

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP AKILLI
MALZEMELERİN HAVA ARAÇLARINDA TİTREŞİM
SÖNÜMLEME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Yasin UZUN

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman

Prof. Dr. Cihan DEMİR

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP AKILLI
MALZEMELERİN HAVA ARAÇLARINDA TİTREŞİM
SÖNÜMLEME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

Yasin UZUN tarafından hazırlanan tez çalışması 03.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Cihan DEMİR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Meral BAYRAKTAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Osman Taha Şen, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Cihan DEMİR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Negatif Poisson Oranına Sahip Akıllı Malzemelerin Hava Araçlarında Titreşim Sönümlenme Performansının Araştırılması” 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.

Yasin UZUN

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Öncelikle kendime inandığım için, hiçbir zaman vazgeçmediğim için, sonuna kadar mücadele ettiğim için kendime teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük emekleri geçen, beni maddi manevi her zaman destekleyen canım annem Fatma UZUN, babam Ramazan UZUN ve Abim Taha UZUN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca kendisinden engin mühendislik bilgileri öğrendiğim, tez sürecimde her zaman beni sabırla dinleyen, destekleyen ve yönlendiren saygı değer tez danışmanım Prof. Dr. Cihan DEMİR hocama teşekkür ederim.

Yüksek lisans hayatım boyunca elinden gelen tüm desteği sağlayan, her daim yanımda olan sevgili Başmühendisim Dođan ÇOK'a teşekkür ederim

Yasin UZUN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Poisson Oranı	1
1.2 Oksetik Yapılar	4
1.2.1 İç İççe Giren Yapılar (Re-entrant).....	7
1.2.2 Kiral Yapılar	8
1.2.3 Dönen Yapılar.....	8
1.3 Oksetik Yapıların Özellikleri	10
1.3.1 Girinti Dayanımı (Indentation Strength).....	10
1.3.2 Eş Eğrilik (Synclasticity).....	10
1.3.3 Kayma Özellikleri.....	11
1.3.4 Dalga İlerlemesi/ Titreşim İletimi.....	11
1.4 Tezin Amacı.....	12
1.5 Hipotez.....	13
2 HELİKOPTER VE TİTREŞİM	14
2.1 Helikopter.....	14
2.2 Titreşim	16
2.3 Titreşim İzolasyonu.....	20
3 TASARIM VE ANALİZ	22
3.1 Malzeme Seçimi.....	22
3.2 2 Boyutlu Tasarım.....	24

3.3	2 Boyutlu Analizler.....	24
3.4	3 Boyutlu Tasarım.....	31
3.5	3 Boyutlu Analizler.....	33
3.5.1	Statik Analiz	36
3.5.2	Serbest Titreşim Analizi	38
3.5.3	Rastlantısal Analiz	41
3.5.4	Harmonik Analiz.....	41
3.6	Parametrik Analizler	42
3.6.1	Ekipman Kütlesi	42
3.6.2	Plaka Kalınlığı	45
3.6.3	Birim Hücre Kesit Alanı.....	47
3.6.4	Yapı Sönümleme Oranı	50
3.6.5	Birim Hücre Sayısı.....	52
3.6.7	T1A1025D125W15 Yapının Diğer Eksenlerdeki Performansı.....	54
4	SONUÇ	61
A	EK İSMİ	64
	KAYNAKÇA	73
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	76

SİMGE LİSTESİ

I_x	Atalet Momenti (X Eksenine Göre)
I_y	Atalet Momenti (Y Eksenine Göre)
I_z	Atalet Momenti (Z Eksenine Göre)
ε	Birim Uzama Oranı
$\varepsilon_{\text{eksenel}}$	Birim Uzama Oranı (Eksen Boyunca)
$\varepsilon_{\text{yanal}}$	Birim Uzama Oranı (Yanal)
ΔL	Boydaki değişim
l	Eğimli Kiriş Uzunluğu
E	Elastisite Modülü
E_1	Elastisite Modülü (1 yönünde)
E_S	Elastisite Modülü (Kullanılan Malzemenin)
r	Frekans Oranı
T	Geçirgenlik
a	Genişlik
σ	Gerilme
H	Girinti Dayanımı
F_T	İletilen Kuvvet
u	Kağıt Düzleminde Kiriş Derinliği
t	Kalınlık
G	Kayma Modülü
F	Kuvvet
m	Kütle
η	Mekanik Kayıp Faktörü
ν	Poisson Oranı
ν_{12}	Poisson Oranı (1-2 düzlemindeki)
ν_{21}	Poisson Oranı (2-1 düzlemindeki)
k	Rijitlik Değeri
K_h	Rijitlik Değeri (Menteşe)
ζ	Sönüm Oranı

x	Şekil değişimi
L	Toplam Boy
b	Yükseklik
F ₀	Zeminden Gelen Kuvvet



KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
FAA	Federal Aviation Administration
FDM	Fused Deposition Modeling
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu (Power Spectral Density)
PLA	Polilaktik Asit
TPU	Termoplastik Poliüretan



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Pozitif poisson oranına sahip 2 boyutlu yapının şekil değişimi [1]	2
Şekil 1.2 Negatif poisson oranına sahip 2 boyutlu yapının şekil değişimi [1]	2
Şekil 1.3 Basitleştirilmiş 2 boyutlu oksetik yapı türleri [1]	3
Şekil 1.4 İki ok kafalı iç içe giren yapı [2]	7
Şekil 1.5 Kiral yapı [2]	8
Şekil 1.6 Kare dönen yapılar [2]	9
Şekil 1.7 Üçgen dönen yapılar [2]	9
Şekil 1.8 Oksetik ve oksetik olmayan yapıların girinti cevapları [2]	10
Şekil 1.9 Eş eğrilik [2]	11
Şekil 2.1 Helikopter bölgeleri [21]	14
Şekil 2.2 Agustawesland aviyonik ekipman yerleşimi [22]	15
Şekil 2.3 Northtop grumann mq-8c fire scout aviyonik ekipman yerleşimi [23] ..	15
Şekil 2.4 Aviyonik ekipman rafı [24], [25]	16
Şekil 2.5 Helikopter titreşim değerleri [26]	17
Şekil 2.6 Helikopter bölgeleri [26]	18
Şekil 2.7 AH-1 titreşim değerleri [26]	20
Şekil 2.8 AM-007 serisi izolatör [27]	21
Şekil 2.9 AM-007 serisi geçirgenlik - frekans ilişkisi [27]	21
Şekil 3.1 İç içe giren üçgen ve iki kafalı ok hücreleri	24
Şekil 3.2 2 kg kütleli yük	25
Şekil 3.3 Standart yer çekim ivmesi	25
Şekil 3.4 Sabit destek	26
Şekil 3.5 Titreşim yanıtları alınan kısım a) harmonik, b) rastlantısal	26
Şekil 3.6 İç içe giren üçgen ok 3. mod şekli	28
Şekil 3.7 İki kafalı ok 3. mod şekli	29
Şekil 3.8 2 boyutlu harmonik analiz ivme değerleri	29
Şekil 3.9 2 boyutlu harmonik analiz izolasyon verimi	30
Şekil 3.10 2 boyutlu rastlantısal analiz PSD ivme değerleri	30
Şekil 3.11 2 boyutlu rastlantısal analiz izolasyon verimi	31

Şekil 3.12 Birim hücre.....	31
Şekil 3.13 Yapı parametreleri.....	32
Şekil 3.14 3 boyutlu yapı ve destek.....	32
Şekil 3.15 1D çizgi elemanlar ve 2D yüzey elemanlardan oluşan model	33
Şekil 3.16 Kütleli nokta.....	34
Şekil 3.17 Sabitlenmiş yüzey.....	34
Şekil 3.18 Standart yer çekimi ivmesi.....	35
Şekil 3.19 5mm ağ yapısı	36
Şekil 3.20 Yapı kuvvet-şekil değişim grafiği	37
Şekil 3.21 1. serbest titreşim şekli	39
Şekil 3.22 2. serbest titreşim şekli	39
Şekil 3.23 3. serbest titreşim şekli	39
Şekil 3.24 4. serbest titreşim şekli	40
Şekil 3.25 5. serbest titreşim şekli	40
Şekil 3.26 6. serbest titreşim şekli	40
Şekil 3.27 Rastlantısal analiz koşulları a) ivme girdisi, b) ivme yanıtı	41
Şekil 3.28 Yapıya etki eden harmonik titreşimler a) ivme girdisi, b) ivme yanıtı	42
Şekil 3.29 Harmonik analiz ekipman ağırlığı değerleri.....	43
Şekil 3.30 Harmonik analiz ekipman ağırlığı izolasyon verimi	43
Şekil 3.31 Rastlantısal analiz ekipman ağırlığı değerleri	44
Şekil 3.32 Rastlantısal analiz ekipman ağırlığı izolasyon verimi.....	44
Şekil 3.33 T1A1025D125W2 10-12 Hz izolasyon verimi	45
Şekil 3.34 Harmonik analiz plaka kalınlığı değerleri	46
Şekil 3.35 Harmonik analiz plaka kalınlığı izolasyon verimi	46
Şekil 3.36 Rastlantısal analiz plaka kalınlığı değerleri.....	47
Şekil 3.37 Rastlantısal analiz plaka kalınlığı izolasyon verimi	47
Şekil 3.38 Harmonik analiz birim kesit değerleri.....	48
Şekil 3.39 Harmonik analiz birim kesit alanı izolasyon verimi	49
Şekil 3.40 Rastlantısal analiz birim kesit değerleri	49
Şekil 3.41 Rastlantısal analiz birim kesit alanı izolasyon verimi	50
Şekil 3.42 Harmonik analiz sönüm oranı değerleri	51
Şekil 3.43 Harmonik analiz sönüm oranı izolasyon verimi.....	51
Şekil 3.44 Rastlantısal analiz sönüm oranı değerleri.....	52
Şekil 3.45 Rastlantısal analiz sönüm oranı izolasyon verimi	52
Şekil 3.46 Harmonik analiz birim hücre değerleri	53

Şekil 3.47 Harmonik analiz birim hücre izolasyon verimi	53
Şekil 3.48 Rastlantısal analiz birim hücre değerleri	54
Şekil 3.49 Rastlantısal analiz birim hücre izolasyon verimi	54
Şekil 3.50 X ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları	55
Şekil 3.51 X ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri	55
Şekil 3.52 Y ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları	56
Şekil 3.53 Y ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri	56
Şekil 3.54 Z ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları.....	57
Şekil 3.55 Z ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri	57
Şekil 3.56 X ekseninde uygulanan rastlantısal ivme sonuçları	58
Şekil 3.57 X ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri	58
Şekil 3.58 Y ekseninde uygulanan rastlantısal ivme Sonuçları.....	59
Şekil 3.59 Y ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri	59
Şekil 3.60 Z ekseninde uygulanan rastlantısal ivme sonuçları.....	60
Şekil 3.61 Z ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri.....	60

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Oksetik yapılar ve sınıflandırmalar [2]	4
Tablo 1.1 Oksetik yapılar ve sınıflandırmalar [2] (devamı)	5
Tablo 2.1 Harmonik frekans değerleri [27]	18
Tablo 2.2 Harmonik frekans maksimum ivme formülleri [27]	19
Tablo 2.3 Harmonik frekans ivme değerleri [27]	19
Tablo 3.1 ABS filament mekanik özellikleri [28]	22
Tablo 3.2 PLA filament mekanik özellikleri [29]	23
Tablo 3.3 TPU 95A filament mekanik özellikleri [30]	23
Tablo 3.4 Rubber tpu (ester aromatic,shore A85/D35) mekanik özellikleri [31]	23
Tablo 3.5 İç içe giren üçgen yapı doğal frekans ve etkili kütle oranı	27
Tablo 3.6 İki kafalı ok yapı doğal frekans ve etkili kütle oranı	28
Tablo 3.7 Parametreler ve değerleri	33
Tablo 3.8 Ağ boyutları – frekans ilişkisi	35
Tablo 3.9 Ağ boyutları – frekans yakınsamaları	35
Tablo 3.10 Ağ yapısı kalitesi	36
Tablo 3.11 Yapı rijitlik değerleri	37
Tablo 3.12 Etkili kütle oranı	38

NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP AKILLI MALZEMELERİN HAVA ARAÇLARINDA TİTREŞİM SÖNÜMLEME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Yasin UZUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Kontrol Programı
Yüksek Lisans

Danışman: Prof. Dr. Cihan DEMİR

Bu çalışmada, Negatif Poisson Oranına sahip akıllı malzemelerin helikopterlerde izolatör olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler son zamanlarda yaygınlaşan, düşük frekanslarda pasif sönüm yapabilen 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak tasarlanabilen yapılardır. Helikopterde oluşan titreşimin ekipmana iletilirken sönümlenerek ekipmanın ömrü veya bakım süresi uzatılarak maliyetler azaltılabilir. Negatif Poisson oranına sahip düşük kütleli izolatörler geliştirilerek düşük frekanslarda kullanılan aktif sönümleyiciler yerine kullanılması durumunda helikopterlerde ağırlık azaltılabilir. Negatif Poisson Oranına sahip tasarım TPU malzemesinden, helikopterin gövdesinde bulunan bir ekipmanın altına izolatör olarak tasarlanmıştır. MIL STD 810H standardına göre AH-1 helikopterinde meydana gelen rastlantısal ve harmonik titreşim seviyeleri belirlenerek yapıya uygulanmıştır. İki boyutlu üçgen yapı ve ok kafalı birim hücre 2 boyutlu olarak analiz edilmiştir. Üçgen yapı harmonik analizde 12 - 40 Hz aralığında %75 izolasyon verimi, rastlantısal analizde 12 – 500 Hz aralığında tüm titreşimleri izole ederek ok kafalı yapıdan daha iyi performans göstermiştir. En iyi

performansa sahip yapı 3 boyutlu modellenmiştir. 3 boyutlu yapının ekipman kütlesine, plaka kalınlığına, kesit alanına, sönümlenme oranına, ve birim hücre sayısı bağılı titreşim sönümlenme performansı Ansys programında analiz edilmiştir. Her tasarıma, verileri kolayca irdeleyebilmek amacıyla farklı tasarım numaraları atanmıştır. Ekipman kütlesi artıkça yapının izolasyon verimi artmış ve daha düşük frekanslarda sönüm elde edilmiştir. Plaka kalınlığı artıkça sönüm yapılan frekans aralığı azalmıştır. Kesit alanı artıkça izolasyon verimi azalmıştır. Sönümlenme oranı artıkça izolasyon verimi de artmıştır. Birim hücre sayısı artıkça sönüm yapılan frekans genişliği azalmıştır. En iyi performansı gösteren T1A1025D125W15 numaralı tasarım harmonik analizde 8 - 40 Hz aralığında %27, rastlantısal analizde ise %85 izolasyon verimine sahip olduğu elde edilmiştir. Titreşim uygulanan eksen dışındaki yönlerde harmonik analizde %60 ve üzerinde rastlantısal analizde tüm %99'a yakın izolasyon verimleri elde edilmiştir. İlerleyen araştırmalarda, helikopterin farklı bölgelerindeki sönüm performansları, farklı tasarımlarının üretilebilirliği ve tasarımların deneysel olarak doğrulanması üzerine çalışma yapılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Negatif poisson oranı, izolatör, helikopter, harmonik analiz, rastlantısal Analiz

INVESTIGATING THE VIBRATION PERFORMANCE OF SMART MATERIALS WITH NEGATIVE POISSON RATIO IN AIRCRAFT

Yasin UZUN

Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Cihan DEMİR

In this study, the usability of smart materials with negative Poisson's ratio as isolator in helicopters is investigated. Negative Poisson's ratio materials are recently widespread structures that can be designed as 2D or 3D structures that can passively damp at low frequencies. By damping the helicopter vibration as it is transmitted to the equipment, the life or maintenance time of the equipment can be extended and costs can be reduced. Low mass isolators with negative Poisson's ratio can be developed and used instead of active dampers used at low frequencies to reduce the weight of helicopters. The Negative Poisson's Ratio design is made of TPU material and is designed as an insulator under a piece of equipment in the helicopter fuselage. According to MIL STD 810H standard, the random and harmonic vibration levels occurring in the AH-1 helicopter were determined and applied to the structure. The two-dimensional triangular structure and the unit cell with arrowhead were analyzed in 2D. The triangular structure showed 75% isolation efficiency in the range of 12 - 40 Hz in harmonic analysis and outperformed the arrowhead structure by isolating all vibrations in the range of 12 - 500 Hz in random analysis. The structure with the best performance was modeled in 3D. The vibration damping performance of the 3D structure depending on the equipment mass, plate

thickness, cross-sectional area, damping ratio, and unit cell number was analyzed in Ansys. Each design was assigned a different design number in order to easily analyze the data. As the equipment mass increased, the isolation efficiency of the structure increased and damping was obtained at lower frequencies. As the plate thickness increased, the damped frequency range decreased. As the cross-sectional area increased, the isolation efficiency decreased. As the damping ratio increased, the isolation efficiency increased. As the number of unit cells increased, the damped frequency width decreased. The best performing design T1A1025D125W15 was found to have 27% isolation efficiency in the range of 8 - 40 Hz in harmonic analysis and 85% in random analysis. In the directions other than the vibration axis, isolation efficiencies of 60% and above in harmonic analysis and close to 99% in random analysis were obtained. In future research, it is recommended to study the damping performances in different regions of the helicopter, the manufacturability of different designs and the experimental verification of the designs.

Keywords: Negative poisson ratio, isolator, helicopter, harmonic analysis, random analysis

1 GİRİŞ

Bu bölümde genel kavramlar, oksetik yapı türleri, oksetik yapıların özellikleri, literatürde yapılan çalışmalar, tezin amacı ve literatüre katkıları anlatılmıştır.

1.1 Poisson Oranı

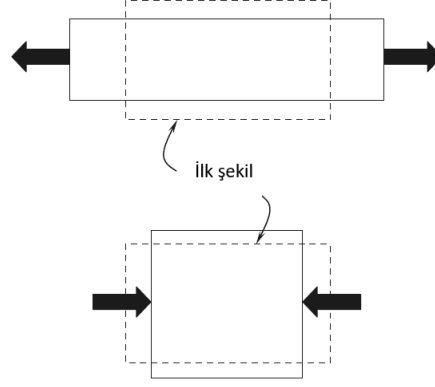
Bir malzemeye kuvvet uygulandığında malzemede şekil değişimi meydana gelir. Malzeme bir yönde uzarken diğer yönde kısalır. Malzemenin bir eksendeki şekil değişim miktarının ilk haline oranına birim uzama denir. Birim uzama (1.1)'den hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.1)$$

Malzemenin yük altındaki şekil değiştirme oranına elastisite modülü denir. Elastisite modülü (1.2)'den hesaplanır. Elastisite modülü yapının rijitliğidir. Elastisite modülü düşük ise yapının rijitliği de düşüktür ve daha fazla şekil değişimi meydana gelir. Bu formül elastik bölgede geçerlidir. Elastik bölge, yük kaldırıldığında yapının ilk haline döndüğü kadar olan kısımdır.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.2)$$

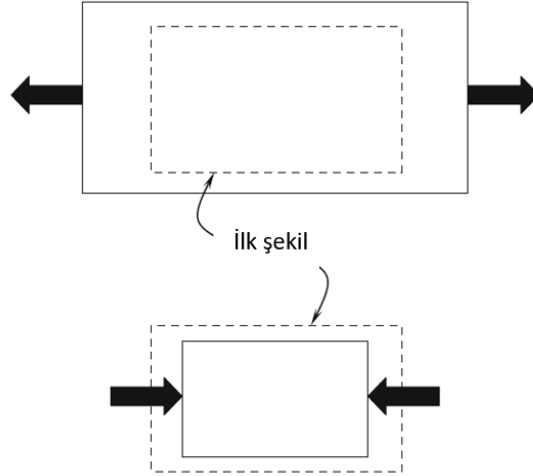
Doğadaki malzemelere genel olarak pozitif poisson oranına sahiptir. Eksenel yönde basma kuvveti uygulandığında enine genişleme, çekme kuvveti uygulandığında eninde kısıalma gözlemlenir (Şekil 1.1). Bu iki düzlemdeki uzama birbiriyle zıt yönlüdür. Bu iki uzamanın oranı poisson oranı olarak tanımlanır. Poisson oranı (1.3)'ten hesaplanır.



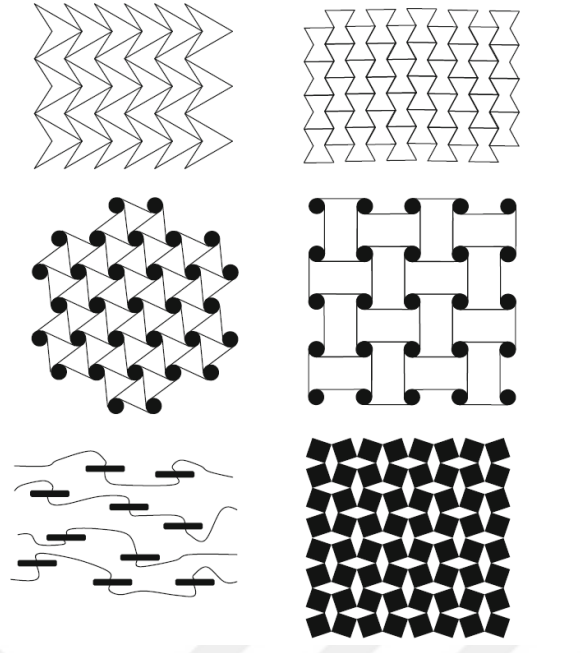
Şekil 1.1 Pozitif poisson oranına sahip 2 boyutlu yapının şekil değişimi [1]

$$\nu = -\frac{\epsilon_{yanal}}{\epsilon_{eksenel}} \quad (1.3)$$

Oksetik (auxetic) malzemeler negatif poisson oranına sahip katılardır. Bu malzemeler aksenal basma kuvvetine maruz kaldıklarında enine de kısalmaya veya aksenal çekme kuvvetine maruz kaldıklarında enine uzama gösterirler (Şekil 1.2). Basitleştirilmiş iki boyutlu oksetik yapı türleri Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Oksetik yapılar tasarıma göre öteleme veya dönme hareketi yapabilirler. [1]



Şekil 1.2 Negatif poisson oranına sahip 2 boyutlu yapının şekil değişimi [1]



Şekil 1.3 Basitleştirilmiş 2 boyutlu oksetik yapı türleri [1]

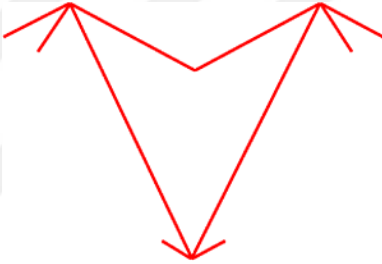
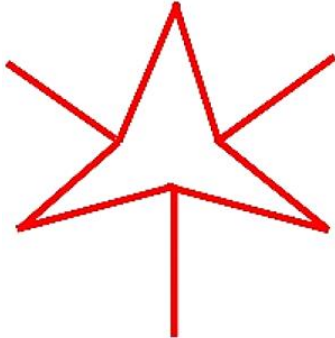
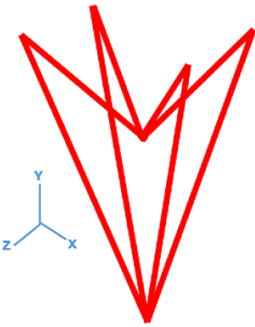
Poisson oranının belirli değerleri için malzemeler farklı özellik gösterirler. Teoride poisson oranı 1 ve -1 arasında değişir. Poisson oranı 1 ise 2 boyutlu yapılarda alanın korunması anlamına gelir. Yapının eksen boyunca uzamasına karşılık eninde aynı miktarda kısılma olur. Bu durum sadece teoride mümkündür. Poisson oranı 0,5 ise hacmin korunması; 0 ise kesit alanın korunması; -0,5 ise elastik modül ve kayma modülünün eşit olduğu -1 ise şeklin korunduğu anlamına gelir [1]

1.2 Oksetik Yapılar

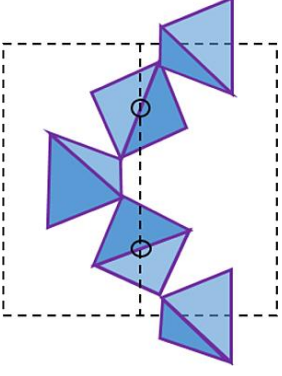
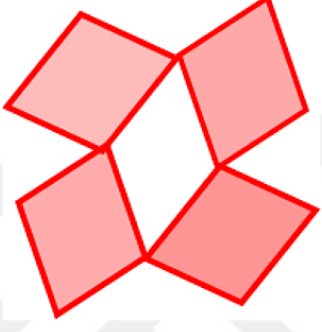
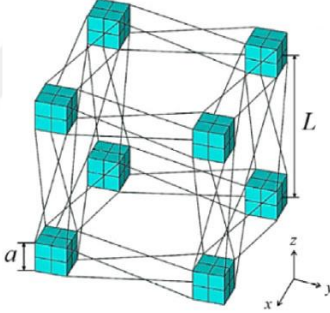
Negatif poisson oranı anlamına gelen oksetik kelimesi 1991 yılında Evans tarafından kullanılmıştır. Bu alandaki ilk çalışmalar (1848) Saint-Venant'ın Cauchy denklemini yeniden yorumlayarak anizotropik malzemelerde poisson oranının negatif veya $\frac{1}{2}$ 'den büyük olabileceği önerisine dayanmaktadır [1].

Oksetik yapılar, birbirini tekrar eden birim hücrelerden oluşmaktadır. Birim hücreler 2 boyutlu veya 3 boyutlu olabilir. Oksetik yapı ve sınıflandırmaları Tablo 1.1'de gösterilmiştir. Hücreler genellikle çubuklardan oluşmakta ve birbirlerine esnek düğüm noktaları ile bağlanmıştır. Yapının hareketi, çubukların yük altında hareketi sonucunda düğüm noktaları yer değiştirmesi sonucu meydana dayanmaktadır.

Tablo 1.1 Oksetik yapılar ve sınıflandırmalar [2]

2 Boyutlu İç İçe Giren Üçgenler	
2 Boyutlu İç İçe Giren Yıldız	
3 Boyutlu İç İçe Giren Üçgenler	

Tablo 1.1 Oksetik yapılar ve sınıflandırmalar [2] (devamı)

Dönen Dört Yüzlü	
Dönen Eşkenar Dörtgen	
3 Boyutlu Kiral	

Oksetik malzemeler üzerine çalışmalar 2000 yılından sonra artmış ve son yıllarda gittikçe hız kazanmaktadır. Bu alana olana ilginin artmasının nedenleri hücrelerin tasarım parametrelerini değiştirerek farklı rijitliğe ve elastisite modülüne sahip tasarımlar ortaya konulabilmesidir. Ayrıca bu alanda çalışmayı kolaylaştıran teknolojik gelişmelerde vardır. Bu teknolojik gelişmeler 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşması, güçlü bilgisayarların karmaşık analizleri çözebilmesi ve makine öğrenmesidir. 3 boyutlu yazıcılar, karmaşık ve geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor malzemelerin üretilebilmesini, güçlü bilgisayarlar, koşulan analizlerin bilgisayarlara girilerek model-sonuç ilişkilerinin makine öğrenmesi yöntemiyle öğrenilip istenilen çıktılara sahip model tasarlanmasına imkân sunmuştur.

Son yıllarda literatürde var olan birim hücrelerin tasarımlarında ufak değişiklikler yapılarak bu değişikliklerin mekanik özelliklerle ilişkisi incelenmiştir. Bu değişiklikler birim hücrenin düğüm sayısını artırmak [3], birim hücreleri eş eksenli olarak iç içe girmesi [4], düz çubukların yerine eğri çubukların kullanılması [5] ve birim hücrede bulunan düğüm noktasının büyütülüp içinin boşaltılmasıdır [6]. Aynı zamanda tamamen yeni birim hücre tasarımları ve bu hücrelerin tasarım parametrelerinin mekanik özellikleri ile ilişkisi incelenmiştir [7], [8], [9], [10].

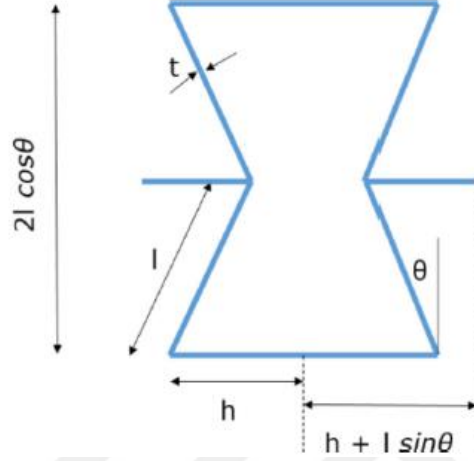
Oksetik yapılarda bulunan birim hücrelerin tasarım parametreleri yapının özelliklerini önemli miktarda etkilemektedir. Farklı tür yapılarda bulunan aynı parametre değerleri farklı özellik göstermektedir. Birim hücrelerin simetrikliğe [11], açığa [3], [7], [10], [12], [13], duvar kalınlığına [10], [12], [14], [15], [16], çubukların uzunluklarına [3] çubuk boyut oranlarına [6], [17] bağlı mekanik özellikleri değişmektedir. İç içe giren yapılarda asimetri arttıkça yapının kontak teması artarak yanal burkulması ve basma altındaki efektif elastik modülü azalır ve özgül enerji sönümleme kapasitesi artar [11]. Çubukların açısının belirli bir değere (75 dereceye) kadar artırmak yapının yük taşıma kapasite önemli miktarda artırırken belirli bir değerden (75 dereceye) sonra önemli bir artış gözlenmemiştir [12]. Çubukların açısı azaldıkça yük homojen olarak dağılmaktadır [12]. Duvar kalınlığı hücrenin merkezinden dışarıya doğru arttıkça yapının yük taşıma ve enerji sönümleme özellikleri iyileşmektedir [12]. Duvar kalınlığının artması yapının poisson oranını azaltırken enerji sönümleme kapasitesini artırmaktadır [10].

Birim hücrelerin şekillerini, kalınlıklarını, uzunluklarını ve açılarını değiştirerek yapının poisson oranı ve elastisite modülü değiştirilebilmektedir. Oksetik olmayan malzemeler için bu değerler sabittir. Günümüzde 3 boyutlu yazıcıların yaygınlaşmasıyla oksetik yapılar kolayca üretilebilir hale gelmiş ve birçok insanın ilgisini çekmiştir.

Oksetik yapılar 3 sınıfa ayrılabilir. Birbiri içine giren (Re-entrant), kiral (chiral) ve dönen birimler (rotating units). Oksetik yapılarda yapı parametreleri ve tasarımlarını değiştirerek farklı poisson oranına ve elastik modülüne sahip malzemeler tasarlanabilir.

1.2.1 İç İçe Giren Yapılar (Re-entrant)

İç içe giren yapılar da herhangi bir yönde yük uygulandığında, çapraz duran kirişler, diğer yönlerde oksetik etkiye neden olur. İç içe giren yapıya örnek şekiller iki ok kafalı şekiller ve yıldızlı şekilli yapılar örnek verilebilir. İki ok kafalı şeklin parametreleri (Şekil 1.4) ve yükleme yönündeki poisson oranı ve elastisite modülü formülleri (1.4), (1.5), ve (1.6) eşitliklerinden hesaplanır [2].



Şekil 1.4 İki ok kafalı iç içe giren yapı [2]

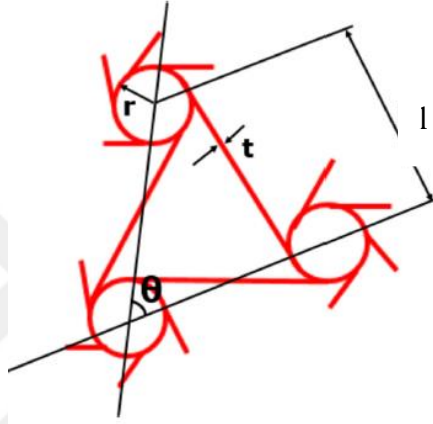
$$\nu_{12} = \frac{\sin \theta (h/l + \sin \theta)}{(\cos \theta)^2} \quad (1.4)$$

$$E_1 = k \frac{(h/l + \sin \theta)}{u (\cos \theta)^3} \quad (1.5)$$

$$k = E_s u \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (1.6)$$

1.2.2 Kiral Yapılar

Kiral üst üste binmeyen anlamına gelmektedir. Kiral yapılar simetriktir ve rijit halkalara teğet olarak bağlanmış bağlardan oluşur (Şekil 1.5). Yapıya yük geldiğinde rijit halkalar döner ve bağların rijit halkalara sarılması veya açılması meydana gelir ve oksetik hareket gerçekleşir. Kiral yapıların poisson oranları -1 civarındadır. Yapı simetrik olduğu için elastisite modülü ve poisson oranı tüm yönlerde aynıdır [2]. Kiral yapının poisson oranı ve elastisite değerleri (1.7) ve (1.8) denklemlerinden hesaplanır.



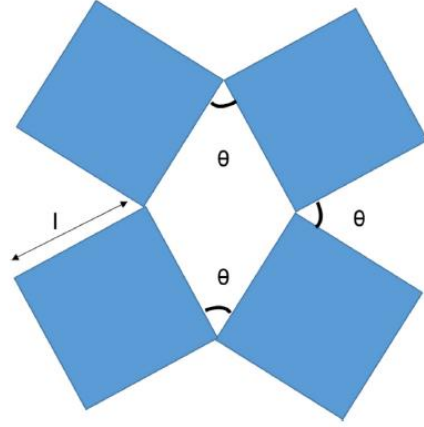
Şekil 1.5 Kiral yapı [2]

$$E = E_s \sqrt{3} \frac{t^3 l^3}{l^3 r^2} \quad (1.7)$$

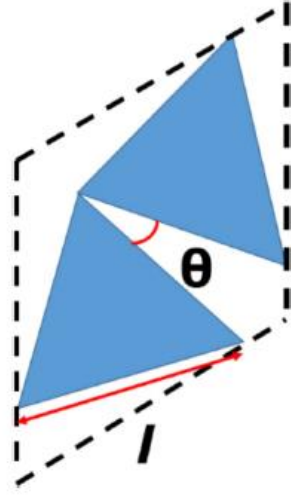
$$\nu_{12} = \nu_{21} = -1 \quad (1.8)$$

1.2.3 Dönen Yapılar

Bu yapılarda oksetik özellik, birbirlerine mafsalla bağlanmış rijit poligonların dönmesinden elde edilir. Poligonlar, kare, dikdörtgen, üçgen vb. yapılar olabilir (Şekil 1.6, 1.7). Örnek olarak kare yapılar incelenmiştir. Bu yapılarda poligon deforme olmaz varsayımıyla yapının poisson oranları her yönde aynıdır. Yapının elastisite modül formülü aşağıda verilmiştir. Yapıda kayma olmayacağı varsayılmıştır [2]. Dönen yapının poisson oranı ve elastisite değerleri (1.9), (1.10) ve (1.11) denklemlerinden hesaplanır.



Şekil 1.6 Kare dönen yapılar [2]



Şekil 1.7 Üçgen dönen yapılar [2]

$$E_1 = E_2 = K_h \frac{8}{l^2} \frac{1}{(1 - \sin \theta)} \quad (1.9)$$

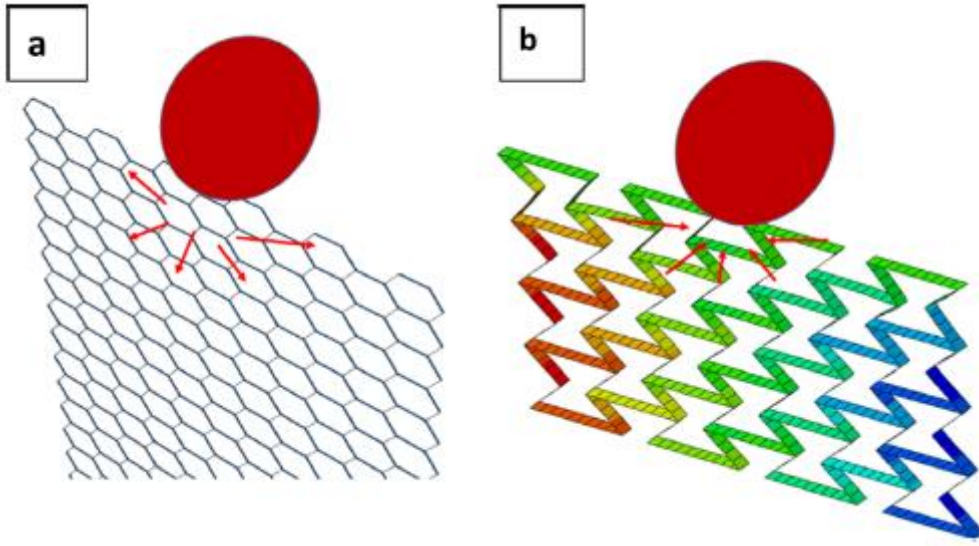
$$\nu_{12} = \nu_{21} = -1 \quad (1.10)$$

$$E_1 = E_2 = K_h \frac{4\sqrt{3}}{l^2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \theta)]} \quad (1.11)$$

1.3 Oksetik Yapıların Özellikleri

1.3.1 Girinti Dayanımı (Indentation Strength)

Oksetik olmayan yapılarda, darbe anında yapı darbe bölgesinden diğer bölgelere doğru akar. Darbenin olduğu bölgede yoğunluk azalması meydana gelir ve yapının girinti dayanımı etkilenir. Oksetik yapılar darbe anında darbenin yakın noktalarına doğru çekilir (Şekil 1.8). Girinti dayanımı (1.12)'den hesaplanır [2].



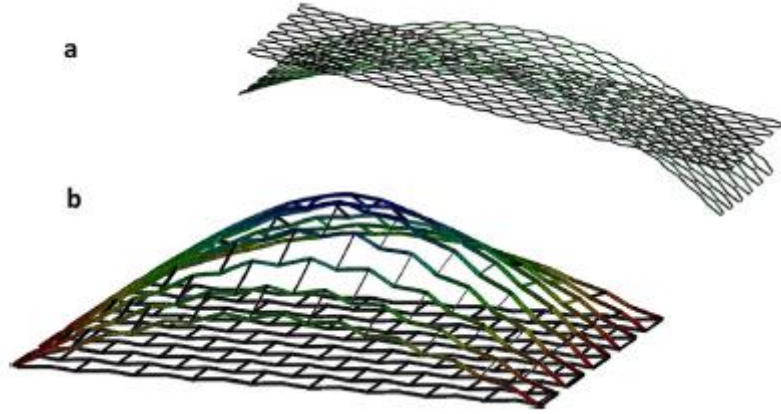
Şekil 1.8 Oksetik ve oksetik olmayan yapıların girinti cevapları [2]

$$H \propto \left[\frac{E}{1 - \nu^2} \right]^Y \quad (1.12)$$

Y, basınç dağılımının eşit olduğu durumda 1 olur. Sabit bir elastise modülü için negatif poisson oranı ile darbe dayanımı artar. Oksetik yapılarda poisson oranı -1'e yaklaştıkça darbe dayanımı sonsuza yakınsar.

1.3.2 Eş Eğrilik (Synclasticity)

Oksetik olmayan yapılar eğilmeye maruz kaldığında yapı genişliği boyunca eğilmeye uğrar. Oksetik yapılar eğilmeye maruz kaldığında tüm yapı eğilmez. Kuvvete maruz kalan kısımlar eğilir ve malzeme yapısı sayesinde eğim gittikçe ortadan kaybolur. Bu özellik eş eğrilik olarak adlandırılır (Şekil 1.9). Oksetik yapıları eş eğrilik özelliğinden dolayı spor ve sağlık alanlarında kullanılabilir.



Şekil 1.9 Eş eğrilik [2]

1.3.3 Kayma Özellikleri

Kayma modülü (1.13)'ten hesaplanır. Oksetik yapılarda formülün paydası sıfıra yaklaştıkça kayma modülü sonsuza yakınsar. Bu durum oksetik yapıların kayma dayanımı oksetik olmayan yapılardan daha iyi olması anlamına gelmektedir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.13)$$

1.3.4 Dalga İlerlemesi/ Titreşim İletimi

Oksetik yapıların birbirlerini tekrar eden yapıları, titreşim dalgalarının azaltılmasını ve yönlendirilmesini sağlar. Örgülerin periyodikliği ile hangi dalga frekansların iletileceği (pass band) hangi dalga frekansların iletilmeyeceği (band gap) ayarlanır. Yapının parametrelerini değiştirilerek farklı frekansların iletilmesi engellenir. Bu sayede yapılar istenilen frekanslarda sönüm özelliğine sahip olur. Veya aynı yapıda farklı parametrelere sahip geometriler kullanılarak ayarlanmış frekans değerlerinde filtre elde edilebilir. Yapının anizotropik olması dalgaların yönlendirilmesini sağlar. [2]

Yıldız şeklindeki oksetik yapılarda, frekansların iletip iletilmeyeceği yapının tasarım parametrelerine bağlıdır. Frekansın iletilmesini engellemede etkili olan parametreler, uzuvların uzunluğu, kalınlığı ve arasındaki açıdır [18].

Kiral yapıda, kiral açısının dalganın ilerleme yönü üzerindeki etkisini büyüktür. Açının artmasıyla dalganın ilerleme yönü, saat yönünün tersinde döner ve ilerleme hızı azalır. Elastik dalganın ilk modu sadece belirli yönde yayılır [13].

Farklı şekil ve parametrelerdeki oksetik hücrelerin frekansı iletmediği değerleri araştırılmış ve yapıların ilk 20 frekansı incelenmiştir. Çalışmada genetik kod kullanılarak 3. ve 4 frekans değerleri arasında maksimum frekans iletimini engelleyen bant genişliğine sahip yapı ve parametreler kümesi oluşturulmuştur. Yapıların modellenmesinde 1D problemlerde kullanılan Floquet's teoreminin genelleştirilmiş hali olan Bloch teoremi kullanılmıştır. Çalışma sonunda en yüksek frekans iletimini engelleyen bant genişliğine değeri 3.8 kHz olarak yıldız yapıda 5kHz civarında elde edilmiştir. Yapı parametreleri ve frekans iletimini engelleyen bant genişliğine arasında bir ilişki olmadığı ortaya çıkmıştır [19].

TPU'dan 3d basılan kiral yapının içine bakır rezonans birimi eklenerek düşük frekanslarda frekans iletimini engelleyen bant genişliğine elde edilmiştir. Yapının kalınlığına göre frekans iletimini engelleyen bant genişliğine 100-450 Hz arasında değişmektedir [20].

Oksetik yapılar negatif poisson oranı sayesinde girinti dayanımı, eş eğrilik, kayma dayanımı ve belirli frekansları sönmüleme özellikleri ile diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Oksetik yapılar üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Literatürde olan çalışmalar çoğunlukla yeni oksetik yapılarının tasarımı ve oksetik yapı parametrelerinin frekans, özgül enerji kapasitesi, elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik özelliklerinin deneysel ve analiz yöntemleri ile incelenmesi üzerinedir. Üretim kolaylığı açısından çoğunlukla iki boyutlu şekiller üzerinde çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışma ile üç boyutlu oksetik yapıların hava araçlarında izolatör olarak kullanılması ve performans analizleri ile literatüre farklı bir kullanım amacı eklenmiştir.

1.4 Tezin Amacı

Bu çalışmada, negatif poisson oranına sahip birim hücrelerden oluşan yapıların ve parametrelerinin havacılıkta kullanılan MIL-STD-810H standardı referans alınarak AH-1 helikopterin aviyonik ekipmanlarında meydana gelen harmonik ve rastlantısal titreşim izolasyon performansı sonlu elemanlar yöntemiyle hava araçlarındaki titreşimlerin pasif, helikopterin ağırlığını artırmadan ve maliyet etkin olacak şekilde izolasyonu amaçlanmıştır.

1.5 Hipotez

Helikopterlerin farklı bölgelerinde helikopter parametrelerine göre farklı harmonik ve rastlantısal titreşimler oluşmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle yeni özelliklere sahip akıllı malzemeler artmaktadır. Bu çalışma kapsamında negatif poisson oranına sahip akıllı hücrelerden oluşan yapıların izolatör olarak kullanarak ekipmanlara iletilen titreşimlerin azaltılması öngörülmüştür.

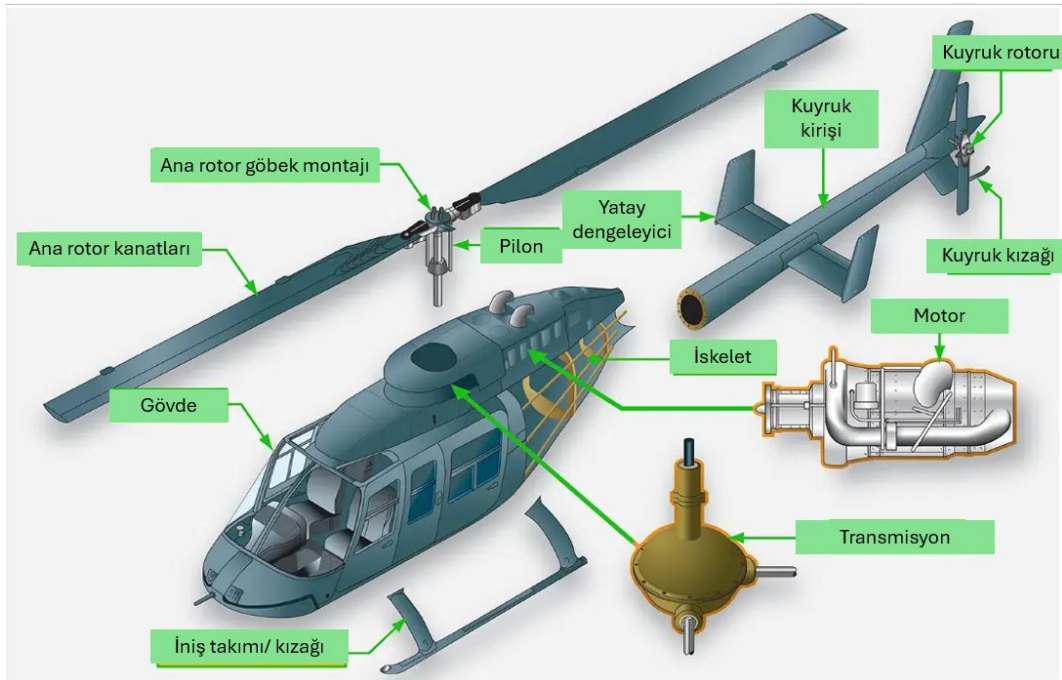


2 HELİKOPTER VE TİTREŞİM

Bu bölümde helikopter ve titreşim hakkında genel bilgiler verilmiştir. Aviyonik ekipmanların konumları ve AH-1 helikopterinde oluşan titreşim değerleri hesaplanmıştır.

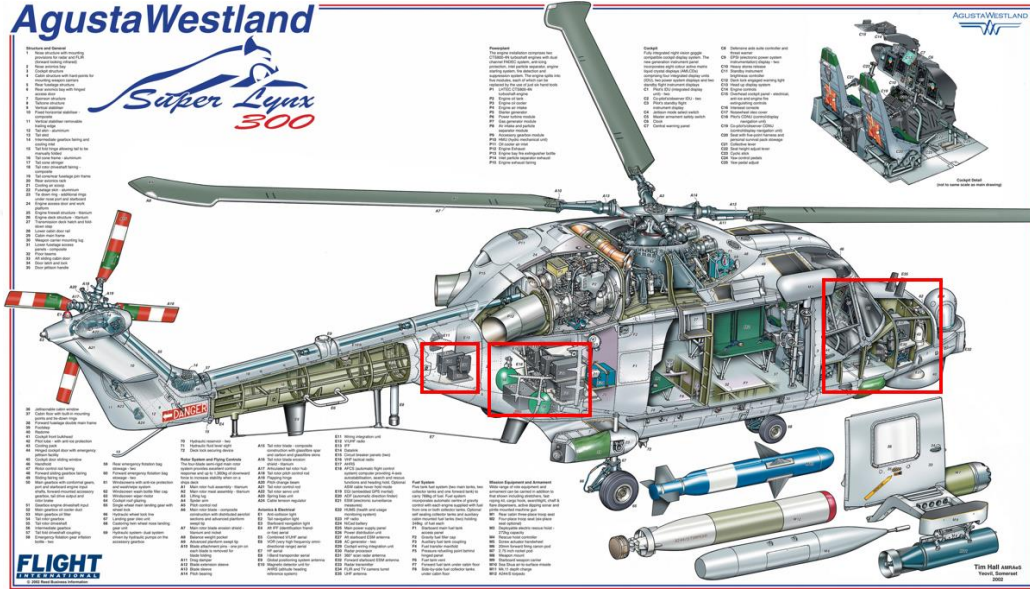
2.1 Helikopter

Helikopter, birden çok sistemden ve bölgeden oluşan karmaşık hava aracıdır (Şekil 2.1). FAA tarafından hava araçları sistem bazlı olarak sınıflandırılmıştır. Hava araçlarında sistemlerin/ekipmanların yerleşimi, sistemlerin bulunduğu bölgelerin özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilir. Her bölge farklı özelliklere sahiptir. İlgili bölgeye yerleştirilecek sistemler/ekipmanlar bu bölgede düzgün ve emniyetli şekilde çalışabilmelidir.

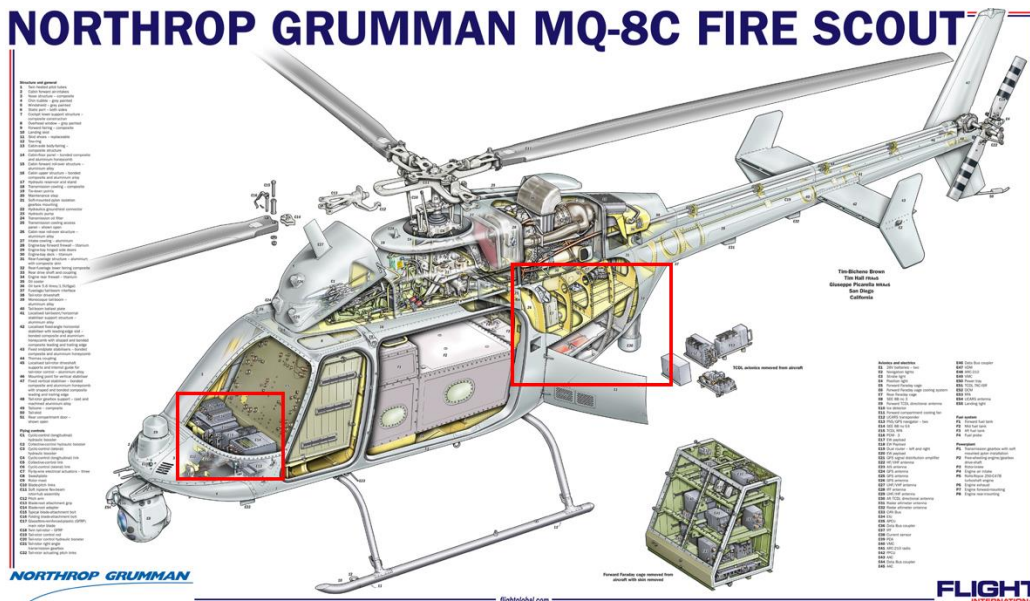


Şekil 2.1 Helikopter bölgeleri [21]

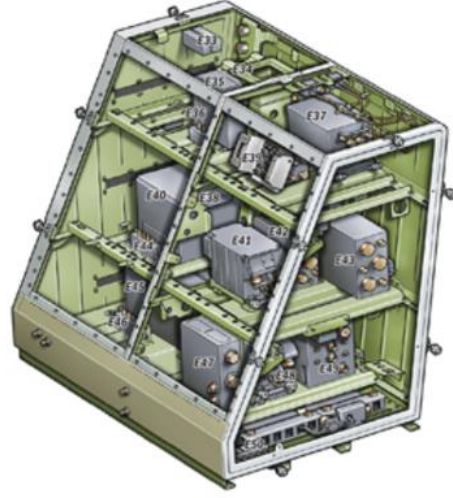
Helikopterlerde bulunan aviyonik ekipmanların çoğu genellikle kokpitin önünde (forward avionic bay) ve gövdenin bitip kuyruğun başladığı (aft avionic bay) kısımda raflarda bulunmaktadır. AgustaWestland firmasının Super Lynx ve Northrop Grumman firmasının MQ-8C Fire Scout helikopterlerinin aviyonik ekipman yerleşim bölgeleri Şekil 2.2, Şekil 2.3 kırmızı kutular içerisinde ve Şekil 2.4'te aviyonik ekipman rafı gösterilmiştir. Ekipmanlar hava aracına takılmadan önce titreşim testine girerek başarıyla geçmesi beklenmektedir.



Şekil 2.2 Agustawesland aviyonik ekipman yerleşimi [22]



Şekil 2.3 Northtop grumann mq-8c fire scout aviyonik ekipman yerleşimi [23]



Şekil 2.4 Aviyonik ekipman rafı [24], [25]

2.2 Titreşim

Titreşim testi, ekipman ömrü boyunca titreşime maruz kalırken fonksiyonunu yerine getirme ve bu titreşime dayanabileceğini göstermek amacıyla yapılır. Titreşim testinde ekipmanın ömrü boyunca maruz kalacağı titreşim uygulanır. Bir ekipman/malzeme ürün döngüsünün her evresinde titreşime maruz kalır. Bu evreler imalat, taşıma, operasyonel ve destek evreleridir. Ekipman/malzeme imalat aşamasında freze, torna vb. tezgahlardan taşıma sırasında yollardan, araçlardan operasyonel zarfta motor, dişli vb. çalıştığı koşullardan titreşime maruz kalmaktadır.

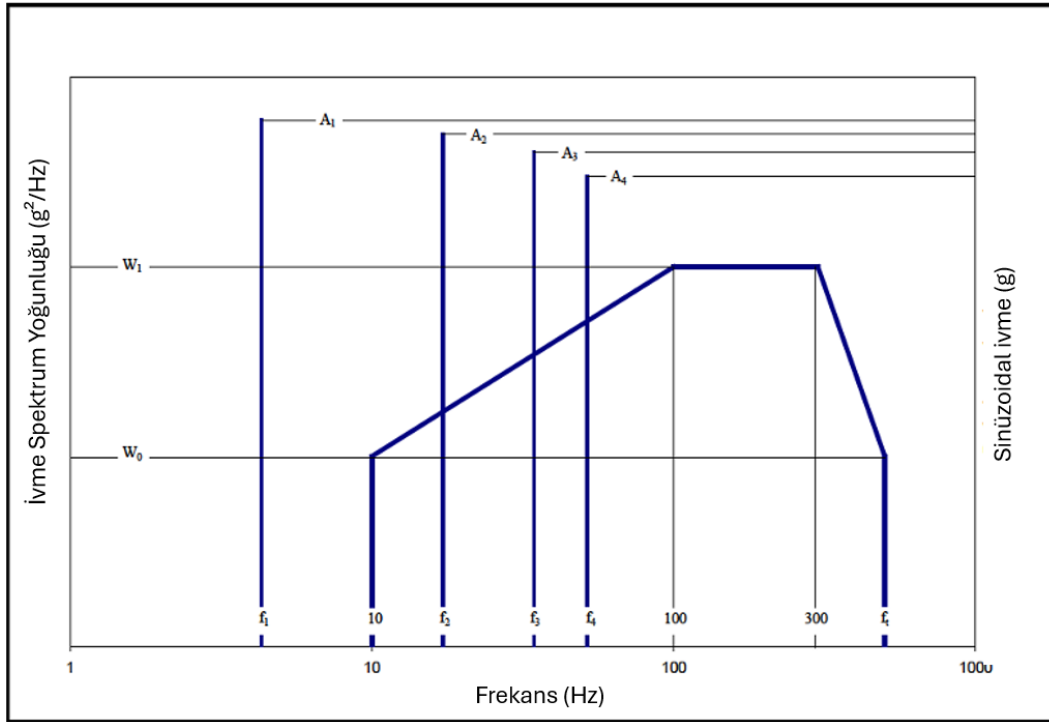
Titreşim, malzemelerin içinde kusurlara sebep olur. Oluşan kusurlar malzemenin aşınmasına, yorulmalara, çatlakların oluşması ve çatlakların ilerlemesine neden olur. Bir yapının/ekipmanın titreşime maruz kaldığını bağlayıcıların gevşemesi, elektriksel kesintiler, deforme olmuş contalar, çatlak oluşmuş veya kırılmış yapılar, yapısal/mekanik düzensizliklerden anlaşılabilir.

Hava araçlarının tasarımında, ekipmanların çalıştığı ortamda görevleri yerine getirebilmesi kritiktir. Bu ekipmanların havada çalışabileceği, hava aracına takılmadan önce yerde simüle edilerek sağlanır. MIL-STD-810H ve DO-160 standartları bu çevresel koşullar hakkında referans değerler vermektedir. MIL-

STD-810H ve DO-160 arasındaki temel fark, 810H ürünün tüm yaşam döngüsü sürecini ele alırken DO-160 sadece operasyonel süreci ele almaktadır.

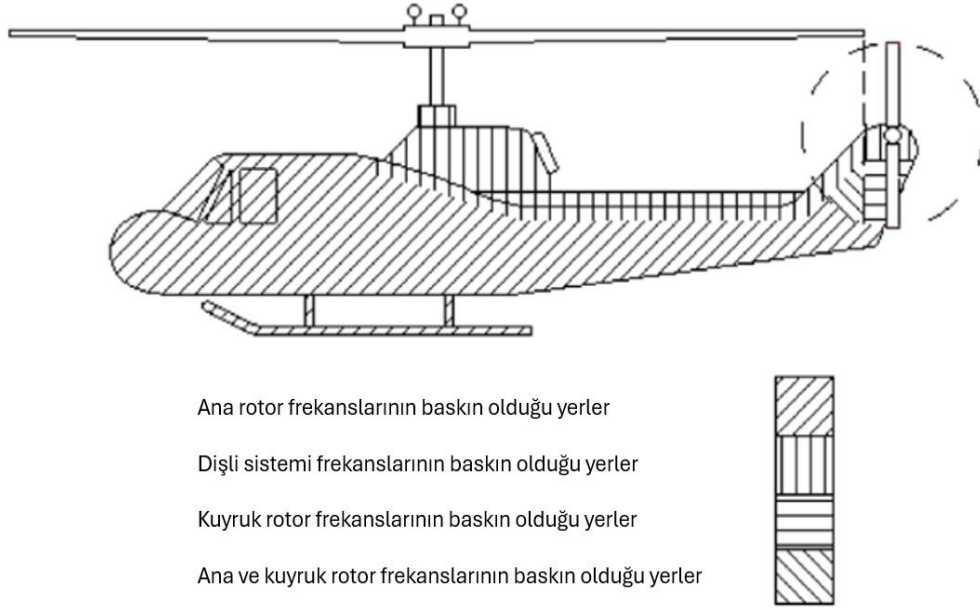
Helikopterlerin operasyon sürecinde rastlantısal titreşimler ve sinüzoidal titreşimler meydana gelmektedir. Rastlantısal titreşimler, ekipmanın karşılaşılabileceği istatistiksel değerlerdir. Rastlantısal analizde belirli bir frekans aralığında RMS ivme değerleri uygulanır. Alt ve üst frekans değerleri ekipmanın etkili bir şekilde uyarılabileceği değerlerdir. Sinüzoidal titreşim belirli bir düzen içinde oluşan titreşimdir. Helikopterlerde sinüzoidal titreşim nedeni ana rotor, kuyruk rotoru güç iletim ve benzeridir [26].

Şekil 2.5'te helikopterlerin operasyonel kullanımında referans olarak verilen grafik gösterilmiştir. A1, A2, A3 ve A4 belirli frekanslarda üretilen harmonik ivme değerleri sağ tarafta gösterilmektedir. W_0 ve W_1 rastlantısal ivme spektrum yoğunluğu değerleri sol tarafta gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Helikopter titreşim değerleri [26]

Şekil 2.6'de helikopter bölgelerindeki baskın titreşim kaynakları gösterilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan ekipman, gövdede konumlandırıldığı için ana rotor frekanslarından etkilenmektedir.



Şekil 2.6 Helikopter bölgeleri [26]

Çalışma, AH-1 helikopteri referans alınarak yapılmıştır. AH-1 helikopterin ana rotor kanat sayısı iki ve dönüş hızı saniyede 5.4 devirdir [26]. Helikopterin harmonik frekansları Tablo 2.1’den hesaplanmaktadır. Dört frekans değeri hesaplanmaktadır. $1P$ ana rotor dönüş hızı ve n ise ana rotor kanat sayısıdır. f_1 temel frekans, f_2 kanat geçiş frekansı, f_3 ikinci harmonik değeri ve f_4 üçüncü harmonik frekansıdır. Harmonik frekans değerleri sırasıyla 5.4 Hz, 10.8 Hz, 21.6 Hz ve 32.4 Hz olarak bulunmuştur.

Tablo 2.1 Harmonik frekans değerleri [26]

Harmonik Frekans	Harmonik Frekans Formülü	Harmonik Frekans Değeri
f_1	$1P$	5.4
f_2	$n \times 1P$	10.8
f_3	$2 \times n \times 1P$	21.6
f_4	$3 \times n \times 1P$	32.4

Harmonik frekans değerlerinde meydana gelen ivmeler Tablo 2.2’deki formülden hesaplanmaktadır. Tablo 2.1’de hesaplanan frekans değerlerinde meydana gelen maksimum ivme değerleri Tablo 2.3’te gösterilmiştir.

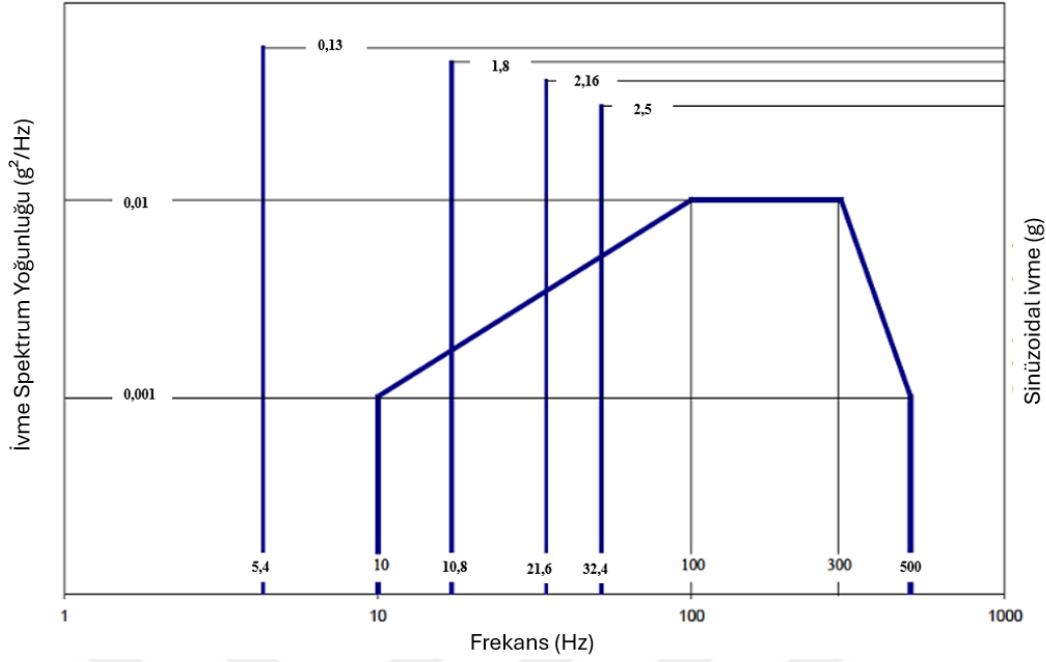
Tablo 2.2 Harmonik frekans maksimum ivme formülleri [26]

Harmonik Frekans Aralığı (f_x)	Harmonik Frekans Maksimum İvme Formülleri (g)
3-10	$0.70 / (10.70 - f_x)$
10-25	$0.10 \times f_x$
25 to 40	2.5
40 to 50	$6.50 - 0.10 \times f_x$
50 to 500	1.50

Tablo 2.3 Harmonik frekans ivme değerleri [26]

Harmonik Frekans	Harmonik Frekans Değeri (Hz)	Harmonik Frekans İvme Değeri (g)
f_1	5.4	0.13
f_2	10.8	1.8
f_3	21.6	2.16
f_4	32.4	2.5

Helikopterin gövdesinde meydana gelen rastlantısal ivme spektrum yoğunluğu değerleri W_0 için $0.0010 \text{ g}^2/\text{Hz}$ ve W_1 için $0.010 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 'dir [26]. Rastlantısal titreşimin meydana geldiği üst frekans (f_t) 500 Hz'dir [26]. AH-1 helikopterinde oluşan rastlantısal ve harmonik titreşim frekans ve seviyeleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 AH-1 titreşim değerleri [26]

2.3 Titreşim İzolasyonu

Titreşim izolasyonu, ekipman veya sistemde meydana gelen istenmeyen titreşimlerin oluşmasını engellenmesi veya etkisinin azaltılmasıdır. Titreşim izolasyonu, tasarımsal değişikliklerle veya izolasyon yöntemleri kullanılarak sağlanabilir. Hava araçlarında tasarımsal değişiklik yapmak oldukça zor ve maliyetli olduğundan genellikle izolasyon yöntemleri kullanılmaktadır. İzolasyon yöntemleri aktif ve pasif yöntemler olmak üzere ikiye sınıflandırılır.

Aktif izolasyon sistemlerinde, titreşim yönüne zıt yönde kuvvet uygulanarak titreşim izole edilir. Gelen titreşimi algılamak için sensörler, kuvvet uygulanması için eyleyiciler ve bir geri bildirim sisteminden oluşmaktadır. Birden fazla ekipman bulunduğu için aktif sistemler karışık ve pahalı olmaktadır. Aktif sistemler düşük frekanslarda bulunan titreşimleri izole etmek amaçlı kullanılmaktadır.

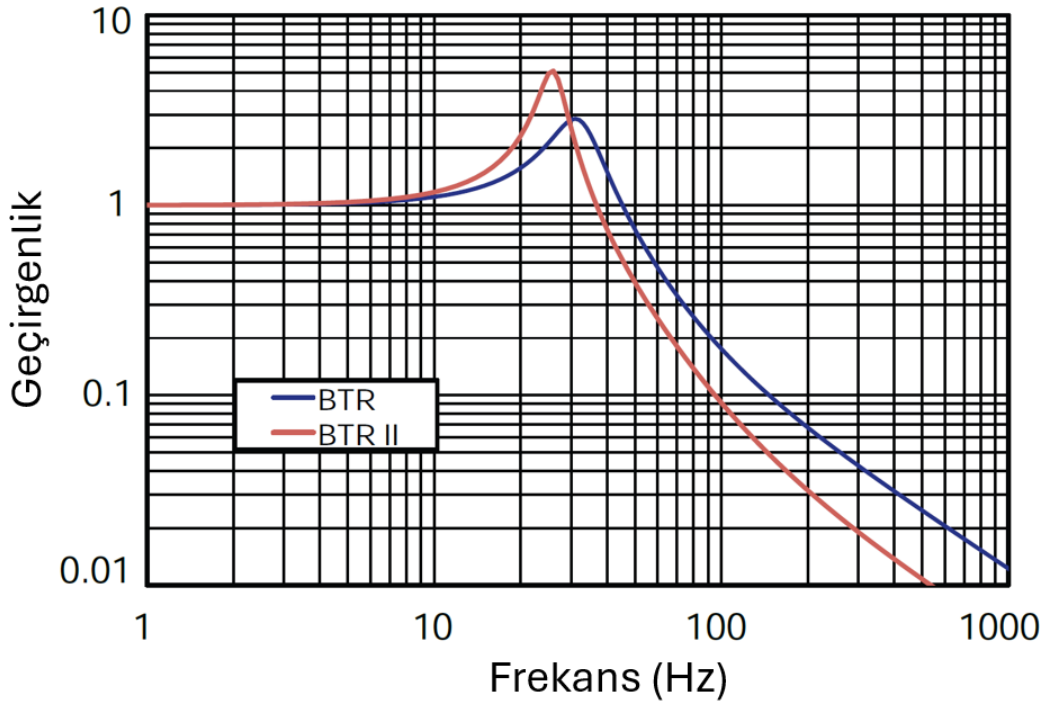
Pasif izolasyon sistemlerde, titreşimi izole etmek amaçlı kauçuk yay gibi malzemeler kullanılır. Sisteme gelen enerji sistemdeki malzemeler tarafından emilir. Pasif sistemler aktif sistemlere göre daha basit ve ucuzdur. Pasif sistemler yüksek frekanstaki titreşimleri izole etmek amaçlı kullanılır.

LORD firması 1924 yılında kurulmuş havacılık sektöründe çeşitli izolatör üreten bir firmadır. LORD firmasına ait izolatörler 46 gram – 25 kilogram arasında statik yük taşıyabilmektedir. İzolatörlerin doğal frekansları genellikle 25 Hz'dir. AM-007 serisi

aviyonik tabanlığı alüminyum 2024 ve elastomere sahip izolatördür (Şekil 2.8). İzolatörün 2 farklı elastomerik malzemeden oluşan geçirgenlik grafiği Şekil 2.9' paylaşılmasıdır. Parçanın doğal frekansı 25 – 30 Hz aralığında ve izolasyonun etkili olarak 40 Hz'den sonra sağlanmaktadır. [27]



Şekil 2.8 AM-007 serisi izolatör [27]



Şekil 2.9 AM-007 serisi geçirgenlik - frekans ilişkisi [27]

Bir sonraki bölümde, düşük frekanslarda izolasyon sağlamak için negatif poisson oranına sahip oksetik birim hücre tasarımları ve parametrelerinin titreşim izolasyon verimine etkileri incelenmiştir.

3

TASARIM VE ANALİZ

Bu bölümde yapının malzemesinin seçiminden, yapının tasarım parametrelerinden ve gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden bahsedilmiştir. Malzeme seçiminden sonra 2 farklı yapı 2 boyutlu tasarlanarak analiz edilmiştir. Daha iyi izolasyon verimine sahip yapı 3 boyutlu tasarlanarak ekipman kütlelerine, plaka kalınlığına, birim hücre kesit alanına, yapı sönümlenme oranına ve birim hücre sayısına bağlı olarak izolasyon verimleri hesaplanmıştır.

3.1 Malzeme Seçimi

Yapının tasarımında FDM yönteminde yaygın olarak kullanılan ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA (polylactic acid) ve TPU (thermoplastic polyurethane) filamentlerin özellikleri incelenmiştir. ABS tok, dayanıklı ısı ve darbe dayanım özelliklerine sahiptir. PLA malzeme en kolay basılabilen, rijit, dayanıklı, gevrek, ısıya ve kimyasallara karşı hassas bir malzemedir. TPU esnek, darbe dayanımlı ve titreşim sönümlenme özelliğine sahiptir [28]. Filamentlerin mekanik özellikleri Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'te verilmiştir. TPU filamentin yüzde uzama değeri daha büyük olduğu için TPU malzemenin enerji sönümlenme kapasitesi daha yüksektir. Malzeme olarak Ansys kütüphanesinde bulunan TPU (Rubber, TPU, Ester aromatic ShoreA85/D35) malzemesi seçilmiştir (Tablo 3.4).

Tablo 3.1 ABS filament mekanik özellikleri [28]

Ultimaker ABS Filament		
Özellik	Değer	Standart
Yoğunluk	1,18 g/cc	ISO 1183
Çekme Dayanımı (Kopma)	33,9 MPa	ISO 527
Uzama (Kopma)	%4,8	ISO 527
Çekme Dayanımı (Akma)	39,0 MPa	ISO 527
Uzama (Akma)	%3,5	ISO 527
Elastisite Modülü	1,6185 GPa	ISO 527

Tablo 3.2 PLA filament mekanik özellikleri [29]

Ultimaker PLA Filament		
Özellik	Değer	Standart
Yoğunluk	1,24 g/cc	ASTM D1505
Çekme Dayanımı (Kopma)	46,5 MPa	ISO 527
Uzama (Kopma)	%5,2	ISO 527
Çekme Dayanımı (Akma)	49,5 MPa	ISO 527
Uzama (Akma)	%3,3	ISO 527
Elastisite Modülü	2,3465 GPa	ISO 527

Tablo 3.3 TPU 95A filament mekanik özellikleri [30]

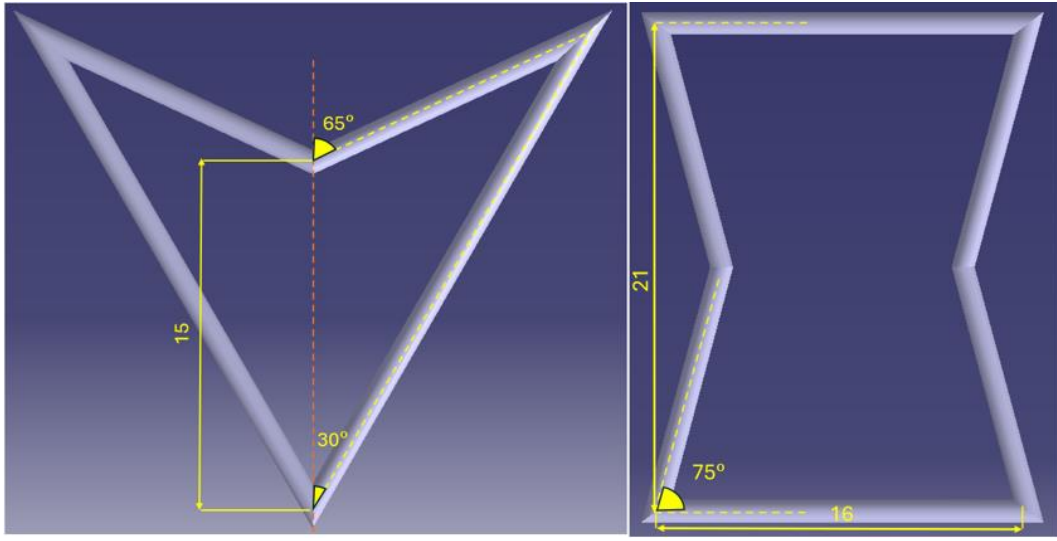
Ultimaker TPU 95A Filament		
Özellik	Değer	Standart
Yoğunluk	1,22 g/cc	ASTM D782
Çekme Dayanımı (Kopma)	39 MPa	ASTM D638
Uzama (Kopma)	%580	ASTM D638
Çekme Dayanımı (Akma)	8,6 MPa	ASTM D638
Uzama (Akma)	%55	ASTM D638
Elastisite Modülü	0,026 GPa	ASTM D638

Tablo 3.4 Rubber tpu (ester aromatic,shore A85/D35) mekanik özellikleri [31]

TPU (Ester aromatic,Shore A85/D35)	
Özellik	Değer
Yoğunluk	1,19 g/cc
Çekme Dayanımı (Kopma)	43 MPa
Elastisite Modülü	0,033 GPa
Poisson Oranı	0,48

3.2 2 Boyutlu Tasarım

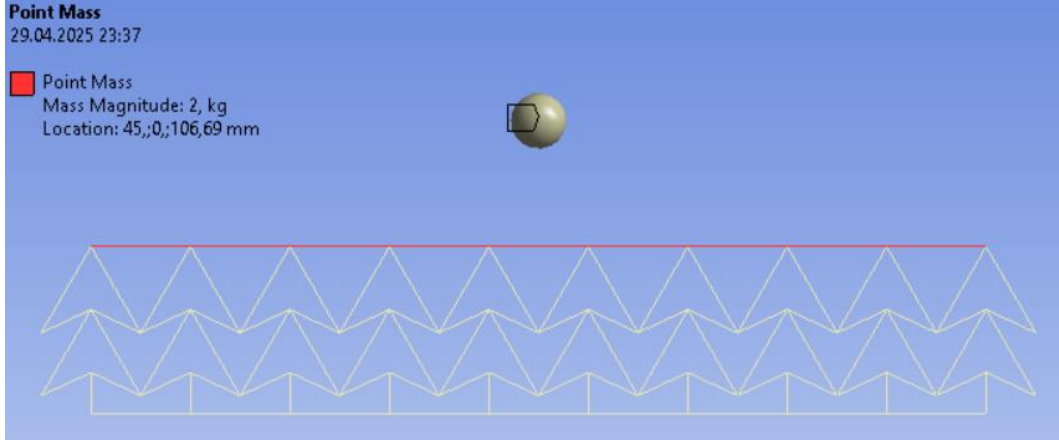
2 boyutlu içe içe giren üçgenden ve iki kafalı oktan oluşan negatif poisson oranına sahip birim hücre parametreleri sırasıyla Şekil 3.1’de sırasıyla gösterilmiştir. Negatif poisson oranına sahip önerilen açı parametreleri, yapılar arasında 130 ve 60 derecedir [32]. 75 dereceli yapının eğilme dayanımı diğer açılara göre daha iyidir ve açı arttıkça yük taşıma kapasitesinde ve özgül enerji soğurma kapasitesinde önemli bir artış yoktur [12]. Yapı boyutları oranlanarak kullanılmış fakat açılar önerilen değerde alınmıştır. Birim hücrelerin çapı 1 milimetredir.



Şekil 3.1 İçe içe giren üçgen ve iki kafalı ok hücreleri

3.3 2 Boyutlu Analizler

Birim hücrelerden 40 milimetre yüksekliğinde ve 240 milimetre genişliğinde yapılar oluşturulmuştur. Malzeme olarak TPU (Ester, aromatic, Shore A85/D35) seçilmiştir. Yapıların 30 milimetre üst yüzeyine 2 kilogram temsili ekipman kütlesi Şekil 3.2’te noktasal kütle olarak tanımlanmıştır. 2 kilogramlık ekipman 60 milimetre yüksekliğe ve 200 mm genişliğe sahip olarak düşünülmüştür. Ekipmanın kütleli atalet momenti, ince dikdörtgen plakanın göre hesaplanmıştır. X, Y ve Z eksenlerine göre kütleli atalet momentleri sırasıyla Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)’ten 6666 kgmm^2 , 7266 kgmm^2 ve 600 kgmm^2 olarak hesaplanmıştır. Kütleli noktaya kütleli atalet momenti eklenmiştir.



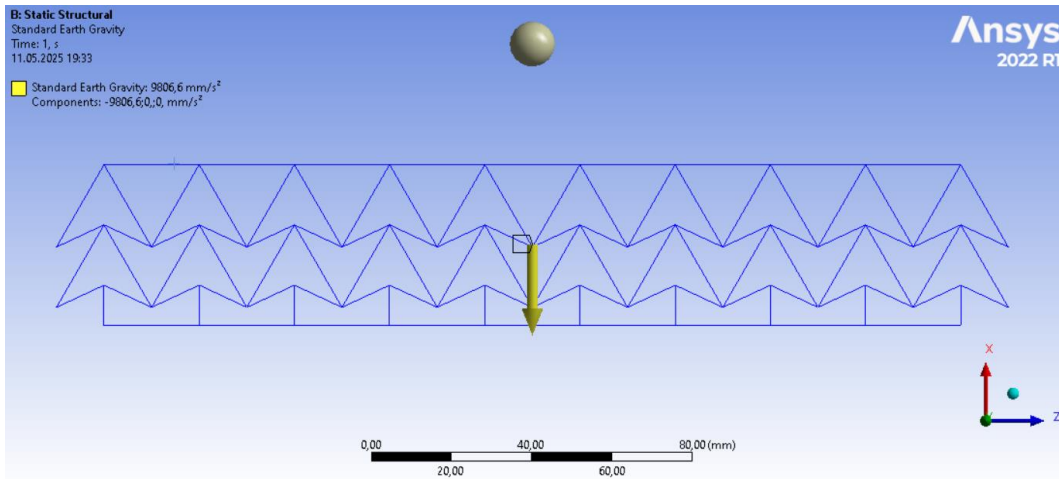
Şekil 3.2 2 kg kütleli yük

$$I_x = \frac{m(a^2)}{12} \quad (3.1)$$

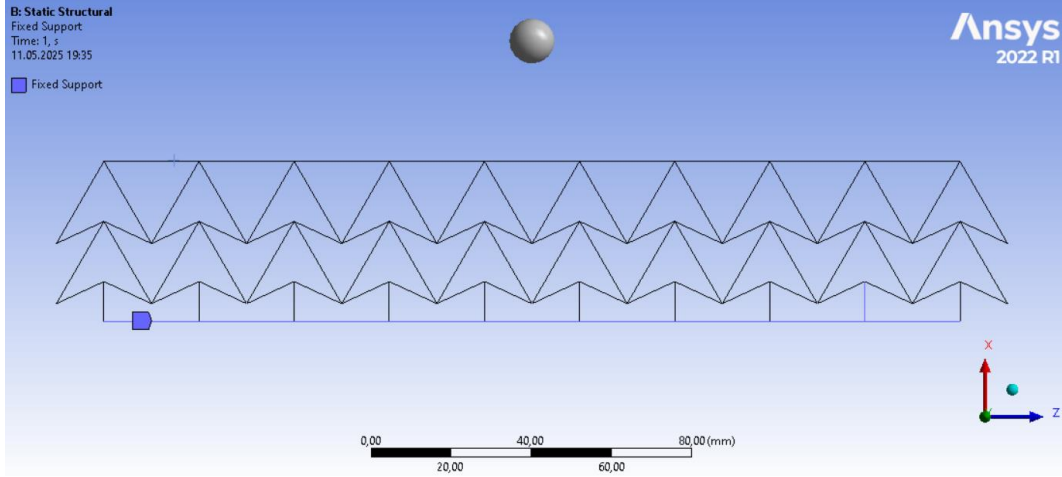
$$I_y = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \quad (3.2)$$

$$I_z = \frac{m(b^2)}{12} \quad (3.3)$$

Yapılara aşağı yönde standart yer çekim ivmesi ve yapıların tabanından sabit destek uygulanmıştır (Şekil 3.3, Şekil 3.4).

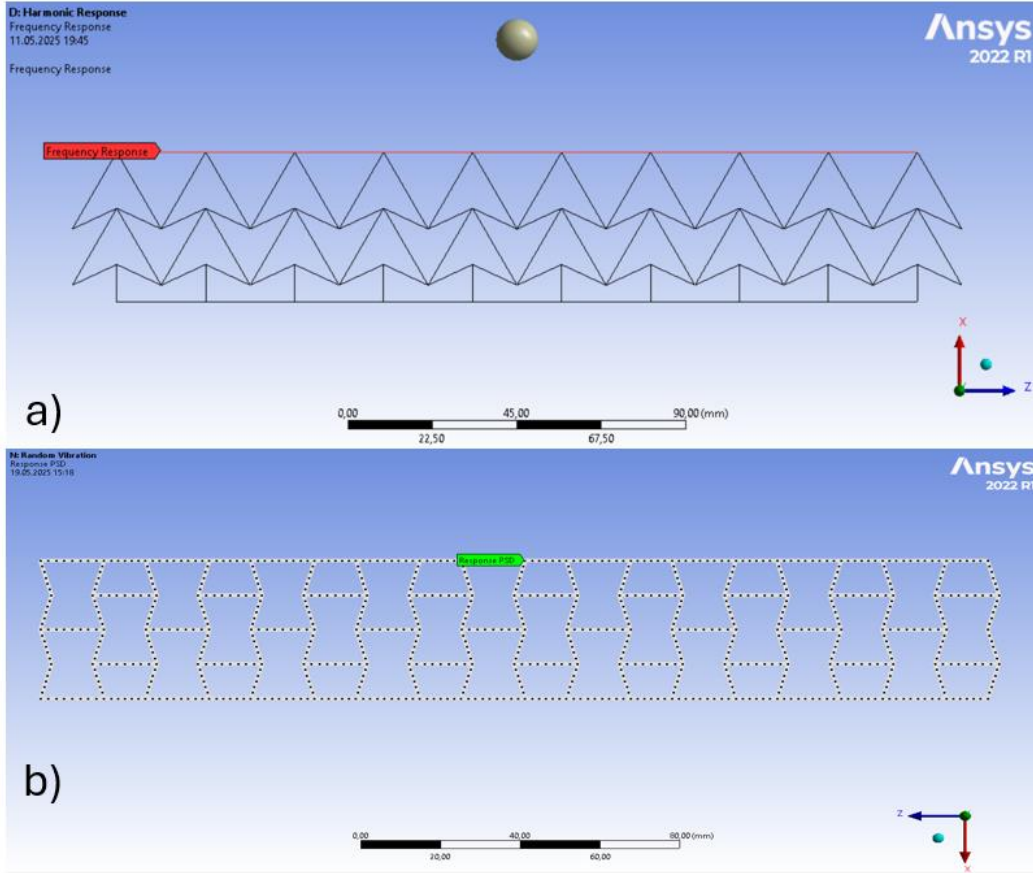


Şekil 3.3 Standart yer çekim ivmesi



Şekil 3.4 Sabit destek

Her iki yapıya Şekil 2.7’de verilen harmonik ivme değerleri ve rastlantısal PSD ivme değerleri yapının sabitlenen desteğinden (tabanında) uygulanmıştır. Harmonik analizde yapının üst tarafının kirişlerden, rastlantısal analizde ise merkez noktalardan titreşim yanıtları alınmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Titreşim yanıtları alınan kısım a) harmonik, b) rastlantısal

TPU'nun oda sıcaklığında mekanik kayıp faktörü 0.2 civarındadır [33]. Genellikle kullanılan elastomerlerin sönüm oranı 0.05 ve 0.33 arasındadır [34]. Mekanik kayıp faktöründen sönüm oranı denklem 3.4 kullanılarak elde edilebilir [34]. Bu durumlar göz önünde bulundurularak sönüm oranı 0.125 alınmıştır.

$$\zeta = \frac{\eta}{2} \quad (3.4)$$

Geçirgenlik ekipmana ne kadar kuvvet iletildiğini gösterir ve denklem 3.5'ten elde edilebilir. Geçirgenlik ekipmana iletilen kuvvet ile zeminden gelen kuvvetin oranıdır. Ayrıca sönüm oranına, uyarıcı frekans ve doğal frekans oranına bağlıdır. Yüzdeler izolasyon verimi ise denklem 3.6'dan elde edilebilir.

$$T = \left| \frac{F_T}{F_0} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3.5)$$

$$\text{İzolasyon Verimi} = 1 - T \text{ (\%)} \quad (3.6)$$

İç içe giren üçgen yapı ve iki kafalı ok yapının ilk 6 doğal frekans değeri ve etkili kütlelerin tüm kütleyle oranı sırasıyla Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

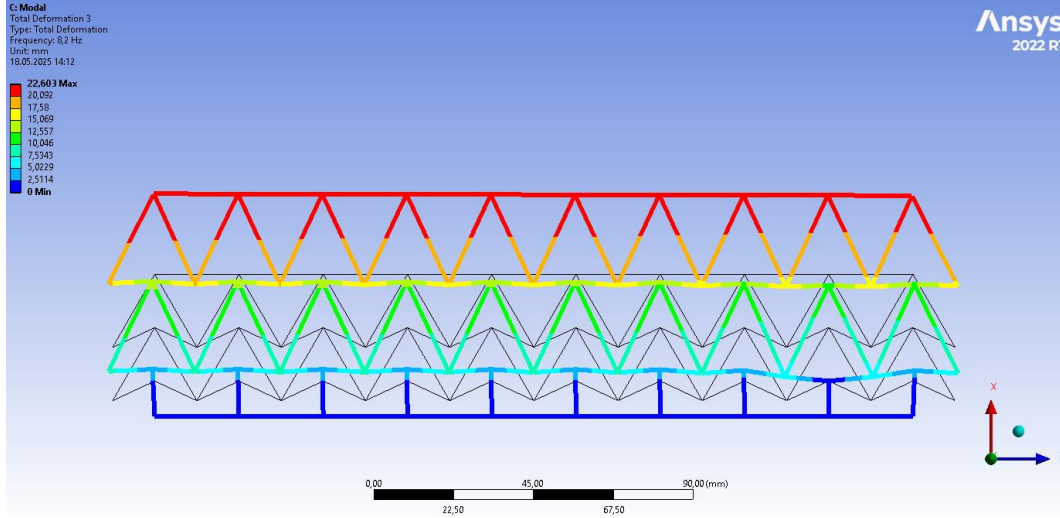
Tablo 3.5 İç içe giren üçgen yapı doğal frekans ve etkili kütlelerin tüm kütleyle oranı

Mod	Frekans (Hz)	X	Y	Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
1	5,19	5,96E-31	0,99785	1,57E-31	0,76381	4,48E-33	0,87184
2	6,56	6,77E-05	1,79E-29	0,97872	2,02E-29	0,14148	1,51E-29
3	8,20	0,9995	1,17E-30	8,52E-05	4,07E-30	0,68008	1,06E-30
4	14,53	5,57E-29	7,27E-05	1,48E-28	0,23411	5,94E-29	8,82E-05
5	18,31	5,66E-05	3,66E-28	2,09E-02	1,07E-27	0,17788	3,98E-28
6	49,55	1,04E-26	1,70E-03	6,24E-27	1,40E-03	2,10E-26	0,12558
Toplam		0,99962	0,99963	0,99966	0,99932	0,99945	0,99751

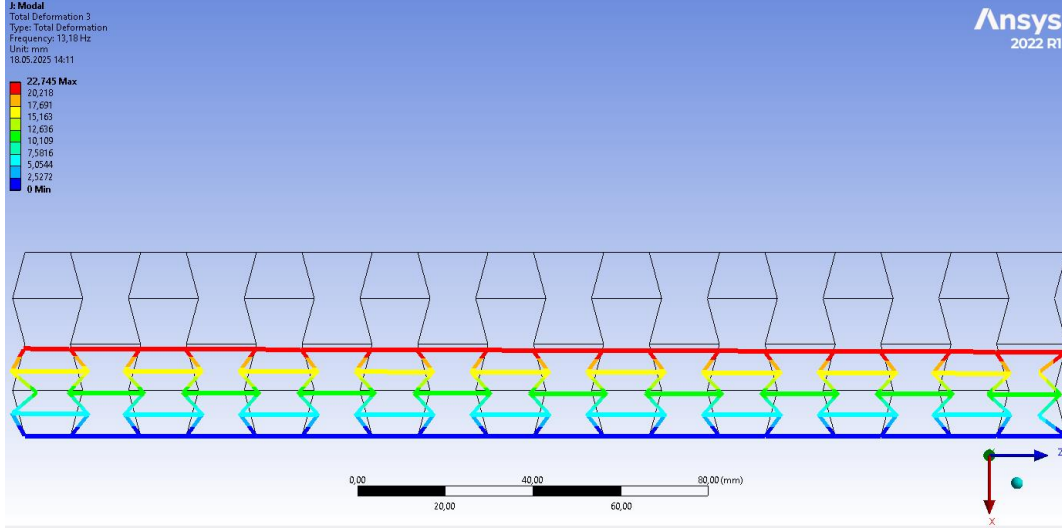
Tablo 3.6 İki kafalı ok yapı doğal frekans ve etkili kütle'nin tüm kütle'ye oranı

Mod	Frekans (Hz)	X	Y	Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
1	7,348	3,02E-30	0,99839	1,07E-27	0,72109	1,23E-28	0,75251
2	7,7218	1,46E-05	8,88E-28	0,99227	6,71E-28	8,88E-02	7,93E-28
3	13,18	0,99952	1,53E-28	2,12E-05	1,09E-28	0,66236	1,07E-28
4	19,472	8,76E-29	1,69E-05	1,55E-28	0,27729	6,99E-29	1,87E-05
5	26,725	8,45E-05	1,55E-26	7,33E-03	2,42E-27	0,24815	3,66E-27
6	72,86	1,26E-26	1,21E-03	3,50E-26	8,40E-04	4,78E-28	0,24275
Toplam		0,99962	0,99962	0,99962	0,99922	0,99934	0,99528

Üçüncü doğal frekansta X ekseninde yapı kütlelerinin %99 hareket etmektedir. Üçüncü frekansların mod şekilleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

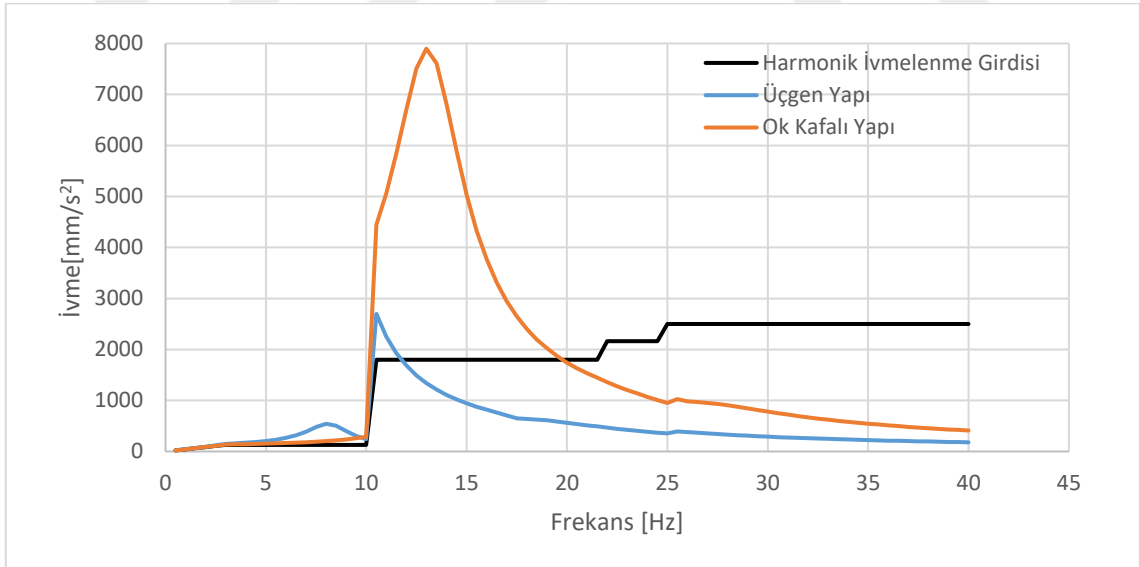


Şekil 3.6 İç içe giren üçgen ok 3. mod şekli

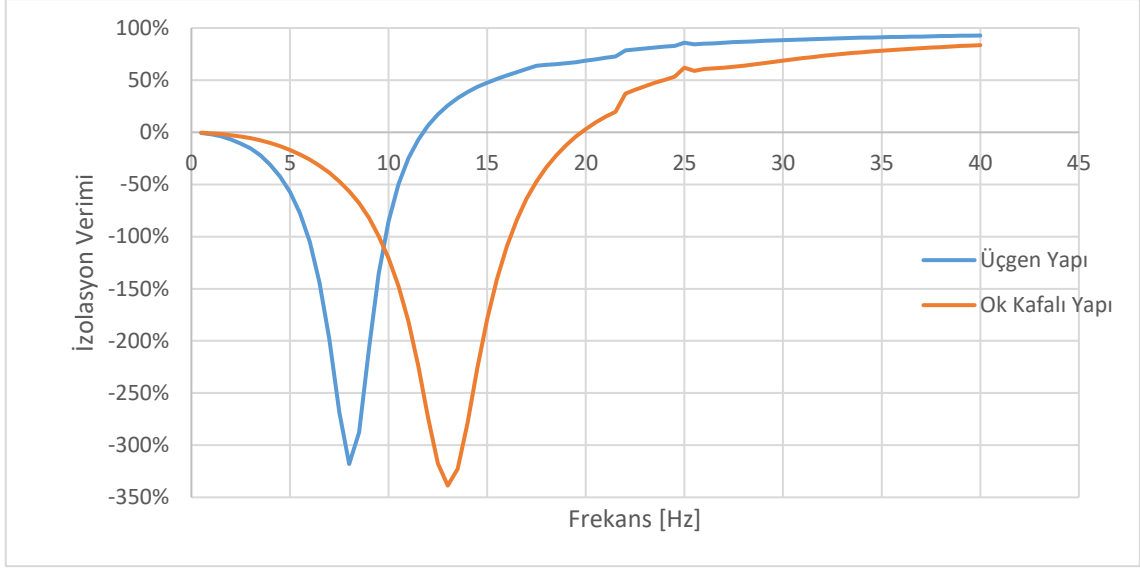


Şekil 3.7 İki kafalı ok 3. mod şekli

Harmonik analiz ivme değerleri ve yüzdelik izolasyon verimi sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Harmonik analizde üçüncü frekans değerlerinde ekipmanlara iletilen ivme 3 kat civarında artmıştır. Tüm frekanslar boyunca üçgen yapı %28 ve ok kafalı yapı -%14 izolasyon verimine sahiptir. Üçgen yapı 12 Hz’den itibaren 40 Hz’e kadar ortalama %75 izolasyon verimine ve ok kafalı yapı 20 Hz’den itibaren ortalama %63 izolasyon verimine sahiptir.

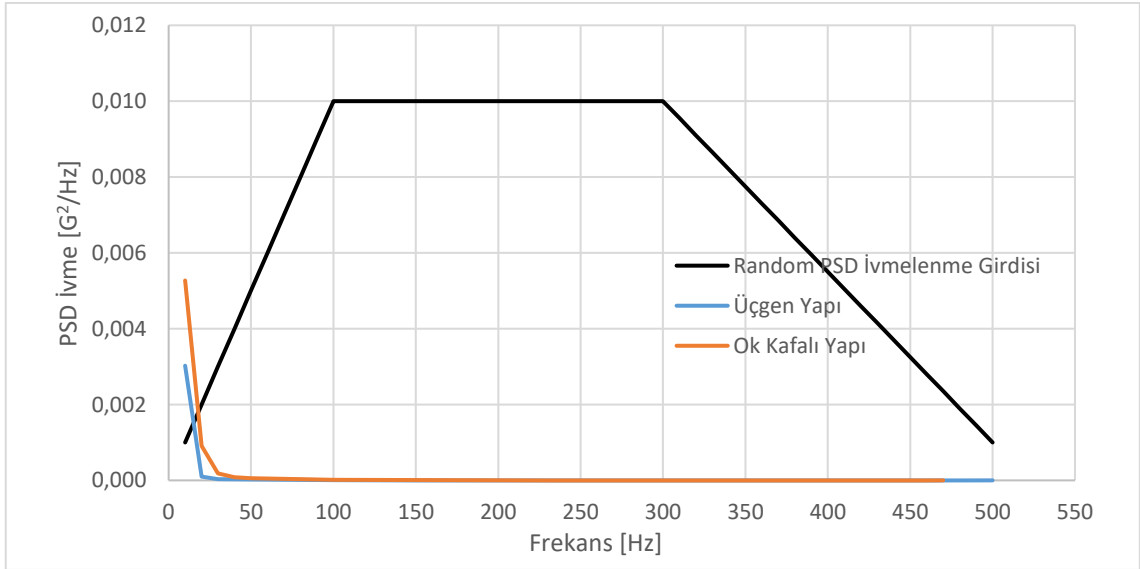


Şekil 3.8 2 boyutlu harmonik analiz ivme değerleri

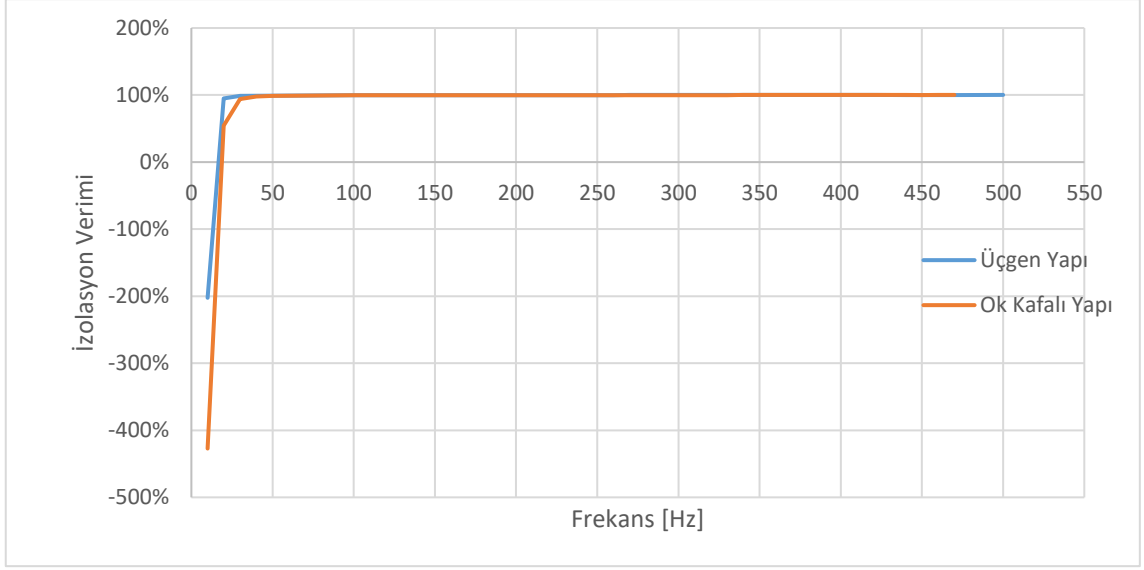


Şekil 3.9 2 boyutlu harmonik analiz izolasyon verimi

Rastlantısal analiz PSD ivme değerleri ve izolasyon verim değerleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Rastlantısal analiz 10-12 Hz aralığında üçgen yapı ve 10-18 Hz aralığında ise ok kafalı yapı izolasyon yapamamaktadır. Üçgen yapının 10-12 Hz aralığında ivmelenmesi 2 kat artarken ok kafalı yapının 10-18 Hz aralığında ivmelenmesi 4,5 kat artmıştır. Diğer frekanslarda tüm rastlantısal titreşimleri sönmüştür.



Şekil 3.10 2 boyutlu rastlantısal analiz PSD ivme değerleri



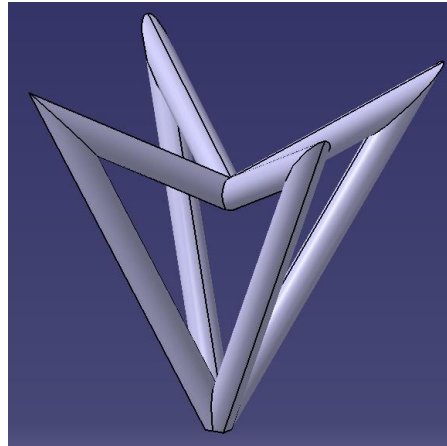
Şekil 3.11 2 boyutlu rastlantısal analiz izolasyon verimi

Üçgen birim hücrelerden oluşan yapının izolasyon verimi ok kafalı birim hücrelerden oluşan yapının izolasyon veriminden daha iyidir ve sönümlenme frekans daha geniştir. Üçgen birim hücrelerden oluşan yapı 3 boyutlu tasarlanarak parametrelerine bağlı izolasyon verimi sonuçları incelenmiştir.

3.4 3 Boyutlu Tasarım

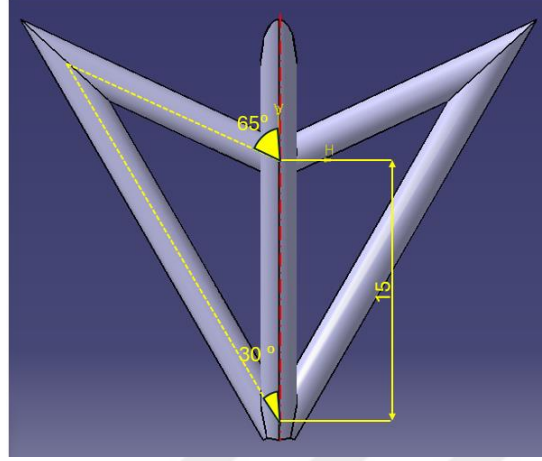
Tasarımda 3 boyutlu iç içe giren birim hücreler kullanılmıştır (Şekil 3.12). 3 boyutlu birim hücre kullanım nedenleri aşağıda verilmiştir.

- Birden fazla eksenden gelen titreşimleri sönümlenmek
- Yapının titreşim performansını iyileştirmek
- Yapının ağırlığını azaltmak.



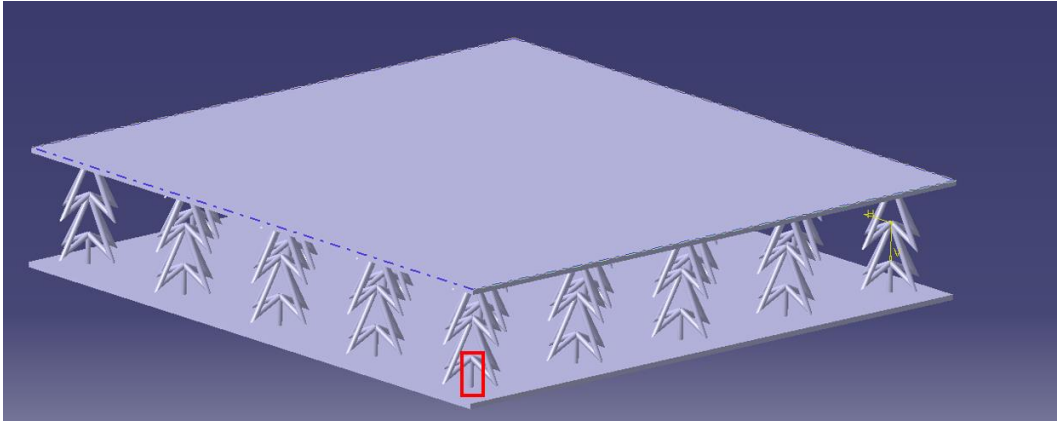
Şekil 3.12 Birim hücre

Yapının tasarım parametreleri Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Üst bileşenin dikey ile açısı 65° , alt bileşenin dikey ile açısı 30° , bileşenler arasındaki uzunluk 15 milimetre ve bileşen çapı 1 milimetre olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.13 Yapı parametreleri

3 boyutlu yapının yüksekliği 2 birimden oluşmaktadır. Yapının ilk katının altına 10 milimetre boyutunda atılan destek Şekil 3.14'te kırmızı kutu içerisinde gösterilmiştir. Destek parçaya yapının rijitliğini azaltmak amaçlı eklenmiştir. Yapının altında ve üstüne plaka bulunmaktadır. (Şekil 3.14). Yapının son ölçüleri 40 milimetre yükseklik ve 240 milimetre genişlik olmuştur.



Şekil 3.14 3 boyutlu yapı ve destek

Yapılan tasarımlara T1A1025D125W15 formatında numaralar atanmıştır. T1 üst plakaların kalınlığının 1 mm, A1 birim hücreyi oluşturan silindirlerin çapının 1 mm², 025 yapıda toplam 25 birim hücre, D125 sönüm sayısının 0,125, W15 yapının üstünde 15 kg olduğunu ifade etmektedir. Yapının farklı plaka kalınlığında, birim hücre silindir çap değerlerinde, birim hücre sayısında, sönüm parametrelerinde ve

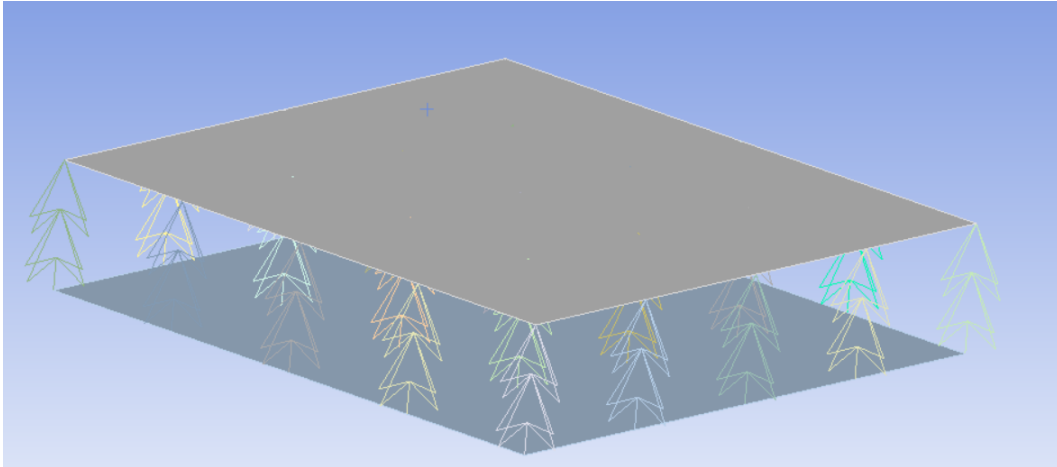
ekipman ağırlığında tasarımları üretilerek modellenmiştir. Tasarım parametreleri ve değerleri Tablo 3.7’te paylaşılmıştır.

Tablo 3.7 Parametreler ve değerleri

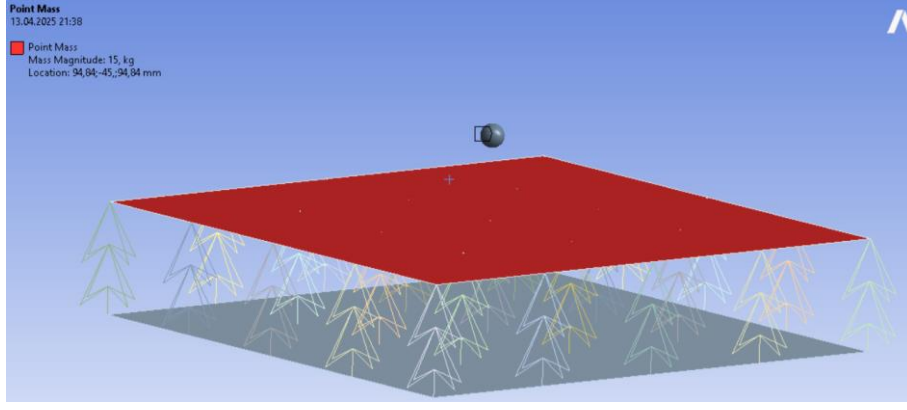
Parametre Adı	Parametre Değerleri
Ekipman kütlesi	2 kg, 5kg, 10kg, 15 kg
Üst Plaka kalınlığı	1 mm, 2 mm, 4 mm
Birim hücre kesit alanı	1 mm ² , 1,5 mm ² ve 2 mm ²
Yapı sönümlleme oranı	0.005, 0.075, 0.125, 0.200, 0.350
Birim hücre sayısı	25, 49, 100

3.5 3 Boyutlu Analizler

Malzeme olarak Ansys kütüphanesinden Rubber, TPU (Ester, aromatic Shore A85/D35 seçilmiştir. Alt ve üst plaka 2D bileşenler ise 1D olarak modellenmiştir (Şekil 3.15). Aviyonik ekipmanın ağırlığı için 2, 5, 10 ve 15 kg üst yüzeyden 30 mm yukarıya kütleli nokta sınır şartı uygulanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 1D çizgi elemanlar ve 2D yüzey elemanlardan oluşan model



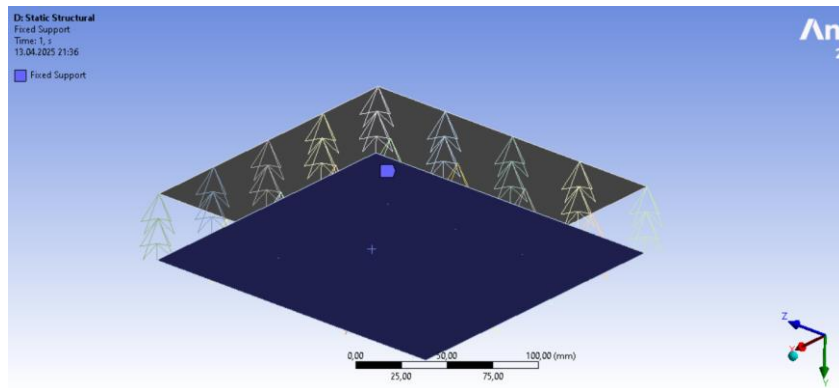
Şekil 3.16 Kütleli nokta

Yapının kütleli atalet momenti Denklem(3.7) ve Denklem (3.8)'ten hesaplanmıştır. Kütleli atalet momenti 15 kilogram yapı için x ve z ekseninde 54500 kgmm^2 y eksenine için 100000 kgmm^2 olarak tanımlanmıştır.

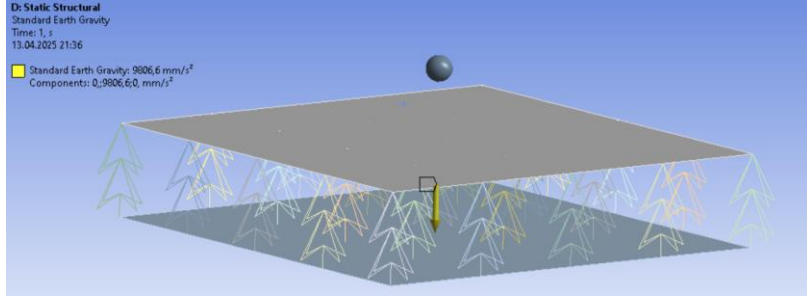
$$I_x = I_z = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \quad (3.7)$$

$$I_y = \frac{m(a^2 + a^2)}{12} \quad (3.8)$$

Yapı alt yüzeyden sabitlenmiştir (Şekil 3.17). Yapıya zemine doğru olacak şekilde y ekseninde standart yer çekimi uygulanmıştır (Şekil 3.18). Yapının, helikoptere bağlantı yerleri ve aviyonik ekipmanın yapıya montaj arayüzlerinin detay tasarımları modeli basitleştirmek amaçlı göz önüne alınmamıştır. Bu şekiller sadece bağlantı noktası olduğundan yapının sönüm performansına etkisi olmayacağı düşünülmektedir. Bu arayüzlerin doğal frekansa etkisi de ihmal edilebilir seviyededir çünkü yapı ağırlığı 100 gram civarındadır. Yapının ağırlığının sistemin ağırlığına oranı maksimum %10'dur.



Şekil 3.17 Sabitlenmiş yüzey



Şekil 3.18 Standart yer çekimi ivmesi

Ağ yapısını kontrol etmek için 4 farklı ağ boyutunda ilk 6 doğal frekans incelenmiştir. Kütlelerin büyük çoğunluğu ilk 6 frekansta tetiklenmektedir. Ağ boyutları 10 mm, 7,5 mm, 5 mm ve 4 mm olarak seçilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.8’te verilmiştir. Tablo 3.9’da yakınsama değerleri verilmiştir. Ağ yapısı olarak 5 mm kullanılmasında fark %0.2’den az olmaktadır ve değerler yakınsamaktadır. Ağ yapısı olarak 5 mm kullanılmıştır.

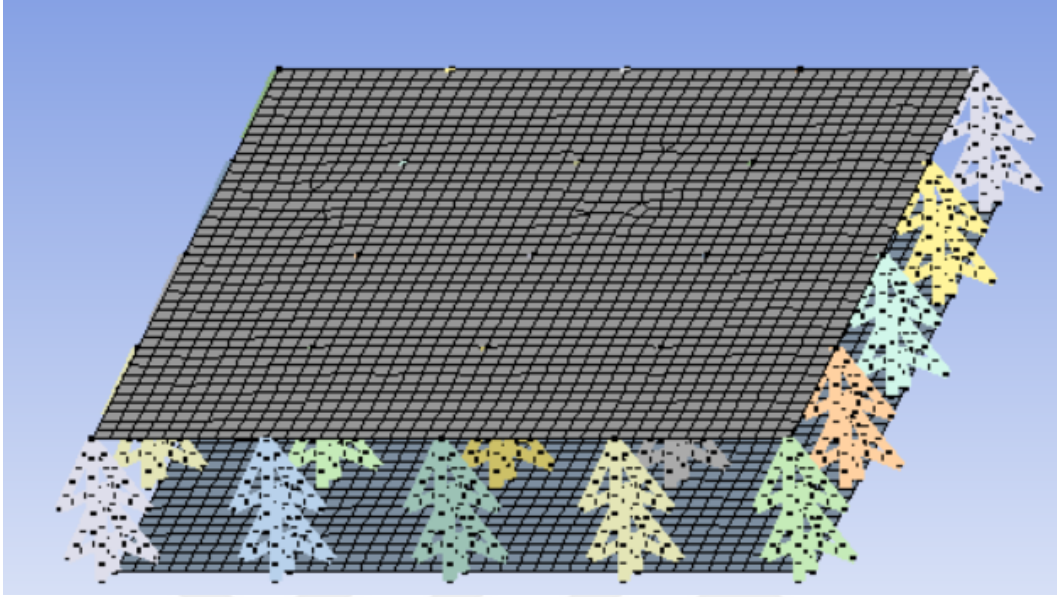
Tablo 3.8 Ağ boyutları – frekans ilişkisi

	10 (mm)	7.5 (mm)	5 (mm)	4 (mm)
1.Frekans (Hz)	3,2755	3,2532	3,2377	3,235
2.Frekans (Hz)	3,2755	3,2538	3,2379	3,235
3.Frekans (Hz)	4,4754	4,4323	4,3825	4,3674
4.Frekans (Hz)	4,9998	5,	4,9923	4,9903
5.Frekans (Hz)	5,5659	5,5584	5,5389	5,5307
6.Frekans (Hz)	5,5660	5,5612	5,539	5,5308

Tablo 3.9 Ağ boyutları – frekans yakınsamaları

	10-7.5 (mm)	7.5-5 (mm)	5-4 (mm)
1.Frekans Farkı (%)	0,685%	0,479%	0,083%
2.Frekans Farkı (%)	0,667%	0,491%	0,090%
3.Frekans Farkı (%)	0,972%	1,136%	0,346%
4.Frekans Farkı (%)	0,004%	0,154%	0,040%
5.Frekans Farkı (%)	0,135%	0,352%	0,148%
6.Frekans Farkı (%)	0,086%	0,401%	0,148%

Modelin 5 mm ağ yapısı Şekil 3.19’te gösterilmiştir. Ağ yapısının kalitesini gösteren değerler Tablo 3.10’te verilmiştir. Bu değerlerde de ağ yapısının yeterli seviyede olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.19 5mm ağ yapısı

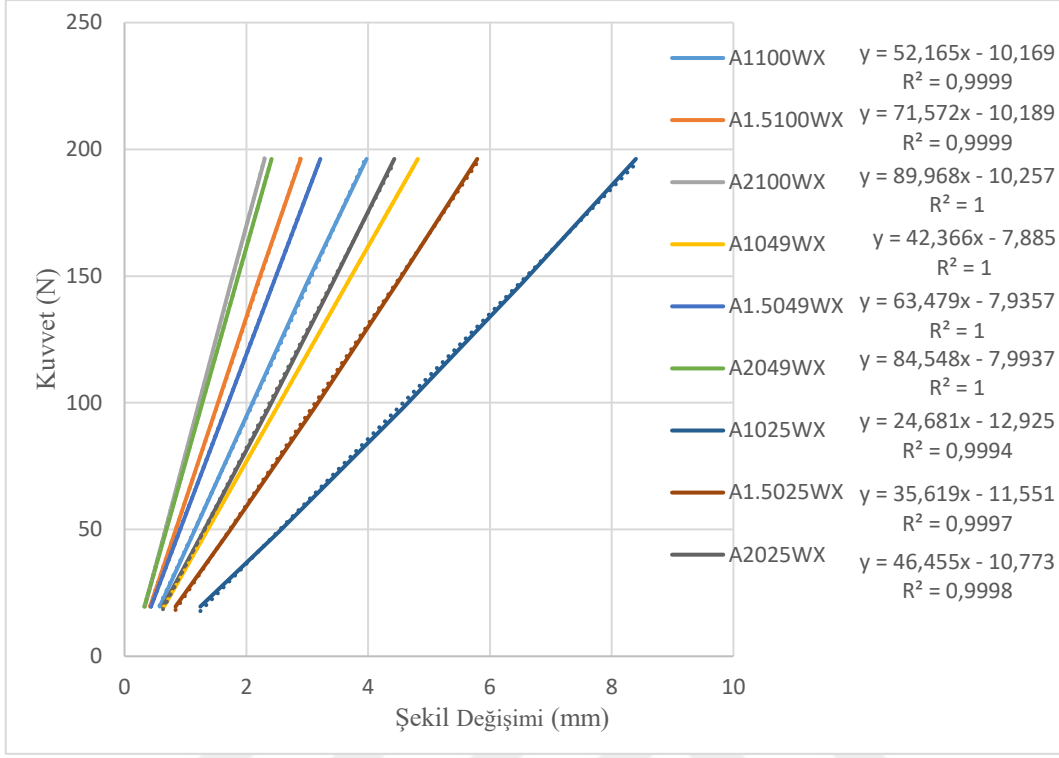
Tablo 3.10 Ağ yapısı kalitesi

	Eleman Kalitesi	En Boy Oranı	Eğrilik
Minimum	0,613	1,	$1,30 \cdot 10^{-10}$
Ortalama	0,989	1,023	$2,05 \cdot 10^{-2}$
Maksimum	1,	1,388	0,401

3.5.1 Statik Analiz

Yapının rijitlik değerini hesaplamak için statik analizler koşulmuştur. Plaka rijitliğini ihmal etmek amacıyla plaka titanyum olarak seçilmiş olup sadece birim hücrelerin rijit değeri (3.9)’dan hesaplanmıştır. Birim hücre kesit alanı 1 mm^2 , 1.5 mm^2 ve 2 mm^2 birim hücre sayısı ise 25, 49 ve 100 seçilerek üst plakaya ekipman kütleleri uygulanarak y ekseninde standart yer çekim ivmesi uygulanmıştır. Şekil 3.20’de analiz sonuçları, grafik denklemleri ve R kare değerleri paylaşılmıştır. Tablo 3.11’de yapılar ve rijitlik katsayıları paylaşılmıştır. Birim hücre kesit alanı arttıkça yapının rijitliği de yaklaşık olarak aynı oranda artmıştır. Birim hücre sayısı arttıkça yapının rijitliği de artmıştır. Hücre sayısı arttıkça rijitlik artışı gittikçe azalmıştır.

$$\frac{F}{x} = k \quad (3.9)$$



Şekil 3.20 Yapı kuvvet-şekil değişim grafiği

Tablo 3.11 Yapı rijitlik değerleri

Yapı	Rijitlik Değeri (N/mm)
A1100WX	52
A1.5100WX	71
A2100WX	89
A1049WX	42
A1.5049WX	63
A2049WX	84
A1025WX	24
A1.5025WX	35
A2025WX	46

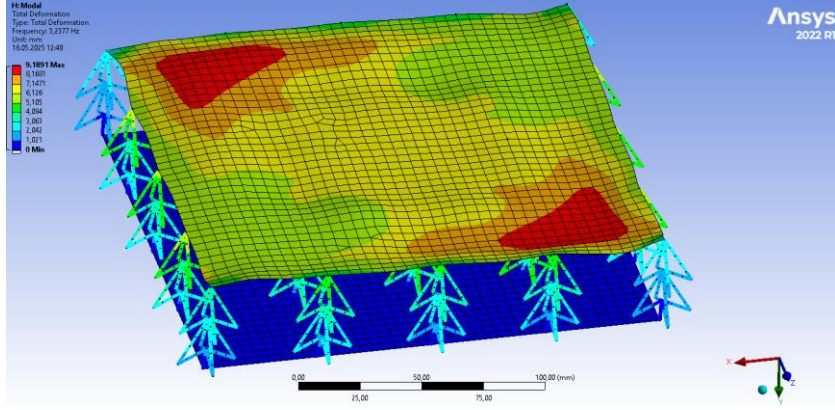
3.5.2 Serbest Titreşim Analizi

Kurulan modelin 6 serbest titreşim frekans değerleri ve Tablo 3.12’de etkili kütlelerin tüm kütleyle oranı verilmiştir. 1. frekansta yapının kütlelerinin %26’sı x ekseninde %54’ü z ekseninde hareket etmektedir. 2. frekansta yapının kütlelerinin %54’ü x ekseninde %26’sı z ekseninde hareket etmektedir. Yapı x ve z ekseninde simetrik olduğu için frekans değerleri aynı, oranlar ise ters şekilde oluşmuştur. 3. frekansta yapının kütlelerinin %26’sı Y ekseninde dönmektedir. 4. frekansta yapının %99’u y ekseninde hareket etmektedir. İlk 6 frekansta yapının kütlelerinin %99’u hareket etmektedir.

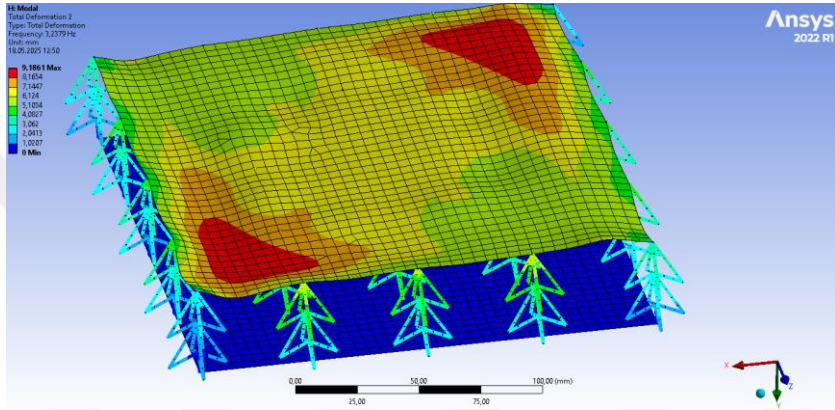
Tablo 3.12 Etkili kütlelerin tüm kütleyle oranı

Serbest Titreşim	Frekans (Hz)	X	Y	Z	Rot X	Rot Y	Rot Z
1	3,24	0,26401	1,33E-10	0,54956	0,14519	0,57453	6,97E-02
2	3,24	0,54958	2,43E-09	0,26402	6,97E-02	1,89E-02	0,14514
3	4,38	1,80E-08	1,46E-09	7,90E-11	2,04E-09	0,26954	2,79E-10
4	4,99	9,56E-09	0,99676	5,61E-10	0,65843	4,10E-09	0,65838
5	5,54	0,132	1,01E-08	5,15E-02	3,45E-02	0,12702	8,86E-02
6	5,54	5,14E-02	6,65E-09	0,13198	8,86E-02	6,80E-03	3,45E-02
Toplam		0,99702	0,99676	0,99702	0,99644	0,99675	0,99644

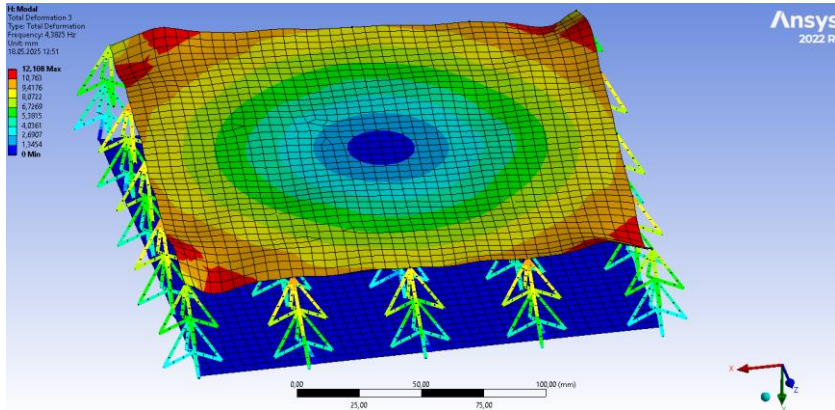
Yapının 6 serbest titreşim şekli Şekil 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25 ve 3.26’da gösterilmiştir.



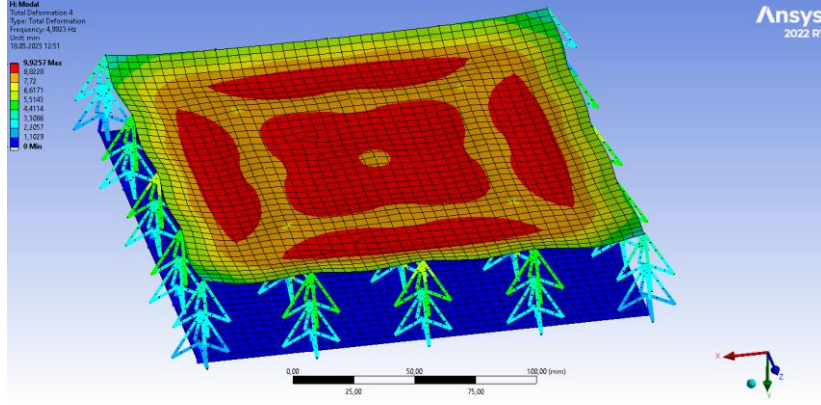
Şekil 3.21 1. serbest titreşim şekli



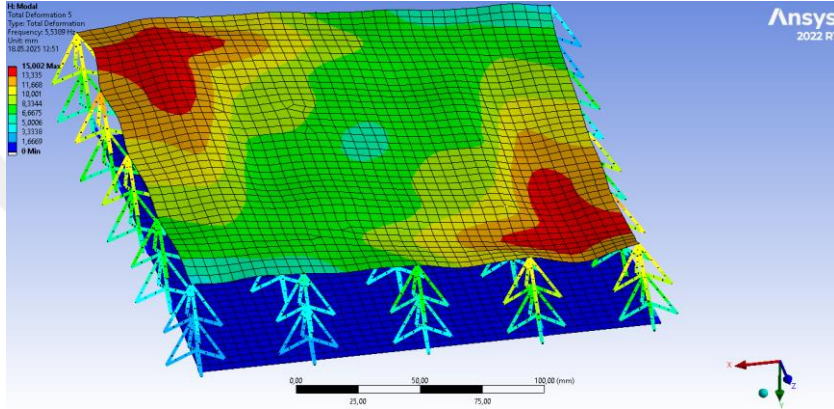
Şekil 3.22 2. serbest titreşim şekli



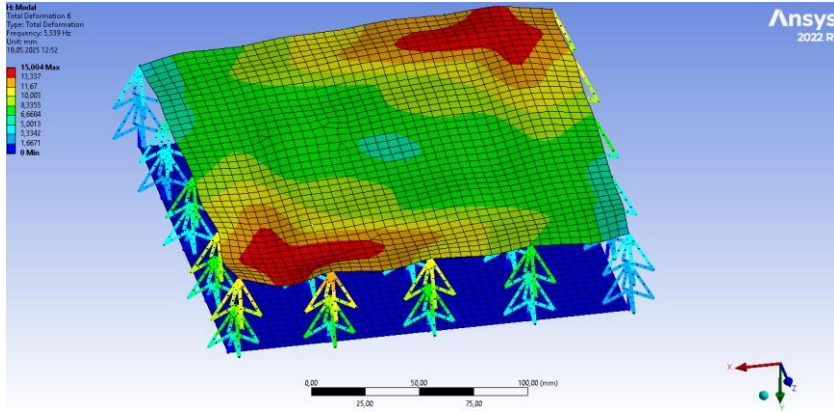
Şekil 3.23 3. serbest titreşim şekli



Şekil 3.24 4. serbest titreşim şekli



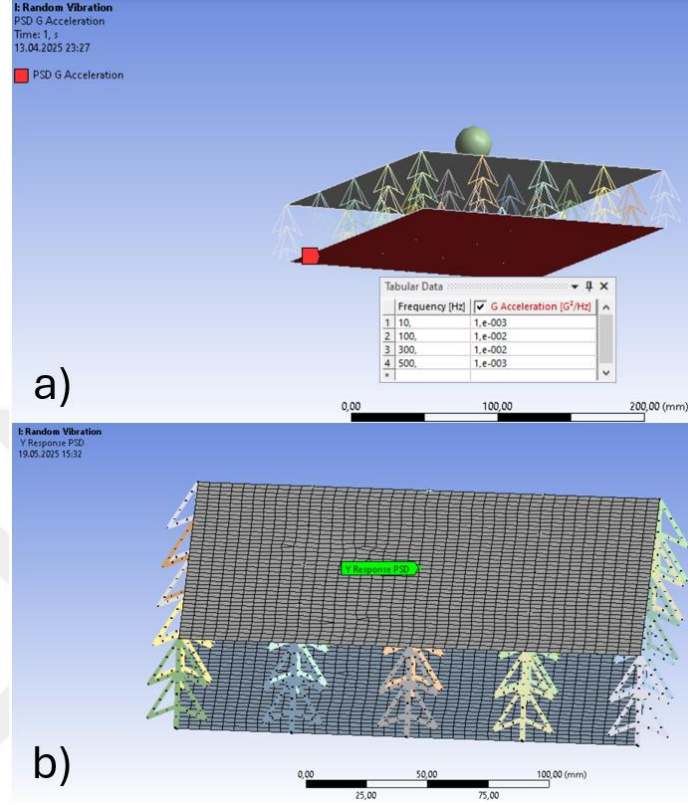
Şekil 3.25 5. serbest titreşim şekli



Şekil 3.26 6. serbest titreşim şekli

3.5.3 Rastlantısal Analiz

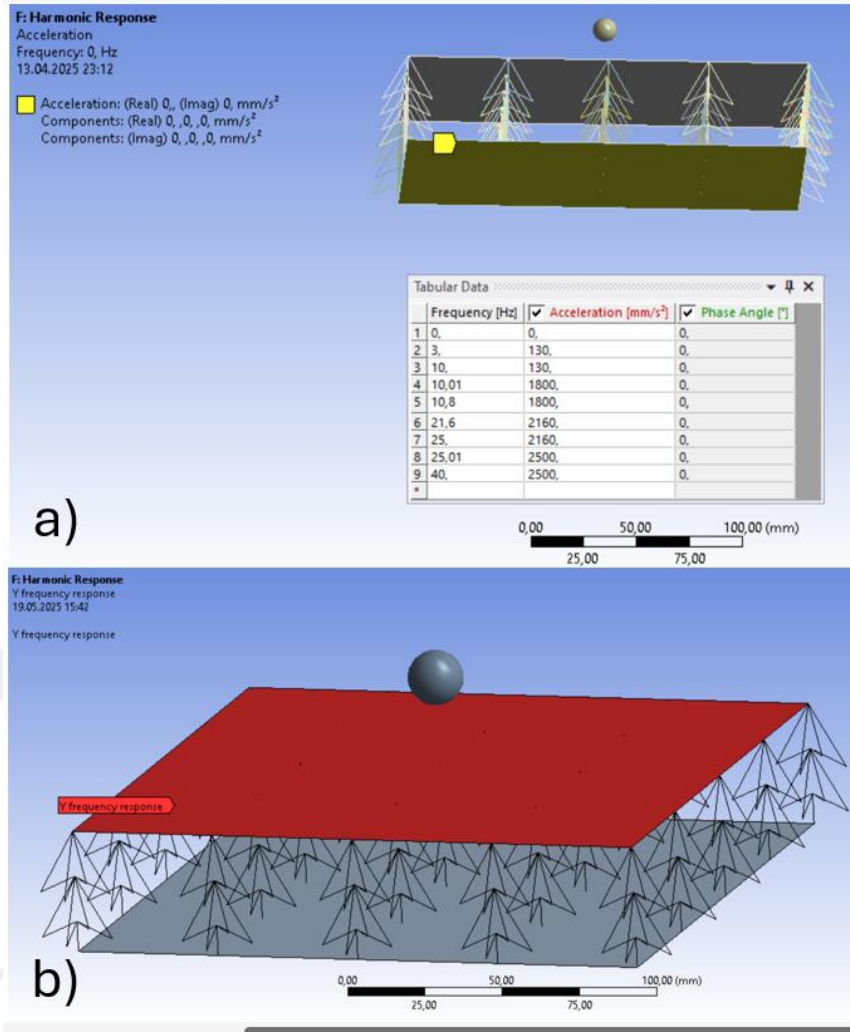
Şekil 2.7’de verilen rastlantısal titreşimler yapının temelinden uygulanmış ve yanıt orta noktadan alınmıştır. (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 Rastlantısal analiz koşulları a) ivme girdisi, b) ivme yanıtı

3.5.4 Harmonik Analiz

Şekil 2.7’de bulunan AH-1 helikopteri harmonik titreşimleri yapıya temelinden uygulanmış ve maksimum ivme yanıtları üst plakandan alınmıştır. (Şekil 3.28). Mod birleştirme yöntemi kullanılmış ve yapının sönüm değeri 0.125 seçilmiştir. 0.005, 0.075, 0.200 ve 0.300 sönüm değerlerinde de analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.28 Yapıya etki eden harmonik titreşimler a) ivme girdisi, b) ivme yanıtı

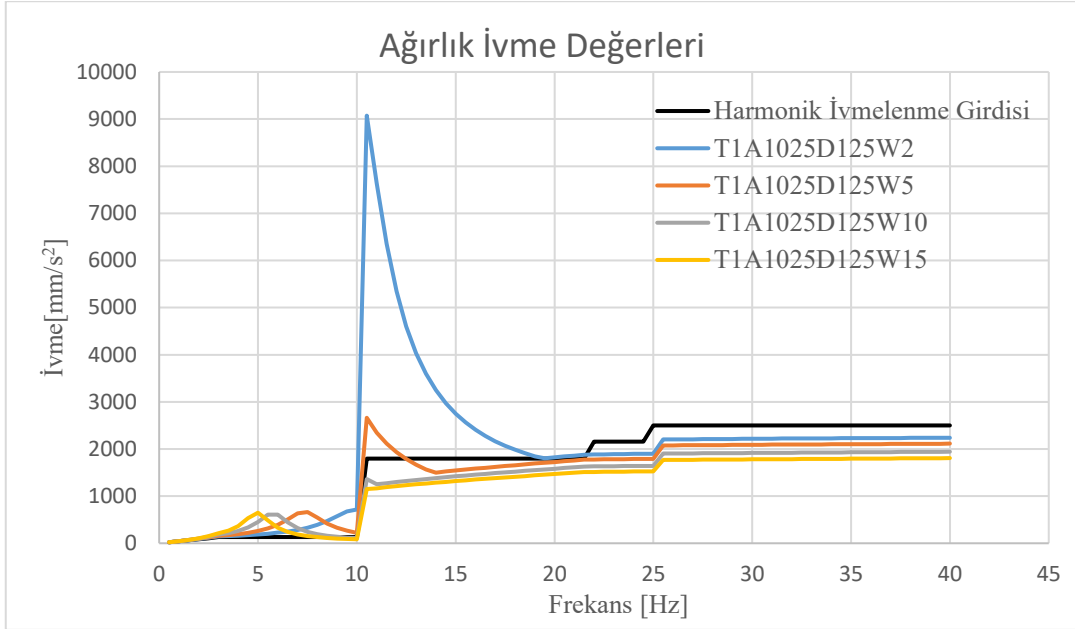
3.6 Parametrik Analizler

3.6.1 Ekipman Kütlesi

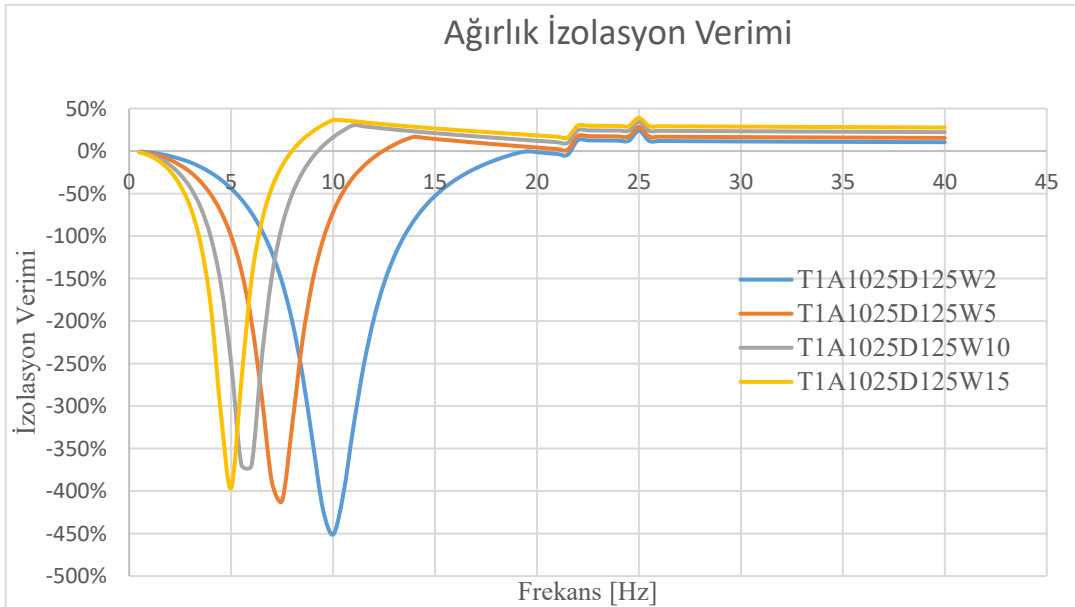
Ekipman kütlelerinde, yapının üzerindeki ekipman kütlesi 2 kg, 5kg, 10kg ve 15 kg olarak seçilerek izolasyon verimi hesaplanmıştır. Yapının kütlelerinin çoğunluğunun y ekseninde hareket ettiği frekanslar dördüncü frekanslardır. Bu frekanslar artan kütle sırasına göre sırayla 10.01 Hz, 7.40 Hz, 5.80 Hz ve 4.99 Hz'dir.

Harmonik frekans yanıtları ve yüzdelik izolasyon verimi Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da paylaşılmıştır. Harmonik analizde dördüncü frekans değerlerinde ekipmanlara iletilen ivme 4 kat civarında artmıştır. Tüm frekanslar boyunca 2 kg ekipman ağırlığına sahip yapı -%48, 5 kg ekipman ağırlığına sahip yapı -%24, 10 kg ekipman ağırlığına sahip yapı -%8 ve 15 kg ekipman ağırlığına sahip yapı %1 izolasyon verimine sahiptir. 2 kg ekipman ağırlığına sahip sistem 22 Hz'den itibaren 40 Hz'e

kadar ortalama %12 izolasyon verimine sahipken 5 kg ekipman ağırlığına sahip sistem 12.5 Hz'den itibaren ortalama %14 izolasyon verimine, 10 kg ekipman ağırlığına sahip sistem 9.5 Hz'den itibaren ortalama %22 izolasyon verimine ve 15 kg ekipman ağırlığına sahip sistem 8 Hz'den itibaren ortalama %27 izolasyon verimine sahiptir.



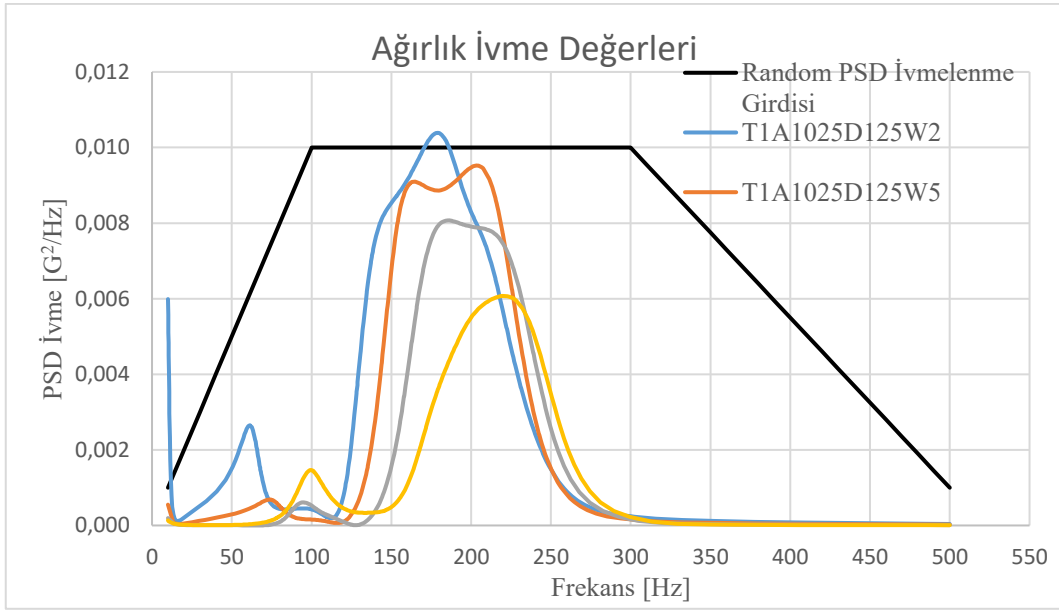
Şekil 3.29 Harmonik analiz ekipman ağırlığı değerleri



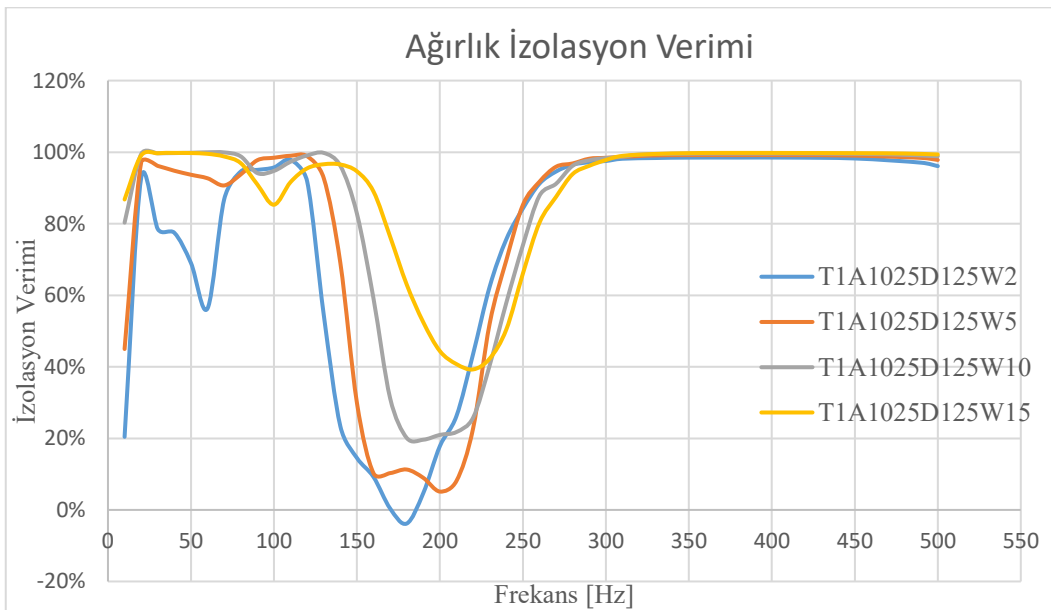
Şekil 3.30 Harmonik analiz ekipman ağırlığı izolasyon verimi

Rastlantısal frekans yanıtları ve yüzdelerik izolasyon verimi Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de paylaşılmıştır. 2 kg ekipman kütlesine sahip yapı 12 Hz'den itibaren gelen

İvmeleri 170 Hz'e kadar izole etmiştir .170-190 Hz aralığında izolasyon verimi sıfırın altına düşmüştür. Yapının ortalama izolasyon verimi %69'dur. 5 kg ekipman kütlesine sahip yapı %75, 10 kg ekipman kütlesine sahip yapı %81, 15 kg ekipman kütlesine sahip yapı %85 izolasyon verimine sahiptir. 2 kg ekipman kütlesine sahip yapının 60 Hz'de izolasyon verimi %55, 15 kg ekipman kütlesine sahip yapının 100 Hz'de izolasyon verimi %85'e düşmüştür. Tüm yapıların 150-250 Hz aralığında izolasyon verimi azalmıştır. En az azalma %40' kadar düşen 15 kg ekipman ağırlığına sahip yapıda olmuştur.

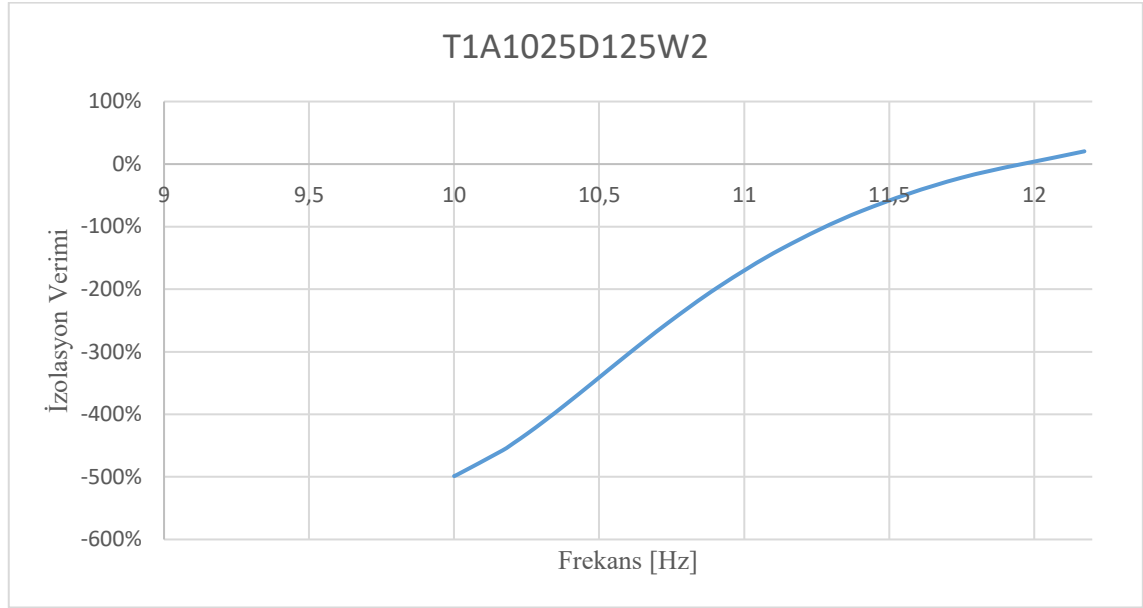


Şekil 3.31 Rastlantısal analiz ekipman ağırlığı değerleri



Şekil 3.32 Rastlantısal analiz ekipman ağırlığı izolasyon verimi

Rastlantısal analizin 10-12 Hz aralığında, 2 kg ekipman kütlesine sahip yapı doğal frekansı ile çakıştığı için 10 Hz’de yapıya 5 kat fazla ivme iletilmiştir (Şekil 3.33).

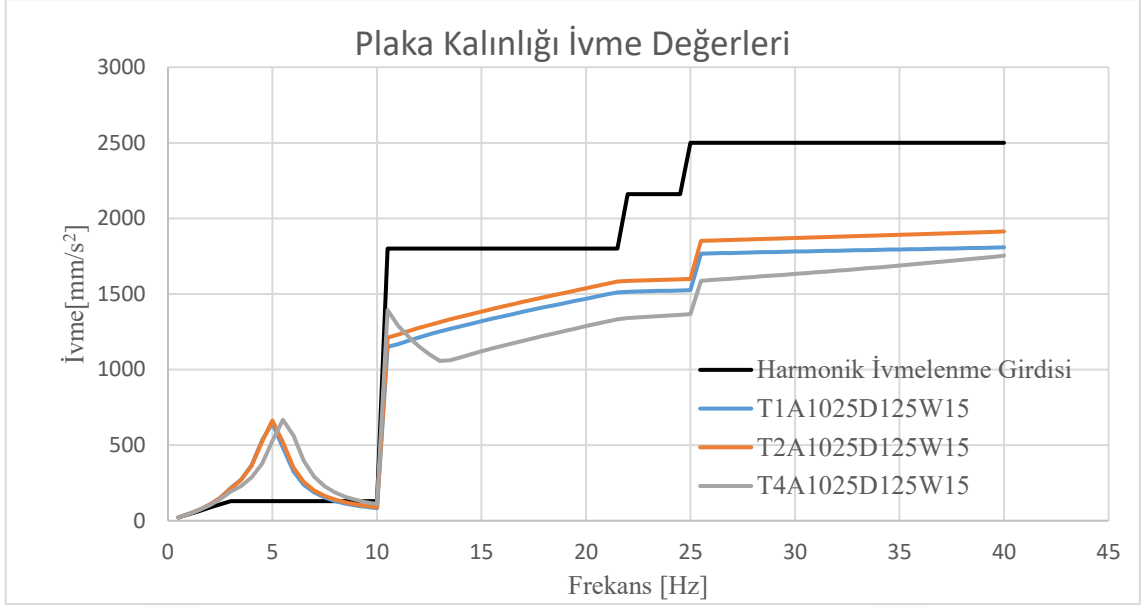


Şekil 3.33 T1A1025D125W2 10-12 Hz izolasyon verimi

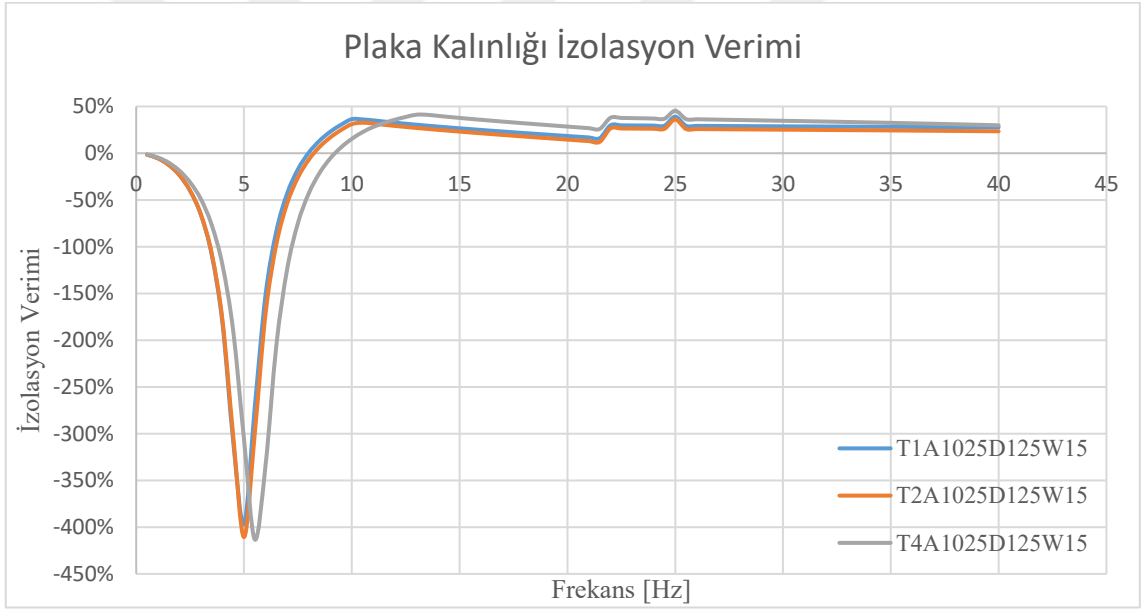
3.6.2 Plaka Kalınlığı

Plaka kalınlığında, yapının üstünde bulunan plaka kalınlıkları 1 mm, 2 mm ve 4 mm olarak seçilerek izolasyon verimi hesaplanmıştır. Plaka kalınlığı arttıkça sırasıyla yapı kütlesi 95 gram, 181 gram ve 353 gram olmuştur. Yapının kütlesinin çoğunluğunun y ekseninde hareket ettiği frekanslar dördüncü frekanslardır. Plaka kalınlığı arttıkça dördüncü frekanslar sırasıyla 4.99 Hz, 5.04 Hz ve 5.60 Hz olmuştur. Kalınlık arttıkça doğal frekans değerleri ve kütlede artmıştır. Dolayısıyla yapının rijitliği de artmıştır.

Harmonik frekans yanıtları ve yüzdelik izolasyon verimi Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’te paylaşılmıştır. Harmonik analizde dördüncü frekans değerlerinde ekipmanlara iletilen ivme 4 kat civarında artmıştır. Tüm frekanslar boyunca 1 mm plaka kalınlığına sahip yapı %1, 2 mm plaka kalınlığına sahip yapı -%4, 4 mm plaka kalınlığına sahip yapı %0 izolasyon verimine sahiptir. 1 mm plaka kalınlığına sahip yapı 8 Hz’den itibaren ortalama %27 sönüm yaparken 2 mm plaka kalınlığına 8,5 Hz’den itibaren ortalama %24 sönüm ve 4 mm plaka kalınlığına 9,5 Hz’den itibaren ortalama %33 izolasyon verimine sahiptir.

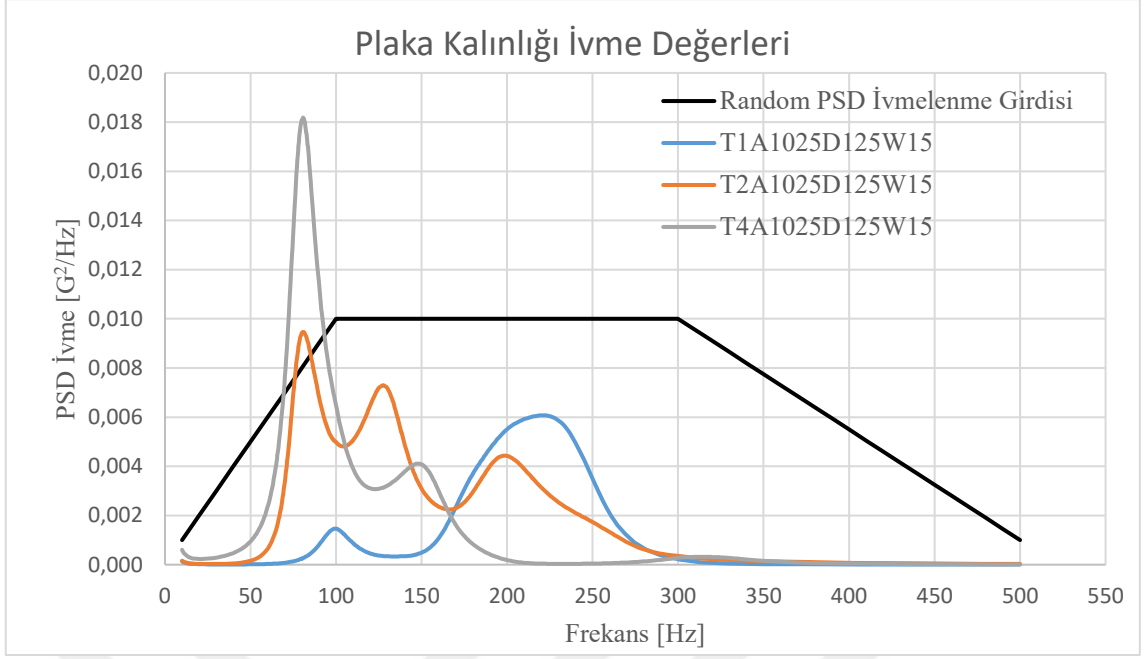


Şekil 3.34 Harmonik analiz plaka kalınlığı değerleri

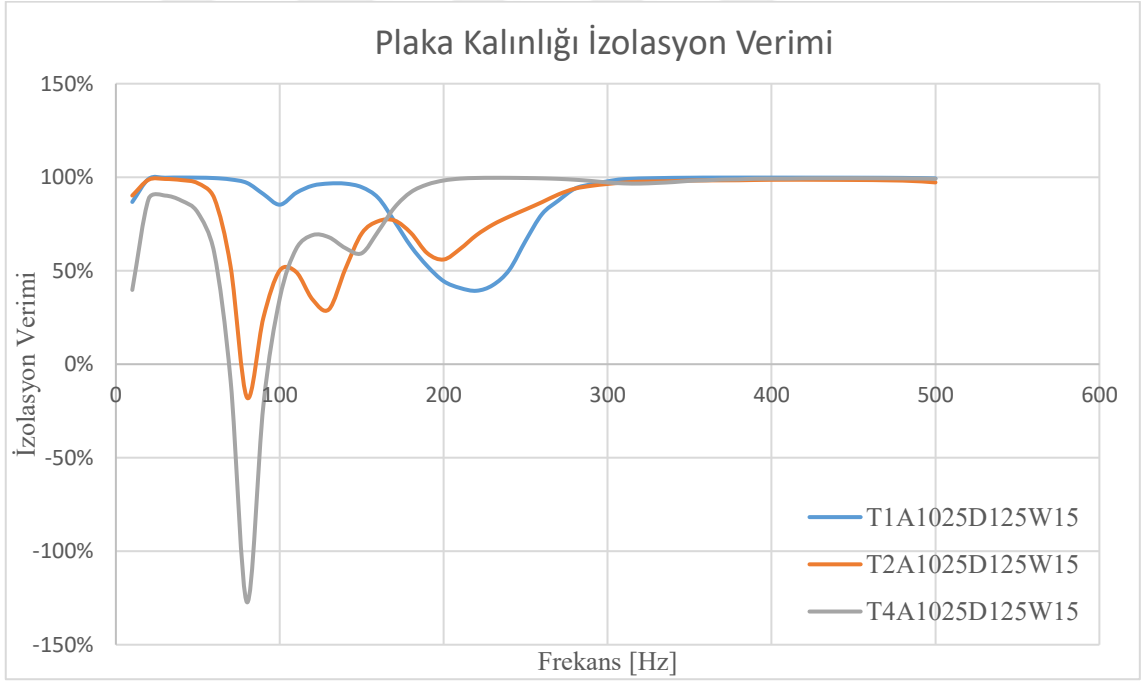


Şekil 3.35 Harmonik analiz plaka kalınlığı izolasyon verimi

Rastlantısal frekans yanıtları ve yüzdelerik izolasyon verimi Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’te paylaşılmıştır. Rastlantısal analizde 1 mm kalınlığa sahip yapıda ekipman tüm frekanslarda izolasyon yapmaktadır. 220 Hz’de izolasyon verimi %39 olmuştur. Ortalama izolasyon verimi %85’tir. 2 mm plaka kalınlığına sahip yapı 70-90 Hz aralığında izolasyon yapmamaktadır. Bu aralıkta ekipmana iletilen ivme miktarı %18 artmıştır. Yapının ortalama izolasyonu %76’dır. 4 mm plaka kalınlığına sahip yapı 60-100 Hz aralığında izolasyon yapmamaktadır. Ekipmana iletilen ivme miktarı %127 artmıştır. Yapının ortalama izolasyonu %79’dur.



Şekil 3.36 Rastlantısal analiz plaka kalınlığı değerleri



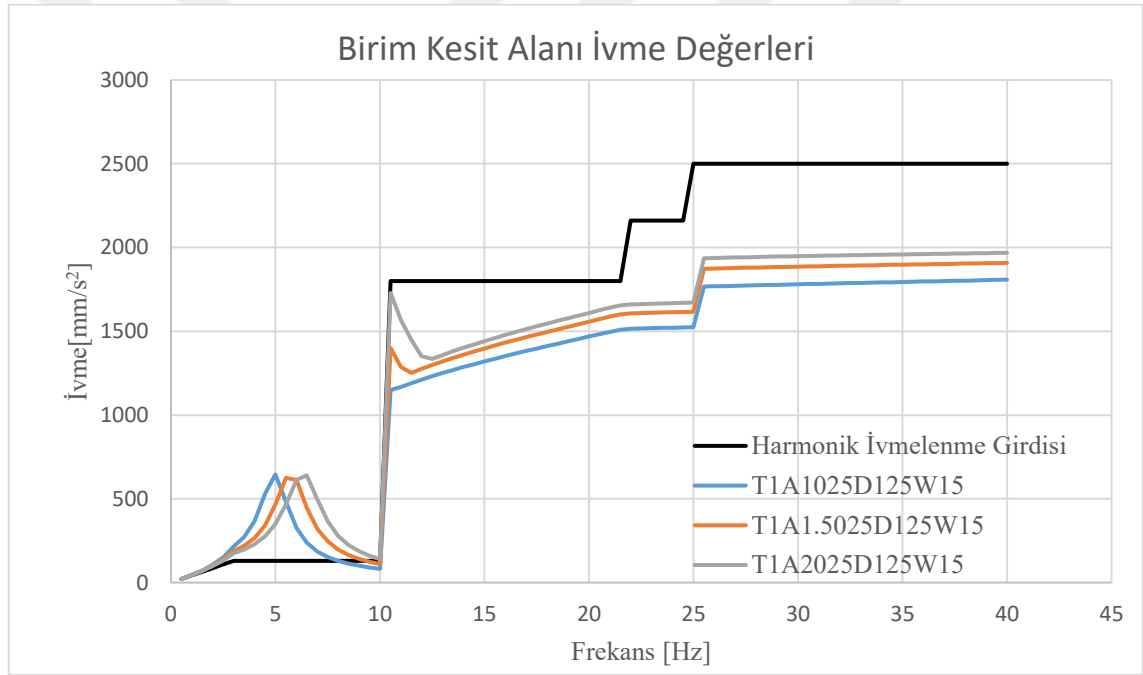
Şekil 3.37 Rastlantısal analiz plaka kalınlığı izolasyon verimi

3.6.3 Birim Hücre Kesit Alanı

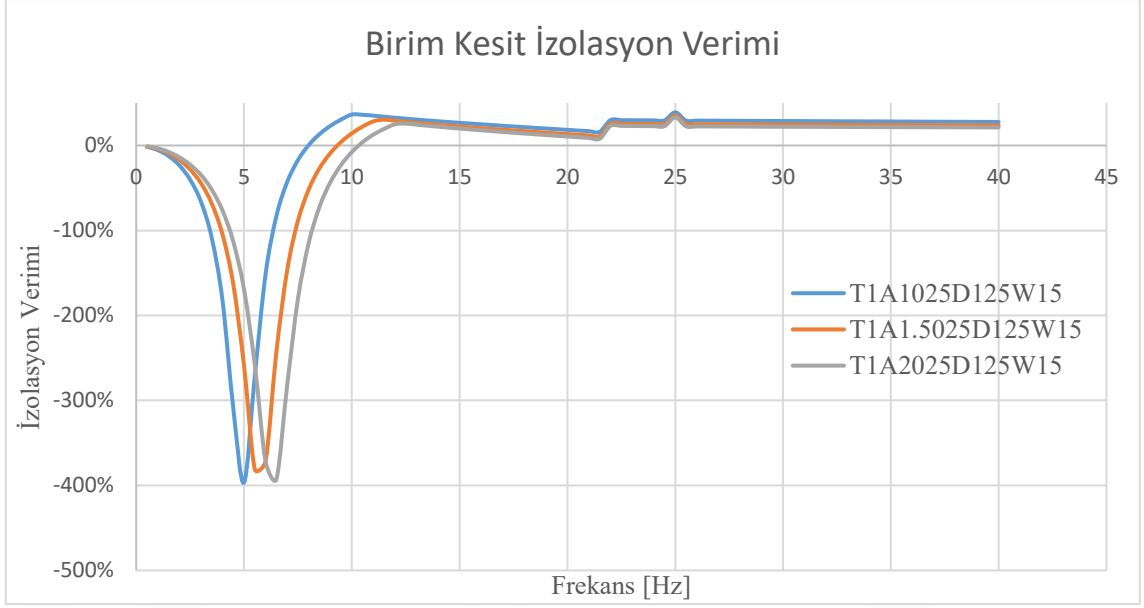
Birim hücre kesit alanında, birim hücredeki kesit alanı 1 mm^2 , $1,5 \text{ mm}^2$ ve 2 mm^2 olarak seçilerek izolasyon verimi hesaplanmıştır. Birim hücre kesit alanı arttıkça yapı kütlesi sırasıyla 95 gram, 100 gram ve 104 gram olmuştur. Yapının kütesinin çoğunluğunun y ekseninde hareket ettiği frekanslar dördüncü frekanslardır. Bu

frekanslar sırasıyla 5 Hz, 5.78 Hz ve 6.37 Hz'dir. Kesit alanı arttıkça yapının rijitliği artmıştır.

Harmonik frekans yanıtları ve yüzdelik izolasyon verimi Şekil 3.38 ve Şekil 3.39'te paylaşılmıştır. Harmonik analizde dördüncü frekans değerlerinde ekipmanlara iletilen ivme 4 kat civarında artmıştır. Tüm frekanslar boyunca 1 mm² birim kesit alanına sahip yapı %1, 1.5 mm² birim kesit alanına sahip yapı %8, 2 mm² birim kesit alanına sahip yapı %13 izolasyon verimine sahiptir. 1 mm² birim kesit alanına sahip yapı 8 Hz'den itibaren ortalama %27 izolasyon verimine sahipken 1.5 mm² birim kesit alanına sahip yapı 9.5 Hz'den itibaren ortalama %23 izolasyon verimi ve 2 mm² birim kesit alanına sahip yapı 10.5 Hz'den itibaren ortalama %20 izolasyon verimine sahiptir.

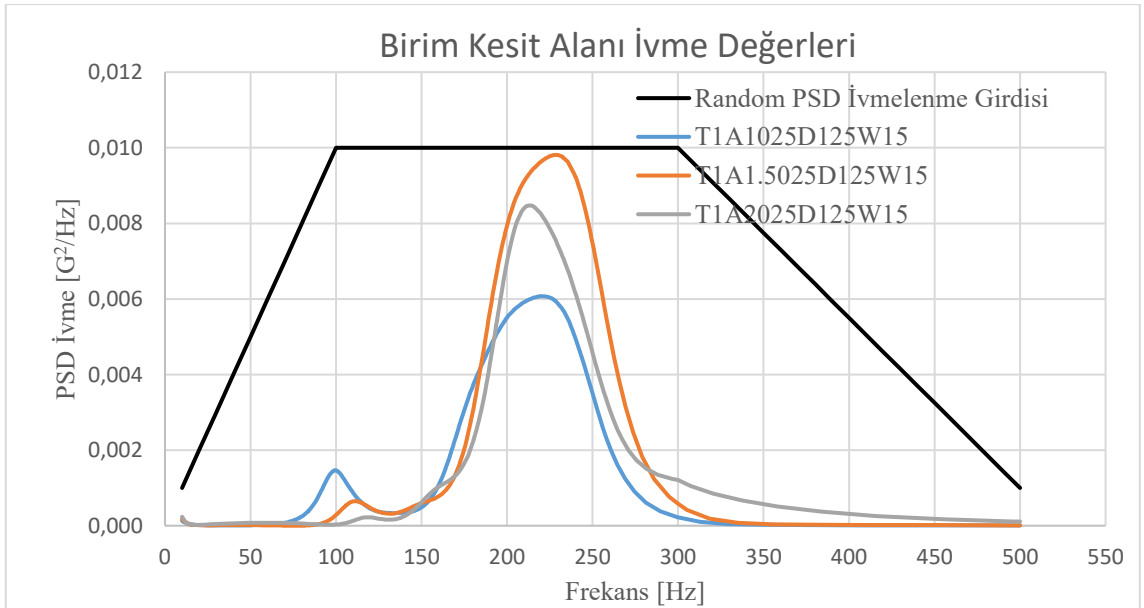


Şekil 3.38 Harmonik analiz birim kesit değerleri

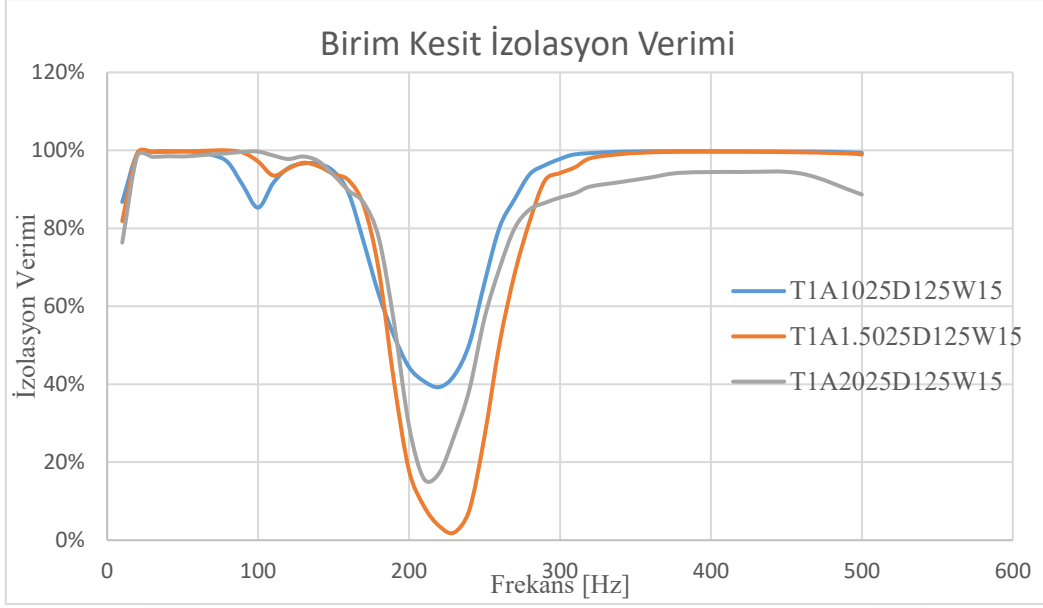


Şekil 3.39 Harmonik analiz birim kesit alanı izolasyon verimi

Rastlantısal frekans yanıtları ve yüzdelerik izolasyon verimi Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de paylaşılmıştır. Rastlantısal analizde tüm yapılar oluşan titreşimleri sönmülemiştir. 1 mm² kesit alanı için ekipmana iletilen maksimum ivme 220 Hz’de 0,006 G²/Hz’dir. Ortalama izolasyon verimi %85’tir. 1,5 mm² kesit alanı için ekipmana iletilen maksimum ivme 230 Hz’de 0,0098 G²/Hz’dir. Ortalama izolasyon verimi %79’tir. 2 mm² kesit alanı için ekipmana iletilen maksimum ivme 210 Hz’de 0,0085 G²/Hz’dir. Ortalama izolasyon verimi %81’tir.



Şekil 3.40 Rastlantısal analiz birim kesit değerleri

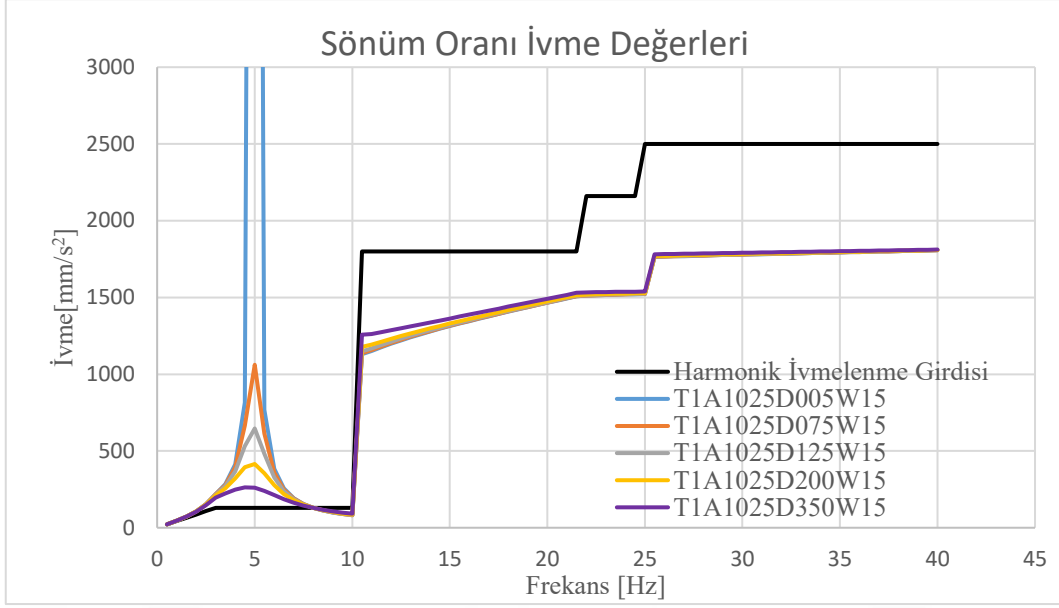


Şekil 3.41 Rastlantısal analiz birim kesit alanı izolasyon verimi

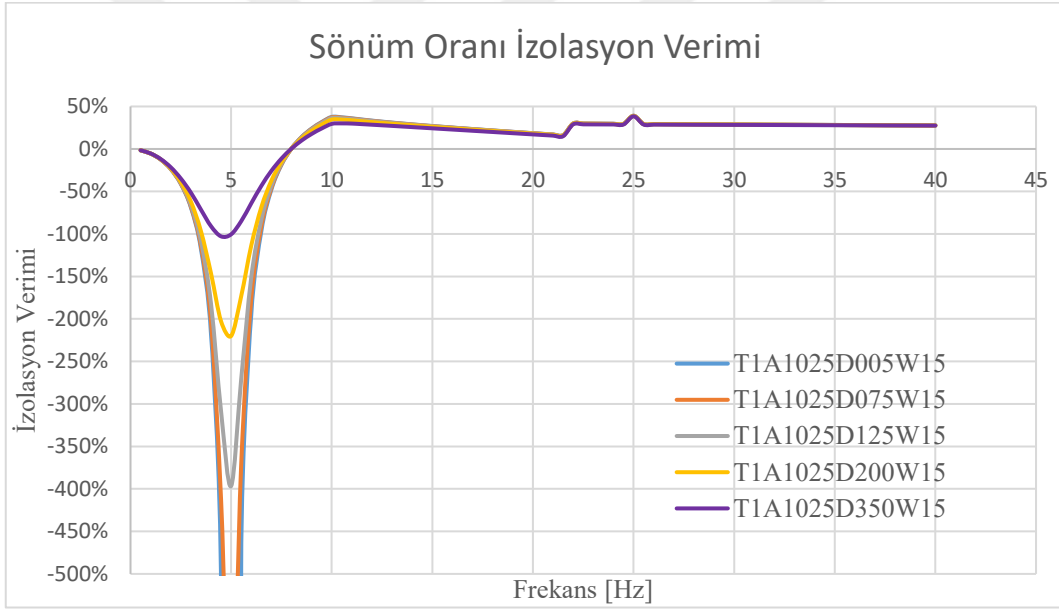
3.6.4 Yapı Sönümleme Oranı

Yapı sönümleme oranında, analizlerde sönümleme oranı olarak 0.005, 0.075, 0.125, 0.200 ve 0.350 olarak alınarak izolasyon verimi hesaplanmıştır. Yapının kütlelerinin çoğunluğunun y ekseninde hareket ettiği dördüncü frekans 4.99 Hz'dir.

Harmonik frekans yanıtları ve yüzdelerik izolasyon verimi Şekil 3.42 ve Şekil 3.43'te paylaşılmıştır. Harmonik analizde tüm frekanslarda 0.005 sönüm oranı için izolasyon verimi -%145, 0.075 için -%7, 0.125 için %1, 0.200 için %6 ve 0.350 için %12'dir. Tüm yapı türleri 8 Hz'den itibaren izolasyon yapmaktadır. 8 Hz'den 40 Hz'e kadar 0.005, 0.075, 0.125 ve 0.200 için ortalama izolasyon verimi %27, 0.350 için ortalama izolasyon verimi %26'dır.



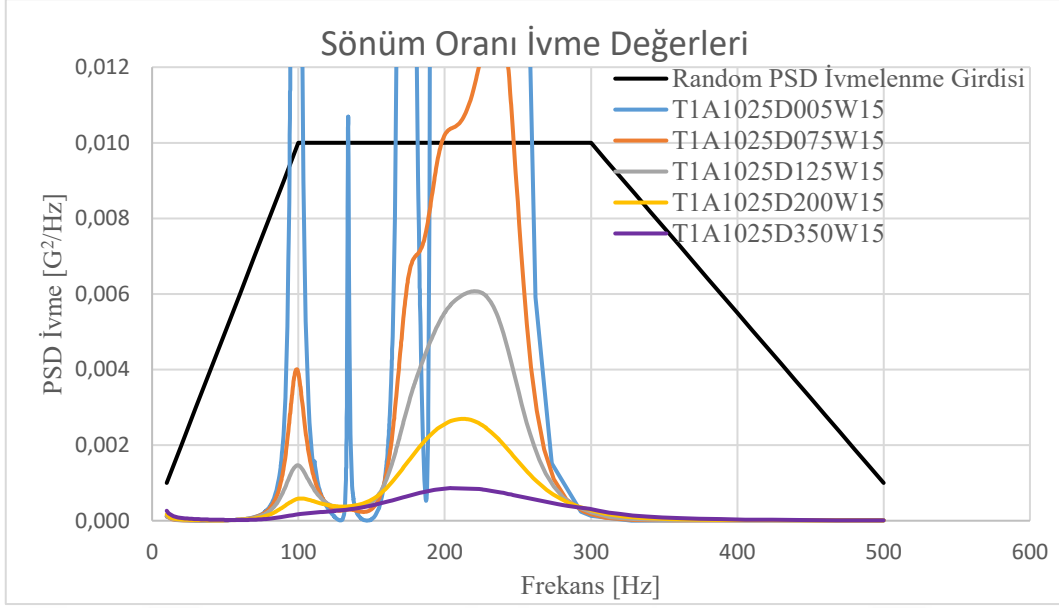
Şekil 3.42 Harmonik analiz sönüm oranı değerleri



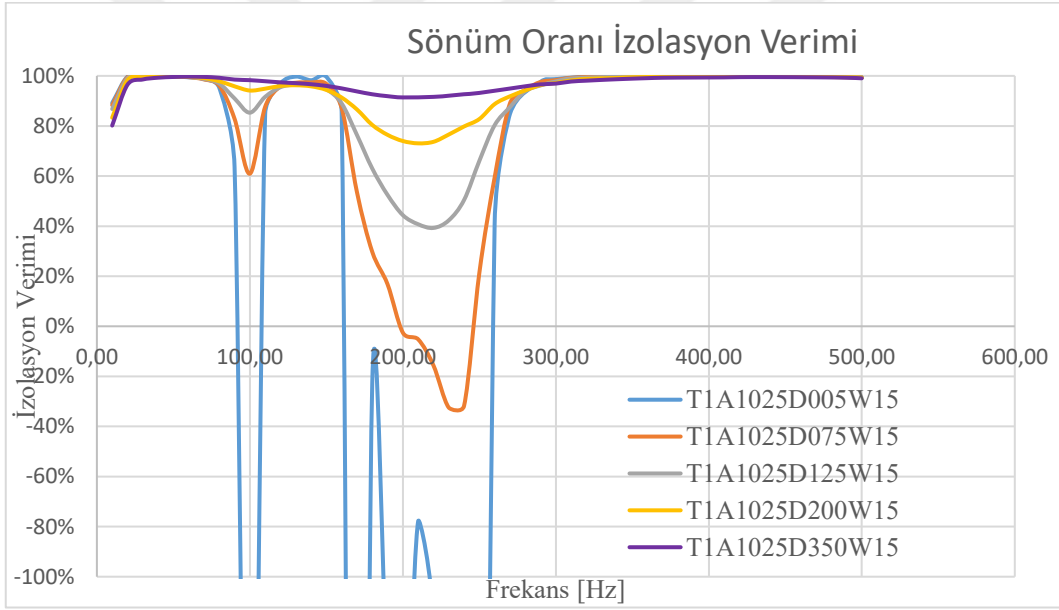
Şekil 3.43 Harmonik analiz sönüm oranı izolasyon verimi

Rastlantısal frekans yanıtları ve yüzdelerik izolasyon verimi Şekil 3.44 ve Şekil 3.45’de paylaşılmıştır. Rastlantısal analizde Y eksenindeki diğer büyük kütlelerin hareket ettiği 90-100 Hz ve 170-270 Hz aralığında tüm yapı türlerinde izolasyon verimi azalmıştır. 0.005 için tüm frekansların ortalama izolasyon verimi -%106, 0.075 için %72, 0.125 için %85, 0.200 için %92 ve 0.350 için %97’dir.

0.005 sönüm oranında harmonik ve rastlantısal analizlerde ivmeler sonsuza gitmektedir.



Şekil 3.44 Rastlantısal analiz sönüm oranı değerleri

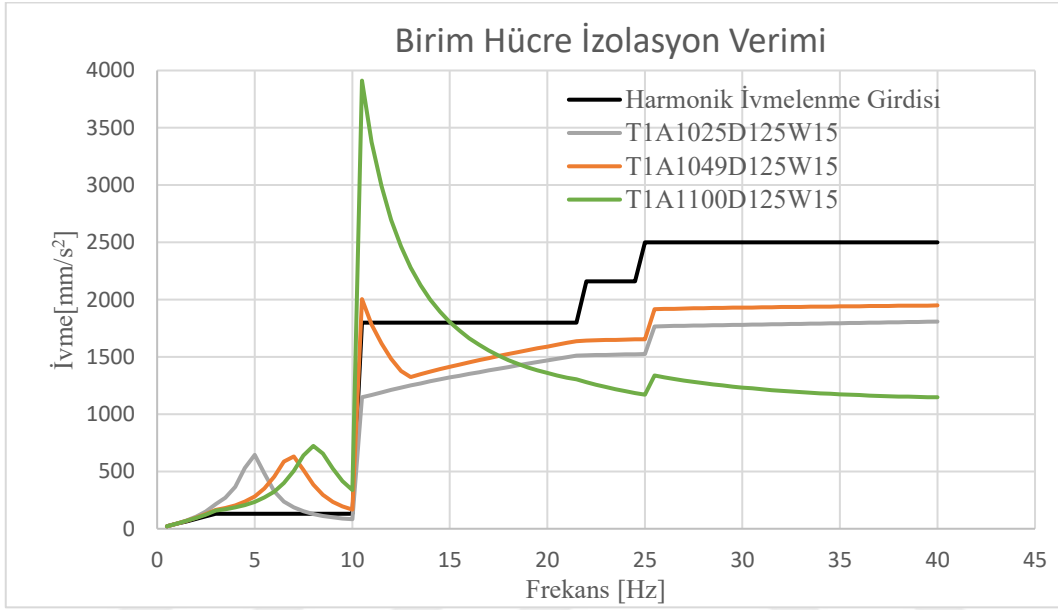


Şekil 3.45 Rastlantısal analiz sönüm oranı izolasyon verimi

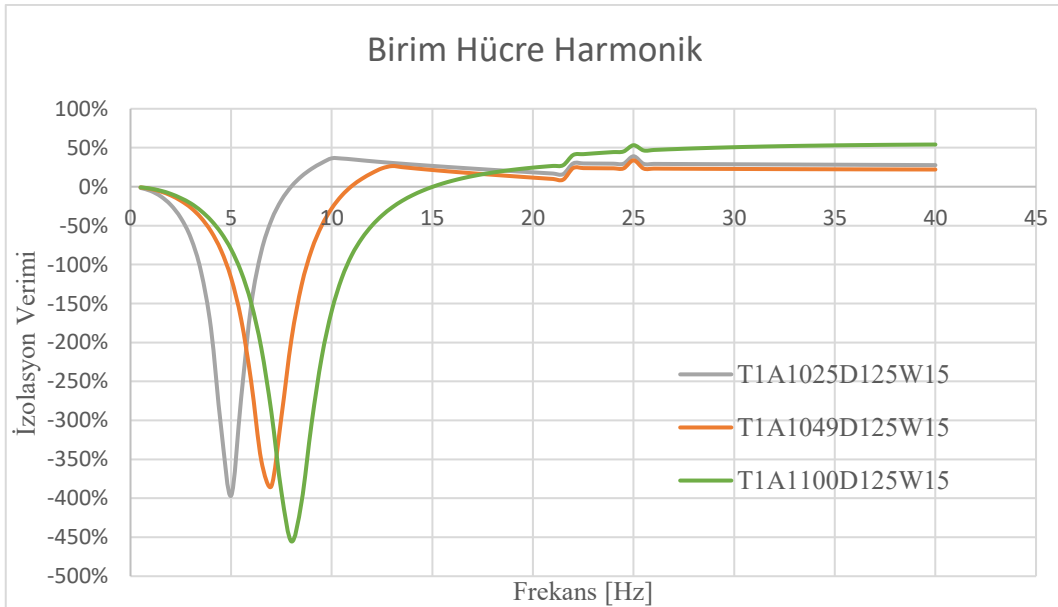
3.6.5 Birim Hücre Sayısı

Birim hücre sayısında her katta 25, 49 ve 100 birim hücreye sahip yapılar oluşturulmuştur. Her katta 25 birim hücreye sahip yapının kütlelerinin çoğunluğunun y ekseninde hareket ettiği frekans 4.99 Hz, 49 birim hücreye sahip olan yapıda 7 Hz ve 100 birim hücreye sahip olan yapıda ise 8 Hz'dir. Yapının ağırlığı sırasıyla 95 gram, 104 gram ve 145 gramdır.

Harmonik frekans yanıtları ve yüzdelik izolasyon verimi Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de paylaşılmıştır. Harmonik analizde tüm frekanslarda 25 birim hücre için izolasyon verimi %1, 49 birim hücre için izolasyon verimi -%14 ve 100 birim hücre için -%16’dır. 25 birim hücrenin 8 Hz’den 40 Hz’e kadar izolasyon verim ortalaması %27, 49birim hücrenin 11 Hz’den 40 Hz’e kadar izolasyon verim ortalaması %21 ve 100 birim hücrenin 15 Hz’den 40 Hz izolasyon ortalaması %41’dir.



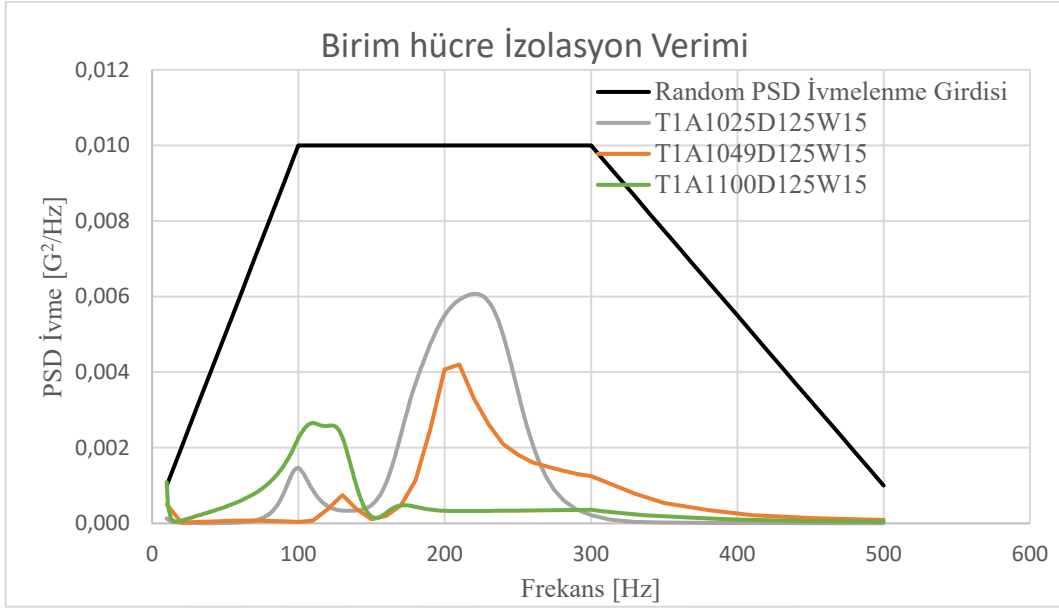
Şekil 3.46 Harmonik analiz birim hücre değerleri



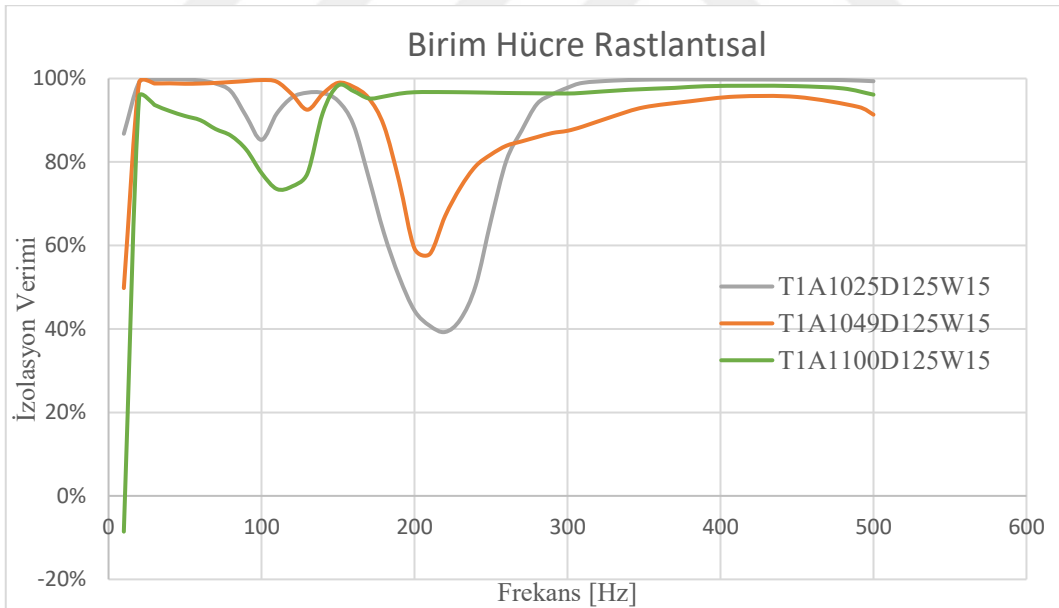
Şekil 3.47 Harmonik analiz birim hücre izolasyon verimi

Rastlantısal frekans yanıtları ve yüzdelik izolasyon verimi Şekil 3.48 ve Şekil 3.49’da paylaşılmıştır. Rastlantısal analizde 25 birim hücreye ve 49 birim hücreye

sahip yapılar tüm frekanslarda izolasyon yapmaktadır. Ortalamaları sırasıyla %85 ve %89'dur. 100 birim hücreye sahip yapı 10-11 Hz aralığında izolasyon yapamamaktadır. Tüm frekanslar boyunca ortalama izolasyon verimi %90'dır.



Şekil 3.48 Rastlantısal analiz birim hücre değerleri

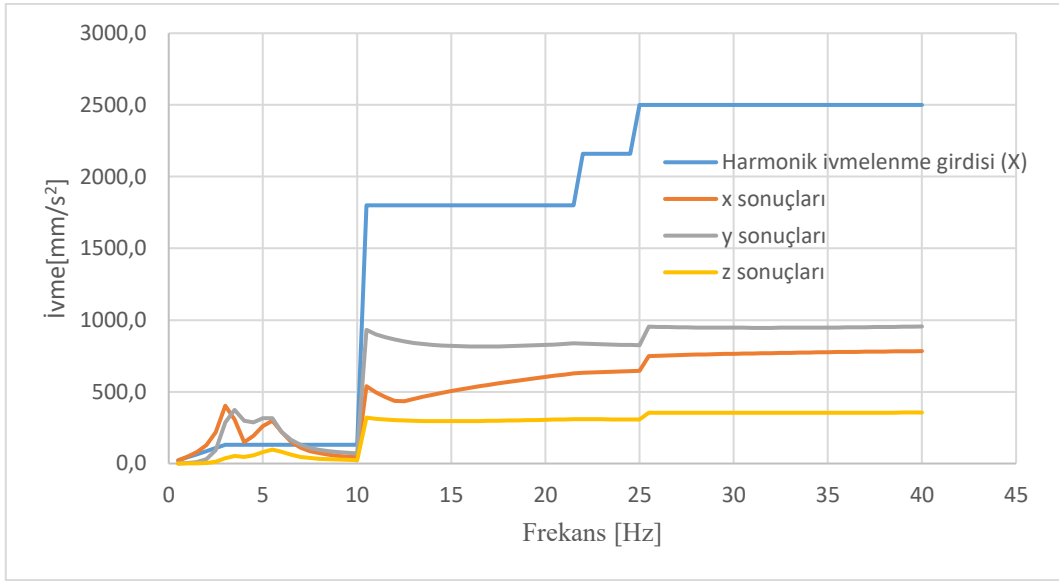


Şekil 3.49 Rastlantısal analiz birim hücre izolasyon verimi

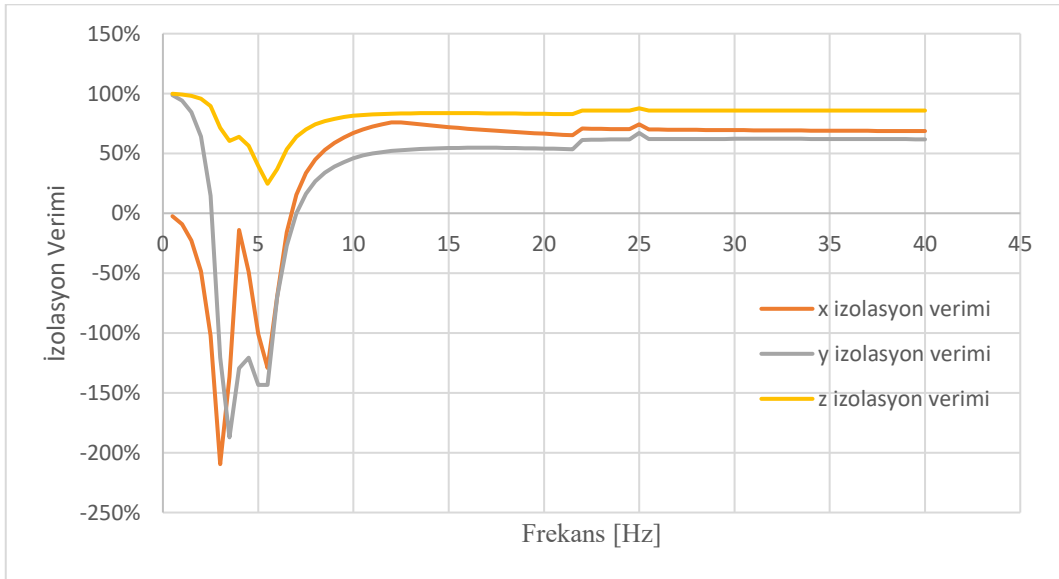
3.6.7 T1A1025D125W15 Yapının Diğer Eksenlerdeki Performansı

Hava araçlarında, gerçekleştirilen uçuş zarfına veya ekipman montaj konumuna göre durumlar sonucundan yapı diğer eksenlerde titreşimde gelebilmektedir.

Harmonik analizde yapıya x yönünde ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.50’de ve izolasyon verimi Şekil 3.51’de gösterilmiştir. X ekseninde kütlelerin çoğu 3.24 Hz ve 5.54 Hz’de uyarılmaktadır. Üst plaka x ekseninde 7 Hz’den itibaren yapı izolasyon yapabilmektedir. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %68’dir. Y ekseninde 3-7 Hz aralığı haricinde izolasyon yapmaktadır. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %58’dir. Z ekseninde tüm frekanslarda izolasyon yapmaktadır. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %81’dir.

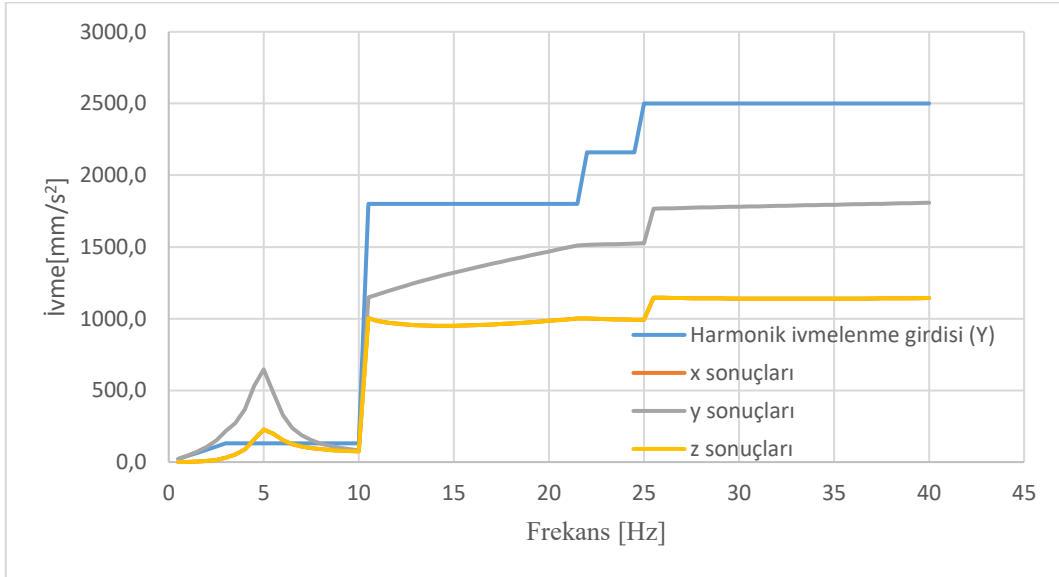


Şekil 3.50 X ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları

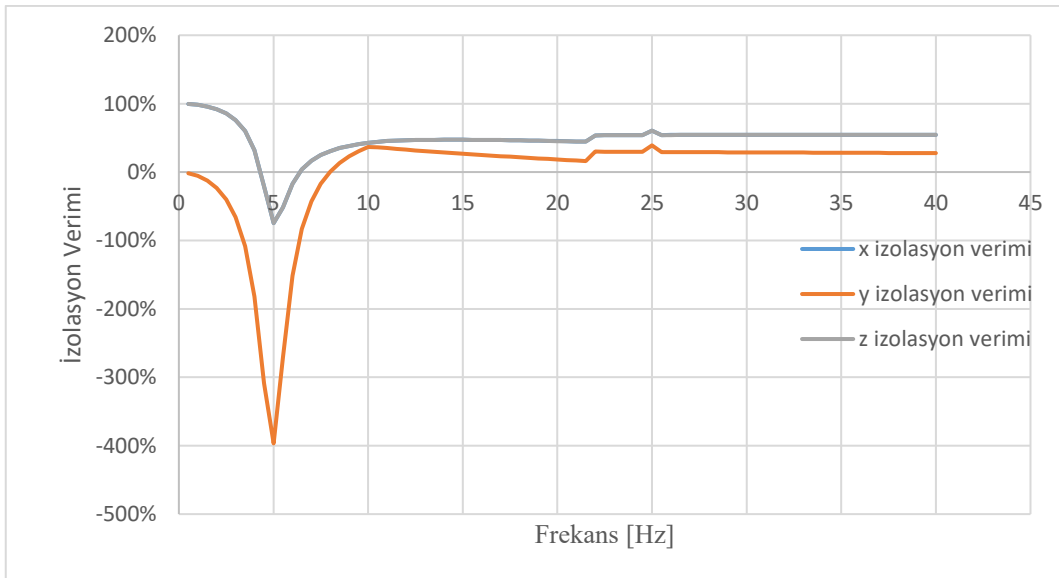


Şekil 3.51 X ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri

Harmonik analizde yapıya y yönünde ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.52’de ve izolasyon verimi Şekil 3.53’te gösterilmiştir. Y ekseninde kütlelerin çoğu 4.99 Hz’de uyarılmaktadır. Üst plaka x ve z ekseninde 4.5 Hz ve 6 Hz haricinde itibaren yapı izolasyon yapabilmektedir. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %52’dir. Y ekseninde 7.5 Hz’den sonra izolasyon yapmaktadır. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %27’dir.



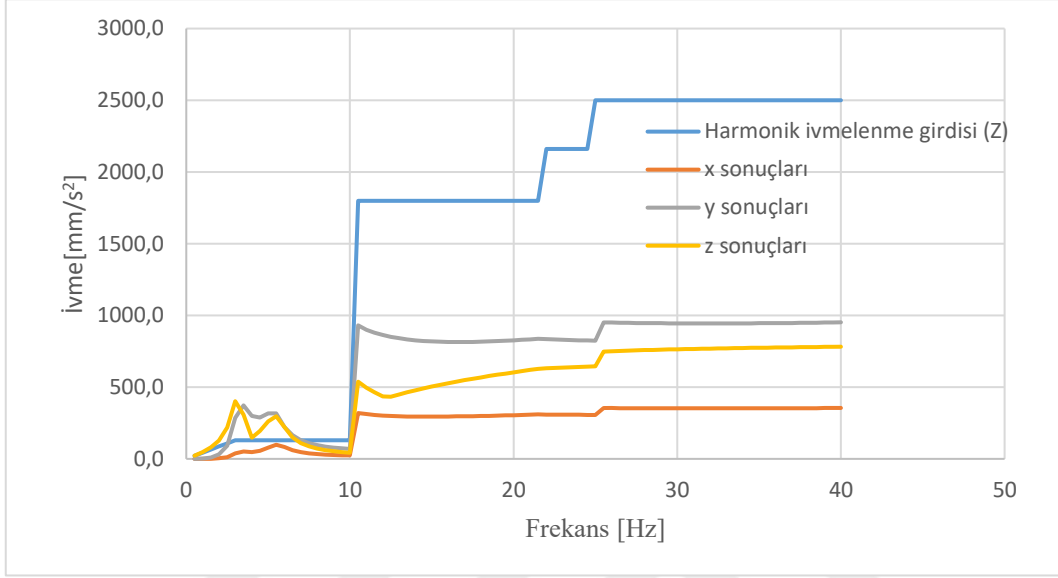
Şekil 3.52 Y ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları



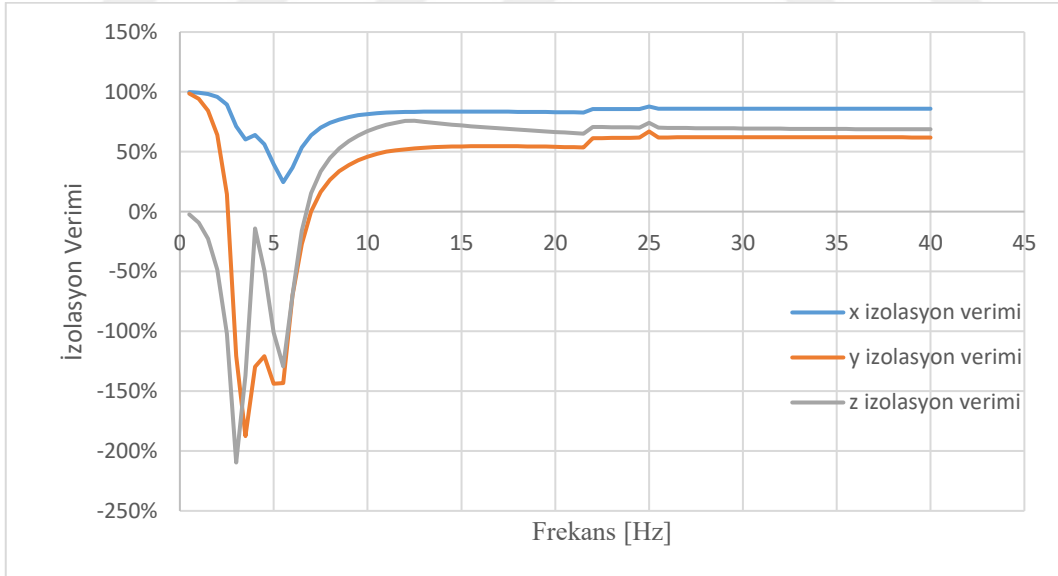
Şekil 3.53 Y ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri

Harmonik analizde yapıya z yönünde ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.54’te ve izolasyon verimi Şekil 3.55’te gösterilmiştir. Z ekseninde kütlelerin çoğu 3.24 Hz ve 5.54 Hz’de uyarılmaktadır. Üst plaka x ekseninde tüm frekanslarda

izolasyon yapabilmektedir. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %81'dir. Y ekseninde 3-7 Hz aralığı haricinde izolasyon yapmaktadır. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %58'dur. Z ekseninde 7 Hz'den itibaren yapı izolasyon yapabilmektedir. İzolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %68'dir.

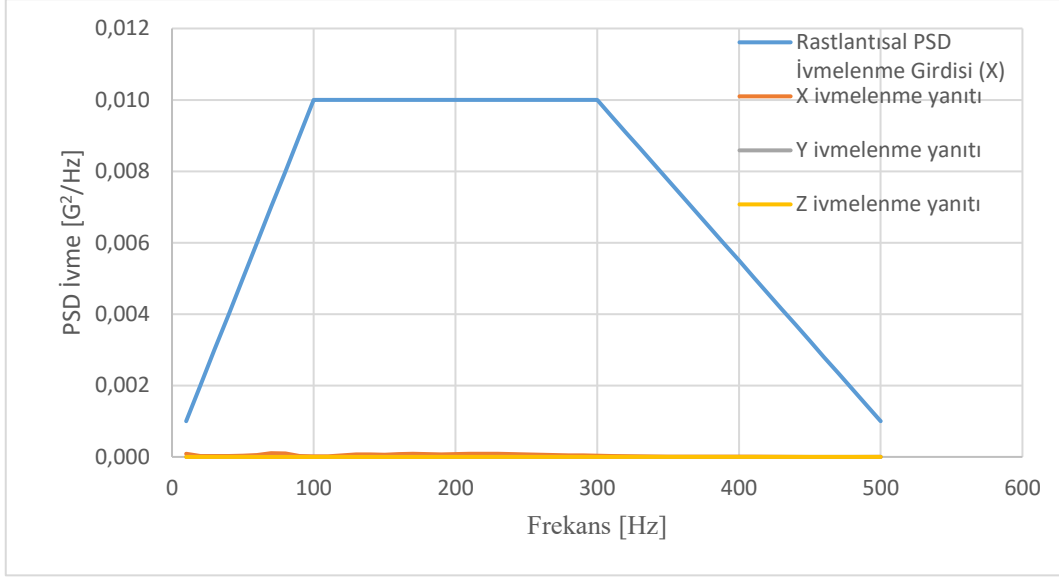


Şekil 3.54 Z ekseninde uygulanan harmonik ivme sonuçları

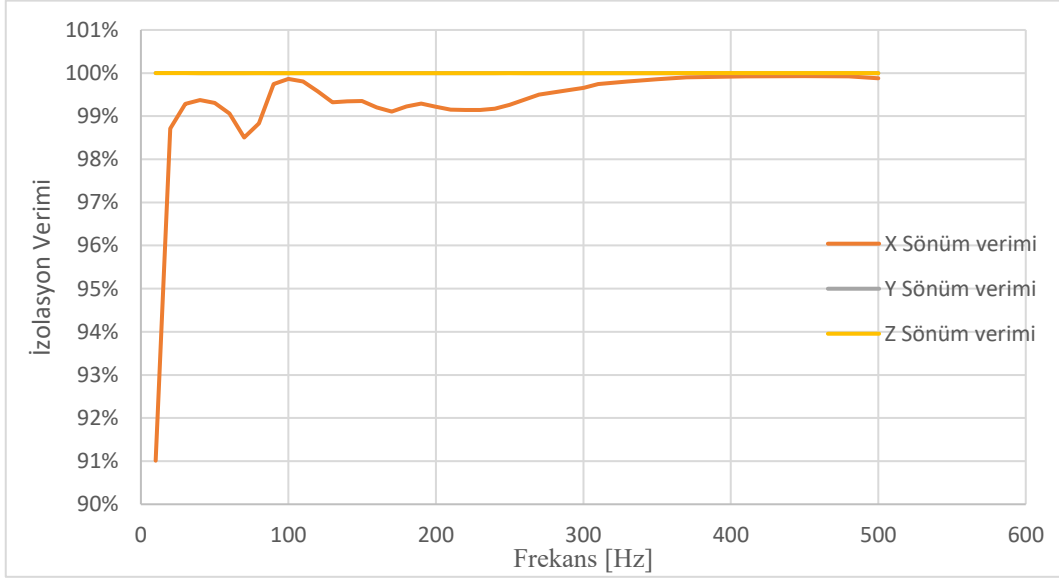


Şekil 3.55 Z ekseninde uygulanan harmonik ivme izolasyon verimleri

Rastlantısal analizde yapıya x yönünde PSD ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.56'da ve izolasyon verimi Şekil 3.57'de gösterilmiştir. Yapı z ve y yönündeki ivmeleri tüm frekanslarda %100 sönümlenmektedir. X eksenindeki ivmelerde tüm frekanslarda ortalama izolasyon verimi %99'dur.

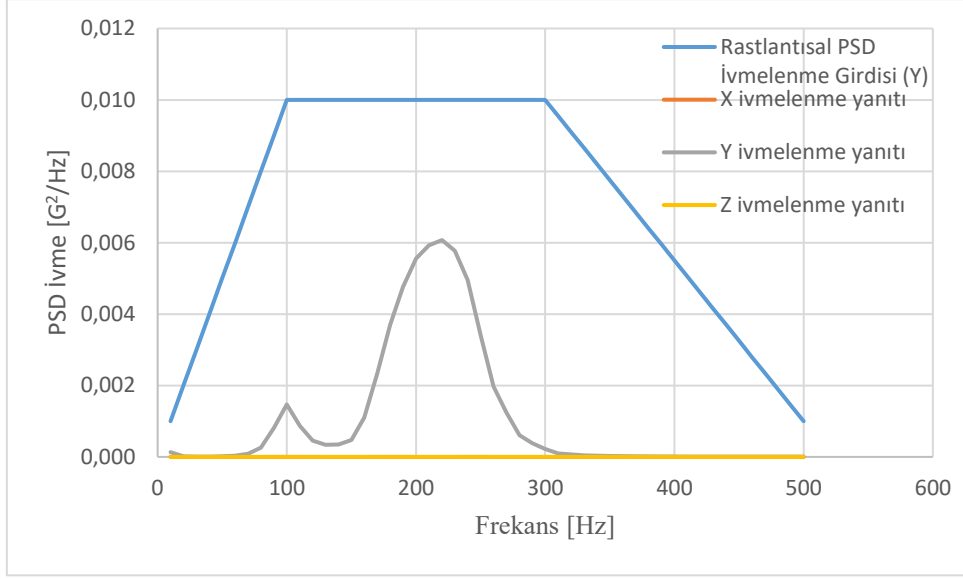


Şekil 3.56 X ekseninde uygulanan rastlantısal ivme sonuçları

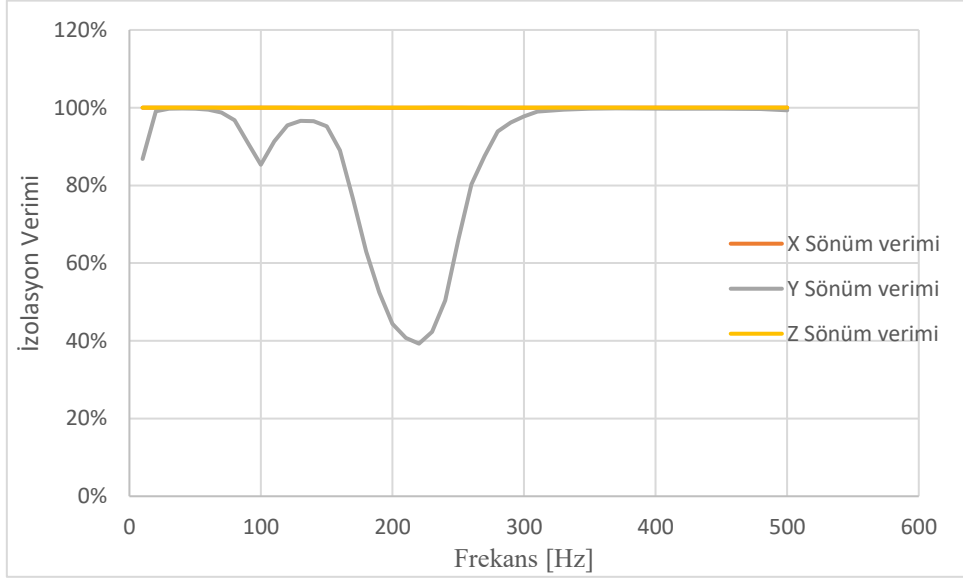


Şekil 3.57 X ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri

Rastlantısal analizde yapıya y yönünde PSD ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.58'te ve izolasyon verimi Şekil 3.59'te gösterilmiştir. Yapı x ve z yönündeki ivmeleri tüm frekanslarda %100 sönümlenmektedir. Y eksenindeki ivmelerde tüm frekanslarda ortalama izolasyon verimi %85'tir.

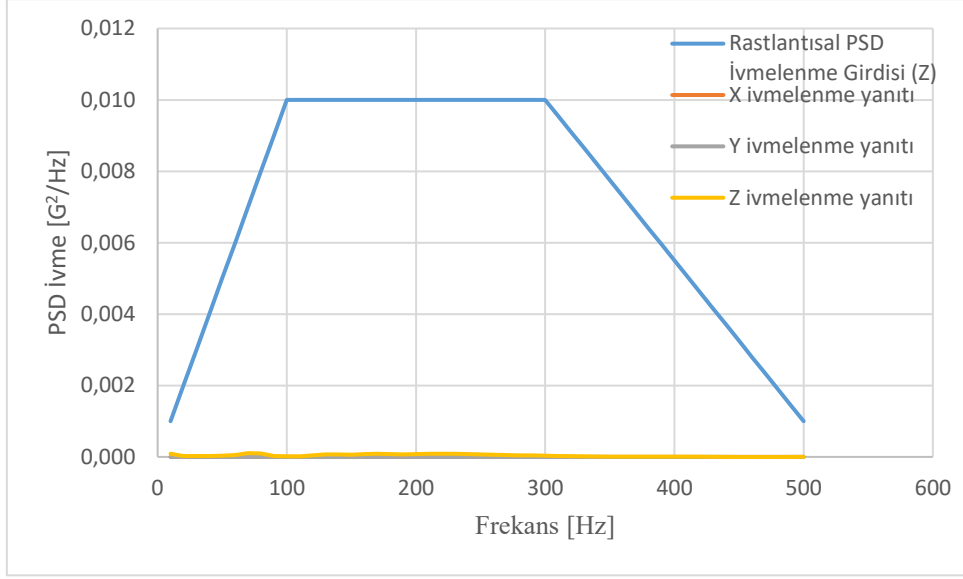


Şekil 3.58 Y ekseninde uygulanan rastlantısal ivme Sonuçları

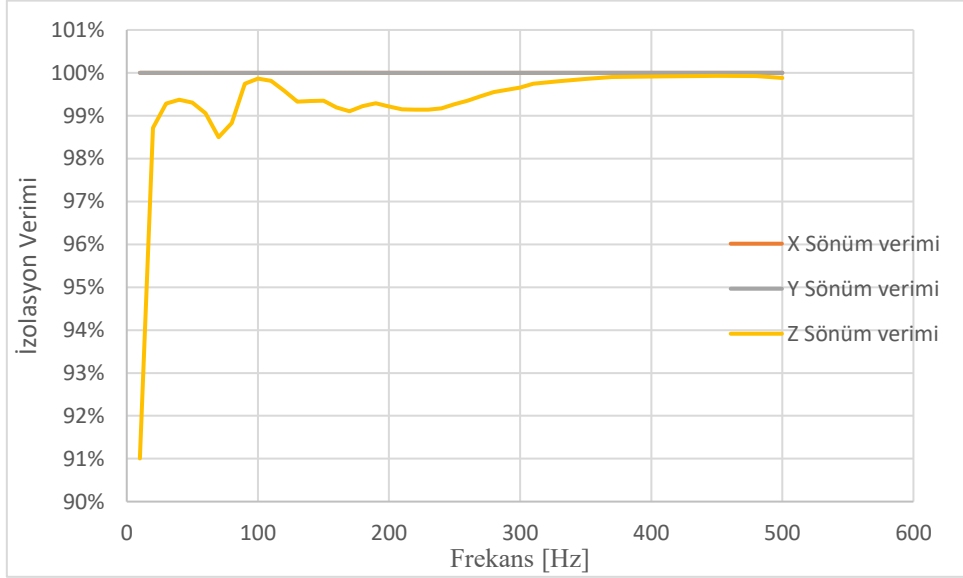


Şekil 3.59 Y ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri

Rastlantısal analizde yapıya z yönünde PSD ivme uygulandığında üst plaka ivme değerleri Şekil 3.60'da ve izolasyon verimi Şekil 3.61'de gösterilmiştir. Yapı x ve y yönündeki ivmeleri tüm frekanslarda %100 sönümlenmektedir. Z eksenindeki ivmelerde tüm frekanslarda ortalama izolasyon verimi %99'dur.



Şekil 3.60 Z ekseninde uygulanan rastlantısal ivme sonuçları



Şekil 3.61 Z ekseninde uygulanan rastlantısal ivme izolasyon verimleri

Tez kapsamında, negatif poisson oranına sahip birim hücrelerden oluşan yapıların havacılıkta kullanan MIL-STD-810H standardı referans alınarak AH-1 helikopterinde aviyonik ekipmanlarda meydana gelen harmonik ve rastlantısal titreşimleri sönümlenme performansı araştırılmıştır. Tasarımlar Catia analizler ise Ansys programında yapılmıştır. İlk olarak yaygın olarak kullanılan iki farklı oksetik hücre iki boyutlu olarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Ardından en iyi performansa sahip iki boyutlu hücre üç boyutlu modellenmiştir. Üç boyutlu modelin, üstündeki ekipman kütlesine, üst plaka kalınlığına birim hücre kesit alanına, yapı sönümlenme oranına ve birim hücre sayısına göre izolasyon verimleri araştırılmıştır.

Oksetik yapılarda yaygın olarak kullanılan üçgen yapı ve ok kafalı yapı iki boyutlu analiz sonuçlarına göre üçgen yapının izolasyon performansı daha iyi çıkmıştır. Üçgen yapı harmonik analizde 12 Hz - 40 Hz aralığında %75 izolasyon verimine sahipken rastlantısal analizde ekipmana 10-12 Hz aralığında iletilen ivme 2 kat artmıştır. 12Hz - 500 Hz aralığında ekipman rastlantısal analizlerin hepsini sönümlenmektedir.

Üçgen yapı üç boyutlu modellenerek parametre ve izolasyon değerleri incelenmiştir. Birim hücre kesit alanı 1 mm², 1.5 mm² ve 2 mm² olarak seçilmiştir. Yapıda bulunan birim hücrelerin kesit alanı artırıldığında yapının rijitliği de yaklaşık aynı oranda artmıştır. Yapıda bulunan birim hücre sayısı 100 birim, 49 birim ve 25 birim olarak seçilmiştir. Birim hücre sayısı azaldıkça rijitlikte azalmıştır.

Ekipman kütlesi 2 kg, 5kg, 10kg ve 15 kg olarak seçilmiştir. Ekipman kütlesi arttıkça harmonik analizin tüm frekanslarında ve sönüm yaptığı frekanslarda ortalama izolasyon verimi artmıştır. Kütle arttıkça daha düşük frekanslarda sönüm elde edilmiştir. Kütle arttıkça rastlantısal analiz frekanslarında ortalama izolasyon verimi artmıştır. 15 kg ekipman ağırlığına sahip yapı harmonik analizde 8 Hz-40

Hz aralığında %27, rastlantısal analizde tüm frekanslarda %85 izolasyon verimine sahip en iyi tasarım olmuştur.

Plaka kalınlığı olarak 1 mm, 2 mm ve 4 mm seçilmiştir. Harmonik analizin tüm frekanslarında ve sönüm yaptığı frekanslarda plaka kalınlığına göre izolasyon veriminde bir ilişki yoktur. Plaka kalınlığı arttıkça sönüm yapılan frekans aralığı azalmıştır. Harmonik analizde en iyi performansı 4 mm plaka kalınlığı sahip yapı ortalama %33 izolasyon verimi 9,5 Hz-40 Hz aralığında ile gerçekleştirmektedir. En geniş sönümleme frekansına sahip yapı ise 8 Hz-40Hz aralığında %27 izolasyon verimi ile 1 mm plaka kalınlığına sahip yapı olmuştur. Rastlantısal analizde plaka kalınlığı ile bir ilişkiye rastlanmamıştır. Tüm frekanslarda ortalama %85 verim ile en iyi performansa sahip yapı 1 mm plaka kalınlığında yapı olmuştur.

Birim hücredeki kesit alanı 1 mm², 1,5 mm² ve 2 mm² olarak seçilmiştir. Harmonik analizin tüm frekanslarında ve sönüm yaptığı frekanslarda kesit alanı arttıkça ortalama izolasyon verimi azalmıştır. Birim kesit alanı arttıkça sönüm yapılan frekans aralığı azalmıştır. Rastlantısal analizde birim kesit alanı ile izolasyon verimi arasında bir ilişkiye rastlanmamıştır. Tüm frekanslarda ortalama %85 verim ile en iyi performansa sahip yapı 1 mm² kesit alanına sahip yapı olmuştur.

Sönümleme oranları 0.005, 0.075, 0.125, 0.200 ve 0.350 olarak seçilmiştir. Harmonik analizlerde tüm frekanslardaki ortalama izolasyon verimi sönümleme oranı arttıkça artmıştır. İzolasyon yapılan frekansların genişliği sabit kalmıştır. 0.350 değeri için izolasyon yapılan frekanslarda ortalama izolasyon verimi %26 iken diğer tüm sönüm oranı değerleri için %26 olmuştur. Rastlantısal analizde sönüm oranı arttıkça tüm frekanslardaki ortalama izolasyon verimi artmıştır. En yüksek izolasyon verimi %97 ile 0.350 sönüm oranı için olmuştur.

Birim hücre sayısında her katta 25, 49 ve 100 birim hücre olarak seçilmiştir. Harmonik analizde en düşük frekansta izolasyonu her katta 25 birim hücreye sahip yapı yapmaktadır. 8 Hz - 40 Hz aralığında izolasyon yapmaktadır. Tüm frekanslardaki ortalama izolasyon verimi daha iyidir. Rastlantısal analizde de tüm frekanslarda izolasyon yapabilmektedir fakat 100 birim hücreye sahip yapının ortalama izolasyon verimi daha iyidir.

Yapıya farklı eksenlerde aynı titreşim seviyesi uygulanmıştır. Harmonik analizde titreşim x ekseninde uyguladığında x yönünde 7Hz -40 Hz aralığında ortalama %68,

y yönünde 3Hz – 7 Hz aralığı dışında ortalama %58, z yönünde ise 0 Hz – 40 Hz aralığında tüm frekanslarda ortalama %81 izolasyon verimine sahiptir. Yapı simetrik olduğu için titreşim z yönünde uygulandığında, x yönünde ise 0 Hz – 40 Hz aralığında tüm frekanslarda ortalama %81, y yönünde 3Hz – 7 Hz aralığı dışında ortalama %58 ve z yönünde 7Hz -40 Hz aralığında ortalama %68 izolasyon verimine sahiptir. Titreşim y yönünde uygulandığında x ve z ekseninde 4.5 Hz ve 6 Hz haricinde ortalama %52 ve y ekseninde 8 Hz- 40 Hz aralığında %27 izolasyon verimine sahiptir. Rastlantısal analizlerde 10 Hz – 500 Hz aralığında tüm eksenlerdeki titreşimlerde izolasyon yapılabilmektedir. Sadece titreşim y ekseninden uygulandığında y yönündeki izolasyon verimi %85'tir.

İlerleyen araştırmalarda, helikopterin farklı bölgelerindeki sönüm performansları, yapı montaj edilebilirliği ve tasarımların deneysel olarak doğrulanması üzerine çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Harmonik Frekans	Harmonik Frekans Yanıtı	Harmonik Sönüm verimi (%)	Rastlantsal Frekans	Rastlantsal Frekans Yanıtı	Rastlantsal Frekans Yuvarlama	Rastlantsal Frekans Benzersiz	Rastlantsal Frekans Yanıtı (Benzersiz)	Rastlantsal Sönüm Verimi (%)
0,5	21,93	-2%	10	1,32E-04	10	10	1,32E-04	87%
1	45,53	-5%	10,45	1,12E-04	10	20	1,87E-05	99%
1,5	72,8	-12%	13,5	4,82E-05	10	30	8,77E-06	100%
2	106,6	-23%	16,56	2,77E-05	20	40	8,35E-06	100%
2,5	151,4	-40%	19,61	1,87E-05	20	50	1,26E-05	100%
3	215,7	-66%	22,67	1,40E-05	20	60	2,81E-05	100%
3,5	270,9	-108%	25,72	1,14E-05	30	70	8,47E-05	99%
4	366,7	-182%	28,78	9,74E-06	30	80	2,46E-04	97%
4,5	531,3	-309%	31,83	8,77E-06	30	90	8,13E-04	91%
5	645,7	-397%	34,89	8,26E-06	30	100	1,47E-03	85%
5,5	482,4	-271%	37,8	8,14E-06	40	110	8,38E-04	92%
6	326,7	-151%	40,53	8,35E-06	40	120	4,53E-04	95%
6,5	238,3	-83%	43,01	8,84E-06	40	130	3,38E-04	97%
7	186	-43%	45,24	9,57E-06	50	140	3,46E-04	97%
7,5	152,4	-17%	47,21	1,05E-05	50	150	5,36E-04	95%
8	129,3	1%	48,92	1,15E-05	50	160	1,10E-03	89%
8,5	112,7	13%	50,38	1,26E-05	50	170	2,36E-03	76%
9	100,1	23%	51,63	1,37E-05	50	180	3,70E-03	63%
9,5	90,38	30%	52,67	1,48E-05	50	190	4,76E-03	52%
10	82,65	36%	53,54	1,58E-05	50	200	5,56E-03	44%
10,5	1149	36%	54,26	1,68E-05	50	210	5,93E-03	41%
11	1168	35%	54,85	1,76E-05	50	220	6,07E-03	39%
11,5	1190	34%	55,33	1,83E-05	60	230	5,77E-03	42%
12	1212	33%	55,73	1,89E-05	60	240	4,96E-03	50%
12,5	1232	32%	56,05	1,95E-05	60	250	3,39E-03	66%
13	1251	31%	56,31	1,99E-05	60	260	1,97E-03	80%
13,5	1269	29%	56,53	2,03E-05	60	270	1,25E-03	88%
14	1287	29%	57,41	2,19E-05	60	280	6,12E-04	94%
14,5	1304	28%	57,78	2,27E-05	60	290	3,82E-04	96%
15	1320	27%	58,31	2,38E-05	60	300	2,21E-04	98%
15,5	1336	26%	58,53	2,43E-05	60	310	9,85E-05	99%
16	1352	25%	58,8	2,49E-05	60	330	4,31E-05	100%
16,5	1367	24%	59,14	2,57E-05	60	350	2,18E-05	100%
17	1382	23%	59,56	2,67E-05	60	370	1,45E-05	100%
17,5	1397	22%	60,09	2,81E-05	60	410	1,14E-05	100%
18	1412	22%	60,75	2,99E-05	60	450	9,08E-06	100%
18,5	1426	21%	60,78	3,00E-05	60	480	7,12E-06	100%
19	1440	20%	61,56	3,24E-05	60	500	6,42E-06	99%
19,5	1455	19%	62,58	3,58E-05	60			
20	1469	18%	63,42	3,90E-05	60			
20,5	1483	18%	63,84	4,07E-05	60			
21	1496	17%	65,42	4,78E-05	70			
21,5	1510	16%	65,72	4,93E-05	70			

22	1515	30%	67,37	5,87E-05	70			
22,5	1516	30%	67,69	6,07E-05	70			
23	1518	30%	69,36	7,27E-05	70			
23,5	1520	30%	69,81	7,64E-05	70			
24	1522	30%	70,76	8,47E-05	70			
24,5	1523	29%	71,92	9,65E-05	70			
25	1525	39%	72,85	1,07E-04	70			
25,5	1767	29%	72,89	1,07E-04	70			
26	1768	29%	73,69	1,18E-04	70			
26,5	1770	29%	74,34	1,27E-04	70			
27	1772	29%	74,87	1,35E-04	70			
27,5	1773	29%	75,3	1,41E-04	80			
28	1775	29%	75,65	1,47E-04	80			
28,5	1776	29%	75,94	1,52E-04	80			
29	1778	29%	76,63	1,65E-04	80			
29,5	1779	29%	77,13	1,75E-04	80			
30	1781	29%	77,74	1,88E-04	80			
30,5	1782	29%	77,92	1,92E-04	80			
31	1783	29%	78,61	2,08E-04	80			
31,5	1785	29%	78,95	2,17E-04	80			
32	1786	29%	79,18	2,23E-04	80			
32,5	1788	29%	79,25	2,25E-04	80			
33	1789	28%	79,62	2,35E-04	80			
33,5	1790	28%	79,63	2,35E-04	80			
34	1792	28%	80	2,46E-04	80			
34,5	1793	28%	80,08	2,48E-04	80			
35	1794	28%	80,31	2,55E-04	80			
35,5	1796	28%	80,65	2,65E-04	80			
36	1797	28%	81,37	2,89E-04	80			
36,5	1798	28%	81,56	2,96E-04	80			
37	1800	28%	82,04	3,14E-04	80			
37,5	1801	28%	82,84	3,45E-04	80			
38	1803	28%	83,14	3,58E-04	80			
38,5	1804	28%	83,15	3,59E-04	80			
39	1805	28%	83,54	3,76E-04	80			
39,5	1807	28%	84,02	3,99E-04	80			
40	1808	28%	84,05	4,00E-04	80			
			84,62	4,29E-04	80			
			84,79	4,38E-04	80			
			85,37	4,69E-04	90			
			85,4	4,71E-04	90			
			85,89	5,00E-04	90			
			86,29	5,24E-04	90			
			86,3	5,25E-04	90			
			86,62	5,45E-04	90			

		87.46	6.02E-04	90			
		87.97	6.39E-04	90			
		87.98	6.40E-04	90			
		89.14	7.30E-04	90			
		89.35	7.48E-04	90			
		89.69	7.76E-04	90			
		90.11	8.12E-04	90			
		90.11	8.13E-04	90			
		90.63	8.59E-04	90			
		90.91	8.84E-04	90			
		91.28	9.18E-04	90			
		91.56	9.44E-04	90			
		92.09	9.93E-04	90			
		92.09	9.94E-04	90			
		92.52	1.03E-03	90			
		92.87	1.07E-03	90			
		93.09	1.09E-03	90			
		94.32	1.20E-03	90			
		94.36	1.20E-03	90			
		94.71	1.23E-03	90			
		95.84	1.32E-03	100			
		96.19	1.35E-03	100			
		96.58	1.37E-03	100			
		96.95	1.39E-03	100			
		97.69	1.43E-03	100			
		98.06	1.44E-03	100			
		98.46	1.45E-03	100			
		98.99	1.46E-03	100			
		99.45	1.47E-03	100			
		99.82	1.47E-03	100			
		100	1.47E-03	100			
		100	1.47E-03	100			
		100.4	1.46E-03	100			
		100.9	1.45E-03	100			
		101.4	1.43E-03	100			
		101.4	1.43E-03	100			
		101.5	1.42E-03	100			
		103	1.34E-03	100			
		103.2	1.33E-03	100			
		103.4	1.32E-03	100			
		103.9	1.29E-03	100			
		104.5	1.25E-03	100			
		104.5	1.24E-03	100			
		105.2	1.20E-03	110			
		105.7	1.16E-03	110			

			106.1	1.13E-03	110			
			106.6	1.10E-03	110			
			107.3	1.05E-03	110			
			107.4	1.04E-03	110			
			108	9.99E-04	110			
			108,5	9.65E-04	110			
			108,7	9.50E-04	110			
			108,9	9.38E-04	110			
			110.5	8.38E-04	110			
			110.6	8.32E-04	110			
			111,2	8,01E-04	110			
			112	7.57E-04	110			
			112,4	7,37E-04	110			
			112.6	7.24E-04	110			
			112,8	7,15E-04	110			
			113.1	6.98E-04	110			
			113.3	6.90E-04	110			
			113,6	6,78E-04	110			
			114	6.59E-04	110			
			114,8	6,24E-04	110			
			115,3	6,02E-04	120			
			115,4	5,99E-04	120			
			116.6	5.54E-04	120			
			117,8	5,16E-04	120			
			118.4	4.97E-04	120			
			118.9	4.84E-04	120			
			119,1	4,79E-04	120			
			119,4	4,69E-04	120			
			120,1	4,53E-04	120			
			120,1	4,53E-04	120			
			121	4,34E-04	120			
			121	4,34E-04	120			
			121,7	4,20E-04	120			
			122,1	4,13E-04	120			
			122,2	4,09E-04	120			
			122,7	4,02E-04	120			
			123,4	3,91E-04	120			
			124,6	3,75E-04	120			
			124,6	3,75E-04	120			
			124,7	3,74E-04	120			
			124,7	3,74E-04	120			
			124,8	3,72E-04	120			
			125,3	3,67E-04	130			
			126.7	3.55E-04	130			
			126.8	3.54E-04	130			

			127,2	3,51E-04	130			
			127,8	3,47E-04	130			
			127,8	3,47E-04	130			
			128,6	3,44E-04	130			
			128,8	3,43E-04	130			
			129,5	3,40E-04	130			
			129,5	3,40E-04	130			
			130,1	3,38E-04	130			
			130,6	3,37E-04	130			
			130,6	3,37E-04	130			
			132,1	3,35E-04	130			
			132,6	3,35E-04	130			
			132,8	3,35E-04	130			
			134	3,35E-04	130			
			134	3,35E-04	130			
			134,6	3,35E-04	130			
			135,1	3,35E-04	140			
			136,1	3,36E-04	140			
			136,6	3,36E-04	140			
			137,2	3,37E-04	140			
			137,3	3,37E-04	140			
			137,3	3,38E-04	140			
			137,3	3,38E-04	140			
			137,3	3,38E-04	140			
			137,6	3,38E-04	140			
			137,7	3,38E-04	140			
			137,8	3,38E-04	140			
			138,3	3,39E-04	140			
			139,9	3,44E-04	140			
			140,4	3,46E-04	140			
			140,5	3,46E-04	140			
			140,8	3,48E-04	140			
			142,7	3,59E-04	140			
			143	3,62E-04	140			
			143	3,62E-04	140			
			144,3	3,74E-04	140			
			145,2	3,85E-04	150			
			145,3	3,87E-04	150			
			145,7	3,93E-04	150			
			146,2	4,00E-04	150			
			146,4	4,04E-04	150			
			146,9	4,11E-04	150			
			147,3	4,19E-04	150			
			147,4	4,22E-04	150			
			148,3	4,41E-04	150			

			149,6	4,75E-04	150			
			149,7	4,78E-04	150			
			151,5	5,36E-04	150			
			152,1	5,58E-04	150			
			152,6	5,82E-04	150			
			153,1	6,04E-04	150			
			153,4	6,14E-04	150			
			154,2	6,58E-04	150			
			154,5	6,72E-04	150			
			155,3	7,19E-04	160			
			155,6	7,35E-04	160			
			156,5	7,93E-04	160			
			156,7	8,07E-04	160			
			157,2	8,44E-04	160			
			157,8	8,88E-04	160			
			158,4	9,35E-04	160			
			160,3	1,10E-03	160			
			162,1	1,29E-03	160			
			162,1	1,29E-03	160			
			164	1,51E-03	160			
			164,1	1,52E-03	160			
			165,5	1,70E-03	170			
			166,6	1,85E-03	170			
			166,7	1,87E-03	170			
			167,2	1,93E-03	170			
			167,7	2,00E-03	170			
			168	2,04E-03	170			
			168,5	2,11E-03	170			
			169	2,19E-03	170			
			169,1	2,21E-03	170			
			170,2	2,36E-03	170			
			171,7	2,59E-03	170			
			171,7	2,60E-03	170			
			171,8	2,60E-03	170			
			173,4	2,84E-03	170			
			175,8	3,17E-03	180			
			176,4	3,25E-03	180			
			177,6	3,41E-03	180			
			178,5	3,52E-03	180			
			178,7	3,54E-03	180			
			179,2	3,60E-03	180			
			179,5	3,64E-03	180			
			180,1	3,70E-03	180			
			180,2	3,71E-03	180			
			181,1	3,82E-03	180			

			182,4	3,96E-03	180			
			183	4,02E-03	180			
			183,8	4,11E-03	180			
			184,5	4,18E-03	180			
			185,9	4,32E-03	190			
			186,6	4,39E-03	190			
			187,4	4,47E-03	190			
			187,4	4,48E-03	190			
			188,1	4,54E-03	190			
			188,9	4,62E-03	190			
			189,7	4,69E-03	190			
			190,4	4,76E-03	190			
			191,1	4,82E-03	190			
			192	4,90E-03	190			
			192,6	4,96E-03	190			
			194,3	5,10E-03	190			
			195	5,16E-03	200			
			196,8	5,29E-03	200			
			197,3	5,33E-03	200			
			198	5,38E-03	200			
			198,2	5,39E-03	200			
			199	5,44E-03	200			
			199,3	5,46E-03	200			
			200,1	5,51E-03	200			
			200,2	5,52E-03	200			
			201	5,56E-03	200			
			201,5	5,59E-03	200			
			203,3	5,68E-03	200			
			204,1	5,71E-03	200			
			204,2	5,72E-03	200			
			205	5,75E-03	210			
			207,4	5,84E-03	210			
			208,2	5,86E-03	210			
			208,4	5,87E-03	210			
			209,2	5,89E-03	210			
			210,4	5,93E-03	210			
			211,2	5,95E-03	210			
			211,9	5,96E-03	210			
			213,5	6,00E-03	210			
			213,7	6,00E-03	210			
			215,4	6,03E-03	220			
			216,1	6,04E-03	220			
			217	6,05E-03	220			
			218,2	6,06E-03	220			
			219	6,07E-03	220			

			219,2	6,07E-03	220			
			220	6,07E-03	220			
			222,6	6,07E-03	220			
			223,5	6,06E-03	220			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			225,4	6,03E-03	230			
			226,3	6,01E-03	230			
			226,3	6,01E-03	230			
			226,3	6,01E-03	230			
			226,3	6,01E-03	230			
			228,1	5,96E-03	230			
			228,1	5,95E-03	230			
			228,2	5,95E-03	230			
			228,4	5,94E-03	230			
			231,8	5,77E-03	230			
			231,9	5,76E-03	230			
			232,5	5,72E-03	230			
			233,4	5,66E-03	230			
			235,6	5,47E-03	240			
			236,4	5,38E-03	240			
			237,1	5,32E-03	240			
			237,1	5,31E-03	240			
			238,4	5,17E-03	240			
			240,1	4,96E-03	240			
			243,5	4,50E-03	240			
			245,4	4,21E-03	250			
			246,8	4,00E-03	250			
			250,6	3,39E-03	250			
			251,6	3,25E-03	250			
			252,7	3,07E-03	250			
			254,2	2,86E-03	250			
			256	2,60E-03	260			
			258,3	2,31E-03	260			
			261,1	1,97E-03	260			
			264,6	1,61E-03	260			
			269	1,25E-03	270			
			274,4	9,07E-04	270			
			281,2	6,12E-04	280			
			289,6	3,82E-04	290			

			300	2,21E-04	300			
			300,1	2,20E-04	300			
			313,1	9,85E-05	310			
			329,4	4,31E-05	330			
			349,6	2,18E-05	350			
			374,7	1,45E-05	370			
			406	1,14E-05	410			
			445	9,08E-06	450			
			484	7,12E-06	480			
			500	6,42E-06	500			



- [1] Lim, T.-C. Auxetic Materials and Structures; *Springer*: Singapore, 2015; pp. 1-50.
- [2] Saxena, K.K.; Das, R.; Calius, E.P. Three decades of auxetics research – materials with negative Poisson's ratio: A review. *Adv. Eng. Mater.* 2016, 18(11), 1847-1870.
- [3] Choudhry, N.K.; Panda, B.; Kumar, S. In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing. *Compos. Part B Eng.* 2022, 228, 109437.
- [4] Jiang, H.; Ren, Y.; Jin, Q.; Zhu, G.; Hu, Y.; Cheng, F. Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm. *Thin-Walled Struct.* 2020, 154, 106911.
- [5] Qi, C.; Jiang, F.; Yang, S.; Remennikov, A. Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing. *Thin-Walled Struct.* 2021, 169, 108314.
- [6] Zhang, X.G.; Ren, X.; Jiang, W.; Zhang, X.Y.; Luo, C.; Zhang, Y.; Xie, Y.M. A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study. *Compos. Struct.* 2022, 282, 115043.
- [7] Gao, Y.; Wei, X.; Han, X.; Zhou, Z.; Xiong, J. Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism. *Int. J. Solids Struct.* 2021, 233, 111232.
- [8] Attard, D.; Farrugia, P.S.; Gatt, R.; Grima, J.N. Starchirals – a novel class of auxetic hierarchical structures. *Int. J. Mech. Sci.* 2020, 179, 105631.
- [9] Wang, Q.; Yang, Z.; Lu, Z.; Li, X. Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression. *Mater. Des.* 2020, 186, 108226.
- [10] Wang, S.; Deng, C.; Ojo, O.; Akinrinlola, B.; Kazub, J.; Wu, N. Design and modelling of a novel three dimensional auxetic reentrant honeycomb structure for energy absorption. *Compos. Struct.* 2022, 280, 114882.
- [11] Montazeri, A.; Saedi, A.; Bahmanpour, E.; Mahnama, M. Auxetic mechanical metamaterials with symmetry-broken re-entrant units. *Int. J. Mech. Sci.* 2024, 266, 108917.
- [12] Genel, K.; Kahraman, M.F. Effect of angle and thickness of cell wall on bending behavior of auxetic beam. *Mater. Today Commun.* 2024, 38, 108339.
- [13] Zhang, K.; Zhao, P.; Zhao, C.; Hong, F.; Deng, Z. Study on the mechanism of band gap and directional wave propagation of the auxetic chiral lattices. *Compos. Struct.* 2020, 238, 111952.
- [14] Teng, X.C.; Ren, X.; Zhang, Y.; Jiang, W.; Pan, Y.; Zhang, X.G.; Zhang, X.Y.; Xie, Y.M. A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption. *Int. J. Mech. Sci.* 2022, 229, 107524.
- [15] Shao, Y.; Meng, J.; Ma, G.; Ren, S.; Fang, L.; Cao, X.; Liu, L.; Li, H.; Wu, W.; Xiao, D. Insight into the negative Poisson's ratio effect of the gradient auxetic reentrant honeycombs. *Compos. Struct.* 2021, 274, 114366.

- [16] Novak, N.; Krstulovic-Opara, L.; Ren, Z.; Vesenjak, M. Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures. *Mech. Mater.* 2020, 148, 103524.
- [17] Gao, D.; Wang, S.; Zhang, M.; Zhang, C. Experimental and numerical investigation on in-plane impact behaviour of chiral auxetic structure. *Compos. Struct.* 2021, 267, 113922.
- [18] Meng, J.; Deng, Z.; Zhang, K.; Xu, X.; Wen, F. Band gap analysis of star-shaped honeycombs with varied Poisson's ratio. *Smart Mater. Struct.* 2015, 24(9).
- [19] Koutsianitis, P.I.; Tairidis, G.K.; Drosopoulos, G.A.; Stravroulakis, G.E. Conventional and star-shaped auxetic materials for the creation of band gaps. *Arch. Appl. Mech.* 2019, 89, 2545-2562.
- [20] Sun, P.; Guo, F.; Zhang, Z.; Liu, N.; Yuan, T.; Ma, L.; Wang, Y. Mechanics and extreme low-frequency band gaps of auxetic hexachiral acoustic metamaterial with internal resonant unit. *Appl. Acoust.* 2022, 200, 109046.
- [21] Aircraft Systems Tech. Available online: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/helicopter-structures.html> (accessed on 10 September 2024).
- [22] eBay. Available online: <https://www.ebay.com/itm/153446233422> (accessed on 7 September 2024).
- [23] Cirium. Available online: <https://newsassets.cirium.com/Assets/GetAsset.aspx?itemid=55456> (accessed on 7 September 2024).
- [24] Aero-Access. Available online: <https://www.aero-access.com/products/bell-412ep-left-hand-aft-equipment-shelf.html> (accessed on 7 September 2024).
- [25] Cirium. Available online: <https://newsassets.cirium.com/Assets/GetAsset.aspx?itemid=55456> (accessed on 7 September 2024).
- [26] Department of Defense. MIL-STD-810H; USA, 2019.
- [27] LORD Corporation. Aerospace & Defense Isolator Catalog; USA, 2017.
- [28] MatWeb. Available online: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3bf38b65d8234f2f82379c32e06f9047&ckck=1> (accessed on 1 May 2025).
- [29] MatWeb. Available online: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bdaf87c3a6ea43a3bf57c6381192c07f&ckck=1> (accessed on 1 May 2025).
- [30] MatWeb. Available online: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=14625939fcbcd2da97f6d3ac9cbdb7e&ckck=1> (accessed on 7 September 2024).
- [31] ANSYS Inc. ANSYS Workbench R2022 Engineering Data; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2022.
- [32] Ma, Z.D.; Arbor, A. Three-dimensional auxetic structures and applications thereof. *U.S. Patent 7,910,193 B2*, 22 March 2011.

- [33] Neubauer, M.; Pohl, M.; Kucher, M.; Böhm, R.; Höschler, K.; Modler, N. DMA of TPU films and the modelling of their viscoelastic. *Polymers*. 2022, 14(13).
- [34] Hutchinson AI. Available online: <https://hutchinsonai.com/wp-content/uploads/2020/01/Definitions.pdf> (accessed on 7 September 2024).



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1.Uzun, Y.; Demir, C. Negatif Poisson Oranına Sahip Akıllı Malzemelerin Hava Araçlarında Titreşim Sönümlene Performansının Araştırılması *6. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, 2025*

