



**TİTREŞİM FİKSTÜRLERİNDE VİBRASYON ÖLÇÜMLERİYLE SONLU
ELEMENLAR MODEL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Doğın Fethi KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Doğan Fethi KAYA

05/02/2021

TİTREŞİM FİKSTÜRLERİNDE VİBRASYON ÖLÇÜMLERİYLE SONLU ELEMENLAR MODEL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Doğan Fethi KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2021

ÖZET

Geliştirilen her ürün bulunduğu ortamda çalışmasını engelleyecek, yapısal hasarlara sebep olabilecek çevresel koşullara maruz kalmaktadır, analizlerle doğrulanarak üretilen bu ürünler bir takım çevresel koşul testlerine tabi tutularak doğrulanmaktadır. Bu çalışmada, titreşim testleri sırasında sarsıcı ve test edilecek ürün arasında titreşimin kayıpsız iletilmesini amaçlayan bir titreşim test gereci tasarlanmıştır. Tasarım, ANSYS programı kullanılarak ve MIL-HDBK-2164A askeri standardında yer alan harmonik ve rastsal titreşim için uygun limitler sağlanarak tamamlanmıştır. Tasarlanan titreşim test gereci Al 6061 serisi ve St52 çelik malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Üretimi tamamlanan titreşim test gereci, sarsıcının dikey eksen tertibatına bağlanarak üzerinden ivme ölçerlerle deneysel veriler alınmıştır. Analiz verileri ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Çözüm ağında dörtyüzlü eleman tipi, altıyüzlü eleman tipine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Harmonik titreşim analizi sonuçlarına bakıldığında X ve Y eksenleri için elde edilen değerler standarda uygun tolerans aralığında, Z ekseninde elde edilen 0,489 değeri ise 2000 Hz’de standartta yer alan tolerans aralığında olduğu için uygun olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan rastgele titreşim analizlerindeki GRMS değerlerinin oranları incelendiğinde, bu oranların 1,043 olduğu görülmüştür. Titreşim test gerecinin rastsal titreşim testlerinde bazı frekans aralıklarında titreşim profilini tam olarak iletemese de titreşim kaynaklı enerjiyi başarılı bir şekilde ileteceği değerlendirilmiştir.

Bilim Kodu : 91433

Anahtar Kelimeler : Titreşim, sarsıcı, doğal frekans, mod şekilleri

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Prof. Dr. Muammer NALBANT

COMPARISON OF VIBRATION MEASUREMENTS AND FINITE ELEMENT MODEL RESULTS IN VIBRATION FIXTURES

(M. Sc. Thesis)

Doğan Fethi KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2021

ABSTRACT

Every product is exposed to environmental conditions that may prevent it from operating in its environment and cause structural damage, these products, which are produced by verification by analysis, are verified by subjecting to a number of environmental conditions tests. In this study, a vibration test fixture has been designed to transmit vibration with minimal loss between the shaker and the product during vibration tests. The design was completed accordance to the appropriate limits for harmonic and random vibration in the military standard MIL-HDBK-2164A with using the ANSYS program. The designed vibration test fixture is manufactured using Al 6061 series and St52 steel materials. Experimental data were obtained with accelerometers on the vibration test fixture, which was manufactured and connected to the vertical axis assembly of the shaker. Analysis data and experimental data were compared. It has been observed that tetrahedral element type gives better results than hexahedron element type in mesh structure. Considering the results of harmonic vibration analysis, the values obtained for the X and Y axes are within the tolerance range in accordance with the standard and the value of 0.489 obtained in the Z axis was considered appropriate because it was within the tolerance range specified in the standard at 2000 Hz. In addition, when the rates of GRMS values in random vibration analysis were examined, it was seen that these ratios were 1,043. It has been evaluated that the vibration test fixture will successfully transmit vibration-induced energy even though it cannot fully transmit the vibration profile in some frequency ranges in random vibration tests.

Science Code : 91433

Key Words : Vibration, shaker, natural frequency, mod shapes

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Muammer NALBANT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Muammer NALBANT'a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TİTREŞİM HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Titreşim İletkenliği.....	7
2.2 Rastgele Titreşim Analizi.....	7
2.3 Fourier Dönüşümü	10
2.4. MIL-HDBK-2164A Standardı.....	11
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
4. MATERYAL VE METOT	17
4.1. Deney Düzeneği.....	17
4.2. Ön Çalışmalar	19
4.3. Son Tasarım.....	21
4.4. Kütle Bilgileri.....	23
4.5. Çözüm Ağı.....	27
4.6. Eleman Kalitesi.....	30
4.7. Uygulanan Sınır Koşulları.....	36
4.8. Analiz Ayarları	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45

	Sayfa
5.1. X Eksenî Konumunda Oluşan Doğal Frekanslar	45
5.2. X Eksenî Konumunda Oluşan Kütle Katılım Oranları	46
5.3. X Eksenî Konumunda Oluşan Mod Şekilleri	48
5.4. Y Eksenî Konumunda Oluşan Doğal Frekanslar	49
5.5. Y Eksenî Konumunda Oluşan Kütle Katılım Oranları	51
5.6. Y Eksenî Konumunda Oluşan Mod Şekilleri	52
5.7. Z Eksenî Konumunda Oluşan Doğal Frekanslar	54
5.8. Z Eksenî Konumunda Oluşan Kütle Katılım Oranları	56
5.9. Z Eksenî Konumunda Oluşan Mod Şekilleri	57
5.10. Aktarım Oranları	59
5.10.1. X eksenî	59
5.10.2. Y eksenî	62
5.10.3. Z eksenî	64
5.11. Rastgele Titreşim Analizleri	66
5.11.1. X eksenî	67
5.11.2. Y eksenî	69
5.11.3. Z eksenî	71
5.12. Deneysel Veriler	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. LDS 895 Sarsıcı Özellikleri	18
Çizelge 4.2. İvmeölçer özellikleri	19
Çizelge 4.3. X eksen kütle merkezleri	24
Çizelge 4.4. Y eksen kütle merkezleri	26
Çizelge 4.5. Z eksen kütle merkezleri	27
Çizelge 4.6 Dört yüzlü ve altı yüzlü eleman tipine göre elde edilen değerler	35
Çizelge 4.7. Eleman kalitesi aralıkları	35
Çizelge 4.8. Analizde elde edilen ağ kaliteleri	36
Çizelge 5.1. X eksen doğal frekans değerleri	45
Çizelge 5.2. X pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar	48
Çizelge 5.3. Y eksen doğal frekans değerleri	50
Çizelge 5.4. Y pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar	52
Çizelge 5.5. Z eksen doğal frekans değerleri	54
Çizelge 5.6. Z pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar	57
Çizelge 5.7. X eksen aktarım oranları	60
Çizelge 5.8. Y eksen aktarım oranları	62
Çizelge 5.9. Z eksen aktarım oranları	65
Çizelge 5.10. X eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı	68
Çizelge 5.11. Y eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı	70
Çizelge 5.12. Z eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Basit harmonik hareket grafiği.....	3
Şekil 2.2. Titreşim sistemi elemanları.....	4
Şekil 2.3. Serbest cisim diyagramı.....	5
Şekil 2.4. Sönümsüz sistem gösterimi.....	6
Şekil 2.5. Rastgele titreşim testi grafiği	9
Şekil 2.6. Fourier dönüşümü.....	11
Şekil 3.1. Ağ yapısı görünümü	13
Şekil 3.2. Plaka üzerinde delik gösterimi	14
Şekil 3.3. Analiz sonunda ürünün PSD grafiği.....	15
Şekil 4.1. Titreşim test düzeneği.....	17
Şekil 4.2. LDS 895 Sarsıcı.....	18
Şekil 4.3. PCB Piezotronics ivmeölçer	18
Şekil 4.4. Dört parçalı adaptör çalışması.....	19
Şekil 4.5. İki parçalı adaptör çalışması	20
Şekil 4.6. Rulmanlı yapı	20
Şekil 4.7. Rulmanlı yapı kesit görünümü	21
Şekil 4.8. X ekseni model görüntüsü	21
Şekil 4.9. Y ekseni model görüntüsü	22
Şekil 4.10. Z ekseni model görüntüsü	22
Şekil 4.11. X ekseninde noktasal kütleler	23
Şekil 4.12. X ekseni referans koordinat düzlemi	24
Şekil 4.13. Y ekseninde noktasal kütleler	25
Şekil 4.14. Y ekseni referans koordinat düzlemi	25
Şekil 4.15. Z ekseninde noktasal kütleler.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Z eksen referans koordinat düzlemi	27
Şekil 4.17. Genel ağ yapısı görünümü	28
Şekil 4.18. Tablanın eleman boyutu.....	28
Şekil 4.19. Adaptörlerin eleman boyutu.....	29
Şekil 4.20. Cıvata yüzeyi eleman boyutu	29
Şekil 4.21. İdeal üçgen ağ ve çarpık durumda üçgen ağ	30
Şekil 4.22. Jacobian oranının artışıyla ideal şekil değişimi.....	30
Şekil 4.23. Dört yüzlü eleman için en-boy oranı	31
Şekil 4.24. Dört yüzlü eleman için jacobian oranı.....	31
Şekil 4.25. Dört yüzlü eleman için çarpıklık oranı	32
Şekil 4.26. Dört yüzlü eleman için ortogonallık.....	32
Şekil 4.27. Altı yüzlü eleman için en-boy oranı	33
Şekil 4.28. Altı yüzlü eleman için jacobian oranı.....	33
Şekil 4.29. Altı yüzlü eleman için çarpıklık	34
Şekil 4.30. Altı yüzlü eleman için ortogonallık.....	34
Şekil 4.31 Kayar bağlantı temas ilişkisi	37
Şekil 4.32. Sabit destekler (X ve Y eksen).....	37
Şekil 4.33. Sabit destekler (Z eksen).....	38
Şekil 4.34. Tabla bağlantısı	38
Şekil 4.35. Adaptör ve cıvata basınç yüzeyi bağlantısı.....	39
Şekil 4.36. Ürün ve cıvata basınç yüzeyi ayrılmaz bağlantısı	39
Şekil 4.37. Tabla ve adaptör bağlantısı	40
Şekil 4.38. Cıvata ve somun bağlantısı	40
Şekil 4.39. Cıvata ve adaptör bağlantısı.....	41
Şekil 4.40. Somun ve tabla bağlantısı	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.41. Somun ve tabla yan yüzeyi bağlantısı	42
Şekil 4.42. Aktarım oranı tolerans aralığı	43
Şekil 4.43. Rastsal titreşim profili.....	43
Şekil 4.44. Program veri girdisi görüntüsü.....	44
Şekil 4.45. Sönüm değeri program görüntüsü	44
Şekil 5.1. X eksenı doğal frekans değeri yazılım gösterimi	46
Şekil 5.2. X yönünde kütle katılım oranları.....	47
Şekil 5.3. Y yönündeki kütle katılım oranları.....	47
Şekil 5.4. Z yönündeki kütle katılım oranları	47
Şekil 5.5. X eksenı yönü mod 1	48
Şekil 5.6. Y eksenı yönü mod 3	49
Şekil 5.7. Z eksenı yönü mod 8	49
Şekil 5.8. Y eksenı doğal frekans değeri grafik gösterimi	50
Şekil 5.9. X eksenı yönünde kütle katılım oranları.....	51
Şekil 5.10. Y eksenı yönünde kütle katılım oranları.....	51
Şekil 5.11. Z eksenı yönünde kütle katılım oranları	52
Şekil 5.12. X eksenı yönü mod 3	53
Şekil 5.13. Y eksenı yönü mod 1	53
Şekil 5.14. Z eksenı yönü mod 7.....	54
Şekil 5.15. Z eksenı doğal frekans değeri grafik gösterimi	55
Şekil 5.16. X eksenı yönünde kütle katılım faktörleri	56
Şekil 5.17. Y eksenı yönünde kütle katılım faktörleri	56
Şekil 5.18. Z eksenı yönünde kütle katılım faktörleri.....	57
Şekil 5.19. X eksenı yönü mod 1	58
Şekil 5.20. Y eksenı yönü mod 5	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. Z eksenî yönü mod 3.....	59
Şekil 5.22. X eksenî aktarım oranları grafiğı.....	60
Şekil 5.23. X ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler	61
Şekil 5.24. X ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi.....	61
Şekil 5.25. Y eksenî aktarım oranları grafiğı.....	62
Şekil 5.26. Y ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler	63
Şekil 5.27. Y ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi.....	63
Şekil 5.28 Z eksenî aktarım oranları grafiğı	64
Şekil 5.29. Z eksenî aktarım oranı gösterimi.....	65
Şekil 5.30. Z ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler.....	66
Şekil 5.31. Z ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi	66
Şekil 5.32. X eksenî rastsal titreşim analizi grafiğı.....	67
Şekil 5.33. X ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası	68
Şekil 5.34. X ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası	68
Şekil 5.35. Y eksenî rastsal titreşim analizi grafiğı.....	69
Şekil 5.36. Y ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası	70
Şekil 5.37. Y ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası	70
Şekil 5.38. Z eksenî rastsal titreşim analizi grafiğı	71
Şekil 5.39. Z ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası	72
Şekil 5.40. Z ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası.....	72
Şekil 5.41. Z eksenî deneysel veriler	73
Şekil 5.42. Maksimum genliklerin karşılaştırmalı gösterimi	74
Şekil 5.43 Armatür tablasında ek salınım oluşturan bölgeler.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB

Desibel

f

Frekans

Hz

Hertz

Q

Titreşim iletkenliği

T

Periyot

ω_n

Doğal frekans

Kısaltmalar

Açıklamalar

FEM

Sonlu elemanlar metodu

FFT

Fourier dönüşümü

PSD

Güç spektral yoğunluğu

1. GİRİŞ

Son zamanlarda teknolojik gelişmelere paralel olarak demir ve alüminyum gibi oldukça mukavemetli ve elastik malzemelerin makina ve dinamik sistem sanayiinde kullanılması daha hafif ve daha hızlı çalışan makinaların gelişmesine imkân verdi. Daha küçük kesitli sistemler sayesinde hafiflik sağlanmış olup beraberinde elastiklik, yani kuvvet ve moment etkisi altında sistemin daha fazla deforme olabilmesi gibi olumsuz unsurları da getirmiştir. Bu da titreşen sistem demektir. Titreşen sistemler kullanıldıkları alan itibarı ile titreşim oluşturacak kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kuvvetlerin incelenmesi cihazların uzun ömürlülüğü bakımından önemli bir yer tutar. Oluşan kuvvetlerin frekansının, cihazların doğal frekans aralığındaki kuvvetlerle çakışması sonucu rezonans oluşur, rezonans hem test edilen ürün için hem de test fikstürü için ağır tahribatlara neden olabilir ve cihazların tasarımında istenmeyen durumdur [1]. Dolayısıyla rezonans oluşumu engellenmesi, cihazların prototip aşamasında mekanik titreşim testleri uygulanarak test edilen ürünün yapısal dinamik karakterizasyonu belirlenmesi ve kontrolünün yapılması ile mümkündür [2]. Titreşim analizi için sistemin sonlu eleman modeli oluşturulur, sistemin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenir. Uygun frekans aralığı baz alınarak test gerçekleştirilir [3]. Askeri standartlar doğrultusunda geliştirilen ve üretimi tamamlanan her ürün bulunduğu ortam koşullarında çalışmasını engelleyecek, yapısal hasarlara sebep olabilecek çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Ürünlerin maruz kalabileceği çevresel koşullar prototip sürecinde ürünler üzerinde çevresel koşul sırasında uygulanarak, ürünler doğrulanmaktadır. Ürünlerdeki titreşim potansiyeli, uygun test fikstürü ve titreşim profili ile tasarım aşamasında incelenip, test edilip gerekli tedbirler alınarak çalışma sırasında sistem elemanlarında görülebilecek erken yorulma ve kırılma gibi titreşim bazlı sorunların önüne geçilebilir.

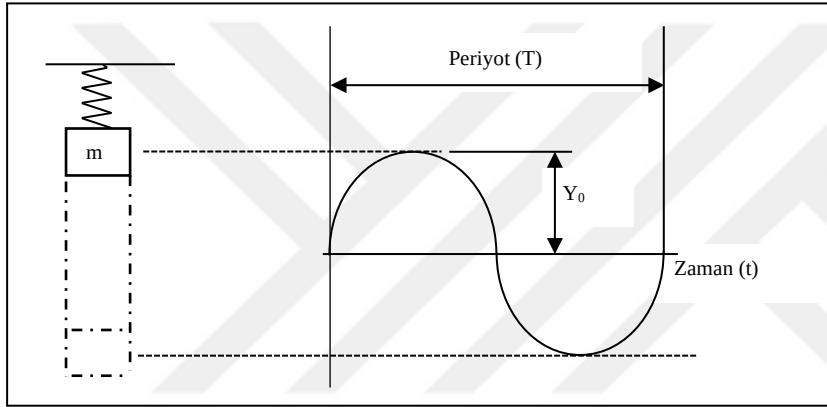
Bu çalışma, test edilecek ürün miktarının ve çeşitliliğin artarak test altyapısı maliyetinin artması, depolama alanının kısıtlı olması ve çalışma konusu tasarlanan gerecin yer tasarrufu sağlaması, ürünlerin bağlanma süresini kısaltarak işçilik süresini düşürülmesi ve zaman israfını önüne geçilmek istenmesi amaçlanarak yapılmıştır. Çalışmanın konusu, test düzeneğinde ürüne özgü bulunan titreşim test gereci yerine, her ürüne göre uyumlanabilen titreşim gerecinin tasarımı, analizi ve üretiminin yapılarak analiz sonuçlarıyla, ivmeölçerlerden alınan deneysel verilerin karşılaştırılmasıdır.

Öncelikle ikinci bölümde titreşim konusunda genel bilgiler, titreşim iletkenliği, rastgele titreşim ve Fourier dönüşümü konularına değinilmiştir. Üçüncü bölümde literatür çalışmaları incelenmiş ve farklılıklar belirtilmiştir. Dördüncü bölümde, tasarım ve analizler kapsamında yapılan önceki tasarım ve nihai tasarım verilmiştir. Ardından titreşim testi yapılabilecek sarsıcının ebatlarına ve kapasitesine uygun olarak seçilen örnek ürünün kütle bilgileri verilmiştir. Çözüm ağı oluşturularak ağı kaliteleri hem dörtyüzlü hem de altıyüzlü eleman tipine göre incelenmiştir. Ardından analiz girdilerinde tanımlanacak olan sınır koşulları ve MIL-HDBK-2164 standardında [4] yer alan 6,06 G RMS değerine sahip rastgele titreşim profili verilmiştir. Beşinci bölümde her eksen için doğal frekanslar, mod şekilleri, aktarım oranları ve rastsal titreşim analizi sonlu elemanlar metoduna (Finite Element Method – FEM) dayalı yazılım programı olan Ansys kullanılarak tamamlanmıştır. Uygun değerlerdeki titreşim test gerecinin Al 6061 ve St52 malzemeleriyle imal edildikten sonra, deneysel veriler için sarsıcıya bağlanarak üzerinden ivmeölçerlerle veriler alınmıştır. Altıncı bölüm olan son bölümde ise analiz verileri ve deneysel veriler karşılaştırılarak, farklılığın sebepleri irdelenmiştir.

2. TİTREŞİM HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Titreşim bir tür periyodik harekettir ya da başka bir deyimle kendini belli bir zaman aralıklarıyla tekrarlayan harekete verilen addır. Burada bahsedilen zaman aralığına titreşimin periyodu (T) denir. Periyodun tersi titreşimin frekansı (f) olarak ifade edilir (Eş. 2.1). Basit harmonik hareket periyodik hareketin en basit şeklidir ve genellikle Şekil 2.1’de gösterildiği gibi zamana karşı yer değiştirme grafiğinde sürekli bir sinüs dalgası ile temsil edilir [5].

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. Basit harmonik hareket grafiği

Yer değiştirme Eş. 2.2’de ifade edilebilir [6].

$$Y = Y_0 \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Bu ifadede; Y , titreşim kaynaklı anlık yer değiştirme değerini (mm), Y_0 , titreşim maksimum yer değiştirme değerini (mm), ω hareketin frekansını (rad/sn), t , zamanı (sn) ifade etmektedir.

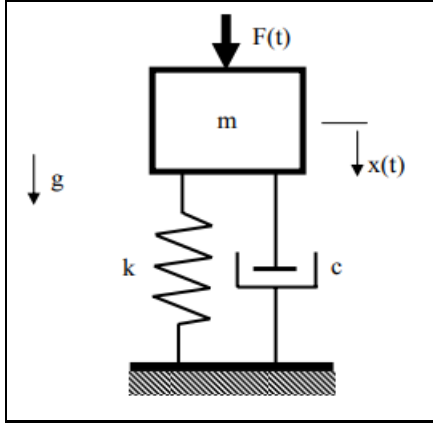
Yer değiştirmenin (Eş. 2.2) birinci türevi alınır hız elde edilir (Eş. 2.3).

$$V = \dot{Y} = \frac{dY}{dt} = \omega Y_0 \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

Yer değiştirmenin (Eř. 2.2) ikinci turevi alınırsa ivme bulunur (Eř. 2.4);

$$A = \ddot{Y} = \frac{d^2 Y}{dt^2} = -\omega^2 Y_0 \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

şekil 2.2’de yer alan m kütlesine etkiyen yay ve sönüm kuvvetleri içeren bir sistem gösterilmektedir. m kütlesinin toplam yer değiştirme ifadesi Eř. 2.5’te statik ve dinamik yer değiştirmelerin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Yine bu ifadenin (Eř. 2.5), ilk turevi hızı (Eř. 2.6), ikinci turevi ise ivmeyi verecektir (Eř. 2.7) [6].



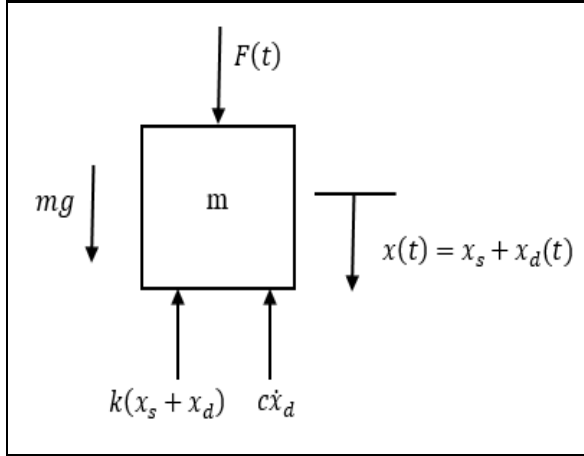
şekil 2.2. Titreşim sistemi elemanları

$$x(t) = x_s + x_d(t) \quad (2.5)$$

$$\dot{x}(t) = \dot{x}_d \quad (2.6)$$

$$\ddot{x}(t) = \ddot{x}_d \quad (2.7)$$

m kütlesine etkiyen kuvvetler şekil 2.3’te gösterilmiştir [6]. İfade de k , yay sabitini (N/m), c ise sönüm katsayısı (N.s/m) değerini temsil etmektedir.



Şekil 2.3. Serbest cisim diyagramı

Tüm kuvvetler aşağı yön pozitif kabul edilerek toplanırsa, Eşitlik 2.8 elde edilir.

$$F(t) + mg - k(x_s + x_d) - c\dot{x}_d = m\ddot{x} \quad (2.8)$$

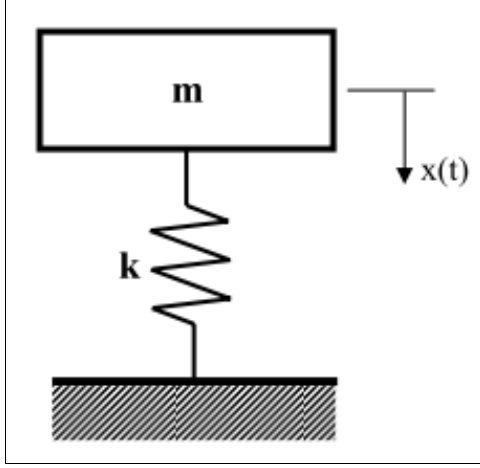
Eşitlik 2.8 düzenlenirse Eş. 2.9 elde edilir.

$$F(t) + mg - mg - kx_d - c\dot{x}_d = m\ddot{x} \quad (2.9)$$

Buradan genel hareket denklemi Eş. 2.10'da gösterildiği gibi oluşturulabilir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.10)$$

Bir sistemde, sistemin enerjisini sönmölendirecek herhangi sönmöl elemanı bulunmuyorsa, sistem sönmölösüz olarak adlandırılır [6]. Sönmölösüz sistem Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sönümsüz sistem gösterimi

Şekil 2.4'te gösterildiği gibi sistemin sönümsüz ve ek kuvvete maruz kalmadığı varsayılararak Eş. 2.10'da verilen denklem Eş. 2.11'de belirtildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.11)$$

Hareket denkleminin çözümü için $x(t) = ae^{st}$ kabulü yapılırsa, $\ddot{x}(t) = s^2 ae^{st}$ Eş. 2.11'de yerine konulursa aşağıdaki ifade elde edilir (Eş. 2.12) [6].

$$[ms^2 + k]ae^{st} = 0 \quad (2.12)$$

Denklemden geçerli bir çözüm olması için ae^{st} ifadesinin sıfırdan farklı olması gereklidir, bu durumda ae^{st} teriminin çarpanı, $[ms^2 + k]$, sıfıra eşit olmalıdır ve bu denklemi sıfır yapan s değerleri sistemin öz değerleri olarak adlandırılır ve her iki s değeri de karakteristik denklemi sağlar (Eş. 2.13) [6].

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{k}{m}} = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i = \pm i\omega_n \quad (2.13)$$

Tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşimlerinin frekansı, doğal frekansı Eş. 2.14'te verilmiştir [6].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} (rad/sn) \quad (2.14)$$

Eş. 2.14'te yer alan öz değerler doğal frekansı vermektedir. Buradaki her köke karşılık gelen öz vektör vardır bu da mod şeklini sağlar. Bu mod şekilleri ve doğal frekanslar yapıların belirli bir kuvvet altındaki tepkisinin saptanmasını sağlar. Yapıda rezonans kaynaklı oluşabilecek hasarların önüne geçmek için doğal frekansların bilinmesi önemlidir. Çalışmada mod şekilleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunmuştur.

Modal analiz, aslında, geleneksel bir teorik analizden ziyade test verilerine dayalı bir yapının titreşim özelliklerini tanımlamak için bir matematiksel model oluşturma sürecidir. Bu nedenle, tüm mühendislik alanında uygulamaları vardır [7].

2.1. Titreşim İletkenliği

Titreşim test gereci, uygulanan kuvvet tarafından saptırılmaması ve giriş hareketini bileşenine aktarması için mümkün olduğu kadar rijit olmalıdır. Titreşim test gerecinin, sarsıcıdan aldığı enerjiyi test edilecek ürüne aktarabilme oranı iletkenlik olarak adlandırılır. Bu hem giriş kuvveti hem de çıkış sapmasının bir karşılaştırmasıdır. 1,0 iletilebilirlikte çıktı, girişle doğru orantılıdır. İdeal olarak, dinamik bir test gereci, sarsıcı hareketini test edilecek ürüne kayıpsız iletir. Rezonans etkisi olmaması için, fiktürün doğal frekansı her zaman mümkün olduğu kadar yüksek ve 1,0'lık bir iletkenlikte tutulur. [8].

Bir nesnenin iletilebilirliği (Q), tepkisini titreşim sırasında gösterir. En büyük iletilebilirlik rezonans frekansında gerçekleşir. İletilebilirlik, çıkış kuvveti F_{out} ve giriş kuvveti F_{in} gibi biliniyorsa Eş. 2.15'te verildiği gibi hesaplanabilir [5];

$$Q = \frac{F_{out}}{F_{in}} \quad (2.15)$$

2.2 Rastgele Titreşim Analizi

Elektronik ekipmanın ticari, endüstriyel ve askeri üreticileri tarafından kabul testleri ve yeterlilik testleri için rastgele titreşim belirtilmektedir. Çünkü rastgele titreşimin, elektronik

ekipmanın çalışması gereken gerçek ortamları daha yakından temsil ettiği gösterilmiştir. Rastgele titreşimin, hatalı bileşenleri ve hatalı montaj yöntemlerini tarayarak elektronik ekipmanın üretim bütünlüğünü iyileştirmek için çok güçlü bir araç olduğu da kanıtlanmıştır, bu da sistemin genel güvenilirliğinde keskin bir gelişme ile sonuçlanır [5].

Rasgele titreşimin en belirgin özelliği, periyodik olmamasıdır. Geçmişteki rastgele hareket geçmişisi bilgisi, çeşitli hızlanma ve yer değiştirme büyüklüklerinin gerçekleşme olasılığını tahmin etmek için yeterlidir ancak belirli bir anda kesin büyüklüğü tahmin etmek yeterli değildir [5].

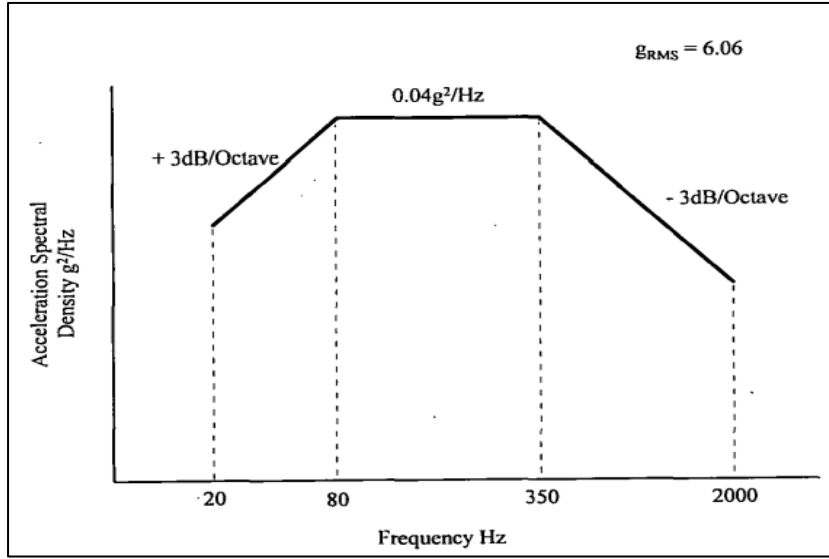
Rastgele titreşim, belirli bir bant genişliğindeki tüm frekansların her zaman ve her an mevcut olması bakımından benzersizdir. Bu, bir elektronik sistem 20 ila 2000 Hz frekans bant genişliği üzerinden rastgele bir titreşime maruz kaldığında, elektronik sistemin aynı bant genişliği içindeki tüm yapısal rezonanslarının aynı anda uyarılacağı anlamına gelir [5].

Rastgele titreşim girdisi ve yanıt eğrileri güç spektral yoğunluğu, (G^2/Hz) olarak ifade edilen (dikey eksen) ve frekans (Hz) (yatay eksen) ile ifade edilir [5]. Güç spektral yoğunluğu (PSD) gösterimi Eş. 2.16'da verilmiştir.

$$PSD = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{G^2}{\Delta f} \quad (2.16)$$

G ivmenin karekök ortalaması yer çekimi birimiyle ifade edilir ve boyutsuzdur, Δf ise Hz olarak ifade edilen frekans bandı aralığıdır [5].

Bu çalışmada kullanılan rastgele titreşim testi grafiği [4] Şekil 2.4'te verilmiştir. Grafiğin altında kalan alan G RMS olarak ifade edilir (Eş. 2.17).



Şekil 2.5. Rastgele titreşim testi grafiği

$$\sqrt{Alan} = \sqrt{\frac{G^2}{Hz} \times Hz} = \sqrt{G^2} = G_{RMS} \quad (2.17)$$

Desibel terimi (dB) rastgele titreşimde güç spektral yoğunluk oranı için kullanılır ve Eş. 2.18’de verildiği gibi ifade edilir (Eş. 2.18) [4].

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad (2.18)$$

P_2 : Ölçülen ivme değeri $\left(\frac{g^2}{Hz}\right)$

P_1 : Verilen ivme değeri $\left(\frac{g^2}{Hz}\right)$

Şekil 2.4’te rastgele titreşim profilinde eğimin +3dB, 0 ve -3dB olduğu bölgeler gösterilmiştir. Bu profilin altında kalan alan ve G RMS hesabı Eş. 2.19, Eş. 2.20 ve Eş. 2.21’de verildiği üzere yapılabilir [5].

Eğimin +3dB olduğu durum;

$$A = \frac{3P_2}{3+S} \left[f_2 - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^{S/3} f_1 \right] \quad (2.19)$$

Eğimin -3dB olduğu durum;

$$A = -f_2 P_2 \log_e \frac{f_1}{f_2} \quad (2.20)$$

Eğimin 0 olduğu durum;

$$A = P(f_2 - f_1) \quad (2.21)$$

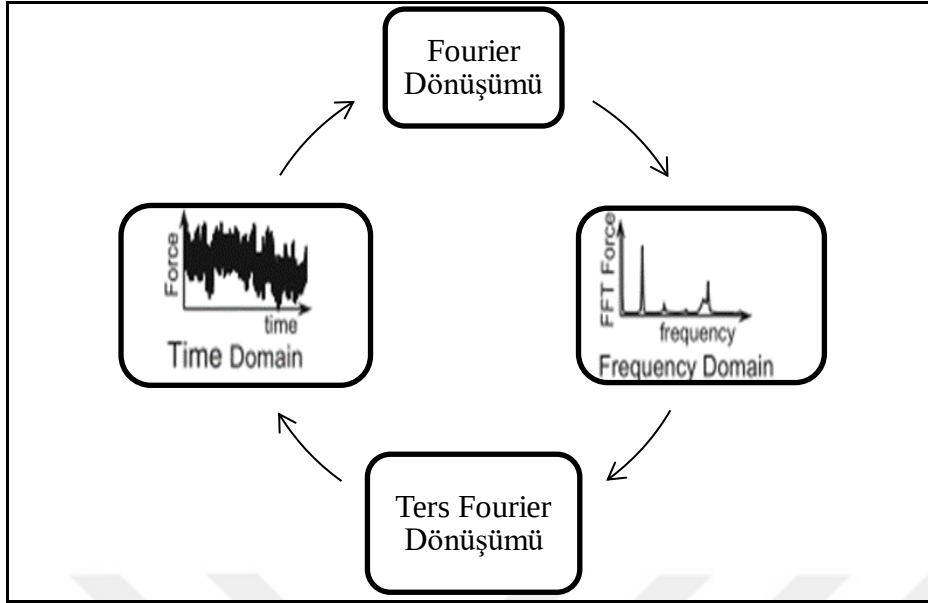
Örnek olarak Eş. 2.19, Eş. 2.20, Eş. 2.21 kullanılarak Şekil 2.4'te profilin altında kalan alan hesaplanırsa 6,06 G RMS olarak bulunur.

2.3 Fourier Dönüşümü

Herhangi bir periyodik fonksiyon, eşit aralıklı zaman frekanslarına sahip bir dizi içeren sonsuz sayıda sinüzoidal bileşen olarak analiz edilebilir (Eş. 2.22). Bu sonsuz dizi serisine Fourier serisi ($f_1 = \frac{1}{T}$, $f_2 = \frac{1}{T+\Delta T}$, $f_3 = \frac{1}{T+2\Delta T}$...) denir. Zaman alanından frekans alanına bir dönüşüme izin verir, bu nedenle Fourier Dönüşümü'nde yaygın bir addır. [9]

$$X(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.22)$$

Gerçek dünyadaki birçok titreşim, özellikle de geçiş sırasında, “rastgele” titreşim olarak adlandırılabilir çünkü aynı anda birçok frekansta harekettir. Bir PSD, bir FFT'deki her bir frekans bölmesinin karmaşık eşleniği ile çarpılmasıyla hesaplanır. Bir PSD'nin rastgele titreşim analizi için bir FFT'den daha kullanışlı olmasını sağlayan temel yönü, bu genlik değerinin daha sonra g^2/Hz birimlerini elde etmek için frekans bölmesi genişliğine normalize edilmesidir. Fourier Dönüşümü şematik olarak Şekil 2.5'de verilmiştir [10].



Şekil 2.6. Fourier dönüşümü

Fourier dönüşümü ve güç spektral yoğunluğu arasındaki ilişki Eş. 2.23'te verilmiştir [10].

$$PSD^{def} = \frac{1}{2T} |FFT|^2 \quad (2.23)$$

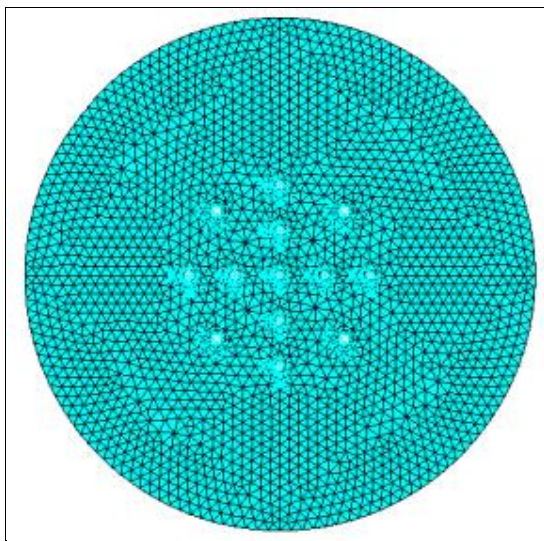
2.4. MIL-HDBK-2164A Standardı

Bu standart, elektronik ürün için çevresel koşul testlerinin nasıl yapılacağını, ürünün teste maruz kalma süresini, test prosedürünü ve ekipmanını, üründe kusur olması durumunda yapılması gereken işlemler konusunda rehberlik sağlamaktadır. Çevresel koşul testleriyle ürünün varsa tasarım hataları belirlenerek erken önlem alınması ve maruz kalacağı çalışma koşulları ortamında ürüne olan güvenilirliğin artması amaçlanır. En yaygın kullanılan testler termal çevrim testleri ve titreşim testleridir. Titreşim testi sırasında kullanılan titreşim test gereci, bu çalışmada standartta yer alan harmonik ve rastgele titreşim limitleri baz alınarak tasarlanmış, modal analiz, harmonik ve rastgele titreşim analizi ile doğrulanarak üretilmiştir.



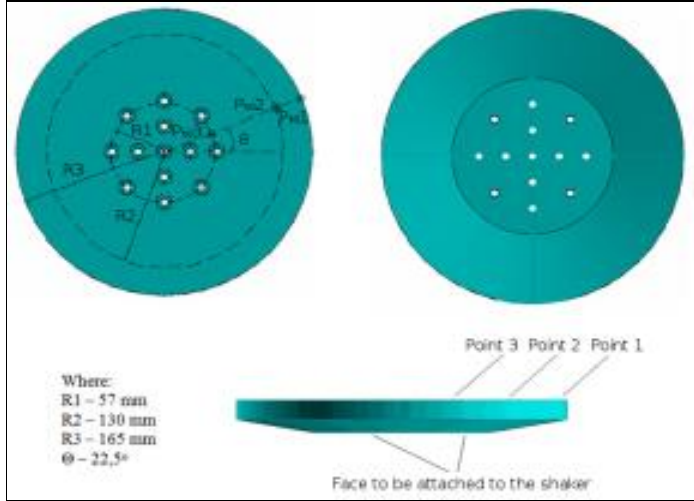
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İncelenen ilk çalışmada, aviyonik sistemlerin maruz kalabileceği yüksek titreşim etkisini askeri standartlarda 20 Hz-2000 Hz aralığında test etmek için ideal fikstür tasarımını belirleyerek ve sonuçlarını sonlu elemanlar analizi kullanarak elde etmişlerdir. Çalışmalarında alüminyum ve magnezyum alaşımlarını kullanarak, L ve T geometriye sahip 4 farklı duruma sahip fikstürü incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre alüminyum alaşımıyla üretilen titreşim test gereçleri, magnezyum alaşımıyla üretilen titreşim test gereçlerine göre ilk mod şekil frekansı her durumda daha yüksek elde edilmiştir. L ve T geometriye sahip titreşim test gereçleri karşılaştırıldığında T geometriye sahip 40 mm feder bulunan titreşim test gerecinin ilk mod şekli Al alaşımı için 2019,8 Hz Mg alaşımı için 1976,7 Hz elde edilmiş olup 4 durum arasında en iyi seçenek olarak önerilmiştir [1]. Bir diğer çalışmada ise çapı 330 mm, kalınlığı 33,4 mm olan alüminyum alaşımından imal edilmiş bir titreşim plakası üzerinde çalışmışlardır. Plakada sarsıcıya bağlanmak üzere M8'e uygun 13 delik kullanılmış olup ağırlığı 5,956 kg'dır. LDS 824 tipi sarsıcı kullanılarak numerik ve deneysel olarak plakanın dinamik davranışı analiz edilmiştir. Ansys programı kullanılarak delikler etrafında sıfır yer değiştirme sınır koşulu uygulanmıştır. FEM modeli lineer dört köşeli ağ yapısı kullanılarak toplamda 24748 element kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ yapısı görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir.



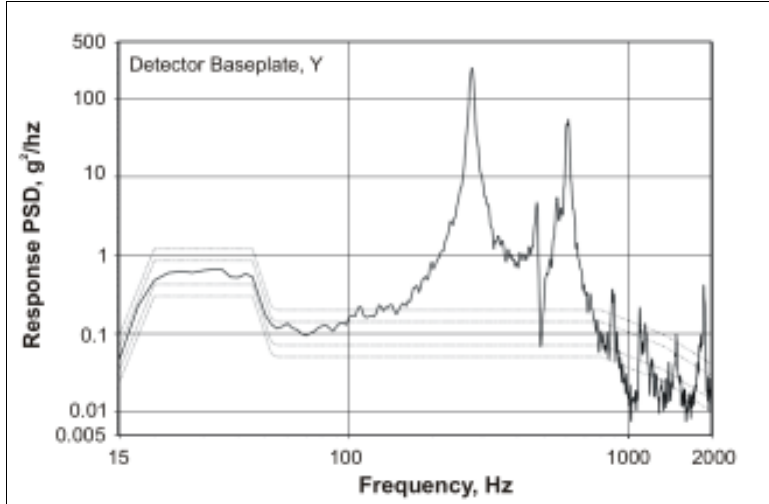
Şekil 3.1. Ağ yapısı görünümü

Test, elektrodinamik sarsıcının fikstüre yavaş sinüs dalgaları uygulamasıyla 10 Hz-2500 Hz arasında gerçekleşmiştir ve ortaya çıkan sonuçlar ölçülmüştür. Sonuç olarak plakada merkezden 3 numaralı delik çapına kadar olan bölgede titreşim iletkenliği 1500 Hz'e kadar çıkarken, 1 numaralı delik çapının merkezle olan mesafesinde titreşim iletkenliği en fazla 500 Hz olarak ölçülmüştür [2].



Şekil 3.2. Plaka üzerinde delik gösterimi

Diğer incelenen çalışmada ise uzay aracı parçası olan elektrostatik analiz edici cihazın, mekanik tasarım ve dinamik testleri konusunu ele almıştır. Malzeme olarak hafiflik, yüksek dayanım, yüksek termal iletkenlik, kolay işlenebilirlik özelliklerinden dolayı Al-6061-T6 seçilmiştir. Titreşim testi 15-2000 Hz aralığında gerçekleşmiştir. FEM kullanılarak fikstürün sarsıcı ile bağlantı noktaları analiz edilmiş titreşim testi için fikstürün frekans aralığı minimum 2000 Hz olarak tasarlanmıştır, bu değer sarsıcının maksimum değerinden daha fazladır. Endevco 2221D tipi piyezoelektrik ivme ölçerler kullanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak Şekil 3.3'te verilen grafik incelendiğinde titreşim testi boyunca test edilen ürünün rezonans etkisine maruz kalmadığı görülmüştür [11].



Şekil 3.3. Analiz sonunda ürünün PSD grafiği

İncelenen bir diğer çalışmada ise cadde aydınlatma cihazı için titreşim test gereci tasarlanmıştır ve tasarımda rezonans oluşumunu engellemek için modelde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Titreşim testi 10 Hz ve 55 Hz aralığında yapılmıştır. Titreşim fikstüründe yapılan deneysel modal analize göre 33,54 Hz ve 39,6 Hz noktaları olan 55 Hz altı frekanslarda fikstürün pik yaptığı yani rezonansa sebebiyet verebileceği noktalar görülmüştür. Daha rijit olabilecek yeni fikstür tasarımına gidilmiştir. Yeni fikstürde optimizasyon çalışmaları sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda eğilme ve burulma kuvvetlerine karşı önde iki destek ve arka tarafta daha geniş destekle yeni fikstür tasarımı tamamlanmıştır. Ağırlık merkezi tablanın merkezine yakın tutulmuştur. Ağırlığı yaklaşık 45kg'dır. Çalışma sonucunda titreşim testi fikstürü için rijit bir yapının ve hafiflik gibi unsurların sağlamasının tasarımda önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Topolojik iyileştirilmeler yapılan yeni fikstürde deneysel modal analize göre fikstürün rezonans oluşturabilecek frekansı 180 Hz ve ötesinde olduğu görülmüştür [12]. İncelenen son literatür çalışmasında ısıtıcı eşanjör için yüksek dinamik karakterizasyona sahip titreşim fikstürü tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımda sonlu elemanlar metoduyla mod analizleri yapılmış olup doğal frekanslar belirlenmiştir. Malzeme seçiminde özgül rijitlik (E/ρ) baz alınmıştır. Alüminyum alaşımının, çelik, berilyum ve magnezyumun karşılaştırıldığı ortamda bu alüminyum alaşımı çelikten benzer doğal frekans vermesi 1/3 oranında daha hafif olması, kolay işlenebilmesi ve daha düşük maliyetli olması yönünden tercih edilmiştir. Modelleme UG NX kullanılarak yapılmıştır. Model ANSYS ortamına aktarılmış, sonlu elemanlar modeli 8 köşeli ağ yapısı kullanılarak toplam 87988 ağ

oluşturulmuştur. Malzeme olarak ZL105A kullanılmıştır. Mod analizi yapılırken fikstürün taban kısmı sabit olarak kabul edilmiştir ve frekans 15 Hz-2000 Hz aralığında tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre fikstürün ilk rezonans frekansı 870 Hz ve ilk 6 frekansı 2000 Hz altında çıkmıştır. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre tasarlanan fikstürün ve test edilen ürünün titreşim testi sırasında istenilen rijitlik, hafiflik gibi unsurlar yönünden yeterli olduğu gözlemlenmiştir [13].

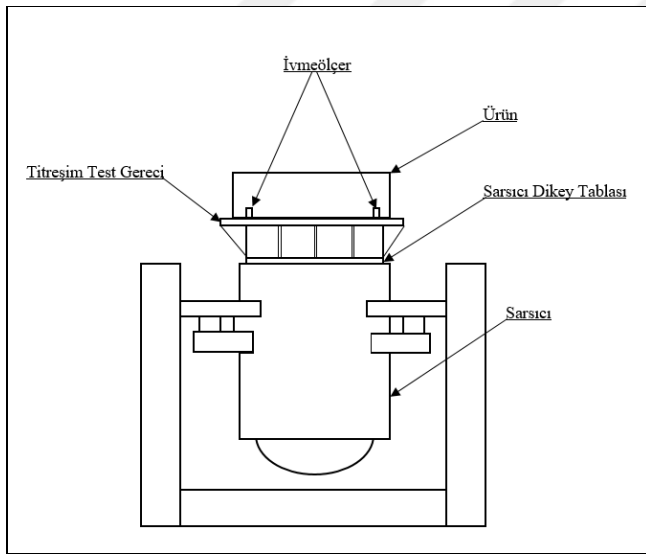
Literatür çalışmaları incelendiğinde tüm çalışmalarda sadece test edilecek ürüne özel titreşim test gereçlerinin tasarlandığı, malzeme olarak Al 6061 serisi, çelik ve magnezyum kullanıldığı ve analizlerin Ansys ortamında çözdürüldüğü görülmüştür. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak, titreşim test gerecinde tabla üzerinde X, Y ve Z eksenlerinde kayabilen adaptör parçalar bulunmaktadır. Bu kayabilen adaptör parçalar sayesinde adaptör ve tablanın ölçüleri kapsamındaki ürünler test edilebilmektedir. X ve Y ekseninde titreşim testleri, sarsıcının kayar tabla düzeneğinde yapılacak olup, tablanın ölçüleri 810x810 mm'dir. Z ekseninde titreşim testi ise sarsıcının armatür düzeneğinde yapılmaktadır ve tablanın ölçüleri 520x520 mm'dir. Adaptör parçaların boyu X ve Y ekseninde 720 mm olup, Z ekseninde 500 mm'dir. Tabla boyutunun ve üzerinde kayan yapıda olan adaptör parçaların bağlantı arayüzü mesafesi olan 643 mm ve boyu 720 baz alındığında, ebatı 643x720 mm'den ve ağırlığı 62 kg'dan düşük ağırlıktaki ürünler X ve Y ekseninde test edilebilirken, Z ekseninde adaptör bağlantı arayüzleri arasındaki mesafe 413 mm ve adaptör boyu 500 mm olduğundan 413x500 mm ölçülerinde ve 62 kg'dan düşük ağırlıktaki ürünler test edilebilir. Literatürde tek ürüne özel geometride titreşim test gereçleri yer almış, birden fazla ürünlere uyarlanabilen bir titreşim test gerecinden bahsedilmemiştir. Bu çalışma uyarlanabilen titreşim test gerecinin tasarımını, analizini ve ürettirilerek, analiz ve deneysel verilerin karşılaştırılmasını içermektedir.

4. MATERYAL VE METOT

Çalışmada, titreşim test gerecinin tasarımı Siemens NX 11 ortamında tamamlanmıştır. Yapılan sonlu elemanlar metoduna bağlı analizler Ansys 18.1 yazılımı ortamında yapılmıştır. Test edilecek ürünlere ait deneysel veriler, titreşim test gereci, LDS 895 tipi elektrodinamik sarsıcı ve PCB Piezotronics firmasına ait 353B03 modeli, ivmeölçer olarak kullanılarak elde edilmiştir.

4.1. Deney Düzenegi

Deneysel veriler toplanırken, deney düzenegi Şekil 4.1’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Deney düzenegi, geri beslemeli elektrodinamik sarsıcı, sarsıcı dikey tablası, titreşim test gereci, ivmeölçer ve test edilecek ürünü içermektedir.



Şekil 4.1. Titreşim test düzenegi

Deneysel veriler elde edilirken test edilecek ürünün ağırlık merkeziyle birebir aynı ağırlık merkezine sahip, test edilecek ürünle aynı fiziksel ölçülerde kaynaklı mekanik parça üretilmiştir. Üretimi sağlanan bu parçaya tek yönlü ivmeölçerler Z eksenine rastsal titreşim analizinde gösterildiği konumda takılmıştır. Verilerin ölçümünde titreşim test gerecinin bağlandığı LDS 895 tipi elektrodinamik sarsıcının özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir [14].

Çizelge 4.1. LDS 895 Sarsıcı Özellikleri

Armatür Çapı	440 mm
Sinüs Pik Kuvveti	56 kN
Maksimum İvme	140 g sinüs / 50 g rastgele
Frekans Aralığı	5 - 2300 Hz
Maksimum Yerdeğiştirme	63,5 mm
Yük Kapasitesi	650 kg
Kayar Tabla Ölçüsü	1200x1200 mm

Titreşim testlerinin yapıldığı LDS 895 tipi sarsıcı görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. LDS 895 Sarsıcı

Adaptör ve test edilen ürün üzerinden ölçümler için PCB Piezotronics firmasına ait 353B03 modeli, ivmeölçer olarak kullanılmıştır (Şekil 4.3) ve özellikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir [15].



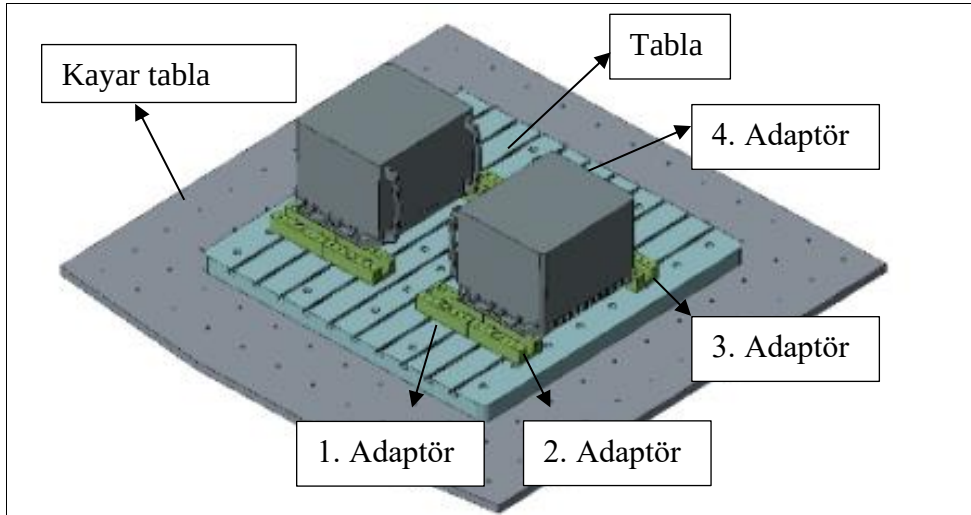
Şekil 4.3. PCB Piezotronics ivmeölçer

Çizelge 4.2. İvmeölçer özellikleri

Hassasiyet	10 mV/g (1.02 mV/(m/s ²))
Ölçüm Aralığı	±500 g pk
Çözünürlük	0.003 g rms (0.03 m/s ² rms)
Frekans Aralığı	1 to 7000 Hz
Algılayıcı Eleman	Kuartz
Ağırlık	10,5 gram

4.2. Ön Çalışmalar

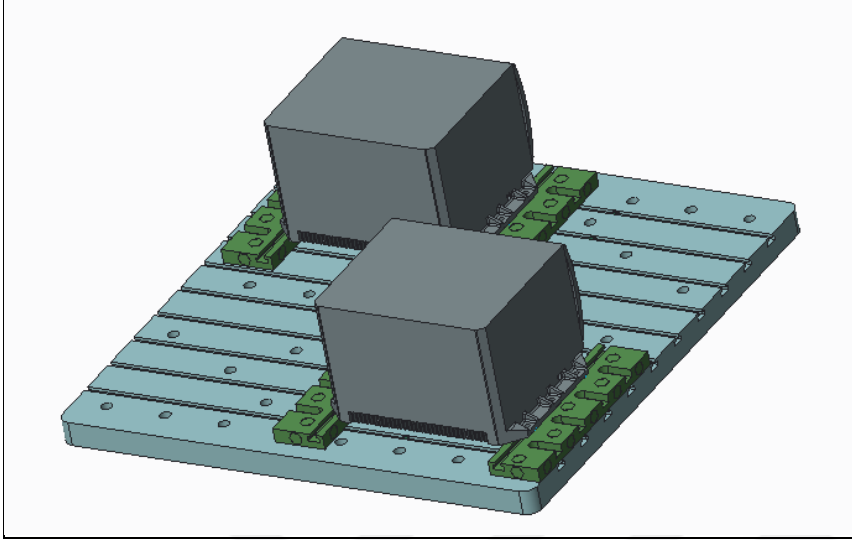
Çalışmaya dört parça adaptörün kullanıldığı, 1 test edilecek ürüne 4 adaptörün bağlandığı tasarımla başlanmıştır (Şekil 4.4). Şekil 4.4'te titreşim test gerecini oluşturan 800x800 mm ölçülerinde tabla, üzerinde M5, M6 ve M8 delik bulunan 8 adaptör parça gösterilmektedir. Titreşim test gerecine test edilmek üzere bağlanan 2 adet ürün ve titreşim test gerecinin bağlanacağı sarsıcının kayar tabla düzeneği de yine Şekil 4.1'de verilmiştir. 4 parçalı adaptör çalışması delik profilleri sık aralıklarda uygulanmasına rağmen her ürünün bağlantı delikleri farklılık göstereceğinden kullanım açısından uygun bulunmamıştır.



Şekil 4.4. Dört parçalı adaptör çalışması

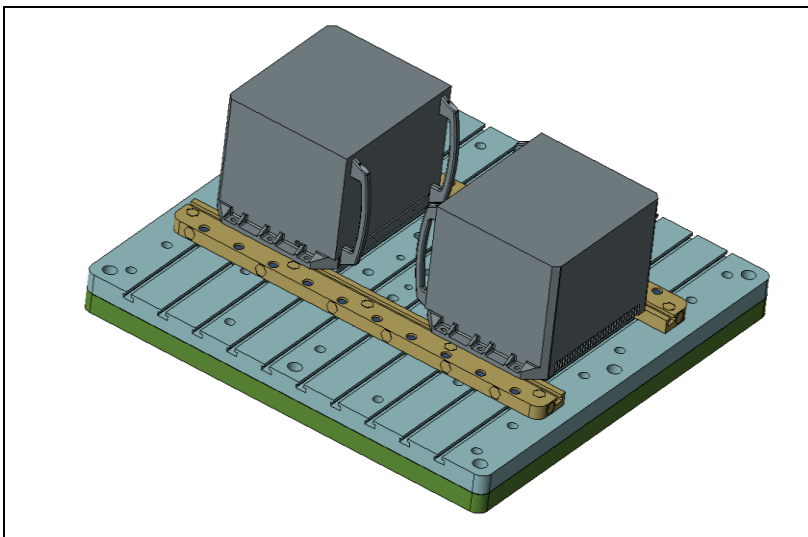
İki parçalı adaptör modelinde (Şekil 4.5), titreşim test gereci, tabla ve tablaya dik ekseninde kanal açılmış adaptör parçalardan oluşmaktadır. Bu modelde adaptör boyutu 350 mm olarak

tasarlanmıştır. Boyutu 350 mm'den küçük ürünlere uygun olup, boyutu 350 mm'den uzun ürünlerin montajına uygun olmadığı düşünülerek tasarımda değişikliğe gidilmiştir.

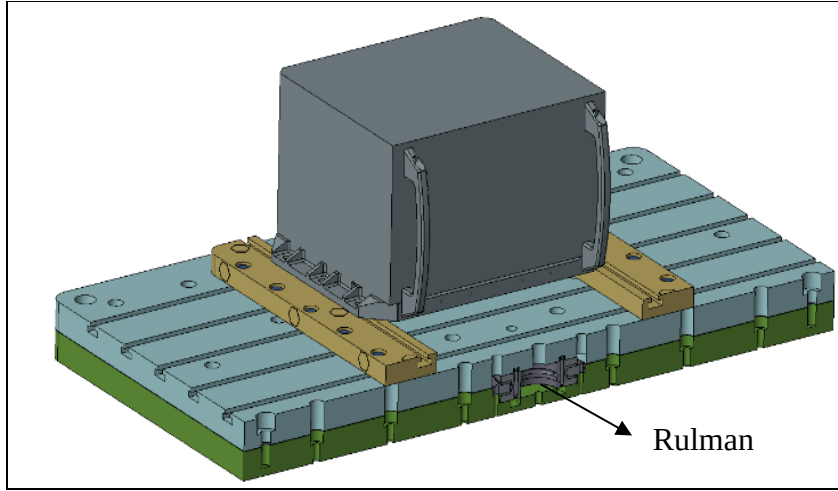


Şekil 4.5. İki parçalı adaptör çalışması

Rulmanlı modelde (Şekil 4.6, Şekil 4.7), eksenel ve radyal kuvvetleri birlikte iletebilen rulman seçilmiştir. Bu model, operatöre montaj kolaylığı sağlamak için yapılmış bir tasarım olup gerek yapılan analizlerde istenilen sonuçların alınamaması gerekse uygun rulmanın yurtdışından tedarik edilecek olması, tedarik süresinin uzun olması sebebi gibi olumsuz nedenlerden dolayı iptal edilmiştir.



Şekil 4.6. Rulmanlı yapı

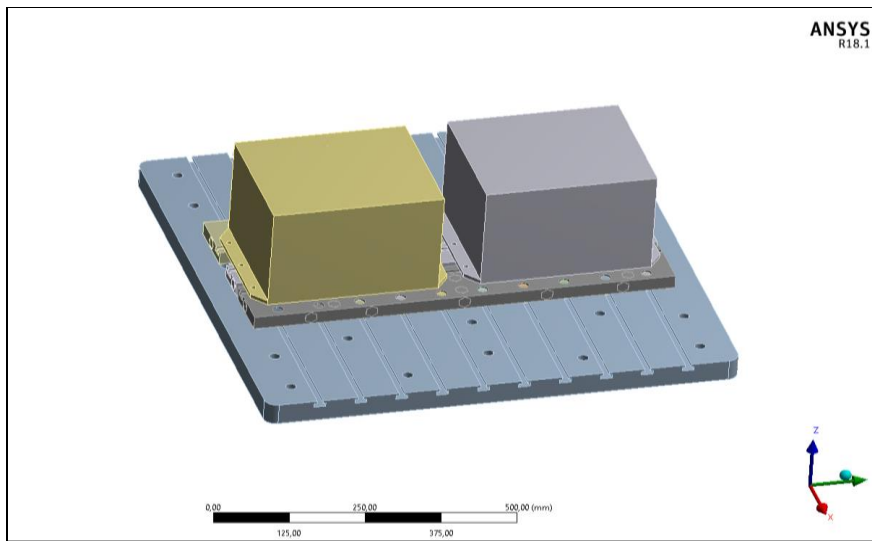


Şekil 4.7. Rulmanlı yapı kesit görünümü

4.3. Son Tasarım

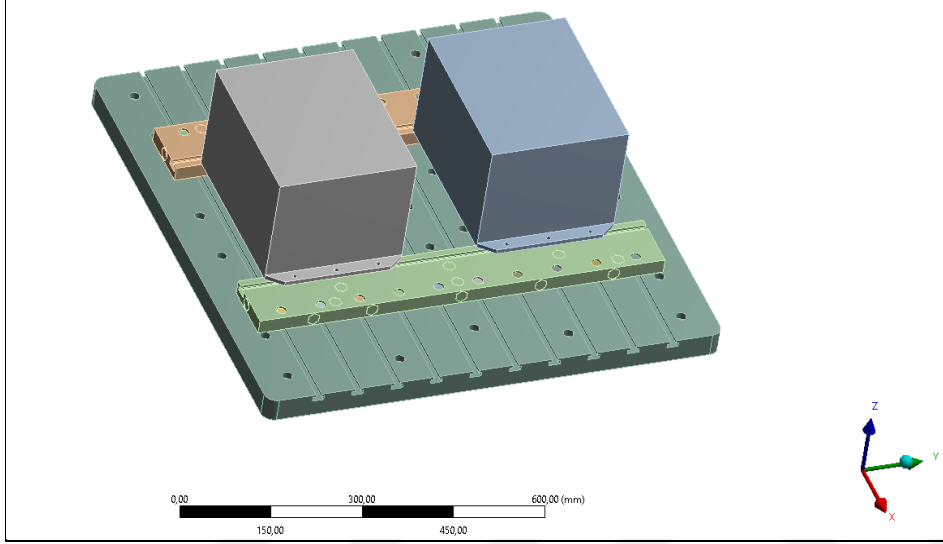
Titreşim testlerini yapıldığı sarsıcıda, X ve Y eksenlerindeki yatay testler için kayar tabla düzeneği, Z eksenindeki dikey testler için armatür tabla düzeneği mevcuttur. Kayar tabla düzeneği 1200x1200 mm ölçülerinde, armatür tabla ise 440 mm çapındadır [14].

X eksenindeki modelde ürünün yerleşimi için 3 adaptör kullanılmıştır (Şekil 4.8).



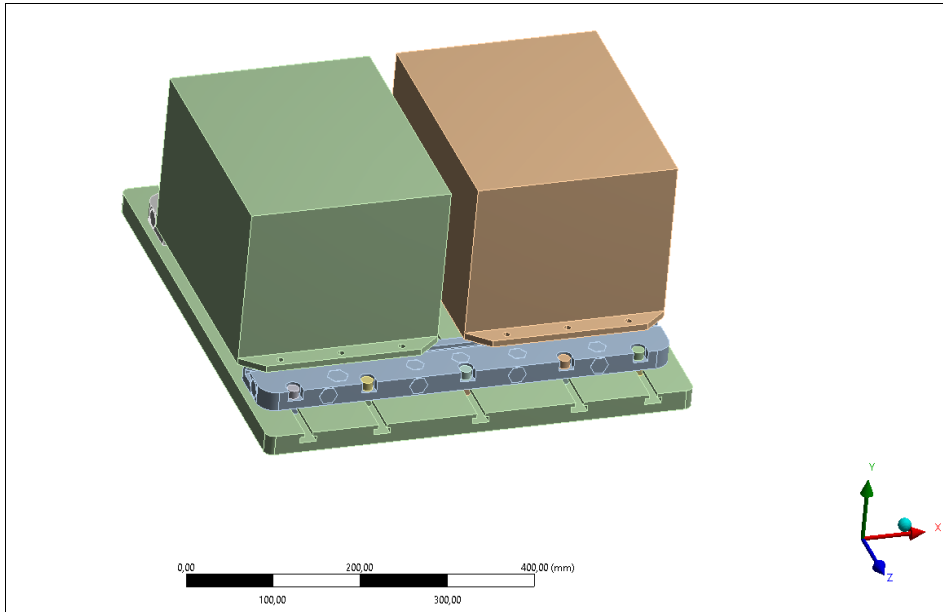
Şekil 4.8. X eksen model görüntüsü

Y eksenindeki modelde 2 adaptör kullanılmıştır (Şekil 4.9). Y eksenini ve X eksenini karşılaştırıldığında, her iki eksenindeki testler için sarsıcının kayar tabla düzeneğine uygun olacak şekilde aynı tabla, tabla üzerinde bulunan aynı adaptör (X ekseninde 3 adet, Y ekseninde 2 adet) kullanılmış olup, farklı olarak test edilen ürünlerin yönleri 90° döndürülmüştür.



Şekil 4.9. Y eksenini model görüntüsü

Z eksenindeki testler sarsıcının armatür tablası düzeneğinde 440 mm çapta yapıldığından Z eksenindeki tabla daha küçük tasarlanmıştır ve modelde de 2 adaptör kullanılmıştır (Şekil 4.10).



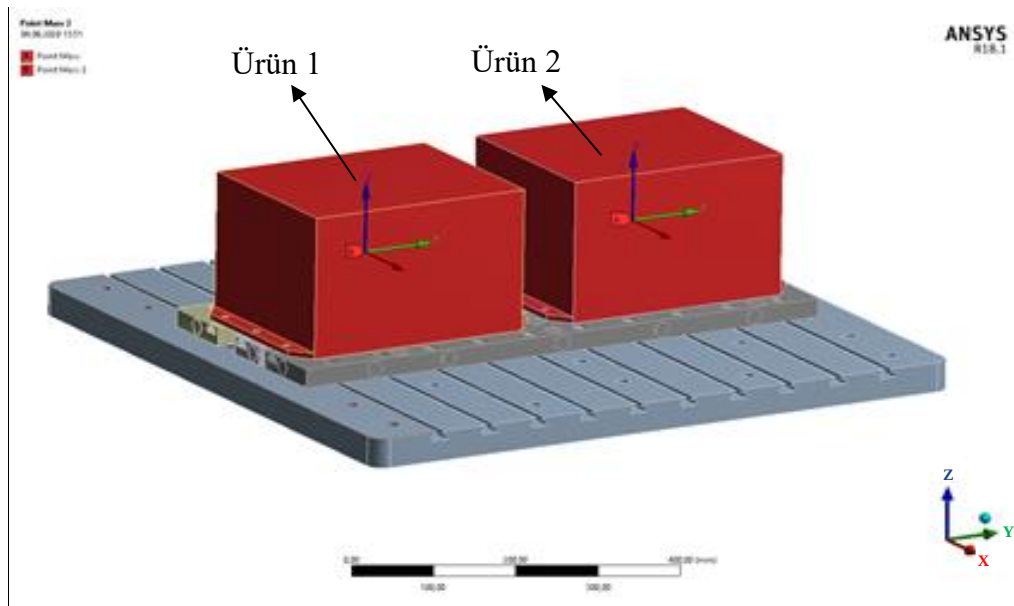
Şekil 4.10. Z eksenini model görüntüsü

Z ekseninde armatür tablasının boyutu 440 mm çapta olduğundan dolayı tablanın altında bulunan delik sayısı 16'dır. Z eksenini için tasarlanan titreşim test gereci tablasının ölçüleri 520x520 mm, adaptörler ise 70 mm eninde ve 500 mm boyundadır. Bu eksenindeki titreşim test gerecinin adaptörlere birlikte ağırlığı 27.2 kg'dır. X ve Y ekseninde kayar tablanın boyutu 1200x1200 mm ebatlarında olduğundan dolayı tablanın altında bulunan delik sayısı 42'dir. X ve Y eksenini için tasarlanan titreşim test gereci tablasının ölçüleri 810x810 mm, adaptörler ise 100 mm eninde 720 mm boyundadır. Bu ekseninde titreşim test gerecinin adaptörlerle birlikte ağırlığı 61.8 kg'dır.

4.4. Kütle Bilgileri

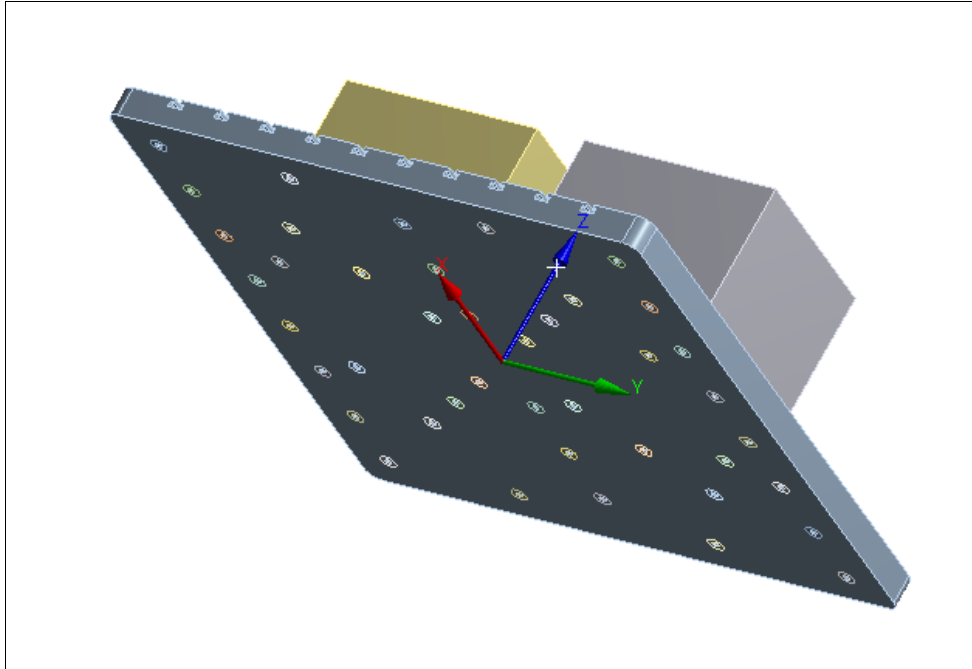
3 ekseninde yapılan analizlerin hepsinde ürün ağırlığını temsilen noktasal kütle kullanılmıştır. Noktasal kütle atanırken ürün modelinin tüm yüzeyleri seçilmiştir ve ürün ağırlığı 31,16 kg olarak atanmıştır. Titreşim test gereğine bağlanarak test edilecek ürünlerin toplam kütlelerinin yaklaşık 62 kg olması hedeflenmiştir.

Test edilecek ürünlerin X eksenini pozisyonundaki model görüntüsü Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. X ekseninde noktasal kütleler

Referans koordinat merkezi titreşim test gereci tablasının alt orta noktası orta noktası alınmıştır (Şekil 4.12).



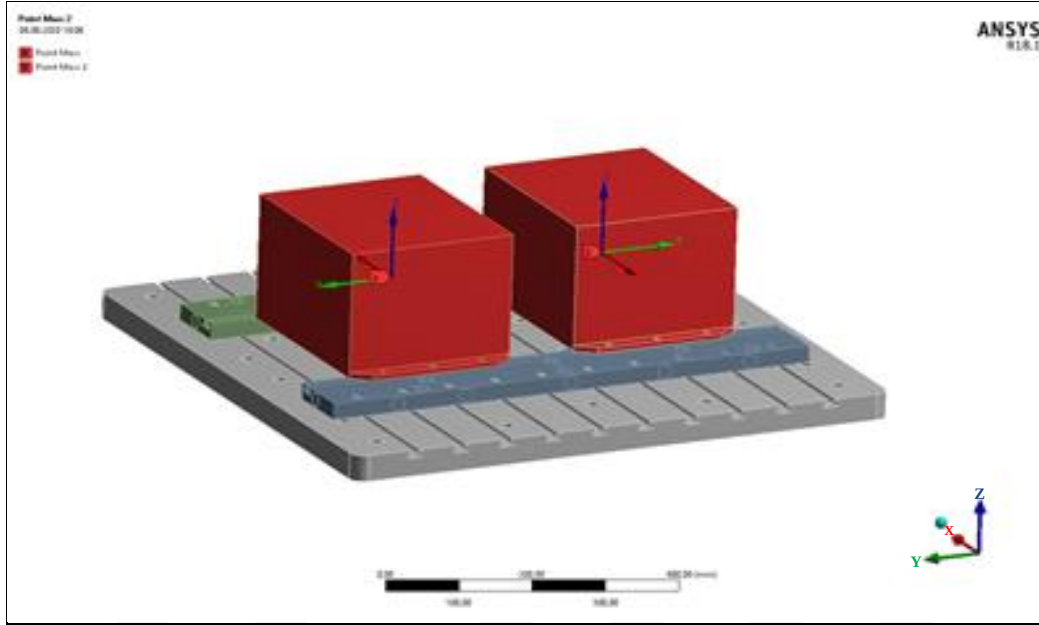
Şekil 4.12. X eksen referans koordinat düzlemi

X ekseninde test edilecek ürünlere ait kütle merkezi ve kütle bilgileri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. X eksen kütle merkezleri

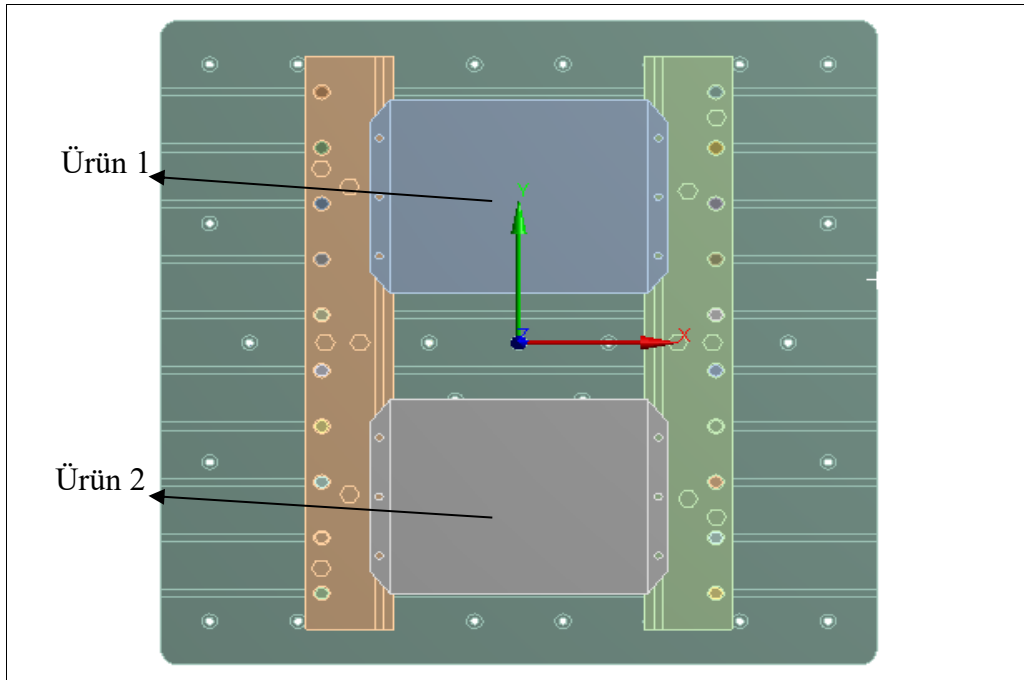
Ürün	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Kütle (kg)
Ürün 1	10,493	181,982	156,783	31,16
Ürün 2	10,493	-181,982	156,783	31,16

Test edilecek ürünlerin Y eksen pozisyonundaki model görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Y ekseninde noktasal kütleler

Referans koordinat merkezi titreşim test gereci tablasının alt orta noktası alınmıştır (Şekil 4.14).



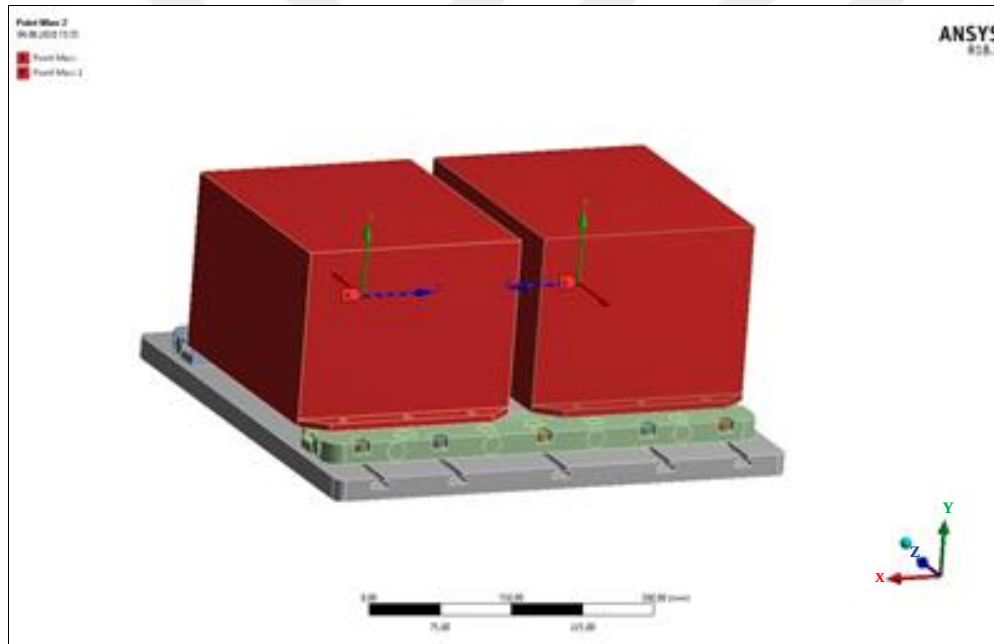
Şekil 4.14. Y eksen referans koordinat düzlemi

Y ekseninde test edilecek ürünlere ait kütle merkezi ve kütle bilgileri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Y eksenli kütle merkezleri

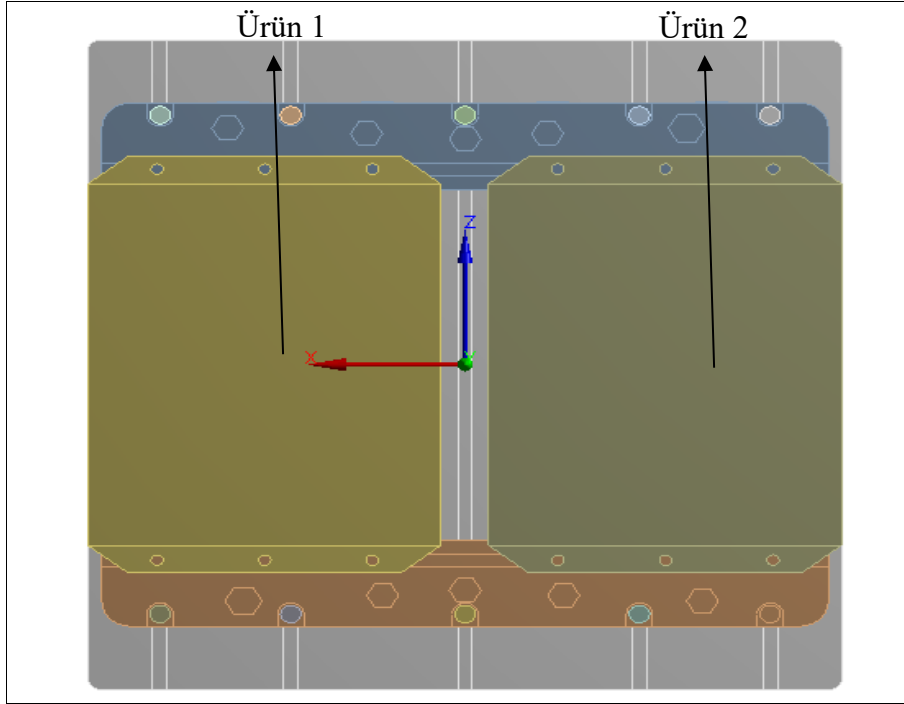
Ürün	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Kütle (kg)
Ürün 1	-0,0175	159,506	156,782	31,16
Ürün 2	0,0175	-159,506	156,782	31,16

Test edilecek ürünlerin Z eksenli pozisyonundaki model görüntüsü Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Z ekseninde noktasal kütleler

Referans koordinat merkezi titreşim test gereci tablasının alt orta noktası alınmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Z eksen referans koordinat düzlemi

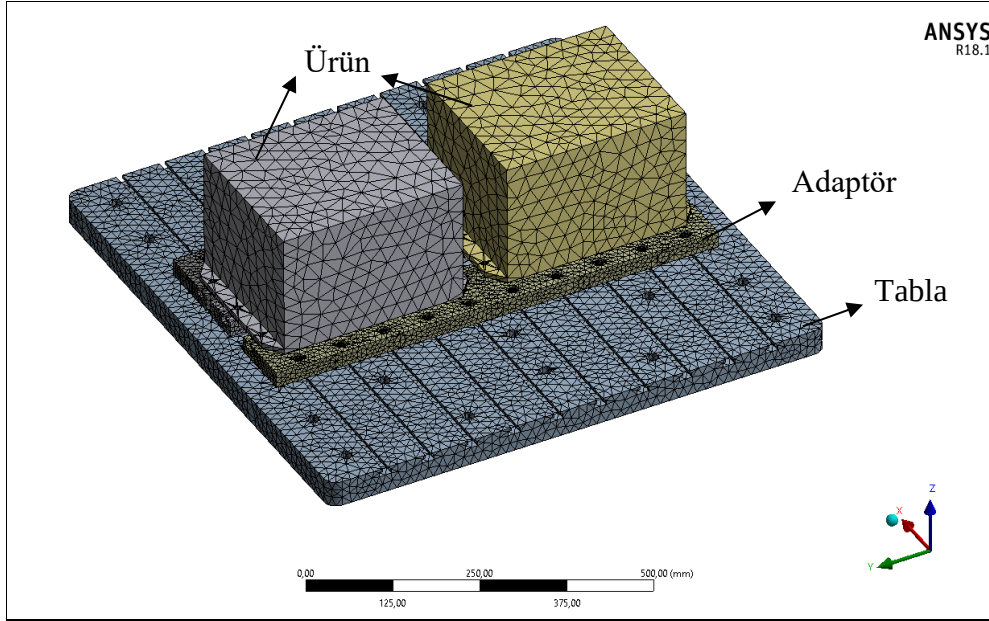
Z ekseninde test edilecek ürünlere ait kütle merkezi ve kütle bilgileri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Z eksen kütle merkezleri

Ürün	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Kütle (kg)
Ürün 1	124,51	138,78	-0,01753	31,16
Ürün 2	-124,51	138,78	0,01753	31,16

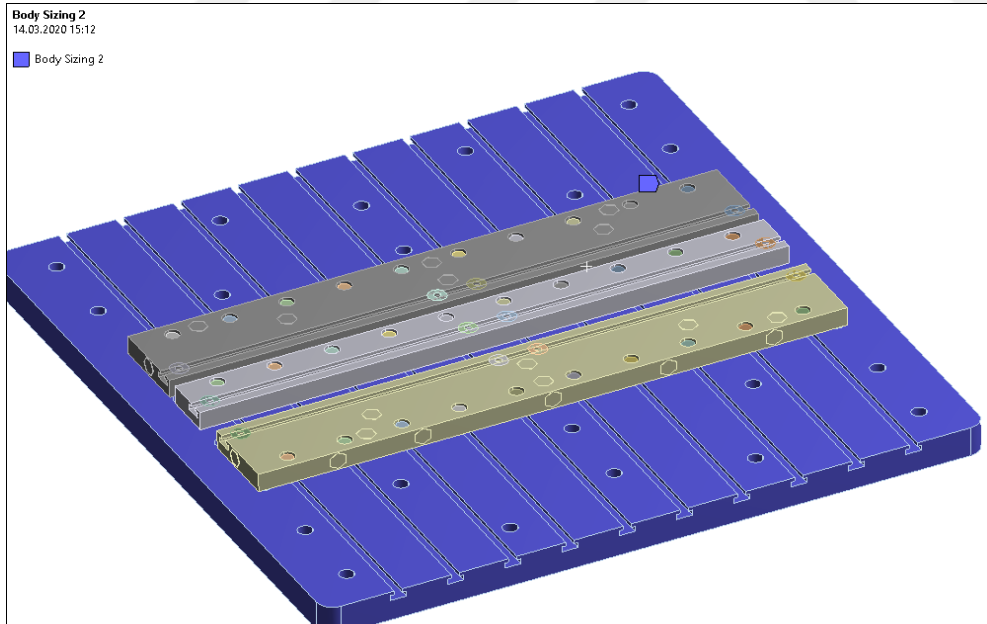
4.5. Çözüm Ağı

Analizde ağ yapısı oluşturulurken dörtyüzlü ve altıyüzlü eleman tipi kullanılarak, elde edilen eleman kaliteleri ayrı ayrı incelenmiş ve nihai olarak dörtyüzlü eleman tipine göre analiz çözdürülmüştür. Oluşan toplam eleman sayısı 376698, düğüm noktası sayısı ise 231309'dur. Genel ağ yapısı görünümü Şekil 4.17'de verilmiştir.



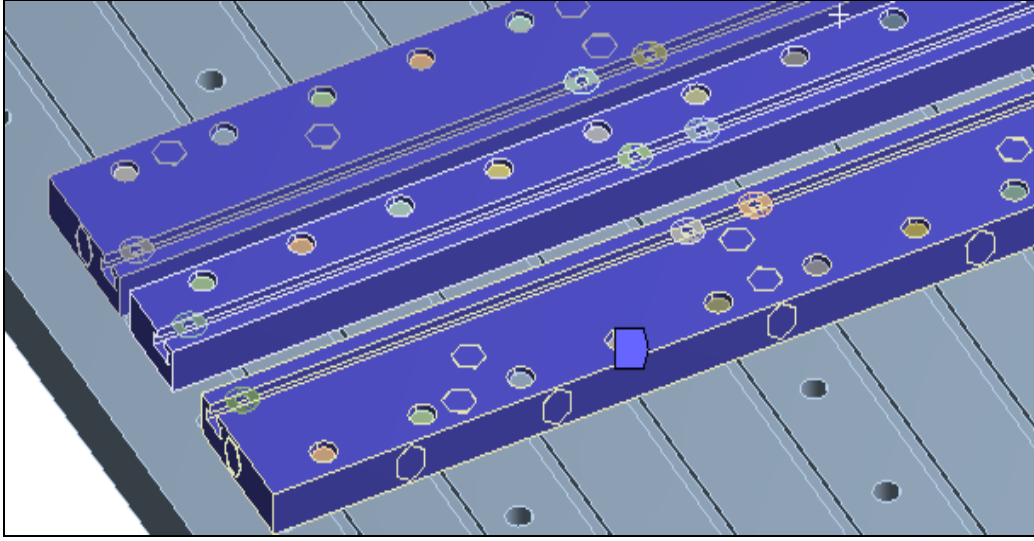
Şekil 4.17. Genel ağ yapısı görünümü

Ağ ayarlarında tablanın eleman boyutu 15 mm girilmiştir (Şekil 4.18).



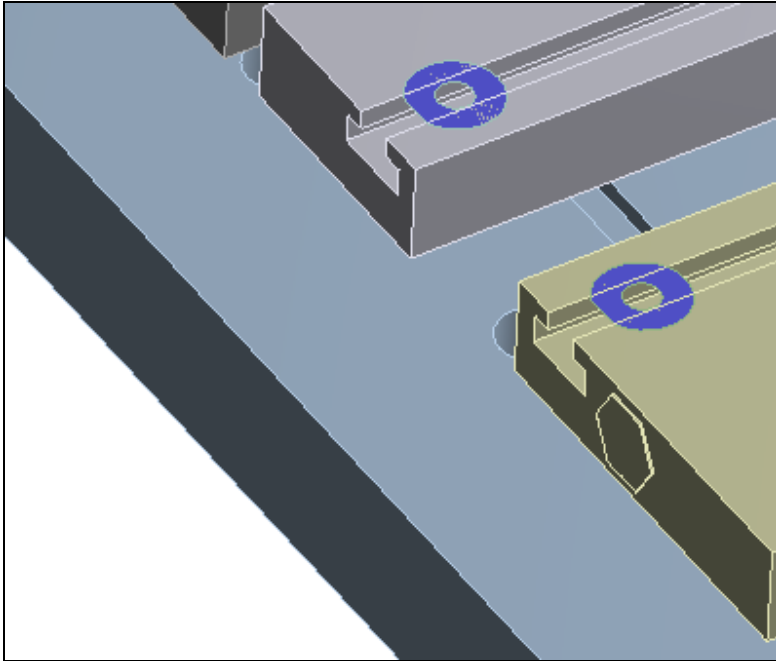
Şekil 4.18. Tablanın eleman boyutu

Adaptörler için eleman boyutu 9mm girilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Adaptörlerin eleman boyutu

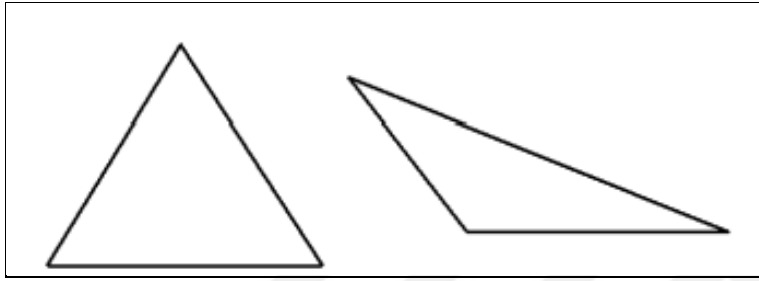
Cıvata gövdesi modele dahil edilmeyip, cıvata ile birbirine bağlanan parçalar cıvata basınç yüzeylerinden birbirine bağlanmıştır. Cıvata basınç yüzeyi, cıvata hesabının gerekmediği durumlarda, cıvata baskı alanını modellemek için kullanılır ve çözüm aşında cıvata basınç yüzeyleri için eleman boyutları 1mm girilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Cıvata yüzeyi eleman boyutu

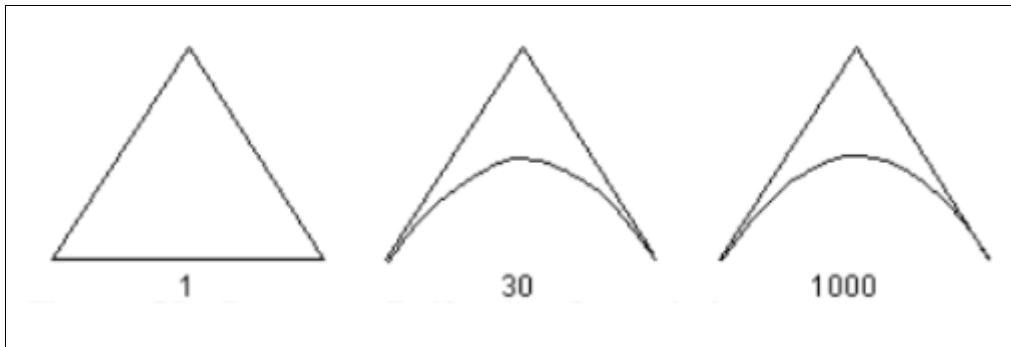
4.6. Eleman Kalitesi

Çalışmada dörtyüzlü ve altıyüzlü eleman tipine göre, eleman kalitesi incelenmiştir. Eleman kalitesi ölçümünde en-boy oranı, çarpıklık, jacobian oranı ve ortogonallık metrikleri kullanılmıştır. En-boy oranı en büyük kenarın en küçük kenara oranıdır ve her kenarı eşit uzunlukta olan ağ için en-boy oranını 1'dir. Çarpıklık, oluşan ağın gerçek şekline ne kadar yakın olduğunun göstergesidir. Şekil 4.21'de şekillerin çarpıklık ideal durumu ve çarpıklık durumu gösterilmiştir [16].



Şekil 4.21. İdeal üçgen ağ ve çarpık durumda üçgen ağ

Jacobian oranı ağ şeklinin ideal durumdan ne kadar saptığıdır. Şekil 4.22'de üçgen elamana ait Jacobian oranının artışıyla ideal şeklinin değişimi gösterilmiştir [17].



Şekil 4.22. Jacobian oranının artışıyla ideal şekil değişimi

Ortogonallık eleman merkezinden kenar yüzeyine olan diklik olarak ifade edilir, çarpıklık kriterine benzerdir. Ortogonallık için 0 en kötü değer, 1 en iyi değerdir [17]. Dörtyüzlü eleman tipi kullanılan ağ yapısında eleman kalitesi metriklerine ait program çıktısı görüntüleri Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.

En-boy oranı 2,22 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

+	Display
+	Defaults
+	Sizing
-	Quality
	Check Mesh Quality Yes, Errors
	Error Limits Standard Mechanical
	☐ Target Quality Default (0.050000)
	Smoothing Medium
	Mesh Metric Aspect Ratio
	☐ Min 1,001
	☐ Max 46,357
	☐ Average 2,22
	☐ Standard Deviation 1,6989
+	Inflation
+	Advanced
+	Statistics

Şekil 4.23. Dörtüzlü eleman için en-boy oranı

Jacobian oranı 0,94 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

Details of "Mesh"	
+	Display
+	Defaults
+	Sizing
-	Quality
	Check Mesh Quality Yes, Errors
	Error Limits Standard Mechanical
	☐ Target Quality Default (0.050000)
	Smoothing Medium
	Mesh Metric Jacobian Ratio (Corner Nodes)
	☐ Min -1,
	☐ Max 1,
	☐ Average 0,94117
	☐ Standard Deviation 0,15222
+	Inflation
+	Advanced
+	Statistics

Şekil 4.24. Dörtüzlü eleman için jacobian oranı

Çarpıklık oranı 0,31 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

Details of "Mesh"	
Display	
Defaults	
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
☐ Min	3,5563e-005
☐ Max	0,99994
☐ Average	0,31641
☐ Standard Deviation	0,20393
Inflation	
Advanced	
Statistics	

Şekil 4.25. Dörtüzlü eleman için çarpıklık oranı

Ortogonallık oranı 0,69 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

Display	
Defaults	
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
☐ Min	5,7252e-005
☐ Max	0,99995
☐ Average	0,69483
☐ Standard Deviation	0,21351
Inflation	
Advanced	
Statistics	

Şekil 4.26. Dörtüzlü eleman için ortogonallık

Altıyüzlü eleman tipi kullanılan ağ yapısında eleman kalitesi metriklerine ait program çıktısı görüntüleri Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.

En-boy oranı 2,82 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Aspect Ratio
☐ Min	1,0009
☐ Max	1099,6
☐ Average	2,8238
☐ Standard Deviation	7,0631
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
+ Statistics	

Şekil 4.27. Altıyüzlü eleman için en-boy oranı

Jacobian oranı 0,84 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Jacobian Ratio (Corner Nodes)
☐ Min	2,7753e-002
☐ Max	1,
☐ Average	0,84619
☐ Standard Deviation	0,20607
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
+ Statistics	

Şekil 4.28. Altıyüzlü eleman için jacobian oranı

Çarpıklık oranı 0,35 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
☐ Min	1,3966e-004
☐ Max	0,99998
☐ Average	0,35053
☐ Standard Deviation	0,21407
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
+ Statistics	

Şekil 4.29. Altıyüzlü eleman için çarpıklık

Ortogonalite oranı 0,67 olarak elde edilmiştir, program çıktısı Şekil 4.30’da gösterilmiştir.

+ Display	
+ Defaults	
+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
☐ Min	2,4309e-005
☐ Max	0,99991
☐ Average	0,67892
☐ Standard Deviation	0,22392
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
+ Statistics	

Şekil 4.30. Altıyüzlü eleman için ortalama

Ağ çözümünde uygulanan dörtyüzlü ve altıyüzlü eleman tiplerine göre elde edilen ağ kalitelerinin karşılaştırılması Çizelge 4.6’da verilmiştir. Eleman kriterleri en boy oranı, jacobian oranı, çarpıklık ve ortalama

Çizelge 4.6 Dörtüzlü ve altıyüzlü eleman tipine göre elde edilen değerler

Eleman Kriteri	Dörtüzlü eleman tipi için kalite ölçüm değerleri	Altıyüzlü eleman tipi için kalite ölçüm değerleri
En boy oranı	2,22	2,82
Jacobian Oranı	0,94	0,84
Çarpıklık	0,31	0,35
Ortogonalılık	0,7	0,67

Eleman kaliteleri için literatürden alınan kalite aralıkları Çizelge 4.7’de verilmiştir [17].

Çizelge 4.7. Eleman kalitesi aralıkları

Eleman Kriteri	Kalite Aralıkları
En boy oranı	$x \approx 1$ İyi Kalite, $5 < x < 10$ Orta Kalite, $20 < x$ Kötü Kalite
Jacobian Oranı	$x \approx 1$ Mükemmel, $x \approx -1$ Kötü Kalite, $x \approx -100$ Kabul Edilemez
Çarpıklık	$0 < x < 0,25$ Mükemmel, $0,25 < x < 0,5$ Çok İyi, $0,5 < x < 0,8$ İyi, $0,8 < x < 0,94$ Kabul Edilebilir, $0,95 < x < 0,97$ Kötü, $0,98 < x < 1$ Kabul Edilemez,
Ortogonalılık	$0 < x < 0,001$ Kabul Edilemez, $0,001 < x < 0,14$ Kötü, $0,15 < x < 0,2$ Kabul Edilebilir, $0,2 < x < 0,69$ İyi, $0,7 < x < 0,95$ Çok İyi, $0,95 < x < 1$ Mükemmel

Elde edilen değerler, Çizelge 4.7’de verilen literatürden alınan kalite aralıklarına göre kıyaslandığında, tüm eleman kriterlerinde dörtüzlü eleman tipinin ideal eleman şekline daha fazla yakınsadığı görülmüştür ve analizlerde dörtüzlü eleman tipi kullanılmıştır.

Analiz sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.8’de verilmiştir. Elde edilen değerlere göre, en-boy oranı yani en uzun ve en kısa kenar oranı 2,22 elde edilmiştir. Jacobian oranı 0,94 elde edilmiştir ve eleman şeklinde konkav oluşumunun çok az olduğu söylenebilir. Çarpıklık

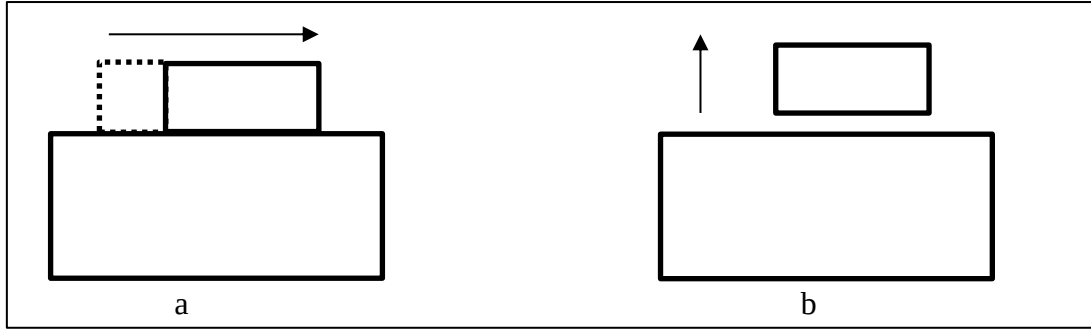
0,31 olarak elde edilmiştir ve literatürde verilen kalite aralığıyla karşılaştırıldığında elde edilen değer çok iyi skalasındadır. Ortogonallık 0,7 elde edilmiştir, literatürde verilen kalite aralığıyla karşılaştırıldığında elde edilen değer çok iyi skalada olup, elemanların merkezden gelen dikliğin çok az bozulmayla genel yapısını koruduğu söylenebilir.

Çizelge 4.8. Analizde elde edilen ağ kaliteleri

Eleman Kriteri	Eleman Kalitesi Ölçüm Değeri (Dörtüzlü)	Eleman Kalitesi Ölçüm Değeri (Altıüzlü)	Kalite Aralıkları	Analizde Elde Edilen Değerin Kabul Kriteri
En boy oranı	2,22	2,82	$1 < x < 46,357$	İyi
Jacobian oranı	0,94	0,84	$-1 < x < 1$	İyi
Çarpıklık	0,31	0,35	$0,25 < x < 0,5$	Çok İyi
Ortogonallık	0,7	0,67	$0,7 < x < 0,95$	Çok İyi

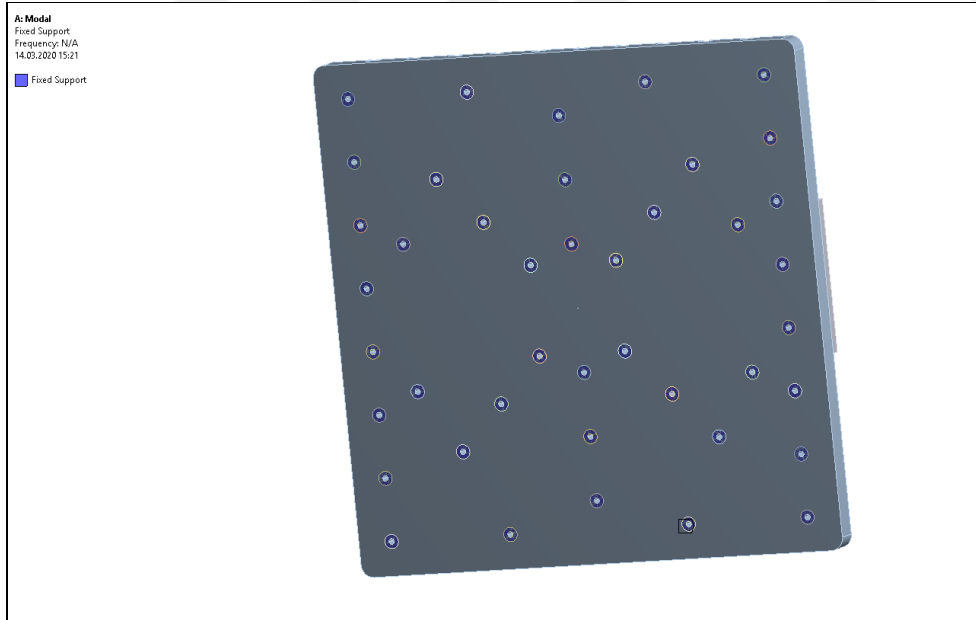
4.7. Uygulanan Sınır Koşulları

Temas algoritmaları, modeli oluşturan parçaların birbiriyle nasıl bağlandığını analizde temsil eden ilişkilerdir. Tanımlanan sınır koşullarında, sabitleyip serbestlik derecesini düşürmek için sabit sınır koşulu kullanılmıştır. Sabit sınır koşulu titreşim test gereci tablasının alt bölümü olan, sarsıcı kayar tablasıyla temas ettiği yüzeydeki cıvata basınç yüzeylerine tanımlanmıştır. Sınır koşulu için kullanılan bir diğer temas ilişkisi çeşidi ise ayrılmaz bağlantıdır. Bu ilişki tanımlanan parçalar birbiriyle sanki tek parçaymış gibi birlikte hareket edebilirler ancak ayrı olarak hareket edemezler. Bu temas ilişkisi şekli Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.38 ve Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Kayar bağlantı temas ilişkisi de sınır koşulu tanımlamalarında kullanılmıştır. Bu temas ilişkisinde Şekil 4.31 a'da görülen kayma hareketi mümkündür ancak Şekil 4.31 b'de görülen normal yönde hareket mümkün değildir [18].

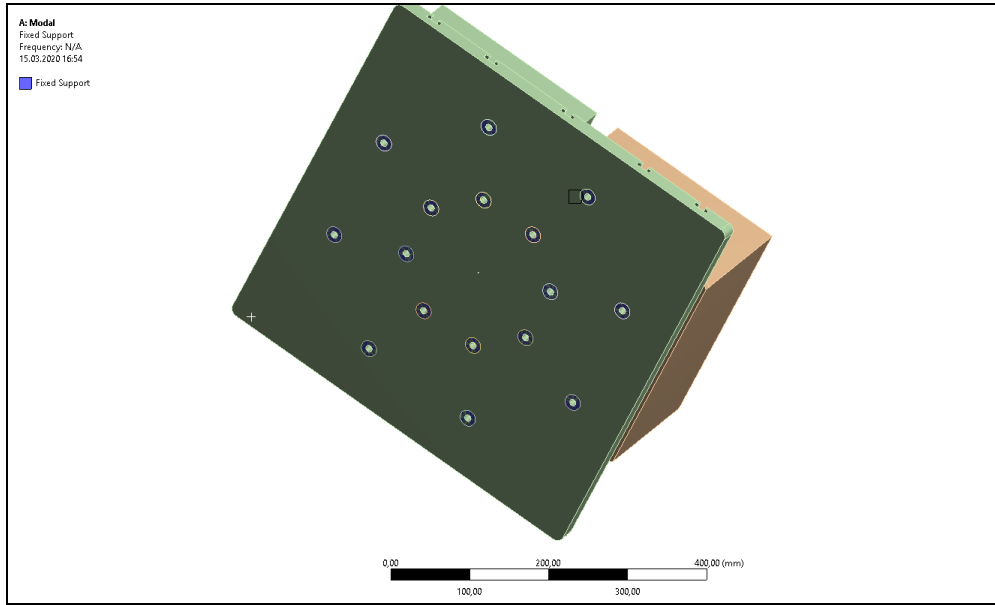


Şekil 4.31 Kayar bağlantı temas ilişkisi

Bu temas ilişkisi şekli Şekil 4.37, Şekil 4.39 ve Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Temas algoritmalarında X eksen pozisyonu referans alınmıştır. Aynı temas algoritmaları Y ve Z eksenindeki analizlerde de uygulanmıştır. Kayar tablaya ve armatüre bağlanacak olan titreşim test gereci tablalarının alt yüzeyinde bulunan cıvata basınç yüzeylerinden sabit sınır koşulu verilmiştir (Şekil 4.32, Şekil 4.33).

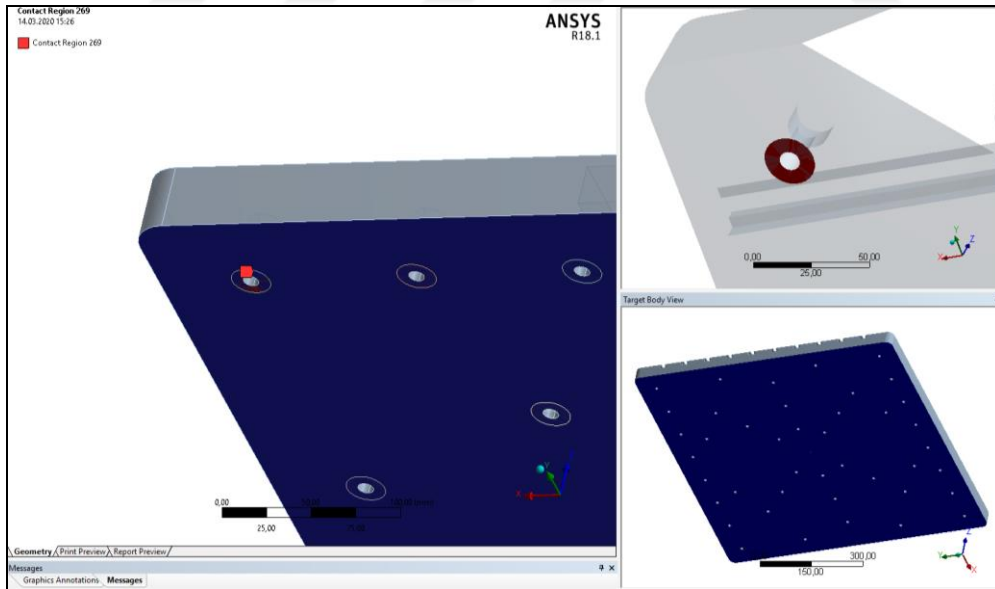


Şekil 4.32. Sabit destekler (X ve Y eksen)



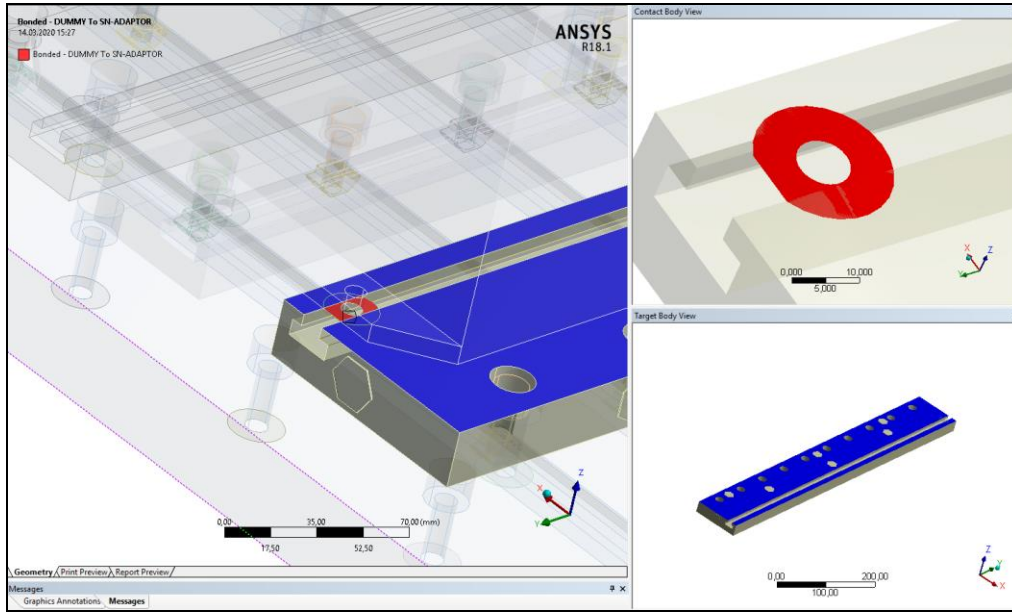
Şekil 4.33. Sabit destekler (Z eksen)

Tablanın alt yüzeyi ve cıvata basınç yüzeyleri arasında ayrılmaz bağlantı tanımlanmıştır (Şekil 4.34).



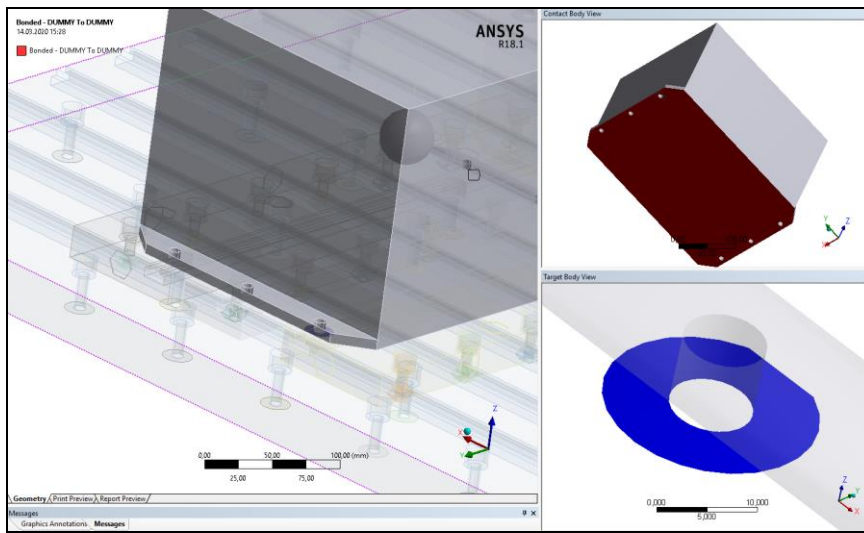
Şekil 4.34. Tabla bağlantısı

Adaptörler ve cıvata basınç yüzeyleri arasında ayrılmaz bağlantı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.35).



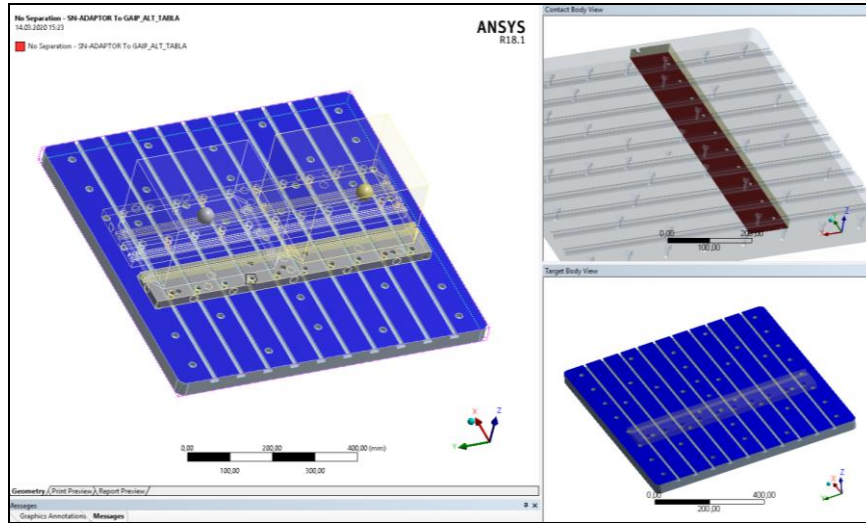
Şekil 4.35. Adaptör ve cıvata basınç yüzeyi bağlantısı

Ürün ve titreşim gereci bağlantısını sağlayan cıvatalar modele dahil edilmeyip cıvata basınç yüzeyleri modellenmiştir. Ürün ve cıvata basınç yüzeyleri arasında ayrılmaz bağlantı tanımlanmıştır (Şekil 4.36). Ürün ve adaptörler arasında ayrıca bir bağlantı tanımlanmamıştır çünkü ikisi de cıvata basınç yüzeyleri aracılığı ile bağlanmaktadır.



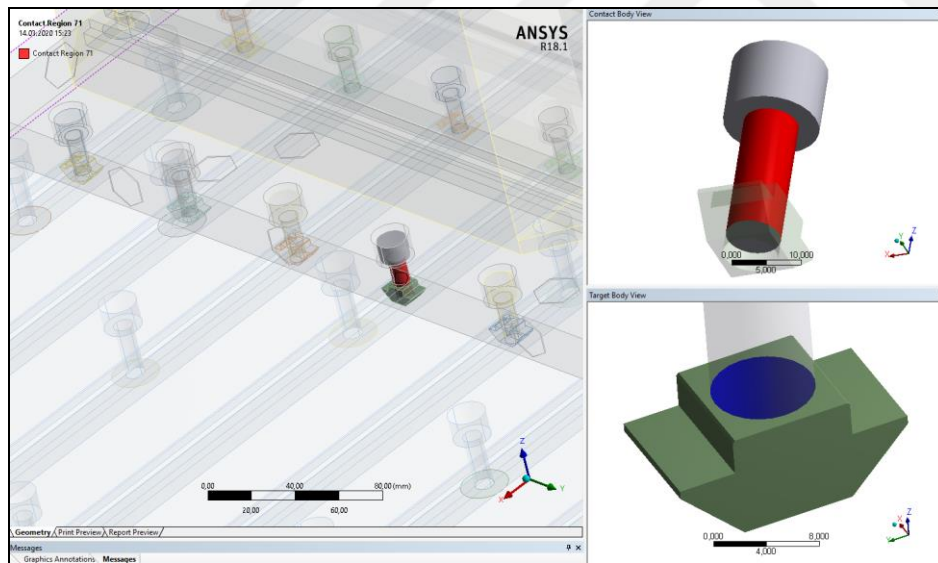
Şekil 4.36. Ürün ve cıvata basınç yüzeyi ayrılmaz bağlantısı

Adaptör ve tabla arasında kayar bağlantı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.37).



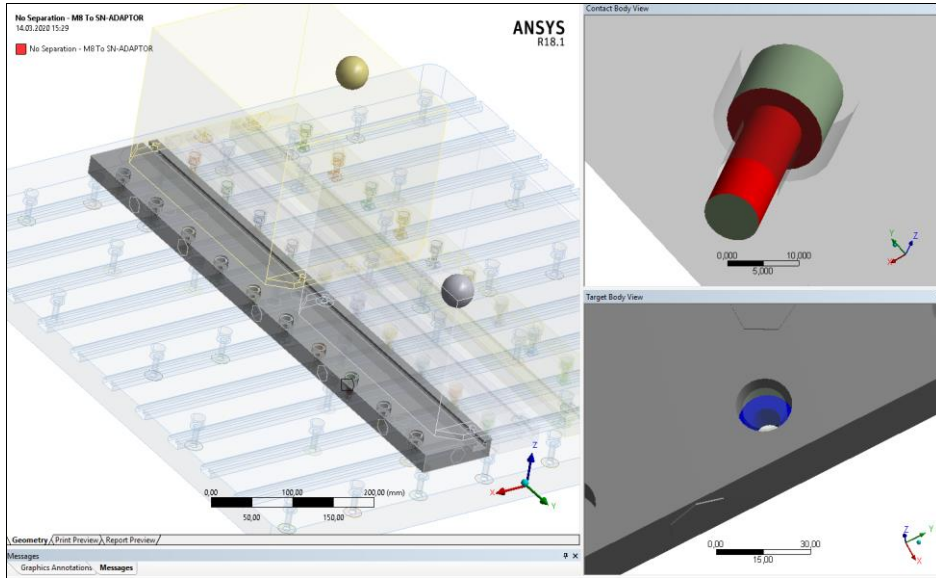
Şekil 4.37. Tabla ve adaptör bağlantısı

Cıvata ve somun temas yüzeyleri arasında ayrılmaz bağlantı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.38).



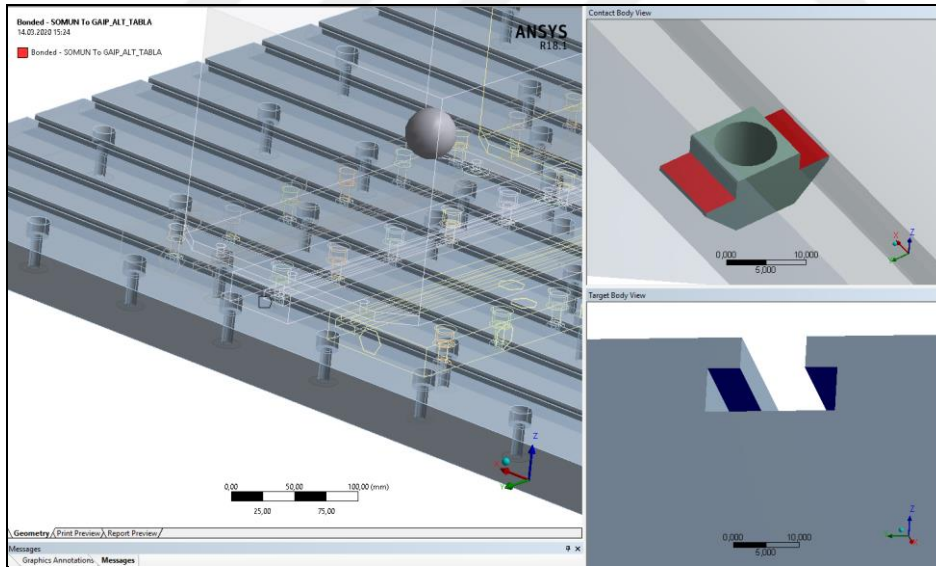
Şekil 4.38. Cıvata ve somun bağlantısı

Cıvatalar ve adaptör arasında temas yüzeylerine kayar bağlantı tanımlanmıştır (Şekil 4.39).



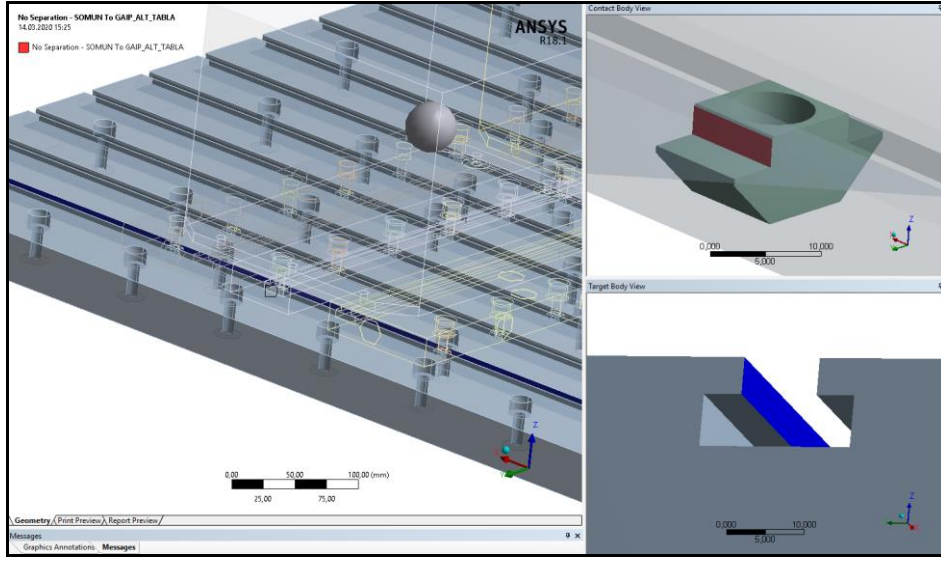
Şekil 4.39. Cıvata ve adaptör bağlantısı

Somun üst yüzeyleri ve tablanın temas yüzeyleri arasında ayrılmaz bağlantı tanımlanmıştır (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. Somun ve tabla bağlantısı

Somun ve tabla yan yüzeyleri arasında kayar bağlantı tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.41).



Şekil 4.41. Somun ve tabla yan yüzeyi bağlantısı

4.8. Analiz Ayarları

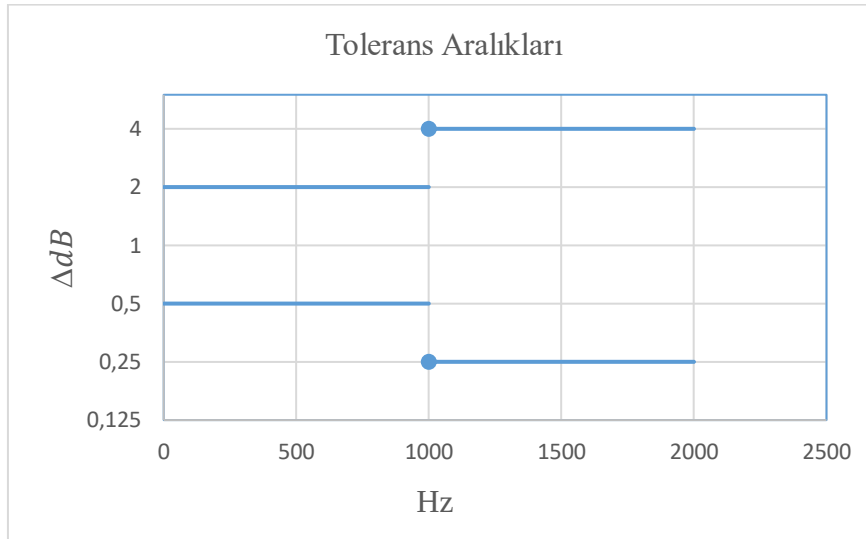
Titreşim test gerecinin modal analizinde 2500 Hz frekansına kadar mod şekilleri belirlenmiştir. MIL-HDBK-2164A standardında belirtildiği üzere aktarım oranı hesaplanırken 20-2000 Hz arasında sinüs yüklemesi tanımlanmıştır. Genlik değeri için $\pm 3\text{dB}$ aralığı baz alınmıştır. Genlik değeri 1000-2000Hz arası frekanslar için $\pm 6\text{dB}$ olarak verilmiştir [4].

Standartta belirtilen $\pm 3\text{dB}$ değerleri [4] Eş. 4.1’de yerine koyulduğunda -3dB için hesaplanan değer 0,5 olup aktarım oranı aralığının minimumunu temsil etmektedir. $+3\text{dB}$ değeri Eş.4.1’de yerine koyulduğunda hesaplanan değer 2 olup aralığın maksimumunu temsil etmektedir. Benzer şekilde 1000-2000Hz arası frekanslarda genliğin en fazla toleransı $+6\text{dB}$ ve en az toleransı -6dB olarak verildiğinden Eş. 4.1 kullanılarak hesaplanırsa 0,25-4 aralığı (Eş. 4.3) bulunur. Bu sebeple, aktarım oranlarının uygunluğu teyit edilirken Eş. 4.2 ve Eş. 4.3’te verilen aralıklar dikkate alınmıştır. Elde edilen aktarım oranları grafiği Şekil 4.42’de gösterilmiştir.

$$\Delta dB = 10 \log \left[\frac{a_2}{a_1} \right] \quad (4.1)$$

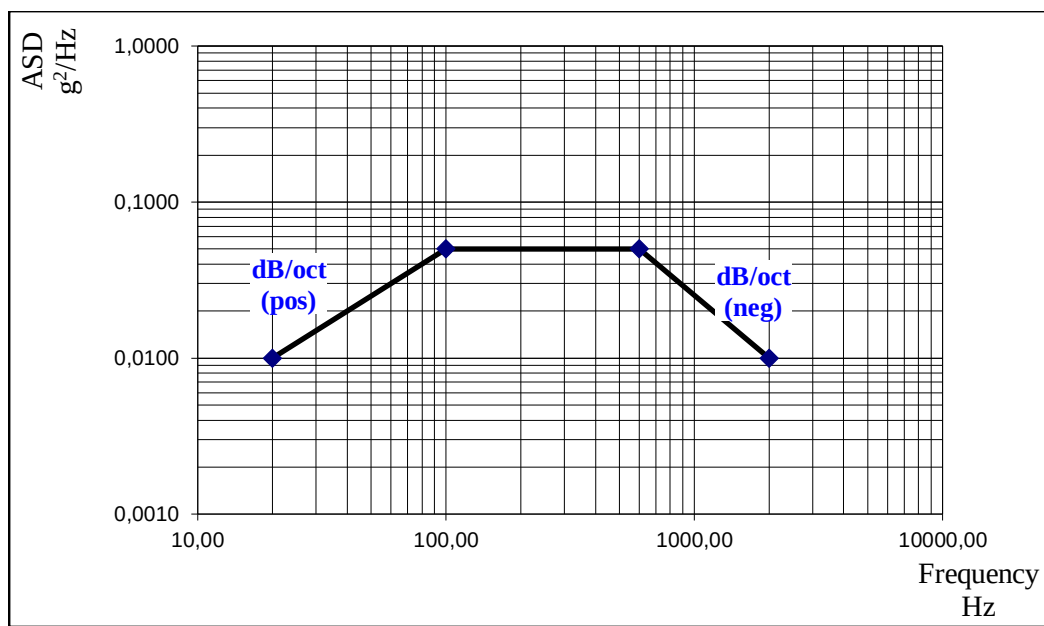
$$0,5 < \frac{a_2}{a_1} < 2 \quad (4.2)$$

$$0,25 < \frac{a_2}{a_1} < 4 \quad (4.3)$$



Şekil 4.42. Aktarım oranı tolerans aralığı

Rastgele titreşim analizi için MIL-HDBK-2164A standardında belirtilen 6,06 G RMS değerindeki profil tanımlanmıştır. Rastsal titreşim profili Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43. Rastsal titreşim profili

Rastgele titreşim analizinde 6,06 G RMS değerinde ve 20-2000 Hz aralığındaki profil değerlerinin programa girdisi Şekil 4.44'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

Tabular Data		
	Frequency [Hz]	☒ G Acceleration [G^2 /Hz]
1	20,	1,e-002
2	80,	4,e-002
3	350,	4,e-002
4	2000,	7,e-003
*		

Şekil 4.44. Program veri girdisi görüntüsü

Sönüm değerleri harmonik analizlerde %2 olarak girilmiştir (Şekil 4.45).

+	Output Controls	
-	Damping Controls	
	☐ Constant Damping Ratio	2,e-002
	Stiffness Coefficient Define By	Direct Input
	☐ Stiffness Coefficient	0,
	☐ Mass Coefficient	0,
+	Analysis Data Management	

Şekil 4.45. Sönüm değeri program görüntüsü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

3 ayrı ekseninde modal analizler çözdürülmüş, 2000 Hz üst limit olan test frekansının ötesinde yaklaşık 2500 Hz'e kadar sistemin dinamik davranışını incelemek amacıyla X ve Y eksenindeki analizlerde 15 mod çözüm alınmış olup, Z eksenindeki analizlerde 20 mod için çözüm alınmıştır. Baskın frekanslar titreşim enerjisinin diğer frekanslara göre en fazla aktarıldığı ve en fazla deformasyona sebep olabilecek frekanslardır. Kütle katılım faktörünün en yüksek olduğu baskın frekanslar incelenmiş olup mod şekilleri baskın frekansları kapsayacak şekilde gösterilmiştir. Harmonik titreşim ve rastsal titreşim incelenmiş olup analiz sonuçlarına göre aktarım oranları 3 eksen için verilmiştir.

5.1. X Ekseninde Oluşan Doğal Frekanslar

Sistemin dinamik davranışını veren modal analiz sonrası X ekseninde elde edilen doğal frekans değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Buna göre ilk doğal frekans değeri 612,4 Hz olup, hedeflenen 200 Hz değerinin üzerinde kalmıştır ve yapısal olarak tasarım uygun olduğundan, tasarım değişikliğine gidilmemiştir. Yaklaşık 2500 Hz'e kadar 15 mod çözüm alınmış olup test frekansı olan 2000 Hz'e kadar 10 mod olduğu görülmüştür.

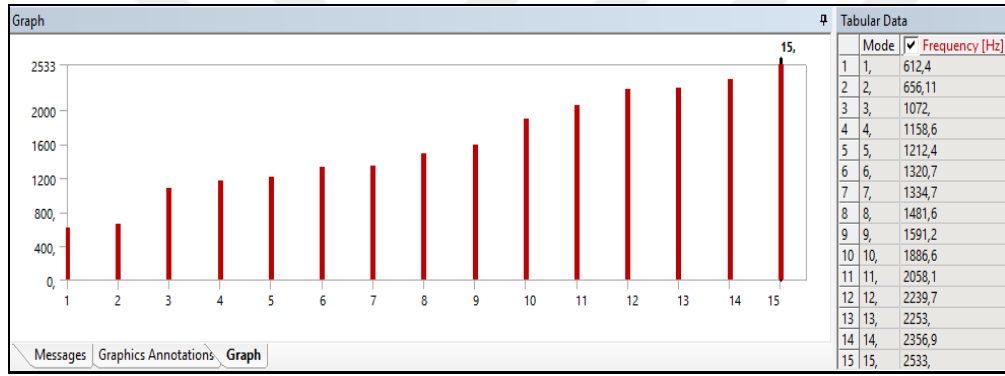
Çizelge 5.1. X ekseninde doğal frekans değerleri

Mod#	Frekans (Hz)
1	612,4
2	656,11
3	1072,
4	1158,6
5	1212,4
6	1320,7
7	1334,7
8	1481,6
9	1591,2

Çizelge 5.1. (devam) X eksenı doğal frekans değeri

10	1886,6
11	2058,1
12	2239,7
13	2253
14	2356,9
15	2533

Yazılımdan alınan doğal frekanslara ait görüntü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. X eksenı doğal frekans değeri yazılım gösterimi

5.2. X Eksenı Konumunda Oluşan Kütıle Katılım Oranları

Elde edilen doğal frekanslara göre X ekseninde oluşın kütıle katılım oranları incelenmiştir. X eksenı yönünde en fazla kütıle katılım oranı birinci mod olan 612,4 Hz’de 0,347 olarak elde edilmiştir. Y eksenı yönüne aktarılan en fazla kütıle katılım oranı üçüncü mod olan 1072,04 Hz’de 0,535 olarak görülmüştür. Z eksenı yönüne aktarılan en fazla kütıle katılım oranı ise 1481,61 Hz’de 0,357 olarak elde edilmiştir. Kütıle katılım oranlarının X, Y ve Z eksenleri için yazılım görüntüsü Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	612.401	0.16329E-02	0.23821	1.000000	0.567436E-01	0.576881	0.347030
2	656.108	0.15241E-02	0.40919E-03	0.001718	0.167434E-06	0.576883	0.102399E-05
3	1072.04	0.93280E-03	-0.67295E-02	0.028251	0.452868E-04	0.577343	0.276962E-03
4	1158.59	0.86312E-03	0.36850E-02	0.015470	0.135794E-04	0.577482	0.830480E-04
5	1212.41	0.82481E-03	0.18751	0.787175	0.351608E-01	0.934943	0.215035
6	1320.71	0.75717E-03	-0.39886E-01	0.167442	0.159091E-02	0.951117	0.972961E-02
7	1334.72	0.74922E-03	-0.64764E-01	0.271879	0.419438E-02	0.993759	0.256518E-01
8	1481.61	0.67494E-03	-0.72091E-02	0.030264	0.519712E-04	0.994287	0.317843E-03
9	1591.20	0.62845E-03	0.22425E-01	0.094139	0.502870E-03	0.999399	0.307543E-02
10	1886.60	0.53005E-03	0.96589E-03	0.004055	0.932938E-06	0.999409	0.570562E-05
11	2058.13	0.48588E-03	0.10071E-02	0.004228	0.101420E-05	0.999419	0.620257E-05
12	2239.73	0.44648E-03	0.49511E-02	0.020785	0.245130E-04	0.999668	0.149916E-03
13	2252.98	0.44386E-03	0.25294E-02	0.010618	0.639766E-05	0.999733	0.391265E-04
14	2356.94	0.42428E-03	-0.51211E-02	0.021498	0.262261E-04	1.000000	0.160392E-03
15	2533.01	0.39479E-03	-0.34772E-04	0.000146	0.120913E-08	1.000000	0.739471E-08
sum					0.983627E-01		0.601562

Şekil 5.2. X yönünde kütle katılım oranları

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	612.401	0.16329E-02	0.73811E-04	0.000250	0.544803E-08	0.533724E-07	0.333188E-07
2	656.108	0.15241E-02	0.60494E-02	0.020452	0.365952E-04	0.358563E-03	0.223807E-03
3	1072.04	0.93280E-03	0.29579	1.000000	0.874913E-01	0.857478	0.535075
4	1158.59	0.86312E-03	-0.62290E-01	0.210590	0.388009E-02	0.895490	0.237297E-01
5	1212.41	0.82481E-03	0.27649E-01	0.093476	0.764481E-03	0.902980	0.467537E-02
6	1320.71	0.75717E-03	0.28943E-01	0.097849	0.837672E-03	0.911186	0.512299E-02
7	1334.72	0.74922E-03	0.18291E-01	0.061838	0.334559E-03	0.914463	0.204608E-02
8	1481.61	0.67494E-03	0.44904E-02	0.015181	0.201637E-04	0.914661	0.123316E-03
9	1591.20	0.62845E-03	-0.32053E-01	0.108364	0.102738E-02	0.924726	0.628320E-02
10	1886.60	0.53005E-03	0.85165E-01	0.287923	0.725299E-02	0.995781	0.443575E-01
11	2058.13	0.48588E-03	-0.28397E-02	0.009601	0.806413E-05	0.995860	0.493182E-04
12	2239.73	0.44648E-03	0.22485E-02	0.007602	0.505595E-05	0.995909	0.309209E-04
13	2252.98	0.44386E-03	-0.18709E-01	0.063251	0.350029E-03	0.999338	0.214069E-02
14	2356.94	0.42428E-03	-0.15904E-02	0.005377	0.252931E-05	0.999363	0.154686E-04
15	2533.01	0.39479E-03	-0.80627E-02	0.027258	0.650078E-04	1.000000	0.397572E-03
sum					0.102076		0.624271

Şekil 5.3. Y yönündeki kütle katılım oranları

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	612.401	0.16329E-02	0.19430E-02	0.007841	0.377536E-05	0.434892E-04	0.230892E-04
2	656.108	0.15241E-02	-0.17938E-01	0.072388	0.321759E-03	0.374991E-02	0.196780E-02
3	1072.04	0.93280E-03	0.74958E-02	0.030250	0.561873E-04	0.439714E-02	0.343627E-03
4	1158.59	0.86312E-03	0.32414E-01	0.130808	0.105067E-02	0.165001E-01	0.642565E-02
5	1212.41	0.82481E-03	0.10036E-01	0.040500	0.100716E-03	0.176602E-01	0.615951E-03
6	1320.71	0.75717E-03	-0.85071E-01	0.343307	0.723702E-02	0.101025	0.442598E-01
7	1334.72	0.74922E-03	0.59684E-01	0.240857	0.356217E-02	0.142058	0.217854E-01
8	1481.61	0.67494E-03	0.24780	1.000000	0.614039E-01	0.849383	0.375531
9	1591.20	0.62845E-03	0.65430E-02	0.026405	0.428108E-04	0.849876	0.261820E-03
10	1886.60	0.53005E-03	0.10209E-02	0.004120	0.104230E-05	0.849888	0.637445E-05
11	2058.13	0.48588E-03	0.14433E-02	0.005825	0.208323E-05	0.849912	0.127405E-04
12	2239.73	0.44648E-03	0.11244	0.453738	0.126417E-01	0.995535	0.773135E-01
13	2252.98	0.44386E-03	0.14917E-01	0.060199	0.222524E-03	0.998098	0.136090E-02
14	2356.94	0.42428E-03	-0.12844E-01	0.051834	0.164980E-03	0.999998	0.100898E-02
15	2533.01	0.39479E-03	-0.37351E-03	0.001507	0.139507E-06	1.000000	0.853191E-06
sum					0.868114E-01		0.530917

Şekil 5.4. Z yönündeki kütle katılım oranları

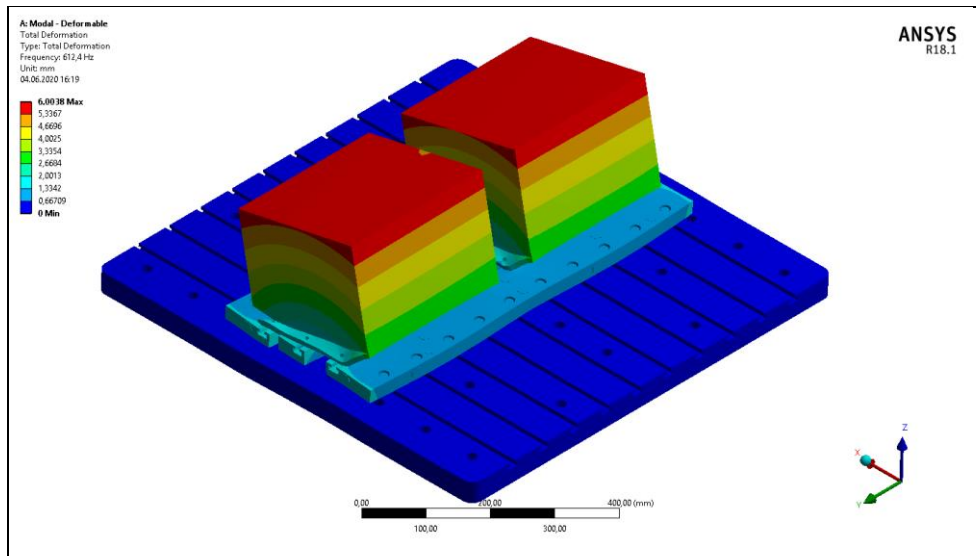
X ekseninde yapılan modal analizler sonucu en büyük kütle katılım oranının yakalandığı baskın frekanslar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. X pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar

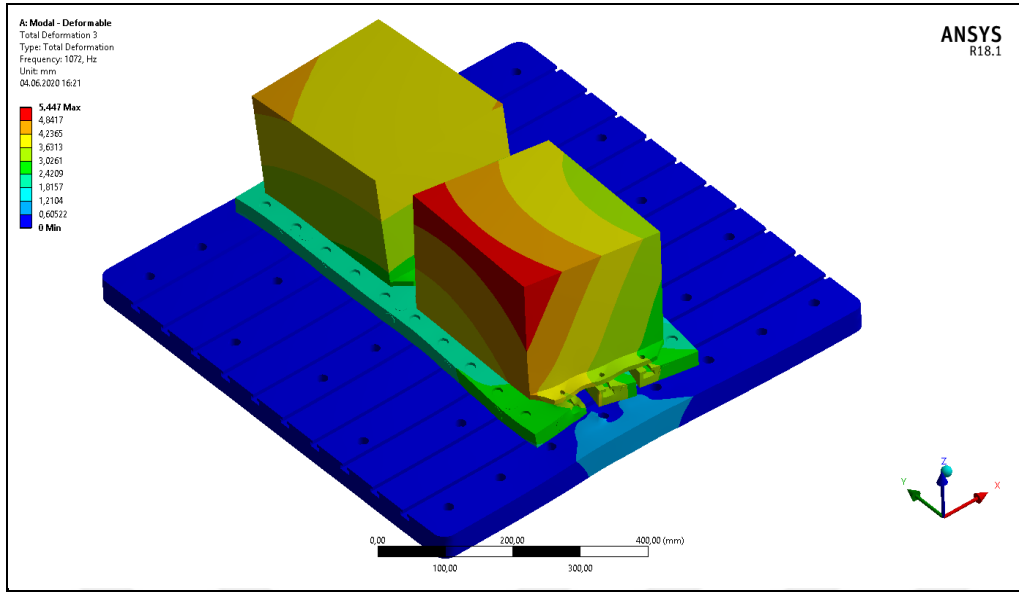
	Mod#	Kütle Katılım Faktörü	Baskın Frekans (Hz)
X Yönü	1	0,347	612,401
Y Yönü	3	0,535	1072,04
Z Yönü	8	0,375	1481,61

5.3. X Ekseninde Oluşan Mod Şekilleri

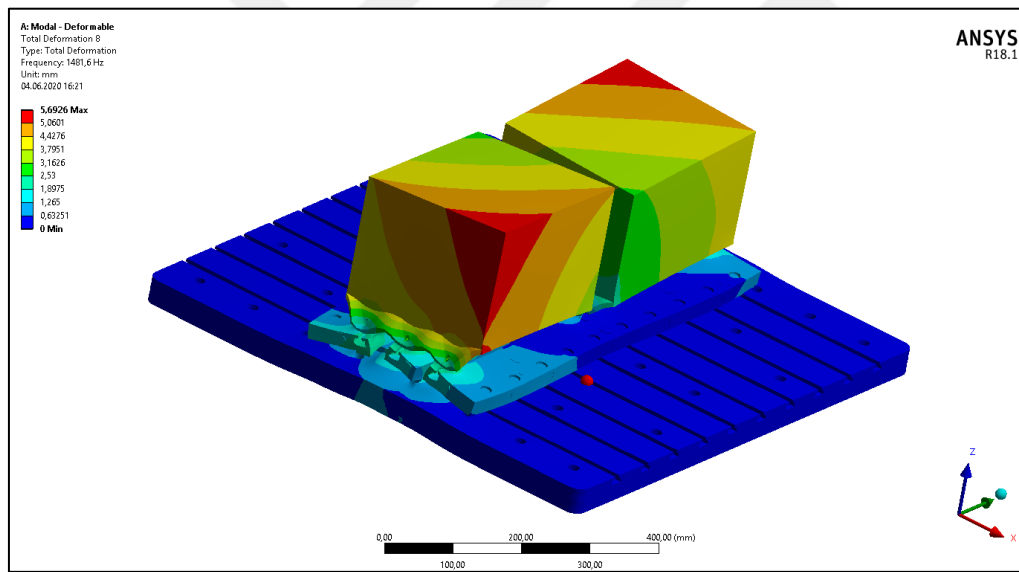
X ekseninde oluşan baskın frekanslara göre mod şekilleri incelendiğinde en fazla deplasman miktarı, X eksen yönünde, kırmızı ile gösterilen ve test edilen ürünlerin üst tarafında görülmüştür (Şekil 5.5). Y ve Z eksen yönünde de oluşan en fazla deplasmanlar kırmızı renkle Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Y ve Z eksenlerindeki mod şekilleri incelendiğinde adaptörlerde deformasyon oluşumu görülebilir ancak bu deformasyonlar 200 Hz üzerinde kalan yüksek frekanslarda oluştuğundan tasarımında değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 5.5. X eksen yönü mod 1



Şekil 5.6. Y eksenı yönü mod 3



Şekil 5.7. Z eksenı yönü mod 8

5.4. Y Eksenı Konumunda Oluşan Doğal Frekanslar

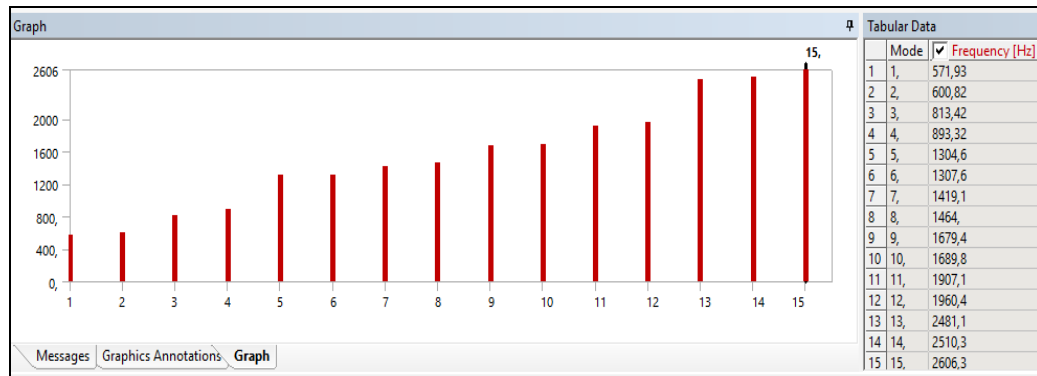
Y ekseninde elde edilen doğal frekans değeri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Buna göre ilk doğal frekans değeri 571,93 Hz olup, hedeflenen 200 Hz değeri üzerinde kalmıştır ve yapısal olarak tasarım uygun olduğundan, tasarım değişikliğine gidilmemiştir. Yaklaşık

2500 Hz'e kadar 15 mod çözüm alınmış olup test frekansı olan 2000 Hz'e kadar 12 mod olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3. Y eksenini doğal frekans değerleri

Mod#	Frekans (Hz)
1	571,93
2	600,82
3	813,42
4	893,32
5	1304,6
6	1307,6
7	1419,1
8	1464
9	1679,4
10	1689,8
11	1907,1
12	1960,4
13	2481,1
14	2510,3
15	2606,3

Yazılımdan alınan doğal frekanslara ait görüntü Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Y eksenini doğal frekans değerleri grafik gösterimi

5.5. Y Ekseninde Oluşan Kütle Katılım Oranları

Elde edilen doğal frekanslara göre Y ekseninde oluşan kütle katılım oranları incelenmiştir. X ekseninde yönünde en fazla kütle katılım oranı üçüncü mod olan 813,51 Hz’de 0,575 olarak elde edilmiştir. Y ekseninde yönüne aktarılan en fazla kütle katılım oranı birinci mod olan 571,92 Hz’de 0,299 olarak görülmüştür. Z ekseninde yönüne aktarılan en fazla kütle katılım oranı ise yedinci mod olan 1419,1 Hz’de 0,477 olarak elde edilmiştir. Kütle katılım oranlarının X, Y ve Z eksenleri için yazılım görüntüsü Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	571.927	0.17485E-02	0.41191E-03	0.001374	0.169670E-06	0.183545E-05	0.108656E-05
2	600.816	0.16644E-02	-0.65406E-04	0.000218	0.427797E-08	0.188173E-05	0.273958E-07
3	813.418	0.12294E-02	0.29984	1.000000	0.899020E-01	0.972540	0.575726
4	893.324	0.11194E-02	0.66078E-03	0.002204	0.436633E-06	0.972544	0.279617E-05
5	1304.64	0.76649E-03	-0.72807E-05	0.000024	0.530088E-10	0.972544	0.339464E-09
6	1307.58	0.76477E-03	-0.21453E-03	0.000715	0.460226E-07	0.972545	0.294725E-06
7	1419.10	0.70467E-03	0.21423E-03	0.000714	0.458957E-07	0.972545	0.293913E-06
8	1463.95	0.68308E-03	0.13017E-02	0.004341	0.169434E-05	0.972564	0.108504E-04
9	1679.39	0.59545E-03	0.45528E-01	0.151843	0.207280E-02	0.994987	0.132741E-01
10	1689.78	0.59179E-03	-0.38058E-02	0.012693	0.144844E-04	0.995143	0.927572E-04
11	1907.12	0.52435E-03	0.31181E-02	0.010399	0.972224E-05	0.995249	0.622606E-04
12	1960.40	0.51010E-03	-0.83395E-04	0.000278	0.695479E-08	0.995249	0.445380E-07
13	2481.15	0.40304E-03	0.93393E-03	0.003115	0.872227E-06	0.995258	0.558568E-05
14	2510.25	0.39837E-03	0.20937E-01	0.069827	0.438343E-03	1.000000	0.280712E-02
15	2606.30	0.38369E-03	0.38414E-04	0.000128	0.147563E-08	1.000000	0.944984E-08
sum					0.924407E-01		0.591984

Şekil 5.9. X ekseninde kütle katılım oranları

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	571.927	0.17485E-02	0.21636	1.000000	0.468105E-01	0.488571	0.299771
2	600.816	0.16644E-02	0.54712E-03	0.002529	0.299336E-06	0.488574	0.191693E-05
3	813.418	0.12294E-02	-0.11272E-03	0.000521	0.127047E-07	0.488574	0.813600E-07
4	893.324	0.11194E-02	0.86129E-04	0.000398	0.741815E-08	0.488574	0.475053E-07
5	1304.64	0.76649E-03	0.27080E-01	0.125162	0.733306E-03	0.496228	0.469604E-02
6	1307.58	0.76477E-03	-0.18375	0.849269	0.337624E-01	0.848613	0.216212
7	1419.10	0.70467E-03	0.19228E-02	0.008887	0.369715E-05	0.848652	0.236763E-04
8	1463.95	0.68308E-03	-0.10310	0.476530	0.106298E-01	0.959597	0.680724E-01
9	1679.39	0.59545E-03	0.75997E-03	0.003513	0.577562E-06	0.959603	0.369867E-05
10	1689.78	0.59179E-03	-0.57364E-03	0.002651	0.329062E-06	0.959607	0.210729E-05
11	1907.12	0.52435E-03	-0.29175E-03	0.001348	0.851176E-07	0.959608	0.545087E-06
12	1960.40	0.51010E-03	-0.13974E-03	0.000646	0.195286E-07	0.959608	0.125060E-06
13	2481.15	0.40304E-03	0.62130E-01	0.287166	0.386019E-02	0.999897	0.247204E-01
14	2510.25	0.39837E-03	-0.31121E-02	0.014384	0.968519E-05	0.999998	0.620233E-04
15	2606.30	0.38369E-03	0.38120E-03	0.001762	0.145310E-06	1.000000	0.930557E-06
sum					0.958110E-01		0.613567

Şekil 5.10. Y ekseninde kütle katılım oranları

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	571.927	0.17485E-02	-0.59399E-04	0.000218	0.352829E-08	0.464412E-07	0.225949E-07
2	600.816	0.16644E-02	-0.19915E-01	0.072960	0.396591E-03	0.522019E-02	0.253974E-02
3	813.418	0.12294E-02	-0.76762E-04	0.000281	0.589248E-08	0.522027E-02	0.377350E-07
4	893.324	0.11194E-02	-0.59076E-03	0.002164	0.348992E-06	0.522486E-02	0.223492E-05
5	1304.64	0.76649E-03	-0.22789E-03	0.000835	0.519348E-07	0.522555E-02	0.332587E-06
6	1307.58	0.76477E-03	0.50972E-03	0.001867	0.259812E-06	0.522897E-02	0.166382E-05
7	1419.10	0.70467E-03	0.27295	1.000000	0.745037E-01	0.985887	0.477116
8	1463.95	0.68308E-03	0.38966E-02	0.014276	0.151834E-04	0.986087	0.972337E-04
9	1679.39	0.59545E-03	-0.39083E-03	0.001432	0.152746E-06	0.986089	0.978177E-06
10	1689.78	0.59179E-03	0.40477E-02	0.014829	0.163835E-04	0.986305	0.104919E-03
11	1907.12	0.52435E-03	0.90359E-05	0.000033	0.816482E-10	0.986305	0.522870E-09
12	1960.40	0.51010E-03	0.32071E-01	0.117495	0.102852E-02	0.999843	0.658658E-02
13	2481.15	0.40304E-03	-0.74220E-04	0.000272	0.550865E-08	0.999843	0.352770E-07
14	2510.25	0.39837E-03	0.10765E-03	0.000394	0.115881E-07	0.999843	0.742091E-07
15	2606.30	0.38369E-03	-0.34522E-02	0.012648	0.119179E-04	1.000000	0.763212E-04
SUM					0.759731E-01		0.486527

Şekil 5.11. Z eksenî yönünde kütle katılım oranları

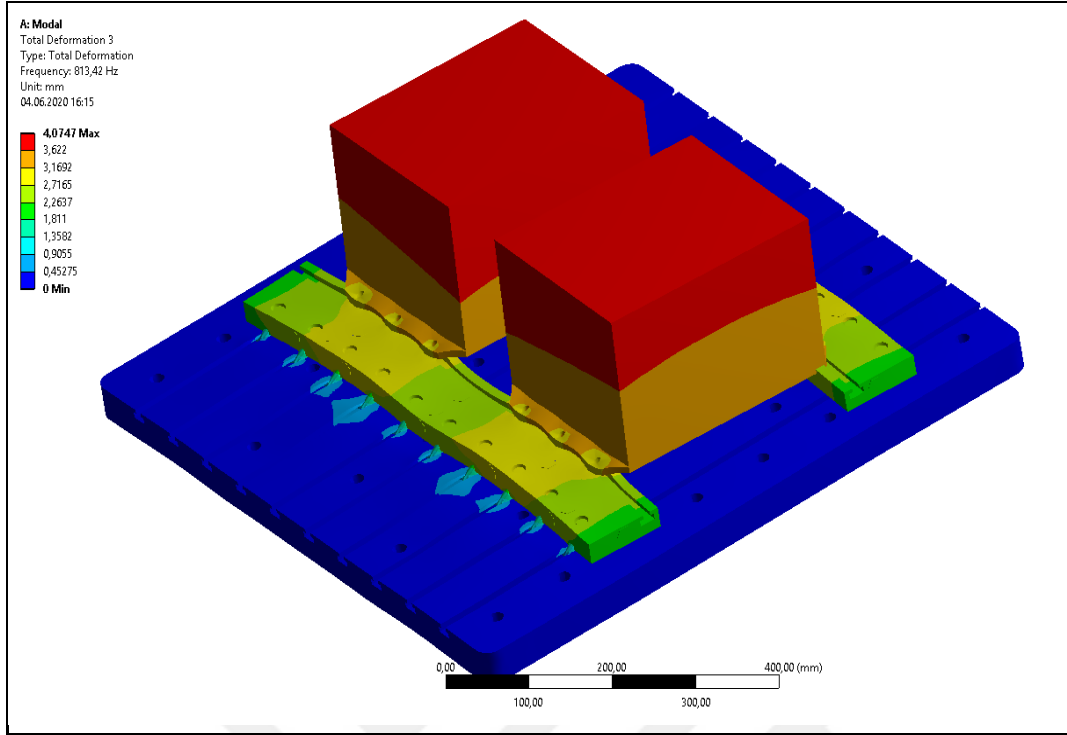
Y eksenî pozisyonunda yapılan modal analizler sonucu en büyük kütle katılım oranının yakalandığı baskın frekanslar Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Y pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar

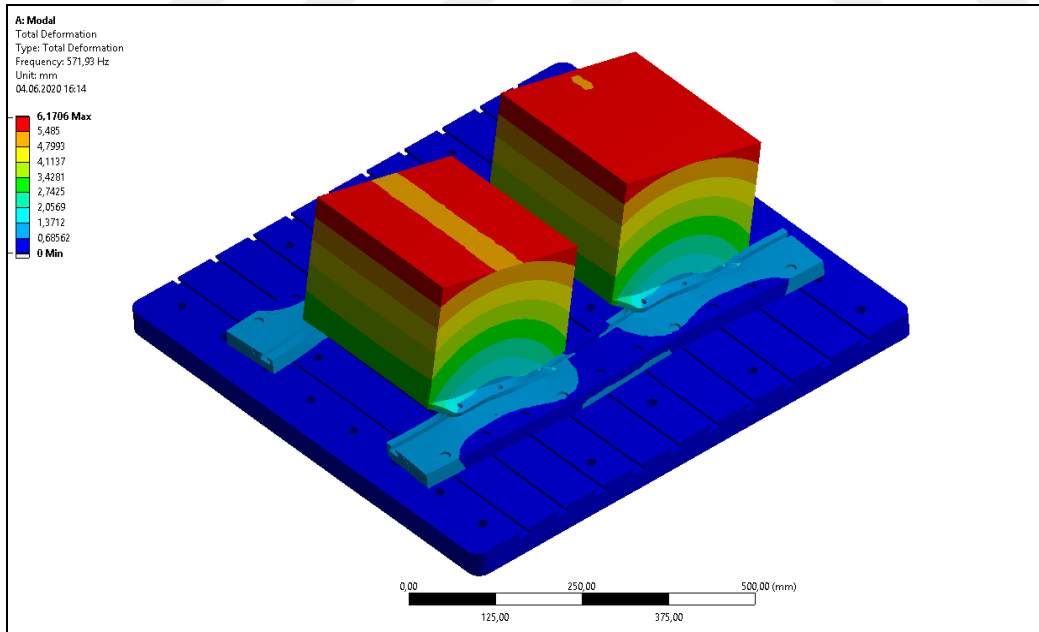
	Mod#	Kütle Katılım Faktörü	Baskın Frekans (Hz)
X Yönü	3	0,575	813,51
Y Yönü	1	0,299	571,92
Z Yönü	7	0,477	1419,1

5.6. Y Eksenî Konumunda Oluşan Mod Şekilleri

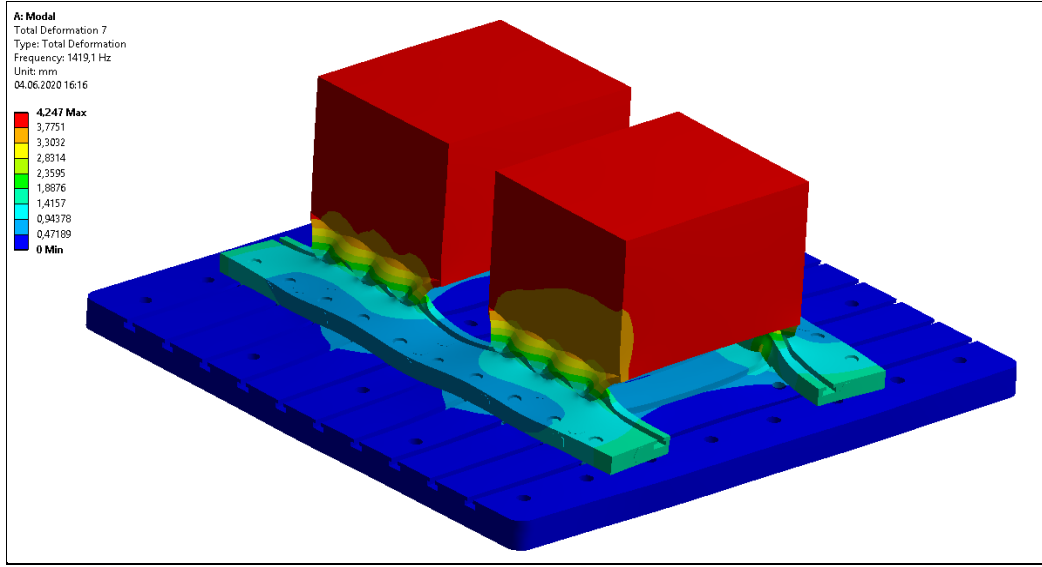
Y ekseninde oluşan baskın frekanslara göre mod şekilleri incelendiğinde en fazla deplasman miktarı, Y eksenî yönünde, kırmızı ile gösterilen ve test edilen ürünlerin üst tarafında görülmüştür (Şekil 5.13). X ve Z eksenî yönünde de oluşan en fazla deplasmanlar kırmızı renkle Şekil 5.12 ve Şekil 5.14’te gösterilmiştir. X ve Z eksenlerindeki mod şekilleri incelendiğinde adaptörlerde deformasyon oluşumu görülebilir ancak bu deformasyonlar 200 Hz üzerinde kalan yüksek frekanslarda oluştuğundan tasarımında değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 5.12. X eksenı yönü mod 3



Şekil 5.13. Y eksenı yönü mod 1



Şekil 5.14. Z eksenı yönü mod 7

5.7. Z Eksenı Konumunda Oluşan Doğal Frekanslar

Sistemin dinamik davranışını veren modal analiz sonrası Z ekseninde elde edilen doğal frekans değeri Çizelge 5.5'te verilmiştir. Buna göre ilk doğal frekans değeri 301,21 Hz olup, hedeflenen 200 Hz değeri üzerinde kalmıştır ve yapısal olarak tasarım uygun olduğundan, tasarım değişikliğine gidilmemiştir. Modal analizler 2500 Hz ötesinde yaklaşık 2800 Hz'e yapılmıştır. Toplam 20 mod çözüm alınmış olup test frekansı olan 2000 Hz'e kadar 15 mod olduğu görülmüştür. En düşük ilk doğal frekans değeri ve 2000 Hz'e kadar en fazla doğal frekans Z ekseninde görülmüştür.

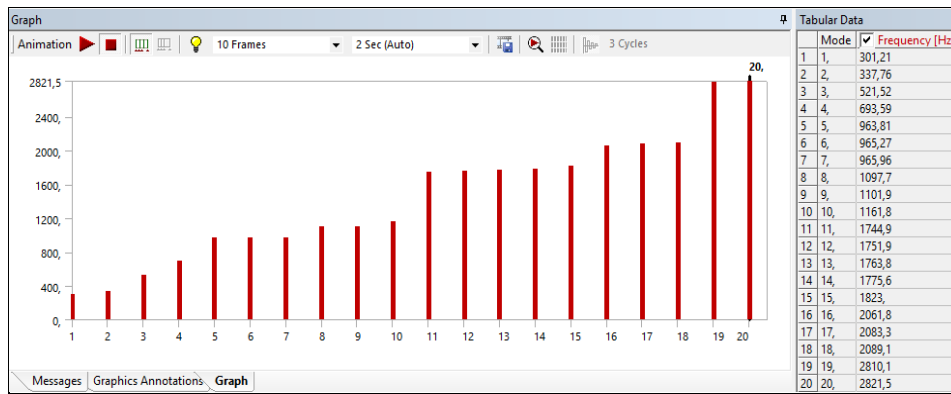
Çizelge 5.5. Z eksenı doğal frekans değeri

Mod#	Frekans (Hz)
1	301,21
2	337,76
3	521,52
4	693,59
5	963,81
6	965,27

Çizelge 5.5. (devam) Z eksenî doğal frekans değeri

7	965,96
8	1097,7
9	1101,9
10	1161,8
11	1744,9
12	1751,9
13	1763,8
14	1775,6
15	1823
16	2061,8
17	2083,3
18	2089,1
19	2810,1
20	2821,5

Yazılımdan alınan görüntü Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Z eksenî doğal frekans değeri grafik gösterimi

5.8. Z Ekseninde Oluşan Kütle Katılım Oranları

Elde edilen doğal frekanslara göre Z ekseninde oluşan kütle katılım oranları incelenmiştir. X eksen yönünde en fazla kütle katılım oranı birinci mod olan 301,21 Hz’de 0,453 olarak elde edilmiştir. Y eksen yönüne aktarılan en fazla kütle katılım oranı beşinci mod olan 963,81 Hz’de 0,512 olarak görülmüştür. Z eksen yönüne aktarılan en fazla kütle katılım oranı üçüncü mod olan 521,52 Hz’de 0,785 olarak elde edilmiştir. Kütle katılım faktörlerinin X, Y ve Z eksenleri için yazılım görüntüsü Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	301.211	0.33199E-02	0.20191	1.000000	0.407691E-01	0.533764	0.453322
2	337.760	0.29607E-02	0.46348E-03	0.002295	0.214813E-06	0.533767	0.238856E-05
3	521.517	0.19175E-02	-0.27615E-04	0.000137	0.762577E-09	0.533767	0.847928E-08
4	693.593	0.14418E-02	-0.19880E-04	0.000098	0.395195E-09	0.533767	0.439427E-08
5	963.809	0.10375E-02	0.98195E-02	0.048632	0.964230E-04	0.535029	0.107215E-02
6	965.271	0.10360E-02	0.21444E-01	0.106204	0.459847E-03	0.541050	0.511316E-02
7	965.965	0.10352E-02	-0.12751	0.631509	0.162589E-01	0.753917	0.180786
8	1097.74	0.91096E-03	0.13421	0.664675	0.180115E-01	0.989730	0.200275
9	1101.85	0.90756E-03	-0.21789E-01	0.107912	0.474756E-03	0.995946	0.527893E-02
10	1161.81	0.86073E-03	0.13122E-03	0.000650	0.172175E-07	0.995946	0.191446E-06
11	1744.90	0.57310E-03	0.19450E-02	0.009633	0.378322E-05	0.995995	0.420665E-04
12	1751.95	0.57079E-03	-0.92898E-03	0.004601	0.863004E-06	0.996007	0.959595E-05
13	1763.80	0.56696E-03	-0.17092E-01	0.084652	0.292149E-03	0.999832	0.324847E-02
14	1775.57	0.56320E-03	0.79158E-03	0.003920	0.626599E-06	0.999840	0.696731E-05
15	1822.96	0.54856E-03	0.17864E-03	0.000885	0.319105E-07	0.999840	0.354821E-06
16	2061.80	0.48501E-03	0.15940E-03	0.000789	0.254083E-07	0.999841	0.282522E-06
17	2083.26	0.48002E-03	0.31321E-02	0.015512	0.981011E-05	0.999969	0.109081E-03
18	2089.11	0.47867E-03	-0.15351E-02	0.007603	0.235640E-05	1.000000	0.262014E-04
19	2810.12	0.35586E-03	0.28847E-04	0.000143	0.832133E-09	1.000000	0.925269E-08
20	2821.53	0.35442E-03	-0.10591E-03	0.000525	0.112164E-07	1.000000	0.124718E-06
sum					0.763804E-01		0.849293

Şekil 5.16. X eksen yönünde kütle katılım faktörleri

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	301.211	0.33199E-02	0.20263E-03	0.000944	0.410594E-07	0.511321E-06	0.456549E-06
2	337.760	0.29607E-02	-0.77192E-01	0.359502	0.595856E-02	0.742037E-01	0.662547E-01
3	521.517	0.19175E-02	0.55972E-05	0.000026	0.313285E-10	0.742037E-01	0.348349E-09
4	693.593	0.14418E-02	0.52970E-03	0.002467	0.280583E-06	0.742072E-01	0.311987E-05
5	963.809	0.10375E-02	0.21472	1.000000	0.461039E-01	0.648349	0.512641
6	965.271	0.10360E-02	0.14473	0.674045	0.209467E-01	0.909203	0.232912
7	965.965	0.10352E-02	0.41860E-01	0.194953	0.175226E-02	0.931025	0.194838E-01
8	1097.74	0.91096E-03	0.10019E-02	0.004666	0.100381E-05	0.931037	0.111616E-04
9	1101.85	0.90756E-03	0.70805E-03	0.003298	0.501329E-06	0.931043	0.557440E-05
10	1161.81	0.86073E-03	-0.26883E-03	0.001252	0.722676E-07	0.931044	0.803562E-06
11	1744.90	0.57310E-03	-0.12176E-02	0.005671	0.148251E-05	0.931063	0.164844E-04
12	1751.95	0.57079E-03	-0.21959E-01	0.102271	0.482218E-03	0.937068	0.536190E-02
13	1763.80	0.56696E-03	0.91187E-03	0.004247	0.831506E-06	0.937078	0.924572E-05
14	1775.57	0.56320E-03	-0.18538E-02	0.008634	0.343651E-05	0.937121	0.382114E-04
15	1822.96	0.54856E-03	-0.52007E-04	0.000242	0.270478E-08	0.937121	0.300751E-07
16	2061.80	0.48501E-03	0.10042E-01	0.046768	0.100843E-03	0.938377	0.112129E-02
17	2083.26	0.48002E-03	0.94445E-02	0.043986	0.891984E-04	0.939488	0.991819E-03
18	2089.11	0.47867E-03	0.20231E-01	0.094221	0.409292E-03	0.944585	0.455102E-02
19	2810.12	0.35586E-03	0.64562E-01	0.300681	0.416822E-02	0.996492	0.463474E-01
20	2821.53	0.35442E-03	0.16783E-01	0.078161	0.281658E-03	1.000000	0.313182E-02
sum					0.803005E-01		0.892881

Şekil 5.17. Y eksen yönünde kütle katılım faktörleri

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Z DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	301.211	0.33199E-02	0.90381E-06	0.000003	0.816864E-12	0.108437E-10	0.908291E-11
2	337.760	0.29607E-02	-0.36821E-05	0.000014	0.135582E-10	0.190825E-09	0.150757E-09
3	521.517	0.19175E-02	-0.26585	1.000000	0.706758E-01	0.938203	0.785861
4	693.593	0.14418E-02	0.24383E-03	0.000917	0.594520E-07	0.938204	0.661061E-06
5	963.809	0.10375E-02	-0.24092E-03	0.000906	0.580440E-07	0.938205	0.645405E-06
6	965.271	0.10360E-02	-0.20745E-04	0.000078	0.430349E-09	0.938205	0.478516E-08
7	965.965	0.10352E-02	0.35471E-03	0.001334	0.125818E-06	0.938207	0.139901E-05
8	1097.74	0.91096E-03	0.89755E-02	0.033762	0.805600E-04	0.939276	0.895766E-03
9	1101.85	0.90756E-03	0.53037E-01	0.199499	0.281288E-02	0.976616	0.312771E-01
10	1161.81	0.86073E-03	0.13967E-03	0.000525	0.195069E-07	0.976617	0.216902E-06
11	1744.90	0.57310E-03	-0.37542E-01	0.141217	0.140943E-02	0.995326	0.156718E-01
12	1751.95	0.57079E-03	0.20809E-02	0.007827	0.433017E-05	0.995384	0.481483E-04
13	1763.80	0.56696E-03	-0.39270E-02	0.014772	0.154213E-04	0.995589	0.171473E-03
14	1775.57	0.56320E-03	0.58527E-03	0.002202	0.342538E-06	0.995593	0.380876E-05
15	1822.96	0.54856E-03	0.15785E-01	0.059377	0.249179E-03	0.998901	0.277068E-02
16	2061.80	0.48501E-03	0.12302E-05	0.000005	0.151342E-11	0.998901	0.168281E-10
17	2083.26	0.48002E-03	0.51627E-04	0.000194	0.266535E-08	0.998901	0.296367E-07
18	2089.11	0.47867E-03	-0.72330E-05	0.000027	0.523157E-10	0.998901	0.581711E-09
19	2810.12	0.35586E-03	0.23110E-02	0.008693	0.534070E-05	0.998972	0.593846E-04
20	2821.53	0.35442E-03	-0.88009E-02	0.033105	0.774567E-04	1.00000	0.861260E-03
sum					0.753310E-01		0.837624

Şekil 5.18. Z eksenini yönünde kütle katılım faktörleri

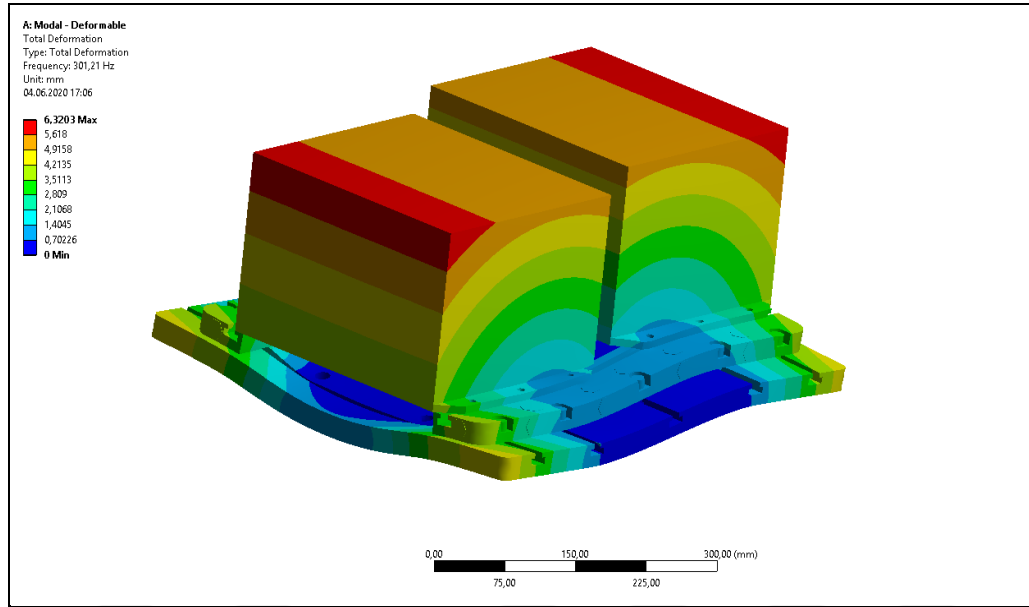
Z eksenini pozisyonunda yapılan modal analizler sonucu en büyük kütle katılım faktörünün yakalandığı baskın frekanslar Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Z pozisyonu modal analizinde baskın frekanslar

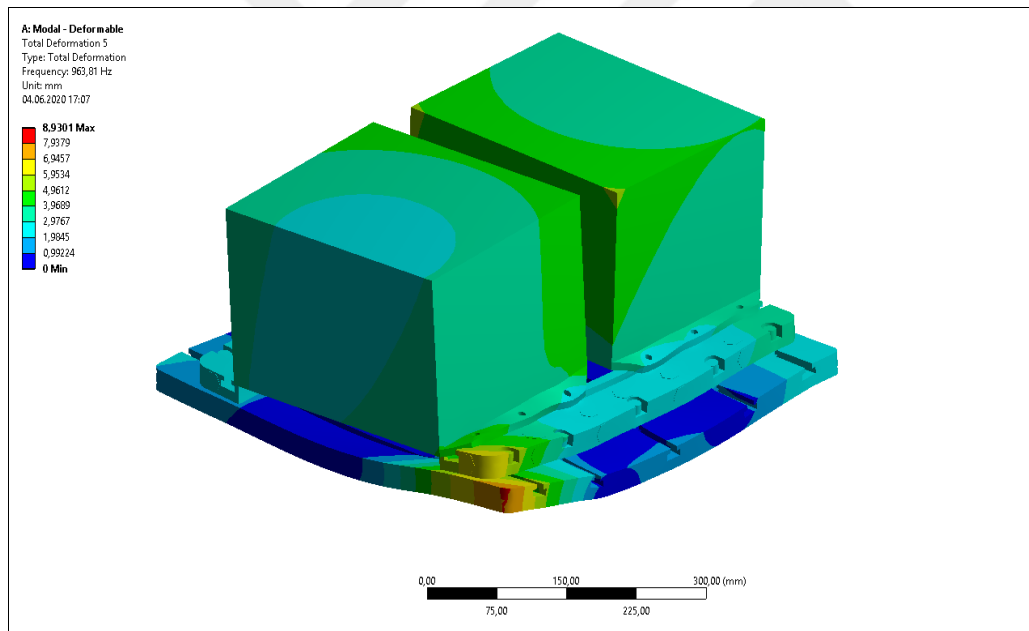
Eksen	Mod#	Kütle Katılım Faktörü	Baskın Frekans (Hz)
X Yönü	1	0,453	301,21
Y Yönü	5	0,512	963,81
Z Yönü	3	0,785	521,52

5.9. Z Eksenini Konumunda Oluşan Mod Şekilleri

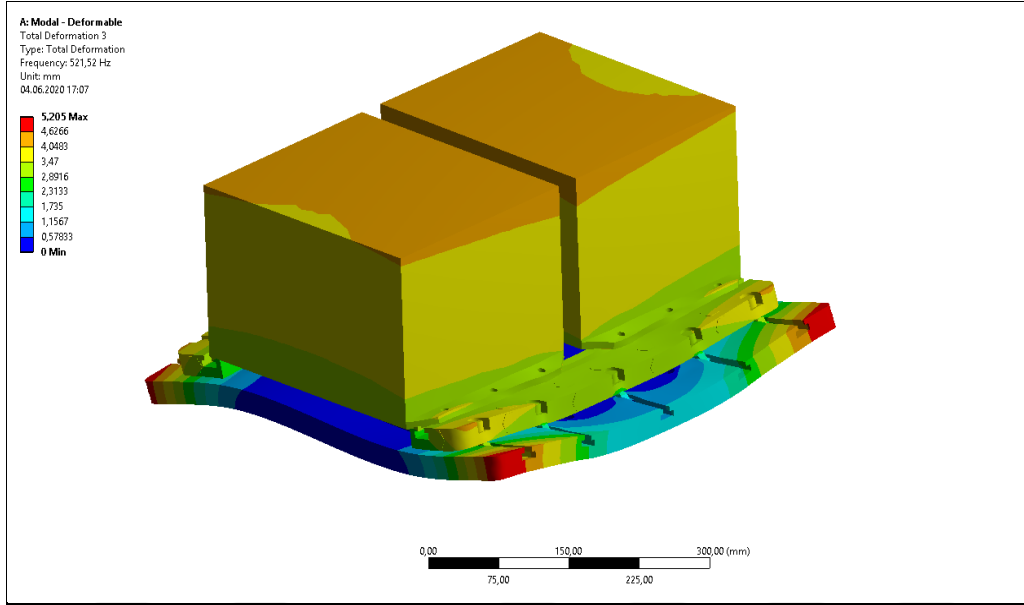
Z ekseninde oluşan baskın frekanslara göre mod şekilleri incelendiğinde en fazla deplasman miktarı, Y eksenini yönünde, kırmızı ile gösterilen ve titreşim test gereci tablasının köşesinde görülmüştür (Şekil 5.20). X eksenini yönünde de oluşan en fazla deplasman kırmızı renkle Şekil 5.19 da test edilen ürünlerin üst köşelerinde gösterilmiştir. Z ekseninde test edilen üründe ve titreşim test gerecinin tablasında deformasyonlar görülmektedir (5.21). Ancak bu deformasyonlar 200 Hz üzerinde kalan yüksek frekanslarda olduğundan tasarımında değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 5.19. X eksenı yönü mod 1



Şekil 5.20. Y eksenı yönü mod 5



Şekil 5.21. Z eksenı yönü mod 3

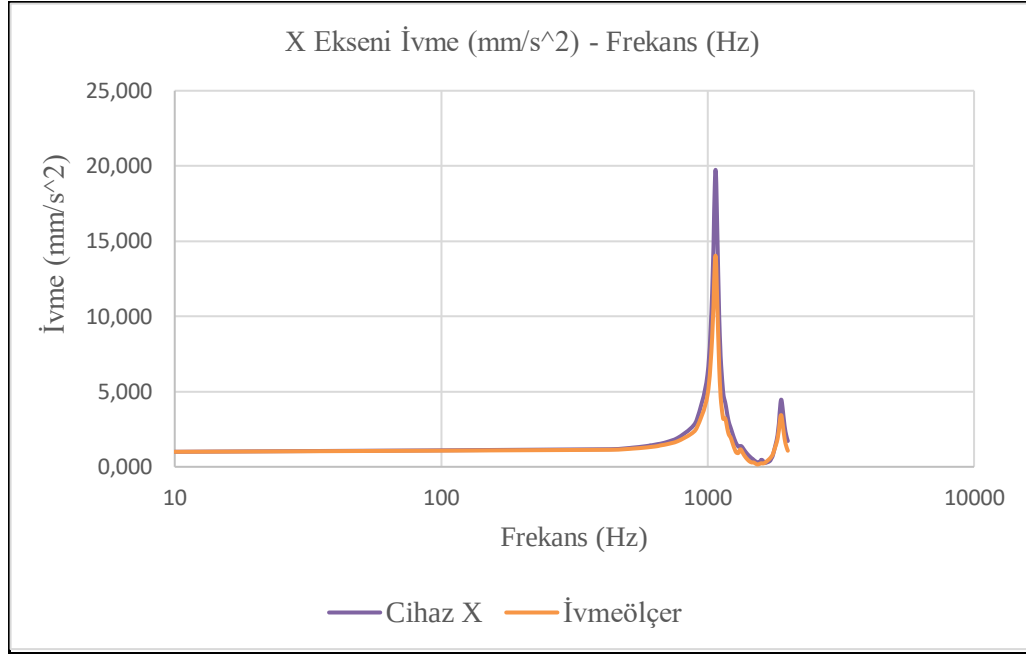
5.10. Aktarım Oranları

Modal analiz tamamlandıktan sonra harmonik titreşim analizi yapılmıştır. Harmonik titreşim analizinde amaç, sinüs dalga profili titreşim test gerecine uygulanarak rezonans ve iletkenlik değerlerini elde etmek ve titreşim test gerecinin dinamik karakteristiğini doğrulamaktır [4]. Harmonik titreşim analizi X, Y ve Z eksenlerinde uygulanmış olup test edilen ürüne ait noktasal kütle için tüm yüzeylerin hareket halinde deformasyona uğrayabileceği bozunabilir formülasyon uygulanmıştır. Test edilen üründen ve ivmeölçerden alınan değerler oranlanarak aktarım oranları hesaplanmıştır.

5.10.1. X eksenı

X ekseninde uygulanan harmonik titreşim analizi sonucunda toplam 144 noktada aktarım oranı hesaplanmıştır, test edilen üründen elde edilen maksimum aktarım $19,742 \text{ mm/s}^2$, ivmeölçerden elde edilen maksimum aktarım $14,036 \text{ mm/s}^2$ ve maksimum oran da 1,98 elde edilmiştir. Minimum değerler incelendiğinde üründen alınan aktarım $0,2614 \text{ mm/s}^2$ ve ivmeölçerden alınan aktarım $0,1562 \text{ mm/s}^2$ ve minimum aktarım oranı da 0,699 elde edilmiştir. X ekseninde elde edilen tüm aktarımların grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir. Elde

edilen tüm aktarım oranları 0,5-2 aralığında çıkmıştır. Şekil 4.39’da verilen tolerans aralıkları incelendiğinde elde edilen tüm aktarım oranları tolerans aralığının içinde kalmıştır ve uygundur dolayısıyla X ekseninde sistemin rezonansa sebebiyet vermeyeceği görülmüştür.



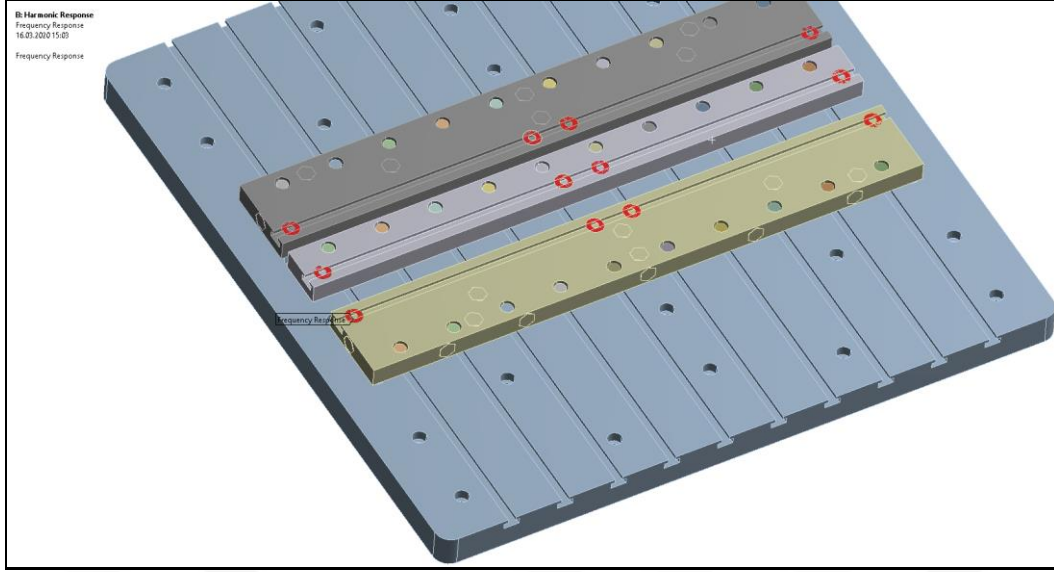
Şekil 5.22. X eksenli aktarım oranları grafiği

Elde edilen maksimum ve minimum değerler Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. X eksenli aktarım oranları

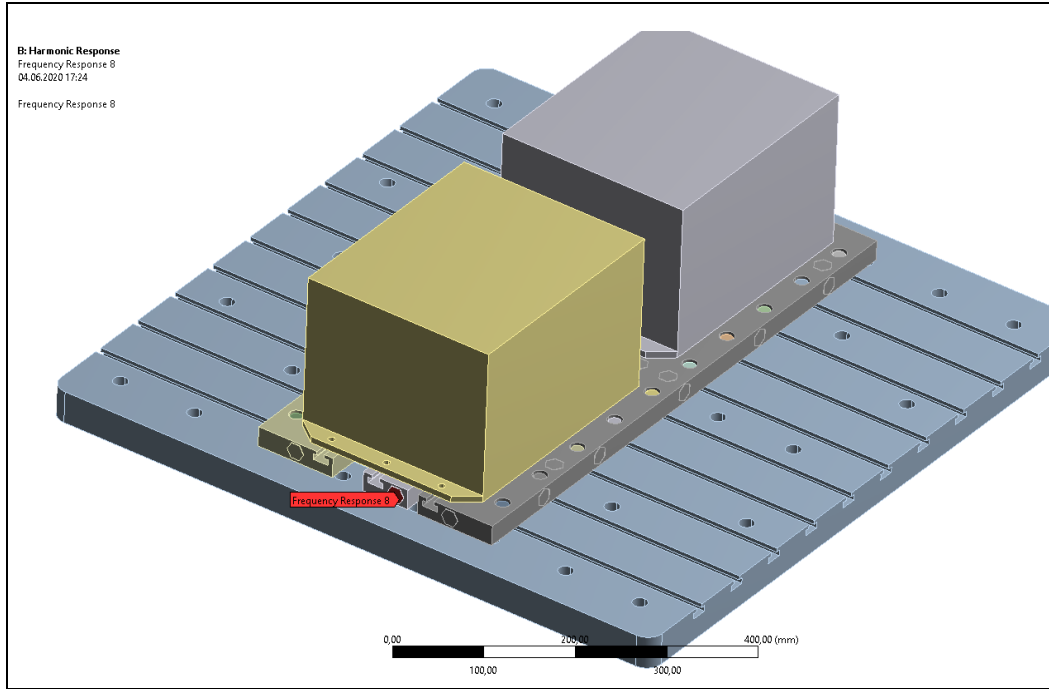
Ürün	İvmeölçer	Oran
Maks (mm/s ²)	Maks (mm/s ²)	Maks
19,742	14,036	1,980
Min (mm/s ²)	Min (mm/s ²)	Min
0,2614	0,1562	0,699

X ekseninde aktarım oranlarının hesaplandığı ürün üzerinden alınan ölçümlerde, ürün-adaptör bağlantısı yüzey elemanları kullanılmıştır (Şekil 5.23). Şekil 5.23’te kırmızı ile gösterilen ürün adaptör bağlantı yüzey elemanlarının tamamından ölçüm alınmış olup en iyi değer işaretli kırmızı noktadan alınmıştır ve aktarım oranlarına işaretli kırmızı nokta dahil edilmiştir.



Şekil 5.23. X ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler

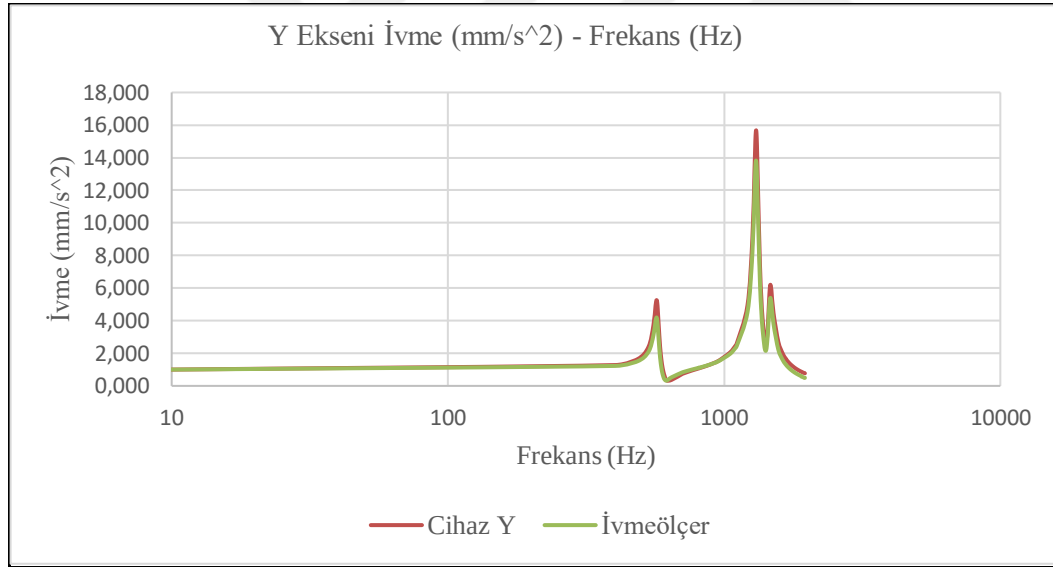
İvmeölçerlerin hepsinden ölçüm alınmış olup, X eksenindeki analizde en iyi aktarım oranının hesaplandığı nokta Şekil 5.24'te gösterilen yüzey olduğu için ölçüm belirtilen yüzeyden yapılmıştır.



Şekil 5.24. X ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi

5.10.2. Y eksen

Y ekseninde uygulanan harmonik titreşim analizi sonucunda toplam 158 noktada aktarım oranı hesaplanmıştır, test edilen üründen elde edilen maksimum aktarım $15,678 \text{ mm/s}^2$, ivmeölçerden elde edilen maksimum aktarım $13,823 \text{ mm/s}^2$ ve maksimum oran da 1,612 elde edilmiştir. Minimum değerler incelendiğinde üründen alınan aktarım $0,3324 \text{ mm/s}^2$ ve ivmeölçerden alınan aktarım $0,3254 \text{ mm/s}^2$ ve minimum aktarım oranı da 0,703 elde edilmiştir. Y ekseninde elde edilen tüm aktarımların grafiği Şekil 5.25'te verilmiştir. Elde edilen tüm aktarım oranları 0,5-2 aralığında çıkmıştır. Şekil 4.39'da verilen tolerans aralıkları incelendiğinde elde edilen tüm aktarım oranları tolerans aralığının içinde kalmıştır ve uygundur dolayısıyla Y ekseninde sistemin rezonansa sebebiyet vermeyeceği görülmüştür.



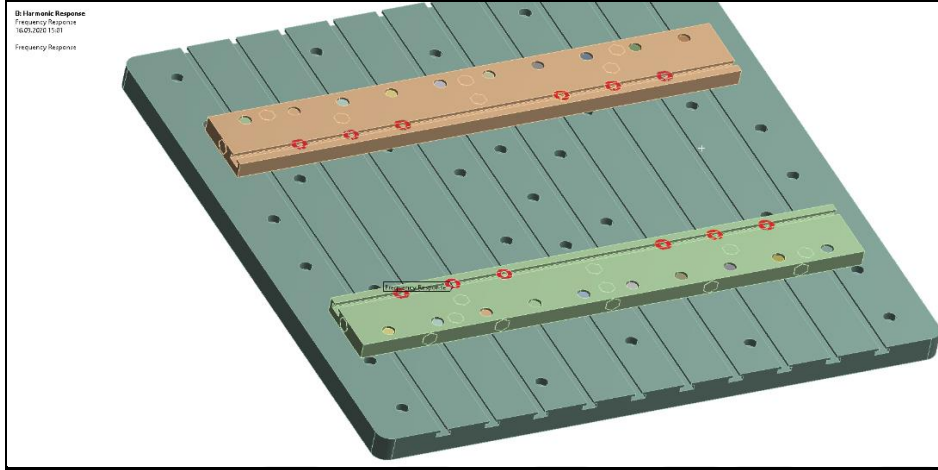
Şekil 5.25. Y eksen i transfer ratio graph

Elde edilen maksimum ve minimum değerler Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Y eksen i transfer ratio

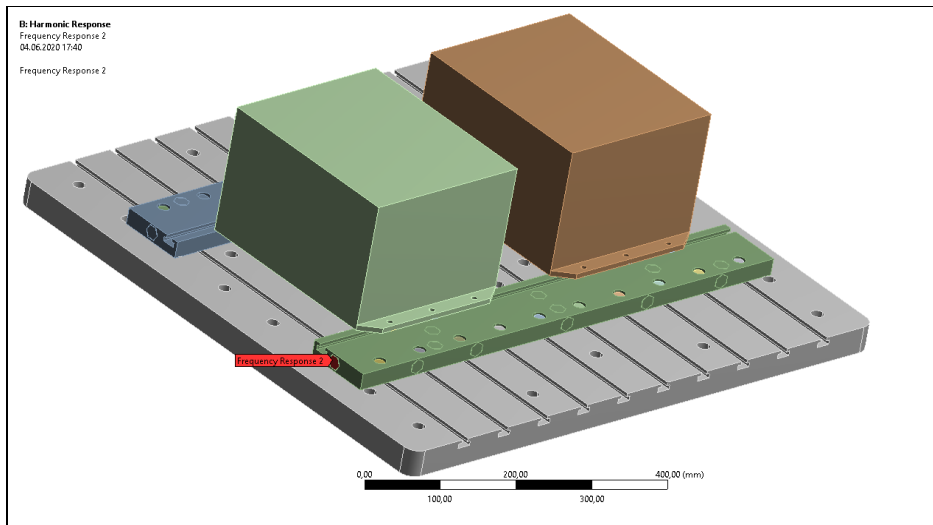
Ürün	İvmeölçer	Oran
Maks	Maks	Maks
15,678	13,823	1,612
Min	Min	Min
0,3324	0,3254	0,703

Y ekseninde aktarım oranlarının hesaplandığı ürün üzerinden alınan ölçümlerde, ürün-adaptör bağlantısı yüzey elemanları kullanılmıştır (Şekil 5.26). Şekil 5.26’da kırmızı ile gösterilen ürün adaptör bağlantı yüzey elemanlarının tamamından ölçüm alınmış olup en iyi değer işaretli kırmızı noktadan alınmıştır ve aktarım oranlarına işaretli kırmızı nokta dahil edilmiştir.



Şekil 5.26. Y ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler

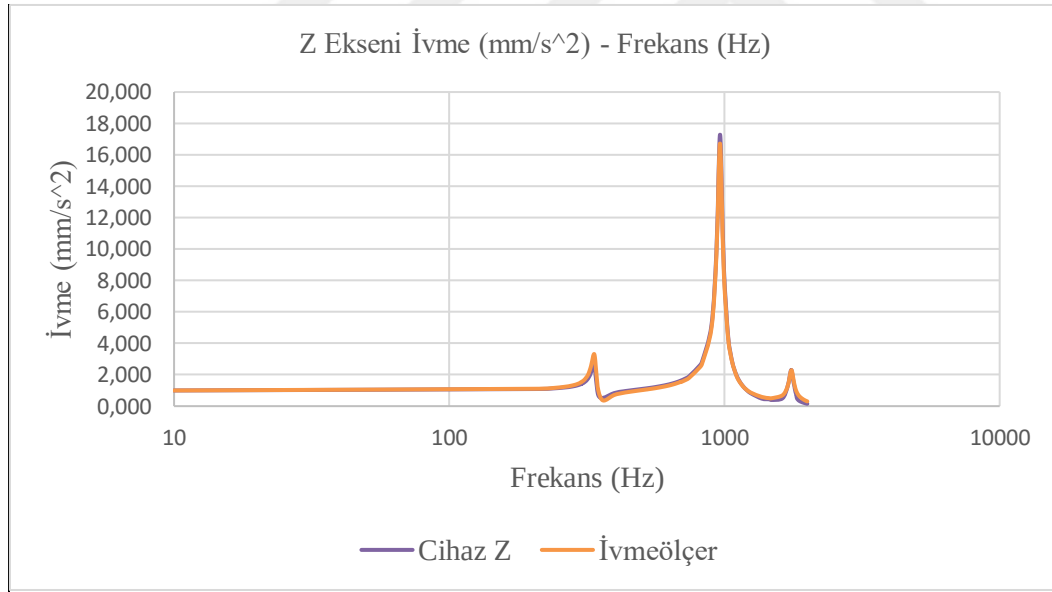
İvmeölçerlerin hepsinden ölçüm alınmış olup, X eksenindeki analizde en iyi aktarım oranının hesaplandığı nokta Şekil 5.27’de gösterilen yüzey olduğu için ölçüm belirtilen yüzeyden yapılmıştır.



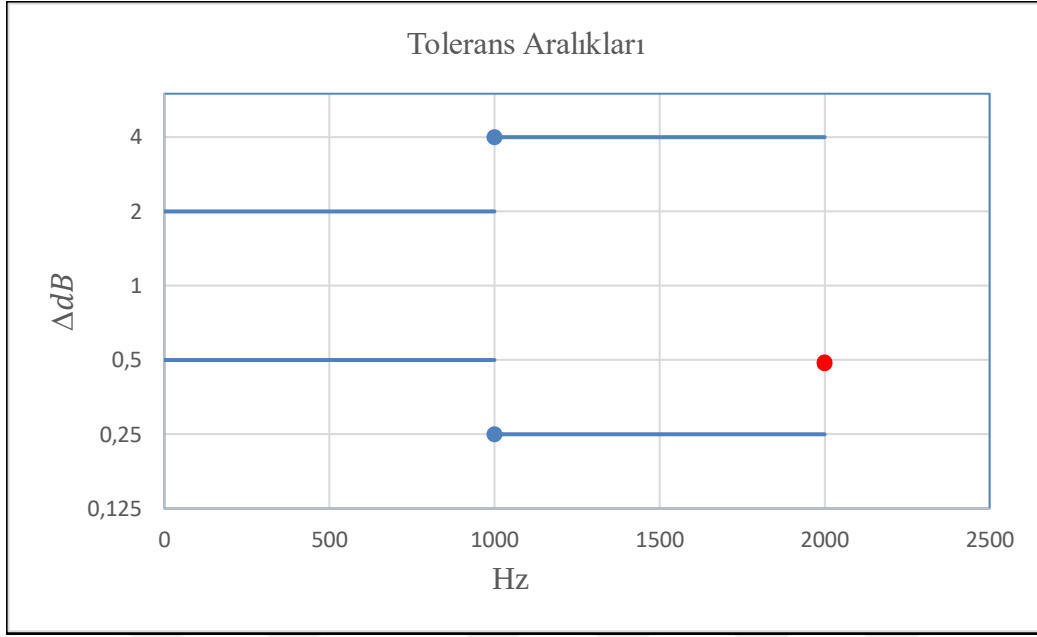
Şekil 5.27. Y ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi

5.10.3. Z eksen

Z ekseninde uygulanan harmonik titreşim analizi sonucunda toplam 149 noktada aktarım oranı hesaplanmıştır, test edilen üründen elde edilen maksimum aktarım $17,283 \text{ mm/s}^2$, ivmeölçerden elde edilen maksimum aktarım $16,721 \text{ mm/s}^2$ ve maksimum oran da 1,475 elde edilmiştir. Minimum değerler incelendiğinde üründen alınan aktarım $0,149 \text{ mm/s}^2$ ve ivmeölçerden alınan aktarım $0,305 \text{ mm/s}^2$ ve minimum aktarım oranı da 0,489 elde edilmiştir. Z ekseninde elde edilen tüm aktarımların grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir. Z eksenindeki aktarım oranları 2000Hz değerinde yalnızca bir noktada 0,489 değerine düşmüştür fakat Şekil 5.29’da gösterildiği üzere tolerans aralıkları incelendiğinde 2000 Hz’de tolerans alt bandı 0,25 ve tolerans üst bandının 4 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla elde edilen tüm aktarım oranları tolerans aralığının içinde kalmıştır ve uygundur ve Z ekseninde de sistemin rezonansa sebebiyet vermeyeceği görülmüştür.



Şekil 5.28 Z eksen aktarım oranları grafiği



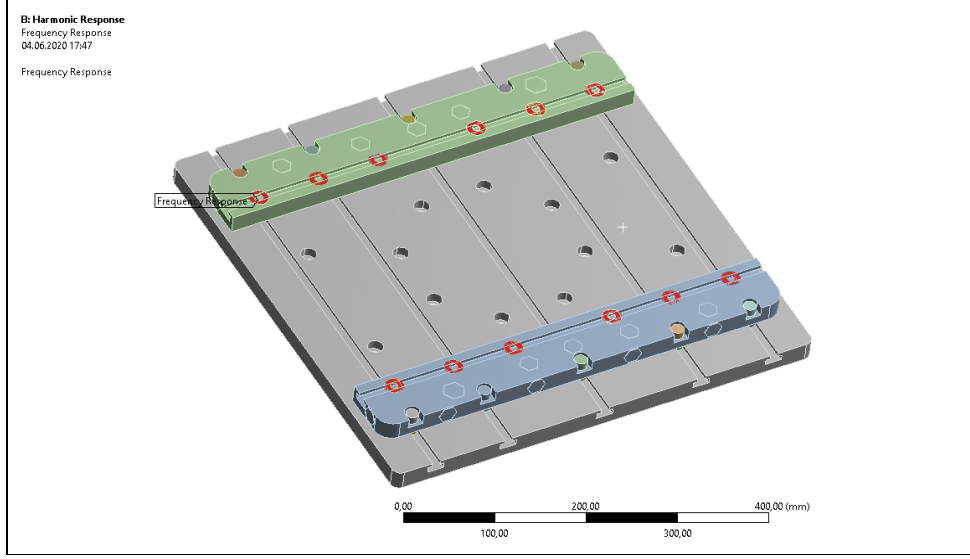
Şekil 5.29. Z eksenli aktarım oranı gösterimi

Elde edilen maksimum ve minimum değerler Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Z eksenli aktarım oranları

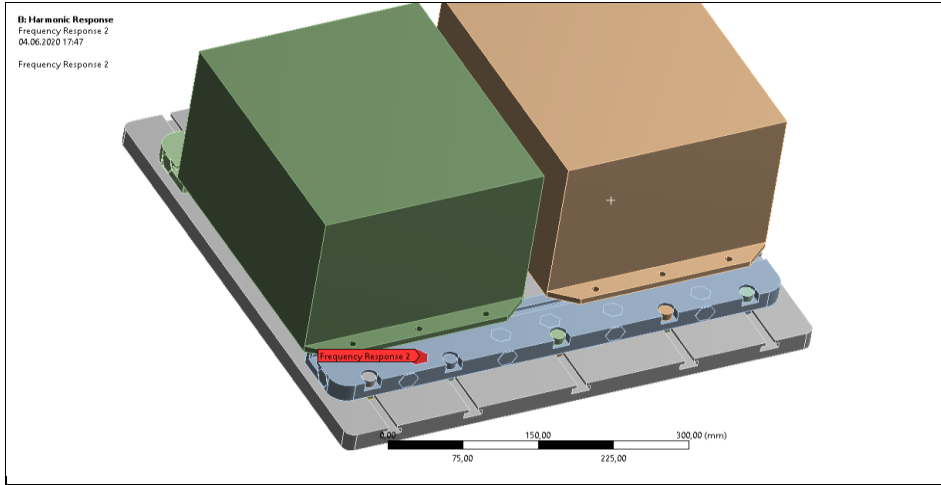
Ürün	İvmeölçer	Oran
Maks	Maks	Maks
17,283	16,721	1,475
Min	Min	Min
0,149	0,305	0,489

Z ekseninde aktarım oranlarının hesaplandığı ürün üzerinden alınan ölçümlerde, ürün-adaptör bağlantısı yüzey elemanları kullanılmıştır (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. Z ekseninde üründen ölçüm alınan yüzeyler

İvmeölçerlerin hepsinden ölçüm alınmış olup, Z eksenindeki analizde en iyi aktarım oranının hesaplandığı nokta Şekil 5.31’de gösterilen yüzey olduğu için ölçüm belirtilen yüzeyden yapılmıştır.



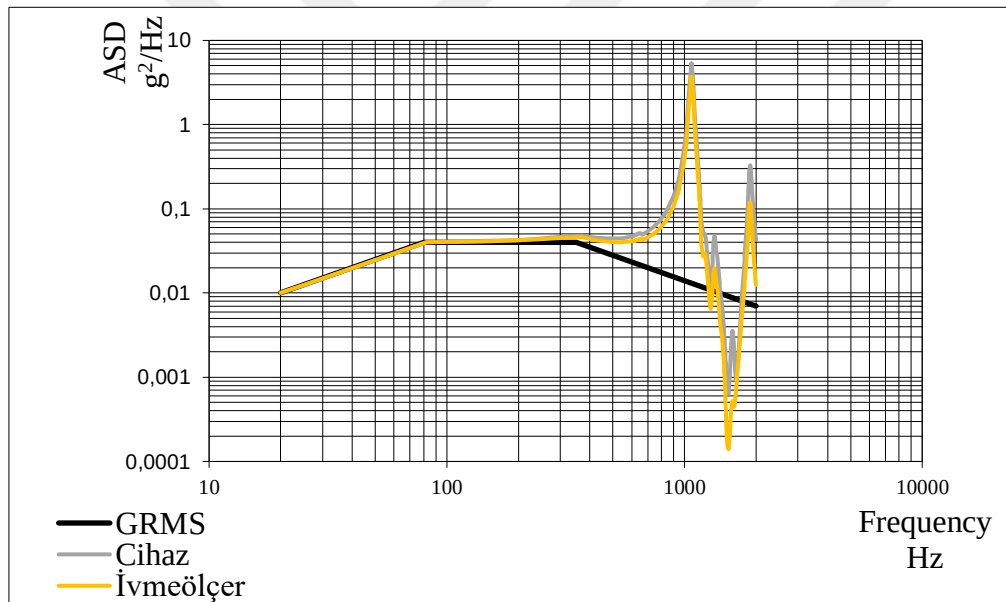
Şekil 5.31. Z ekseninde ivmeölçer ölçüm yüzeyi

5.11. Rastgele Titreşim Analizleri

Rastgele titreşim analizi Şekil 4.40’ta verilen 6,06 G RMS değerindeki profilin, Şekil 4.41’de gösterilen veriler tanımlanarak X, Y ve Z eksenlerinde yapılmıştır.

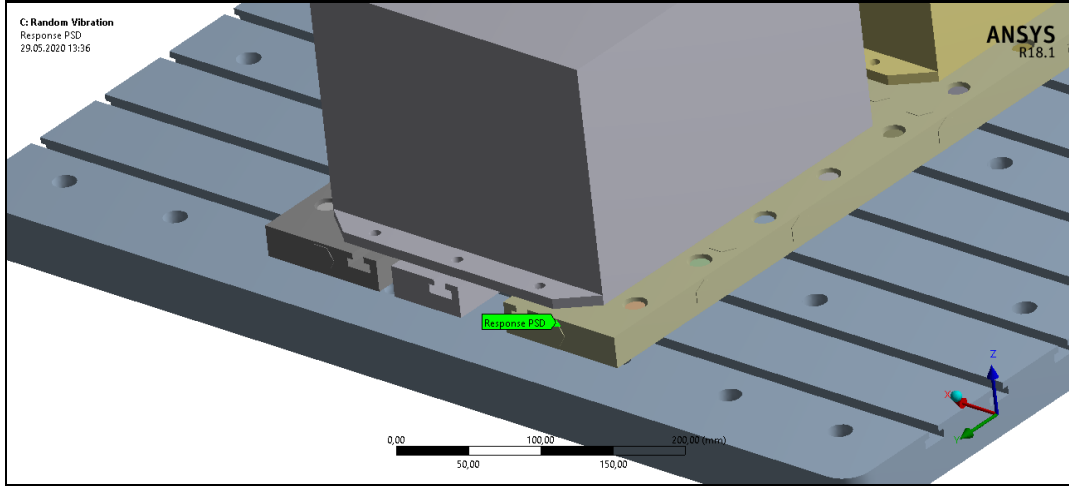
5.11.1. X eksen

X ekseninde elde edilen rastsal titreşim analizi grafiği Şekil 5.32’de verilmiştir. Harmonik analiz sonucu olan Şekil 5.22 ile kıyaslandığında her iki analiz türünde de ilk pik genlik frekansı değerlerinin birbirine yakın frekansta, harmonik analiz sonucunda 1077,9 Hz’de, rastgele titreşim analizi sonucunda 1074,3 Hz’de olduğu görülmüştür. İvmeölçerlerin adaptöre ve test edilen ürüne bağlantı noktaları iterasyonla denenerek, ivmeölçerler en iyi değer veren noktada konumlandırılmıştır. Rastgele titreşim analizi sonucunda ivmeölçer ve test edilen ürünün güç spektral yoğunluğu (G^2/Hz) oranı 1,2 elde edilmiş olup ideal iletilebilirlik oranı olan 1 mertebesinde.



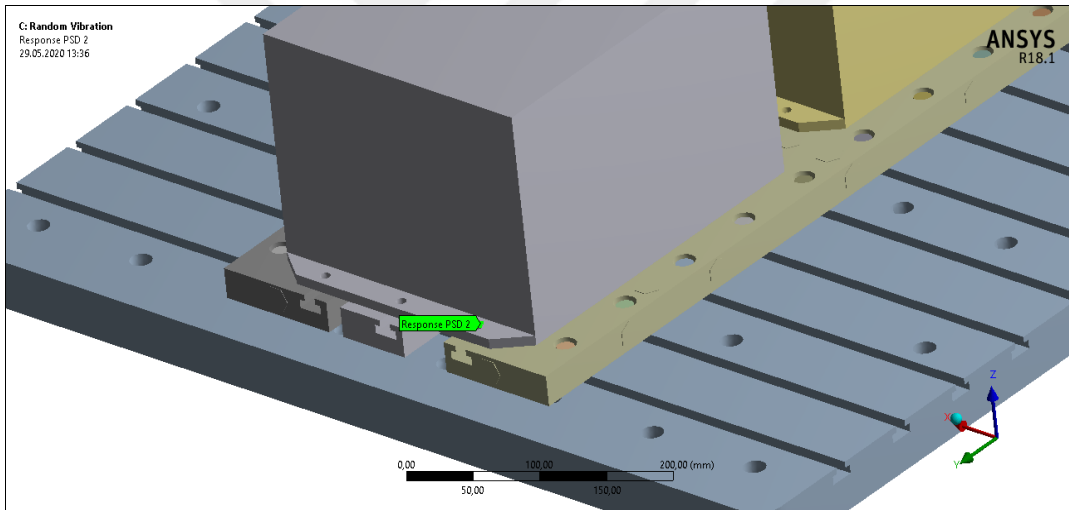
Şekil 5.32. X eksen rastsal titreşim analizi grafiği

İvmeölçerlerin adaptöre bağlandığı nokta Şekil 5.33’te gösterilmiştir.



Şekil 5.33. X ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası

İvmeölçerin ürüne bağlandığı nokta Şekil 5.34’te gösterilmiştir.



Şekil 5.34. X ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası

İvmeölçerlerden ve üründen alınan değerler Çizelge 5.10’da gösterilmiştir.

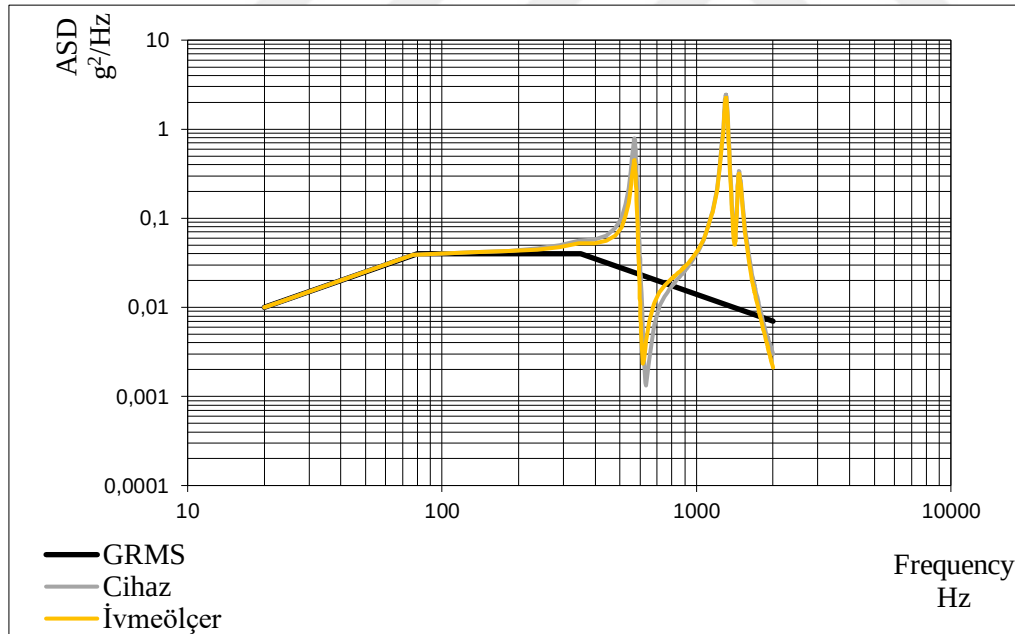
Çizelge 5.10. X eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı

İvmeölçer	Cihaz	Oran
16,874	20,379	1,207716

5.11.2. Y eksen

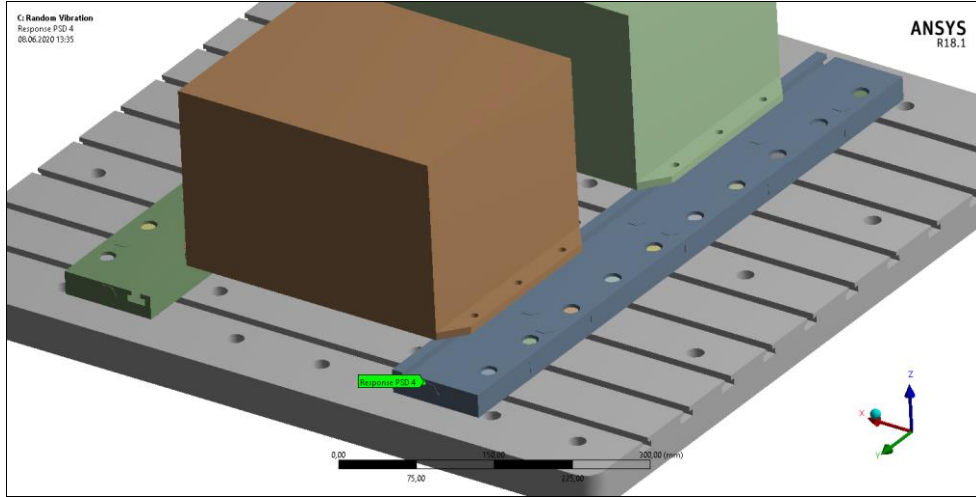
Y ekseninde elde edilen rastsal titreşim analizi grafiği Şekil 5.35'te verilmiştir. Harmonik analiz sonucu olan Şekil 5.25 ile kıyaslandığında her iki analiz türünde de ilk pik genlik frekansı değerlerinin birbirine yakın frekansta, harmonik analiz sonucunda 573,23 Hz'de, rastgele titreşim analizi sonucunda 573,11 Hz'de olduğu görülmüştür. İkinci pik genlik de incelendiğinde harmonik analiz sonucunda 1310,6 Hz'de, rastgele titreşim analizi sonucunda 1311,7 Hz'de olduğu görülmüştür. İvmeölçerlerin adaptöre ve test edilen ürüne bağlantı noktaları iterasyonla denenerek, ivmeölçerler en iyi değer veren noktada konumlandırılmıştır. Rastgele titreşim analizi sonucunda ivmeölçer ve test edilen ürünün güç spektral yoğunluğu (G^2/Hz) oranı 1,0574 elde edilmiş olup X eksenine göre ideal iletilebilirlik oranına daha yakın değer elde edilmiştir.

Y ekseninde elde edilen rastsal titreşim analizi grafiği Şekil 5.35'te verilmiştir.



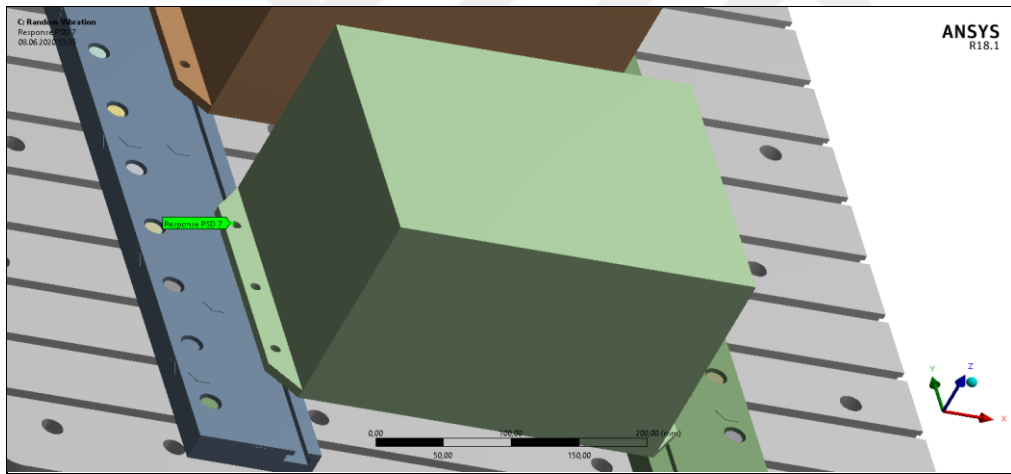
Şekil 5.35. Y eksen rastsal titreşim analizi grafiği

İvmeölçerlerin adaptöre bağlandığı nokta Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.36. Y ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası

İvmeölçerin ürüne bağlandığı nokta Şekil 5.37’de gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Y ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası

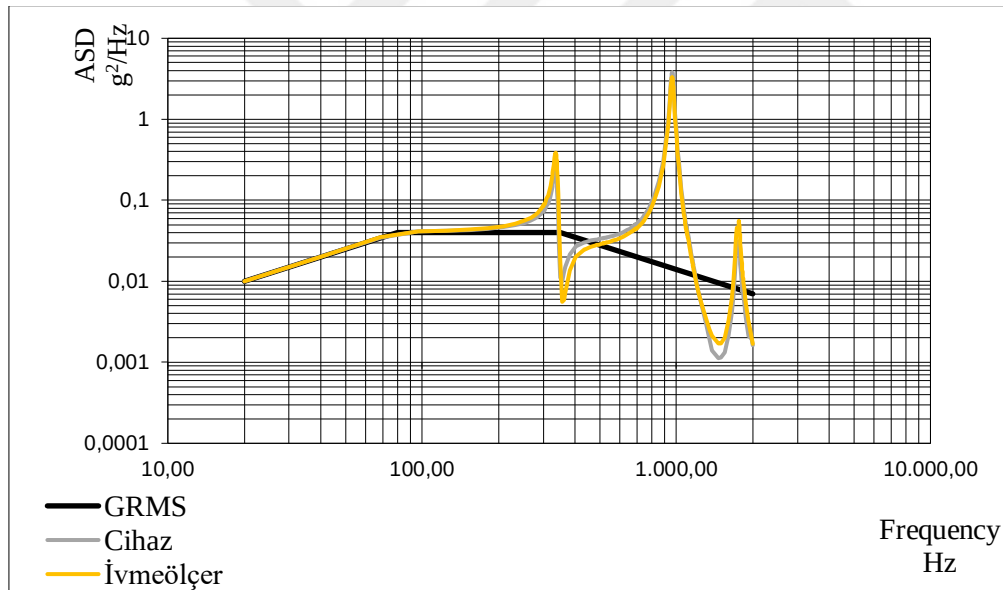
İvmeölçerlerden ve üründen alınan değerler Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. Y eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı

İvmeölçer	Cihaz	Oran
15,753	16,658	1,0574

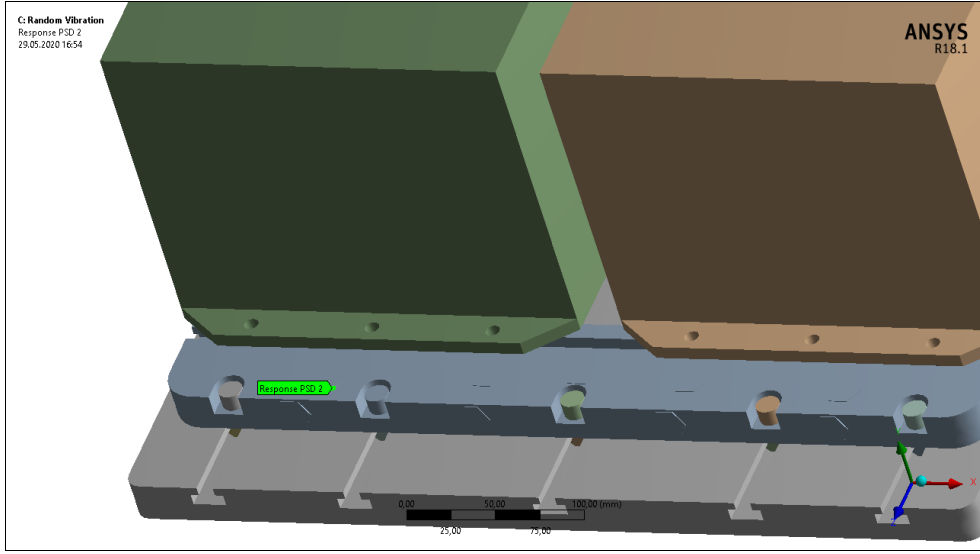
5.11.3. Z eksen

Z ekseninde elde edilen rastsal titreşim analizi grafiği Şekil 5.38’de verilmiştir. Harmonik analiz sonucu olan Şekil 5.28 ile kıyaslandığında her iki analiz türünde de ilk pik genlik frekansı değerlerinin birbirine yakın frekansta, harmonik analiz sonucunda 338,53 Hz’de, rastgele titreşim analizi sonucunda 338,46 Hz’de olduğu görülmüştür. İkinci pik genlik de incelendiğinde harmonik analiz sonucunda 962,89 Hz’de, rastgele titreşim analizi sonucunda 959,27 Hz’de olduğu görülmüştür. İvmeölçerlerin adaptöre ve test edilen ürüne bağlantı noktaları iterasyonla denenerek, ivmeölçerler en iyi değer veren noktada konumlandırılmıştır. Rastgele titreşim analizi sonucunda ivmeölçer ve test edilen ürünün güç spektral yoğunluğu (G^2/Hz) oranı 1,043 elde edilmiş olup en iyi iletilebilirlik değeri Z ekseninde elde edilmiştir.



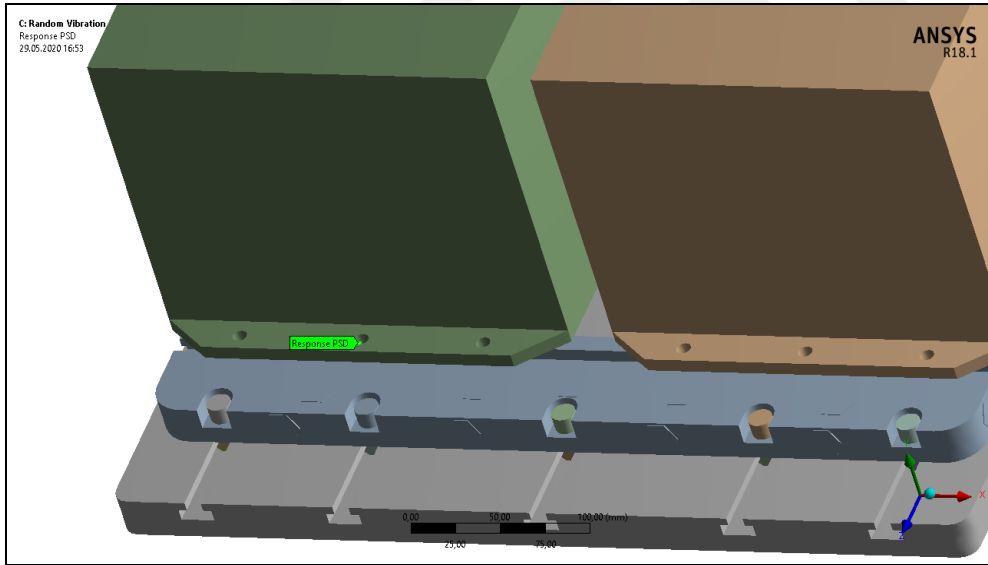
Şekil 5.38. Z eksen rastsal titreşim analizi grafiği

İvmeölçerlerin adaptöre bağlandığı nokta Şekil 5.39’da gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Z ekseninde ivmeölçerin adaptöre bağlantı noktası

İvmeölçerin ürüne bağlandığı nokta Şekil 5.40’da gösterilmiştir.



Şekil 5.40. Z ekseninde ivmeölçerin ürüne bağlantı noktası

İvmeölçerlerden ve üründen alınan değerler Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

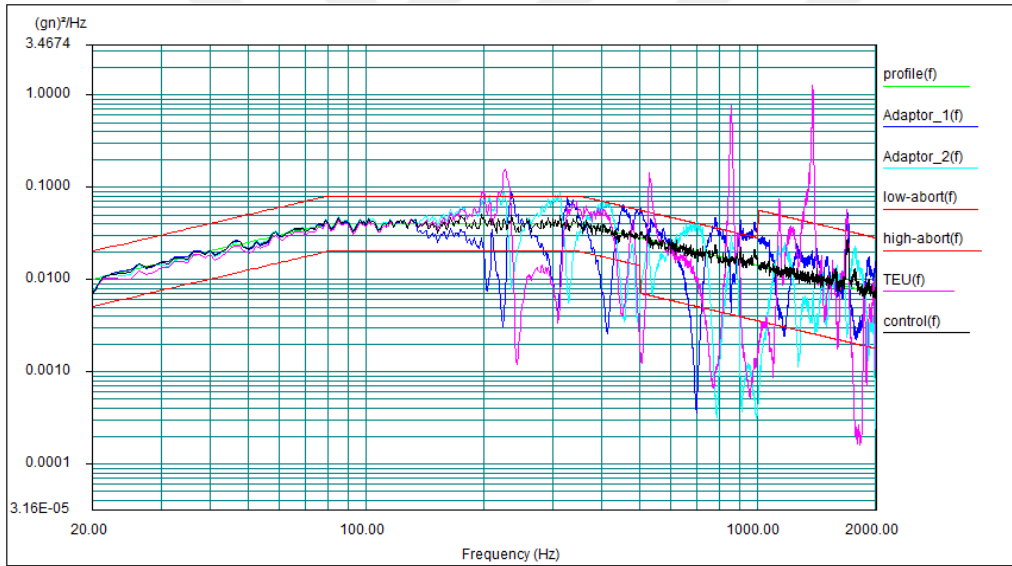
Çizelge 5.12. Z eksen güç spektrum yoğunluğu ivmeölçer ve ürün oranı

İvmeölçer	Cihaz	Oran
15,322	15,987	1,043402

5.12. Deneysel Veriler

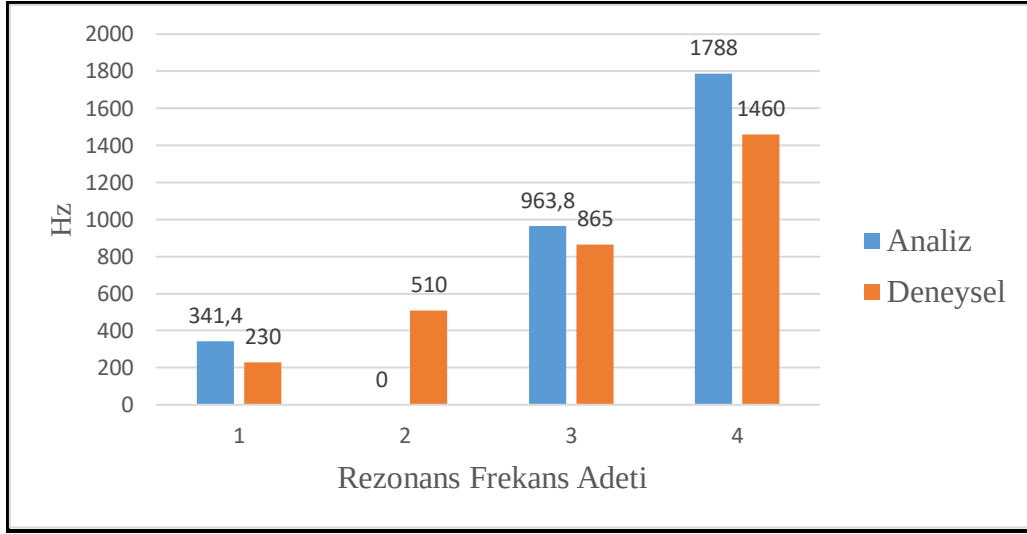
Z ekseninde ilk doğal frekansın hedeflenen 200 Hz'in üstünde olsa da diğer eksenlere göre daha düşük olup, 2000 Hz'e kadar diğer eksenlere göre daha fazla doğal frekans içermesi ve aynı zamanda X ve Y eksenlerinde kullanılan gerece göre daha küçük olup daha az maliyetle ürettirilebileceğinden, Z ekseninde armatür tablasına bağlanan titreşim test gerecinin tablasında Al 6061 ve adaptör parçalarında St52 malzemesi kullanılarak ürettirildi.

10 dakikalık test profili süresi sonucunda test verisi elde edildi. Elde edilen sonuç Şekil 5.41'de gösterilmiştir. Şekil 5.41'de pembe çizgi test edilen cihaz üzerinden alınan grafiği, mavi ve turkuaz renkleri ise ivmeölçerlerin bağlı olduğu adaptör üzerinden alınan grafiği temsil etmektedir.



Şekil 5.41. Z ekseninde deneysel veriler

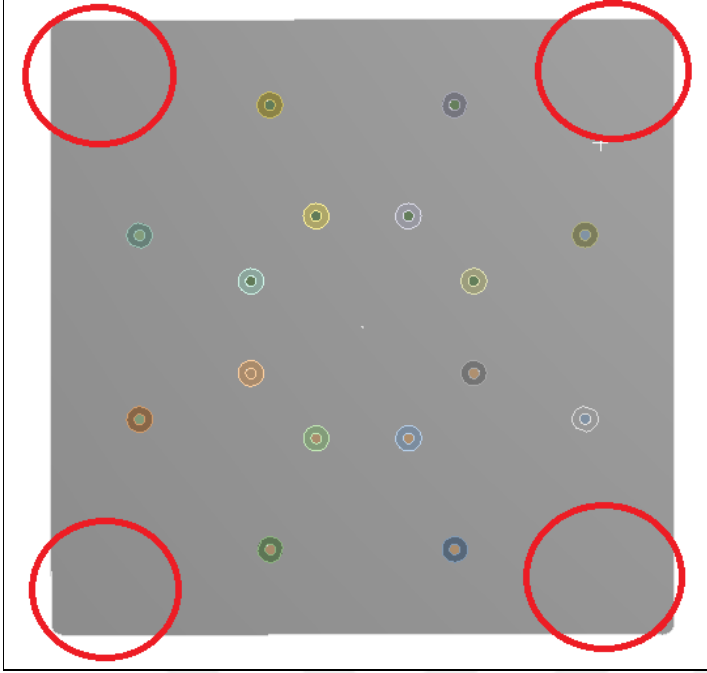
Z ekseninde elde edilen analiz verilerine ve deneysel verilere ait maksimum genliklerin karşılaştırmalı olarak gösterimi Şekil 5.42'de verilmiştir.



Şekil 5.42. Maksimum genliklerin karşılaştırmalı gösterimi

Deneyisel olarak ivmeölçerlerden toplanan verilerle oluşan grafikte ilk rezonans frekansı yaklaşık 230Hz, ikincisi yaklaşık 510Hz üçüncüsü 865Hz ve dördüncüsü 1460Hz’de oluşmuştur (Şekil 4.40). Analiz sonuçlarında elde edilen rezonans frekansları ise 340Hz, 964Hz ve 1788Hz olarak elde edilmiştir. Maksimum genlik frekansları genel olarak birbirine yakın olsa da deneyisel sonuçlarda 510Hz olarak bulunan ancak analiz sonuçlarında bulunmayan değer görülmüştür. Bunun da sebebinin gerçek ürünü simule eden kaynaklı mekanik parça olduğu değerlendirilmiştir.

Z ekseninde kullanılan titreşim test gerci tablası, sarsıcının dikey eksenindeki delik ara yüzünün uç kısımlarına bağlanamamaktadır. Tabla uç kısımlarından sabitlenemediği için bu kısımların (Şekil 5.43) modal analizde ek salınım oluşturduğu ve analiz verilerinin ve deneyisel verilerin farklılığının bir diğer nedeninin belirtilen sabitleme sorunu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.43 Armatür tablasında ek salınım oluşturan bölgeler



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, titreşim testleri sırasında sarsıcı ve test edilecek ürün arasında titreşimin kayıpsız iletilmesini amaçlayan literatürdeki çalışmalardan farklı olarak her ürüne uyarlanabilen titreşim test gereci tasarlanmıştır. Çalışmada, titreşim test gerecinin tasarımı Siemens NX 11 ortamında tamamlanmıştır. Yapılan sonlu elemanlar metoduna bağlı modal analizler harmonik ve rastsal titreşim analizi Ansys 18.1 yazılımı ortamında yapılmış olup, analiz sonuçlarına göre tasarımın uygun olduğu görülmüştür. Z eksenine için tasarlanan titreşim test gereci ve test edilecek ürünün ağırlık merkeziyle birebir aynı ağırlık merkezine sahip, test edilecek ürünle aynı fiziksel ölçülerde kaynaklı mekanik parça üretilmiştir. Üretimi sağlanan bu parçaya tek yönlü ivmeölçerler takılarak, sarsıcı üzerinde 10 dakikalık test profili sonrasında deneysel veriler elde edilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, aşağıda maddeler halinde ifade edilmiştir.

- Analizlerde dörtyüzlü ve altı yüzlü eleman tipi için ayrı ayrı çözüm alınıp ağ kaliteleri incelenmiş ve dörtyüzlü eleman tipinde ağ kalitesi daha iyi elde edilmiştir (Çizelge 4.4).
- Modal analiz sonucunda doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Her üç ekseninde de elde edilen ilk doğal frekans değerleri 200 Hz üzerinde ve yapısal olarak uygun bulunmuştur. Mod şekilleri baskın frekanslara göre verilmiştir ve oluşan deplasmanlar yine 200 Hz üzerinde yüksek frekanslarda oluşmuştur.
- X ve Y eksenlerinde aktarım oranları Şekil 4.39'da verilen tolerans aralığında çıkmış ve uygun bulunmuştur. Z ekseninde ise, aktarım oranı sadece 2000Hz'de 0,489 çıkmış ve standartta belirtilen 0,5-2 aralığına göre %2,2 sapma elde edilmiştir. Ancak yine de bulunduğu frekans itibarıyla uygun tolerans aralığında kalmıştır (Şekil 5.28).
- Rastgele titreşim analizi sonucunda oluşan grafikleri incelendiğinde her üç ekseninde de G RMS değerleri, titreşim test gerecinin doğal frekanslarının bulunduğu kısma kadar girdi ivmeye çok yakın olacak şekilde iletilmiş ancak fikstürün doğal frekansları nedeniyle 500 Hz üstünde belli aralıklarda daha yüksek değerler iletilmiştir. Her üç ekseninde de titreşim iletilebilirliği 1 mertebelerinde elde edilmiş olup en iyi iletilebilirlik oranı 1,043 olarak Z ekseninde görülmüştür (Çizelge 5.12).
- Deneysel veriler için, Z eksenine için tasarlanan titreşim test gereci, Al 6061 ve St52 malzemeleri kullanılarak üretilmiştir. Aynı zamanda test edilecek ürünün ağırlık

merkeziyle birebir aynı ağırlık merkezine sahip, test edilecek ürünle aynı fiziksel ölçülerde kaynaklı mekanik parça ürettirilmiştir.

- Deneysel olarak ivmeölçerlerden toplanan veriler ve analiz verileri (Şekil 5.45) karşılaştırılmış ve deneysel sonuçlarda 510Hz olarak bulunan ancak analiz sonuçlarında bulunmayan değer görülmüştür. Bunun da sebebinin gerçek ürünü simule eden kaynaklı mekanik parça olduğu değerlendirilmiştir. Analiz verileri ve deneysel veriler arasındaki farklılığın bir diğer sebebi olarak da Z ekseninde kullanılan titreşim test gereci tablasının uç bölümlerinin, armatüre düzeneğine bağlanamamasından kaynaklı ek salınım oluşturması belirtilmiştir (Şekil 5.46).
- Titreşim test gerecinin ek salınıma maruz kalmasından dolayı analiz verileri ve deneysel veriler farklılık gösterip, rastsal titreşim testlerinde bazı frekans aralıklarında titreşim profilini tam olarak iletemese de titreşim test gerecinin titreşim kaynaklı enerjiyi başarılı bir şekilde ileteceği ve sonrasında yapılacak ek salınıma sebebiyet veren bölgelerin modelde revize edilmesiyle analiz sonuçlarının da elde edilebileceği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Sowjanya, G. P., Rao, P. D., Kiran, D.C. (2013). Finite Element Analysis of Vibration Fixture Made of Aluminum and Magnesium Alloys. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2(1), 84-89.
2. Barros, E. D., & Souto, C. D. (2017). Evaluation of a Vibration Test Fixture. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 22(3), 348-352.
3. Wang, L., Burger, R., Aloe, A. (2017). Considerations of Vibration Fatigue for Automotive Components. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 10(1), 150-158.
4. İnternet: MIL-HDBK-2164A, MILITARY HANDBOOK: ENVIRONMENTAL STRESS SCREENING PROCESS FOR ELECTRONIC EQUIPMENT (19 JUN 1996). *United States Department of Defense*. Web: http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-2000-2999/MIL_HDBK_2164A_173/ Erişim Tarihi: 12 Aralık 2020
5. Steinberg, D. S. (2000). *Vibration analysis for electronic equipment*. (Third Edition). New York: John Wiley & Sons. 1-3, 188-202
6. İnternet: Kırıl, Z. Mekanik Titreşimler Ders Notları. (n.d.) Web: http://kisi.deu.edu.tr/zeki.kiral/Mekanik_Titresimler_Ders_Notlari_Zeki_Kiral.pdf Erişim Tarihi: 12 Aralık 2020
7. Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory and practice*. (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 1-5.
8. Borhade, R.B., Parate B.A., Korade, D.N. (2016). Structural Design Consideration and Performance Evaluation of Vibration Fixture for Power Cartridge Applications. *International Engineering Research Journal*, 562-567.
9. İnternet: Cheever E. Fourier Series from Fourier Transform (n.d.) Web: <https://lpsa.swarthmore.edu/Fourier/Xforms/FXFS.html> Erişim Tarihi: 14 Aralık 2020
10. İnternet: Bishop, N., Woodward (n.d.) A. Fatigue Analysis of a Missile Shaker table Mounting Bracket. (n.d.) Web: https://www.academia.edu/1058168/Fatigue_Analysis_of_a_Missile_Shaker_Table_Mounting_Bracket?auto=download Erişim Tarihi: 12 Aralık 2020
11. Bernardin, J., & Baca, A. (2009, April). *Mechanical design and dynamic testing of the IBEX-HI electrostatic analyzer spacecraft instrument*. Paper presented at the AIAA Infotech@Aerospace Conference, Seattle, Washington.

12. Poncelet, F., Marin, F., Fleury, C., Golinval, J.C. (2005, January). *Optimal design of fixtures for vibration testing of structures on electro-dynamic shaker*. Paper presented at the 12th International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal.
13. Jingze, W., Wenyan, Z., Pengtao, Z. (2016, October). *Design and mode analysis of random vibration test fixture of some airborne heat exchanger*. Paper presented at the 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), Beijing, China.
14. İnternet: LDS V895 Shaker With Horizontal Table (n.d.) *CENTROTECNICA TEST HOUSE FACILITIES* Web: <http://www.centrotecnica.net/wp-content/uploads/2013/03/CENTROTECNICA-LDS-V895-HIGH-FORCE-VIBRATION-SHAKER-1.pdf> Erişim Tarihi: 10 şubat 2021
15. İnternet: MODEL 353B03, *PCB PIEZOTRONICS* Web: <https://www.pcb.com/products?m=353B03> Erişim Tarihi: 10 şubat 2021
16. İnternet: Chapter 15. Reporting Mesh Statistics (n.d.) Web: <https://romeo.univ-reims.fr/documents/fluent/tgrid/ug/chp15.pdf> Erişim Tarihi: 10 şubat 2021
17. İnternet: ANSYS Meshing Advanced Techniques. (2017, April). *ANSYS Inc.* Web: <https://docplayer.net/48950759-Ansys-meshing-advanced-techniques.html>. Erişim Tarihi: 12 Aralık 2020
18. İnternet: Contact Types and Behaviours in Ansys (2018, July) Web: <http://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys> Erişim Tarihi: 10 şubat 2021



GAZİ GELECEKTİR..