

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**AKIŞKAN KATI ETKİLEŞİMLERİNİN TİTREŞİM
ÜZERİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ**

Mert Han YILDIRIM

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL**

MANİSA-2024

Mert Han
YILDIRIM

AKIŞKAN KATI ETKİLEŞİMLERİNİN TİTREŞİM ÜZERİNE ETKİSİNİN SONLU
ELEMENLAR İLE ANALİZİ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Mert Han YILDIRIM



ÖZET

Yüksek Lisans

Mert Han YILDIRIM
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL

Akışkan-Katı Etkileşimleri (FSI), yapıların dinamik davranışlarının anlaşılması açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, bir kirişin titreşimleri üzerindeki akışkan etkilerini derinlemesine incelemek amacıyla kapsamlı bir FSI analizi yapılmıştır. Analizlerde ANSYS programının çeşitli modülleri kullanılmış ve hava ile su olmak üzere iki farklı akışkan ortamında kiriş üzerindeki dinamik etkiler karşılaştırılmıştır.

Öncelikle, analizde kullanılacak kiriş profilleri belirlenerek katı modeller oluşturulmuş ve akışkan analizine uygun kontrol hacmi ve sonrasında ağ yapısı oluşturulmuştur. Zamana bağlı olarak değişen akışkan hızının kirişe uyguladığı aerodinamik kuvvetler, ANSYS Fluent modülü ile hesaplanmıştır. Kirişin doğal frekanslarını belirlemek için modal analiz gerçekleştirilmiştir. ANSYS Transient Structural modülü ile aerodinamik kuvvetlerin kiriş üzerindeki zamanla değişen etkileri analiz edilmiştir. Harmonic Response modülü kullanılarak yapılan analizlerde ise, frekans-tepki grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, rezonans frekanslarında meydana gelen maksimum deformasyonlar ve gerilmeleri belirlemiş ve kirişin kritik frekanslar altındaki davranışını detaylandırmıştır.

Bu çalışma, akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almış ve hem hava hem de su ortamında kirişin dinamik davranışını incelemiştir. Frekans-tepki grafikleri, maksimum gerilmeler, deformasyonlar ve reaksiyon kuvvetleri gibi elde edilen veriler, kiriş tasarımında ve

mühendislik uygulamalarında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu sonuçlar, FSI problemlerinde kullanılmak üzere değerli veriler sağlamaktadır ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır. Tez, akışkan etkilerinin yapısal sistemler üzerindeki karmaşık etkilerini anlamada önemli bir katkı sunmakta ve güvenli, dayanıklı tasarımlar yapılmasına yardımcı olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akışkan-Katı Etkileşimleri (FSI), Titreşim Analizi, ANSYS Simülasyonu, Modal Analiz, Harmonik Tepki Analizi

2024, 68 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Mert Han YILDIRIM

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Saim KURAL

Fluid-Solid Interactions (FSI) are of great importance in understanding the dynamic behavior of structures. In this study, a comprehensive FSI analysis is carried out to investigate in depth the fluid effects on the vibrations of a beam. Various modules of the ANSYS program were used in the analysis and the dynamic effects on the beam in two different fluid environments, air and water, were compared.

Firstly, solid models were created by determining the beam profiles to be used in the analysis and the control volume and then the network structure suitable for the fluid analysis were created. The aerodynamic forces exerted on the beam by the time-varying fluid velocity were calculated with the ANSYS Fluent module. Modal analysis was performed to determine the natural frequencies of the beam. The time varying effects of aerodynamic forces on the beam were analyzed with ANSYS Transient Structural module. In the analysis using the Harmonic Response module, frequency-response graphs were obtained. These graphs determined the maximum deformations and stresses occurring at resonant frequencies and detailed the behavior of the beam under critical frequencies.

This study comprehensively addresses the effects of fluid-solid interactions on beam vibrations and investigates the dynamic behavior of the beam in both air and water environments. The data obtained, such as frequency-response plots, maximum stresses, deformations and reaction forces, provide important information for beam design and engineering applications. These results provide valuable data for use in FSI problems and provide an important reference for future work. The thesis makes an important contribution to the understanding of the complex effects of fluid effects on structural systems and helps to achieve safe and durable designs.

Keywords: Fluid-Solid Interactions (FSI), Vibration Analysis, ANSYS Simulation, Modal Analysis, Harmonic Response Analysis

2024, 68 pages



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada akışkan katı etkileşimlerinin bir giriş titreşim karakteristiğine etkileri araştırılmıştır. İlk önce konunun teorik altyapısı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra akışkanın giriş yüzeyine oluşturacağı kuvvet farklı akışkan tipleri ve farklı giriş kesitleri analiz setleri oluşturularak bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS'in Fluent modülü ile hesaplatılmıştır. Elde edilen kuvvet değerlerini sağlayacak sinüzoidal harmonik kuvvet denklemleri Mathematica programı yardımıyla elde edilmiştir. Giriş tasarımlarının doğal frekansları Modal modülü ile hesaplatılmış ve elde edilen kuvvetler Transient Structural ve Harmonic Response modüllerine girdi olarak verilerek girişin dinamik karakteristiği analiz edilmeye çalışılmıştır. Çıkan sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanarak giriş tasarımları ile ilgili tasarım yapacak araştırmacılara öneriler sunulmuştur.

Araştırmamdaki her aşamada bana yardımcı olan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL'a, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mert Han YILDIRIM
Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FSI	Akışkan-Katı Etkileşimleri (Fluid-Solid Interactions)
C_D	Sürükleme Katsayısı
C_L	Kaldırma Katsayısı
$U(t)$	Zamana Bağlı Rüzgar Hızı
Ω	Akışkan Hızının Değişim Frekansı
ϕ	Faz Açısı
$Li(t)$	Kaldırma Kuvveti
$Dr(t)$	Sürükleme Kuvveti,
L	Lagrangian
V	Potansiyel Enerji

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Dikdörtgen kesitli kiriş modelimiz (Model 1)	12
Şekil 2.2. Elips kesitli kiriş modelimiz (Model 2)	12
Şekil 2.3. Tasarlanan modellerin geometrik özellikleri	13
Şekil 2.4. Alüminyum Alaşımının malzeme özellikleri	14
Şekil 2.5. Model 1 kontrol hacmi ağ yapısı	15
Şekil 2.6. Model 1 kiriş ağ yapısı	15
Şekil 2.7. Model 2 kontrol hacmi ağ yapısı	16
Şekil 2.8. Model 2 kiriş ağ yapısı	16
Şekil 2.9. Fluent hava özellikleri	17
Şekil 2.10. Fluent su özellikleri	17
Şekil 3.1. Model 1, akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken Sürüklenme Kuvvetinin zaman ile değişimi (Siyah çizgi elde edilen sinüzoidal ifade)	22
Şekil 3.2. İlk 8 doğal frekans değerleri	25
Şekil 3.3. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)	26
Şekil 3.4. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)	26
Şekil 3.5. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)	27
Şekil 3.6. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)	27
Şekil 3.7. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	28
Şekil 3.8. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	29
Şekil 3.9. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	29
Şekil 3.10. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	30
Şekil 3.11. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	30
Şekil 3.12. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	31

Şekil 3.13. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	31
Şekil 3.14. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	32
Şekil 3.15. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	32
Şekil 3.16. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	33
Şekil 3.17. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	33
Şekil 3.18. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	34
Şekil 3.19. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	34
Şekil 3.20. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	35
Şekil 3.21. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)	36
Şekil 3.22. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)	36
Şekil 3.23. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)	37
Şekil 3.24. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)	37
Şekil 3.25. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	38
Şekil 3.26. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	38
Şekil 3.27. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	39
Şekil 3.28. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	39
Şekil 3.29. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	40
Şekil 3.30. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	40
Şekil 3.31. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	41
Şekil 3.32. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	41
Şekil 3.33. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	42
Şekil 3.34. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	42
Şekil 3.35. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	43
Şekil 3.36. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	43
Şekil 3.37. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	44

Şekil 3.38. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	44
Şekil 3.39. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)	45
Şekil 3.40. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)	46
Şekil 3.41. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)	46
Şekil 3.42. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)	47
Şekil 3.43. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	47
Şekil 3.44. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	48
Şekil 3.45. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	48
Şekil 4.46. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	49
Şekil 3.47. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	49
Şekil 3.48. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	50
Şekil 3.49. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	50
Şekil 3.50. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	51
Şekil 3.51. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	51
Şekil 3.52. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	52
Şekil 3.53. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	52
Şekil 3.54. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	53
Şekil 3.55. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	53
Şekil 3.56. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	54
Şekil 3.57. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)	55
Şekil 3.58. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)	55
Şekil 3.59. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)	56
Şekil 3.60. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)	56
Şekil 3.61. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	57

Şekil 3.62. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	57
Şekil 3.63. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği	58
Şekil 3.64. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	58
Şekil 3.65. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	59
Şekil 3.66. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	59
Şekil 3.67. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	60
Şekil 3.68. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği	60
Şekil 3.69. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği	61
Şekil 3.70. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	61
Şekil 3.71. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	62
Şekil 3.72. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	62
Şekil 3.73. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği	63
Şekil 3.74. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği	63

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Akışkan hava için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)	19
Tablo 3.2. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)	20
Tablo 3.3. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 2m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)	21
Tablo 3.4. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 2m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 2)	22

İÇİNDEKİLER

ÖZET	Sayfa I
ABSTRACT	III
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	XI
İÇİNDEKİLER	XII
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

TEORİK ALTYAPI VE TEMEL EŞİTLİKLER

1.1. Akışkan Hızının Zamana Bağlı Değişimi	6
1.2. Plaka Üzerindeki Kuvvetin Hesaplanması	6
1.2.1. Sürüklenme Kuvveti (Drag Force)	7
1.2.2. Kaldırma Kuvveti (Lift Force)	7
1.2.3. Toplam Kuvvetin Hesaplanması	7
1.3. Zamana Bağlı Kuvvetin Uygulanması ve Kiriş Hareket Denkleminin Eldesi	8
1.3.1. Kirişin Enerji Fonksiyonlarını Tanımlama	9
1.3.2. Lagrangian Fonksiyonunun Tanımlanması	10

İKİNCİ BÖLÜM

SAYISAL SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

2.1. Model Tasarımı	11
2.2. Malzeme Belirlenmesi	13
2.3. Ağ Yapısı Ayarlamaları	14
2.4. Analiz Hazırlıkları	17

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇLAR VE YORUMLAR

3.1. Analiz Sonuçları	18
3.2. Yorumlar	64
KAYNAKLAR	66



GİRİŞ

Akışkan-Katı etkileşimleri, kirişlerin titreşim davranışlarında önemli rol oynar ve yapısal tepkilerini ve dinamik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Bu çalışma, akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde araştırmaktadır. Bu etkileşimlerin titreşim analizinde dikkate alınmasının önemini vurgulamakta ve bu etkileşimleri etkileyen faktörleri ve analiz yöntemlerini incelemektedir.

Akışkan-Katı etkileşimleri, akışkan ortamı ile katı yapı arasındaki dinamik ilişkiyi ifade eder; burada akışkan akışı, katı cismin titreşim davranışını etkiler. Kiriş titreşimleri bağlamında, hava veya su gibi akışkanların akışı kiriş yapısında titreşimlere neden olabileceğinden bu etkileşim özellikle önemlidir. Örneğin, bir kiriş hava akışına maruz kaldığında, dalgalanmaya veya girdap kaynaklı titreşimlere yol açabilecek aerodinamik kuvvetlere maruz kalır. Kiriş titreşim analizinde akışkan-katı etkileşimlerinin dikkate alınması, yapısal tepkinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve sistemin güvenliğinin ve stabilitesinin sağlanması açısından büyük önem taşır.

Akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini çeşitli faktörler etkiler. Kirişi çevreleyen akışkanın hızı ve yoğunluğu, indüklenen titreşimlerin büyüklüğünün ve frekansının belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Daha yüksek akışkan hızları ve yoğunlukları, kirişin titreşim özelliklerini etkileyen aerodinamik kuvvetlerin artmasına neden olabilir. Ek olarak, kirişin malzeme özellikleri ve geometrisi, kirişin çevredeki sıvıyla nasıl etkileşime girdiğini etkileyebilir. Ayrıca, kiriş titreşimlerinin frekansı ve genliği, akışkan-katı etkileşimlerinin genel titreşim davranışına ne ölçüde katkıda bulunduğunu belirler.

Kiriş titreşimleri üzerindeki akışkan-katı etkileşimlerinin analizi genellikle hesaplamalı ve deneysel yöntemlerin bir kombinasyonunu içerir. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile birleştirilmiş Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları, kiriş etrafındaki akışkan akışının ve bunun indüklenen kuvvetlere yapısal tepkisinin sayısal olarak modellenmesine olanak tanır. Bu bütünleşmiş yaklaşım, sistemin akışkan-katı etkileşimleri altındaki dinamik davranışına ilişkin

değerli bilgiler sağlar. Rüzgar tüneli testi gibi deneysel teknikler, sayısal sonuçların fiziksel olarak doğrulanmasını sağlar ve akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki gerçek dünyadaki etkilerinin anlaşılmasına yardımcı olur. Akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini gösteren vaka çalışmaları, bu etkileşimlerin yapısal analiz ve tasarımda dikkate alınmasının önemini daha da vurgulamaktadır.

Konunun önemi sebebiyle birçok araştırmacı konu üzerinde yaptığı çalışmalar ile bu ilişkiyi araştırmış ve akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimlerini nasıl etkilediğine ışık tutmuştur. Park ve arkadaşları (2015), akışkan-yapı etkileşimlerinin kiriş titreşim özelliklerini nasıl değiştirdiğini ve kirişlerin karmaşık dalga sayısının frekansa bağlı değişimlerini incelemiştir. Dong ve arkadaşları (2011), iç dolgu viskoz akışkan birimlerine sahip esnek yapıların kendinden uyarlamalı kalıntı titreşim bastırmasını incelemiş ve akışkan kuvvetlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki bastırıcı etkisini vurgulamıştır. Baroudi ve Razafimahéry (2015) ise suya batırılmış noktasal kütleler taşıyan Euler-Bernoulli kirişlerinin serbest titreşim özellikleri üzerinde sıvının bağlantı etkisine odaklanarak, akışkan ortamın kiriş titreşimleri üzerindeki etkisini incelemiştir.

Wei ve diğerleri (2007), elektoreolojik (ER) akışkanlarla doldurulmuş dönen sandviç kirişlerin titreşim özelliklerini incelemiş, farklı dönme hızlarında elektrik alanı artırılarak önemli titreşim zayıflaması sağlanmış ve ER akışkanlarının kiriş titreşimlerini kontrol etmek için fizibilitesi ortaya konmuştur. Zhang ve diğerleri (2012), titreşim analizinde akışkan-yapı etkileşimlerini göz önünde bulundurarak, akışkan ve aktif bağlantılarla birleştirilmiş iki kirişin titreşimi için bir model geliştirmiştir. Jamalabadi (2019), düşük genlikli titreşimleri analiz etmek için deneysel aerodinamik yük verilerini yapısal bir modelle birleştirerek, dörtlü piezoelektrik enerji hasadına (galloping piezoelectric energy harvesting) bir akışkan-katı etkileşim modeli dahil etmiştir.

Zhang & Cui (2021) ve Eskandari (2023), sırasıyla hidrolik boru hattı sistemlerinde ve viskoz akışkan ortamına batırılmış nano döner kanatlarda akışkan-katı etkileşimini inceleyerek, akışkan ortamlarda kirişlerin titreşim davranışına ilişkin

analitik yöntemleri ve teorik araştırmaları vurgulamışlardır. Lara ve diğerleri (2004), titreşen kirişler ve çevreleyen viskoz akışkanlar arasındaki etkileşimi ele almış ve bu etkileşimi basitleştirilmiş harmonik osilatörlerle modellemiştir. Qian ve diğerleri (2011), elastik bir takip kenarı plakası ile dalan rijit bir kanadın akışkan-yapı etkileşimini simüle etmiş ve kiriş titreşimlerinin sayısal analizini gerçekleştirmiştir.

Wei ve arkadaşları (2011), elektoreolojik elastomer sandviç kirişlerin, Cox ve arkadaşları (2012) ise viskoz sıvı ortamdaki rezonanslı mikro konsol kirişler sıvı etkileşimlerinin neden olduğu sönümlenme özelliklerini ve rezonans frekansı kaymalarını incelemiştir. Bu çalışmalar, sıvı özelliklerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Yang ve Wen (2010), doymuş poroelastik Timoshenko konsol kirişlerinin dinamik bükülmesini araştırarak, akışkan etkileşimi altında kiriş sapmalarının azalmasını ve statik sapmalara yakınsamasını vurgulamıştır. Kang ve diğerleri (2001) ise, akıllı elektro-reolojik kompozit kirişlerin pasif ve aktif sönümlenme özelliklerini incelemiş, akışkan katmanları aracılığıyla sönümlenme kapasitesini en üst düzeye çıkarmaya odaklanmıştır. Kolekar ve diğerleri (2017), manyetoreolojik akışkan katmanlara sahip sandviç kirişlerin titreşim parametrelerini ve değişen manyetik alanlar altındaki tepkilerini deneysel olarak araştırmıştır.

Jamalabadi (2018), damar-konsol kiriş sistemlerinde akışkan-katı etkileşimlerine ilişkin içgörüler sağlamak için Port-Hamiltonian modelini geliştirmiştir. Kimber ve diğerleri (2009), titreşimli konsol dizilerindeki aerodinamik sönümlenmeyi incelemiş, akışkanlar aracılığıyla kiriş bağlantısının titreşim genliklerine ve bileşen yakınlığına duyarlılığını vurgulamıştır.

Syuhri ve diğerleri (2020), akışkan-yapı etkileşimlerinin doğrusal olmayan sistem tanımlama üzerindeki etkisini incelemiş ve manyetik alanların indüklenmesinin kiriş etrafında itme oluşturmak için hareketli dalgalar yaratabileceğini göstermiştir. Qiu ve arkadaşları (2022), bir kirişin titreşiminin diğer kirişlerde de titreşimleri tetikleyebildiği bağlantı etkisini vurgulayarak, üç bağlı esnek kirişten oluşan bir sistemde titreşim kontrolünü araştırmıştır. Ma ve arkadaşları (2020), zamanla değişen

akışkan alanlarında titreşen esnek kirişlerin akışkan-yapı etkileşim analizini yapmış ve sönümlemenin kiriş titreşimleri üzerindeki önemli etkisini vurgulamıştır. Xu ve diğerleri (2021), yarı aktif kontrolün polimer matrisli kompozitlerden ve MR akışkan çekirdeğinden oluşan sandviç kompozit kirişlerin titreşim tepkisi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiş ve yerel titreşimleri azaltmada kontrol stratejilerinin pratik uygulamasını göstermiştir.

Zhao ve diğerleri (2022), destekleyici doğrusal olmayanlığa sahip çift kirişli bir sistemin enine zorlanmış doğrusal olmayan titreşimini analiz ederek, bu tür sistemlerin akışkan-katı etkileşimleri altındaki karmaşık dinamiklerini ortaya koymuştur. Bu araştırmalar, akışkan özellikleri ile kiriş titreşimleri arasındaki karmaşık ilişkiye dair önemli bilgiler sunarak, akışkan-yapı etkileşimlerinin kirişlerin titreşim davranışını nasıl önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çalışmalar, doğrusal olmayan sistem tanımlama, titreşim kontrol stratejileri, zamanla değişen akışkan alanları ve sandviç kompozit kirişlerin dinamik tepkisi gibi çeşitli yönleri kapsayarak, akışkan-yapı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Araştırmacılar, bu farklı perspektifleri dikkate alarak, akışkan-yapı etkileşimleri alanında ilerlemeler kaydedebilir ve akışkan ortamlara maruz kalan yapıların kontrolünü ve tasarımını iyileştirebilirler.

Sonuç olarak, akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkileri, literatürde özetlenen çeşitli araştırma çalışmalarıyla gösterildiği gibi, oldukça karmaşık ve çok yönlüdür. Bu çalışmalar, akışkanların viskozite ve reoloji gibi özelliklerinin kirişlerin titreşim davranışını nasıl etkilediğine dair önemli bilgiler sunarak, akışkan ortamlar içinde titreşim kontrolü ve yapısal tasarım alanlarında önemli ilerlemeler sağlamıştır. Bu bilgiler, yapıların dayanıklılığı ve performansını artırmak için akışkan ortamlarla daha uyumlu ve verimli tasarım stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmalara ilave olarak, bu çalışmadaki temel amaç, akışkan-katı etkileşimlerinin kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini daha derinlemesine anlamaktır. Bu kapsamda, hava ve su gibi farklı akışkanlarla tek yönlü akışkan-katı etkileşimi (Fluid-Structure Interaction) analizi gerçekleştirerek kirişlerin titreşim davranışlarını

incelenmiştir. Çalışmamızda, kirişlerin doğal frekanslarını, maksimum deformasyonlarını ve frekans tepki sonuçlarını elde edilmiştir.

Araştırmamızda, akışkan yoğunluğunun titreşim üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hava ve su kullanılmıştır. Farklı akışkan hızlarına sahip senaryoları analiz ederek hız değişimlerinin etkilerini de gözlemlenmiştir. Ayrıca, iki farklı kiriş tasarımı kullanarak geometrik özelliklerin titreşim davranışına olan etkilerini incelenmiştir. Bu kapsamlı analizler, mühendislik uygulamalarında titreşim kontrolü ve yapısal tasarım için önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu çalışma, akışkan ortamların kiriş titreşimleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza ve bu alandaki literatüre değerli katkılar sunmamıza yardımcı olacaktır.



BİRİNCİ BÖLÜM

TEORİK ALTYAPI VE TEMEL EŞİTLİKLER

Bu bölümde yapacağımız analizlere temel oluşturacak altyapı denklemlerinden bahsedilecektir. Bu denklemler hem akışkan hem de katı için elde edilecektir. Çalışmamızda akışkan hızının zamana bağlı değişken olduğunu kabul edeceğiz ve bu değişken akışkan hızının bir kiriş üzerinde oluşturacağı değişken kuvveti hesaplamak için temel aerodinamik prensipler, Newton'un ikinci yasası ve Hamilton Prensibinden yararlanılacaktır. Bu süreç genellikle iki ana adımdan oluşur: ilk olarak, akışkan hızının zamana bağlı değişimini tanımlamak ve ikinci olarak, bu hız değişiminin kiriş üzerindeki kuvvetlere olan etkisini hesaplamak. Bu adımlar, kirişin dinamik tepkisinin doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlar.

1.1.Akışkan Hızının Zamana Bağlı Değişimi

Akışkan hızının zamana bağlı değişimini $U(t)$ fonksiyonu ile ifade edelim. Bu fonksiyon, belirli bir zaman diliminde akışkan hızının nasıl değiştiğini tanımlar. Örneğin, sinüzoidal olarak değişen bir akışkan hızı şu şekilde ifade edilebilir:

$$U(t) = U_0 + A \sin(\Omega t + \phi) \quad (1.1)$$

Burada,

- U_0 ortalama akışkan hızı,
- A akışkan hızındaki maksimum sapma (genlik),
- Ω akışkan hızının değişim frekansı,
- ϕ faz açısı,
- t zaman.

1.2.Plaka Üzerindeki Kuvvetin Hesaplanması

Bir plaka üzerindeki aerodinamik kuvvetler, genellikle kaldırma kuvveti L ve sürüklenme kuvveti D olarak iki bileşene ayrılır. Bu kuvvetler, akışkan hızına ve plakanın geometrisine bağlıdır.

1.2.1. Sürüklenme Kuvveti (Drag Force)

Sürüklenme kuvveti, plakanın yüzeyine paralel olan kuvvettir ve şu formülle hesaplanır:

$$Dr(t) = \frac{1}{2} \rho U(t)^2 C_D A \quad (1.2)$$

Burada,

- $Dr(t)$ sürüklenme kuvveti,
- ρ akışkan yoğunluğu,
- $U(t)$ zamana bağlı rüzgar hızı,
- C_D sürüklenme katsayısı (plakanın şekline ve akışın özelliklerine bağlı),
- A plakanın referans yüzey alanı (genellikle projeksiyon alanı).

1.2.2. Kaldırma Kuvveti (Lift Force)

Kaldırma kuvveti, plakanın yüzeyine dik olan kuvvettir ve şu formülle hesaplanır:

$$Li(t) = \frac{1}{2} \rho U(t)^2 C_L A \quad (1.3)$$

Burada,

- $Li(t)$ kaldırma kuvveti,
- C_L kaldırma katsayısı (plakanın açısına ve akışın özelliklerine bağlı).

1.2.3. Toplam Kuvvetin Hesaplanması

Toplam aerodinamik kuvvet $F(t)$, sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin vektörel toplamıdır. Bu kuvvetler genellikle x ve y bileşenlerine ayrılarak hesaplanır. X doğrultusundaki aerodinamik kuvvet,

$$F_x(t) = D(t) \cos(\theta) - L(t) \sin(\theta) \quad (1.4)$$

y doğrultusundaki aerodinamik kuvvet,

$$F_y(t) = D(t) \sin(\theta) + L(t) \cos(\theta) \quad (1.5)$$

Burada θ , plakanın akışa göre eğim açısıdır.

1.3.Zamana Bağlı Kuvvetin Uygulanması ve Kiriş Hareket Denkleminin Eldesi

Zamana bağlı kuvvetler, plaka üzerinde dinamik etkilere yol açabilir ve bu etkilerin plakanın titreşimleri üzerindeki etkisini incelemek için hareket denklemleri kullanılabilir. Bu kuvvetlerin zamana bağlı etkisini analiz ederken, plakanın yer değiştirme, hız ve ivme gibi dinamik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bir ucu ankastre mesnetli bir kirişe zamana bağlı değişken bir kuvvetin etkisiyle oluşacak titreşim genliklerini analiz etmek için kirişin dinamik davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler kullanılabilir. Mühendislikte bu tür sistemler "konsol kiriş" olarak bilinir. Zamana bağlı değişken akışkan hızının etkisiyle kirişe uygulanan kuvvet $F(t)$ olarak tanımlanır. Bu kuvvetin x ve y bileşenlerini dikkate alarak kuvveti aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$F(t) = F_x(t) + F_y(t) \quad (1.6)$$

Kirişin dinamik davranışını modellemek için Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanabiliriz. Bu teori, çubuğun eğilme titreşimlerini tanımlar. Kiriş için hareket denklemlerinin elde edilmesinde Hamilton Prensibinden yararlanılabilir. Hamilton Prensibi, bir sistemin dinamiğini belirlemek için kullanılır ve genellikle Lagrangian mekanik formülasyonu ile ifade edilir. Ankastre-serbest bir kirişin hareket denklemini Hamilton Prensibi kullanarak elde etmek için şu adımlar izlenir:

1.3.1. Kirişin Enerji Fonksiyonlarını Tanımlama

a. Kinetik Enerji (T)

Ankastre-serbest bir kirişin kinetik enerjisi, kiriş boyunca her noktadaki hızın karelerinin toplamıdır.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (1.7)$$

Burada,

- $w(x, t)$ çubuğun enine yer değiştirme fonksiyonu,
- ρ kirişin yoğunluğu,
- A kirişin kesit alanıdır.

b. Potansiyel Enerji (V)

Kirişin elastik potansiyel enerjisi, eğilme nedeniyle kiriş boyunca oluşan gerilmelerin toplamıdır. Eksenel rijitlik EI ile ifade edilir.

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (1.8)$$

Burada,

- E kirişin elastisite modülü,
- I kirişin atalet momentidir.

c. Yayılı Yükün İş (W)

Kirişe etki edecek yayılı yükün işini hesaba katmalıyız:

$$W = \int_0^L F(x, t) w(x, t) dx \quad (1.9)$$

Burada, $F(t)$ 'nin zamana bağılı bir fonksiyon olduğu ve çalışmamız için akışkan hızının zamanla değişimine bağılı olarak yukarıda formüller ile elde edilen yapıda olduğu kabul edilecek, fakat esas kuvvet CFD analizi ile elde edilecektir.

1.3.2. Lagrangian Fonksiyonunun Tanımlanması

Lagrangian, kinetik ve potansiyel enerjilerle yükün yaptığı işin farkı olarak tanımlanır:

$$L = T - V + W \quad (1.10)$$

Elde ettiğimiz enerji ifadelerini burada yerine koyarsak,

$$L = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx + \int_0^L F(x,t) w(x,t) dx \quad (1.11)$$

Buradan gerekli işlemler yapılırsa hareket denklemi aşağıdaki yapıda olacaktır,

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = F(t) \quad (1.12)$$

Bu yaklaşım, zamana bağılı rüzgar hızının plaka üzerindeki etkilerini anlamak ve hesaplamak için temel bir çerçeve sağlar. Daha karmaşık durumlar için deneysel veriler ve sayısal simülasyonlar (CFD analizleri) kullanılmaktadır. Bu çalışmada da bu etkileri daha ayrıntılı incelemek amacıyla, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Geçici Durum Yapısal (Transient Structural) ve Harmonik Tepki analizleri kullanılarak detaylı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu büttrünleşmiş analizler, akışkanın kiriş üzerindeki dinamik etkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır.

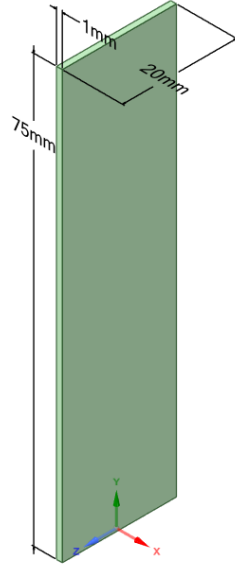
İKİNCİ BÖLÜM

SAYISAL SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

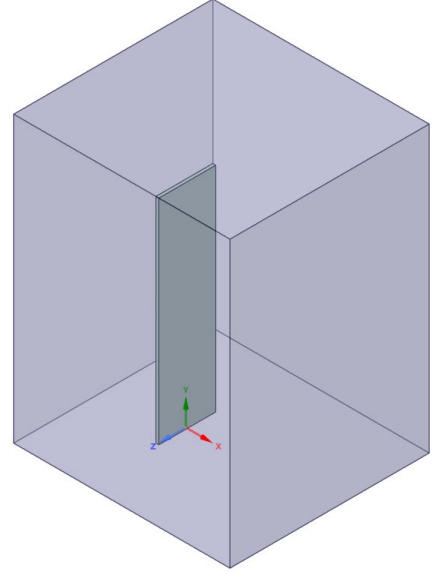
Akışkan-katı etkileşimleri (FSI), mühendislik analizlerinde önemli bir yer tutar ve özellikle yapıların dinamik tepkilerinin belirlenmesinde kritik rol oynar. Bu çalışmada, FSI analizleri için ANSYS yazılımı kullanılarak bir model oluşturulmuş ve çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. ANSYS, sonlu elemanlar analizi (FEA) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yetenekleriyle bu tür karmaşık etkileşimlerin incelenmesinde güçlü bir araçtır.

2.1. Model Tasarımı

Analiz sürecinin ilk adımı, analiz edilecek modelin tasarımını yapmaktır. Bu çalışmada, belirli geometrik özelliklere sahip bir kiriş modeli oluşturulmuştur. Kirişin boyutları, şekli ve destek koşulları, analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyecek önemli faktörlerdir. Kiriş olarak iki farklı geometri ele alınmıştır. Şekil 2.1 ve 2.2’de ele alınan 2 farklı geometri görülmektedir. Bu modeller oluşturulurken, akışkan hızına karşı kütlenin etkinin değişiklik oluşturmaması adına modellerin hacimleri mümkün olduğu kadar aynı yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 2.3’te model 1 ve model 2 için geometrik özellikler görülmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere ağırlık ve hacim neredeyse aynı olarak tasarlanmıştır.

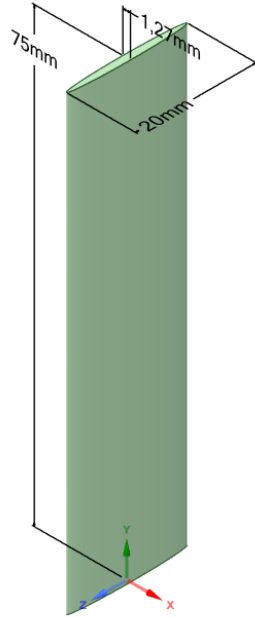


a. Kesit ölçüleri

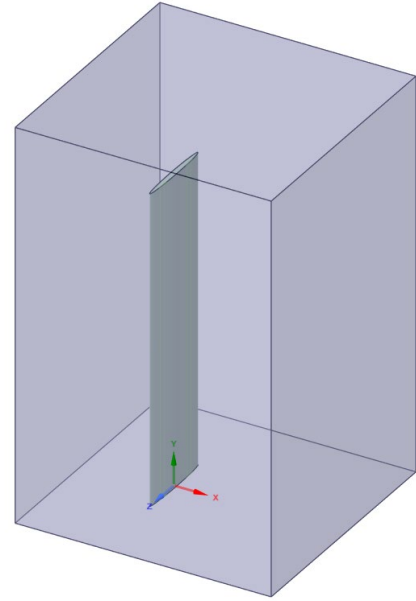


b. Kontrol hacmi

Şekil 2.1. Dikdörtgen kesitli kiriş modelimiz (Model 1)



a. Kesit ölçüleri



b. Kontrol hacmi

Şekil 2.2. Elips kesitli kiriş modelimiz (Model 2)

☒	Material	
☐	Assignment	Aluminum Alloy
	Nonlinear Effects	Yes
	Thermal Strain Effects	Yes
☒	Bounding Box	
	Length X	1, mm
	Length Y	75, mm
	Length Z	20, mm
☒	Properties	
☐	Volume	1500, mm ³
☐	Mass	4,155e-003 kg
	Centroid X	5,7443e-018 mm
	Centroid Y	37,5 mm
	Centroid Z	0, mm
☐	Moment of Inertia Ip1	2,0862 kg·mm ²
☐	Moment of Inertia Ip2	0,13885 kg·mm ²
☐	Moment of Inertia Ip3	1,948 kg·mm ²

a. Model 1

☒	Material	
☐	Assignment	Aluminum Alloy
	Nonlinear Effects	Yes
	Thermal Strain Effects	Yes
☒	Bounding Box	
	Length X	1,273 mm
	Length Y	75, mm
	Length Z	20, mm
☒	Properties	
☐	Volume	1499,7 mm ³
☐	Mass	4,1542e-003 kg
	Centroid X	-1,7952e-018 mm
	Centroid Y	37,5 mm
	Centroid Z	-3,7086e-017 mm
☐	Moment of Inertia Ip1	2,0457 kg·mm ²
☐	Moment of Inertia Ip2	0,10399 kg·mm ²
☐	Moment of Inertia Ip3	1,9426 kg·mm ²

b. Model 2

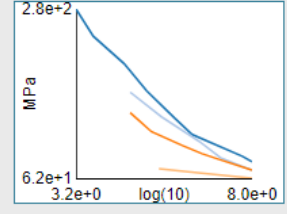
Şekil 2.3. Tasarlanan modellerin geometrik özellikleri

2.2. Malzeme Belirlenmesi

Model tasarımının ardından, kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kiriş için alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Malzeme ANSYS yazılımının kütüphanesinden alınmıştır. Malzeme olarak alüminyum seçilmesinin sebebi çelik malzemeye oranla etkileri daha rahat görebileceğimiz bir elastisite modülüne sahip olmasıdır. Malzeme özellikleri, kirişin titreşim davranışını ve akışkan-katı etkileşimlerini doğrudan etkilediğinden, doğru malzeme seçimi ve tanımlaması büyük önem taşır. Seçilmiş olan alaşımın özellikleri Şekil 2.4’te verilmiştir.

Aluminum Alloy

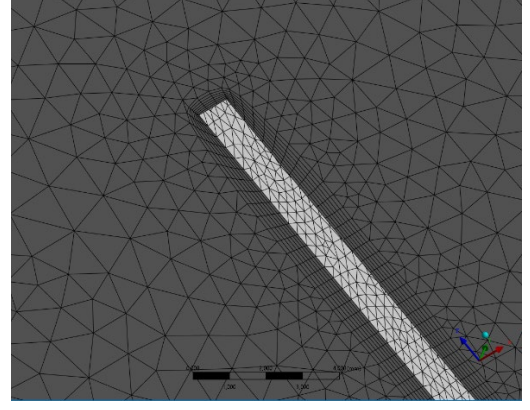
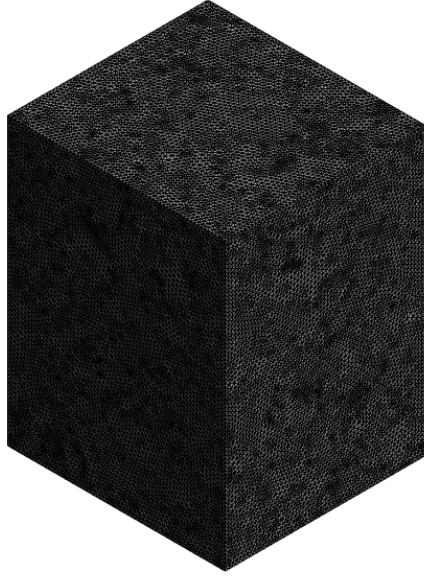
General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Density	2,77e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	71000 MPa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	69608 MPa
Shear Modulus	26692 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2,3e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	280,00 MPa
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	310,00 MPa
Tensile Yield Strength	280,00 MPa

Şekil 2.4. Alüminyum Alaşımının malzeme özellikleri

2.3. Ağ Yapısı Ayarlamaları

Analizin hassasiyeti ve doğruluğu, model için uygun şekilde ağ yapısı oluşturulmasına bağlıdır. Ağ yapısı oluşturma, modelin küçük parçalara bölünerek hesaplama yapılabilir hale getirilmesi işlemidir. Bu çalışmada, kiriş ve çevresindeki akışkan ortamı için uygun ağ yapısı (mesh) ayarları yapılmıştır. Ağ yapısı yoğunluğu, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve çözüm süresini etkileyen kritik bir faktördür. Bu nedenle, özellikle kiriş ve akışkan arasındaki etkileşim bölgelerinde daha ince ağ yapısı kullanılmıştır.



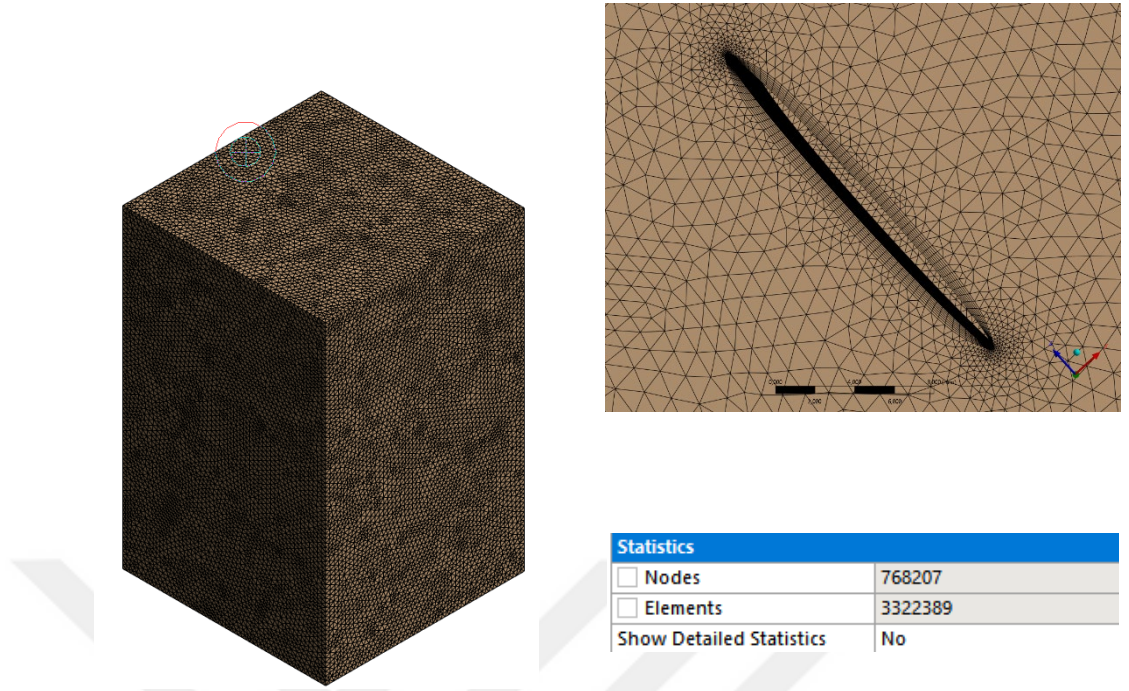
Statistics	
☐ Nodes	649423
☐ Elements	3164551
Show Detailed Statistics	No

Şekil 2.5. Model 1 kontrol hacmi ağ yapısı



Statistics	
☐ Nodes	67525
☐ Elements	12000
Show Detailed St...	No

Şekil 2.6. Model 1 kiriş ağ yapısı



Şekil 2.7. Model 2 kontrol hacmi ağ yapısı

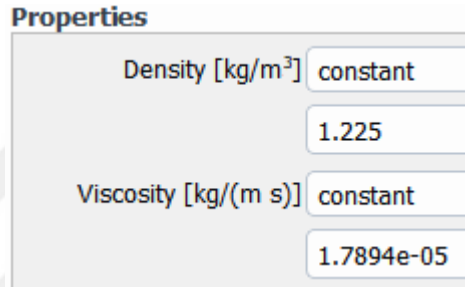


Statistics	
☐ Nodes	114028
☐ Elements	63087
Show Detailed St...	No

Şekil 2.8. Model 2 kiriş ağ yapısı

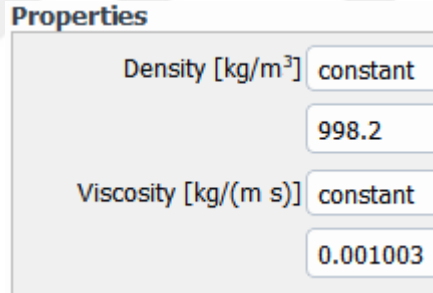
2.4. Analiz Hazırlıkları

Model tasarımı, malzeme belirlenmesi ve ağ yapısı ayarlamalarının ardından, analiz için gerekli diğer hazırlıklar tamamlanmıştır. Bu aşamalar, sınır koşullarının belirlenmesi, yük ve kuvvetlerin uygulanması gibi adımları içermektedir. ANSYS yazılımında, sınır koşulları ve yüklerin doğru bir şekilde tanımlanması, analiz sonuçlarının gerçekçiliği açısından önemlidir. Fluent modülü içinde akışkan olarak 2 farklı girdi kullanılmıştır: hava ve su. Bu malzemelerin özellikleri Şekil 2.9 ve 2.10'da görülmektedir.



Properties	
Density [kg/m³]	constant
	1.225
Viscosity [kg/(m s)]	constant
	1.7894e-05

Şekil 2.9. Fluent hava özellikleri



Properties	
Density [kg/m³]	constant
	998.2
Viscosity [kg/(m s)]	constant
	0.001003

Şekil 2.10. Fluent su özellikleri

Akışkan hızı zamanla değişken olarak tanımlanmış ve denklem 2.1'deki formül ile kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak Fluent'e girilmiştir.

$$U(t) = U_0 + 0,5 * U_0 \cos(\Omega t) \quad (2.1)$$

Analizlerimizde ortalama akışkan hızı 12 m/s ve 2 m/s olmak üzere iki farklı değer olarak ele alınmıştır. Akışkan katı arasındaki yüzey tanımlanmış ve bu yüzeye zamanla etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri sonuç olarak yazdırılmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇLAR VE YORUMLAR

3.1. Analiz Sonuçları

Bu bölümde tasarlanan analiz setlerinin analiz sonuçlarına yer verilecektir. Analiz sonuçları sırasıyla Fluent, Modal, Transient Structural ve Harmonic Response sonuçlarından oluşacaktır. Fluent analizlerinden elde edilen sonuçlarda, akışkanın kirişe çarptıktan sonraki hareketi ve dağılımından ziyade kiriş yüzeyi üzerinde oluşturacağı kuvvet, bu kuvvetin zamanla harmonik değişimi çalışmamız için gerekli olduğu için çalışma konusu dışındaki akışkan analizlerinin sonuçlarına yer verilmeyecektir. Kiriş yüzeyinde oluşan bu kuvvetler, tüm analiz setleri için tablolar halinde verilecektir. Daha sonra sayısal olarak elde edilmiş bu kuvvet değerlerini yaklaşık olarak sağlayacak kuvvet değişim denklemleri Mathematica programı yardımı ile elde edilecektir. Bu yaklaşık denklemlerin elde edilme sebebi özellikle Harmonic Response modülünün giriş için sinüzoidal bir giriş istemesidir. Fluent analiz sonuçlarından sonra kiriş modellerimiz için doğal frekansların Modal modülü ile elde edilmiş ilk 8 doğal frekans değeri verilecektir. Doğal frekans değerlerinden sonra analizimizin esas mekanik kısmının sonuçlarına yer verilecektir. Bu kısım iki ayrı bölüm şeklinde düşünülebilir. Bunun ilk kısmı geçici durum yapısal (transient structural) modülü ile yapılan analiz sonuçlarıdır. Bu modül zamana bağlı doğrusal sistem çözümlerini vermektedir. Bu her ne kadar kiriş için değişken bir kuvvet uygulandığında gerilme, şekil değiştirme vs. sonuçlarını bize verse de özellikle bu harmonik değişen kuvvetlerin değişim frekanslarının sistemin doğal frekansına yakın olduğu rezonans bölgeleri için herhangi bir sonuç verememektedir. Bu nedenle sonrasında doğrusal olmayan çözümü de içeren harmonik tepki (harmonic response) modülü ile elde edilen sonuçlara yer verilecektir. Bu sonuçlar sayesinde akışkan hızının değişim frekansının çeşitli aralıkları için kirişte oluşacak deformasyon, gerilme vs. değerleri ayrıntılı bir şekilde gösterilecektir. Bu analiz sonuçları rezonans bölge içinde sonuçları içerecektir.

Sonuç değerlerinin ilki olan Tablo 3.1’de 12 m/s ortalama hızdaki, akışkan hava için model 1 yüzeyinde oluşan bu değerleri görmekteyiz.

Tablo 3.1. Akışkan hava için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)

Zaman [s]	Sürükleme Kuvveti (Drag Force) [N]	Kaldırma Kuvveti (Lift Force) [N]	Sürükleme Katsayısı (Drag Coef.)
0	0.00000000	0.000000	0.000000
0.05	0.79768746	0.019063	1.302347
0.15	0.18922657	0.007201	0.308941
0.2	0.25528897	0.008877	0.416798
0.25	0.62842986	0.008958	1.026008
0.3	1.01914292	0.011533	1.663907
0.35	0.86186765	0.012685	1.407131
0.4	0.39288291	0.009222	0.641441
0.45	0.15319520	0.005222	0.250115
0.5	0.18091617	0.004833	0.295373
0.55	0.48810876	0.007447	0.796912
0.6	0.95528355	0.010055	1.559647
0.65	0.97922184	0.010626	1.598730
0.7	0.51102572	0.007207	0.834328
0.75	0.16266112	0.004554	0.265569
0.8	0.11973535	0.003718	0.195486
0.85	0.34745790	0.004921	0.567278
0.9	0.84150166	0.007977	1.373880
0.95	1.04181501	0.011097	1.700922
1	0.65380087	0.008983	1.067430
1.05	0.22883131	0.005890	0.373602
1.1	0.11527496	0.004066	0.188204
1.15	0.25549686	0.004704	0.417138
1.2	0.70239057	0.006513	1.146760
1.25	1.05678862	0.010442	1.725369
1.3	0.80274207	0.010376	1.310599
1.35	0.32263181	0.007582	0.526746
1.4	0.13008456	0.004872	0.212383
1.45	0.19352321	0.005061	0.315956
1.5	0.55317397	0.006902	0.903141
1.55	1.00681287	0.010070	1.643776
1.6	0.93386618	0.011199	1.524679
1.65	0.43738310	0.008213	0.714095
1.7	0.15192779	0.004991	0.248045
1.75	0.14379521	0.004207	0.234768
1.8	0.41470462	0.005725	0.677069
1.85	0.91015809	0.008559	1.485972
1.9	1.01935416	0.011073	1.664252
1.95	0.57516584	0.008958	0.939046

2	0.19689535	0.005858	0.321462
---	------------	----------	----------

Tablo 3.2. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)

Zaman [s]	Sürüklenme Kuvveti (Drag Force) [N]	Kaldırma Kuvveti (Lift Force) [N]	Sürüklenme Katsayısı (Drag Coef.)
0	0.00000	0.00000	0.00
0.05	607.65982	15.58590	992.10
0.1	315.70447	10.50187	515.44
0.15	172.10909	4.72559	280.99
0.2	198.59626	6.75121	324.24
0.25	497.45975	7.96008	812.18
0.3	839.04770	9.89432	1369.87
0.35	721.51424	10.51841	1177.98
0.4	347.21419	7.01755	566.88
0.45	153.38743	4.16705	250.43
0.5	162.17889	3.93692	264.78
0.55	397.39308	4.84220	648.81
0.6	782.57410	6.48671	1277.67
0.65	804.50850	8.31772	1313.48
0.7	420.75306	6.25217	686.94
0.75	156.01763	3.57693	254.72
0.8	123.46666	2.59078	201.58
0.85	300.81406	3.42725	491.13
0.9	690.79780	5.31126	1127.83
0.95	853.03234	7.74997	1392.71
1	533.14263	6.24681	870.44
1.05	176.10411	3.66412	287.52
1.1	84.88977	2.30118	138.60
1.15	214.60888	3.56101	350.38
1.2	559.93141	5.64827	914.17
1.25	848.98852	7.60406	1386.10
1.3	650.31732	6.84775	1061.74
1.35	258.80188	4.18227	422.53
1.4	97.85311	2.34341	159.76
1.45	158.06218	1.93418	258.06
1.5	461.65305	2.77347	753.72
1.55	824.41236	6.33235	1345.98
1.6	761.70471	7.92219	1243.60
1.65	358.22547	5.61454	584.86
1.7	133.58033	3.27516	218.09
1.75	134.03002	2.95112	218.82
1.8	344.85942	4.17383	563.04
1.85	738.30938	6.00890	1205.40
1.9	837.81128	7.94870	1367.86
1.95	475.91294	6.19729	777.00

2	161.34749	3.69261	263.42
---	-----------	---------	--------

Benzer şekilde Tablo 3.2’de akışkan olarak su kullanıldığında model 1 yüzeyinde oluşan bu değerleri görmekteyiz. Tablo 3.3’te ise ortalama akışkan hızının 2 m/s olarak kabul edildiğinde yine akışkan su için model 1 yüzeyinde elde edilen değerler görülmektedir.

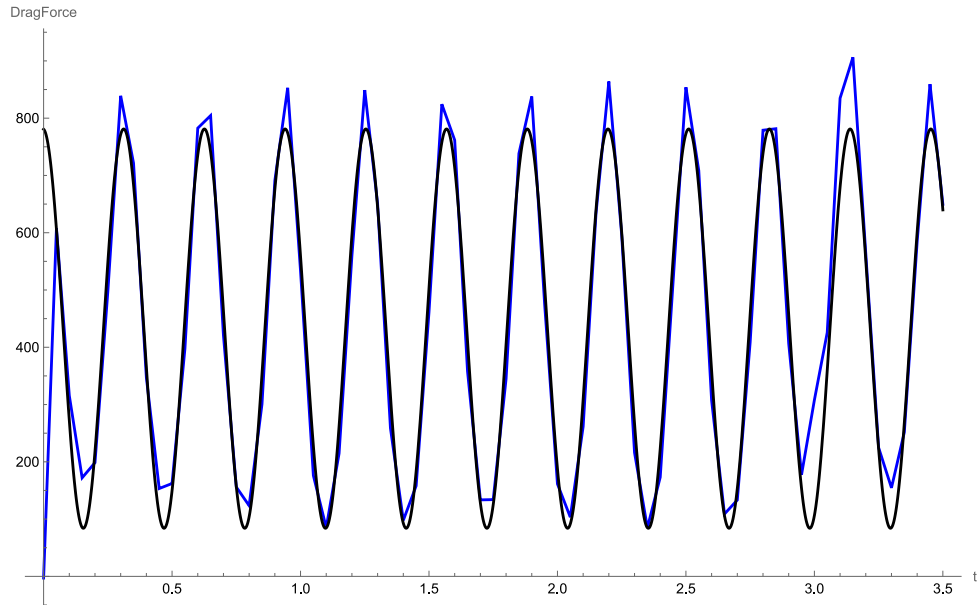
Tablo 3.3. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 2m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 1)

Zaman [s]	Sürüklenme Kuvveti (Drag Force) [N]	Kaldırma Kuvveti (Lift Force) [N]	Sürüklenme Katsayısı (Drag Coef.)
0.00	0.000000	0.000000	0.00
0.05	17.040973	0.372034	27.82
0.10	7.310196	0.296170	11.94
0.15	3.999087	0.151769	6.53
0.20	5.935930	0.173766	9.69
0.25	14.465710	0.212930	23.62
0.30	23.772440	0.265664	38.81
0.35	19.872987	0.283384	32.45
0.40	8.718808	0.210541	14.23
0.45	3.344872	0.139449	5.46
0.50	4.314541	0.114965	7.04
0.55	11.604235	0.125116	18.95
0.60	22.378305	0.186885	36.54
0.65	22.493099	0.242129	36.72
0.70	11.309279	0.199074	18.46
0.75	3.711389	0.141005	6.06
0.80	3.142509	0.103004	5.13
0.85	8.530765	0.118407	13.93
0.90	19.574653	0.166328	31.96
0.95	24.018585	0.231696	39.21
1.00	14.808776	0.202139	24.18
1.05	4.777848	0.143153	7.80

Tablo 3.4’te ise ikinci tasarımıımız olan model 2 yüzeyinde oluşan kuvvetler, akışkan su için, ortalama akışkan hızının 2 m/s olduğu durumda elde edilmiştir. Tüm tablolarda elde edilen kuvvetlerin yaklaşık sinüzoidal denklem karşılıkları Mathematica programı yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 3.1’de elde edilen bu denklemin tablodaki değerler ile uyumu Tablo 3.2’deki değerler için örnek olması amacıyla çizdirilip, karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.4. Akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 2m/s iken CFD Analiz sonuçları (Model 2)

Zaman [s]	Sürüklenme Kuvveti (Drag Force) [N]	Kaldırma Kuvveti (Lift Force) [N]	Sürüklenme Katsayısı (Drag Coef.)
0	0.000000	0.000000	0.00
0.05	18.490638	0.320262	30.19
0.1	7.986618	0.381857	13.04
0.15	4.669007	0.182612	7.62
0.2	6.654303	0.215500	10.86
0.25	15.933082	0.244544	26.01
0.3	26.161246	0.292733	42.71
0.35	22.164592	0.245680	36.19
0.4	9.927120	0.112293	16.21
0.45	3.405220	0.036073	5.56
0.5	4.179741	0.011940	6.82
0.55	12.481116	0.094334	20.38
0.6	23.997627	0.250552	39.18
0.65	24.581563	0.239262	40.13
0.7	13.159192	0.089653	21.48
0.75	4.236075	0.026990	6.92
0.8	3.170795	0.009417	5.18
0.85	9.435328	0.055247	15.40
0.9	21.209144	0.232842	34.63
0.95	26.130173	0.284842	42.66
1	16.932093	0.122491	27.64
1.05	5.914463	0.040763	9.66



Şekil 3.1. Model 1, akışkan su için ortalama akışkan hızı (U_0) 12m/s iken Sürüklenme Kuvvetinin zaman ile değişimi (Siyah çizgi elde edilen sinüzoidal ifade)

Akışkan hava için, ortalama akışkan hızı (U_0) =12m/s olduğu durumda elde edilen zamana bağlı kuvvet ifadeleri (Model 1);

Sürüklenme Kuvveti,

$$F_x = 0,51485 + 0,4385 \sin(1,605 + \Omega t) \quad (3.1)$$

Kaldırma Kuvveti,

$$F_y = 0,00751 + 0,0032 \sin(1,201 + \Omega t) \quad (3.2)$$

Bu ifadelerde Ω , akışkan hızının zamanla değişim frekansıdır.

Akışkan su için, ortalama akışkan hızı (U_0) =12m/s olduğu durumda elde edilen zamana bağlı kuvvet ifadeleri (Model 1);

Sürüklenme Kuvveti,

$$F_x = 432,57 + 348,521 \sin(58,1683 + \Omega t) \quad (3.3)$$

Kaldırma Kuvveti,

$$F_y = 5,4414 + 2,178 \sin(1,12633 + \Omega t) \quad (3.4)$$

Akışkan su için, ortalama akışkan hızı (U_0) =2m/s olduğu durumda elde edilen zamana bağlı kuvvet ifadeleri (Model 1);

Sürüklenme Kuvveti,

$$F_x = 11,444 + 9,41 \sin(7,92 + \Omega t) \quad (3.5)$$

Kaldırma Kuvveti,

$$F_y = 0,167 + 0,063 \sin(0,849 + \Omega t) \quad (3.6)$$

Akışkan su için, ortalama akışkan hızı (U_0) = 2m/s olduğu durumda elde edilen zamana bağlı kuvvet ifadeleri (Model 2);

Sürüklenme Kuvveti,

$$F_x = 12,375 + 9,3 \sin (7,894 + \Omega t) \quad (3.7)$$

Kaldırma Kuvveti,

$$F_y = 0,115 + 0,14 \sin (1,6565 + \Omega t) \quad (3.8)$$

Elde edilen bu ifadeler Geçici Durum Yapısal (Transient Structural) ve Harmonik Tepki analizleri için kuvvet girdisi olarak kullanılmıştır. Ayrıca ağırlık kuvvetinin etkisinin de analize dahil olabilmesi için yerçekimi ivmesi -y doğrultusunda tanımlanmıştır. Kiriş alt ucundan her üç ekseninde sabitlenmiştir. Analizlerde sönüm katsayısı 0,02 olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.2’de dikdörtgen kesitli model 1 için ilk sekiz doğal frekans görülmektedir. Şekil 3.3’te ise bu değerler model 2 için elde edilmiştir. Şekillerdeki değerler incelenecek olursa model 2 için doğal frekans değerleri model 1’e göre daha yüksek çıkmıştır. Bu artış yaklaşık %10.15 civarında olmuştur. Bu doğal frekans değerlerinden en önemli olanlar ilk doğal frekanslardır çünkü literatür bize en yüksek genliklerin ilk doğal frekans değerine yakın frekanslarda oluştuğunu söylemektedir. Bu nedenle ileride göreceğimiz harmonik tepki analizlerinde frekans aralığı olarak 0-300Hz aralığını almayı uygun bulduk. Bu aralık her iki model için de ilk doğal frekanslarını kapsamakta ve hem bu değere yakın hem de uzak olan değerleri içermektedir.

	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	148,19
2	2,	925,75
3	3,	1093,7
4	4,	2596,6
5	5,	2768,5
6	6,	3390,8
7	7,	5100,1
8	8,	5997,6

a. Model 1

	Mode	✓ Frequency [Hz]
1	1,	163,06
2	2,	1015,9
3	3,	1378,6
4	4,	2432,8
5	5,	2827,3
6	6,	4203,8
7	7,	5497,8
8	8,	7223,7

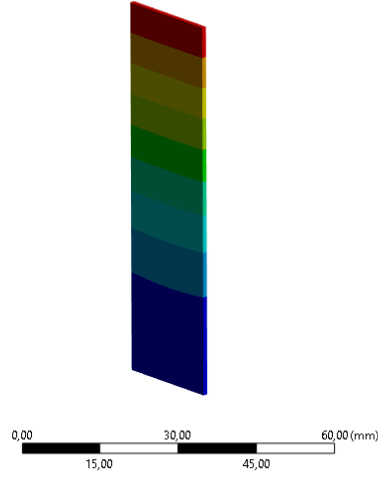
b. Model 2

Şekil 3.2. İlk 8 doğal frekans değerleri

Akışkanın hava ve ortalama akışkan hızının 12m/s olduğu durum için, Şekil 3.3 ve 3.4'te geçici durum yapısal analiz sonuçlarından elde edilen görselleri model 1 için görmekteyiz. Şekil 3.3'te x doğrultusundaki deformasyonu, Şekil 3.4'te ise eşdeğer gerilme sonuçlarını görmekteyiz. x doğrultusundaki maksimum deformasyonun tahmin edileceği üzere serbest ucun en uç noktasında yaklaşık 0,396mm olduğu görülmektedir. Kirişe etki eden kuvvetlerden daha kritik olanı x doğrultusundaki sürüklenme kuvveti zamanla 0 ile 1 N arasında değişen bir değere sahiptir. Bu aslında çok küçük bir kuvvettir. Ama yine de doğrusal sonuçlara göre bu şekilde değişken bir kuvvet bile Şekil 3.4'te görüleceği üzere yaklaşık 11 MPa bir eşdeğer gerilmeye sebep olmuştur. Tabi bahsettiğimiz bu sonuçlar akışkan hızının değişim frekansının doğal frekansa yakınlığı hesaba katılmadan yapılmış analiz sonuçlarıdır. Şekil 3.5 ve 3.6'da ise bu sonuçların harmonik tepki analizi sonucunda elde edilmiş görselleri görülmektedir. Bu sonuçlar 0 ile 300Hz arasındaki maksimum değerleri vermektedir. Maksimum deformasyon yaklaşık 4.814mm olarak elde edilmiştir ki bu değer geçici durum sonucuna kıyasla 12 kattan fazladır. Eş değer gerilme sonucu ise yaklaşık 122.23MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer de önceki sonuca oranla yaklaşık 11 kat artmıştır. Bu da bize 1N gibi çok çok küçük bir kuvvetin bile çok büyük gerilmelere sebep olabileceğini göstermektedir.

D: Transient Structural
 Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 5, s

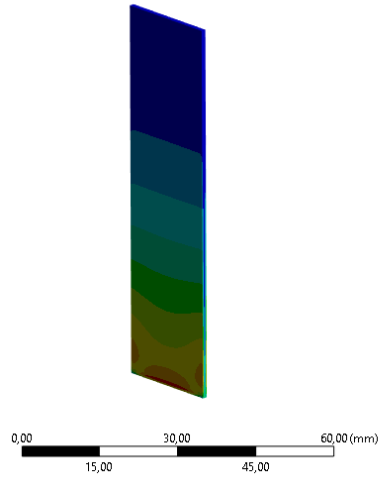
0.39576 Max
 0,35178
 0,3078
 0,26383
 0,21985
 0,17588
 0,1319
 0,087924
 0,043948
-2,8431e-5 Min



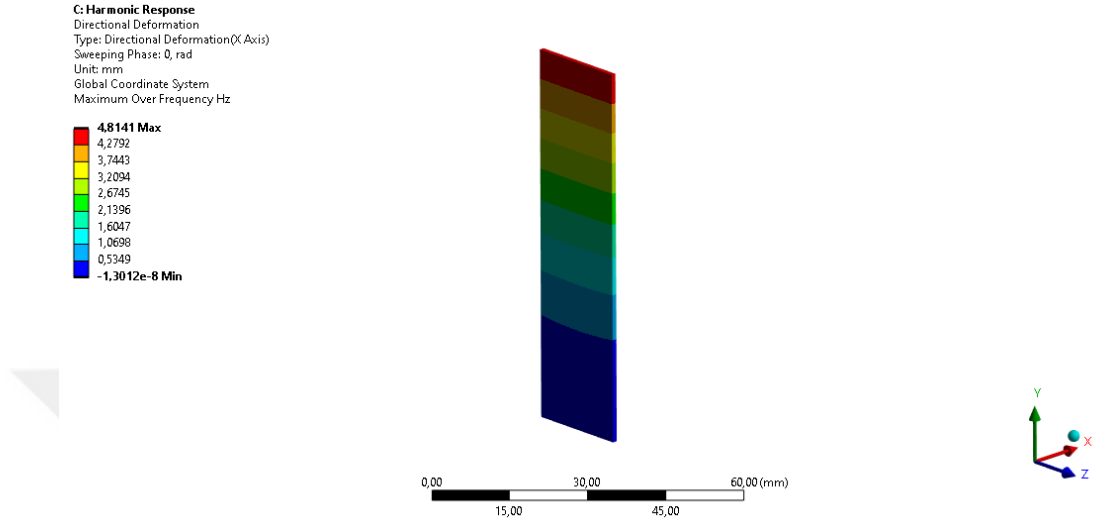
Şekil 3.3. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)

D: Transient Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 5, s

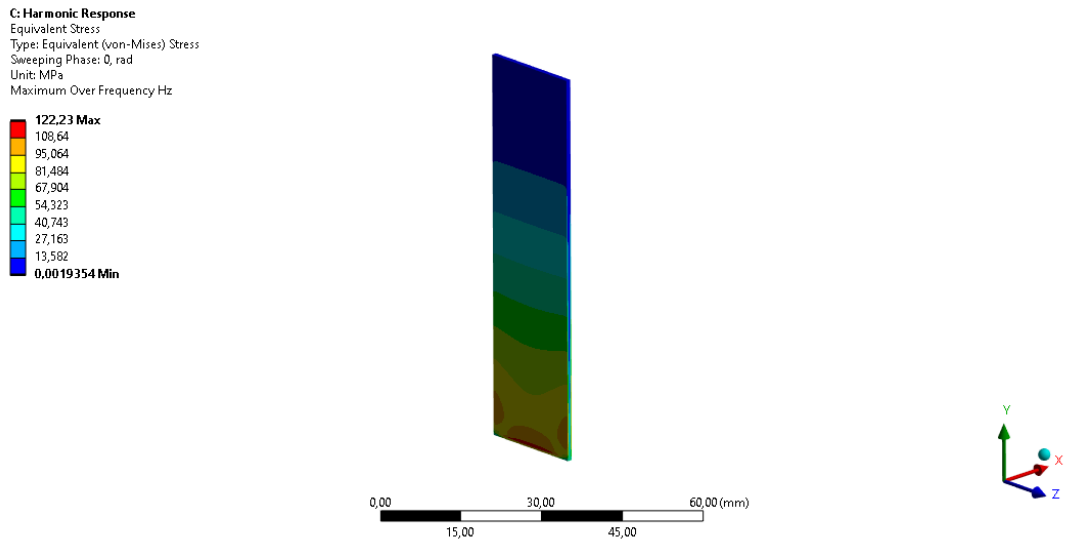
11.185 Max
 9,9426
 8,6998
 7,457
 6,2142
 4,9713
 3,7285
 2,4857
 1,2429
0,00014125 Min



Şekil 3.4. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)



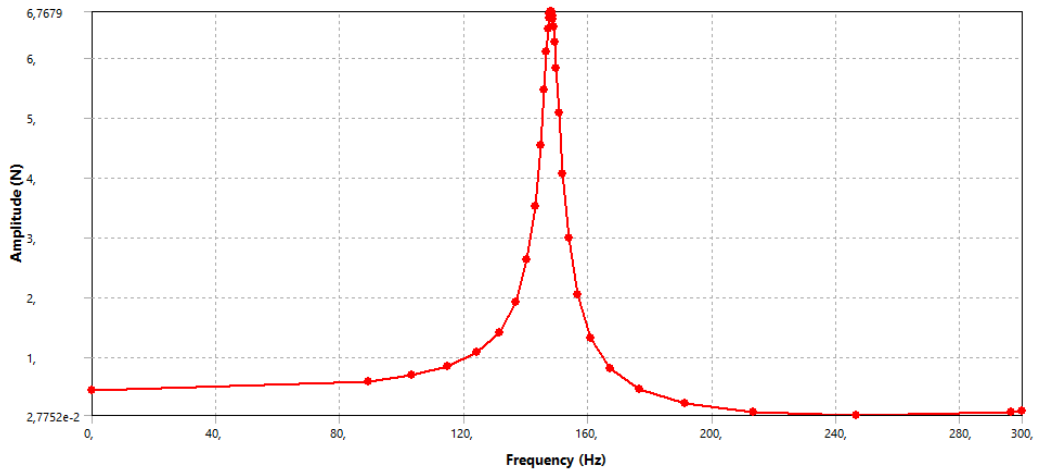
Şekil 3.5. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)



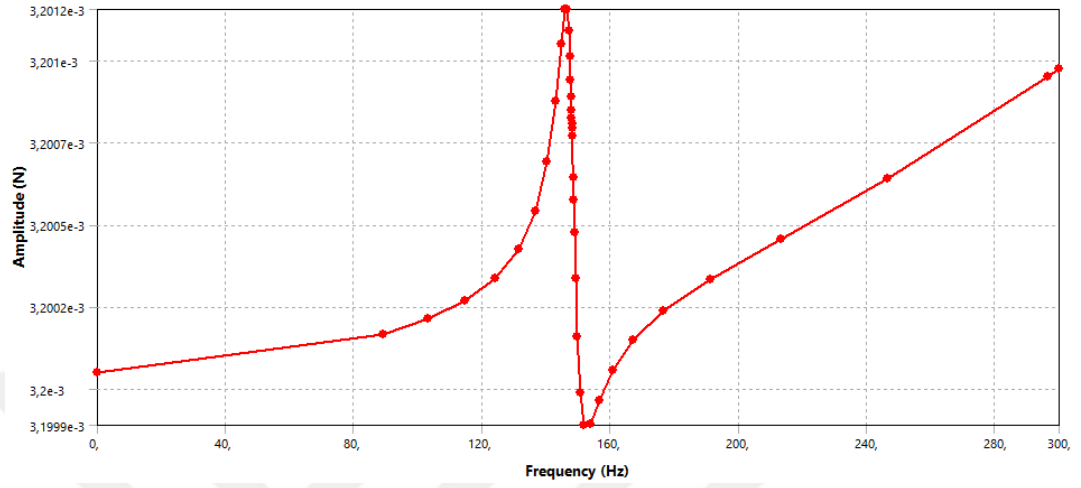
Şekil 3.6. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)

Şekil 3.7-8 ve 9’da aynı şartlar altında (akışkan hava, ortalama hız 12m/s, model 1) ankastre mesnette oluşan x, y ve z doğrultusundaki reaksiyon kuvvetlerinin frekansa bağlı değişimleri görülmektedir. En yüksek reaksiyon kuvveti değeri x doğrultusunda olduğu görülmektedir. Genlikler ilk doğal frekansa (148.19Hz) yaklaştıkça artmakta ve tam doğal frekans değerinde pik yapmaktadır. y ve z doğrultusundaki kuvvetler ise sırasıyla 10^{-3} ve 10^{-8} gibi oldukça küçük değerler çıkmıştır. y doğrultusunda ayrıca kuvvet değişimi yok denilecek kadar azdır. Bu nedenle doğal frekans değerinin dışında da artma varmış gibi görülse de aslında kayda değer bir değişim yoktur.

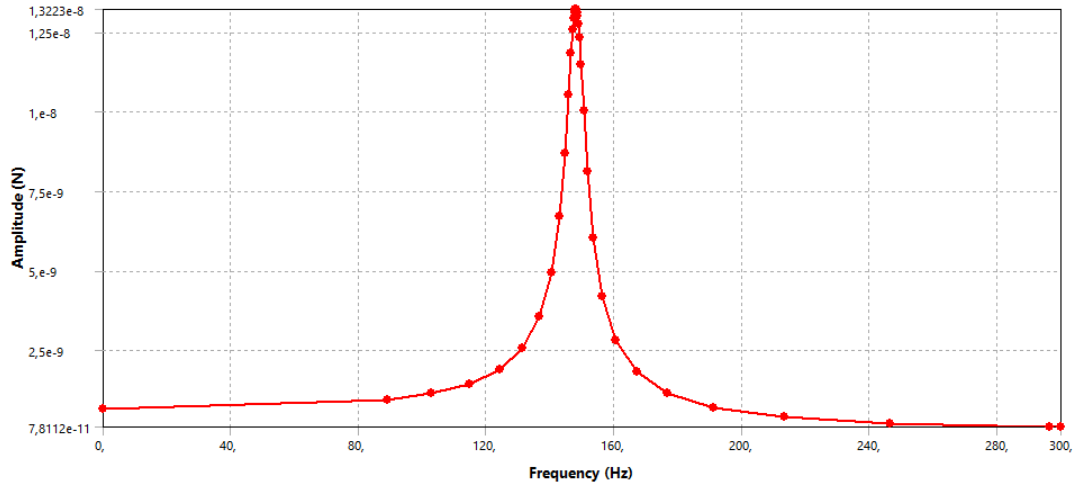
Şekil 3.10-15 aralığında aynı şartlar altında x, y ve z doğrultularındaki normal gerilmeler ve faz değişimleri görülmektedir. Normal gerilmeler için sırasıyla x, y ve z doğrultularında 54 MPa, 137 MPa ve 63 MPa pik değerleri elde edilmiştir. Faz açısı değişimi ise her üç ekseninde aynı şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 3.16-20 arasında ise xy, xz ve yz düzlemlerindeki kayma gerilmesi sonuçları ile ilgili grafikler görülmektedir. Sırasıyla 34 MPa, 7 MPa ve 22 MPa kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Normal gerilme en düşük kesit alanına sahip y doğrultusunda meydana gelirken, en yüksek kayma gerilmesi ise xy düzleminde meydana gelmiştir.



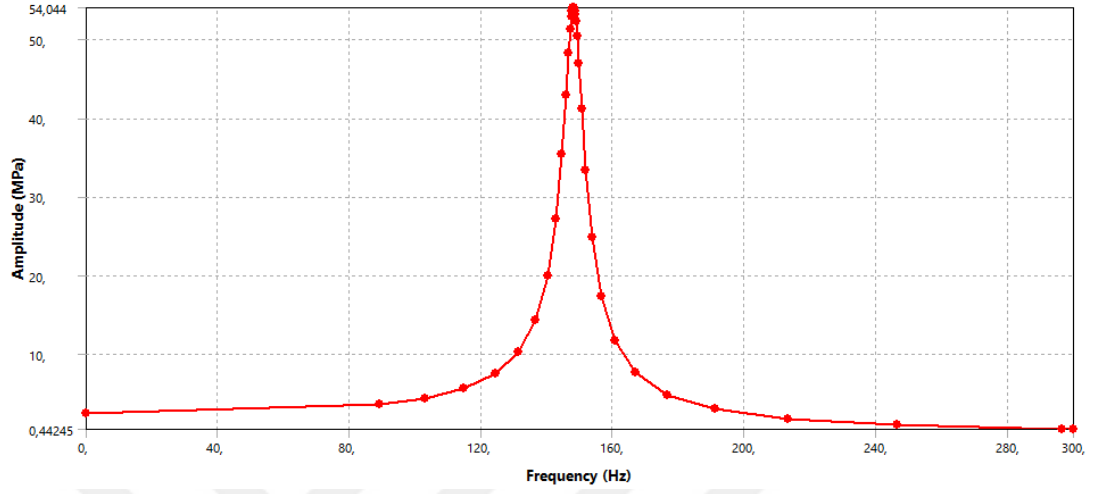
Şekil 3.7. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



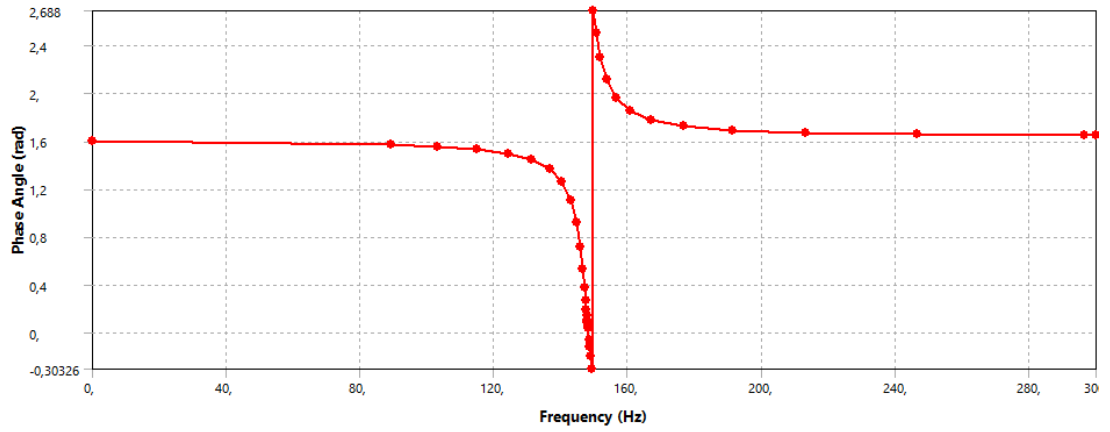
Şekil 3.8. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



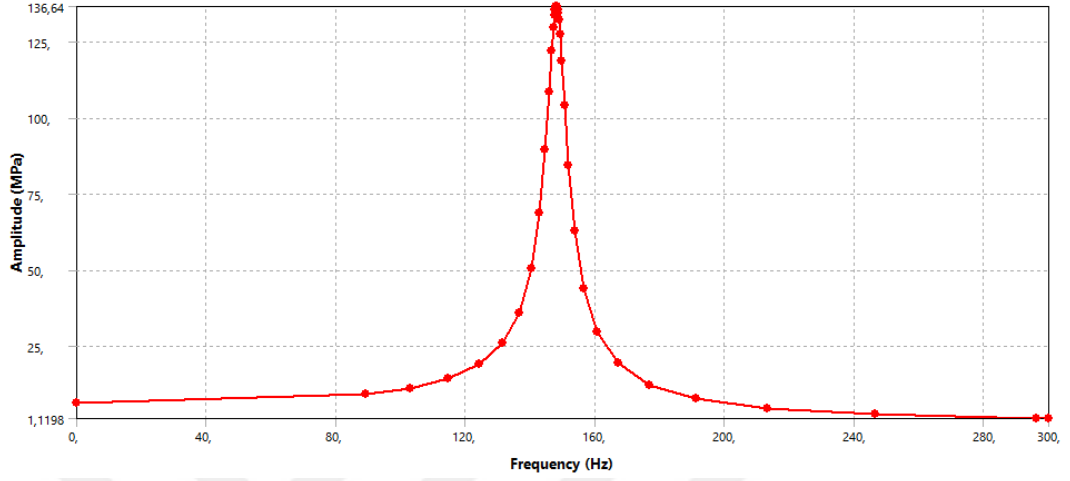
Şekil 3.9. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



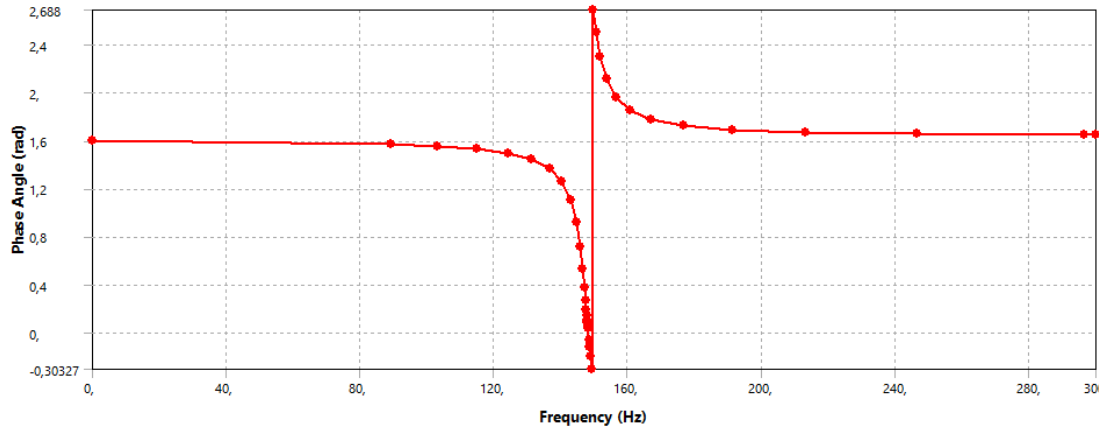
Şekil 3.10. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



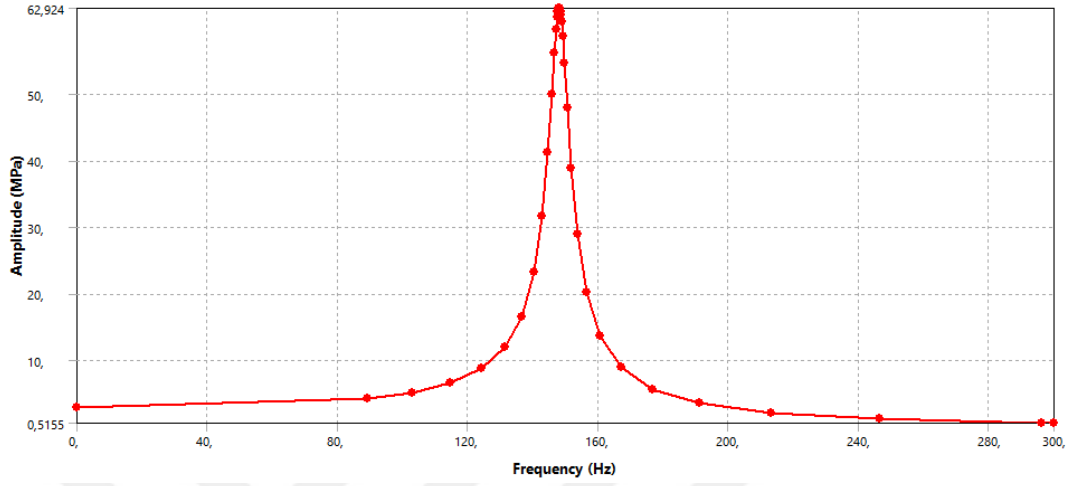
Şekil 3.11. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



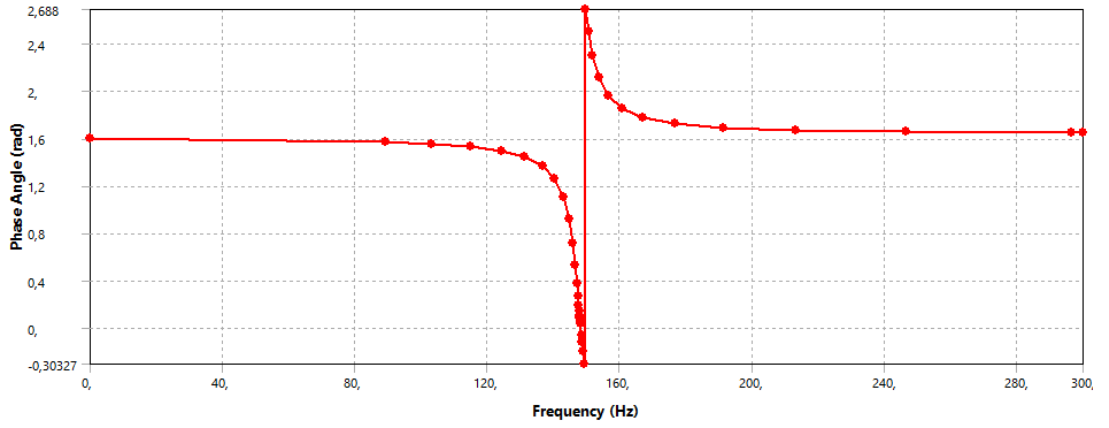
Şekil 3.12. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



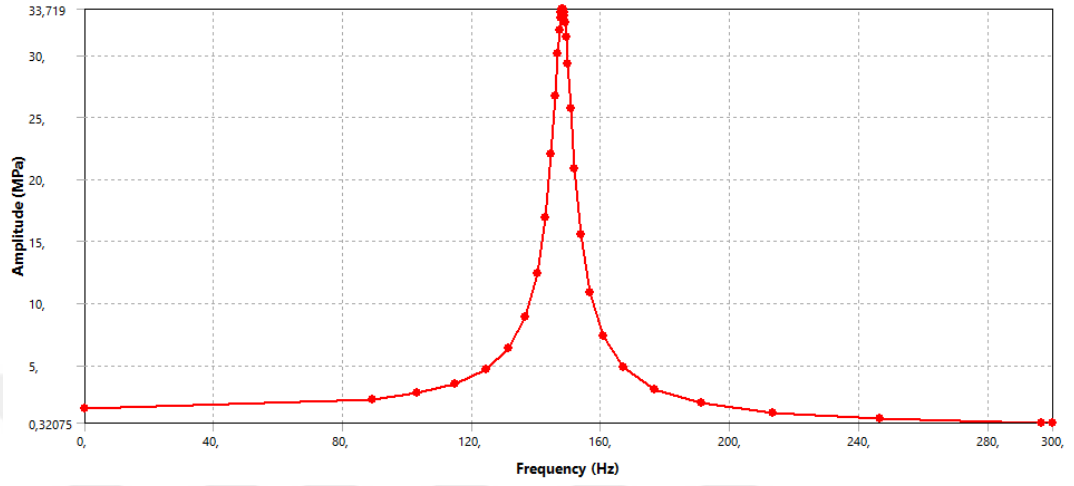
Şekil 3.13. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



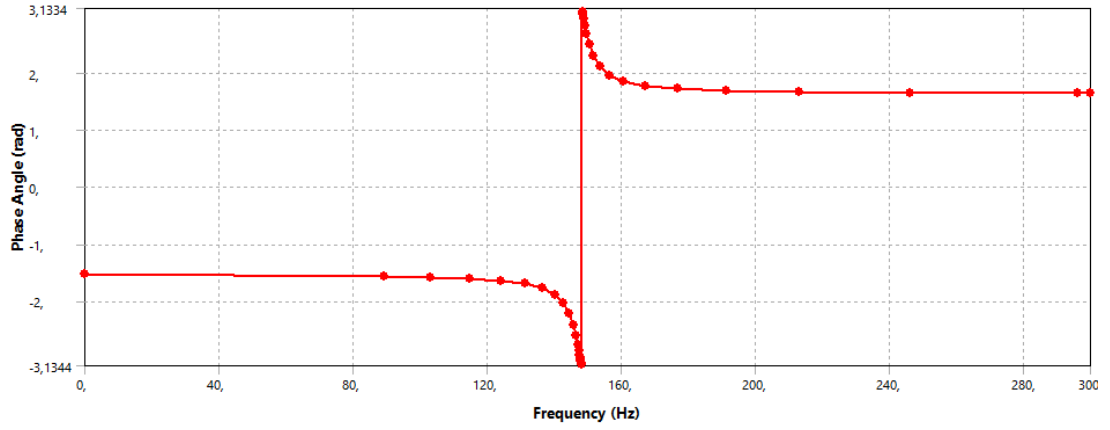
Şekil 3.14. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



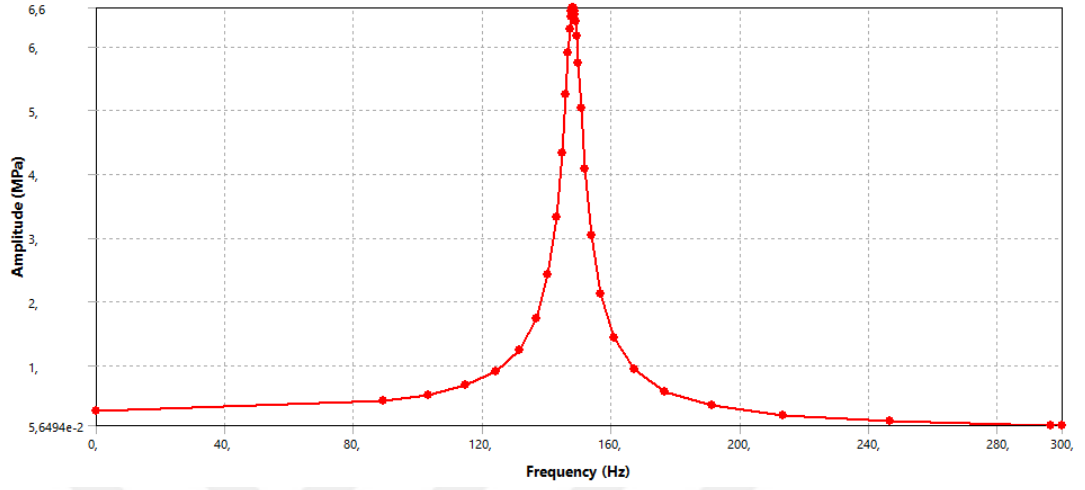
Şekil 3.15. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



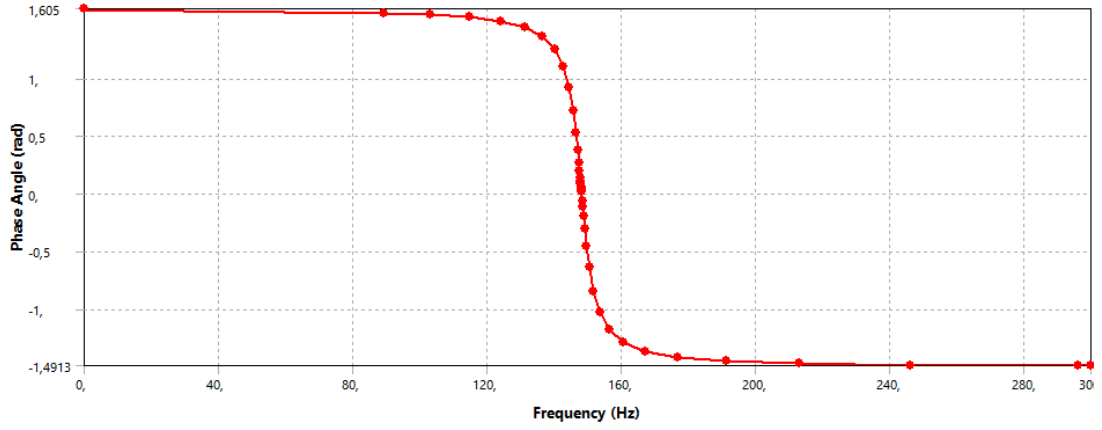
Şekil 3.16. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



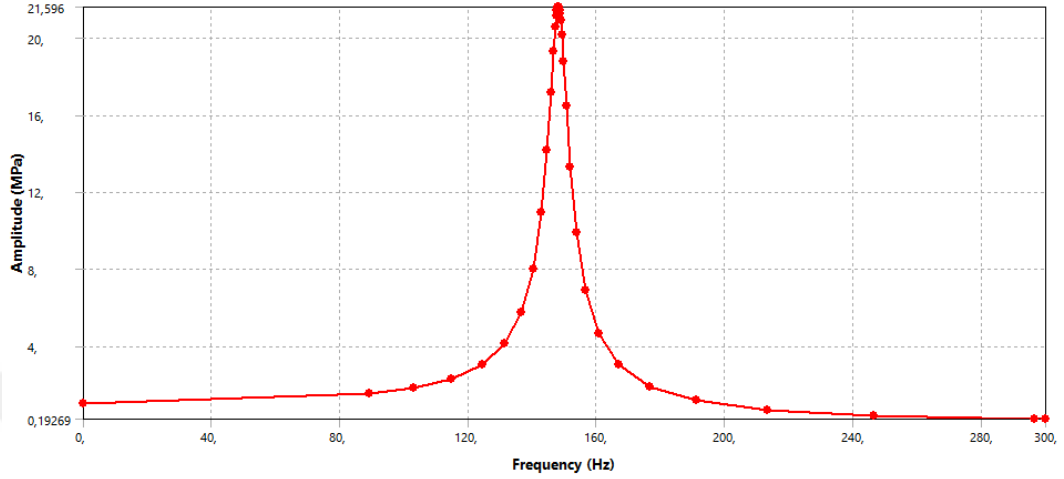
Şekil 3.17. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.18. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği

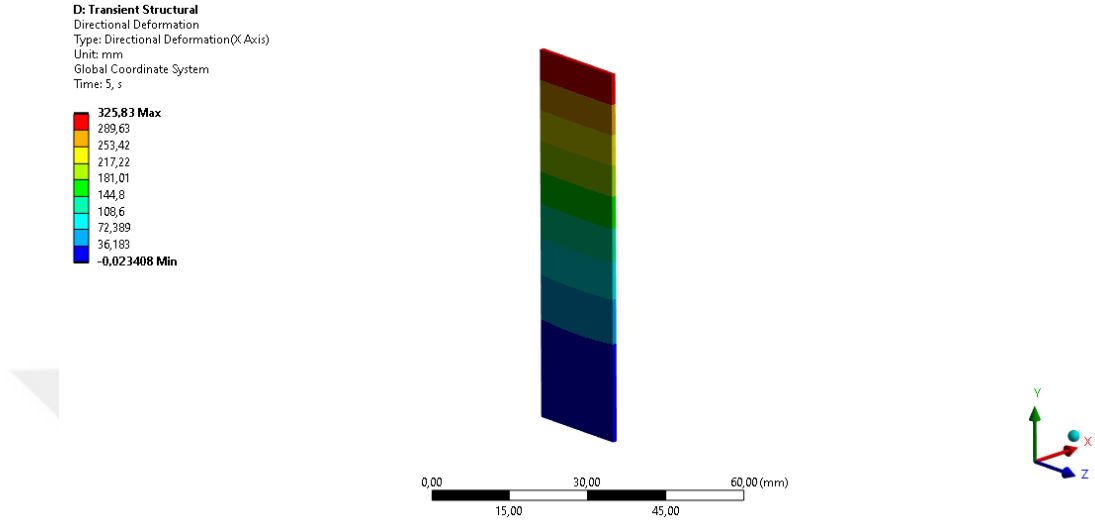


Şekil 3.19. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği

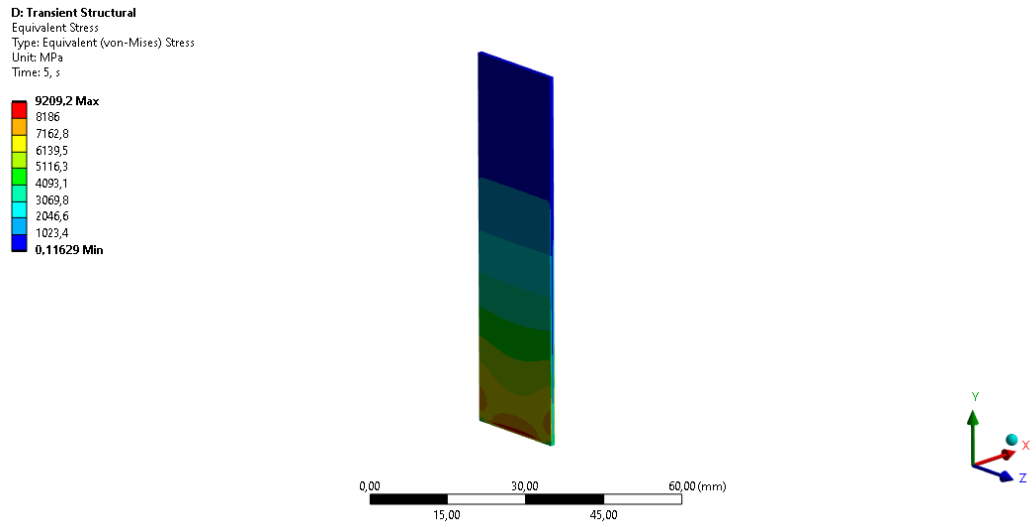


Şekil 3.20. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepkisi grafiği

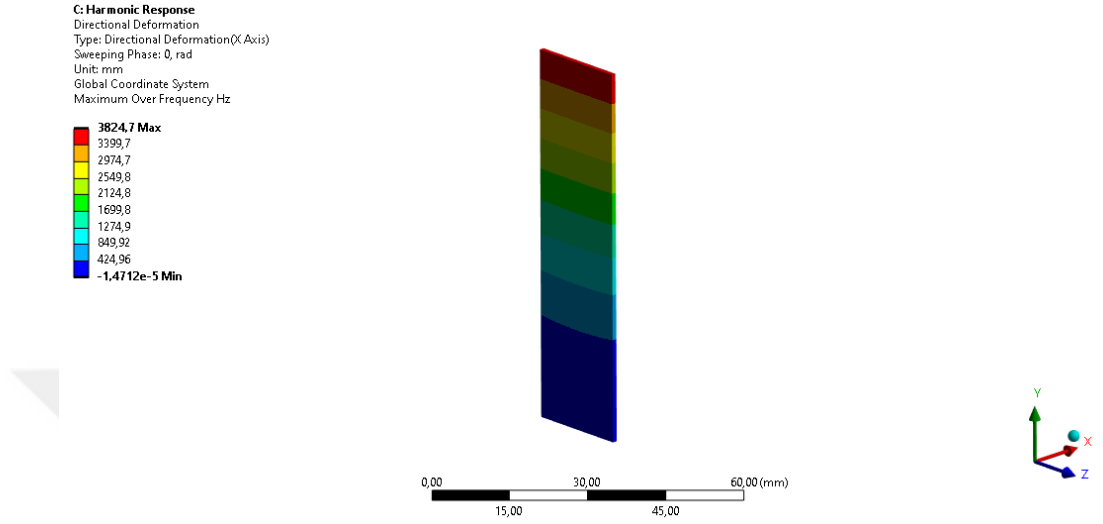
Akışkanın su ve ortalama akışkan hızının 12m/s olduğu durum için, Şekil 3.21 ve 3.22'de geçici durum yapısal analiz sonuçlarından elde edilen görselleri model 1 için görmekteyiz. Şekil 3.21'de x doğrultusundaki deformasyonu, Şekil 3.22'de ise eşdeğer gerilme sonuçlarını görmekteyiz. Akışkanın hava yerine su seçilmesiyle gerilme değerlerinde çok çok fazla bir artış meydana gelmiştir. Geçici durum sonuçlarına göre bile 326mm deplasman ve 9210 MPa gerilme değeri elde edilmiştir ki bu lineer olmayan etkileri dahil etmeden bile kirişin dayanıksız olduğunu göstermektedir. Şekil 3.23-24'te, lineer olmayan etkileri dahil ettiğimizde ise maksimum deplasman değeri yaklaşık 12 kat artarak 3825mm'ye çıkmıştır. Bu değer uç noktada yaklaşık 4m yer değiştirme anlamına gelmekte ve fiziksel olarak kiriş hasar almadan gerçekleşmesi mümkün değildir. Yine benzer şekilde gerilme değeri ise 97100 MPa gibi bir değere çıkarak yaklaşık 11 kat artmıştır. Harmonik tepki analiz sonuçları da benzer şekilde Şekil 3.25-38 arasında gösterilmiştir. Elde edilen yapılar pik noktalarının olduğu frekans değerleri yine beklenildiği üzere aynıdır fakat genlik değerlerinde 10 katın üzerinde bir artış gözlemlenmektedir. Maksimum kuvvet ve gerilmelerin olduğu düzlemler doğrultular yine aynı olarak elde edilmiştir.



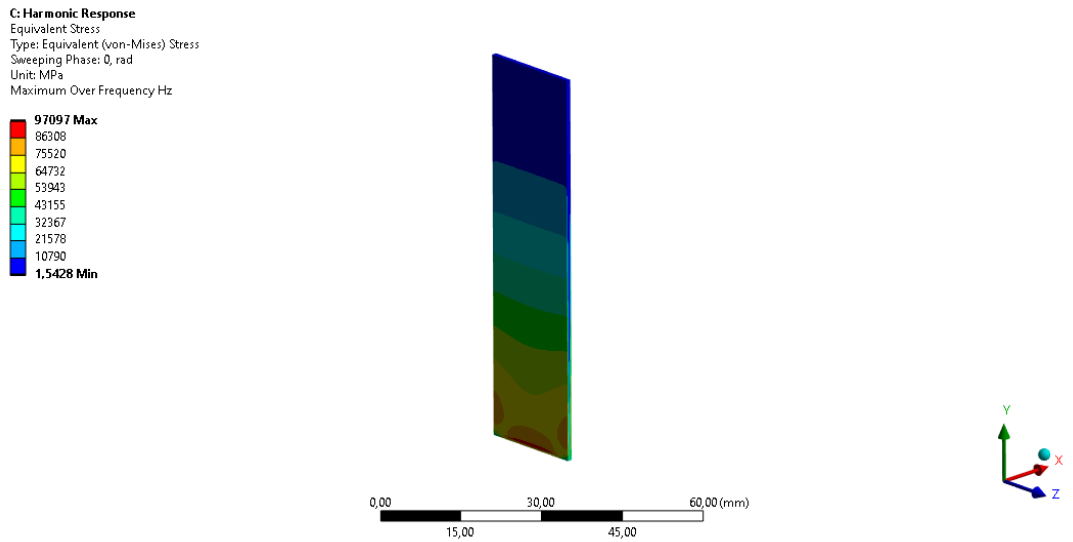
Şekil 3.21. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)



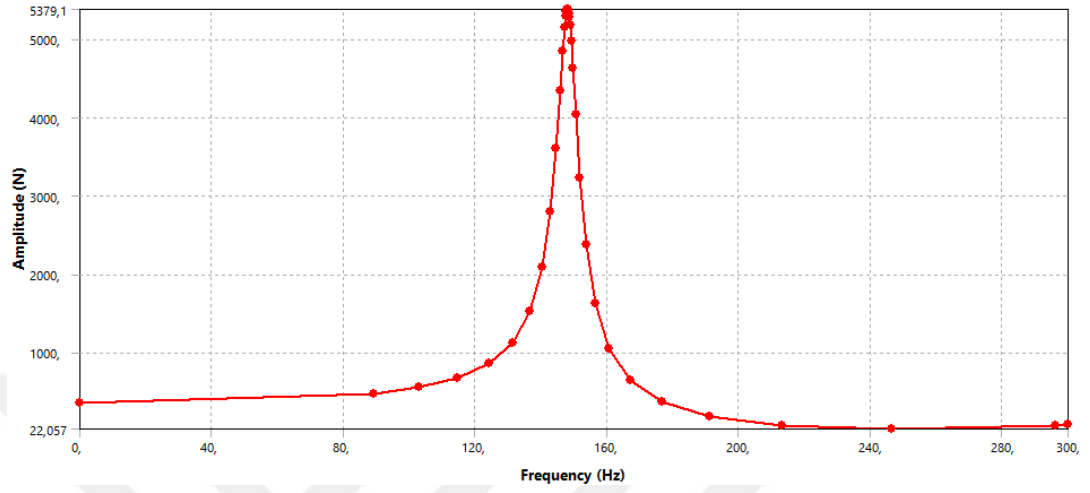
Şekil 3.22. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)



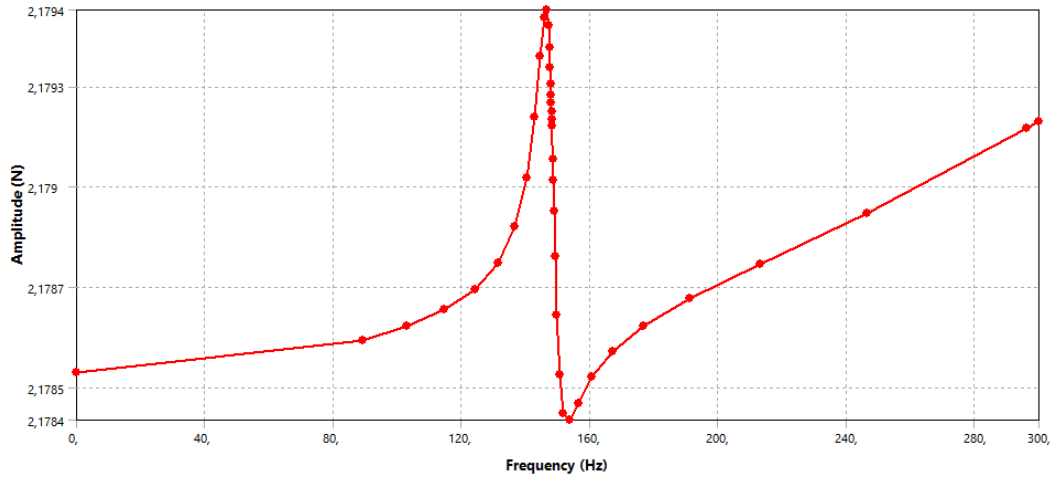
Şekil 3.23. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)



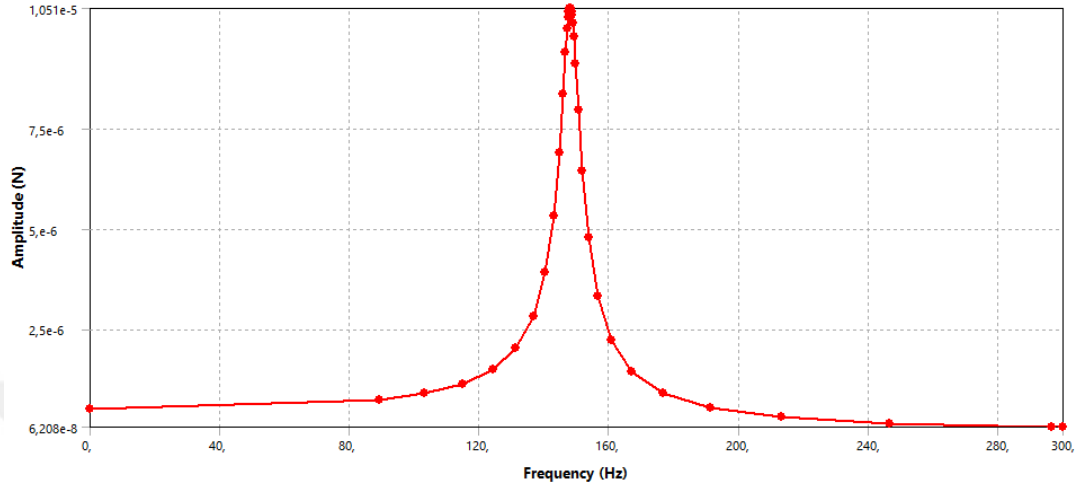
Şekil 3.24. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)



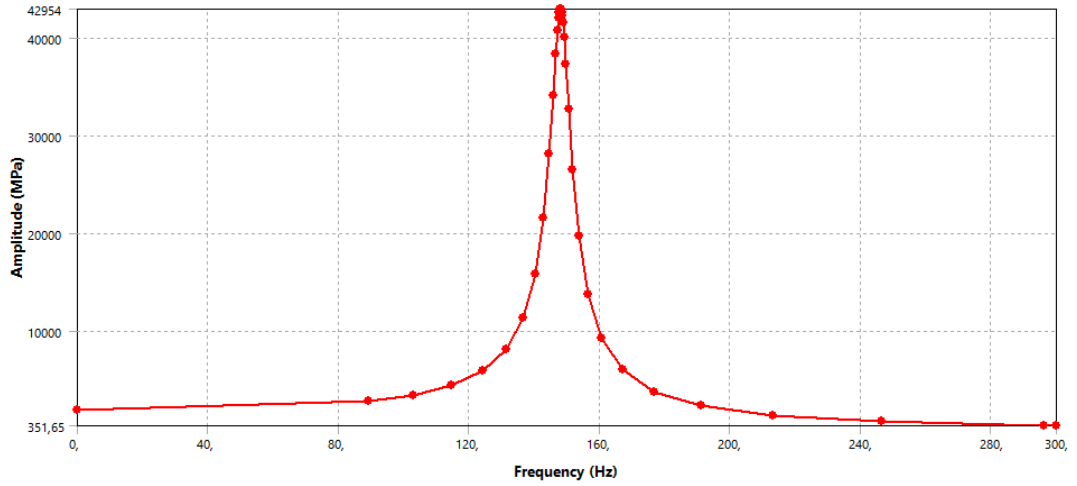
Şekil 3.25. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



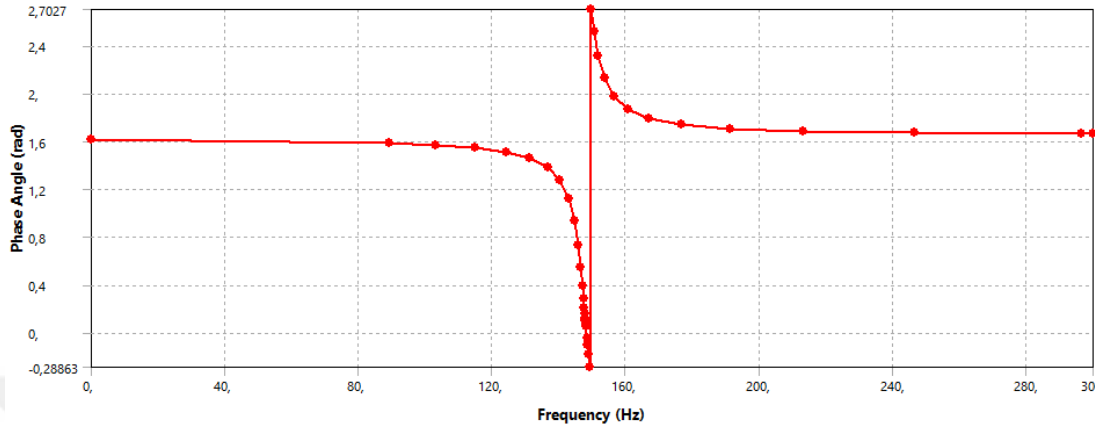
Şekil 3.26. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



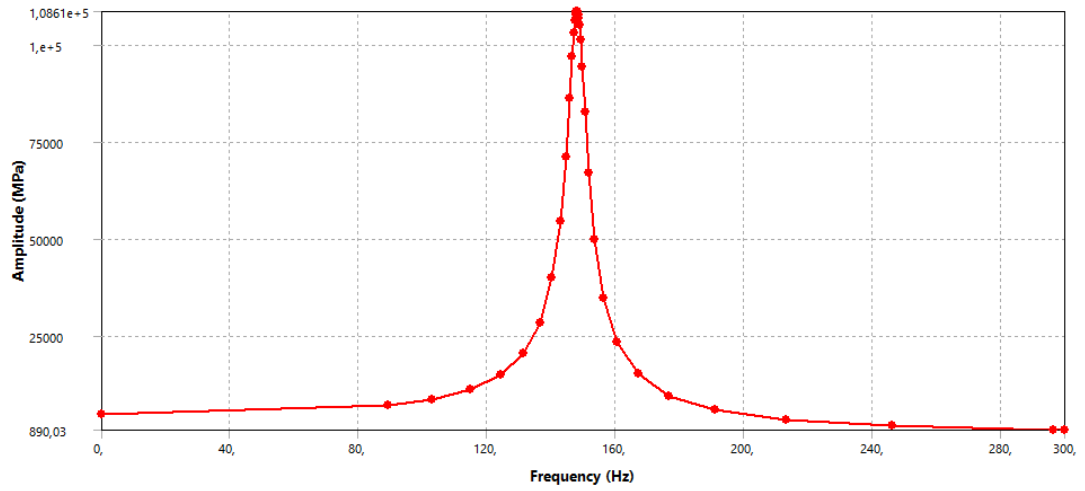
Şekil 3.27. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



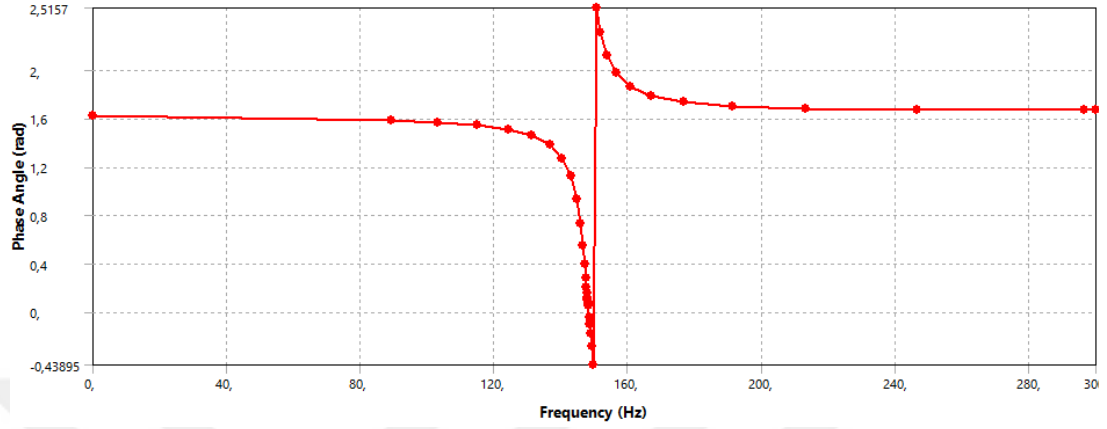
Şekil 3.28. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



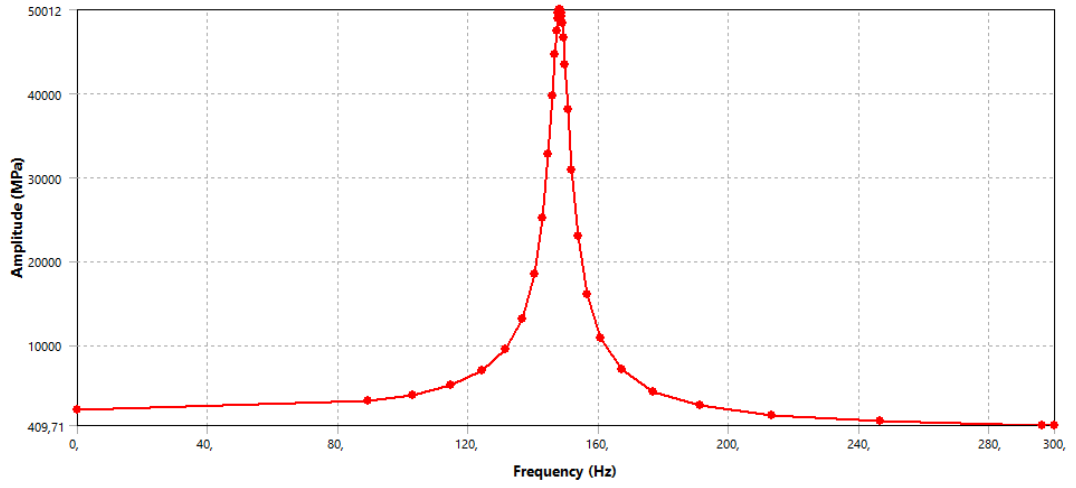
Şekil 3.29. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



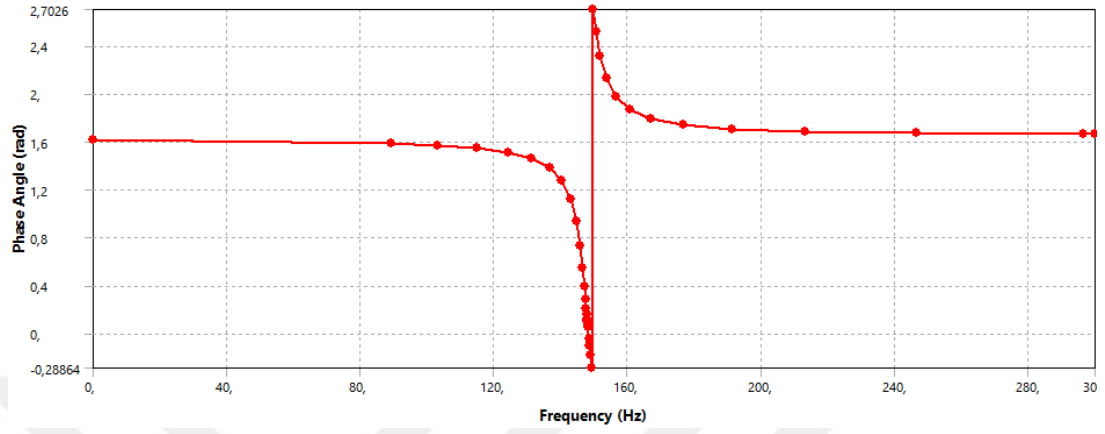
Şekil 3.30. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



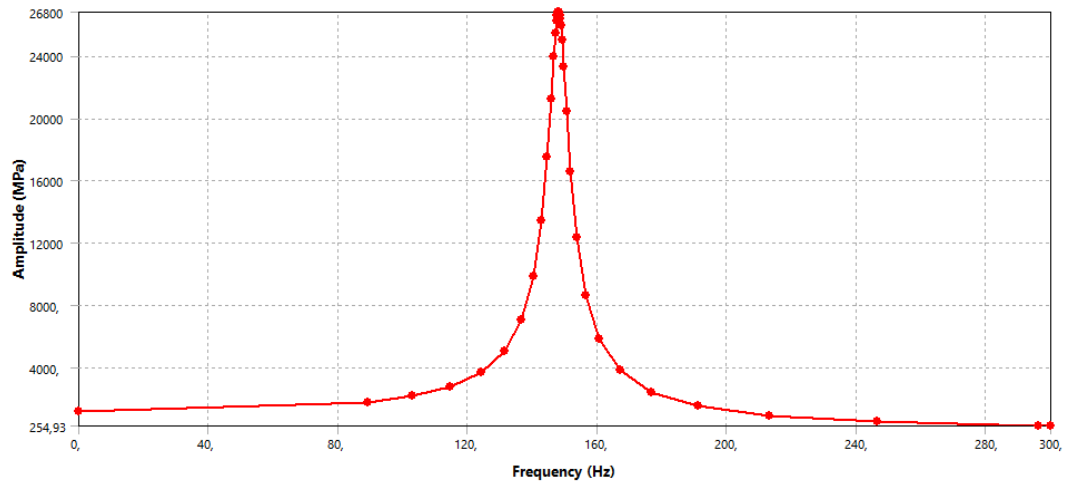
Şekil 3.31. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



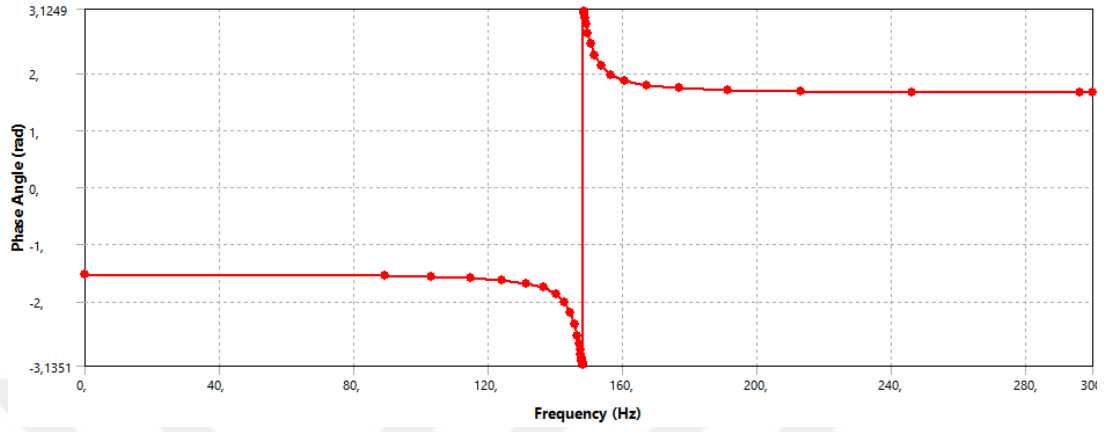
Şekil 3.32. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



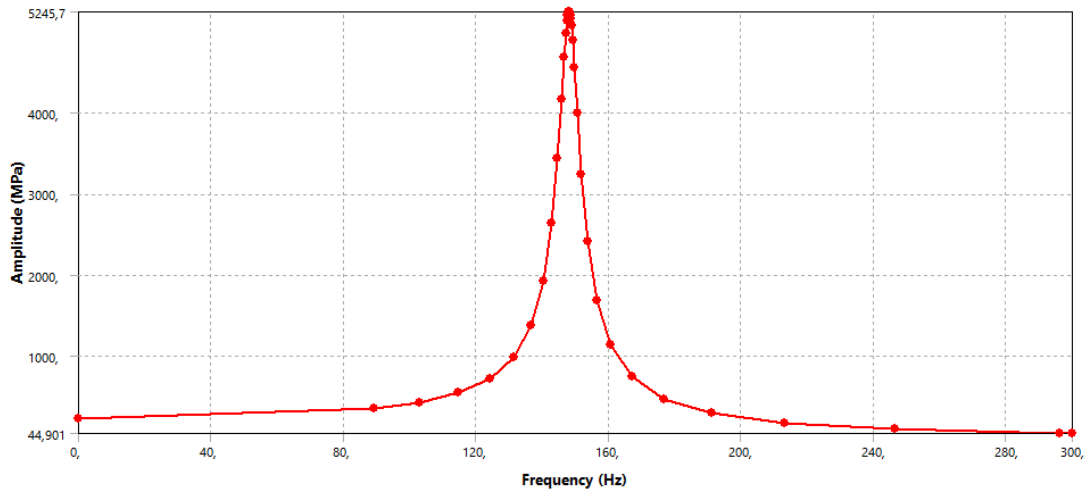
Şekil 3.33. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



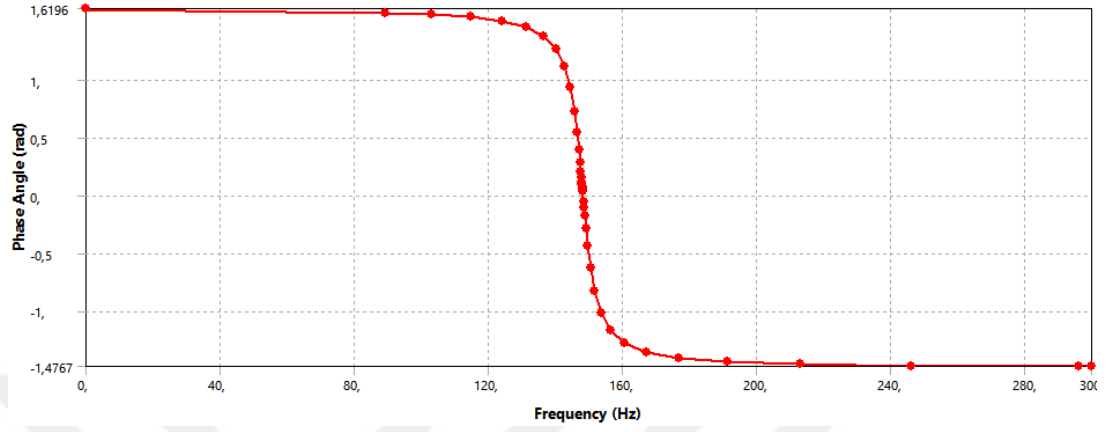
Şekil 3.34. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



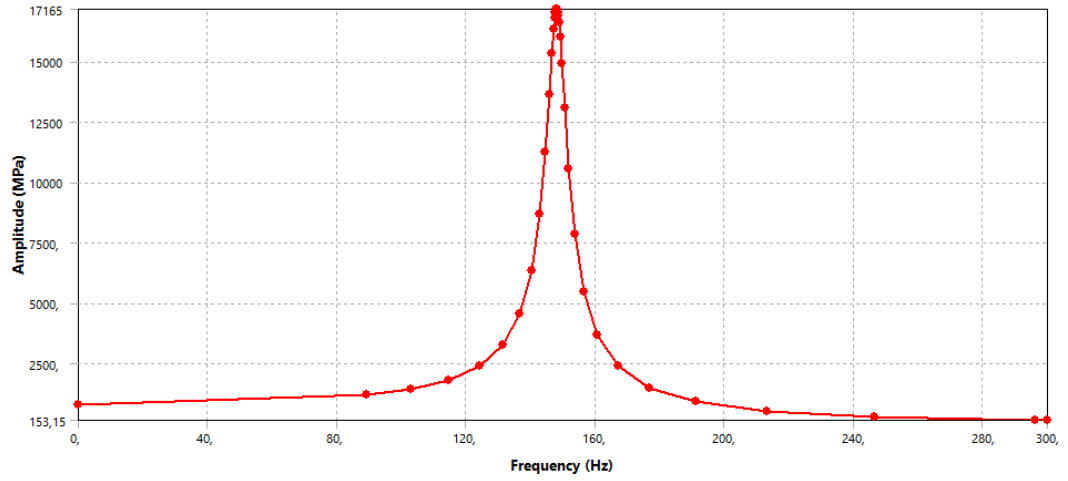
Şekil 3.35. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.36. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği

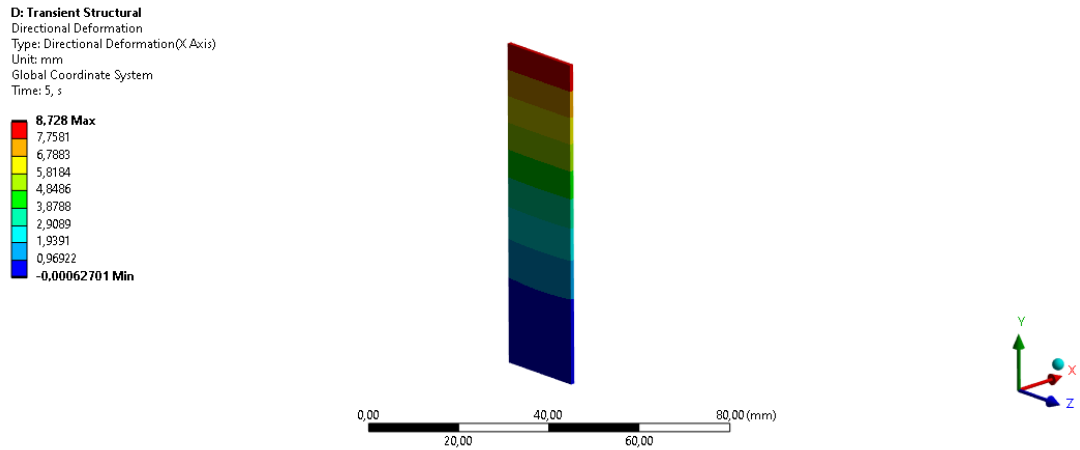


Şekil 3.37. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.38. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği

Akışkanın su ve ortalama akışkan hızının bu sefer azaltılarak 2m/s olduğu durum için, Şekil 3.39 ve 3.40’da geçici durum yapısal analiz sonuçlarından elde edilen görselleri model 1 için görmekteyiz. Önceki durumdan tek farkımız ortalama akışkan hızının 6 kat azaltılmış olmasıdır. Bu durumun kiriş üzerindeki etkileri büyük oranda azaltacağı düşünülmektedir. Çıkan sonuçları da yorumlayacak olursak, Şekil 3.39 ve 3.40 doğrusal sonuçlara göre biz maksimum deplasmanın 8,8mm’ye maksimum gerilmenin ise 247 MPa’a düştüğünü göstermektedir. Bunlar ciddi düşüşler olsa ve kabul edilebilir sınırlar dahilinde olsa da doğrusal olmayan sonuçlara baktığımızda, Şekil 3.41’de maksimum deplasmanın yaklaşık 103mm ve Şekil 3.42’de maksimum eşdeğer gerilmenin 2622 MPa olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar bize harmonik etkinin kritikliğini bir kez daha göstermiş olmaktadır. Kirişimiz akışkanın su kabul edildiği ortamda, ortalama akışkan hızının 2m/s olduğu durumda bile kritik şekilde hasar alacaktır. Şekil 3.43-56 arasında yine benzer şekilde harmonik tepki analizi ile elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Yine en yüksek reaksiyon kuvveti 145N ile x doğrultusundadır. Normal gerilme 2934MPa ile y doğrultusunda, kayma gerilmesi 724MPa ile xy düzleminde oluşmuştur.



Şekil 3.39. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)

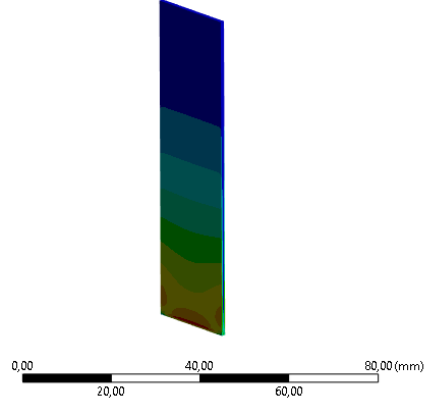
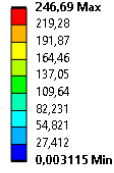
D: Transient Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 5, s



Şekil 3.40. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)

C: Harmonic Response

Directional Deformation

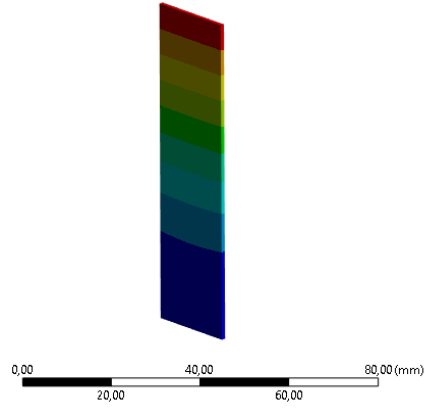
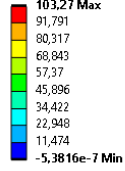
Type: Directional Deformation(X Axis)

Sweeping Phase: 0, rad

Unit: mm

Global Coordinate System

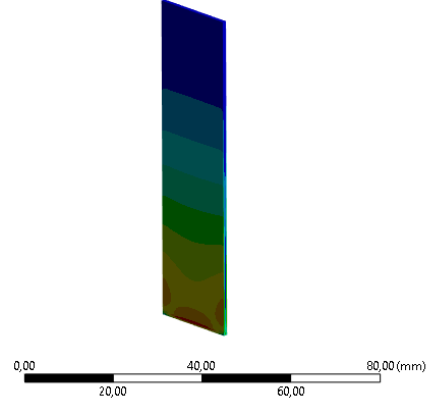
Maximum Over Frequency Hz



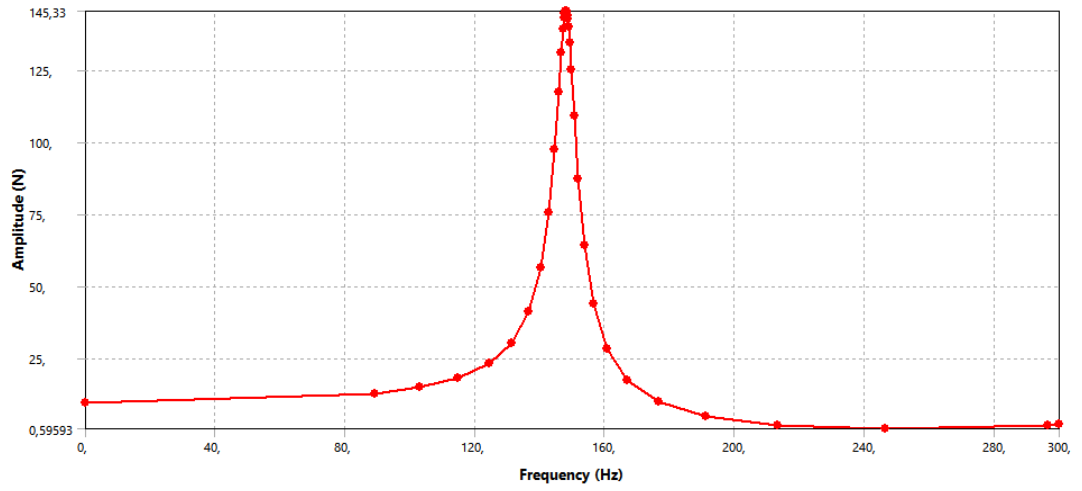
Şekil 3.41. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)

C: Harmonic Response
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Sweeping Phase: 0, rad
 Unit: MPa
 Maximum Over Frequency Hz

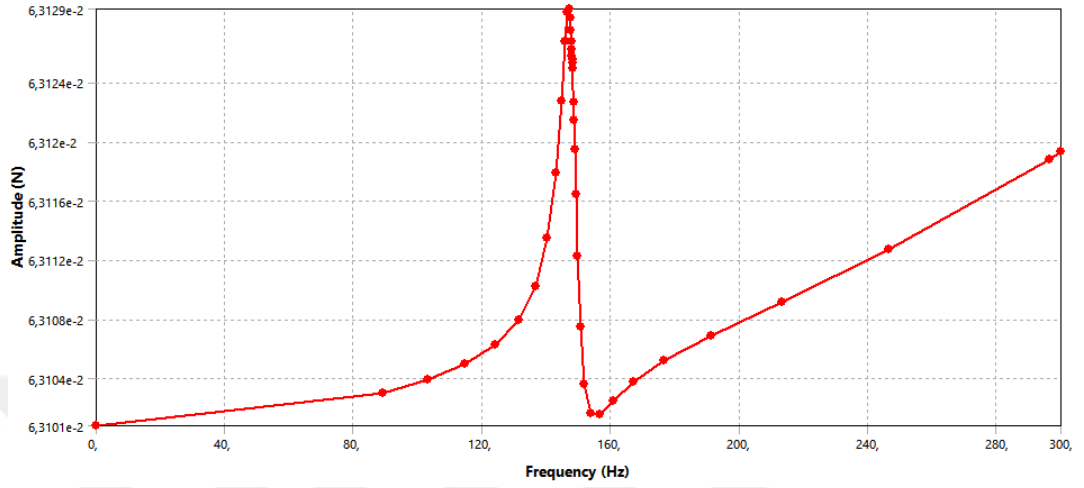
2621,4 Max
 2330,1
 2038,9
 1747,6
 1456,3
 1165,1
 873,82
 582,56
 291,3
 0,041823 Min



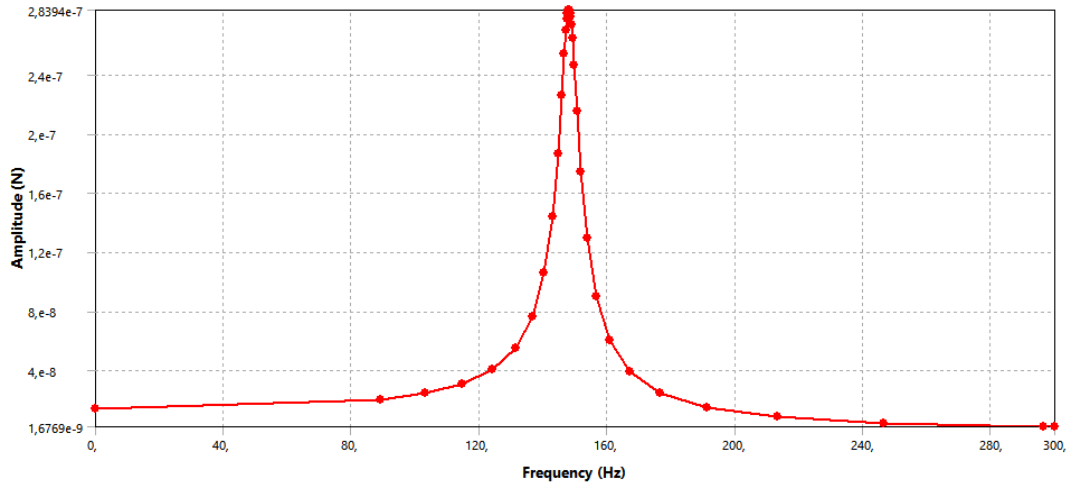
Şekil 3.42. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)



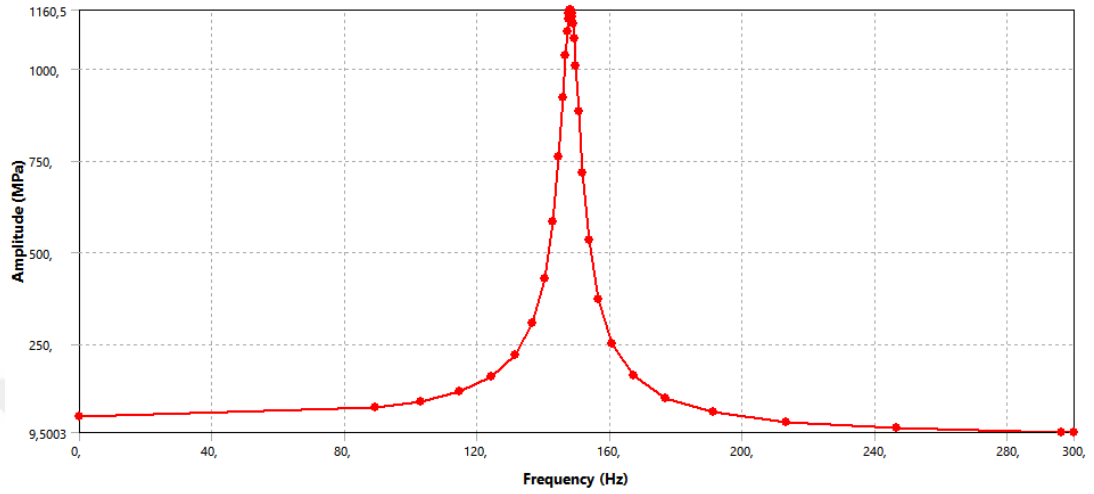
Şekil 3.43. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



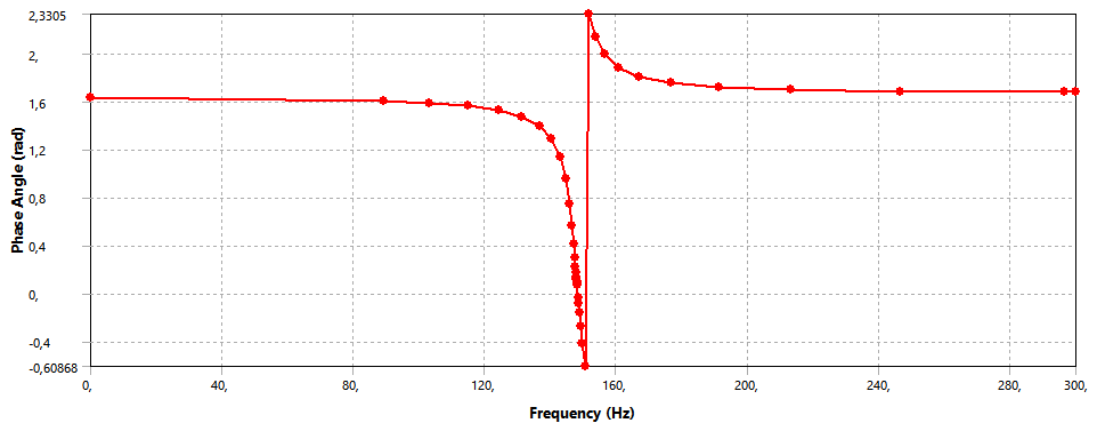
Şekil 3.44. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



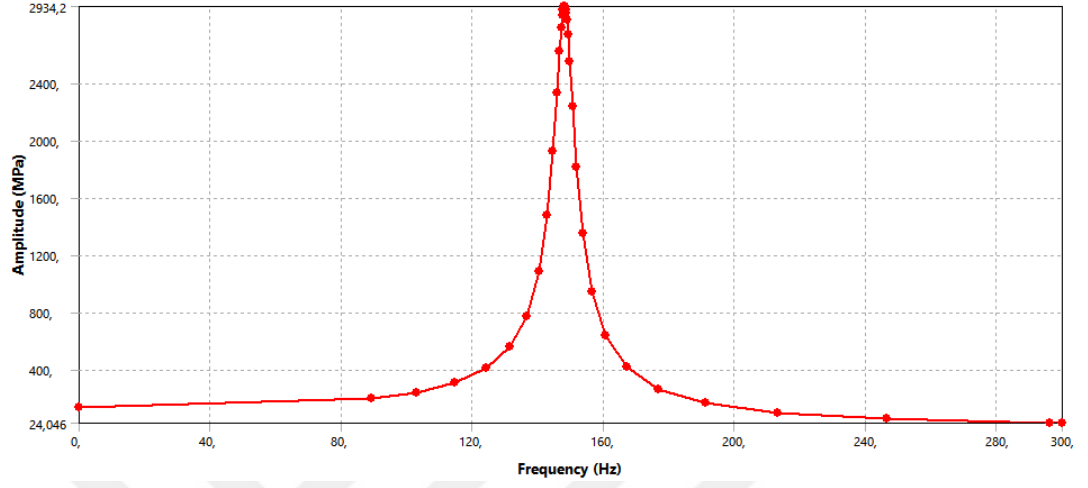
Şekil 3.45. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



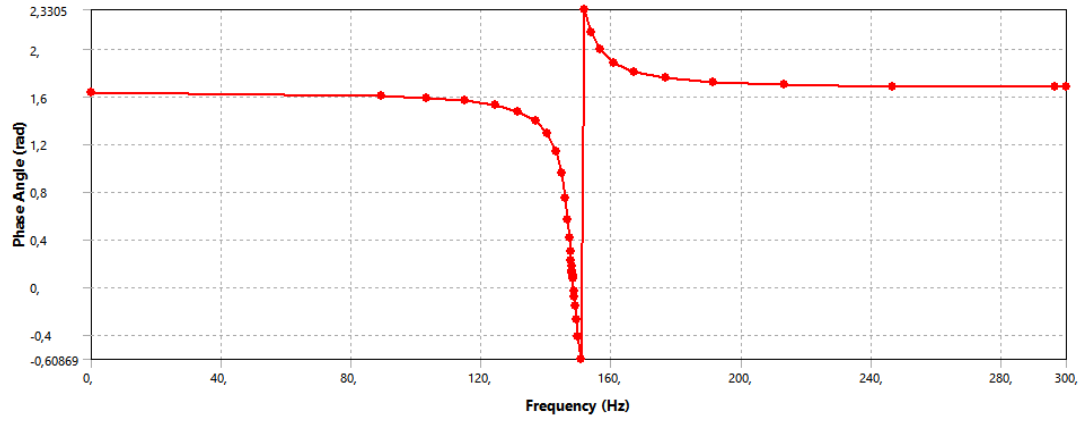
Şekil 4.46. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



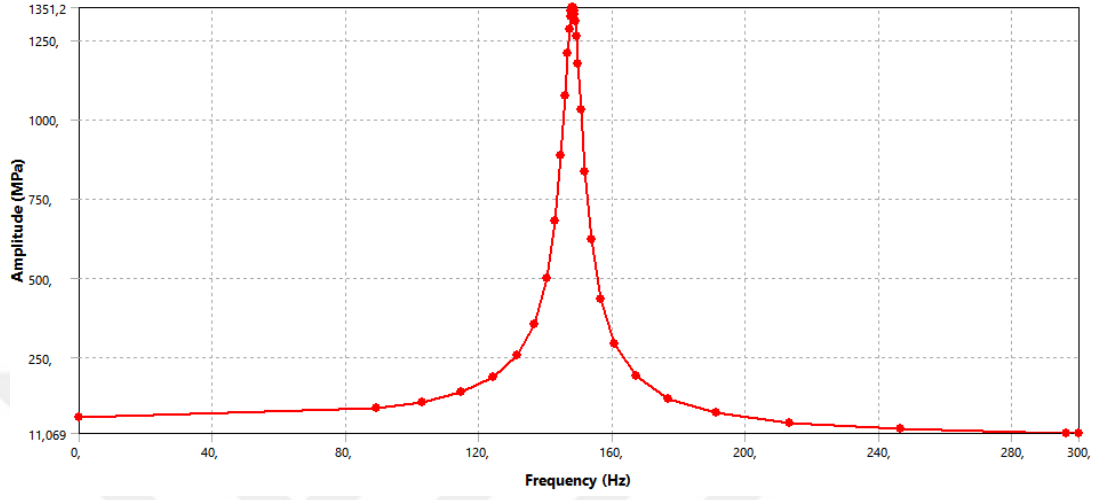
Şekil 3.47. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



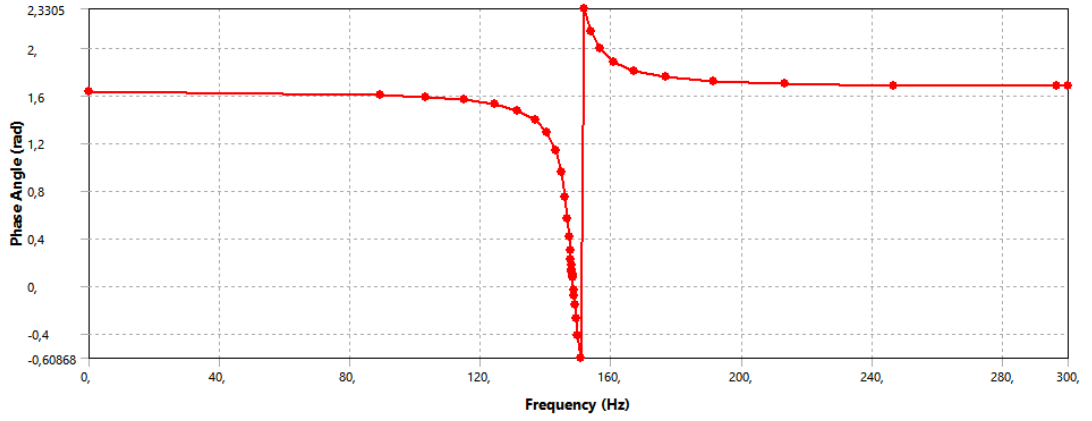
Şekil 3.48. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



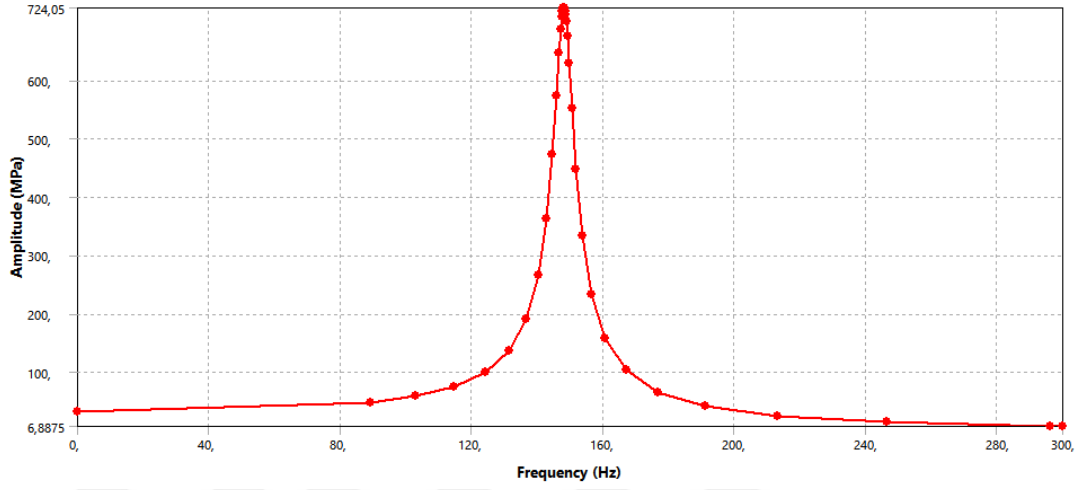
Şekil 3.49. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



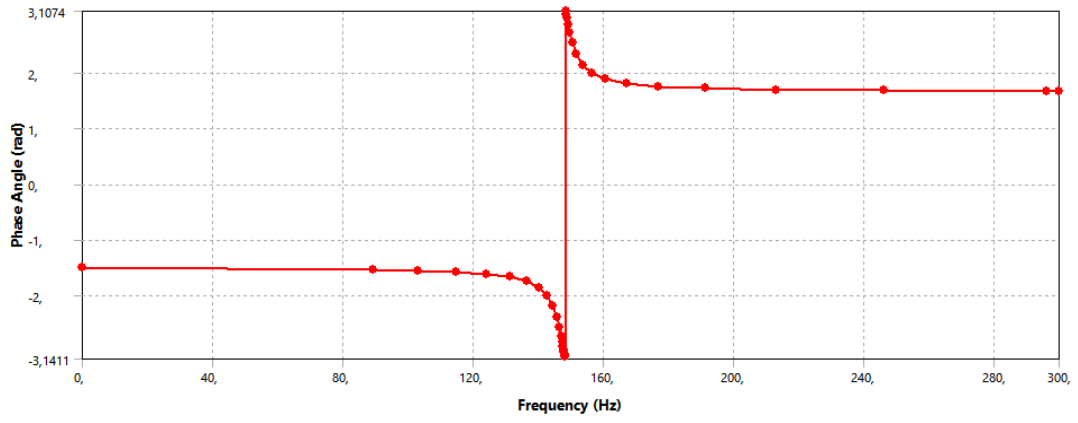
Şekil 3.50. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



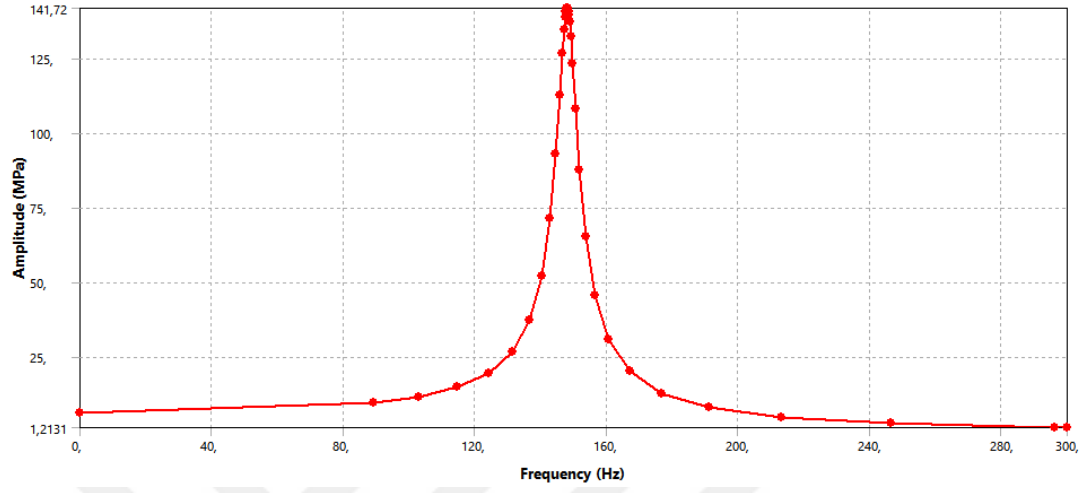
Şekil 3.51. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



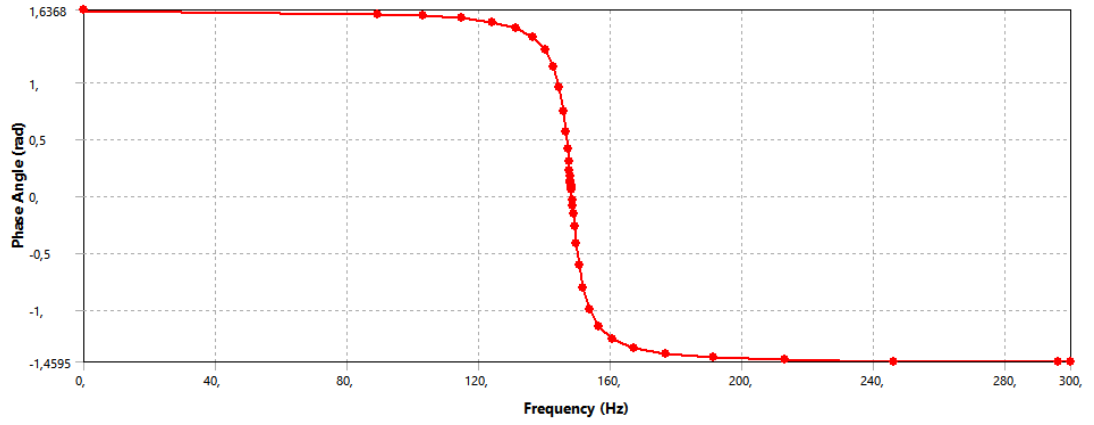
Şekil 3.52. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



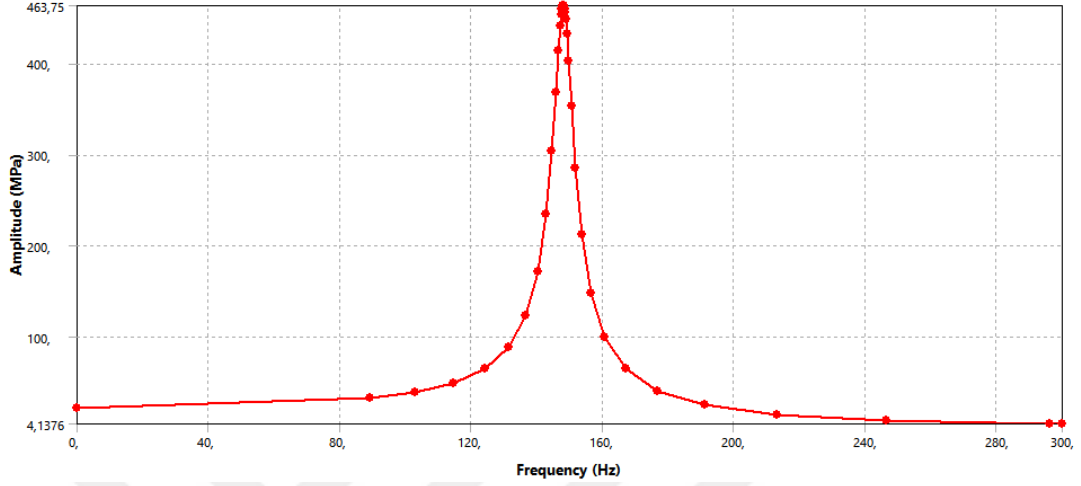
Şekil 3.53. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.54. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



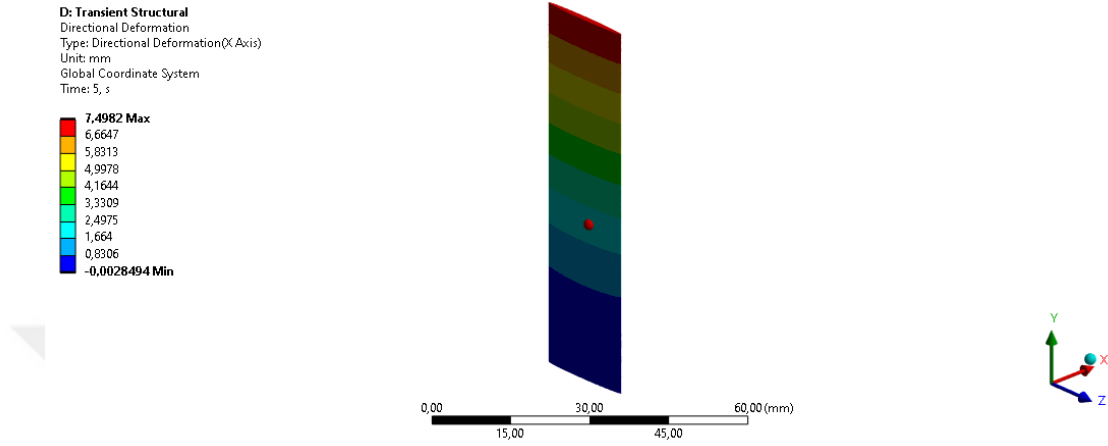
Şekil 3.55. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



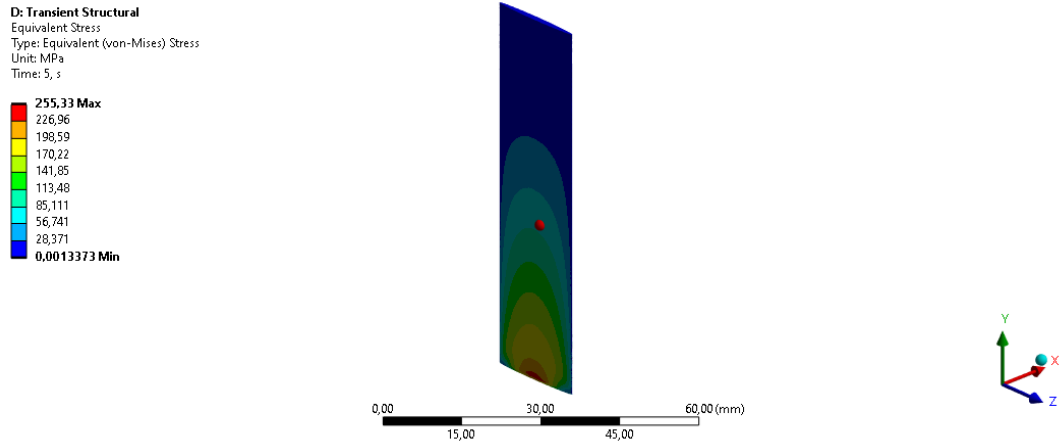
Şekil 3.56. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği

Akışkanın su ve ortalama akışkan hızınının 2m/s olduğu durum için, Şekil 3.57 ve 3.58’de geçici durum yapısal analiz sonuçlarından elde edilen görselleri model 2 için görmekteyiz. Bu durumda kesit şeklinin analiz üzerindeki etkisini görmek amaçlanmıştır. Kirişin hacmi, kütlesi aynıdır. Bununla beraber Şekil 3.57’den de anlaşılacağı üzere maksimum deplasman değeri yaklaşık 7,5mm olmuştur. Bu değer dikdörtgen kesitli analizde 8.8mm olarak elde edilmişti. Eşdeğer gerilme ise 255 MPa olarak elde edilmiştir. Önceki analizde bu ifade 247 MPa olarak elde edilmişti. Gerilme açısından yüze olarak çok büyük fark olmamakla birlikte kiriş kesitinin daha ince olduğu bölgeler model 2 tasarımıımızda gerilmenin bir miktar fazla çıkması normaldir (%3’lük bir fark bulunmaktadır). Ayrıca kuvvetin etkin olduğu x doğrultusunda bir miktar maksimum kesit arttığı için deplasmanın da düşmesi beklenen bir durumdur. Harmonik tepki sonuçlarını inceleyecek olursak, Şekil 3.59’da maksimum deplasmanın yaklaşık 85mm ve Şekil 3.60’da maksimum eşdeğer gerilmenin 2584 MPa olduğu görülmektedir. Maksimum deformasyon yine büyük ölçüde azalmıştır. Maksimum eşdeğer gerilme ise %1.5’lik bir düşüş yaşamıştır. Analiz yapısı gereği bu yüzdelikteki bir değişim değişmemiş kabulü ile yorumlanabilir. Model 1 ve model 2 arasındaki önemli fark maksimum deformasyonun yaklaşık %20 civarı azaltmasıdır. Şekil 3.61-74 arasında yine benzer

şekilde harmonik tepki analizi ile elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Yine en yüksek reaksiyon kuvveti 144N ile x doğrultusundadır. Normal gerilme 3207MPa ile y doğrultusunda, kayma gerilmesi 564 MPa ile xy düzleminde oluşmuştur. Yeni modelin kayma gerilmesini de önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir.



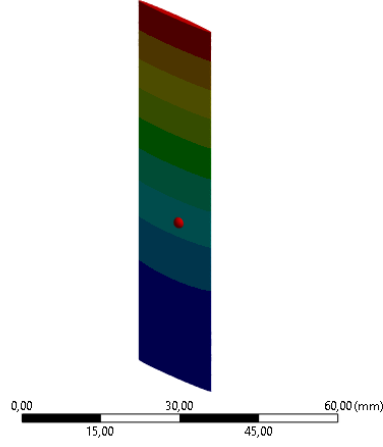
Şekil 3.57. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Transient Structural sonucu)



Şekil 3.58. Eşdeğer Gerilme değişimi (Transient Structural sonucu)

C: Harmonic Response
 Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Sweeping Phase: 0, rad
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Maximum Over Frequency Hz

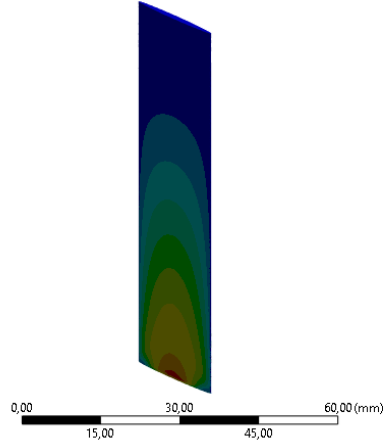
84,733 Max
 75,318
 65,903
 56,489
 47,074
 37,659
 28,244
 18,83
 9,4148
-1,366e-5 Min



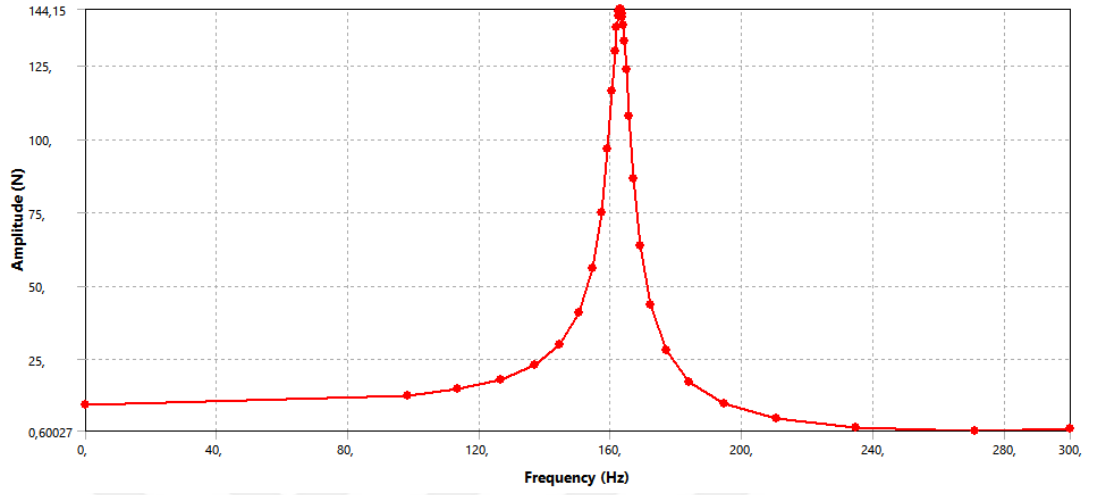
Şekil 3.59. x doğrultusundaki deformasyon değişimi (Harmonic Response sonucu)

C: Harmonic Response
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Sweeping Phase: 0, rad
 Unit: MPa
 Maximum Over Frequency Hz

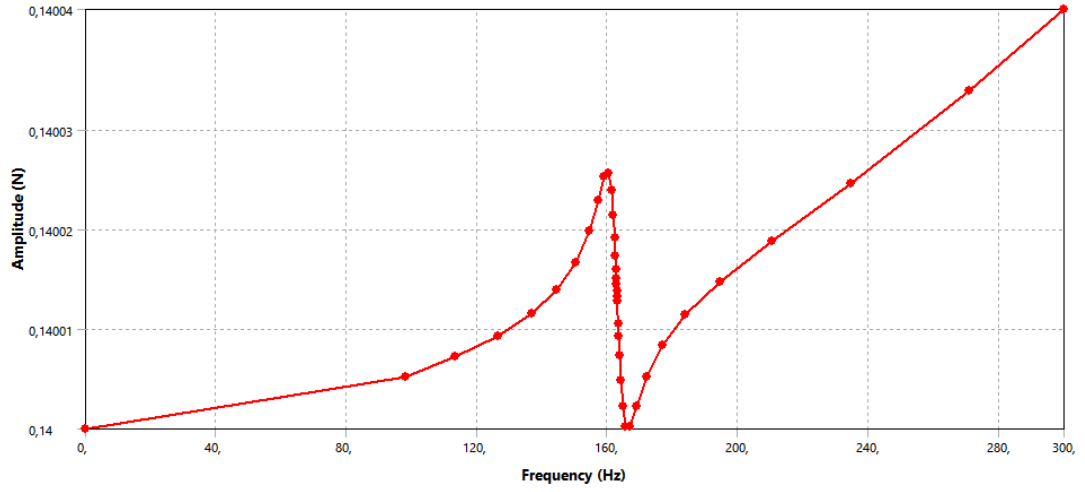
2584 Max
 2296,9
 2009,8
 1722,7
 1435,6
 1148,5
 861,35
 574,24
 287,13
0,023878 Min



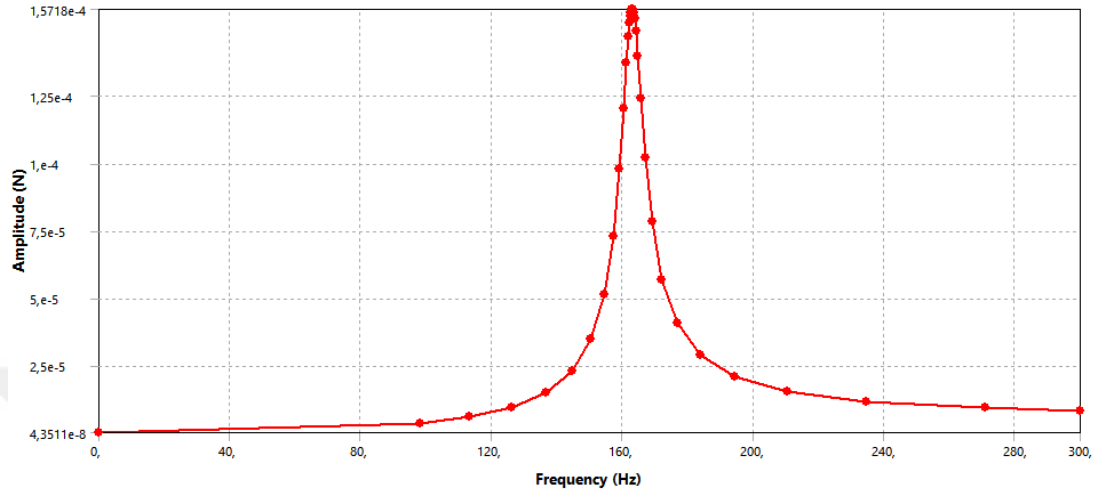
Şekil 3.60. Eşdeğer gerilme değişimi (Harmonic Response sonucu)



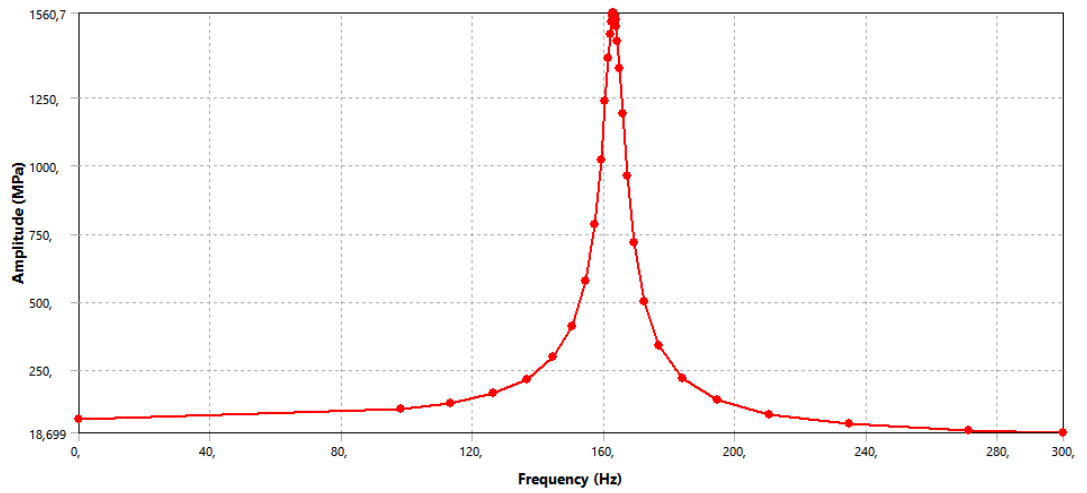
Şekil 3.61. Ankastre mesnet x doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



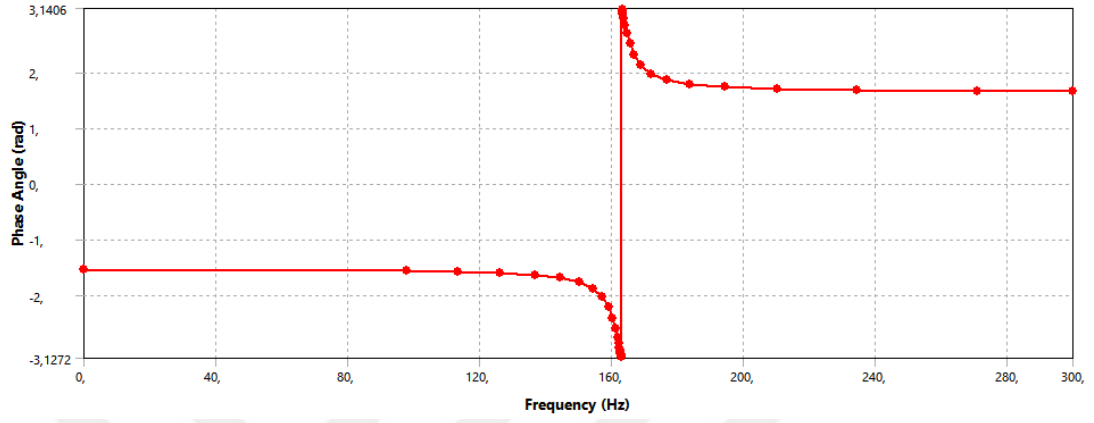
Şekil 3.62. Ankastre mesnet y doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



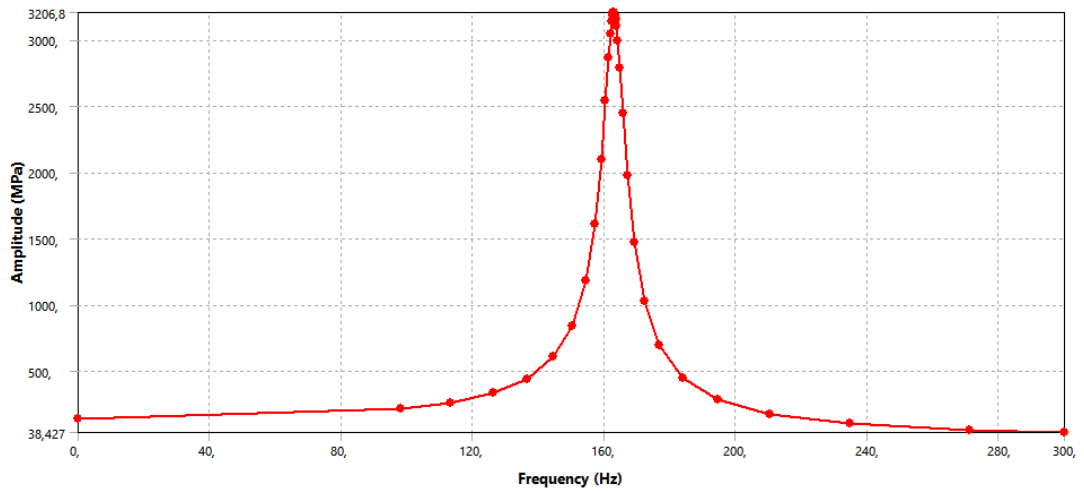
Şekil 3.63. Ankastre mesnet z doğrultusundaki reaksiyon kuvveti için frekans-tepki grafiği



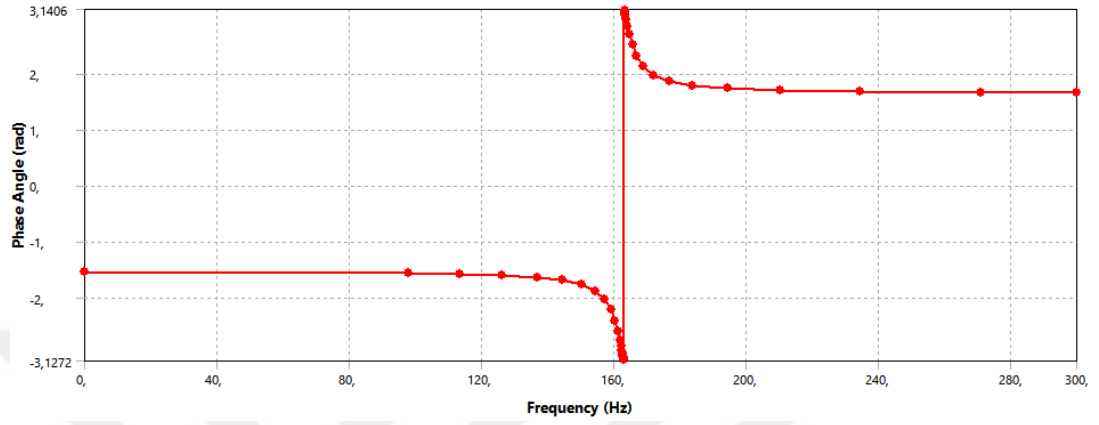
Şekil 3.64. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



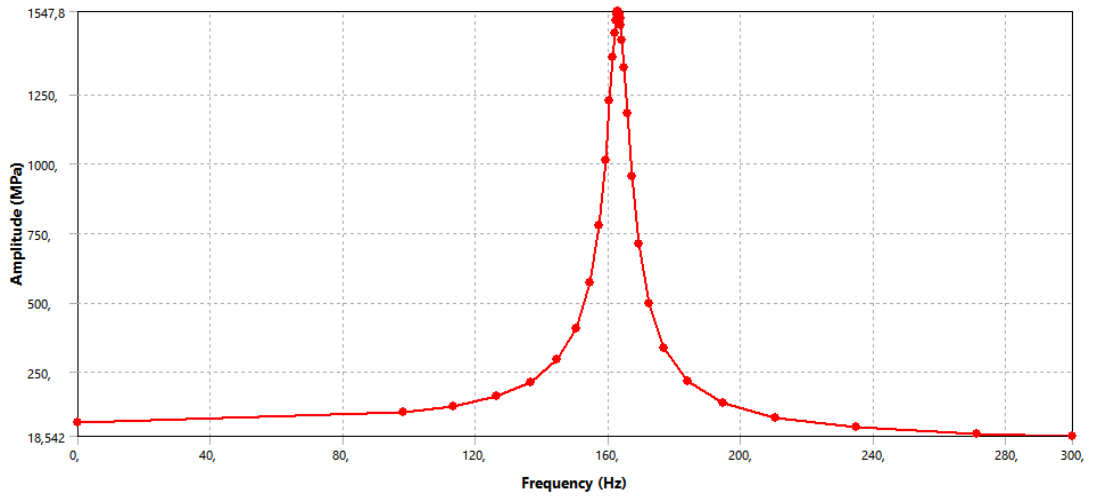
Şekil 3.65. x doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



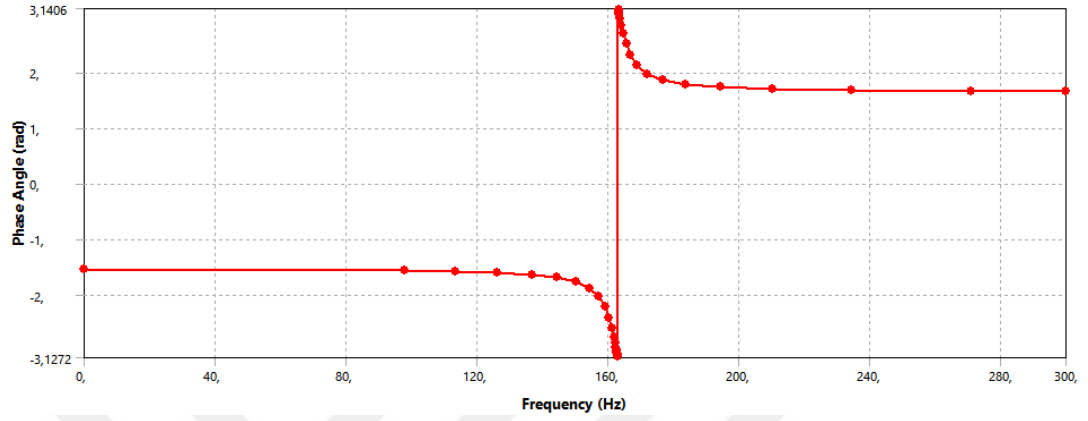
Şekil 3.66. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



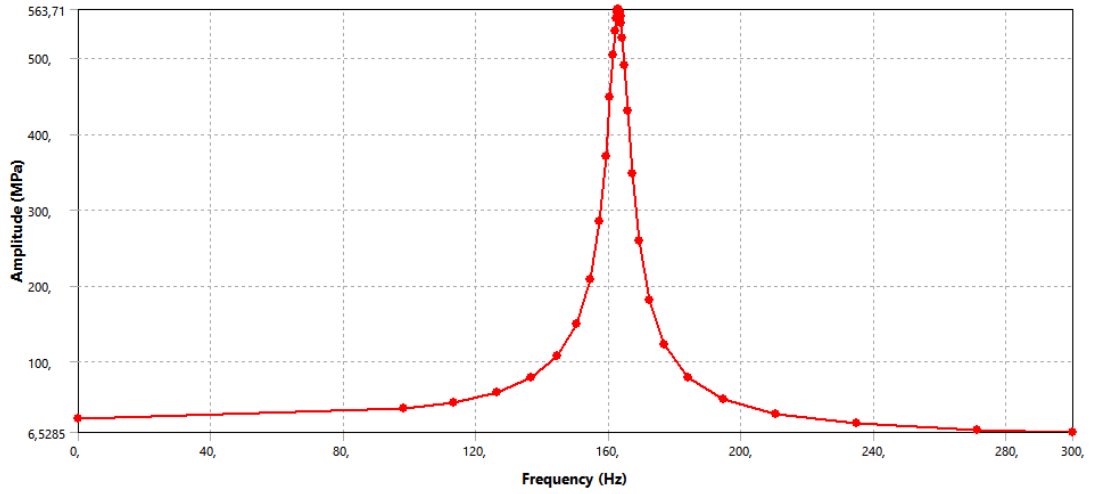
Şekil 3.67. y doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



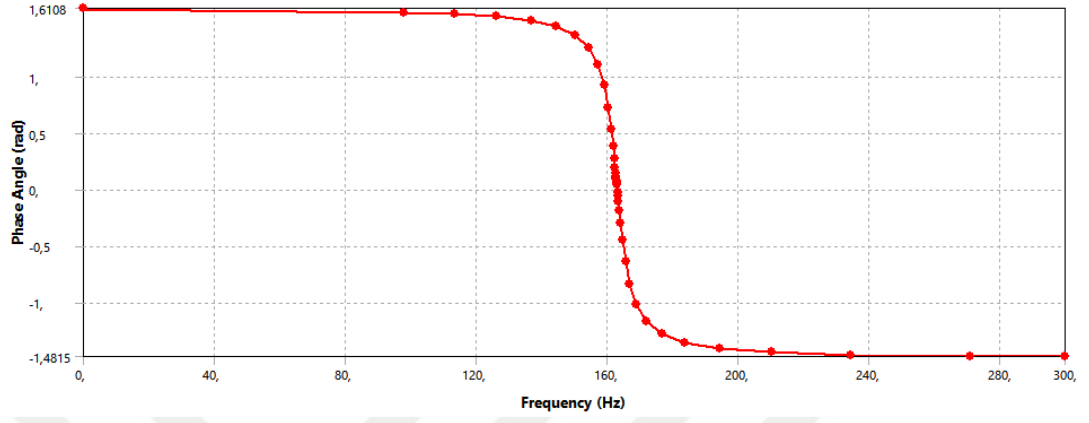
Şekil 3.68. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-tepki grafiği



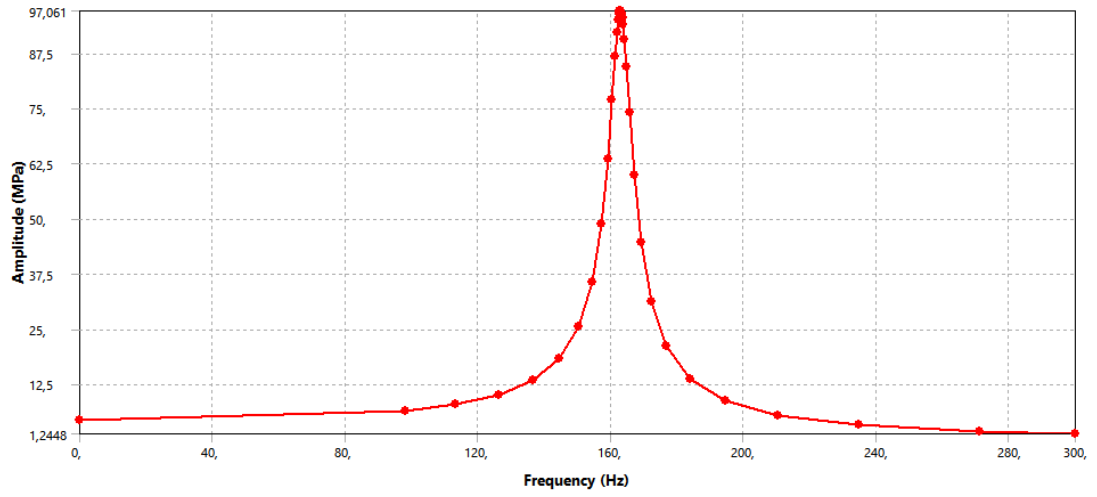
Şekil 3.69. z doğrultusundaki normal gerilme için frekans-faz açısı grafiği



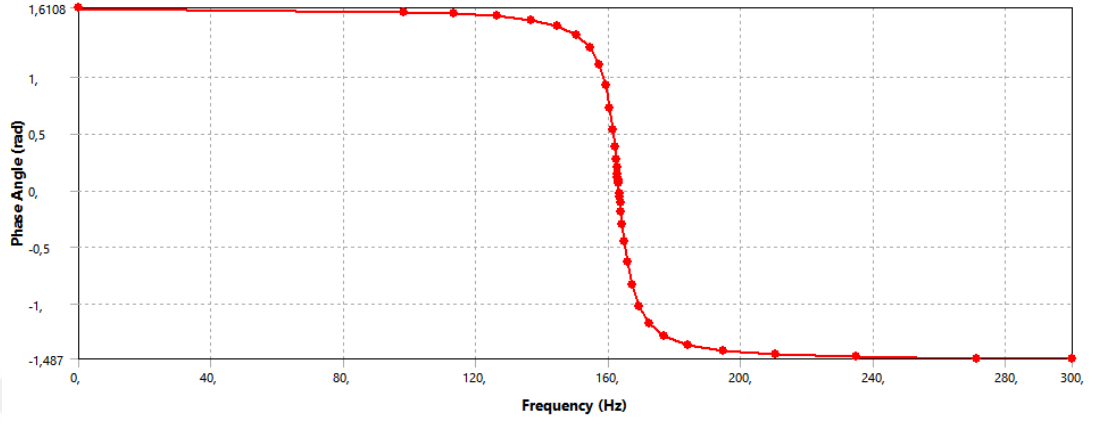
Şekil 3.70. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



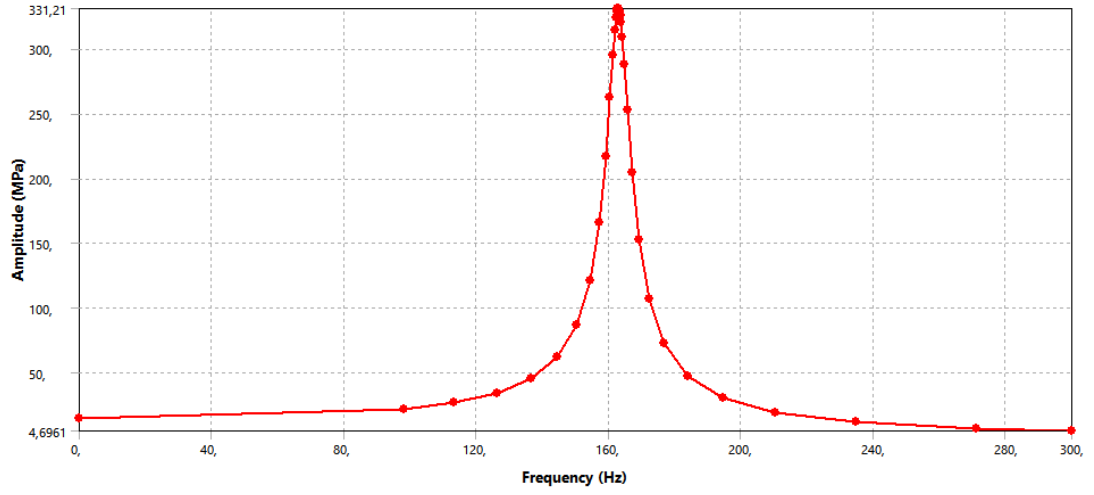
Şekil 3.71. xy düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.72. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği



Şekil 3.73. xz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-faz açısı grafiği



Şekil 3.74. yz düzlemindeki kayma gerilmesi için frekans-tepki grafiği

3.2. Yorumlar

Bu çalışmada, akışkan hızının ve kesit şeklinin kiriş üzerindeki titreşim ve gerilme davranışlarına etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, su gibi yoğun bir akışkanın kullanılması, hava ile kıyaslandığında, oluşan gerilmeleri yaklaşık 11-12 kat artırmaktadır. Bu durum, akışkanın yoğunluğunun kiriş üzerindeki stres dağılımı ve büyüklüğü üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Harmonik analizlerde, titreşim genliklerinin doğal frekansa yaklaştıkça arttığı ve tam doğal frekans değerinde maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu, sistemin rezonans davranışının önemli bir göstergesidir.

Analizler sonucunda, en yüksek normal gerilmenin y doğrultusunda, en düşük kayma gerilmesinin xz düzleminde, en yüksek kayma gerilmesinin ise xy düzleminde meydana geldiği tespit edilmiştir. Akışkan hızının ortalama değerinin 12 m/s yerine 2 m/s olarak değiştirilmesi, kiriş üzerindeki etkileri önemli ölçüde azaltmış olsa da doğal frekansa yakın çalışma koşullarında kirişin hasar görebileceği riskinin devam ettiği görülmüştür. Bu bulgu, düşük hızlarda dahi rezonans etkilerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Kesit şeklinin değiştirilmesi üzerine yapılan analizlerde, dikdörtgen kesit yerine elips kesit kullanmanın gerilme üzerinde büyük bir değişikliğe sebep olmadığı, ancak maksimum deformasyon üzerinde yaklaşık %20'lik bir azalma sağladığı belirlenmiştir. Bu, kesit şeklinin deformasyon davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, akışkan-katı etkileşimlerinde akışkan hızının, yoğunluğunun ve kesit şeklinin kiriş titreşimleri ve gerilmeleri üzerindeki kritik rolünü vurgulamakta, mühendislik uygulamalarında bu faktörlerin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmaya devam olarak,

- Farklı kiriş tipleri için etkileşim analizleri gerçekleştirilebilir,
- Yapılan analizler işlemin karmaşıklığı ve analiz programının kısıtlarından dolayı tek yönlü olarak ele alınmıştır. Kirişte meydana gelen titreşimler sebebiyle akışkanda meydana gelecek değişimle birlikte daha kapsamlı çift yönlü bir analiz gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Baroudi, A. and Razafimahéry, F. (2015). Transverse vibration analysis of euler-bernoulli beam carrying point masse submerged in fluid media. International Journal of Engineering & Technology, 4(2), 369. <https://doi.org/10.14419/ijet.v4i2.4570>
- Cox, R., Josse, F., Heinrich, S., Brand, O., & Dufour, I. (2012). Characteristics of laterally vibrating resonant microcantilevers in viscous liquid media. Journal of Applied Physics, 111(1). <https://doi.org/10.1063/1.3674278>
- Dong, J., Xu, H., & Wang, X. (2011). Experimental study of self-adaptive remnant vibration suppression for flexible structure with interior inlay viscous fluid unit. Journal of Vibration and Control, 17(12), 1886-1892. <https://doi.org/10.1177/1077546310395960>
- Eskandari, A. (2023). Investigation of vibration of the nano rotating blade coupled with viscous fluid medium by considering the nonlocal elastic theory. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 43(2), 863-879. <https://doi.org/10.1177/14613484231216229>
- Jamalabadi, M. (2018). An improvement of port-hamiltonian model of fluid sloshing coupled by structure motion. Water, 10(12), 1721. <https://doi.org/10.3390/w10121721>
- Jamalabadi, M. (2019). Effect of tip mass length ratio on low amplitude galloping piezoelectric energy harvesting. Acoustics, 1(4), 763-793. <https://doi.org/10.3390/acoustics1040045>
- Kang, Y., Kim, J., & Choi, S. (2001). Passive and active damping characteristics of smart electro-rheological composite beams. Smart Materials and Structures, 10(4), 724-729. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/4/316>
- Kimber, M., Lonergan, R., & Garimella, S. (2009). Experimental study of aerodynamic damping in arrays of vibrating cantilevers. Journal of Fluids and Structures, 25(8), 1334-1347. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2009.07.003>
- Kolekar, S., Venkatesh, K., Oh, J., & Choi, S. (2017). The tenability of vibration parameters of a sandwich beam featuring controllable core: experimental

investigation. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2017, 1-10.
<https://doi.org/10.1155/2017/5674032>

Lara, M. and Atkinson, C. Theoretical model on the interaction of a vibrating beam and the surrounding viscous fluid with applications to density and viscosity sensors..
<https://doi.org/10.1109/icsens.2004.1426298>

Park, J., Jeong, S., Kim, S., & Park, J. (2015). Sensing of fluid viscoelasticity from piezoelectric actuation of cantilever flexural vibration. *Review of Scientific Instruments*, 86(1). <https://doi.org/10.1063/1.4905331>

Qian, J., Zhang, Z., Luo, S., & Liu, F. (2011). Numerical study of the aerodynamic characteristics of a plunging rigid airfoil with elastic trailing-edge plate..
<https://doi.org/10.2514/6.2011-3062>

Wei, K., Bai, Q., Meng, G., & Ye, L. (2011). Vibration characteristics of electrorheological elastomer sandwich beams. *Smart Materials and Structures*, 20(5), 055012. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/5/055012>

Wei, K., Meng, G., Zhang, W., & Zhou, S. (2007). Vibration characteristics of rotating sandwich beams filled with electrorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(11), 1165-1173.
<https://doi.org/10.1177/1045389x06072380>

Yang, X. and Wen, Q. (2010). Dynamic and quasi-static bending of saturated poroelastic timoshenko cantilever beam. *Applied Mathematics and Mechanics*, 31(8), 995-1008. <https://doi.org/10.1007/s10483-010-1335-6>

Zhang, T. and Cui, J. (2021). Analytical method for fluid-solid coupling vibration analysis of hydraulic pipeline system with hinged ends. *Shock and Vibration*, 2021, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2021/8846869>

Zhang, Z., Hu, F., Zeng, L., & Hu, H. (2012). Modeling and control of the vibration of two beams coupled with fluid and active links. *Shock and Vibration*, 19(4), 653-668. <https://doi.org/10.1155/2012/408957>

Ma, C., Shao, M., Ma, J., Liu, C., & Gao, K. (2020). Fluid structure interaction analysis of flexible beams vibrating in a time-varying fluid domain. *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 234(10), 1913-1927. <https://doi.org/10.1177/0954406220902163>

Qiu, Z., Du, J., & Zhang, X. (2022). Vibration control of three coupled flexible beams using reinforcement learning algorithm based on proximal policy optimization. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 33(20), 2578-2603. <https://doi.org/10.1177/1045389x221093351>

Syuhri, S., Zare-Behtash, H., & Cammarano, A. (2020). Investigating the influence of fluid-structure interactions on nonlinear system identification. Vibration, 3(4), 521-544. <https://doi.org/10.3390/vibration3040032>

Xu, J., Chen, Y., Tai, Y., Shi, G., Chen, N., & Yao, J. (2021). New control strategy for suppressing the local vibration of sandwich beams based on the wave propagation method. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 33(1), 231-247. <https://doi.org/10.1177/1045389x211018845>

Zhao, Y., Hu, X., Du, J., Liu, Y., & He, F. (2022). Transverse forced nonlinear vibration analysis of a double-beam system with a supporting nonlinearity. Journal of Vibration and Control, 30(1-2), 250-265. <https://doi.org/10.1177/10775463221144359>