



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**BALPETEĞİ KOMPOZİTLERİNİN**  
**ÖNGERİLME ALTINDA DOĞAL TİTREŞİM**  
**DAVRANIŞLARINA YAPIŞTIRICI**  
**ÖZELLİKLERİNİN VE KOR GEOMETRİSİ**  
**ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İbrahim YOZGATLI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ağustos-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim YOZGATLI tarafından hazırlanan “Balpeteği Kompozitlerinin Öngerilme Altında Doğal Titreşim Davranışlarına Yapıştırıcı Özelliklerinin ve Kor Geometrisi Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 09/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Necati ATABERK

#### Üye / Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

#### Üye

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Yukarıdaki sonucu onaylarım.


Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İbrahim YOZGATLI

Tarih: 09/08/2019

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# BALPETEĞİ KOMPOZİTLERİNİN ÖNGERİLME ALTINDA DOĞAL TİTREŞİM DAVRANIŞLARINA YAPIŞTIRICI ÖZELLİKLERİNİN VE KOR GEOMETRİSİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**İbrahim YOZGATLI**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**2019, 141 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Doç. Dr. Necati ATABERK  
Doç. Dr. Mehmet BAĞCI**

Bu çalışmada havacılık sektöründen enerji sektörüne hafifliğin ve rijitliğin önemli olduğu alanlarda tercih edilen balpeteği kompozit malzemesinin öngerilmesiz, yerçekimi öngerilmesi ve termal genleşme öngerilmesi altında seçilen geometri parametreleri (kor genişliği, kor yüksekliği, topoloji) ve yapıştırıcı malzemenin termal genleşme katsayısı, elastisite modülü parametrelerinin doğal titreşim frekansları üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla araştırılmıştır. Bilindiği üzere yapılar, üzerine gelen titreşimler özellikle doğal frekanslar ile aynı frekansta ise küçük yüklemelerde dahi yıkıcı etkiler doğurabilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda öngerilmenin doğal frekanslar üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak söz konusu malzemenin yüksek rijitliğe ve hafifliğe sahip olmasından dolayı yerçekimi altında öngerilme oluşumunun sebep olduğu etki, incelediğimiz parametre aralığında yok sayılacak kadar düşük olduğu belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesi sonucunda ise genellikle ilk doğal frekans değerleri düşerken, diğer mod frekansları üzerindeki değişim etkisinin çok düşük olduğu belirlenmiştir. Kor genişliği parametresinin değeri arttıkça rijitliğin azaldığı, kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça rijitliğin arttığı belirlenmiştir. Kor genişliği parametre değerinin büyümesi sonucunda ana mod frekansı (kabul: toplam kütlein %5'inden fazlasını harekete geçiren doğal frekans değerleri 'ana mod' olarak adlandırılmıştır) değerinin daha düşük frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir. Topoloji parametresinin değeri arttıkça ana mod frekansının daha düşük frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir. Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir. Ancak ana mod frekans değerlerinin serbestlik yönüne göre arttığı veya azaldığı durumlar olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple ana mod frekansının değişimi ile alakalı genel bir sonuç yorumu yapılamamaktadır. Epoksi malzemenin elastisite modülü değerinin artması sonucunda ana mod frekans değerlerinin genellikle çok küçük miktarda arttığı belirlenmiştir. Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı değerinin artması sonucunda doğal frekans değerleri birebir aynı çıkmaktadır. Epoksi malzemenin elastisite modülü ve termal genleşme katsayısı parametrelerinin termal genleşme öngerilmesiz / öngerilmeli analiz sonuçları karşılaştırıldığında, öngerilme sonucunda ana mod frekans değerinin genellikle çok küçük miktarda arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** balpeteği kompozit, doğal frekans, ansys modal analiz, öngerilmeli modal analiz, modal analiz, modal, özdeğer, özvektör

## ABSTRACT

### MS THESIS

# INVESTIGATION OF ADHESIVE PROPERTIES AND CORE GEOMETRY EFFECT ON NATURAL VIBRATION BEHAVIOR OF HONEYCOMB COMPOSITES UNDER PRETENSION

**İbrahim YOZGATLI**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**2019, 141 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Assoc. Prof. Dr. Necati ATABERK  
Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI**

Honeycomb composite materials are preferred in areas where lightness and stiffness are important from the aviation sector to the energy sector. In this study, with the help of finite element method in honeycomb composite material; the effect of selected parameters and prestress on natural frequencies were investigated as a result of gravitational prestressed / non-prestressed and thermal expansion prestressed / non-prestressed analyzes. Selected parameters; geometry parameters (core width, core height, topology), thermal expansion coefficient of adhesive material and modulus of young's modulus of adhesive material. As it is known, vibrations on the structures can have destructive effects even at small loads, especially if they are at the same frequency with natural frequencies.

As a result of the analysis, it was determined that prestressing has an effect on natural frequencies. However, due to the high rigidity and lightness of the material in question, the effect caused by gravitational prestressing was determined to be negligible in the parameter range we investigated. As a result of thermal expansion prestressing; it is generally determined that it decreases the initial natural frequency values but the change effect on other mode frequencies is very low. It has been determined that stiffness decreases as the value of the core width parameter increases and stiffness increases as the value of the core height parameter increases. As a result of the increase of core width parameter value, it was determined that the main mode frequency value was transferred to lower frequency value and 100 mode frequencies examined were moved to a narrow frequency range (Acceptance: the natural frequency values that affect more than 5% of the total mass are called the main mode). As the value of the topology parameter increased, it was determined that the main mode frequency was moved to a lower frequency value and the 100 mode frequencies examined were moved to a narrow frequency range. As the value of core height parameter increased, it was determined that 100 mode frequencies examined were carried to a narrow frequency range. However, it has been determined that the main mode frequency values are increased or decreased according to the direction of freedom. Therefore, there is no general interpretation of the main mode frequency change. As a result of the increase in the young's modulus of the epoxy material, it was determined that the frequency values of the main mode were generally increased slightly. Increasing coefficient of thermal expansion of epoxy material did not change natural frequencies. When the young's modulus and thermal expansion coefficient parameters of the epoxy material are examined in the results of thermal expansion prestressed / non-prestressed analysis; it was determined that the main mode frequency value increased with a small amount by pretension effect.

**Keywords:** Honeycomb, honeycomb composite, natural frequency, ansys modal analysis, prestressed modal analysis, modal analysis, modal, eigenvalue, eigenvector

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım esnasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü problemimi titizlikle ele alan, değerli danışman hocam Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e, tez çalışmaları boyunca bana değerli yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU'na, bana büyük emekleri geçen, beni yetiştirip bu günlere ulaşmamı sağlayan aileme, son olarak da hayatımın her alanında bana yar ve yardımcı olan sevgili eşim Amine YOZGATLI'ya sonsuz teşekkür ederim.

17401063 nolu BAP (Bilimsel Araştırma Projesi) projesi ile bu çalışmayı destekleyen Selçuk Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

İbrahim YOZGATLI  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ</b> .....   | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....   | <b>vii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....   | <b>ix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>   |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....   | <b>5</b>   |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....   | <b>13</b>  |
| 3.1. Teori.....  | 16         |
| 3.2. Parametreler .....  | 20         |
| 3.2.1. Malzeme.....  | 20         |
| 3.2.2. Boyut parametreleri .....   | 22         |
| 3.2.3. Öngerilme parametreleri .....   | 23         |
| 3.3. Analizler.....  | 24         |
| 3.3.1. Çözüm ağından bağımsız sonuçlar için yapılan hassasiyet analizleri .....  | 25         |
| 3.3.2. Yerçekimi öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analizler .....  | 26         |
| 3.3.3. Termal genleşme öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analizler .....  | 28         |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....  | <b>31</b>  |
| 4.1. Öngerilmenin Gerilme ve Deformasyon Sonuçları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi .....  | 31         |
| 4.1.1. Yerçekimi öngerilmesinin gerilme ve deformasyon sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi.....   | 31         |
| 4.1.2. Termal genleşme öngerilmesinin gerilme ve deformasyon sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi.....                                       | 34         |
| 4.2. Parametre Değişimlerinin Mod Frekans Değerleri ve Etkin Kütle Oranları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi .....                                 | 53         |
| 4.2.1. Yerçekimi öngerilmesi parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....                             | 55         |
| 4.2.2. Yerçekimi öngerilmesiz analizlerde kor genişliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....  | 58         |
| 4.2.3. Yerçekimi öngerilmesiz analizlerde kor yüksekliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi..... | 63         |
| 4.2.4. Yerçekimi öngerilmesiz analizlerde topoloji parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....       | 68         |
| 4.2.5. Termal genleşme öngerilmesi parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi .....                      | 73         |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.6. Termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde kor genişliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi .....                              | 79         |
| 4.2.7. Termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde kor yüksekliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi .....                             | 87         |
| 4.2.8. Termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde topoloji parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi .....                                   | 95         |
| 4.2.9. Termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi..... | 103        |
| 4.2.10. Termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....        | 112        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>   | <b>121</b> |
| 5.1. Sonuçlar .....   | 121        |
| 5.2. Öneriler .....   | 124        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>  | <b>125</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>   | <b>132</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\gamma_i$      | : Katılım faktörü                                      |
| $\{\emptyset\}$ | : Özvektör   |
| $\omega$        | : Özdeğer (Hz)   |
| $n$             | : Serbestlik derecesi                                  |
| $[S]$           | : Gerilme rijitlik matrisi                             |
| $\{x_o\}$       | : Deformasyon vektörü                                  |
| $[\sigma_o]$    | : Gerilme matrisi                                      |
| $\{D\}$         | : Global kartezyen yönleri (X, Y, Z, RotX, RotY, RotZ) |
| $M_{eff,i}$     | : Etkilenen kütle                                      |
| $[C]$           | : Sönüm matrisi  |
| $[K]$           | : Rijitlik matrisi                                     |
| $[M]$           | : Kütle matrisi  |
| $\{\dot{u}\}$   | : Hız vektörü  |
| $\{\ddot{u}\}$  | : İvme vektörü   |
| $\{u\}$         | : Yer değiştirme vektörü                               |
| $\{F\}$         | : Uygulanan yük  |
| 1x Model        | : Çeyrek model   |
| 4x Model        | : Tam model  |
| C               | : Kor genişliği (mm)                                   |
| H               | : Kor yüksekliği (mm)                                  |
| k               | : Isıl iletim katsayısı (w/m°C)                        |
| $\alpha$        | : Termal genleşme katsayısı (°C <sup>-1</sup> )        |

### Kısaltmalar

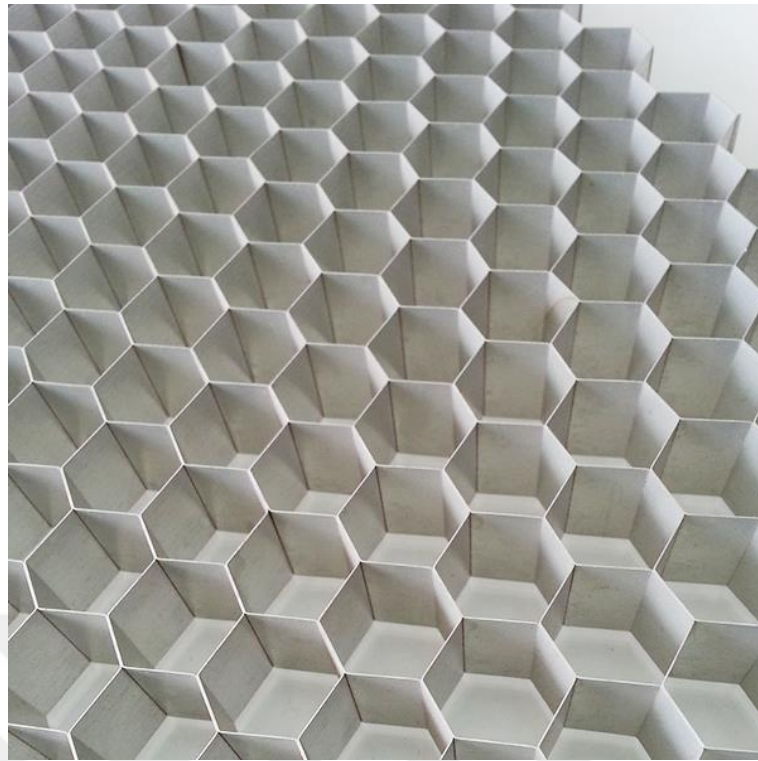
|     |   |
|-----|---|
| EM  | : Epoksi yapıştırıcı malzemenin elastisite modülü (GPa)                       |
| FFT | : Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform)                             |
| FRF | : Frekans tepki(cevap) fonksiyonu (Frequency Response Function)               |
| PSD | : Güç yoğunluk spektrumu (Power Spectral Density)                             |
| FEM | : Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method)                              |
| TGK | : Epoksi yapıştırıcı malzemenin termal genleşme katsayısı (°C <sup>-1</sup> ) |

## 1. GİRİŞ

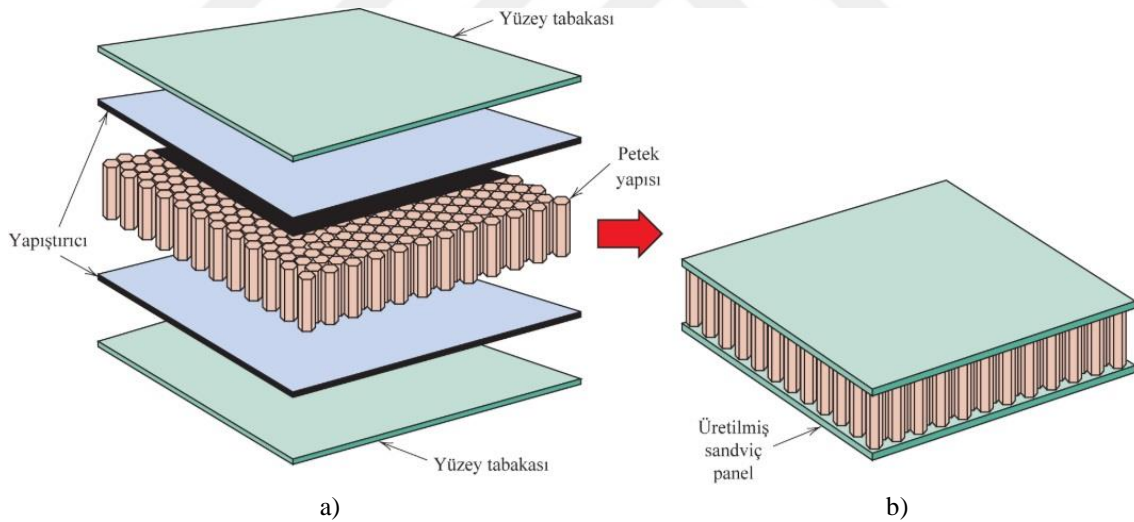
Balpeteği kompozit paneller (Şekil 1.1) hafifliğin istendiği; ağırlığın kritik problem olduğu, aynı zamanda yüksek mukavemet ve rijitlik istenen yerlerde kullanılır. Bu sandviç yapıların üretiminde genellikle; yüksek mukavemetli ve ince iki tabaka arasında çekirdek (kor) (Şekil 1.2) yerleştirilmesi ve bileşenlerin birbirine yük transferini bir yüzeyden diğerine aktarabilecek güçlü yapıştırmacılar ile bağlanırlar (Şekil 1.3). Amaç, düşük ağırlıkta yüksek rijitlik elde edilmesidir. Sonuçta yüksek burulma rijitliği ve eğilme rijitliği elde edilmektedir. Söz konusu özellikleri sebebiyle balpeteği kompozitleri havacılık ve uydu teknolojileri gibi yüksek teknoloji içeren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda bileşenlerin doğal titreşim davranışları oldukça önem arz etmektedir. Zira bileşenler üzerine gelen aşırı yükler ve hasar oluşumunun temel kaynağı söz konusu titreşimlerdir.



Şekil 1.1. Balpeteği kompozitler

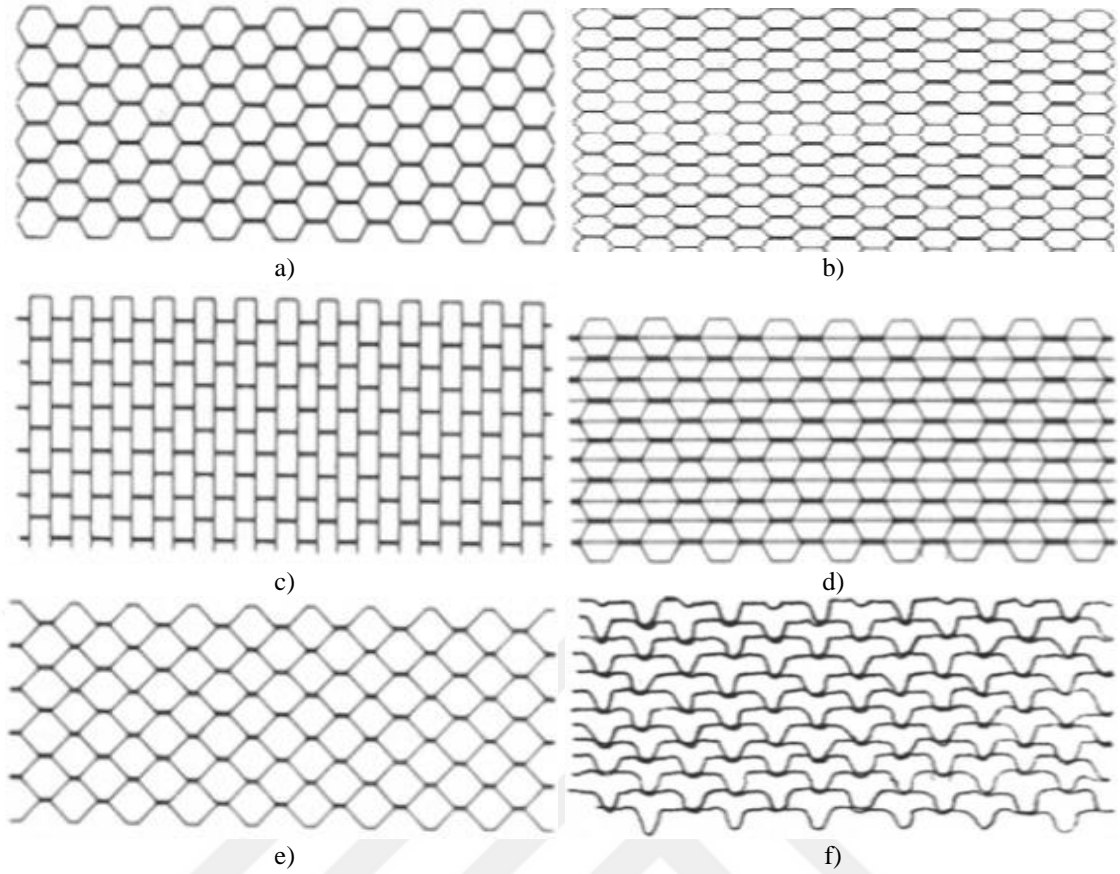


**Şekil 1.2.** Altıgen hücreli petek yapı, çekirdek (kor)



**Şekil 1.3.** Sandviç panelin yapıştırılarak elde edilmesi; a) balpeteği kompozit yapısının üretimi esnasında yüzey tabakalar, yapıştırıcı epoksi malzeme ve petek yapısının demontaj durumu, b) balpeteği kompozit yapısının montaj durumu

Balpeteği kompozit yapılarda bilinenin aksine sadece altıgen petek yapısı kullanılmamaktadır, birçok varyasyon kullanılmaktadır (Şekil 1.4). Bu varyasyonlar içerisinde en çok bilineni ve kullanılanı altıgen petek yapısıdır. Bu çalışmada altıgen petekli yapı (Şekil 1.4-a) geometrisinin kullanılmasına karar verilmiştir.



**Şekil 1.4.** Petekli yapı hücre türleri; a) altıgen petekli yapı, b) az uzatılmış altıgen, c) aşırı uzatılmış dikdörtgen, d) takviye edilmiş altıgen, e) kare petekli yapı, f) flex petekli yapı

Balpeteği kompozitler kullanıldıkları uygulamalarda sıcaklık değişimleri sebebiyle termal, yerçekimi sebebiyle kendi ağırlıkları altında gerilmelere ve periyodik zorlanmalara maruz kalabilmektedir. Periyodik zorlanmaların doğal titreşim frekansları ile çakışması sonucunda rezonans durumu söz konusu olmaktadır. Bu durum istenmeyen bir durum olup, ilgili bileşenler üzerinde aşırı yüksek gerilmeler oluşmasına ve fonksiyonlarını yerine getirmelerine engel olabilecek kadar büyük deformasyonlara sebep olabilmektedir.

Balpeteği kompozitlerinin kor geometrisinin boyutları, yapının genel boyutları, kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri ve çalışma sıcaklığı gibi parametreler doğrudan söz konusu kompozitlerin doğal titreşim davranışlarını etkilemektedir. Havacılık sektöründe kullanılmakta olan balpeteği kompozitlerinde çalışma sıcaklık farkı yüksek derecelere çıkabilmektedir, deniz seviyesinde sıcaklık 25 °C civarında olabilirken stratosferde sıcaklıklar -60 °C'ye düşebilmektedir. Dünya yörüngesindeki uyduların çalışma sıcaklığı ise ekzosfer seviyelerinde sıcaklık değerleri mutlak sıfır değerine doğru yaklaşmaktadır, güneş ışınlarının direkt yansıdığı bölgelerde ise aşırı

ısınmalara yol açtığı bilinmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda termal veya başka bir mekanik öngerilme etkisinin doğal frekanslar üzerindeki etkisinin incelenmediği görülmüştür. Bu sebeple söz konusu kompozitler için belirlenecek tasarım girdilerinin doğal titreşim frekanslarına sayısal olarak etkisinin incelenmesinin yanı sıra mekanik ve termal genişleme öngerilme etkilerinin de doğal titreşim frekanslarına etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır. Balpeteği kompozitlerinin çalışma koşulları ve maruz kalacakları yük bilindiği takdirde rezonans oluşumunun önüne geçilecek şekilde balpeteği malzemesi tasarımının boyutlandırılması için gerekli tasarım girdilerinin seçilmesinde yol gösterici olması veya yol gösterici bir yöntemin adımlarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

İstenen çıktılarına ulaşabilmek için tanımlanacak olan problemlerin çözümünde sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method, FEM) modelleme tekniği ve ANSYS paket yazılımı kullanılarak yapılacaktır. Araştırmada amaçlanan konu hakkında istenilen çıktıları belirleyebilmek için önemli olduğu düşünülen parametreler seçilerek bu parametrelerin değişimi sonucunda balpeteği kompozitinin doğal frekans değerlerinin değişimini incelemek için seçilen bütün parametre versiyonları için 360 adet FEM analizi yapılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Balpeteği yapılı kompozit levhaların hücre (kor) kısmını altıgen petek ya da balpeteği denilen hafif yoğunluklu kısım oluşturmaktadır. Balpeteği hücrelerin alt ve üst yüzey örtüsü ile kaplanması sonucu ise sandviç kompozit levhalar elde edilmektedir. Balpeteği kompozit paneller hafifliğin istendiği; ağırlığın kritik problem olduğu ve aynı zamanda yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılır. Amaç, malzeme kalınlığını hafif yapılar ile arttırarak direngenliği arttırmaktır. Bu malzemeler yüksek mukavemetli alt ve üst yüzeylere yük transferini bir yüzeyden diğerine aktarabilecek güçlü yapıştırıcılar ile bağlanırlar. Bu paneller farklı mimari yapılarda, havacılık uygulamalarında, hızlı tren, uzay sanayine yönelik uygulamalarda, ticari uçakların taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda birçok binek ve spor otomobillerin tavan, direk ve gövdesinin birçok kısımlarında, spor aletlerinde (yarış bisikleti kaburgası), karayolları hareketli, sabit bariyerlerde, motosiklet kasklarında ve rüzgâr türbini pervanesi gibi uygulama alanlarında da kullanılmaktadır. Bu paneller yapılardaki kullanıma ilave olarak, petekli yapılar enerji sönümleme, mikrodalga kalkanı, uyduların güneş panelleri ve hava akımı doğrultucusu olarak da yaygın bir kullanıma sahiptir.

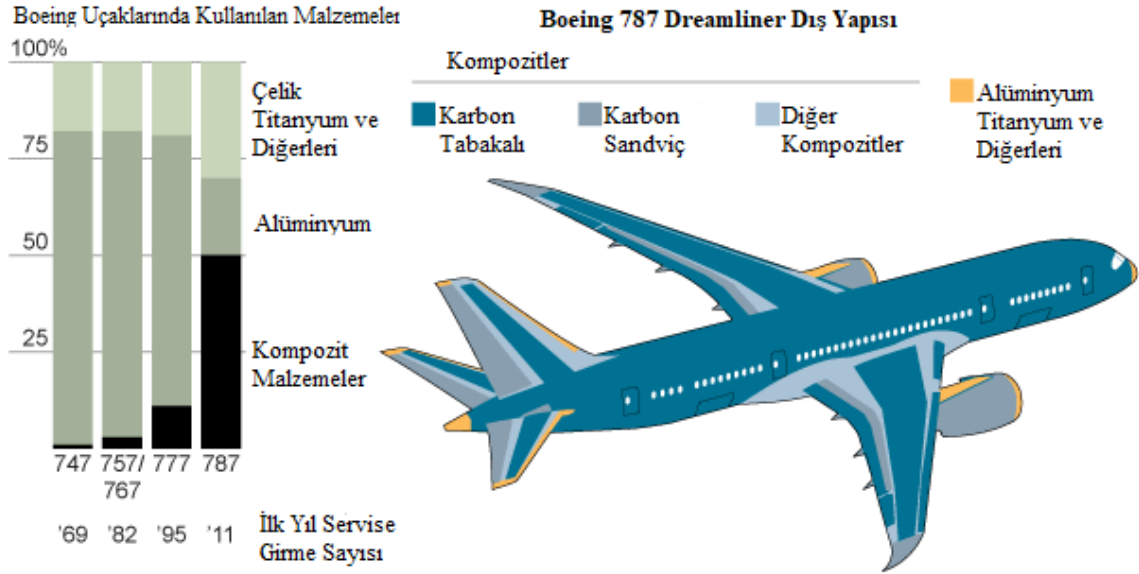
Balpeteği paneller temelde üç grup malzemeden oluşmaktadır. Bunlar;

- Alt ve üst yüzey levhaları
- Ara yapıştırıcı,
- Çekirdek (kor) malzemesidir.

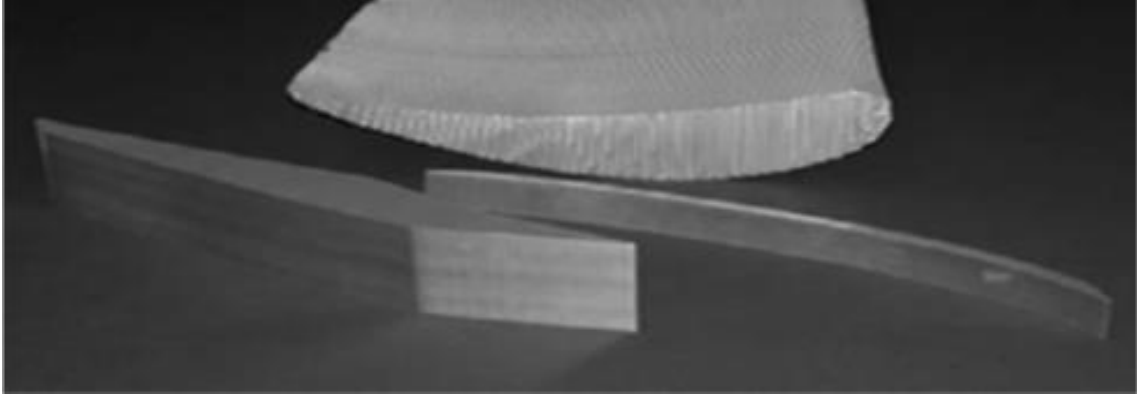
Balpeteği kor geometrisi, sandviç panel yüzeylerine düzenli ve kuvvetlendirilmiş destek vermektedir. Balpeteği kor geometrisi ile yüzey tabakalar arası kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanı kuvvetli bir şekilde bağlayarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Sonuçta yüksek burulma rijitliği ve eğilme rijitliğine sahip bir yapı elde edilmektedir.

Alüminyum balpeteği paneller konstrüksiyon açısından oldukça hafif olması, mukavemet ve rijitliği oldukça yüksek olması nedeni ile uzay, hava, kara ve deniz ulaşım araçlarında, inşaat gibi sektörlerde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5). Özellikle darbe yüklerine maruz kalan bölgelerde yüksek enerji sönümleme kabiliyeti olması nedeni ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Balpeteği sandviç panellerin servis ömrü darbe yüklerinin etkisi altında değişim göstermektedir. Özellikle hava ulaşım araçlarının gövde ve kanatlarında

yüksek hızda, kuş gibi cisimlerin çarpması nedeni ile tehlikeye maruz kalabilirler. Bu çarpma neticesinde zamanla bu bölgeler daha hızlı hasar oluşumuna neden olabilmektedir (Foo ve ark., 2008). Bu nedenle bu yapıların darbe yükleri altındaki davranışları gerek deneysel gerek ise bilgisayar ortamında analizler yapılarak uygun alüminyum kor yüksekliği belirlenmesi ve bu bölgelerin iyileştirilmesi oldukça büyük önem arz ettiği rapor edilmiştir (Anderson, 2005; Shin ve ark., 2008). Düşük yoğunlukları ve yüksek eğilme rijitlikleri sebebiyle sandviç yapılar havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır (Zumpano ve Meo, 2008; Panopoulou ve ark., 2011; Narayana ve ark., 2008; Mahato ve Maiti, 2010; Kathiravan ve Ganguli, 2007). Şekil 2.1'de Boeing 787 ticari uçağında kullanılan sandviç kompozit uygulamaları görülmektedir (Kalender, 2019). Şekil 2.2'de petek yapılu uçak kanadı, Şekil 2.3'te Ariane5 roketinde sandviç köpük panel uygulaması, Şekil 2.4'te ses izolasyonu için kullanılan petek levhalar görülmektedir (Yiğit, 2010). Şekil 2.5'te bir jet motorunda ses izolasyonu için balpeteği kompozit uygulaması görülmektedir (Aydıncak, 2007).



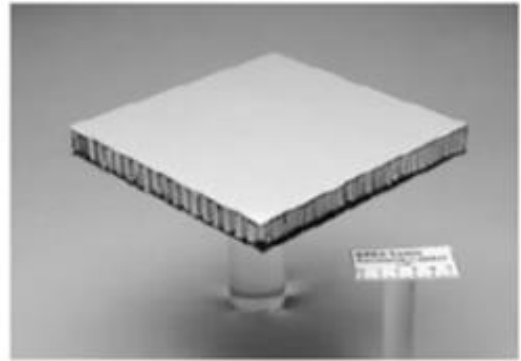
Şekil 2.1. Boeing 787 ticari uçağında kullanılan sandviç kompozit uygulamaları (Kalender, 2019)



Şekil 2.2. Petek yapılı uçak kanadı (Yiğit, 2010)



a)



b)

Şekil 2.3. Ariane5 roketinde; a) sandviç köpük panel uygulaması, b) kullanılan sandviç köpük panel (Yiğit, 2010)



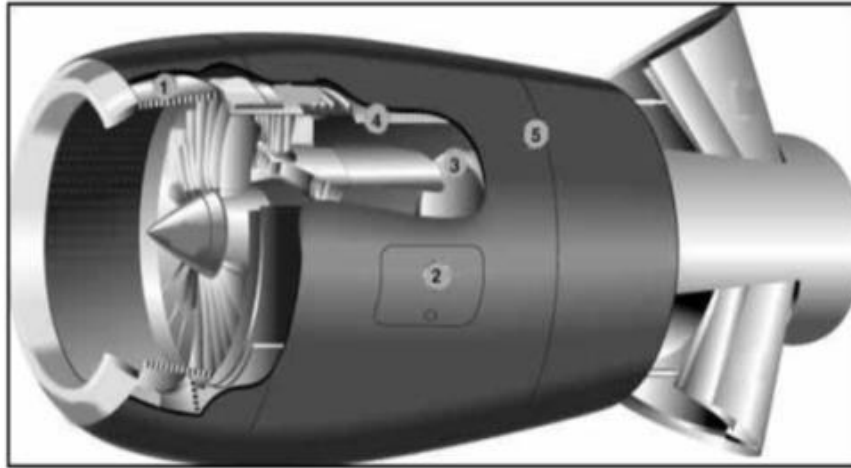
a)



b)

Şekil 2.4. Ses izolasyonu için kullanılan petek levhalar; a) viyadük altı, b) başka bir viyadük altı resmi (Yiğit, 2010)





**Şekil 2.5.** Bir jet motorunda balpeteği uygulaması (Aydınca, 2007)

Alüminyum balpeteği panellerin farklı yük gerilmelerinin etkisi ile oluşan hasarların analizi ve modellenmesi üzerine çalışmaların yoğunlaştığı görülmüştür. Paik ve ark. (1999) alüminyum balpeteği ile üretilen sandviç panellerin çekme, üç noktalı eğilme ve burulma yüküne maruz kalan balpeteği panellerin mekanik özelliklerini üzerinde çalışmalar yaparak hem deneysel hem de teorik olarak modelleme üzerinde inceleme yapmıştır. Alüminyum balpeteği sandviç panellerin farklı hücre boyutlarına sahip korların statik ve düşük hızlı darbe deneyleri yapılarak sönüm enerjisi ve hasar mekanizmaları üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı görülmektedir (Crupi ve ark., 2012; Nguyen ve ark., 2005; Akil ve Cantwell, 2003; Crupi ve Montanini, 2007; Hou ve ark., 2012; Hong ve ark., 2006).

Alüminyum balpeteği sandviç panellerin düşük ve yüksek darbe hasarlarını tahmin edebilmek için ticari programlar ile modelleme yapılarak çalışmalar yapılmaktadır (Asadi ve ark., 2006; Hou ve ark, 2011; Jie ve ark., 2013). Aktay ve ark. (2008) Al 5052 balpeteği panelin kuasi-statik yük altında yutulmuş enerji belirlenerek ticari ANSYS programı ile modelleme yapmışlardır. Buitrago ve ark. (2010) yüksek hızda çarpmaya maruz kalan balpeteği panellerin 3 boyutlu ABAQUS/Explicit ile sonlu elemanlar analizlerini yapmıştır. Sonuçlar, deneysel sonuçlar ile kıyas edilmiştir. Shen ve ark. (2013) düşük hız darbe yükü altındaki balpeteği davranışını araştırmıştır. Deformasyon modu ve enerji absorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir.

Gaetano ve ark. (2011) motosiklet kaskı üzerinde farklı üç bölgeye (ön, üst ve arka) yerleştirilen alüminyum balpeteği (Al 3003) çekirdeğin 7,5 m/sn hızda bir yük düşürerek absorbe edilen enerjileri belirlenmiş ve sürücü emniyetine önemli iyileştirmeler gerçekleştirmişlerdir. Bazı araştırmacılar ulaşım sektöründe polimerik

köpük ve alüminyum balpeteği paneller üzerinde yapılan çalışmaları derlemiştir (Baumeister ve ark., 1997; Banhart ve ark., 1998; Ferraris ve Volpone, 2005).

Crupi ve ark. (2013) alüminyum köpük panel ile alüminyum balpeteği panellerin statik ve düşük hız darbe deneylerini mukayese etmiştir. Araştırmada 2 farklı hücre boyutuna sahip köpük panel ve alüminyum balpeteği panel kullanılmıştır.

Cricri ve ark. (2013) basma ve kayma gerilmesine maruz kalan alüminyum balpeteği panel çekirdeklerinin deformasyon modları incelemiştir. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde alüminyum balpeteği panellerin eğilme, basma, burkulma, aksel yük ve darbe yüklerine maruz kaldığında hasarın oluşması için birçok parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu parametreler alüminyum koru yüksekliği, kor hücre boyutu, kor kalınlığı, dış yüzey elemanların kalınlığı ve cinsi, panelin yoğunluğu, koru geometrik yapısı, alüminyum balpeteği koru cinsi ve bunun gibi birçok parametrelere bağlılığı üzerinde çalışmalar mevcuttur (Manes ve ark., 2013; Crupi ve ark., 2013).

Güneş panelleri uzay araçları için temel enerji kaynaklarıdır (Nurre ve ark., 1995; Foster ve ark., 1995). Son on yıl içerisinde 117 kez güneş paneli arızası rapor edilmiş ve bunların 12 tanesi uydunun kalıcı hasarına sebep olmuştur (Wu ve ark., 2011). Uzay araçları dünya yörüngesinde dolaşırken periyodik olarak güneş ve gölge bölgelerinden geçmektedir. Bu durumda yaşanan ciddi sıcaklık farkları güneş panelleri üzerinde zamana bağlı değişken eğilme momentlerine yol açmaktadır (Li ve Yan, 2014). Bu değişken momentler ise termal titreşimlere sebep olmaktadır. Örneğin Hubble uzay teleskobunda (Thornton ve Foster, 1992) böyle bir durum tespit edilmiştir. Güneş panellerindeki termal kaynaklı titreşimlerin nümerik çözümleri ile ilgili birçok çalışma mevcuttur (Murozono ve Thornton, 1998; Thornton ve Kim, 1998; Song ve ark., 2002; Xue ve Ding, 2004; Xue ve ark., 2007). Tauchert (1991) ve Thornton (1993) termal kaynaklı değişken yüklemeler altında eğilme, burulma ve titreşim davranışlarını incelemiştir. Johnston ve Thornton (1998; 2000) güneş panellerinde termal kaynaklı yapısal tedirginlikleri incelemiştir.

Balpeteği kompozitlerinin mekanik özellikleri, dinamik özellikleri ve modal davranışları araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Sakar ve ark., 2010; Aydınca, 2007; Ercan, 2006; Sezgin, 2008; Yiğit, 2010; Bolat, 2011; Aydın, 2013; Çınar, 2014). Balpeteği sandviçlerinin serbest eğilme titreşimleri basit ve ankastre sınır şartlarında incelenmiştir (Yu ve Cleghorn, 2005; Li ve Jin, 2008; Li ve Zhu, 2009; Li ve ark., 2010). Zorlanmış titreşimler altında balpeteği sandviç yapısının davranışları ile ilgili az

sayıda çalışma mevcuttur (Li ve ark., 2011). Naidu ve Sinha (2007) higrotermal etkiler altında tabakalı kompozit yapıların nonlinear serbest titreşimlerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir.

Bazı araştırmacılar sandviç yapılarda oluşan hasar gelişiminin yapısal bütünlüğü, mukavemet ve rijitliği etkilediği ve dolayısıyla dinamik davranış üzerinde etkili olduğunu rapor etmiştir (Wang ve ark., 1982; Majumdar ve Suryanarayn, 1988; Tracy ve Pardoen, 1989; Shen ve Grady, 1992; Tenek ve ark., 1993; Chen, 1994; Ju ve ark., 1995; Hou ve Jeronimidis, 1999; Paolozzi ve Peroni 1990; Kim ve ark., 2003). Krueger (1999) sandviç yapılarda dinamik modelleme için 3D modelleme yerine 2D veya 2D/3D hibrid modelleme tekniğinin daha uygun olduğunu rapor etmiştir. Abaqus yazılımı kullanılarak balpeteği kompozitlerinin FFFF SSSS, CSCS ve CCCC sınır şartları altında serbest titreşim davranışları incelenmiştir (Burlayenko ve Sadowski, 2010).

Sandviç panel ve balpeteği kompozit panellerinin üretimleri (Yiğit, 2010), tasarımları (Aydıncak, 2007), düşük hızlı darbe davranışları (Yiğit 2010; Danacıoğlu, 2013; Engin, 2011) ve eğilme davranışları (Staal, 2006) incelenmiştir. Li ve Jin, (2008) simetrik dikdörtgen balpeteği sandviç kompozitlerin CCSS sınır şartlarında eğilme titreşimlerini klasik levha teorisi ve üçüncü mertebe Reddy teorilerini kullanarak incelemiştir. Nilsson ve Nilsson, (2002) balpeteği kompozitlerinin dinamik davranışlarını Rayleigh-Ritz yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Aydıncak, (2007) balpeteği kompozitlerinin tasarım ve analiz parametrelerini sayısal olarak incelemiştir. Backström ve Nilsson, (2007) sandviç kompozit kirişlerin doğal titreşim davranışlarını basit dördüncü mertebeden kiriş teorisini kullanarak yapmışlardır. Murphy ve ark. (1997) yaptıkları çalışmada dikdörtgen şekilli levhaların serbest titreşim davranışları üzerine termal öngerilmenin etkisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Bir başka çalışmada (Adeniji-Fashola, ve Oyediram, 1988) termal gradyanın öngerilme altındaki dikdörtgen levhaların titreşim davranışları incelenmiştir. Holnicki-Scule (1991), yaptığı çalışmada antenlerin doğal titreşim mod şekillerinin istenen biçime getirilmesi için öngerilme uygulanabileceğini göstermiştir.

Uydu sistemlerinin tasarımında ilk olarak fırlatıcı aracın kuasi-statik yükleri esas alınarak belirlenir. Uydu yapısının doğal frekanslarının roketin doğal frekansından belli bir uzaklıkta olacak şekilde (Akgül, 2009) bileşenlerin rijitlikleri ve titreşim davranışları yönlendirilir.

Çizelge 2.1’de çeşitli fırlatma araçlarında karakteristik olarak ulaşılan ivme değerleri görülmektedir. Söz konusu ivme değerleri uydu yapısı üzerinde oluşacak olan yüklerin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir (Akgül, 2009). Uyduların fırlatılmasını müteakip ilk gün içerisinde gerçekleşen hasarların %45’lik bölümünün titreşim kaynaklı hasarlar sebebiyle olduğu NASA tarafından rapor edilmiştir (Akgül, 2009).

Roketlerin kalkışları esnasında şok yükü nedeniyle 5-100 Hz aralığında titreşimlerin oluşması söz konusudur (Wijker, 2008). Bu yükler haricinde aerodinamik ve akustik etkiler sebebiyle 20-2000 Hz arasında değişebilen ve deterministik olmayan rastgele titreşimler oluşması da söz konusudur (Wijker, 2008). Kalkış ve transonik hızlarda 20-10000 Hz aralığında oluşan akustik gürültü de bileşenler üzerinde etkilidir. Daha yüksek doğal frekanslara sahip bileşenler bu durumdan daha fazla etkilenmeye açıktır. Şekil 2.6’da Ariane5 roketi için güç yoğunluk spektrumu görülmektedir.

Uydu sistemleri için; güneş radyasyonu, Albedo radyasyonu, yeryüzü kaynaklı radyasyon ve uydunun ısı üreten sistemlerinin yaydığı radyasyon olmak üzere dört çeşit ısı girdisi söz konusudur (Şekil 2.7) (Akgül, 2009). Takip edilen yörünge boyunca dış kaynaklı radyasyonda değişiklikler görülür. Bileşenler için tercih edilen malzemelere ait termal genleşme katsayıları ile ilişkili olarak gerilmeler oluşur.

Birçok askeri standart (MIL-E-5400, MIL-T-5422, MIL-STD-810) özellikle elektronik bileşenlerin rezonans noktalarını kapsayacak biçimde sinüzoidal biçimli yükleme ile taranmasını önermektedir (Ontaç, 2008). Bu durumda özellikle düşük frekanslarda daha kritik olmak üzere 10-2000 Hz aralığında harmonik yükleme altında yapıların cevabının sorgulanması oldukça önemlidir.

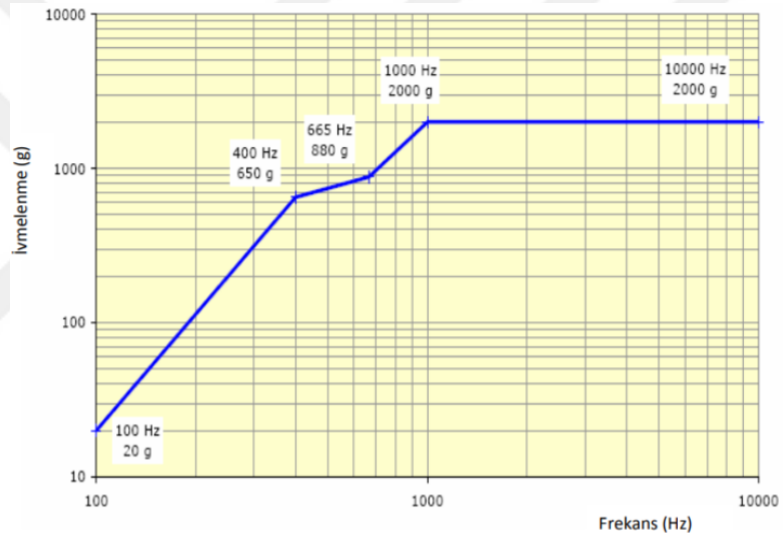
Ansys sonlu elemanlar yazılımının yakınsaması Büyükbayram ve ark. (2014) yapmış olduğu çalışmada test sonuçlarından en fazla %1.5, ortalama yakınsama değerinin ise %0.84 olduğu görülmektedir. Yalnızca ve ark. (2014) yapmış olduğu çalışmada en fazla %4, ortalama yakınsama değerinin ise %1.75 olduğu görülmektedir. Şen ve ark. (2015) yapmış olduğu çalışmada ise en fazla %5.58, ortalama yakınsama değerinin ise %1.96 olduğu görülmektedir. Bu değerler kabul edilebilir değerler olduğu için çalışmanın Ansys sonlu elemanlar yazılımında yapılmasında bir sakınca görülmemiştir.

Yapılan literatür araştırmasından görüleceği üzere, balpeteği sandviç yapısı ile ilgili çalışmaların daha çok mekanik davranışları, düşük hızlı darbelere karşı tepkileri ve serbest titreşim davranışları ile ilgili olduğu görülmüştür. Mekanik ve/veya termal

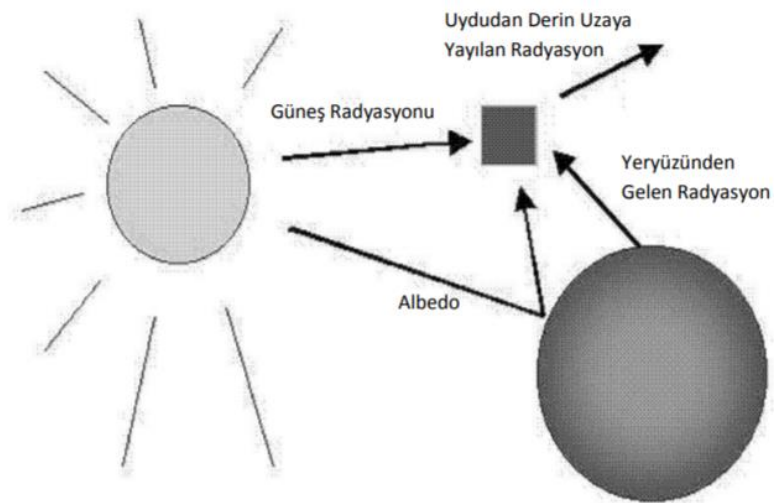
öngörülme altındaki titreşim davranışlarının incelenmediği ve bu konuda literatürde ciddi bir eksiklik olduğu görülmektedir. Yapılan çalışma ile söz konusu eksikliğin giderilmesi konusunda önemli bir adım atılacağı düşünülmektedir.

**Çizelge 2.1.** Çeşitli fırlatıcı roketleri için maksimum sürekli hal ivmelenme değerleri (Wijker, 2008)

| Fırlatma Aracı | Maksimum Sürekli Hal İvmelenme |           |
|----------------|--------------------------------|-----------|
|                | Boylamsal (g)                  | Yanal (g) |
| Ariane-4       | 4,5                            | 0,2       |
| Ariane-5       | 4,25                           | 0,2       |
| Atlas          | 5,5                            | 0,4       |
| Pegasus        | 7-10                           | 0         |
| Proton         | 4                              | 0         |
| Long March 2E  | 5,2                            | 0,6       |
| Long March 3   | 5,5                            | 0,6       |



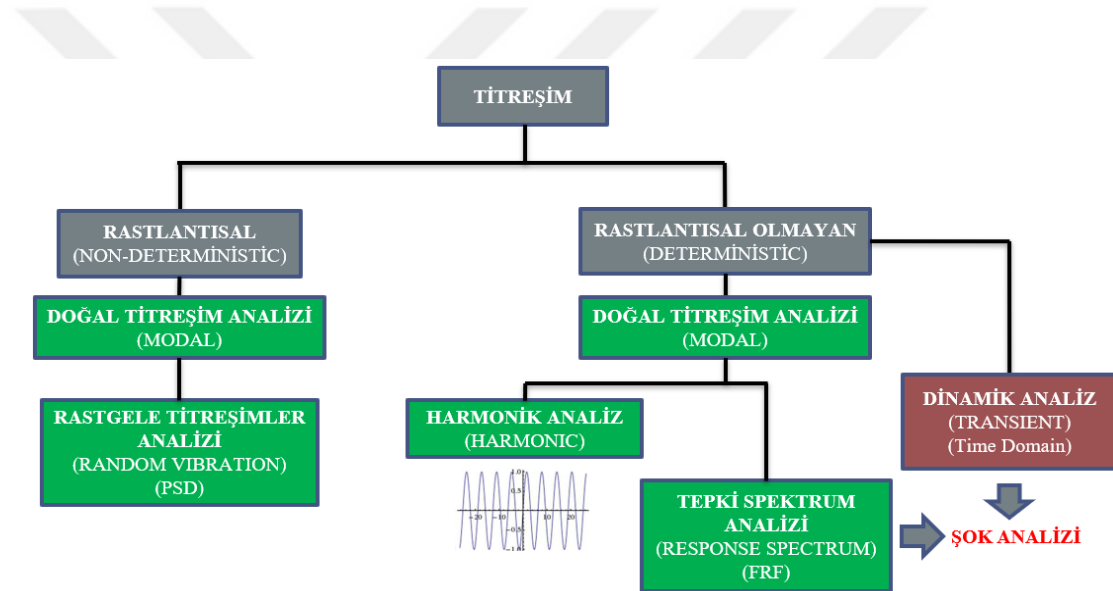
**Şekil 2.6.** Ariane5 roketi için güç yoğunluk spektrumu (Akgül, 2009)



**Şekil 2.7.** Yörüngedeki bir uyduya etki eden radyasyon (Akgül, 2009)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Sonlu elemanlar analizinde doğal frekans analizi (modal), doğrusal (lineer) titreşim analizlerinin olmazsa olmazıdır (Şekil 3.1). Titreşim analizi, hiçbir rastlantısal durum olmayan yani aynı şartlar için hep aynı sonuçları veren (deterministik) titreşim analizi yöntemleri ve rastlantısal titreşim analizi (non-deterministik) olmak üzere iki ana başlığa ayrılmaktadır. Şekil 3.1’de bu analiz gruplarını bir şemada görebilmekteyiz. Yeşil renkte olanlar lineer analizleri göstermektedir. Kırmızı renkte olan, zamana bağlı dinamik (transient) analiz ise doğrusal olmayan (nonlinear) durumların çözülmek istendiği modellerde kullanılmaktadır, lineer analizlerde ise bazı kritik durumlarda (sonucun doğruluğunu daha hassas görmek için) kullanıldığı olur.



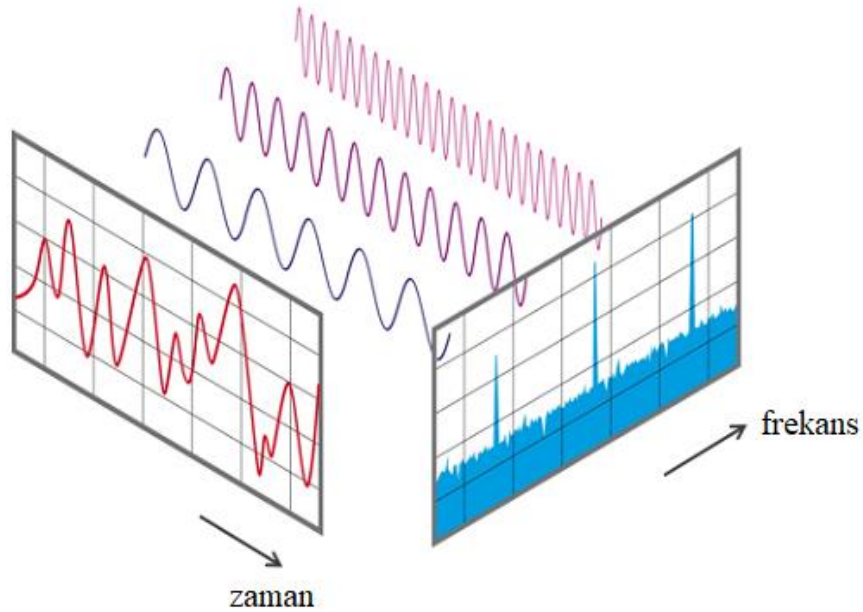
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar metodunda titreşim analizleri

Dinamik (transient) titreşim analizleri diğer lineer titreşim analizlerine göre daha uzun zaman almaktadır. Bunun sebebi, zamana bağlı verilen titreşim verisi sonucunda yapının doğal frekanslarının tetiklenip tetiklemediğini görebilmek için 1 saniyenin, analizde incelenmek istenen maksimum frekans değerinin 20 katında biri kadarlık bir zaman adımı ile çözülmesi gerekmesindedir (Morgan, 2011). Bu yüzden çözülmek istenen simülasyonda nonlinear durumlar yoksa lineer analizler tercih edilir.

Sonlu elemanlar analizlerinde nonlinearite üç sebeple oluşur (Ağdacı, 2013);

- Geometrik nonlinearite
- Malzeme nonlinearitesi
- Temas (kontakt) nonlinearitesi

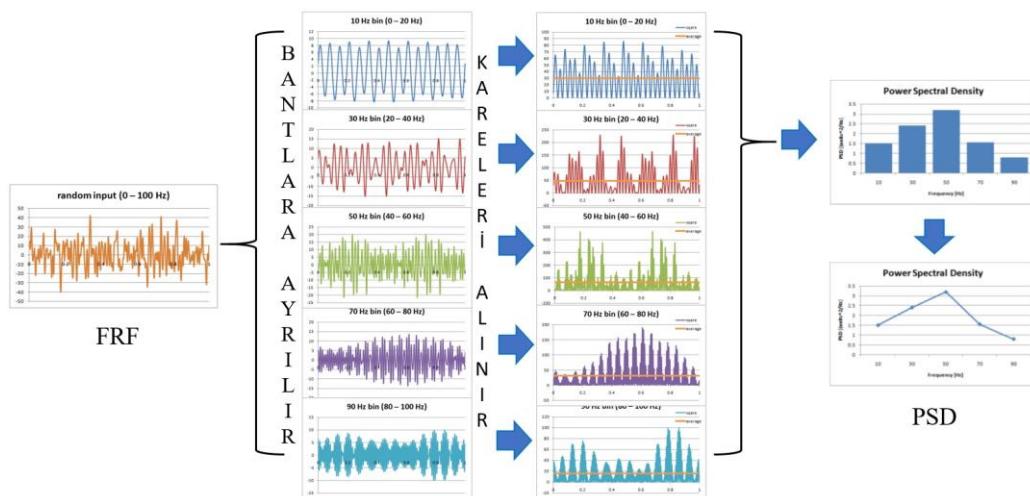
Şok analizleri için transient veya tepki spektrum (response spectrum) analizlerinden biri seçilir. Transient analizlerde model üzerine gelen titreşim yükleri zamana (time domain) bağlıdır. Eğer nonlinear bir durum yoksa zamana bağlı titreşim verisi hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) yöntemi ile frekans bölgesine geçirilir (Şekil 3.2). Bu yöntem basitçe zamana bağlı veriyi tarayarak tüm titreşim verisinin harmonik birleşenlerini bulur. Böylece titreşim verisi frekans bölgesine taşınmış olur. Bunu yapmakta ki amaç analiz süresini kısaltmaktır. Bir örnekte (Morgan, 2011), zaman bölgesindeki veri ile transient analiz yapmak yerine verinin FFT'sini alarak frekans tepki (cevap) fonksiyonu (Frequency Response Function, FRF) verisine çevirdikten sonra response spectrum analizi yapmak 125 kat daha kısa sürede çözüm vermiştir. Bunu yaparken çok büyük bir hızlilik kazandığımız doğrudur. Ancak gerçek sonuçlardan bir miktar uzaklaşmayı göze almak gerektiğini de unutmamak gerekir, Morgan (2011) yaptığı çalışma sonucunda response spectrum analiz sonucunun, transient analiz sonucuna göre gerilme sonuçlarında %14'e kadar, deformasyon sonuçlarında ise %9'a kadar sapma görmüştür. Response spectrum analizini yapmadan önce doğal frekans analizi çözerek doğal frekansların bulunması çok önemlidir. Öncesinde doğal frekans analizi yapılarak, response spectrum analizi esnasında FRF verisindeki harmonik birleşenlerin frekanslarının doğal frekanslar ile çakışıp çakışmadığının belirlenmesi sağlanır.



**Şekil 3.2.** Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ile titreşim verisinin zaman (time domain) bölgesinden, frekans bölgesine (frequency domain) yani frekans cevap fonksiyonuna (FRF) dönüşümünün şematik gösterimi

Harmonik analiz ise lineer bir modelin harmonik titreşim yükü altında ne gibi gerilme ve deformasyonlara uğrayacağını bulmak için yapılır. Harmonik titreşim yükünün doğal frekanslar ile nasıl bir etkileşime gireceğini çözebilmek için öncesinde doğal frekans analizi yaparak yapının doğal frekanslarını bulmak çok önemlidir.

Rastgele titreşim (random vibration) analizleri ise Şekil 3.1’de görüldüğü üzere rastlantısal (Non-deterministik) titreşim analizi için kullanılmaktadır. Burada rastlantısal ile anlatılmak istenen, aynı durum için yapılan test sonuçlarında benzer titreşim verilerinin elde edilememesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin bir roketin fırlatılması esnasında elde edilen titreşim verisi ile aynı roketin tekrar fırlatılması esnasında elde edilen titreşim verisi aynı olmamaktadır. Random vibration analizleri bu gibi durumları çözmek için kullanılır. Random vibration analizinde güç yoğunluk spektrum (Power Spectral Density, PSD) verisi kullanılır. PSD verisi, zamana bağlı titreşim verisinden elde edilen FRF verisinin belirlenen frekans aralıklarındaki enerji yoğunluğunu gösterir. FRF verisinden, PSD verisinin nasıl elde edildiğine dair şema Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Şekil 3.3’te görüldüğü üzere FRF verisi belirlenen aralıklar için bantlara ayrılır (örneğin 0-100 Hz arasında ki FRF verisi 0-20 Hz, 20-40 Hz, 40-60 Hz... gibi), daha sonra bu bantların güç yoğunluğunu çıkarmak için ortalaması alınacaktır. Ancak bu bantlar negatif bölgelerde içerdiği için alınacak ortalama değer birbirini sıfırlayabilir. Bu durumda gerçek güç yoğunluğunu veremeyecektir. Bu sebeple ayrılan bu bantlardaki tüm titreşim gücü değerlerinin kareleri alınır, böylece tüm veri pozitif bölgeye geçmektedir ve bu verinin ortalaması alınarak o frekans aralığındaki güç yoğunluğu elde edilmiş olur.



**Şekil 3.3.** FRF verisinden güç yoğunluk spektrum (Power Spectral Density, PSD) verisi elde edilmesinin şematik gösterimi



Balpeteği kompozit yapısı lineer olarak modellenbildiği için doğal frekans davranışlarının incelenmesi modal analizde yapılmıştır.

### 3.1. Teori

Sonlu elemanlar yönteminde doğal frekans analizinde kullanılan teorik altyapıya göz atacak olursak, genel hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.1)$$

Burada;

$[M]$  = Kütle matrisi

$[C]$  = Sönüm matrisi

$[K]$  = Rijitlik matrisi

$\{F\}$  = Uygulanan yük

$\{\ddot{u}\}$  = İvme vektörü

$\{\dot{u}\}$  = Hız vektörü

$\{u\}$  = Yer değiştirme vektörü

Sönümsüz doğrusal bir serbest titreşim hareketinde sönüm matrisi  $[C]$  ve uygulanan yük  $\{F\}$  sıfır olacağından 3.1'de ki denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.2)$$

Doğal titreşim sonucunda oluşan rezonans durumu harmonik hareket olarak kabul edilebilir, 3.2'deki denklemde şu harmonik hareket kabulleri yapıldığında:

$$\{u\} = \{\emptyset\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (3.3)$$

$$\{\dot{u}\} = \omega_i \{\emptyset\}_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (3.4)$$

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_i^2 \{\emptyset\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (3.5)$$

Burada;

$\theta_i$  = faz açısı

Denklem 3.3 ve denklem 3.5 harmonik hareket kabullerini 3.2'deki denklemde yerine yazacak olursak:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.2)$$

$$-\omega_i^2 [M]\{\phi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) + [K]\{\phi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) = \{0\}$$

$$(-\omega_i^2 [M] + [K])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (3.6)$$

3.6'da ki denklemin çözümü için ya  $\{\phi\}_i = 0$  olmalıdır, bu çözüm anlamsızdır.

Veya:

$$\det([K] - \omega_i^2 [M]) = \{0\} \quad (3.7)$$

olmalıdır. 3.7'deki denklemin çözümünden  $\omega_i, \omega_1 \dots \omega_n$  özdeğerleri yani doğal frekansları (mod frekanslarını) bulmuş oluruz. Burada 'n' sayısı yapının serbestlik derecesini ifade etmektedir.

Özvektörleri bulmak için ise kütle matrisinin normalleştirilmesi kullanılır:

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = 1 \quad (3.8)$$

Buradan  $\{\phi\}_i, \{\phi\}_1 \dots \{\phi\}_n$  özvektörleri yani doğal frekansın mod şeklini vermektedir. Birbirinden farklı  $\omega_j$  ve  $\omega_k$  gibi iki özdeğer için bulunan iki özvektörün skalar çarpımı;  $\{X\}_j^T \{X\}_k = 0$ 'dır. Bu özelliğe ortogonallik özelliği denir. Eğer  $j = k$  ise; bu iki matrisin skalar çarpımı  $\{X\}_j^T \{X\}_k = 1$  olur. Özvektör matrislerinde ise bu skalar çarpımının sonucu genelde  $\{\phi\}_j^T \{\phi\}_k = \sqrt{s}$  gibi bir sayıya eşittir, matrisin her terimi  $\sqrt{s}$ 'e bölerek sonucun 1 çıkması sağlanır. Bu işleme normalleştirme denir.

Özvektörün kütlelerin yüzde kaçını harekete geçirdiğini bulmak için önce katılım faktörlerini bulmamız gerekir, katılım faktörü:

$$\gamma_i = \{\phi\}_i^T [M] \{D\} \quad (3.9)$$

Burada:

$\{D\} =$  global kartezyen (X, Y, Z) yönleri ve bu yönlerin her biri etrafında dönme (RotX, RotY, RotZ) yönlerindeki yer değiştirme spektrumudur.

Etkilenen kütle ise:

$$M_{eff,i} = \frac{\gamma^2}{\{\emptyset\}_i^T [M] \{\emptyset\}_i} \quad (3.10)$$

Burada denklem 3.8'den  $\{\emptyset\}_i^T [M] \{\emptyset\}_i = 1$  olduğu için etkilenen kütle denklemi:

$$M_{eff,i} = \gamma^2 \quad (3.11)$$

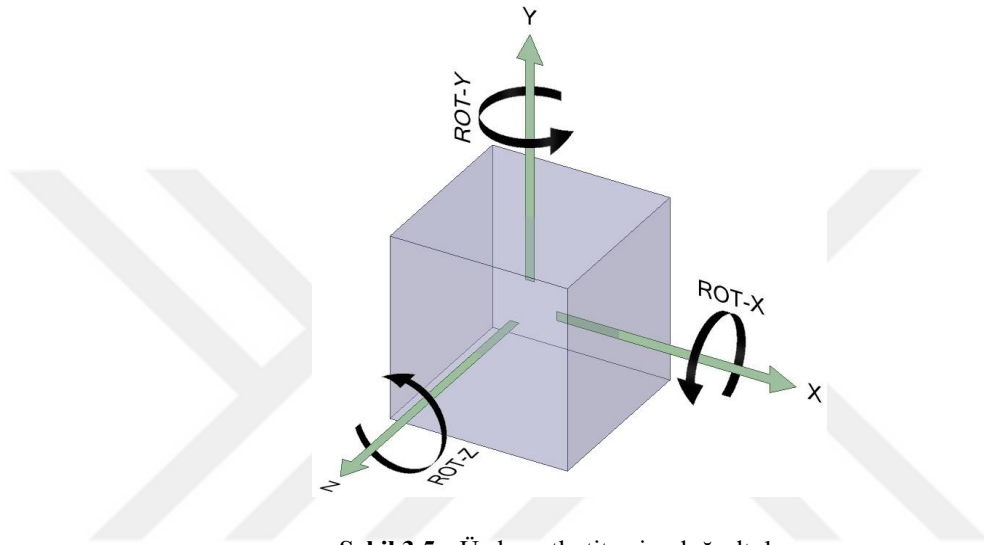
olur. Bu sayede doğal frekansın kütlelerin yüzde kaçını etkilediğini bulabiliriz. Bu değer, değerlendirme aşamasında çok önemlidir. Analiz sonucunda bize her bir doğal frekans için X, Y, Z, RotX, RotY, RotZ (Şekil 3.5) yönlerinde kütlelerin yüzde kaçını etkilediğine dair tablo olarak çıktılar verilir (Şekil 3.4), bu veriler sayesinde bulunan doğal frekansın hangi yönde etkili olduğu, lokal mod veya ana mod olup olmadığı yorumu yapılabilmektedir. Eğer kütlelerin %5'inden küçük bir bölümünü etkiliyorsa lokal mod, eğer kütlelerin %5'inden büyük bölümünü etkiliyorsa ana mod olarak adlandırılmıştır. Bulunan doğal frekans değeri küçük bir kütleyle harekete geçiriyorsa o doğal frekans değerinde yapı rezonansa girse bile yapıya zarar verme ihtimali azalır. Bu çalışmada önemli olarak gördüğümüz çıktılardan biri ise ana modların bizim incelediğimiz parametre değişimlerinde, başka frekans değerlerine taşınıp taşınmamasıdır.

| ***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** |           |             |                |          |                | Y DIRECTION              |                               |
|--|-----------|-------------|----------------|----------|----------------|--------------------------|-------------------------------|
| MODE   | FREQUENCY | PERIOD      | PARTIC. FACTOR | RATIO    | EFFECTIVE MASS | CUMULATIVE MASS FRACTION | RATIO EFF. MASS TO TOTAL MASS |
| 1  | 940.406   | 0.10634E-02 | 0.39182E-02    | 1.000000 | 0.153526E-04   | 0.860687                 | 0.643827                      |
| 2  | 1246.11   | 0.80250E-03 | -0.40067E-05   | 0.001023 | 0.160535E-10   | 0.860688                 | 0.673218E-06                  |
| 3  | 1304.05   | 0.76684E-03 | 0.10366E-03    | 0.026455 | 0.107445E-07   | 0.861290                 | 0.450592E-03                  |
| 4  | 1305.42   | 0.76604E-03 | -0.18591E-03   | 0.047448 | 0.345638E-07   | 0.863228                 | 0.144947E-02                  |
| 5  | 1331.09   | 0.75126E-03 | -0.14992E-03   | 0.038262 | 0.224761E-07   | 0.864488                 | 0.942556E-03                  |
| 6  | 1337.23   | 0.74782E-03 | 0.89621E-04    | 0.022873 | 0.803195E-08   | 0.864938                 | 0.336827E-03                  |
| 7  | 1417.90   | 0.70527E-03 | 0.19729E-04    | 0.005035 | 0.389239E-09   | 0.864960                 | 0.163231E-04                  |
| 8  | 1434.36   | 0.69717E-03 | -0.81479E-04   | 0.020795 | 0.663886E-08   | 0.865332                 | 0.278406E-03                  |
| 9  | 1435.89   | 0.69643E-03 | 0.15409E-05    | 0.000393 | 0.237426E-11   | 0.865332                 | 0.995667E-07                  |
| 10   | 1451.66   | 0.68887E-03 | 0.30572E-05    | 0.000780 | 0.934669E-11   | 0.865333                 | 0.391962E-06                  |
| 11   | 1463.44   | 0.68332E-03 | 0.24403E-04    | 0.006228 | 0.595513E-09   | 0.865366                 | 0.249734E-04                  |
| 12   | 1493.30   | 0.66966E-03 | -0.36242E-06   | 0.000092 | 0.131348E-12   | 0.865366                 | 0.550821E-08                  |
| 13   | 1507.44   | 0.66337E-03 | -0.81108E-05   | 0.002070 | 0.657849E-10   | 0.865370                 | 0.275875E-05                  |
| 14   | 1509.96   | 0.66227E-03 | 0.14318E-03    | 0.036542 | 0.205005E-07   | 0.866519                 | 0.859709E-03                  |
| 15   | 1510.51   | 0.66203E-03 | 0.14512E-03    | 0.037036 | 0.210584E-07   | 0.867700                 | 0.883103E-03                  |
| 16   | 1513.51   | 0.66072E-03 | -0.20342E-03   | 0.051915 | 0.413781E-07   | 0.870020                 | 0.173523E-02                  |
| 17   |           | 0.64461E-03 | -0.17978E-03   | 0.045883 | 0.323208E-07   | 0.871831                 |                               |

Şekil 3.4. Ansys paket yazılımında bir doğal frekans analizi sonucunda Y doğrultusundaki çıktılar

Şekil 3.4'te soldaki kutucuk içine alınan kısımda doğal frekans değerleri görülmektedir, sağdaki kutucuk içine alınan bölümde ise etkilenen kütle oranları,

ortadaki kutucuk içerisinde ise tablodaki verilerin hangi yön için olduğu görülmektedir. Bu grafiği değerlendirirken örneğin; 1. mod için bir değerlendirme yapacak olursak doğal frekans değerinin 940,4 Hz olduğunu, Y yönünde yapının toplam kütesinin %64'ünün bu frekansta etkilendiğini görebilmekteyiz. Bu şekilde değerlendirmeye devam ettiğimizde mod 1'in Y doğrultusunda ana mod olduğu, diğer modların yapı üzerinde Y doğrultusunda çok az etkisi olduğundan dolayı lokal modlar olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 3.5. Üç boyutlu titreşim doğrultuları

Yüklemenin doğal frekans analizindeki yerine göz atacak olursak, modal analizden önce lineer bir statik analiz yapılarak yükleme uygulanır, bu analiz sonucunda;

$$[K]\{x_o\} = \{F\} \rightarrow [\sigma_o] \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'den gerilmeler elde edilir, burada  $\{x_o\}$  deformasyon vektörüdür.

Elde edilen gerilmeler daha sonra;

$$[\sigma_o] \rightarrow [S] \quad (3.13)$$

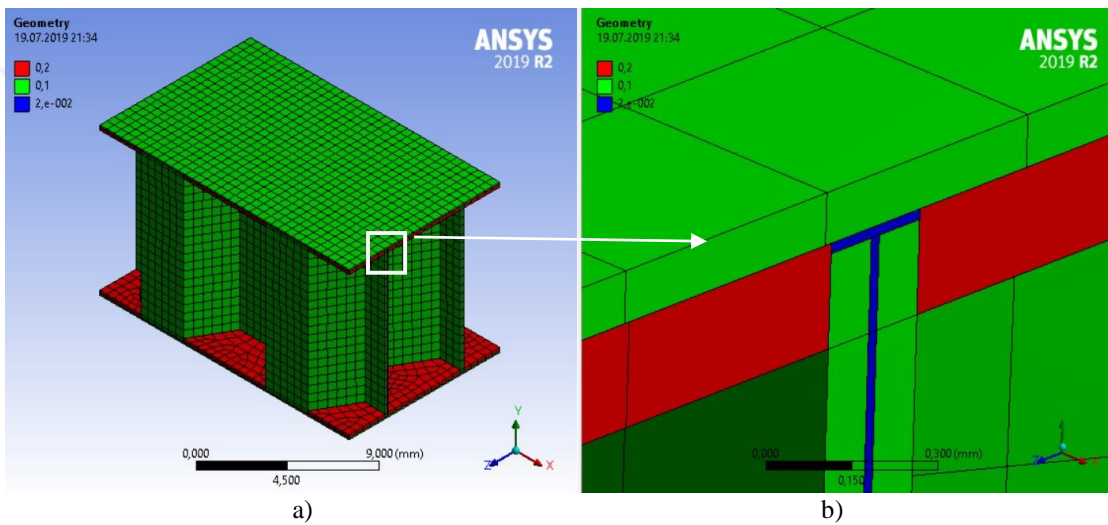
Gerilme rijitlik matrisine ( $[S]$ ) dönüştürülür ve denklem 3.7'ye;

$$([K + S] - \omega_i^2[M])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (3.14)$$

olarak eklenir. Denklem 3.14'ten öngerilmenin oluşturmuş olduğu etkinin yapının rijitliğini artırdığını görebilmekteyiz.

### 3.2. Parametreler

Tüm analizlerde alüminyum plakaların kalınlığı 0.1 mm (Şekil 3.6, yeşil renk ile gösterilen parçaların kalınlığı), korlar arasında ve kor kenarı ile alt, üst yüzey levhaları arasında sıkışan epoksi kalınlığı 0.02 mm (Şekil 3.6, mavi renk ile gösterilen parçaların kalınlığı), yüzeye sürülen katmanlar arasında sıkışmayan bölgelerdeki epoksi kalınlığı ise 0.2 mm (Şekil 3.6, kırmızı renk ile gösterilen parçaların kalınlığı) olarak alınmıştır.



Şekil 3.6. Balpeteği yapı üzerinde kullanılan; a) malzeme kalınlıklarının renkli gösterimi, b) detay gösterim

#### 3.2.1. Malzeme

Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerin tamamında alüminyum alaşımı (Şekil 3.7'de kahverengi renk ile gösterilen parçaların malzemesi) plakanın ve epoksi yapıştırıcı (Şekil 3.7'de turkuaz renk ile gösterilen parçaların malzemesi) malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Yani yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde malzeme özellikleri parametre olarak alınmamıştır.

Çizelge 3.1. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

| Materyal           | Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> ) | Elastisite Modülü (GPa) | Poisson Oranı | Akma Mukavemeti (MPa) |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------|
| Alüminyum Alaşımı  | 2770                          | 71                      | 0.33          | 280                   |
| Epoksi Yapıştırıcı | 1160                          | 3,78                    | 0.35          | 54.6                  |

Termal genişleme öngörülmesi / öngörülmesiz analizlerde alüminyum alaşımı plakasının ve epoksi yapıştırıcı malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.2’de de görüldüğü üzere termal genişleme öngörülmesi / öngörülmesiz analizlerde epoksi yapıştırıcı malzemenin elastisite modülü (EM) ve termal genişleme katsayısı (TGK,  $\alpha$ ) parametre olarak alınmıştır.

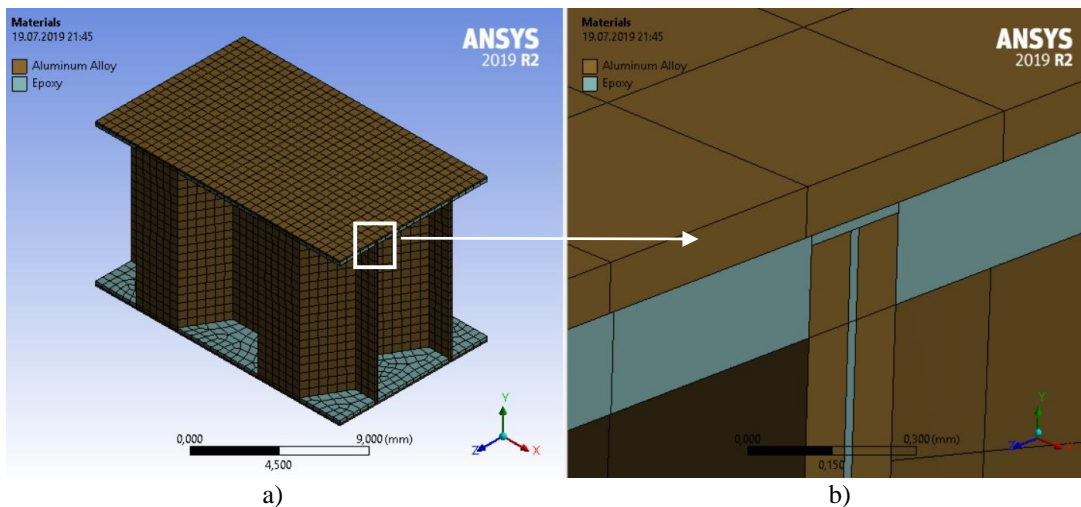
**Çizelge 3.2.** Termal genişleme öngörülmesi / öngörülmesiz analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

| Materyal             | Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> ) | Elastisite Modülü (EM) (GPa) | Poisson Oranı | Akma Mukavemeti (MPa) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) (10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup> ) | Isıl İletim Katsayısı (k) (w/m°C) |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|--|-----------------------------------|
| *Alüminyum Alaşımı   | 2770                          | 71                           | 0.33          | 280                   | 23   | (Çizelge 3.3)                     |
| Epoksi Yapıştırıcı 1 | 1160                          | 2,7                          | 0.35          | 54.6                  | 45   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 2 | 1160                          | 2,7                          | 0.35          | 54.6                  | 55   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 3 | 1160                          | 2,7                          | 0.35          | 54.6                  | 65   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 4 | 1160                          | 3,1                          | 0.35          | 54.6                  | 45   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 5 | 1160                          | 3,1                          | 0.35          | 54.6                  | 55   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 6 | 1160                          | 3,1                          | 0.35          | 54.6                  | 65   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 7 | 1160                          | 3,5                          | 0.35          | 54.6                  | 45   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 8 | 1160                          | 3,5                          | 0.35          | 54.6                  | 55   | 0.00021                           |
| Epoksi Yapıştırıcı 9 | 1160                          | 3,5                          | 0.35          | 54.6                  | 65   | 0.00021                           |

\*Tüm termal genişleme öngörülmesi / öngörülmesiz analizlerde alüminyum plakalar için aynı malzeme özellikleri kullanılmıştır.

**Çizelge 3.3.** Alüminyum alaşımı malzemenin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı

| Sıcaklık (°C) | Isıl İletim Katsayısı (k) (w/m°C) |
|---------------|-----------------------------------|
| -100          | 0.114                             |
| 0             | 0.144                             |
| 100           | 0.165                             |
| 200           | 0.175                             |



**Şekil 3.7.** Balpeteği yapı üzerinde kullanılan; a) malzemelerin renkli gösterimi, b) detay gösterim

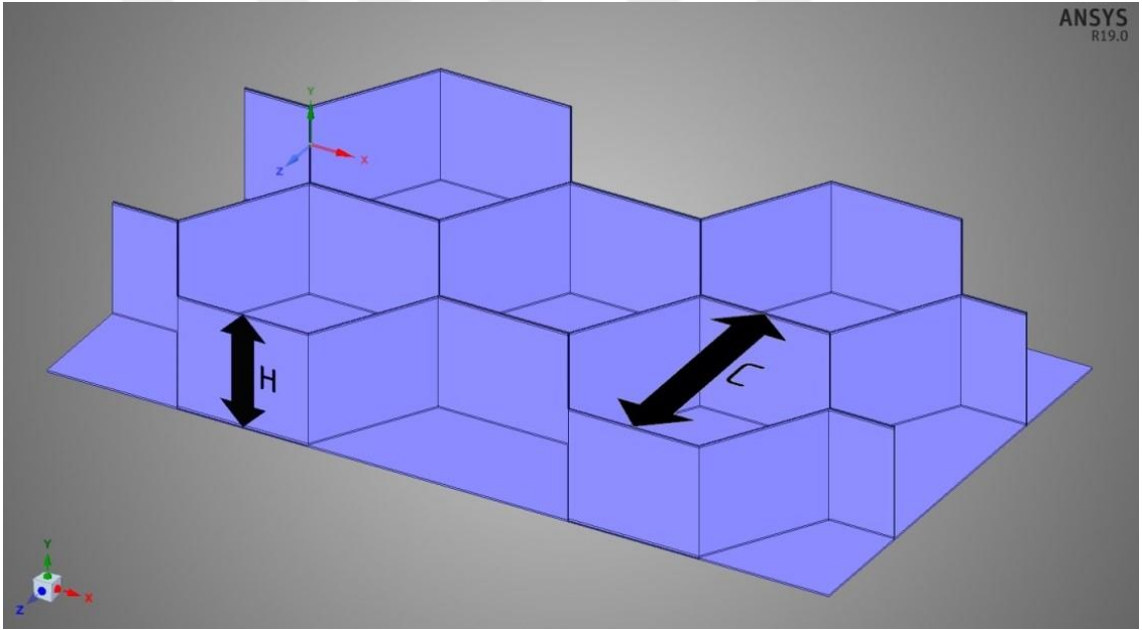
### 3.2.2. Boyut parametreleri

Yapılan çalışmada balpeteği kompozit malzeme için boyut parametreleri olarak;

- Kor geometrisi ölçüleri
    1. Kor genişliği
    2. Kor yüksekliği
  - Topoloji parametresi
- olarak seçilmiştir.

#### 3.2.2.1. Kor geometrisi parametreleri

Balpeteği geometrisinde kor parametreleri; kor genişliği 'C', kor yüksekliği 'H' için seçilen parametre ölçülerinin geometri üzerinde gösterimi Şekil 3.8'de görülmektedir. C ve H için seçilen parametre değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.



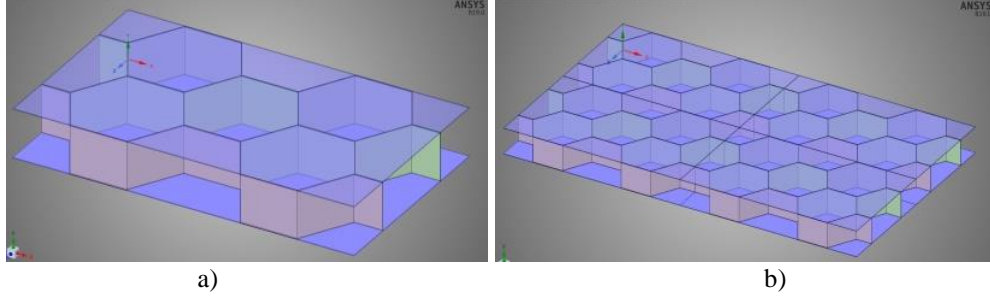
Şekil 3.8. Kor yüksekliği H, kor genişliği C parametrelerinin geometri görseli üzerinde gösterimi

Çizelge 3.4. Kor genişliği C ve kor yüksekliği H parametreleri için seçilen değerler

| C (mm) | H (mm) |
|--------|--------|
| 5      | 10     |
| 10     | 20     |
| 20     | 30     |

### 3.2.2.2. Topoloji parametresi

Topoloji parametreleri çeyrek model (1x Model) ve tam model (4x Model) (Şekil 3.9) olarak seçilmiştir.



Şekil 3.9. Topoloji parametreleri; a) 1x Model, b) 4x Model

### 3.2.3. Öngerilme parametreleri

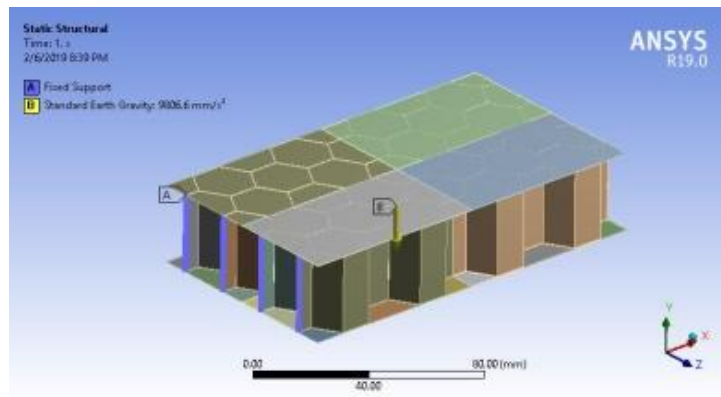
Tüm analizlerde iki öngerilme kullanılmıştır;

- Yerçekimi etkisi ile öngerilme
- 90 °C'lik sıcaklık farkından dolayı, termal genişleme sonucunda yapı üzerinde oluşan öngerilme

Öngerilme parametrelerinde yapının tamamına etki edecek parametreler seçebilmek adına bu parametrelere karar verilmiştir.

#### 3.2.3.1. Yerçekimi öngerilmesi

Yerçekimi öngerilmesi parametresinde, adından da anlaşılacağı üzere yükleme olarak sonlu elemanlar analizinde tüm düğüm noktalarına (node) eşit yükleme oluşturmak için -Y yönünde yerçekimi ivmesi (1G) (Şekil 3.10) verildi, böylece yapı üzerinde kendi ağırlığı ile öngerilme oluşması sağlandı.

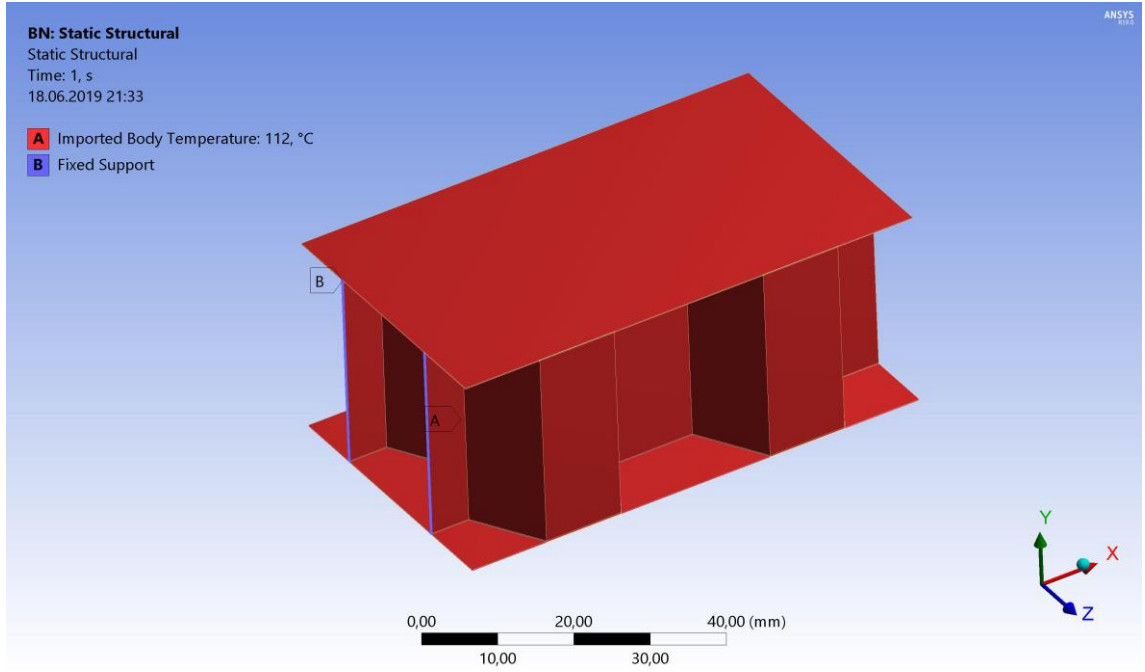


Şekil 3.10. Yerçekimi öngerilmesinin uygulama yönü ve geometrinin sabitlendiği bölgenin gösterimi



### 3.2.3.2. Termal genleşme öngerilmesi

Termal genleşme öngerilmesi parametresinde, yükleme olarak sonlu elemanlar analizinde tüm geometrinin sıcaklığını 22 °C'den 112 °C'ye çıkararak 90 °C'lik sıcaklık farkı oluşturuldu, termal çıktılar statik analize bağlanarak termal genleşme oluşması sağlandı (Şekil 3.11). Yapıyı bir bölgeden sabitlediğimiz için ve yapı termal genleşme katsayısı farklı olan iki malzemeden oluştuğu için bu genleşme sonucunda yapıda gerilme oluşmakta, böylece termal genleşme sonucunda öngerilme sağlanmış oldu.



Şekil 3.11. Termal genleşme öngerilmesi için geometrinin tamamına uygulanan 112 °C'lik sıcaklık ve geometrinin sabitlendiği bölgenin gösterimi

### 3.3. Analizler

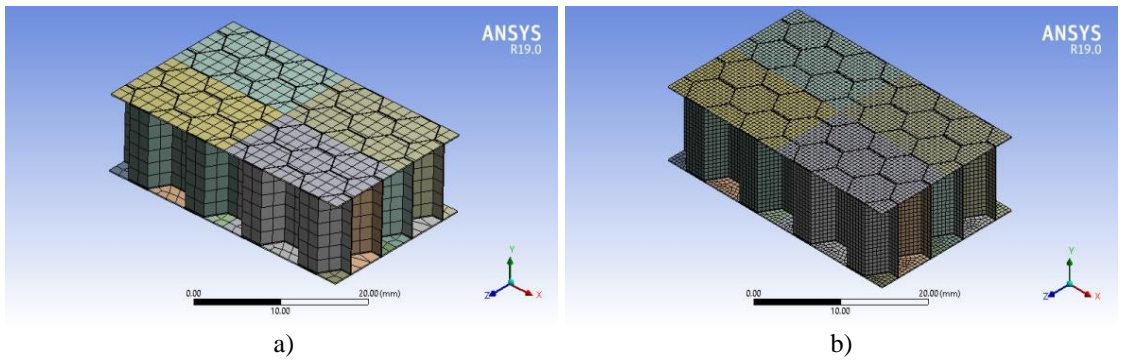
Hazırlanan FEM analizleri Ansys paket yazılımının R19.0 versiyonunda, 2 adet İntel E5-2620v4 8 çekirdek (toplam 16 çekirdek) işlemciye sahip, 160 GB ram'e, 1TB katı hal diskinde sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Analizler 16 paralel işlemci çekirdeğinde koşturulmuştur. Tarif edilen donanım üzerindeki işletim sistemi 64 bit Windows 10'dur. Destek ve yükler '3.2.3.1. Yerçekimi öngerilmesi' ve '3.2.3.2. Termal genleşme öngerilmesi' başlıklarında gösterilmiştir. Tüm parçaların kalınlıkları çok ince olduğu için geometri yüzey (shell) olarak modellenmiştir. Birbirine temas eden tüm yüzeylerde kaynak (bonded) kontak tipi kullanılmıştır. Modal analizlerde çözücü tipi 'subspace' olarak seçilmiştir.

### 3.3.1. Çözüm ağından bağımsız sonuçlar için yapılan hassasiyet analizleri

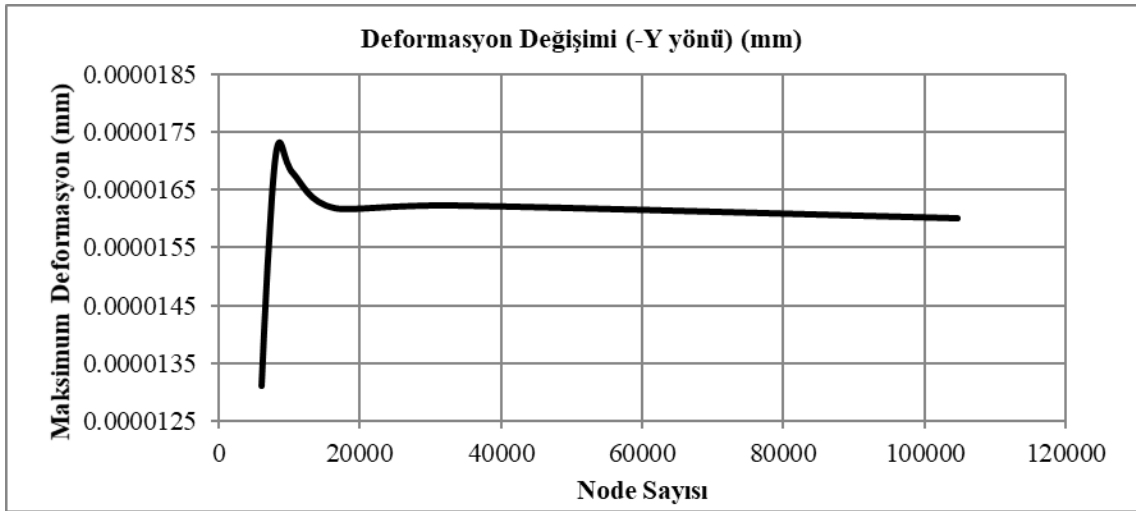
Yapılan analizlerin güvenilirliği ve çözüm ağından bağımsız sonlu elemanlar analizini oluşturmak için çözüm ağı hassasiyet çalışması yapıldı. Doğru çözüm ağı boyutları için aynı modelde farklı yoğunlukta (Şekil 3.12) mesh atılarak 7 adet analiz yapıldı (Çizelge 3.5). Bu analizlerin sonucunda mesh boyutları ortalama 0.5 mm'ye yaklaştıkça deformasyon değeri değişimi çok küçülmektedir (Şekil 3.13, Şekil 3.14), bu sebeple mesh boyutu için 0.5 mm'lik ölçü kullanıldı. Burada amaç sonlu elemanlar analizinde en doğru sonlu elemanlar ağ yoğunluğunu yakalayıp çözümün doğruluğunun çözüm ağı parametresinden bağımsız olmasını sağlamaktır. Çözüm ağından bağımsız analizlerde, kor genişliği değerinin 5 mm, kor yüksekliği değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model (4x Model) olduğu yerçekimi öngermeli model kullanılmıştır.

**Çizelge 3.5.** Çözüm ağından bağımsız analiz için farklı sonlu elemanlar ağı ölçüleri ile yapılan analiz denemeleri sonucunda node sayısı ve maksimum deformasyon değerleri

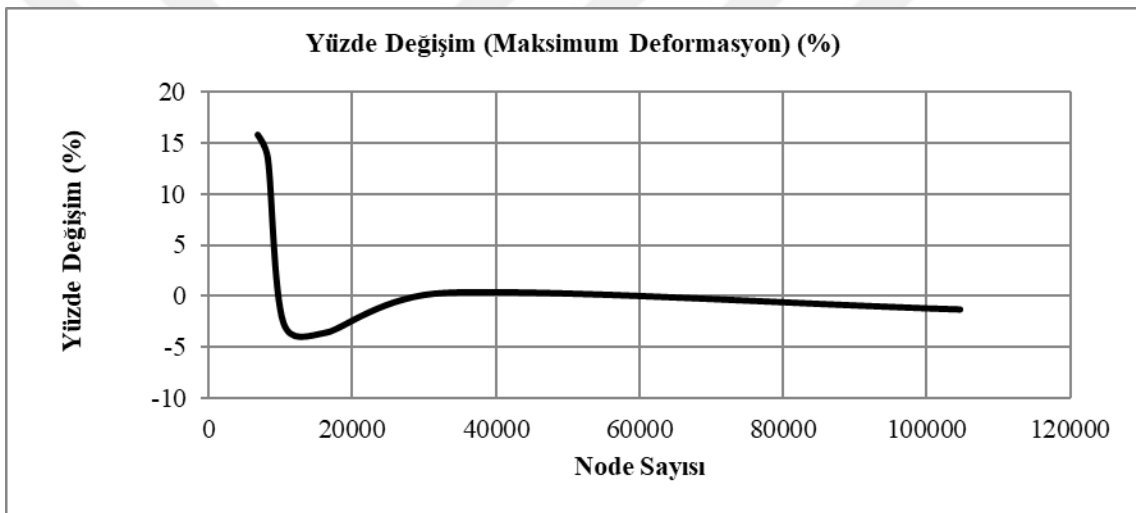
|           | Mesh Ölçüsü (mm) | Node Sayısı | Maksimum Deformasyon (-Y yönü) (mm) |
|-----------|------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1. Analiz | 10               | 6040        | 1.31E-05                            |
| 2. Analiz | 5                | 6882        | 1.52E-05                            |
| 3. Analiz | 2.5              | 8284        | 1.72E-05                            |
| 4. Analiz | 2                | 10454       | 1.68E-05                            |
| 5. Analiz | 1.5              | 16480       | 1.62E-05                            |
| 6. Analiz | 1                | 33180       | 1.62E-05                            |
| 7. Analiz | 0.5              | 104728      | 1.60E-05                            |



**Şekil 3.12.** Çözüm ağı ortalama boyutu; a) 1.5 mm, b) 0.5 mm



Şekil 3.13. Çözüm ağının yoğunlaştırılması sonucunda maksimum deformasyon değerinin değişimi



Şekil 3.14. Çözüm ağının yoğunlaştırılması sonucunda deformasyon sonuçlarının yüzde değişimi

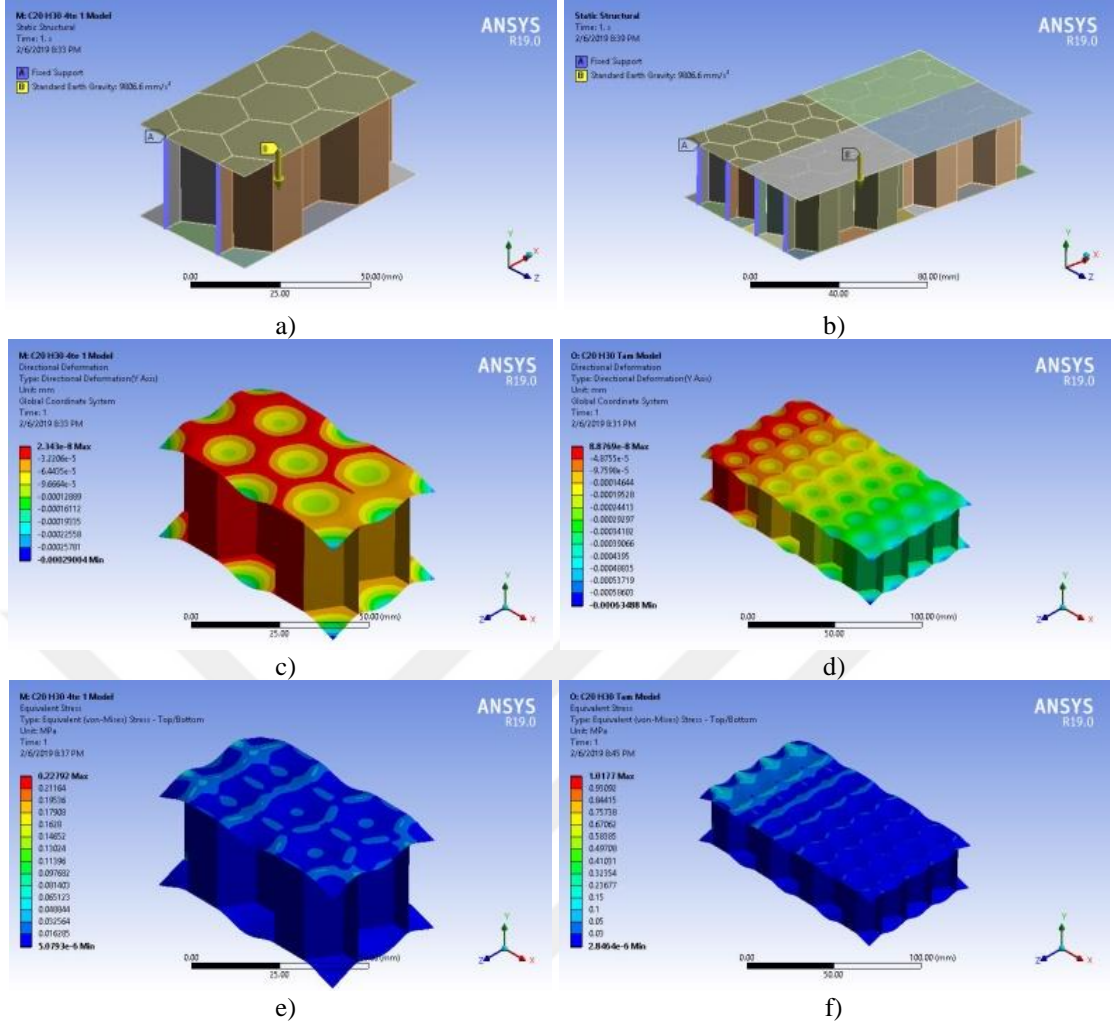
### 3.3.2. Yerçekimi öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analizler

Parametreler başlığı altındaki yerçekimi öngerilmesi etkisinin tüm parametreler kullanılarak karşılaştırma yapılabilmesi için 18 adet yerçekimi öngerilmeli, 18 adet öngerilmemiş olarak toplamda 36 adet analiz (Çizelge 3.6) yapılmıştır. Analizler sonucunda çıkan özdeğer (mod) frekanslarının ve özvektörlerin kütlelerin yüzde kaçını (etkilenen kütle oranı) harekete geçirdiği 6 serbestlik yönünde (X, Y, Z, ROTX, ROTY, ROTZ) ilk 100 doğal frekansta incelenmiştir.

**Çizelge 3.6.** Yerçekimi öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analiz varyasyonları

| Analizler | Yer Çekimi Öngerilmesi | Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) |
|-----------|------------------------|-----------------------|----------|------------------------|
| 1         | Öngerilmeli            | C: 5                  | 1x Model | H: 10                  |
| 2         |                        |                       |          | H: 20                  |
| 3         |                        |                       |          | H: 30                  |
| 4         |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 5         |                        |                       |          | H: 20                  |
| 6         |                        |                       |          | H: 30                  |
| 7         |                        | C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |
| 8         |                        |                       |          | H: 20                  |
| 9         |                        |                       |          | H: 30                  |
| 10        |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 11        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 12        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 13        |                        | C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |
| 14        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 15        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 16        |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 17        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 18        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 19        | Öngerilmesiz           | C: 5                  | 1x Model | H: 10                  |
| 20        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 21        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 22        |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 23        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 24        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 25        |                        | C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |
| 26        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 27        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 28        |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 29        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 30        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 31        |                        | C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |
| 32        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 33        |                        |                       |          | H: 30                  |
| 34        |                        |                       | 4x Model | H: 10                  |
| 35        |                        |                       |          | H: 20                  |
| 36        |                        |                       |          | H: 30                  |

Yerçekimi öngerilme etkisinin modal analizde dahil edilmesi için çözülen statik analizlerin sonucunda deformasyon ve gerilme görselleri Şekil 3.15'teki gibidir.



Şekil 3.15. C: 20 mm, H: 30 mm, 1x Model yerçekimi öngerilmeli analiz; a) analiz senaryosu görseli, c) 15,000 kat abartılmış deformasyon görseli, e) 15,000 kat abartılmış gerilme görseli. C: 20 mm, H: 30 mm, 4x Model yerçekimi öngerilmeli analiz; b) analiz senaryosu görseli, d) 13,000 kat abartılmış deformasyon görseli, f) 13,000 kat abartılmış gerilme görseli

### 3.3.3. Termal genleşme öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analizler

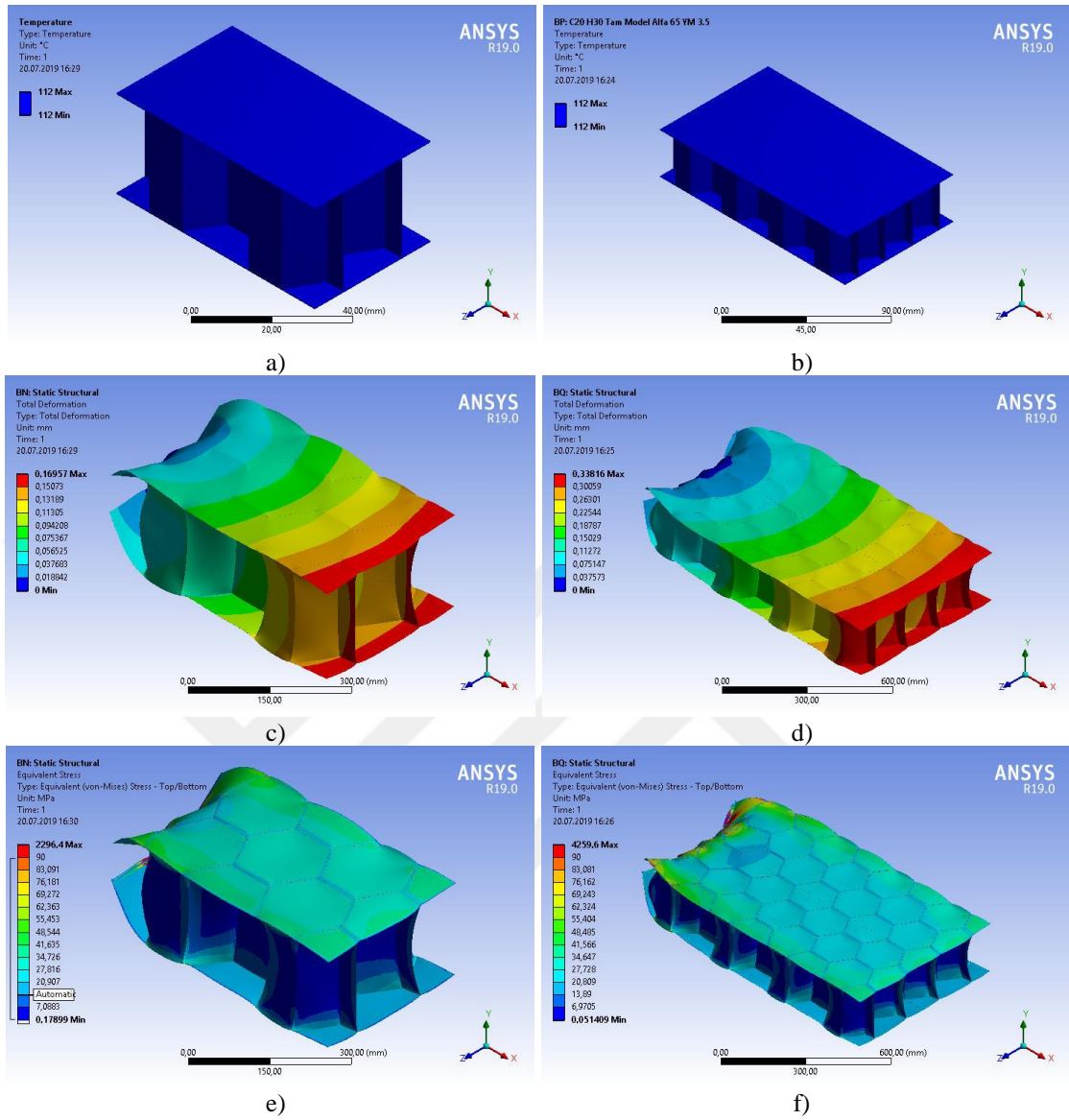
Parametreler başlığı altındaki termal genleşme öngerilmesi etkisinin tüm parametreler kullanılarak karşılaştırma yapılabilmesi için 162 adet termal genleşme öngerilmeli, 162 adet öngerilmemiş olarak toplamda 324 adet analiz (Çizelge 3.7) yapılmıştır. Analizler sonucunda çıkan özdeğer (mod) frekanslarının ve özvektörlerin kütlelerin yüzde kaçımı (etkilenen kütle oranı) harekete geçirdiği 6 serbestlik yönünde (X, Y, Z, ROTX, ROTY, ROTZ) ilk 100 doğal frekansta incelenmiştir.

Çizelge 3.7. Termal genleşme öngerilmesi etkisinin incelenmesi için yapılan analiz varyasyonları

| Analizler | Termal Genleşme Öngerilmesi | Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genleşme Katsayısı ( $\alpha$ )( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) |
|-----------|-----------------------------|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|
| 1         | Öngerilmeli                 | C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 45   | 2.7                         |
| 2         |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 3         |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 4         |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 5         |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 6         |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 7         |                             | C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |
| 8         |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 9         |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 10        |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 11        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 12        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 13        |                             | C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |
| 14        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 15        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 16        |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 17        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 18        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 19        | Öngerilmesiz                | C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 45   | 2.7                         |
| 20        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 21        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 22        |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 23        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 24        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 25        |                             | C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |
| 26        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 27        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 28        |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 29        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 30        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 31        |                             | C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |
| 32        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 33        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 34        |                             |                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |
| 35        |                             |                       |          | H: 20                  |  |                             |
| 36        |                             |                       |          | H: 30                  |  |                             |
| 72        |                             | *...                  |          |                        |  | 3.1                         |
| 108       |                             | *...                  |          |                        |  | 3.5                         |
| 144       |                             | *...                  |          |                        | 55   | 2.7                         |
| 180       |                             | *...                  |          | 3.1                    |  |                             |
| 216       |                             | *...                  |          | 3.5                    |  |                             |
| 252       |                             | *...                  |          |                        | 65   | 2.7                         |
| 288       |                             | *...                  |          | 3.1                    |  |                             |
| 324       |                             | *...                  |          | 3.5                    |  |                             |

\*'...' işareti bulunan kutuların her birinde çizelgede koyu renkli kutu ile çizilen bölge içerisindeki varyasyonların aynı bulunduğu belirtilmektedir. Çizelgenin boyutu çok büyük olduğundan dolayı sayfaya sığmayacağı için böyle bir kısaltmaya gidilmiştir.

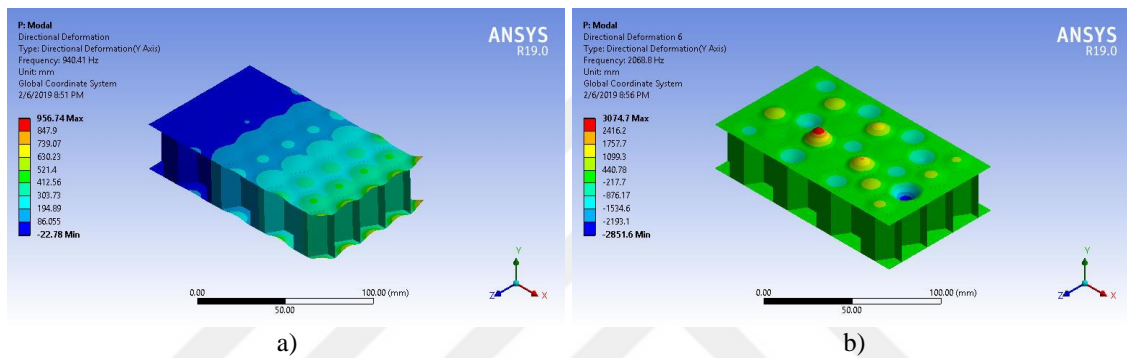
Termal genleşme öngerilme etkisinin modal analizde dahil edilmesi için çözülen steady-state termal, termal genleşme etkisinin oluşması için çözülen statik analizlerin sonucunda deformasyon ve gerilme görselleri Şekil 3.16'daki gibidir.



**Şekil 3.16.** C: 20 mm, H: 30 mm, 1x Model, TGK:  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , EM: 3.5 GPa termal genişleme öngörilmeli analiz; a) termal analiz sonuç görseli, c) 3,000 kat abartılmış deformasyon görseli, e) 3,000 kat abartılmış gerilme görseli. C: 20 mm, H: 30 mm, 4x Model, TGK:  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , EM: 3.5 GPa termal genişleme öngörilmeli analiz; b) termal analiz sonuç görseli, d) 3,000 kat abartılmış deformasyon görseli, f) 3,000 kat abartılmış gerilme görseli

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Modal analizler sonucunda bulunan doğal frekans sonuçlarının yapı üzerinde meydana getirdiği deformasyon görsellerinden birkaçı Şekil 4.1’de görülmektedir. Yapılan analiz çalışmaları sonucunda bulunan mod, kütleinin %5’inden fazlasını harekete geçiriyorsa ‘ana mod’ (Şekil 4.1-a), kütleinin %5’inden daha düşük bir oranını harekete geçiriyorsa ‘lokal mod’ (Şekil 4.1-b) olarak adlandırılmıştır. Bulunan doğal frekans değeri küçük bir kütleiyi harekete geçiriyorsa o doğal frekans değeriinde yapı rezonansa girse bile yapıya zarar verme ihtimali azalır.



Şekil 4.1. C: 20 H: 30 4x Model yerçekimi öngerilmeli balpeteği kompozit malzemenin doğal frekans analizi sonucunda Y yönünde; a) ana mod salınım görseli, b) lokal mod salınım görseli

### 4.1. Öngerilmenin Gerilme ve Deformasyon Sonuçları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Öngerilme etkisi sonucunda yapı üzerinde oluşan gerilmelerin, yapının doğal titreşim davranışları üzerinde etkisinin olduğu teorik altyapıdan bilinmektedir. Bu sebeple parametre değerlerinin değişimi sonucunda öngerilme etkisiyle oluşan gerilme ve deformasyonların ayrıca incelenmesine karar verilmiştir.

#### 4.1.1. Yerçekimi öngerilmesinin gerilme ve deformasyon sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi

Yapılan öngerilmeli analizler sonucunda maksimum gerilme ve deformasyonlar Çizelge 4.1’de görülmektedir. Boyut parametrelerinin varyasyonları ile yerçekimi öngerilmeli analizlerin sonucunda çıkan maksimum gerilme (Şekil 4.2) ve maksimum deformasyon (Şekil 4.3) grafikleri incelendiğinde:



- Kor genişliği parametresi arttıkça yapının maksimum deformasyon değerinin ve gerilme değerinin artmasından dolayı yapının rijitliğinin azalmakta olduğu belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresi arttıkça yapının maksimum deformasyon değerinin ve gerilme değerinin azalmasından dolayı yapının rijitliğinin arttığı belirlenmiştir.

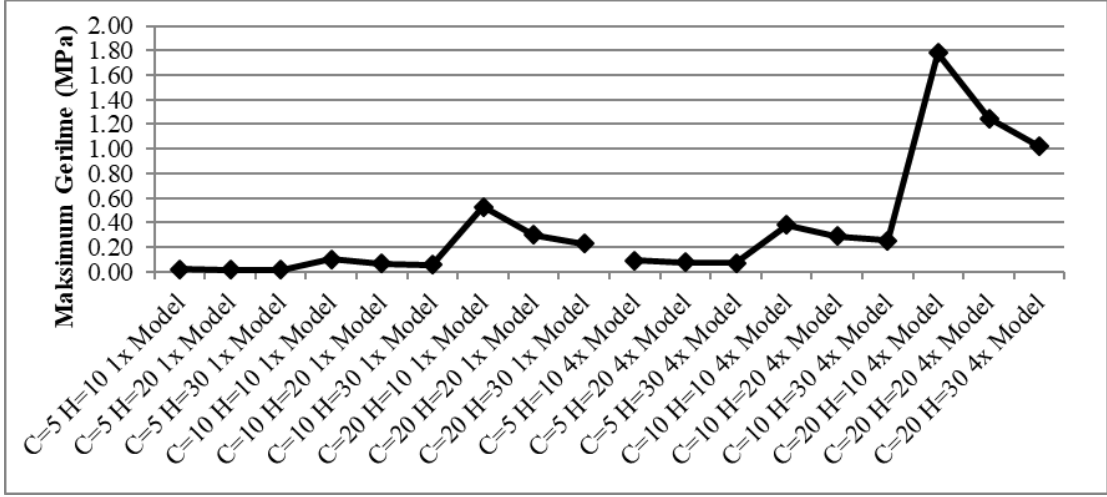
Yapılan öngerilme analizlerinin sonucunda bulunan gerilme, deformasyon değerlerinin ve parametrelerin değişimleri sonucunda yapının kütle değişimini topoloji parametresi olan 1x Model ve 4x Model arasında incelediğimizde (Şekil 4.4);

- 4x Model'in kütlesi 1x Model'inkine göre %300 civarında artış gösterdiği, 4x Model'in 1x Model'in neredeyse 4 katı olduğu açıkça görülmektedir.
- Gerilme ve deformasyon değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

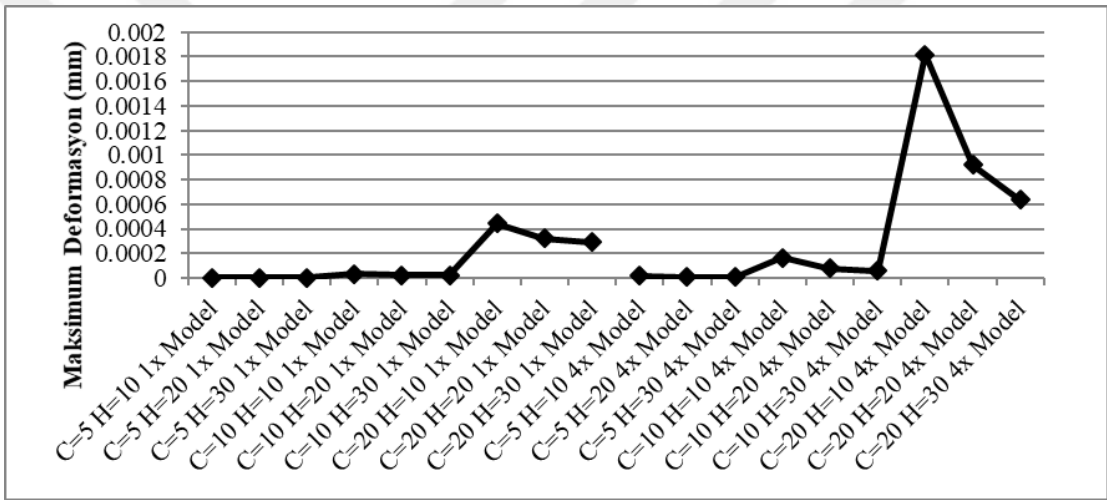
Şekil 4.5'te parametre değişimleri sonucunda toplam kütle değişimini görmekteyiz, doğal olarak boyutlar büyüdükçe kütle artmaktadır. Balpeteği kompozit malzemenin yüksek hafiflik ve yüksek rijitlik özelliğinden dolayı incelediğimiz parametrelerde en büyük modelin bile kendi ağırlığı altındaki gerilme ve deformasyon değerlerinin çok düşük çıktığı belirlenmiştir.

**Çizelge 4.1.** Yerçekimi öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen maksimum gerilme, maksimum deformasyon ve toplam kütle verileri

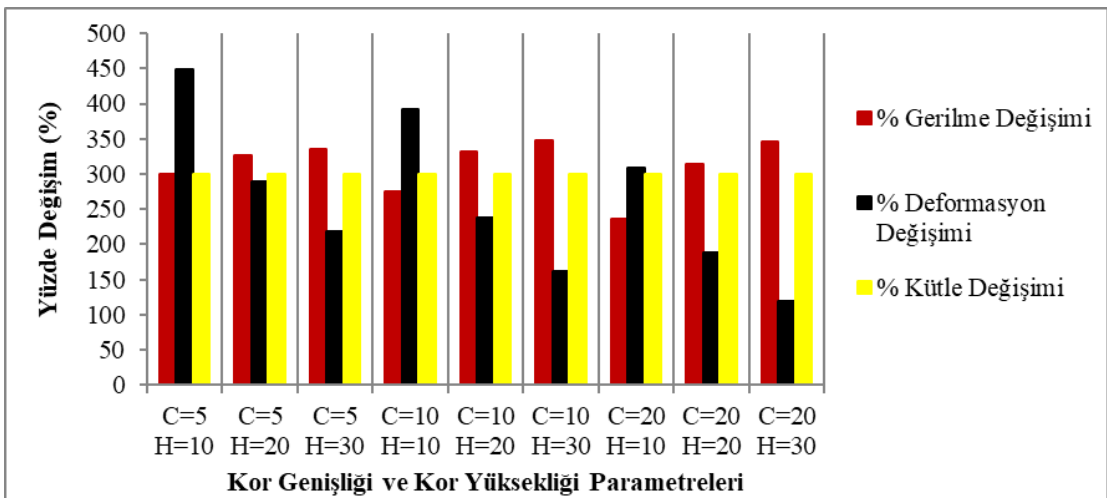
| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 0.023324               | 0.0000029464              | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  | 0.018016               | 0.0000021311              | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  | 0.016245               | 0.0000019208              | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 0.093365               | 0.000016161               | 0.001761          |
|                       |          | H: 20                  | 0.076967               | 0.0000083078              | 0.0028033         |
|                       |          | H: 30                  | 0.070761               | 0.000006112               | 0.0038456         |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  | 0.10152                | 0.000033644               | 0.0012318         |
|                       |          | H: 20                  | 0.067112               | 0.000023912               | 0.0017516         |
|                       |          | H: 30                  | 0.056296               | 0.000021549               | 0.0022714         |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 0.38089                | 0.00016527                | 0.0049327         |
|                       |          | H: 20                  | 0.28933                | 0.000080723               | 0.0070172         |
|                       |          | H: 30                  | 0.25223                | 0.000056227               | 0.0091018         |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  | 0.52953                | 0.00044503                | 0.0038743         |
|                       |          | H: 20                  | 0.30068                | 0.00031969                | 0.0049139         |
|                       |          | H: 30                  | 0.22792                | 0.00029014                | 0.0059535         |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 1.7804                 | 0.001817                  | 0.015508          |
|                       |          | H: 20                  | 1.2455                 | 0.00092201                | 0.019677          |
|                       |          | H: 30                  | 1.0177                 | 0.00063656                | 0.023846          |



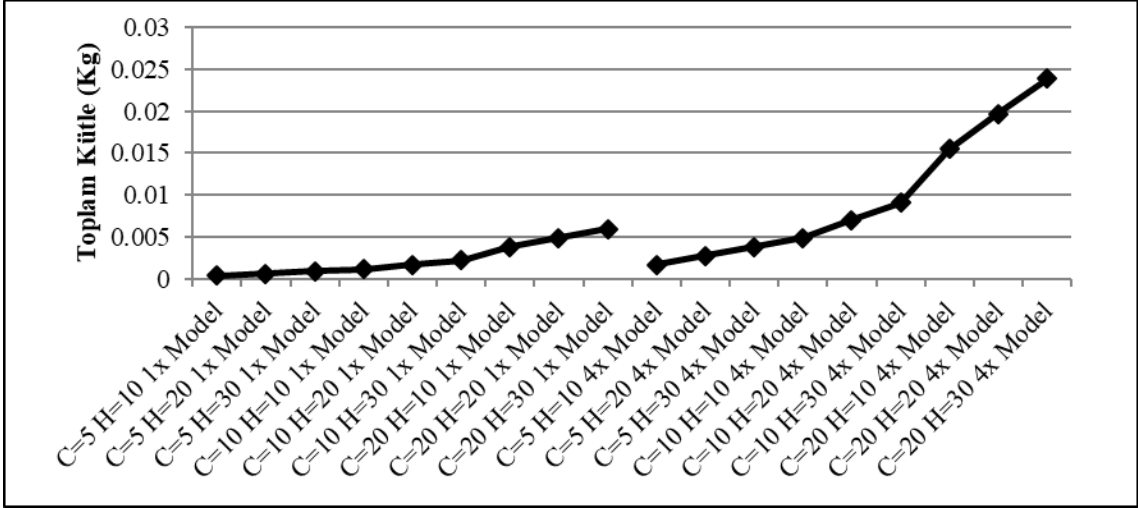
Şekil 4.2. Yerçekimi öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerlerinin grafiği



Şekil 4.3. Yerçekimi öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen maksimum deformasyon değerlerinin grafiği



Şekil 4.4. Topoloji parametresinin yerçekimi öngerilmeli analizlerde 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda maksimum gerilme, maksimum deformasyon ve toplam kütle'nin yüzde değişim grafiği



Şekil 4.5. Yerçekimi öngerilmeli analizlerde kullanılan modellerin toplam kütle grafiği

#### 4.1.2. Termal genleşme öngerilmesinin gerilme ve deformasyon sonuçları üzerindeki etkisinin incelenmesi

Parametre bölümünde bahsedildiği üzere termal genleşme öngerilme etkisini incelemek için 324 adet analiz yapıldı. Yapılan termal genleşme öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen maksimum gerilme, deformasyon ve her bir analizdeki toplam kütleler Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10'da görülmektedir. Bu analizler sonucunda öngerilme etkisinin gerilme ve deformasyon değişimlerini detaylı inceleyebilmek için birçok tablo ve grafikten faydalanmak gerekti. Bu grafik ve şekillerin çokluğu sebebi ile termal genleşme öngerilme etkisinin gerilme ve deformasyonlar üzerindeki etkisi her parametre için ayrı başlıklarda değerlendirilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 45   | 2.7                         | 895.67                 | 0.040071                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1092.70                | 0.042986                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1206.00                | 0.060369                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1385.40                | 0.079529                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1567.20                | 0.080665                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1682.90                | 0.083065                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1166.20                | 0.079194                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1434.60                | 0.079730                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1599.20                | 0.081938                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2161.60                | 0.158830                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2413.70                | 0.158430                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2570.70                | 0.159120                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1720.40                | 0.158620                  | 0.00387430        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1990.80                | 0.157990                  | 0.00491390        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2199.00                | 0.158120                  | 0.00595350        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 3648.40                | 0.318560                  | 0.01550800        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 3919.40                | 0.317000                  | 0.01967700        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 4124.80                | 0.316280                  | 0.02384600        |

**Çizelge 4.3.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan öngerilmeli analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 45   | 3.1                         | 893.37                 | 0.040325                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1091.30                | 0.043212                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1205.10                | 0.060411                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1376.70                | 0.080037                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1560.20                | 0.081153                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1677.70                | 0.083536                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1161.40                | 0.079744                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1431.80                | 0.080252                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1597.60                | 0.082436                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2140.90                | 0.159950                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2394.30                | 0.159460                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2552.90                | 0.160120                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1709.60                | 0.159800                  | 0.00387430        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1982.30                | 0.159090                  | 0.00491390        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2192.60                | 0.159190                  | 0.00595350        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 3605.10                | 0.320990                  | 0.01550800        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 3875.90                | 0.319250                  | 0.01967700        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 4081.80                | 0.318410                  | 0.02384600        |

**Çizelge 4.4.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |          |            |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 45   | 3.5                         | 890.86                 | 0.040576                  | 0.00043959        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1089.30                | 0.043436                  | 0.00069949        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1203.30                | 0.060447                  | 0.00095939        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1368.50                | 0.080534                  | 0.00176100        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1553.30                | 0.081630                  | 0.00280330        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1672.10                | 0.083997                  | 0.00384560        |          |            |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 1156.70           | 0.080284 | 0.00123180 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 1428.60           | 0.080767 | 0.00175160 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 1595.10           | 0.082930 | 0.00227140 |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 2122.40           | 0.161040 | 0.00493270 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 2376.60           | 0.160470 | 0.00701720 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 2536.40           | 0.161110 | 0.00910180 |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1699.70                | 0.160960                  | 0.00387430        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1974.10                | 0.160180                  | 0.00491390        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2186.00                | 0.160240                  | 0.00595350        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 3566.70                | 0.323380                  | 0.01550800        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 3837.10                | 0.321450                  | 0.01967700        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 4043.20                | 0.320500                  | 0.02384600        |          |            |

**Çizelge 4.5.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |          |            |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 55   | 2.7                         | 906.85                 | 0.041034                  | 0.00043959        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1103.70                | 0.043860                  | 0.00069949        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1216.80                | 0.060403                  | 0.00095939        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1409.60                | 0.081273                  | 0.00176100        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1591.20                | 0.082334                  | 0.00280330        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1707.10                | 0.084673                  | 0.00384560        |          |            |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 1188.30           | 0.081129 | 0.00123180 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 1457.70           | 0.081580 | 0.00175160 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 1622.10           | 0.083719 | 0.00227140 |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 2208.80           | 0.162550 | 0.00493270 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 2460.10           | 0.161840 | 0.00701720 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 2616.70           | 0.162430 | 0.00910180 |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1762.20                | 0.162660                  | 0.00387430        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2033.70                | 0.161780                  | 0.00491390        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2242.70                | 0.161800                  | 0.00595350        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 3740.90                | 0.326590                  | 0.01550800        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 4008.50                | 0.324370                  | 0.01967700        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 4211.90                | 0.323230                  | 0.02384600        |          |            |

**Çizelge 4.6.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 55   | 3.1                         | 906.12                 | 0.041406                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1103.80                | 0.044197                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1217.50                | 0.060450                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1404.00                | 0.082005                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1587.20                | 0.083037                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1705.00                | 0.085353                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1186.50                | 0.081930                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1458.00                | 0.082343                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1623.60                | 0.084452                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2194.10                | 0.164170                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2446.60                | 0.163320                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2604.80                | 0.163880                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  | 1756.90  | 0.164370                    | 0.00387430             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 2030.90  | 0.163390                    | 0.00491390             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 2242.10  | 0.163360                    | 0.00595350             |                           |                   |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 3708.70  | 0.330110                    | 0.01550800             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 3975.80  | 0.327620                    | 0.01967700             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 4179.70  | 0.326310                    | 0.02384600             |                           |                   |

**Çizelge 4.7.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 55   | 3.5                         | 905.12                 | 0.041772                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1103.30                | 0.044526                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1217.10                | 0.060492                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1398.80                | 0.082721                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1583.30                | 0.083725                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1702.40                | 0.086019                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1184.70                | 0.082717                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1457.80                | 0.083095                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1624.20                | 0.085176                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2181.20                | 0.165750                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2434.50                | 0.164780                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2593.80                | 0.165300                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  | 1752.10  | 0.166060                    | 0.00387430             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 2028.20  | 0.164980                    | 0.00491390             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 2241.20  | 0.164900                    | 0.00595350             |                           |                   |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 3680.80  | 0.333560                    | 0.01550800             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 3947.40  | 0.330800                    | 0.01967700             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 4151.40  | 0.329330                    | 0.02384600             |                           |                   |

**Çizelge 4.8.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 65   | 2.7                         | 918.07                 | 0.041999                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1114.80                | 0.044740                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1227.70                | 0.060437                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1433.80                | 0.083019                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1615.20                | 0.084005                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1731.40                | 0.086286                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1210.50                | 0.083066                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1480.80                | 0.083433                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1645.10                | 0.085508                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2256.10                | 0.166280                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2506.60                | 0.165250                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2662.80                | 0.165750                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  | 1804.10  | 0.166690                    | 0.00387430             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 2076.70  | 0.165580                    | 0.00491390             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 2286.40  | 0.165490                    | 0.00595350             |                           |                   |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 3833.50  | 0.334630                    | 0.01550800             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 4097.60  | 0.331740                    | 0.01967700             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 4299.00  | 0.330190                    | 0.02384600             |                           |                   |

**Çizelge 4.9.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 65   | 3.1                         | 918.92                 | 0.042489                  | 0.00043959        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1116.50                | 0.045185                  | 0.00069949        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1229.90                | 0.060490                  | 0.00095939        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1431.30                | 0.083974                  | 0.00176100        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1614.40                | 0.084924                  | 0.00280330        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1732.40                | 0.087177                  | 0.00384560        |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1211.70                | 0.084118                  | 0.00123180        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1484.30                | 0.084438                  | 0.00175160        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1649.70                | 0.086477                  | 0.00227140        |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 2247.30                | 0.168390                  | 0.00493270        |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2499.00                | 0.167190                  | 0.00701720        |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2656.70                | 0.167640                  | 0.00910180        |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  | 1804.20  | 0.168950                    | 0.00387430             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 2079.60  | 0.167700                    | 0.00491390             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 2291.70  | 0.167550                    | 0.00595350             |                           |                   |
|                       | 4x Model | H: 10                  | 3812.30  | 0.339240                    | 0.01550800             |                           |                   |
|                       |          | H: 20                  | 4075.80  | 0.335990                    | 0.01967700             |                           |                   |
|                       |          | H: 30                  | 4277.60  | 0.334210                    | 0.02384600             |                           |                   |

**Çizelge 4.10.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizler sonucunda elde edilen; gerilme, deformasyon sonuçlarının ve ilgili geometrinin toplam kütle tablosu

| Kor Genişliği (C, mm) | Topoloji | Kor Yüksekliği (H, mm) | Termal Genişleme Katsayısı (TGK, $\alpha$ ) ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) | Elastisite Modülü (EM)(GPa) | Maksimum Gerilme (MPa) | Maksimum Deformasyon (mm) | Toplam Kütle (Kg) |          |            |
|-----------------------|----------|------------------------|--|-----------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|----------|------------|
| C: 5                  | 1x Model | H: 10                  | 65   | 3.5                         | 919.45                 | 0.042971                  | 0.00043959        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1117.50                | 0.045625                  | 0.00069949        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1231.00                | 0.060539                  | 0.00095939        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 1429.20                | 0.084910                  | 0.00176100        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 1613.40                | 0.085824                  | 0.00280330        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 1732.80                | 0.088051                  | 0.00384560        |          |            |
| C: 10                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 1212.80           | 0.085151 | 0.00123180 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 1487.20           | 0.085428 | 0.00175160 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 1653.30           | 0.087433 | 0.00227140 |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             |                        |                           | 2240.00           | 0.170460 | 0.00493270 |
|                       |          | H: 20                  |  |                             |                        |                           | 2492.50           | 0.169090 | 0.00701720 |
|                       |          | H: 30                  |  |                             |                        |                           | 2651.40           | 0.169500 | 0.00910180 |
| C: 20                 | 1x Model | H: 10                  |  |                             | 1804.60                | 0.171160                  | 0.00387430        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 2082.40                | 0.169780                  | 0.00491390        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 2296.40                | 0.169570                  | 0.00595350        |          |            |
|                       | 4x Model | H: 10                  |  |                             | 3794.90                | 0.343750                  | 0.01550800        |          |            |
|                       |          | H: 20                  |  |                             | 4057.70                | 0.340160                  | 0.01967700        |          |            |
|                       |          | H: 30                  |  |                             | 4259.60                | 0.338160                  | 0.02384600        |          |            |

#### 4.1.2.1. Kor genişliği ve kor yüksekliği parametrelerinin termal genişleme öngörülmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

Kor genişliği, kor yüksekliği parametrelerinin değişimi ile öngörülmesi analizlerin sonucunda çıkan maksimum gerilme ve maksimum deformasyon değerleri Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te ki grafiklerde ayrı ayrı görselleştirilmiştir.

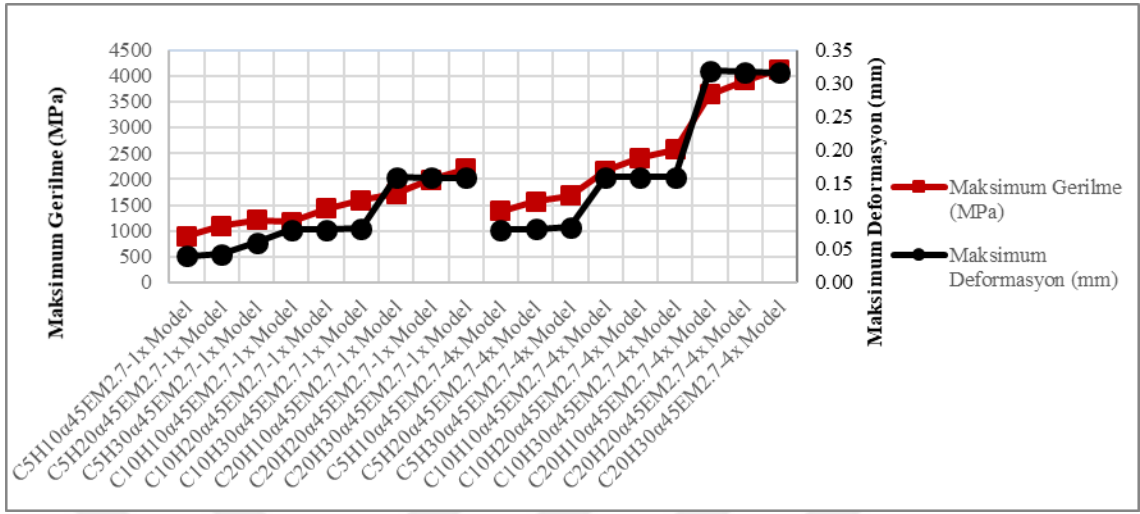
Kor genişliği parametresinin ve kor yüksekliği parametrelerinin değerleri arttıkça, gerilme ve deformasyon değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

Deformasyon değişimleri daha dikkatli incelendiğinde kor genişliği parametresinin değeri arttığında deformasyon değerlerinin de neredeyse tüm analizlerde 2 kat arttığı görülmekte. Ancak kor yüksekliği parametresinin değeri 20 mm'den 30 mm'ye artarken deformasyon değişimi sadece kor genişliği parametresinin değeri 5 mm iken dikkat çekici bir değişim olurken, diğer kor yüksekliği parametresi değerlerinde genellikle neredeyse sabit kalmaktadır.

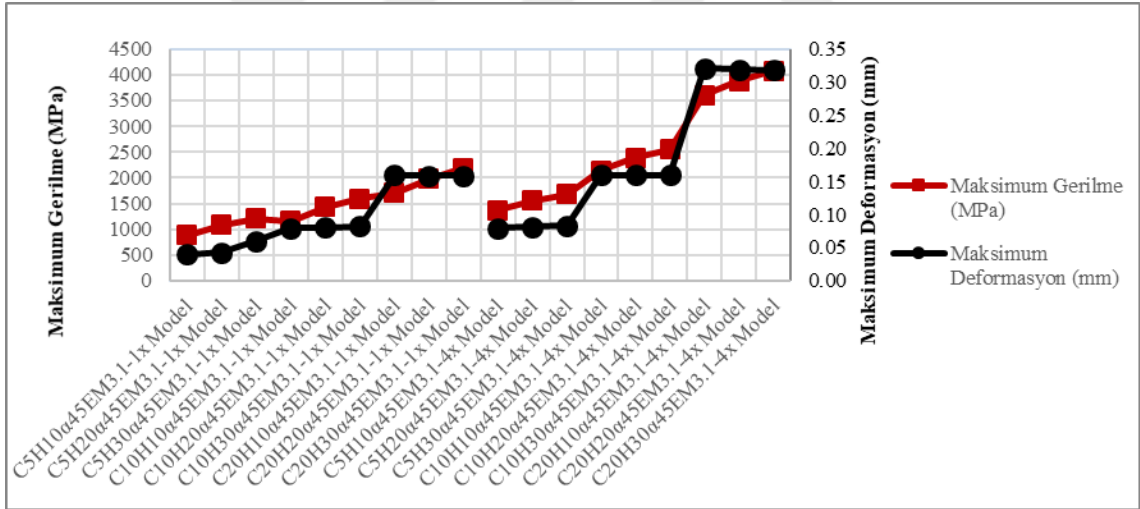
Termal genişleme öngörülmesi etkisi sonucunda yapı yerçekimi öngörülmesi analizde olduğu gibi tek bir yöne değil de tüm yönler doğru deformasyon göstermektedir. Bu nedenle kor genişliği ve kor yüksekliği parametrelerinin rijitlik



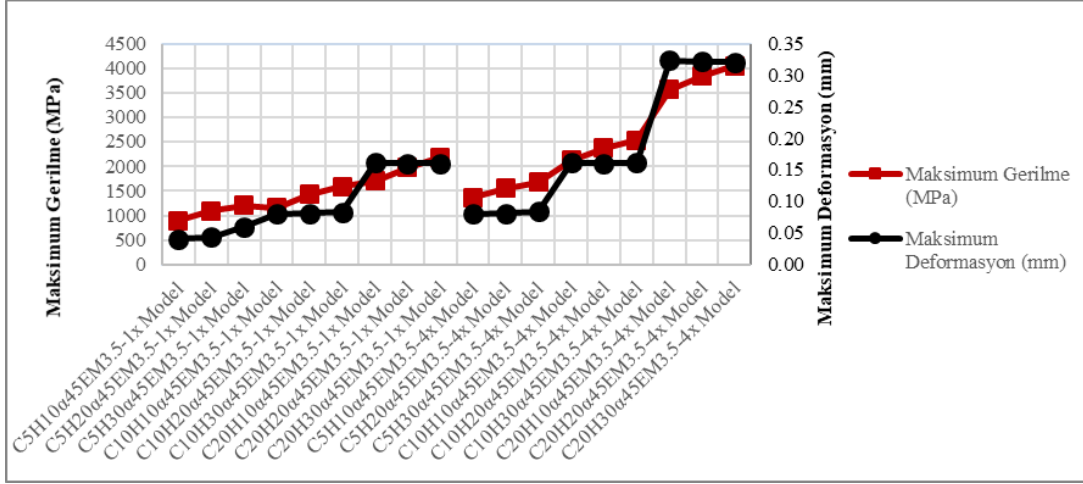
üzerine etkisi, deformasyon ve gerilme sonuçları incelenerek bir yorum yapılamamaktadır. Sadece teorik alt yapıdan gerilmenin rijitliği artırdığı bilinmektedir.



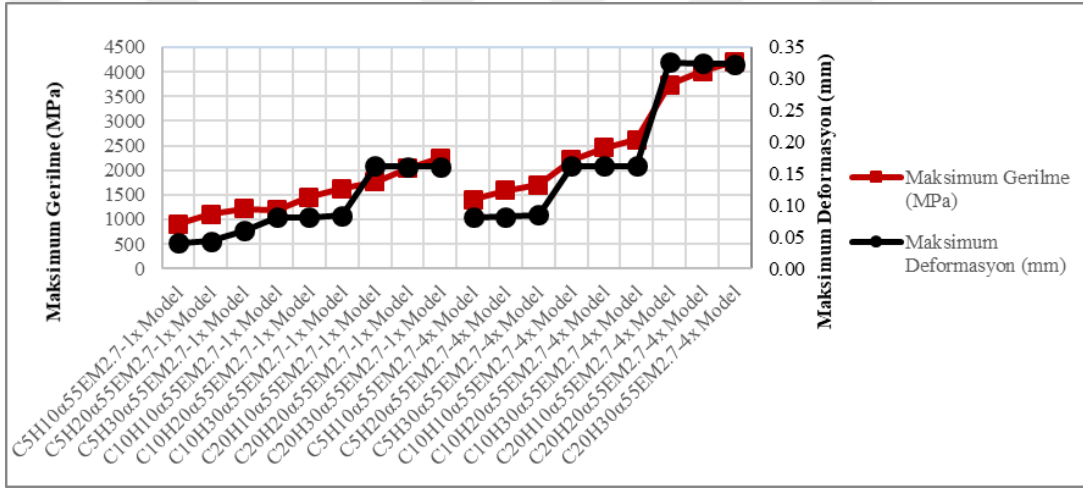
Şekil 4.6. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



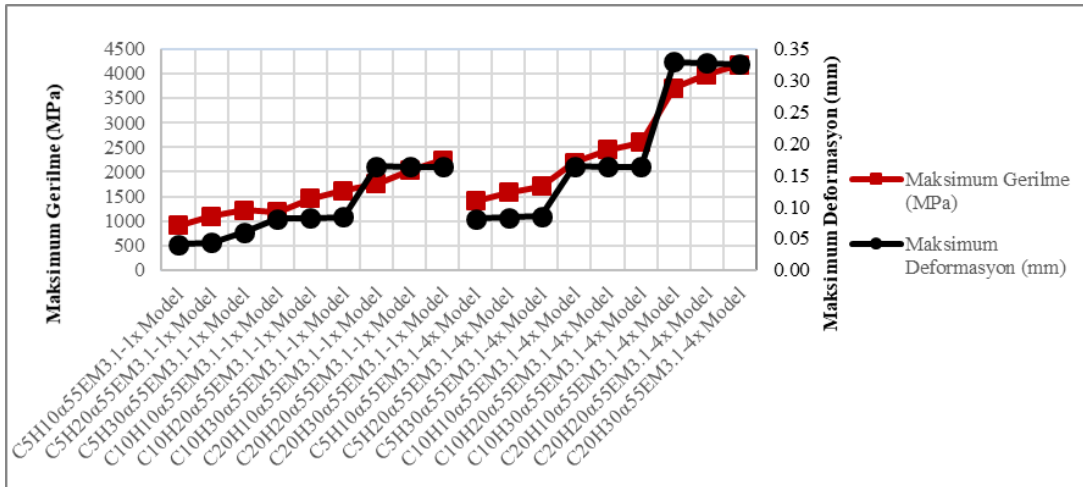
Şekil 4.7. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



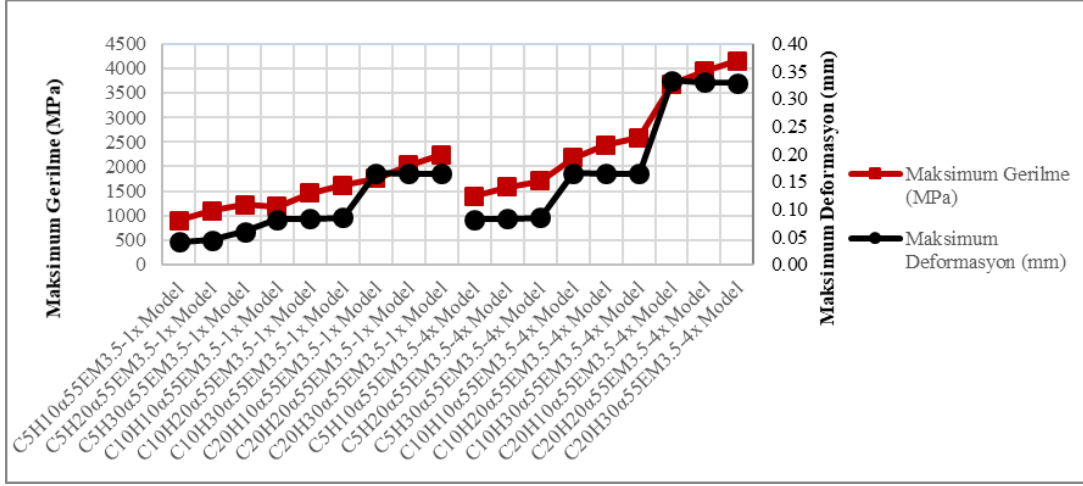
Şekil 4.8. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



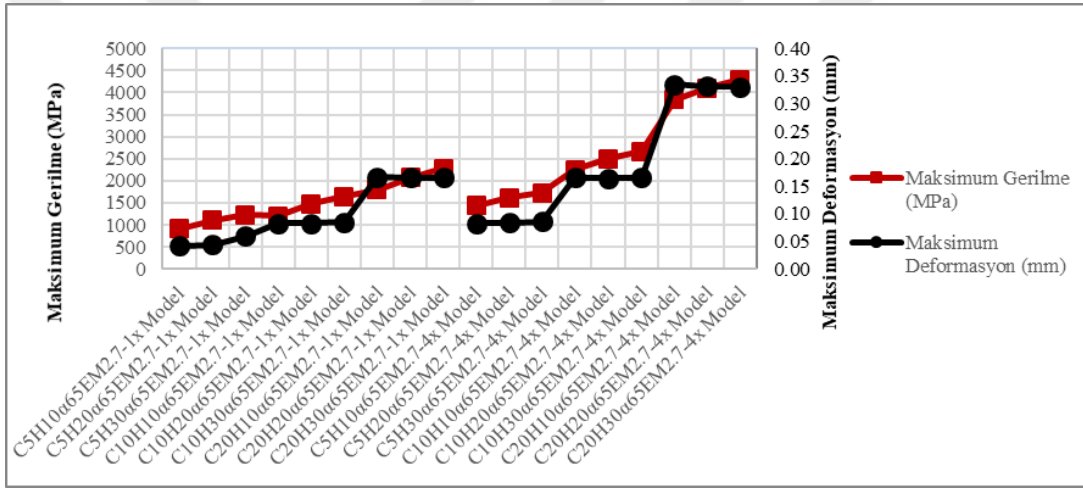
Şekil 4.9. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



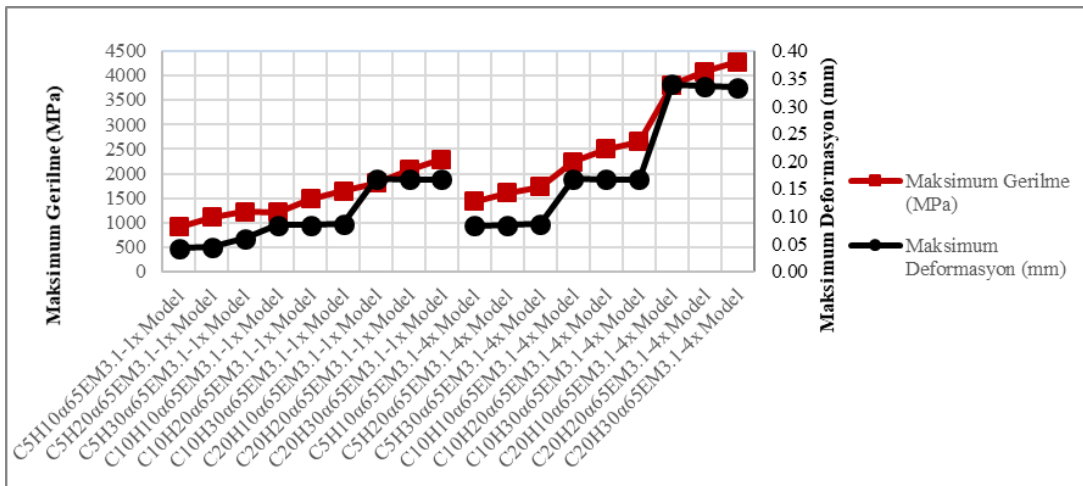
Şekil 4.10. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



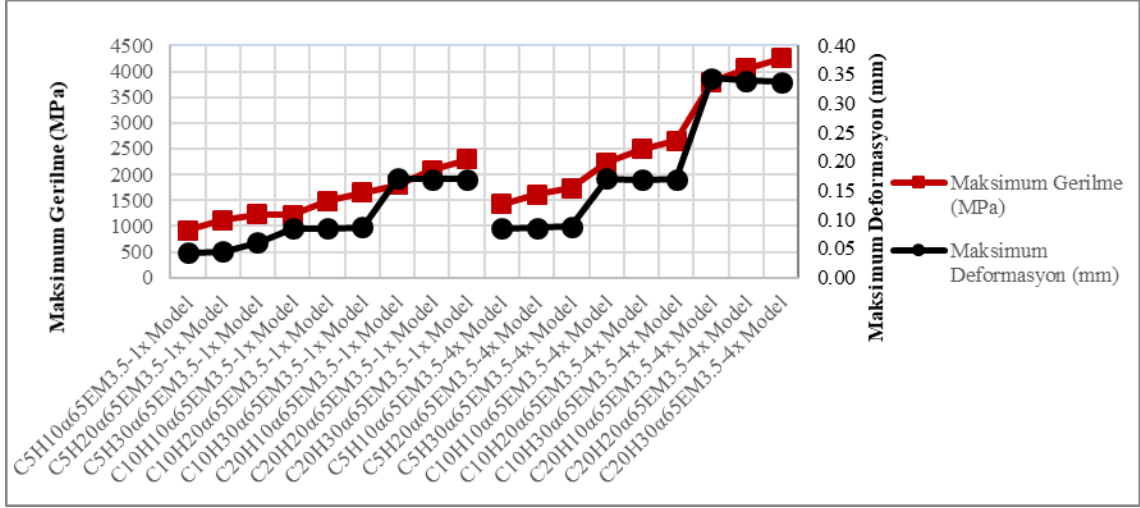
Şekil 4.11. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



Şekil 4.12. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği

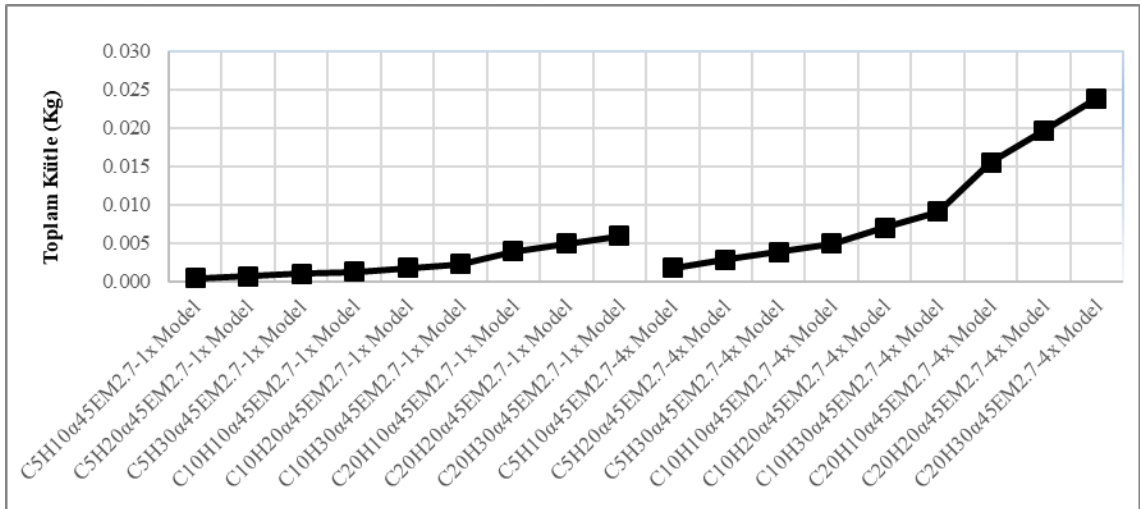


Şekil 4.13. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.1 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği



**Şekil 4.14.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 3.5 GPa için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin gerilme ve deformasyon sonuçlarının grafiği

Termal genişleme katsayısı ve elastisite modülü değişimlerinin incelendiği analizlerde bu parametrelerin değişiminde malzemelerin yoğunluğu değişmediği için küle değişimleri de olmayacaktır. Bu sebeple kütle değişimi sadece termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa iken incelenmiştir (Şekil 4.15). Grafikte de görüldüğü üzere doğal olarak geometri büyüdükçe ağırlıkta artmaktadır.



**Şekil 4.15.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan analizlerde ki geometrilerin toplam kütle grafiği

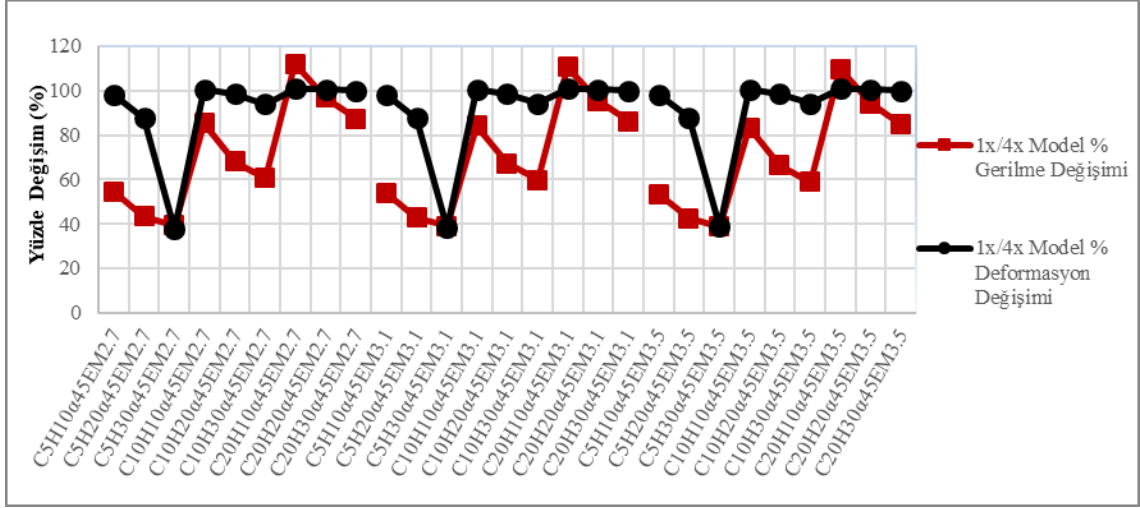
#### **4.1.2.2. Topoloji parametresinin termal genleşme öngerişmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi**

Topoloji parametresinin değışimi ile termal genleşme öngerişmeli analizlerin sonucunda çıkan maksimum gerilme ve maksimum deformasyon değeriğlerinin yüzde değışimi Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'te ki grafiklerde ayrı ayrı görselleştirilmiştir.

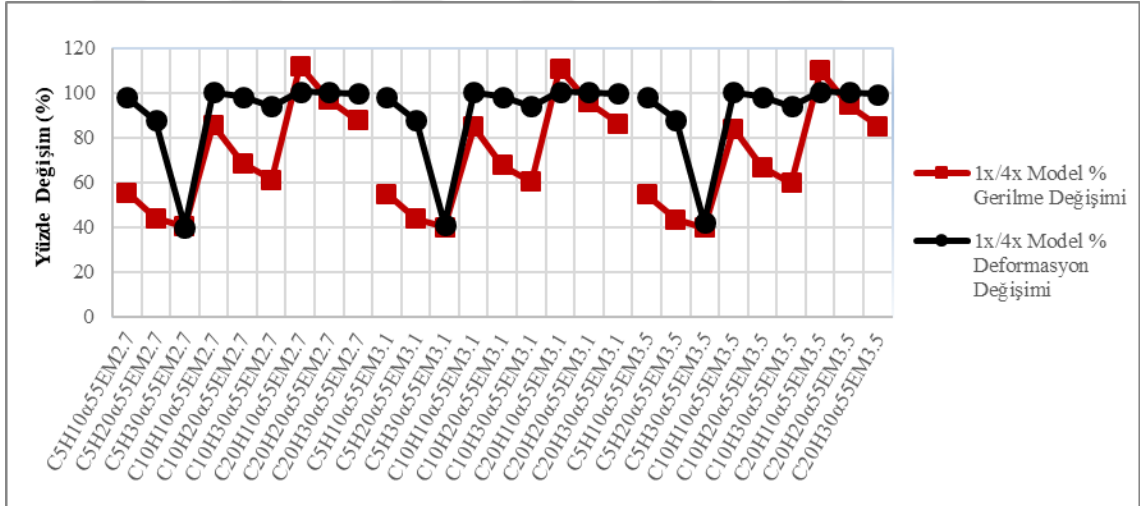
Topoloji parametresi 1x Model'den 4x Model'e çıktığında gerilme değeriğlerinin ve deformasyon değeriğlerinin arttığı belirlenmiştir. Yapı 4x Model'de daha büyük olduğu için daha fazla genleşmeye maruz kaldığından dolayı bu öngörülen bir sonuçtur.

Topoloji parametresi ile kor genişliğı parametresi bir arada incelendiğinde kor genişliğı parametresinin değeri arttıkça topolojinin 1x Model'den 4x Model'e değışimi sonucunda gerilme değeri artmaktadır. Topoloji parametresi ile kor yüksekliğı parametresi bir arada incelendiğinde ise kor yüksekliğı parametresinin değeri artarken, topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değışimi sonucunda gerilme değeri düşmektedir.

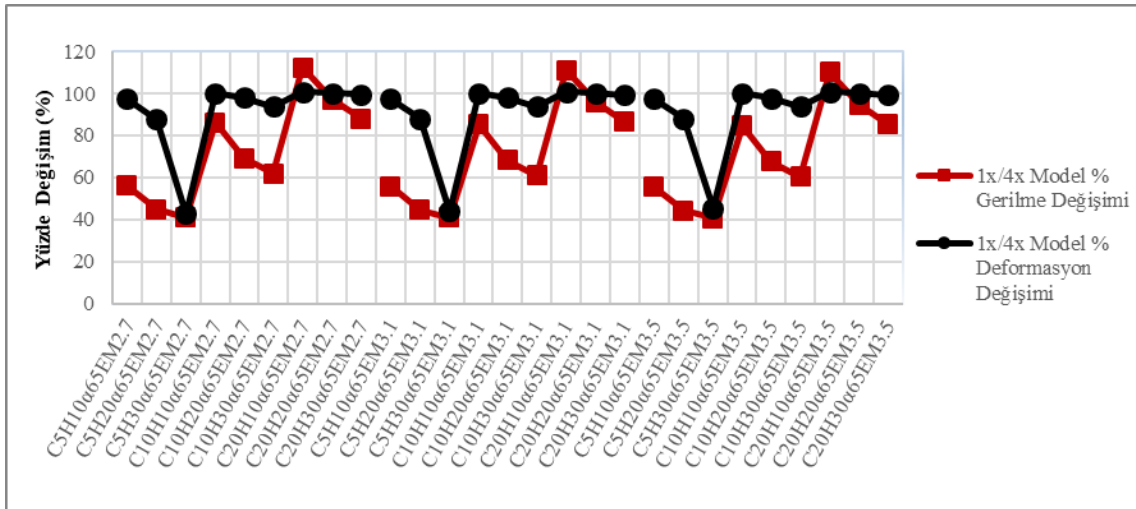
Deformasyon konusunda kor genişliğı ve kor yüksekliğı parametrelerinin değışimi ile topoloji parametresinin değışimi sonuçları ayrı ayrı değeriğlendirildiğinde. Kor genişliğı parametresinin değeri 5 mm iken kor yüksekliğı parametresi değeriğlerinin değışimleri sonucunda deformasyon değeriğinin artma oranının büyük derecede değıştiğı, kor genişliğı parametresi 10 mm iken kor genişliğı parametresinin deformasyon değeriğinin artma oranın çok küçük değıştiğı, kor genişliğı parametresi değeri 20 mm olduğunda ise kor yüksekliğı parametresinin deformasyon değeriğinin artma oranı üzerinde neresyede hiçbir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.16.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin, çeyrek model (1x Model)-tam model (4x Model) sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği

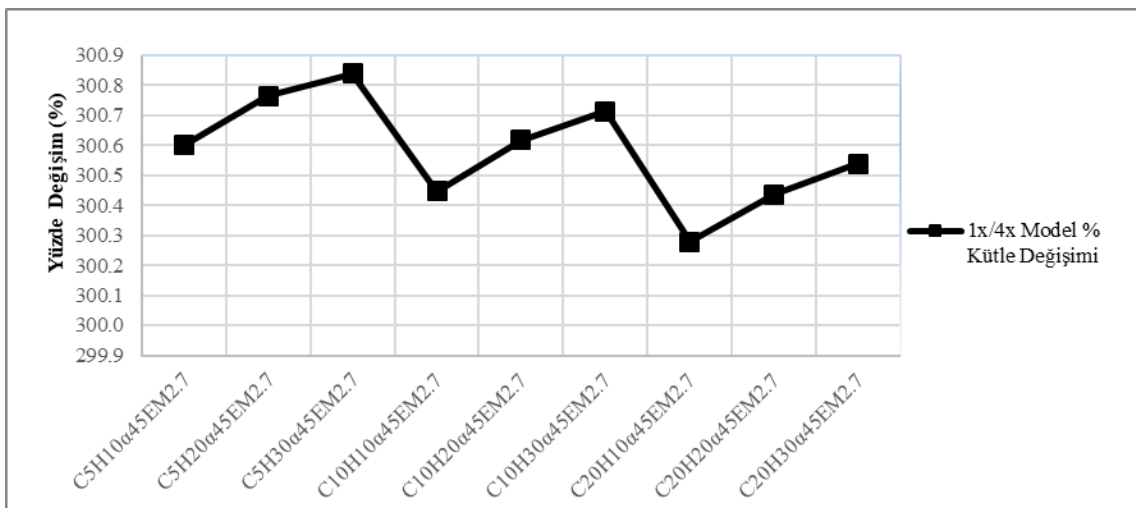


**Şekil 4.17.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinin, çeyrek model (1x Model)-tam model (4x Model) sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



**Şekil 4.18.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerin, çeyrek model (1x Model)-tam model (4x Model) sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişimi grafiği

Termal genişleme katsayısı ve elastisite modülü parametre değerlerinin değişimi sonucunda malzemelerin yoğunluğu değişmediği için kütle değişimi de olmayacaktır. Bu sebeple kütle değişimi yalnızca epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değeri  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , epoksi malzemenin elastisite modülü değerini 2.7 GPa için değerlendirilmiştir (Şekil 4.19). Şekil 4.19 incelendiğinde 4x Model'in kütlede artış gösterdiği ve 4x Model'in 1x Model'inkine göre %300 civarında artış gösterdiği ve 4x Model'in 1x Model'in neredeyse 4 katı olduğu açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.19.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , elastisite modülü 2.7 GPa için yapılan analizlerde, çeyrek model (1x Model)-tam model (4x Model) geometrilerinin yüzde kütle değişimi grafiği

#### 4.1.2.3. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin termal genişleme öngörülmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi değerinin değişimi ile termal genişleme öngörülmesi analizlerin sonucunda çıkan maksimum gerilme ve maksimum deformasyon yüzde değişim (Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23) grafikleri incelendiğinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı arttıkça gerilme ve deformasyon değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu beklenen bir çıktıydı, termal genişleme katsayısı farklı olan iki malzemenin birbirine yapılandırılması sonucunda iki malzeme arasındaki termal genişleme katsayısı farkı arttıkça yapı aynı sıcaklık değişiminde daha fazla genişlemeye uğrayacağı için gerilme ve deformasyon sonuçları da doğal olarak artmaktadır.

Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının gerilme üzerindeki etkisi diğer parametrelerle beraber ayrıntılı incelendiğinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değeri arttıkça;

- Kor genişliği parametresi değeri arttıkça gerilme değerinin ve yüzde gerilme değişiminin arttığı belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça gerilme değerinin arttığı ancak yüzde gerilme değişiminin azaldığı belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda gerilme değerinin ve yüzde gerilme değişiminin arttığı belirlenmiştir.

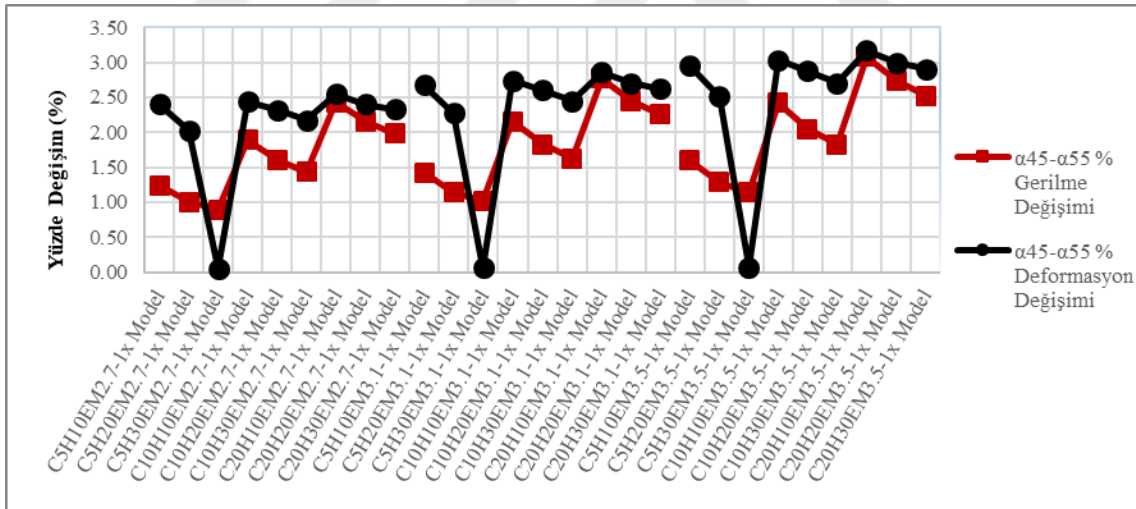
Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının deformasyon üzerindeki etkisi diğer parametrelerle beraber ayrıntılı incelendiğinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değeri arttıkça genellikle;

- Kor genişliği parametresi değeri arttıkça deformasyon değerinin ve yüzde deformasyon değişiminin arttığı belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça deformasyon değerinin arttığı ancak yüzde deformasyon değişiminin azaldığı belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda deformasyon değerinin arttığı ancak yüzde deformasyon değişiminin azaldığı belirlenmiştir.

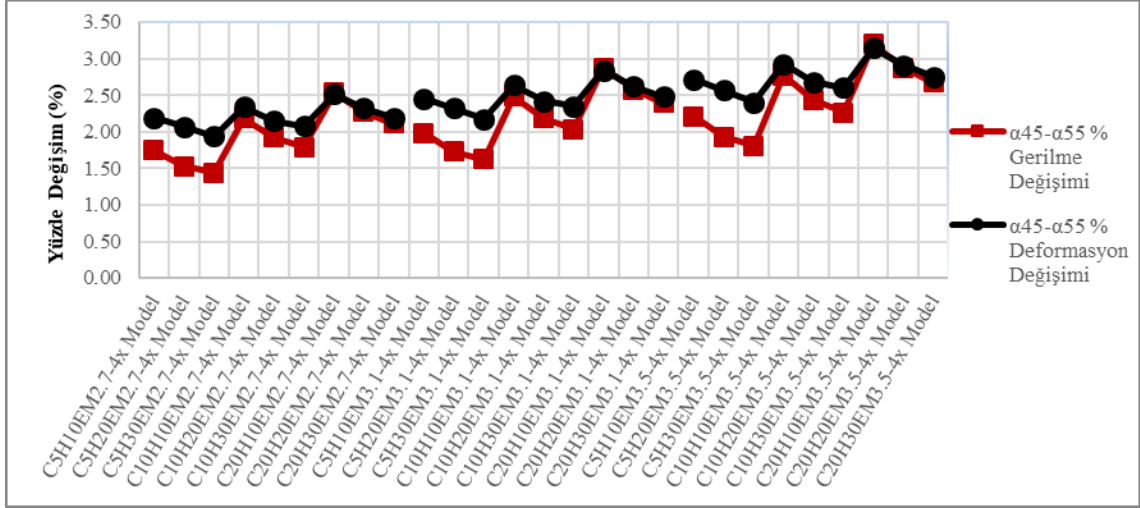
Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının deformasyon oluşumu üzerindeki etkisinin topoloji parametresi 1x Model, kor genişliği parametresinin değeri 5 mm iken ayrı değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu durumda kor yüksekliği



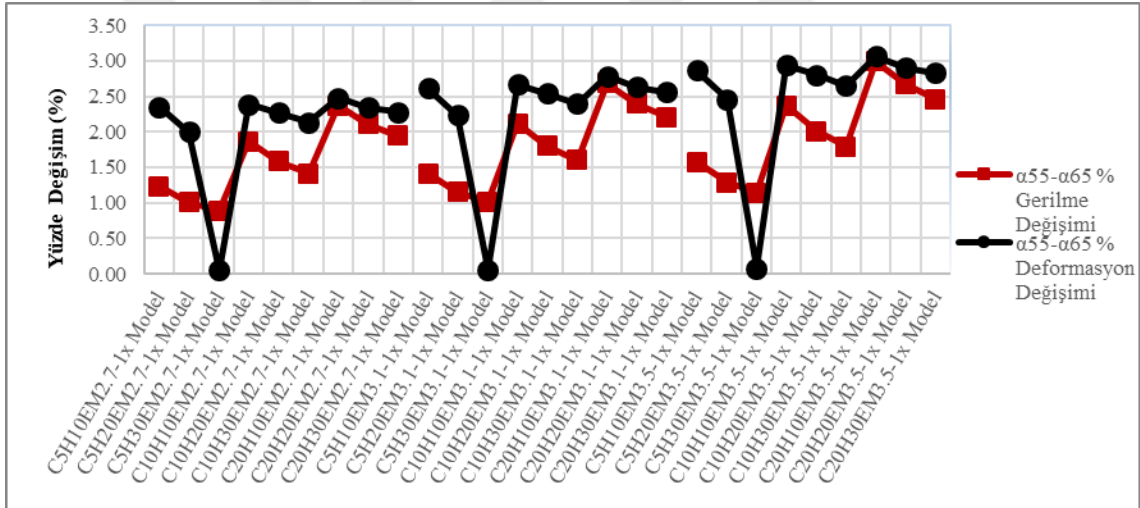
parametresi değerinin artması esnasında deformasyon değerinin artma yüzdesinin diğer kor genişliği parametresi değerlerine göre yüksek miktarda düştüğü belirlenmiştir. Özellikle kor yüksekliği parametresi değeri 30 mm olduğu durumda yüzde deformasyon değişimi sifıra çok yakın bir değere düşmektedir. Yani kor genişliği parametresinin değeri 5 mm, kor yüksekliği parametresinin değeri 30 mm ve topoloji parametresinin 1x Model olduğu termal genişleme öngörülmesi analizlerde epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değerinin  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  veya  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  olmasının deformasyon sonuçlarını etkilemediği belirlenmiştir (Şekil 4.20 ve Şekil 4.22'deki yüzde deformasyon değişimi sifıra yakın olan analiz sonuçları). Bu durum sonucunda incelenen parametreler içerisinde kor genişliği parametresinin değeri 5 mm, kor yüksekliği parametresinin değeri 30 mm ve topoloji parametresinin 1x Model olduğu analiz gruplarının termal genişleme öngörülmesi sonucunda deformasyon davranışının genel davranıştan aykırı ve özel davrandığı ortaya çıkmıştır. Teorik altyapıdan dolayı biliyoruz ki deformasyonun modal analiz üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeple bu aykırılığın ayrıca incelenmesine gerek olmadığına karar verilmiştir.



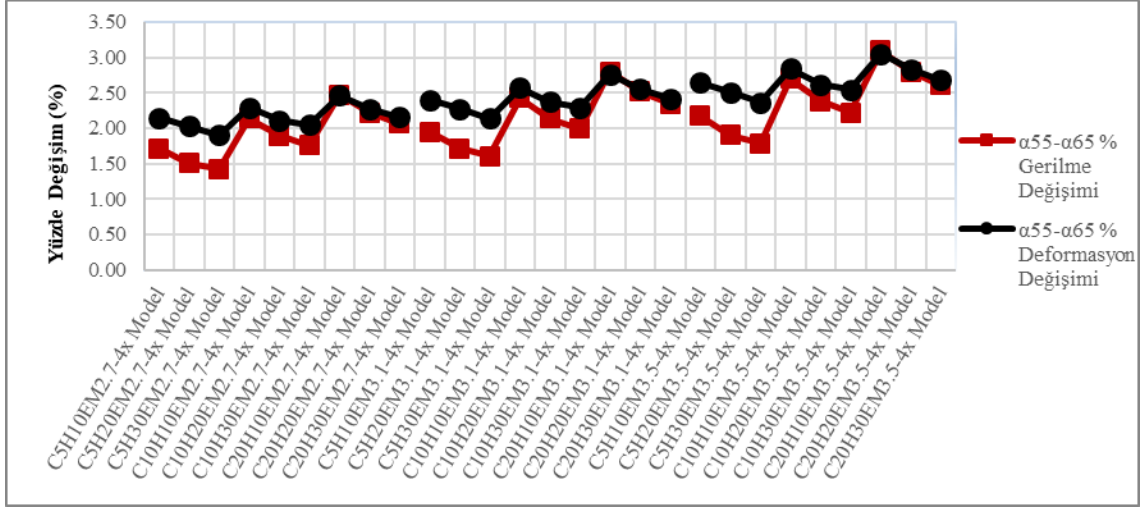
**Şekil 4.20.** Topoloji parametresi çeyrek model (1x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{45}$ ) - epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{55}$ ) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



**Şekil 4.21.** Topoloji parametresi tam model (4x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{45}$ ) - epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{55}$ ) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



**Şekil 4.22.** Topoloji parametresi çeyrek model (1x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{55}$ ) - epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{65}$ ) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



**Şekil 4.23.** Topoloji parametresi tam model (4x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{55}$ ) - epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ( $\alpha_{65}$ ) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği

#### 4.1.2.4. Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin termal genişleme öngörülmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değişimi ile termal genişleme öngörülmesi analizlerin sonucunda çıkan maksimum gerilme ve maksimum deformasyon değerlerinin yüzde değişim (Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27) grafikleri incelendiğinde, elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça gerilme değerlerinin azaldığı, deformasyon değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

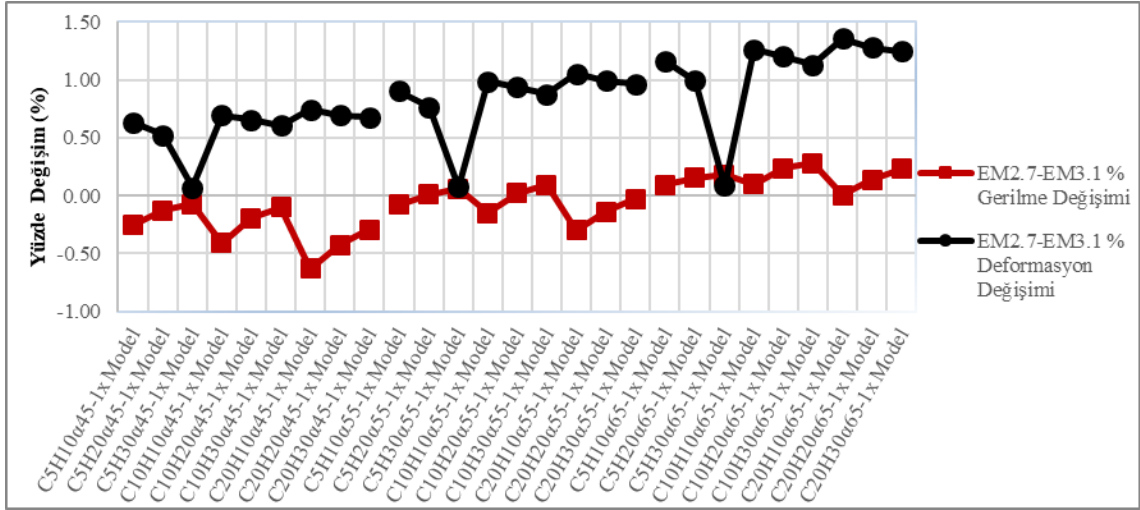
Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin gerilme oluşumu üzerindeki etkisi diğer parametrelerle beraber incelendiğinde, epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça;

- Kor genişliği parametresinin değeri arttıkça gerilme değerinin genellikle düştüğü, bazılarında arttığı ancak yüzde gerilme değişiminin tamamında arttığı belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça gerilme değerinin yükseldiği ancak yüzde gerilme değişiminin azaldığı belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi esnasında gerilme değerinin düştüğü ancak yüzde gerilme değişiminin arttığı belirlenmiştir.

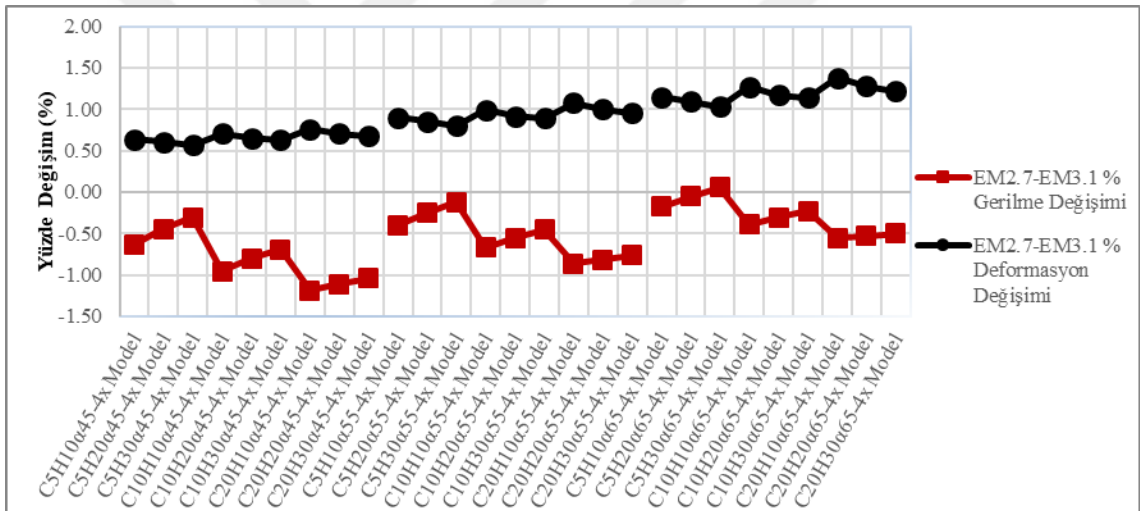
Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin deformasyon oluşumu üzerindeki etkisi diğer parametrelerle beraber incelendiğinde, epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça;

- Kor genişliği parametresinin değeri arttıkça deformasyon değerinin arttığı ancak yüzde deformasyon değişiminin azaldığı belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça deformasyon değerinin ve yüzde deformasyon değişiminin arttığı belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi esnasında deformasyon değerinin arttığı ancak yüzde deformasyon değişiminin neredeyse değişmediği belirlenmiştir.

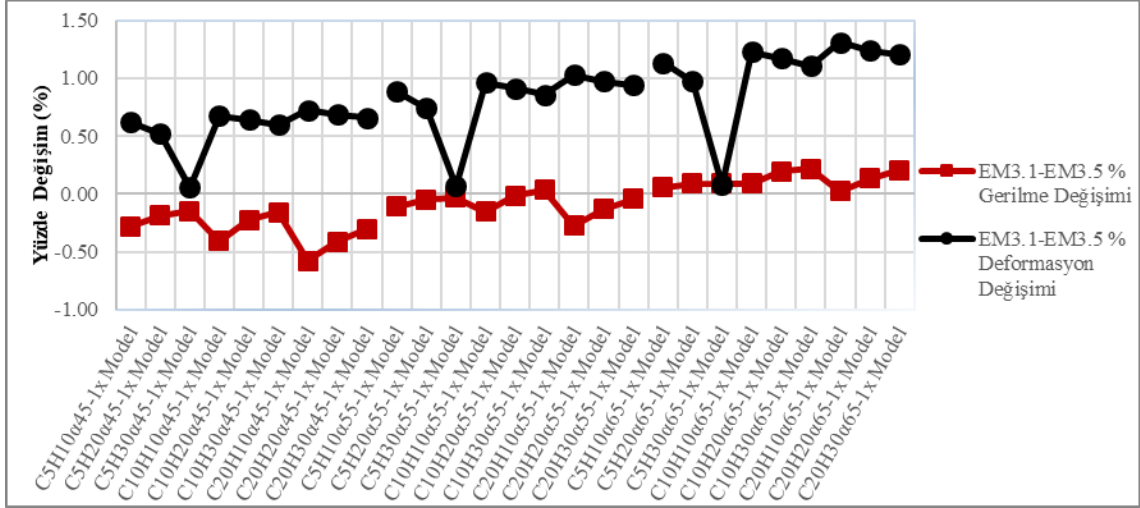
Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin deformasyon oluşumu üzerindeki etkisinin topoloji parametresi 1x Model, kor genişliği parametresinin değeri 5 mm iken ayrı değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu durumda kor yüksekliği parametresi değerinin artması esnasında deformasyon değerinin artma yüzdesinin diğer kor genişliği parametresi değerlerine göre yüksek miktarda düştüğü belirlenmiştir. Özellikle kor yüksekliği parametresi değeri 30 mm olduğu durumda yüzde deformasyon değişimi sifıra çok yakın bir değere düşmektedir. Yani kor genişliği parametresinin değeri 5 mm, kor yüksekliği parametresinin değeri 30 mm ve topoloji parametresinin 1x Model olduğu termal genleşme öngörülmesi analizlerde epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı değerinin 2.7 GPa, 3.1 GPa veya 3.5 GPa olmasının deformasyon sonuçlarını etkilemediği belirlenmiştir (Şekil 4.24 ve Şekil 4.26'daki yüzde deformasyon değişimi sifıra yakın olan analiz sonuçları). Bu durum sonucunda incelenen parametreler içerisinde kor genişliği parametresinin değeri 5 mm, kor yüksekliği parametresinin değeri 30 mm ve topoloji parametresinin 1x Model olduğu analiz gruplarının genel davranıştan aykırı ve özel davrandığı ortaya çıkmıştır. Teorik altyapıdan dolayı biliyoruz ki deformasyonun modal analiz üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeple bu aykırılığın ayrıca incelenmesine gerek olmadığına karar verilmiştir.



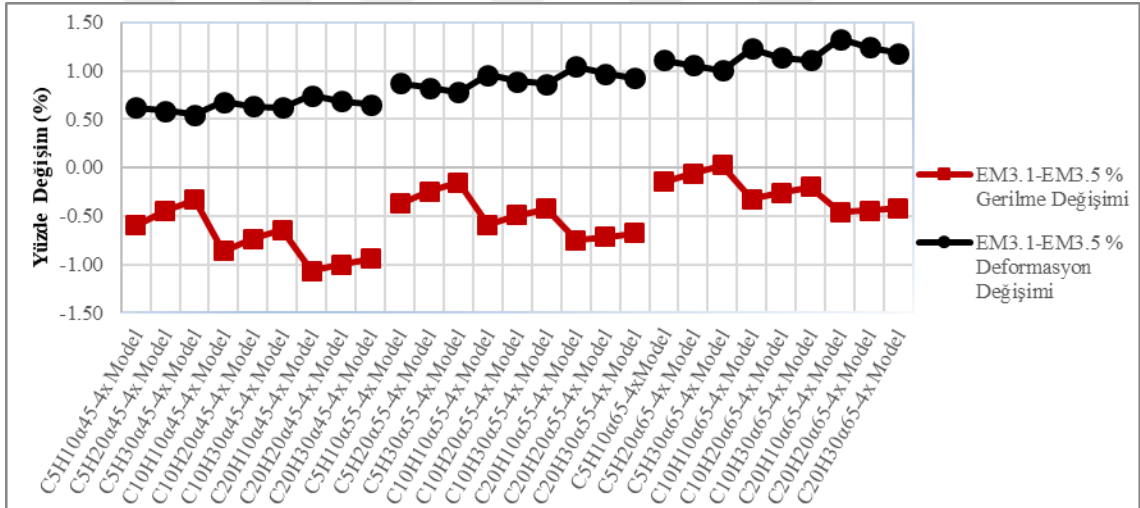
**Şekil 4.24.** Topoloji parametresi çeyrek model (1x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin elastisite modülü 2.7 GPa (EM2.7) - epoksi malzemenin elastisite modülü 3.1 GPa (EM3.1) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



**Şekil 4.25.** Topoloji parametresi tam model (4x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin elastisite modülü 2.7 GPa (EM2.7) - epoksi malzemenin elastisite modülü 3.1 GPa (EM3.1) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



Şekil 4.26. Topoloji parametresi çeyrek model (1x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin elastisite modülü 3.1 GPa (EM3.1) - epoksi malzemenin elastisite modülü 3.5 GPa (EM3.5) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği



Şekil 4.27. Topoloji parametresi tam model (4x Model) için yapılan termal genişleme öngörülmesi analizlerinde, epoksi malzemenin elastisite modülü 3.1 GPa (EM3.1) - epoksi malzemenin elastisite modülü 3.5 GPa (EM3.5) olduğu analizlerin sonuçları arasındaki yüzde gerilme ve yüzde deformasyon değişim grafiği

## 4.2. Parametre Değişimlerinin Mod Frekans Değerleri ve Etkin Kütle Oranları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Çizelge 4.11’de görüldüğü üzere mod frekansları değişiminin en yüksek çıktığı analizler tüm yönlerde yerçekimi ve termal genişleme öngörülmesi analizleri kendi içerisinde aynı analizde çıkmıştır. Teorik altyapıyı incelediğimizde de mod frekansları yönden bağımsızdır. Bu sebeple yapılan analiz grupları içerisinde maksimum frekans değişimi yalnızca X-yönünde incelenecektir.

Tüm parametrelerin etkin kütle ve mod frekansı üzerindeki etkisinin incelenmesinde yapılan 360 analizin tamamının grafiğe dökerek raporlanması efektif olmayacağı için bu değişimin değerlendirilmesi sadece değişimin en yüksek olduğu analizlerde yapılmıştır.

**Çizelge 4.11.** Analiz yönlerine göre mod frekansı değişimi en yüksek çıkan analizler

| Öngerilme       | Serbestlik Yönü | Maksimum Mod Frekansı % Değişimi<br>Çıkan Analiz adı   |
|-----------------|-----------------|--|
| Yerçekimi       | X               | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | Y               | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | Z               | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | ROT X           | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | ROT Y           | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | ROT Z           | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
| Termal Genleşme | X               | C: 10 mm H:10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa  |
|                 | Y               | C: 10 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | Z               | C: 10 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | ROT X           | C: 10 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | ROT Y           | C: 10 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | ROT Z           | C: 10 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |

Çizelge 4.12’te görüldüğü üzere etkilenen kütle oranları değişiminin en yüksek çıktığı analizler, tüm yönlerde yerçekimi ve termal genleşme öngerilmeli analizler kendi içerisinde farklı analizlerde çıkmıştır. Teorik altyapıyı incelediğimizde de görüldüğü üzere etkilenen kütle oranı sonuçları yöne bağlıdır.

Tüm parametrelerin etkin kütle oranları üzerindeki etkisinin incelemelerinde yapılan 360 analizin tamamının 6 serbestlik yönü için grafiğe dökerek raporlanması efektif olmayacağından dolayı bu değişimin değerlendirilmesi sadece değişimin en yüksek olduğu analizlerde 6 serbestlik yönünde yapılmıştır.

**Çizelge 4.12.** Analiz yönlerine göre etkin kütle değişimi en yüksek çıkan analizler

| Öngerilme       | Serbestlik Yönü | Maksimum Etkin Kütle % Değişimi<br>Çıkan Analiz adı  |
|-----------------|-----------------|--|
| Yerçekimi       | X               | C: 20 mm H: 20 mm Tam Model  |
|                 | Y               | C: 20 mm H: 20 mm Tam Model  |
|                 | Z               | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
|                 | ROT X           | C: 20 mm H: 30 mm Tam Model  |
|                 | ROT Y           | C: 20 mm H: 30 mm Tam Model  |
|                 | ROT Z           | C: 20 mm H: 10 mm Tam Model  |
| Termal Genleşme | X               | C: 20 mm H: 10 mm Çeyrek Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | Y               | C: 5 mm H: 30 mm Tam Model TGK: $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa     |
|                 | Z               | C: 10 mm H: 10 mm Tam Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 2.7 GPa    |
|                 | ROT X           | C: 10 mm H: 20 mm Çeyrek Model TGK: $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa |
|                 | ROT Y           | C: 10 mm H: 10 mm Tam Model TGK: $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa    |
|                 | ROT Z           | C: 20 mm H: 30 mm Tam Model TGK: $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ EM: 3.5 GPa    |

#### 4.2.1. Yerçekimi öngerilmesi parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin, parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin ise tam model olduğu analizde çıkmıştır.

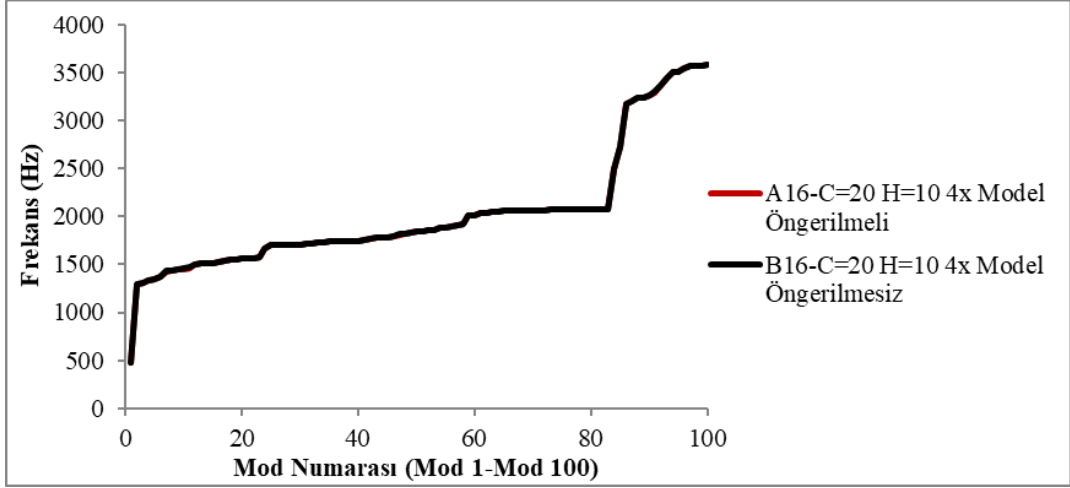
En yüksek gerilme değeri kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin ise tam model olduğu öngerilmeli analizde görülmektedir. En yüksek gerilme değeri çıkan analizin öngerilmeli ve öngerilmesiz varyasyonları sonuçlarında elde edilen doğal frekans modlarının teorik altyapıdan dolayı en fazla değişeceği düşünülmektedir. Yapılan öngerilmeli / öngerilmesiz analiz karşılaştırmaları sonucunda en yüksek mod frekans değişimlerinin bu analizde olduğu görülerek bu düşünce doğrulanmış oldu. Yapılan karşılaştırma sonucunda (Şekil 4.28) gözle görülür bir değişiklik saptanamadığı gibi en yüksek frekans değişiminin %0.09705925 olduğu (Şekil 4.29) ve değerinin ise sadece 2.01 Hz olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla öngerilmenin mod frekansları üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak 1. modun frekansının 480 Hz'den başlayıp, 100. modun frekansının ise 3580 Hz olduğu bir frekans aralığında 2.01 Hz'lik bir değişim yok sayılabilecek kadar küçük kalmaktadır.

Etkilenen kütle oranının değişimini yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde incelediğimizde ise en yüksek değişimin 6 serbestlik yönünün bazılarında

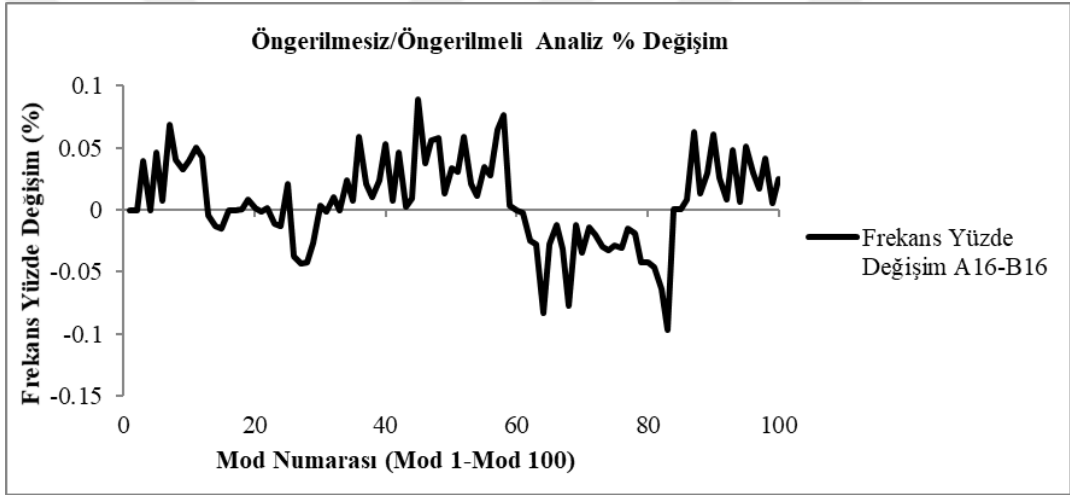


aynı analizde çıkarken, bazılarında ise farklı analizlerde çıktığı belirlenmiştir (Çizelge 4.11, yerçekimi öngerilmesi satırı içeriği). Tüm analizlerdeki etkilenen kütle oranı değişimleri üzerinden daha ayrıntılı incelendiğinde etkin kütle değişiminin maksimum olduğu analiz sonucunun Z yönünde ve kor genişliği parametresinin değeri 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model olduğu analizin öngerilmeli / öngerilmesiz analiz karşılaştırmasında çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4.30). İlgili grafikte gözle görülür bir değişim bulunmamaktadır. Bu analizde doğal frekans modlarındaki maksimum etkin kütle değişiminin %82021036605 olduğu görülmektedir (Şekil 4.31). Dolayısıyla yerçekimi öngerilmesinin etkilenen kütle oranı üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak etkilenen kütle yüzdesindeki artışta yüzde değeri olarak çok büyük bir değer değişimi var gibi görülse de ilgili modlarda etkilenen kütle oranı sadece  $3,43685E-16$ 'dan  $0.000000281894$  değerine çıkmaktadır. Burada %82021036605 artışa rağmen bahsi geçen doğal frekans modu için kütle için yalnızca %0.0000281894'lik bir kısmı etkilemektedir. Bu değişime rağmen yapı bahsi geçen doğal frekans modunda rezonansa girse bile yapıya zarar verebilecek oranda bir kütleyi etkilemediği belirlenmiştir.

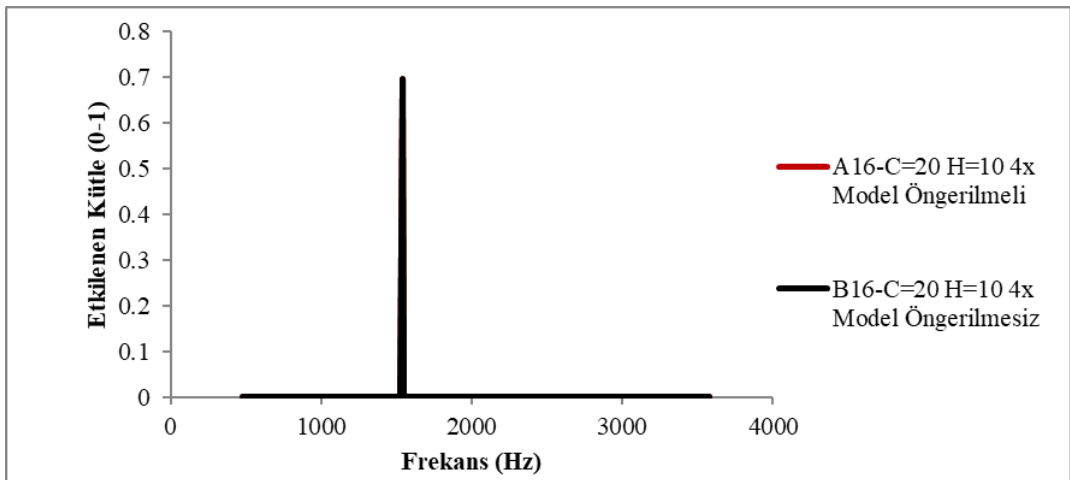
Buradan yerçekimi öngerilmesinin doğal frekans değerlerini ve etkin kütle oranını değiştirdiği, ancak yapının kendi ağırlığı ile yerçekimi ivmesi altında yüklenmesinin sonucunda yapı üzerinde yüksek gerilme oluşturulamadığı için söz konusu doğal frekans mod değişimlerinin önemsiz miktarda olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden yerçekimi öngerilme parametresinin etkisi yok sayılacak kadar düşük olduğu için, bundan sonraki yerçekimi öngerilme parametresi içeren analizlerde öngerilme yok sayılarak değerlendirmelerin tamamı yerçekimi öngerilmesiz analizler arasında yapılmıştır.



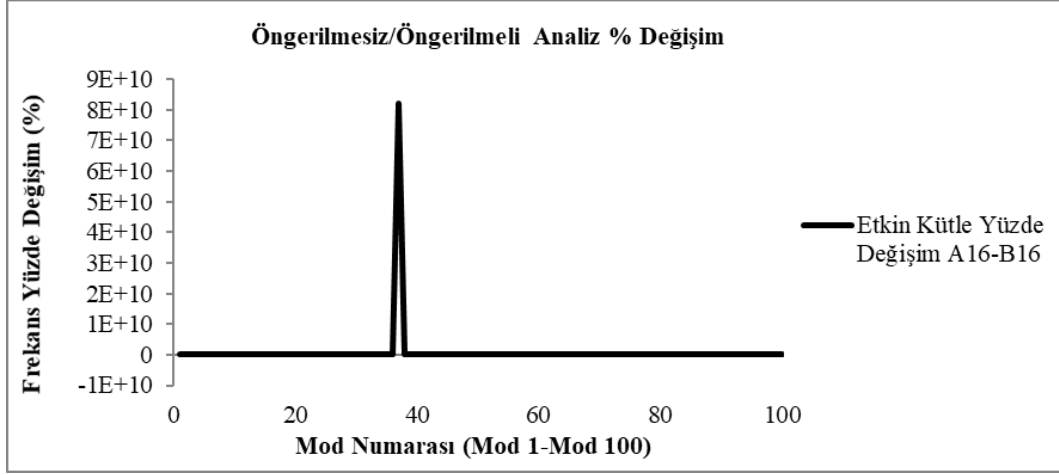
Şekil 4.28. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizler içerisinde en yüksek mod frekansı değişimi olan analizlerin mod numarası – frekans grafiği



Şekil 4.29. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizler içerisinde en yüksek mod frekansı değişimi olan analizlerin mod numarası – frekans yüzde değişim grafiği



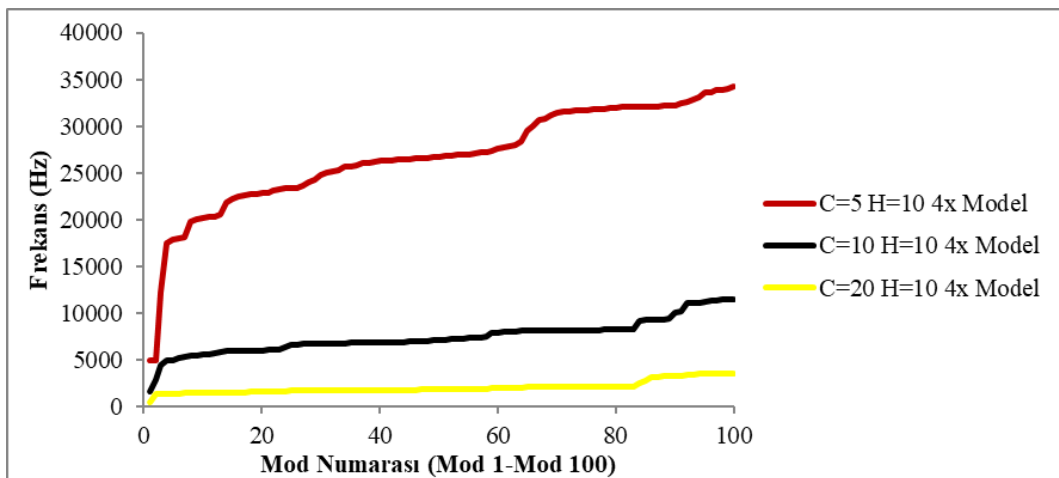
Şekil 4.30. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmesiz analizler içerisinde en yüksek, etkilenen kütle değişimi olan analizlerin frekans – etkilenen kütle grafiği



Şekil 4.31. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmemiş analizler içerisinde en yüksek etkilenen kütle değişimi olan analizlerin mod numarası – frekans yüzde değişim grafiği

#### 4.2.2. Yerçekimi öngerilmemiş analizlerde kor genişliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin ise tam model olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.32). İlgili analizler sonucunda kor genişliği parametresi değerlerinin değişimi sonucunda mod frekanslarının değişimi incelendiğinde, kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ilk 100 modun daha dar bir frekans bandına sıkıştığı ve mod frekans değerlerinin düştüğü belirlenmiştir.

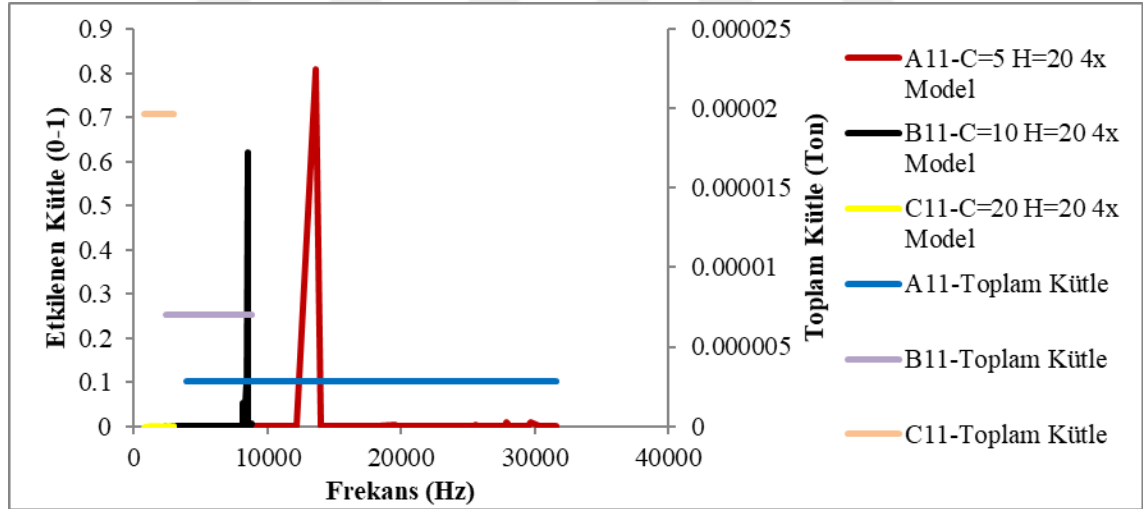


Şekil 4.32. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda elde edilen mod numarası – frekans grafiği

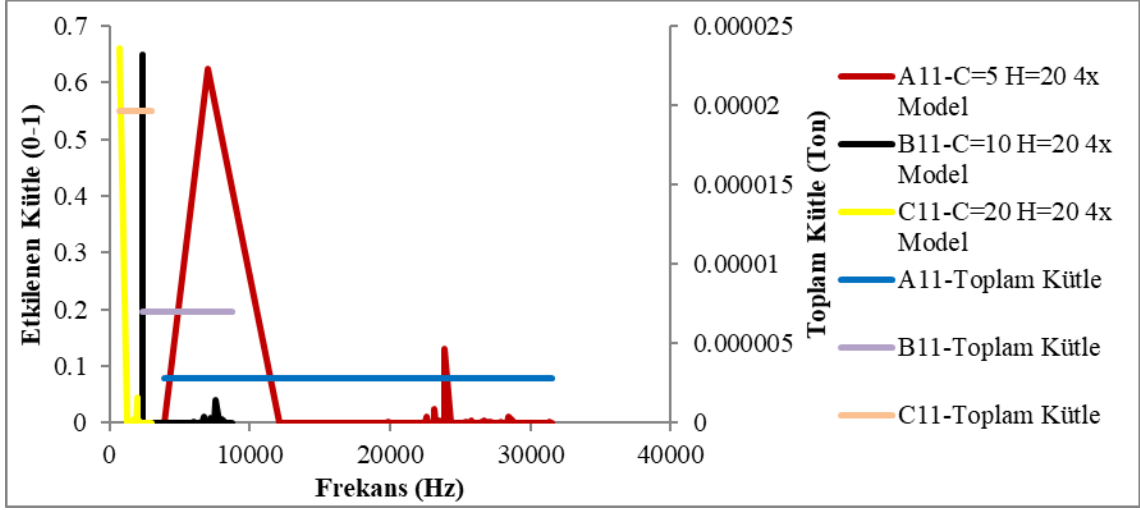
Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.33) ve Y-yönünde (Şekil 4.34) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde ve Y-yönünde incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; sadece kor genişliği parametresi değerinin 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda ana mod çıktığı, kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının da düştüğü belirlenmiştir. Kor genişliği parametresi değerinin 20 mm olduğu analizde ise X yönünde ana mod çıkmadığı belirlenmiştir.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir.



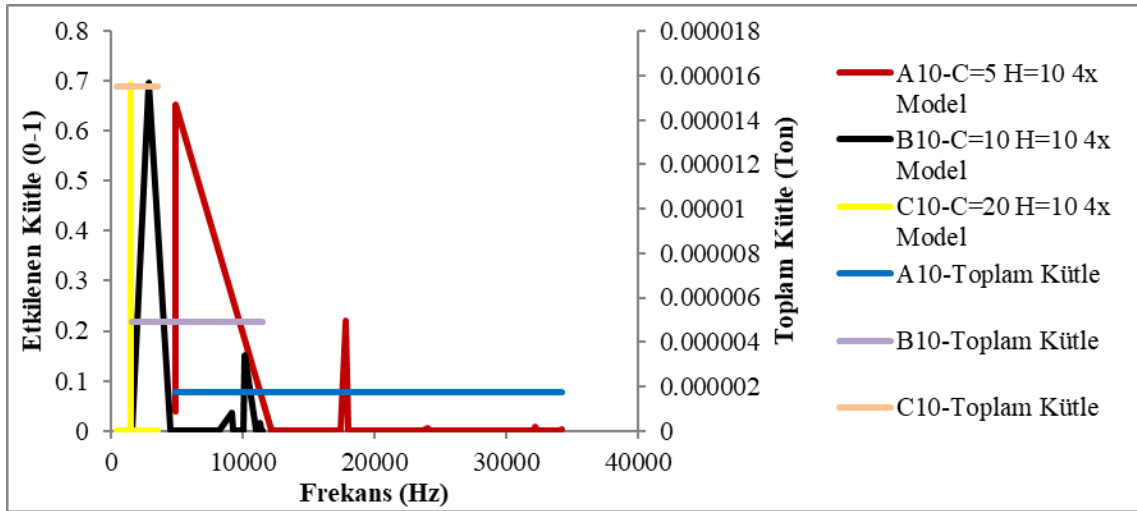
**Şekil 4.33.** Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



**Şekil 4.34.** Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.35) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca kor genişliği parametresi değeri 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda 2. ana modun çıktığı ve kor genişliği parametresinin değeri arttıkça bu modların düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının da düştüğü belirlenmiştir.

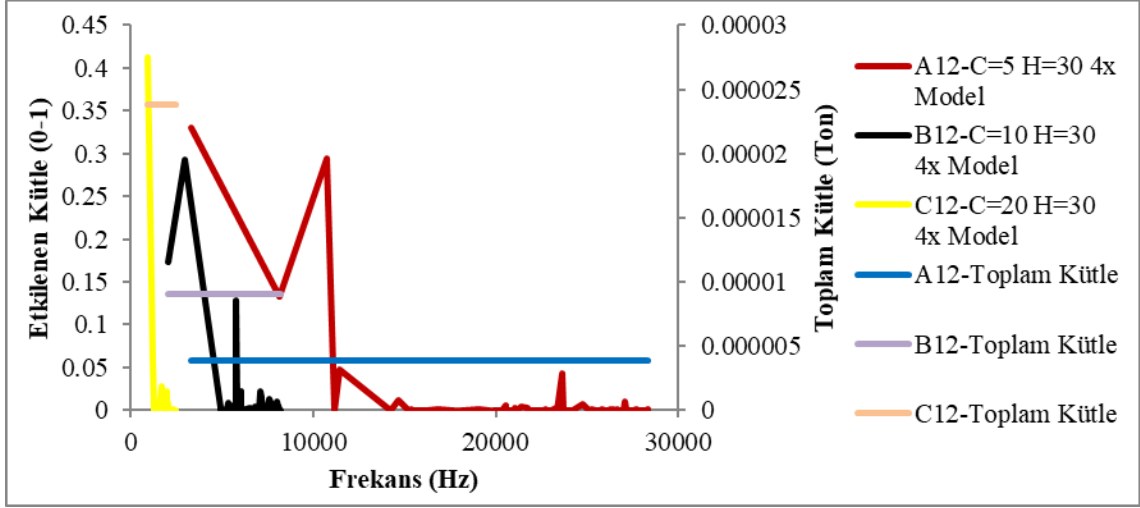


**Şekil 4.35.** Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

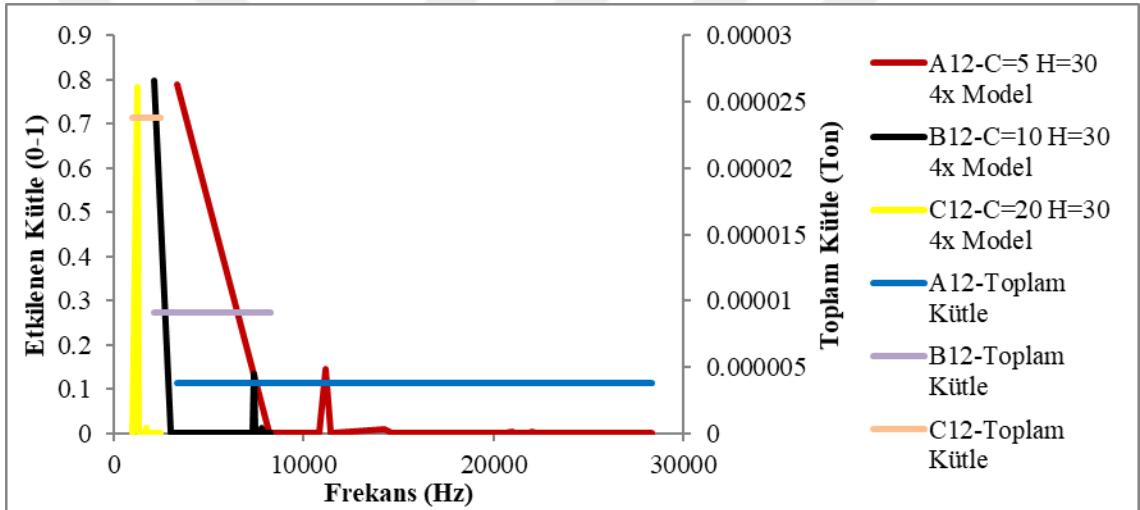
Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.36) ve ROTY-yönünde (Şekil 4.37) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde ve ROTY-yönünde incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modların düşük frekans değerlerine taşındığı, ancak etkilenen kütle oranları hakkında yorum yapılamayacak şekilde davrandığı belirlenmiştir.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ancak etkilenen kütle oranının neredeyse değişmediği belirlenmiştir. Ayrıca kor genişliği parametresi değeri 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda çıkan ikinci derece ana modlar için de aynısını söylemek mümkündür.



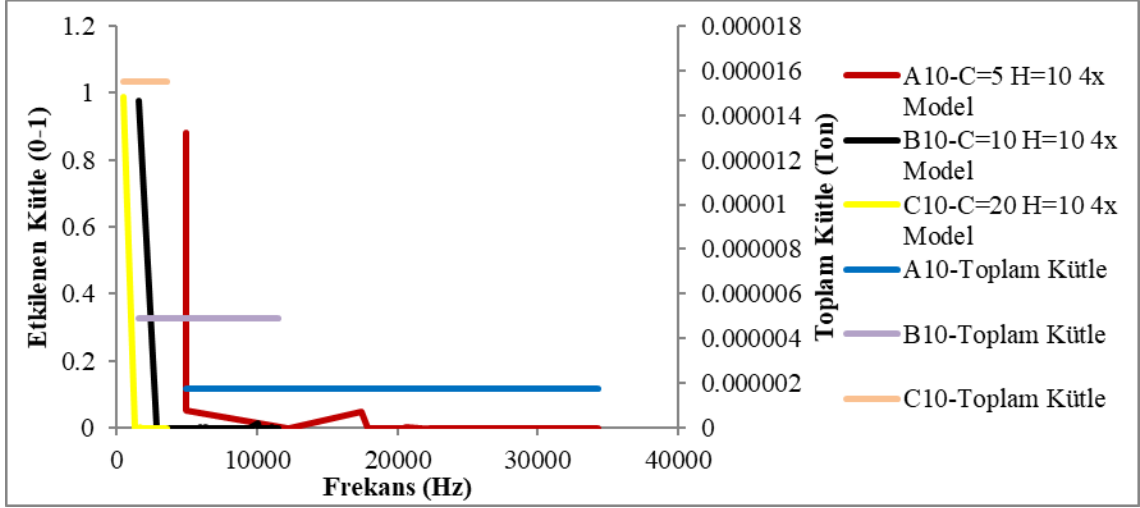
Şekil 4.36. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



Şekil 4.37. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.38) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir.

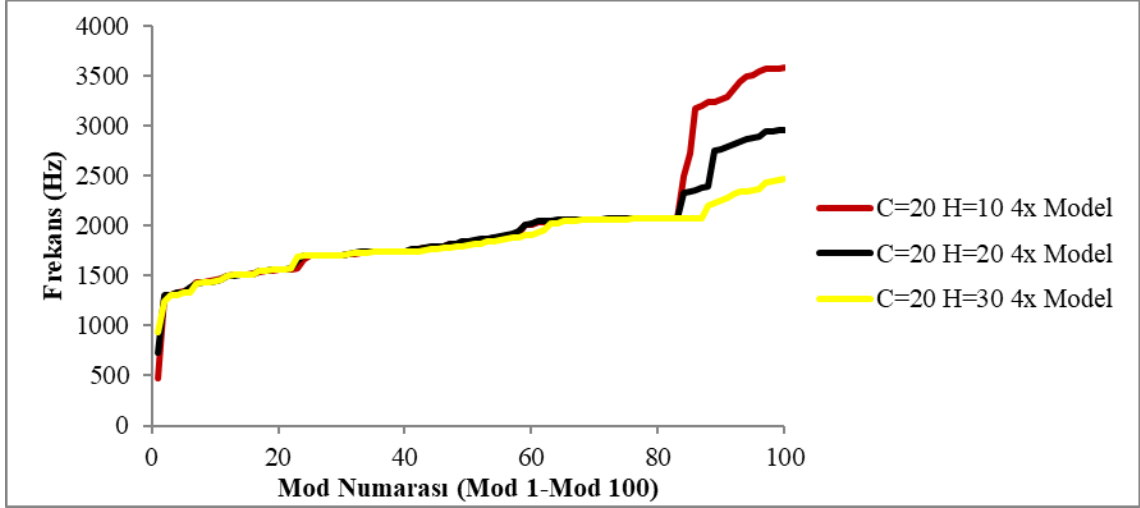


Şekil 4.38. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.3. Yerçekimi öngerilmemiş analizlerde kor yüksekliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin ise tam model olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.39). İlgili analizler sonucunda kor yüksekliği parametre değerinin değişimi sonucunda mod frekanslarının değişimi incelendiğinde kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ilk 100 Mod'un daha dar bir frekans bandına sıkıştığı, mod frekans değerlerinin 1. Mod ile 30. Mod arasında yükseldiği, 30. Mod'dan sonra azaldığı ve bu azalmanın 80. Mod'dan sonra daha dikkat çeken bir miktarda olduğu belirlenmiştir.



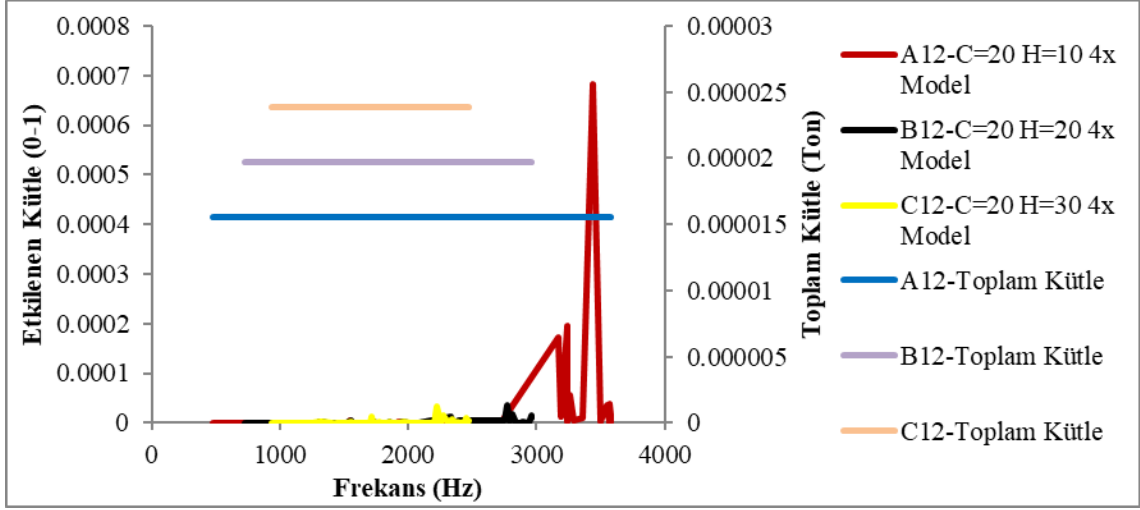


**Şekil 4.39.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda elde edilen mod numarası – frekans grafiği

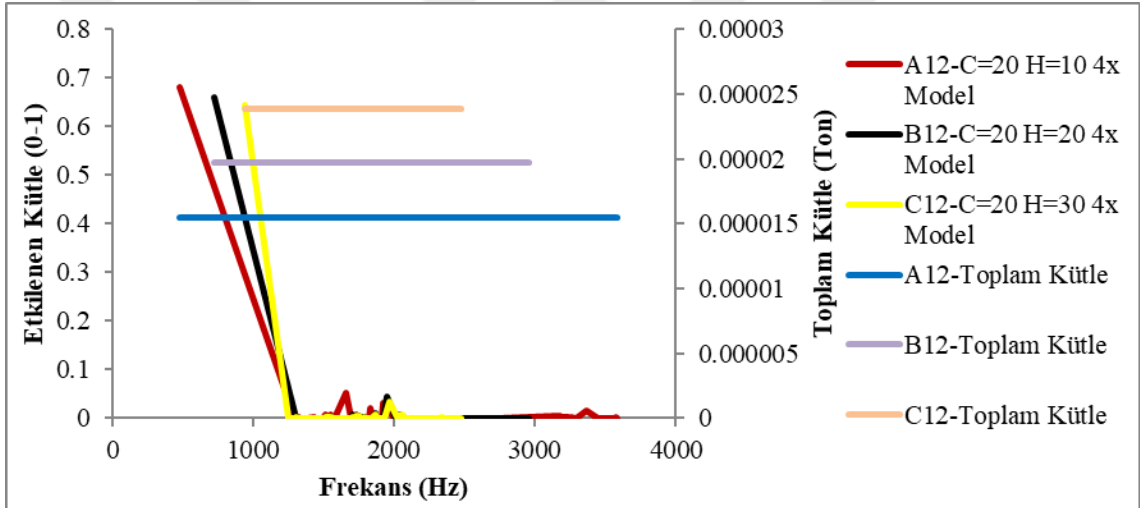
Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.40) ve Y-yönünde (Şekil 4.41) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde ve Y-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %0.07 olduğu görülmektedir. Toplam kütle için bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır. Kor yüksekliği parametresinin değeri büyüdükçe de bu etkilenen kütle oranlarının daha da aşağı çekildiği belirlenmiştir.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ana modun yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.



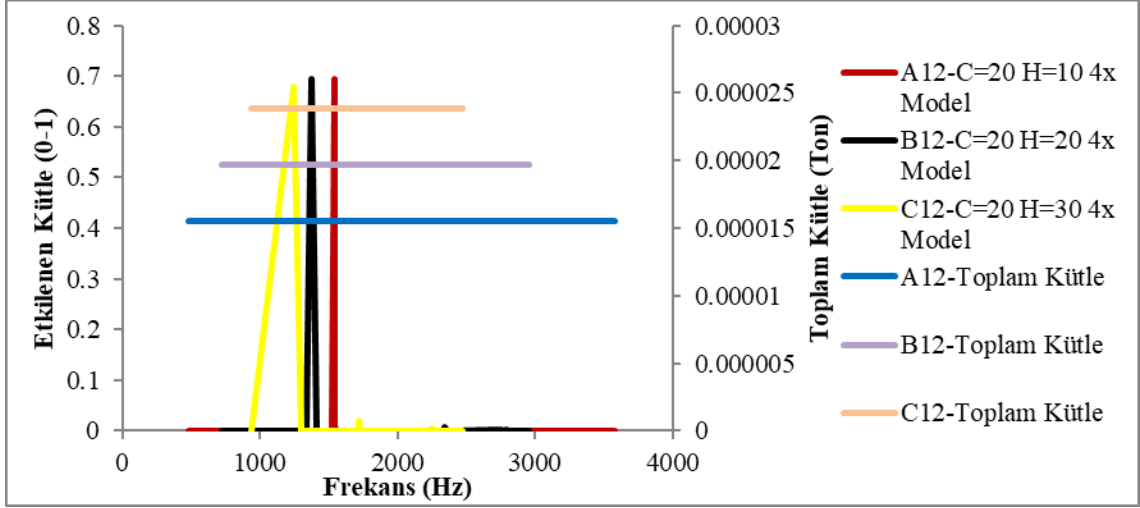
**Şekil 4.40.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



**Şekil 4.41.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.42) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde ve Z-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.

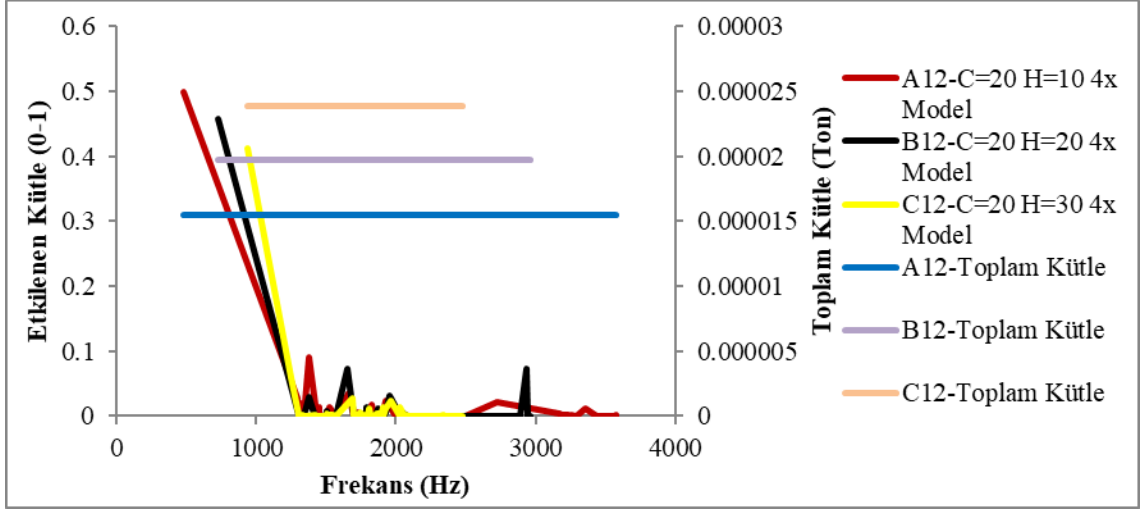


**Şekil 4.42.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

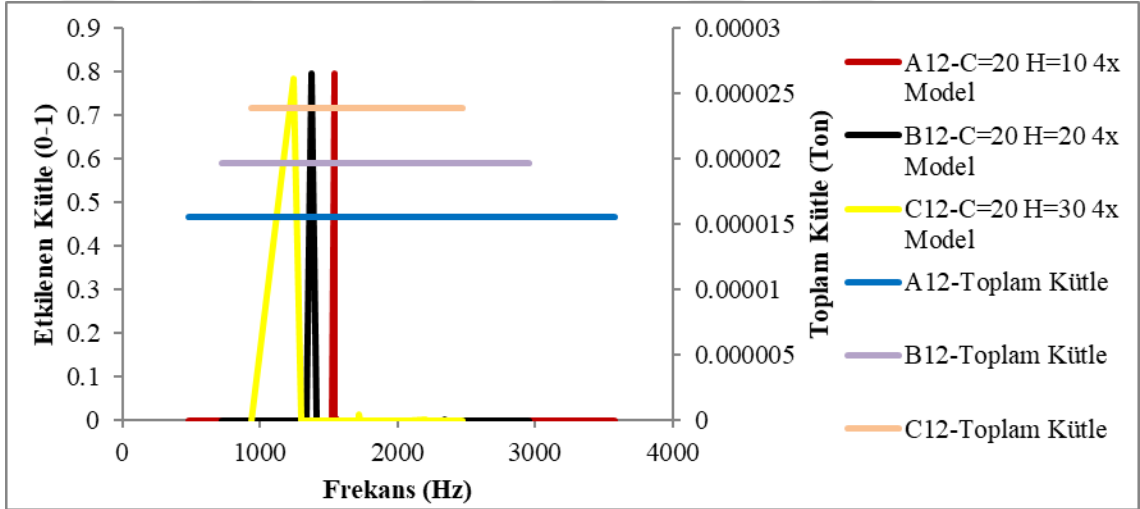
Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.43) ve ROTY-yönünde (Şekil 4.44) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde ve ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ana modun yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.



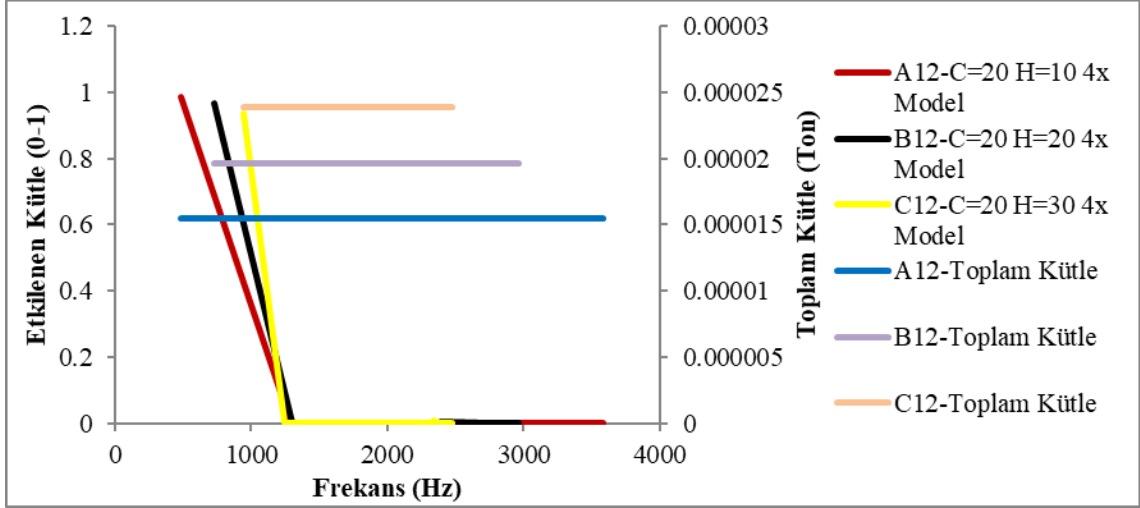
Şekil 4.43. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



Şekil 4.44. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.45) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

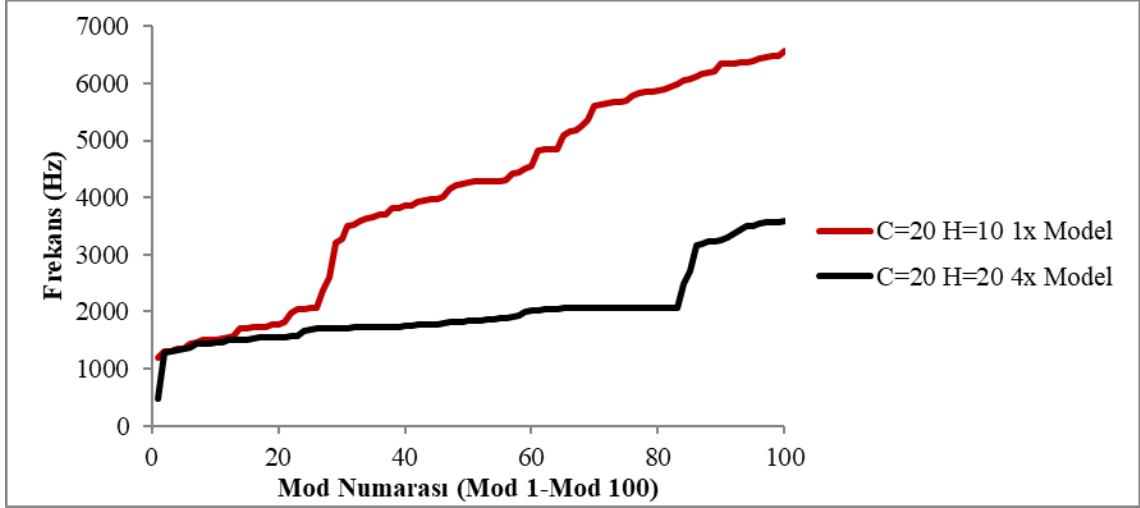
ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ana modun yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.45. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği

#### 4.2.4. Yerçekimi öngerilmemiş analizlerde topoloji parametresinin mod frekansları ve etkin kütlesi oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin ise tam model olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden topoloji parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.46). İlgili analizler sonucunda topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e çıktığında mod frekanslarının değişimi incelendiğinde ilk 100 modun daha dar bir frekans bandına sıkıştığı ve mod frekans değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Özellikle 20. Mod'dan sonra daha dikkat çeken bir azalma olduğu belirlenmiştir.

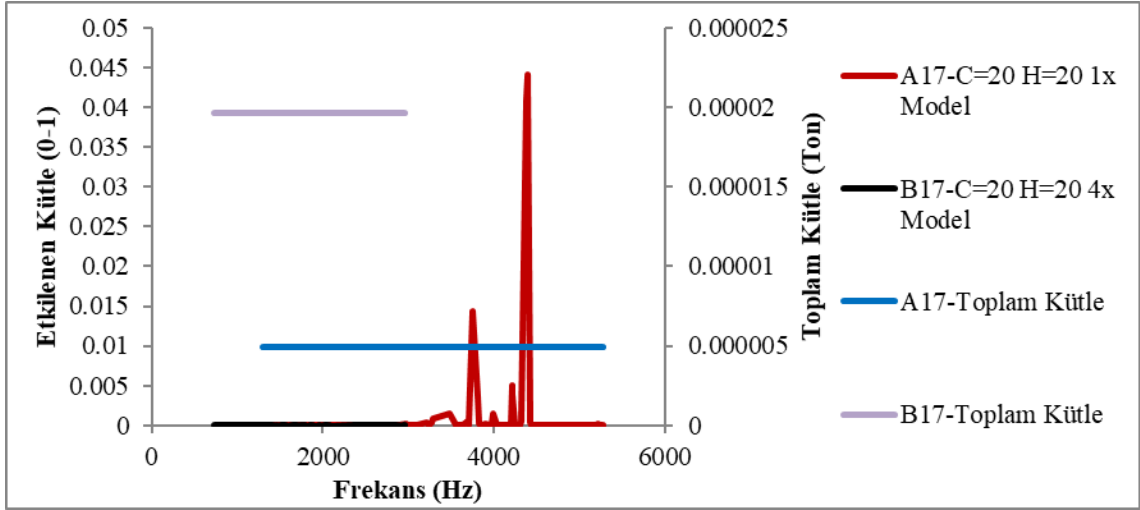


Şekil 4.46. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda elde edilen mod numarası – frekans grafiği

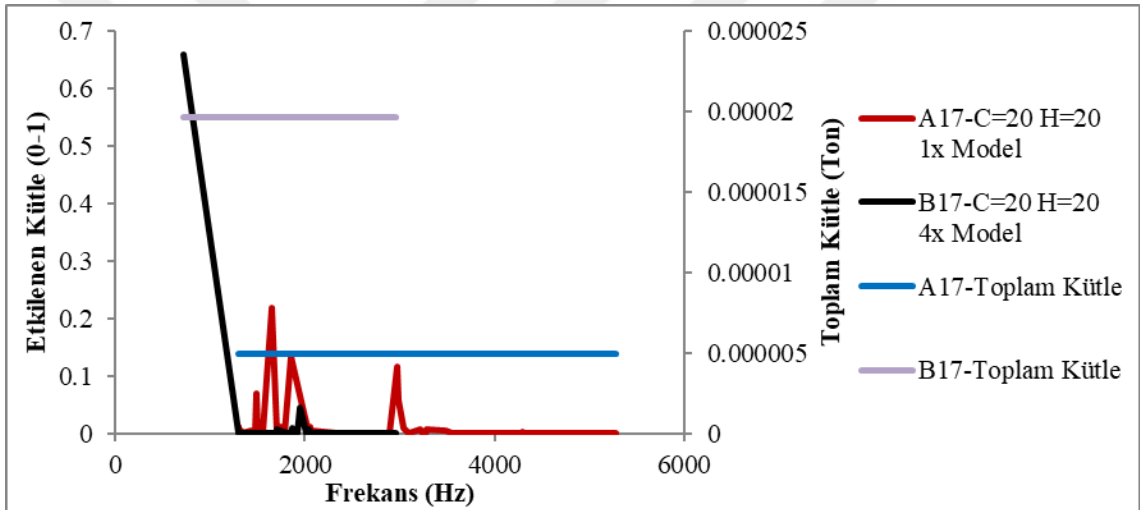
Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.47) ve Y-yönünde (Şekil 4.48) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde ve Y-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle oranı değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %4.5 olduğu görülmektedir. Topoloji parametresinin 4x Model olduğu modelde etkilenen kütle oranı en fazla %0.0034 olduğu belirlenmiştir. Toplam kütlelerin bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır. Topoloji parametresi 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda etkilenen kütle oranlarının daha da aşağı çekildiği belirlenmiştir.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir.



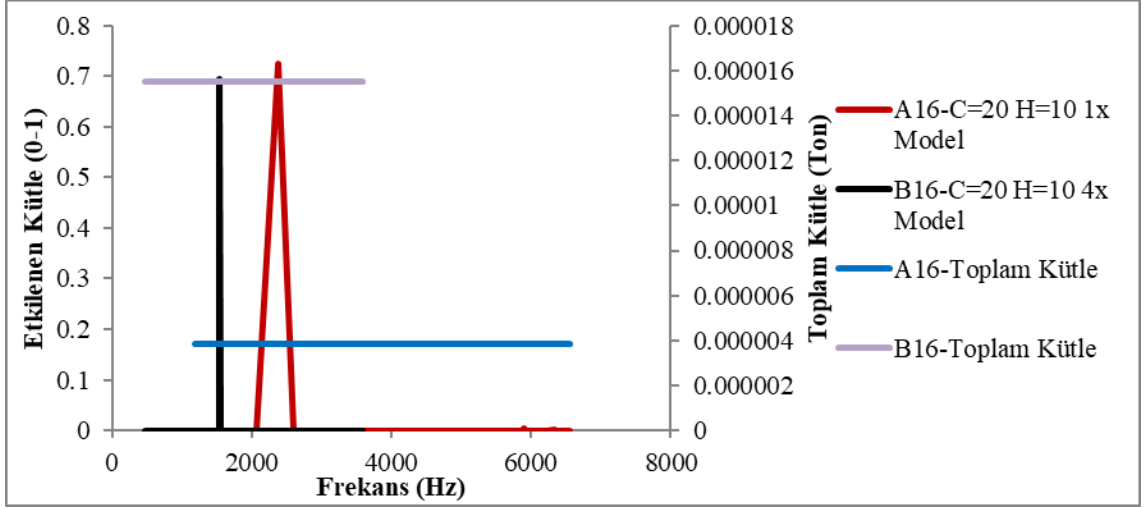
Şekil 4.47. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



Şekil 4.48. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.49) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.



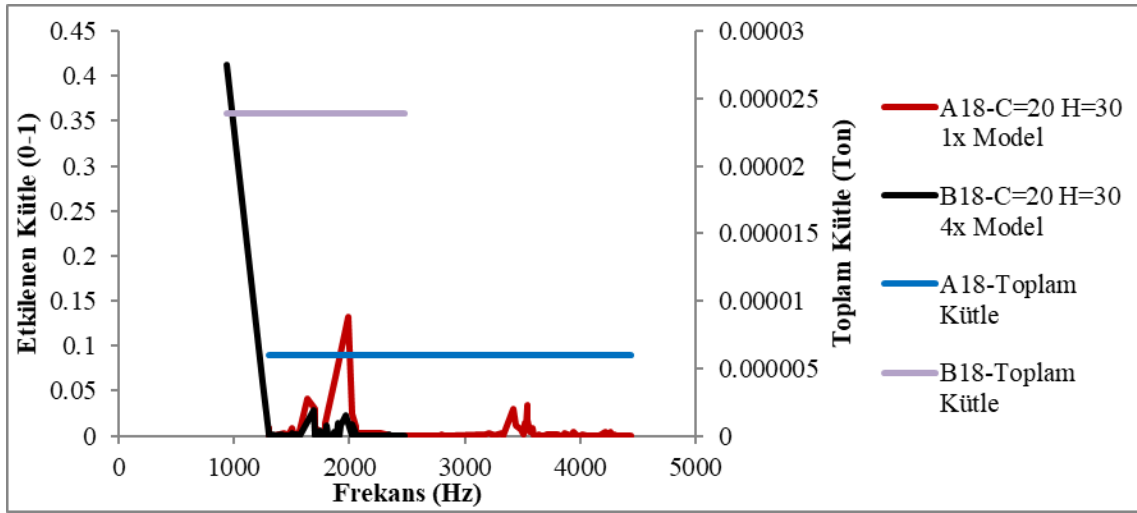
Şekil 4.49. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmesiz analizi sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.50) ve ROTY-yönünde (Şekil 4.51) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde ve ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

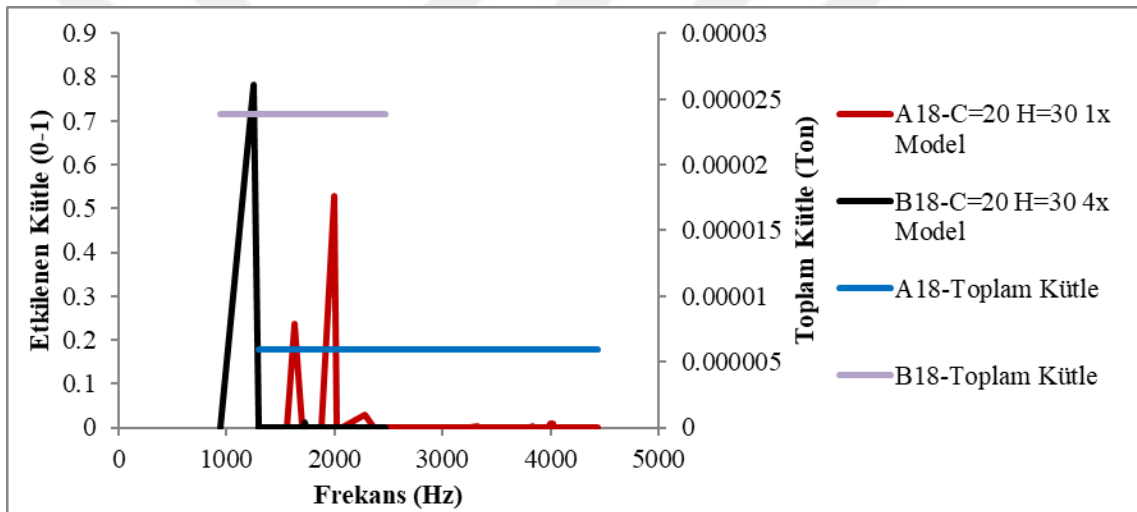
ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir.





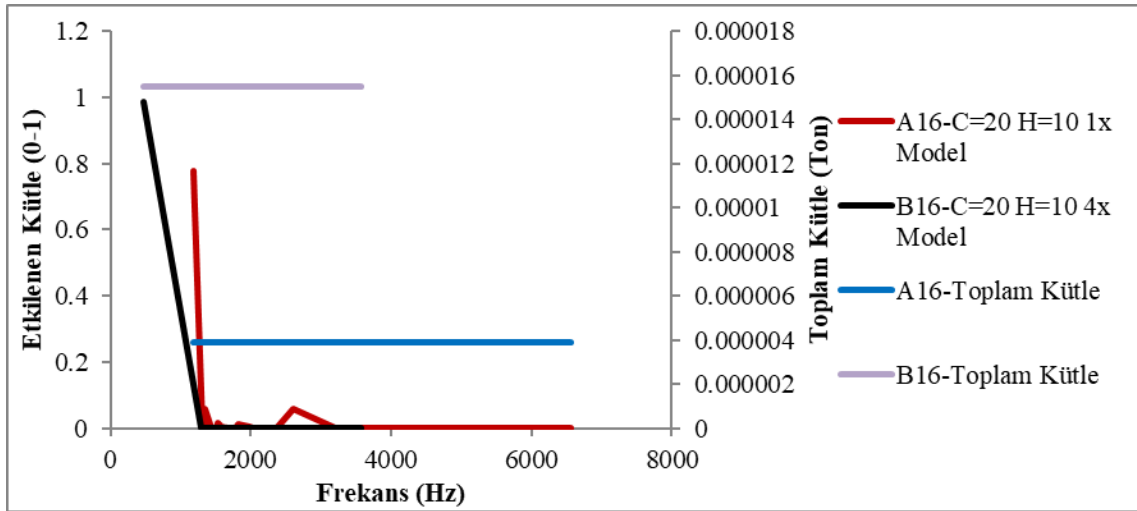
Şekil 4.50. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği



Şekil 4.51. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği

Yerçekimi öngerilme parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.52) en yüksek etkin kütlesi değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm ve topoloji parametresinin tam model olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütlesi oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

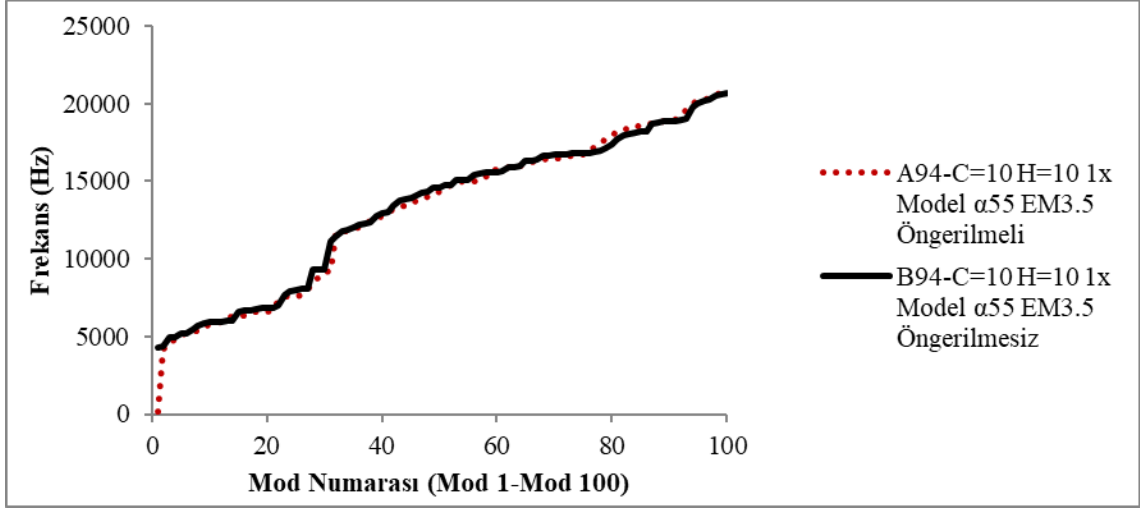
ROTZ-yönündeki etkin kütlesi değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilene kütlesi oranının arttığı belirlenmiştir.



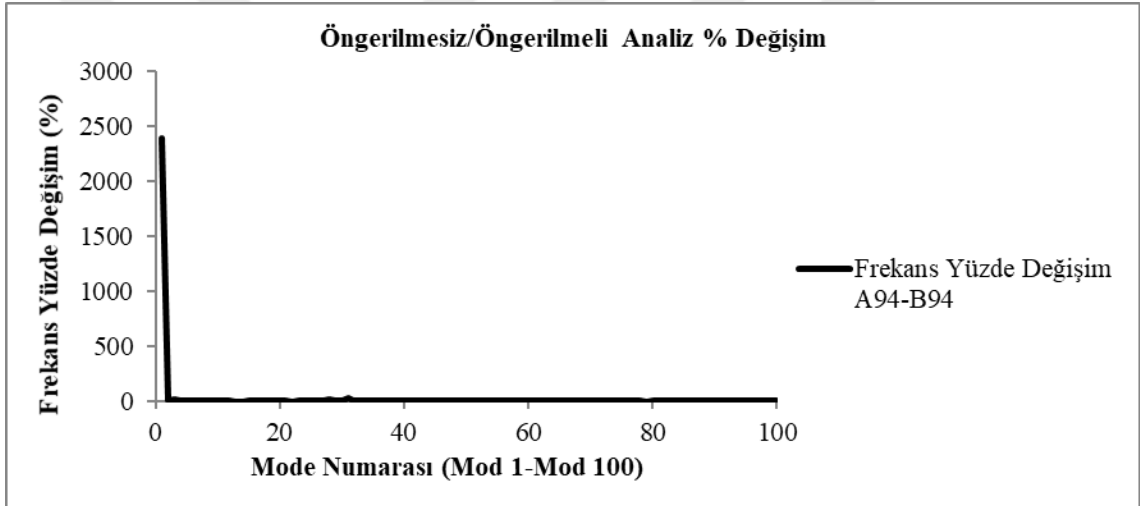
Şekil 4.52. Topoloji parametresi alternatiflerinin yerçekimi öngerilmemiş analizi sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.5. Termal genleşme öngerilmesi parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genleşme öngerilme parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden termal genleşme öngerilme parametresinin mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.53). İlgili analizler sonucunda termal genleşme öngerilmesi etkisiyle mod frekanslarının değişimi incelendiğinde; en büyük değişimin ilk mod'da olduğu, 4255 Hz'den 170 Hz'e düştüğü, 80. mod'a kadar genellikle frekansları düşürdüğü ve 80. moddan sonra ise artırdığı belirlenmiştir. Şekil 4.54 incelendiğinde de en yüksek değişimin 1. modda olduğu, diğer modlardaki değişimlerin çok küçük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.53. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizi sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

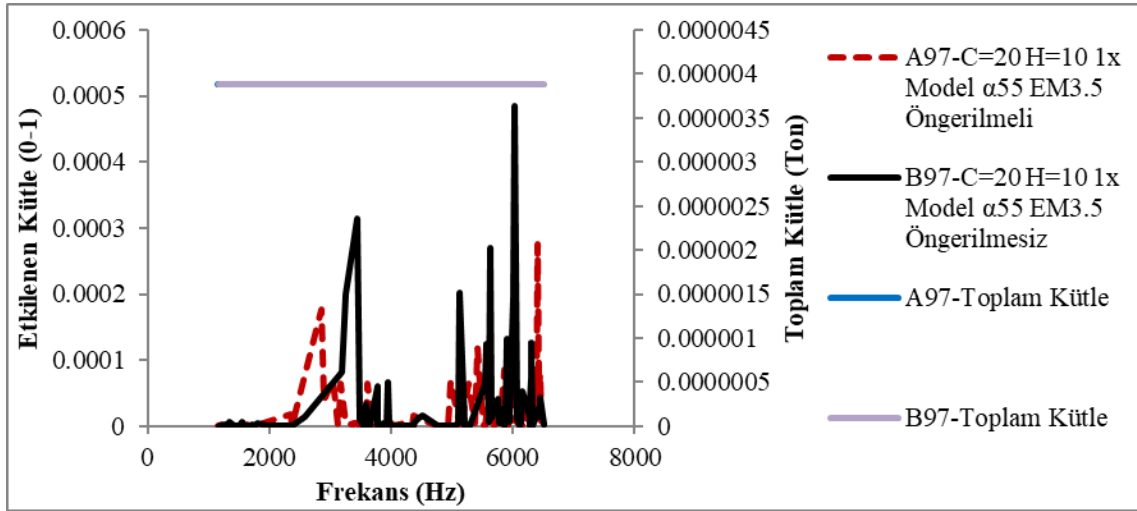


Şekil 4.54. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizi sonucunda elde edilen mod numarası - frekans yüzde değişim grafiği

Termal genişleme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.55) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genişleme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %0.05 olduğu görülmektedir. Termal genişleme öngerilmesi uygulandığında ise etkilenen kütle oranının en fazla %0.027

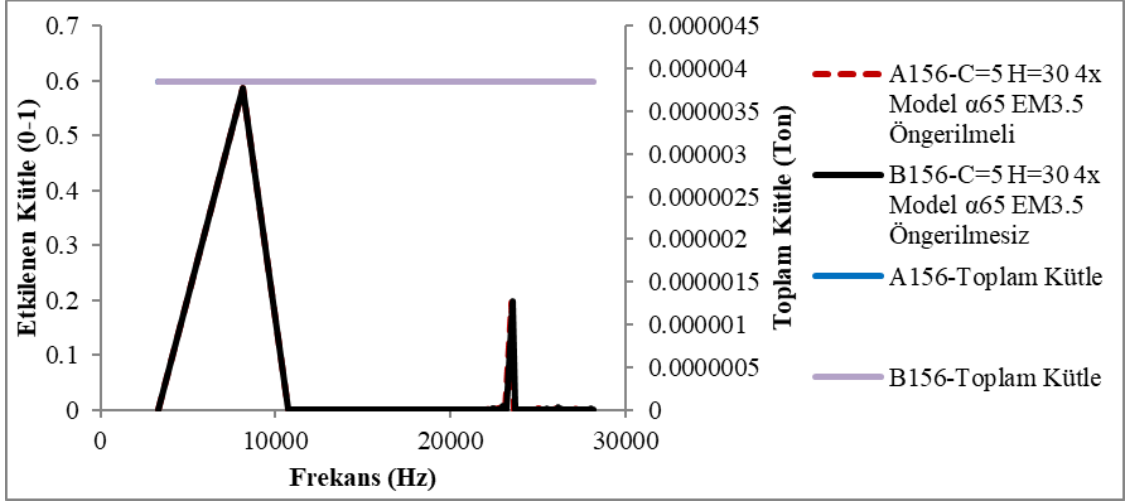
olduğu belirlenmiştir. Toplam kütle bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır. Termal genleşme öngerilmesi sonucunda X-yönünde etkilenen kütle oranlarının daha da aşağı çekildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.55. Termal genleşme öngerilmesi parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Termal genleşme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.56) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genleşme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

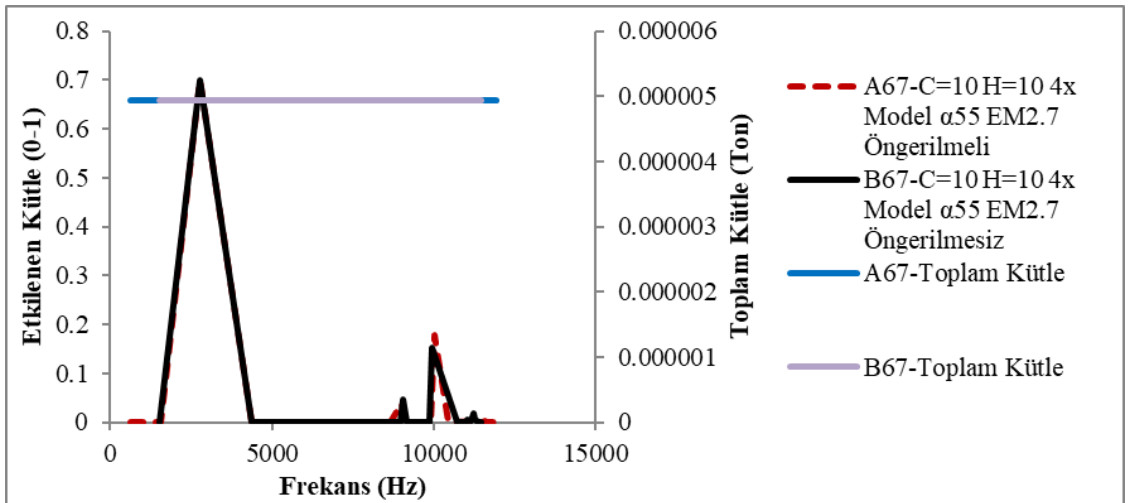
Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; termal genleşme öngerilmesinin etkilenen kütle frekansı ve ana modlar üzerinde bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.



**Şekil 4.56.** Termal genişleme öngerilmesi parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Termal genişleme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.57) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genişleme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

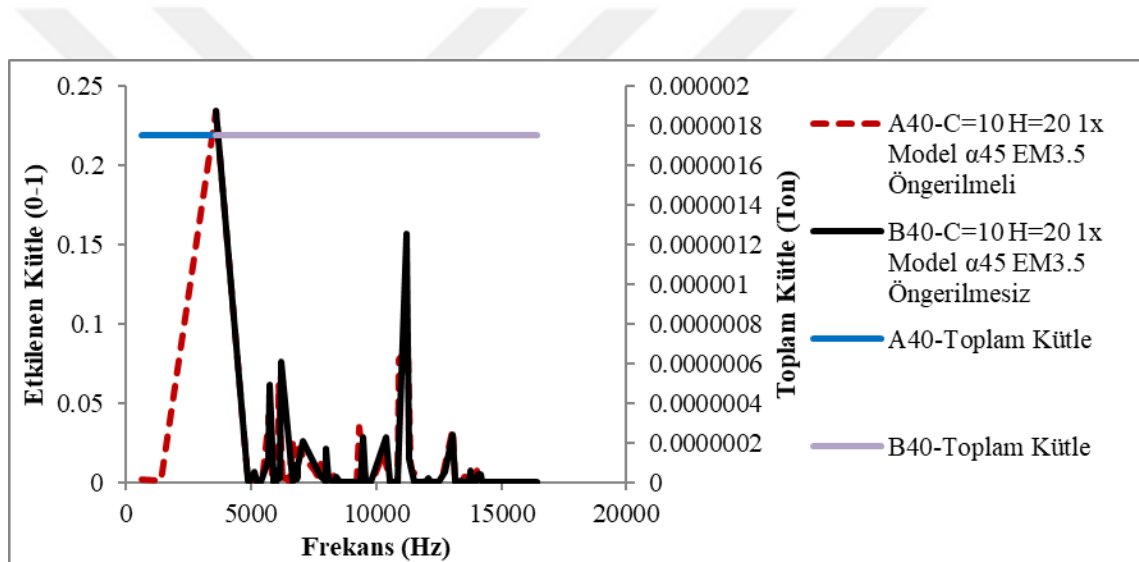
Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; termal genişleme öngerilmesi sonucunda ana modun neredeyse değişmediği, ikinci ana modun frekans değerlerinin ve etkilenen kütle oranının küçük de olsa arttığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.57.** Termal genişleme öngerilmesi parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Termal genleşme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.58) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genleşme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

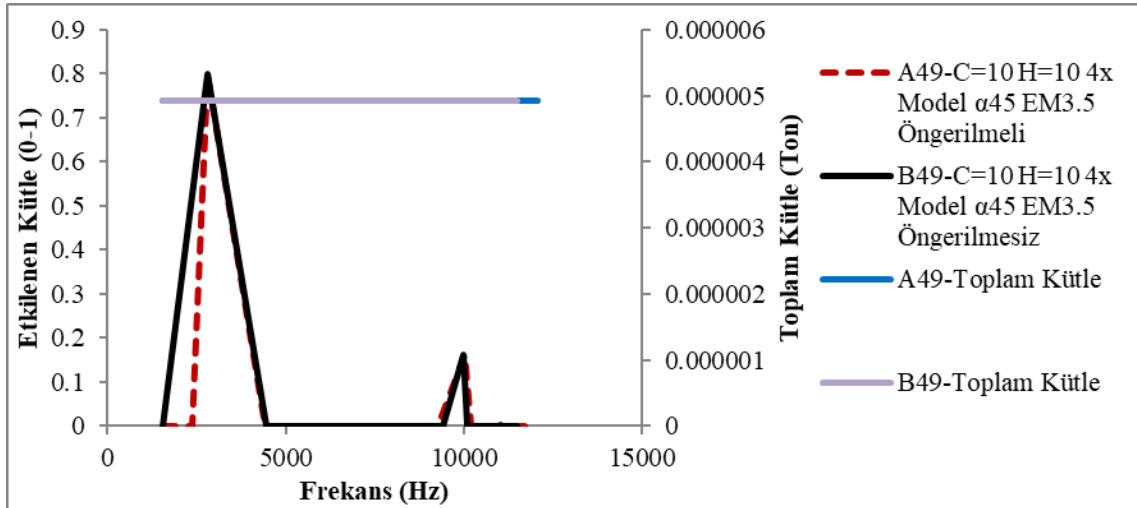
ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; termal genleşme öngerilmesi sonucunda ana modun neredeyse değişmediği, ikinci ana modun frekans değerlerinin ve etkilenen kütle oranının küçük de olsa azaldığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.58.** Termal genleşme öngerilmesi parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli / öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Termal genleşme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.59) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genleşme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

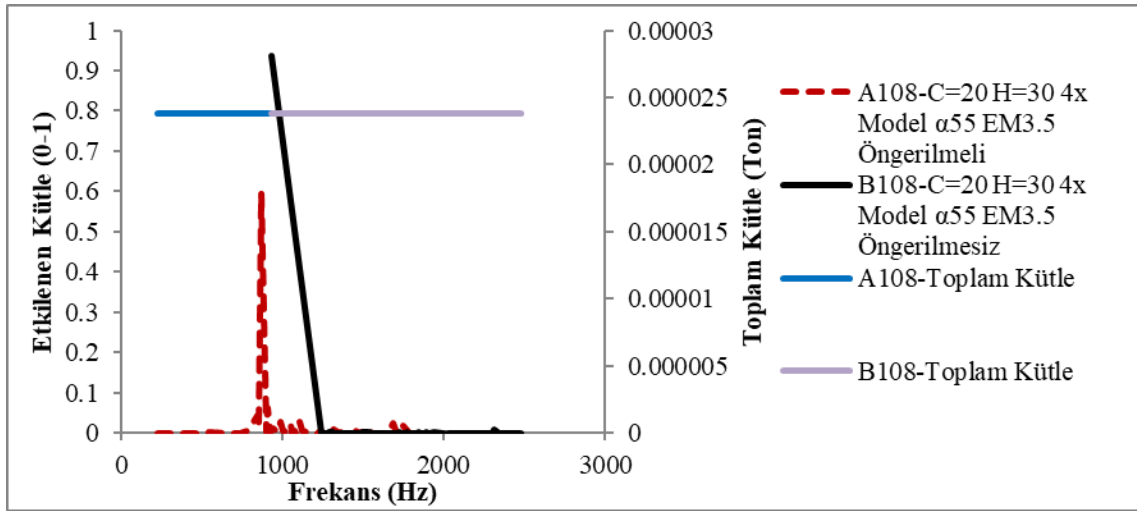
ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; termal genleşme öngerilmesi sonucunda ana modun neredeyse değişmediği, ikinci ana modun frekans değerlerinin küçük miktarda arttığı, etkilenen kütle oranının ise küçük miktarda azaldığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.59.** Termal genleşme öngerilmesi parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli / öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Termal genleşme öngerilmesi parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.60) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden termal genleşme öngerilmesi parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; termal genleşme öngerilmesi sonucunda ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.

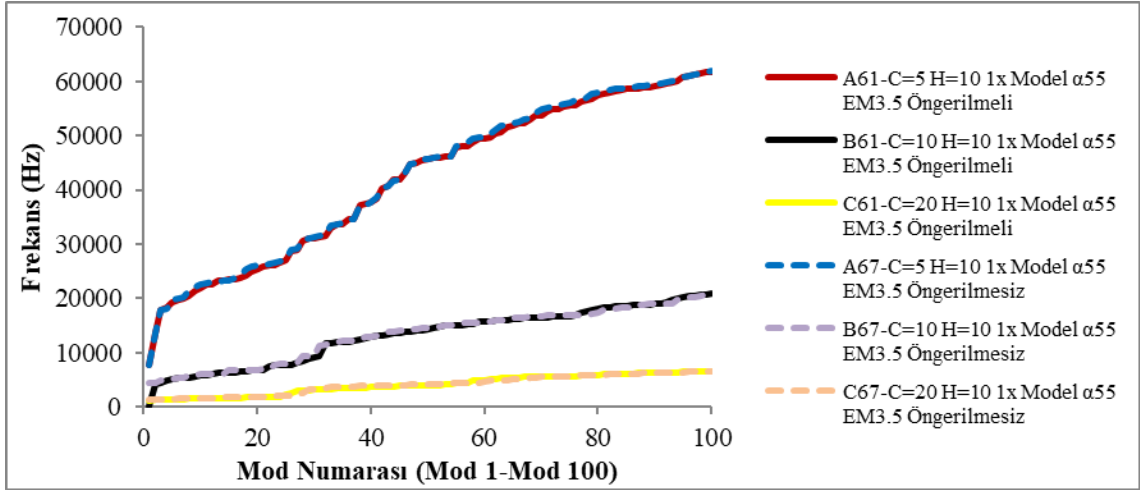


**Şekil 4.60.** Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.6. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmesiz analizlerde kor genişliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmesiz parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.61). İlgili modlar incelendiğinde kor genişliği parametresi arttığında mod frekanslarının daha düşük ve dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir.

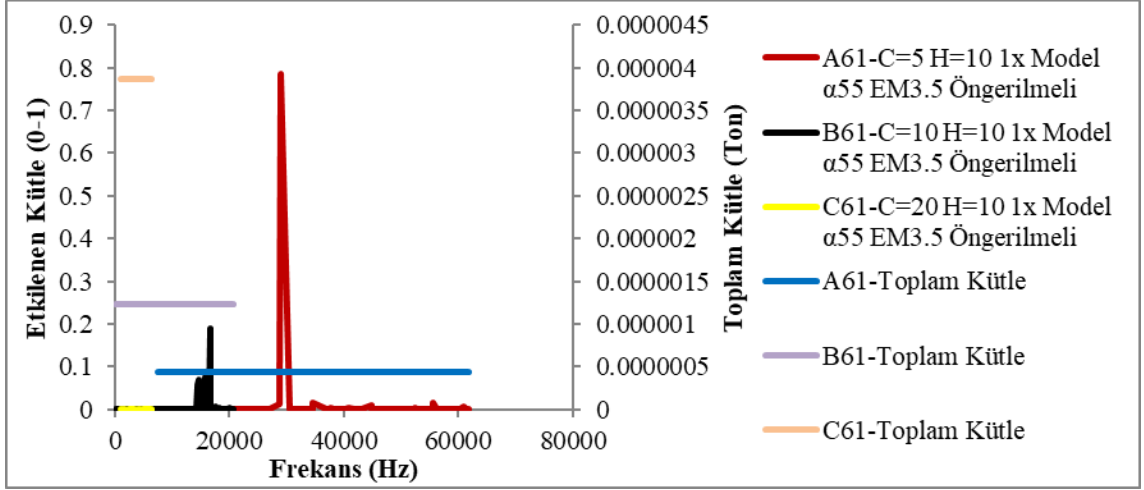




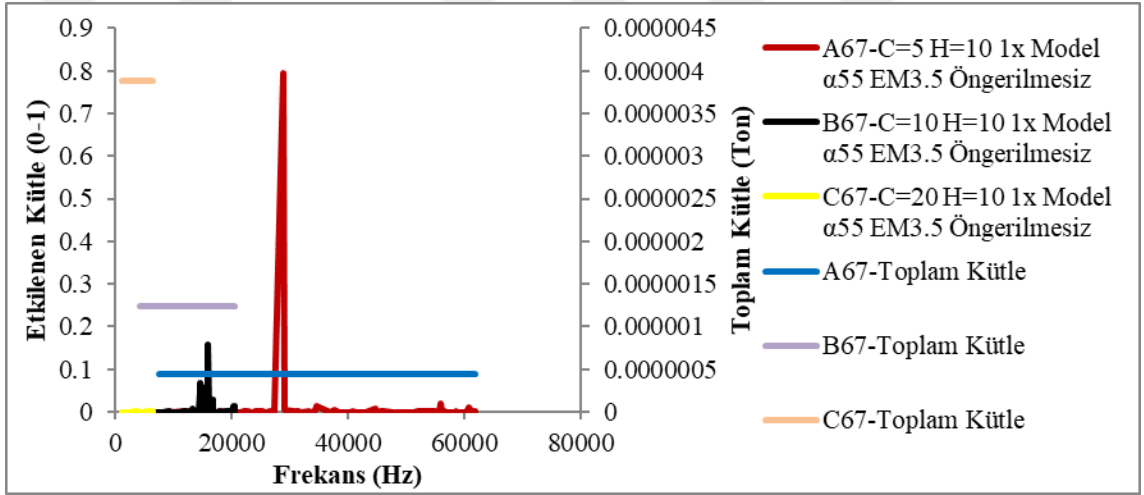
**Şekil 4.61.** Kor genişliği parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.62, Şekil 4.63) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; sadece kor genişliği parametresi değerinin 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda ana mod çıktığı ve kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modların düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının da düştüğü belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.62. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngörülmesi analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

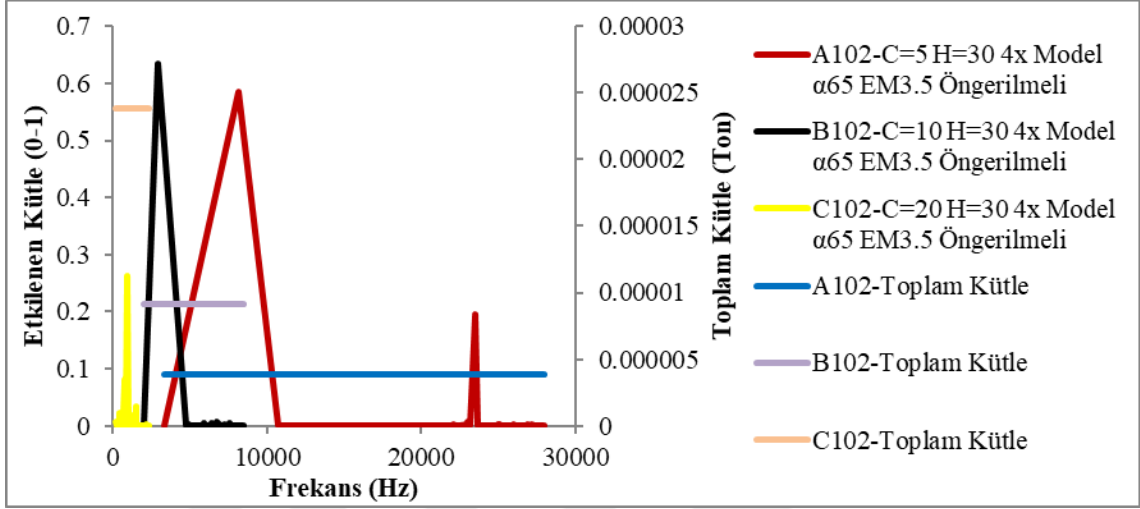


Şekil 4.63. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngörülmesiz analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

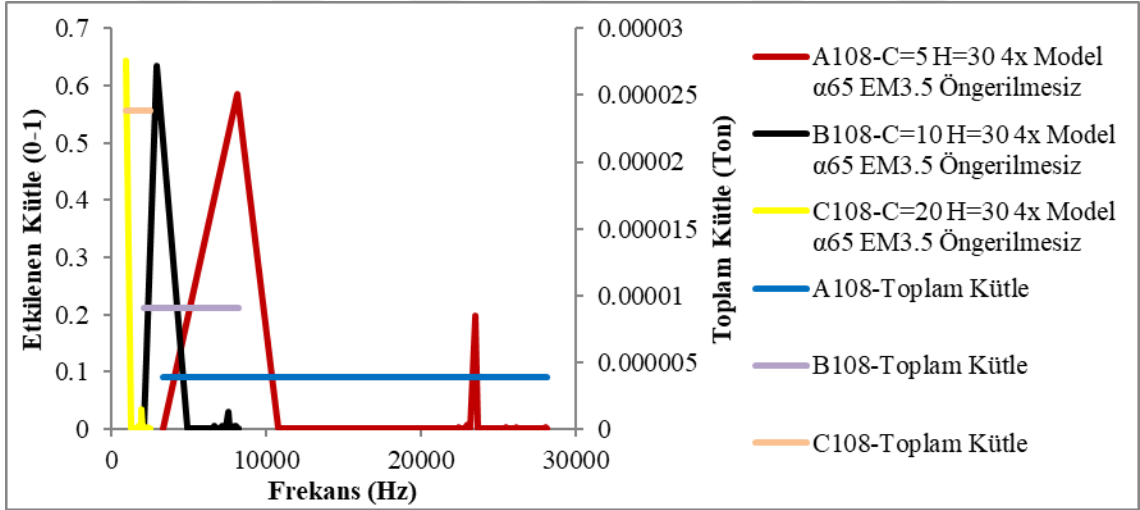
Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.64, Şekil 4.65) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngörülmesinin; kor genişliği

parametresi değeri 20 mm iken ana modun etkilenen kütle oranını %40 civarında aşağı çektiği belirlenmiştir. Bunun dışında termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.64. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

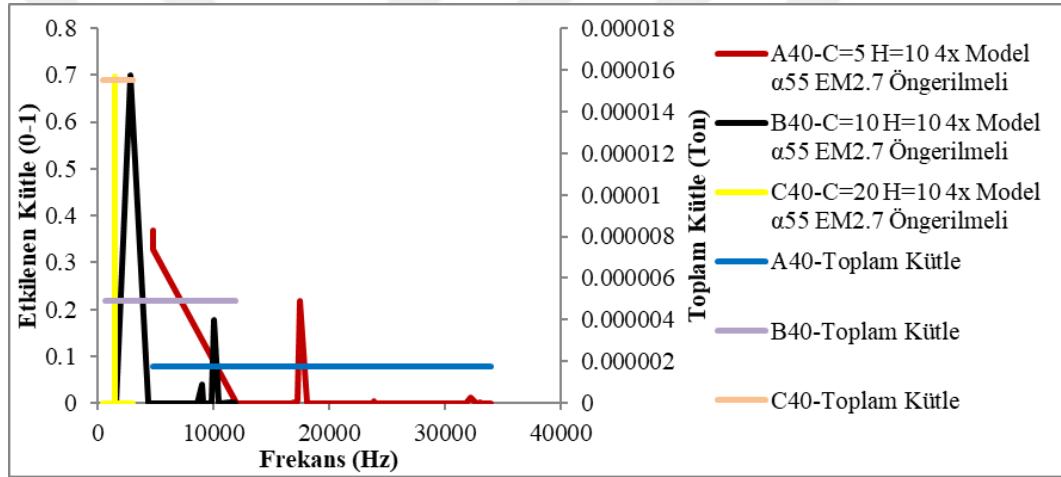


Şekil 4.65. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemesiz analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

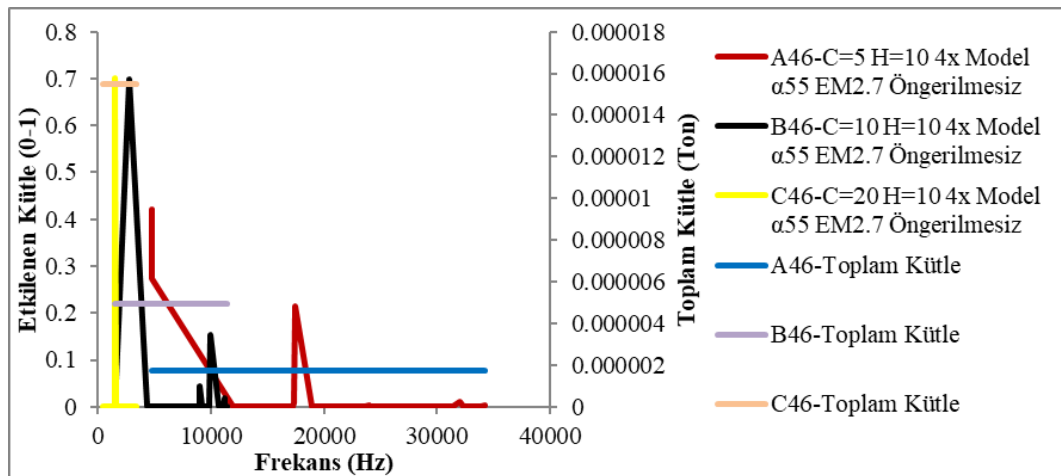
Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.66, Şekil 4.67) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği

parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca kor genişliği parametresi değeri 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda 2. ana modun çıktığı, kor genişliği parametresi arttıkça bu modların düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının da düştüğü belirlenmiştir. Termal genişleme öngерilmesinin; kor genişliği parametresi değeri 5 mm iken ana modun etkilenen kütle oranını %5 civarında aşağı çektiği belirlenmiştir. Bunun dışında termal genişleme öngерilmesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



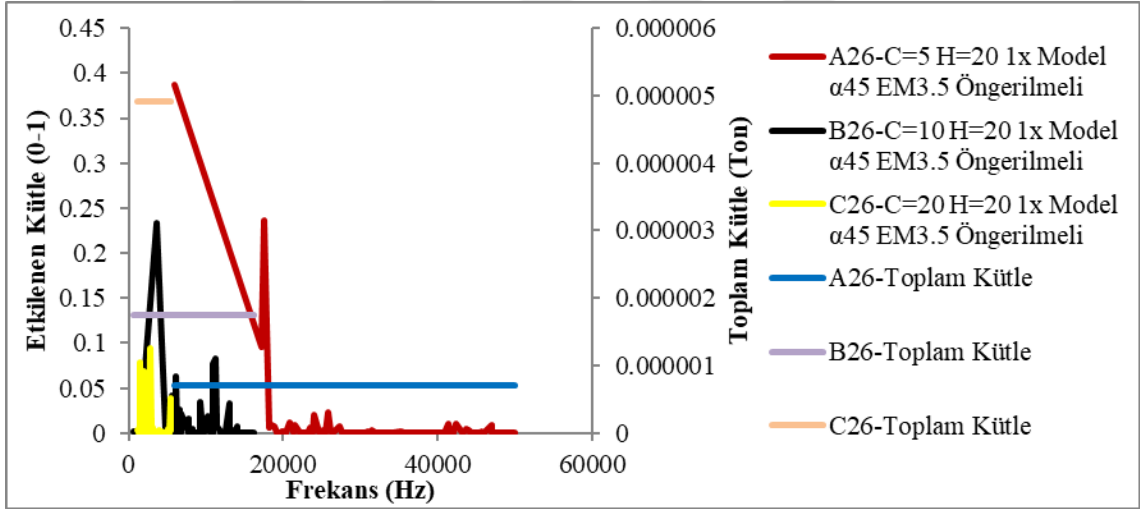
Şekil 4.66. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngерilmeli analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



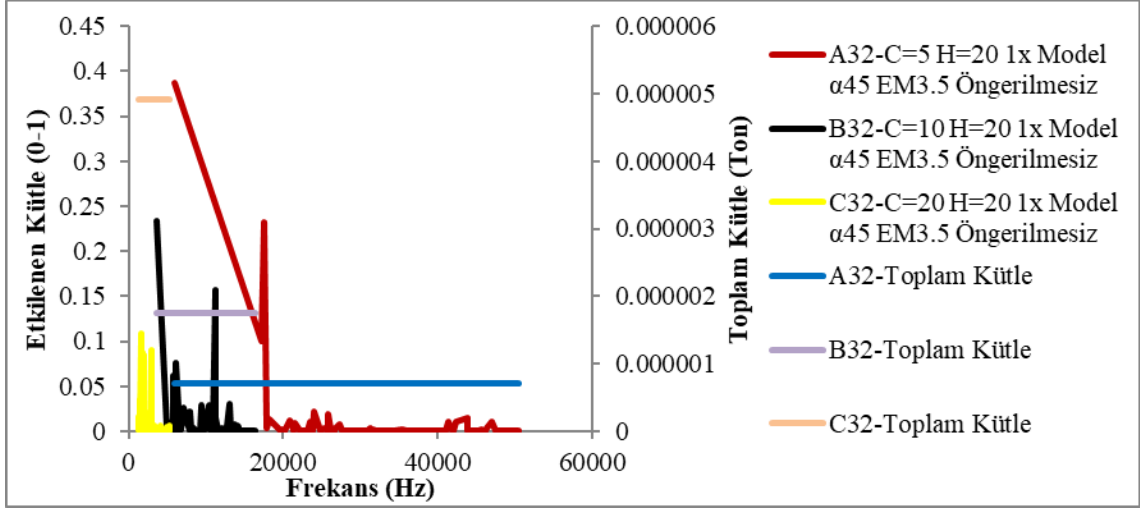
Şekil 4.67. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngерilmesiz analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.68, Şekil 4.69) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modların düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin; kor genişliği parametresi değeri 20 mm iken ana modun etkilenen kütle oranını %3 civarında aşağı çektiği belirlenmiştir. Bunun dışında termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



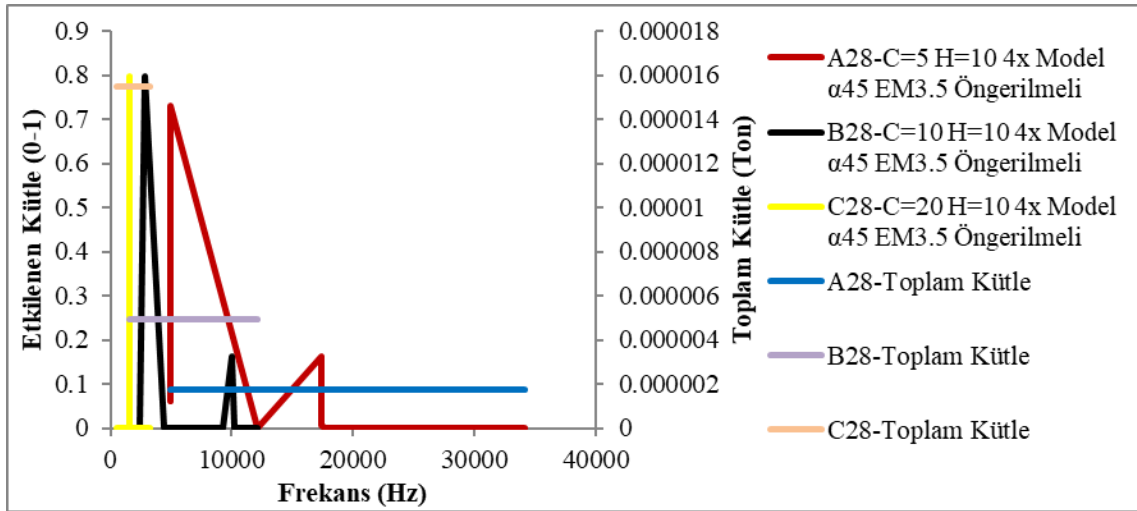
Şekil 4.68. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



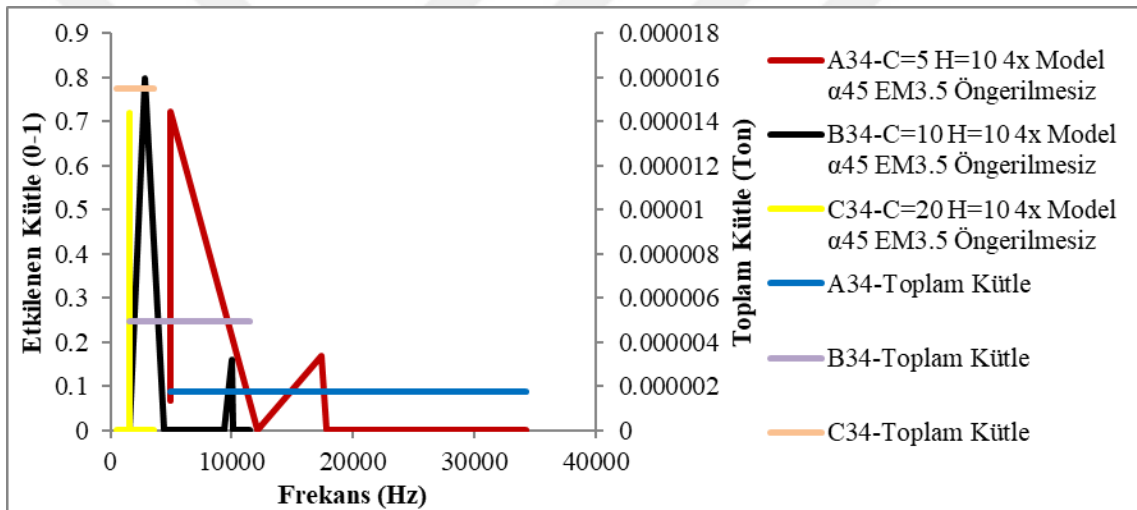
**Şekil 4.69.** Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.70, Şekil 4.71) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca kor genişliği parametresi değeri 5 mm ve 10 mm olduğu varyasyonlarda çıkan ikinci derece ana modun frekansları için de aynıını söylemek mümkündür. Termal genleşme öngerilmemesinin; kor genişliği parametresi değeri 20 mm iken ana modun etkilenen kütle oranını %8 civarında aşağı çektiği belirlenmiştir. Bunun dışında termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.70. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

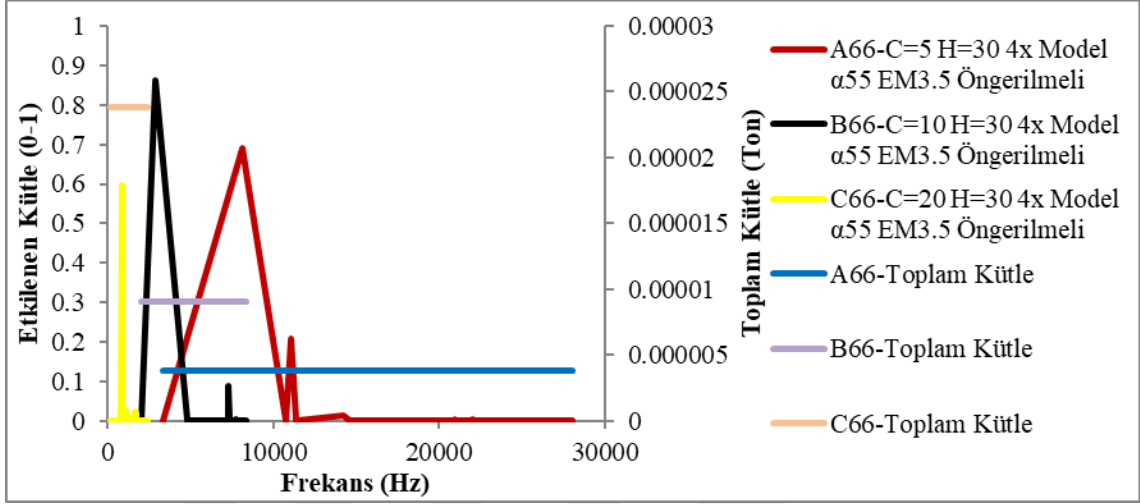


Şekil 4.71. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

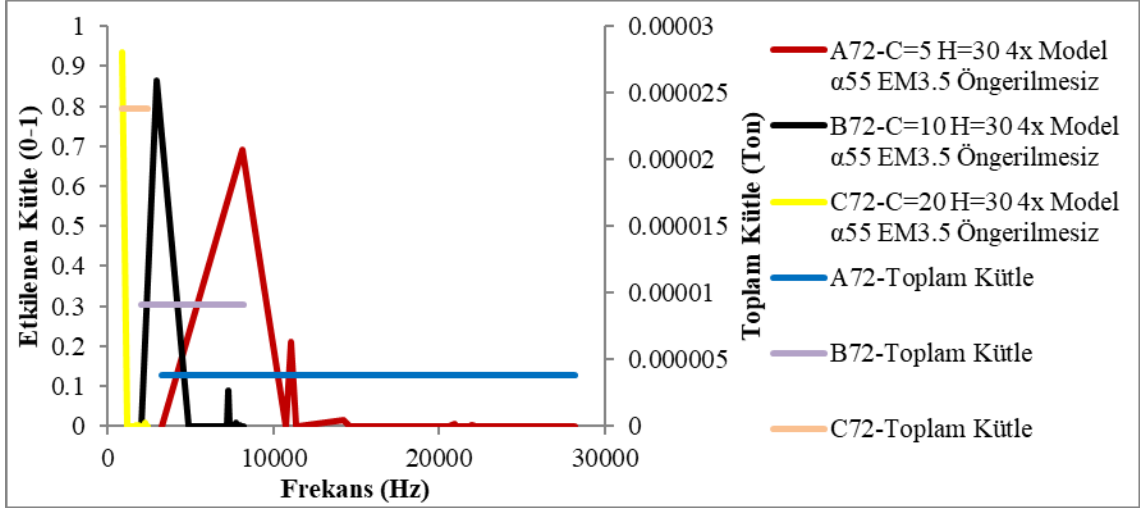
Kor genişliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.72, Şekil 4.73) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor genişliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin; kor

genişliği parametresi değeri 20 mm iken ana modun etkilenen kütle oranını %33 civarında aşağı çektiği belirlenmiştir. Bunun dışında termal genişleme öngerilmemesinin ana modlarda frekans değerleri ve etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.72. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



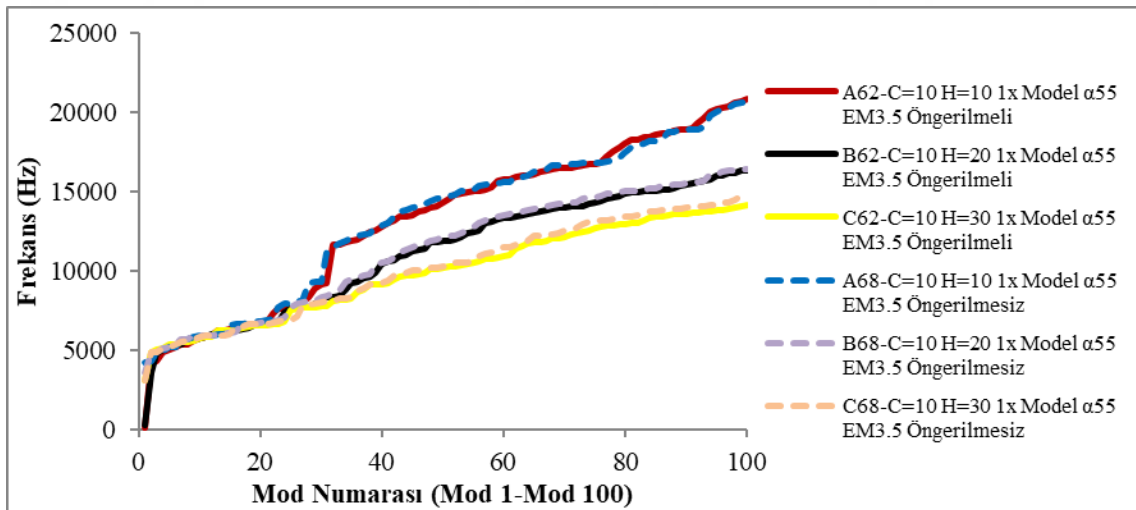
Şekil 4.73. Kor genişliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.7. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizlerde kor yüksekliği parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği



parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.74). İlgili analizler sonucunda kor yüksekliği parametresi değerinin değişimi sonucunda mod frekanslarının değişimi incelendiğinde kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça ilk 100 Mod'un daha dar bir frekans bandına sıkıştığı, mod frekans değerlerinin 1. Mod ile 22. Mod arasında yükseldiği, 22. Mod'dan sonra azaldığı ve bu azalmanın 30. Mod'dan sonra daha da arttığı belirlenmiştir.

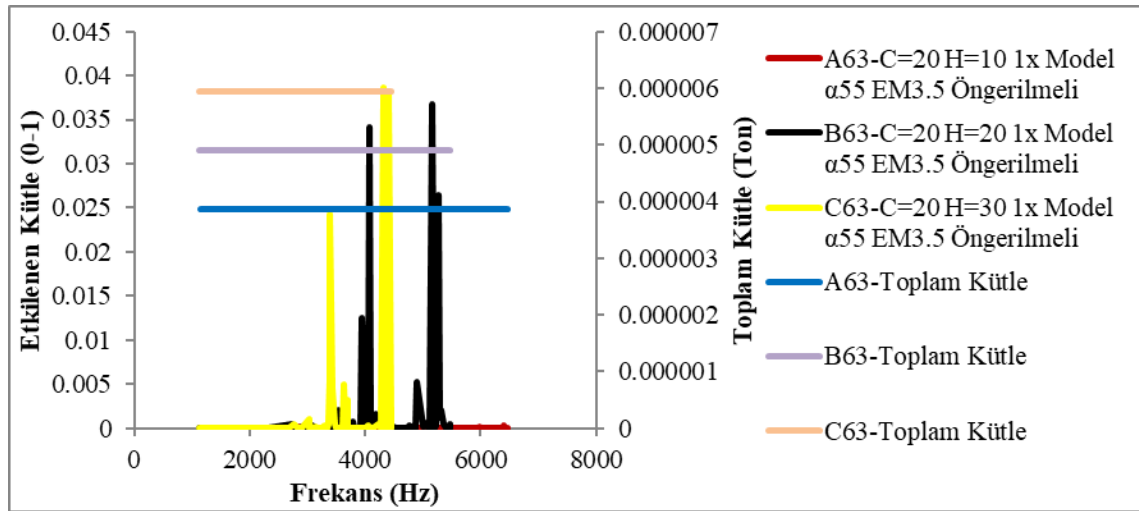


Şekil 4.74. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngörülmesi / öngörülmesi analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

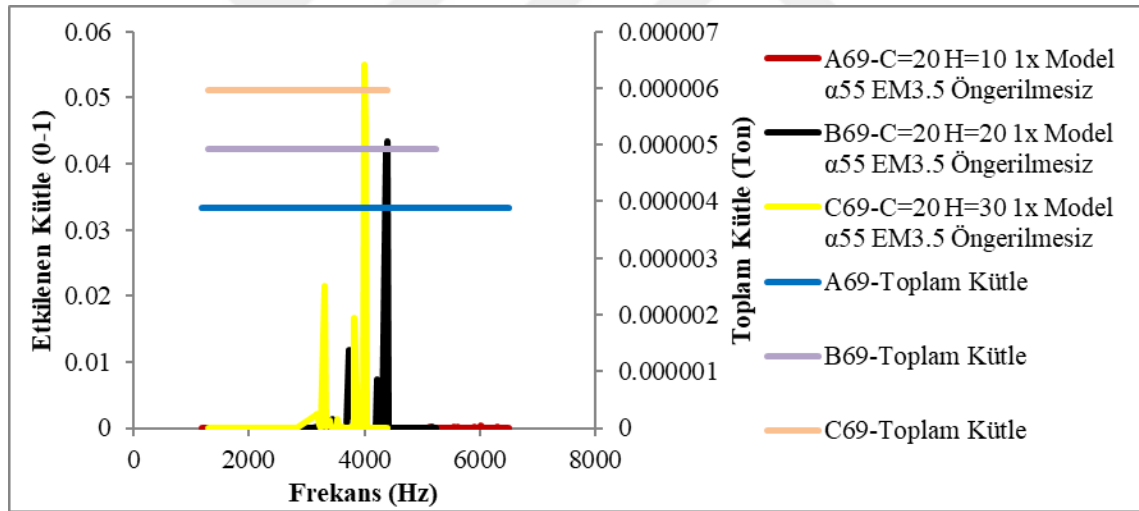
Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.75, Şekil 4.76) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %5.5 olduğu görülmektedir. Diğer tüm modların kütle oranının %5'ini bile etkilemediği belirlenmiştir. Kor genişliği parametresinin

değeri arttıkça etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin etkilenen kütle oranını azalttığı belirlenmiştir.



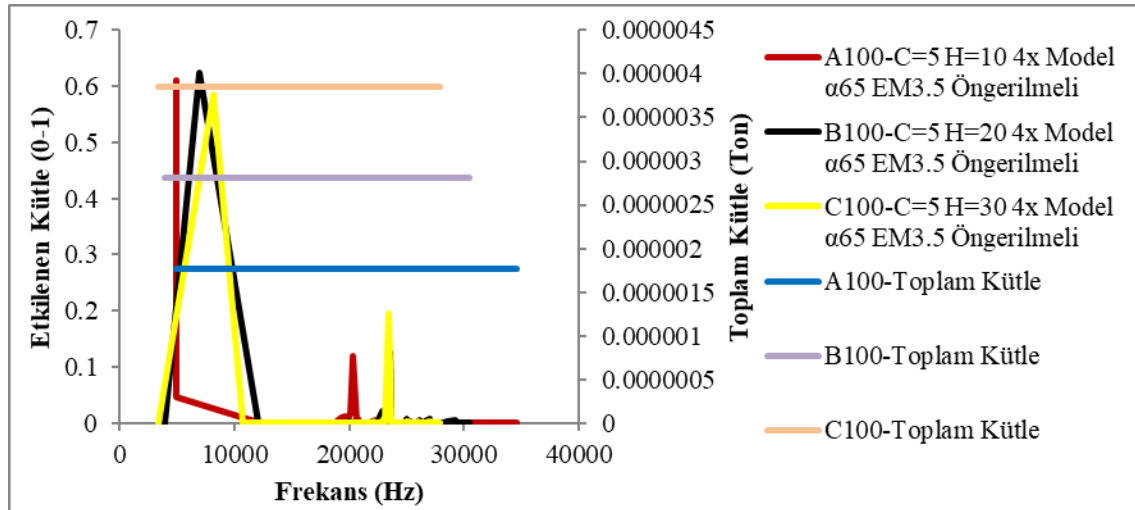
Şekil 4.75. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



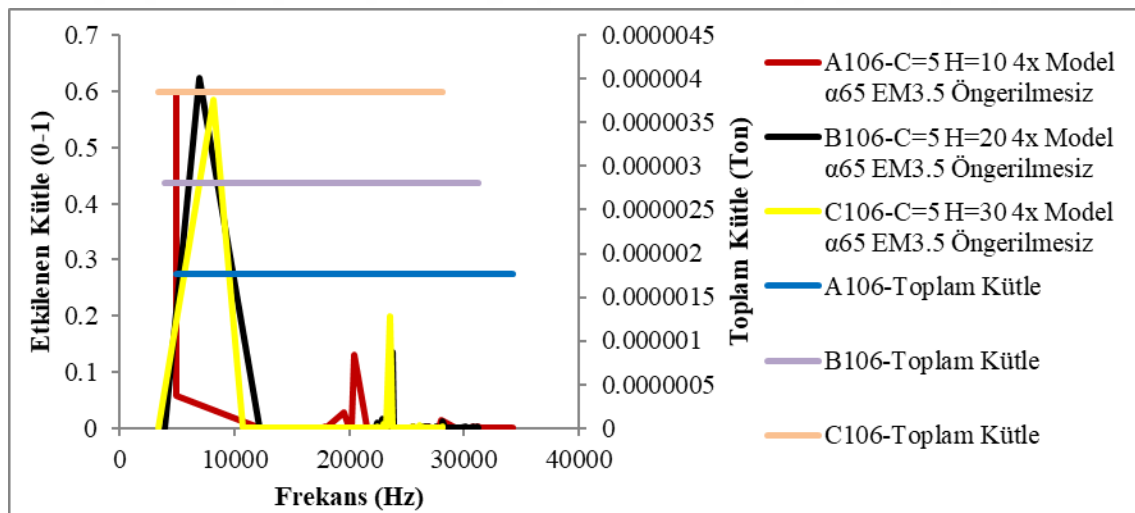
Şekil 4.76. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemesiz analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.77, Şekil 4.78) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresi arttıkça ana modun yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının önce arttığı ardından azaldığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.77. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

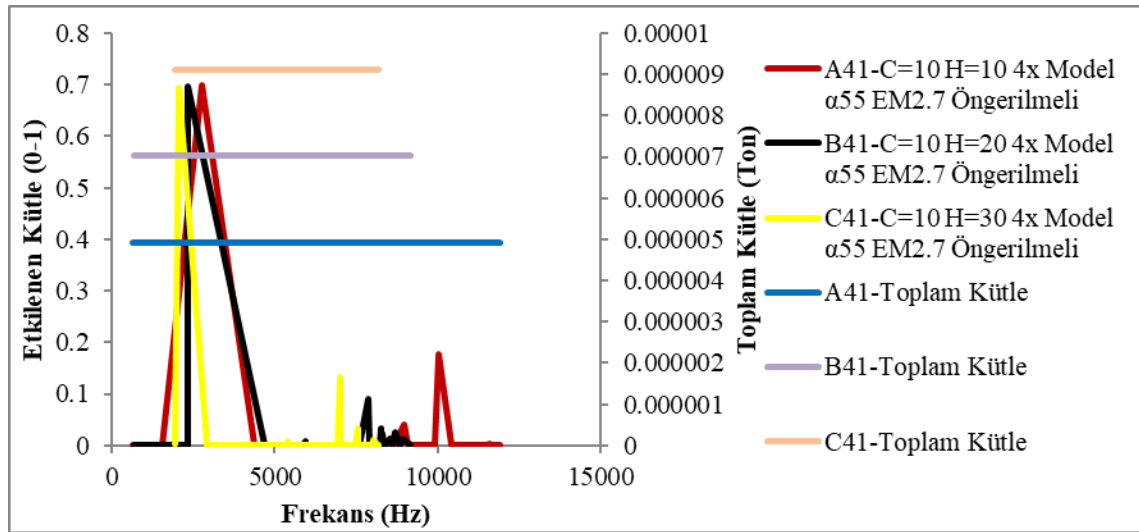


Şekil 4.78. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

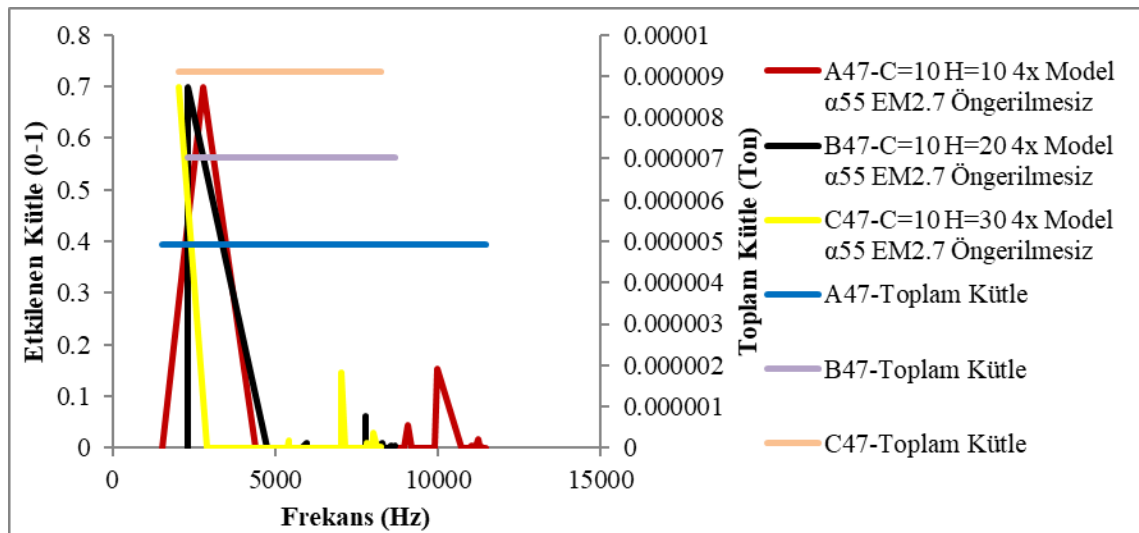
Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.79, Şekil 4.80) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu

analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresi arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



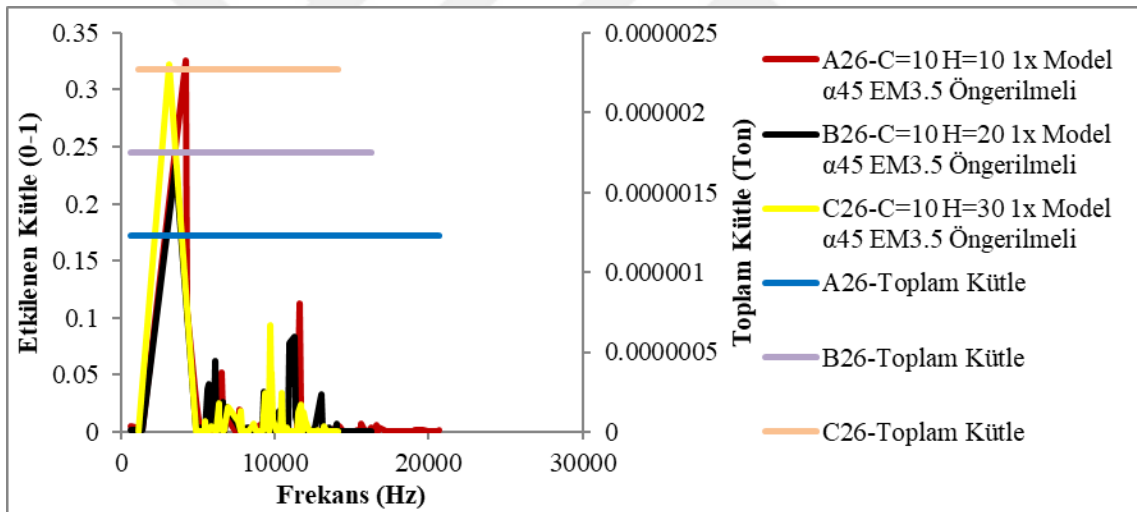
Şekil 4.79. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



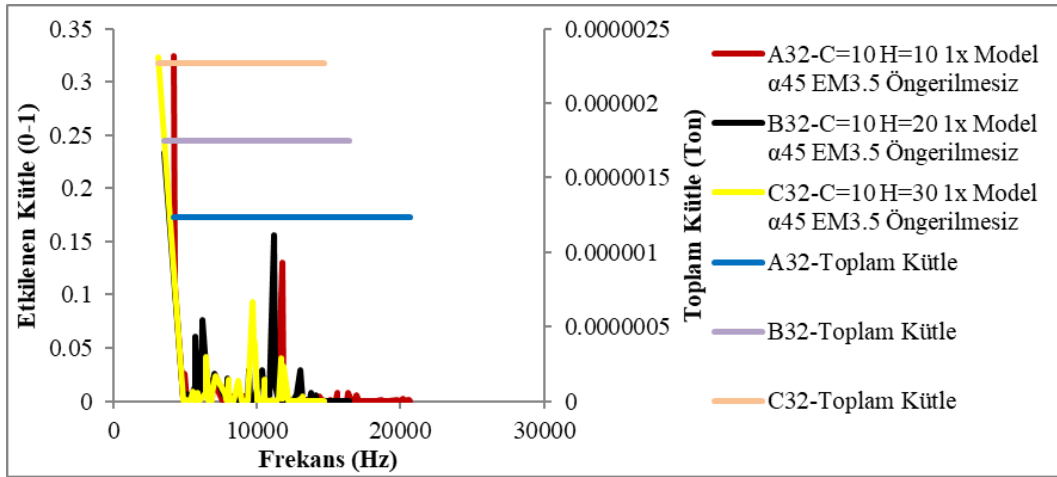
Şekil 4.80. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.81, Şekil 4.82) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresi arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının önce düştüğü sonra arttığı belirlenmiştir. Termal genişme öngerilmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



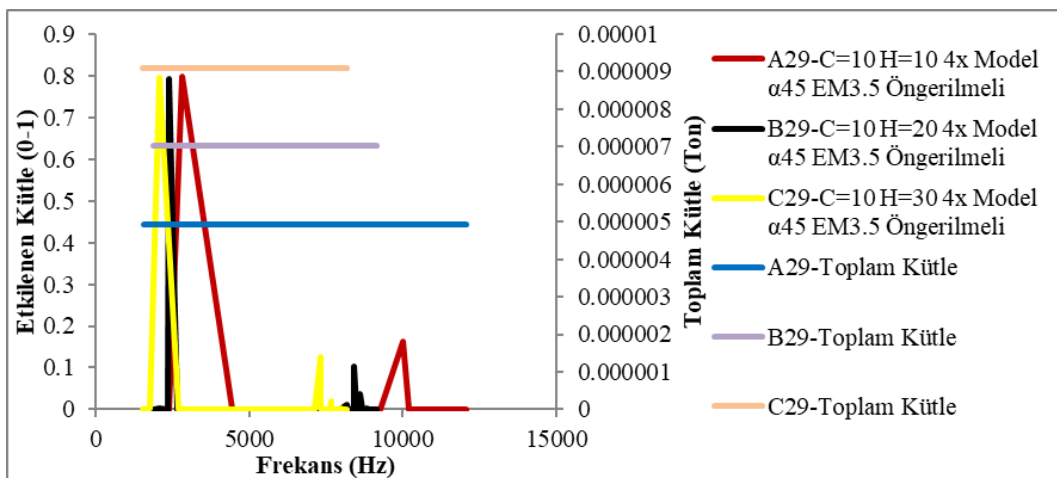
Şekil 4.81. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



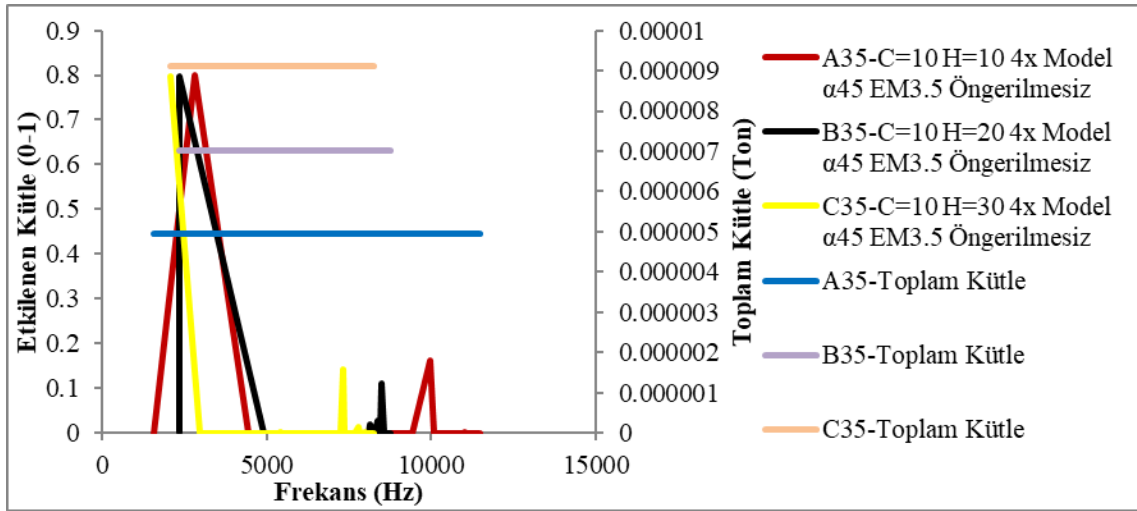
**Şekil 4.82.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği

Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.83, Şekil 4.84) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresi arttıkça ana modun düşük frekans değerlerine taşındığı ve etkilene kütlesi oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin ana modlarda etkilene kütlesi oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



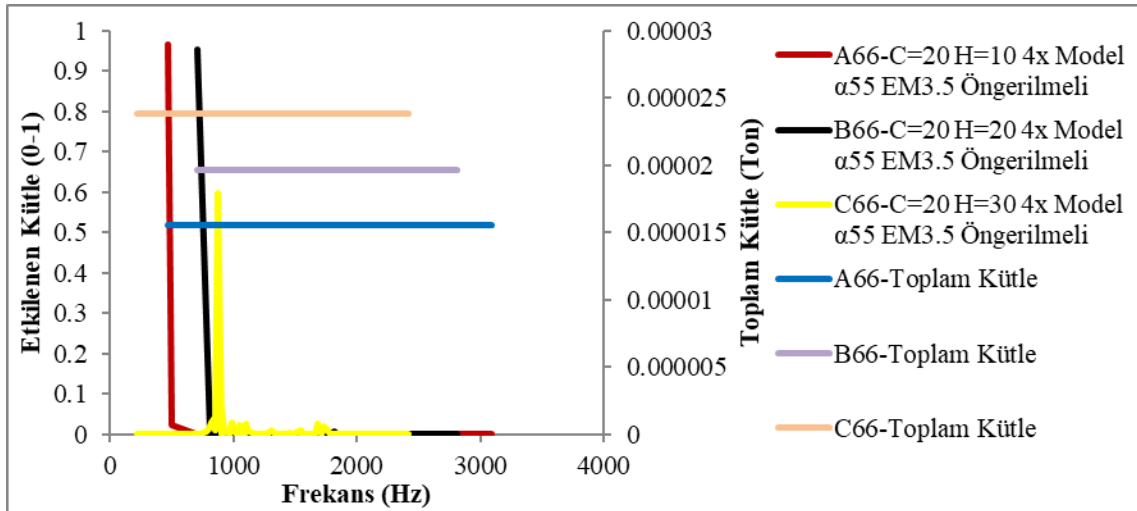
**Şekil 4.83.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği



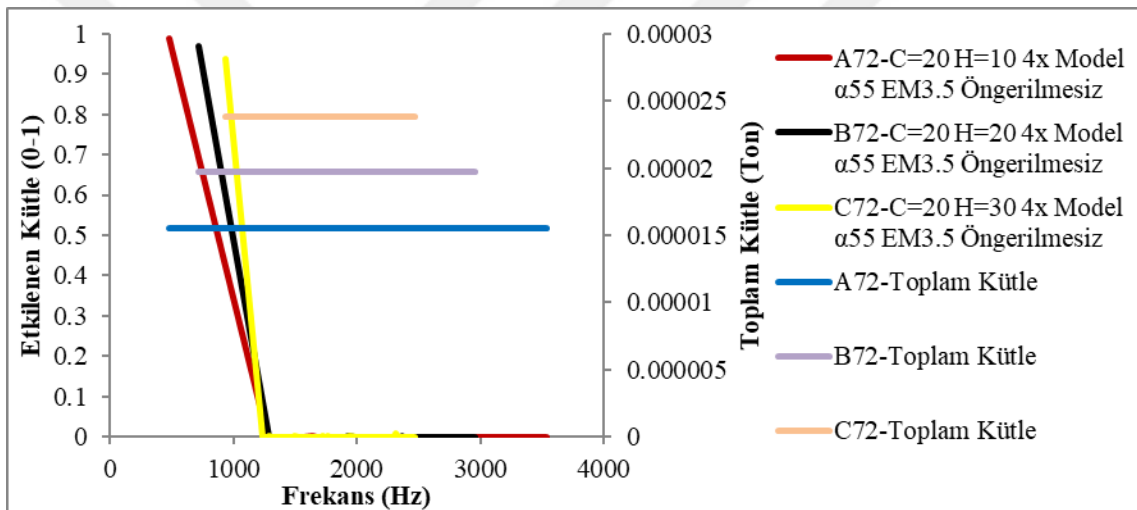
**Şekil 4.84.** Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilene küt le grafiği

Kor yüksekliği parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.85, Şekil 4.86) en yüksek etkin küt le değ işiminin; kor genişliği parametre değ erinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değ erinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkt ığı belirlenmiştir. Bu yüzden kor yüksekliği parametresinin, etkin küt le oranı değ işimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin küt le değ işimi incelendiğinde; kor yüksekliği parametresi arttıkça ana modun yüksek frekans değ erlerine taşındığı ve etkilene küt le oranının azaldığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin; kor yüksekliği parametresinin değ eri 10 mm ve 20 mm iken ana modlarda etkilene küt le oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu, 30 mm iken etkilene küt le oranının %25 oranında azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.85. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngörilmeli analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



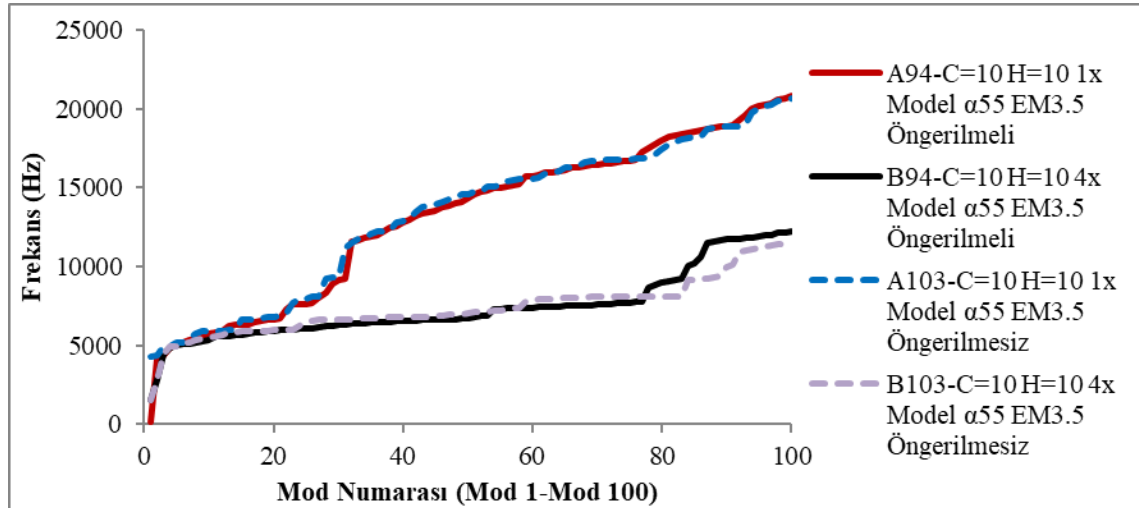
Şekil 4.86. Kor yüksekliği parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngörülmesiz analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.8. Termal genleşme öngörilmeli / öngörülmesiz analizlerde topoloji parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genleşme öngörilmeli / öngörülmesiz parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden topoloji parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.87). İlgili



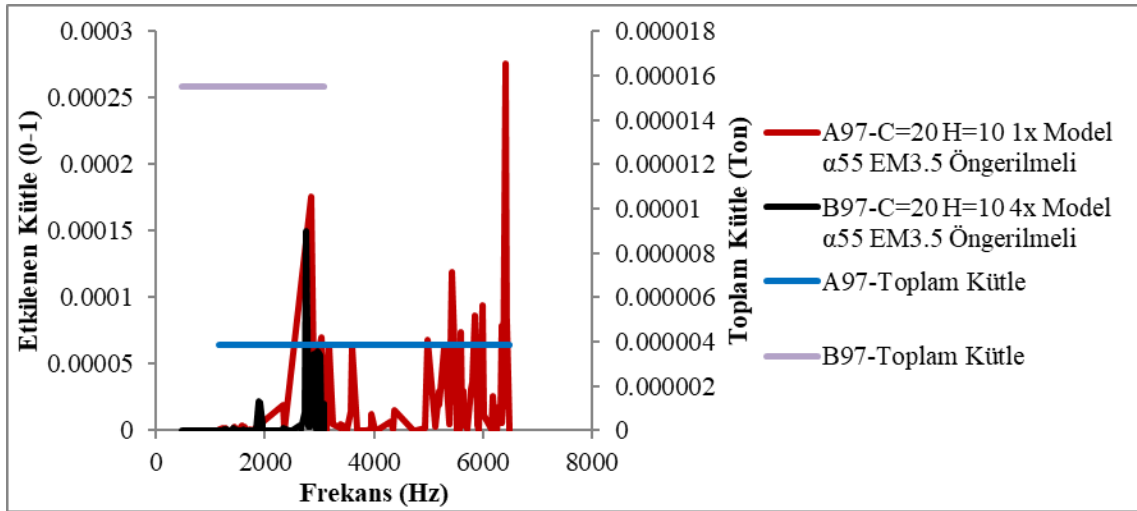
analizler sonucunda topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e çıktığında mod frekanslarının değişimi incelendiğinde; ilk 100 modun daha dar bir frekans bandına sıkıştığı ve mod frekans değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Özellikle 20. Mod'dan sonra daha dikkat çeken bir azalma olduğu belirlenmiştir.



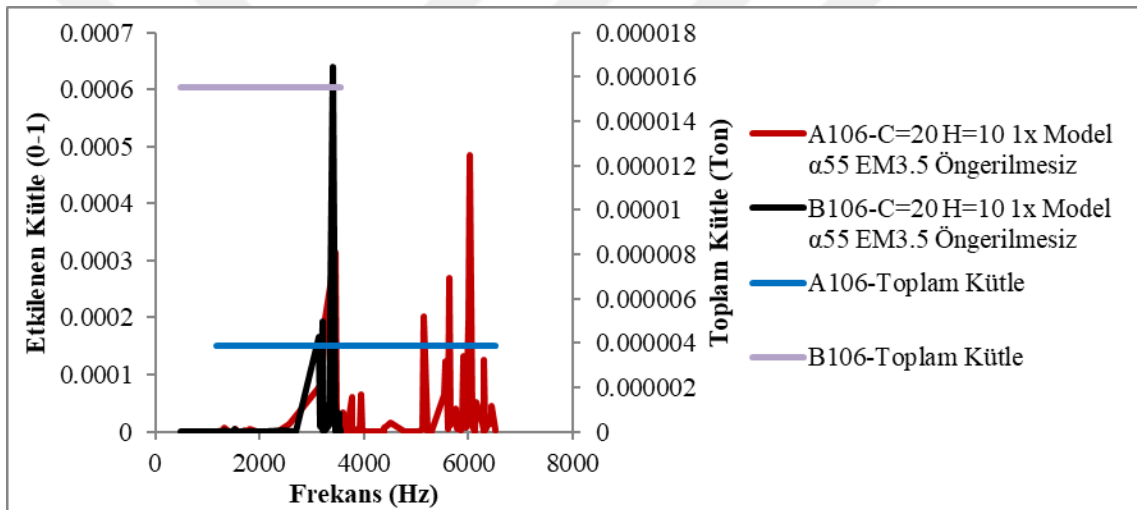
Şekil 4.87. Topoloji parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngerilmeli / öngerilmemiş analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.88, Şekil 4.89) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle oranı değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %0,064 olduğu görülmektedir. Toplam kütle bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır. Topoloji parametresi 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda mod frekanslarının ve etkilenen kütle oranlarının düşük değerlere taşındığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin etkilenen kütle oranını ise düşük değerlere taşıdığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.88.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

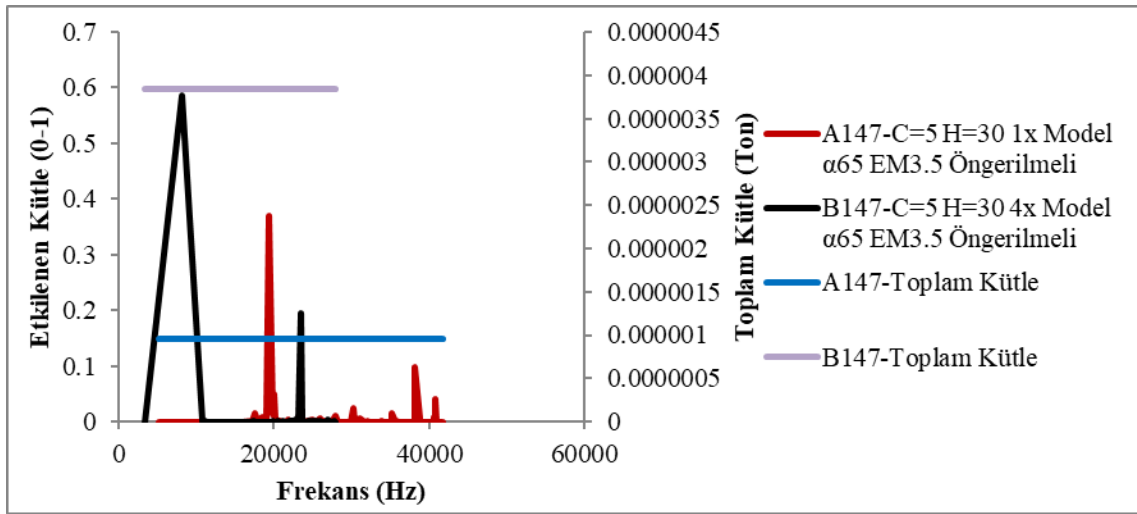


**Şekil 4.89.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

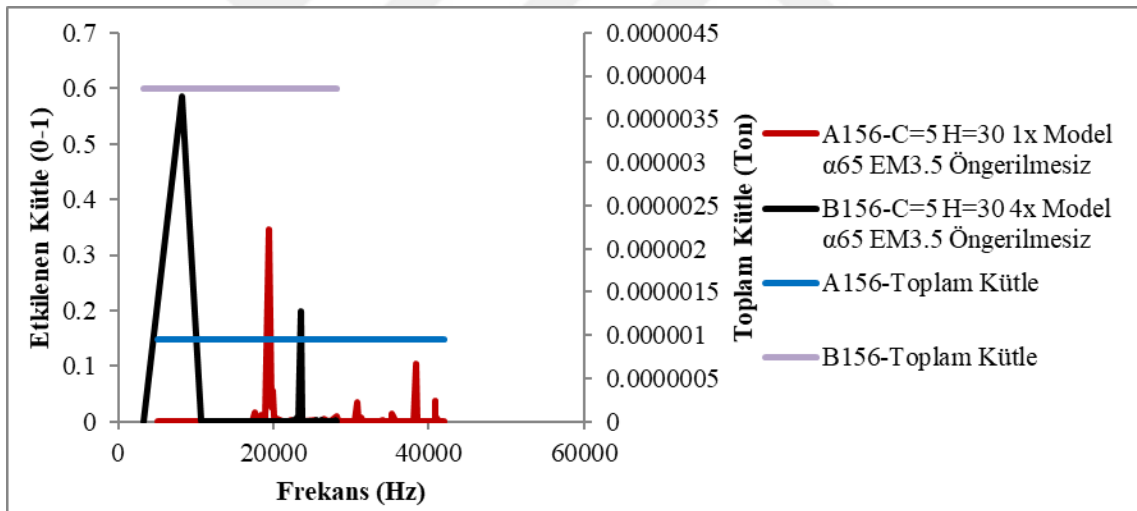
Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.90, Şekil 4.91) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin ana

modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



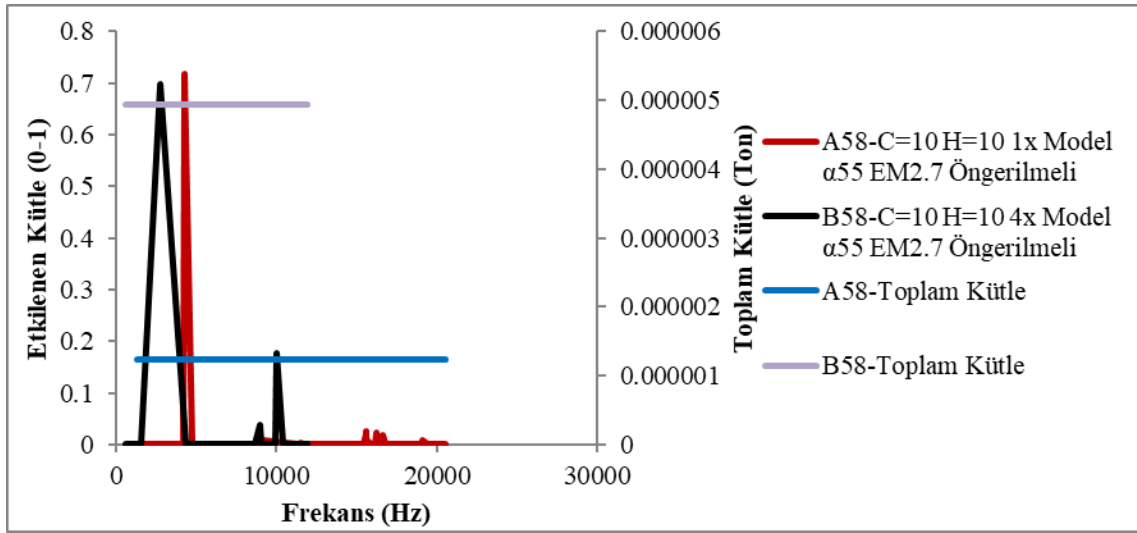
Şekil 4.90. Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



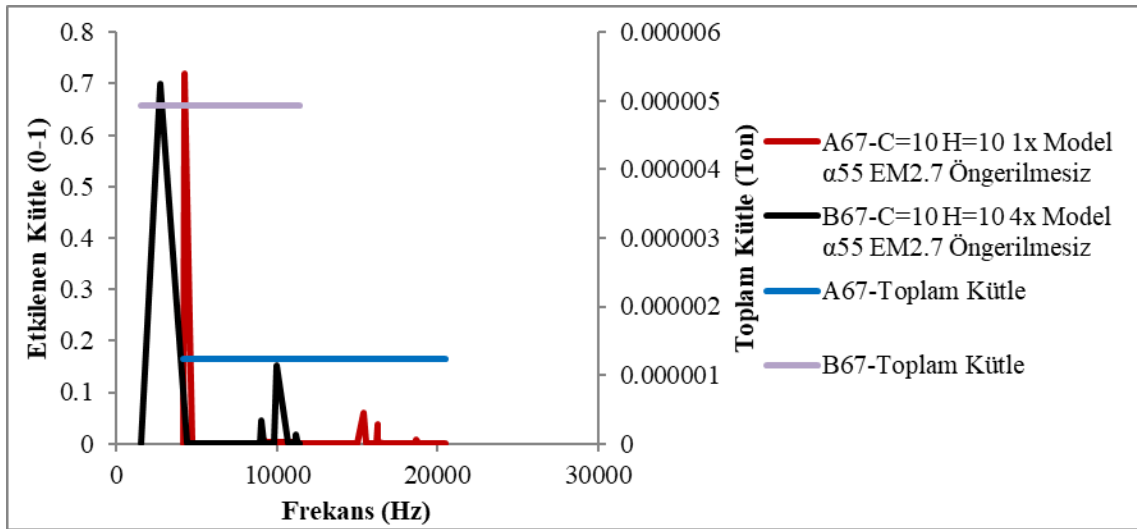
Şekil 4.91. Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.92, Şekil 4.93) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.92. Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

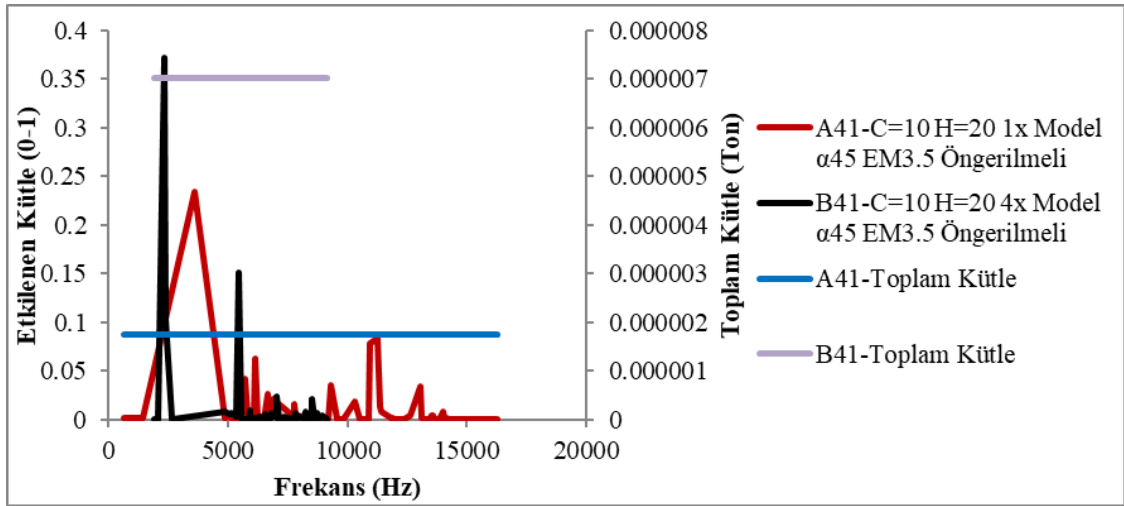


Şekil 4.93. Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

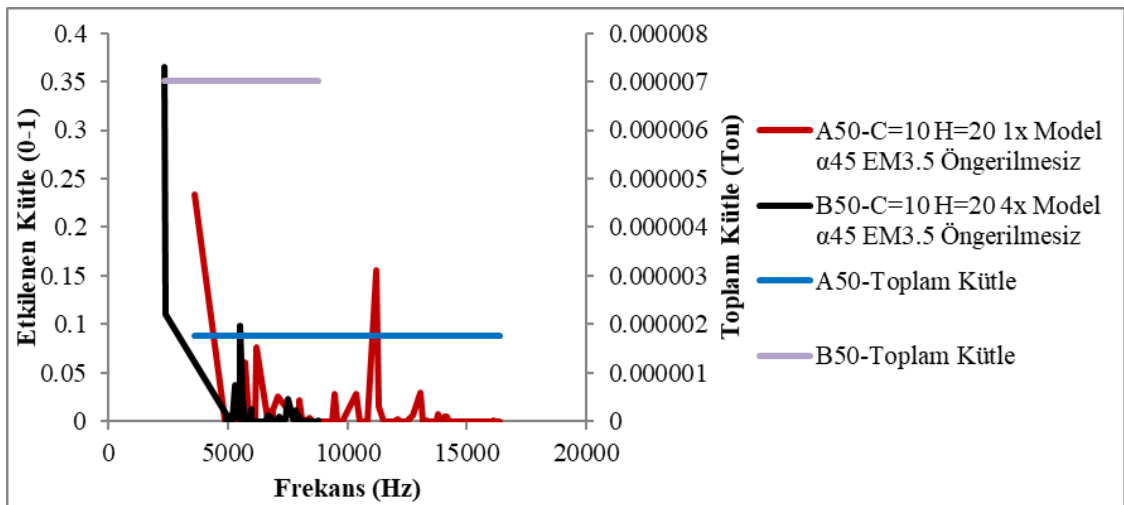
Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.94, Şekil 4.95) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model,

epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin birinci ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu ikinci ana modlarda ise etkilenen kütle oranlarında %5 civarında değişim olduğu görülmektedir.



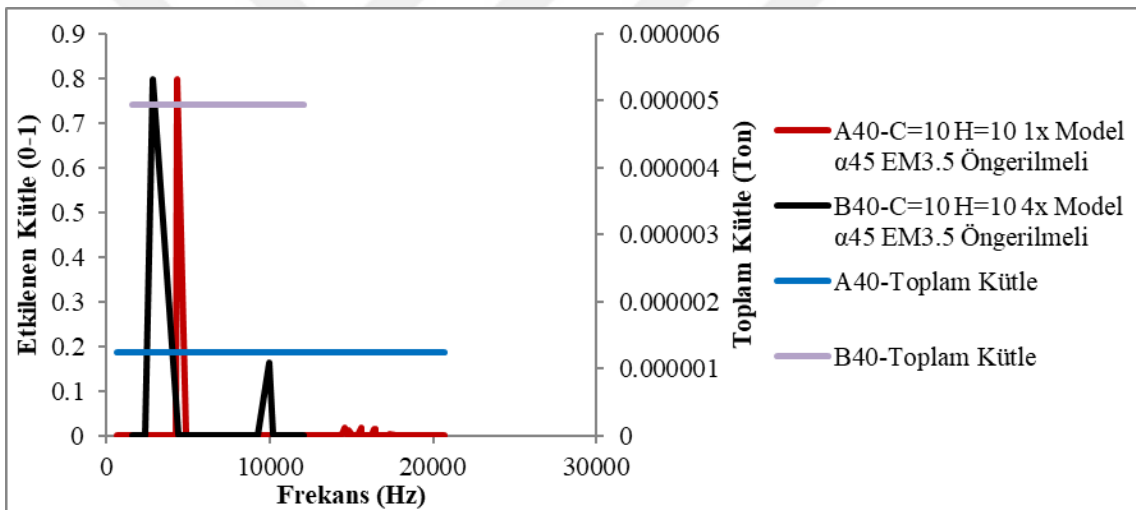
**Şekil 4.94.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



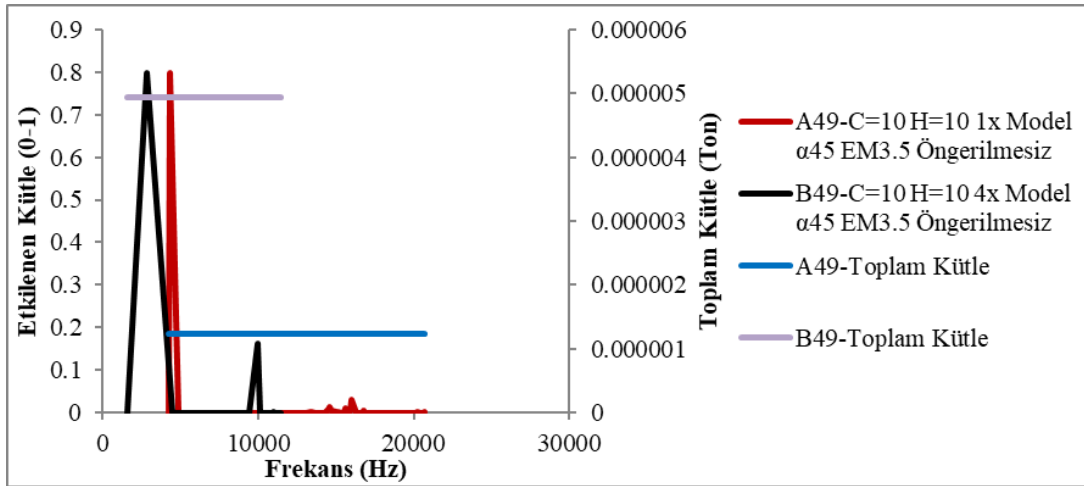
**Şekil 4.95.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.96, Şekil 4.97) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model'den 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının ise değişmediği belirlenmiştir. Termal genişleme öngörülmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



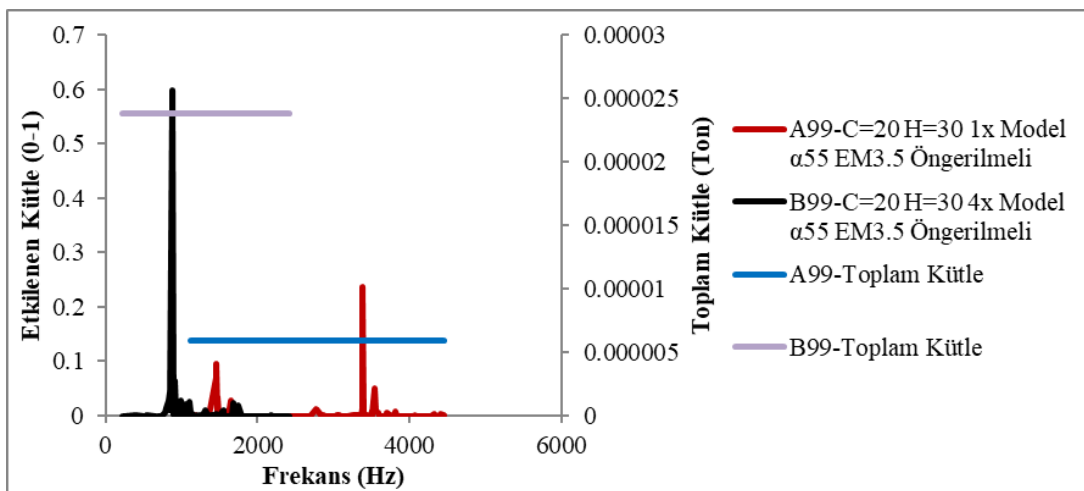
**Şekil 4.96.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngörülmesi analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



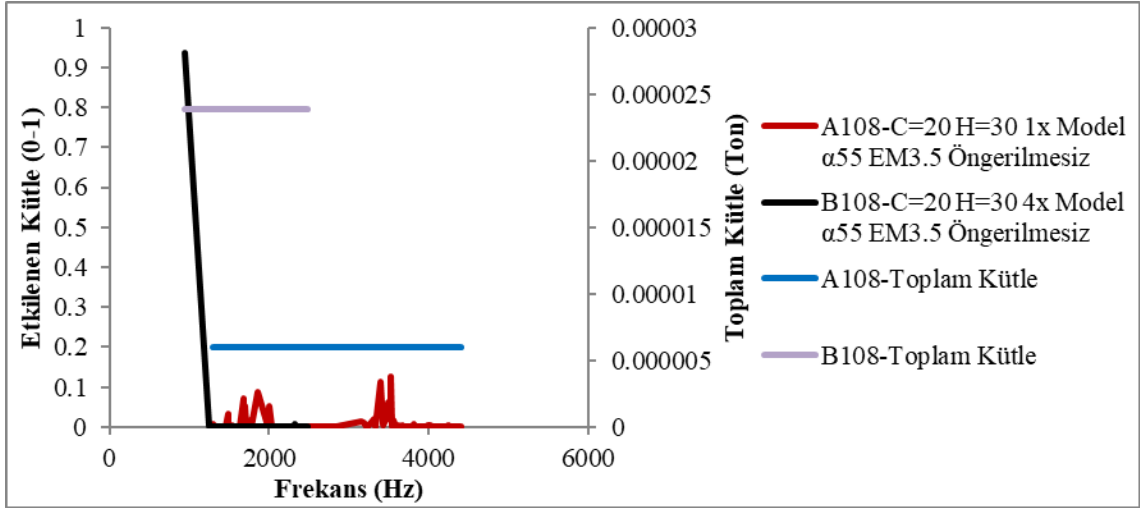
**Şekil 4.97.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Topoloji parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.98, Şekil 4.99) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden topoloji parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; topoloji parametresinin 1x Model 4x Model'e değişimi sonucunda ana modun düşük frekans değerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının arttığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranlarını azalttığı belirlenmiştir.



**Şekil 4.98.** Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



Şekil 4.99. Topoloji parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilene kütlesi grafiği

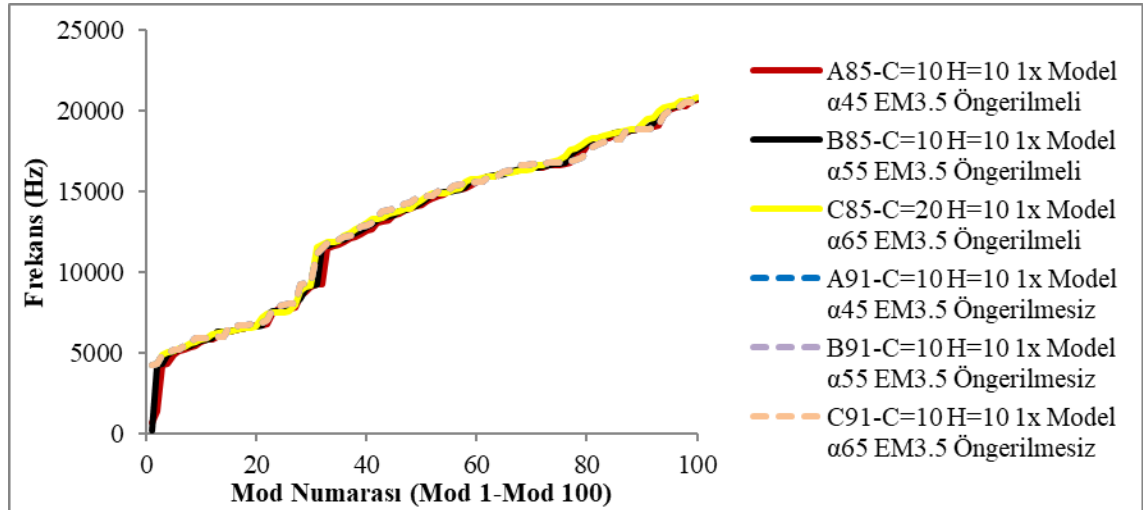
#### 4.2.9. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizlerde epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin mod frekansları ve etkin kütlesi oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden yapılmıştır (Şekil 4.100, Şekil 4.101). İlgili grafikler incelendiğinde termal genişleme öngerilmemiş analizlerde epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değişse de mod frekanslarının değişmediği belirlenmiştir (Şekil 4.101). Teorik altyapıdan termal genişleme katsayısının mod frekansları üzerinde bir etkisinin olmadığını biliyorduk, bu durumda bize bu sonucu doğrulamakta. Termal genişleme öngerilmeli analizlerde ise termal genişleme katsayısı büyük olan malzeme daha fazla genişeyeceği için yapının daha fazla çarpılmasına ve üzerinde daha fazla gerilme oluşmasına sebep olmaktadır. Teorik altyapıdan gerilmenin modal analizde rijitliği artırdığını biliyorduk. Termal genişleme öngerilmeli analizlerde, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının değeri arttıkça küçük miktarda da olsa modların genellikle daha yüksek frekanslara taşındığı belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizler karşılaştırıldığında termal genişleme etkisinin en çok birinci modu

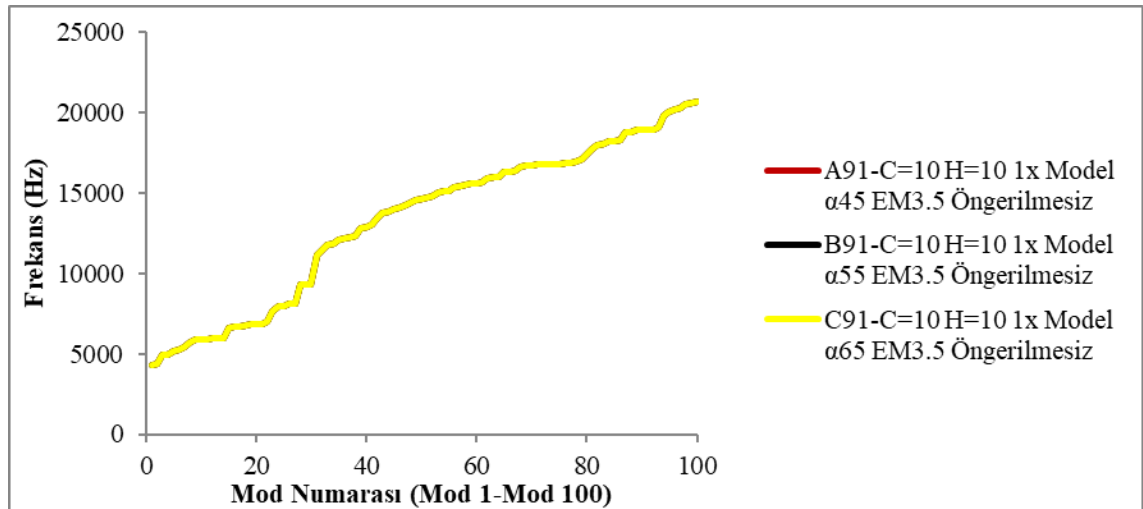


etkilediği ve frekans değerini 4,255 Hz'den 170 Hz'e düşürdüğü, diğer modlar üzerinde ise etkisinin çok küçük olduğu belirlenmiştir.

Farklı sonlu elemanlar ağına sahip termal genleşme öngerilmemiş analizlerin, farklı termal genleşme katsayısına sahip epoksi malzemeler ile yapılan analizlerde frekans ve etkin kütle değerlerinin birbirinin aynı çıkması sonlu elemanlar modelinin doğru modellendiğini göstermektedir (Şekil 4.101).



Şekil 4.100. Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngerilmeli / öngerilmemiş analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

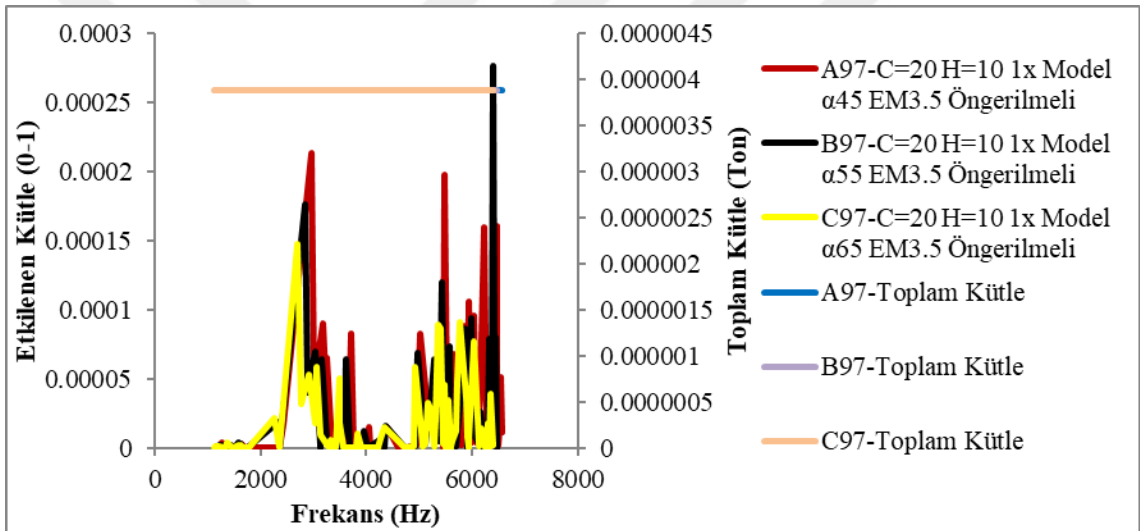


Şekil 4.101. Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

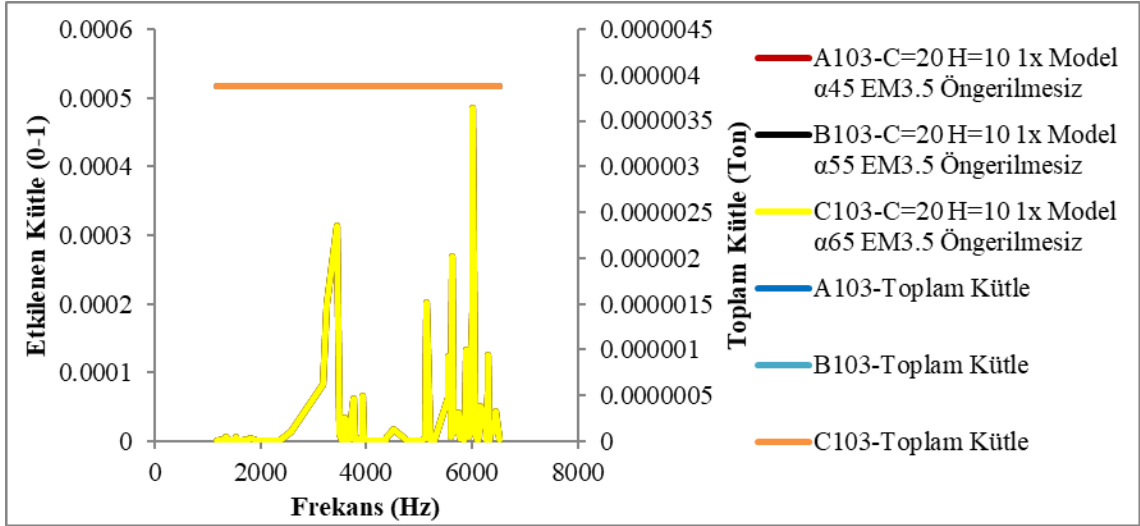
Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.102, Şekil 4.103) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm,

topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genleşme katsayısı parametresi arttıkça termal genleşme öngerilmemiş analizlerde etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmeli analizlerde etkilenen kütle değerlerini incelediğimizde, en fazla etkilenen kütle oranının %0.05 olduğu belirlenmiştir. Toplam kütlenin bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır.



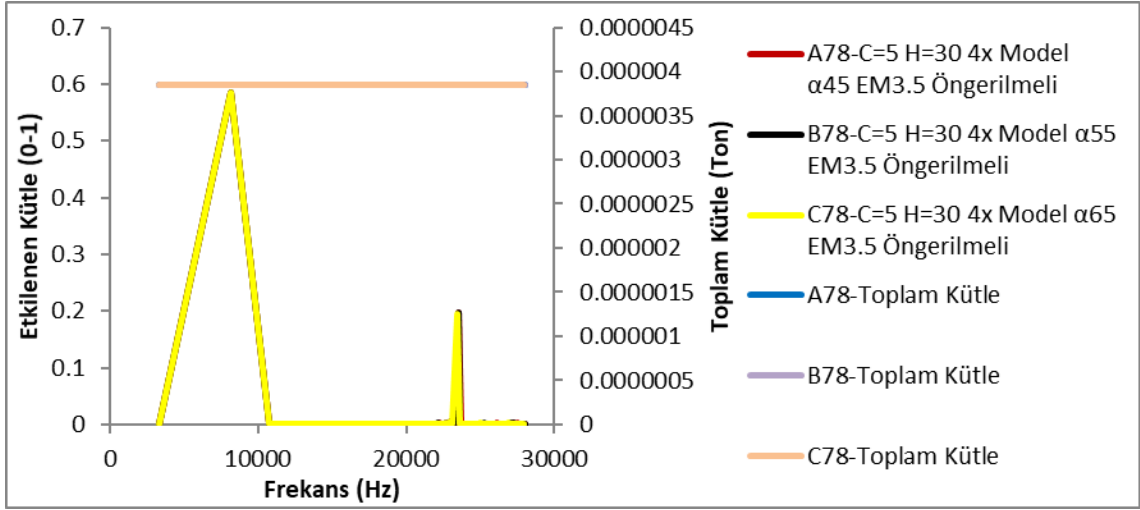
**Şekil 4.102.** Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



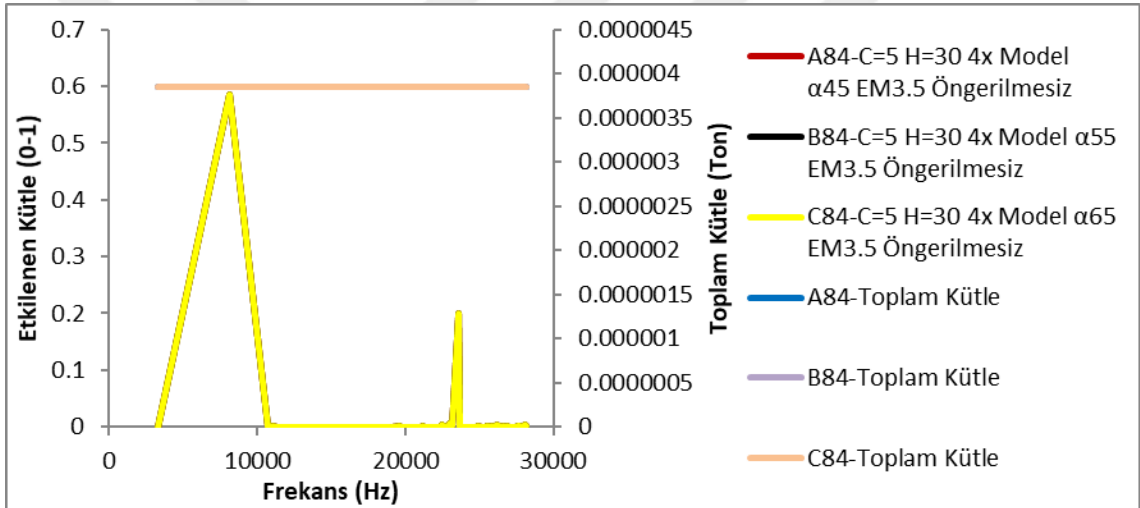
**Şekil 4.103.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.104, Şekil 4.105) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genişleme katsayısı parametresi arttıkça termal genişleme öngerilmemiş analizlerde etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.104.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

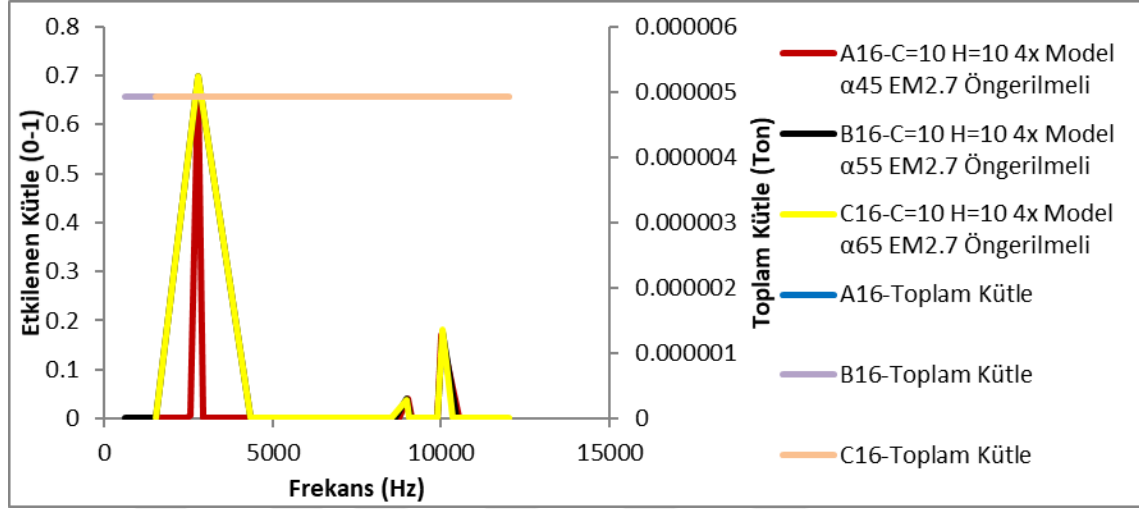


**Şekil 4.105.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

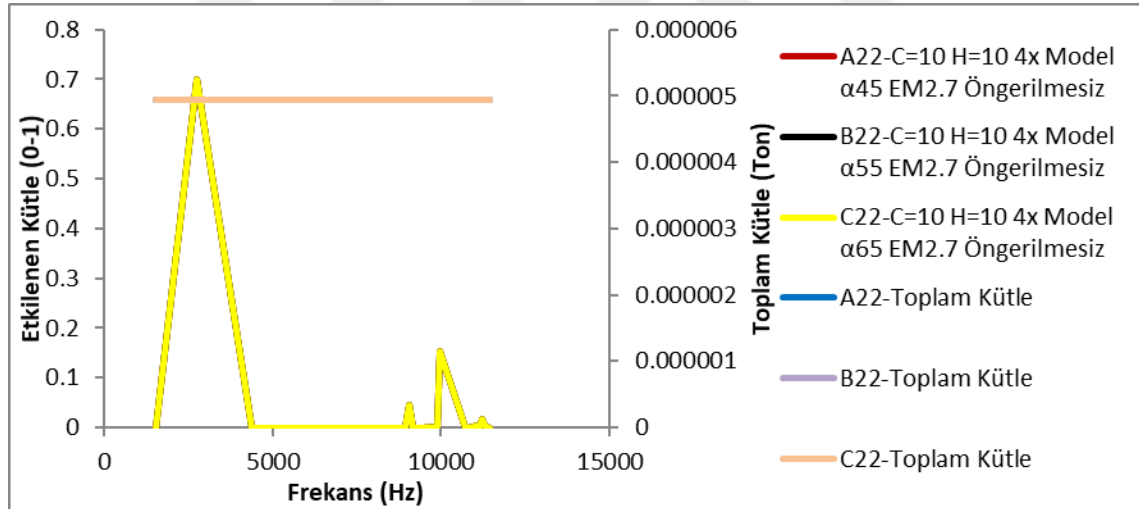
Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.106, Şekil 4.107) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genişleme katsayısı parametresi arttıkça termal genişleme öngerilmemiş analizlerde

etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.106. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

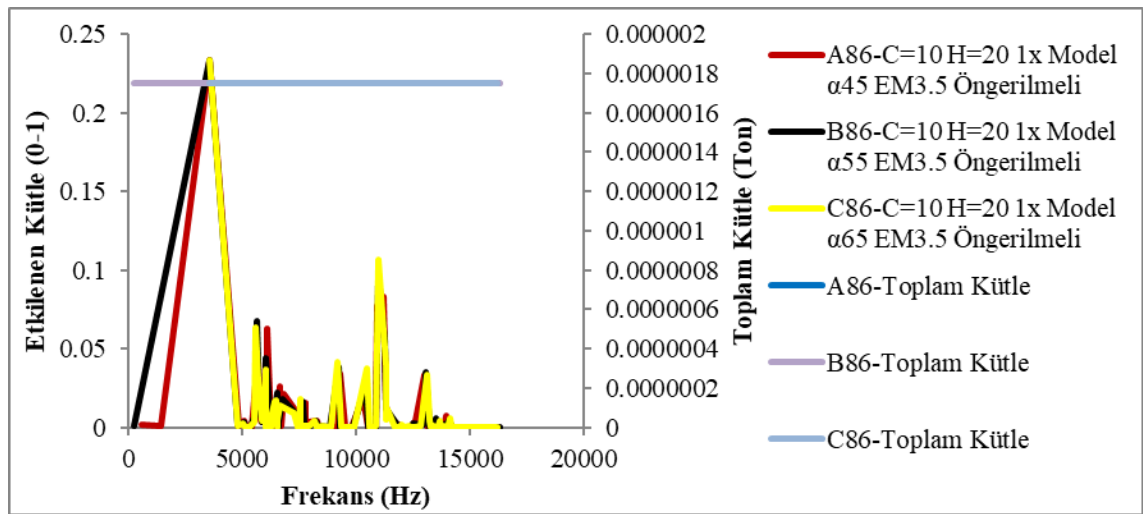


Şekil 4.107. Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmesiz analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

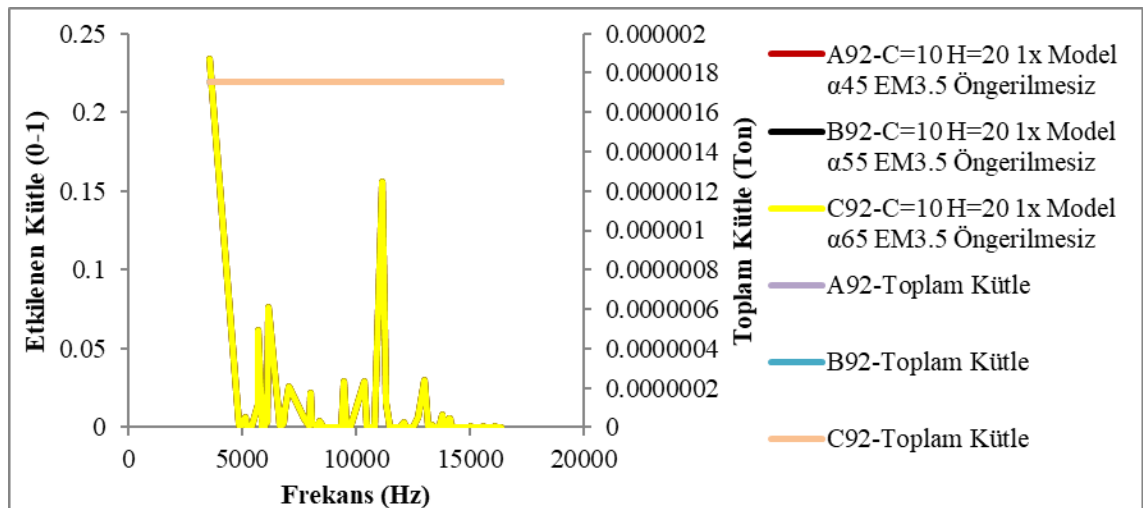
Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.108, Şekil 4.109) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı

parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genleşme katsayısı parametresi arttıkça termal genleşme öngerilmemiş analizlerde etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu ancak ikincil modlarda etkilenen kütle oranının azaldığı belirlenmiştir.



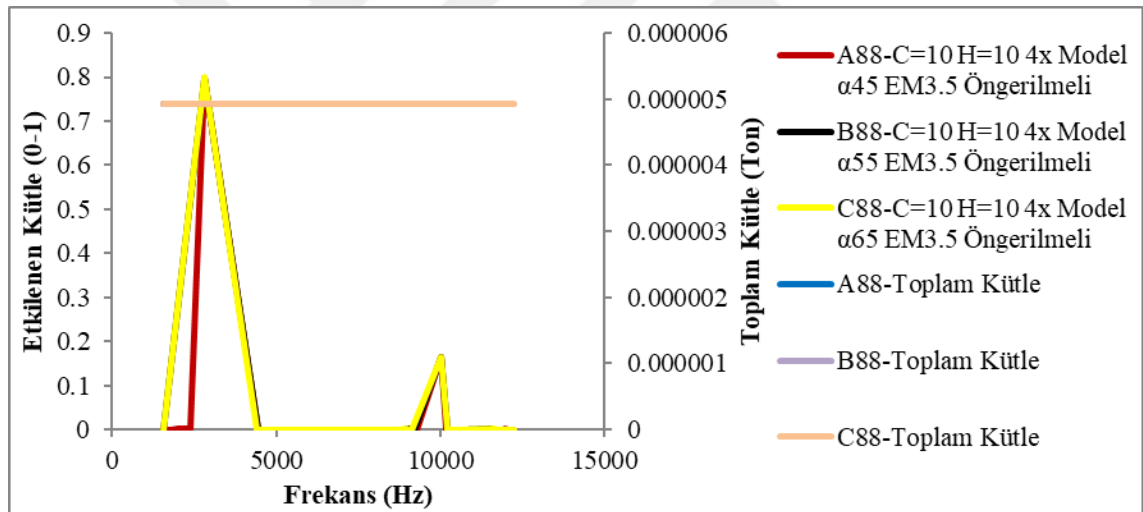
**Şekil 4.108.** Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



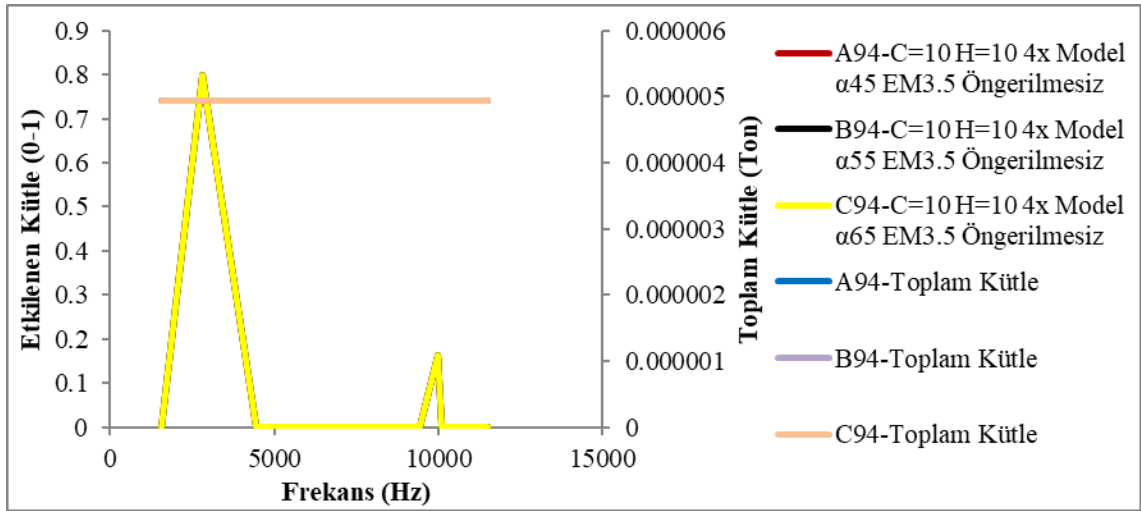
**Şekil 4.109.** Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.110, Şekil 4.111) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genleşme katsayısı parametresi arttıkça termal genleşme öngerilmemiş analizlerde etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.110.** Epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

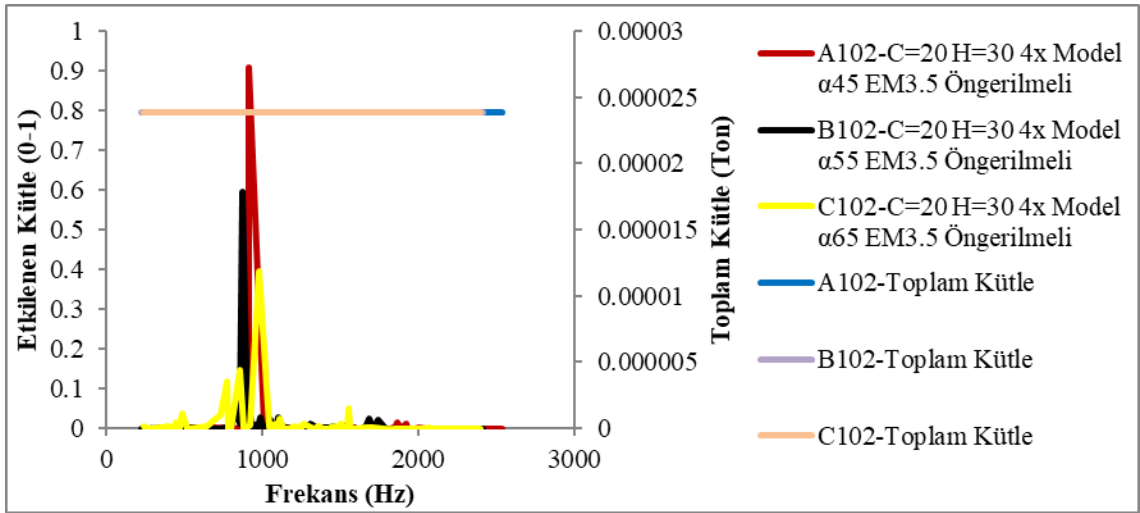


**Şekil 4.111.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

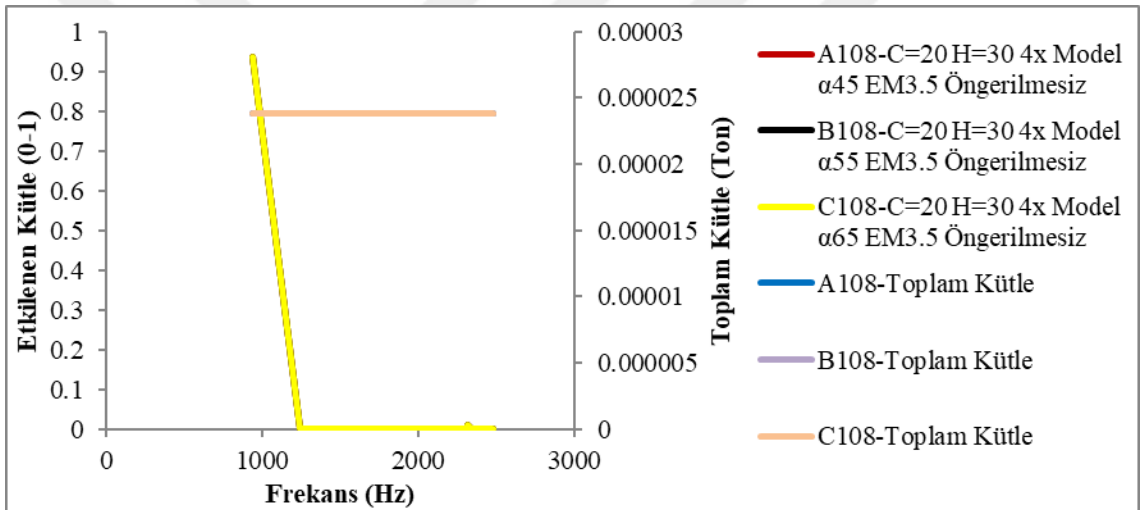
Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.112, Şekil 4.113) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemesinin termal genişleme katsayısı parametresi arttıkça termal genişleme öngerilmesiz analizlerde etkilenen kütle oranının ve frekansların birebir aynı olduğu belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmesinin ana modlarda etkilenen kütle oranını azalttığı belirlenmiştir.





**Şekil 4.112.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

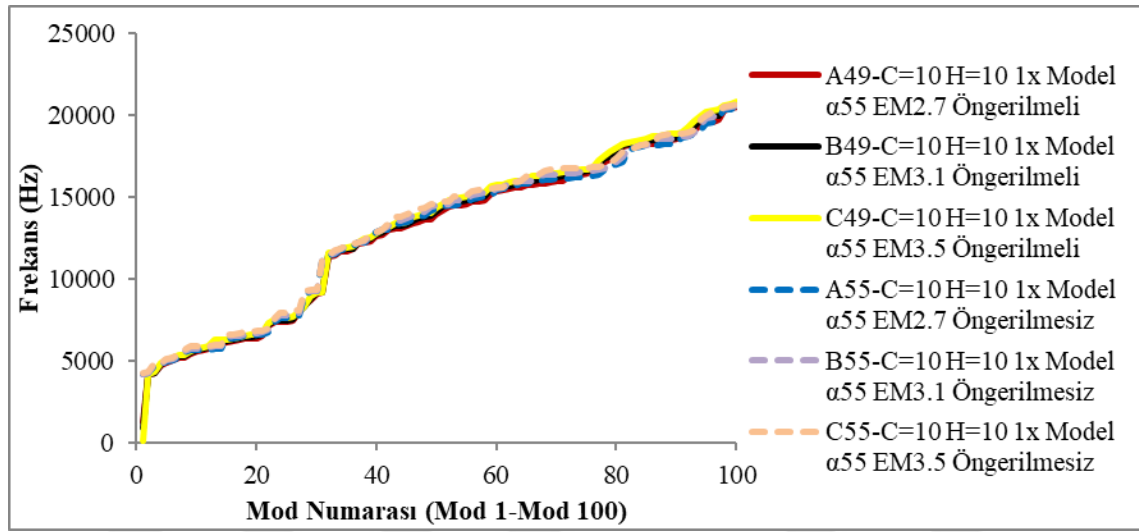


**Şekil 4.113.** Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

#### 4.2.10. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizlerde epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin mod frekansları ve etkin kütle oranı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş parametresinin incelendiği analizler karşılaştırıldığında en yüksek mod frekansı değişiminin parametrelerin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıkmıştır. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, mod frekansı değişimi üzerindeki etkisinin incelenmesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafik üzerinden

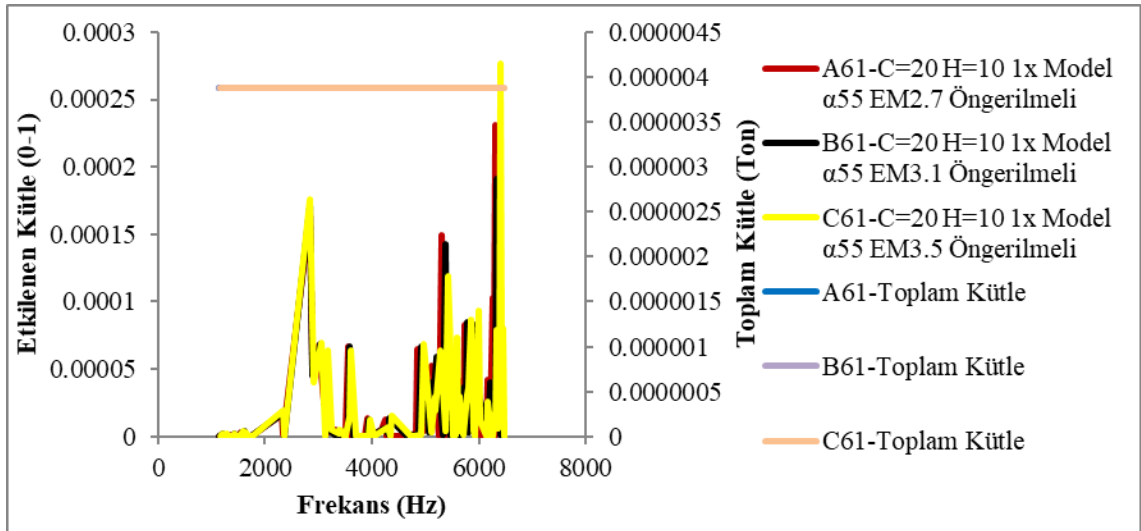
yapılmıştır (Şekil 4.114). İlgili analizler sonucunda epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değişimi sonucunda mod frekanslarının değişimi incelendiğinde epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça mod frekans değerlerinin küçük miktar da olsa yüksek değerlere taşındığı belirlenmiştir. Termal genleşme etkisinin en çok birinci modu etkilediği ve frekans değerini 4,255 Hz'den 170 Hz'e düşürdüğü, diğer modlar üzerinde ise öngerilme sonucunda mod frekans değerinin genellikle yine çok küçük miktarda arttığı belirlenmiştir.



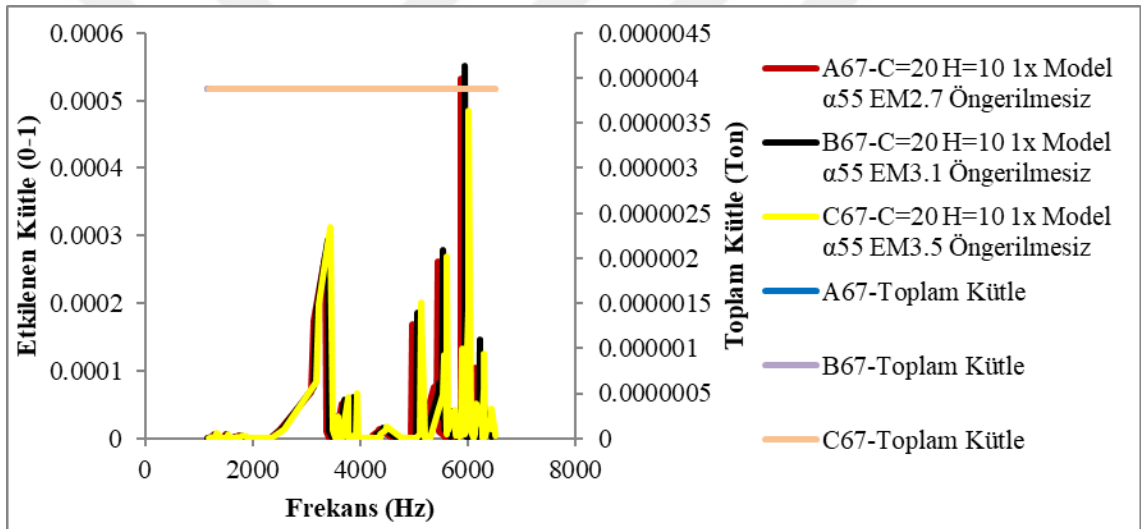
**Şekil 4.114.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin termal genleşme öngerilmeli / öngerilmesiz analizleri sonucunda elde edilen mod numarası - frekans grafiği

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde X-yönünde (Şekil 4.115, Şekil 4.116) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin X-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

X-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; ilk 100 modda ana mod çıkmadığı, en yüksek etkilenen kütle oranının %0.055 olduğu görülmektedir. Toplam kütlelerin bu kadar küçük bir kısmı rezonansa girse bile yıkıcı bir etki oluşturmayacaktır.



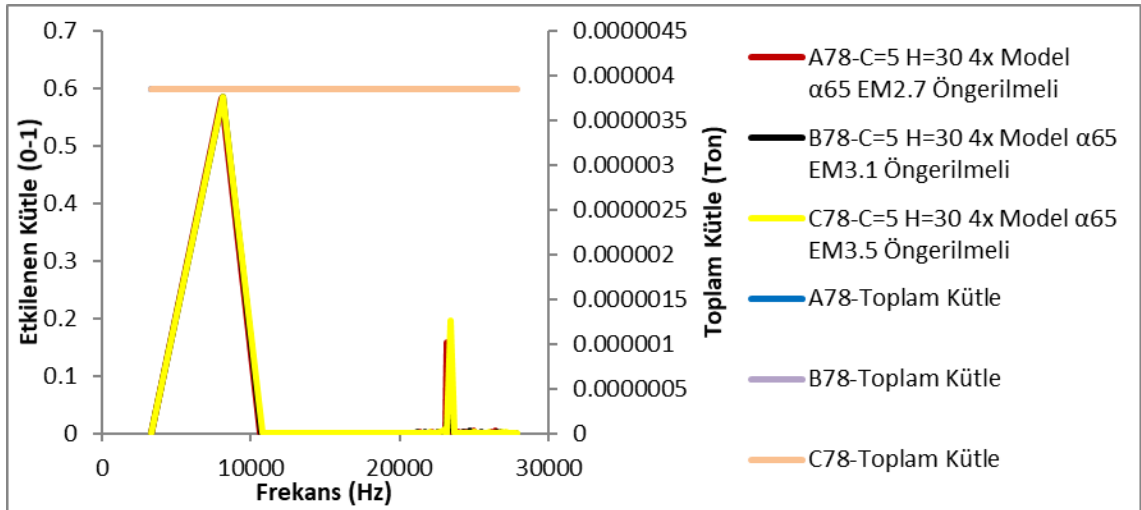
**Şekil 4.115.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



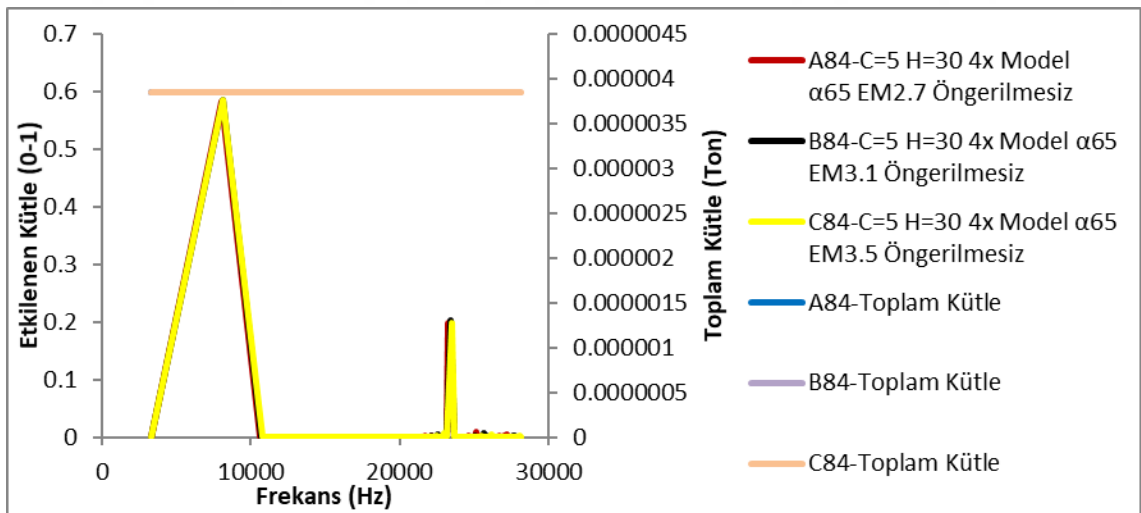
**Şekil 4.116.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda X-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde Y-yönünde (Şekil 4.117, Şekil 4.118) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 5 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $65 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Y-yönünde incelemesi bu analizlerin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Y-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça ana modun küçük de olsa yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının neredeyse hiç değişmediği belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.117. Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

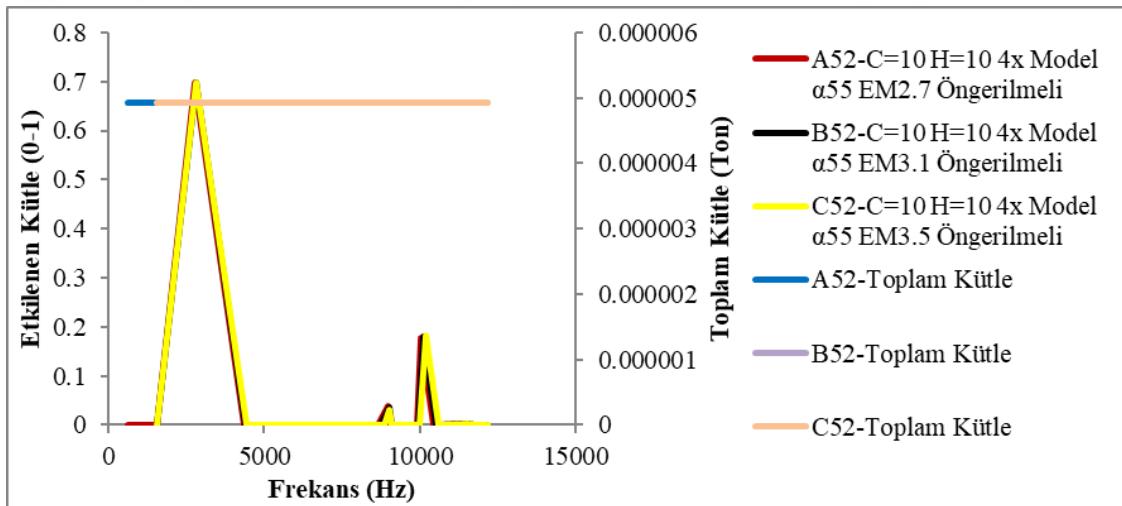


Şekil 4.118. Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemesiz analizleri sonucunda Y-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

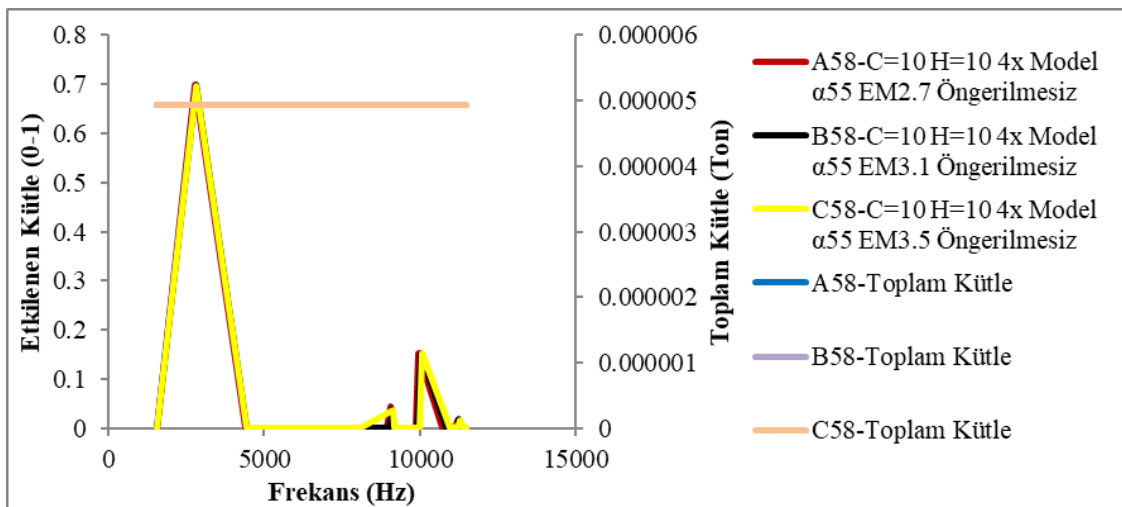
Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde Z-yönünde (Şekil 4.119, Şekil 4.120) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $55 \times 10^{-4}$

$^{\circ}\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 2.7 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin Z-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

Z-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça ana modun küçük de olsa yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modlarda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu, ikincil ana modda ise etkilenen kütle oranını artırdığı belirlenmiştir.



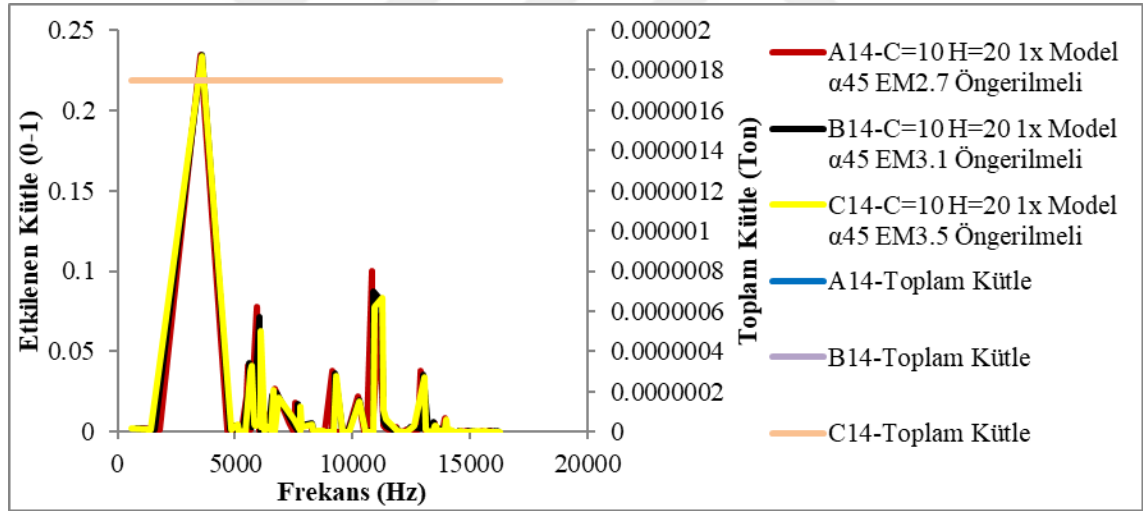
**Şekil 4.119.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



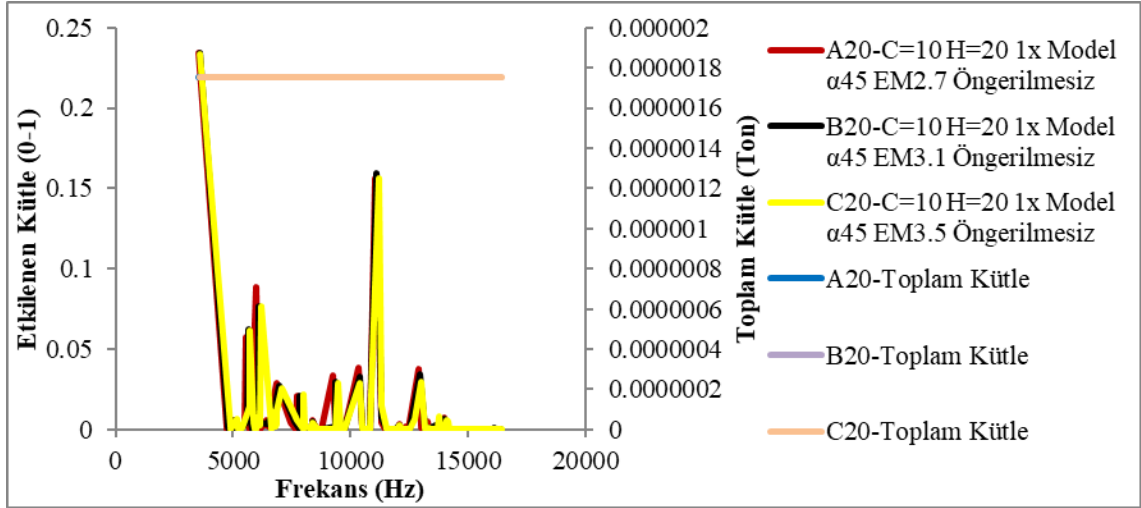
**Şekil 4.120.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmemesiz analizleri sonucunda Z-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde ROTX-yönünde (Şekil 4.121, Şekil 4.122) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 20 mm, topoloji parametresinin çeyrek model, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTX-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTX-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça ana modun küçük de olsa yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmesinin ana modda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu, ikincil ana modda ise etkilenen kütle oranını azalttığı belirlenmiştir.



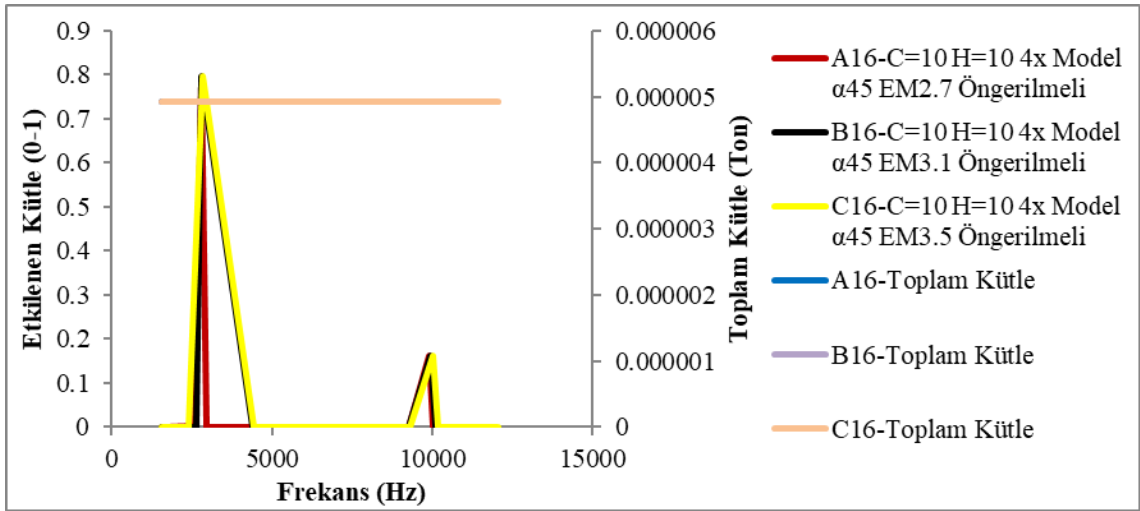
Şekil 4.121. Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



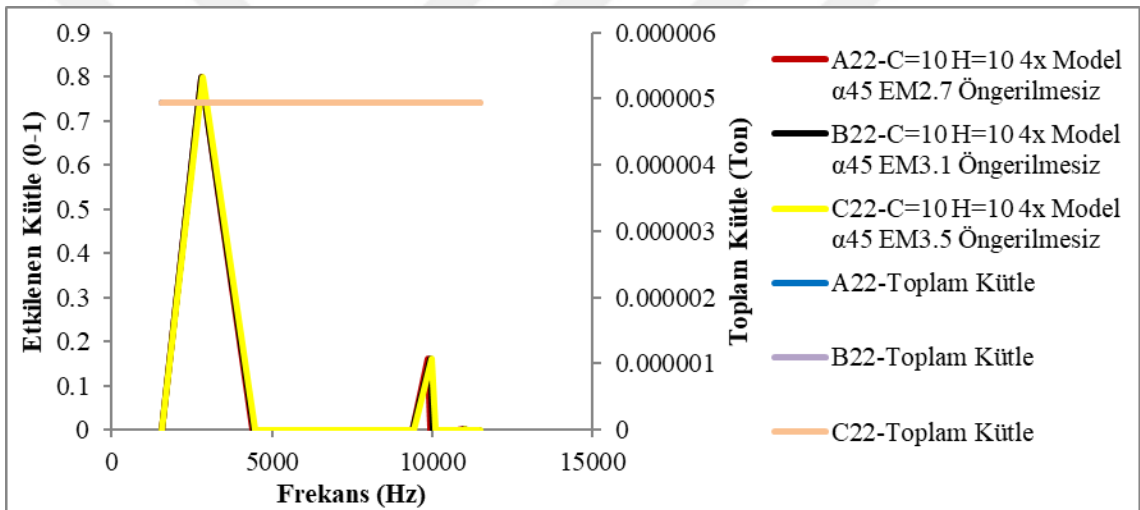
**Şekil 4.122.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTX-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde ROTY-yönünde (Şekil 4.123, Şekil 4.124) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 10 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 10 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTY-yönünde incelemesi bu analizin alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

ROTY-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça ana modun küçük de olsa yüksek frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genişleme öngerilmesinin ana modda etkilenen kütle oranı üzerinde etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 4.123.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



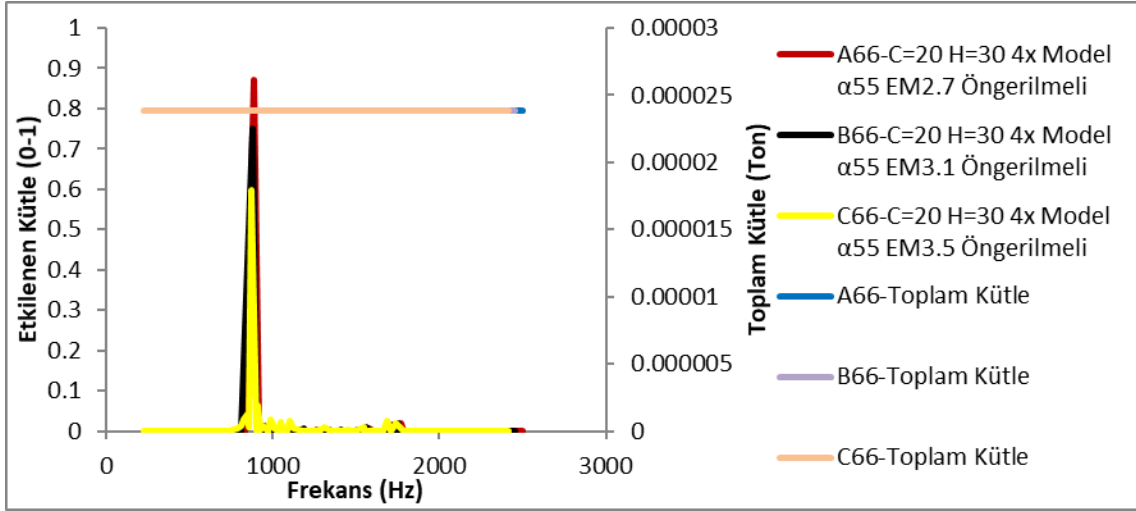
**Şekil 4.124.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genişleme öngerilmemiş analizleri sonucunda ROTY-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin incelendiği analizlerde ROTZ-yönünde (Şekil 4.125, Şekil 4.126) en yüksek etkin kütle değişiminin; kor genişliği parametre değerinin 20 mm, kor yüksekliği parametre değerinin 30 mm, topoloji parametresinin tam model, epoksi malzemenin termal genişleme katsayısının  $55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ve elastisite modülü parametresinin 3.5 GPa olduğu analizde çıktığı belirlenmiştir. Bu yüzden epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin, etkin kütle oranı değişimi üzerindeki etkisinin ROTZ-yönünde incelemesi bu analiz alternatiflerinde hazırlanan grafikler üzerinden yapılmıştır.

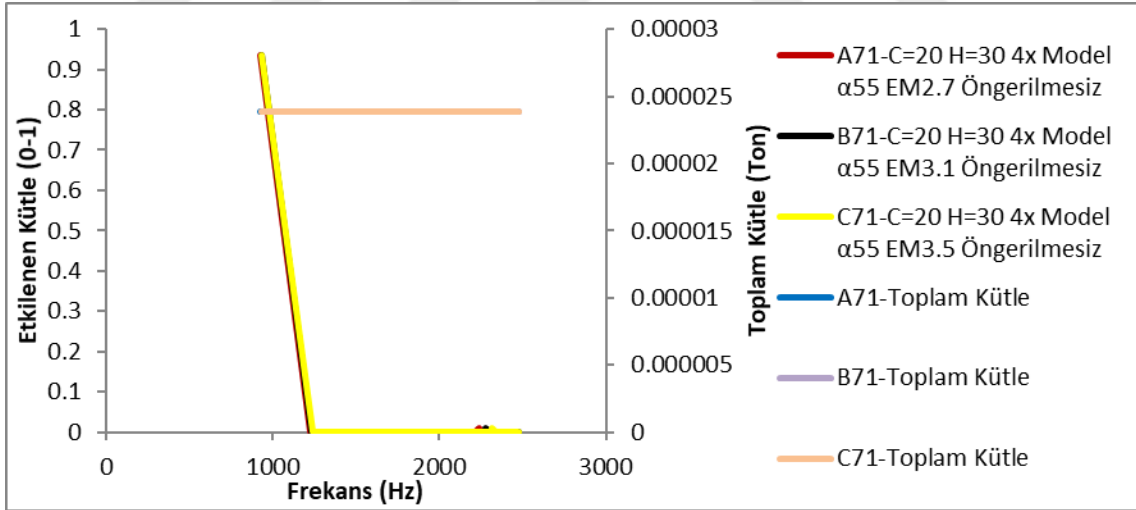
ROTZ-yönündeki etkin kütle değişimi incelendiğinde; epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça ana modun küçük de olsa yüksek



frekans değerlerine taşındığı ve etkilenen kütle oranının değişmediği belirlenmiştir. Termal genleşme öngerilmemesinin ana modda epoksi malzemenin elastisite modülü parametresinin değeri arttıkça etkilenen kütle oranını kademeli bir şekilde düşürdüğü belirlenmiştir.



**Şekil 4.125.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmeli analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği



**Şekil 4.126.** Epoksi malzemenin elastisite modülü parametresi alternatiflerinin yapılan termal genleşme öngerilmesiz analizleri sonucunda ROTZ-yönünde elde edilen frekans – etkilenen kütle grafiği

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Yapılan yerçekimi öngerilmeli analizler sonucunda;

- Kor genişliği parametresinin değeri azaldıkça rijitliğin arttığı, kor genişliği parametresinin değeri arttıkça rijitliğin azaldığı belirlenmiştir.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça rijitliğin arttığı, kor yüksekliği parametresinin değeri azaldıkça rijitliğin azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada tüm doğal frekans analizleri göz önüne alınarak bir değerlendirme yapılmaya çalışıldığında sadece toplam kütleli artıran etkilerin, doğal frekans değerlerinin birbirine yaklaşmasına ve aynı sayıda incelenen doğal frekansların daha dar bir frekans aralığına sıkışmasına sebep olduğu, toplam kütleli azaltan etkilerin sonucunda doğal frekans değerlerinin birbirinden uzaklaşmasına ve aynı sayıda incelenen doğal frekansların daha geniş bir frekans aralığına dağılmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Bu bilgi ışığında;

- Kor genişliği parametresinin değeri arttıkça mod frekans değerleri birbirine yaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansının daha dar bir frekans aralığında sıkışmasına sebep olmaktadır. Aynı durumun tersi de geçerlidir, kor genişliği parametresinin değeri azaldıkça mod frekans değerleri birbirinden uzaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansının daha geniş bir frekans aralığına dağılmasına sebep olmaktadır.
- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça mod frekans değerleri birbirine yaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansını daha dar bir frekans aralığında sıkışmasına sebep olmaktadır. Aynı durumun tersi de geçerlidir, kor yüksekliği parametresinin değeri azaldıkça mod frekans değerleri birbirinden uzaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansının daha geniş bir frekans aralığına dağılmasına sebep olmaktadır.
- Topoloji parametresinin değeri arttıkça mod frekans değerleri birbirine yaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansını daha dar bir frekans aralığında sıkışmasına sebep olmaktadır. Aynı durumun tersi de geçerlidir, topoloji parametresinin değeri azaldıkça mod frekans değerleri birbirinden uzaklaşmakta ve incelenen 100 adet mod frekansının daha geniş bir frekans aralığına dağılmasına sebep olmaktadır.

Bunun dışında tüm modlar göz önüne alınarak bir değerlendirme yapılmaya çalışıldığında verilerin, çıkması muhtemel sonuçların bazılarını doğrularken birçoğunda etkisinin olmadığı bazılarında ise etkisinin umulanın tersine çıktığı belirlenmiştir. Bu sebeple tüm doğal frekans sonuçları yerine, analizler sonucunda bulunan ana mod frekansları incelendiğinde bazı parametreler için tutarlı veriler ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ana mod için yaptığımız kabulü tekrarlayacak olursak, yapının ilgili doğal frekans değerinde rezonansa giren kütle oranı toplam kütleinin %5'inden küçük bir bölümünü etkiliyorsa lokal mod, eğer kütleinin %5'inden büyük bölümünü etkiliyorsa ana mod olarak adlandırılmıştır. Bu kabul ışığında ana modlar üzerinden tutarlı veriler çıkan parametre değerlendirilmeleri yapıldığında;

- Kor genişliği parametresinin değeri arttıkça ana mod frekansının daha düşük frekans değerine taşınmakta olduğu belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinin değeri arttıkça ana mod frekansı daha düşük frekans değerine taşınmakta olduğu belirlenmiştir.

Yukarıdaki çıktılar birlikte değerlendirildiğinde yapı çok hafif de olsa yapının kütleinin doğal frekans değerleri üzerinde büyük bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Teorik altyapıdan doğal frekans değerlerinin yapının rijitliği ile doğru orantılı, yapının toplam kütlesi ile de ters orantılı olduğunu bilmekteyiz. Çıkan net sonuçlar incelendiğinde; rijitliğin azalıp, kütleinin arttığı veya rijitliğin artıp kütleinin azaldığı durumlarda net sonuçlar çıktığı belirlenmiştir. Yani rijitliğin ve toplam kütleinin doğal frekans değerleri üzerindeki etkisinin birbirini desteklediği durumlarda net çıktılar elde edilmiştir. Örneğin:

- Kor genişliği parametre değerinin büyümesi, kor genişliği parametresinin değeri arttıkça rijitlik azalmakta ve kütle artmaktadır. Bu sebeple ana mod frekansının daha düşük frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir.
- Kor genişliği parametre değerinin küçülmesi, kor genişliği parametresinin değeri azaldıkça rijitlik artmakta ve kütle azalmaktadır. Bu sebeple ana mod frekansının daha yüksek frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının geniş bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir.
- Topoloji parametresinde de durumun net olduğunu görmekteyiz, bunun sebebinin de topoloji parametresi değerinin artması sonucunda rijitliğin arttığı veya azaldığı yönünde bir sonuç çıkmazken, kütleinin arttığını bilmekteyiz.

Hatta hiçbir parametre değerinin değişiminde topoloji parametresinin değişiminde olduğu kadar fazla toplam kütle değişimi olmamaktadır. Doğal frekans değişimlerini incelediğimizde de sonucun kütleden etkilendiği belirlenmiştir. Topoloji parametresinin değeri arttıkça ana mod frekansının daha düşük frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir. Topoloji parametresinin değeri azaldıkça ana mod frekansının daha yüksek frekans değerine ve incelenen 100 adet mod frekansının geniş bir frekans aralığına taşındığı belirlenmiştir.

Rijitliğin ve toplam kütlelerin birbirini desteklemediği durumlarda ana mod frekansının değişimi ile alakalı net bir yorum yapılamadığı belirlenmiştir. Örneğin;

- Kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça yapının rijitliği de toplam kütlesi de artmaktadır. Toplam kütlelerin etkisi, kor yüksekliği parametresinin değeri arttıkça incelenen 100 adet mod frekansının dar bir frekans aralığına taşınmasından net bir şekilde anlaşılmaktadır. Ancak ana mod frekans değerlerinin serbestlik yönüne göre arttığı veya azaldığı durumlar çıkmaktadır. Bu sebeple ana mod frekansının değişimi ile alakalı genel bir sonuç yorumu yapılamamaktadır.

Toplam kütlelerin değişmediği, rijitliğin değiştiği parametrelerde;

- Yerçekimi öngerilmesi sonucunda toplam kütle değişmezken öngerilme etkisi ile yapının rijitliği artmaktadır. Yerçekimi öngerilmeli / öngerilmemiş analizler karşılaştırıldığında yapının çok hafif olması sebebi ile yerçekimi etkisi ile yapının kendi ağırlığı ile oluşan gerilmeler çok küçük çıkmıştır ve doğal frekanslar üzerindeki etkisi de yok denecek kadar küçük olduğu belirlenmiştir.
- Termal genişleme öngerilmesi sonucunda toplam kütle değişmezken öngerilme etkisi ile yapının rijitliği artmaktadır. Termal genişleme öngerilmeli / öngerilmemiş analizler karşılaştırıldığında doğal frekans değerlerinde değişim olduğu görüldü ancak genelde 100 mod içerisinde birkaç modun frekans değerinde büyük değişim olurken (genellikle ilk mod frekanslarında) diğer mod frekansları üzerindeki değişim etkisinin çok küçük olduğu belirlenmiştir.
- Epoksi malzemenin termal genişleme katsayısı değerinin artması sonucunda toplam kütle değişmez. Öngerilmemiş analizlerde ilgili parametre değerinin

artması veya azalmasının rijitlik üstüne de bir etkisi yoktur. İlgili analizler farklı FEM modellerine sahip olmasına rağmen doğal frekans değerleri ve etkin kütle oranları birebir aynı çıkmaktadır. Termal genleşme öngerilmesi sonucunda termal genleşme katsayısı büyüdükçe yapı üzerinde öngerilme etkisi ile oluşan gerilme değeri de artmaktadır. Bu sebeple termal genleşme öngerilmeli analizlerde, epoksi malzemenin termal genleşme katsayısı değerinin artması sonucunda kütle değişmezken rijitlik artmaktadır. Bu rijitlik artışının ana mod frekansları üzerindeki etkisi sonucunda genellikle çok küçük miktarda da olsa ana mod frekans değerinin arttığı belirlenmiştir.

- Epoksi malzemenin elastisite modülü değerinin artması sonucunda kütle değişmezken rijitlik artmıştır. Öngerilmesiz analizlerde elastisite modülü değerinin artması sonucunda ana mod frekans değerlerinin çok küçük miktarda arttığı belirlenmiştir. İlgili parametrenin termal genleşme öngerilmesiz / öngerilmeli analiz sonuçları karşılaştırdığında, öngerilme sonucunda da ana mod frekans değerinin genellikle yine çok küçük miktarda arttığı belirlenmiştir.

## 5.2. Öneriler

Çalışmada bahsi geçen balpeteği kompozit malzemelerin rastgele titreşimler (random vibration), harmonik ve tepki spektrum (responce spectrum) analizleri de yapılarak incelenen parametrelerin ve doğal frekans değerleri değişiminin lineer dinamik analiz sonuçlarında ne gibi etkiler doğurduğunun gösterilmesi ile tezin araştırma motivasyonu tamamlanmış olacaktır.

**KAYNAKLAR**

- Adeniji-Fashola, A. A., Oyediram, A. A., 1988, Thermal gradient effects on the vibration of prestressed rectangular plates, *Acta Mechanica*, 74, 235-248.
- Ağdacı, O., 2013, Dental İmplant Analizleri, *Figes İleri Mühendislik ve Arge teknolojileri Dergisi*, 2, 30-32.
- Akgül, F., 2009, Uydu Sistemlerinin Titreşim Yönünden İncelenmesi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Akil H., Cantwell, W. J., 2003, The Low Velocity Impact Response Of An Aluminium Honeycomb Sandwich Structure, *Composites Part B: Engineering*, 34 (8), 679–687.
- Aktay, L., Johnson, A. F., Kröplin, B.-H., 2008, Numerical Modeling Of Honeycomb Core Crush Behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (9), 2616–2630.
- Anderson, T.A., 2005, An Investigation Of Sdof Models For Large Mass Impact On Sandwich Composites, *Composites: Part B*, 36 (2), 135–142.
- Asadi, M., Shirvani, H., Sanaei, E., Ashmead, M., 2006, A Simplified Model To Simulate Crash Behavior Of Honeycomb, *Proceedings of International Conference On Advanced Design And Manufacture*, Harbin, China.
- Aydın, M.R., 2013, Köpük Dolgulu Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Titreşim Analizi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Aydıncak, I., 2007, Investigation Of Design And Analyses Principles Of Honeycomb Structures, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Backström, D., Nilsson, A.C., 2007, Modelling the vibration of sandwich beams using frequency-dependent parameters, *Journal of Sound and Vibration*, 300, 589-611.
- Banhart, J., Schmoll, C., Neumann, U., 1998, Light-Weight Aluminium Foam Structures For Ships, *Proc. Conf. Materials In Oceanic Environment (Euromat '98) Vol. 1*, Lisbon, Portugal, 55–63.
- Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M., 1997, Aluminium Foams For Transport Industry, *Materials And Design*, 18 (4-6), 217–220.
- Bolat, F.Ç., 2011, Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Buitrago, B.L., Santiuste, C., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., Navarro, C., 2010, Modeling Of Composite Sandwich Structures With Honeycomb Core Subjected To High Velocity Impact, *Composite Structures*, 92 (9), 2090–2096.

- Burlayenko, V.N., Sadowski, T., 2010, Influence Of Skin-Core Debonding On Free Vibration Behavior Of Foam And Honeycomb Cored Sandwich Plates, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45, 959-968.
- Büyükbayram C., Salihoğlu B., Sever A., 2014, 8x8 Askeri Kara Aracı Gövde-Silah Kulesi Uyumunun Sağlanması Amacıyla Modal Analiz ve Doğrulaması, *Figes İleri Mühendislik ve Arge teknolojileri Dergisi*, 4, 8-11.
- Chen, H.P., 1994, Free Vibration Of Prebuckled And Postbuckled Plates With Delamination, *Composites Science And Technology*, 51 (3), 451-462.
- Cricri, G., Perrella, M., Cali, C., 2013, Honeycomb Failure Processes Under In-Plane Loading, *Composites: Part B: Engineering*, 45 (1), 1079-1090.
- Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., 2012, Collapse Modes In Aluminium Honeycomb Sandwich Panels Under Bending And Impact Loading, *International Journal Of Impact Engineering*, 43, 6-15.
- Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., 2013, Comparison Of Aluminium Sandwiches For Lightweight Ship Structures: Honeycomb Vs. Foam, *Marine Structures*, 30, 74-96.
- Crupi, V., Montanini, R., 2007, Aluminium Foam Sandwiches Collapse Modes Under Static And Dynamic Three-Point Bending, *International Journal Of Impact Engineering*, 34 (3), 509-521.
- Çınar, O., 2014, Evaluation Of Effective Elastic Properties Of Honeycomb Sandwich Structures By Optimization Involving Modal Behavior, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Danacıoğlu, K., 2013, Özgün Petek Yapılı Sandviç Kompozit Panelin Üretimi Ve Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Engin, Z.B. 2011, Balpeteği Sandviç Kompozitlerin Darbe Davranışının İncelenmesi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Ercan, H., 2006, Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, doktora tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ferraris, S., Volpone, L.M., 2005, Aluminium Alloys In Third Millennium Shipbuilding: Materials, Technologies, Perspectives., *Proc. The Fifth International Forum On Aluminum Ships*, Tokyo, 19-29.
- Foo, C.C., Seah, L.K., Chai G.B., 2008, Low-Velocity Impact Failure Of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels, *Composite Structures*, 85, 20-28.

- Foster, C.L., Tinker, M.L., Nurre, G.S., Till, W.A., 1995, Solar-Array-Induced Disturbance Of Hubble Space Telescope Pointing System, *Journal of Spacecrafts and Rockets*, 32 (4), 634-644.
- Gaetano, D.C., Lorenzo, L., Ugo, G., 2011, Shock Absorption Performance Of A Motorbike Helmet With Honeycombs Reinforced Liner, *Composite Structures*, 93, 2748–2759.
- Holnicki-Scule, J., 1991, Vibration Mode Shape Control By Prestressing, *AIAA Journal*, 30 (7), 1924-1927.
- Hong, S.T., Pan, J.T., Prasad, P., 2006, Quasi-Static Crush Behavior Of Aluminum Honeycomb Specimens Under Compression Dominant Combined Loads, *International Journal Of Plasticity*, 22, 73–109.
- Hou, B., Pattofatto, S., Li, Y.L., Zhao, H., 2011, Impact Behavior Of Honeycombs Under Combined Shear-Compression, Part Ii Analysis, *International Journal Of Solids And Structures*, 48, 698–705.
- Hou, B., Zhao, H., Pattofatto, S., Liu, J.G., Li, Y.L., 2012, Inertia Effects On The Progressive Crushing Of Aluminium Honeycombs Under Impact Loading, *International Journal Of Solids And Structures*, 49, 2754–2762.
- Hou, J.P., Jeronimidis, G., 1999, Vibration Of Delaminated Thin Composite Plates, *Composite Part B*, 30, 989–995.
- Jie, W., Anthony, M.W., Hai W., 2013, Experimental And Numerical Study On The Low-Velocity Impact Behavior Of Foam-Core Sandwich Panels, *Composite Structures*, 96, 298–311.
- Johnston, J.D., Thornton, E.A., 1998, Thermally Induced Attitude Dynamics Of A Spacecraft With A Flexible Appendage, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 21 (4), 581-587.
- Johnston, J.D., Thornton, E.A., 2000, Thermally Induced Dynamics Of Satellite Solar Panels, *Journal of Space Crafts and Rockets*, 37 (5), 604-613.
- Ju, F., Lee, H.P., Lee, K.H., 1995, Free Vibration Of Composite Plates With Delamination Around Cutouts, *Composite Structures*, 31, 177–183.
- Kalender M., 2019, Kompozit malzeme nedir? Kompozit malzeme nerelerde kullanılır? [online], Teknik Kütüphane, Türkiye, <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemenin-kullanim-alanlari.html> [Ziyaret Tarihi: 01.05.2019]
- Kathiravan, R., Ganguli, R., 2007, Strength Design Of Composite Beam Using Gradient And Particle Swarm Optimization, *Composite Structures*, 81(4), 471–479.
- Kim, H.S., Chattopadhyay, A., Ghoshal, A., 2003, Characterization Of Delamination Effect On Composite Laminates Using A New Generalized Layerwise Approach, *Computers And Structures*, 81 (15), 1555–1566.



- Krueger, R., 1999, A Shell/3d Modeling Technique For Delaminations In Composite Laminates, *Proceeding Of American Society Of Composites*, 843–852.
- Li, J., Yan, S., 2014. “Thermally Induced Vibration Of Composite Solar Array With Honeycomb Panels In Low Earth Orbit”, *Applied Thermal Engineering*, 71, 419–432.
- Li, Y., Jin, Z., 2008, Free Flexural Vibration Analysis Of Symmetric Rectangular Honeycomb Panels With SCSC Edge Supports, *Composite Structures*, 83 (2), 154–158.
- Li, Y., Li, F., He, Y., 2011, Geometrically Nonlinear Forced Vibrations Of The Symmetric Rectangular Honeycomb Sandwich Panels With Completed Clamped Supported Boundaries, *Composite Structures*, 93 (2), 360–368.
- Li, Y., Li, F., Zhu, D., 2010, Geometrically Nonlinear Free Vibrations Of The Symmetric Rectangular Honeycomb Sandwich Panels With Simply Supported Boundaries, *Composite Structures*, 92 (5), 1110–1119.
- Li, Y., Zhu, D., 2009, Free Flexural Vibration Analysis Of Symmetric Rectangular Honeycomb Panels Using Improved Reddy’s Third-Order Plate Theory, *Composite Structures*, 88 (1), 33–39.
- Mahato, P., Maiti, D., 2010, Aeroelastic Analysis Of Smart Composite Structures In Hygro-Thermal Environment, *Composite Structures*, 92 (4), 1027–38.
- Majumdar, P. M., Suryanarayn, S., 1988, Flexural Vibration Of Beams With Delaminations, *Journal Of Sound And Vibration*, 125, 441–461.
- Manes, A., Gilioli, A., Sbarufatti, C., Giglio, M., 2013, Experimental And Numerical Investigations Of Low Velocity Impact On Sandwich Panels, *Composite Structures*, 99, 8–18.
- Morgan, K., 2011, Shock & Vibration using ANSYS Mechanical Kelly Morgan ANSYS Inc. [online], 25025892, <https://docplayer.net/25025892-Shock-vibration-using-ansys-mechanical-kelly-morgan-ansys-inc.html> [Ziyaret Tarihi: 16.03.2019].
- Murozono, M., Thornton, E. A., 1998, Buckling And Quasistatic Thermal-Structural Response Of Asymmetric Rolled-Up Solar Array, *Journal of Space Crafts and Rockets*, 35, 147–155.
- Murphy, K.D., Virgin, L. N., Rizzi, S. A., 1997, The Effect of Thermal Prestress on the Free Vibration Characteristics of Clamped Rectangular Plates - Theory and Experiment, *Journal of Vibration and Acoustics*, 119, 243–249.
- Naidu, N., Sinha, P., 2007, Nonlinear Free Vibration Analysis Of Laminated Composite Shells In Hygrothermal Environments, *Composite Structures*, 77 (4), 475–483.

- Narayana, N. G., Gopalakrishnan, S., Ganguli, R., 2008, Design Optimization Of Composites Using Genetic Algorithms And Failure Mechanism Based Failure Criterion, *Composite Structures*, 83 (4), 354–367.
- Nguyen, M.Q., Jacombs, S.S., Thomson, R. S., Hachenberg, D., Scott, M.L., 2005, Simulation Of Impact On Sandwich Structures, *Composite Structures*, 67 (2), 217–227.
- Nilsson, E., Nilsson A.C., 2002, Prediction And Measurement Of Some Dynamic Properties Of Sandwich Structures With Honeycomb And Foam Cores, *Journal of Sound and Vibration*, 251(3), 409-430.
- Nurre, G. S., Sharkey, J. P., Nelson, J. D., 1995, Preserving Mission, On-Orbit Modifications To Hubble Space Telescope Pointing Control System, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 18 (2), 222-229.
- Ontaç, S., 2008, Finite Element Analysis Of A Micro Satellite Structure Under Vibration Induced Loads During Launch, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Kim, G. S., 1999, The Strength Characteristics Of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels, *Thin-Walled Structures*, 35, 205–231.
- Panopoulou, A., Loutas, T., Roulias, D., Fransen, S., Kostopoulos, V., 2011, Dynamic Fiber Bragg Gratings Based Health Monitoring System Of Composite Aerospace Structures, *Acta Astronautica*, 69 (7-8), 445–457.
- Paolozzi, A., Peroni, I., 1990, Detection Of Debonding Damage In A Composite Plate Through Natural Frequency Variations, *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 9, 369–388.
- Sakar, G., Yaman, M., Bolat, F. Ç., 2010, Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi, 2. *Ulusal Tasarım İmalat Ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, 531-540.
- Sezgin, F. E., 2008, Mechanical Behavior And Modeling Of Honeycomb Cored Laminated Fiber/Polymer Sandwich Structures, yüksek lisans tezi, *mühendislik ve fen bilimleri enstitüsü*, İzmir İleri Teknoloji Üniversitesi, İzmir.
- Shen, C. J., Lu, G., Yu, T. X., 2013. Dynamic Behavior Of Graded Honeycombs – A Finite Element Study, *Composite Structures*, 98, 282–293.
- Shen, M.H.H., Grady, J.E., 1992, Free Vibrations Of Delaminated Beams, *AIAA Journal*, 30, 1361–1370.
- Shin, K. B, Lee, J. Y., Cho, S. H., 2008, An Experimental Study Of Low-Velocity Impact Responses Of Sandwich Panels For Korean Low Floor Bus, *Composite Structures*, 84 (3), 228–240.

- Song, O., Yoon, I., Librescu, L., 2002, Thermally Induced Bending Vibration Of Composite Spacecraft Booms Subjected To Solar Heating, *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, And Materials Conference*, Denver, Colorado, 829-843.
- Staal, R. 2006, Failure of Sandwich Honeycomb Panels in Bending, PhD thesis, *department of mechanical engineering*, The University of Auckland, Auckland.
- Şen M., Hüseyinoğlu M., Çakar O., 2015, Poliüretan Köpük Kaplı Bir Plağın Deneysel Modal Analizi, *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu*, İzmir, 899-904.
- Tauchert, T.R., 1991, Thermally Induced Flexure, Buckling And Vibration Of Plates, *Journal of Applied Mechanics Reviews*, 44 (8), 347-359.
- Tenek, L.H., Henneke, E.G., Gunzburger, M.D., 1993, Vibration Of Delaminated Composite Plates And Some Applications To Non-Destructive Testing, *Composite Structures*, 23 (3), 253–262.
- Thornton, E.A., Foster, R.S., 1992, Dynamic Response Of Rapidly Heated Space Structure, *Computational Nonlinear Mechanics In Aerospace Engineering, Progress In Astronautics And Aeronautics*, Atluri S.N., *Washington D.C*, 451-477.
- Thornton, E.A., 1993, Thermally Bucking Of Plates And Shells, *Journal of Applied Mechanics Reviews*, 46 (10), 485-506.
- Thornton, E.A., Kim, Y.A., 1998, Thermally-Induced Bending Vibrations Of A Flexible Rolled-Up Solar-Array, *Journal of Spacecrafts and Rockets*, 30 (4), 438-448.
- Tracy, J.J., Pardoen, G.C., 1989, Effect Of Delamination On The Natural Frequencies Of Composite Laminates, *Journal Of Composite Materials*, 23, 1200–1215.
- Wang, J.T.S., Lin, Y.Y., Gibby, J.A. 1982, Vibration Of Split Beams, *Journal Of Sound And Vibration*, 84, 491–520.
- Wijker, J. J., 2008, *Spacecraft Structures*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 318-335.
- Wu, J., Yan, S., Xie, L., 2011, Reliability Analysis Method Of A Solar Array By Using Fault Tree Analysis And Fuzzy Reasoning Petri Net, *Acta Astronautica*, 69 (11-12), 960-968.
- Xue, M., Ding, Y., 2004, Two Kinds Of Tube Elements For Transient Thermal-Structural Analysis Of Large Space Structures, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 59 (10), 1335-1353.
- Xue, M.D. Duan, J., Xiang, Z.H., 2007, Thermally-Induced Bending-Torsion Coupling Vibration Of Large Scale Space Structures, *Computational Mechanics*, 40 (4), 707-723.

- Yalnızca O., Özelgin, İ., Aksoy, E. 2014, Esnek Volan Modal Analizi, Mühendis ve Makina, 55 (656), 30-41.
- Yiğit, A., 2010, Petek Yapılı Sandviç Yapıların Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi, yüksek lisans tezi, *fen bilimleri enstitüsü*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Yu, S., Cleghorn, W., 2005, Free Flexural Vibration Analysis Of Symmetric Honeycomb Panels, *Journal of Sound and Vibration*, 284, 189–204.
- Zumpano, G., Meo, M., 2008, Damage Detection In An Aircraft Foam Sandwich Panel Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy, *Computers and Structures*, 86 (3-5), 483–490.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : İbrahim YOZGATLI  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti Vatandaşı  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Çiçekdağı 1989  
**Telefon** : +90 505 694 93 87  
**Faks** : ---  
**E-Posta** : ibrahimyozgatli@hotmail.com

### EĞİTİM

| Derece          | Adı, İlçe, İl  | Bitirme Yılı |
|-----------------|--|--------------|
| Lise            | : İstiklal Lisesi, Merkez, Yozgat  | 2006         |
| Üniversite      | : Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü,<br>Selçuklu, Konya     | 2014         |
| Yüksek lisans : | Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği<br>Bölümü, Selçuklu, Konya | 2019         |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl               | Kurum  | Görevi                                     |
|-------------------|--|--|
| 2015-2018         | Anova Proje ve Danışmanlık Tic.<br>Ltd. Şti. | Proje, Satış ve Teknik<br>Destek Mühendisi |
| 2018-Devam ediyor | Numesys İleri Mühendislik<br>Hizmetleri A.Ş. | Bölge Sorumlusu                            |

### UZMANLIK ALANI

Titreşim, Kapalı (Implicit) FEA Analizler (Termal, Statik, Modal, Rastgele Titreşimler(Random Vibration), Harmonik, Tepki Spektrum (Response Spectrum), Dinamik Analiz (Transient), Kinematik Analiz (Rigid Body Dynamics) vb.)

### YAYINLAR

Yozgatlı, İ., Şahin, Ö.S., 2019, Bal Peteği Kompozit Yapıda Boyut Parametrelerinin ve Yer Çekimi Öngerilmesinin Doğal Frekanslar Üzerindeki Etkisi, *Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi'19, INSAC-2019*, Konya, Cilt 2, 177-192. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)