

**T.C.**  
**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİ İLE YAPI DİNAMIĞI ÖZELLİKLERİNİ**  
**KORUYAN KÜÇÜLTÜLMÜŞ MODEL OLUŞTURULMASI**

**BİTİRME ÇALIŞMASI**

**Betül ACAR**

**Yağmur KAYA**

**(I. ÖĞRETİM)**

**HAZİRAN 2021**

**TRABZON**

**T.C.**  
**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİ İLE YAPI DİNAMİĞİ ÖZELLİKLERİNİ**  
**KORUYAN KÜÇÜLTÜLMÜŞ MODEL OLUŞTURULMASI**

**Betül ACAR**

**Yağmur KAYA**

**(I. ÖĞRETİM)**

**Jüri Üyeleri**

**Danışman: Doç. Dr. Ömer Necati CORA**

**Üye :**

**Üye :**

**Bölüm Başkanı: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU**

**HAZİRAN 2021**

**TRABZON**

## ÖNSÖZ

Yapılan tez çalışması TUSAŞ Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Programı olan LIFT UP kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının daha önce üzerinde çalışma yapılmamış ve geliştirilmeye açık bir konuya sahip olması yapılan bu projeyi seçmemizdeki en önemli nedenlerden biridir. Yapacağımız çalışmaların bizden sonra bu konu üzerinde çalışacaklara sağlam bir temel oluşturmasını amaçlıyoruz. Gerçekleştireceğimiz projenin kendi akademik çalışmalarımıza yön vermesinin yanı sıra gerek TUSAŞ gerekse ülkemiz için bir katkı sağlamasını ümit ediyoruz.

Projenin planlanmasında, araştırılmasında, geliştirilmesinde çalışmalarımızı yönlendiren ve bize her konuda destek sağlayan TUSAŞ' a, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü akademik danışmanımız Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya ve sanayi danışmanımız Müslüm ÖZKESİCİLER'e teşekkürü bir borç biliriz.

Eğitimimiz süresince bizden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ailelerimize sevgi ve saygılarımızı sunarız.

Betül ACAR

Yağmur KAYA

Trabzon 2021

## ÖZET

Bu tez çalışmasında tam ölçekli modelin yapı dinamiği özelliğini değiştirmeden küçültülmüş model oluşturulması kapsamında analizler gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında 473x30x6 mm boyutlarında dikdörtgen polikarbondan yapılmış bir plakanın modal analizi ve çarpınma analizi MSC.Nastran programı üzerinden yapılmıştır. Çarpınma analizi çözümünde MSC.Nastran'da yer alan üç çözüm yönteminden PK yöntemi kullanılmıştır.

Analiz çalışmalarının ardından 473x30x6 mm boyutlarındaki dikdörtgen polikarbon plakanın deneysel modal analizi yapılmıştır. Ancak bu plakanın çarpınma analizi sonucu plakada çarpınma meydana gelmediği için deneysel çarpınma analizi yapılmamıştır. Tam ölçekli plaka modeli geometrik olarak ölçeklendirilerek küçültülmüş plakanın analizleri yapılmıştır. Çalışmanın devamı olarak tam ölçekli modelin dinamik karakteristiğine uygun güncellemeler yapılarak farklı ölçeklerde modellenmiş plakaların 3 boyutlu yazıcıda üretilmesi ve deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** modal analiz, küçültülmüş model, çarpınma analizi, tam ölçekli model

## SUMMARY

In this study, analyses have been carried out in order to create a scaled model without changing the structural dynamics of the full-scale model. Modal analysis of a rectangular plate made from rectangle polycarbonate which is the size of 473x30x6 mm and flutter analysis were done through MSC Nastran P-K method that is out of three methods in MSC Nastran was used as solution method for flutter analysis.

After the numerical analysis studies, the experimental modal analysis of the rectangular polycarbonate plate with the dimensions of 473x30x6 mm was made. However, experimental flutter analysis was not performed because flutter did not occur on the plate as a result of flutter analysis of this plate. The full-scale plate model was geometrically scaled, and the reduced plate was analysed. the ongoing study, it is aimed to produce the different scale plates modeled by making updates by the dynamic characteristics of the full-scale model on a 3D printer and examine them experimentally.

**Keywords:** modal analysis, scaled model, flutter analysis, full scale model

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY .....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.1.1.Modal Analiz.....	2
1.1.2. Çırpıntı Analizi.....	5
1.1.3.Çırpıntı Analizi Çözüm Metotları .....	8
1.1.3.1. K- Yöntemi.....	8
1.1.3.2. KE- Yöntemi .....	8
1.1.3.3. PK-Yöntemi .....	9
1.1.4. Katmanlı İmalat Teknolojisi.....	120
1.1.4.1. 3 Boyutlu baskılama yöntemi.....	120
1.2. Literatür Taraması .....	12
1.3. Kısıtlar Ve Koşullar.....	13
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	14
2.1. Sayısal Analizler.....	14
2.1.1. Tam Ölçekli Model .....	14
2.1.2. Küçültülmüş model .....	17
2.2. Deneysel Çalışmalar.....	27
2.2.1. Tam Ölçekli Model .....	31

2.2.2. Küçültülmüş model .....	32
3. BULGULAR .....	34
4. TARTIŞMA .....	35
5. MALİYET HESABI .....	36
6. HAFTALIK ÇALIŞMA PROGRAMI.....	36
7. SONUÇLAR .....	38
8. ÖNERİLER .....	38
9. KAYNAKÇA .....	40
ÖZGEÇMİŞ	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Uçağın tarihsel gelişimi . . . . .	1
Şekil 1.2. Dinamik analiz için kullanılan uçağın CFD ağı[4]. . . . .	6
Şekil 1.3. Çırpınma hızını gösteren hız-sönüm grafiği [8] . . . . .	9
Şekil 1.4. 3 boyutlu yazıcı baskı aşaması . . . . .	11
Şekil 1.5. 3 boyutlu yazıcı ürün örnekleri . . . . .	11
Şekil 2.1. Dikdörtgen plakanın FEA modeli . . . . .	14
Şekil 2.2. Mod şekilleri . . . . .	16
Şekil 2.3. Frekans-Hız grafiği . . . . .	16
Şekil 2.4. Sönüm-Hız grafiği . . . . .	17
Şekil 2.5. Tamamen içi boşaltılmış model görünüşü. . . . .	19
Şekil 2.6. Kanat ucundan doldurulan plakanın katı modeli. . . . .	20
Şekil 2.7. Yarısı boşaltılmış 1/3 ölçekli plaka kesit modeli . . . . .	22
Şekil 2.8. Üç adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın katı modeli . . . . .	23
Şekil 2.9. Bir adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın katı modeli . . . . .	24
Şekil 2.10. Plakaya enine eklenen çelik levhalar . . . . .	25
Şekil 2.11. Plakaya eklenen çelik levhalar (2x1,6x9,6 mm) . . . . .	26
Şekil 2.12. Tek eksenli modal analiz test düzeneği . . . . .	28
Şekil 2.13. Deney düzeneği . . . . .	28
Şekil 2.14. Deneysel çalışmada kullanılan düzenek . . . . .	29
Şekil 2.15. Deney düzeneğine yerleştirilen plaka . . . . .	29
Şekil 2.16. İvme ölçer . . . . .	30
Şekil 2.17. Modal analizde kullanılan çekiç . . . . .	30
Şekil 2.18. Labview Signalexpress programı . . . . .	31
Şekil 2.19. Modal analiz deney düzeneği . . . . .	31
Şekil 2.20. Üç boyutlu yazıcıda üretilen modeller . . . . .	32
Şekil 2.21. %100 dolu üç boyutlu üretim modeli . . . . .	34
Şekil 2.22. 3 Boyutlu yazıcıda üretilmiş küçültülmüş model . . . . .	34



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Polikarbon mekanik özellikleri .....	15
Tablo 2.2. Doğal frekans ve mod şekilleri. ....	15
Tablo 2.3. 1/5 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları .....	18
Tablo 2.4. 1/10 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları .....	18
Tablo 2.5. 1/10 ölçeklendirilmiş modelin içi dolu ve boş model karşılaştırılması .....	19
Tablo 2.6. Doldurulan plaka modal analiz sonuçları .....	21
Tablo 2.7. ABS mekanik özellikleri.....	21
Tablo 2.8. 1/3 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları. ....	22
Tablo 2.9. Çelik levha mekanik özellikleri. ....	23
Tablo 2.10. Üç adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın analiz sonuçları .....	24
Tablo 2.11. Bir adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın analiz sonuçları .....	25
Tablo 2.12. Plakaya enine eklenen çelik levhaların analiz sonuçları.....	26
Tablo 2.13. Plakaya enine eklenen çelik levhalar (2x1,6x9,6 mm) analiz sonuçları .....	27
Tablo 2.14. Sayısal ve deneysel analiz karşılaştırma sonuçları. ....	32
Tablo 2.15. 0,4 mm'lik et kalınlığına ait modal analiz sonuçları.....	33
Tablo 5.1. Maliyet tablosu. ....	36
Tablo 6.1. Çalışma planı.. . ....	36
Tablo 6.2. Aylık iş-zaman çizelgesi. ....	37
Tablo 6.3. Haftalık çalışma programı .....	38

Tablo 2.1. Haftalık çalışma programı.....	14
Tablo 2.2. İş paketleri.....	15
Tablo 2.3. Aylık İş-Zaman Çizelgesi. ....	15
Tablo 3.4. Eleman tipine göre düğüm sayısı. ....	18
Tablo 3.5. Plakanın mod şekli ve frekans değerleri. ....	20
Tablo 3.6. Sönüm-Hız değişim değerleri. ....	21
Tablo 3.7. Frekans-Hız değişim değerleri. ....	21
Tablo 3.8. 1/5 oranında küçültülmüş model sonuçları. ....	23
Tablo 3.9. 1/10 oranında küçültülmüş model sonuçları. ....	23
Tablo 5.1. Maliyet Tablosu. ....	25
Tablo 6.1. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	26

## SEMBOLLER DİZİNİ

- $[M]$  : Modal kütle matrisi
- $[K]$  : Rijitlik matrisi
- $[C]$  : Sönüm matrisi
- $\{P\}$  : Kuvvet vektörü
- $\{u\}$  : Yer değiştirme vektörü
- $\{\dot{u}\}$  : Hız vektörü
- $\{\ddot{u}\}$  : İvme vektörü
- $\{\emptyset\}$  : Öz vektör veya doğal mod şekli
- $\omega$  : Doğal frekans, Hz
- $p$  : Özdeğer
- $[A]$  : Kare dinamik matris
- $f_i$  :  $i$ 'nci doğal frekans, Hz
- $\xi_i$  :  $i$ 'nci modal yerdeğiştirme, m
- $m_j$  :  $j$ 'nci genelleştirilmiş kütle, kg
- $k_j$  :  $j$ 'nci genelleştirilmiş rijitlik, N/m
- $[Q_r]$  : Fazda modal sapma matrisi
- $[Q_i]$  : Faz dışı modal sapma matrisi
- $g$  : Yapay yapısal sönüm, Ns/m
- $\rho$  : Yoğunluk,  $\text{kg/m}^3$
- $V$  : Hız, m/s
- $Q_{hh}(m,k)$  : Aerodinamik kuvvet matrisi
- $\{u_h\}$  : Modal genlik vektörü
- $k$  : Azaltılmış frekans, Hz

- $M$  : Mach sayısı
- $\bar{c}$  : Referans uzunluk, m
- $Q_{hh}^I$  : Modal aerodinamik sönümlenme matrisi
- $Q_{hh}^R$  : Modal aerodinamik rijitlik matrisi

## 1. GENEL BİLGİLER

Bu tezin amacı polikarbondan yapılmış bir plakanın MSC.Nastran ile modal analizlerini gerçekleştirmek, sıkıştırılmaz bir akış için çarpınma analiz sonuçlarını belirlemektir. Yapılan analiz sonuçlarının var olan çalışmalarla karşılaştırılması hedeflenmektedir. Plakanın 1/5 ve 1/10 ölçeklendirilmiş modelinin oluşturularak tam ölçekli modelin sonuçlarıyla karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Yapılan düz plaka analizinin daha karmaşık yapısı olan uçak kanadı analiz çalışmalarının sanayide kullanılacak modellerin alt yapısını oluşturması hedeflenir. Projenin ilerleyen çalışmalarında, incelenen plakanın katmanlı imalat üretimi ile üretilerek uçak kanatlarına optimizasyon edilmesi planlanmaktadır.

### 1.1.Giriş

1903 yılında Wright kardeşlerin yaptığı ve havada 12 saniye durabilecek uçaktan günümüze kadar uçak sanayisinde birçok gelişme olmuştur. Artık uçaklar saatlerce havada kalabiliyor, ses hızını geçebilecek hızlarda hareket edebiliyorlardır. Teknolojinin ilerlemesi uçak ve havacılık sanayisini de etkilemiştir. Uçak ve havacılık sanayisindeki bu gelişmeler avantajların yanı sıra teknik sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunları çözüme ulaştırmak için çeşitli yenilemeler ve analizler geçmişten bugüne kadar devam etmektedir.



Şekil 1.1 Uçağın tarihsel gelişimi

Bir hava aracının durumuna, sürüş koşuluna bağı olarak çeşitli analiz çalışmaları yapılmaktadır. Gerçek yapının her koşulda test yapılması ve yapının dinamik davranışının belirlenmesi pratikte mümkün değildir. Bu yüzden rezonans çakışmaları, ömür yetersizlikleri vb. durumlar doğru elde edilememektedir. Analizlerde yapının sonlu eleman modeli oluşturularak model test sonuçları ile güncelleştirilmesi dinamik tabanlı analizler için önem arz etmektedir.

Bu tezde özellikle uçak kanatlarının yapı dinamiğini etkileyen yapısal analizler üzerinde durulacaktır. Bu analizlerden en temeli olan modal analiz uçak kanadının belirlenen koşullar altında hesaplanan doğal frekans ve mod şekillerini açıklayacaktır.

### **1.1.1. Modal Analiz**

Modal analiz, son yirmi yılda mühendislik yapılarında dinamik özelliklerin belirlenmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesinde önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Yalnızca mekanik ve havacılık mühendisliği ile sınırlı olmayıp aynı zamanda inşaat ve bina yapıları, biyomekanik problemler, akustik aletler, ulaşım ve nükleer santraller gibi pek çok alanda uygulanmaktadır [1].

Modal analizde amaç doğal frekans ve mod şekilleri gibi sistemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve bu dinamik davranışın matematiksel modelinin elde edilmesidir. Modal analiz ile yapının modal davranışı incelenerek rijitlik dağılımı, burulma vb. durumlar hakkında fikir edinilebilmektedir. İncelenen bu yapısal analizler tasarımın dayanıksız bölgelerinin tespit edilmesinde fayda sağlamaktadır.

Modal Analiz yöntemi kullanılarak hareket denklemlerini tek başlarına çözülebilir bağımsız denklemler haline getirmek ve elde edilen çözümlerden yola çıkılarak Mod toplama yöntemi ile başlangıç şartları veya verilen bir dış zorlama için gerçek sistem cevaplarını elde etmek mümkündür. Buradaki Mod toplamı Mod şekillerini oluşturur. Mod şekli yapının her bir doğal frekansındaki titreşim esnasında aldığı şekli ifade etmektedir.

Doğal frekansların bilinmesi girdi frekanslarının ve sistemdeki rezonans oluşabilecek bölgelerin tespiti açısından önemlidir. Böylece sistemin hareketi esnasında tehlikeye yol açacak yerlerin belirlenip, bu bölgelerde yapılan iyileştirmeler sayesinde yapıda meydana gelebilecek riskler en aza indirilebilecektir.

Bu mod şekillerinin her biri doğal bir frekansa karşılık gelmektedir. Öz değerler (eigenvalues) ve öz modlar (eigenmodes) salınımlı sistemlerde modal analiz ile belirlenir. Öz değerler ve öz modlar mekanik yapıları titreşim açısından inceleyerek mühendislik yapıları hakkında bilgi edinmek için kullanılırlar.

Matris formundaki genel hareket denklemi (1.1)'de verilmiştir [2];

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1.1)$$

Sönüm kuvvetleri ve dış kuvvetleri göz ardı ederek hareket denklemi (1.1)'i indirgersek denklemin yeni matris formu denklem (1.2) elde edilmektedir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (1.2)$$

Harmonik titreşim durumu ve modal ayrıştırma yöntemi kullanılarak  $\{\ddot{u}\} = -\omega^2\{u\}$  değeri denklem (1.2) öz değer problemine indirgenirse;

$$([K] - \omega^2[M])\{\emptyset\} = 0 \quad (1.3)$$

Denklem (1.3) öz değer problem olarak adlandırılır ve homojen cebirsel denklemler dizisi olarak yorumlanabilir. Öz denklem (1.3) 'ü  $[M]^{-1}$  matrisiyle veya  $[K]^{-1}$  matrisiyle çarparak standart bir öz değer denklemi denklem (1.4) olarak yazılabilir;

$$[A]\{\phi\} = p\{\phi\} \quad (1.4)$$

Öz denklem (1.3)'ün olası iki çözümü vardır:

1-  $\det([K] - \omega^2[M]) \neq 0$  ise olası tek çözüm  $\{\emptyset\} = 0$  'dır. Bu hareket olamaması dışında fiziksel bir bakış açısıyla hiçbir yararlı bilgi vermeyen önemsiz bir çözümdür.

2-  $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$  ise  $\{\emptyset\} \neq 0$  'dır.

Öz değer problem denklemi (1.5) indirgenerek denklem (1.6) elde edilir;

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (1.5)$$

$$\omega^2 = p \text{ ise;}$$

$$\det([K] - p[M]) = 0 \quad (1.6)$$

Determinant yalnızca  $p_i$  veya  $\omega_i^2$  ayrık öz değerler kümesinde sıfırdır.  $i$ . değere karşılık gelen öz vektör  $\{\phi\}_i$  'dir. Böylece denklem (1.3) tekrar yazılarak denklem (1.7) elde edilmiştir;

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\phi\}_i = 0 \quad i=1,2,3... \quad (1.7)$$

Öz değerlerin ve öz vektörlerin sayısı serbestlik derecesi sayısına eşittir. Yapısal dinamiklerde, her öz değer doğal frekansa ve her öz vektör doğal mod şekline karşılık gelir. Birlikte yapının bir serbest titreşim modunu tanımlarlar.  $i$ 'nci öz değer  $p_i$ , denklem(1.8)'deki  $i$ 'nci doğal frekansla ilişkilidir;

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (1.8)$$

Herhangi bir zamanda serbest veya zorlanmış titreşimde olan doğrusal elastik bir yapının mod şekli, tüm doğal mod şekillerinin doğrusal bir kombinasyonudur. Matematiksel olarak denklem (1.9)'daki gibi açıklanmaktadır.

$$\{u\} = \sum_i \{\phi\}_i \xi_i \quad (1.9)$$

Öz vektörler arasında ortogonalite özelliği vardır. Bu özelliklerin kanıtlarını sunmak çok kolaydır. Denklem (1.7)'dan  $\omega_i^2 = p_i$  eşitliğine göre bir vektör için elde edilirse;

$$[K]\{\phi\}_i = p_i[M]\{\phi\}_i \quad (1.10)$$

Ve daha sonra başka bir transpoze vektör olan  $\{\phi\}_j^T$  ile çarpılırsa, denklem (1.10), denklem (1.11) şeklinde ifade edilir;

$$\{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_i = p_i \{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_i \quad (1.11)$$

Aynı şekilde  $\{\phi\}_j$  vektöründen başlayarak  $\{\phi\}_i^T$  vektörüyle ön çarpma yapılırsa denklem (1.10), denklem(1.12) şeklinde ifade edilir;

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = p_j \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j \quad (1.12)$$

$[K]$  ve  $[M]$  gerçekte simetrik matrislerse, şu şekilde yazılabilir;

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = \{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_i$$

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = \{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_i$$

$$0 = (p_i - p_j) \{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j$$

$(p_i - p_j) \neq 0$  ise, yani  $i \neq j$  ise;

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0 \text{ ve } \{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \quad (1.13)$$



Denklem (1.13), vektörlerin ortogonal özelliklerini sistem kütlesi veya rijitlik matrislerine göre tanımlar.

Eğer  $i = j$  ise o zaman bu iki vektör ortogonal değildir ve denklem (1.12) sıfır olmayan bir skaler sabite eşittir;

$$\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j = m_j \quad (1.14)$$

$$\{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_j = k_j \quad (1.15)$$

Denklem (1.13), normal modların ortogonal özelliği olarak bilinir; bu, her normal mod şeklinin benzersiz ve diğerlerinden farklı olduğu anlamına gelir. Ek olarak, bir normal mod şekli, diğer normal mod şekillerinin doğrusal bir kombinasyonu yoluyla elde edilemez.

Ek olarak, denklem (1.14) ve denklem (1.15) 'den Rayleigh denklemi elde edilirse;

$$\omega_j^2 = \frac{\{\phi\}_j^T [K] \{\phi\}_j}{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j} \quad (1.16)$$

Pratik inceleme için doğal mod şekilleri ölçeklenebilir. Öz vektörlerin ögelerinden birine belirli bir değer atanırsa, herhangi iki öge arasındaki oran sabit olduğundan (n-1) ögelerinin geri kalanı da sabit olacaktır. Bu nedenle, genliklerini benzersiz kılmak için doğal mod şekillerinin ögelerini ayarlama işlemine normalleştirme denir. Ortaya çıkan ölçeklendirilmiş doğal modlara ortonormal modlar denir. Kütle (atalet) normalizasyonu, öz vektör normalizasyonunun varsayılan yöntemidir ve her öz vektörü, doğal mod şeklini, genelleştirilmiş kütlenin bir birim değerine ölçeklendirir. Bu ölçeklendirme matematiksel olarak denklem (1.17)'de açıklanmaktadır:

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 1 \quad (1.17)$$

Yapı serbest olduğunda (desteksiz olduğunda) elastik modların yanı sıra, katı gövde modlarına sahiptir. Katı cisim modunun doğal frekansı sıfıra eşittir.

### 1.1.2. Çırpıntı ( flutter ) Analizi

Günümüzde atmosferde uçan her taşıt uçuştan önce aeroelastik analizden geçmektedir. Aerodinamik etkiler sonucu ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu sebeple uçuştan önce çırpınma (flutter), gövde titreşimi (buffeting) ve ıraksaklıklar (divergence) en önemli analizlerdir. Çırpınma, bir uçuş aracının aerodinamik, elastik ve atalet kuvvetleri arasındaki

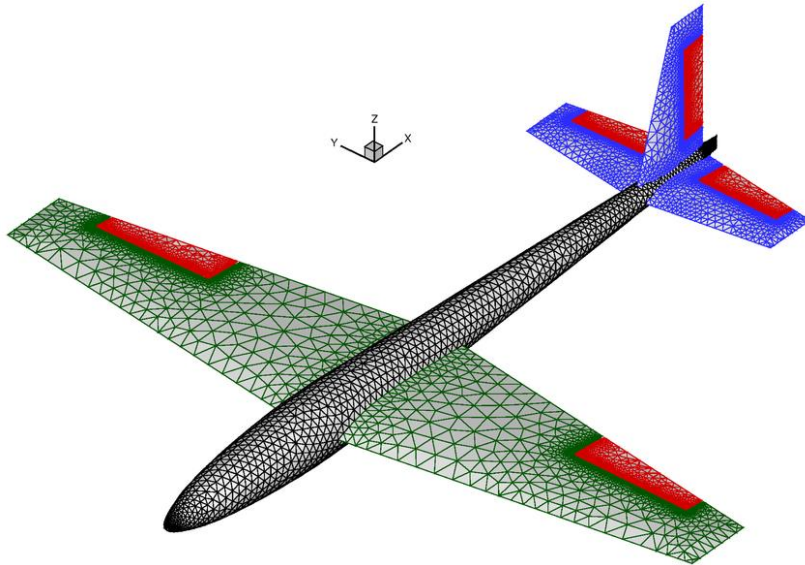
etkileşimleri içeren dinamik bir dengesizliktir [3]. Bir hava aracının hızı arttıkça yapıya eklenen aerodinamik enerji nedeniyle artan hareketleri sönümlmek için yapısal sönümün yetersiz kaldığı bir nokta olabilir ve yapısal arıza meydana gelebilir. Bu nedenle çarpıntı özelliklerini dikkate almak hava taşıtı tasarımının önemli bir parçasıdır.

Çarpınma analizi için izlenen yol 4 bölüme ayrılmıştır.

1. Sonlu eleman modellemesi
2. Dinamik Karakteristik
3. Kararsız aerodinamik
4. Çarpınma çözümü

Birinci adım olan sonlu elemanlar modellemesi hava aracının modellenmesini içerir. Hava aracındaki her üye çubuk eleman, kiriş eleman, plaka elamanı ve katı eleman gibi bir, iki veya üç boyutlu elemanların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Her üyenin kuvvetleri ve yer değiştirmeleri arasındaki ilişki sertlik matrisi ile temsil edilir. Parçaların modellenmesi ile sonlu elemanlar ağı (mesh) oluşturulur.

İkinci adımda sonlu elemanlar modeli oluşturulan yapının dinamik analizi yapılmaktadır. Mod ve frekansları elde edilmektedir.



Şekil 1.2. Uçuş dinamik analizi için kullanılan uçağın CFD ağı [4]

Bir kanadın sonlu elemanlar modeli için yapısal hareket denklemi (1.18) gösterilmiştir [5];

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (1.18)$$

Diğer bileşenlerde de benzer şekilde frekans modları elde edildikten sonra kararsız aerodinamik model oluşturulur.

Kararsız aerodinamik model, bir yapıya etki eden kuvvetleri temsil eden aerodinamik modeldir. Aerodinamik etkilerin mevcut olduğu koşullar için gereklidir. Aerodinamik kuvvetler modal kuvvetler olarak hesaplanır.

$$\{F\} = [Q_r] \{u\} + [Q_i] \{\dot{u}\} = 0 \quad (1.19)$$

Denklem (1.19) daki matrisler  $[Q_r]$  ve  $[Q_i]$  sırasıyla fazdaki modal sapma ile faz dışı modal sapma aerodinamik kuvvetlerin bileşenlerinin diyagonal olmayan matrisleridir [6]. Modal aerodinamik kuvvetler indüklendikleri salınım frekansına bağlıdır. Bu aerodinamik kuvvetler, ek yer değiştirmelere neden olur. Spline interpolasyonu ile yapısal dinamik analizin neden olduğu deplasmana ek yer değiştirmeler aktarılır. Böylece yapının aerodinamik kuvvetleri ve yapısal dinamikleri, aerodinamik ve yapısal sonlu elemanlar aracılığıyla birleştirilerek aeroelastik model oluşturulur. Aeroelastik model hareket denklemi (1.18) ve (1.19)'un bir araya getirilmesiyle elde edilir. Aerodinamik denklem (1.20)'de verilmiştir;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (1.20)$$

Doğal mod şekillerindeki herhangi bir sapma aerodinamik kuvvetleri etkiler. Yapısal denklem ile aerodinamik kuvvetler birlikte alındığında modal aeroelastik denklemi (1.21) elde edilmektedir;

$$[M]\{\ddot{u}\} - [Q_i]\{\dot{u}\} + ([K] - [Q_r])\{u\} = \{0\} \quad (1.21)$$

Son adım olarak çarpınma çözümümü yapılır. Uçuş hızı, azaltılmış frekans ve mod sayısı belirlenerek çarpınma analizi çözülür. Çarpınma analizi için MSC. Nastran' da var olan üç metot bulunmaktadır. PK-yöntemi, K-yöntemi ve KE yöntemi bölüm 1.1.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Çözüm yöntemleri sonucunda hesaplanan değerlerle V-g ve V- $\omega$  grafikleri oluşturularak çarpınma gözlemlenebilir.

### 1.1.3. Çırpınma Analizi Çözüm Metotları

#### 1.1.3.1. K- Yöntemi

K-yöntemi ile modal çarpıntı analizi temel denklemi denklem (1.22) 'de verilmiştir.

$$[-M\omega^2 + iC\omega + (1+ig)K - (\frac{1}{2}\rho V^2)Q_{hh}(m,k)]\{u_h\} = 0 \quad (1.22)$$

K-yöntemi çözümü için aerodinamik terim eşdeğer bir aerodinamik kütleye dönüştürülür fakat MSC. Nastran ile küçük bir varyasyon kullanılmış ve denklem (1.23) elde edilerek analizleri yapılmaktadır [7].

$$[[(\frac{2k}{c})^2 M + \frac{\rho}{2} Q_{hh}(m,k)](\frac{-V^2}{1+ig}) + (\frac{2k}{c})C \frac{iV}{\sqrt{1+ig}} + K]\{u_h\} = 0 \quad (1.23)$$

K yöntemi bir döngü prosedürüdür. V, g ve  $\omega/2\pi$  değerleri çeşitli m, k ve  $\rho$  değerleri için çözülür. Çırpıntı hızlarını belirlemek için V – g grafikleri kullanılır. Fakat bu eğrileri yorumlamak son derece zordur.

#### 1.1.3.2. KE-Yöntemi

Yapıdan veya bir kontrol sisteminden gelen viskoz sönümlenmeleri ihmal etmeye ve çözümü öz değerlerle sınırlandırmaya ve öz vektörlere gerek duymadan, daha verimli bir çarpınma analizi K-yöntemi mümkündür. Bu verimli K yöntemi algoritmasına KE -yöntemi denir.

Köklerin eğrileri çizilebilmesi için köklerin sıralanması gerekir.  $k$ 'nin ilk değeri için, kökler, üst Hessenberg öz değer alt yordamı tarafından çıktı sırasına göre kabul edilir. Eğer n. indirgenmiş frekans  $k_n$  için i. Öz değerini  $p_{i,n}$  ile ifade edersek, ekstrapolasyonlu bir öz değerini şu şekilde tanımlayabiliriz [7];

$$p_{i,n}^{(e)} = p_{i,n-1} + (k_n - k_{n-1})(p_{i,n-1} - p_{i,n-2}) / (k_n - k_{n-1}), \quad (1.24)$$

$n = 2, 3, 4, \dots$

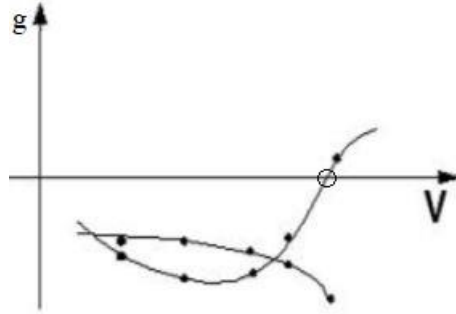
Daha sonra  $p_{i,0}$  değerleri  $p_{i,1}$  'ye yakınlığa göre sıralanır ve burada "yakınlık" minimum değer ile ölçülür. Bu sıralama ile, MSC. Nastran NASPLOT yardımcı programı kullanılarak üretilen V-g ve V-f eğrileri fiziksel olarak yorumlanabilir.

### 1.1.3.3. PK- Yöntemi

PK- yöntemi ile modal çarpınma analizi için temel denklem denklem (1.25) ' de verilmiştir [7].

$$[Mp^2 + (C - \frac{1}{4}\rho\bar{c}VQ_{hh}^I/k)p + k - \frac{1}{2}\rho V^2 Q_{hh}^R] \{u_h\} = 0 \quad (1.25)$$

Aeroelastik özellikler elde etmek için bazen sönümlenme oranını tahmin etmek gerekir. Sönüm oranı, uçuş çarpınma testlerinde gösterge olarak kullanılabilir. Sönüm oranını tahmin etmek için PK- yöntemi kullanılır. K-yöntemine kıyasla PK-yöntemi daha karmaşıktır, çünkü PK- yönteminde frekans eşleştirme işlemi gerçekleştirilir. Önceden varsayılmış bir azaltılmış frekans  $k$  için öz değer  $p$ 'nin hesaplanmasını ve  $k$  değerleri yaklaşıpına kadar hesaplanan  $p$  öz değerinden  $k'$  nın hesaplanmasını içeren yinelemeli bir süreçtir. Bu işlem ilgili tüm hız aralığı için gerçekleştirilir. Daha sonra, K-yöntemine benzer şekilde, çarpınma hızını ve frekansını bulmak için  $V - \omega$  ve  $V - g$  grafikleri çizilir.  $V-g$  grafiklerinde eğrinin yatay eksenini keserek işaret değiştirdiği nokta yani sönüm değeri olan  $g$ 'nin pozitif bölgeye geçtiği noktada ( $g>0$ ) çarpınma meydana gelir. Noktanın denk geldiği hıza karşılık gelen hız ise olası çarpınma hızı olarak alınır. Şekil 3'te tipik bir hız- sönüm grafiği verilmiştir.



Şekil 1.3.Çarpınma durumunu gösteren hız-sönüm grafiği [8]

PK yönteminin temel avantajı, verilen hız değerleri için doğrudan sonuçlar üretmesidir, oysa K ve KE yöntemlerinin azaltılmış titreşim frekansını belirlemek için yenilemek gerekir.

Aynı zamanda PK yöntemi daha kesin ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edildiği için bu çalışmanın çarpıntı analizinde PK yöntemi kullanılmıştır.

#### **1.1.4. Katmanlı İmalat Teknolojisi**

Yaygın olarak 3 boyutlu baskı olarak bilinen katmanlı imalatın (Additive manufacturing) günümüzde kullanımı oldukça artmıştır. Genellikle katman üzerine katman oluşturularak malzemelerin birleştirilme işlemidir. Otomotiv, savunma sanayi, medikal uygulamalar vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe yüksek maliyetlerde imalatlar gerektiğinden katmanlı imalat bu sektörde de çokça kullanılan uygulama alanıdır.

Katmanlı imalat yöntemine ve malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Temelde; sıvı, toz ve katı bazlı yöntemler olarak kategorize edilmiştir [9].

##### **A- Sıvı Bazlı yöntemler;**

- Sterolitografi
- Fıskırtma sistemleri
- Direkt ışık prosesi
- Yüksek viskoziteli fıskırtma
- Matris destekli lazer darbeli buharlaştırma prosesi

##### **B- Toz (pudra) Bazlı yöntemler;**

- Seçmeli lazer sinterleme
- Direkt metal lazer sinterleme
- 3B baskılama
- Erimiş metal çökeltme sistemleri
- Seçmeli lazer eritmesi

##### **C- Katı Bazlı yöntemler;**

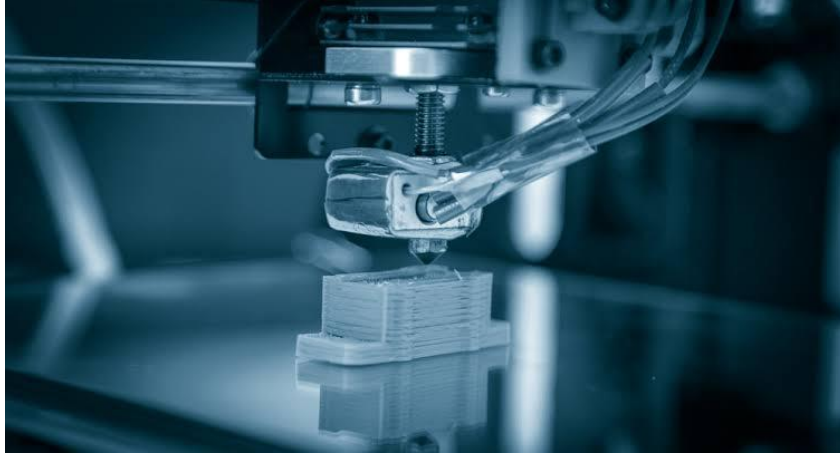
- Saç istifleme teknolojisi
- Eriyik biriktirme Modellemesi

Bu çalışmada bahsedilen katmanlı imalat yöntemlerinden Toz(pudra) bazlı yöntem olan 3B baskılama yöntemi kullanılacaktır.

### 1.1.4.1. 3 Boyutlu Baskılama yöntemi

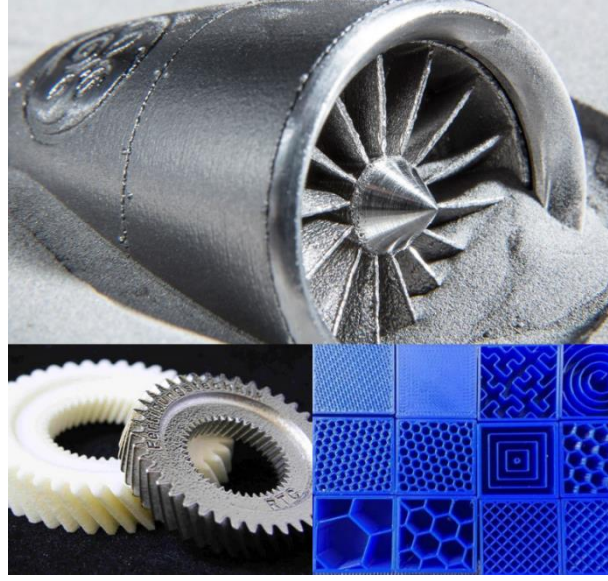
Bu yöntemde genellikle plastik ve polimer malzemeler kullanılmaktadır. Filament adı verilen bu malzemeler eritilerek nozul ucuna iletilir. Katmanlar halinde alt tablaya üst üste yapışarak model oluşur. Ortam sıcaklığında sertleştirilerek 3 boyutlu gerçek model oluşturulur.

3 boyutlu yazıcılarda filamet malzemesi olarak PLA, ABS ve PVA kullanılmaktadır [10]. PLA (polilaktik asit) mısır bazlı bir çeşit bioplastiktir. İdeal işletme sıcaklığı 180-200 °C arasındır. ABS (akrilonitril bütadien stiren) petrol bazlı bir plastiktir, oldukça sağlam bir baskıdır. İdeal baskı sıcaklığı 250-260 °C 'dir. PVA(polivinil alkol) sıvıda çözünme özelliğiyle günümüzde mevcut olan en iyi destek materyallerinden biridir.



Şekil 1.4. 3 boyutlu yazıcı baskı aşaması

3 boyutlu baskı yönteminin birçok avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Karmaşık yüzey geometrisine sahip nesnelerin kolaylıkla üretilebilmesi, kullanılan ham maddelerin maliyetinin düşük ve kolay elde edilebilir olması, bilgisayar destekli tasarım modeli üretiminin kısa süreler alması gibi avantajlarının yanı sıra seri üretim yöntemlerine göre yavaş olması, oluşturulan modelin yüzey pürüzlülüğünün düzgün olmaması, malzeme çeşitliliğinin az olması ve hacim büyüklüğünün sınırlı olması gibi dezavantajları mevcuttur.



Şekil 1.5. 3 boyutlu yazıcı ürün örnekleri

## 1.2.Literatür Taraması

Bu bölümde çeşitli kanat yapıları üzerinde yapılan modal analiz, çarpınma analiz ve optimizasyon çalışmalarına değinilmektedir.

Edmond ve arkadaşları [11], Aktif Esnek Kanat (AFW) konseptinin bir F-16 Çevik Falcon, düşük hızlı aeroelastik modele uygulanmasından elde edilen sonuçları incelemiştir. Esnek kanat teknolojisinin faydalarının, yalnızca dinamik basınç etkilerinin ele alınabildiği ses altı test sırasında kaydedilebilecek olandan çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

Sezsy Yusuf ve arkadaşları [12], tasarım sürecinin bir parçası olarak kavramsal, esnek kanatlı bir planformunun deneysel testine izin vermek için ölçeklendirme yasalarını benimseyen bir metodoloji geliştirmek amacıyla bu çalışmayı yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre alt ölçekli modelin gözlemlenen dinamik davranışı, uçağın tasarımını belirlemek ve yüksek en-boy oranına sahip bir kanadın tasarımını olgunlaştırmak için kullanılabilir.

Jelena Dimitrijević ve Predrag Kovačević [2], hesaplamalı Modal Analizinin sonuçlarını, yani LASTA uçağının doğal frekanslarının ve doğal mod şekillerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak hesaplanmasını sunmaktadır. Bir uçak prototipinin tasarımı, imalatı ve incelenmesi sırasında, uçağın tasarlanan hız aralığında dalgalanma olmadığını teyit edilmesi gerekmektedir. Çarpınma analizi ve uçuş testi bunu doğrulamak için kullanılır. İlk olarak, LASTA uçağının sonlu eleman modeli yapılmıştır. Daha sonra doğal frekanslar ve doğal



mod şekilleri Hesaplamalı Modal Analiz kullanılarak tahmin edilir. Bütün bunlar I-DEAS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalı Modal Analizinin sonuçları Çırpınma Analizi için, yani LASTA uçağının kararsız genelleştirilmiş aerodinamik kuvvetlerinin ve kritik düz hızlarının hesaplanması için kullanılacaktır.

Kurtuluş Ersoy [13], yaptığı çalışmada örnek yapılar için modal güncelleme yapıp güncellenen sonlu elemanlar modelinin farklı yükleme koşullarında verdiği sonuçların değerlendirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada doğal frekans ve mod şekilleri farklarını artık değerler olarak kullanan metod uygulanmıştır. Çalışmada alüminyum plaka kullanılmıştır. Yapının dinamik davranışını değiştirecek bir yapısal değişiklik yapıldığında güncellenmiş sonlu elemanlar modelinin doğru sonuçlar verip vermediğinin kontrol edilebilmesi için alüminyum plaka üzerine 5 gramlık bir ağırlık eklenmiş ve modal testler yenilenmiştir. Kütle ve atalet momenti değerleri güncellenmiş sonlu elemanlar modeli üzerine noktasal kütle olarak eklenerek modal analizler tekrarlanmıştır.

Mevlüt Burak Dalmış [14], bu çalışmada, plaka benzeri yapıların sıkıştırılmaz akıştaki çırpıntı karakteristikleri ticari çırpıntı analiz programı ZAERO© ile yapılan çırpıntı analizleri ile ART'de yapılan çırpıntı testleri sonuçlarının karşılaştırılmasını incelemiştir. İlk olarak 5x125x1000 mm boyutlarında dikdörtgen polikarbon plaka incelenmiştir. İkinci test kalemi ise 1/10 ölçekli F-16 savaş uçağı boyutlarındaki PC plakadır. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, bir çırpıntı analizi yaparak modal verileri doğrulamak için modal bir deney yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bir diğer önemli sonuç, mükemmel bir çırpınma analizi elde edilse bile çırpınma deneylerinin de yapılması gerektiğidir.

### **1.3.Kısıtlar ve Koşullar**

Plakanın sınır koşulları bir uçaktaki kanat durumuna göre belirlenmiştir. Tasarımı yapılacak plaka boyutları daha önce literatürde kullanılmış olan plaka boyutları ile aynı seçilmiştir. Çırpıntı analizlerinin gerçekleştirileceği hız frekansları testlerin yapılacağı rüzgâr tünelinin çalışılabilir hız aralığına göre sınırlandırılmıştır. Yapılan plakanın analizleri literatürde kullanılan PC malzemesinin özelliklerine göre yapılmıştır. İmalat aşamasında 3-boyutlu yazıcıda kullanılan filamente uygun malzeme özellikleri kullanılarak tekrar analizler yapılacaktır.



Plakanın mesh yapısında Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kare elemanlara yakın mesh yapısı oluşturulmuştur. Plaka sınır koşullarında uçak gövdesine bağlı bir kanat gibi düşünülmüştür. Bu sebeple plakanın bir kenarı dönme ve ötelenmesi engellenerek ankastre özelliğine uygun modellenmiştir.

Tablo 2.1. Polikarbon mekanik özellikleri

Malzeme Özellikleri	Polikarbon
Elastisite Modülü (Pa)	25e8
Poisson Oranı	0,35
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1200

Tablo 2.2. Doğal frekans ve mod şekilleri

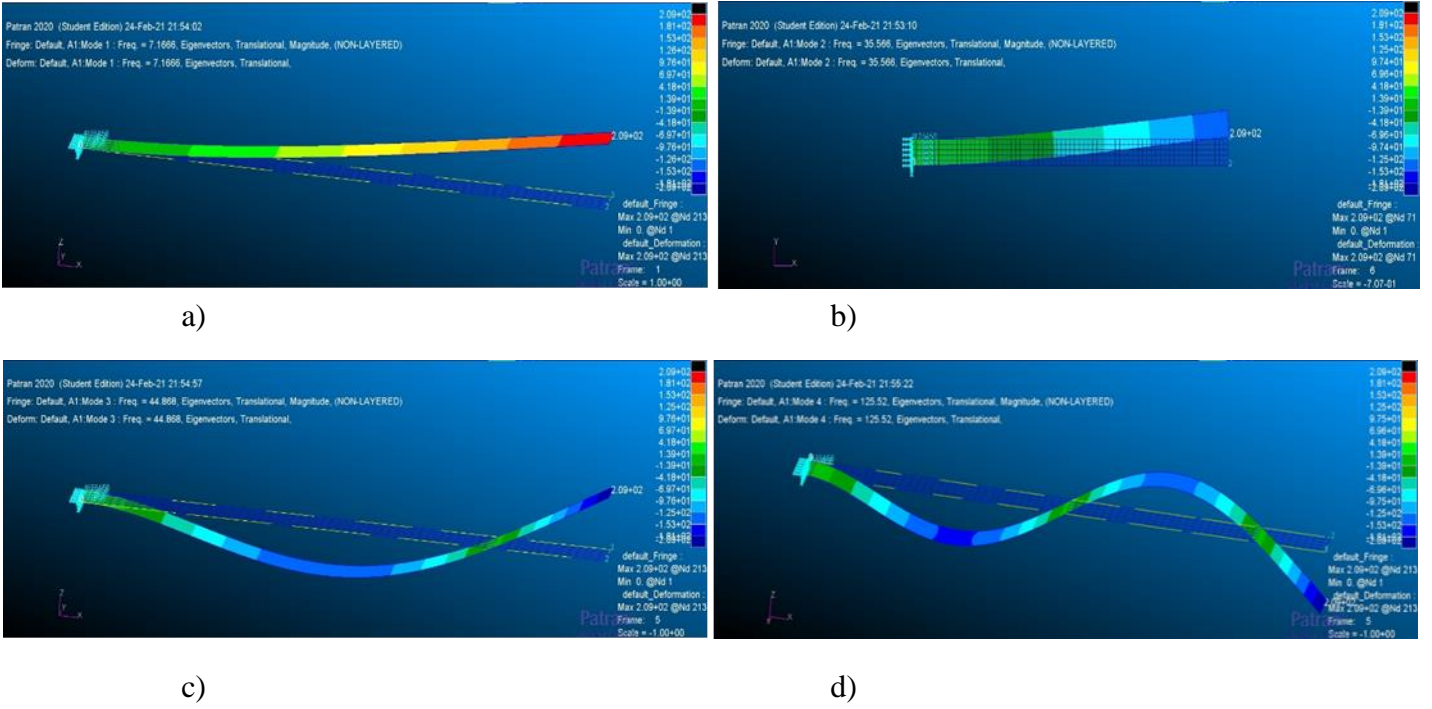
Mod Şekli	Frekans (Hz)
1.Eğilme mod (Mod 1)	7,2
1.Yatay Eğilme mod (Mod 2)	35,7
2.Eğilme mod (Mod 3)	45,1
3.Eğilme mod (Mod 4)	126,1
1.Burulma mod (Mod 5)	175,8
2.Yatay Eğilme mod (Mod 6)	218,8
4.Eğilme mod (Mod 7)	246,9
5.Eğilme mod (Mod 8)	407,6
2.Burulma mod (Mod 9)	528,5
3.Yatay Eğilme mod (Mod 10)	591,9

a)

Mod	Matlab	MSC.Nastran	Fark (%)
1	7,203	7,201	0,03
2	N/A	35,734	N/A
3	45,115	45,081	0,07
4	126,301	126,114	0,15
5	180,511	175,791	2,61
6	N/A	218,797	N/A
7	247,526	246,885	0,26
8	409,296	407,644	0,4
9	542,89	528,47	2,66

b)

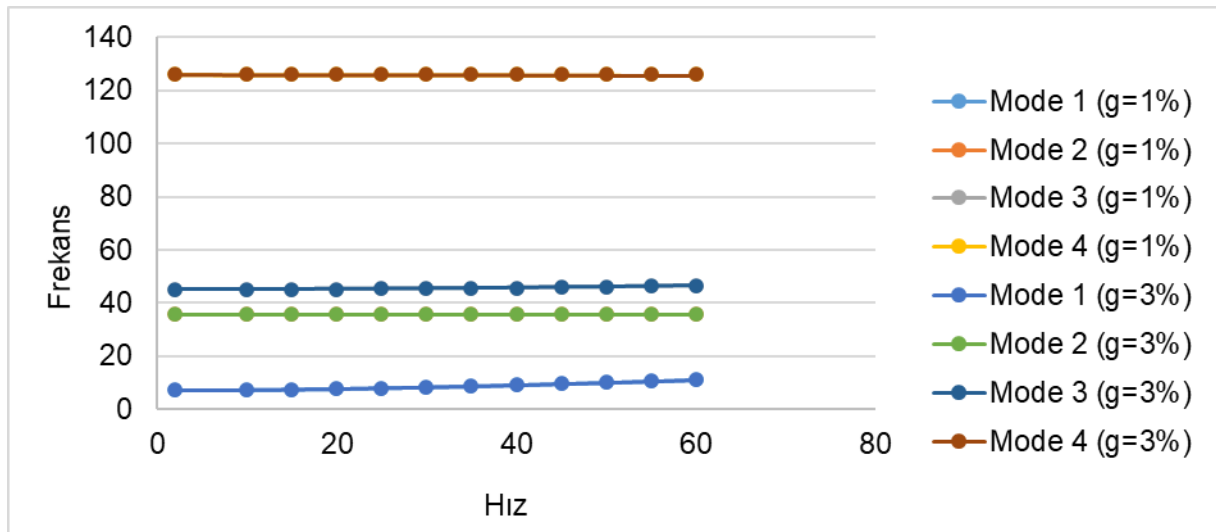
Tablo 2.2’ e göre en büyük fark mod 9’ da yaklaşık %3 olmaktadır. Mod 2 ve Mod 6 yatay eğilme hareketine karşılık gelmektedir. Ancak Matlab kodunda bu harekete karşılık denklem olmadığından bu mod şekilleri N/A olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Mod şekilleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4

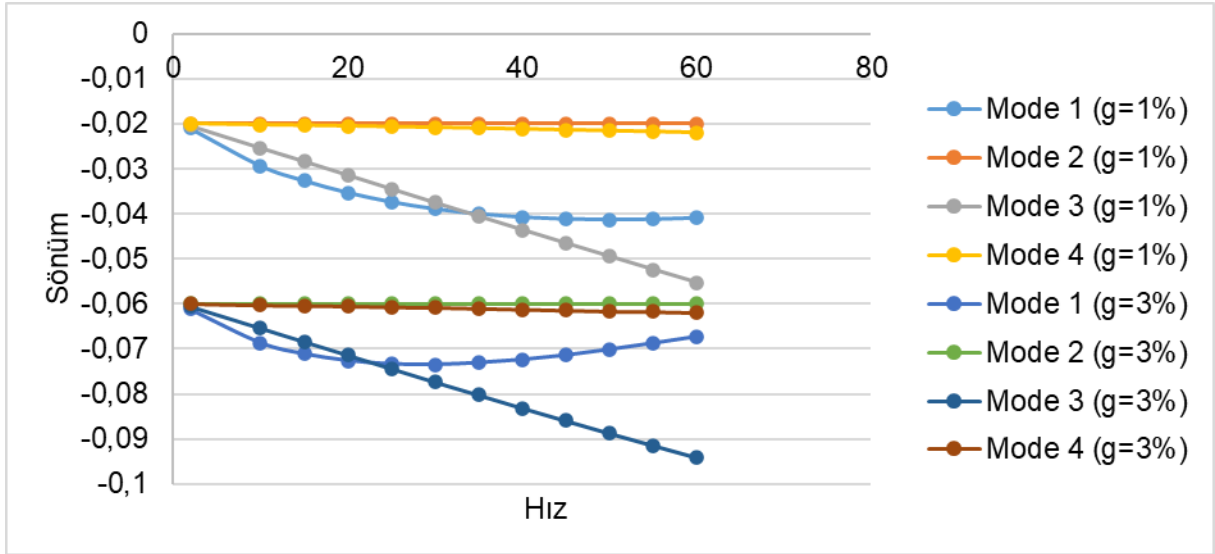
Plakanın ilk 4 mod şekli göz önüne alınarak flutter analizi gerçekleştirilmiştir. Flutter analizinde MSC.NASTRAN PK metodu kullanılmıştır. Plaka öncelikli olarak %1 sönüm oranı ile analizi yapılmıştır. Sönüm oranı artırılarak %3 sönüm için analizler tekrarlanmıştır.

İlk dört mod için frekans- hız grafikleri Şekil 2.3’de ve sönüm- hız grafikleri Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.3. Frekans-Hız grafiği

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi %1 sönüm içim meydana gelen frekans-hız grafiği %3 sönüm oranı için de aynı olmuştur. Sonuç olarak sönüm oranının artması frekans-hız grafiğinde gözle görülebilir bir fark yaratmamıştır.



Şekil 2.4. Sönüm-Hız grafiği

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'e göre plaka üzerinde %1 ve %3 sönüm değeri için herhangi bir flutter meydana gelmemiştir. Bu sönüm değerlerinde hız yaklaşık 60 m/s değerine kadar çıkmıştır. Bu hız değerinde flutter meydana gelmemesi plakanın çok hafif ve doğal frekanslarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

### 2.1.2. Küçültülmüş Model

MSC. Nastran programında modal analizi yapılan plaka geometrik ölçeklendirilmiştir. İlk olarak 1/5 oranında küçültülerek modal analizleri yapılmıştır. Plaka boyutları 84,6 x 6 mm ve kalınlık 1,2 mm alınmıştır. Malzeme özellikleri ve sınır koşulları sabit tutularak analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı işlemler 1/10 oranında geometrik ölçeklendirme yapılmış plaka üzerinde tekrarlanmıştır. Tablo 2.3'te 1/5 ölçeklendirilmiş modelin ve Tablo 2.4'te 1/10 ölçeklendirilmiş modelin doğal frekanslarının Matlab ve MSC.Nastran' da karşılaştırılması verilmiştir.

1/5 ve 1/10 küçültülmüş modellerin üretim aşamaları göz önüne alınmış ve boyutlarının küçük olması sebebiyle plaka daha büyük bir ölçekle modellenerek deneysel çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan modeller 1/3 ölçeklendirilerek 141x10x2 mm boyutlarındaki modellerin sayısal analizleri ve deneysel analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.3. 1/5 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları

Mod	Matlab	MSC Nastran	Fark (%)
1	36,0	36,0	0,03
2	N/A	178,7	N/A
3	225,6	225,4	0,07
4	631,5	630,6	0,15
5	902,6	878,9	2,61
6	N/A	1093,9	N/A
7	1237,6	1234,4	0,26
8	2046,5	2038,2	0,4
9	2714,5	2642,4	2,66
10	N/A	2959,3	N/A

Tablo 2.3 'e bakıldığında 1/5 ölçekli modelin doğal frekans değerlerinde en büyük fark mod 9 de yaklaşık %3 fark olmaktadır.

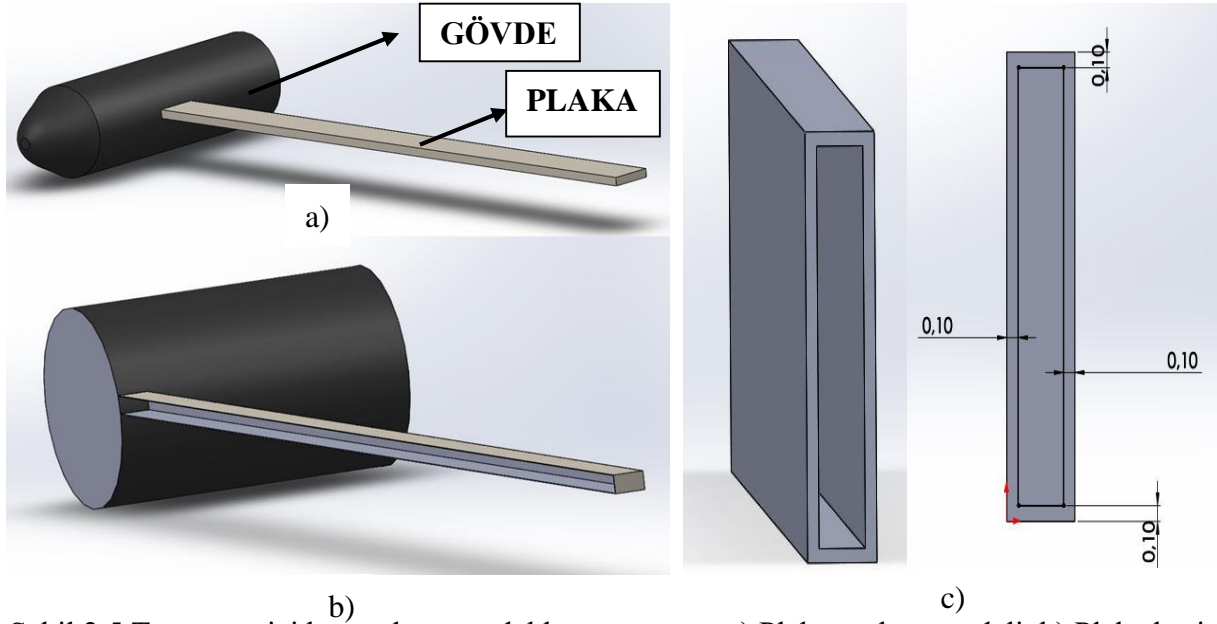
Tablo 2.4. 1/10 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları

Mod	Matlab	MSC Nastran	Fark (%)
1	72,0	72,0	0,03
2	N/A	357,3	N/A
3	451,2	450,8	0,07
4	1263,0	1261,1	0,15
5	1805,1	1757,9	2,61
6	N/A	2187,9	N/A
7	2475,3	2468,9	0,26
8	4093,0	4076,4	0,4
9	5428,9	5284,7	2,66
10	N/A	5918,6	N/A

Tablo 2.4'te görüldüğü gibi 1/10 ölçeklendirilmiş modelde de en büyük fark mod 9 da %3 olmuştur.

1/10 ve 1/5 küçültülmüş modelde de plakanın tam ölçekli modelinin frekansı ölçek oranı katı kadar artmıştır [15]. Örnek olarak tam ölçekli modelin Mod 1 değerine bakıldığında 7,2 Hz 'dir. Plaka 1/5 ölçeklendirildiğinde doğal frekans değeri 5 kat artarak 36 Hz olmuştur. Aynı durum 1/10 ölçekli modelde de görülmüş ve doğal frekansı 10 kat artarak 72 Hz olmuştur.

Çalışmada tam ölçekli modelde elde ettiğimiz doğal frekans değerlerinin küçültülmüş modellerdeki frekans değerleriyle eşit olması amaçlanmaktadır. Ancak plakanın doğal frekansı ölçek ile ters orantılı olduğundan ölçek azaldıkça doğal frekans değeri artmaktadır. Bu nedenle tam ölçekli plakanın doğal frekanslarına ulaşmak için farklı modeller oluşturulmuştur. İlk olarak plaka 0.1 mm et kalınlığı bırakılarak içi tamamen boşaltılmıştır. Plakanın katı modeli ve kesit görünüşü Şekil 2.5.a ve Şekil 2.5.b 'de verilmiştir. Plakaya ait et kalınlıkları Şekil 2.5.c'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Tamamen içi boşaltılmış model katı görünüşü a) Plakanın katı modeli, b) Plaka kesit görünüşü, c) et kalınlıkları

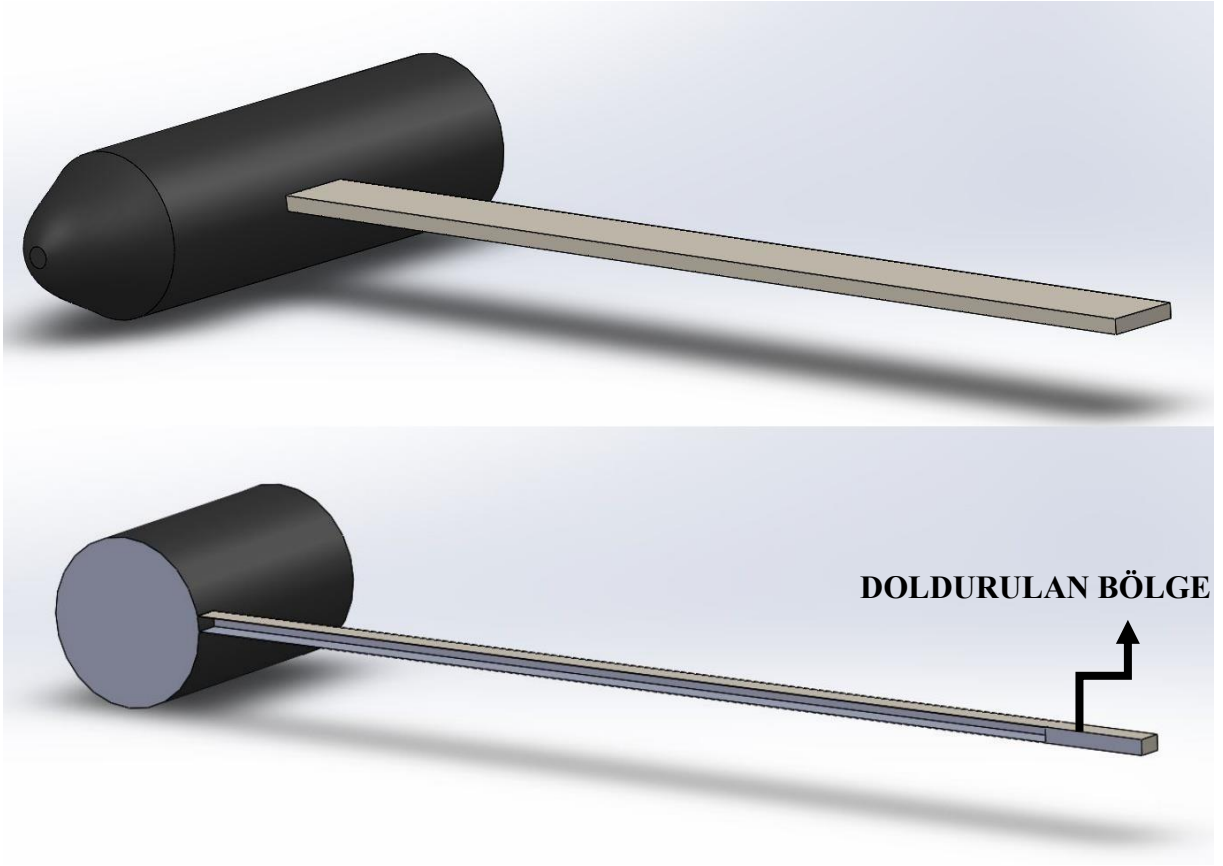
Tablo 2.5'te 1/10 ölçeklendirilmiş modelin 0.1 mm et kalınlığı hariç boşaltılması ile içinin tamamen dolu olması durumundaki model karşılaştırması sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.5. 1/10 ölçeklendirilmiş modelin içi dolu ve boş model karşılaştırması

Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model	1/10 ölçekli, İçi Dolu Model	1/10 ölçekli, İçi Boşaltılmış Model
1	7,2	72,0	107,9
2	35,7	357,3	426,3
3	45,1	450,8	678,0
4	126,1	1261,1	1902,6
5	175,8	1757,9	2409,4
6	218,8	2187,9	2599,2

Tablo 2.5'te görüldüğü gibi içi tamamen dolu model 1/10 küçültüldüğünde frekans değeri ölçek miktarı kadar artarak 72 Hz 'e çıkmıştır. Küçültülen model belirlenen cidar kalınlıklarında içi tamamen boşaltıldığında ise frekans değeri daha da artarak 107,9 Hz olmuştur.

Bu durum göz önüne alındığında ikinci modelde içi tamamen boşaltılan model kanat ucundan belirli uzunluklar ile doldurularak analizler yapılmıştır. İkinci modelde 1/10 ölçeklendirilmiş modeller kanat ucundan itibaren **3, 6, 9, 15, 21.1 ve 31.1 mm** olacak şekilde doldurulmuştur. Plakanın 3 mm doldurulmuş katı modeli Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kanat ucundan doldurulan plakanın katı modeli

Plakanın farklı uzunluklar boyunca doldurulması ile yapılan analiz sonuçları Tablo 2.6'da verilmiştir. Tablo 2.6'da görüldüğü gibi plakanın yarısına kadar olan uzunluk doldurmalarında doğal frekans değerleri azalırken plakanın uzunluk boyunca yarısı geçildiğinde doğal frekans artmaktadır. Bu durumda doldurulan modellerde en iyi sonucu plakanın uzunluk boyunca yarısına kadar doldurulması ile ulaşılmaktadır.



Tablo 2.6. Doldurulan plaka modal analiz sonuçları

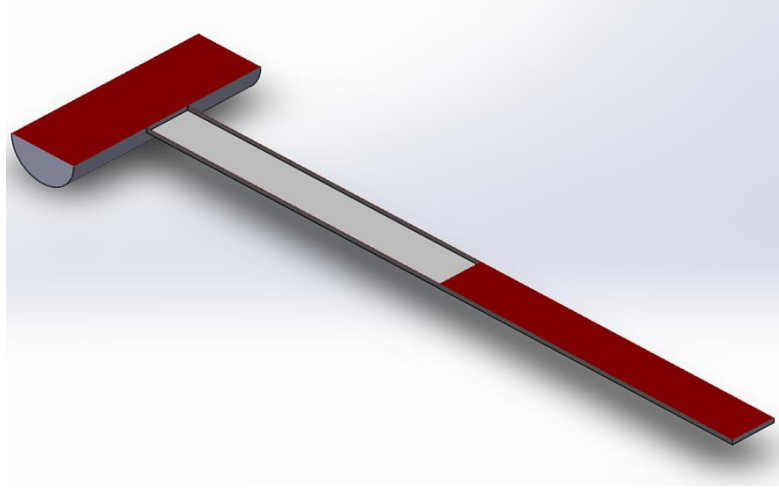
Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model	1/3 Ölçekli Modelde Enine Eklenen Levha Sayısı					
		3 mm	6 mm	9 mm	15 mm	21.1 mm (Plaka yarısı)	31.1 mm
1	7,2	90,7	81,4	76,1	70,4	68,5	69,4
2	35,7	358,3	322,2	300,7	278,9	272,5	284,1
3	45,1	616,7	602,1	605,9	582,4	533,1	482,1
4	126,1	1786,3	1753,7	1743,4	1663,5	1652,1	1449,5
5	175,8	2234,7	2087,8	1988,4	1857,7	1803	1822,6
6	218,8	2359,6	2335,5	2348,4	2324,4	2251,5	2190,8

İlk model göz önüne alınarak yapılan analizlerde 1/10 ölçeklendirilmiş model için elde edilen sonuçlar istenilen değerden çok yüksektir. İstenilen sonuca daha kolay yaklaşabilmek amacı ile modelin ölçeği büyütülmüş ve 1/3 ölçek yapılmıştır. Ayrıca sayısal ve deneysel analizleri karşılaştırabilmek için plaka malzemesi 3 boyutlu yazıcı filamenti olan ABS malzeme özelliklerine göre modellenmiştir. Tablo 2.7’de analizlerde kullanılan ABS filamentinin mekanik özellikleri verilmiştir. Tamamen boşaltılmış ve kanat ucundan doldurulan modeller göz önüne alındığında en iyi sonuç veren model yarısı dolu yarısı boş modeldedir.

Tablo 2.7. ABS mekanik özellikleri

Malzeme özellikleri	ABS
Elastisite Modülü (Pa)	1,19e9
Poisson Oranı	0,29
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	1040

Üçüncü model olarak 1/3 ölçeklendirilmiş plaka yarı dolu yarı boş olacak şekilde modellenmiştir. Plakanın katı model kesin görünüşü Şekil 2.7’de verilmiştir. Şekilde kanat profili uçağa sabitlenmiş olarak görülmektedir. Şekil üzerinde beyaz renkte uçak gövdesine sabitlenen kanat bölümü içi boş, kırmızı renkli kanat ucu ise içi dolu modellenmiştir.



Şekil 2.7. Yarısı boşaltılmış 1/3 ölçekli plaka kesit katı modeli

Tablo 2.8’de tam ölçekli ve 1/3 ölçeklendirilmiş ABS plakanın ilk 6 modunun doğal frekansları verilmiştir.

Tablo 2.8. 1/3 ölçeklendirilmiş model modal analiz sonuçları

Mod	Tam Ölçekli Model	Tamamen Dolu 1/3 Ölçekli Model	Yarısı Doldurulmuş 1/3 Ölçekli Model
1	5,8	17,4	9,9
2	28,9	86,7	35,7
3	36,4	109,2	105,6
4	101,8	305,4	287,1
5	145,2	435,7	389,5
6	176,9	530,9	411,9

1/3 küçültülen plakanın yarısı doldurulması plakanın hacimsel olarak %60 doluluk oranına tekabül etmektedir. Tablo 2.8’de görüldüğü gibi tam dolu model için 1/5 ve 1/10 ‘da meydana gelen frekans artışı 1/3 ölçeklendirilmiş model için de meydana gelmiştir. Fakat modelin yarısı boş yarısı dolu olarak modellendiğinde tam dolu modele göre frekans değeri daha düşük olmuş ve istenilen sonuca 1/10 ölçeklendirilmiş modele göre daha çok yaklaşmıştır.

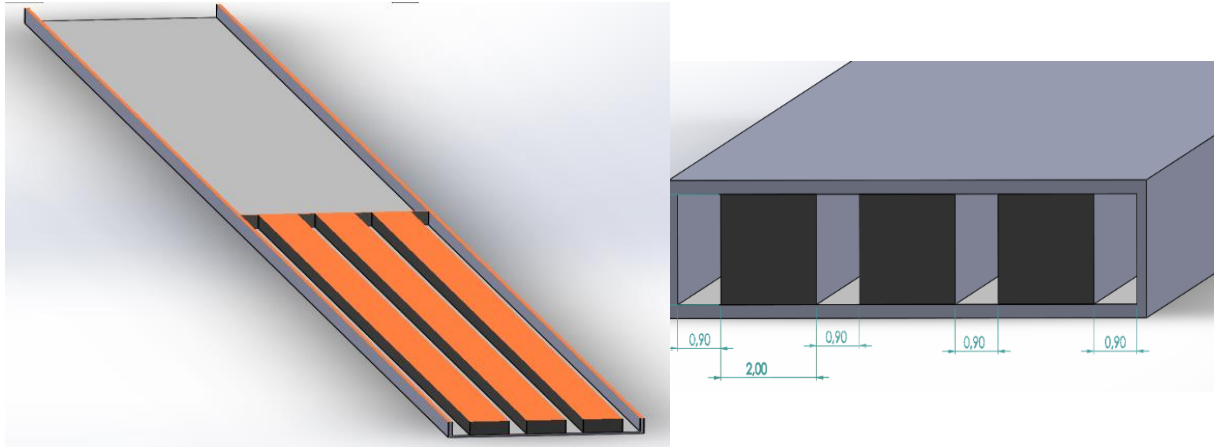
Üç model incelendiğinde plakanın farklı doluluk oranlarında olsa bile modelin küçültülmesi frekansı her şekilde arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle frekansı azaltmak amacıyla plaka içerisine/dışarısına yoğunluğu plaka malzemesine göre fazla olan farklı bir malzeme eklenilmesi düşünülmüştür. Uçak kanadı yapısından esinlenerek frekansı azaltmak için

plakanın enine veya boyuna olacak şekilde çelik levhalar eklenilmiştir. Bu çelik levhalar uçak kanatlarındaki spar görevini görmektedir. Plakada kullanılan çelik malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9. Yapısal çeliğin mekanik özellikleri

Malzeme Özellikleri	Yapısal Çelik
Elastisite Modülü (Pa)	2e11
Poisson Oranı	0,3
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	7850

Çelik plaka eklenen modellerde ilk olarak plaka 0.2 mm et kalınlığına sahip olacak şekilde tamamen boşaltılmıştır. İçi boşaltılan plakaya 2x1.6x70.4 mm boyutlarında 3 adet çelik levha plaka boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu modelde daha önceki analiz sonuçlarından yola çıkılarak çelik levhaların boyu plakanın yarı boyuna denk gelecek şekilde modellenmiştir. Plakanın katı model ve kesit görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir. Modele ait analiz sonuçları Tablo 2.10’da verilmiştir.

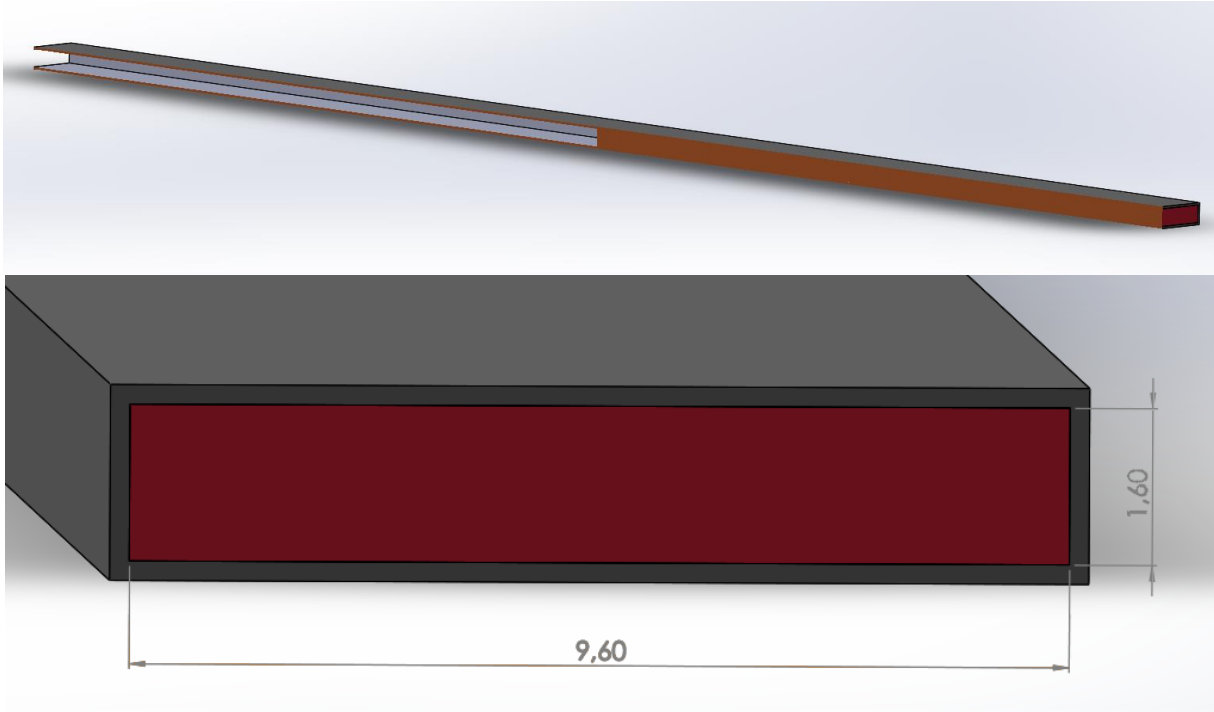


Şekil 2.8. 3 adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın katı modeli

Tablo 2.10. 3 adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın analiz sonuçları

Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model (ABS)	1/3 Ölçekli Boyuna Spar Eklenmiş Model-I (ABS)
1	5,8	6,7
2	28,9	25,2
3	36,4	88,7
4	101,8	235,9
5	145,2	313,4
6	176,9	587,1

Tablo 2.10'a göre doğal frekans değeri 6,7 Hz 'e kadar inmiştir ancak yine de istenen frekans değerinden yüksektir. Bu frekans azalması düşünülerek çelik levhalar arası mesafe azaltılmış ve çelik plakalar tamamen bitişik olacak şekilde modellenmiştir. Bu modelde çelik levha boyutları 9.6x 1.6x 70,4 mm olmuştur. Modele ait katı model görüntüsü Şekil 2.9'da ve analiz sonuçları Tablo 2.11'de verilmiştir.



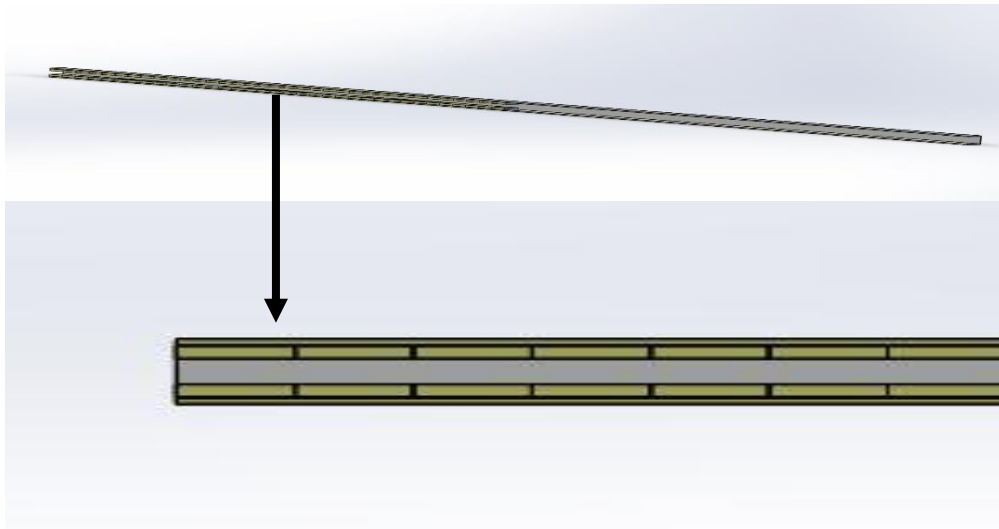
Şekil 2.9. 1 adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın katı modeli

Tablo 2.11. 1 adet çelik levha eklenmiş 1/3 ölçekli plakanın analiz sonuçları

Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model (ABS)	1/3 Ölçekli Boyuna Spar Eklenmiş Model-IV (ABS)
1	5,8	5,4
2	28,9	20,2
3	36,4	72,1
4	101,8	171,8
5	145,2	260,5
6	176,9	472,3

Tablo 2.11'deki sonuçlara göre plaka yarı uzunluğu boyunca çelik levha eklendiğinde doğal frekans değeri istenilen değere ulaşmış ve daha düşük frekans değeri elde edilmiştir.

1/3 ölçeklendirilmiş plakaya eklenen boyuna çelik levha yerine plakaya enine çelik levhalar eklenmiştir. Öncelikli olarak 2x0.4x9.6 mm olacak şekilde çelik levhalar oluşturulmuş, plakanın alt ve üst yüzeylerine konularak modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çelik levhalar birbirlerine bitişik ve aralarında mesafe olacak şekilde yerleştirilmiş fakat aralarındaki mesafe arttıkça doğal frekans değeri artmıştır. Aynı şekilde eklenen enine çelik levhalar kanat ucundan uzaklaştıkça doğal frekansı arttırmıştır. Bu sebeple çelik levhalar kanat ucundan başlayarak birbirine bitişik olarak sırasıyla yerleştirilmiştir. Plakanın katı modeli Şekil 2.10' da verilmiştir. En iyi analiz sonuçları Tablo 2.12'de verilmiştir.



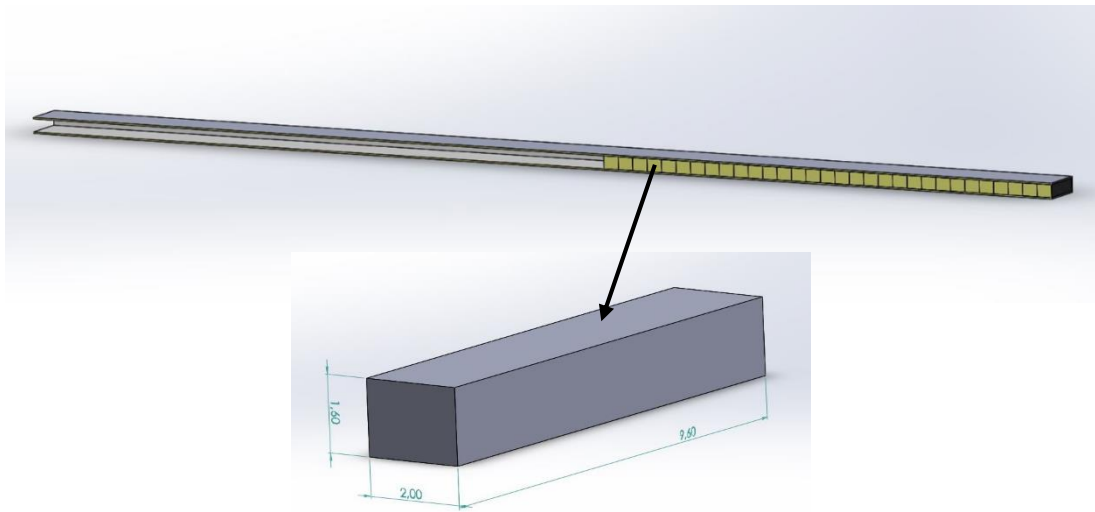
Şekil 2.10. Plakaya enine eklenen çelik levhalar

Tablo 2.12. Plakaya enine eklenen çelik levhaların analiz sonuçları

Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model	Alt –Üst 60 adet	Alt- Üst 70 adet	Alt- Üst 80 adet
1	5,8	7,4	7,4	7,5
2	28,9	28,1	28,0	28,2
3	36,4	93,2	96,4	96,1
4	101,8	217,3	218,4	218,2
5	145,2	349,7	362,6	362,6
6	176,9	475,6	604,7	659,90

Eklenen çelik levhaların sayısı sırasıyla arttırılarak analizler yapılmış fakat frekans değerleri en düşük 7,4 Hz olmuştur. Bu frekans değerinin üst ve alt yüzeye toplam 70 adet 0.4x2x9.6 boyutlarında çelik levha yerleştirilmesi demektir. Eklenen çelik levhalar kanat boyunca 70 mm'lik kısma yani yaklaşık plakanın boyunun yarısına denk gelmiştir. Sonuçların istenilen frekans değerine uzak kalması sebebiyle çelik levhaların kalınlığı arttırılarak yeni bir model oluşturulmuştur.

Yeni modelde çelik levhaların boyutları 2x1,6x9,6 mm olmuştur ve daha önceki analiz modellerinden yola çıkılarak çelik levhalar kanat uzunundan başlayarak birbirine bitişik olarak farklı uzunluklar boyunca eklenmiştir. Elde edilen modelin katı model görüntüsü Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Plakaya enine eklenen çelik levhalar (2x1,6x9,6 mm)

Plakaya eklenen çelik levha sayısı arttırılmış ve en iyi sonuçlar 20, 19 ve 18 adet çelik levha eklenilmesi ile elde edilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 2.13'te verilmiştir.

Tablo 2.13. Plakaya enine eklenen çelik levhalar (2x1,6x9,6 mm) analiz sonuçları

Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu Model	1/3 Ölçekli Modelde Enine Eklenen Levha Sayısı		
		20 Adet	19 Adet	18 Adet
1	5,8	5,7	5,8	5,8
2	28,9	21,4	21,7	22
3	36,4	82	82	87
4	101,8	160,2	161,2	165,3
5	145,2	309,2	295,3	300,6
6	177	318,4	310	328,1

Plakanın kendi doğal frekans değerine en yakın sonuç 18 adet 2x1,6x9,6 mm boyutlarında çelik levhalar eklenilmesi ile bulunmuştur. Eklenen bu çelik levhalar plakanın boyunca 36 mm uzunluğuna denk gelmektedir.

Bütün modeller göz önüne alındığında plakaya enine veya boyuna çelik levhalar eklenmesi ve çelik levhaların birbirine tamamen bitişik olduğu durumlarda istenilen frekans değerleri elde edilmiştir.

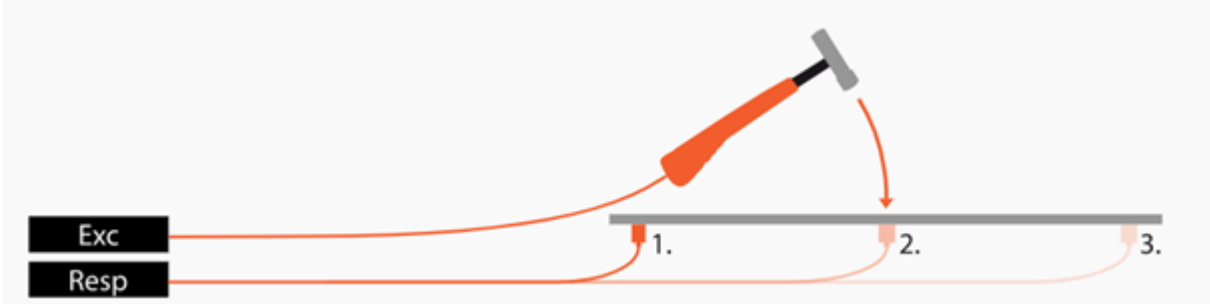
Elde edilen modellerin üretim aşamaları düşünüldüğünde içi boşaltılmış plakanın içine farklı bir malzeme yerleştirmek zor olabilir bu yüzden deneysel çalışmalar sırasında daha kolay üretilebilmesi için belirlenen çelik levhalar plakanın üst yüzeyine yerleştirilebilir. Çelik levhanın plakanın içine yerleştirilmesi yerine üst yüzeyine yerleştirilmesi analiz sonuçlarında farklılık meydana getirmemektedir.

## 2.2.Deneysel Çalışmalar

Deneysel modal analiz testi yapılırken, nesnelere yapay kuvvetler tarafından uyarılır ve hem giriş (uyarma) sinyalleri hem de çıkış (yanıtlar) sinyalleri ölçülür ve Modal Modelleri değerlendirmek için kullanılır [16]. Öncelikle deneysel test hazırlıklarının yapılması gerekir. Test hazırlığı yapı desteğinin seçimi, uyarma yerlerinin belirlenmesi, tepkileri ölçmede kullanılacak donanım ve sensörlerin belirlenmesini içerir. Yapı desteğinin seçiminde deneysel analizi yapılacak sistem dinamik özelliklerini gösterebilecek ve serbestçe titrecek şekilde olmalıdır. Sistem belirlenen yerlerden tahrik edilerek ivmeölçerle yanıt sinyalleri kaydedilmektedir. Sensörler, modal teste dahil edilen frekans aralığını ve seviye aralığını

destekleyecek şekilde seçilmelidir. Veri tutarlılığını optimize etmek ve ölçüm süresini azaltmak için genellikle birden fazla ivmeölçer seçilmektedir. Genel bir tek eksenli modal analiz test düzeneği Şekil 2.12’de verilmiştir.

Bu çalışmada da tek eksenli modal analiz testi uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 2.13’te verildiği gibi 4 temel elemandan oluşur. Bu elemanlar sırasıyla bağlantı düzeneği, deney numunesi, modal çekiç ve ivmeölçerdir.



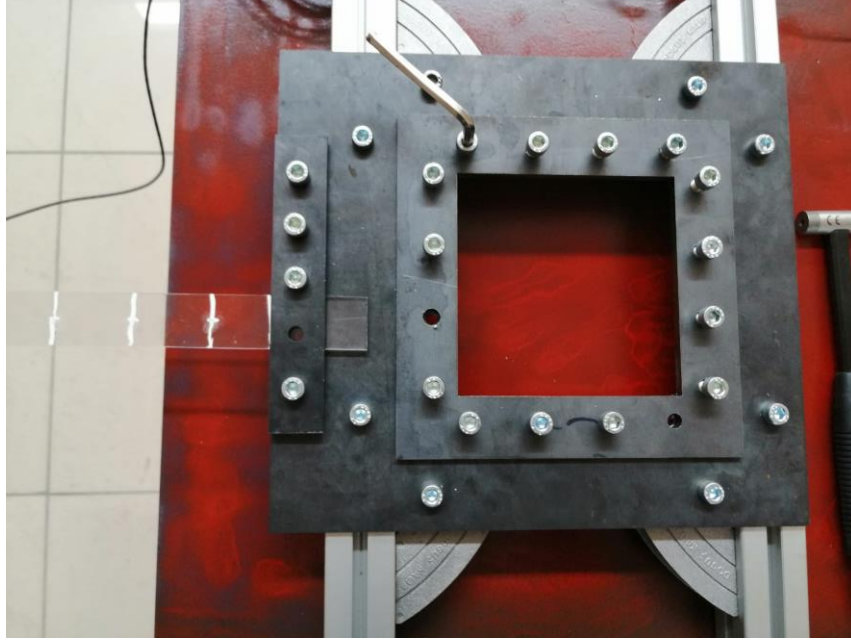
Şekil 2.12. Tek eksenli modal analiz test düzeneği



Şekil 2.13. Deney düzeneği

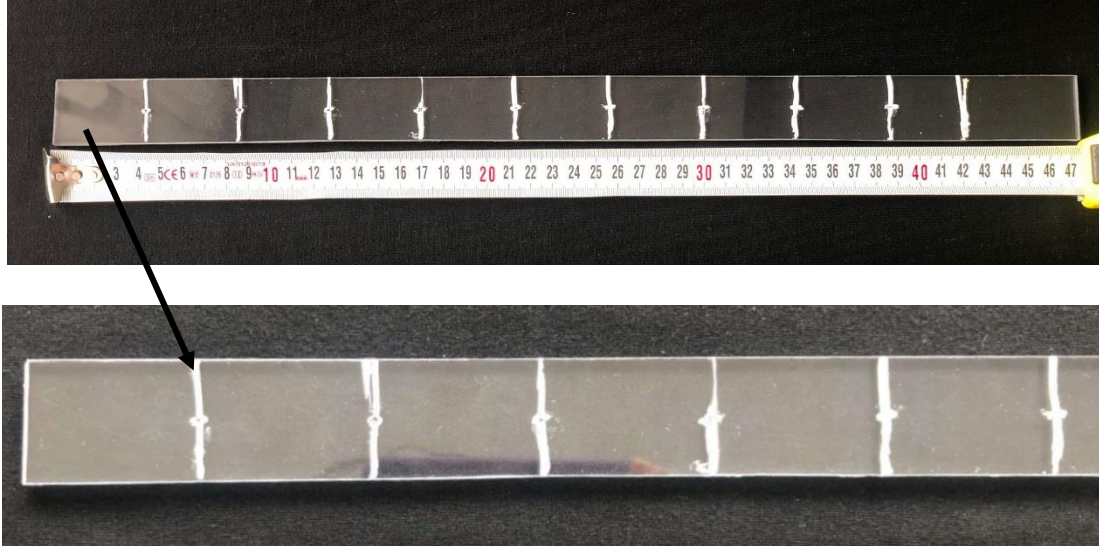
Bağlantı düzeneği iki metal plakanın somunlar ile bağlantısından oluşur ve plakadaki somunlar sayesinde kullanılan deney numunesi iki parça arasına sıkıştırılabilmektedir. Deney çalışmasına ait bağlantı düzeneği Şekil 2.14’te verilmiştir.





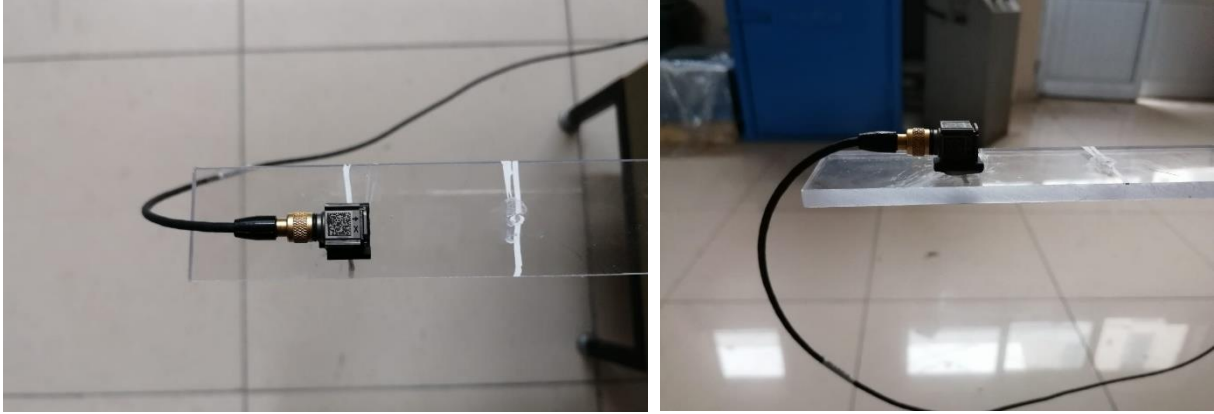
Şekil 2.14. Deneysel çalışmada kullanılan düzenek

Deney numunesi olan polikarbon plaka 473x30x6 mm boyutlarındadır fakat plakanın 50 mm'lik kısmı sabitleme için kullanılmıştır. Plaka çekiç vurulma noktalarını ve ivmeölçer konumlarını belirleyebilmek için 423mm 'lik uzunluk 10 eşit parçaya bölünmüştür. Bölünen bu kısımlar beyaz bir kalem yardımıyla plaka üzerine işaretlenmiştir. Şekil 2.15'te plaka görülmektedir.



Şekil 2.15. Deney düzeneğine yerleştirilen plaka

Deney düzeneğinde 1 adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçer Şekil 2.16'da gösterilmiştir. İvmeölçer plakada işaretlenmiş beyaz çizgilerin orta noktalarına bir vaks yardımıyla yapıştırılmıştır. İvmeölçer dışındaki 9 nokta için sırasıyla ölçümler alınmıştır. İvme ölçer ilk olarak plakanın en ucuna yerleştirilmiş ve diğer belirlenen bölgelere sırasıyla çekiçle vurulmuştur. Kullanılan modal çekiç Şekil 2.17'de verilmiştir.



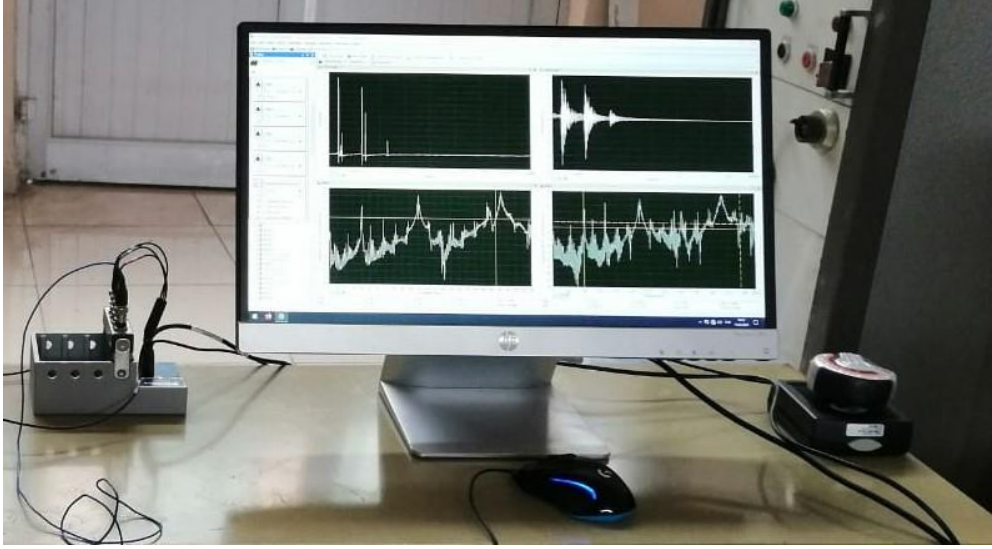
Şekil 2.16. İvme ölçer



Şekil 2.17. Modal analizde kullanılan çekiç

Çekiç ve ivme ölçerden alınan verileri Labview Signalexpress programı yardımıyla işlenmiştir. Bu program yardımıyla plakaya ait z yönündeki genlik-frekans ve y yönündeki genlik-frekans eğrileri oluşturularak meydana gelen doğal frekanslar belirlenmiştir.

Y ve Z yönünde aynı değerin elde edildiği frekans değerleri yatay eğilme hareketi, Y yönünde elde edilen frekans değerleri ise düşey eğilme hareketi olarak belirlenmiştir. Deney esnasında bir adet ivmeölçer kullanılması sonucu elde edilen verilerde burulma modu görülmemiştir. Bu problemin çözülebilmesi için birden fazla ivmeölçer kullanılmalı ve bu kullanılan ivme ölçerlerin plakaların yan bölgelerine yapıştırılmaları gerekmektedir.



Şekil 2.18. Labview Signalexpress programı

### 2.2.1. Tam Ölçekli Model Deneysel Çalışma Sonuçları

423x30x6 mm boyutlarındaki tam ölçekli polikarbon plakanın deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Plakaya ait deney düzeneği Şekil 2.19’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi plaka 50 mm sabitleme payından sabitlenmiş ve ölçüm noktalarına ivmeölçerler yerleştirilmiştir. İşaretlenen her bir nokta üzerinden çekiç darbesiyle elde edilen veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen sonuçlar analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tablo 2.14’te karşılaştırma sonuçları ve frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.19. Modal analiz deney düzeneği

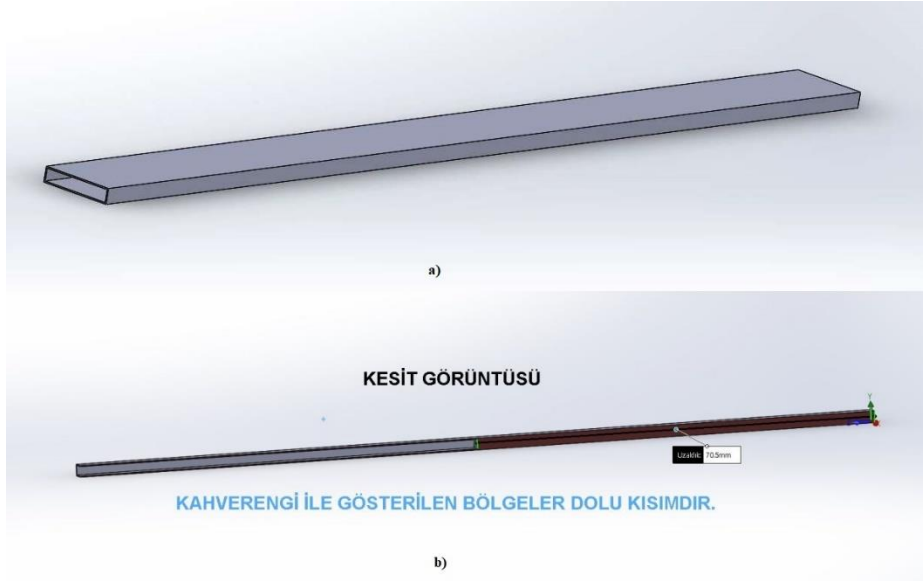
Tablo 2.14. Sayısal ve deneysel analiz karşılaştırma sonuçları

MOD ŞEKİLLERİ	SAYISAL SONUÇLAR	DENEYSEL SONUÇLAR
1.Düşey eğilme Modu (Mode 1)	7,2	6,3
1.Yatay Eğilme Modu (Mod 2)	35,7	37,3
2.Düşey Eğilme Modu (Mod 3)	45,1	38,3
3.Düşey Eğilme Modu (Mod 4)	126,1	144,3
1. Burulma Modu (Mod 5)	175,8	218,0
2. Yatay Eğilme Modu (Mod 6)	218,8	223,3
4.Düşey Eğilme Modu (Mod 7)	246,9	445,5
5.Düşey Eğilme Modu (Mod 8)	407,6	594,8

Tablo 2.14'e göre deneysel çalışmalar ile sayısal çalışmalar arasında %17 'lik bir fark meydana gelmiştir fakat bu durum gerçek uçak testlerindeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında doğru kabul edilebilecek seviyededir.

### 2.2.2. Küçültülmüş Model

Yapılan analiz çalışmalarından istenilen sonuçlara en yakın ve üretimleri en yapılabilir modeller seçilmiştir. Üç boyutlu yazıcıda üretilen modeller Şekil 2.20'de verilmiştir. Şekil 2.20.a'da içi tamamen boşaltılmış model, Şekil 2.20.b'de farklı yoğunlukta bir malzeme ile yarısı doldurulmuş model gösterilmektedir.



Şekil 2.20. Üç boyutlu yazıcıda üretilen modeller a) içi tamamen boşaltılmış, b) farklı yoğunluktaki malzeme ile doldurulmuş model

Şekil 2.20'deki modellerin analizlerinde 0,2 mm'lik et kalınlıkları kullanılmıştır fakat üç boyutlu yazıcıdaki nozul ucunun 0,4 mm olması sebebiyle modeller 0,4 mm et kalınlığına sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Et kalınlığının artırılması modal analiz sonuçlarını da değiştirmiş beklenildiği gibi plakanın doğal frekans değerlerini artırmıştır. Seçilen modellerin 0,4 mm lik et kalınlıklarına ait modal analiz sonuçları Tablo 2.15' te verilmiştir.

Tablo 2.15. 0,4 mm lik et kalınlıklarına ait modal analiz sonuçları

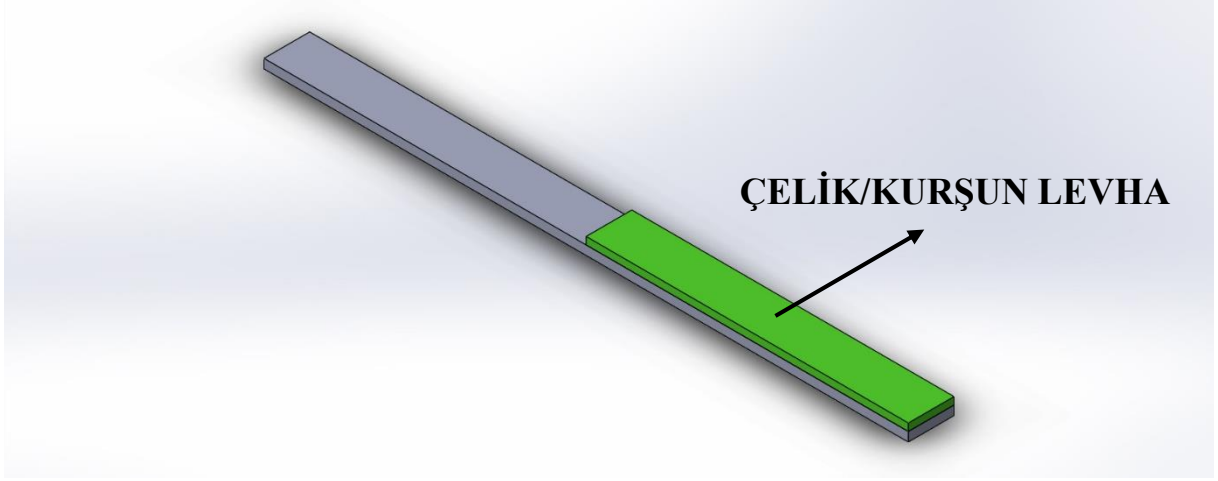
Mod	Tam Ölçekli İçi Dolu (ABS)	1/3 ölçekli, içi tamamen boşaltılmış	1/3 ölçekli, yarısı doldurulmuş
1	5,81	23,27	7,6148
2	28,88	94,58	30,987
3	36,40	143,85	90,268
4	101,81	394,34	237,39
5	145,24	517,34	368,07
6	176,99	576,57	528,36

Tablo 2.13'te görüldüğü gibi plaka küçültülüp içi tamamen boşaltıldığında frekans değeri 5.8 Hz den 23.3 Hz'ye çıkmıştır. Plakanın yarısı doldurulduğunda ise cidar kalınlıkları 0,4 mm'ye artırdığımızda plaka içine yerleştirilen levhanın kalınlığı azalacağından frekansların artması beklenir. Tablo 2.15'te görüldüğü gibi frekans değerinin 0,4 mm kalınlık için 7,6 Hz'ye çıkması bu durumu doğrular.

0,4 mm 'lik et kalınlığına sahip içi tamamen boşaltılmış model üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Üretilen modelin iç kesiti tasarımlarda dikdörtgen olması planlanırken uygulamada eliptik yapıda oluşmuştur ve plaka üzerinde herhangi bir yük kaldıramayacak kadar dayanıksız ve kırılmandır. Bu durumlar içi boşluklu bir modelde test imkanının mümkün olmayacağını göstermiştir. Bu sebeple deneysel veri elde edebilmek amacıyla plakanın %100 dolu (içi dolu) olarak üretilmesine karar verilmiştir.

Yapılan analiz çalışmalarından %100 dolu modelin istenilen doğal frekans değerine ulaşamadığı bilinmektedir. Plaka farklı doluluk oranlarında olsa bile yoğunluğu farklı bir malzeme plaka üzerine eklenmesi gerekmektedir. Üretilen plakada da %100 dolu model istenilen doğal frekansı elde etmeyeceği bilinmektedir. Bu nedenle plakanın dış yüzeyine çelik veya daha yoğun bir malzeme olan kurşun levhalar eklenilmesi ile deneysel verilerin elde edilmesi planlanmıştır. Üretim sonunda istenilen model Şekil 2.21'de verilmiştir.





Şekil 2.21. %100 dolu 3 boyutlu üretim modeli

Şekil 2.21’de yeşil ile gösterilen bölge eklenen levhayı göstermektedir. %100 dolu olan plaka ise gri olarak verilmiştir.

Küçültülmüş model 0.4 mm et kalınlığına sahip ve %100 dolu olarak 3B yazıcıda üretilmiştir. Üretilen model Şekil 2.22’de verilmiştir. Projenin ilerleyen aşamasında 3B yazıcıda üretilen modelin üzerine farklı yoğunlukta yapı çeliği veya kurşun gibi PLA ‘dan daha yoğun malzemeler eklenecek ve tam ölçekli modelde yapılan modal analiz testleri gerçekleştirilecektir.



Şekil 2.22. 3 Boyutlu yazıcıda üretilen küçültülmüş model

### 3. BULGULAR

423x30x6mm boyutlarındaki tam ölçekli plakanın polikarbon ve üç boyutlu yazıcı filamentleri (ABS/PLA) malzemeleri kullanılarak analizleri yapılmıştır. Plakanın orijinal yapısında meydana gelen doğal frekansların ABS/PLA malzemesi kullanılması durumunda düştüğü görülmüştür. Bu durum yapının 3 boyutları yazıcılarda üretilmesi sonucu belirli bir miktarda doğal frekanslarının düşmesine neden olacaktır.

423x30x6mm boyutlarındaki plakanın farklı ölçeklerde küçültülmesi sonucunda bir geometrinin geometrik olarak ölçeklendirilmesiyle yapının doğal frekansları ölçek ile ters orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bu sonuç 1/10, 1/5 ve 1/3 ölçeklendirilmiş modeller için de doğrulanmıştır.

Plakanın ölçeklendirilmesi sonucu meydana gelen frekans artışını düşürmeye yönelik farklı modeller tasarlanmıştır. Üretim ve test aşamasının yapılabilirliği açısından 1/3 ölçeklendirilmiş modeller üzerinde çalışılması daha uygun görülmüştür. 1/3 Ölçeklendirilmiş modellerde tamamen dolu modelde (%100 dolu) farklı boşaltmalar yapılarak yapının doluluğu değiştirilmiştir. Analizdeki sonuçlara bakıldığında farklı bir malzeme eklenmeksizin 1/3 ölçekli plakanın boyunca plaka yarısına gelecek model (%60 dolu) diğer modellere göre en iyi sonucu vermiştir. Fakat bu modelde de istenilen frekansa ulaşamamıştır. Ölçeği küçültülmüş plakanın içerisinden malzeme boşaltılması ile istenilen frekansa düşülememesiyle plakanın üstüne/içine farklı yoğunlukta malzeme eklenilmesi düşünülmüş ve buna göre çalışmalar yapılmıştır. Plakanın enine veya boyuna çelik levhalar eklenmiştir. Çelik levhalar plakanın farklı bölgelerine, farklı uzunluklarda ve farklı boyutlarda eklenseler bile analiz sonuçlarına bakıldığında plakanın doğal frekansına en yakın değerlerin elde edilebilmesi için çelik levhalar birbirine bitişik ve kanat ucundan doldurularak yerleştirilmelidir. Enine ve boyuna çelik levha eklenmiş modellerde plakanın doğal frekansına en yakın değer 36 mm 'de ulaşılmıştır. Aynı zamanda plaka ucundan başlayarak plakanın uzunluk boyunca yarısına gelene kadar frekanslarda istenilenin altına düşebilmenin mümkün olduğu görülmüştür.

#### 4. TARTIŞMA

Yapı malzemelerinin veya yapım yöntemlerinin hiçbirini değiştirilmeden tüm boyutların yapısı küçültülürse, ortaya çıkan yapının geometrik olarak ölçeklendiği söylenebilir [15]. Geometrik ölçeklendirilmiş modelin frekansları tam ölçekli model frekansının ölçek miktarında katı kadardır. Yani 1/5 oranında geometrik olarak ölçeklendirilmiş modelin frekansları tam ölçekli modelin frekans değerlerine göre 5 kat arttığını göstermektedir. Literatürde açıklanan bu durum 1/10, 1/5 ve 1/3 ölçekli modeller ile doğrulanmıştır.

Çalışmada tam ölçekli modelde elde ettiğimiz doğal frekans değerlerinin küçültülmüş modellerdeki frekans değerleriyle eşit olması amaçlanmaktadır. Tam ölçekli model 1/5, 1/10 ve 1/3 oranlarında küçültülmüş ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Ancak plakanın doğal frekansı ölçek ile ters orantılı olduğundan ölçek azaldıkça doğal frekans değeri artmıştır. Bu nedenle küçültülmüş plakalar tamamen boşaltılıp kanat ucundan itibaren kanat boyunca doldurmalar yapılarak analizler tekrarlanmıştır. Frekans değerlerinde azalma meydana gelse de istenen değere ulaşılamamıştır. Yoğunluğu plaka yoğunluğundan fazla olan yapısal çelik malzemesi plaka içine yerleştirilmiştir. Yapısal çelik malzemesi enine ve boyuna yerleştirilerek analizleri yapılmıştır. Çelik levhalar frekansı düşürse de birbirlerine bitişik modellendiğinde istenen değere ulaşıldığı görülmüştür. 1/3 için kullanılan çelik levhalar 1/10 küçültülmüş plakada kullanılmıştır ama frekans düşümü tam sağlanamamıştır. Bu sonuç yapının ölçeği küçültüldükçe eklenilmesi gereken malzemenin yoğunluğunun artırılması gerektiğini göstermektedir.

Analizlerde MSC.Nastran ve Matlab programları kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda tam ölçekli plakanın deneysel analizi yapılarak sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen fark %17'dir. İşaretlenen her bir noktaya sırayla yerleştirilen sensörlerin zaman alması ve ivmeölçerler kütesinden dolayı her noktada farklı etki ederek ölçümü etkilemesi bir dezavantajdır.



## 5. MALİYET HESABI

Tablo 5.1’ de maliyet tablosu verilmiştir.

Tablo 5.1. Maliyet tablosu

Malzemeler	Adet	Maliyetler (TL)
PLA 3 Boyutlu yazıcı filament	2	244 TL+KDV
ABS 3 Boyutlu yazıcı filament	2	238TL+KDV
<b>TOPLAM MALİYET</b>		<b>482TL+KDV</b>

## 6. HAFTALIK ÇALIŞMA PROGRAMI

Yapılan tez çalışması TUSAŞ LIFT UP projesi kapsamında gerçekleştirilmektedir. Çalışma planımız Tablo 6.1 ‘de, aylık çalışma programımız Tablo 6.2’de ve haftalık çalışmalarımız Tablo 6.3’te gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Çalışma Planı

No	İş Paketi Hedefi	İş Paketi İçeriği
1	Literatür araştırması	Konu ile ilgili makale taramasının yapılması
2	MSC Nastran ile tam ölçekli ve küçültülmüş modellerin analizlerinin yapılması	Modal Analiz sonuçlarından elde edilen mod şekilleri ve frekansların incelenmesi
3	Küçültülmüş plakanın içi boşaltılıp farklı uzunluklarda doldurmalar yapılarak modal analizlerin yapılması	Analizlerden elde edilen doğal frekansların tam ölçekli modelin frekansına yaklaştırılması ve üretilecek modelin belirlenmesi
4	Tasarlanan modellerin deneylerinin gerçekleştirilmesi ve deney verilerinin analizi	Plaka ile ilgili deney sonuçlarının analizlerinin yapılması, grafiklerinin çizilmesi, bulguların irdelenmesi ve elde edilen sonuçların ortaya konulması

Tablo 6.2. Aylık iş zaman Çizelgesi

No	Adı/Tanımı	Kim(ler) Tarafından Yapılacağı	AYLAR																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10								
1	Literatür araştırması	Betül ACAR Yağmur KAYA																		
2	MCS Nastran analizlerinin yapılması	Yağmur KAYA Betül ACAR																		
3	Küçültülmüş plakanın içi boşaltılıp farklı uzunluklarda doldurmalar yapılarak modal analizlerin yapılması ve elde edilen sonuçlara göre üç boyutlu yazıcıda üretilecek modelin belirlenmesi	Betül ACAR Yağmur KAYA																		
4	Yapılacak deneyler için deney düzeneğinin kurulması, deney modellerinin üretilmesi ve sonuçların sayısal analizlerle karşılaştırılması	Betül ACAR Yağmur KAYA																		

Tablo 6.3 Haftalık çalışma programı

<b>1. Hafta</b>	Projenin ayrıntıları, proje detayları hakkında TUSAŞ ile görüşme yapıldı.
<b>2. Hafta</b>	Konu ile ilgili literatür taraması yapıldı. Yazılan tezler incelendi.
<b>3. Hafta</b>	Yapılan literatür taraması ve tezlerin incelenmesine göre, kısıtlar kapsamı tartışması yapıldı. Kısıtlara göre tasarımsal detaylar netleştirildi.
<b>4. Hafta</b>	Araştırılan literatür taramalarından elde edilen veriler TUSAŞ Sanayi danışmanı ile paylaşılarak projenin ilerlemesi hakkında fikir alışverişi yapıldı.
<b>5. Hafta</b>	En uygun plakanın boyutları belirlenerek modal analizi ve flutter analizi yapıldı.
<b>6. Hafta</b>	Tam ölçekli plakanın deneysel analizi yapılarak sonuçlar sayısal analizlerle karşılaştırıldı.
<b>7. Hafta</b>	Plaka belirli oranlarda geometrik küçültülerek modal analizleri yapıldı.
<b>8. Hafta</b>	Küçültülen plakalar içi boşaltılıp farklı uzunluklarda doldurmalar yapılarak modal analizler tekrarlandı.
<b>9. Hafta</b>	Yapılan analiz sonuçları hakkında sanayi danışmanına bilgi verildi ve kontrol edildi.
<b>10. Hafta</b>	MSC.Nastran webinarına katılım sağlandı.
<b>11. Hafta</b>	En uygun sonuçları veren küçültülmüş plakanın üç boyutlu yazıcıda üretimi gerçekleştirildi.
<b>12. Hafta</b>	Tez yazımına geçildi. Küçültülmüş plaka üzerindeki deneysel çalışmalar devam etmektedir.

## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada dikdörtgen plakanın tam ölçekli modelin dinamik özelliklerini koruyarak geometrik ölçeklendirme ile küçültülmüş modellerinin modal analizleri incelenmiştir. Analizlerde MSC.Nastran ve Matlab programları kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda tam ölçekli plakanın deneysel analizi yapılarak sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen fark %17'dir ve bu fark kabul edilebilirdir.

Çalışmada tam ölçekli modelde elde ettiğimiz doğal frekans değerlerinin küçültülmüş modellerdeki frekans değerleriyle eşit olması amaçlanmaktadır. Tam ölçekli model 1/5, 1/10 ve 1/3 oranlarında küçültülmüş ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Ancak plakanın doğal frekansı ölçek ile ters orantılı olduğundan ölçek azaldıkça doğal frekans değeri artmıştır. Bu nedenle küçültülmüş plakalar tamamen boşaltılıp kanat ucundan itibaren kanat boyunca doldurmalar yapılarak analizler tekrarlanmıştır. Frekans değerlerinde azalma meydana gelse de istenen değere ulaşamamıştır. Yoğunluğu plaka yoğunluğundan fazla olan yapısal çelik malzemesi plaka içine yerleştirilmiştir. Yapısal çelik malzemesi enine ve boyuna yerleştirilerek analizleri yapılmıştır. Çelik levhalar frekansı düşürse de birbirlerine bitişik modellendiğinde istenen değere ulaşıldığı görülmüştür.

## 8. ÖNERİLER

Bu projede, farklı konfigürasyonlarda tasarlanan modeller göz önüne alınarak yapının doğal frekansını belirleyen etkenler belirlenerek bunlar bir yazılım programı içerisine aktarılabilir. Elde edilen modellerin daha kolay ve çabuk elde edilmesine yönelik bir optimizasyon programı yazılarak kullanılacak programın ara yüzüne eklenmesiyle yapılan çalışma daha hızlı sonuçlar verebilir.

Optimizasyon programında tam ölçekli model istenilen küçültme oranlarına bağlı olarak küçültülecektir. Küçültülen bu modelin frekansları tam ölçekli modelin frekansları ile uyum içinde olması gerekmektedir. Fakat modal analizde görüldüğü gibi frekanslar ölçek oranına göre artmaktadır. Çırpınma analizinde de bu durum meydana gelmemesi için çırpıntı analizlerinin önemli değişkenlerinden olan azaltılmış frekansların iki model için de birbirlerine eşit olması gerekir. Azaltılmış frekansa göre model için küçülme oranı belirlenir. Küçülme oranını belirlenmesinin ardından optimizasyonda doluluk oranı parametresi kullanılarak modelin hangi kalınlık, yükseklik ve kesitlere sahip olması gerektiği belirlenir. Doluluk parametresi modelin yapılacağı 3 boyutlu yazıcının özellikleri de göz önünde

bulundurulmalıdır. Ayrıca MAC (modal assurance criteria) kodu eklenerek her optimizasyonda iki modelin karşılaştırılması ve her öz değer vektörün MAC'ını 1 yapacak şekilde programa tanımlanan quad elemanların yerlerini, kalınlıklarını, yüksekliklerini değiştirerek nihai FEM'i oluşturulabilir.

Oluşturulan FEM bir çizim programına entegre edilip CAD modeli oluşturulur ve sonrasında yazıcı ara yüzüne basım özellikleri belirlenerek parçayı yazıma hazır hale getirebilecek bir optimizasyon çalışması daha ileri çalışmalar için yapılabilir.

## 9. KAYNAKÇA

- [1] He, J., Fu, Z., Modal Analysis, First Edition, Butterworth-Heinemann Publishing, October 2001.
- [2] Dimitrijević, J., Kovačević, P., Computational Modal Analysis of the LASTA Aircraft, 2010.
- [3] Bisplinghoff, R., Ashley, H. and Halfman, R., “Aeroelasticity”, Addison-Wesley Publishing Company INC. Reading, Massachusetts, 1978
- [4] Ritter, M., Dillinger, J., Nonlinear Numerical Flight Dynamics for the Prediction of Manuever Loads, 15th International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, IFASD-2011-143
- [5] Hodges D. H., Pierce G. A., “Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity”, Second Edition, Cambridge University Press, New York, 2011.
- [6] Vinayagamurthy, G., Flutter Analysis of Wing Booster Fin and Vertical Tail, Scientific.VIT University, Applied Mechanics and Materials Vols. 110-116 (2012) pp 3500-3505
- [7] MSC. Nastran Version 68 Aeroelastic Analysis User’s Guide, 2009.
- [8] Dereli, Y., Bir Uçak Kanadının Aeroelastik Karakteristiğinin Belirlenmesi, 7.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eylül 2018.
- [9] Aktimur, B., Gökpınar, E., Katmanlı Üretimin Havacılıktaki Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji, 3(2):463-469 (2015)
- [10] Sönmez, S., Kesen, U. Ve Dalgıç, C., Üç Boyutlu Yazıcılar, 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, 01-03 Kasım 2018, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa ,471-481.
- [11] Pendleton, E., Lee, M., and Wasserman, L., ‘Application of Active Flexible Wing Technology to the Agile Falcon’, Wright-Patterson Air Force Base, 1992.
- [12] Yusuf, S., Pontillo, A., Weber, S., Hayes, D. ve Lone, M., Aeroelastic Scaling for Flexible High Aspect Ratio Wings, 2019.
- [13] Ersoy, K., Havacılıkta Kullanılan Alüminyum ve Kompozit Yapıların Sonlu Elemanlar Modellerinin Modal Güncelleme Teknikleri Kullanılarak Gerçek Yapı ile Benzeştirilmesi, 5.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eylül 2014.

[14] Dalmış, M., Flutter Characteristics of Plate Like Structures, Master's Thesis, Middle East Technical University, Department of Mechanical Engineering, November 2014.

[15] Wasserman, L., Flutter Model Design and Ground Vibration Testing, Flutter Prevention Handbook, 1-50.

[16] <https://rnc.com.tr/modal-analiz-nedir>, 7 Haziran 2021.

## ÖZGEÇMİŞ

**YAĞMUR KAYA**, lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır (2021). Üniversite eğitimi süresince, TÜBİTAK 118M592, *Hücum ve Firar Kenarı Dalgalı Geometriye Sahip Uçak Kanadı Performansına Artan Azalan Genlik Modülasyonunun Etkisinin İncelenmesi*, projesinde bursiyer lisans öğrenci olarak çalışmış ve *MM 4006 Bitirme Projesi'ni TUSAŞ Lift Up* programı ile gerçekleştirmektedir. Karadeniz Teknik Üniversitesi Su Sporlar ve Denizcilik Kulübü yönetim kurulu üyesi ve antrenörlüğü yapmıştır.

E-mail: yagmur.kaya.98@outlook.com

**BETÜL ACAR**, lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır (2021). *MM 4006 Bitirme Projesi'ni TUSAŞ Lift Up* programı ile gerçekleştirmektedir. Stajını Eskasan Makine'de üretim bölümünde yapmıştır.

E-mail: betul.acar@hotmail.com