

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HASARLI PLAKLARDA TİTREŞİM ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

Adem DUYGU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Ömer Kadir MORGÜL

Mart 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASARLI PLAKLARDA TİTREŞİM ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

Adem DUYGU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez ²³⁰³.../.../2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. İmer Kadir Margul
.....
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Murat PAKDİL
.....
Üye



Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DAL
.....
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Adem DUYGU

01/03/2018



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tüm eğitim hayatım boyunca, en zor zamanlarımda büyük bir sabırla beni destekleyen, yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren, bugünlere gelmeme vesile olan değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-050) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | iv |
| TABLolar LİSTESİ | vi |
| GRAFİKLER LİSTESİ | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ | ix |
| ÖZET | xi |
| SUMMARY | xii |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Plaklar | 1 |
| 1.2. Plak Titreşimleri Üzerine Literatür Araştırması | 9 |
| 1.3. Tezin Amacı | 11 |
| BÖLÜM 2. | |
| PLAKLARIN HAREKET DENKLEMLERİ | 12 |
| 2.1. İzotropik Plakların Hareket Denklemi | 12 |
| BÖLÜM 3. | |
| MATERYAL VE YÖNTEM | 21 |
| 3.1. Plak Malzemesi | 21 |
| 3.1.1. İnce plağın mekanik özellikleri | 21 |
| 3.1.2. Modal analizi yapılacak plaklar ve hasar konumları..... | 21 |
| 3.2. Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar | 26 |
| 3.2.1. Titreşim verisi alma ekipmanları | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.2.1.1. İvmeölçer..... | 26 |
| 3.2.1.2. Darbe çekici..... | 27 |
| 3.2.1.3. Sinyal şartlandırıcı | 28 |
| 3.2.1.4. Sinyal analiz yazılımı | 28 |
| 3.2.2. Serbest-serbest sınır şartları için çerçeve askı..... | 29 |
| 3.3. Deneysel Modal Analiz | 30 |
| 3.3.1. Titreşim verisi alma | 31 |
| 3.3.1.1. Hasarsız A plağının doğal frekanslarının tespiti..... | 34 |
| 3.3.1.2. Hasarlı plakların doğal frekanslarının tespiti | 34 |
| 3.4. Sonlu Elemanlar Programı ile Modal Analiz | 35 |
| 3.4.1. Plakların katı modeli | 35 |
| 3.4.2. Plakların sonlu elemanlar modeli | 36 |
| 3.4.3. Geometrinin tanımlanması | 37 |
| 3.4.4. Modal analizin tanımlanması ve sonlu elemanlar ağı | 37 |
| 3.4.5. Sonlu elemanlar analizi | 38 |
| 3.4.5.1. Hasarsız A plağının doğal frekanslarının tespiti..... | 39 |
| 3.4.5.2. Hasarlı plakların doğal frekanslarının tespiti | 39 |

BÖLÜM 4.

| | |
|--|----|
| BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 41 |
| 4.1. Hasarsız A Plağının Nümerik Analizden Elde Edilmiş Mod Şekilleri | 41 |
| 4.2. Hasarsız A Plağının Deneysel Analizden Elde Edilmiş Mod Şekilleri | 43 |
| 4.3. Nümerik ve Deneysel Analizden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması | 46 |

BÖLÜM 5.

| | |
|-------------------------|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER | 57 |
| KAYNAKÇA | 58 |
| EKLER | 61 |
| ÖZGEÇMİŞ | 65 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Yavuz Sultan Selim Köprüsü çelik tabliyeleri | 2 |
| Şekil 1.2. FNSS Pars zırhlı aracında kullanılan plaklar | 2 |
| Şekil 1.3. Mars kaşifi otonom Curiosity aracı | 3 |
| Şekil 1.4. SpaceX Falcon 9 roketi | 3 |
| Şekil 1.5. Türksat 6A uydusu | 3 |
| Şekil 1.6. Tünel açma makinesi | 4 |
| Şekil 1.7. TAI Hürkuş hafif taarruz uçağı | 4 |
| Şekil 1.8. Plak çeşitleri; a)Plak b)Membran c)Bükülgen plak d)Kalın plak | 7 |
| Şekil 1.9. Düzlemsel taşıyıcılar; a) Plak b) Levha c) Ön gerilmeli plak | 7 |
| Şekil 2.1. Dikdörtgen plak | 12 |
| Şekil 2.2. Eğilmiş dikdörtgen bir plak | 13 |
| Şekil 2.3. Plak üzerindeki momentler ve kesme kuvvetleri | 14 |
| Şekil 2.4. Burulma momentleri | 16 |
| Şekil 3.1. Leissa'nın çalışmasında kare plakların mod şekillerinin gösterimi | 22 |
| Şekil 3.2. Hasarsız A plağının şematik gösterimi | 23 |
| Şekil 3.3. 1.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi | 23 |
| Şekil 3.4. 2.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 3.5. 3.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 3.6. 4.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi | 25 |
| Şekil 3.7. Deneyleerde kullanılan bazı plak modelleri | 25 |
| Şekil 3.8. Deneyleerde kullanılan plak modelleri | 26 |
| Şekil 3.9. İvmeölçer | 27 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.10. Darbe çekici | 27 |
| Şekil 3.11. Sinyal şartlandırıcı | 28 |
| Şekil 3.12. RT Photon+ programının ekran görüntüsü | 29 |
| Şekil 3.13. Örnek bir plağın çerçeve askıya asılması | 30 |
| Şekil 3.14. Kuvvet etkimesi ve ivmeölçerden alınan zaman sinyalleri | 31 |
| Şekil 3.15. Askıda bırakılmış bir hasarsız plak ile ivmeölçer eksenel bilgisi | 31 |
| Şekil 3.16. Deneysel modal analizde FFT ölçüm düzeneği | 32 |
| Şekil 3.17. CU plağının RT Pro Photon+ programında çözüm ekranı | 33 |
| Şekil 3.18. Örnek bir hasarlı plağın Creo programında hazırlanan katı modeli..... | 36 |
| Şekil 3.19. Problemin sonlu elemanlar programındaki çözüm modeli | 36 |
| Şekil 3.20. ANSYS programında Modal modülünde örnek bir hasarlı plak geometrisi | 37 |
| Şekil 3.21. Örnek hasarlı plak üzerindeki mesh ağının görünümü | 38 |
| Şekil 3.22. Örnek hasarlı plak üzerindeki mesh ağının yakından görünümü | 38 |
| Şekil 4.1. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 1. Mod şekli | 41 |
| Şekil 4.2. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 2. Mod şekli | 42 |
| Şekil 4.3. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 3. Mod şekli | 42 |
| Şekil 4.4. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 4. Mod şekli | 43 |
| Şekil 4.5. MATLAB ekranı | 43 |
| Şekil 4.6. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 1.Mod şekli | 44 |
| Şekil 4.7. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 2.Mod şekli | 45 |
| Şekil 4.8. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 3.Mod şekli | 45 |
| Şekil 4.9. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 4.Mod şekli | 45 |

TABLolar LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 3.1. Plak malzemesinin kimyasal bileşimi | 21 |
| Tablo 3.2. Çekiç ve ivmeölçerin hassaslık ayarı | 27 |
| Tablo 3.3. Test için kullanılan ölçüm parametreleri | 30 |
| Tablo 3.4. Hasarlı plakların doğal frekans değişimlerini kıyaslamak için hasarsız A plağının deneysel analizden elde edilen 4 doğal frekansı . | 34 |
| Tablo 3.5. 1.mod şekline göre hasar verilmiş B9 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 34 |
| Tablo 3.6 1.mod şekline göre hasar verilmiş Bx10 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 34 |
| Tablo 3.7. 2.mod şekline göre hasar verilmiş CU plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 35 |
| Tablo 3.8. 2.mod şekline göre hasar verilmiş CxU plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 35 |
| Tablo 3.9. 3.mod şekline göre hasar verilmiş D6 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 35 |
| Tablo 3.10. 3.mod şekline göre hasar verilmiş Dx6 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 35 |
| Tablo 3.11. 4.mod şekline göre hasar verilmiş E4 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 35 |
| Tablo 3.12. Hasarlı plakların doğal frekans değişimlerini kıyaslamak için hasarsız A plağının nümerik analizden elde edilen 4 doğal frekansı .. | 39 |
| Tablo 3.13. 1.mod şekline göre hasar verilmiş B2 ve B9 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 39 |
| Tablo 3.14. 1.mod şekline göre hasar verilmiş Bx2 ve Bx10 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 39 |

| | |
|--|----|
| Tablo 3.15. 2.mod şekline göre hasar verilmiş C2 ve CU plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 40 |
| Tablo 3.16. 2.mod şekline göre hasar verilmiş Cx2 ve CxU plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 40 |
| Tablo 3.17. 3.mod şekline göre hasar verilmiş D2 ve D6 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 40 |
| Tablo 3.18. 3.mod şekline göre hasar verilmiş Dx2 ve Dx6 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 40 |
| Tablo 3.19. 4.mod şekline göre hasar verilmiş E2 ve E4 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması | 40 |
| Tablo 4.1. Hasarlı plakların A plağına göre ilk 4 modunun yüzdelik değişim değerleri | 54 |

GRAFİKLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Grafik 4.1. A plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi | 46 |
| Grafik 4.2. B9 plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi ... | 47 |
| Grafik 4.3. Bx10 plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi | 48 |
| Grafik 4.4. CU plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi ... | 49 |
| Grafik 4.5. CxU plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi . | 50 |
| Grafik 4.6. D6 plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi ... | 51 |
| Grafik 4.7. Dx6 plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi . | 52 |
| Grafik 4.8. E4 plağı nümerik (solda) ve deneysel (sağda) frekans değişimi ... | 53 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|------------------------|---|
| m | : Kütle |
| \underline{x} | : Deplasman vektörü |
| $\dot{\underline{x}}$ | : Hız vektörü |
| $\ddot{\underline{x}}$ | : İvme vektörü |
| k | : Yay katsayısı (N/m) |
| ω | : Doğal frekans |
| ω_d | : Sönümlü doğal frekans |
| x_0 | : Başlangıç deplasmanı (m) |
| c | : Sönüm katsayısı (kg/s) |
| F | : Kuvvet (N) |
| r | : Frekans oranı |
| $\{q\}$ | : Modal koordinat vektörü |
| $[]^T$ | : Matrisin transpozu |
| $[]^{-1}$ | : Matrisin tersi |
| $H(\omega)$ | : Frekans tepki fonksiyonu |
| u | : X yönündeki yer değiştirme |
| v | : Y yönündeki yer değiştirme |
| w | : Z yönündeki yer değiştirme |
| ε | : Yüzde şekil değiştirme |
| τ | : Kayma gerilmesi(N/m ²) |
| E | : Elastisite modülü (N/m ²) |
| G | : Kayma modülü (N/m ²) |
| ν | : Poisson oranı |
| M | : Moment (Nm) |
| T | : Kinetik enerji |
| U | : Potansiyel enerji |

| | |
|----------|-------------------------------------|
| V | : Dış kuvvetin yaptığı iş |
| ρ | : Yoğunluk (kg/m^3) |
| h | : Plaka kalınlığı (m) |
| q | : Dış kuvvet (N) |
| σ | : Normal gerilme (N/m^2) |
| δ | : Delta operatörü |
| FTF | : Frekans Tepki Fonksiyonu |
| {f} | : Genel kuvvet vektörü |



ÖZET

Anahtar kelimeler: titreşim, titreşim mekaniği, titreşim analizi, plakların titreşimi

Bir plak üzerindeki hasarın varlığı, konumu ve büyüklüğüne göre yapının doğal frekanslarında ve mod şekillerinde değişikliğe neden olur. Bu çalışmada, kare şeklindeki plakaların titreşim analizi, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ve deneysel olarak Photon+ yazılımı ve ekipmanı yardımıyla, plak üzerindeki farklı hasar durumuna göre doğal frekansların değişimi incelenmiş ve bunun ile hasarın varlığı tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Özetle kare plaklarda hasar yeri-büyüklüğü ile doğal frekans değişimi incelenmiştir.

Mekanik yapılarda hasar görmüş plaklar yaygın olarak kullanılır. Bu tarz yapıların titreşim analizi hasar tespiti için kullanılır. Birçok çalışmada, delikli dairesel plakların ve parça eksiltilmiş plaklarının titreşim analizinde analitik, deneysel vb. yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Bununla birlikte, sabit bir plak üzerinde hasarın konumu, hasarın büyümesi, sınır koşullarının çeşitliliğinin etkileri konularına literatürde az rastlanmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada hasarlar ve doğal frekans sonuçları arasında sistematik bir ilişki aranmaya çalışılmıştır. Bu analizler için gerekli parametreler belirlenmiştir. Kare plak boyutu, hasar derinlikleri, hasar genişlikleri ve ortam koşulları gibi bazı parametreler sabit tutulmuştur.

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile hasarlı kare plakların modal analizi ve hasar tespiti tahmin edilmektedir. Sayısal ve deneysel analiz sonuçları tablolar halinde karşılaştırılmış ve grafiklerle sunulmuştur.

VIBRATION ANALYSIS OF DAMAGED PLATES

SUMMARY

Keywords: vibration, vibration mechanics, vibration analysis, vibration of plates

Presence of a damage on a plate causes some changes in the natural frequencies and mode shapes depending on its location and size. In this study, vibration analysis of square shaped plates were examined experimentally. With the help of ANSYS software which uses the finite elements method and Photon+ software/equipment, the change in natural frequencies as a result of different damages on plate were examined and with this, damage prediction was aimed. As a summary, natural frequency change were examined on the square plates by using damage location-size.

It's encountered that damaged plates are used on mechanic structures. Vibration analysis of these kind of stuctures is also used for damage detection. In a lot of study, it's encountered that analytical, experimental etc. methods are used on the vibration analysis of perforated circular plates and part-detracted plates. However, the location of the damage on a fixed plate, the growth of damage, the effects of the diversity of boundary conditions are rarely found in the literature. For this reason, a systematic relationship between damage and natural frequency results has been sought. The parameters required for these analyzes were determined. Some parameters such as square plate size, depth of damage, damage widths and ambient conditions are kept constant.

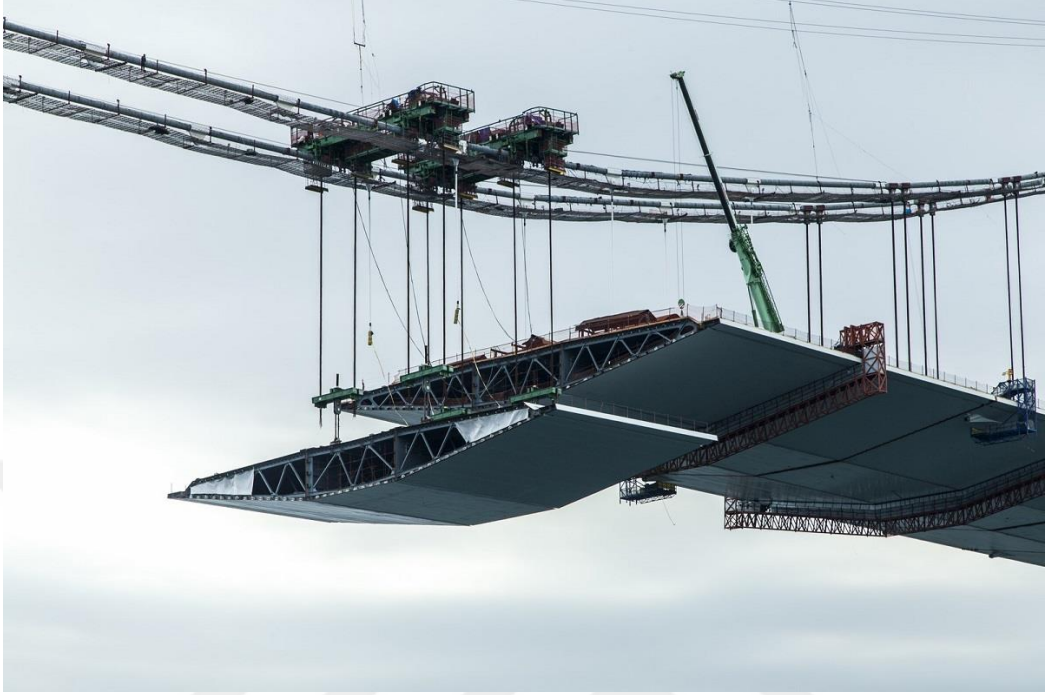
In this study, modal analysis and damage detection of damaged square plates are predicted with the results obtained. Numerical and experimental analysis results are tabulated and compared with graphs.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Plaklar

Plaklar, kalınlıkları kenar boyutlarına göre oldukça küçük olan metal levhalardır. Diğer bir ifadeyle h kalınlıklı düz bir yüzey ile tanımlanan yapısal elemanlardır. Plağın alt-üst sınırlarını oluşturan alt ve üst yüzeylere $\pm h/2$ mesafede bulunan düz yüzey, plağın orta yüzeyi olarak adlandırılır. Plak kalınlığı sabit veya değişken kalınlıklı da olabilir. Orta düzlem geometrilerine göre dikdörtken, kare, dairesel, eliptik, üçgensel plaklar şeklinde adlandırılabilirler.

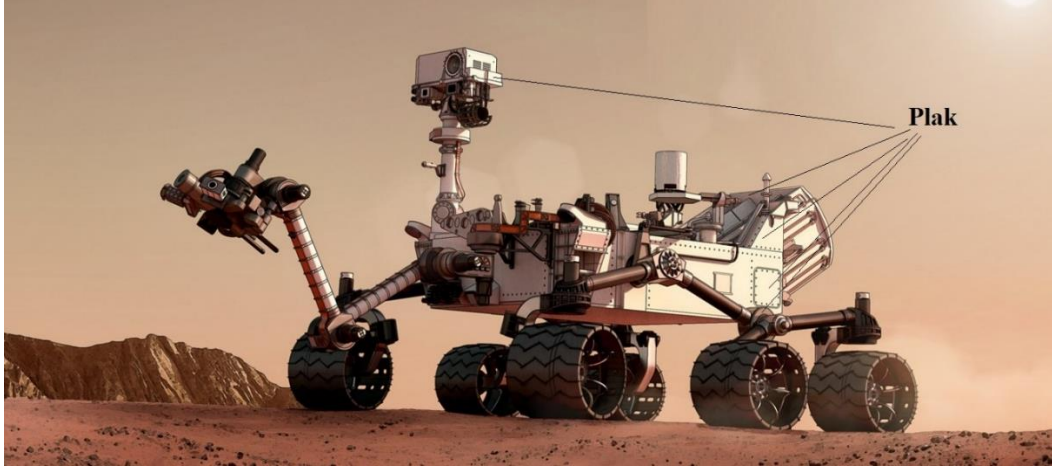
Plak ve plak benzeri yapıların sınırsız mühendislik uygulamaları vardır. Mühendislik yapılarındaki yapısal bileşenlerin önemli bir bölümünü plaklar oluşturmaktadır. Ulaşım araçlarının (otomobil, uçak, helikopter, zırhlı araç, otobüs, demiryolu araçları vb.) gövde yapıları, iş makineleri, roket ve füze sistemleri, modern köprüler, bariyerler, baraj ve kanal kapakları, hard-disklerin içindeki ince dairesel diskler, plak elemanların uygulamadaki örneklerinden bazılarıdır. Ayrıca plaklar, çok ileri teknoloji uzay ve havacılık endüstrisinde dahi kullanılan komponentlerdir. Mesela; bir uçağın kanatları ve gövdesi komple bir plak yapı oluşturduğu gibi aynı zamanda birçok plak bileşeni de içermektedir. Uydu ve uzay sistemleri de bünyelerinde çok özel plak elemanlar barındıran süper yapılardır. Aynı şekilde makine sanayiinde genellikle tüm makineler mikro boyutlardan çok büyük boyutlara kadar plak eleman içerebilmektedirler. Plakların sınırsız uygulama alanlarından bazıları aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 1.1. Yavuz Sultan Selim Köprüsü çelik tabliyeleri [1]



Şekil 1.2. FNSS Pars zırhlı araçında kullanılan plaklar [2]



Şekil 1.3. Mars kaşifi otonom Curiosity aracı [3]



Şekil 1.4. SpaceX Falcon 9 roketi [4]



Şekil 1.5. Türksat 6A uydusu [5]



Şekil 1.6. Tünel açma makinesi [6]



Şekil 1.7. TAI Hürkuş hafif taarruz uçağı [7]

Plaklar elastisite teorisi denklemleri ile analiz edilebilmektedir. Bazı plakların diferansiyel denklemlerinin kesin çözümleri, yalnızca belirli sınır ve yükleme şartlarında elde edilebilmektedir. Birçok plak problemleri için çeşitli enerji metotları analitik çözümlere yakın sonuçlar verebilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile sayısal çözüm teknikleri önem kazandı ve yaygınlaştı. Plak çözümleri için sonlu farklar, sınır eleman, ızgara, sonlu şeritler, sonlu elemanlar gibi metodlar mevcuttur. Sayısal çözüm tekniklerinden sonlu elemanlar yöntemi diğer metotlara göre daha çok kullanılmaktadır. Analitik metotlara ise Navier, Levy, süper pozisyon metodları örnek verilebilir.

Plak teorisindeki amaç, yüksüz veya bir yüke maruz kalan bir plaktaki gerilme, deformasyon, titreşim gibi statik ve dinamik parametrelerin hesaplanmasıdır. Yani bir plağın titreşim karakteristiklerini elde etmek mümkündür. Üç boyutlu sürekli bir plağın analizini yapmak için çok güçlü ve karmaşık bir elastik analiz gerekmektedir. Matematiksel zorluklar nedeniyle her zaman bu tür analizler yapmak pratik olmaz. Bu nedenle bu zorluğu aşmak için problem genelde iki boyutlu bir probleme dönüştürülerek çözülür [8].

Bir plağın eğilme özellikleri kalınlığı ile kenar boyutları arasındaki kıyaslamalara bağlıdır. Plaklar, bu geometrik özelliklerine ve mukavemet özelliklerine göre farklı kaynaklarca farklı sınıflandırmalara ayrılmışlardır. Mesela; Timoshenko ve Woinowsky [9] plakları; kalın plaklar, küçük ve büyük sehimli ince plaklar olarak üçe ayırmışlardır. Szilard [10] plak kalınlığının plak boyutlarına oranlarının değişimine göre; membranlar, ince plaklar, orta dereceli kalın plaklar, kalın plaklar olarak dörde ayırmışlardır. Ventsel ve Krauthamme [11] plakları; kalın plaklar, membranlar ve ince plaklar şeklinde üçe ve ince plakları da kendi aralarında rijit plaklar ve bükülgen plaklar olarak ikiye ayırmışlardır. Plak kalınlığının, plağın tipik boyutlarından birinin derecesine (a/h) göre plaklar aşağıdaki şekilde kategorize edilebilirler (Şekil 1.8.).

İnce plaklar: Plak genişliğinin plak kalınlığına oranları $8 \dots 10 \leq a/h \leq 80 \dots 100$ olan, membranlar ile kalın plaklar arasında kalan ve en geniş grubu oluşturan plaklardır. Plağın maksimum çökmesini ifade eden w ile h kalınlığının oranına (w/h) bağlı olarak, eğilme ve membran kuvvetleri farklılıklar gösterir. Bu yüzden (w/h) oranına bağlı olarak ince plaklarda kendi arasında, rijit plaklar ve bükülgen plaklar olarak ikiye ayrılır.

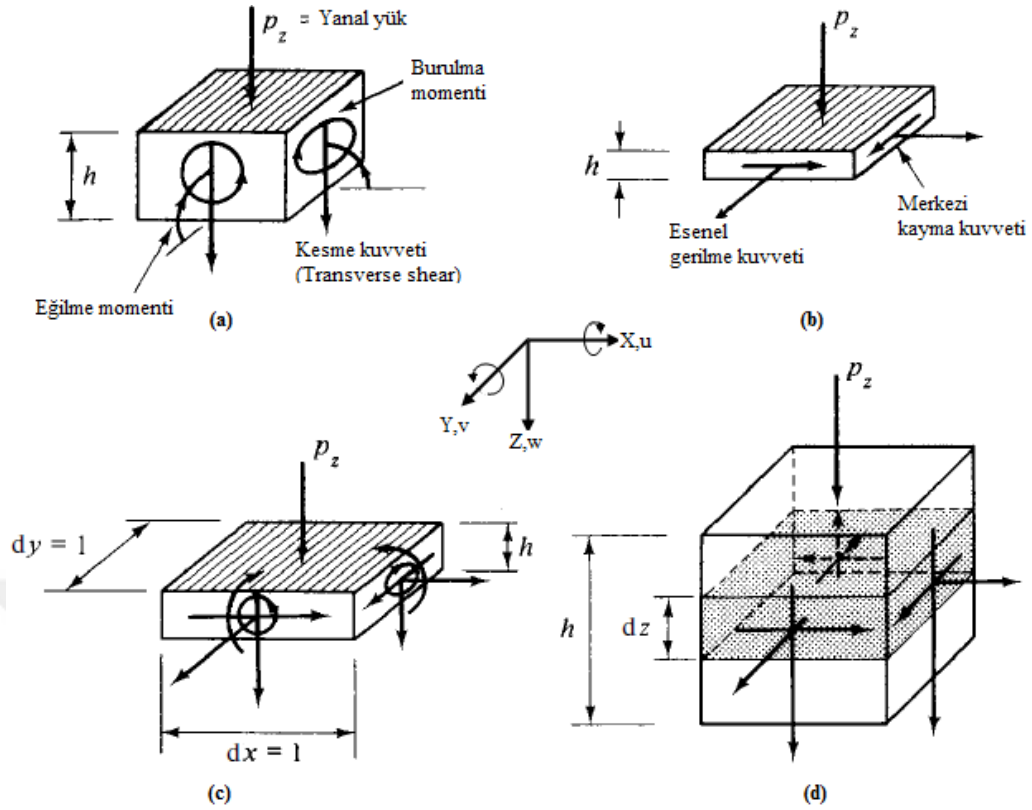
Rijit plaklar: Plağın maksimum çökmesi (w) ile (h) kalınlığının oranı $w/h \leq 0.2$ olan plaklar rijit plaklardır. Küçük sehimli plaklar olarak da adlandırılır. Eğilme rijitliğine sahiptirler. Çoğunlukla eğilme ve burulma momentleri ve kesme kuvvetlerinin etkisi altındadırlar. Orta düzlem deformasyonları ve membran

kuvvetleri ihmal edilir. Plak terimi aksi belirtilmedikçe rijit plak olarak anlaşılır (Şekil 1.8.-a).

Bükülgen plaklar: Eğer sehimler $w/h \geq 0.3$ gibi belli bir orandan büyük ise bükülgen plaklardan söz etmek daha doğru olur. Bu plaklar, büyük sehimli plaklar olarak ta isimlendirilirler. Bu tür plaklarda orta düzlemin, yatay olarak da yer değiştirmesi mümkün olmaktadır. Böyle plaklar, hem rijit plakların hem de membranların bileşimini ve karakteristiklerini sunarlar. Yani eğilme ve burulma momentleri, kesme kuvvetleri ve membran kuvvetleri (eksenel gerilme ve kayma kuvvetleri) etkisi altındadırlar (Şekil 1.8.-c). Plak sehimleri, kalınlığına göre daha yüksek olduğu zaman membran hareketi hâkim olur. Bu nedenle $w/h > 5$ olduğu zaman bükülme gerilmeleri membran gerilmelerine göre ihmal edilebilecek kadar küçük kalır.

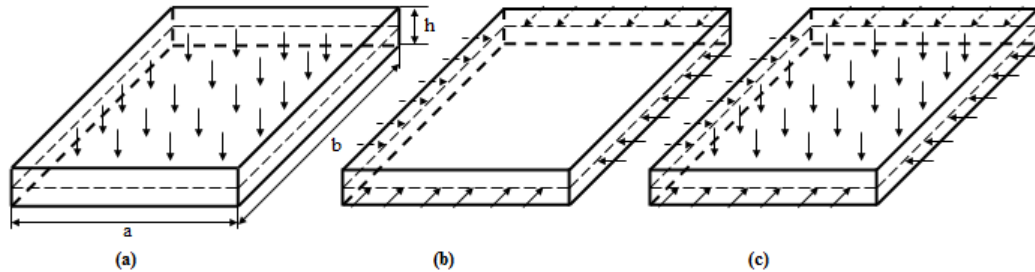
Membranlar: Plak genişliğinin plak kalınlığına oranı $a/h \geq 80 \dots 100$ aralığında olan çok ince plak elemanlardır. Plak orta yüzeyi üzerinde hareket eden, aksenal gerilme kuvvetleri ve kayma kuvvetleri etkisinde olan yükler taşırlar. Bu kuvvetlere membran kuvvetleri de denmektedir. Eğilme rijitlikleri mevcut değildir. Bu tez çalışmasında bu tür plakların titreşim analizleri yapılmıştır (Şekil 1.8.-b).

Kalın plaklar: Plak genişliği (a) ile kalınlık (h) oranının değişimi yaklaşık olarak $a/h \leq 8 \dots 10$ olan plaklardır. Bu tür plaklar, katı cisimlerde olduğu gibi gerilme, gerinim ve deformasyon bileşenlerine bağlı analizleri içerirler (Şekil 1.8.-d).



Şekil 1.8. Plak çeşitleri; a) Rijit plak b) Membran c) Bükülgen plak d) Kalın plak [10]

Plak yapılar aynı zamanda düzlemsel taşıyıcılar grubundandır. Düzlemsel taşıyıcılar, dış yüklerin etki biçimine göre plak, ön gerilmeli plak, derin kiriş, levha gibi gruplara ayrılmaktadır (aşağıdaki şekilde). Dış yükler orta düzleme yalnızca dik etkiyorsa; plak, sadece orta düzlem içinde etkiyorsa; levha, her iki şekilde de etkiyorsa; ön gerilmeli plak çalışması söz konusudur. Bunun haricinde orta yüzey, düzlem değil de eğri bir yüzey ise o zaman kabuk çalışmasından söz edilmektedir.



Şekil 1.9. Düzlemsel taşıyıcılar; a) Plak b) Levha c) Ön gerilmeli plak

İnce plakların beş farklı matematiksel modeli vardır, bunlardan ilk üçü elastik modellerdir; Kirchhof modeli, Mindlin-Timoshenko modeli ve Von Karan

modelidir. Geniş aralıklı viskoelastik plak modeli ve termoelastik plak modelleri ise diğerk iki modeldir [12]. Yapısal mekaniğın gelişimi statik uygulamaların araştırılmasıyla başlarken, plaklar üzerine yapılan ilk analitik ve deneysel çalışmalar neredeyse tamamen serbest titreşimler üzerine yoğunlaşmıştır [10].

L. Navier, basit destekli dikdörtgen plakların belirli sınır değerk problemlerinin çözümlü için Fourier tarafından tanıtılan çift trigonometrik serilerin kullanımıyla diferansiyel denklemi cebirsel ifadeye dönüştüren kesin bir metot tanıttı ancak Navier daha karmaşık plak problemlerinin çözümünde başarısız oldu [10,11,12]. Karşılıklı iki kenarından basit mesnetli diğerk kenarları serbest olan dikdörtgen plaklar problemleri Levy tarafından başarıyla çözüldü [11,13].

Gustav R. Kirchhoff ince plak teorisi üzerine önemli bir tez çalışması yayınladı. Bu tezde Kirchhoff, günümüzde bile büyük kabul görmüş plak eğilme teorisinde Kirchhoff hipotezi olarak bilinen iki temel varsayım üzerinde durdu. Kirchhoff ayrıca plakların frekans değışimini keşfetti ve büyük sehimli plaklar üzerine çalışmalar yaparak plak teorisine önemli katkılar yaptı [10]. E. Reissner, kayma kuvvetlerinin oluşturduğu deformasyonları hesaba katan bir plak teorisi geliştirdi [11]. Mindlin, kayma deformasyonlarına dönme atalet momentlerini de ekleyerek plak titreşim teorisini geliştirdi, elastik plakların matematiksel titreşim teorilerini yazdığı kitap [15] 1955 yılında yayınlandı. Mindlin plak titreşimleri'ni Liew kitabında incelemiştir [16].

20. yüzyılın başlarında gemi inşa sanayisinde ahşap malzemelerle birlikte yapısal çelikler de kullanılmaya başlayınca plak teorilerinin gelişimi hızlandı. Rusya'nın bilim insanları matematiksel elastisite teorilerini kullanarak plak teorilerine büyük katkı sağladılar. Timoshenko başta olmak üzere Galerkin, Boobnov ve Krylov en önemlileridir [11,14]. Timoshenko ve Woinowsky'nin "Theory of Plates and Shells / Plak ve Kabuk Teorisi" adlı kitabı ve daha birçok çalışması önemli kaynaklardır. II. Dünya Savaşı sırasında modern uçak endüstrisinin ihtiyaç duyduğu sorunların çözümü için plak problemlerinin daha hızlı ve daha doğru çözümüne

ihtiyaç duyulması Wagner, Levy, Bleich, Federhofer gibi ünlü bilimcilerin ortaya çıkmasını sağlamıştır [10].

Plak çalışmalarına ciddi katkı sağlamış günümüz araştırmacılarından birisi de A. W. Leissa'dır. Plakların serbest titreşimlerinin mod biçimleri ve doğal frekanslarıyla ilgili birçok faydalı bilgi ve yüzlerce literatür araştırmasını içeren kitabı plak titreşimleri alanında çalışma yapanlar için ana kaynaklardan biridir [17]. Plak teorilerinin tarihi hakkında daha detaylı bilgilere Timoshenko [18], Soedel [19] ve Rao [20] kitaplarında yer vermişlerdir.

1.2. Plak Titreşimleri Üzerine Literatür Araştırması

M. Şen [21], Plak yapıların mühendisliğin birçok alanında kullanılması nedeniyle plakların dinamik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Plaklardaki titreşimlerin azaltılması için bir yüzeyine sönüm kabiliyeti yüksek malzemeler takviye etmiştir. Üretim maliyetinin düşük olması nedeniyle sönümleyici malzeme olarak poliüretan köpük kullanmış ve farklı takviye kalınlıklarında plağın sönüm oranlarını ölçmüştür.

H. U. Şekerci [22], plaka malzemesi üzerinde titreşim deneyleri yapmış ve teorik, sayısal ve deneysel olarak sonuçları karşılaştırarak yöntemi doğrulamıştır. Buna istinaden bir insansız helikopterin palinin sayısal ve deneysel doğal frekans sonuçlarını elde etmiştir. Sonuçların birbirine oldukça yakın olduğunu gözlemlemiştir.

Değişik geometrilere sahip ince plaklarda titreşim analizi ile ilgili birçok çalışmalar yapılmıştır. Khurasia ve Rawtani [23], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak simetrik olmayan noktalardan delinmiş bir plağın titreşimini incelemiştir. Çalışmada, dairesel plakların merkezden ve merkezden uzaklaşan eksantrik dairesel delikler açılmış ve değişen mod şekilleri ile frekans değişimleri tablo üzerinde gösterilmiştir.

Cheng, Li ve Yam [24], Khurasia ve Rawtani'nin [23] çalışmalarını genişletmişlerdir.

V. Kılıç [25], homojen, izotrop ve lineer elastik Winkler ve Vlasov zemini (yumuşak zemin) üzerine oturan dikdörtgen bir plağın harmonik yük altındaki davranışını incelemiştir. İnce plaklara ait temel denklemleri çıkarıp Newton'un ikinci yasasına göre hareket denklemlerini elde etmiş ve daha sonra homojen, izotropik ve lineer Winkler ve Vlasov zemini üzerine oturan plaklar için hareket denklemini elde etmiştir.

Civalek ve Calayır [26], farklı mesnet koşuluna sahip dikdörtgen plakların titreşim davranışını tahmin etmek için bir yapay sinir ağı uygulaması sunmuş, yapay sinir ağı sonuçları ile sayısal sonuçları karşılaştırmıştır.

Dal ve Morgül [27], karşılıklı iki kenarından basit destekli, diğer iki kenarından elastik mesnetli ince dikdörtgen plakların çözümü için polinomsal Fourier sinüs serisi uygulamış, bu yöntemin birçok sınır şartında da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Aksencer ve Aydoğdu [28], nano boyutta plaklarda yerel olmayan elastisite teorisine göre çökme değerlerini incelemiştir.

Joshi, Jain ve Ramtekkar [29], ortotropik plaklarda titreşim özelliklerinin plağın merkezinde bulunan çatlakların varlığından etkilendiğini görmüşlerdir.

Joshi, Jain, Ramtekkar ve Virdi [30] ise, merkezinde çatlaklar bulunan ince bir ortotropik plağın titreşimi için termal ortamda analitik bir model sunmuşlardır.

1.3. Tezin Amacı

Bir plak üzerindeki hasarın varlığı, konumu ve büyüklüğüne göre yapının doğal frekanslarında ve mod şekillerinde değişikliğe neden olur. Bu çalışmada, kare şeklindeki plakların titreşim analizi, sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

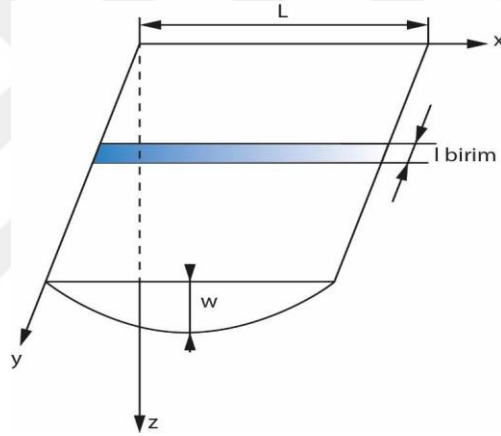
Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı ve deneysel olarak Photon+ yazılımı ve ekipmanı yardımıyla, plak üzerindeki farklı hasar durumuna göre doğal frekansların değişimi incelenmiş ve bunun ile hasarın varlığı tahmin edilmesi amaçlanmıştır.



BÖLÜM 2. PLAKLARIN HAREKET DENKLEMLERİ

2.1. İzotropik Plakların Hareket Denklemi

İzotropik plakların hareket denklemi Kirchhoff'un Plak Teorisi'ne [10] göre elde edilmiştir. Aşağıda L kenar uzunluğuna sahip, kalınlığı h olan bir plağın z ekseninde boyunca eğilme hareketine ait şekli görülmektedir.

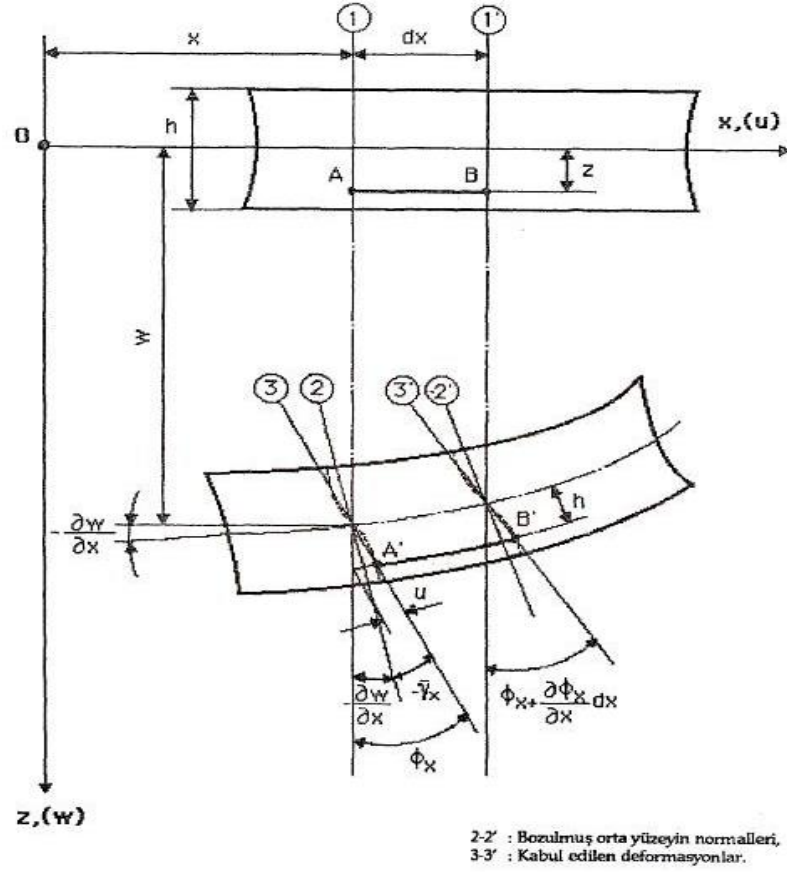


Şekil 2.1. Dikdörtgen plak [31]

Hareket denklemi bazı kabuller yapılarak çıkarılmıştır. Bunlar:

- Plak malzemesi homojen olup, elastik ve izotropiktir.
- Plakta herhangi bir şekil bozukluğu yoktur, kusursuz olduğu varsayılmıştır.
- Plak kalınlığı kenar uzunluklarına göre küçüktür.
- Enine kaymalardan oluşan deformasyonlar ihmal edilmiştir.
- Orta düzleme dik olan gerilmeler ihmal edilmiştir.
- Düzlem içi kuvvetler sonucu üretilen orta düzlem gerilmeleri ihmal edilmiştir.

Aşağıdaki şekilde L boyutlarındaki bir plağın bozulmuş orta yüzeyi ve kabul edilen deformasyonlar görülmektedir.



Şekil 2.2. Eğilmiş dikdörtgen bir plak [32]

Her bir doğrultuda birbirine dik yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
 u_x &= -ZW_x & \epsilon_{xx} &= -ZW_{xx} \\
 u_y &= -ZW_y & \epsilon_{yy} &= -ZW_{yy} \\
 u_z &= W & \epsilon_{xy} &= -ZW_{xy}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Hooke Kanunu ile şekil değiştirmeler ve kayma gerilmeleri, elastiklik modülü ve poisson oranını kullanarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\tau_{xx}}{E} - \nu \frac{\tau_{yy}}{E}$$

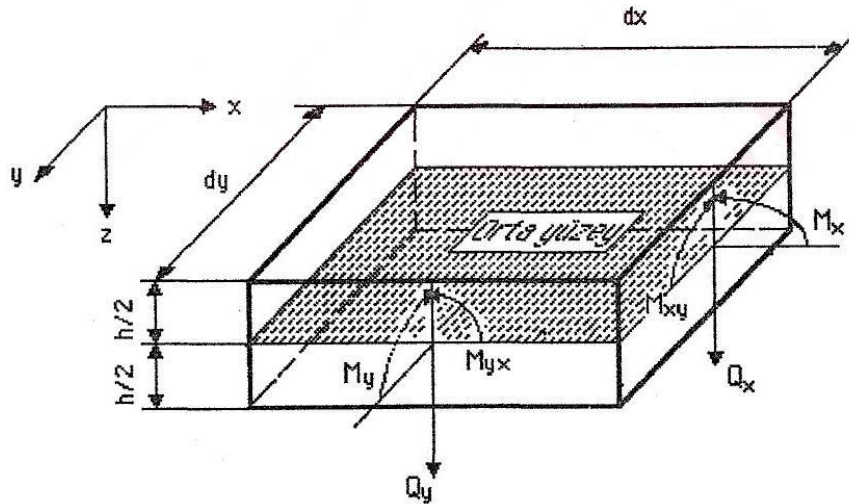
$$\begin{aligned}\varepsilon_{yy} &= \frac{\tau_{yy}}{E} - \nu \frac{\tau_{xx}}{E} \\ \varepsilon_{zz} &= -\nu \frac{\tau_{xx}}{E} - \nu \frac{\tau_{yy}}{E} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{2G} = \frac{\tau_{xy}}{E} (1 + \nu)\end{aligned}\quad (2.2)$$

Buradan kayma gerilmeleri (2.2) denkleminde çekildiğinde;

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{xx} + \nu \varepsilon_{yy}) \\ \tau_{yy} &= \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{yy} + \nu \varepsilon_{xx}) \\ \tau_{xy} &= 2G \varepsilon_{xy} = \frac{E}{(1 + \nu)} \varepsilon_{xy}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Kayma gerilmeleri için (2.3) eşitlikleri elde edilir.

Eğilme Momentleri şu şekilde elde edilir;



Şekil 2.3. Plak üzerindeki momentler ve kesme kuvvetleri [32]

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy}) = -\frac{Ez}{(1-\nu^2)} (w_{xx} + \nu w_{yy}) \\ \tau_{yy} &= \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{xx}) = -\frac{Ez}{(1-\nu^2)} (w_{yy} + \nu w_{xx})\end{aligned}\quad (2.4)$$

Gerilmeler her birim uzunluk için eğilme momentleri meydana getirir. Bu momentler;

$$\begin{aligned}M_x &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xx} z dz = - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{Ez^2}{(1-\nu^2)} (w_{xx} + \nu w_{yy}) dz \\ &= -D(w_{xx} + \nu w_{yy}) \\ M_y &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{yy} z dz = - \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{Ez^2}{(1-\nu^2)} (w_{yy} + \nu w_{xx}) dz \\ &= -D(w_{yy} + \nu w_{xx})\end{aligned}\quad (2.5)$$

$$\text{Burda } D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \text{ olarak eğilme rijitliği ifade edilir.} \quad (2.6)$$

Eğer $M_x = M_y = M$ olursa;

$$w_{xx} = w_{yy} = -\frac{M}{D(1+\nu)} \text{ yazılabilir.}$$

Diğer yandan eğer $M_x = M_1$ ve $M_y = M_2$ yazıldığında,

$$w_{xx} = -\frac{M_1 - \nu M_2}{D(1-\nu^2)} \quad \text{ve} \quad w_{yy} = -\frac{M_1 - \nu M_2}{D(1-\nu^2)} \quad \text{yazılabilir.} \quad (2.7)$$

Eğilmiş yüzey ise;

$$w_{xx} = -\frac{M_1 - \nu M_2}{D(1 - \nu^2)} x^2 - \frac{M_2 - \nu M_1}{D(1 - \nu^2)} y^2 + a_1 x + a_2 y + a_3 \quad (2.8)$$

Şeklinde ifade edilir.

Eğer orjinde plağın orta düzlemine teğet olan bir referans düzlem seçilirse;

$$(x = y = 0 \text{ da } w = w_x = w_y = 0)$$

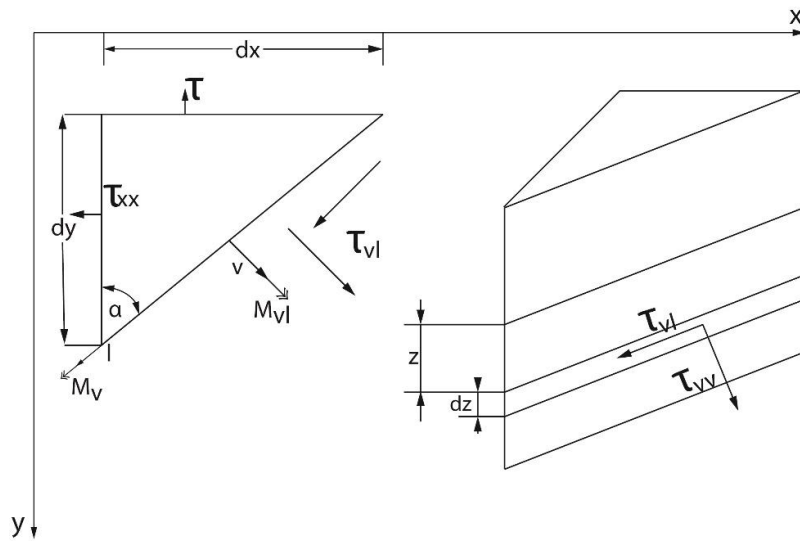
$$w = -\frac{M_1 - \nu M_2}{D(1 - \nu^2)} x^2 - \frac{M_2 - \nu M_1}{D(1 - \nu^2)} y^2 \quad (2.9)$$

Yazılabilir, buradan $M_x = M_y = M$ için

$$w = -\frac{M(x^2 + y^2)}{2D(1 + \nu)} \quad (2.10)$$

elde edilir.

Burulma momenti ise;



Şekil 2.4. Burulma momentleri [31]

$$\begin{aligned}\tau_{vv} &= \tau_{xx} \cos^2 a + \tau_{yy} \sin^2 a \\ \tau_{vl} &= \frac{1}{2}(\tau_{yy} - \tau_{xx}) \sin 2a\end{aligned}\quad (2.11)$$

Burada τ_{vv} tarafından oluşturulan eğilme momenti;

$$M_v = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{vv} z dz = M_x \cos^2 a + M_y \sin^2 a \quad (2.12)$$

yazılabilir.

$$M_x = -D(w_{xx} + \nu w_{yy}) \quad M_y = -D(w_{yy} + \nu w_{xx})$$

ifadeleri elde edilmiştir. Bu eşitlikler de kullanılınc;

$$M_x = -D(w_{xx} \cos^2 a + w_{yy} \sin^2 a) - \nu D(w_{xx} \cos^2 a + w_{yy} \sin^2 a) \quad (2.13)$$

elde edilir. Benzer biçimde τ_{vl} kesme gerilmesi tarafından oluşturulan burulma momenti;

$$M_{vl} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{vl} z dz = (M_x - M_y) \sin a \cdot \cos a$$

Ya da $\varepsilon_{vl} = -z w_{vl}$ ve $\tau_{vl} = -2Gz w_{vl}$ için;

$$M_{vl} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} 2Gz^2 w_{vl} dz = D(1 - \nu) w_{vl} \quad (2.14)$$

elde edilir.

Eğilme şekil değiştirme enerjisi:

M_x dy tarafından yapılan iş;

$$-\frac{1}{2}M_x w_{xx} dx dy$$

M_y dx tarafından yapılan iş;

$$-\frac{1}{2}M_y w_{yy} dy dx$$

şeklinde yazılabilir. Yapılan toplam iş;

$$du = -\frac{1}{2}(M_x w_{xx} + M_y w_{yy}) dx dy$$

$$du = \frac{D}{2}(w_{xx}^2 + w_{yy}^2 + 2\nu w_{xx} w_{yy}) dx dy \quad (2.15)$$

elde edilir. Buradan alanı A olarak ifade edilen bir plak için toplam şekil değiştirme enerjisi;

$$u = \frac{1}{2}DA(w_{xx}^2 + w_{yy}^2 + 2\nu w_{xx} w_{yy}) \quad (2.16)$$

olarak bulunur. Aynı zamanda, M_{xy} dy ve M_{yx} dx tarafından oluşturulan burulma şekil değiştirme enerjileri;

$$\frac{1}{2}M_{xy} w_{xy} dx dy$$

$$\frac{1}{2}M_{yx} w_{yx} dx dy$$

olarak yazılır.

Buradan toplam burulma şekil değiştirme enerjisi;

$$M_{xy}w_{xy}dxdy = D(1 - \nu)w_{xy}^2dxdy \quad (2.17)$$

olarak bulunur.

Eğer eğilme ve burulma için toplam şekil değiştirme enerjilerini yazarsak;

$$\begin{aligned} du &= \frac{D}{2}(w_{xx}^2 + w_{yy}^2 + 2\nu w_{xx}w_{yy})dxdy + D(1 - \nu)w_{xy}^2dxdy \\ du &= \frac{D}{2}[(w_{xx} + w_{yy})^2 - 2(1 - \nu)(w_{xx}w_{yy} - w_{xy}^2)]dxdy \end{aligned} \quad (2.18)$$

Buradan dikdörtgen bir plak için Laplace Operatörü;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.19)$$

Olmak üzere, dikdörtgen bir plak için toplam şekil değiştirme enerjisi;

$$u = \iint \frac{D}{2}[(\nabla^2 w)^2 - 2(1 - \nu)(w_{xx}w_{yy} - w_{xy}^2)]dxdy \quad (2.20)$$

olarak bulunur.

Dış kuvvet sebebiyle oluşan potansiyel enerji;

$$V = \iint_R q(x, y)w(x, y)dxdy \quad (2.21)$$

olarak yazılır. Burdan hareketle toplam potansiyel enerji;

$$V = \iint_R \frac{D}{2}[(\nabla^2 w)^2 - 2(1 - \nu)\{w_{xx}w_{yy} - w_{xy}^2\}]dxdy - \iint_R wq dxdy \quad (2.22)$$

elde edilir. \dot{w} hızına bağlı olarak kinetik enerji;

$$T = \frac{1}{2} \iint_R \rho h \dot{w}^2 dx dy \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir.

Kinetik ve potansiyel enerji denklemleri kullanılarak genelleştirilmiş Hamilton Prensipleri uygulanırsa;

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} \delta(T - U - V) = 0 \\ & \int_{t_1}^{t_2} \delta \left[\frac{1}{2} \iint_R \rho h \dot{w}^2 dx dy - \iint_R \frac{D}{2} [(\nabla^2 w) - 2(1 - \nu) \{w_{xx} w_{yy} - w_{xy}^2\}] dx dy \right] dt \\ & = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

Bu denklemden;

$$D \nabla^4 w + \rho h \ddot{w} = q(x, y, t) \quad (2.25)$$

şeklinde izotropik plak için hareket denklemi bulunmuş olur. Bu denklem plakların hareket denklemdir.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Plak Malzemesi

3.1.1. İnce plağın mekanik özellikleri

Plak malzemesi St52 karbon çeliğinden 1 mm kalınlığında sacdır. Plak malzemesinin Poisson oranı (ν): 0.3, Kayma modülü (G): 80.8 GPa, Elastisite modülü (E): 210 GPa'dır. Her bir plağın ağırlığı 311 gram ve yoğunluğu 7.775 g/cm³'tür. DKP sac olarak bilinen saclardan seçilen plak malzemesinin kimyasal bileşimi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

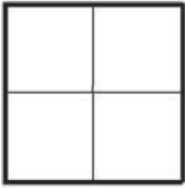
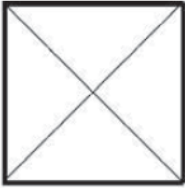
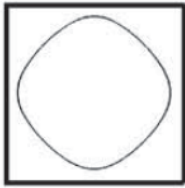
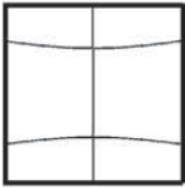
Tablo 3.1. Plak malzemesinin kimyasal bileşimi

| KİMYASAL BİLEŞİM | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C % | Mn % | P % | S % | Si % | Al % |
| 0.047 | 0.186 | 0.006 | 0.006 | 0.010 | 0.051 |

3.1.2. Modal analizi yapılacak plaklar ve hasar konumları

Bir kaynaktan çıkan dalga tepesi ile diğer özdeş kaynaktan çıkan dalga çukuru karşılaşırsa birbirlerini sönmümlerler. Hareketin, yer değiştirmenin gözlenmediği bu noktaya düğüm noktası denir. Bu noktaların da art arda gelmesi nedeniyle bir çizgi ile birleştirildiklerinde oluşan çizgiye düğüm çizgisi adı verilir [33]. Plağın her bir doğal frekansında düğüm çizgilerinin o frekansa özgü bir şekil aldığı görülür buna da mod şekli denir.

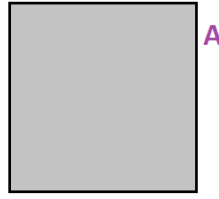
Leissa'nın kare plak mod şekillerini gösterdiği bir çalışmada [34] aşağıdaki şekilde görülen ilk 4 mod şeklinin düğüm çizgileri baz alınarak düğüm çizgilerinin olduğu yerlere yüzey hasarları verilmiştir. 14 plağa bu şekilde yüzey hasarı verilmiştir, 1 plak ise hasarsızdır; toplamda 15 plak modeli vardır.

| Mode No. | | | |
|---|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|  |  |  |  |

Şekil 3.1. Leissa'nın çalışmasında kare plakların mod şekillerinin gösterimi [34]

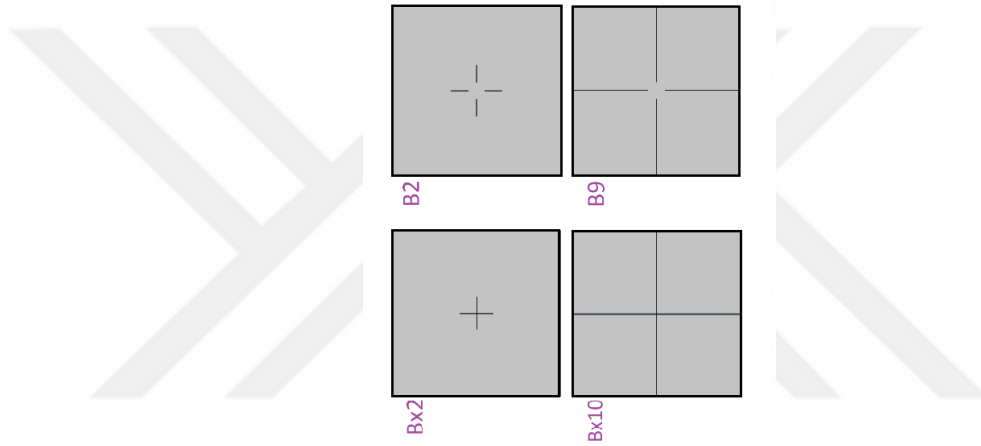
Nümerik ve deneysel analizler için kullanılan plak parametreleri; plak geometrisi 200mm x 200mm x 1mm, hasar derinliği 0.3 mm ve hasar genişliği 0.3 mm dir. Hasar uzunlukları ise minimum 2 cm, maksimum 9, 10 cm veya kenardan kenara olarak Şekil 3.2., Şekil 3.3., Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'teki gibi uygulanmıştır. Hasarlar lazer kesme yöntemi ile oluşturulmuştur.

A plağı, yalın halde hasarsız olarak diğerleri ile aynı ölçülerdedir. A plağının ilk 4 mod şekli incelenmiş ve mod şekillerine göre hasar verilen plak grupları oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Hasarsız A plağının şematik gösterimi

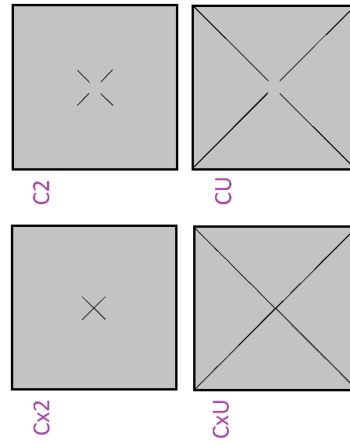
Leissa'nın çalışmasında kare plakların 1. modundaki düğüm çizgilerine [34] uygun hasar verilen plaklar: B grubu ve Bx grubu plaklardır (Şekil 3.2.).



Şekil 3.3. 1.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi

B2; Her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip plak, B9; her bir hasar çizgisi 9cm uzunluğa sahip plaktır. Bx2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğuna sahip hasarlar arasında boşluk olmayan plak, Bx10; her bir hasar çizgisi 10cm uzunluğa sahip hasarlar arasında boşluk olmayan plaktır.

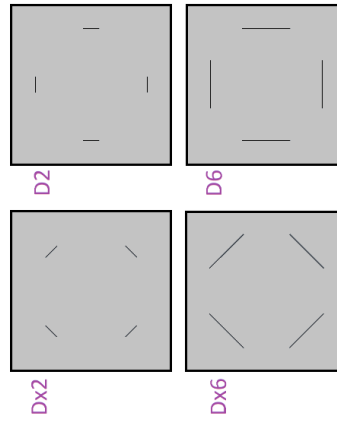
Leissa'nın çalışmasında kare plakların 2. modundaki düğüm çizgilerine [34] uygun hasar verilen plaklar: C grubu ve Cx grubu plaklardır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.4. 2.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi

C2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip plak, CU; C plağının uçtan uca hasar verilmiş halidir. Cx2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip hasarlar arasında boşluk olmayan plak, CxU; plak kenarları arasında uçtan uca hasar uzunluğuna sahip hasarlar arasında boşluk olmayan plaktır.

Leissa'nın çalışmasında kare plakların 3. modundaki düğüm çizgilerine [34] uygun hasar verilen plaklar: D grubu ve Dx grubu plaklardır (Şekil 3.4.).

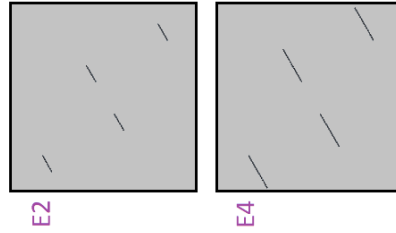


Şekil 3.5. 3.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi

D2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip plak, D6; her bir hasar çizgisi 6cm uzunluğa sahip plaktır. Dx2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip hasarlar

arasında boşluk olmayan plak, $D \times 6$; her bir hasar çizgisi 6cm uzunluğa sahip hasarlar arasında boşluk olmayan plaktır.

Leissa'nın çalışmasında kare plakların 4. modundaki düğüm çizgilerine [34] uygun hasar verilen plaklar: D grubu ve D_x grubu plaklardır (Şekil 3.5.).



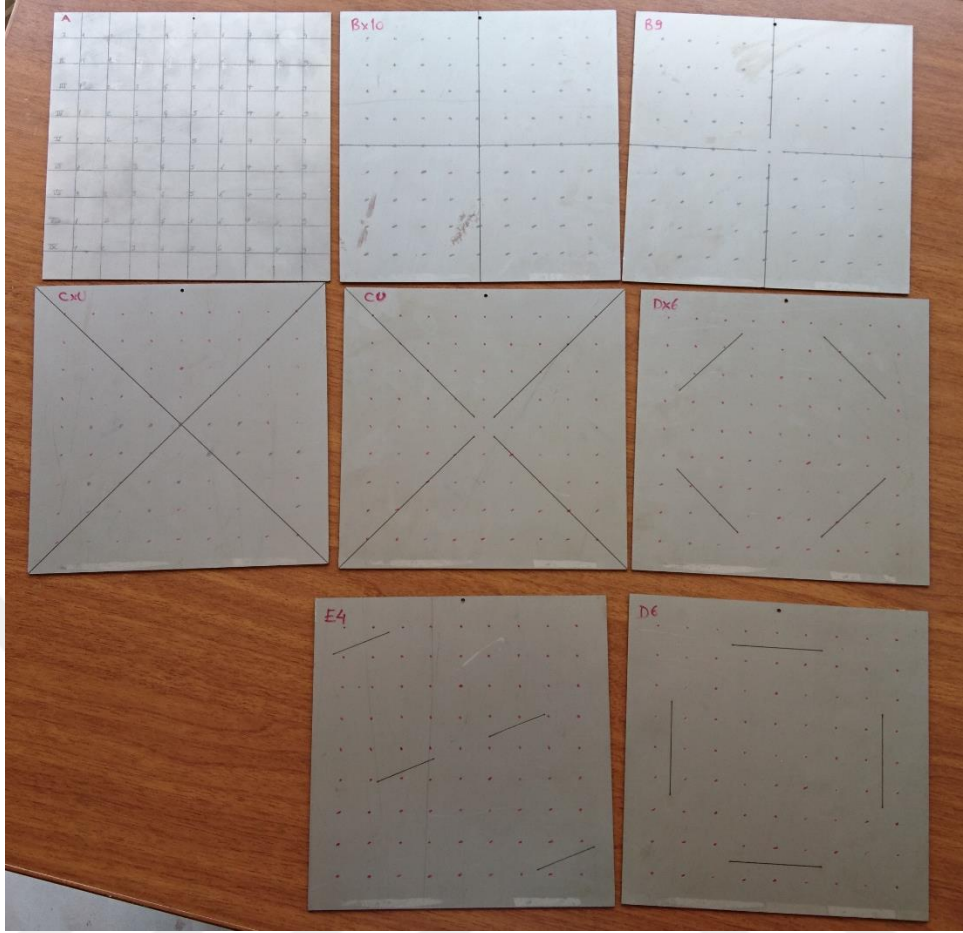
Şekil 3.6. 4.mod şeklinde oluşan düğüm çizgilerine uygun hasarların plaklardaki şematik gösterimi

E2; her bir hasar çizgisi 2cm uzunluğa sahip plak, E4; her bir hasar çizgisi 4cm uzunluğa sahip plaktır.

Deneylerde kullanılan plak modelleri aşağıdaki şekillerde görüldüğü gibidir.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan bazı plak modelleri



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan plak modelleri

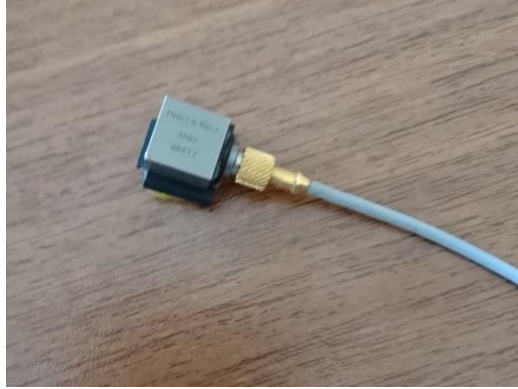
3.2. Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

3.2.1. Titreşim verisi alma ekipmanları

3.2.1.1. İvmeölçer

Brüel&Kjaer firmasına ait 100 mV/g hassasiyetine sahip 4.8 gram ağırlığında Type 4507 model ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçer, 98.41 mV/g hassasiyete sahiptir ve 0.3 Hz ile 6 kHz frekans aralığında $\pm 10\%$ tolerans ile çalışır. İvmeölçerin ideal çalışma sıcaklığı 22.5 °C'dir. İvmeölçerin doğal frekansı 18000 Hz'dir ve deneyde çalışma aralığı 0-400 Hz arasında olduğundan deneyde kullanmak için uygundur. Yapılan çalışmada tek ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer ile birlikte

İvmeölçer-tabanlığı da kullanılmıştır ve deney sırasında plak yüzeyine, tabanlığın altına sürülen balmumu ile yapıştırılmıştır.



şekil 3.9. İvmeölçer

3.2.1.2. Darbe çekici

Brüel&Kjaer üretimi Type 8206-002 model darbe çekici kullanılmıştır. Bu darbe çekicinin hassasiyeti 2.27 mv/N'dir. Deney sırasında plağa darbe vermek amacıyla kullanılmıştır. -73° ila 60° C arasında çalışabilir.



şekil 3.10. Darbe çekici

Tablo 3.2. Çekiç ve ivmeölçerin hassaslık ayarı

| | Max Volts | Quantity | mv/EU | Coupling |
|-----------|-----------|--------------|-------|----------|
| Çekiç | 0.1 | Force | 2.27 | CCLD |
| İvmeölçer | 10.0 | Acceleration | 98.41 | CCLD |

3.2.1.3. Sinyal şartlandırıcı

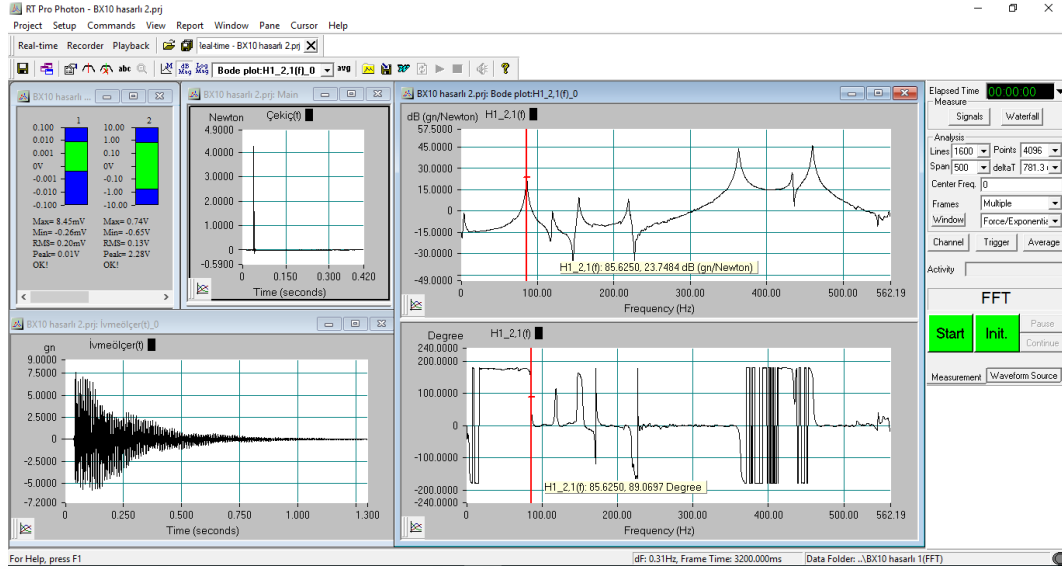
Brüel&Kjaer üretimi analizör (sinyal şartlandırıcı) kullanılmıştır. 4 girişe sahiptir. 1.girişe darbe çekici bağlanmış, 2.girişe ivmeölçer bağlanmıştır. USB bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanmıştır.



Şekil 3.11. Sinyal şartlandırıcı

3.2.1.4. Sinyal analiz yazılımı

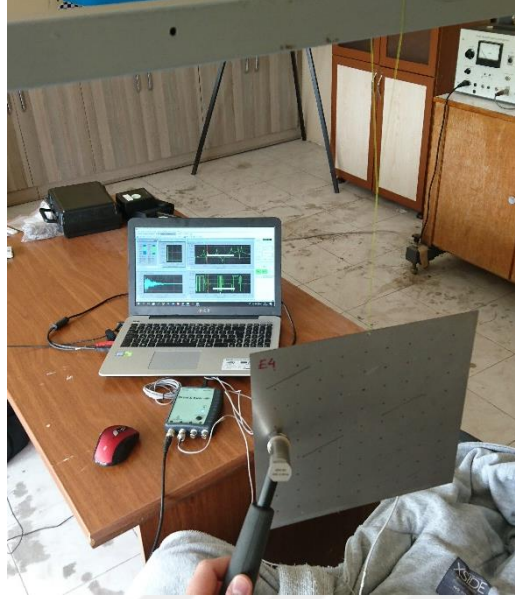
DeneySEL çalışma boyunca Brüel&Kjaer tarafından geliştirilen RT Pro Photon+ yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın ekran görüntüsü aşağıda görüldüğü gibidir.



Şekil 3.12. RT Pro Photon+ programının ekran görüntüsü

3.2.2. Serbest-serbest sınır şartları için çerçeve askı

Çerçeve askılar, titreşim analizi yapılacak sistemin serbest hareket edecek şekilde düşey asılması için yapılmış yapılardır. Deney sırasında çerçeve askıya asılan sisteme ivmeölçer yapıştırılır ve darbe çekici ile vurulur. Bu deneyde kullandığımız çerçeve askıda 1000 mm genişlik ve 1000 mm yüksekliğe kadar olan cisimler serbest hareket edecek şekilde düşey askıda bırakılabilir.



Şekil 3.13. Örnek bir plağın çerçeve askıya asılması

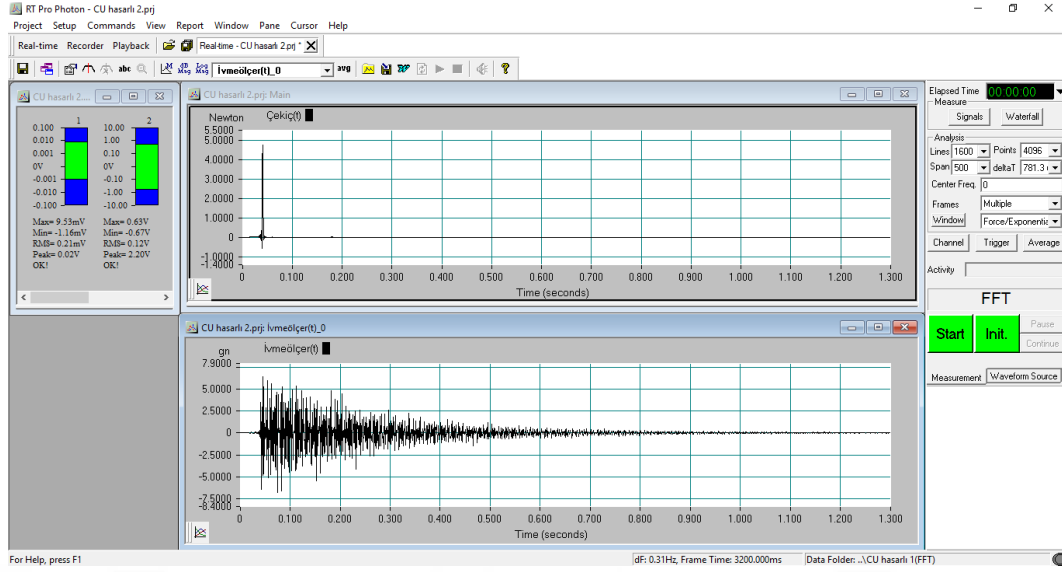
3.3. Deneysel Modal Analiz

Bu deneyi yapmadan önce deney düzeneği kurulmuştur. Bilgisayarda verileri analiz edecek olan RT Pro Photon+ yazılımının kalibrasyon ayarları yapılarak deneye hazır hale getirildi.

Tablo 3.3. Test için kullanılan ölçüm parametreleri

| Parametre | Değer |
|----------------------------|-------------------|
| Frekans genişliği | 0-400 Hz |
| Frekans çözünürlüğü | 0.625 Hz |
| Örnek sayısı | 800 |
| Ölçüm süresi | 1.6 s |
| Pencereleme (cevap/tahrik) | (Üniform/Üniform) |

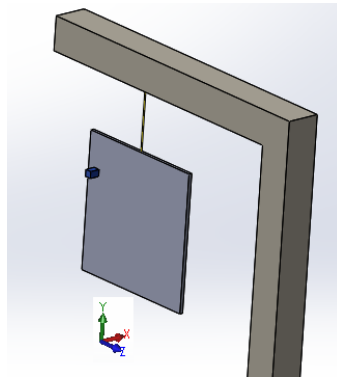
Deneyselerde, plaklar 9 kirişe ayrılmış, her kirişte 9 vuruş noktası belirlenmiştir ve her kirişin analizinde o kirişin üzerine ivmeölçer yerleştirilip, her bir düğüme modal çekiçle darbe uygulanarak ilgili düğüm noktaları için FTF 'ler elde edilmiştir. Bu şekilde her plaktan 81 adet FTF ölçülmüştür.



Şekil 3.14. Kuvvet etkimesi ve ivmeölçerden alınan zaman sinyalleri

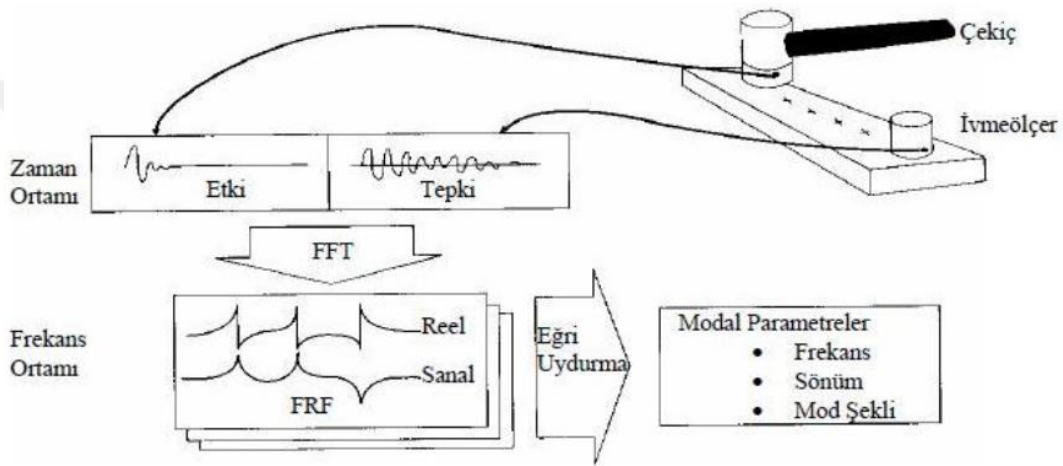
3.3.1. Titreşim verisi alma

Titreşim verisi almak için bütün deney araçlarının hazır olması gereklidir. Önce doğal frekanslarını elde etmek istediğimiz sistemin serbest hareket edecek şekilde düşey askıda bırakılması ya da yumuşak zemine koyulması gerekir; bu deneyde sistem serbest hareket edecek şekilde düşey askıda bırakılmıştır. Serbest hareket edecek şekilde düşey askıda bırakılan sisteme ivmeölçer tutturulur. İvmeölçer belli eksenindeki ivmeyi ölçeceği için tutturulduğu eksen önemlidir, bu deneyde X eksenine tutturulmuştur (Şekil 3.11.). Daha sonra darbe çekici ve ivmeölçerin analizöre (sinyal şartlandırıcı), analizörün de bilgisayara bağlı olduğundan emin olunmalıdır.



Şekil 3.15. Askıda bırakılmış bir hasarsız plak ile ivmeölçerin eksenel bilgisi

Deneysel modal analiz ölçümlerini yapmak amacıyla deney sırasında, özel olarak deneysel titreşim analizleri için geliştirilmiş olan (Brüel&Kjaer) sinyal toplama ve işleme modülü kullanılmıştır. Örnekleme frekansı ve hassasiyet, bilgisayar programı içerisinde ayarlanabilmekte olup bu bilgiler doğrultusunda ivmeölçer ve çekiçten gelen sinyaller toplanarak işlenmektedir. Elde edilen tüm veriler FFT diyagramlarına aktarılmaktadır. FFT fonksiyonları işlenerek titreşim sistemine ait rezonans frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri elde edilebilmektedir.



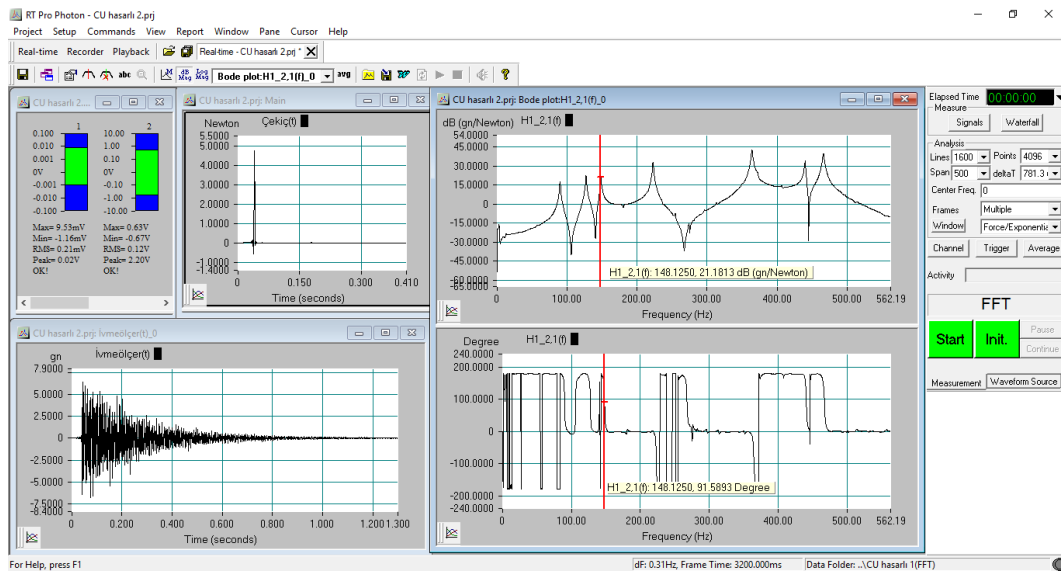
Şekil 3.16. Deneysel modal analizde FFT ölçüm düzeneği [35]

Modelleri titreştirmek amacıyla bu iş için özel olarak tasarlanan bir çekiçten (Endevko, 2302 – 10 tip) faydalanılmıştır. Darbe etkisi uygulandığında, çekiğin ucuna yerleştirilmiş bulunan sinyal algılayıcısı (ivmeölçer) sayesinde, uygulanan kuvveti ölçebilmektedir. Deneyslerde kullanılan çekiç, çelik uçlu olup, 1 Pc/N hassasiyetine sahiptir.

Modellerin tepkilerini ölçmek amacıyla 4507B (Brüel&Kjaer) tipi tek eksenli piezoelektrik ivmeölçer bağlanmıştır. Bir piezoelektrik ivmeölçer; piezoelektrik eleman, sismik kütleler ve sinyal yükselticiden meydana gelir. Piezoelektrik elemanın bir yüzü, algılayıcının tabanındaki katı desteğe bağlıdır. Sismik kütle ise diğer tarafındadır. İvmeölçer titreşim etkisinde kaldığında, piezoelektrik elemana etki eden bir kuvvet oluşur. Newton kanunu'na göre bu kuvvet, sismik kütle için yarattığı ivmenin sonucudur. Piezoelektrik ilkesine göre, uygulanan bu kuvvetle

orantılı bir şekilde elektriksel yük çıkışı gözlemlenir. Sismik kütle, sabit bir değerde olduğundan dolayı ortaya çıkan bu elektriksel yük, kütlelerin ivmesi ile doğru orantılıdır. Çok düşük voltajlarda olan bu sinyaller, yükseltici tarafından daha yüksek seviyelere çıkartılarak sinyal işleme modülüne iletilir. Yüksek hassasiyete sahip olan piezoelektrik ivmeölçerler ile oldukça geniş frekans aralığındaki titreşim hareketi incelenebilmektedir.

Plakanın deneysel modal analiz ölçümleri serbest – serbest sınır şartlarını sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Daha sonra model üzerinde çekicinin vurulacağı ve ivmeölçerlerin bağlanacağı noktalar belirlenmiştir. Belirli aralıklarla işaretlenen bu noktalar kullanılarak model titreştirilmiş ve ölçümler alınmıştır. Ölçüm işlemi için ölçüm cihazının mevcut modelde oluşan sinyallere göre ayarlanması gerekmektedir. Bunun için modelde öncelikle ölçümün yapılacağı frekans aralığı belirlenmiştir. Ölçüm frekans aralığı belirlendikten sonra modele çekiçle birkaç kez vurularak ivmeölçer hassasiyetleri belirlenmiştir. Ölçüm işlemi için yapıya belirlenen noktadan bir kez vurulduktan sonra ölçüm cihazının ekranında ilk frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Bir sonraki vuruş için titreşimin tamamen yapıdan çıkması yani kararlı durum şartlarının oluşması için belirli bir süre beklenmiştir. Model üzerinde belirlenen noktalarda ivmeölçer dolaştırılarak ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 3.17. CU plağının RT Pro Photon+ programında çözüm ekranı

3.3.1.1. Hasarsız A plağının doğal frekanslarının deneysel tespiti

Üzerinde hiç hasar bulunmayan yalın bir kare (200 x 200 mm) plağın (A plağı) doğal frekansları deneysel yöntemlerle tespit edildi. Bu veriler hasar verilmiş plaklarla karşılaştırmak için elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Hasarlı plakların doğal frekans değişimlerini kıyaslamak için hasarsız A plağının deneysel analizden elde edilen 4 doğal frekansı

| Mod\Tip | A [Hz] |
|---------|------------|
| 1 | 92,18 |
| 2 | Bulunamadı |
| 3 | 141,56 |
| 4 | 226,25 |

3.3.1.2. Hasarlı plakların doğal frekanslarının deneysel tespiti

Lazer ile hassas kestirilen plaklar ve hasar bırakılan plakların Photon+ ekipmanı ile elde edilen Hz cinsinden doğal frekans sonuçları aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.5. 1.mod şekline göre hasar verilmiş B9 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | B9 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|
| 1 | 92,18 | 90,93 | -1,356 |
| 2 | - | 127,50 | - |
| 3 | 141,56 | 144,37 | +1,985 |
| 4 | 226,25 | 222,18 | -1,798 |

Tablo 3.6. 1.mod şekline göre hasar verilmiş Bx10 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | Bx10 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|-----------|----------|
| 1 | 92,18 | 85,62 | -7,116 |
| 2 | - | 118,75 | - |
| 3 | 141,56 | 154,06 | +8,830 |
| 4 | 226,25 | 216,56 | -4,282 |

Tablo 3.7. 2.mod şekline göre hasar verilmiş CU plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | CU [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|
| 1 | 92,18 | 90,31 | -2,028 |
| 2 | - | 127,18 | - |
| 3 | 141,56 | 148,12 | +4,634 |
| 4 | 226,25 | 222,81 | -1,520 |

Tablo 3.8. 2.mod şekline göre hasar verilmiş CxU plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | CxU [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|----------|----------|
| 1 | 92,18 | 88,75 | -3,721 |
| 2 | - | 124,06 | - |
| 3 | 141,56 | 150,93 | +6,619 |
| 4 | 226,25 | 223,12 | -1,383 |

Tablo 3.9. 3.mod şekline göre hasar verilmiş D6 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | D6 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|
| 1 | 92,18 | 91,87 | -0,336 |
| 2 | - | 130,93 | - |
| 3 | 141,56 | 140,00 | -1,102 |
| 4 | 226,25 | 224,68 | -0,693 |

Tablo 3.10. 3.mod şekline göre hasar verilmiş Dx6 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | Dx6 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|----------|----------|
| 1 | 92,18 | 90,31 | -2,028 |
| 2 | - | - | - |
| 3 | 141,56 | 136,56 | -3,532 |
| 4 | 226,25 | 218,75 | -3,314 |

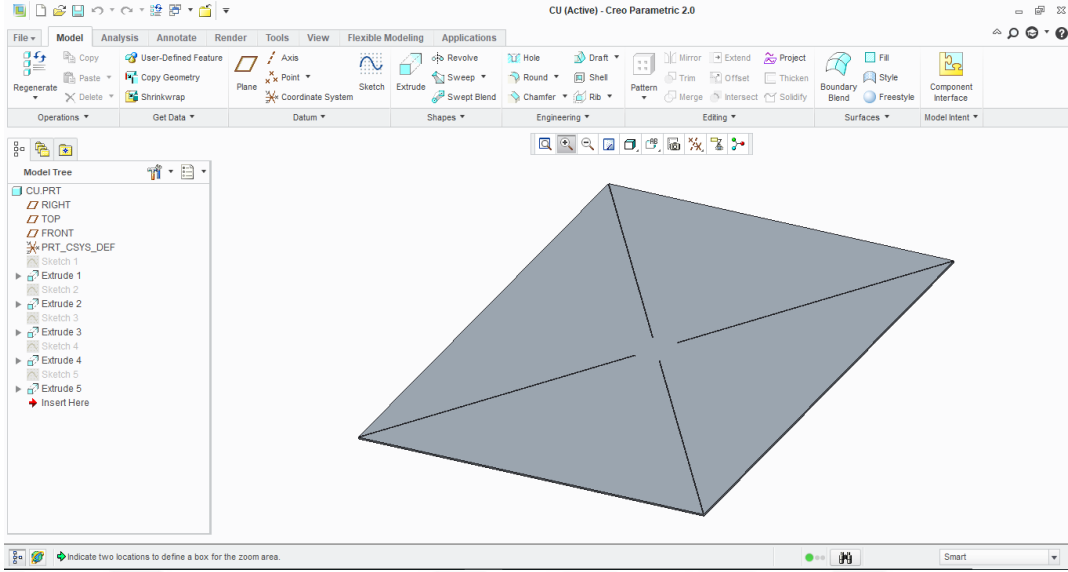
Tablo 3.11. 4.mod şekline göre hasar verilmiş E4 plağı ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | E4 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|
| 1 | 92,18 | 88,00 | -4,534 |
| 2 | - | - | - |
| 3 | 141,56 | 140,31 | -0,883 |
| 4 | 226,25 | 222,18 | -1,798 |

3.4. Sonlu Elemanlar Programı İle Modal Analiz

3.4.1. Plakların katı modeli

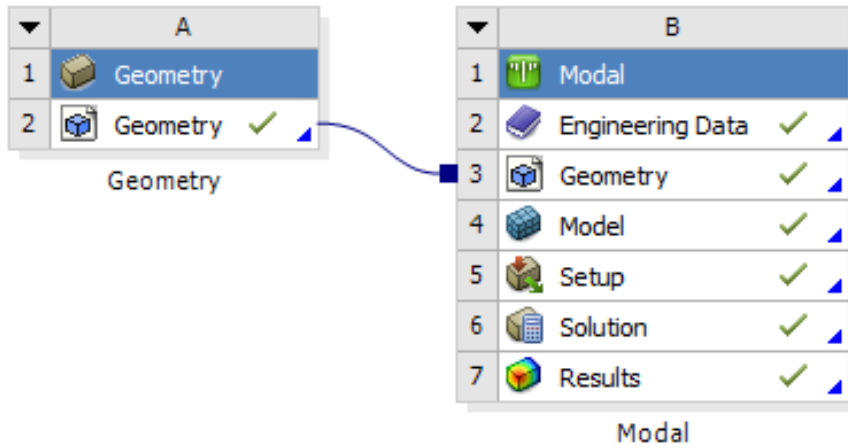
Bütün plakların katı model (3 boyutlu) çizimleri Creo 2.0 programında çizilmiştir. Örnek bir Creo ekran görüntüsü aşağıdaki şekilde (Şekil 3.11.) görüldüğü gibidir.



Şekil 3.18. Örnek bir hasarlı plağın Creo programında hazırlanan katı modeli

3.4.2. Plakların sonlu elemanlar modeli

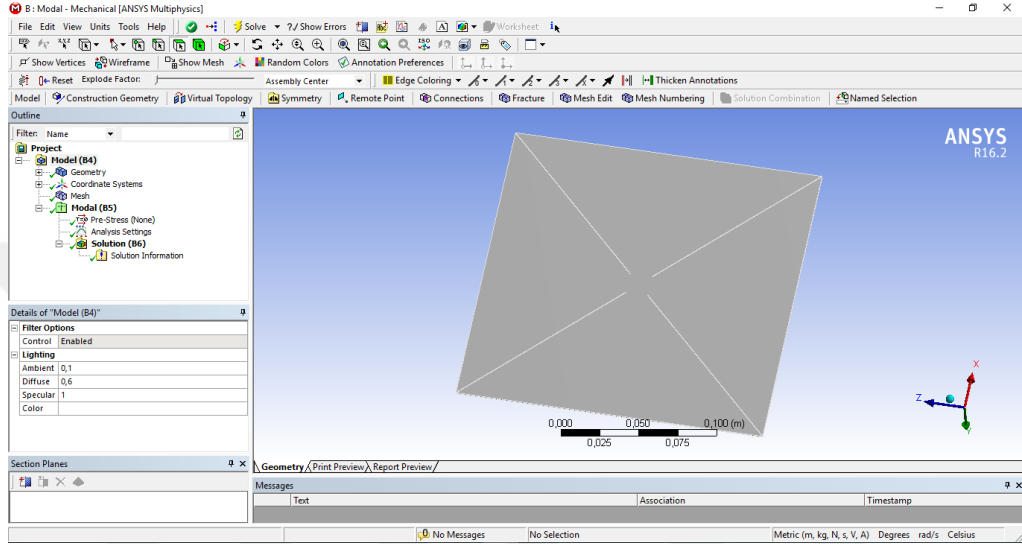
Creo programında plakların katı model bire bir ebatlarda çizimi yapıldıktan sonra nümerik analizler için sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programında açılan çözüm ekranına Geometri modülü ve Modal modülü sürüklenip bırakılır. Bu iki modül arasında gerekli ilişkilendirme yapılır.



Şekil 3.19. Problemin sonlu elemanlar programındaki çözüm modeli

3.4.3. Geometrinin tanımlanması

Creo programında modellenen plaklar “.stp” uzantısı ile kaydedilerek ANSYS’e aktarılır. Bu uzantılarla kaydedilen dosyalar, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmeye uygundur. Bu tür dosyaları ANSYS tanımlayabilir ve analizde kullanır.

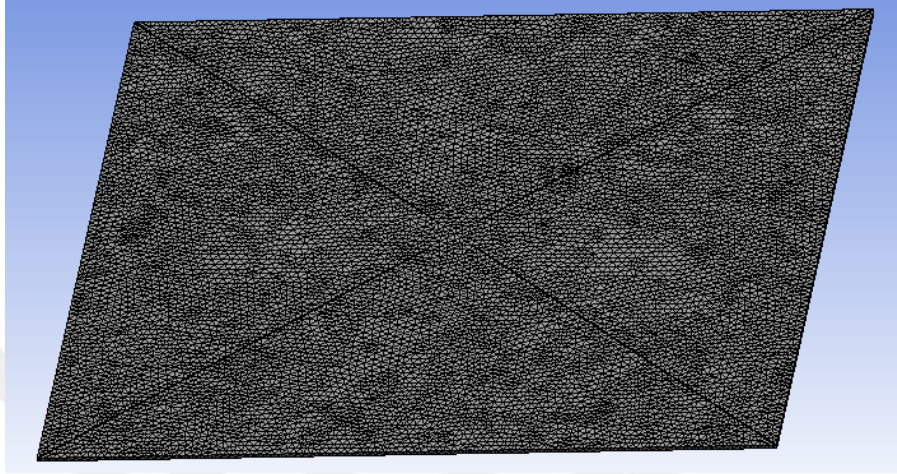


Şekil 3.20. ANSYS programında Modal modülünde örnek bir hasarlı plak geometrisi

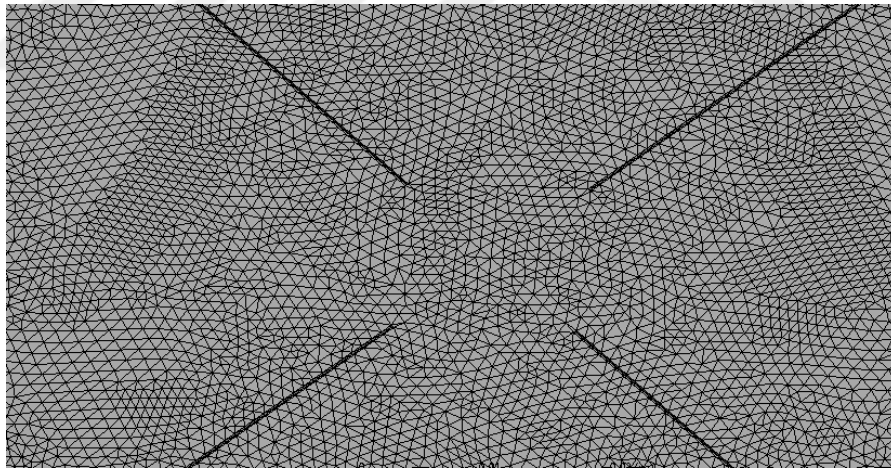
3.4.4. Modal analizin tanımlanması ve sonlu elemanlar ağı (mesh)

Sonlu elemanlar programında tanımlanan plak geometrisi, deneylere tabi tutulan gerçek plağın bire bir ölçekli halidir; 200 mm kenar uzunluğuna sahip 1 mm kalınlığında kare plak. Plağın malzeme özellikleri de aynıdır, yaylanmayı sağlayan elastisite modülü $E = 210 \text{ GPa}$, kütlesi $m = 311 \text{ gram}$ ve yoğunluğu $d = 7,775 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu şekilde ANSYS'de tanımlanan geometri meşlenerek nihai çözüm ağı oluşturulmuştur. Mesh sizing (mesh boyutu) olarak 1 mm'den başlayarak sırasıyla 0,5 mm, 0,3 mm, 0,1 mm derinliğe kadar inilmiş; 0,1 mm mesh sizing'de kullanılan Workstation yetersiz kaldığından daha detaylı mesh yapılamamıştır. 0,5 mm ve 0,3 mm nümerik analiz sonuçları birbirine yakın çıktığından çözümün gerçeğe yakın sonuç vermesi ve zaman tasarrufu için 0,5 mm'lik mesh boyutunda çözüm ağı (mesh) uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi yapılan bütün plaklara sırasıyla; Mesh > Body Sizing > Element Size: 0,5 mm adımları uygulanarak mesh

optimizasyonu yapılmıştır ve bu optimizasyona göre elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Örnek olarak hasarsız A plağının mesh ağında 1766405 node 320000 element vardır. ANSYS MODAL’da ilk 4 doğal frekansı gösterecek şekilde, plakların sönümsüz olarak nümerik modal analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.21. Örnek hasarlı plak için oluşturulan çözüm ağı (mesh)



Şekil 3.22. Örnek hasarlı plak üzerindeki çözüm ağının (mesh) yakından görünümü

3.4.5. Sonlu elemanlar analizi

ANSYS programında gerekli veriler ve malzeme özellikleri girildikten sonra mesh çözüm ağı oluşturuldu ve çözüm komutu verildi. Her plak için aynı işlemler yapıldı ve sırasıyla analiz sonuçları alındı. Her plağın enine titreşim ilk 4 doğal frekans değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

3.4.5.1. Hasarsız A plağının doğal frekanslarının nümerik analizle tespiti

Üzerinde hiç hasar bulunmayan yalın bir kare (200 x 200 mm) plağın (A plağı) doğal frekansları sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Modal’da nümerik yöntemlerle tespit edildi. Bu veriler hasar verilmiş plaklarla karşılaştırmak için elde edilmiştir.

Tablo 3.12. Hasarlı plakların doğal frekans değişimlerini kıyaslamak için hasarsız A plağının nümerik analizden elde edilen 4 doğal frekansı

| Mod\Tip | A [Hz] |
|---------|--------|
| 1 | 81,691 |
| 2 | 119,08 |
| 3 | 147,48 |
| 4 | 211,09 |

3.4.5.2. Hasarlı plakların doğal frekanslarının nümerik analizle tespiti

1-1 ölçekli olarak plaklar ve üzerindeki hasarlar Creo 2.0 programında modellenmiş ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımının Modal modülünde titreşim analizi yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.13. 1.mod şekline göre hasar verilmiş B2 ve B9 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | B2 [Hz] | Değişim% | B9 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,64 | -0,062 | 81,485 | -0,252 |
| 2 | 119,08 | 118,96 | -0,101 | 118,4 | -0,571 |
| 3 | 147,48 | 147,18 | -0,203 | 146,25 | -0,834 |
| 4 | 211,09 | 211,06 | -0,014 | 210,15 | -0,445 |

Tablo 3.14. 1.mod şekline göre hasar verilmiş Bx2 ve Bx10 plakları ile yalın A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | Bx2 [Hz] | Değişim% | Bx10 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|----------|----------|-----------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,639 | -0,063 | 81,457 | -0,286 |
| 2 | 119,08 | 118,96 | -0,1 | 118,33 | -0,629 |
| 3 | 147,48 | 147,16 | -0,216 | 146,06 | -0,962 |
| 4 | 211,09 | 211,08 | -0,004 | 210,15 | -0,445 |

Tablo 3.15. 2.mod şekline göre hasar verilmiş C2 ve CU plakları ile yalnız A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | C2 [Hz] | Değişim% | CU [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,631 | -0,073 | 81,409 | -0,345 |
| 2 | 119,08 | 118,98 | -0,083 | 118,79 | -0,243 |
| 3 | 147,48 | 147,2 | -0,189 | 146,87 | -0,413 |
| 4 | 211,09 | 211,08 | -0,004 | 210,92 | -0,08 |

Tablo 3.16. 2.mod şekline göre hasar verilmiş Cx2 ve CxU plakları ile yalnız A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | Cx2 [Hz] | Değişim% | CxU [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,629 | -0,075 | 81,372 | -0,39 |
| 2 | 119,08 | 118,98 | -0,083 | 118,74 | -0,285 |
| 3 | 147,48 | 147,16 | -0,216 | 146,68 | -0,542 |
| 4 | 211,09 | 211,08 | -0,004 | 210,92 | -0,08 |

Tablo 3.17. 3.mod şekline göre hasar verilmiş D2 ve D6 plakları ile yalnız A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | D2 [Hz] | Değişim% | D6 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,653 | -0,046 | 81,577 | -0,139 |
| 2 | 119,08 | 119,07 | -0,008 | 119,06 | -0,016 |
| 3 | 147,48 | 147,43 | -0,033 | 147,33 | -0,101 |
| 4 | 211,09 | 211,01 | -0,037 | 210,85 | -0,113 |

Tablo 3.18. 3.mod şekline göre hasar verilmiş Dx2 ve Dx6 plakları ile yalnız A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | Dx2 [Hz] | Değişim% | Dx6 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,675 | -0,019 | 81,629 | -0,075 |
| 2 | 119,08 | 119,04 | -0,033 | 118,94 | -0,117 |
| 3 | 147,48 | 147,39 | -0,061 | 147,18 | -0,203 |
| 4 | 211,09 | 210,96 | -0,061 | 210,63 | -0,217 |

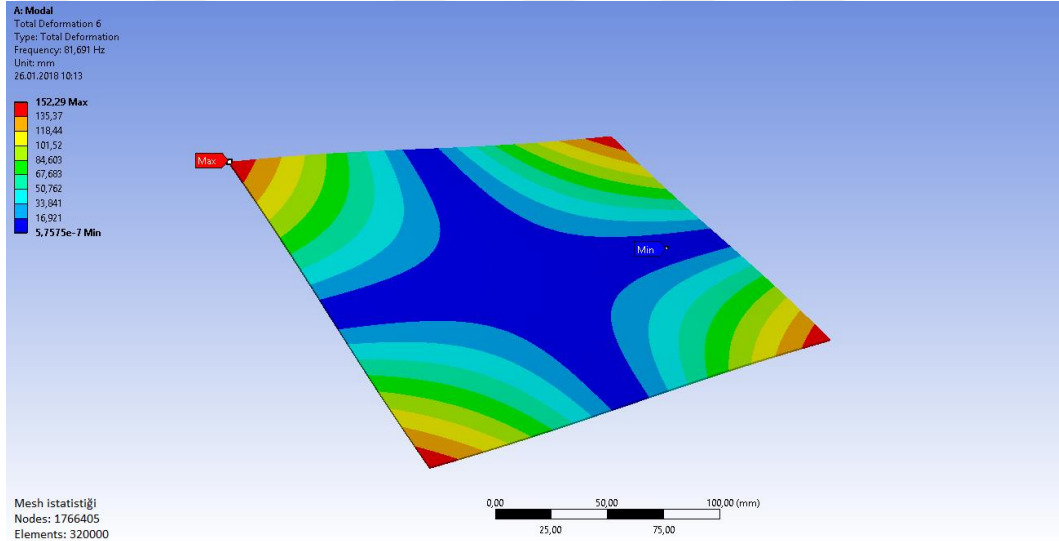
Tablo 3.19. 4.mod şekline göre hasar verilmiş E2 ve E4 plakları ile yalnız A plağının ilk 4 doğal frekansının kıyaslanması

| Mod\Tip | A [Hz] | E2 [Hz] | Değişim% | E4 [Hz] | Değişim% |
|---------|--------|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 81,691 | 81,65 | -0,05 | 81,602 | -0,108 |
| 2 | 119,08 | 118,99 | -0,075 | 118,91 | -0,142 |
| 3 | 147,48 | 147,29 | -0,128 | 147,13 | -0,237 |
| 4 | 211,09 | 211 | -0,042 | 210,83 | -0,123 |

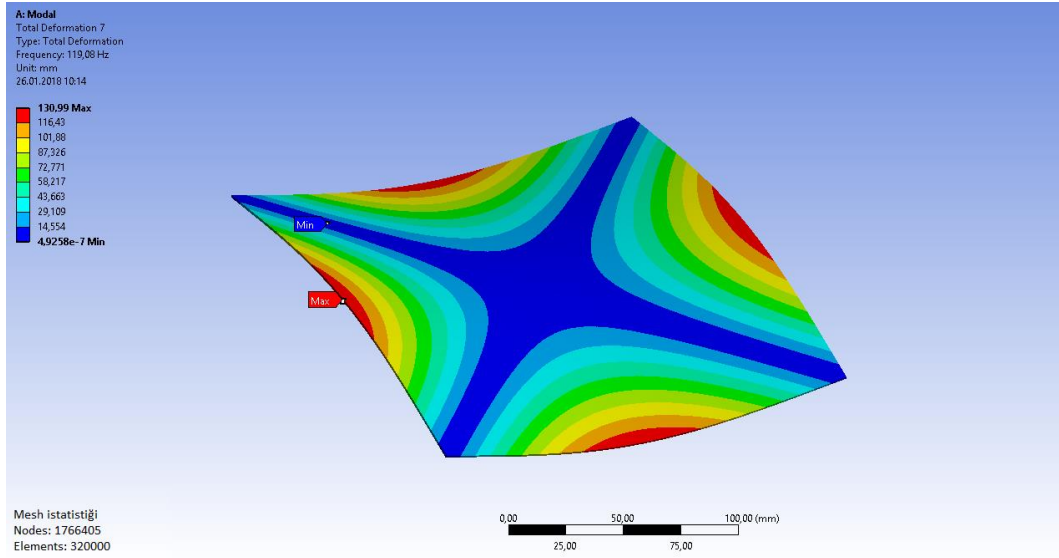
BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hasarsız A Plağının Nümerik Analizden Elde Edilmiş Mod Şekilleri

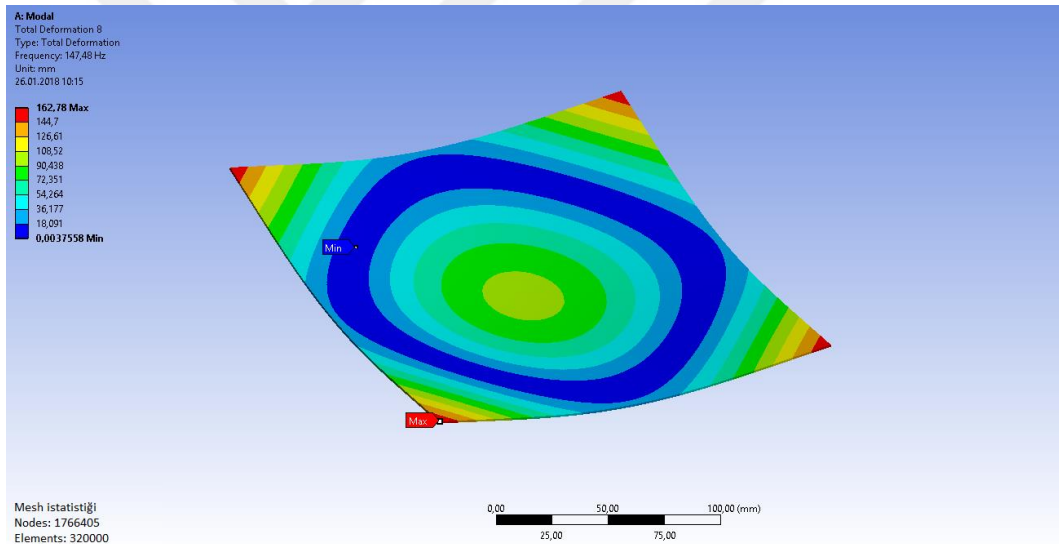
Analizlerde kullanılan hiç hasar verilmemiş A plağının ANSYS sonlu elemanlar programında elde edilen 4 mod şekli (4 frekans için) aşağıda görüldüğü gibidir.



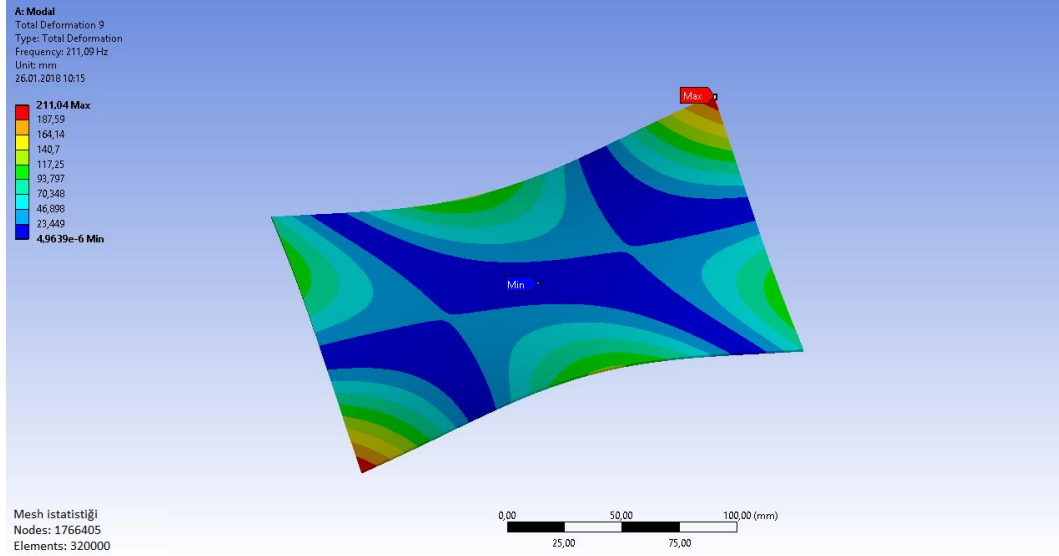
Şekil 4.1. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 1. Mod şekli



Şekil 4.2. A plağının ANSYS'de elde edilmiş 2. Mod şekli



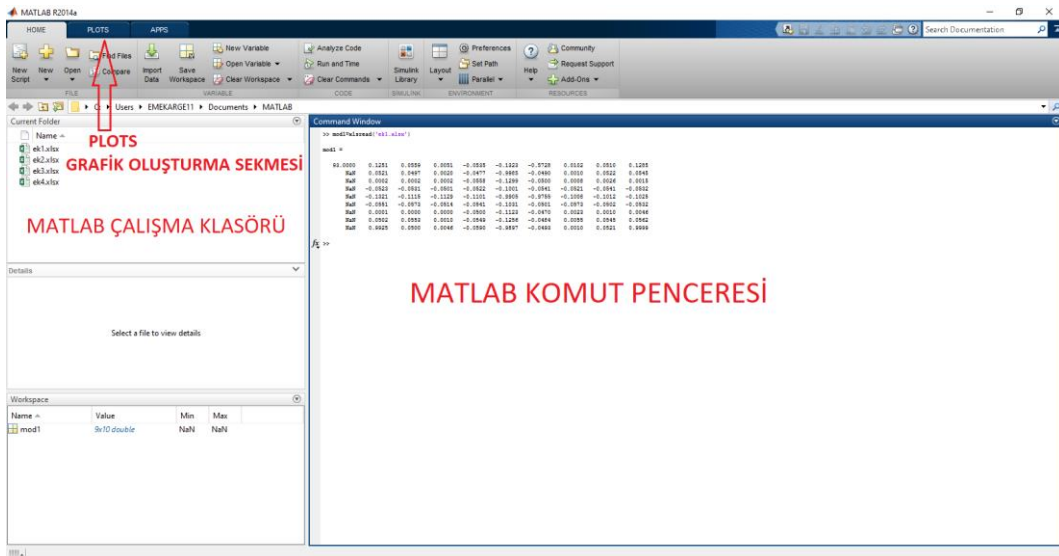
Şekil 4.3. A plağının ANSYS'de elde edilmiş 3. Mod şekli



Şekil 4.4. A plağının ANSYS’de elde edilmiş 4. Mod şekli

4.2. Hasarsız A Plağının Deneysel Analizden Elde Edilmiş Mod Şekilleri

PHOTON+ deney ekipmanı yardımıyla yapılan deneylerde titreşim verileri, deney sırasında bilgisayarda RT Pro PHOTON yazılımı ekranında Excel dosyası olarak elde edildi. Bu Excel dosyaları bilgisayarda MATLAB’ın çalışma klasörüne atılır. Daha sonra bilgisayarda MATLAB programı açılır.



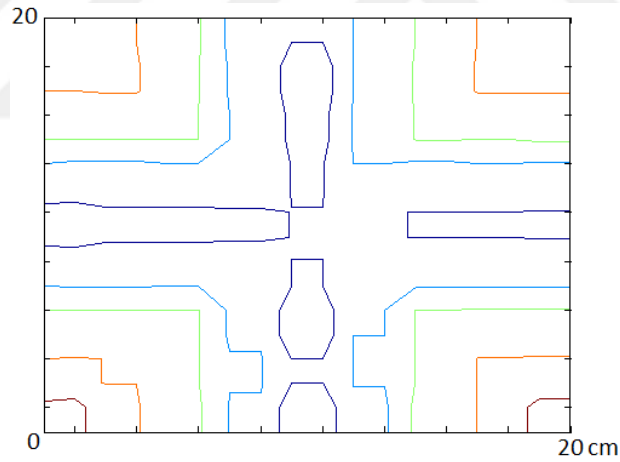
Şekil 4.5. MATLAB ekranı

Bu çalışmada excel dosyaları ek1, ek2, ek3, ek4 olarak adlandırıldığı için tırnak içinde her mod şekli için çalışma klasöründeki ad yazılır. Örneğin 1. Mod şeklini oluşturacak verileri içeren excel dosyasının adı (ek1.xlsx) aşağıdaki komutta görüldüğü gibi yazılarak veriler MATLAB komut penceresine çağrılır:

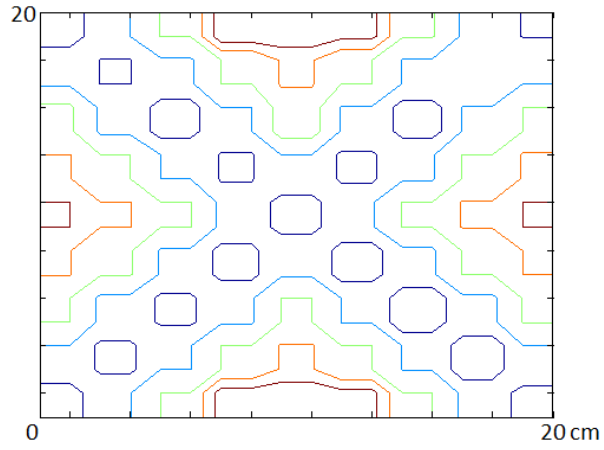
```
Mod=xlsread('ek1.xlsx')
```

Daha sonra MATLAB ekranında PLOTS sekmesine geçilir ve Contour seçeneği seçilir. Çağrılan verilerin bir mod şekli oluşturduğu görülür. Her mod şeklini oluşturmak için bu işlemler tekrarlanır.

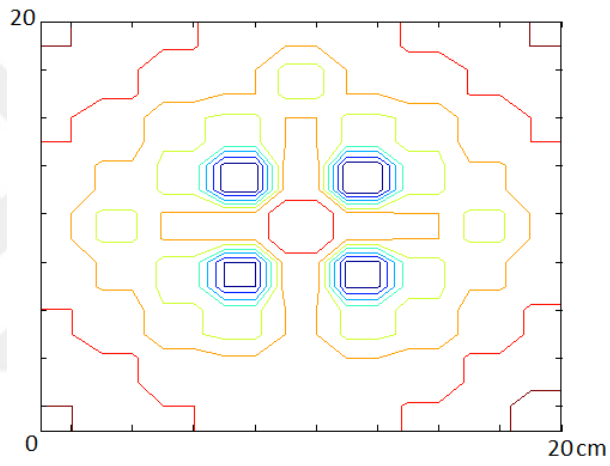
Analizlerde kullanılan düz, hasarsız A plağının deneylerden elde edilen verilerin (EK A'da verilmiştir) MATLAB'a aktarılmasıyla oluşturulan ilk 4 mod şekli (4 frekans için) aşağıda görüldüğü gibidir.



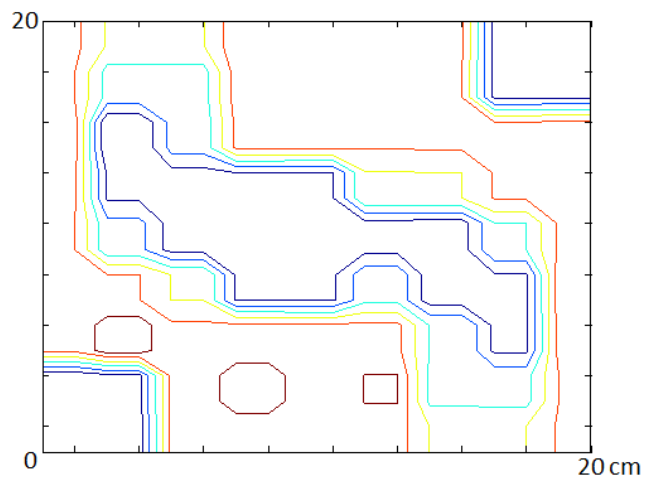
Şekil 4.6. A plağının deneysel verilerden MATLAB'da oluşturulmuş 1. Mod şekli



Şekil 4.7. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 2. Mod şekli



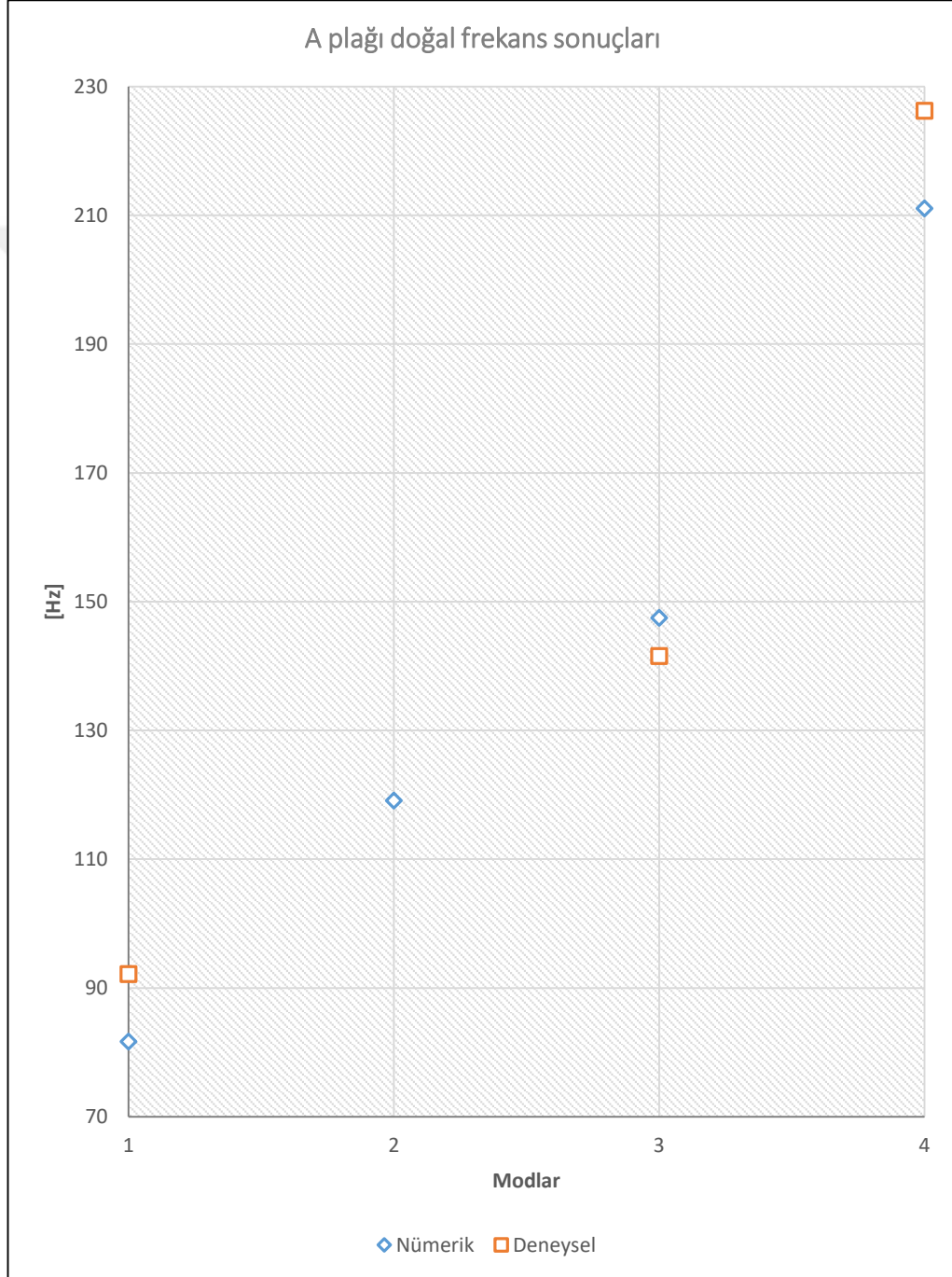
Şekil 4.8. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 3. Mod şekli



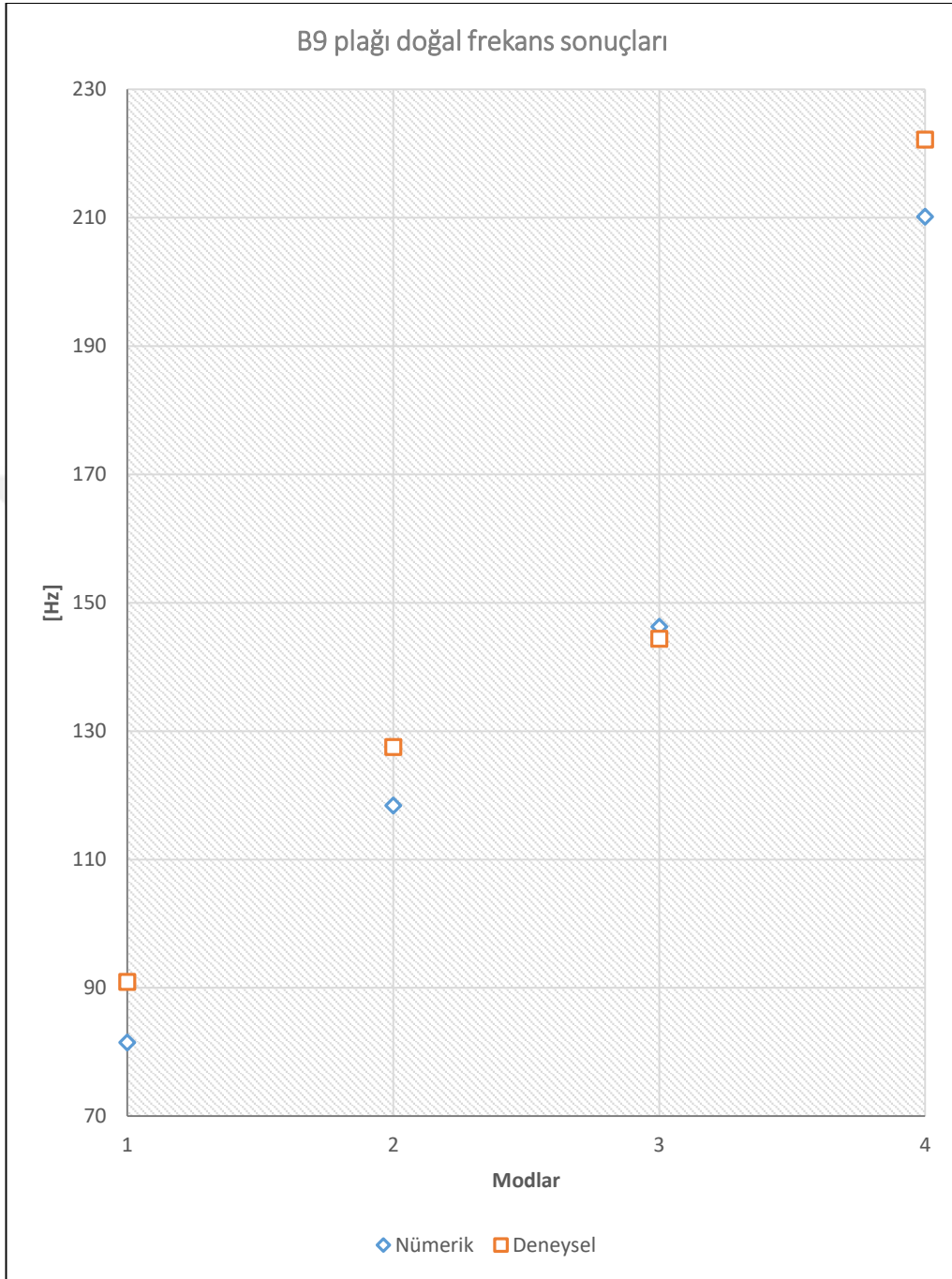
Şekil 4.9. A plağının deneysel verilerden MATLAB’da oluşturulmuş 4. Mod şekli

4.3. Nümerik ve Deneysel Sonuçlardan Elde Edilen Doğal Frekansların Karşılaştırılması

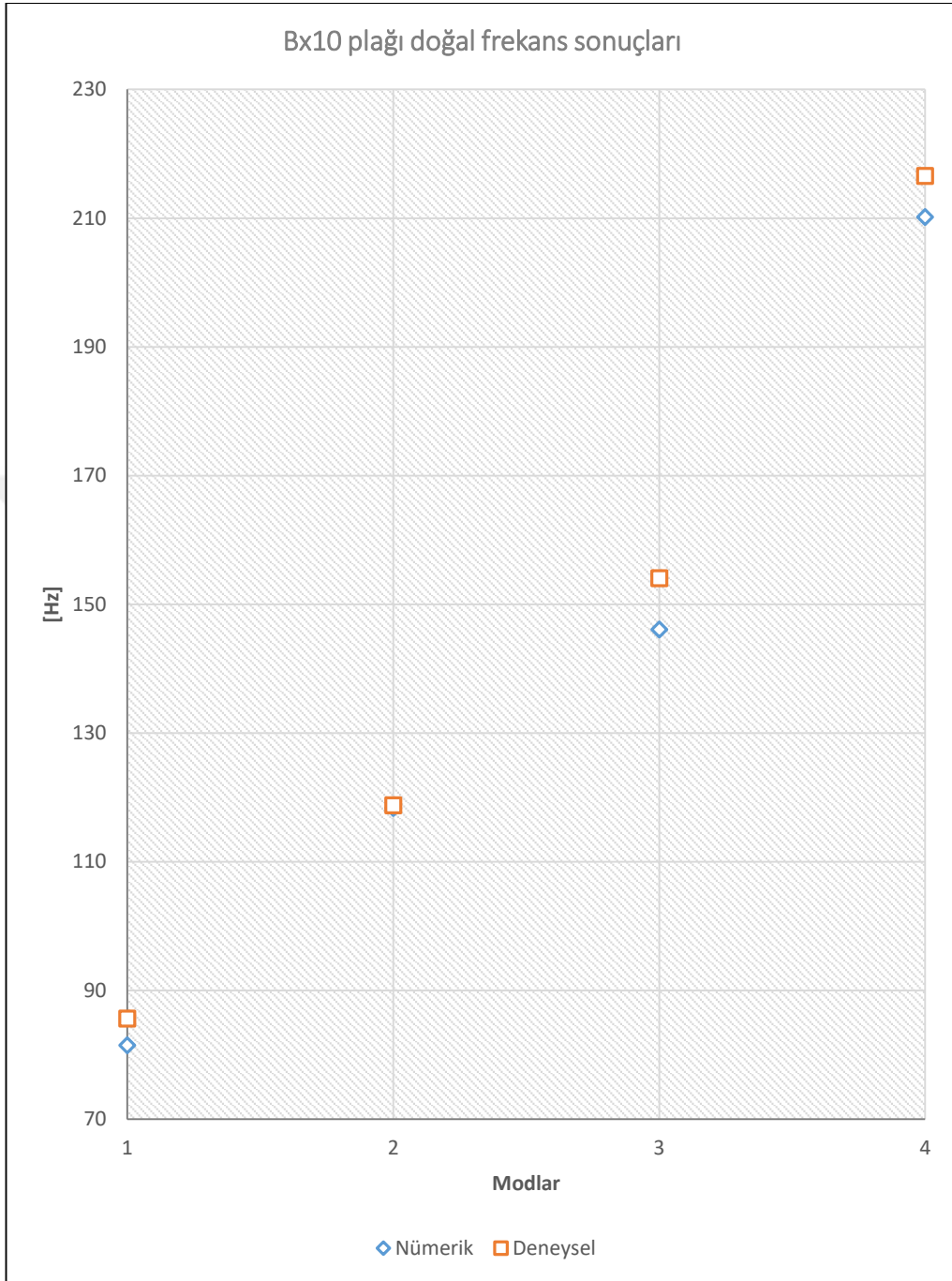
Hasarlı ve hasarsız olarak deneye tutulmuş bütün plakların nümerik ve deneysel analizlerinin karşılaştırma grafikleri aşağıdaki grafiklerde verildiği gibidir.



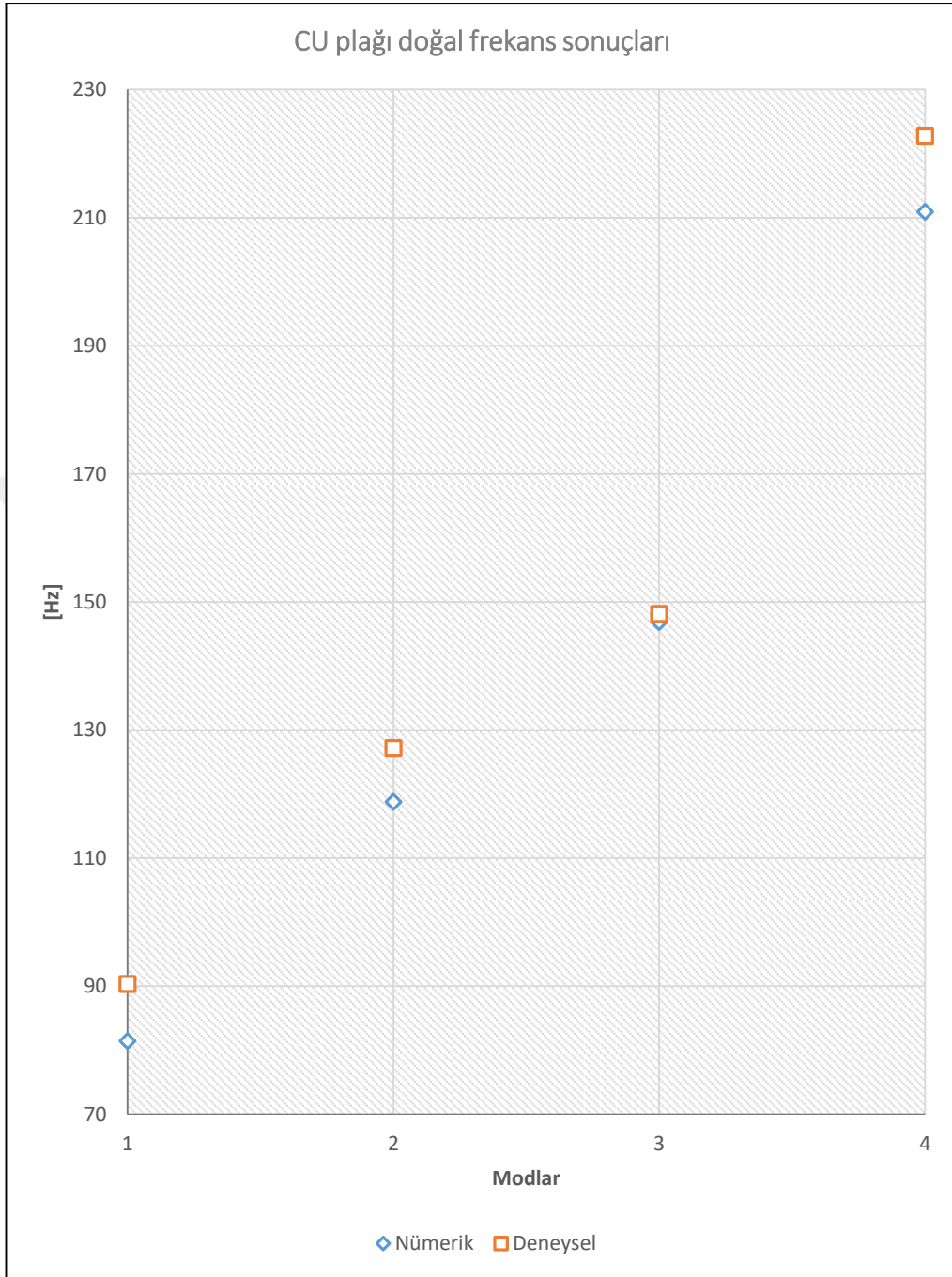
Grafik 4.1. A plağı nümerik ve deneysel frekans değışimi



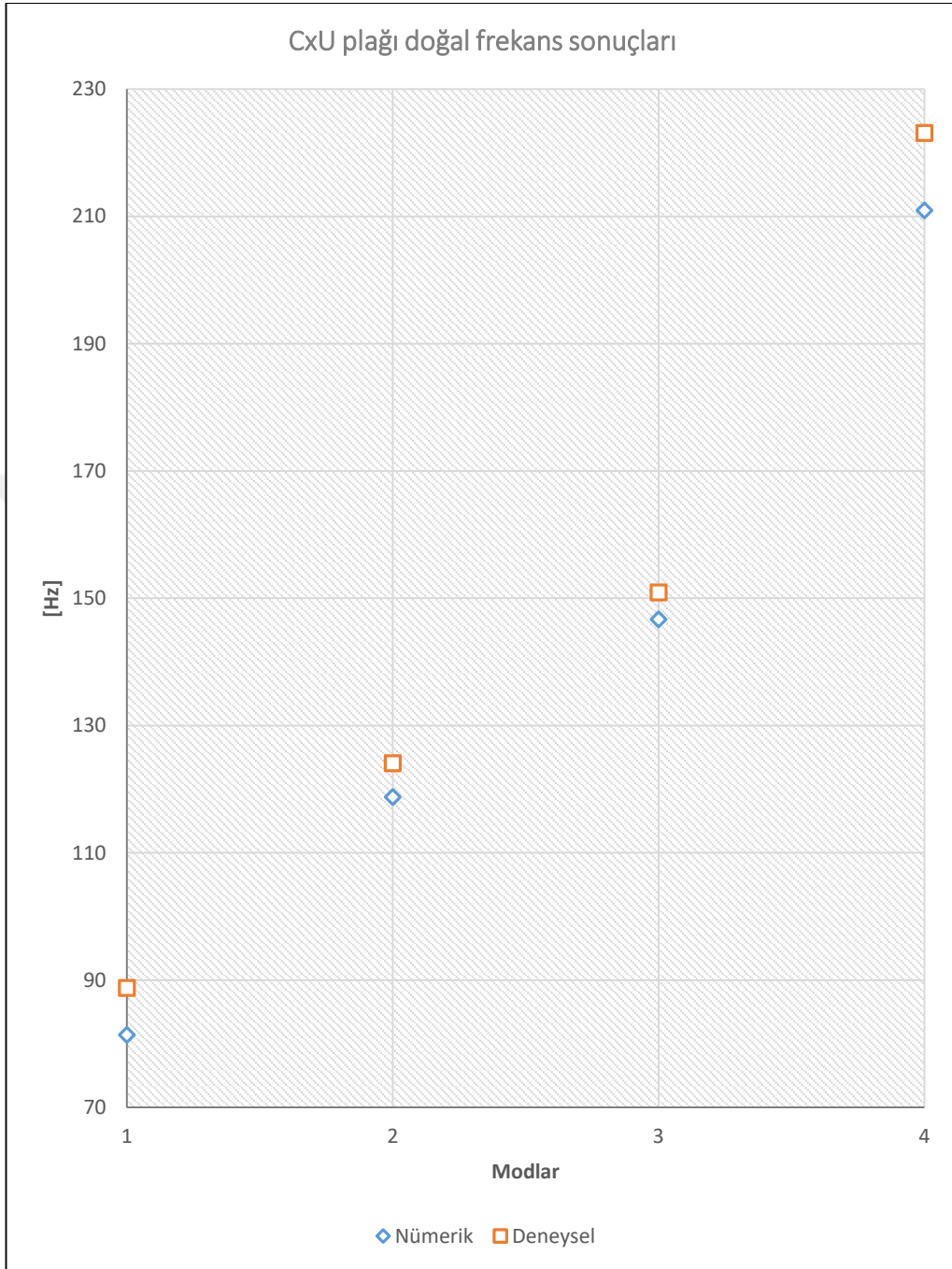
Grafik 4.2. B9 plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi



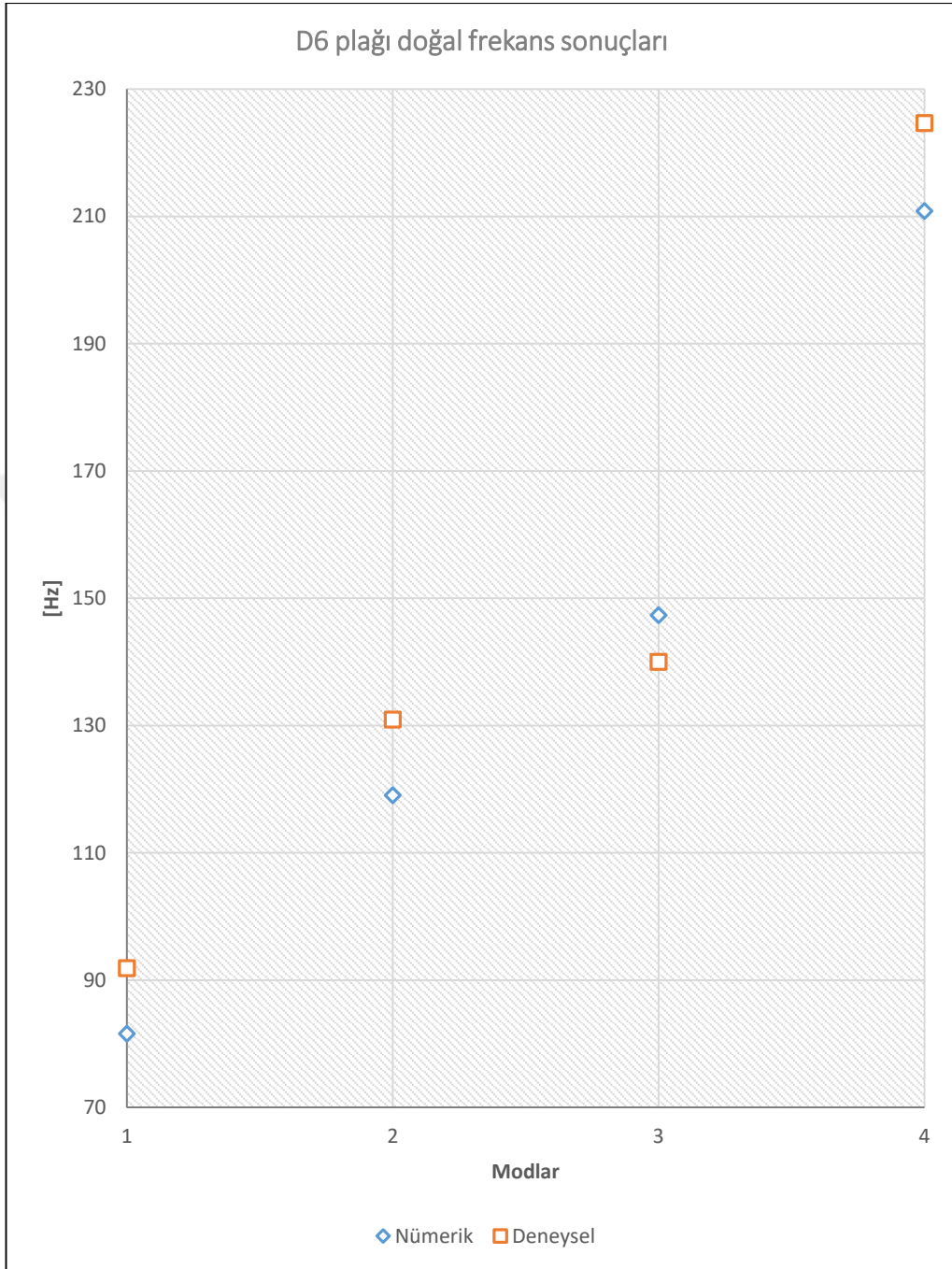
Grafik 4.3. Bx10 plağı nümerik ve deneysel frekans değışimi



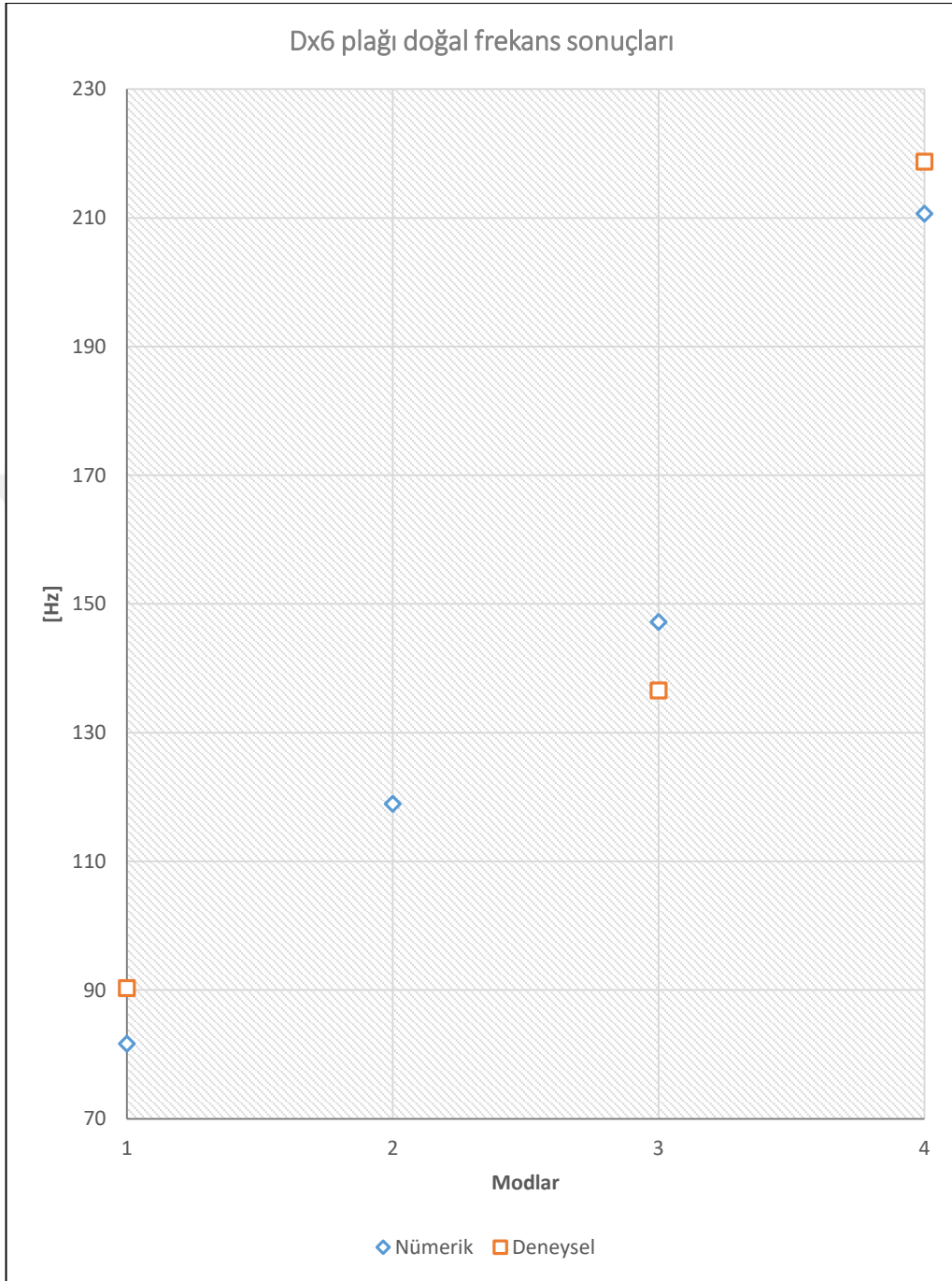
Grafik 4.4. CU plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi



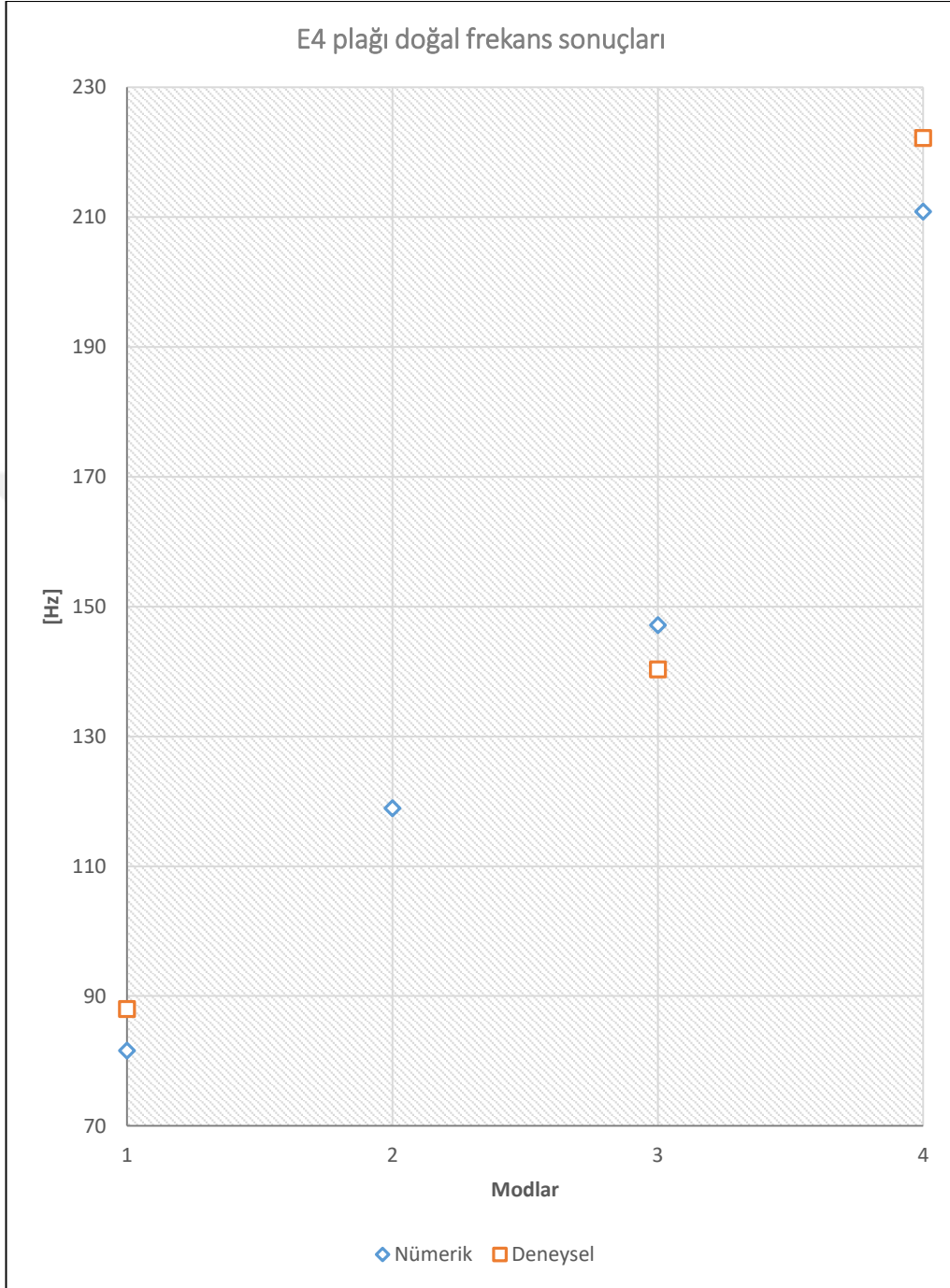
Grafik 4.5. CxU plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi



Grafik 4.6. D6 plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi



Grafik 4.7. Dx6 plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi



Grafik 4.8. E4 plağı nümerik ve deneysel frekans değişimi

Yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki farkların makul seviyede olduğu görülmektedir. Tezin amacı olan mod şekline uygun hasar verilen plakların frekans sonuçları ile hasar ilişkisi arasında bir fark

olup olmadığı sonlu elemanlar yöntemiyle analizde bütün doğal frekans sonuçları elde edildiği için nümerik analize göre A plağı referans alınarak aşağıda değerlendirilmiştir.

Tablo 4.1. Hasarlı plakların A plağına göre ilk 4 modunun yüzdelerik değışim değeri

| Mod / Plak | B9 (%) | Bx10 (%) | CU (%) | CxU (%) | D6 (%) | Dx6 (%) | E4 (%) |
|------------|--------|----------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 1 | -0,252 | -0,286 | -0,345 | -0,39 | -0,139 | -0,075 | -0,108 |
| 2 | -0,571 | -0,629 | -0,243 | -0,285 | -0,016 | -0,117 | -0,142 |
| 3 | -0,834 | -0,962 | -0,413 | -0,542 | -0,101 | -0,203 | -0,237 |
| 4 | -0,445 | -0,445 | -0,08 | -0,08 | -0,113 | -0,217 | -0,123 |

Tablo 4.1'e bakıldığında 1.Mod şekline uygun hasar verilen B9 ve Bx10 plaklarının ilk 4 doğal frekans sonuçlarının A plağının ilk 4 doğal frekansıyla kıyaslamasında en düşük yüzdelerik değışimin 1. Modda olduğu görülmektedir.

B9 ve Bx10 plakları 1. Mod şekline uygun hasar verilmiş plaklar olarak nümerik sonuçlara bakıldığında B9 ve Bx10 plaklarının 1. Mod frekansı A plağının 1. Mod frekansından %-0,252 ve %-0,286 oranında düşük çıkmıştır. 2. Mod şekline uygun hasar verilen CU ve CxU plaklarının 1. Mod frekansının A plağının 1. Mod frekansından %-345 ve %-0,39 oranında, 3. Mod şekline uygun hasar verilen D6 ve Dx6 plaklarının 1. Mod frekansının A plağının 1. Mod frekansından %-0,139 ve %-0,075 oranında, 4. Mod şekline uygun hasar verilen E4 plağının 1. Mod frekansının A plağının 1. Mod frekansından %-0,108 oranında düşük çıkmıştır.

Tablo 4.1'e bakıldığında 2.Mod şekline uygun hasar verilen CU ve CxU plaklarının ilk 4 doğal frekans sonuçlarının A plağının ilk 4 doğal frekansıyla kıyaslamasında en düşük yüzdelerik değışimin 4. Modda olduğu görülmektedir.

CU ve CxU plakları 2. Mod şekline uygun hasar verilmiş plaklar olarak nümerik sonuçlara bakıldığında CU ve CxU plaklarının 2. Mod frekansı A plağının 2. Mod frekansından %-0,243 ve %-0,285 oranında düşük çıkmıştır. 1. Mod şekline uygun hasar verilen B9 ve Bx10 plaklarının 2. Mod frekansının A plağının 2. Mod

frekansından %-571 ve %-0,629 oranında, 3. Mod şekline uygun hasar verilen D6 ve Dx6 plaklarının 2. Mod frekansının A plağının 2. Mod frekansından %-0,016 ve %-0,117 oranında, 4. Mod şekline uygun hasar verilen E4 plağının 2. Mod frekansının A plağının 2. Mod frekansından %-0,142 oranında düşük çıkmıştır.

Tablo 4.1'e bakıldığında 3.Mod şekline uygun hasar verilen D6 ve Dx6 plaklarının ilk 4 doğal frekans sonuçlarının A plağının ilk 4 doğal frekansıyla kıyaslamasında en düşük yüzdelik değişimin D6 plağı için 2. Modda, Dx6 plağı için 1. Modda olduğu görülmektedir.

D6 ve Dx6 plakları 3. Mod şekline uygun hasar verilmiş plaklar olarak nümerik sonuçlara bakıldığında D6 ve Dx6 plaklarının 3. Mod frekansı A plağının 3. Mod frekansından %-0,101 ve %-0,203 oranında düşük çıkmıştır. 2. Mod şekline uygun hasar verilen CU ve CxU plaklarının 3. Mod frekansının A plağının 3. Mod frekansından %-413 ve %-0,542 oranında, 1. Mod şekline uygun hasar verilen B9 ve Bx10 plaklarının 3. Mod frekansının A plağının 3. Mod frekansından %-0,834 ve %-0,962 oranında, 4. Mod şekline uygun hasar verilen E4 plağının 3. Mod frekansının A plağının 3. Mod frekansından %-0,237 oranında düşük çıkmıştır.

Tablo 4.1'e bakıldığında 4.Mod şekline uygun hasar verilen E4 plağının ilk 4 doğal frekans sonuçlarının A plağının ilk 4 doğal frekansıyla kıyaslamasında en düşük yüzdelik değişimin 1. Modda olduğu görülmektedir.

E4 plağı 4. Mod şekline uygun hasar verilmiş plak olarak nümerik sonuçlara bakıldığında E4 plağının 4. Mod frekansı A plağının 4. Mod frekansından %-0,123 oranında düşük çıkmıştır. 2. Mod şekline uygun hasar verilen CU ve CxU plaklarının 4. Mod frekansının A plağının 4. Mod frekansından %-0,08 ve %-0,08 oranında, 3. Mod şekline uygun hasar verilen D6 ve Dx6 plaklarının 4. Mod frekansının A plağının 4. Mod frekansından %-0,113 ve %-0,217 oranında, 1. Mod şekline uygun hasar verilen B9 ve Bx10 plaklarının 4. Mod frekansının A plağının 4. Mod frekansından %-0,445 ve %-0,445 oranında düşük çıkmıştır.

Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde yapılan çalışmanın yaklaşımı ile hasarlı plaklarda hasarın varlığını belirlemenin mümkün olduğu görülmüştür. Doğal frekanslardaki değişim ile hasarın bölgesi belirlenemese de periyodik kontrollerde farklılıklar izlenerek hasarın büyüüp büyümediği gözlenebilmektedir.

Bu çalışmadaki yaklaşımın periyodik izlenecek parça üzerine uygulanması ile o özel parça için özellikle muhtemel hasarın olduğu gözlenen veya tahmin edilen bölgeler için benzer bir analiz yapılarak oluşacak veriler değerlendirilebilir. Yine bu veri tabanı yapay zeka teknikleri ile yorumlanarak daha hızlı ve detaylı bilgilere ulaşılabilir.

Ancak yapılan çalışmanın yeterli teknik olanaklara (hızlı bilgisayar ve modele uygun numune hazırlamak gibi) sahip olması gerekir ki bu şekilde yukarıdaki yüzdelerik değişimler daha hassas bir şekilde elde edilebilir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 15 plak modeli kullanılmıştır, bunlardan biri hasarsız diğer 14 plak ise hasarlıdır. Plaklar üzerinde yapılan nümerik ve deneysel analiz sonuçlarında görülen yüzdelik değişimler birbirine yeterli yakınlıktadır. Bu farklılıkta deney numunelerinin lazer kesme ile hazırlanmasının da etkisi vardır. Lazer kesmelerde kesilen bölgede kalıcı gerilmeler oluşmaktadır. Sac levhanın hadde yönü de analiz sonuçlarını etkileyebilecek bir faktördür ve hadde yönüne deneylerde dikkat edilmemiştir. Boyutlar küçük olduğundan B ve Bx grubu, C ve Cx grubu, D ve Dx grubu plaklardaki frekans değerlerini tespit etmek zor olmuştur. Deney sırasında bazı modların karşılığı bulunamamıştır. Nümerik ve deneysel analiz sonuçlarındaki farklılıklar; deneysel numunenin üretimi ile ideal model arasındaki farklılıklardan, çekiçle her noktaya aynı şiddette vurulamamış olmasından, deneyin hassasiyetinden ve plağın özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nümerik analizde ise mesh sizing olarak 1mm'den başlayarak sırasıyla 0,5mm, 0,3mm, 0,1mm derinliğe kadar inilmiş; 0,1mm mesh sizing'de kullanılan Workstation yetersiz kalmıştır, bu nedenle daha detaylı mesh yapılamamıştır. 0,5mm ve 0,3mm nümerik analiz sonuçları birbirine yakın çıktığından dolayı zamanı etkin kullanmak için 0,5mm mesh sizing ile nümerik analizler tamamlanmıştır. Hasar genişliği ve hasar derinliği parametreleri sabit tutulduğundan, hasar uzunluğu ile orantılı olarak doğal frekanslarda düşüş olduğu görülmüştür.

Uygulamada, buna benzer çalışmalar ile periyodik bakım ile izlenen plaklardaki öz frekans azalışları hasar ihtimali olarak değerlendirilebilir. Yine bu veri tabanı yapay zekâ teknikleri ile yorumlanarak daha hızlı ve detaylı bilgilere ulaşılabilir. Daha yakın gözlemler ile çatlaktan kaynaklı tahribatlar önlenir.

KAYNAKÇA

- [1] <http://yavuzsultanselim-koprusu.blogspot.com.tr/2016/03/yavuz-sultanselim-koprusu-son-durum.html>, Erişim Tarihi: 01.12.2017.
- [2] <http://aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/otomotiv/ummana-ilk-pars-teslim-edildi/638439>, Erişim Tarihi: 10.01.2018.
- [3] <http://www.kollected.com/Mars-Rover-Curiosity>, Erişim Tarihi: 10.01.2018
- [4] https://res.cloudinary.com/engineering-com/image/upload/w_350,c_limit,q_auto,f_auto/Falcon_9_kuvbrt.jpg, Erişim Tarihi: 23.11.2017.
- [5] <http://www.trthaber.com/haber/bilim-teknoloji/tamamen-yerli-ve-milli-uydu-turksat-6a-geliyor-329099.html>, Erişim Tarihi: 08.01.2018.
- [6] <http://www.crossrail.co.uk/construction/tunnelling/railway-tunnels/western-tunnels-royal-oak-to-farringdon>, Erişim Tarihi: 25.12.2017.
- [7] <http://www.ucuyoruzz.com/tusas-idef-2017de-ilkleri-ile-yer-alacak>, Erişim Tarihi 10.01.2018.
- [8] Dal, H., Elastik ve sönüm mesnetli plakların titreşimlerinin incelenmesi, Doktora Tezi, 2011.
- [9] Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- [10] Szilard, R., Theories and Applications of Plate Analysis, New Jersey, John Willey & Sons, Inc., ISBN:0-471-42989-9, 2004.
- [11] Ventsel, E., Krauthammer, T., Thin Plates and Shells, Marcel Dekker, Inc, Newyork, ISBN:0-8247-0575-0, 2001.
- [12] Lagnese, J.E., Boundary Stabilization of Thin Plate, SIAM Studies In Applied Mathematics, Philadelphia, ISBN: 0-89871-237-8, 1989.
- [13] Berktaş, İ., Plak Teorisi ve Uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sayı 237, İstanbul. 1992.

- [14] Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, ISBN:0-7-Y85821-7, 1963.
- [15] Mindlin, R.D., Mathematical Theory of Vibrations of Elastic Plates, World Scientific Publishing, ISBN 981-270-381-0, 2006.
- [16] Liew, K.M., Wang, C.M., Xiang, Y., Kitipornchai, S., Vibration of Mindlin Plates, Elsevier, ISBN: 0 08 043341 3, 1998.
- [17] Leissa, A.W., Vibration of Plates, NASA SP-160, Government Printing Offices, Washington, D.C., U. S. 1969.
- [18] Timoshenko, S.P., History of Strength of Materials, McGraw-Hill, New York. 1953.
- [19] Soedel, W., Vibrations of Shells and Plates, Third Edition, Marcel Dekker INC., ISBN: 0-8247-5629-0, 2004.
- [20] Rao, S.S., Vibration of Continuous Systems, John Wiley & Sons, ISBN-13:978-0-471-77171-5, 2007.
- [21] Şen, M., Poliüretan köpük kaplı plaklarda takviye kalınlığının sistemin dinamik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [22] Şekerci, H.U., Bir hava aracı komponentinin dinamik karakteristiklerinin teorik ve deneysel modal analiz metoduyla belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [23] Khurasia, H.B., Rawtani, S., Vibration analysis of circular plates with hole, Journal of Applied Mechanics Transactions of the ASME 45, 215–217, 1978.
- [24] Cheng, L., Li, Y.Y., Yam, L.H., Vibration analysis of annular-like plates, Journal of Sound And Vibration, 2002.
- [25] Kılıç, V., Elastik zemine oturan dikdörtgen plakların titreşimleri, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [26] Civallek, Ö., Calayır, Y., İnce dikdörtgen plakların titreşim frekanslarının yapay sinir ağları yaklaşımı ile tahmini, İMO Teknik Dergi, 4161-4176, 2007.
- [27] Dal, H., Morgül, Ö.K., Vibrations of elastically restrained rectangular plates, Scientific Research and Essays, Vol. 6(34), 6811-6816, 2011.
- [28] Aksencer, T., Aydoğdu, M., Nano ölçekli plakların zorlanmış titreşimi, 15. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, 617-626, 2011.

- [29] Joshi, P.V., Jain N.K., Ramtekkar, G.D., Analytical modelling for vibration analysis of partially cracked orthotropic rectangular plates, *European Journal of Mechanics A/Solids* 50, 100-111, 2015.
- [30] Joshi, P.V., Jain N.K., Ramtekkar, G.D., Viridi, G.S., Vibration and buckling analysis of partially cracked thin orthotropic rectangular plates in thermal environment, *Thin-Walled Structures* 109, 143-158, 2016.
- [31] Rao, S., *Dynamic of Plates*, Narosa ISBN 81-7319-250-2, Marcel Dekker ISBN 0-8247-1977-8, 1999.
- [32] Çakar, O., Değişken kesitli Mindlin plaklarının serbest titreşim analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, 1995.
- [33] <https://www.fiziktime.com/fiziktime/ydalgalar.html>, Erişim Tarihi: 01.12.2017.
- [34] Huang, C.S., Leissa, A.W., Vibration analysis of rectangular plates with side cracks via the Ritz method, *Journal of Sound and Vibration* 323, 974–988, 2009.
- [35] Schwarz, Brian J., Mark H. Richardson., *Experimental modal analysis*, CSI Reliability week 35.1, 1-12, 1999.

EKLER

EK A: RT PRO PHOTON+ yazılımıyla deney sırasında elde edilmiş ve MATLAB'da oluşturulan mod şekillerinin temeli olan titreşim verileri

Tablo A.1. PHOTON+ yazılımıyla deney sırasında elde edilen ve MATLAB'da oluşturulan mod şekillerinin temeli olan hasarsız A plağı 1.Mod titreşim verileri

| | Z = 1 | Z = 2 | Z = 3 | Z = 4 | Z = 5 | Z = 6 | Z = 7 | Z = 8 | Z = 9 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| X (93 Hz) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) |
| | 0,125126207 | 0,055944849 | 0,005105151 | -0,053452635 | -0,132324625 | -0,572818546 | 0,010152551 | 0,050958113 | 0,12854586 |
| | 0,052132345 | 0,049689591 | 0,002005002 | -0,047659465 | -0,099847154 | -0,0489897 | 0,001025698 | 0,052235221 | 0,054526416 |
| | 0,000152551 | 0,000152551 | 0,000152557 | -0,055846185 | -0,129858657 | -0,050040426 | 0,000836022 | 0,002589845 | 0,001548512 |
| | -0,052344526 | -0,053121506 | -0,050055061 | -0,052154135 | -0,100060008 | -0,05410554 | -0,052104563 | -0,05410554 | -0,053154623 |
| | -0,132133243 | -0,11152152 | -0,112854752 | -0,110122849 | -0,099051520 | -0,097548514 | -0,100809451 | -0,101205105 | -0,102511321 |
| | -0,055052242 | -0,057274647 | -0,051354113 | -0,05410554 | -0,103051 | -0,050080805 | -0,0572554 | -0,050196562 | -0,053235323 |
| | 5,12155E-05 | 1,50156E-05 | 7,70705E-06 | -0,050000855 | -0,112342545 | -0,047031003 | 0,002252551 | 0,001025698 | 0,004589845 |
| | 0,050221513 | 0,055255413 | 0,000986098 | -0,054884183 | -0,125586575 | -0,048420045 | 0,005462551 | 0,054526416 | 0,056235366 |
| | 0,099253854 | 0,050001052 | 0,004569845 | -0,058968845 | -0,098969458 | -0,049300555 | 0,001025698 | 0,052132345 | 0,099985587 |

Tablo A.2. PHOTON+ yazılımıyla deney sırasında elde edilen ve MATLAB'da oluşturulan mod şekillerinin temeli olan hasarsız A plağı 2.Mod titreşim verileri

| X (127 Hz) | Z = 1 | Z = 2 | Z = 3 | Z = 4 | Z = 5 | Z = 6 | Z = 7 | Z = 8 | Z = 9 |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) |
| | -0,134512488 | -0,051585886 | 6,45449E-05 | 0,124152653 | 0,142151256 | 0,120512049 | 1,527E-07 | -0,05986459 | -0,125356646 |
| | -0,050215121 | -0,111809472 | -0,050512515 | 0,000512052 | 0,05415205 | 4,1585E-06 | -0,052125103 | -0,128484585 | -0,051205153 |
| | 0,000154325 | -0,059631585 | -0,110130986 | -0,055205463 | 5,14416E-06 | -0,051425014 | -0,135244154 | -0,057565485 | 0,001245249 |
| | 0,052087565 | 0,003256548 | -0,053425163 | -0,115956485 | -0,056251253 | -0,123132052 | -0,056254162 | 0,000852845 | 0,050784549 |
| | 0,100312855 | 0,052154284 | 0,000584549 | -0,059855481 | -0,122288546 | -0,055485484 | 0,001306052 | 0,054645284 | 0,100012521 |
| | 0,051354162 | 0,000152485 | -0,050021055 | -0,105121054 | -0,051052415 | -0,109132546 | -0,053523233 | 0,000587455 | 0,055105021 |
| | 0,008728421 | -0,058052257 | -0,121122341 | -0,050210515 | 0,021510205 | -0,053421524 | -0,121245321 | -0,048310515 | 5,41845E-05 |
| | -0,055455683 | -0,100958425 | -0,056325127 | 0,000054845 | 0,05481526 | 4,15345E-05 | -0,052152345 | -0,099975845 | -0,050210515 |
| | -0,142516598 | -0,050270545 | 0,000768785 | 0,132584153 | 0,143515105 | 0,115584284 | 0,005106051 | -0,055442452 | -0,104510129 |

Tablo A.3. PHOTON+ yazılımıyla deney sırasında elde edilen ve MATLAB'da oluşturulan mod şekillerinin temeli olan hasarsız A plağı 3.Mod titreşim verileri

| X (144 Hz) | Z = 1 | Z = 2 | Z = 3 | Z = 4 | Z = 5 | Z = 6 | Z = 7 | Z = 8 | Z = 9 |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) |
| | 0,202153466 | 0,152102035 | 0,101012029 | 0,052015051 | 0,012109513 | 0,052543152 | 0,111897458 | 0,152635614 | 0,292516546 |
| | 0,150215342 | 0,111012025 | 0,056543822 | 0,017081545 | 0,012109513 | 6,05248E-05 | 0,050090512 | 0,112135202 | 0,151205135 |
| | 0,10212021 | 0,053968959 | -0,089258988 | -0,126572455 | 0,000305586 | -0,128528454 | -0,080082829 | 0,053215323 | 0,115448416 |
| | 0,051026302 | -0,011232155 | -0,129121235 | -0,502907862 | 0,05969866 | -0,530262027 | -0,122385154 | -0,011198565 | 0,050050055 |
| | 0,000152454 | -0,120210245 | 0,010001545 | 0,050959113 | 0,159855859 | 0,050525487 | 0,000156454 | -0,12005089 | 0,004104284 |
| | 0,050101113 | -0,012995897 | -0,120925129 | -0,551845579 | 0,053955686 | -0,572818546 | -0,120550759 | -0,010111227 | 0,050958113 |
| | 0,100108656 | 0,054125289 | -0,087675482 | -0,120825042 | 0,000542524 | -0,120313052 | -0,085485462 | 0,050122013 | 0,100109055 |
| | 0,151230213 | 0,111120549 | 0,053215051 | 0,001025698 | -0,129858657 | 0,001035245 | 0,053215461 | 0,1030856 | 0,154324569 |
| | 0,200010125 | 0,155324569 | 0,109102413 | 0,051221355 | 0,000120521 | 0,05832989 | 0,115488646 | 0,151515453 | 0,200920172 |

Tablo A.4. PHOTON+ yazılımıyla deney sırasında elde edilen ve MATLAB'da oluşturulan mod şekillerinin temeli olan hasarsız A plağı 4.Mod titreşim verileri

| X (223 Hz) | Z = 1 | Z = 2 | Z = 3 | Z = 4 | Z = 5 | Z = 6 | Z = 7 | Z = 8 | Z = 9 |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) | Y (gn/N) |
| | -0,229934126 | -0,228575768 | 0,015771891 | 0,014228392 | 0,039074514 | 0,023110418 | -0,050913872 | -0,050196562 | 0,006336022 |
| | -0,239594371 | -0,21224407 | 0,012769842 | 0,085740781 | 0,017405785 | 0,052524463 | -0,112920232 | -0,115060052 | 0,000836022 |
| | 0,008707983 | 0,073113184 | 0,010280622 | 0,013294347 | 0,013294347 | 0,013294347 | -0,102034038 | -0,209670936 | 0,017336022 |
| | 0,003345409 | 0,001091199 | -0,051516157 | -0,204521136 | -0,20747731 | -0,115034249 | -0,228959434 | -0,205570936 | 0,023336022 |
| | 0,000399613 | -0,133958434 | -0,221938969 | -0,201201095 | -0,216137903 | -0,219962832 | -0,226262703 | -0,100566434 | 0,009336022 |
| | 0,004294105 | -0,206987599 | -0,218476219 | -0,201206885 | -0,204073059 | -0,053326598 | -0,050249876 | 0,002948586 | 0,004336022 |
| | 0,019790849 | -0,246644143 | -0,130594873 | 0,011125235 | 0,00834058 | 0,002852984 | 0,006723586 | 0,001148586 | 0,016336022 |
| | 0,000211041 | -0,11616957 | -0,121708237 | 0,023415247 | 0,034092061 | 0,00717795 | 0,002923586 | -0,211109918 | -0,207220807 |
| | 0,012468801 | -0,054066066 | -0,050900747 | 0,035425247 | 0,009807657 | 0,005936718 | 0,005323586 | -0,211484819 | -0,214601446 |

ÖZGEÇMİŞ

Adem DUYGU, 20.10.1991'de Yozgat Sarıkaya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2009 yılında Keçiören Fatih Sultan Mehmet Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında üniversite eğitimine Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Makine Mühendisliği'ne başladı ve 2014'te mezun oldu. Lisans mezuniyetinin ardından aynı yıl yine Sakarya Üniversitesi FBE Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. Yüksek lisansta 12 ay boyunca 1505-5140003 numaralı TÜBİTAK projesinde proje asistanı olarak görev aldı. 2016 yılında askerlik görevini yedek subay olarak tamamladı.