



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**HAVACILIKTA KULLANILAN  
PEKİŞTİRİLMİŞ EĞRİ KOMPOZİT  
PANELLERİN DÜŞÜK  
HIZLI DARBE SONUCUNDA  
MEKANİK DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

**Tolunay DAĞ**

**HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2024**



**HAVACILIKTA KULLANILAN PEKİŞTİRİLMİŞ EĞRİ KOMPOZİT  
PANELLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE SONUCUNDA MEKANİK  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

**Tolunay DAĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**Temmuz 2024**

Tolunay DAĞ tarafından hazırlanan HAVACILIKTA KULLANILAN PEKİŞTİRİLMİŞ EĞİK KOMPOZİT PANELLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE SONUCUNDA MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali GÜVENÇ

Havacılık ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

.....

...

**Başkan:** Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

.....

...

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

.....

...

Tez Savunma Tarihi: 22/07/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ☒ Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - ☒ Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - ☒ Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - ☒ Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - ☒ Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - ☒ Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tolunay DAĞ

22/07/2024

HAVACILIKTA KULLANILAN PEKİŞTİRİLMİŞ EĞRİ KOMPOZİT PANELLERİN  
DÜŞÜK HIZLI DARBE SONUCUNDA MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE  
OPTİMİZASYONU  
(Yüksek Lisans Tezi)

Tolunay DAĞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Havacılık sektöründe malzeme teknolojileri gün geçtikçe ilerlemektedir. Ahşapla üretilen yapı malzemeleri günümüzde ileri teknoloji alaşımlar, kompozitler ve nanoteknolojik malzemeler gibi alternatif birçok seçenekle geliştirilmiştir. Bu malzemelerin kullanımı ve optimizasyonu da havacılık için önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, hava araçlarının gövde, kanat ve kuyruk gibi yüzeylerini oluşturan pekiştirilmiş w ve düz plakaların darbe davranışını ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Plaka ve pekiştiricilerin istifleme yönü, kalınlığı, katman sayısı ve katman kalınlığı gibi mekanik özelliklerinin darbe davranışına etkisi incelenmiştir. Darbe sonrası oluşan hasarlar hava aracının üzerine uygulanan dinamik yükler sayesinde çatlak gibi davranarak büyüyebilir ve nihayetinde ana yapısalın başarısız olmasıyla sonuçlanabilir. Tez kapsamında darbe sonucu deformasyon ve titreşim davranışlarının optimizasyonu yapay sinir ağı (YSA) ve Taguchi L9 metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plakalar üzerinde oluşan deformasyon ve ivmelenme değerleri minimize edilmiştir. Karbon T700 malzemesi sonlu elemanlar yöntemi ile uygun geometri modellerine atanarak düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiş ve temas kuvveti, ivme, enerji sönmeme miktarı ve yer değiştirme verileri çekilmiştir. Titreşim analizi için ham ivme verileri Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) analizi gerçekleştirilmiş ve baskın frekans değerleri elde edilmiştir. YSA modülü kullanılarak ivme değerlerinin tahminlemesi gerçekleştirilerek en düşük ivme değerinin elde edileceği mekanik özelliklere sahip yapı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Düşük hızlı darbe, kompozit plaka, optimizasyon, pekiştirici, titreşim, yapay zekâ teknikleri

Sayfa Adedi : 77

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali Güvenç  
2. Danışman Prof. Dr. Mesut UYANER

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF  
STIFFENED CURVED COMPOSITE PANELS USED IN AEROSPACE SUBJECTED  
TO UNDER LOW VELOCITY IMPACT  
(M. Sc. Thesis)

Tolunay DAĞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

July 2024

ABSTRACT

Material technologies in the aviation industry are advancing day by day. Building materials produced with wood have been developed with many alternative options such as high-tech alloys, composites and nanotechnological materials. The use and optimization of these materials is also important for aviation.

In this thesis, studies on the optimization of the impact behavior and mechanical properties of stiffened curved and flat plates forming surfaces such as fuselage, wing and tail of aircraft have been carried out. The effect of mechanical properties of plates and stiffeners such as stacking direction, thickness, number of layers and layer thickness on impact behavior has been investigated. Damage after impact can grow and act like cracks due to the dynamic loads applied on the aircraft and may eventually result in the failure of the main structure. Within the scope of this thesis, the optimization of deformation and vibration behaviors as a result of impact was carried out using artificial neural network (ANN) and Taguchi L9 method. The deformation and acceleration values on the plates were minimized. Carbon T700 material was assigned to appropriate geometry models by finite element method and low velocity impact tests were performed and contact force, acceleration, energy absorption and displacement data were extracted. For vibration analysis, Fast Fourier Transform (FFT) analysis was performed on the raw acceleration data and dominant frequency values were obtained. By predicting the acceleration values using the ANN module, the structure with the mechanical properties with the lowest acceleration value was determined.

Key Words : Low velocity impact, composite plate, optimization, stiffener, vibration, artificial intelligence techniques

Page Number : 77

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Mehmet Ali GÜVENÇ

2. Supervisor : Prof. Dr. Mesut UYANER

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim ve çalışmalarımı yürütürken tez danışmanlığımı kabul ederek bana tez çalışmalarımı yürüttüğüm dönemde ve tamamlanma aşamasında tecrübeleri ve fikirleriyle yol gösteren kıymetli hocalarım sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali GÜVENÇ ve Prof. Dr. Mesut UYANER'e teşekkür ederim.

Çalışmalarımı tamamlarken desteklerini esirgemeyen İskenderun Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Dekanı Suha Orçun MERT ve Dr. Öğr. Üyesi Habibe GÜRSOY DEMİR'e ve bana her zaman destek olan kıymetli mesai arkadaşım Ar. Gör. Veysel EROL ile fakülteadaki diğer mesai arkadaşlarım ve hocalarıma,

Akademik kariyerime adım atarken bana yol gösteren ve yardımcı olan kıymetli hocalarım sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ, Dr. Öğr. Üyesi Engin Hasan ÇOPUR ve Dr. Öğr. Üyesi Tarık ÜNLER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik çalışmalarım da verdikleri desteğin yanı sıra tüm hayatım boyunca sahip oldukları tüm imkanlar ve destekleriyle beni hiç yalnız bırakmayan kıymetli babam Ömer DAĞ, annem Yeter DAĞ ve kardeşlerim Furkan DAĞ ve Mehmet Yiğit DAĞ'a ve tüm dostlarıma tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                               | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                                    | iv           |
| ABSTRACT .....                                                                | v            |
| TEŞEKKÜR .....                                                                | vi           |
| İÇİNDEKİLER .....                                                             | vii          |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                                    | ix           |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                                      | xiv          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                 | xv           |
| 1. GİRİŞ .....                                                                | 1            |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI .....                                                   | 5            |
| 2.1. Kompozit Plakalarda Hasar .....                                          | 5            |
| 2.2. Pekiştirilmiş Plakalarda Hasar .....                                     | 6            |
| 2.3. Eğri Kompozit Panellerin Darbe Davranışı .....                           | 9            |
| 2.4. İstatiksel ve Yapay Zeka Tabanlı Teknikleri ile Hasar Tahminlemesi ..... | 11           |
| 3. YÖNTEM ve METOD .....                                                      | 13           |
| 3.1. Geometri Modellenmesi .....                                              | 14           |
| 3.2. Sonlu Elemanlar Yazılımı .....                                           | 15           |
| 3.3. Mesh Yakınsaması .....                                                   | 16           |
| 3.4. Mekanik Özelliklerin Tanımlanması .....                                  | 17           |
| 3.5. Sınır Koşullarının Tanımlanması .....                                    | 19           |
| 3.6. Temas Koşullarının Tanımlanması .....                                    | 20           |
| 3.7. Veri Toplama .....                                                       | 21           |
| 3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi Doğrulaması .....                                | 21           |

|                                                            | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.9. Veri İşleme .....                                     | 22           |
| 3.9.1. Taguchi L9 metodu ile tahminleme .....              | 22           |
| 3.9.2. Yapay sinir ağları ile tahmin ve optimizasyon ..... | 24           |
| 4. BULGULAR.....                                           | 25           |
| 4.1. Düşük Hızlı Darbe Hasar Davranışı.....                | 27           |
| 4.2. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Titreşim Davranışı .....    | 38           |
| 4.3. Yapay Sinir Ağı (YSA) ile Tahminleme.....             | 51           |
| 5. SONUÇLAR.....                                           | 52           |
| 5.1. Taguchi L9 Optimizasyon çalışması.....                | 52           |
| 5.2. Yapay Sinir Ağı Tekniği ile Tahminleme.....           | 53           |
| KAYNAKLAR .....                                            | 54           |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                              | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Panel ve pekiştirici geometrik özellikleri .....                                                        | 15    |
| Çizelge 3.2. Karbon Fiber Kompozitlerin Mekanik Özellikleri .....                                                    | 18    |
| Çizelge 4.1. E/Cam Epoksi Mekanik Özellikleri.....                                                                   | 25    |
| Çizelge 4.2. Taguchi L9 yönteminde kullanılan parametre verileri. ....                                               | 28    |
| Çizelge 4.3. Taguchi tahmini ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve tahmin hata oranı.....             | 30    |
| Çizelge 4.4. Tüm parametreler için darbe sonrası oluşan deformasyon miktarları .....                                 | 37    |
| Çizelge 4.5. Tüm parametreler için darbe sonrası sönmölenen enerji miktarları .....                                  | 38    |
| Çizelge 4.6. 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değeri .....                  | 44    |
| Çizelge 4.7. 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değeri .....                  | 44    |
| Çizelge 4.8. 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değeri .....                  | 44    |
| Çizelge 4.9. 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değeri .....  | 49    |
| Çizelge 4.10. 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değeri ..... | 50    |
| Çizelge 4.11. 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değeri ..... | 50    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                          | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. T tipi üç pekiştiricili eğri plakanın SolidWorks yazılımında yüzey komutu ile modellenmesi.....                     | 14    |
| Şekil 3.2. Pekiştirilmiş eğri panelin LS-PresPost yazılımı ile uygun ölçülerde ve kalınlıkta modellenmesi.....                 | 15    |
| Şekil 3.3. 6 mm yarıçapa sahip vurucu küre modellenmesi .....                                                                  | 15    |
| Şekil 3.4. Mesh boyutuna göre düşük hızlı darbe kuvvet-zaman çıktısı. ....                                                     | 17    |
| Şekil 3.5. Plakaya ve pekiştirici elemanlarına uygulanan örnek sınır koşulları. ....                                           | 19    |
| Şekil 3.6. Vurucu kütlenin hareket yönü .....                                                                                  | 20    |
| Şekil 3.7. Sonlu elemanlar analiz modelinin doğrulaması.....                                                                   | 22    |
| Şekil 3.8. Taguchi L9 tahmin metodolojisi.....                                                                                 | 23    |
| Şekil 3.9. Optimizasyon çalışmasında kullanılan YSA modeli .....                                                               | 24    |
| Şekil 4.1. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen temas kuvveti-zaman değişimi.....                       | 26    |
| Şekil 4.2. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen temas kuvveti-yer değişimi.....                         | 26    |
| Şekil 4.3. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen enerji-zaman değişimi.....                              | 27    |
| Şekil 4.4. Taguchi L9'dan elde edilen optimum parametre değerleri .....                                                        | 29    |
| Şekil 4.5. Katman kalınlığı ve katman sayısının deformasyona etkisinin yüzey grafiği .....                                     | 30    |
| Şekil 4.6. 0,45 mm katman kalınlığına ve [0/90] istifleme sırasına sahip 16 katmanlı plakanın temas kuvveti- zaman eğrisi..... | 31    |
| Şekil 4.7. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi .....                                                | 32    |
| Şekil 4.8. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi .....                                               | 32    |
| Şekil 4.9. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi .....                                               | 33    |

| Şekil                                                                                                    | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.10. Çarpışma sonrası plaka üzerinde biriken enerjinin zamana göre değişiminin örnek grafiği..... | 33    |
| Şekil 4.11. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi .....                    | 34    |
| Şekil 4.12. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi .....                   | 34    |
| Şekil 4.13. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi .....                   | 35    |
| Şekil 4.14. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi .....   | 35    |
| Şekil 4.15. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi .....  | 36    |
| Şekil 4.16. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi .....  | 36    |
| Şekil 4.17. 3 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 39    |
| Şekil 4.18. 3 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 39    |
| Şekil 4.19. 3 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 40    |
| Şekil 4.20. 5 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 41    |
| Şekil 4.21. 5 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 41    |
| Şekil 4.22. 5 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 42    |
| Şekil 4.23. 7 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 42    |
| Şekil 4.24. 7 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 43    |
| Şekil 4.25. 7 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği .....   | 43    |
| Şekil 4.26. 3 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 45    |

| <b>Şekil</b>                                                                                             | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.27. 3 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 45           |
| Şekil 4.28. 3 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 46           |
| Şekil 4.29. 5 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 46           |
| Şekil 4.30. 5 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 47           |
| Şekil 4.31. 5 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 47           |
| Şekil 4.32. 7 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 48           |
| Şekil 4.33. 7 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 48           |
| Şekil 4.34. 7 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği..... | 49           |
| Şekil 4.35. Ortalama ivme YSA saçılım grafiği .....                                                      | 51           |
| Şekil 4.36. YSA performans test saçılım grafiği .....                                                    | 52           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

**ms**

**s**

**s<sup>2</sup>**

**dk**

**mm**

**m**

**m<sup>2</sup>**

**m<sup>3</sup>**

**kg**

**N**

**GPa**

**MPa**

**Hz**

**kHz**

**J**

### Açıklamalar

milisaniye

saniye

saniyekare

dakika

milimetre

Metre

Metrekare

metreküp

kilogram

Newton

Giga paskal

Mega paskal

Hertz

Kilohertz

Joule

### Kısaltmalar

**Al**

**Ar-Ge**

**CAD**

**CFRP**

**FFT**

**FML**

**FS**

**İHA**

**LN**

**LT**

### Açıklamalar

Alüminyum

Araştırma-Geliştirme

Bilgisayar destekli tasarım

Karbon fiber takviyeli polimer

Hızlı Fourier Dönüşümü

Fiber metal lamine

Statik sürtünme katsayısı

İnsansız hava aracı

Katman sayısı

Katman kalınlığı

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| <b>PLA</b> | Polilaktik Asit              |
| <b>PVC</b> | Polivinil klorür             |
| <b>RPM</b> | Bir dakikada dönüş sayısı    |
| <b>SEM</b> | Taramalı elektron mikroskobu |
| <b>SS</b>  | İstifleme açısı              |
| <b>TNT</b> | Trinitrotoluen               |
| <b>TPU</b> | Termoplastik poliüretan      |
| <b>YSA</b> | Yapay sinir ağı              |
| <b>YZ</b>  | Yapay zekâ                   |



## 1. GİRİŞ

Fiber takviyeli kompozit plakalar havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit plakalar sağladıkları hafiflik ve yüksek mukavemet özellikleri sayesinde hava araçlarında metallerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle helikopter palleri, İHA kanatları ve kuyruklarında sıkça görülen kompozit malzemeler pekleştirilerek daha yüksek mukavemet değerleri sağlayabilmektedir (Barkanov, Ozoliņš, Eglitis, Almeida, Bowering ve Watson, 2014; Pan, Li, Song ve Xu, 2019).

Tabakalı kompozit plakalı yapılar yüksek dayanım ve darbe sönümleme özelliklerine sahip malzemelerdir (Quaresimin, Ricotta, Martello ve Mian, 2013; Santiago, Cantwell, Jones ve Alves, 2018). Bu kompozitler havacılık ve uzay, savunma, otomotiv ve denizcilik gibi birçok önemli sektörde tercih edilen yapı malzemesidir (Manesh, Kazemian ve Rahmani, 2024). Özellikle yapısal ağırlık açısından sağladığı avantajlarla havacılık yapı malzemelerinde çoğunluk kompozit malzemelerden oluşmaktadır.

Güvenlik ve emniyet parametrelerinin titizlikle incelendiği havacılık alanında kompozitlerin hasar davranışı da kritik önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerin sağladığı bu avantajlarla birlikte kritik bir dezavantaja da sahiptir. Kompozitlerin anizotrop özelliğinden dolayı özellikle tabaklı kompozitler çarpışmaya karşı zayıftırlar (Jain ve Upadhyay, 2010). Çarpışma olayı sonucunda bileşenin çalışamaz hale gelecek şekilde hasar alması bile olası bir durumdur. Bu sebepten dolayı kompozit panellerin yabancı cisim çarpmalarına karşı mekanik davranışlarının karakterize edilmesi önemlidir. Sayısal ve deneysel analizler ile bu mekanik davranışların incelenmesi için kompozit yapılar üzerine darbe çalışmaları devam etmektedir (Mansor, Ahmad ve Abdullah, 2021).

Tabakalı kompozitlerde en sık karşılaşılan darbe hasarları tabakalar arasında delaminasyon, fiber kırılmaları ve çatlaklardır. Bu hasarlar bazı durumlarda yüzeyde gözle muayene edilebilecek şekilde oluşurken bazı durumlarda mikro yapıda oluşurlar (Düring, Weiß, Stefaniak, Jordan ve Hühne, 2015). Oluşabilecek bu hasarlar kompozit plakanın performansına olumsuz etkilediği gibi yapısal bütünlüğün de bir arada kalmasına engel olabilecek hasarlardır. Özellikle havacılık ve uzay alanında kullanılan araçların üretiminde

tercih edilen kompozit malzemeler devamlı ve ani yüklere maruz kalmaktadırlar. Tabakalı kompozit yapıların üzerinde oluşan çarpmalar sonucunda iç yapısında oluşan çatlaklar çalışma süresince üzerine ani ve devamlı yüklemeler etki eden bu yapıların tamamen hasarlanmasına sebep olabilir (Ferrante, Sarasini, Tirillò, Lampani, Valente ve Gaudenzi, 2016; Masood, Gaddikeri ve Viswamurthy, 2021).

Hava araçlarında darbe hasarına genellikle pistlerde bulunan yabancı maddeler sebep olmaktadır. İniş-kalkış anında hava aracı pistlerinde bulunan yabancı maddelerin kinetik enerji kazanması ve hava aracının yapısal elemanlarından birine çarparak hasar oluşturması çok rastlanan bir olaydır. Bunun yanında bakım-onarım ekiplerinin hava aracının üzerinde gerçekleştirdikleri muayeneler sırasında üzerindeki teçhizat veya takımların da aracın üzerine düşerek hasar oluşturmaları.

Yapılar üzerinde meydana gelen birçok darbe çeşidi mevcuttur. Düşük hızlı darbeler, vurucunun hızının 10 m/s ve altındaki değerlerde çarptığı durumları içeren darbe sınıfıdır. Orta hızda darbeler 10-50 m/s, yüksek hızlı darbeler 50-1000 m/s ve son olarak hiper hızlardaki darbeler ise 5000 m/s hız değerine kadar çarpma etkisine sahip darbe çeşitleridir (Khalili ve Ardali, 2013).

Kompozit malzemelerin dayanımı birçok Ar-Ge çalışmasına veya makaleye konu olmuştur. Kompozit malzeme mukavemetinin artırılması adına birçok yöntem geliştirilmiş olup içlerinde en yaygın olanı pekiştiriciler ile yapıyı desteklemektir. Pekiştiriciler, geometrik şekillerine göre isimlendirilmektedir. Bunlar Z, C, T, J, Y, I, Pala ve Şapka tipleridir. Pala-tipi, Z-tipi ve T-tipi pekiştiriciler, havacılık sektöründe en yaygın kullanımda olan pekiştiricilerdir.

Uçak gövdesi, kanat ve kuyruk gibi hava aracının kritik elemanlarının iç yüzeylerinde bulunan bu yapısal elemanlar çarpma sonucunda yapının üzerinde oluşacak hasar miktarını azaltabilir. Pekiştirici elemanlar, kompozit plakanın burulma ve eğilme dayanımını artırarak yapısal bütünlüğün ve işlevselliğin korunmasına yardımcı olan elemanlardır. Ancak bu paneller boyuna mukavemeti yüksek yapılar olsalar bile, yanal yük taşıma kapasitesi çok düşük elemanlardır.

Bu panellerin sağladığı en önemli avantaj, eleman düzleminde rijitlik sağlamaktır (Correas, Crespo, Ghasemnejad ve Roshan, 2021; Sun, Guan, Ouyang, Tan ve Zhang, 2018). Pekiştirilmiş tabakalı kompozit plakaların üzerine uygulanacak düşük hızlı darbeler sonucunda numunenin göstereceği mekanik davranış pekiştirici tipine göre farklılık gösterecektir (Khan, Khan ve Husain 2021). Düşük darbe sonucunda plaka üzerinde oluşan enerjinin bir kısmını pekiştiricilerin sönümlediği görülmüştür. Pekiştirici elemanın sönümlediği enerji plakanın yüzeyinde oluşan deformasyon miktarını daha düşük seviyelere indirgemektedir (Wang, Cao, Deng, Wang ve Yue, 2015).

Çarpışma sonrası yapıda hasarlar veya yapısal elemanı oluşturan kompozit plakada fiber çatlaklar oluşabileceğinden dolayı yapının yük taşıma kapasitesinde ilk haline kıyasla düşüş olacağı bilinmektedir. Bununla birlikte darbe hızının artışıyla darbe sonrası testlerde pekiştirilmiş panelin mekanik performansında da azalmalar gözlenmiştir (Chen ve Hao, 2013; Liu ve Amdahl, 2012).

Darbe sonucunda hasar oluştuğu gibi yapıda titreşim olayı da meydana gelmektedir. Mekanik yapıların üzerinde oluşan titreşim olayları parçanın çalışma performansını olumsuz etkilemektedir. Titreşim sonucunda yapıda rezonans ve yorulmaya bağlı deformasyonlar meydana gelebilmektedir (Sui, Zhang, Liu, Ma, Gu, Qiu, Wu, Song ve Song, 2024). Bu sebeplerden dolayı kompozit yapıların bütünlüğünü korumak adına titreşim önleyici formüller üzerine çalışmalar yürütülmektedir (Liu, Sun, Liu, Du ve Ma, 2024). Yapılan literatür araştırmalarına göre pekiştirilmiş eğri kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışı üzerine yapılmış birçok çalışma mevcutken darbe sonrası titreşim davranışının incelenmesi ve optimizasyonu üzerine çalışmaların yeterli olmadığı görülmüştür. Hem pekiştirici elemanların hem de kompozit plakanın mekanik özelliklerinin darbe sonrasında titreşim cevabının incelenmesinin önem arz ettiği düşünülmektedir.

Pekiştirilmiş panellerin mekanik iyileştirmesi ve optimizasyonu yapının uzun ömürlü olması açısından kritik önem arz etmektedir. Bu konuda yapılacak olan çalışmalar havacılık ve uzay alanında kullanılacak olan malzemeler için hayati önem taşımaktadır. Kullanılacak olan yapısal elemanın tabaka kalınlığı, katman sayısı ve istiflenme yönü gibi parametrelerinin değiştirilmesi sonucunda darbe davranışında meydana gelen farklılıklar sayısal analizler ile gözlemlenebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi deneysel çalışmalardaki zaman ve kaynak tüketimini düşürmeyi amaçlasa da analizlerin gerçekçiliği ve uygulanabilirliği göz önüne alındığında aktarılan kaynak miktarı göz ardı edilemez. Tabi ki deneysel çalışmaların kaynak tüketim miktarına kıyasla çok avantajlı bir uygulama ancak yapay zekâ (YZ) ve istatistiksel tahmin tabanlı yaklaşımlar bu sonlu elemanlar yöntemlerine entegre edildiklerinde çalışmalar hızlanmakta ve elde edilen sonuçlar çok az bir yüzdeyle sapmaya uğramaktadır. Bu tekniklerin kompozit plakalar gibi tasarımında birçok farklı parametre bulunduran yapılarda kullanılması ve optimizasyon çalışmalarının yürütülmesi avantaj sağlayacaktır. Çeşitli varyasyonların tek tek analiz edilmesinden YZ ve istatistiksel tahminleme çalışmaları sayesinde daha kısa sürede beklenen sonuçlar elde edilebilecektir (Artero-Guerrero, Pernas-Sánchez, Martín-Montal, Varas ve López, 2018).

Pekiştirilmiş eğri panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını analiz etmek için birçok sonlu eleman yazılımı bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak Abaqus, Nastran, ANSYS ve LS-Dyna verilebilir (Johnson, Toso-Pentecôte ve Schueler, 2015; Nazari, Malekzadeh ve Naderi, 2019). Bu ticari yazılımlar, kendi içlerinde belli durumlara göre daha doğru sonuçlar üretmektedir. Yapılacak olan pekiştirilmiş panellerde düşük hızlı darbe analizi için bu sonlu eleman yazılımlarını karşılaştıran bir çalışmada tüm yazılımların belli bir deformasyona kadar benzer sonuç vermesine karşın LS-Dyna yazılımının burkulma analizinde diğer yazılımlara göre daha fazla doğru veri çıktısı verdiğine ulaşılmıştır (Orifici Thomson, Gunnion, Degenhardt, Abramovich ve Bayandor 2005). Bu tez çalışması kapsamında düşük hızlı darbe analizinin LS-Dyna yazılımıyla yapılmasına karar verilmiştir. LS-Dyna'dan alınacak çıktılar, kuvvet-zaman, yer değiştirme-zaman ve enerji-zaman eğrileri iken bu değerlerin farklı darbe hızlarında kıyaslamasına dayanması planlanmaktadır. Pekiştirici ve plaka kombinasyonu, değişik kalınlık ve ağırlıklarda uçak yapısal sistemi sağladığından, enine darbe davranışlarını analiz etmek için ayrıntılı matematiksel modellemelere başvurulmaktadır (Correas vd., 2021).

Bu tez çalışmasında havacılıkta kullanılan pekiştirilmiş kompozit eğri ve düz panellerin darbe sonrası mekanik davranışlarının sayısal yöntemlerle incelenmesi ve iyileştirilmesi üzerine çalışılmıştır. İstatistiksel ve yapay zekâ metotları kullanılarak tahminleme ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Kompozit Plakalarda Hasar

Kompozit plakaların elyaf yönelimi, katman kalınlığı, vb. gibi kalınlığı gibi karakteristik özellikleri darbe davranışı doğrudan etkilemektedir. Anizotropik malzemeler olarak sınıflandırılan kompozit yapıların farklı elyaf yönelim kombinasyonlarında sahip olduğu mekanik özellikler değişiklik gösterebilmektedir. B. Ma ve ark. (Ma, Cao, Feng, Song, Yang, Li, Zhang, Wang ve He, 2024) üç farklı yönelime sahip fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Üç farklı plakanın fiber çatlak oranları, delaminasyon alanı ve fiber kırılmaları görüntüleme cihazları ile tespit edilerek irdelenmiştir.

A. A. Ryabov ve ark. (Ryabov, Maslov, Strelets ve Slobodchikov, 2019) kompozit panellerin darbe sonucunda hasar alanında meydana gelen yarı statik yükleme durumunu hem de dinamik deformasyonu simüle edebilmek üzere LS-Dyna ticari yazılımını kullanmışlardır. Yapılan bu sonlu elemanlar metodu ile elde edilen sonuçlarda hasarlı kompozit panellerin darbe hasarını hasarsız kompozit panellerin taşıdığı değerden %50 fazlası seviyelerde taşıyabildiği sonucuna ulaşmışlardır. Sayısal modellemenin yanı sıra yapılan deneysel testlerde elde edilen veriler de %20'nin altında bir sapma ile simüle edilen analizlerin doğruluğunu kabul edilebilir derecede olduğunun değerlendirilmesi yapılmıştır.

P. Jakubczak ve ark. (Jakubczak, Bienias ve Surowska, 2018) farklı fiber oryantasyonlarına sahip kompozit katmanlara sahip FML yapıları üzerine düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirerek FML lamineleri arasındaki bağlantının darbe sonucundaki davranışları ve delaminasyonları incelenmiştir. Üretilen 2/1'lik bir FML yapısı üzerine gerçekleştirilen 5-20 J darbe deneylerinde yapıda bir hasar gözlenmemiştir. Laminelerin bu değer aralığından daha fazla enerji sönmemesi yapabildiği belirlenmiştir. Son kompozit tabakasını oluşturan fiber yönelimleri hemen altındaki Al plakada meydana gelen çatlağın yönünü doğrudan etkilediği bu çalışmada ortaya çıkarılmıştır. Metal ve kompozit tabakanın alt bitişik yüzeylerinde fiber yönelimine dik bir şekilde metal plakada çatlak yönelimi olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple fiber yönelimleri kompozit ve FML gibi yapıların mukavemetinin incelenmesinde önem arz eden bir parametre olduğu bu çalışmada daha net olarak anlaşılmıştır.

Kompozitlerde hasar incelemesi çoğunlukla hasarsız bir yapı üzerinde gerçekleştirilirken Damghani ve ark. (Damghani, Atkinson, Thapa, Joy, Monaghan, Maleki ve Ward, 2024) hasarlanmış CFRP yapılar üzerinde düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmiştir. Hasarsız, onarılmış ve 5 J darbe enerji değeri ile çarpışmaya maruz kalmış plakaların mekanik performansını değerlendirmiştir. Darbe sonrasında mukavemette düşüş olduğu belirlenmiştir. Hasarlı yapının onarım ihtiyacı fazla olduğu yapılarda çatlaklar ve delaminasyonlar daha fazladır. Darbe sonrasında az onarılmış ve orta düzeyde onarılmış yapıların statik dayanımını büyük bir çoğunluğunu geri kazandığı da belirlenmiştir.

Metaller ve alaşımların darbe davranışları kompozitler ile kıyasla daha basit ve tespit edilmesi kolay malzemelerdir. Kompozit yapılar kırılğan olduğundan dolayı darbe dayanımı metallere kıyasla daha düşüktür. Metaller sünek ve izotropik malzemelerdir (Kaware ve Kotambkar, 2022). N. Tsartsaris ve ekip arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada fiber metal laminelerden oluşmuş bir yapının üzerinde uygulanan düşük hızlı darbe yüklemesinin kompozite etkisini incelemiştir. Havacılıkta yoğunlukla kullanılan alüminyum alaşımlarla oluşturulan FML yapıları cam epoksi ile birleştirilmiş. Deneysel ve sayısal analizler ile mekanik davranışları gözlemlenmiş. Darbe sonucu hasar alanı tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri ile incelenmiştir. En alt metal tabaka ve ortada bulunan kompozit tabakalarda yoğun delaminasyonlar tespit edilmiş olup sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile de uyumlu olduğu görülmüştür (Tsartsaris, Meo, Dolce, Polimeno, Guida ve Marulo, 2011).

## **2.2. Pekiştirilmiş Plakalarda Hasar**

Pekiştirilmiş paneller kompleks yapılar olduğundan hasar davranışları da birçok farklı etkene dayanmaktadır. Pekiştirici tiplerinin hasar davranışı üzerinde etkilerinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular panellerde pekiştirici kullanımının panelin rijitliğinde ve mukavemetinde büyük oranda artış olduğu yönündedir. I-Tipi pekiştirici kullanılarak yapılan pekiştirilmiş panellerin diğer pekiştirici türlerine göre (T-Tipi ve düz pekiştirici kullanılmış) panele düşük hızlı darbe için daha yüksek performans özellikleri gösterdiği elde edilmiştir (Zhang, Zhou ve Sun, 2022). Z-Tipi ve L-Tipi pekiştirici kullanılarak yapılan pekiştirilmiş panelin burkulma analizinde Z-

Tipi pekiştiricinin daha yüksek yüklerde deformasyona uğradığı gözlenmiştir. Her iki tip pekiştirici için, burkulma yükünün yaklaşık %30 fazla yüklenmesi durumunda yapının çökmesi meydana gelmiştir (Bisagni ve Giavotto, 2009). T-Tipi pekiştirici kullanılmış karbon fiber takviyeli polimer malzemeden pekiştirilmiş panel ve lamine kompozitin darbe yüzeyine termoplastik poliüretan katmanı eklenerek emilen enerji ve hasar büyümesi karşılaştırıldığında termoplastik poliüretan katmanı eklenmiş kompozitin yüksek hızlı darbe davranışı açısından en az %54 daha verimli olduğuna ulaşılmıştır (Rizzo, D'Agostino, Cuomo, Pinto ve Meo, 2021). T-Tipi pekiştirici kullanılmış pekiştirilmiş panele düşük hızlı darbe uygulanması durumunda darbe sonrası performans özelliklerinde kırılma dayanımı %44 azalmıştır (Kim, Yu, Lim, ve Cho, 2020). Düzlem kayma gerilmesi durumunda Blade-Tipi, Şapka-Tipi ve T-Tipi pekiştirici kullanılmış pekiştirilmiş bir panelde burkulma analizinde Blade-Tipi pekiştirici kullanılmış pekiştirilmiş panelin daha çok veri çıktısını verdiği gözlenmiştir (Jain ve Upadhyay, 2010).

W. Sun ve ark. (Sun, Guan, Ouyang, Tan ve Zhong, 2018) bu çalışmalarında kompozit panellerin üzerine uygulanan darbe deneylerinde numunenin hasar tepkisi ve takviye eklenmesi ile pekiştirilmiş kompozit panelin hasar davranışındaki değişimlerin incelenmesi üzerine deney yapmışlardır. Eklenen üç adet T-pekiştirici, panelin burkulmaya ve hasarlı yüzeylerinin oluşmasına karşı önemli derecede etkili olmuştur. Panelin hasar eşiği 34 J olarak belirlenmiş ve bu enerji üzerinde darbe uygulandığında panelde hasar meydana geleceği gözlemlenmiştir. Bu enerji seviyesinin altındaki darbe enerjileri için pekiştirici elemanların panele uygulanmasına gerek olmadığı değerlendirilmiştir. Darbe enerjisinin 34 J değerinden yüksek olması durumunda pekiştirici elemanının panel ile olan bağının kopması ve plakalar arasında delaminasyon meydana geldiği görülmüştür. Fakat panelde hasar olmadığından dolayı sadece orta pekiştirici işlevini kaybetmesinden dolayı panel artık üç pekiştiricili değil iki pekiştiricili olarak kullanımına devam edebildiği gözlemlenmiştir.

K. S. Kumar ve ark. (Kumar, Patil ve Mallikarjuna, 2019) aynı yönelim açısına sahip farklı yönelimlerle oluşturulmuş birçok katmandan oluşan Cam/Epoksi ve Karbon/Epoksi plakaların üzerinde düşük hızlı darbe simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Testi Abaqus/Explicit ticari yazılımı ile gerçekleştirerek malzemelerin darbe davranışları simüle edilmiştir. Cam/Epoksi ve Karbon/Epoksi ile üretilen katmanlı plakaların verileri birbirlerine çok yakın seviyelerde çıktığı gözlemlenmiştir.

Düşük hızlı darbeler, pekiştirilmiş panellerin özellikle kalınlık yönünde performansını azaltmaktadır. Darbe sonrası analizlerde, pekiştirilmiş panelin darbe öncesine göre %20 daha az yük taşıma kapasitesinde olduğu görülmüştür. Bununla birlikte darbe hızının artışıyla darbe sonrası testlerde pekiştirilmiş panelin mekanik performansında azalma gözlenmiştir (Zou, Lei, Bai, Liu, Jiang, Liu ve Yang, 2021).

F. Rizzo ve ark. (Rizzo vd., 2019) tarafından gerçekleştirilen hibrit bir kompozit yapıya yüksek hızlı darbe simülasyonları ve bu simülasyonların deneysel veriler ile desteklenmesini kapsayan çalışmada malzemedeki darbe davranışının sayısal ve deneysel çıktılarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. LS-Dyna ticari yazılımı kullanılarak yapılan sayısal simülasyonların sonuçlarında, deneyler sonucunda elde edilen verilerine göre %6 ile %17 arasında sapma olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bir diğer adımı olarak bu oluşa hasar seviyesinin azaltılabilmesi adına karbon fiber takviyeli polimer (*Carbon Fiber Reinforced Polymer / CFRP*) malzemesiyle üretilen yapının üst yüzeyine farklı kalınlıklara sahip olan termoplastik poliüretan (TPU) tabakaları ve T-tipi pekiştiriciler eklendiğinde emilen enerji miktarının artış gösterdiği sayısal simülasyonlar ile belirlenmiştir. Sonuç olarak veriler incelendiğinde 1 mm kalınlığındaki TPU katmanının eklenmesi ile hasar alan, maksimum çatlak oluşumu ve emilen enerji değerlerinde sırasıyla %66, %35 ve %34 oranlarında iyileşmeler gerçekleşmiştir.

Kompozit yapıların çevresel etkiler sonucunda darbe davranışlarındaki değişimler de önemli bir inceleme konusudur. Özellikle havacılık sektöründe irtifa değişiminden dolayı oluşan ani sıcaklık değişimleri, kohezyon veya buzlanma gibi çevresel etkiler mekanik yapılarda etkilidirler. U. Khashaba (Khashaba, 2024) farklı sıcaklık değerlerinde cam elyaf dokumalarının düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Sıcaklık ile darbe hasar miktarının bağıntısını inceleyen bir metot kurgulamış ve deney seti oluşturmuştur. Fiber takviyelerinin sıcaklık değerinin değişimi ile rijit veya elastik bir yapıya sahip olduğu ve darbe sonucunda sönmölen enerji miktarının bu parametreler sonucunda farklı olduğu bulgusuna varılmıştır.

Kompozit plakalarda darbe sonucunda kritik derecede hasarlar oluşabilmektedir. Bu yapılar için mekanik özellikleri, üretim yöntemleri ve takviye eklenmesi gibi metotlar darbe sonucu hasarlanmaya karşı avantaj sağlamaktadır. Özellikle darbe hasarlarına karşı birçok yeni

yöntem ile önlem alınmaya çalışılmaktadır. Kompozitlerin darbeye karşı hassas yapılar olduğu bilindiğinden dolayı bu yapılar takviye elemanlarıyla desteklenmektedir. Xiao ve arkadaşları (Xiao, Lu, Li, Xu, Zheng, Wang, Wang ve Zhang, 2023) kabuklu deniz canlılıklarından elde edilen sedef ile kompozit plakayı kaplayarak yüzeyde ve mikro yapıda çatlak oluşumunun önüne geçmeyi hedeflemişlerdir. Bu yöntem işe yaramakla birlikte hasarlı alan oranını düşürmüş ve yapının dayanımı %5 gibi bir oranda arttırmayı da başarmıştır.

J. Zou ve ekibi asimetrik plakaların düşük hızı ve yüksek hızlı darbe sonucunda hasar davranışlarını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Tabakalar arasındaki delaminasyonları ultrasonik taramalar ile tespit etmişlerdir. Farklı darbe enerjilerinde kompozit plakanın fiber çatlaklarını, matris hasarını ve delaminasyon yoğunlukları değerlendirilmiştir (Zou, Lei, Bai, Liu, Liu, Huang ve Yan, 2023). Darbe sonucunda kompozitlerde çeşitli hasarlar görülmektedir. Elyaf hasarı, matris hasarı ve delaminasyonlar gibi hasarlar çarpışmanın kompozitler üzerindeki yıkıcı etkileridir. Özellikle kompozitlerde kalınlık yönünde sıkıştırma hasarı kritik hasar çeşitlerine dahil edilebilirler. Çarpışma noktasında yoğun bir şekilde meydana gelen bu hasar tipi vurucu kütlenin temas ettiği noktadan dairesel bir şekilde yayılım göstermektedir (Jiang, Zhang, Fu, Wang ve Ng, 2023).

Kumar ve diğerleri (Kumar, Rezasefat, Amico, Manes, Dolez ve Hogan, 2024); Ls-Dyna yazılımında bulunan iki farklı malzeme kartının kompozit plakalar üzerindeki darbe hasar etkisini incelemişlerdir. Dört farklı enerji miktarı ile darbe uygulanan plakaların mekanik davranışı ve hasarlanmaları gözlemlendi. MAT55 ve MAT162 materyal kartları içinde uygulanan darbeler sonucunda alınan veriler deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda MAT162 malzeme modelinin hasarlanma kriteri göz önüne alındığında daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

### **2.3. Eğri Kompozit Panellerin Darbe Davranışı**

K. I. Tserpes ve ark. (Tserpes, Karachalios, Giannopoulos, Prentzias, Ruzek, 2014; Ruzek, Kudrna, Kadlec, Karachalios ve Tserpes, 2014) tamamlamış olduğu iki çalışmayı birbirinin devamı olan iki yayın olarak sunmuşlardır. Çalışmada uçak gövdesini oluşturan bir eğri panel üzerine düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Gövdeyi oluşturan eğri

panel deneyler için düz bir formda üretilmiş ayrıca şapka tipi pekiştiriciler ve blade tipi şasiler ile mekanik açıdan desteklenmiştir. Gövde üzerinde oluşabilecek basınç, gerinim ve hasarın takibi açısından panelin üretimi açısından yapısına sensörler entegre edilmiştir. Bu sensörler kullanılarak yapıda oluşan hasar miktarı en aşağı seviyelere indirilecektir. Üretimden hemen sonra panel üzerine düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilerek gözle görülmeyecek düzeyde deformasyonlar meydana gelmesi sağlandı ve bu deformasyonlar C-tarama (*C-scan*) adı verilen bir metot ile gözlemlendi. İkinci aşamada çalışmanın amacı mekanik testler ve bu testlerin bir önceki çalışmada bahsedilen sensörler ile takibi gerçekleştirmektir. Darbe ve yorulma hasarları sonucunda yapının hasar yükü ve panellerdeki yer değiştirmenin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Sensörler ile alınan ölçümler panelin çarpma anında meydana gelen burkulmalardaki tüm değişikliklerin yakalanmış olduğu belirtilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarına göre pekiştirilmiş eğri kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışı üzerine yapılmış birçok çalışma mevcutken darbe sonrası titreşim davranışının incelenmesi ve optimizasyonu üzerine çalışmaların yeterli olmadığı görülmüştür. Hem pekiştirici elemanların hem de kompozit plakanın mekanik özelliklerinin darbe sonrasında titreşim cevabının incelenmesinin önem arz ettiği düşünülmektedir. Yuanqi Liu ve arkadaşları (Liu, Du, Zhang, Zhou, Ma ve Liu, 2024) silindirik katmanlı bir tüp üzerinde TNT patlaması sonucu yapıda oluşan gerinim ve titreşim davranışlarının incelenebileceği bir sonlu elemanlar yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Changjiang Liu ve arkadaşları da karbon fiber takviyeli polimer bir şemsiyenin üzerine uygulanan dolu düşme testleri sonucunda kompozit şemsiyenin mekanik özelliklerini ve sönümleme özelliği üzerinde inceleme yapmışlardır (Liu, Pan, Deng, Li, Zhang, Sun ve Huang, 2022).

Cam elyaf ve PLA ile üretilen eğri sandviç panelin darbe enerjisi emme kapasitesini değerlendirildiği çalışmada üç farklı eğrilik çapına sahip numune üretilmiştir. Eğri sandviç panel üzerine 10, 25 ve 80 J enerji ile çarpışma testleri uygulanmıştır. Darbe davranışlarını incelemek adına, sandviç panelin çekirdek yapısının mekanik özellikleri değiştirilerek ayrı ayrı deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda panel eğrilik çapının ve çekirdek tipinin darbe davranışını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Anti-tetrakiral tipi çekirdek modeli enerji Emilimi açısından diğer örneklerle göre daha efektif sonuçlar vermiştir (Atilla Yolcu ve Okutan Baba, 2024).

80, 150 ve 260 mm eğrilik yarıçapına sahip farklı formlarda üretilen karbon/pvc eğri panel üzerine düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin amacı eğrilik yarıçapının, pekleştirme metotlarının ve katmanların serim açısının darbe sonrasında mekanik davranışlarını irdelemek üzerinedir. Darbe sonucunda hasar oluşumunun eğrilik yarıçapına, elyaf serim açısına ve PVC-reçine takviyesine bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu üç parametreden darbe sonucu oluşan hasara en çok etki eden faktör eğrilik yarıçapıdır. Bu çalışmanın sonucunda sandviç yapılarının eğri paneller şeklinde üretilmesi darbe davranışı açısından daha avantajlı olacağı savunulmuştur (Liu, Ma ve Gao, 2023).

Genda Wang ve ekibi (Wang, Lu, Liu ve Fan, 2024) kavisli sandviç panellerin üzerine farklı varyasyonlarda darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Vurucu yarıçapı, hızı, temas açısı ve çarpma konumları değiştirilerek uygulamalar tamamlanmıştır. Bu analizler sonucunda dış ve iç peteklerin çekirdekli yapılarla oluşturulan numunelerin darbe enerji absorbe kapasiteleri irdelenmiştir. Çekirdekli yapı sandviç iç yapısında bulunduğu numunelerin darbe enerjisini sönmleme bakımında daha iyi oluğu anlaşılmıştır. Deformasyon parametresi göz önüne alındığında dış yapının çekirdekli olması daha verimli olduğu kanısına varılmıştır. Bu iki durum sonucunda hibrit bir yapı oluşturulup numune üzerinde düşük hızlı darbe gerçekleştirilmiş ve enerji emiliminde %3'lük bir artış gözlemlenmiştir. İç yapının çekirdekli olduğu duruma kıyasla %28 oranında daha az deforme olduğu kaydedilmiştir.

#### **2.4. İstatiksel ve Yapay Zekâ Tabanlı Teknikleri ile Hasar Tahminlemesi**

Kompozit yapıların darbe davranışı kullanım alanının yaygınlaşmasıyla daha da önem kazanmıştır. Bunun yanı sıra yapay zekâ destekli optimizasyon çalışmaları ile darbe sonucunda yapının olabildiğince az hasar görmesi için algoritmalar üzerine çalışılmaktadır. Yapay sinir ağı veya bulanık çıkarım gibi yapay zekâ teknikleri ile kompozit yapıların mekanik özelliklerinin optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir. J. A. Artero-Guerrero ve arkadaşları (Artero-Guerrero vd., 2018) kompozit plakaların istifleme yönü ile balistik yükleme davranışının değişimini deneysel ve sayısal yöntemler ile incelemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar YSA algoritması ile eğitilerek optimum değerler bu teknik ile elde edilerek yapının performansı iyileştirilmiştir.

Yufang Chen ve ekibi (Chen ve Zhao, 2023) eğri kompozit kirişin çeşitli parametreleri değiştirilmesi ile titreşim davranışını incelemiş ve bu parametrelerin etki seviyelerini incelemek adına bir yapay sinir ağı modeli geliştirmişlerdir. Geometrik parametrelerin değişmesi sonucunda doğal frekansları ve titreşim genlikleri üzerinde meydana gelen etkileri değerlendirmişlerdir.

M. H. Malik ve A. F. Arif yayımladıkları çalışmalarında kompozit yapıların kalınlık, istifleme sırası ve katman sayısı gibi parametrelerinin darbe davranışına yapmış olduğu etkiyi incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirdikleri sayısal simülasyonlarda yapının darbe sonunda sönümlendiği enerji miktarlarını yapay sinir ağına öğretmek tahmin çalışması gerçekleştirmişlerdir. Tüm bu parametreler bütün varyasyonlar ile modellenmiş ve sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Sonuç olarak YSA tekniği ile gerçeğe yakın bir tahmin çalışması yapılmıştır (Malik ve Arif, 2013).

Karbon fiber takviyeli kompozit yapıların darbe davranışı vurucu kütlesi, çapı ve yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Yang ve arkadaşları 125x75 mm<sup>2</sup> boyutlarındaki plaka üzerine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak düşük hızlı darbe simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakanın yedi farklı istifleme varyasyonu ile darbe tepkileri elde edilmiştir. Yapay zekâ uygulaması ile de bu varyasyonlar üzerinde tahmin çalışmaları yapılmış ve tahmin sonuçları, sonlu elemanlar sonuçları ile kıyaslandığında en fazla %5'lik bir sapma olduğu belirlenmiştir (Yang, Fu, Lee ve Li, 2021).

P. P. Bijlwan ve arkadaşları (Bijlwan, Prasad, Sharma ve Kumar, 2023) kompozit yapıların mekanik performansını incelemek için Taguchi metodu kullanmışlardır. Elyafın ağırlığı ve elyaf uzunluğu değiştirilirken sertlik ve aşınma durumları değerlendirme kriteri olarak kabul edilmiştir. Beş farklı ağırlık değeri ile dört çeşit mekanik performans kriterine dayandırılan Taguchi tahminlemesi L25 ortogonal dizisi ile gerçekleştirilmiştir.

D.C. O'Mahoney ve arkadaşları yapıştırılmış kompozit plakaların mekanik davranışlarını incelenmesi üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uygun bir sayısal analiz model oluşturup iki plakayı birbirine sonlu elemanlar yazılımı aracılığı ile yapışık halde modellemiştir. Üç farklı parametrenin değiştirilmesi ile kırılma davranışları incelenmiş ve Taguchi yöntemiyle de bu davranış üzerinde tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Yazarlar Taguchi tahminlemesinin sayısal sonuçlara yakın sonuçlar verdiği ve metodun analizleri desteklediği yorumuna ulaşmışlardır (O'Mahoney, Katnam, O'Dowd, McCarthy ve Young, 2013).

M. Murali Mohan ve ekibi Grafen oksit /Karbon fiber polimer kompozitlerin üretim sürecindeki parametrelerinin değişimiyle üretim performansını ve sürecin optimizasyonunu Taguchi yöntemiyle irdlemiştir. Grafen yoğunluğu, ilerleme hızı ve mil hızı parametrelerinin değişimi ile delaminasyon ve itme kuvveti değerlerindeki farklılıklar elde edilmiştir. Bunun sonucunda %2'lik grafen yoğunluğu 100mm/dk ilerleme hızı ve 2100 rpm mil hızı optimum proses için uygun parametre değerleri olduğu sonucuna varılmıştır. Bu parametreler arasından deformasyon ve itme kuvvetine yüzdesel olarak en çok etki eden parametrenin mil hızı olduğu görülmüştür. Taguchinin sağlamış olduğu bu önem derecesi sayesinde parametrelerin etki yüzdeleri de elde edilebilmektedir (Mohan, Bandhu, Mahesh, Thakur, Deka, Saxena ve Abdullaev, 2024).

A. Pattanaik ve arkadaşları kompozit bir plaka üzerinde aşınma deneyleri gerçekleştirmiş ve dört farklı parametrenin bu mekanik olaya etkisi Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. Deneyi onaylamak ve değerlendirme kriterlerini kontrol etmek için TOPSIS metodu kullanılmıştır. Değerlendirme kriterleri bu yöntemler kullanılarak çözümlenince aşınma davranışına parametrelerin etki oranları belirlenmiştir. Bu metodların kullanılmasıyla ihtiyaç duyulan deney sayılarında azalma olmuştur (Pattanaik, Satpathy ve Mishra, 2016).

### 3. YÖNTEM ve METOD

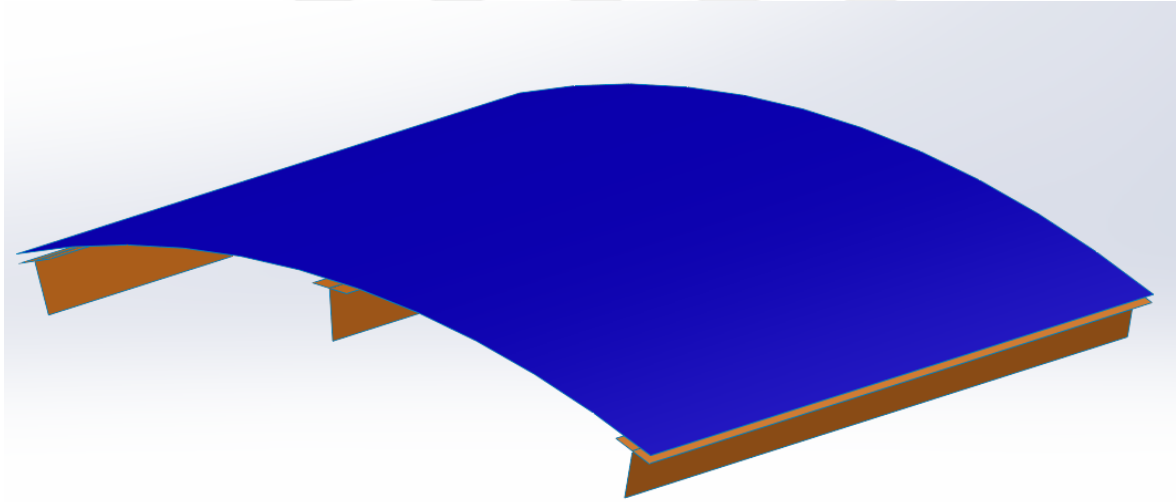
Yapı malzemelerinde en kritik hasar diye adlandırılabilen hasar türleri malzemede oluşan çatlaklar ve oyuklardır. Bu hasarların oluşmasındaki en büyük nedenlerden biri de yüzey üzerine etki eden ani darbelerdir. Meydana gelen bu darbeler sonucunda malzeme yüzeyinde veya iç yapısında hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar malzeme ömrünü doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmanın amacı; eğri bir forma sahip olan farklı pekiştirici sayılası ve pekiştirici tipleri ile güçlendirilmiş kompozit plaka üzerine düşük hızlı darbe simülasyonunu ticari bir yazılım olan LS-Dyna yazılımında simüle etmek ve elde edilen sonuçları istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı metotlar ile inceleyip yapıyı optimize etmektir.

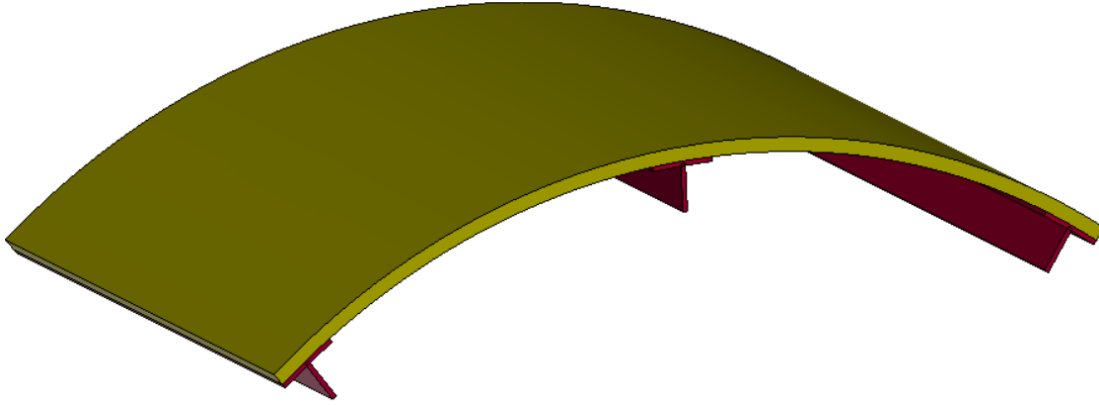
### 3.1. Geometri Modellemesi

Analizlerin simüle edilebilmesi adına darbe uygulanacak olan yapının bilgisayar ortamında modellenmesi gerekmektedir. Bu modelleme işlemi bilgisayar destekli tasarım (*Computer Aided Design / CAD*) olarak bilinmektedir. Plakanın ve vurucunun CAD çalışmaları için SolidWorks ve LS-Dyna yazılımları kullanılmış ve üç boyutlu yapı simülasyon için hazır duruma getirilmiştir.

Plaka ve pekiştiricileri SolidWorks yazılımında birer yüzey olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de SolidWorks yazılı ile modellenmiş olan pekiştirilmiş eğri panelin bir örneği yer almaktadır. Yapının katı olarak değil de yüzey olarak modellenmesinin temel nedeni, plaka ve pekiştirici kalınlıklarıyla bu yüzey oluşturma komutu sayesinde LS-PrePost üzerinden kolaylıkla değişiklik yapılabilmesidir. Şekil 3.1’de tasarlanan üç boyutlu modelin LS-Dyna yazılımına aktarılmış versiyonu Şekil 3.2’de verildiği gibidir.

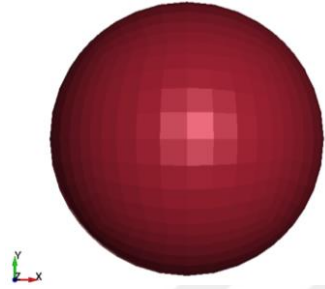


Şekil 3.1. T tipi üç pekiştiricili eğri plakanın SolidWorks yazılımında yüzey komutu ile modellenmesi



Şekil 3.2. Pekiştirilmiş eğri panelin LS-PrePost yazılımı ile uygun ölçülerde ve kalınlıkta modellenmesi

Eğri plaka ve pekiştirici modellemeleri SolidWorks ve LS-PrePost yazılımları bir arada kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra Şekil 3.3'te verilen 6 mm yarı çapında küresel vurucu LS-PrePost arayüzünden Sphere Solid komutu ile oluşturulmuştur.



Şekil 3.3. 6 mm yarıçapa sahip vurucu küre modellenmesi

Çalışmada incelenen iki farklı tip plaka ve pekiştiricilerin geometrik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Panel ve pekiştirici geometrik özellikleri

|                     | Eğri Kompozit Plaka |             | Düz Kompozit Plaka |             |
|---------------------|---------------------|-------------|--------------------|-------------|
|                     | Plaka               | Pekiştirici | Plaka              | Pekiştirici |
| En [mm]             | 200                 | 200         | 180                | 180         |
| Uzunluk [mm]        | 300                 | 16          | 100                | 16          |
| Boy [mm]            | -                   | 16          | -                  | 16          |
| <b>Vurucu Kütle</b> |                     |             |                    |             |
| Yarıçap [mm]        | 6                   |             |                    |             |

### 3.2. Sonlu Elemanlar Yazılımı

Sonlu elemanlar yazılımı kompleks bir geometriye sahip yapıların veya üç boyutlu araçların modellenmesini sanal ortamda gerçekleştirilerek üzerinde test simülasyonları yapmamızı sağlayan bilgisayar destekli araçlardır. Bu çalışmada LS-Dyna sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak pekiştirilmiş bir eğri plaka üzerine düşük hızlı darbe simülasyonu

gerçekleştirilmiştir. Bu yapılan analizlerin gerçeğe yakın olabilmesi için LS-Dyna/Explicit yöntemi kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar metodunda statik ve dinamik analizler Implicit ve Explicit çözücüler ile uygulanabilirler. Implicit çözücü numunenin anlık ve analiz süreci boyunca durumunu inceleyen çözücü türüdür. Explicit çözücü ise durum analizini gerçekleştiren, numunenin anlık durumundan daha çok belli bir zaman diliminden sonraki durumunu inceleyen çözücü modudur.

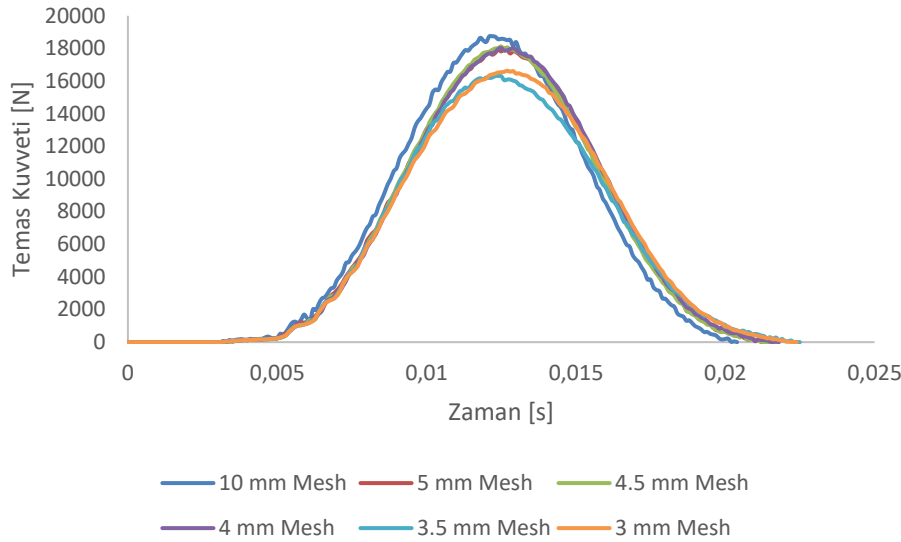
Günümüz teknolojisinde deneylerin uygulaması sürecinde ortaya çıkan üst düzey maliyetler ve harcanan zamanların önüne geçebilmek üzere sonlu elemanlar metodu (SEM) ile gerçekleştirilen simülasyonlar ön plana geçmiştir. Yapılan SEM analizleri gerçek zamanlı deney çıktıları ile de karşılaştırılarak doğrulukları kanıtlanmıştır.

### 3.3. Mesh Yakınsaması

Modellenen numunenin sayısal analizi için uygun ve sonlu elemanlar metodu için tanınabilir hale getirilebilmesi için ağ (mesh) atma işlemi yapılır. Bir katı veya kabuk için mesh atma işlemi o yapının geometrisinin yazılım dilinde uygun sayısal değerleri ile oluşturulması demektir. Mesh atma işlemi analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar vermesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Farklı hızlarda düşük hızlı darbe deneylerinin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi adına eğri pekiştiricisiz panel üzerine 2,5 m/s hızında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde panel üzerinde uygulanan mesh elemanı boyutları 10, 5, 4.5, 4 ve 3 mm olarak belirlenmiş ve bu eleman boyutları uygulanarak eğri panel üzerine düşük hızlı darbe analizleri uygulanmıştır. Bu analizlerde elde edilen kuvvet-zaman eğrileri değerlendirilerek en uygun mesh boyutu panel ve pekiştiricilere uygulanabilmesi için seçilmiştir. Kuvvet-zaman eğrisinin tepe noktası olan tepe kuvvet değeri her bir mesh boyutu için değerlendirilmiş ve sapma miktarı %0,5 olarak belirlenmiştir (Sanjaya, Prabowo, Imaduddin ve Binti Nordin, 2021). Her bir mesh boyutunda elde edilen tepe kuvvet değeri bu sapma miktarı aralığında olduğu belirlendiğinde uygun mesh boyutunun belirlendiği anlaşılmıştır. Bu uygulamanın temel sebebi ise sonuçlarda meydana gelen bu kadar az miktarda değişimin gerçekliği çok etkilemeyecek olmasından dolayıdır. Fakat mesh sayısı ne kadar artarsa analizin çözüm hızı o oranda artarak zaman kaybını ileri boyutlara taşıyacaktır.

Şekil 3.4'te mesh yakınsaması için yapılan yaklaşım sonucunda elde edilen kuvvet-zaman eğrileri verilmektedir. Bu analizler sonucunda 4 mm mesh boyutunun geometri ve sonuçların doğruluğu açısından en uygun mesh boyutu olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 3.4. Mesh boyutuna göre düşük hızlı darbe kuvvet-zaman çıktısı

### 3.4. Mekanik Özelliklerin Tanımlanması

Geometrilerin sonlu eleman yazılımı olan LS-Dyna aracında uygun sayısal formatta oluşturulmasının ardından üç boyutlu yapıların özünü oluşturan malzemelerin tanımlama işlemine geçilmiştir. Bunun için iki farklı malzeme tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki vurucu kütlelinin özü olan çeliğin *Mat Rigid* malzeme kartı ile bir parça olarak tanımlanmasıdır.

Eğri plaka ve pekiştiricileri için malzeme tanımlanabilmesi adına *Mat Enhanced Composite Damage* kartı kullanılmıştır. Bu kompozit kartı sayesinde farklı hasar kriterleri seçenekleri sunulmaktadır. Chang-Chang ve Tsai-Wu hasar kriterlerini kapsayan bu materyal kartı çeşitli simülasyon sonuçları çıktılarını sağlayabilmektedir. *MAT-055 Enhanced Composite Damage* hasar kriterine sahip malzeme kartı da kompozit yapıların matrislerinde Tsai-Wu, fiber takviyelerinde Chang-Chang hasar kriterlerinin uygulandığı materyal kartıdır (Feraboli, Wade, Deleo, Rassaian, Higgins ve Byar, 2011; Nyambeni ve Mabuza, 2011).

Çizelge 3.2. Karbon Fiber Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

| Mekanik Özellikler                       | Değer     | Birim             | Sembol     |
|------------------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Yoğunluk                                 | 1570      | kg/m <sup>3</sup> | $\rho$     |
| Elastisite Modülü (Boyuna Yön)           | 132       | GPa               | $E_1$      |
| Elastisite Modülü (Enine Yön)            | 10,3      | GPa               | $E_2$      |
| Poisson Oranı                            | 0,25      | -                 | $\nu_{12}$ |
| Kayma Modülü                             | 6500      | MPa               | $G_{12}$   |
| Boyuna Basınç Dayanımı                   | 1050      | MPa               | $X_C$      |
| Boyuna Çekme Dayanımı.                   | 2100      | MPa               | $X_T$      |
| Enine Basınç Dayanımı                    | 132       | MPa               | $Y_C$      |
| Enine Çekme Dayanımı                     | 24        | MPa               | $Y_T$      |
| Kesme Dayanımı                           | 75        | MPa               | $S_C$      |
| Matris için maksimum gerinim             | 0,0128155 | -                 | DFAILM     |
| Maksimum kayma gerinimi                  | 0,03      | -                 | DFAILS     |
| Elyaf sıkıştırması için maksimum gerinim | -0,007955 | -                 | DFAILC     |
| Elyaf gerginliği için maksimum gerinim   | 0,0159091 | -                 | DFAILT     |

Plaka ve pekiştiricileri oluşturan karbon elyaf kompozitin materyal tanımlaması için MAT 055- Enhanced Composite Damage kartı kullanılmıştır. Çizelge 3.2’te plaka ve pekiştirici elemanlarını oluşturan T700 karbon fiber malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir (Wang, Wu, Ma ve Feng, 2011). MAT-055 materyal kartının kullanılabilmesi için Eş. 3.1’de yer alan eşitliği sağlaması gerekmektedir. Bu eşitliğin sağlanmadığı koşullarda sayısal simülasyon tamamlanamaz.

$$\nu_{12} = \nu_{21} * E_1 / E_2, \nu_{12} * \nu_{21} < 1 \quad (3.1)$$

Karbon fiber kompozitin gerinim hasar kriterleri Eş. 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5’te verilmektedir (Yao, Yu, Wang ve He vd., 2021).

$$DFAILM = \frac{Y_C}{E_2} \quad (3.2)$$

$$DFAILS = \frac{S_C}{G_{12}} \quad (3.3)$$

$$DFAILC = -\frac{X_C}{E_1} \quad (3.4)$$

$$DFAILT = \frac{X_T}{E_1} \quad (3.5)$$

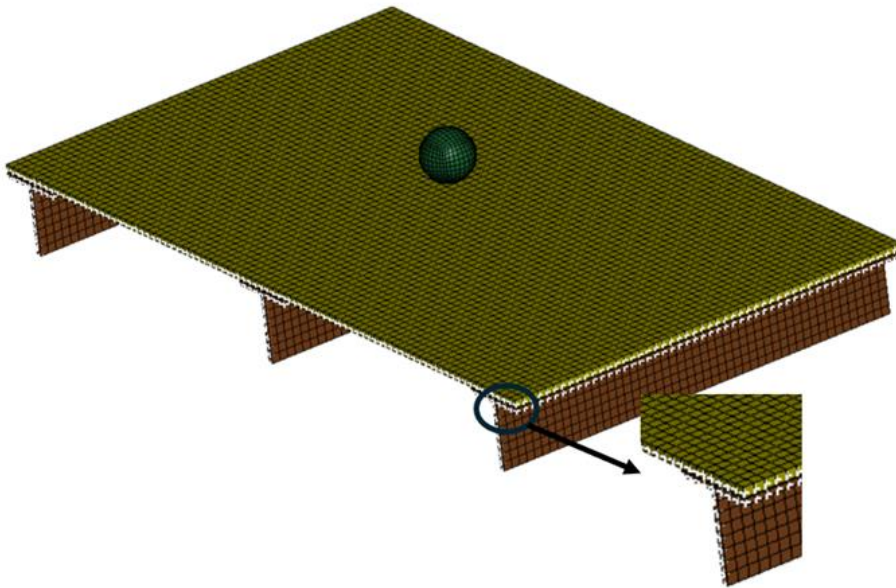
Bu çalışmada ele alınan pekiştirilmiş Tsai-Wu hasar kriteri seçilmiştir.

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_6\tau_{12} + F_{66}\tau_{12}^2 \leq 1 \quad (3.6)$$

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}\right), F_2 = \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}\right), F_{12} = -\sqrt{\frac{1}{X_TX_C} * \frac{1}{Y_TY_C}}, F_{11} = \frac{1}{X_TX_C}, F_{22} = \frac{1}{Y_TY_C}, F_{66} = \frac{1}{S_C^2} \quad (3.7)$$

### 3.5. Sınır Koşullarının Tanımlanması

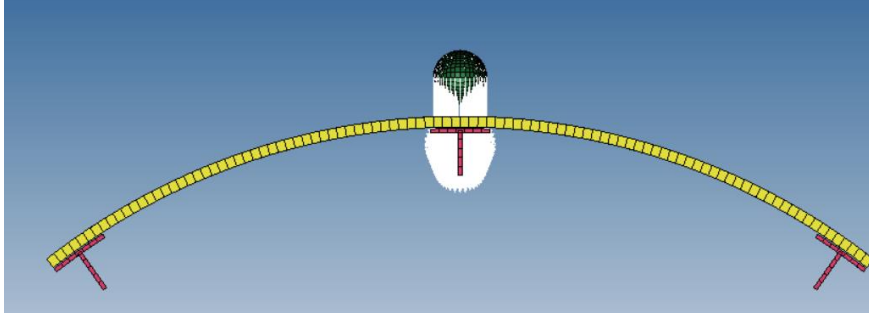
Plakaların ve pekiştiricilerin sınır koşullarının deney düzeneğindeki ile ya da pekiştirilmiş panelin işlev göreceği yapı içerisindeki aynı olması gerekir. Bu sınır koşulları sayısal simülasyonda modellenmiştir. Plakanın dört kenarı ve takviyeler kenar bölgelerinde sabitlendiğinde, panel bu kenarlarda öngörülen darbeye bağlı olarak rijit bir şekilde tutulmuştur. Panel her bir kenarından, pekiştiriciler ise uçlarından sabitlenmiştir. Şekil 3.5 sınır koşullarının düz plakada nasıl uygulandığını göstermektedir.



Şekil 3.5. Plakaya ve pekiştirici elemanlarına uygulanan örnek sınır koşulları

Sabitlenen plaka ve pekiştiricilerin ardından belirli bir kinetik enerji ile darbe uygulayacak olan kütle hız ve yönü *Initial Velocity Generation* kartıyla girilir. Vurucu pekiştirilmiş

plakaların orta noktasında darbe uygular. Böylece çarpma plakanın merkezinde gerçekleşmektedir. Şekil 3.6’da tanımlanan hız ve yönü belirtilmektedir.



Şekil 3.6. Vurucu kütlenin hareket yönü

### 3.6. Temas Koşullarının Tanımlanması

Çarpma simülasyonunda hız ve sınır koşulları tanımlanmasının ardından farklı yapıların birbirleri arasındaki temas koşullarının tanımlanması gerekeceğinden dolayı uygun temas kartlarından biri veya birden fazlası yapılara uygulanır. Bu kartların tanımlanmamasından veya hatalı bir tanımlama gerçekleştirilmesiyle birlikte kompozit eğri plaka ya hiçbir tepkiye maruz kalmayacak ya da gerçeğe uygun bir davranış sergilemeyecektir.

Bu çalışmada öncelikle vurucu kütle ile pekiştirilmiş eğri plakanın üst yüzeyi arasında kontak atanmıştır. Bunun için tercih edilen temas kartı *Contact Automatic Nodes to Surface* temas kartıdır. Plaka ve vurucu yüzeylerinin birbiri ile temasını sağlayan bu temas kartı temas anında vurucu ile plaka arasında oluşan statik ve dinamik sürtünmelerin modellenmesini de sağlamaktadır. Statik sürtünme katsayısı (FS) 0,20 olarak girilmiştir.

Vurunun plakaya temasının ardından pekiştiricilere iletilmesi beklenen enerjinin doğru aktarılabilmesi adına eğri plaka ve pekiştiriciler arasında *Contact Automatic Surface to Surface* komutu kullanılmıştır. Pekiştirici elemanlarını oluşturan flanşlar (*flange*) ve gövde arasında kullanılan kontak kartı da *Contact Automatic Surface to Surface* olarak belirlenmiştir.

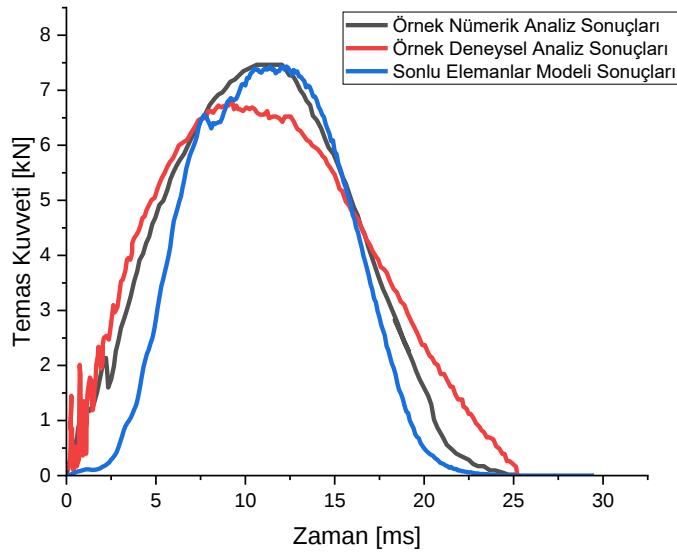
### 3.7. Veri Toplama

Analiz için tüm malzeme kartları, temas ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra analiz çıktılarının uygun formatta alınabilmesi için LS-Prepost arayüzünde uygun bilgi aktarma seçenekleri ve parametreleri tanımlanmaktadır. *Hourglass Title* komutu, darbe sonrasında mesh elemanlarının sıfır gerinim değerinde geometrisinde değişime uğramasının önüne geçmek için kullanılır. Sıfır gerinim değerinde mesh elemanları kum saati modeline benzeten bir form şeklini alarak gerçek dışı bir cevap verdiği görülmüştür. Bunun için *Hourglass Title* kartında kontrol tipi mod 8 olarak alınması gerektiği belirlenmiştir ve katsayısı 0,03 değeri olarak alınmıştır. Uygun kum saati enerji verilerinin analiz sonunda aktarılabilmesi adına yapay sertlik uygulaması yapılmalıdır.

Uygun grafik çıktılarının analiz sonucunda elde edilebilmesi adına *GLSTAT*, *MATSUM*, *RCFORC* ve *BINARY D3PLOT* komutları kullanılarak sonlu elemanlar analizinde veri çekilmiştir.

### 3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi Doğrulaması

Bu bölümde düşük hızlı darbe simülasyon modelinin doğruluğu belirleyebilmek adına kaynak (Uyaner, Kara, Kepir ve Gunoz, 2023) seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntem Uyaner ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu deneylere uygun şekilde entegre edilerek sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir. Şekil 3.7’de referans çalışmasındaki deneysel ve sayısal analizler sonucunda elde edilmiş olan temas kuvvetlerinin zamana bağlı değişimleri ile bu çalışmada kullanılan sayısal yöntem sonucunda elde edilen kuvvet geçmişi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7. Sonlu elemanlar analiz modelinin doğrulaması

### 3.9. Veri İşleme

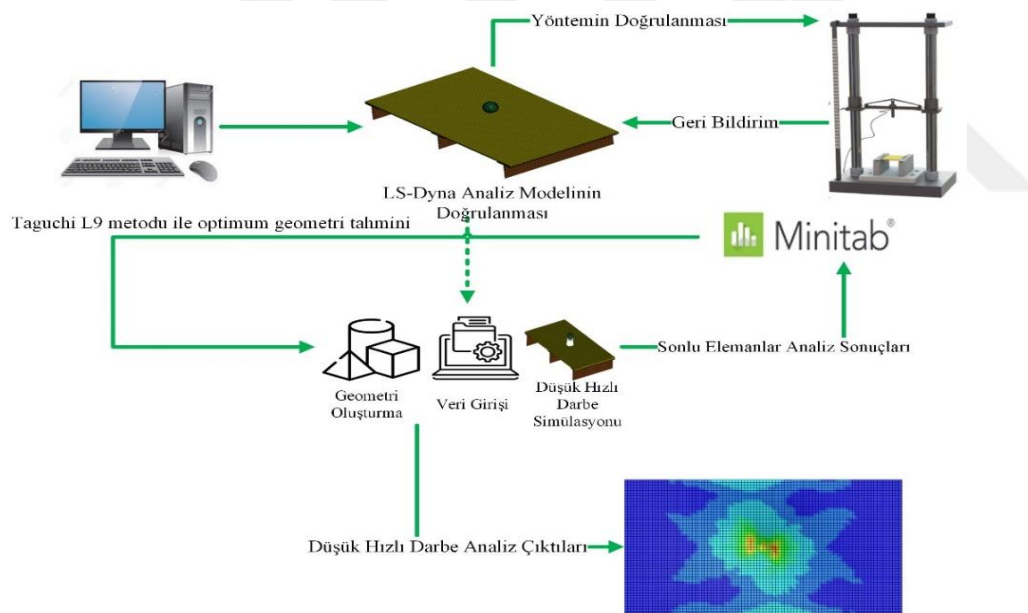
Tez kapsamında pekiştirilmiş tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı ve optimizasyonu sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Düşük hızlı darbe simülasyonları için LS-Dyna yazılımı tercih edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar istatistiksel ve yapay zekâ temelli metotlar ile irdelenip plaka ve pekiştirici elemanları üzerinde optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

#### 3.9.1. Taguchi L<sub>9</sub> Metodu ile Tahminleme

İstatistiksel bir tahmin metodu olan Taguchi çeşitli parametrelerin etki değerlerini irdelemek ve optimum deney düzeneğini oluşturabilmek için kullanılan bir yöntemdir. Taguchi L<sub>9</sub> metodu ile pekiştirilmiş tabakalı kompozit plakaların elyaf serim açısının, katman kalınlığının ve plaka kalınlığının darbe davranışı incelenerek darbe sonrası en düşük deformasyonu sağlayacak parametreler belirlenmiştir. Taguchi L<sub>9</sub> metodu gibi istatistik temelli metotların kullanılmasıyla deney sayısı gibi parametreleri minimize ederek optimum tasarım koşullarının tahmini yapılabilmektedir (Aabid, Ibrahim, Hrairi ve Ali, 2023; Bijlwan vd., 2023).

180x100 mm boyutunda ve T-tipi pekiştiriciler ile desteklenen panellerin geometrik tasarımı LS-Prepost arayüzü ile tamamlanmıştır. Plakayı oluşturan her bir katmanının kalınlığı 0,25, 0,35 ve 0,45 mm olmak üzere üç farklı kalınlık değerinde olmaktadır. Katman sayısı da 8, 12 ve 16 olmak üzere en ince plaka 2 mm ve en kalın plaka ise 7,2 mm dir. [0/90], [0/45/-45/90] ve [0/30/60/90] olmak üzere 3 farklı istifleme açısı ile modellenen bu plakaların her birine yarıçapı 6 mm ve kütlesi 1,5 kg olan vurucu ile 7,5 m/s hız ile düşük hızlı darbe uygulanmıştır.

Düşük hızlı darbenin uygulanacağı plakanın mekanik tasarımını oluşturan üç parametrenin 3 değeri ile toplamda 27 koşul içinde yalnızca 9 tanesini Taguchi L9 yöntemi ile çözümleyerek optimum tasarım değerleri belirlenmiştir. Yapının darbe sonrası deformasyon miktarı değerlendirme kriteri olarak göz önüne alınmıştır. Taguchi L9 yöntemi ile minimum deformasyona uğrayan plakanın özellikleri belirlenmiştir. Yürütülen optimizasyon çalışmasının metodolojisi Şekil 3.8’de verildiği gibidir.



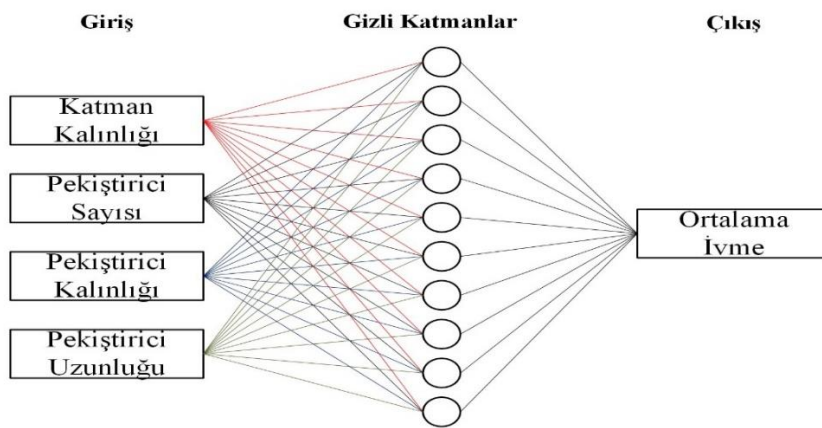
Şekil 3.8. Taguchi L9 tahmin metodolojisi

Taguchi L9 da “*smaller the better formula*” kriteri kullanılarak darbe sonucunda en düşük deformasyon oluşturacak mekanik tasarım parametreleri elde edilmiştir. Smaller the better formülü Eş. 3.8’de verildiği gibidir (Güvenç, Çakır ve Mistikoglu, 2019).

$$S/N = -10 \log \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{Y^2}{n} \right) \quad (3.8)$$

### 3.9.2. Yapay Sinir Ağları ile Tahmin ve Optimizasyon

Kompozit plakanın farklı varyasyonlara sahip olduğu durumlarda düşük hızlı darbe davranışının incelenebilmesi için yapay zekâ tekniklerinden biri olan yapay sinir ağı (YSA) metoduna başvurulmuştur (Mahendru, 2024; Zhou, Yin ve Hu, 2009). T-tipi pekiştirici ile pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın üzerine düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. LS-Dyna yazılımı ile gerçekleştirilen darbe simülasyonları sonucunda kompozit plaka ve pekiştiricilerin titreşim davranışı incelenmiştir. Pekiştirici kalınlığı, pekiştirici sayısı, pekiştirici yüksekliği ve plaka katman sayısı parametreleri değiştirilerek gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonucunda yapının titreşim davranışları elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu 81 farklı sanal deney sonucunda elde edilen ivme-zaman verileri bir programlama dili kullanılarak Hızlı Fourier Dönüşümü (*Fast Fourier Transform – FFT*) gerçekleştirilmiştir. FFT sistemde meydana gelen kritik frekans değerini sistemi çözümleyerek ulaşma yöntemidir. Elde edilen ivme verilerinden yapının darbe sonrası üzerinde oluşan maksimum- minimum ivmelenme ve FFT dönüşümü sonucunda elde edilen ortalama ivme değerleri yapay zekâ teknikleri ile incelenerek pekiştiricili eğri kompozit plakanın optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’da bu optimizasyon çalışmasında kullanılan YSA modeli verilmiştir.



Şekil 3.9. Optimizasyon çalışmasında kullanılan YSA modeli

Yapay sinir ağı (YSA) deneysel ve sayısal sonuçları değerlendirme kriterlerine göre öğrenen, işleyen ve gerçeğe son derece yakın tahminleme yapabilen bir yazılım metodudur. Girişte verilen bilgiler çıktı alınana kadar işlenir ve değişkenleri etkileri analiz edilir. Hata

oranının azaltılması adına modele parametrelerin değiştirilmesi sonucunda değerlendirme kriterine göre değişiklikleri öğretilir (Asteris ve Mokos, 2020).

#### 4. BULGULAR

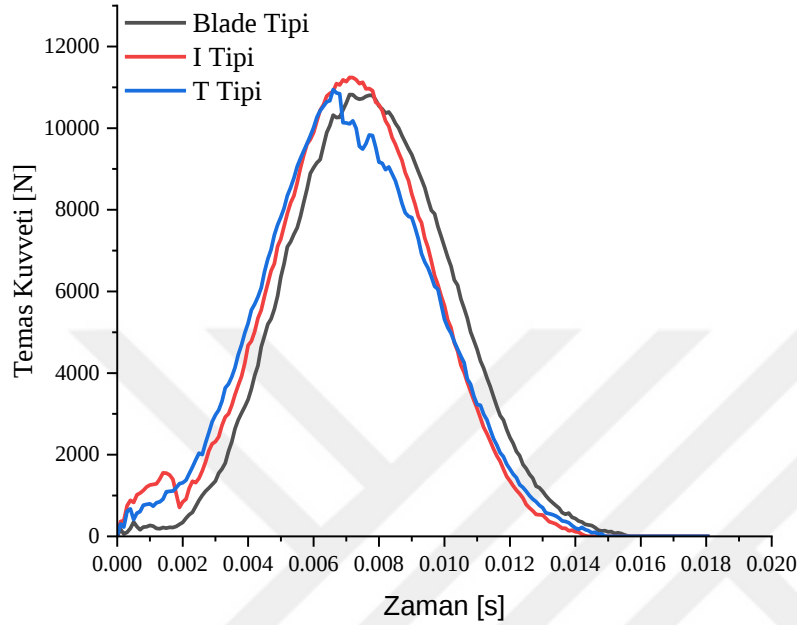
Bu kısımda pekiştirici tipi olarak düz, I ve T tipi olmak üzere 3 farklı pekiştirici geometrisi ile desteklenmiş eğri panelin düşük hızlı darbe cevabının sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Sayısal simülasyonlar sonucunda kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

200x300x4 mm boyutlarındaki pekiştiricili eğri E/Cam Epoksi plaka üzerine 2,5 m/s hızla düşük hızlı darbe simülasyonu LS-Dyna yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda darbe sonrası plakada oluşan temas kuvveti, enerji ve yer değiştirme değerlerinin zamana karşı değişimleri elde edilmiştir. Maksimum temas kuvveti, enerji sönümleme oranları ve kalıcı deformasyon miktarları da analizler neticesinde elde edilen değerlerdir.

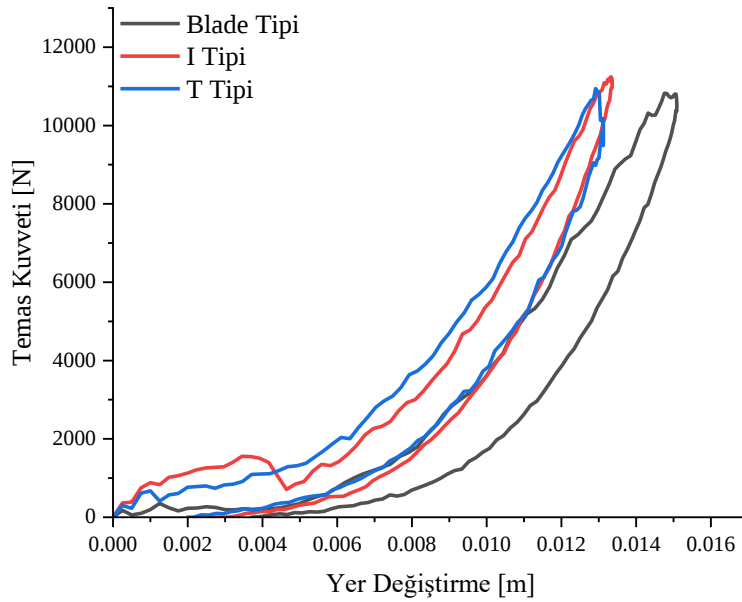
Çizelge 4.1. E/Cam Epoksi Mekanik Özellikleri

| Mekanik Özellikler                       | Değer     | Birim           | Sembol     |
|------------------------------------------|-----------|-----------------|------------|
| Yoğunluk                                 | 1840      | $\text{kg/m}^3$ | $\rho$     |
| Elastisite Modülü (Boyuna Yön)           | 42        | GPa             | $E_1$      |
| Elastisite Modülü (Enine Yön)            | 9,5       | GPa             | $E_2$      |
| Poisson Oranı                            | 0,34      | -               | $\nu_{12}$ |
| Kayma Modülü                             | 3500      | MPa             | $G_{12}$   |
| Boyuna Basınç Dayanımı                   | 300       | MPa             | $X_C$      |
| Boyuna Çekme Dayanımı.                   | 690       | MPa             | $X_T$      |
| Enine Basınç Dayanımı                    | 147       | MPa             | $Y_C$      |
| Enine Çekme Dayanımı                     | 66        | MPa             | $Y_T$      |
| Kesme Dayanımı                           | 56        | MPa             | $S_C$      |
| Matris için maksimum gerinim             | 0,001547  | -               | DFAILM     |
| Maksimum kayma gerinimi                  | 0,016000  | -               | DFAILS     |
| Elyaf sıkıştırması için maksimum gerinim | -0,007143 | -               | DFAILC     |
| Elyaf gerginliği için maksimum gerinim   | 0,0164286 | -               | DFAILT     |

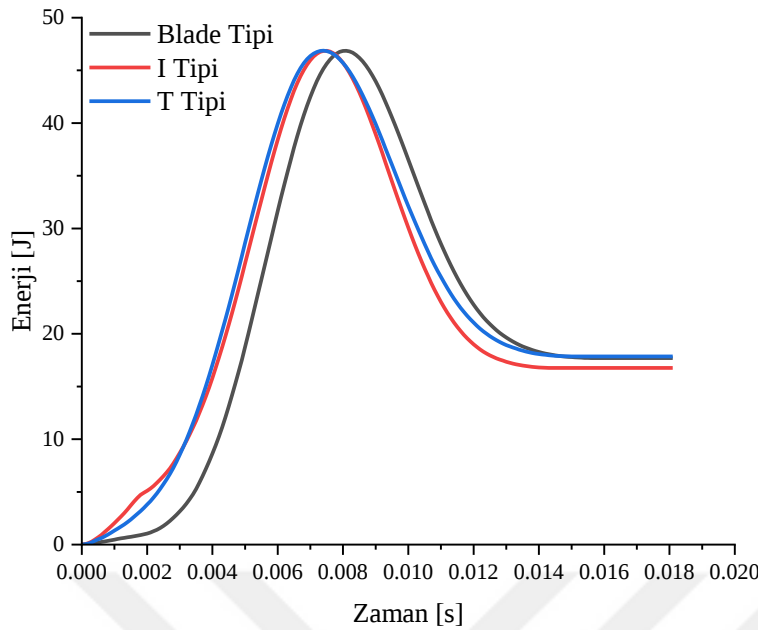
Bu analizler sonucunda pekiştirici tipinin deformasyon miktarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te sırasıyla kompozit eğri plakanın farklı tip pekiştiricilerle güçlendirilmiş plakaların temas kuvveti-zaman, temas kuvveti-yer değiştirme ve enerji-zaman verileri verilmiştir.



Şekil 4.1. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen temas kuvveti değişimi



Şekil 4.2. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen temas kuvveti- yer değiştirme değişimi



Şekil 4.3. Pekiştirici tipine göre darbe sonrası plakada meydana gelen enerji-zaman değişimi

Elde edilen bu veriler sonucunda T tipi pekiştiricili plakanın darbe sonucunda uğradığı deformasyon diğer pekiştiricili plakalardan daha düşüktür. Bu sebeple plakaların T tipi pekiştiricilerle güçlendirilmesi daha yüksek performans sağlayacağı kanısına varılmıştır.

#### 4.1. Düşük Hızlı Darbe Hasar Davranışının Taguchi Analizi

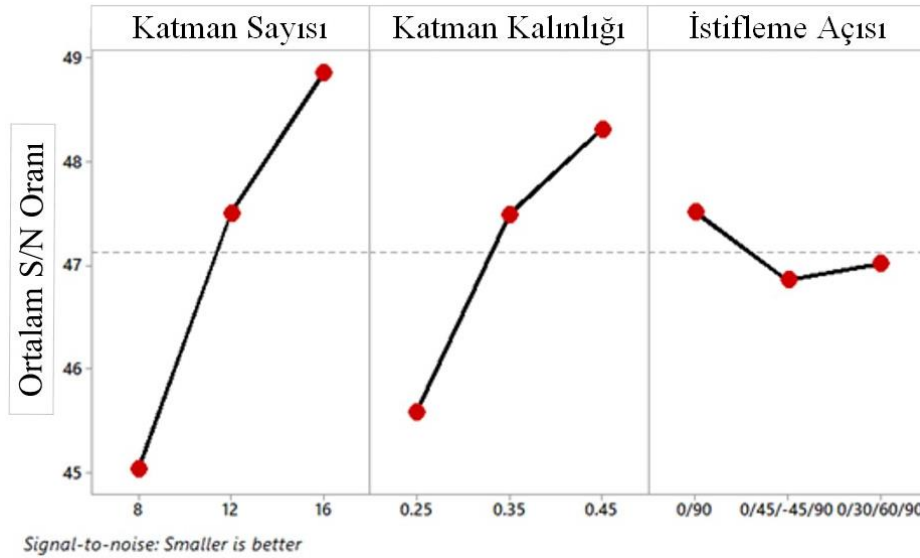
Pekiştirilmiş kompozit plakaların bahsedilen üç farklı parametre ve bu üç parametrenin 3 değeri ile ayrı ayrı modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların üzerine 7,5 m/s hızla 1,5 kg'lık metal bilye ile düşük hızlı darbe uygulanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda yapının darbe davranışları, enerji absorbe miktarının ve temas kuvvetinin zaman bağlı değişimleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.2, Taguchi L9 yönteminde kullandığımız parametreleri sunmaktadır. Bu parametrelerden maksimum deformasyon değerleri LS-Dyna analizinden alınmıştır. Taguchi L9 yöntemi en düşük deformasyona maruz kalacak mekanik tasarım parametrelerini ortaya çıkartabilmektedir.

Çizelge 4.2. Taguchi L9 yönteminde kullanılan parametre verileri

| Katman Sayısı | Katman Kalınlığı [mm] | İstifleme Yönü             | Maksimum Deformasyon |
|---------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| 8             | 0,25                  | [0/90] <sub>4</sub>        | 0,006468             |
| 8             | 0,35                  | [0/45/-45/90] <sub>2</sub> | 0,005521             |
| 8             | 0,45                  | [0/30/60/90] <sub>2</sub>  | 0,004947             |
| 12            | 0,25                  | [0/45/-45/90] <sub>3</sub> | 0,005192             |
| 12            | 0,35                  | [0/30/60/90] <sub>3</sub>  | 0,004131             |
| 12            | 0,45                  | [0/90] <sub>6</sub>        | 0,003502             |
| 16            | 0,25                  | [0/30/60/90] <sub>4</sub>  | 0,004350             |
| 16            | 0,35                  | [0/90] <sub>8</sub>        | 0,003306             |
| 16            | 0,45                  | [0/45/-45/90] <sub>4</sub> | 0,003275             |

Şekil 4.4, Minitab yardımıyla elde edilen minimum deformasyon için optimum tasarım parametrelerini göstermektedir. Sinyal/Noise oranı değerlendirme kriteri olarak kullanılan parametrenin ortalama değerinin standart sapmaya oranıdır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere minimum deformasyon için optimum mekanik parametreler 16 katman sayısı ve 0,45 mm katman kalınlığıdır. [0/90] ve [0/45/-45/90] istifleme sıralamalarına ait değerleri neredeyse aynı seviyededir (Khan vd., 2021; Lyu, Hung, Ay, Tsai ve Chiang, 2022).



Şekil 4.4. Taguchi L<sub>9</sub>'dan elde edilen optimum parametre değerleri

Optimum parametre değerlerinin belirlenmesinin yanı sıra ANOVA analizleri ile parametrelerin deformasyon miktarına etkisi de ortaya çıkarılmıştır. Katman sayısı ve katman kalınlığındaki değişimler elyaf istifleme yönüne kıyasla deformasyon miktarına daha çok etki etmektedir (Sharma, Khan ve Velmurugan, 2019). Katman sayısı, katman kalınlığı ve elyaf istifleme yönü parametrelerinin etki değerleri sırasıyla %57,75, %40,57 ve %1,68 şeklindedir. Bu sonuçlar elyaf istifleme yönünün darbe sonucunda deformasyona etkisinin olmadığını göstermektedir (Bunea, Bria, Silva, Bîrsan ve Buciumeanu, 2021). Bir başka ifadeyle elyaf istifleme yönü diğer iki parametreye nazaran panel deformasyonuna daha az etki etmektedir. Elyaf istifleme yönü, katman kalınlığı ve katman sayısına bağlı olarak deformasyonu veren regresyon Eş. 9'de verilmiştir.

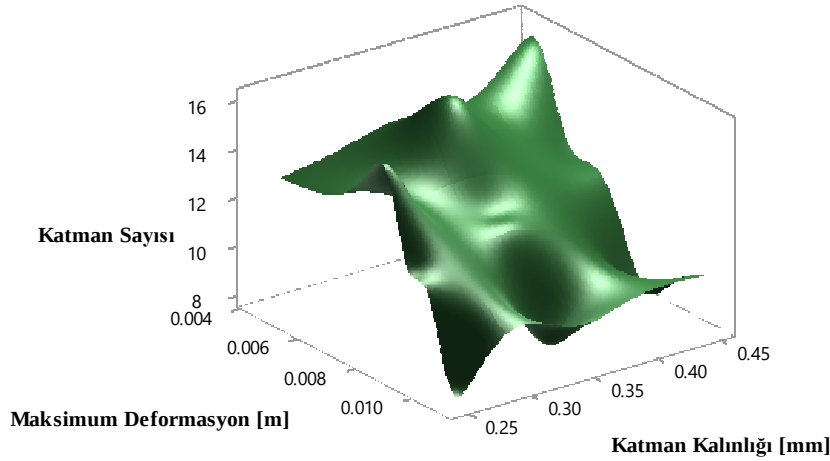
$$\begin{aligned}
 \text{Maks Def.} = & 0,008142 + 0,001770 \text{ LN}_8 - 0,000101 \text{ LN}_{12} \\
 & - 0,001669 \text{ LN}_{16} + 0,001470 \text{ LT}_{0,25} - 0,000060 \text{ LT}_{0,35} \quad (9) \\
 & - 0,001411 \text{ LT}_{0,45} - 0,000216 \text{ SS}_{0/90} \\
 & - 0,000089 \text{ SS}_{[0/45/-45/90]} + 0,000305 \text{ SS}_{[0/30/60/90]}
 \end{aligned}$$

LN: Katman Sayısı

LT: Katman Kalınlığı

SS: İstifleme Açısı

Şekil 4.5 ise katman sayısı ve katman kalınlığının deformasyon miktarına etkisini göstermektedir.



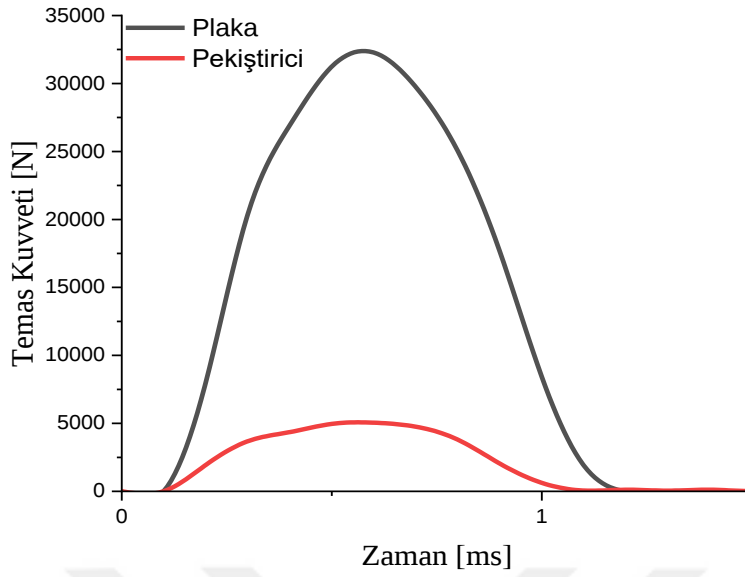
Şekil 4.5. Katman kalınlığı ve katman sayısının deformasyona etkisinin yüzey grafiği

Tahmin analizi, Şekil 4.1'de elde edilen optimum parametre değerleri ile Minitab yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Katman sayısı, katman kalınlığı ve istifleme sırası sırasıyla 16, 0,45 ve [0/90]<sub>8</sub> olarak girilmiş ve ardından deformasyon tahmini istenmiştir. Tahmin sonucunda optimum parametre değerine sahip plakanın deformasyon miktarı 2,93 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan Taguchi L9 yöntemi ile analiz edilen parametreler için tahmin edilen deformasyon miktarları ve hata oranları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Taguchi tahmini ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve tahmin hata oranı

| Katman Sayısı | Katman Kalınlığı [mm] | İstifleme Açısı            | Tahmini Deformasyon [m] | Gerçek Deformasyon [m] | Hata [%] |
|---------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------|
| 8             | 0,25                  | [0/90] <sub>4</sub>        | 0,006365                | 0,006468               | 1,59     |
| 8             | 0,35                  | [0/45/-45/90] <sub>2</sub> | 0,005584                | 0,005521               | 1,14     |
| 8             | 0,45                  | [0/30/60/90] <sub>2</sub>  | 0,004987                | 0,004947               | 0,81     |
| 12            | 0,25                  | [0/45/-45/90] <sub>3</sub> | 0,005232                | 0,005192               | 0,77     |
| 12            | 0,35                  | [0/30/60/90] <sub>3</sub>  | 0,004028                | 0,004131               | 2,50     |
| 12            | 0,45                  | [0/90] <sub>6</sub>        | 0,003566                | 0,003502               | 1,83     |
| 16            | 0,25                  | [0/30/60/90] <sub>4</sub>  | 0,004414                | 0,004350               | 1,47     |
| 16            | 0,35                  | [0/90] <sub>8</sub>        | 0,003346                | 0,003306               | 1,21     |
| 16            | 0,45                  | [0/45/-45/90] <sub>4</sub> | 0,003172                | 0,003275               | 3,15     |

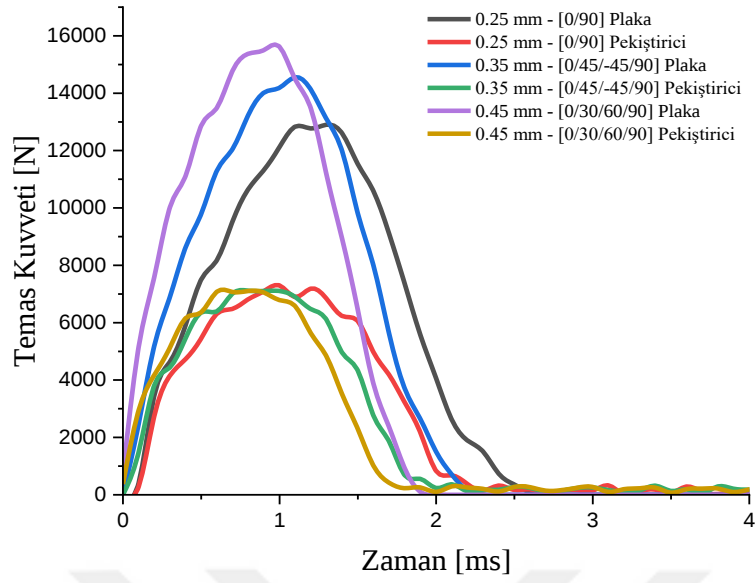
Taguchi metodu ile elde edilen optimum parametreler ile pekleştirilmiş panelin düşük hızlı darbe simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile elde edilen temas bölgesindeki kuvvetin zaman bağlı değişimi Şekil 4.6'te verilmiştir.



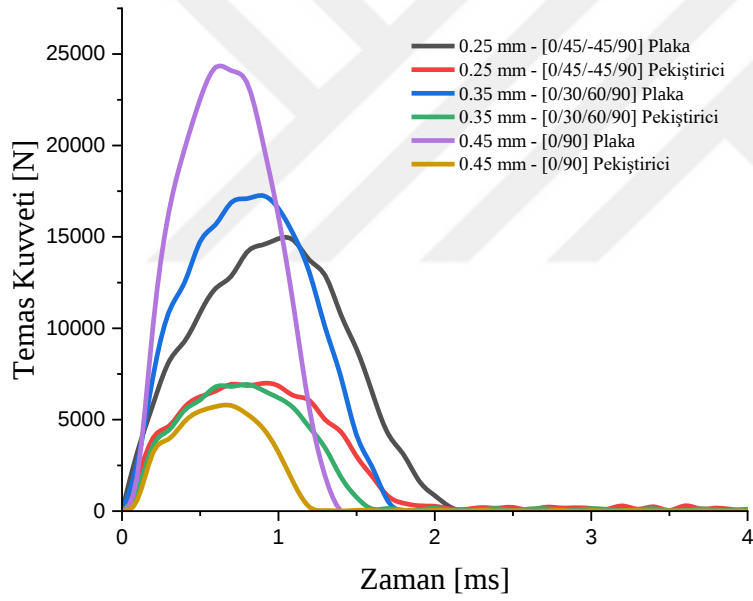
Şekil 4.6. 0,45 mm katman kalınlığına ve [0/90] istifleme sırasına sahip 16 katmanlı plakanın temas kuvveti-zaman eğrisi

Şekil 4.6, darbe esnasında pekleştirilmiş plakanın üzerindeki kuvvet geçmişini göstermektedir. Vurucu kütle plakaya temas ettiği andan itibaren plaka üzerinde gerilmeler ve kuvvet oluşumu görülmektedir. Kompozit plaka bu kuvvetin bir kısmını doğrudan pekiştiricilere ileterek yükün bir kısmını pekiştiricilere aktarmaktadır.

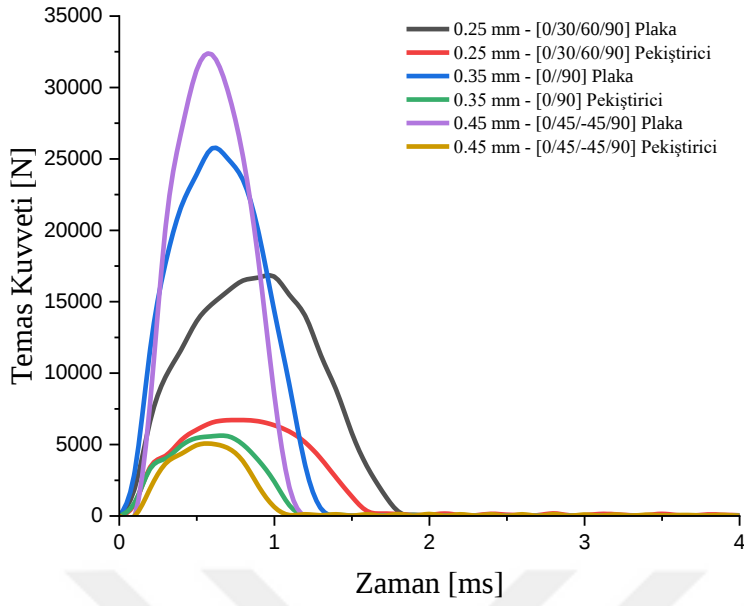
Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da sırasıyla 8, 12 ve 16 katmanlı kompozit plakalar ve pekiştiricilerinin temas kuvveti-zaman değişimi verilmektedir. Temas kuvveti-zaman eğrisinde üst plaka ile pekiştiricilerin maruz kaldığı kuvvet değerlerindeki farkta artış görülmektedir. Bu da katman kalınlığının bir etkisi olarak yorumlanmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça pekiştiricilere iletilen enerji miktarı indirgenerek hasar oluşuma ihtimalini azaltmıştır.



Şekil 4.7. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi

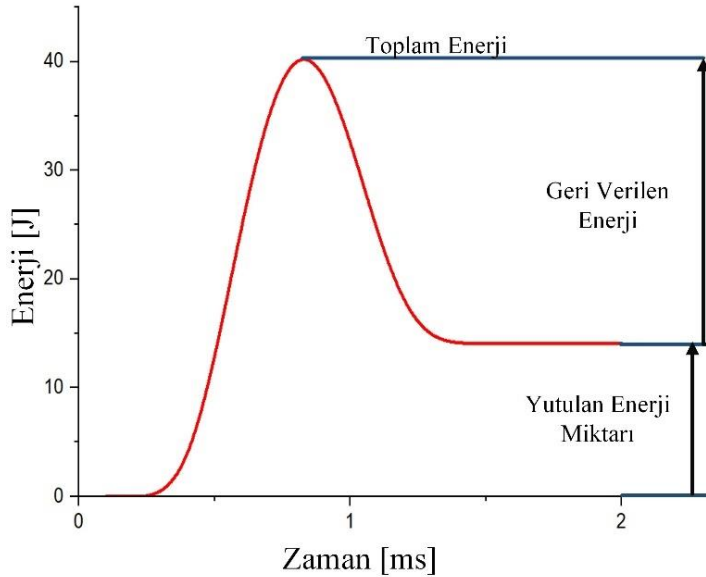


Şekil 4.8. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi



Şekil 4.9. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri plaka temas kuvveti-zaman eğrisi

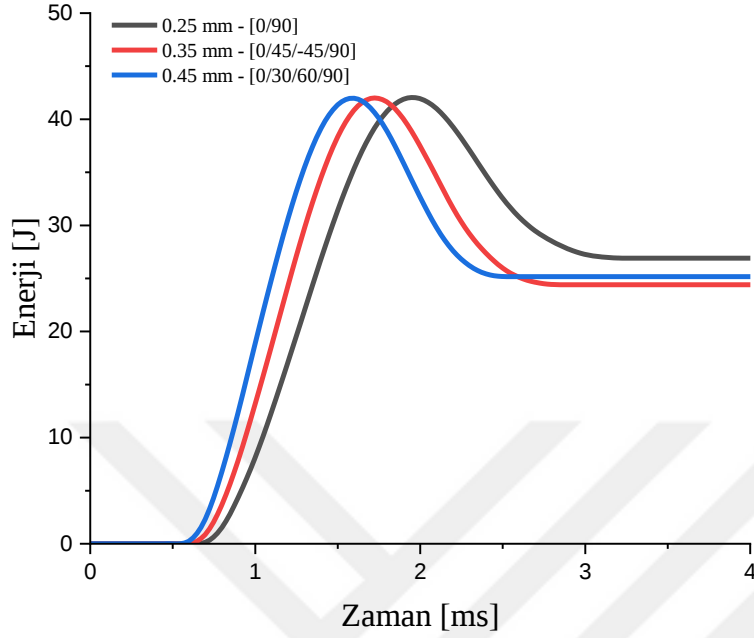
Şekil 4.10'da verilen darbe sonrası enerji zaman değişim grafiği plakanın yuttuğu enerji miktarının gösterimi açısından bir örnektir. Tepe noktası ile sabit durumdaki değerler arasındaki fark topun darbe sonrası plakadan uzaklaşırken ki kinetik enerjisidir. Geriye kalan enerji plaka tarafından yutulmuştur.



Şekil 4.10. Çarpışma sonrası plaka üzerinde biriken enerjinin zamana göre değişiminin örnek grafiği.

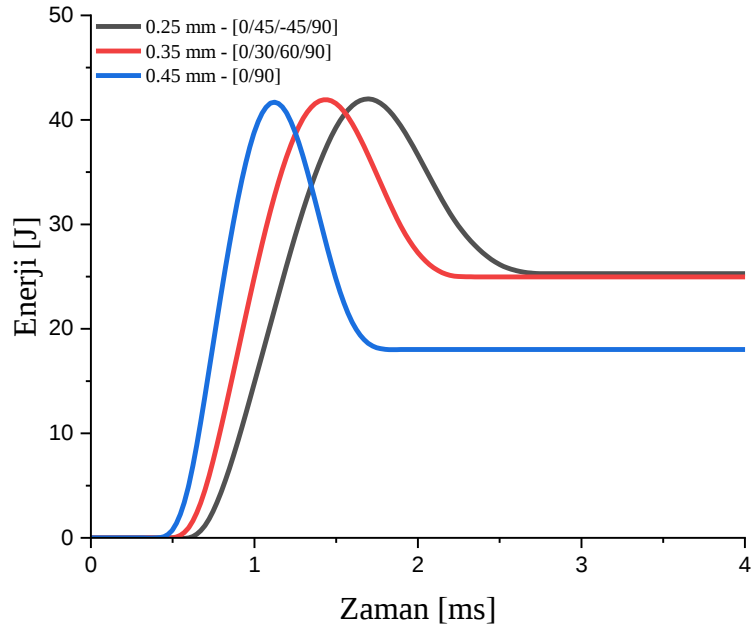
Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13 sırasıyla 8, 12 ve 16 katmanlı kompozit plakaların çarpma olayındaki enerji geçmişlerini göstermektedir. Çarpışma sonucunda vurucu kütlenin sahip olduğu

enerjinin bir miktarı yapıya aktarılmış ve vurucu geri sekerek daha düşük bir hızla plakadan sekmektedir. Bu durumda yapı enerjinin bir miktarını sönümleyerek iç enerjisini arttırmıştır.



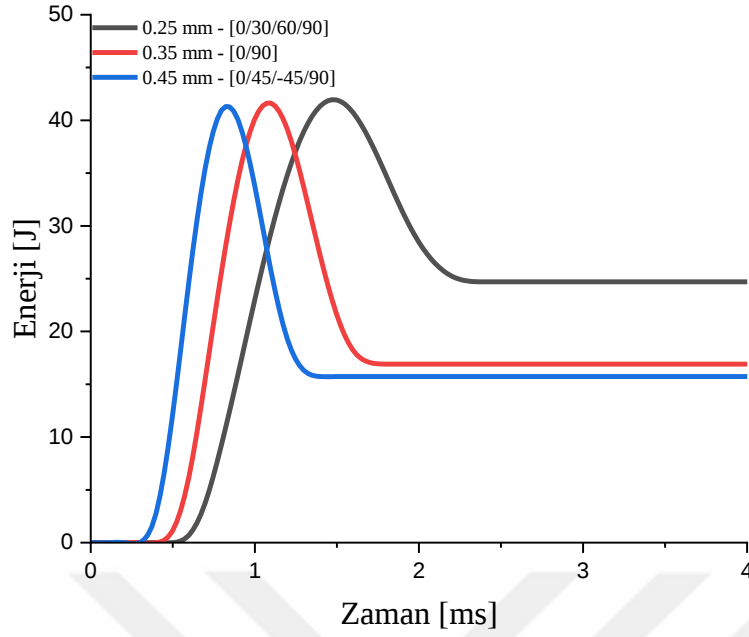
Şekil 4.11. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi

[0/90] yönelimine sahip elyaflar ile oluşturulan plakaların enerji sönümleme kapasitesi diğer plakalara oranla daha düşük olduğu grafiklerde görülebilmektedir.



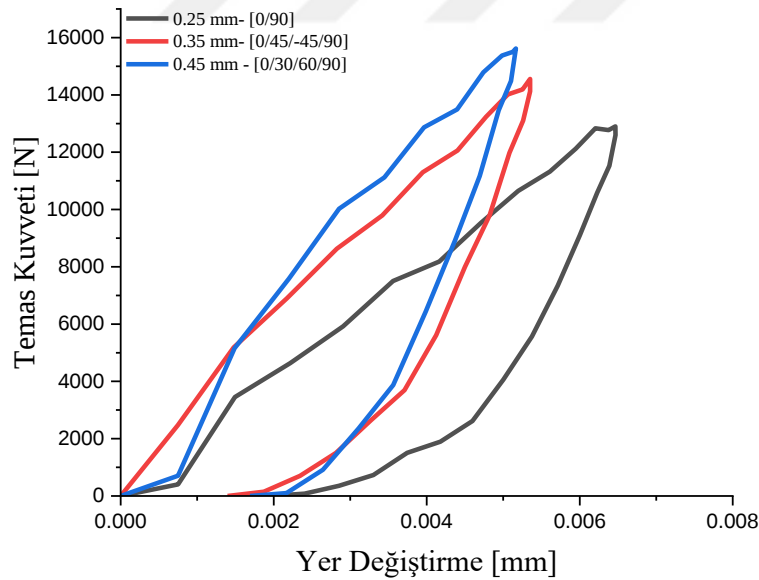
Şekil 4.12. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi

Katman kalınlığı farkı olmasına rağmen [0/90] ve [0/45/-45/90] serim açılı plakaların sönümlediği enerji miktarları birbirine çok yakın değerdendirler.



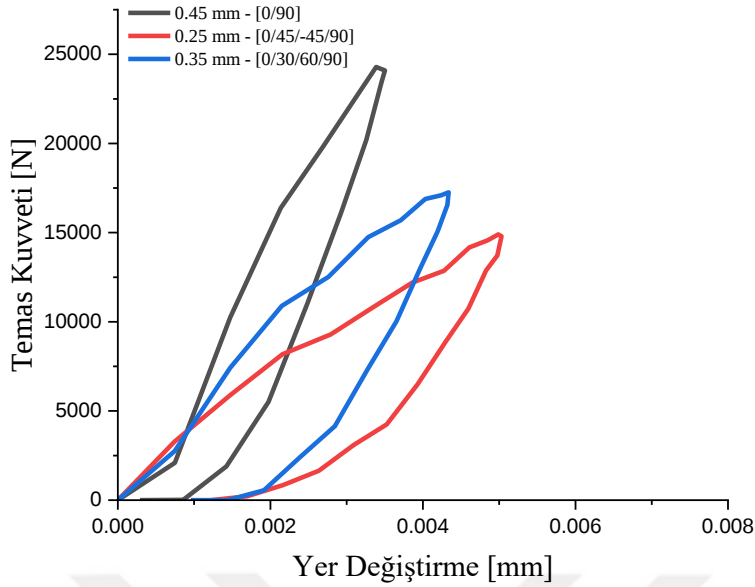
Şekil 4.13. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın enerji-zaman eğrisi

Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16’te pekiştirilmiş kompozit plakaların temas kuvveti-deformasyon değişimleri verilmektedir. Temas kuvveti-deformasyon değişimi karbon elyafların katman kalınlığı ve yönlendirme açısına bağlı olarak farklılık göstermektedir.



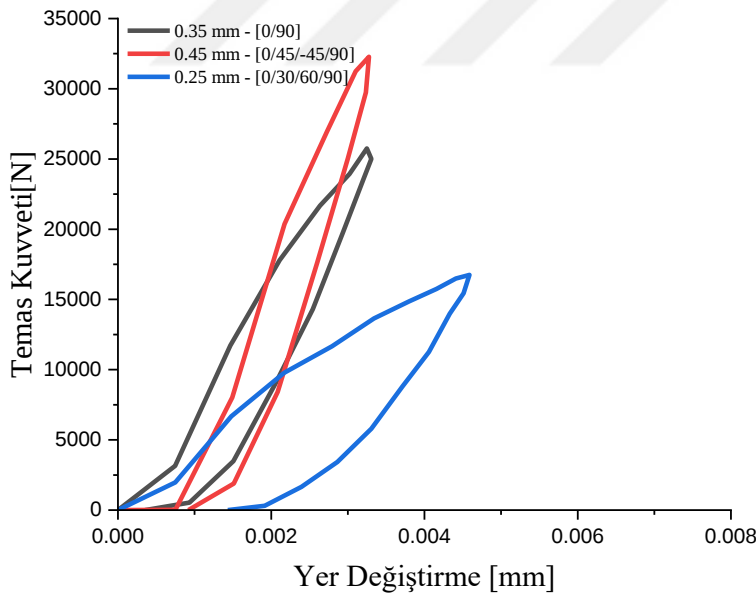
Şekil 4.14. 8 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi

8 katmanlı plaka üzerinde gerçekleştirilen çarpışma sonucunda kalıcı deformasyon miktarı tüm durumlarda birbirine yakın değerlere sahiptir



Şekil 4.15. 12 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi

12 ve 16 katmanlı plakalar için kalıcı deformasyon miktarları katman kalınlığı ve elyaf serim açısına göre farklılık göstermektedir. [0/90] ve [0/45/-45/90] serim açılı plaklar yakın miktarda deforme olduğu fark edilmiştir.



Şekil 4.16. 16 katmanlı pekiştirilmiş eğri kompozit plakanın yer değiştirme -temas kuvveti eğrisi

Tüm analizlerin tamamlanmasının ardından temas kuvveti – zaman, yutulan enerji – zaman ve kuvvet – yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Darbe sonucunda plakaların deformasyon miktarına göre Taguchi L9 metodu ile en uygun tasarımın 0,45 mm elyaf katman kalınlığı ile 16 katmanlı ve [0/90]<sub>8</sub> istifleme yönüne sahip plakaların en düşük deformasyon miktarına sahip olacağı belirlenmiştir. Belirlenen optimum parametre değerleri

ile gerçekleştirilen tahmin çalışması ile deformasyon miktarı Taguchi ile 2,93 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda gerçek deformasyon miktarı ise 3,26 mm olarak bulunmuştur. Analizlerden elde edilen sonuçlar ile tahmin çalışmasından elde edilen değer karşılaştırıldığında yapılan tahmin çalışması ile elde edilen değer %9,98 değerinde bir sapma ile sonlu elemanlar analizi sonucuna yakın bir değer olduğu belirlenmiştir. Tüm sayısal analizler sonucunda elde edilen deformasyon miktarı değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Tüm parametreler için darbe sonrası oluşan deformasyon miktarları

| Katman Sayısı<br>$n_L$ | Katman Kalınlığı<br>[mm] | Maksimum Deformasyon<br>[m] |                        |                         |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
|                        |                          | $[0/90]_{n_L/2}$            | $[0/30/60/90]_{n_L/4}$ | $[0/45/-45/90]_{n_L/4}$ |
| 8                      | 0,25                     | 0,006468                    | 0,006705               | 0,006565                |
|                        | 0,35                     | 0,005255                    | 0,005521               | 0,005352                |
|                        | 0,45                     | 0,004882                    | 0,005166               | 0,004947                |
| 12                     | 0,25                     | 0,004945                    | 0,005192               | 0,005031                |
|                        | 0,35                     | 0,004059                    | 0,004338               | 0,004131                |
|                        | 0,45                     | 0,003502                    | 0,003760               | 0,003530                |
| 16                     | 0,25                     | 0,004308                    | 0,004587               | 0,004350                |
|                        | 0,35                     | 0,003306                    | 0,003525               | 0,003322                |
|                        | 0,45                     | 0,00326                     | 0,003486               | 0,003275                |

Darbe sonucunda elde edilen temas kuvvetleri kullanılarak pekleştirilmiş plakaların absorbe edebildiği enerji miktarlarının maksimum değerleri belirlenmiştir. Burada enerji emilme miktarı ve deformasyon miktarı arasında bir bağıntı göze çarpmıştır. Yapının yuttuğu enerji miktarında meydana gelen artış deformasyon miktarını da arttırmaktadır. Bu sebeple deformasyonun az olmasını beklediğimiz yapıların darbe sonucunda vurucunun enerjisini olabildiğince az miktarda sönmlemesini bekleriz. Yani bu durum sonucunda kompozit plakanın daha rijit bir yapıya sahip olması, deformasyon miktarının daha düşük olabileceği yorumuna varılmıştır. Daha rijit bir yapı elastiklik açısından zayıf olabilir fakat darbe sonucunda deformasyon miktarı en az seviyelerde olacaktır. 27 farklı deneyde elde edilen enerji sönmleme miktarları her bir durum için ayrı ayrı elde edilmiş Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

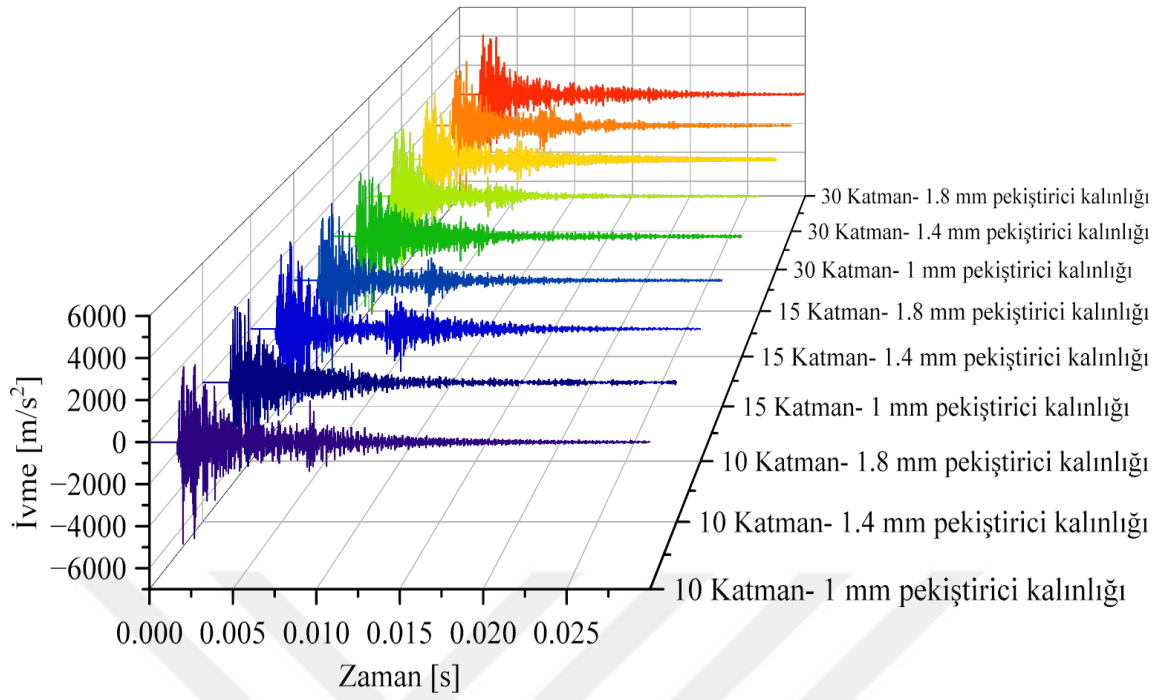
Çizelge 4.5. Tüm parametreler için darbe sonrası sönümlenen enerji miktarları

| Katman Sayısı<br>$n_L$ | Katman Kalınlığı<br>[mm] | Absorbe Edilen Enerji<br>[m] |                        |                         |
|------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
|                        |                          | $[0/90]_{n_L/2}$             | $[0/30/60/90]_{n_L/4}$ | $[0/45/-45/90]_{n_L/4}$ |
| 8                      | 0,25                     | 26,91                        | 28,56                  | 27,96                   |
|                        | 0,35                     | 24,40                        | 25,67                  | 25,32                   |
|                        | 0,45                     | 22,75                        | 25,17                  | 24,58                   |
| 12                     | 0,25                     | 23,60                        | 26,13                  | 25,28                   |
|                        | 0,35                     | 21,62                        | 24,98                  | 23,67                   |
|                        | 0,45                     | 18,03                        | 23,44                  | 21,03                   |
| 16                     | 0,25                     | 21,88                        | 24,71                  | 23,94                   |
|                        | 0,35                     | 16,91                        | 22,58                  | 20,41                   |
|                        | 0,45                     | 14,07                        | 17,58                  | 15,74                   |

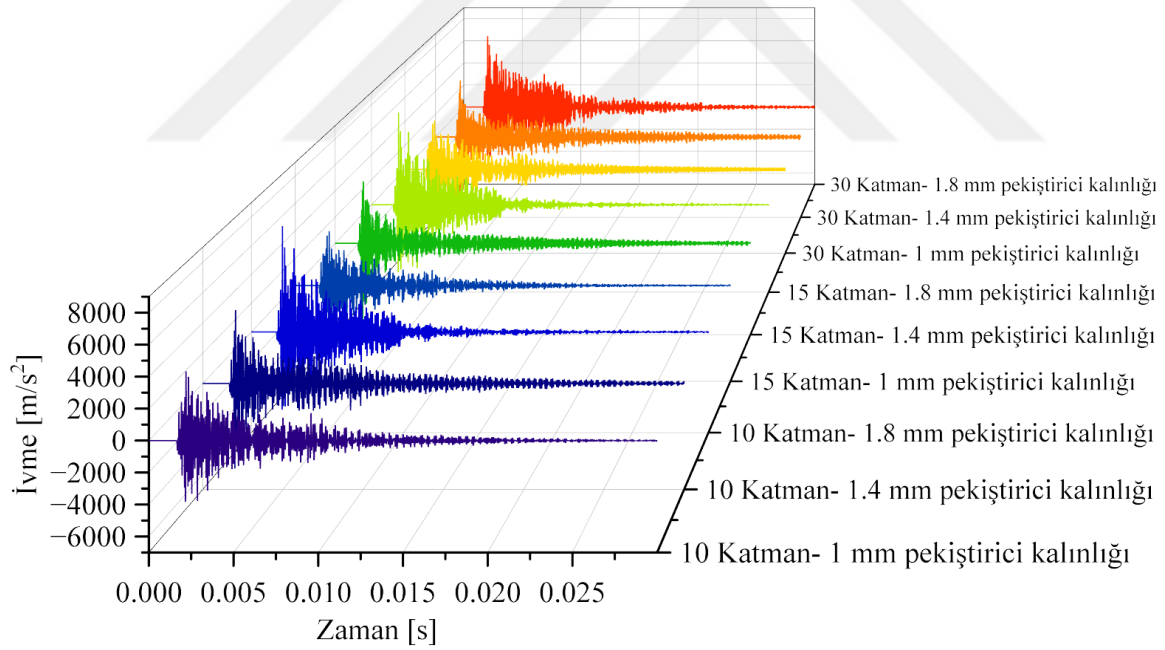
#### 4.2. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Titreşim Davranışı

Darbe sonrası hasar davranışı kompozit plakalar adına kritik bir olay olmasının yanı sıra darbenin gerçekleştiği andan itibaren yapı üzerinde titreşim meydana gelmektedir. Titreşim yapısal bütünlüğü ve parçanın çalışmasını riske atacak bir mekanik olaydır. Bu sebeple titreşimin düşük seviyelerde olması için mesai harcanır.

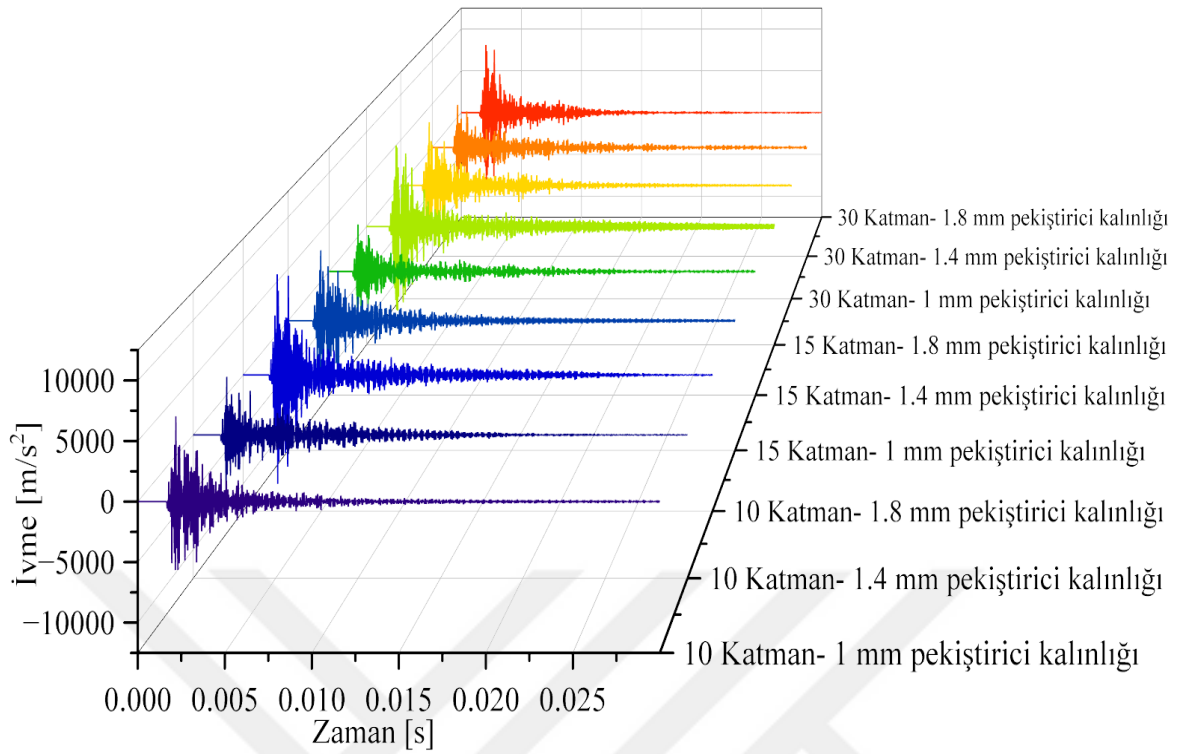
Bu bölümde 10, 15 ve 30 katmanlı pekiştirilmiş eğri plakaların titreşim davranışının pekiştirici sayısına, flanş kalınlığına, uzunluğuna ve plaka katman kalınlığına bağlı değişimleri yapay sinir ağları yöntemi ile değerlendirilmiştir. Kütlesi 15 kg olan vurucunun 1,5 m/s hızla pekiştirilmiş eğri plaka üzerine darbe uygulaması sonucu plakada oluşan ivmelenme sonlu elemanlar metodu olan LS-Dyna yazılımı ile elde edilmiştir. Plakanın zamana bağlı ivme değişimleri pekiştirici sayısına, uzunluğuna, kalınlığına ve plaka katman sayısına göre değişimleri grafik olarak verilmiştir (Tarih, Coskun, Yar, Gundogdu ve Sahin, 2023).



Şekil 4.17. 3 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

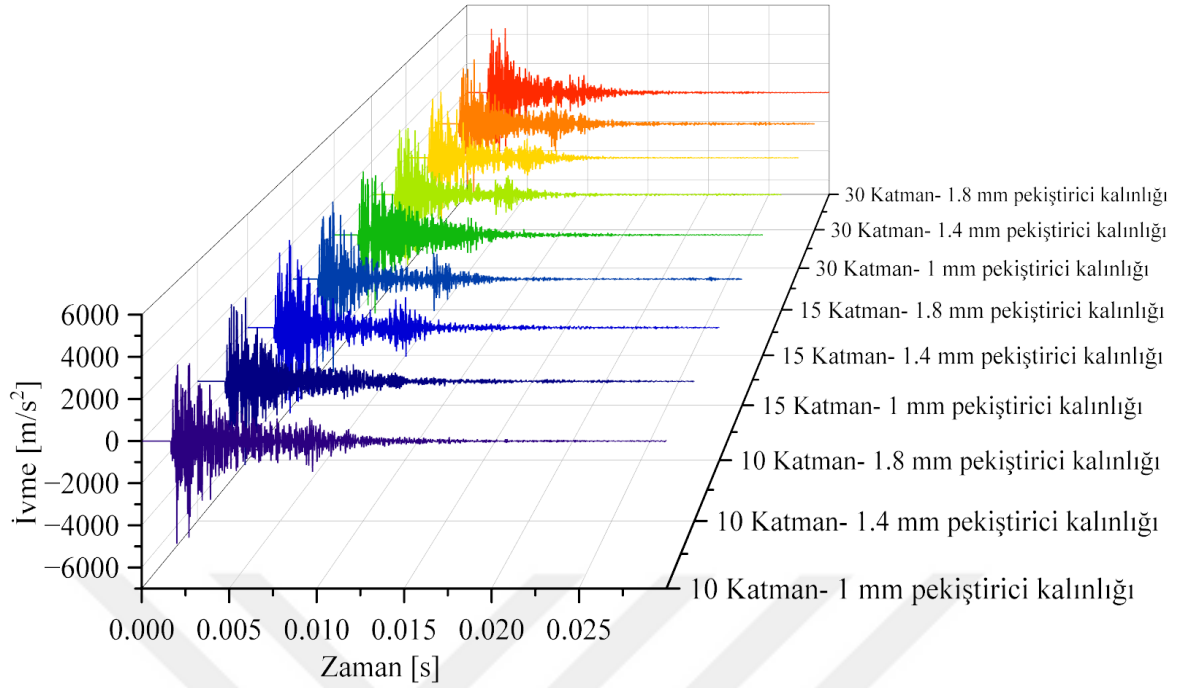


Şekil 4.18. 3 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

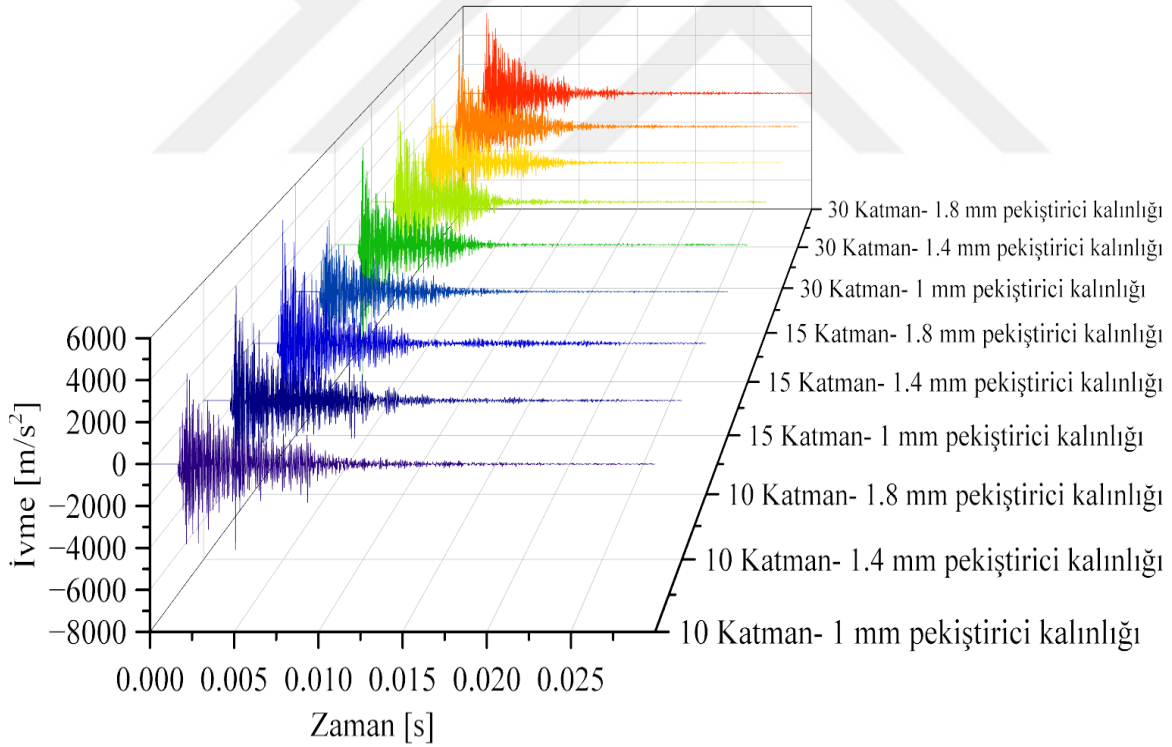


Şekil 4.19. 3 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

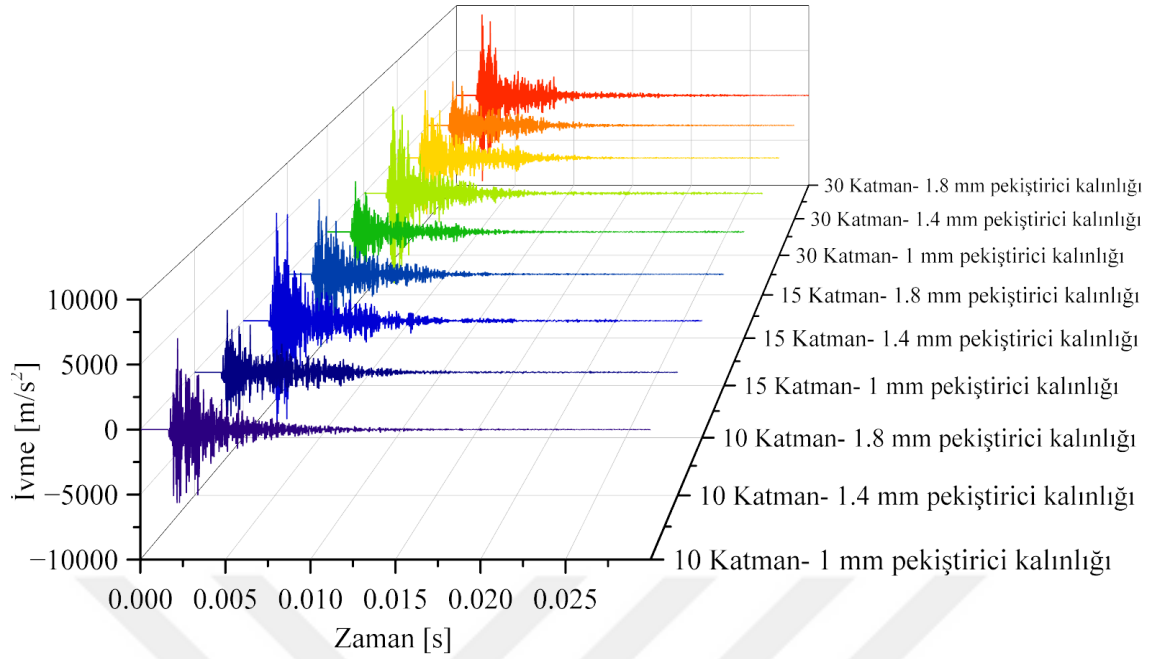
Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19’da 3 pekiştiriciye sahip eğri panellerin darbe sonrası zaman göre ivmelenmeleri verilmiştir. Pekiştirici sayısının arttırılmasıyla birlikte yapı daha rijit bir hal alırken plakada oluşan ivmelenmenin sönümlenmesi daha kısa zaman aldığı Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22’da verilen 5 pekiştiricili eğri plakanın ivme zaman değişim grafiğinden okunabilmektedir. 3 pekiştiricili eğri plaka ve 5 pekiştiricili eğri plakanın ivme değişimleri karşılaştırıldığında maksimum ve minimum ivme değerleri birbirine yakın olduğu fakat 5 pekiştiricili yapının denge konumuna geçme davranışının daha yüksek olduğu grafiklerden okunabilmektedir.



Şekil 4.20. 5 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

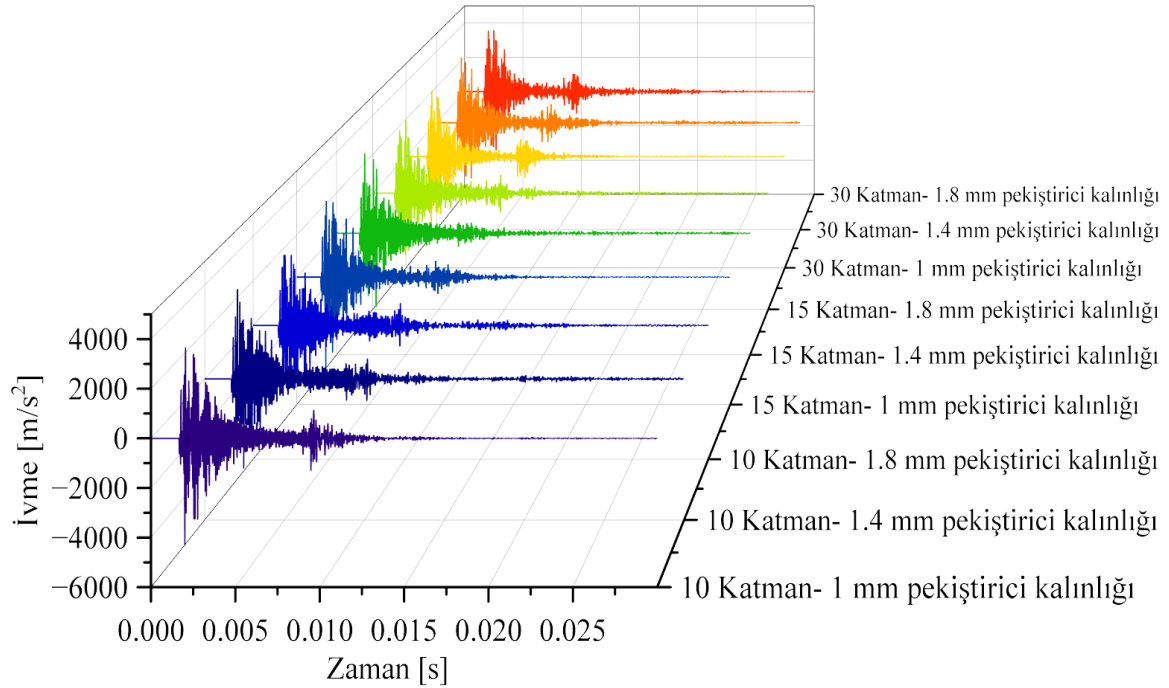


Şekil 4.21. 5 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

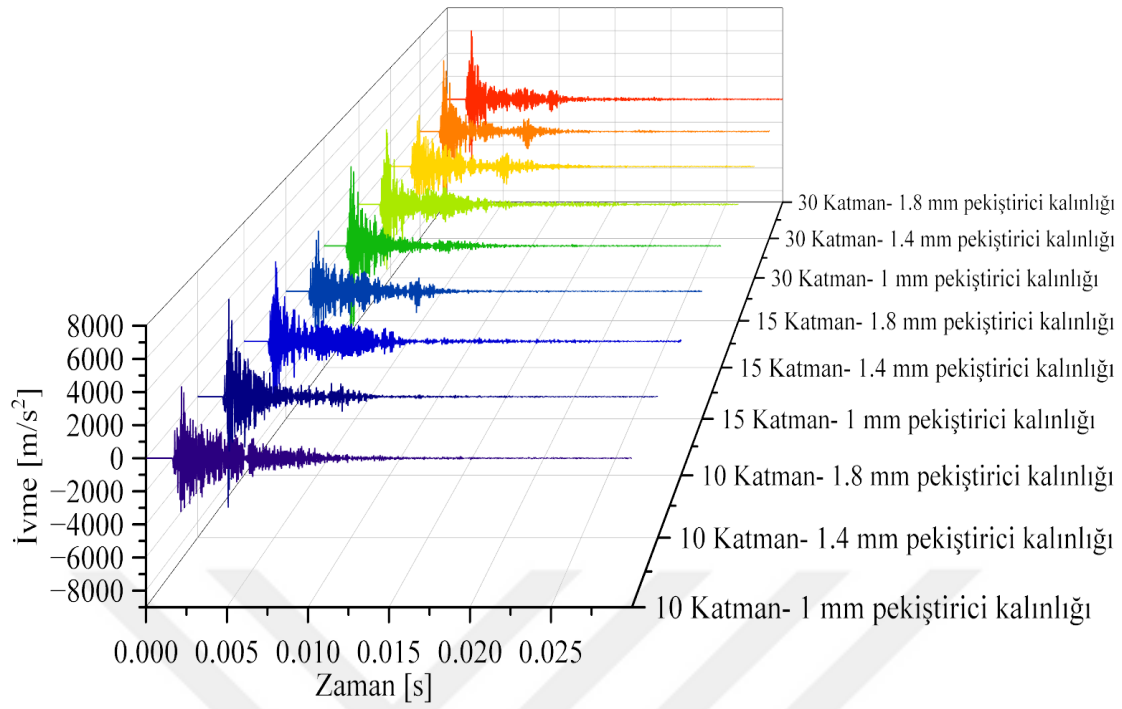


Şekil 4.22. 5 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

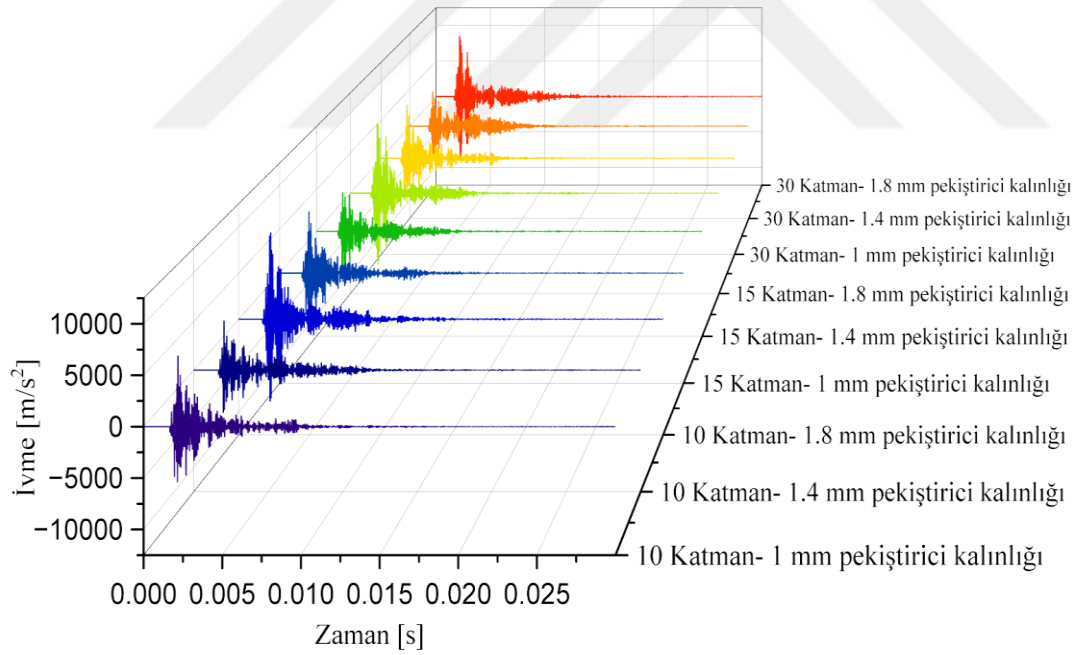
Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'te 7 pekiştiricili eğri plakaların üzerinde darbe yüzünden oluşan ivme değişimleri verilmiştir. Yapının darbe sonucunda üzerinde oluşan ivme değerleri pekiştirici sayısı arttıkça düşmektedir. Bu da yapıda pekiştiricilerin yapısal dayanımda büyük rol oynadığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.23. 7 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği



Şekil 4.24. 7 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği



Şekil 4.25. 7 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların ivme- zaman grafiği

Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8’de darbe sonrası plakalar üzerinde oluşan ivme değerlerinin ortalamaları verilmiştir. İvme değerlerinin maksimum ve minimum değerlerinin mutlak ortalamasından elde edilen değerlerdir.

Çizelge 4.6. 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değerleri

|                                          | 3 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 5 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 7 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 4286,942                               | 4295,241                               | 3994,795                               |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 4219,999                               | 4206,978                               | 3818,412                               |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 4586,111                               | 4589,305                               | 3049,43                                |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 4742,136                               | 4735,525                               | 4006,119                               |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 4120,952                               | 4134                                   | 3790,252                               |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 4194,948                               | 4167,562                               | 3490,738                               |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 4509,108                               | 4492,639                               | 4016,759                               |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 4542,346                               | 4548,758                               | 3404,205                               |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 4121,079                               | 4365,099                               | 3502,046                               |

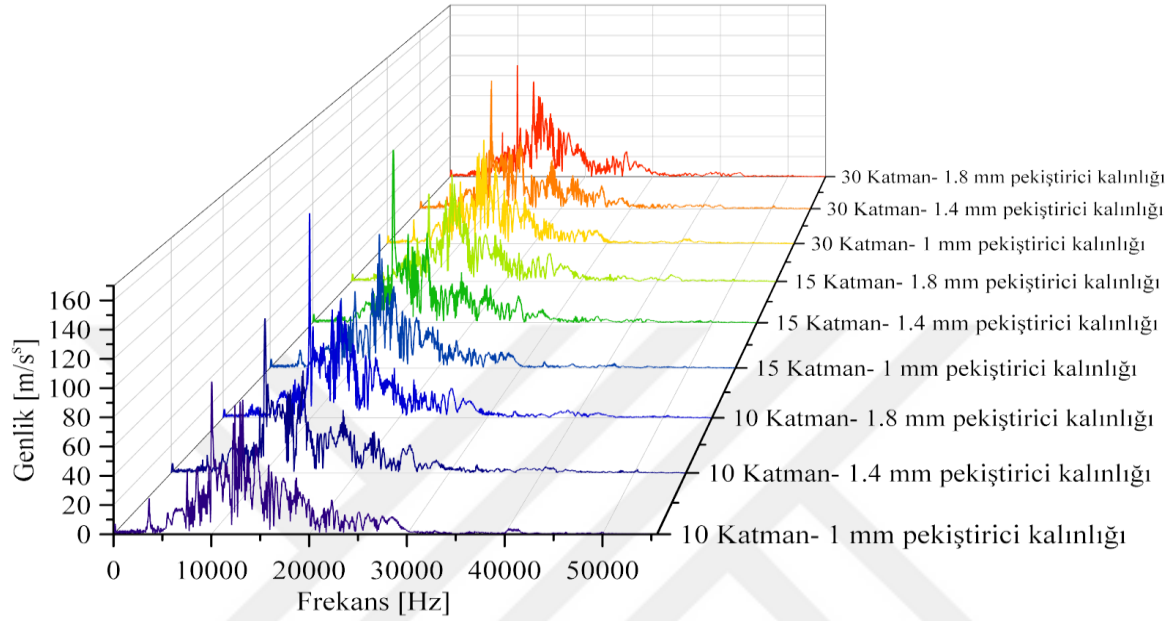
Çizelge 4.7. 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değerleri

|                                          | 3 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 5 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 7 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 4089,307                               | 4074,386                               | 3802,595                               |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5237,108                               | 6654,563                               | 6665,932                               |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 6393,734                               | 5761,487                               | 4949,756                               |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 3823,078                               | 3826,94                                | 3680,575                               |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5338,359                               | 6787,759                               | 6753,970                               |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 6393,734                               | 5065,613                               | 5425,586                               |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 3975,247                               | 3981,3                                 | 3611,702                               |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5347,274                               | 6850,787                               | 6701,264                               |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 5497,251                               | 4957,245                               | 5656,509                               |

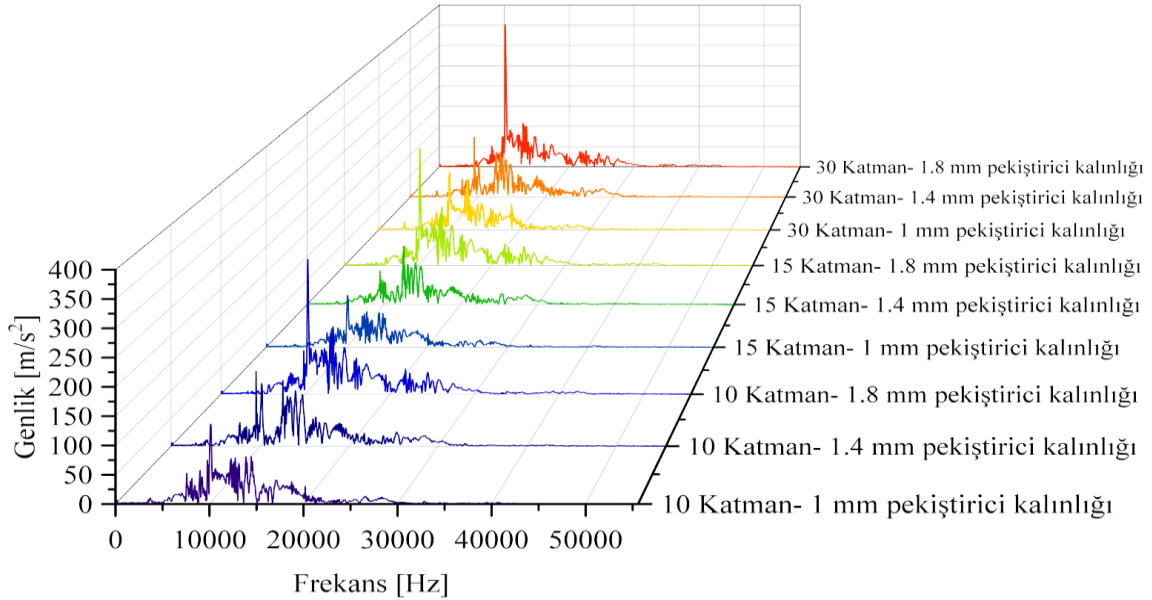
Çizelge 4.8. 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ortalama ivme değerleri

|                                          | 3 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 5 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] | 7 Pekiştiricili<br>[m/s <sup>2</sup> ] |
|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 6365,371                               | 6349,338                               | 6173,469                               |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5201,488                               | 5193,331                               | 4742,255                               |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 9631,280                               | 9618,742                               | 9148,380                               |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 6396,340                               | 6646,338                               | 6514,374                               |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5209,279                               | 5219,808                               | 4864,41                                |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 8733,742                               | 8715,378                               | 8715,324                               |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 6396,340                               | 6383,702                               | 6346,169                               |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 5259,876                               | 5062,7                                 | 4662,048                               |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 8079,488                               | 9294,855                               | 8728,489                               |

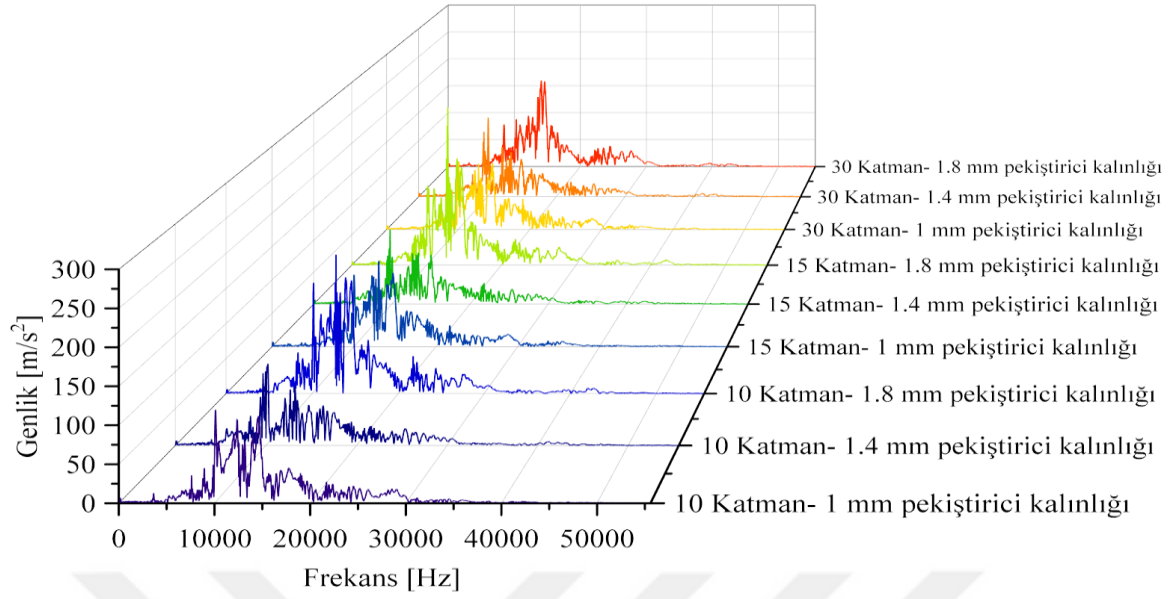
Plakaların darbe sonucunda ivmelenmelerinin zamana bağlı değişimlerine ulaşılmasının ardından plakaların maksimum, minimum ve ortalama ivme değerlerine ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra FFT analizlerinden kritik frekans değerleri çekilmiştir (Güvenç, 2021; Liu, Sun, Liu, Du ve Ma, 2024).



Şekil 4.26. 3 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği

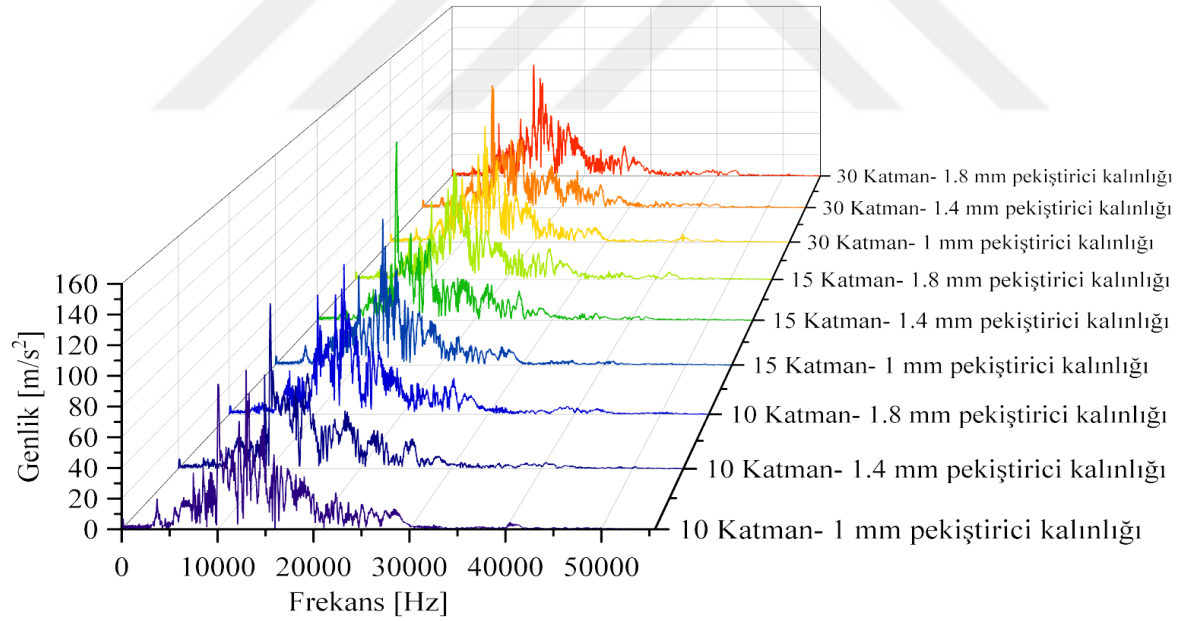


Şekil 4.27. 3 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği

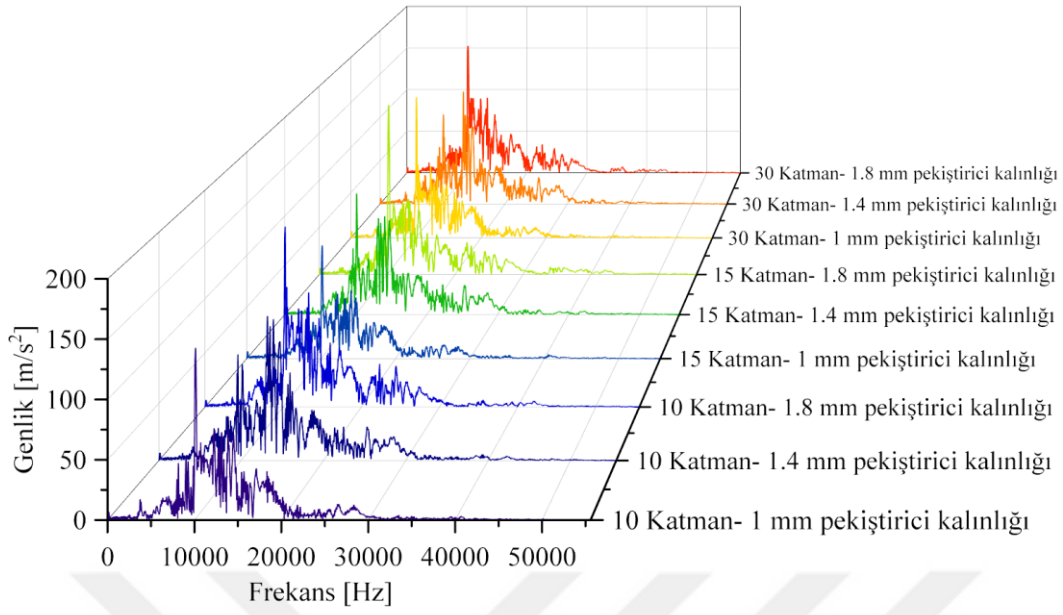


Şekil 4.28. 3 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği

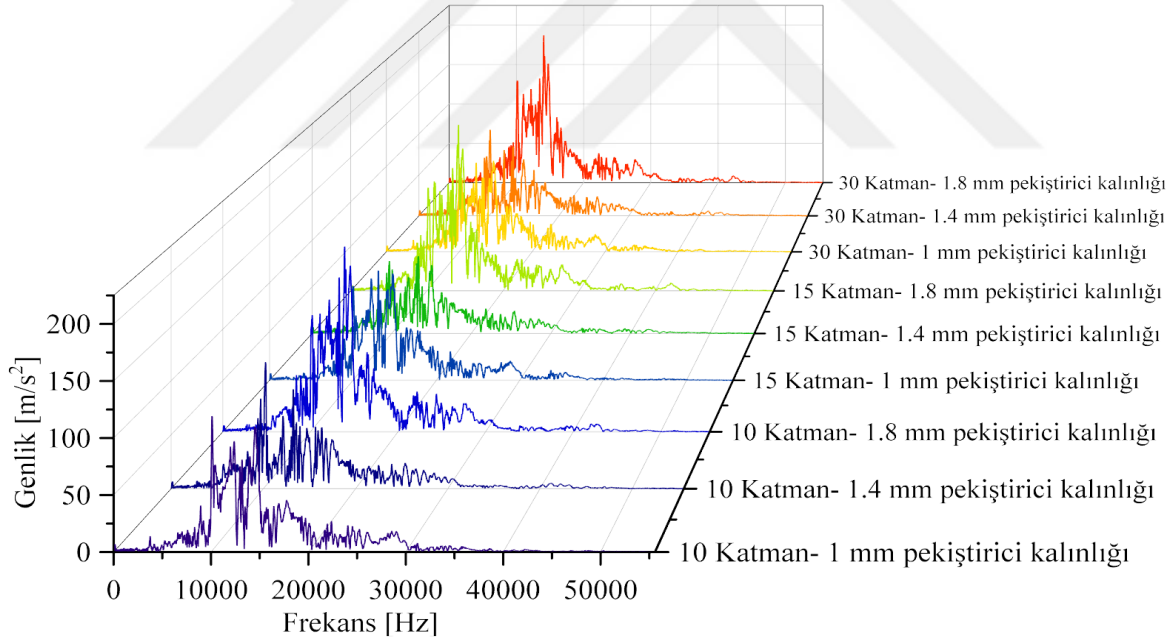
Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28’te üç pekiştiricili plakanın ivme-zaman grafiği verilerinin FFT metodu dönüşümü ile elde edilen genlik-frekans verileri aktarılmıştır.



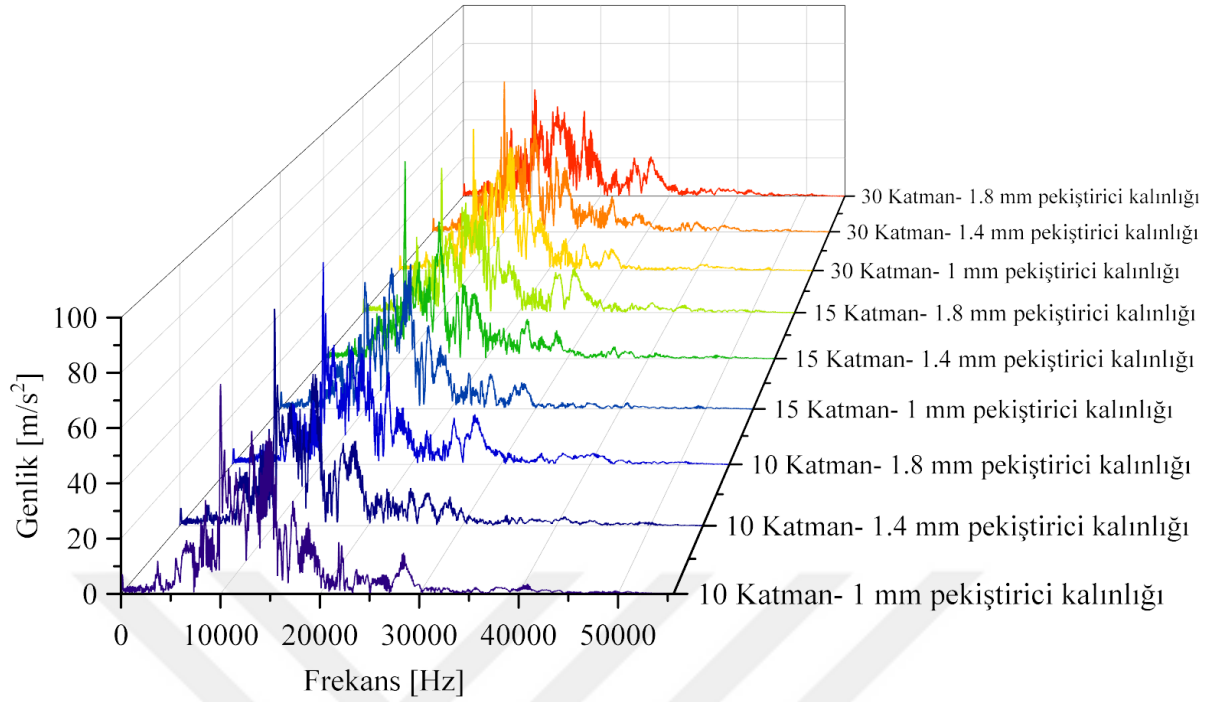
Şekil 4.29. 5 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği



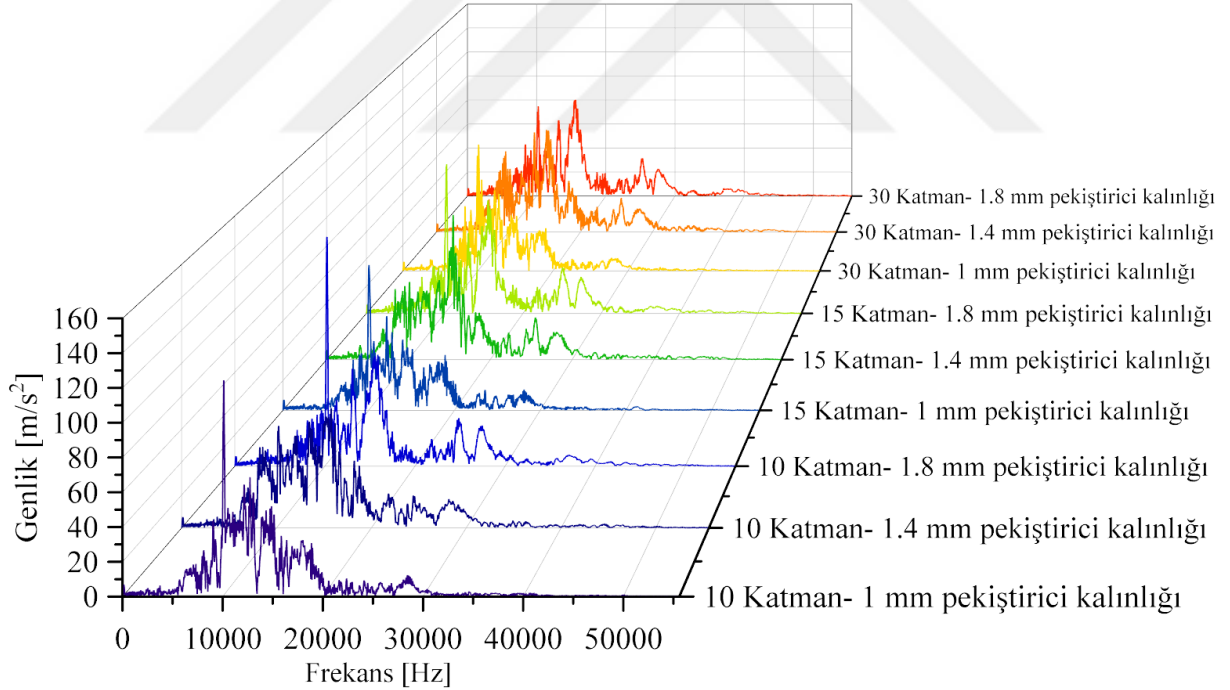
Şekil 4.30. 5 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği



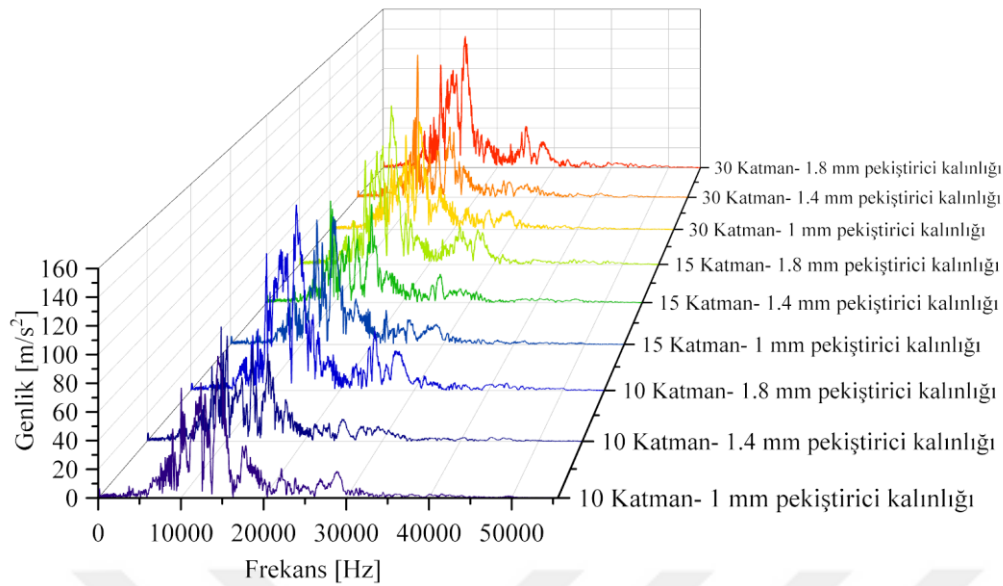
Şekil 4.31. 5 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği



Şekil 4.32. 7 pekiştiricili ve 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği



Şekil 4.33. 7 pekiştiricili ve 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği



Şekil 4.34. 7 pekiştiricili ve 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların genlik-frekans grafiği

Şekil 4.26-4.34 arasında verilen FFT dönüşümü ile elde edilen genlik-frekans verilerinden 81 farklı plaka formasyonu için kritik frekans değerleri elde edilmiştir. Yukarıda 81 farklı koşulda gerçekleştirilen düşük hızlı darbe sonucunda elde FFT verileri incelendiğinde yapının titreşim yoğunluğunun 9-16 kHz aralığında sıklaştığı görülmektedir (Ambhore, Kamble ve Chinchankar, 2020). Elde edilen bu kritik frekans değerleri her bir parametre için ayrı ayrı belirlenmiş ve Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.9. 10 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değerleri

|                                          | 3 Pekiştiricili | 5 Pekiştiricili | 7 Pekiştiricili |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                          | [Hz]            | [Hz]            | [Hz]            |
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10040           | 12970           | 10020           |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 10120           | 10120           | 10070           |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 9825            | 13300           | 10150           |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 13050           | 13080           | 15310           |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 10400           | 10150           | 10040           |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 13140           | 13140           | 10120           |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 13190           | 13190           | 9961            |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 10180           | 10150           | 10040           |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 9934            | 12320           | 10420           |

Çizelge 4.10. 15 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değerleri

|                                          | 3 Pekiştiricili | 5 Pekiştiricili | 7 Pekiştiricili |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                          | [Hz]            | [Hz]            | [Hz]            |
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10120           | 10120           | 10100           |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 9554            | 13190           | 15770           |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 10290           | 10260           | 10230           |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10150           | 10150           | 10040           |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 12590           | 10150           | 15470           |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 10290           | 10230           | 10260           |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10070           | 10100           | 10100           |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 9472            | 13380           | 15310           |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 10150           | 10210           | 15630           |

Çizelge 4.11. 20 mm pekiştirici uzunluğuna sahip plakaların darbe sonrası ivmelenmesinin kritik frekans değerleri

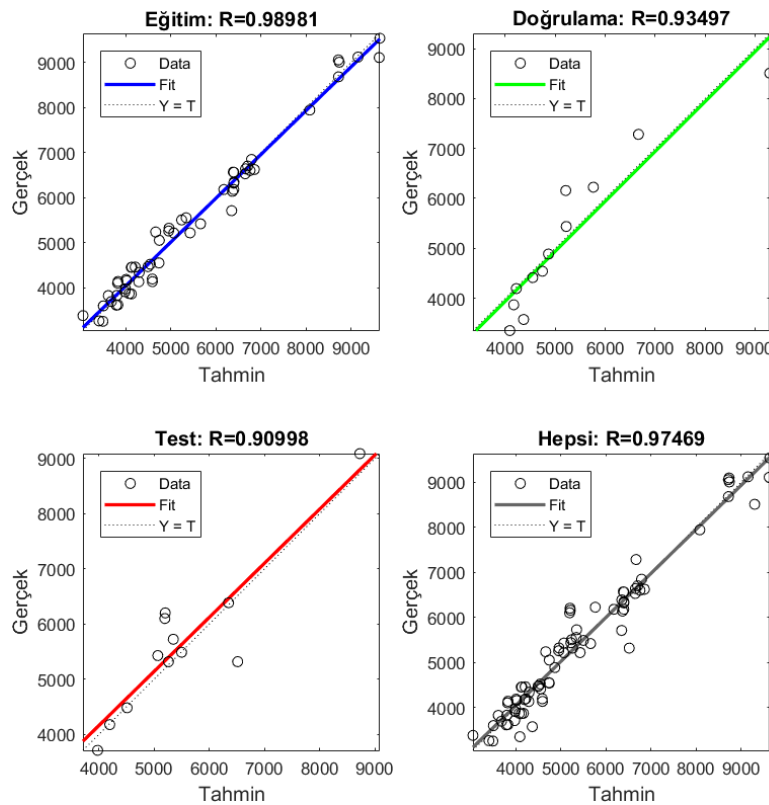
|                                          | 3 Pekiştiricili | 5 Pekiştiricili | 7 Pekiştiricili |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                          | [Hz]            | [Hz]            | [Hz]            |
| 10 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10100           | 10100           | 14470           |
| 10 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 10230           | 10230           | 9472            |
| 10 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 12780           | 13920           | 14170           |
| 15 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 13030           | 13050           | 14520           |
| 15 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 9771            | 13350           | 9472            |
| 15 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 12860           | 14170           | 14220           |
| 30 Katmanlı 1 mm pekiştirici kalınlığı   | 10070           | 14170           | 14490           |
| 30 Katmanlı 1,4 mm pekiştirici kalınlığı | 10120           | 10180           | 10150           |
| 30 Katmanlı 1,8 mm pekiştirici kalınlığı | 14090           | 14090           | 14410           |

Kritik frekans değerinin düşük seviyelerde olması yapının rezonansa girmesini ve yüksek genliklerde titreşim yapmasını engellemektedir. Elde edilen bu kritik frekans değerleri sonucunda en düşük değere sahip yapılar 30 katmanlı, 3 pekiştiricili, 15 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1.4 mm flanş kalınlığına sahip plaka ve 10 katmanlı, 7 pekiştiricili, 20 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1.4 mm flanş kalınlığına sahip plakalardır.

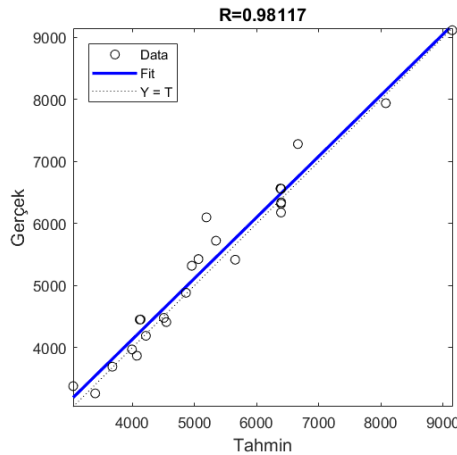
### 4.3. Yapay Sinir Ağı (YSA) ile Tahminleme

Bu bölümde pekiştirilmiş eğri plakaların darbe sonrası üzerinde oluşan titreşimin YSA algoritmasıyla incelemesi yapılmıştır. Darbe sonrası plakada oluşan ivmelenmeler kayıt altına alınmış ve maksimum-minimum ivme değerleri ile ortalama bir değer elde edilmiştir (Hiremath, Patil, Reddy, Mutra, Patil ve Poornima, 2024). Değişkenler plakanın katman sayısı, pekiştirici sayısı, pekiştirici uzunluğu ve pekiştirici flanş kalınlığı olarak girilirken değerlendirme kriteri olarak darbe sonrası elde edilen ortalama ivme değeri göz önüne alınmıştır.

YSA modülünde algoritmaya verileri öğretebilmek amacıyla verilerin %70'i, test için %15'si ve doğrulama için de %15'si aktarılmıştır. Bu koşullarda YSA'nın kolerasyon değerleri doğrulama ve test için sırasıyla 0,93 ve 0,91 olarak elde edilirken öğrenme için bu değer 0,99 olarak elde edilmiştir. Ayrıca sonuçların doğruluğu açısından YSA aracının performansı da test edilmiştir. Değerlendirilen verilerin bir kısmı burada işlenmiş ve bu işlem sonucunda kolerasyon değeri 0,98 gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da tahminleme ve test verilerinin saçılım grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.35. Ortalama ivme YSA saçılım grafiği



Şekil 4.36. YSA performans test saçılım grafiği

Yapay sinir ağı ile tahminleme sonucunda elde edilen çıktılar incelendiğinde minimum ortalama ivme değeri  $3255,2 \text{ m/s}^2$  olarak belirlenmiştir. Bu değere sahip olan 15 katmanlı, 7 pekiştiricili, 10 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1,8 mm flanş kalınlığına sahip plakanın sayısal simülasyonlardan elde edilen ivme değeri  $3490,7 \text{ m/s}^2$  olarak bulunmuştur. Bu durumda yapay zekâ modülüyle elde edilen ivme değerinin tahminlemesi, sayısal yöntemlerden elde edilen değerle kıyaslandığında %6,75 oranında kabul edilebilir bir sapma gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR

### 5.1. Taguchi L9 Optimizasyon çalışması

Bu bölümde karbon elyaf ile modellenmiş düz plaka ve bu plakalara entegre edilmiş pekiştiricilerin üzerine 7,5 m/s hızla düşük hızlı çarpma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Plakayı oluşturan mekanik özellikler olan katman sayısı, katman kalınlığı ve elyaf yönelim açısına göre 27 farklı mekanik özelliğe sahip numune ortaya çıkarılmıştır. Plaka ve pekiştiricilerinin darbe davranışına göre optimizasyonu gerçekleştirilerek minimum deformasyon miktarına sahip olan plaka verileri elde edilmiştir.

- 16 katmanlı, 0,45 mm katman kalınlığı ve  $[0/90]_8$  yönelim açısına sahip plaka 3,26 mm deformasyon miktarı ile minimum deformasyon oluşturan yapıdır.
- Darbe sonucunda 6,705 mm'lik deformasyon miktarı ile maksimum deformasyona uğrayan plakanın mekanik özellikleri 8 katmanlı, 0,25 mm katman kalınlığı ve  $[0/30/60/90]_2$  elyaf serim açılı plakadır.

- 16 Katmanlı, 0,45 mm katman kalınlığı ve  $[0/90]_8$  elyaf serim açılı plaka minimum sönümlenmiş enerji miktarına sahiptir. Bu mekanik özelliklere sahip numune 42,2 Joule enerjinin %33,3 kadarını absorbe edebilmektedir.

## 5.2. Yapay Sinir Ağı Tekniği ile Tahminleme

Bu çalışmada T tipi pekiştiriciler ile güçlendirilmiş eğri plakalar üzerine 1,5 m/s hıza sahip 15 kilogramlık bir küresel vurucu sayısal yöntemler ile simüle edilerek çarpıtılmaktadır. Bu çarpışma sonucunda yapı üzerinde oluşan ivme değerleri elde edilmiştir. Bu ivme değerlerinin kompozit plakanın katman sayısına, pekiştirici sayısına, pekiştirici uzunluğuna ve pekiştirici flanş kalınlığına bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Elde edilen ham ivme verileri FFT metodu ile maksimum frekans değerleri elde edilmiştir.

- En düşük kritik frekans değerine sahip olan yapı 30 katmanlı, 3 pekiştiricili, 15 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1.4 mm flanş kalınlığına sahip plaka ve 10 katmanlı, 7 pekiştiricili, 20 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1.4 mm flanş kalınlığına sahip plakalardır. Kritik frekans değeri de 9472 Hz olarak bulunmuştur.
- En büyük kritik frekans değerine sahip olan yapı 10 katmanlı, 7 pekiştiricili, 15 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1.4 mm flanş uzunluğuna sahip pekiştirilmiş plakadır. Kritik frekans değeri de 15770 Hz olarak bulunmuştur.
- Yapay sinir ağı tahminleme çalışması sonucunda en düşük ortalama ivme değerine sahip yapı 15 katmanlı, 7 pekiştiricili, 10 mm pekiştirici uzunluğuna ve 1,8 mm flanş kalınlığına sahip kompozit plaka olduğu belirlenmiştir. Sayısal analizler ile karşılaştırıldığında YSA modülünün %6,75 oranında bir hata ilmin çalışması gerçekleştirdiği belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- A. Mansor, M., Ahmad, Z., ve Abdullah, M. R. (2021). Experimental Studies on the Impact Characteristics of Seamless Fibre Metal Laminate (FML) Tubes. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1077-1081.
- Aabid, A., Ibrahim, Y. E., Hrairi, M., ve Ali, J. S. M. (2023). Optimization of Structural Damage Repair with Single and Double-Sided Composite Patches Through the Finite Element Analysis and Taguchi Method. *Materials*, 16(4), 1581.
- Ali GÜVENÇ, M. (2021). Tornalama Süreçlerinde Aktif Titreşim Kontrolü, Yapay Zeka Uygulamaları ve Nesnelerin İnterneti Uygulamaları.
- Ali Güvenç, M., Çakır, M., ve Mistikoglu, S. (2019). *Experimental Study on Optimization of Cutting Parameters by Using Taguchi Method for Tool Vibration and Surface Roughness in Dry Turning of AA6013*.
- Ambhore, N., Kamble, D., ve Chinchankar, S. (2020). Evaluation of Cutting Tool Vibration and Surface Roughness in Hard Turning of AISI 52100 Steel: An Experimental and ANN Approach. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 8(3), 455-462.
- Artero-Guerrero, J. A., Pernas-Sánchez, J., Martín-Montal, J., Varas, D., ve López-Puente, J. (2018). The Influence of Laminate Stacking Sequence on Ballistic Limit Using a Combined Experimental/FEM/Artificial Neural Networks (ANN) Methodology. *Composite Structures*, 183(1), 299-308.
- Asteris, P. G., ve Mokos, V. G. (2020). Concrete Compressive Strength Using Artificial Neural Networks. *Neural Computing and Applications*, 32(15), 11807-11826.
- Atila Yolcu, D., ve Okutan Baba, B. (2024). Experimental Investigation on Impact Behavior of Curved Sandwich Composites with Chiral Auxetic Core. *Composite Structures*, 329, 117749.
- Barkanov E., Ozoliņš O., Eglītis E., Almeida F., Bowering M. C., ve Watson G. (2014). Optimal Design of Composite Lateral Wing Upper Covers. Part I: Linear Buckling Analysis. *Aerospace Science and Technology*, 38, 1-8

- Bijlwan, P. P., Prasad, L., Sharma, A., ve Kumar, S. (2023). Taguchi Optimized Sliding Wear Behavior and Hardness of Novel Grewia Optiva/Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polyester Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(30).
- Bisagni, C., ve Giavotto, V. (2009). Experiments and Analyses on Postbuckling Behavior of Stringer-Stiffened Laminated Composite Helicopter Tailplane. *Journal of the American Helicopter Society*, 54(2), 22003-2200312.
- Bunea, M., Bria, V., Silva, F. S., Bîrsan, I. G., ve Buciumeanu, M. (2021). Influence of Fiber Orientation and Fillers on Low Velocity Impact Response of the Fabric Reinforced Epoxy Composites. *Applied Composite Materials*, 28(4), 1277-1290.
- Chen, W., ve Hao, H. (2013). Numerical Simulations of Stiffened Multi-arch Double-Layered Panels Subjected to Blast Loading. *Çinde Protective Structures* (C. 4).
- Chen, Y., ve Zhao, G. (2023). On the Energy Absorption of the Reinforced Sandwich Curved Beam Equipped with Piezoelectric Layers Through ANN and MCS Analyses. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- Correas, A. C., Crespo, A. C., Ghasemnejad, H., ve Roshan, G. (2021). Analytical Solutions to Predict Impact Behaviour of Stringer Stiffened Composite Aircraft Panels. *Applied Composite Materials*, 28(4), 1237-1254.
- Damghani, M., Atkinson, G. A., Thapa, P., Joy, J., Monaghan, M., Maleki, P., ve Ward, C. (2024). An Experimental Investigation of Tensile Residual Strength of Repaired Composite Laminates After Low Velocity Impact. *Thin-Walled Structures*, 200.
- Düring, D., Weiß, L., Stefaniak, D., Jordan, N., ve Hühne, C. (2015). Low-velocity Impact Response of Composite Laminates with Steel and Elastomer Protective Layer. *Composite Structures*, 134, 18-26.
- Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M., ve Byar, A. (2011). LS-DYNA MAT54 Modeling of the Axial Crushing of a Composite Tape Sinusoidal Specimen. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1809-1825.
- Ferrante, L., Sarasini, F., Tirillò, J., Lampani, L., Valente, T., ve Gaudenzi, P. (2016). Low Velocity Impact Response of Basalt-Aluminium Fibre Metal Laminates. *Materials ve Design*, 98, 98-107.

- Hiremath, V. S., Patil, S., Reddy, D. M., Mutra, R. R., Patil, B., ve Poornima, N. (2024). An ANN Approach to Predicting the Impact Parameters of GFRP Composites Under Low-Velocity Impact. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(2), 709-720.
- Jain, H. K., ve Upadhyay, A. (2010). Buckling Behavior of Blade-, Angle-, T-, and Hat-Stiffened FRP Panels Subjected to in-Plane Shear. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(24), 3614-3623.
- Jakubczak, P., Bienias, J., ve Surowska, B. (2018). The Influence of Fibre Orientation in Aluminium–Carbon Laminates on Low-Velocity Impact Resistance. *Journal of Composite Materials*, 52(8), 1005-1016.
- Jiang, J., Zhang, Z., Fu, J., Wang, H., ve Ng, C.-T. (2023). A Newly Proposed Damage Constitutive Model for Composite Laminates Under Low-Velocity Impact by Considering Through-Thickness Compression Damage. *Aerospace Science and Technology*, 137, 108267.
- Johnson, A. F., Toso-Pentecôte, N., ve Schueler, D. (2015). Numerical Modelling of Impact and Damage Tolerance in Aerospace Composite Structures. *Numerical Modelling of Failure in Advanced Composite Materials* (ss. 479-506). Elsevier Inc.
- Kaware, K., ve Kotambkar, M. (2022). Low Velocity Impact Response and Influence of Parameters to Improve the Damage Resistance of Composite Structures/Materials: A Critical Review. *International Journal of Crashworthiness*, 27(4), 1232-1256.
- Khalili, S. M. R., ve Ardali, A. (2013). Low-Velocity Impact Response of Doubly Curved Symmetric Cross-Ply Laminated Panel with Embedded SMA Wires. *Composite Structures*, 105, 216-226.
- Khan, S. H., Khan, A. A., ve Husain, A. (2021). Effect of Fibre Orientation on Damage Resistance of Composite Laminates. *International Journal of Crashworthiness*, 26(3), 270-282.
- Khashaba, U. A. (2024). A Comprehensive Study of Low-Velocity Impact Behavior and Damage Evaluation of Angle-Ply Thin Woven GFRP Composites Under Elevated Temperatures. *Composites Science and Technology*, 252, 110608.

- Kim, D. K., Yu, S. Y., Lim, H. L., ve Cho, N. K. (2020). Ultimate Compressive Strength of Stiffened Panel: An Empirical Formulation for Flat-Bar Type. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8).
- Kumar, K. S., Patil, S., ve Mallikarjuna Reddy, D. (2019). Modeling and Analysis of Low Velocity Impact on Composite Plate with Different Ply Orientations. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 505, 515-521.
- Kumar, Y., Rezasefat, M., Amico, S. C., Manes, A., Dolez, P. I., ve Hogan, J. D. (2024). Comparison of Two Progressive Damage Models for Predicting Low-Velocity Impact Behavior of Woven Composites. *Thin-Walled Structures*, 197.
- Liu, C., Ma, C., ve Gao, X. (2023). Study on Impact Behavior of Glass Fiber/PVC Curved Sandwich Structure Composites. *Polymer Composites*, 44(1), 365-376.
- Liu, C., Pan, R., Deng, X., Li, D., Zhang, M., Sun, Y., ve Huang, W. (2022). Theoretical and Experimental Study on Nonlinear Dynamic Response of Composite Umbrella Membrane Structure Under Hail Impact. *Thin-Walled Structures*, 173.
- Liu, X., Sun, W., Liu, H., Du, D., ve Ma, H. (2024). Frequency Veering and Nonlinear Coupled Vibration Analysis of Variable Stiffness Composite Plates with Curvilinear Fiber Paths. *Thin-Walled Structures*, 194.
- Liu, Y., Du, Y., Zhang, Z., Zhou, F., Ma, L., ve Liu, B. (2024). Dynamic Response and Vibration Modes of Multi-Layer Wound Cylindrical Shell for Hydrogen Storage Under External Blast Loading. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 1242-1250.
- Liu, Z., ve Amdahl, J. (2012). Numerical and Simplified Analytical Methods for Analysis of the Residual Strength of Ship Double Bottom. *Ocean Engineering*, 52, 22-34.
- Lyu, Y.-T., Hung, T.-P., Ay, H.-C., Tsai, H.-A., ve Chiang, Y.-C. (2022). Evaluation of Laminated Composite Beam Theory Accuracy. *Materials*, 15(19), 6941.
- Ma, B., Cao, X., Feng, Y., Song, Y., Yang, F., Li, Y., Zhang, D., Wang, Y., ve He, Y. (2024). A Comparative Study on the Low Velocity Impact Behavior of UD, Woven, and Hybrid UD/Woven FRP Composite Laminates. *Composites Part B: Engineering*, 271.

- Mahendru, P. (2024). Optimization of Erosion Parameters of Coated SS316L Using Taguchi Method. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 18(3), 1575-1591.
- Malik, M. H., ve Arif, A. F. M. (2013). ANN Prediction Model for Composite Plates Against Low Velocity Impact Loads Using Finite Element Analysis. *Composite Structures*, 101, 290-300.
- Manesh, M. G., Kazemian, A. H., ve Rahmani, H. (2024). Investigation of the Collapse Behavior of Aluminum Burr-Filled Cylindrical Energy Absorber Under Low-Velocity Impact. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*.
- Masood, S. N., Gaddikeri, K. M., ve Viswamurthy, S. R. (2021). Experimental and Finite Element Numerical Studies on the Post-Buckling Behavior of Composite Stiffened Panels. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(16), 1677-1690.
- Mohan, M. M., Bandhu, D., Mahesh, P. V., Thakur, A., Deka, U., Saxena, A., ve Abdullaev, S. (2024). Machining Performance Optimization of Graphene Carbon Fiber Hybrid Composite Using TOPSIS-Taguchi Approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*.
- Nazari, A., Malekzadeh, K., ve Naderi, A. A. (2019). Experimental and Numerical Free Vibration Analysis of Hybrid Stiffened Fiber Metal Laminated Circular Cylindrical Shell. *Journal of Solid Mechanics*, 11(1), 105-119.
- Nyambeni, N., ve Mabuza, B. R. (2018). Considerations of Failure Analysis in a Multi-Layered Composite Structure Under Thermomechanical Loading. *The 18th International Conference on Experimental Mechanics*, 447.
- O'Mahoney, D. C., Katnam, K. B., O'Dowd, N. P., McCarthy, C. T., ve Young, T. M. (2013). Taguchi Analysis of Bonded Composite Single-Lap Joints Using a Combined Interface-Adhesive Damage Model. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, 168-178.
- Orifici, A. C., Thomson, R., Gunnion, A. J., Degenhardt, R., Abramovich, H. Ve Bayandor, J. (2005). Benchmark Finite Element Simulations of Postbuckling Composite Stiffened. *11th Australian International Aerospace Congress*.

- Pan, J., Li, N., Song, Z. J., ve Xu, M. C. (2019). Influence of Boundary Condition and Stiffener Type on Collapse Behaviours of Stiffened Panels Under Longitudinal Compression. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(10),
- Pattanaik, A., Satpathy, M. P., ve Mishra, S. C. (2016). Dry Sliding Wear Behavior of Epoxy Fly Ash Composite With Taguchi Optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 710-716.
- Quaresimin, M., Ricotta, M., Martello, L., ve Mian, S. (2013). Energy Absorption in Composite Laminates Under Impact Loading. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 133-140.
- Rizzo, F., D'Agostino, T., Cuomo, S., Pinto, F., ve Meo, M. (2021). High-Velocity Impact Investigation on Thermoplastic Polyurethane/CFRP T-Stiffened Panel. *Materials Today: Proceedings*, 34, 164-170.
- Ruzek, R., Kudrna, P., Kadlec, M., Karachalios, V., ve Tserpes, K. I. (2014). Strain and Damage Monitoring in CFRP Fuselage Panels Using Fiber Bragg Grating Sensors. Part II: Mechanical Testing and Validation. *Composite Structures*, 107, 737-744.
- Ryabov, A. A., Maslov, E. E., Strelets, D. Y., ve Slobodchikov, V. G. (2019). Computational Analysis of Compressed Stiffened Composite Panels with Impact Damage. *Aerospace*, 6(3).
- Sanjaya, Y., Prabowo, A. R., Imaduddin, F., ve Binti Nordin, N. A. (2021). Design and Analysis of Mesh Size Subjected to Wheel Rim Convergence Using Finite Element Method. *Procedia Structural Integrity*, 33, 51–58.
- Santiago, R. C., Cantwell, W. J., Jones, N., ve Alves, M. (2018). The Modelling of Impact Loading on Thermoplastic Fibre-Metal Laminates. *Composite Structures*, 189, 228-238.
- Sharma, A. P., Khan, S. H., ve Velmurugan, R. (2019). Effect of Through Thickness Separation of Fiber Orientation on Low Velocity Impact Response of Thin Composite Laminates. *Heliyon*, 5(10), e02706.

- Sui, H., Zhang, J., Liu, F., Ma, Z., Gu, C., Qiu, H., Wu, R., Song, H., ve Song, H. (2024). Dynamic Response Analysis and Vibration Reduction of a 10-MW Jacket Offshore Wind Turbines Under the Combined Wind and Ice Loads. *Ocean Engineering*, 303.
- Sun, W., Guan, Z., Ouyang, T., Tan, R., ve Zhong, X. (2018). Effect of Stiffener Damage Caused by Low Velocity Impact on Compressive Buckling and Failure Modes of T-Stiffened Composite Panels. *Composite Structures*, 184, 198-210.
- Tarih, Y. S., Coskun, T., Yar, A., Gundogdu, Ö., ve Sahin, Ö. S. (2023). The Influences of Low-Velocity Impact Loading on the Vibration Responses of the Carbon/Glass Fiber-Reinforced Epoxy Composites Interleaved with Various Non-woven Thermoplastic veils. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(15).
- Tsartsaris, N., Meo, M., Dolce, F., Polimeno, U., Guida, M., ve Marulo, F. (2011). Low-Velocity Impact Behavior of Fiber Metal Laminates. *Journal of Composite Materials*, 45(7), 803-814.
- Tserpes, K. I., Karachalios, V., Giannopoulos, I., Prentzias, V., ve Ruzek, R. (2014). Strain and Damage Monitoring in CFRP Fuselage Panels Using Fiber Bragg Grating Sensors. Part I: Design, Manufacturing and Impact Testing. *Composite Structures*, 107, 726-736.
- Uyaner, M., Kara, M., Kepir, Y., ve Gunoz, A. (2023). Virtual Testing of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, 47(2), 595-610.
- Wang, B., Wu, L. Z., Ma, L., ve Feng, J. C. (2011). Low-velocity Impact Characteristics and Residual Tensile Strength of Carbon Fiber Composite Lattice Core Sandwich Structures. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 891-897.
- Wang, G., Lu, Z., Liu, J., ve Fan, D. (2024). Performance Analysis and Multilayer Design of Curved Honeycomb Sandwich Panels with Different Cell Arrays Under Projectile Impact. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 24(03).
- Wang, X. M., Cao, W., Deng, C. H., Wang, P. Y., ve Yue, Z. F. (2015). Experimental and Numerical Analysis for the Post-Buckling Behavior of Stiffened Composite Panels with Impact Damage. *Composite Structures*, 133, 840-846.

- Xiao, L., Lu, C., Li, X., Xu, N., Zheng, T., Wang, G., Wang, X., ve Zhang, D. (2023). Exploration of Impact Response and Damage Mechanism of Discontinuous CFRP Laminates Subjected to Low Velocity Impact. *Polymer Composites*, 44(10), 6324-6336.
- Yang, B., Fu, K., Lee, J., ve Li, Y. (2021). Artificial Neural Network (ANN)-Based Residual Strength Prediction of Carbon Fibre Reinforced Composites (CFRCs) After Impact. *Applied Composite Materials*, 28(3), 809-833.
- Yao, L., Yu, H., Wang, C., ve He, W. (2021). Numerical and Experimental Investigation on the Oblique Successive Impact Behavior and Accumulated Damage Characteristics of Fiber Metal Laminates. *Thin-Walled Structures*, 166, 108033.
- Zhang, Y., Zhou, Y., ve Sun, Y. (2022). Bird-Strike Damage Analysis of Composite Panels with Different Stiffeners. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(6), 933-947.
- Zhou, C.-C., Yin, G.-F., ve Hu, X.-B. (2009). Multi-Objective Optimization of Material Selection for Sustainable Products: Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm approach. *Materials ve Design*, 30(4), 1209-1215.
- Zou, J., Lei, Z., Bai, R., Liu, D., Jiang, H., Liu, J., ve Yan, C. (2021). Damage and Failure Analysis of Composite Stiffened Panels Under Low-Velocity impact and Compression after impact. *Composite Structures*, 262.
- Zou, J., Lei, Z., Bai, R., Liu, D., Liu, H., Huang, X., ve Yan, C. (2023). Damage Evolution and Failure Mechanism of Asymmetric Composite Laminates Under Low-Velocity Impact and Compression After Impact. *Thin-Walled Structures*, 182.

**DİZİN**

---

**A**

Abstract · v, vii

---

**Ç**

Çizelge · ix, 15, 18, 25, 27, 28, 30,  
37, 38, 43 44, 49, 50

---

**F**

FFT · iv, v, 54, 72, 73, 76, 80

---

**K**

*Key Words* · v

---

**T**

Taguchi · iv, v, 43, 52, 53, 54,55,  
56, 57, 63, 64, 80

---

**U**

Unvan · 3, 4

---

**Y**

YSA · iv, 42, 53, 54, 78, 79, 81



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

