



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI DOKUMA TİPİ VE AĞIRLIĞINDAKİ
ELYAF İSTİFLEME SIRASI İLE HİBRİT
PLANÖR KANADINDA OLUŞAN DARBE
HASAR TEPKİSİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Esat KAHRAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Teknolojileri Anabilim Dalı

Şubat-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Esat KAHRAMAN tarafından hazırlanan “FARKLI DOKUMA TİPİ VE AĞIRLIĞINDAKİ ELYAF İSTİFLEME SIRASI İLE HİBRİT PLANÖR KANADINDA OLUŞAN DARBE HASAR TEPKİSİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 22/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık Teknolojileri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

Danışman

Doç. Dr. Mustafa TAŞYÜREK

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr.

FBE Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 24201008 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Esat KAHRAMAN

Tarih: 22.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI DOKUMA TİPİ VE AĞIRLIĞINDAKİ ELYAF İSTİFLEME SIRASI İLE HİBRİT PLANÖR KANADINDA OLUŞAN DARBE HASAR TEPKİSİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Esat KAHRAMAN

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Havacılık Teknolojileri Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mustafa TAŞYÜREK

2025, 123 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mustafa TAŞYÜREK

Doç. Dr. Soner ŞEN

Doç. Dr. Fatih AYDIN

Uçak ve diğer hava araçları genel olarak kanatlar, kuyruk, uçuş kumandaları, uçak motoru ve varsa pervane gibi elemanlardan meydana gelir. Havada tutunabilmeyi sağlayan kanatlar, dengede tutmaya yarayan kuyruk ve kuyruktaki yatay ve dikey stabilizerler ile uçağın durum ve pozisyonunu değiştiren uçuş kumandaları mevcut olduğu hava aracının tipine ve kullanım amacına bağlı olarak metal ya da kısmen kompozit malzemeden üretilmektedir. Gelişen ve değişen havacılık endüstrisi bu malzemelerin de tüm uçağın olduğu gibi sürekli olarak geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Askeri uçaklar çok yüksek mekanik gerilmeler altında çalıştıklarından dolayı metal yapılarla üretilmektedir. Keza yolcu uçakları da çok değişken mekanik ve termal şartların etkisi altında çalıştıklarından metal ve kompozit yapılardan meydana gelmektedir. Daha hafif yapılı planör tip hava araçları ile günümüzde ticari ve sportif amaçlı kullanımı yaygınlaşan drone ve mini model uçak gibi taşıtlar ise ağırlıklı olarak kompozit malzemelerden imal edilmektedirler. Küçük ölçekli model uçaklardan büyük yolcu uçaklarına kadar tüm hava taşıtları ağırlık avantajına ihtiyaç duymaktadır. Bu durumun etkenleri arasında menzil, yakıt sarfiyatı ve maliyet sayılabilir. Teknolojik ilerlemenin sağlanması ve aynı anda giderlerin azaltılabilmesi taşıtlar üzerinde yapılmasını gittikçe zorunlu hale getiren birtakım değişikliklerin yapılmasını sektöre sunmaktadır.

Bu gerekliliklerden birisi de mukavemette herhangi bir eksiklik yaşamadan ağırlık azaltımının sağlanmasıdır. Tüm sportif ve ticari hava taşıtlarında mukavemet/ağırlık oranlarının yüksek olması beklenmektedir. Bu sayede uzun menzil, uzun havada kalma süresi, düşük yakıt sarfiyatı ve yüksek darbe mukavemeti elde edilmektedir. Malzeme mukavemeti pek çok yöntemle artırılabilir. Bunlardan birisi de kompozit yapı oluşturmaktır. Kompozit malzemeler metallere kıyasla darbe hasarına karşı daha

hassastırlar. Kk lekli ticari taşıtlarda plastik ya da kompozit esaslı destek malzemesi veya kaplama malzemesi mukavemet/ağırlık oranının paydası olan ağırlık azaltımını sağlamaya en iyi adaylardandır.

Gerek uçuş esnasında gerekse bakım onarım çalışmaları sırasında ufak çaplı istenmeyen kazalar meydana gelebilmektedir. Bu kazalarda hava taşıtları öncelikle dış yüzeylerinden sonra da yüzey alt tarafında yer alan dolgu malzemelerinden hasar almaktadır. Bu hasar, enerjinin byklğne bağlı olarak çarpma bölgesinin arka yüzeyinde bile görülebilmektedir. Aerodinamik şartları olumsuz etkilediği için uçuş güvenliği tehlikeye düşürecek bu sonuçlar hava taşıtlarında kesinlikle istenmemektedir.

Çalışmada farklı konfigürasyonlarda üretilen bal peteği + elyaf kompozitinin ticari/sportif amaçlı çalışan hava araçlarının darbe hasar davranışları üzerine davranışları incelenecektir. Elde edilen deney sonuçları, hasar alanı incelemeleri ve zgn grafik çıkarımları ile hangi numune türünün hangi enerji seviyesindeki çarpmalara daha olumlu cevap verebileceği tespit edilmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, Hava taşıtı kanat/gövde, İstifleme sırası, Karbon elyaf, Kompozit uçak



ABSTRACT

MS THESIS

IMPROVING THE IMPACT DAMAGE RESPONSE OF THE HYBRID GLIDER WING BY STACKING FIBERS OF DIFFERENT WEAVE TYPES AND WEIGHTS

Esat KAHRAMAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
DEPARTMENT OF AVIATION TECHNOLOGIES**

Advisor: Doç. Dr. Mustafa TAŞYÜREK

2025, 123 Pages

Jury

Assoc. Prof. Mustafa TAŞYÜREK

Assoc. Prof. Soner ŞEN

Assoc. Prof. Fatih AYDIN

Aircraft and other aircraft generally consist of elements such as wings, tail, flight controls, aircraft engine and propeller, if any. The wings that enable it to stay in the air, the tail and the horizontal and vertical stabilizers on the tail that help keep it in balance, and the flight controls that change the status and position of the aircraft are produced from metal or partially composite materials, depending on the type of aircraft and the purpose of use. The developing and changing aviation industry requires the continuous development of these materials, as well as the entire aircraft. Military aircraft are produced with metal structures because they operate under very high mechanical stresses. Likewise, passenger aircraft are composed of metal and composite structures because they operate under the influence of highly variable mechanical and thermal conditions. Lighter glider type aircraft and vehicles such as drones and mini model aircraft, which are widely used for commercial and sports purposes today, are mainly manufactured from composite materials. All aircraft, from small-scale model planes to large passenger planes, need weight advantages. Factors in this situation include range, fuel consumption and cost. Ensuring technological progress and reducing expenses at the same time offers the industry the opportunity to make some changes on vehicles that make it increasingly necessary.

One of these requirements is to achieve weight reduction without experiencing any deficiency in strength. Strength/weight ratios are expected to be high in all sport and commercial aircraft. In this way, long range, long airtime, low fuel consumption and high impact resistance are achieved. Material strength can be increased by many methods. One of these is to create a composite structure. Composite materials

are more susceptible to impact damage compared to metals. In small-scale commercial vehicles, plastic or composite-based support material or coating material is one of the best candidates to achieve weight reduction, which is the denominator of the strength/weight ratio.

Minor undesirable accidents may occur both during flight and during maintenance and repair work. In these accidents, aircraft are damaged firstly by their outer surfaces and then by the filling materials under the surface. This damage can even be seen on the rear surface of the impact area, depending on the magnitude of the energy. These consequences, which endanger flight safety because they negatively affect aerodynamic conditions, are absolutely undesirable in aircraft.

In the study, the behavior of honeycomb + fiber composite produced in different configurations on the impact damage behavior of commercial/sporting aircraft will be examined. With the obtained test results, damage area examinations and original graphical deductions, it will be determined which sample type can respond more positively to impacts at which energy level.

Keywords: Aircraft wing/fuselage, Carbon fiber, Composite aircraft, Low-speed impact, Stacking order

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum çalışmanın her aşamasında ve bu çalışmanın bitirilebilmesi adına vermiş olduğu destekten, doğru kaynak ve bilgiye ulaşma konusunda her zaman yanımda ve yol gösterici olan danışman hocam Doç. Dr. Mustafa TAŞYÜREK'e sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında destek ve motivasyon kaynağım olan sevgili eşime ve güzel kızlarıma teşekkür eder kızlarıma ilham kaynağı olmasını dilerim.

Esat KAHRAMAN
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	2
1.2. Kompozit Malzeme Çeşitleri	3
1.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler	3
1.2.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler	5
1.3. Havacılıkta Kompozit Malzemenin Önemi	8
1.4. Havacılıkta Kompozit Malzemelerin Gelişimi	8
1.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	9
1.5.1. Avantajları	9
1.5.2. Dezavantajları	11
1.6. Uçakların Seyir Esnasında veya Bakım ve Onarım Esnasında Maruz Kalabileceği Darbeler	11
1.6.1. Seyir sırasında maruz kalınan darbeler	122
1.6.2. Bakım ve onarım sürecinde maruz kalınan darbeler	13
1.7. Darbe Testleri	14
1.8. Kompozit Malzemelerde Oluşabilecek Hasarlar	14
1.9. Kuş Çarpması.....	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	17
2.1. Elyafli Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	17
2.2. Hibrit Elyaf Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar	20
2.3. Uçak Yapılarında Bal Peteği/Sandviç Yapı Tahribatlı Testler Üzerine Yapılan Çalışmalar	22
2.4. Düşük Hızlı Darbe İle İlgili Çalışmalar	24
2.5. Kuş Çarpması Üzerine Yapılan Çalışmalar	25
2.6. Tez Çarpmasının Amacı	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. Malzemeler	322
3.1.1. Elyaf dokuma kumaşlar	33
3.1.2. Kullanılan epoksi ve sertleştiriciler	34
3.2. Yöntem.....	34
3.2.1. Ağırlık düşürme testi ve standartları.....	34
3.2.2. Düşme ağırlığı darbe testinin hizmet alanları	35
3.3. Düşük Hızlı Darbe Testlerinin Gerçekleştirilmesi.....	36

3.4. Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	39
3.5. Deney Numunelerinin Üretimi	39
3.6. FTIR Analizi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	44

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... 46

4.1. Cam Elyaf - Cam Elyaf - Cam Elyaf (GGG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	47
4.2. Cam Elyaf - Karbon Elyaf - Cam Elyaf (GCG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	50
4.3. Cam Elyaf - Cam Elyaf - Karbon Elyaf (GGC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	54
4.4. Cam Elyaf - Karbon Elyaf - Karbon Elyaf (GCC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	58
4.5. Karbon Elyaf - Karbon Elyaf - Karbon Elyaf (CCC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	62
4.6. Karbon Elyaf - Cam Elyaf - Karbon Elyaf (CGC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	66
4.7. Karbon Elyaf - Karbon Elyaf - Cam Elyaf (CCG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	70
4.8. Karbon Elyaf - Cam Elyaf - Cam Elyaf (CGG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı.....	74
4.9. 10J-20J-30J Enerji Seviyelerinde Kuvvet - Zaman, Kuvvet - Deplasman ve Enerji - Zaman Grafiklerinin Karşılaştırması	78
4.9.1. 10J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması	78
4.9.2. 20J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması	80
4.9.3. 30J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması	82
4.10. Hasar Analizi	84
4.10.1. Cam elyaf - cam elyaf - cam elyaf (CCC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	84
4.10.2. Cam elyaf - karbon elyaf - cam elyaf (GCG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	86
4.10.3. Cam elyaf - cam elyaf - karbon elyaf (GGC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	88
4.10.4. Cam elyaf - karbon elyaf - karbon elyaf (GCC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	90
4.10.5. Karbon elyaf - karbon elyaf - karbon elyaf (CCC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi.....	92
4.10.6. Karbon elyaf - cam elyaf - karbon elyaf (CGC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	94
4.10.7. Karbon elyaf - karbon elyaf - cam elyaf (CCG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	96
4.10.8. Karbon elyaf - cam elyaf - cam elyaf (CGG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi	98

4.11. FTIR Analizi	100
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
5.1. Sonuçlar	103
KAYNAKLAR	105



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A1	Üst Plaka Kesit Alanı
A2	Çekirdek Yapı Kesit Alanı
A3	Alt Plaka Kesit Alanı
F	Takviye Elemanı
L	Uzunluk, cm
M	Matris
W	Karışım ρ Yoğunluk
X	Ağırlık

Kısaltmalar

ANSYS	Simülasyon Yazılımı
CNT	Karbon Nanotüp
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
ÇCKNT (MWCNT)	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
DWCNT	İki Duvarlı Karbon Nanotüp
FAI	Dünya Hava Sporları Federasyonu
GRP	Cam Elyafı ile Güçlendirilmiş Malzeme
PE	Polietilen
PET	Polietilen Tereftalat
PLA	Polilaktik Asit
PP	Polietilen Bal Peteği
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
THK	Türk Hava Kurumu

C	Karbon elyaf plain (düz dokuma)
<u>C</u>	Karbon elyaf twill (çapraz dokuma)
<u>CC</u>	Üç kat karbon elyaf
<u>CCG</u>	İçten dışa karbon-karbon-cam
<u>CGC</u>	İçten dışa karbon-cam-karbon
<u>CGG</u>	İçten dışa karbon-cam-cam
G	Cam elyaf plain (düz dokuma)
<u>G</u>	Cam elyaf twill (çapraz dokuma)
<u>GG</u>	Üç kat cam elyaf
<u>GCG</u>	İçten dışa cam-karbon-cam
<u>GCC</u>	İçten dışa cam-karbon-karbon
<u>GGC</u>	İçten dışa cam-cam-karbon

1. GİRİŞ

Planör kelimesi dilimize Fransızca "Planeur" sözcüğünden girmiştir. Fransızca karşılığı "süzülerek uçmak, süzülerek mesafe kat etmek" demektir. Uluslararası Sportif Havacılık Federasyonu (FAI) tarafından "Sabit kanatları yapısı sayesinde kaldırıcı güç oluşturarak havada süzülme kabiliyetine sahip, havadan ağır motorsuz hava aracı" olarak tanımlanır [25]. Planör, hava akımlarından yararlanarak uçan, uçağa benzer motorsuz hava aracıdır. Bir başka tanıma göre planör, "sabit kanatları yapısı sayesinde kaldırıcı güç oluşturarak havada süzülme kabiliyetine sahip ve havadan ağır motorsuz hava aracıdır" [21].

Dünya genelinde çok yaygın bir spor dalı ve tanınan bir hava aracı olsa da planör, ülkemizde hava aracı olarak ve planörcülük sporu alanında oldukça az bilinmektedir. Planörcülük ülkemizde sadece sivil olarak Türk Hava Kurumu (THK) tarafından icra edilmektedir. Tarihçesi motorlu uçuştan önceye dayanan planör, süzülme uçuşunu ve doğal meteorolojik oluşumlarını kullanarak havada kalabilen ve bu yöntemlerle binlerce kilometre mesafe kat edebilen bir hava aracıdır. Motoru olmamasına rağmen, dünya genelinde motorlu uçuşa başlangıçtan önce temel eğitimin en önemli parçasıdır. NASA'nın astronot eğitimlerinin en önemli parçası olan planör eğitimi, astronotları dünyaya dönüşte motorsuz uçuş için hazırlamaktadır. Çünkü atmosfere giriş anından itibaren uzay mekikleri süzülme, yani planör uçuşu yapmaktadır ve zemine yumuşak iniş araştırmaları gerek ülkemizde gerekse uluslararası çalışmalarda halen devam etmektedir. Deneysel planörcülüğün örnek projelerinden olan Perlan projesinin ilk etabında çoğu jet uçağının çıkamayacağı 52.221 fit irtifaya çıkmış ve bir sonraki 90.000 fit hedeflenmiştir. Bu bağlamda planör, dünyada hem eğitim amacıyla, hem yarışma hem de deneysel sınıfta oldukça önemli bir hava aracıdır [27].

1853 yılında mühendis George Cayley dünyadaki ilk planörü yapmış, fakat ilk uçuşun sonunda geçirdiği kaza nedeniyle bu uçuş ilk başarılı planör uçuşu olarak kayıtlara geçmemiştir. Cayley' nin anılarından ve kuşların süzülme uçuşundan etkilenen havacı Otto Lilienthal ise yaptığı planör ile 1890'lı yıllarda 2000'e yakın uçuş gerçekleştirmiştir. Ne yazık ki 1896 yılında geçirdiği planör kazasında yaralanmış sonrasında bu sakatlıklardan dolayı hayatını kaybetmiştir [12]. Lilienthal her ne kadar planör kazası sonucu hayatını kaybetse de yaptığı planör uçuşları planörcülüğün başlangıcı olarak kabul edilir. Ayrıca McCullough, Wright Kardeşler kitabında belirttiği üzere Wright Kardeşler 1903 yılında yaptıkların ilk motorlu uçuş öncesinde uçaklarını

motorsuz olarak denemişler ve planör uçuşu yapmışlardır [5]. İlk motorlu uçuştan sonra ise insanlık bütün enerjisini motorlu uçakların gelişimi üzerine harcamış ve neredeyse 20 yıl boyunca planör ile ilgili çalışmalar yapılmamıştır. I. Dünya Savaşı'ndan sonra Almanya'ya gelen gerçek hava aracı tasarlama yasağı sonrasında ise buradaki birçok öğrenci tekrar motorsuz uçuşa yönelmiş ve planör uçuşunu tekrar canlandırmışlardır. Ancak bu dönemde yapılan planörler günümüz planörlerinden daha çok günümüz çok hafif hava araçlarına benzemektedir. Fakat çok kısa bir süre sonra bu öğrenciler Vampyr ismini verdikleri planörde günümüzde iyi bilinen Göttingen kanat profili serisinden GOE 441 numaralı kanat profilini kullanarak bu büyük başarılar elde etmiştir. Bu başarılarından 1922 yılında termik ve yelken uçuşları ile yaptıkları ilk olarak bir saat ve ardından üç saatlik uçuşlar ile modern planörlerin gelişiminde önemli bir kilometre taşı olmuştur [12].

Planörlerin kanat yapıları motorlu uçaklara göre çok daha uzun tasarlanmakta böylece birim ağırlık başına kaldırma kuvveti daha fazla olmaktadır. Ayrıca motor, pervane gibi sürtünmeyi artıran yapılar olmadığından daha az aerodinamik sürtünme katsayısına sahiplerdir. Planörlerde motorların, yakıt depolarının, diğer sistemlerin oluşturduğu ağırlıklar da olmadığından yer çekiminden daha az etkilenecek şekilde havada daha uzun süzulebilmektedir. Yeni nesil planörlerde kompozit malzemeler kullanılarak daha hafif imal edilmelerine imkan sağlanmaktadır [21].

1.1. Kompozit Malzemeler

İki veya daha fazla organik ya da inorganik malzemenin birbiri içinde çözünmeden bir araya gelmesiyle oluşan ve bu malzemelerden farklı yapısal özelliklere sahip olarak ortaya çıkan ve bileşenlerinden daha iyi özelliklerle sonuçlanan yeni tür malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir.

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelerin kullanımı artmaktadır. Bu malzemeler, minimum iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle oluşan ve istenilen yapısal özellikleri elde etmek için tasarlanmış malzemelerdir. Kompozit malzemeler, makine, otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisi sektöründe, hafiflik ve yüksek mukavemet dayanımı gibi önemli yapısal özelliklerin elde edilmesinde kompozit malzemeler çok işlevsel hale gelmiştir [39]. Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci, titreşim sönmüleme kabiliyeti ve uzun yorulma

ömrü gibi birçok avantajlı özelliğe sahip oldukları için başta havacılık ve otomotiv olmak üzere birçok sektörde sıklıkla tercih edilmektedirler [17].

İlk motorlu uçuş, 1903 yılında Wright Kardeşler tarafından gerçekleştirildi. O zamandan bu zamana uçaklarda hassas yapı üretiminde kullanılan ahşap, tel ve kumaşın yerini zamanla çelik ve alüminyumdan imal edilen alaşımlara; günümüzde ise kompozit malzemelere bıraktı. Dolayısıyla havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanılıyor olması sıkça karşımıza çıkmaktadır.

Havacılık sektörü, gelişen malzeme biliminden en fazla etkilenen sektörlerin başında gelir. Havacılık sektöründeki "daha fazla hafiflik" anlayışı gelişti. Artan akaryakıt, işletme ve bakım maliyetleri bu anlayışın gelişmesine sebep oldu. Uçağın gövde ağırlığı azaltılarak hem düşük yakıt tüketimi sağlanır hem de karbon emisyonları ve işletme maliyetleri azaltılır. Havacılık sektöründe kompozit malzemeler, güvenlik anlayışı ön planda tutularak ağırlığın azaltılmasına yardımcı olur. Geleneksel malzemelere kıyasla hafiflik, yüksek darbe dayanımı, düşük maliyet, basit montaj ve radara karşı görünmezlik gibi birçok avantaja sahiptir [38].

1.2. Kompozit Malzeme Çeşitleri

Kompozit malzemelerin yapılarında çok fazla sayıda malzeme kullanabilmesinden ötürü sınıflandırmada kesin sınırların çizilememesine rağmen aşağıdaki gibi matris ve elyaf elemanlarına göre sınıflandırma yapabilmek mümkündür [47].

1.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

1.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer malzemeler liflerle pekiştirilerek polimer kompozitler elde edilmektedir. Düşük maliyetleri sebebiyle endüstride çok geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Pekiştirici malzeme olarak karbon, cam ve boron lifleri kullanılmaktadır.

Polimer kompozitlerde mukavemet pekiştirici liflerin miktarı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. En önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite modülüne sahip olması, işleme kolaylığı ve nem tutma özelliğidir. Yoğunlukları düşük

olduğundan sıcaklık, nem ve zaman etkisiyle viskoelastik ve viskoplastik davranış sergilemektedirler.

1.2.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile vakum emdirme, dökme, karıştırma, elektroliz yoluyla kaplama, sıcak presleme, haddeleme ve difüzyon kaynağı gibi yöntemlerle pekiştirilmesi ile elde edilmektedirler. Matris malzemesi olarak genellikle demir, alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır ve çelik kullanılmaktadır. Ana metaller bir ya da daha fazla sayıda diğer metal elementler ile alaşımlanarak kullanılacağı yere göre istenilen özellikler elde edilebilmektedir. Oksitlenme riskinin yüksek olduğu ortamlarda bile yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. İmalatının zor ve maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen daha çok uzay ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

1.2.1.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramik fazın takviye malzemeleri ile pekiştirilmesi yoluyla elde edilirler. Metalik ya da metal özelliği taşımayan elemanların bir araya gelmesiyle üretilmektedirler. Seramiğin yüksek sıcaklık kapasitesi, hava taşıtlarının son derece yüksek sıcaklık kısımları için onları çok çekici malzemeler haline getirir. Bununla birlikte, çok düşük kırılma dayanıklılıkları nedeniyle, seramikler yapısal uygulamalarda sınırlıdır. Yapıları itibariyle gevrektirler ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren çalışma şartlarında karbon, cam, metal ve seramik elyaflarla kullanılırlar. Başlıca kullanım alanları arasında zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar ve uzay araçları gelmektedir. İmalat işlemleri sırasında veya hizmet esnasında ortaya çıkabilecek çatlak benzeri kusurlara karşı çok düşük toleransları vardır. Küçük bir çatlak bile hızla kritik boyuta büyüyerek ani arızaya yol açabilir.

1.2.1.4. Karbon matrisli kompozitler

Karbon, seramiklere benzer şekilde kırılğan bir malzemedir. Yüksek sıcaklık ve sürünme dayanımı, düşük yoğunluk, çekme ve basma yönlerinde yüksek gerilme mukavemeti, yüksek yorulma dayanımı, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek sürtünme katsayısı gibi özelliklere sahiptirler. Bunun yanında yüksek maliyet, düşük kayma dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon hassasiyeti gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Havacılık ve otomobil yarışları gibi yüksek performans gerektiren alanlarda kullanılırlar.

1.2.2. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler

1.2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler elyaf liflerinin uygun bir matris malzemesi ile birleştirilmesinden elde edilirler. Cam elyaf, karbon elyaf, bazalt elyaf, aramid elyaf, plastik elyaflar ve doğal elyaflar elyaf takviyeli kompozitlerin imalatında sayılabilir. Bu elyaf türleri gerek tek başlarına gerek hibrit olarak gerekse farklı boyutlarda diğer takviye elemanları ile multi-skala olacak şekilde takviyelendirilmektedirler. Elyafların matris içindeki doğrultuları, yerleşimi ve boyutları kompozitlerin özelliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Uzun boyutlardaki elyafların matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf doğrultusunda yüksek mukavemet, elyaflara dik doğrultuda ise oldukça düşük mukavemet elde edilmektedir. Birbirlerine dik iki doğrultuda da yerleştirilmiş elyaf durumunda ise iki doğrultuda da yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Ayrıca laminat oluşturma esnasında istenilen açılarda da yerleştirilebilmektedir. Elyafı matris içerisinde homojen olarak dağıtarak yarı-izotropik bir yapı elde edilebilmektedir. Kompozit malzemeye uygulanan gerilme elyaf doğrultusunda ise kompozit malzemenin dayanım değeri yüksek, elyaf doğrultusu dışına çıkıldıkça kompozit malzemenin dayanım değeri düşük olmaktadır.

Çeşitli şekillerdeki elyaflar aynı malzemenin katı haldeki yapısına göre daha rijit ve daha güçlüdür. Elyafın yoğunluklarına oranla yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahiptirler. Elyaf takviyeli kompozitlerin yapısında kısa veya kesik yapıda

elyaflar bulunabilir. Kısa elyafların boy-çap oranı oldukça büyüktür ve matris içerisinde tek yönlü ya da rastgele dizilmiş halde bulunabilirler. En çok kullanılan çeşitleri grafit ve karbon elyaflardır.

1.2.2.2. Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozit malzemeler bir ya da daha fazla malzemedan yapılmış partiküllerin daha farklı bir malzemedan olan matris içinde rastgele yerleştirilmesiyle oluşturulurlar. Partikül takviyeler hem mikro boyutta hem de nano boyutta olabilmektedir. Partikül dağılımının rastgele ve homojen olmasından ötürü bu malzemelere yarı izotropik malzeme de denilmektedir. Anizotropik olarak sınıflandırılmamasının ön şartı ise yapı içerisinde homojen olarak dağıtılabilesidir. Matrisler seramik, metal ya da polimer olabilmektedir. Parçacık boyutlarının aynı olması yüksek mukavemet için gereklidir. Beton, alüminyum takviyeli poliüretan kauçuk ve bakır alaşımları bu kompozitlere örnektir. Genellikle nükleer reaktörlerde ve roket pervanelerinde kullanılmaktadırlar.

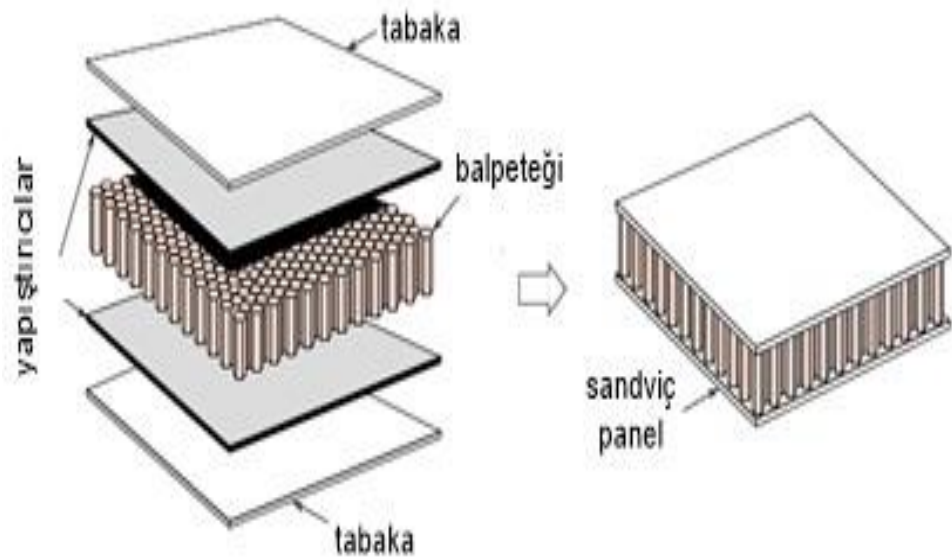
1.2.2.3. Dolgu kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ya da malzemeye emdirilmesi ile oluşturulur. Matris düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılarda çeşitli geometrik şekillerde bir iskelet görevi görmektedir. Matrisin arasındaki dolgu malzemesi metalik, organik veya seramik esaslı olabilmektedir. Kompozit malzeme oluşturulurken seçilen malzemelerin için birbiri içinde çözünmeyen ve birbirleriyle kimyasal reaksiyon vermeyen malzemelerden olmasına dikkat edilmelidir.

1.2.2.4. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler aynı veya farklı doğrultularda elyaf barındıran en az iki tabakanın üst üste konularak bir araya getirilmesi ile oluşturulurlar. Bu tabakalar metal, cam, plastik ya da ahşap olabilmektedir. Matris içerisinde rastgele yönlenmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakalar ile de oluşturulabilirler. Elyaf takviyeler hem sürekli elyaf hem de süreksiz elyaf olarak uygulanabilir. En eski ve uygulamalarda en çok karşılaşılan kompozit türüdür. Bu sebeple çok farklı üretim yöntemi ile imal edilebilirler. Uçaklardaki kanat ve kuyruk gruplarında yüzey kaplama malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılırlar.

Sandviç kompozit yapılar, düşük ağırlıkları nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. Genellikle yapısal bileşen olarak kullanıldıklarından dolayı, çeşitli yükleme koşulları altında yapısal bütünlük çok önemlidir [14]. Tabakalı kompozit malzemelerin tercih edilmesindeki esas sebep, bu kompozitlerin maruz kalacağı yükleme şartına uygun tasarlanabilmesidir. Çünkü uygulanan her tabakanın malzeme yönü istenilen doğrultuda seçilebilmektedir. Tabakalı kompozitler simetrik ve asimetrik olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu tabakalamanın temelinde açığı, malzeme ve tabaka kalınlığındaki farklılık yer almaktadır. Tabakalı kompozitler aşağıdaki şekilde gibidir [63]. (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Tabakalı kompozitlerin yapısı

1.3. Havacılıkta Kompozit Malzemenin Önemi

Kompozit malzemeler birçok alanda olduğu gibi havacılıkta da çok önemli bir yere sahiptir. Kompozit malzemelerin düşük ağırlığı, uçakların yakıt verimliliğini artırırken aynı zamanda daha fazla yolcu veya kargo taşıma kapasitesi, daha uzun menzile erişim ve daha yüksek irtifalarda yükselebilen avantajlarını sağlamaktadır. Bu, havayolu şirketlerine daha düşük işletme maliyetleri ve daha sürdürülebilir bir işletme modeli sunmaktadır. Kompozit malzemelerin mükemmel mukavemet özellikleri ve yüksek dayanıklılığı, uçakların daha güvenli olmasını sağlamaktadır. Bu malzemeler, geleneksel metal yapıların aksine daha iyi darbe dayanımı sağlar ve yorulma kırılmalarına karşı daha dirençlidir. Bu da uçakların uzun ömürlü olmasını ve bakım maliyetlerinin azalmasını sağlar. Ayrıca havacılık sektöründe kompozit malzemelerin tasarım esnekliği, havacılık endüstrisinde daha aerodinamik ve verimli uçakların üretilmesini sağlamıştır. Bu malzemelerin şekillendirilmesi ve katmanlı yapısı, daha karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine olanak tanır. Bu da uçakların performansını artırırken yakıt tüketimini azaltır. Son olarak kompozit malzemelerin korozyona dayanıklı olması da havacılık sektörü için önemlidir. Metal malzemeler zamanla korozyona uğrayabilirken, kompozit malzemeler bu sorunu minimize eder. Bu da uçakların bakım sürelerini azaltır ve operasyonel verimliliği artırır.

Tüm bu nedenlerle havacılık sektöründe kompozit malzemelerin yeri ve önemi giderek artmaktadır. İleri teknoloji ve araştırmalarla birlikte, kompozit malzemelerin daha da geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir [48].

1.4. Havacılıkta Kompozit Malzemelerin Gelişimi

1950'lilerin sonlarında Boeing 707 ve DC-9 gibi uçakların kullanımı ile havacılık sektöründe kompozit malzemeler kullanımında erken dönem başlamış oldu. Kullanılan ilk kompozit malzeme, cam elyafı ile güçlendirilmiş plastik "fiberglas"tır. Kompozitlerin kullanılmaya başlanması, güvenlik ilkesi sebebiyle, üç aşama ile meydana geldi. İlk aşamada direkt olarak güvenliği tehdit etmeyen iç kısımlar, yan duvarlar veya mutfak gibi alanlarda kullanıldı. 1960'lı yılların sonuna gelindiğinde havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanımı iç kısımlarda başarılı olduğundan ikincil uçak yapıları olan rüzgarlık, dümenler ve flaplar gibi alanlarda da kullanılmaya başladı. Fakat en kritik kullanımı şüphesiz stabilizatörler ve kanatlar gibi

birincil yapılarda kullanılmasıdır. 1990'lerden itibaren "karbon fiber" kullanımı yaygınlaşmış ve bu buluş havacılık sektörü için devrim niteliğinde bir gelişme olmuştur. Bunu ilk başarılı örneği Airbus A310 da kullanılan dikey stabilizatördür. Ağırlığı 250 kg'dan fazla azalttığı gözlemlenmiştir [48].

Ticari uçak segmenti, pazardaki en büyük paya sahiptir. Bu durumun yakın gelecekte de artış göstererek devam etmesi beklenmektedir.

Elyaf türüne göre havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanımı, kendi içinde karbon elyaf, seramik elyaf, fiberglas ve diğerleri olarak ayrılmaktadır. Aralarında öne çıkan 2019 yılında %40'luk payla karbon elyaf olmuştur. Kanatlar, gövde ve iç parçalar gibi alanlarda daha sık kullanıldığı görülmektedir.

Reçine türüne göre havacılık sektöründe kompozit malzeme kullanımı ikiye ayrılır; termosetler ve termoplastikler. 2019 yılı pazarında termoset reçineler, pazarda kendine dörtte üçlük bir alan bulmuştur.

Uygulama türleri bakımından kompozit kullanımı ise ciddi bir oranla pazarın %60'ını domine eder. Bu kadar çok tercih edilmesinin sebebi mukavemet, esneklik, dayanıklılık gibi güçlü özelliklere sahip olmasıdır [38].

1.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

1.5.1. Avantajları

Günümüzde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelerin kullanımı artmaktadır. Bu malzemeler, minimum iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle oluşan ve istenilen yapısal özellikleri elde etmek için tasarlanmış malzemelerdir. Kompozit malzemeler, makine, otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisi sektöründe, hafiflik ve yüksek mukavemet dayanımı gibi önemli yapısal özelliklerin elde edilmesinde kompozit malzemeler çok işlevsel hale gelmiştir. Bu özellikleri sayesinde, şirketler ekonomik açıdan daha verimli hale gelmiş ve hizmetlerinin fiyat performans oranı yükselmiştir [39]. Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci, titreşim sönümlenme kabiliyeti gibi birçok avantajlı özelliğe sahip oldukları için başta havacılık ve otomotiv olmak üzere birçok sektörde sıklıkla tercih edilmektedirler [17].

Kompozit malzemelerin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Düşük Ağırlık: Kompozitler çoğu metalle karşılaştırıldığında hafif ağırlıktadır. Hafiflikleri, daha az ağırlığın daha iyi yakıt verimliliği (her galon için daha fazla mil) anlamına geldiğinden uçaklarda büyük öneme sahiptir.

Ağırlıkla İlgili Mukavemet: Güç/ağırlık oranı, bir malzemenin ağırlığı ile ilgili olarak gücüdür. Bazı malzemeler çelik gibi çok güçlü ve ağırdır. Kompozit malzemeler hem güçlü hem de hafif olacak şekilde tasarlanabilir. Bu özellik, kompozitlerin mümkün olan en düşük ağırlıkta çok yüksek mukavemetli bir malzemeye ihtiyaç duyan uçaklar oluşturmak için kullanılmasının nedenidir.

Korozyon Direnci: Kompozitler hava koşullarından ve diğer malzemelerden yiyebilecek sert kimyasalların zarar görmesine karşı dayanıklıdır. Açık havada, şiddetli hava koşullarına, değişken çevre şartlarına, sıcaklıktaki geniş değişikliklere ve korozyonun en baskın şekilde hissedildiği sıcak-ıslak bölgelerdeki etkilere karşı dayanırlar.

Tasarım Esnekliği: Kompozitler diğer birçok malzemedен daha karmaşık şekillerde kalıplanabilir. Bu, tasarımcılara hemen hemen her şekil veya form oluşturma özgürlüğünü verir.

Parça Konsolidasyonu (yapıları benzer durumda olan nesnelerin birleştirilmesi): Kompozit malzemelerden yapılmış tek bir parça metal parçaların tamamının yerini alabilir. Bir makinedeki veya yapıdaki parça sayısının azaltılması zaman kazandırır ve ürünün ömrü boyunca gereken bakımı azaltır.

Boyutsal Stabilité: Kompozitler, sıcak veya soğuk, ıslak veya kuru olduklarında şekillerini ve boyutlarını korurlar. Örneğin uçak kanatlarında kullanılırlar, böylece uçağın yükseklik kazanması ya da kaybetmesiyle kanat şekli ve büyüklüğü değişmez.

Radar Şeffaflığı: Radar sinyalleri, kompozitlerin içinden geçer; bu, kompozitleri, ister yerde ister havada olsun, radar ekipmanının çalıştığı her yerde kullanım için ideal malzemeleri yapan ideal bir özellik haline getirir. Birleşik Hava Kuvvetleri'nin B-2 gizli bombardıman uçağı (Northrop Grumman B-2 Spirit) gibi gizli uçaklarda, radarın neredeyse görünmez olduğu kompozitler rol oynar.

Dayanıklılık: Kompozitlerden yapılan yapılar uzun ömürlüdür ve az bakım gerektirir. Kompozit ömrünün ne kadar sürdüğünü bilmiyoruz, çünkü birçok orijinal kompozitin ömrünün sonuna gelmedik. Birçok kompozit yarım yüzyıldır hizmettedir.

1.5.2. Dezavantajları

Delaminasyon (kompoziti oluşturan tabakaların birbirinden ayrılması): Kompozitler genellikle farklı kat katmanlarından bir laminant yapıya kurulduğundan, daha zayıf oldukları katmanlar arasında “katmanları azaltabilir”. Özellikle üretim esnasında tabakalar arasında meydana gelebilecek muhtemel hava boşlukları, içerisindeki nem sebebiyle yıllar boyunca donma-çözme döngüleri nedeniyle yapıda delamine hasarı oluşturabilmektedir.

Yüksek Maliyet: Nispeten yeni bir materyaldir ve bu nedenle yüksek bir maliyeti vardır.

Karmaşık Üretim: Üretimi genellikle emeği yoğun ve karmaşık bir süreçtir, bu da maliyeti artırır.

Hasar muayenesi: Kompozitlerde delaminasyon ve çatlaklar çoğunlukla içseldir ve üç boyutlu hale gelebilmektedir. Bu nedenle tespit için karmaşık denetim teknikleri gerektirir.

Kompozite metal eklenmesi: Metaller, kompozitlere kıyasla sıcaklıktaki değişimler üzerinde daha fazla genişler ve büzülür. Bu durumda dengesizliğe ve arızaya neden olabilir.

Birkaç dezavantajı engelleyen kompozit malzemeler, uçak için neredeyse mükemmel bir malzemedir ve yapısal gereksinimlerin çoğunu yerine getirir. Kompozit malzeme hasar kontrolünde daha fazla araştırma yapılmasıyla mevcut problemler de kontrol edilebilir [33].

1.6. Uçakların Seyir Esnasında veya Bakım ve Onarım Esnasında Maruz Kalabileceği Darbeler

Uçaklar seyir sırasında ve bakım-onarım süreçlerinde farklı türde darbelerle maruz kalabilir. Bu darbeler uçağın yapısal bütünlüğünü, sistemlerini ve operasyonel güvenliğini etkileyebilir. Bunlar:

1.6.1. Seyir sırasında maruz kalınan darbeler

1.6.1.a. Kuş çarpması

Özellikle kalkış ve iniş sırasında meydana gelir. Burun konisi, kanatlar, motorlar ve kokpit camı en sık etkilenen bölgelerdir. Kuş çarpmaları motor arızasına neden olabilir.

1.6.1.b. Yıldırım çarpması

Seyir sırasında yüksek irtifalarda meydana gelebilir. Elektriksel sistemlere zarar verebilir, ancak uçaklar yıldırıma karşı koruyucu sistemlerle donatılmıştır.

1.6.1.c. Dolu ve şiddetli hava koşulları

Dolu taneleri burun, kanatlar ve kokpit camlarına zarar verebilir. Şiddetli türbülans, yapısal zorlanmaya neden olabilir.

1.6.1.d. Yabancı cisim hasarı (FOD - Foreign Object Damage)

Pistlerdeki taş, metal veya diğer enkaz parçalarının motor veya iniş takımlarıyla teması sonucu oluşur. Özellikle kalkış sırasında tehlikelidir.

1.6.1.e. Diğer uçaklarla yakın geçiş veya çarpışma

Hatalı manevralar veya iletişim sorunları sonucunda oluşabilir. Havada çarpışma riski düşüktür ancak ciddi sonuçlara yol açar.

1.6.2. Bakım ve onarım sürecinde maruz kalınan darbeler

1.6.2.a. Araç ve ekipman çarpması

Havaalanı yer hizmet araçları veya bakım ekipmanlarının uçağa çarpması sonucu hasar oluşabilir. Kanatlar, gövde veya iniş takımları bu tür kazalardan etkilenebilir.

1.6.2.b. İnsan hatası kaynaklı zararlar

Yetersiz eğitilmiş veya dikkatsiz personelin uçağın yüzeyine veya ekipmanlarına zarar vermesi mümkündür. Örneğin, yakıt dolumu sırasında hortumun gövdeye çarpması.

1.6.2.c. Bakım sırasında aşırı kuvvet uygulanması

Vidaların fazla sıkılması, komponentlerin hatalı montajı gibi hatalar yapısal stres yaratabilir.

1.6.2.d. Pist veya hangar kazaları

Uçak park ederken veya hareket ettirilirken diğer uçaklarla veya sabit yapılarla temas sonucu hasar alabilir.

Hava taşıtları bakım/onarım ve periyodik kontroller esnasında veya seyir halindeyken birçok sebepten dolayı darbelere maruz kalabilirler. Darbe yükleri uçak

yapısında çeşitli hatalara neden olurlar. Bazen yükler yüzeyde veya yüzey altında küçük hatalar oluştururlar. Diğer taraftan yüksek enerjili darbe yükleri yapıyı kırabilir. Yabancı cisim ve kuş çarpması yağmur, dolu darbe yüklerine örnek olarak verilebilir. Bakım çalışmaları sırasında, alet düşmesinin darbe etkisi bile mümkündür [49].

Motor kaportası, radom kısmı veya hücum kenarı gibi uçak yapılarına düşük hızlı bir darbeden (kuş çarpması, alet düşmesi, pist enkazı vb.) kaynaklanan potansiyel tehlikeler, uçak endüstrisi için uzun vadeli bir endişe kaynağı oluşturduğunu, açıkta kalan uçak bileşenlerinin, kritik hasara uğramadan düşük hızlı darbelere dayanma kapasitelerinin kanıtlanması için test edilmesini şart koşuyor [29].

1.7. Darbe Testleri

Darbe testleri malzeme ya da parçaların belirlenen bir yük altında ve değişken sıcaklıklarda kırılma davranışları ile ilgili bilgi veren kısa süreli uygulamalardır. Bu testleri; düşük, orta ve yüksek hızlı darbe testleri olarak sınıflandırılabiliriz. Ayrıca genel olarak test sistemlerini prensipte sarkaç, darbe ve düşürme test cihazları olarak üç gruba ayırabiliriz. En yaygın olarak kullanılan Izod, Charpy, Split Hopkinson ve Drop Tower (Ağırlık Düşürme) testleridir. Prensip olarak numunenin üzerine belli bir ağırlığa sahip parça düşürme esasına göre çalışır. Test sonucuna göre de numunedeki hasar durumları incelenir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Bu testte malzemelerin darbe dirençleri belirlenebildiği gibi, çarpma anından darbenin enerjisinin sönmüldüğü zamana kadar geçen sürede sayısal ortamda verileri kayıt altına alarak grafiksel sonuçla elde edilebilmektedir [2]. Testler arasında sayılan ağırlık düşürme testi havacılık kompozitlerinin test edilmesinde daha fazla yarar sağlamaktadır. Bu test ile malzeme üzerinde zamana göre oluşan kuvvet değişimleri, oluşan kuvvet ile üst yüzey ve iç yapının deplasman değişimleri, kuvvet ve deplasman ile alakalı olarak değişen enerji sönmüleme durumu ve zamana göre şekil değişikliği ile incelenebilen elastiklik durumu hakkında çıkarımlar yapılabilmektedir.

1.8. Kompozit Malzemelerde Oluşabilecek Hasarlar

Kompozit malzemeler kullanım yerlerine bağlı olarak çeşitli darbelere maruz kalabilirler. Darbe nedeniyle malzemede oluşan hasar artan darbe enerjisine bağlı olarak artmaktadır. Elyafların kırılması ve sıyrılması, matris çatlağı, elyaf matris arayüzey

hasarı, delinme ve delaminasyon genel olarak darbe sonrası kompozit malzemede oluşan hasar türleridir [50].

Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından ani veya tekrarlı olarak darbeye maruz kalabilirler. Darbe şiddetleri farklı enerjilerde meydana gelebilir. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir ve boyut olarak ilerleyebilir ve sayıca çoğalabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların yaptığı darbe verilebilir. Taksi yapma esnasında diğer taşıtlar ve platformlar ile çarpışmalar da örnek gösterilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar gövde üzerine düşürülebilir. Hareketli merdivenler kanatlara ya da gövde alt kısımlarına çarpılabilir. Bu durumlarda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit yapılarda darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkidir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder [51].

1.9. Kuş Çarpması

Kompozit yapılar, yabancı cisim hasarları nedeniyle oldukça mütevazı darbe enerjisi seviyelerinde bile hasara uğramaya çok eğilimlidir [52]. Kompozit malzemeler, hafiflik ve yüksek dayanım avantajlarıyla modern uçak tasarımlarında yaygın olarak kullanılır. Ancak, bu malzemeler yabancı cisim hasarlarına karşı metalik malzemelere kıyasla daha hassastır. Kompozit yapıların katmanlı doğası, mütevazı seviyedeki darbe enerjilerinde bile lif kırılması, matris çatlaması ve katmanlar arası ayrışma (delaminasyon) gibi hasarlara yol açabilir. Bu hasarlar, yüzeyde görünür izler bırakmasa bile malzemenin mekanik özelliklerini ciddi şekilde zayıflatabilir. Özellikle yabancı cisim hasarı (FOD), kuş çarpması, dolu veya bakım ekipmanlarının çarpması gibi durumlar, kritik bileşenlerin güvenilirliğini tehlikeye atabilir. Uçaklarda kanatlar, burun konisi ve kontrol yüzeyleri gibi kompozit bölgelerin düzenli olarak incelenmesi ve hasar

tespiti büyük önem taşır. Ayrıca, darbeye dayanıklı reçine sistemleri ve koruyucu kaplamalar gibi teknolojilerle kompozit yapıların darbe dayanımı artırılabilir.

Kuş çarpmaları havacılıkta uçuş emniyetini tehdit eden en büyük etkenlerden biridir. Her 2000 uçuşta bir kuş çarpması olayı gerçekleşmektedir. Havacılıkta yabancı cisim hasarlarının %90'ı kuş çarpması sonucu oluşmaktadır. Kuş çarpması durumunda uçağın en kritik kısımları radom (burun), ön cam, motor, hava girişi ve kanat hücum kenarlarıdır. Kuş çarpmaları genellikle uçağın iniş ve kalkış anlarında meydana gelmektedir. Ayrıca küreselleşen dünyada uçuş sayısının artması ve kuşların göç durumları gibi faktörler de bu vakaların artmasında rol oynamaktadır. Kuş çarpmalarının %15'inde uçak ciddi hasar görmektedir. Uçuş emniyeti için uçak parçalarının hasarı en aza indirmek amacıyla belirli bir dayanıklılığa sahip olması gerekmektedir. Kritik parçalar için kriterler havacılık yönetmeliklerinde belirlenmiştir. Bu kriterleri karşılamak için uçak parçalarının uçuştan önce kuş çarpması sertifikasyon testlerini başarıyla tamamlaması gerekmektedir. Fiziksel testlerin maliyeti nedeniyle sertifikasyon testleriyle paralel olarak sayısal simülasyonlara dayalı analizler yapılmaktadır. Bu analizin amacı, doğrulanmış kuş modeliyle uçağa gelen hasarı tahmin etmek, gerektiğinde uçak bileşeni tasarımında ve malzemesinde değişiklikler yapmak ve maliyeti düşürmektir [22].

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ticari/sportif olarak çalışan hava taşıtlarının bakım/onarım ve periyodik kontroller esnasında karşılaşılabilen, bunların yanı sıra seyrüsefer ve iniş kalkış manevraları sırasında meydana gelebilecek çarpışmalara karşı oluşacak hasarlanma durumlarını azaltmak için yapılan bu çalışma daha önce yapılan çalışmalara katkı sağlayacak nitelikte olup özellikle son yıllarda ticari/sportif olarak çalışan hava taşıtlarının giderek gelişmesi kompozit malzemenin kanat ve kanat sistemlerinde kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

2.1. Elyaflı Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Gojny ve ark. (2005), çalışmalarında farklı tipteki nano dolgu maddelerinin değerlendirilmesine, epoksi bazlı nano kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine ve yüzey fonksiyonelleştirmesinin önemine odaklanmışlar. Üretilen nano kompozitler, gelişmiş bir mukavemet, sertlik ve daha da önemlisi, kırılma tokluğunda önemli bir artış (0.5 ağırlıkça amino - fonksiyonelleştirilmiş DWCNT'de % 43) sergilemiştir. Dolgu içeriğinin, değişen dağılılırlığın, en-boy oranının, özgül yüzey alanının ve bir amino-fonksiyonelleştirmenin kompozit özellikleri üzerindeki etkisi tartışılarak ve tanımlanan mikro-mekanik mekanizmalarla ilişkilendirilmiştir. Neticede karbon nanotüplerin, birçok işleve sahip özellikler barındıran yeni nesil malzemelerin geliştirilmesine olanak sağladığını. CNT'lerin kıymetli kimyasal maddelerinden bir tanesi olduğunu. Epoksiler ve polimerlerin modifikasyon işlemleri için geleneksel elyaf takviyelerle kombinasyonu ilerde çok önemli olacağı kanısına varılmıştır.

Işık (2008), yapmış olduğu çalışmada, karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyafın özellikleri, birbirine göre üstün ve zayıf yönleri araştırmıştır. Ayrıca numune parçasının ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek farklı tabaka durumunda ve farklı diziliş durumunda yük altında eğilme ve eğilmeli burulma analizlerini yapmışlar. Çalışmada, uçuş kontrol yüzeylerinde kullanılan bir destek elemanı ön kurlmeli akış masası yöntemi kullanılarak üretilmiş. Deney kısmında ise üretilen numunenin ANSYS modelindeki yapının ankastre olması sağlanmış ve üzerine yük uygulanarak gerilme ve gerilmeler incelenmiş. Halpin-Tsai formülleriyle hesaplanan malzeme özelliklerinin imal edilen parçanın gerçek elastisite katsayısından

daha yüksek tahmin edilmiş, elyaf oryantasyonu analizdeki sonuç ile imal edilen deney numunesi arasında şekil kaynaklı sapmalar meydana gelmiştir.

Mathivanan ve Jerald (2010), çalışmalarında, dokunmuş cam elyaf epoksi matrisli kompozit laminatların düşük hızlı darbe davranışını darbe test makinesi kullanılarak ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmişler. Darbe testleri, farklı darbe hızlarına maruz kalan kalınlık aralıkları için laminatta gözlenen hasarın türünü ve kapsamını karakterize etmek için gerçekleştirmişler. Darbeye maruz kalan numunelerin kalan girintilerinin korelasyonu, hasarın kapsamı için bir ölçüt sağlamış. Darbe enerjisi arttıkça, laminatın merkezinden kenarına doğru bir çatlak oluşması veya darbe bölgesinde lokalize bir çukurdan oluşan önemli hasarlar oluşması gibi hasarlardan birisinin meydana geldiği belirtilmiştir. Kalınlığı farklı epoksi ve matris katmanlı üç farklı cam elyaf plakaya ağırlık testi yapılmış. Bunun sonucunda geri tepme, durma ve delme gibi durumların meydana geldiği tespit edilmiştir.

Ağır (2012), cam elyaftan üretilen kompozit plakaların darbe davranışlarını incelemiştir. Takviye malzemesi olarak 2-3-4 eksenli ve keçeli olmak üzere dört farklı kumaş, matriks malzemesi olarak ise epoksi ve polyester reçineler kullanmıştır. Hasar başlama ve delinme hasar arasında farklı darbe enerjileri uygulanmıştır. Numunelerin hasar analizleri; kuvvet- yer değiştirme eğrileri, enerji-profil diyagramı ve darbe bölgesi hasar görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Polyester matriks kullanılan iki-eksenli, üç-eksenli ve dört-eksenli kompozit yapıda 50 J enerjiye kadar emilen enerji aynı çıkmıştır. 3-eksenli/polyester kompozitin delinme sınır değeri, dört-eksenli olana kıyasla %27, 2-eksenli olana kıyasla ise %22 daha yüksek çıkmıştır. Epoksi reçineli kompozit numunelerde ise; 4-eksenli kompozit yapının enerji aktarımı değerleri 2-eksenli kompozite kıyasla %74 daha fazla çıkmış, delinme sınır değeri ise %14 artmıştır. Polyester ve epoksi matrikslerinin hasar modları ve darbe karakteristikleri bakımından çok farklı sonuçlar vermediği tespit edilmiştir.

Soliman ve ark. (2012), fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (MWCNT) ile takviye edilmiş ince karbon dokuma kumaş kompozitlerinin düşük hızlı darbe tepkisini incelemiştirlerdir. Ağırlığına göre %0,5, %1,0 ve %1,5 olmak üzere üç MWCNT yüklemesi karşılaştırılmıştır. Kompozit plakalar beş enerji seviyesine tabi tutulmuş; 15, 24, 30, 60 ve 120 J. Kuvvet, deplasman, çarpma hızı ve enerjinin zaman geçişi tepkisi ölçülmüş ve raporlamasını, ayrıca, her enerji seviyesiyle ilişkili kompozit hasar, farklı MWCNT yüklemeleri arasında niceliksel olarak belirlenmiş ve karşılaştırılmışlardır. Fonksiyonelleştirilmiş CNT'lerin karbon elyaf kompozitin darbe tepkisini iyileştirdiği

ve hasarı sınırladığı görülmüştür. %1.5 MWCNT eklenmesi, enerji emiliminde %50 artışla sonuçlanmıştır.

Tarfaoui ve ark. (2016), karbon nanotüp katkısının tekstil esaslı kompozitlerin elastik davranışları üzerine etkisini araştırmışlar. Karbon elyaf kumaş, epoksi matris ve karbon nanotüpler olmak üzere üç ayrı malzeme ile çalışma yapılmıştır. CNT'lerin farklı hacim kesirleri kullanılmıştır (% 0, % 0,5, % 1, % 2 ve % 4). Açık delik gerilimi, kesme kirişi testi ve düz gerilim testleri gibi bir dizi mekanik test gerçekleştirmişler. Kompozit numunelerde hasar başlangıcı ve çatlak yayılmasını kontrol etmişler. Deneysel sonuçlar, kompozitin mekanik performansında % 2'ye kadar CNT katkı maddesinin arttığını göstermiştir. Ancak, bu değer in ötesinde, malzeme mukavemetinde önemli bir azalma görüldüğünü tespit etmişlerdir.

Taşyürek ve Tarakçıoğlu (2017), yapmış oldukları çalışmada filaman sarım kompozit borular ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile takviye edilmiş matris malzemedden üretilen cam elyaf-epoksi matrisli kompozit borular ile çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile takviye edilmiş matris malzemedden üretilen nanokompozit filaman sarım boruların yorulma ömrünü, iç basınç etkisi altında deneysel olarak incelemişler. Karbon nanotüpler ile takviye edilmiş cam elyaf takviyeli plastik (GRP) boruları, açık uçlu test koşullarında test etmişler. Tüm deneyler sırasında, takviyeli karbon nanotüplerin yorulma ömrü etkisini incelemişler. Referans malzeme olarak takviyesiz cam, % 0.5 ve % 1 olmak üzere iki farklı oranda nano takviyeli malzeme ilavesiyle saf CTP numune ile karşılaştırmışlar. Numunelerin yorulma testleri ASTM D-2992'ye uygun olarak gerçekleştirilmiş. Daha sonra, karbon nanotüpler-CTP borular ile takviye edilmiş malzeme özelliklerinin belirlenmesiyle elde edilen sonuçları değerlendirilmişler. Bu çalışmanın sonucunda, MWCNT takviyesinin CTP tüplerin yorulma ömrünü arttırdığını bulmuşlar. MWCNT'lerin mekanik kilitlenmesi yoluyla lamineler arası kırılma mukavemetini geliştirdiği sonucuna varılmış, MWCNT kullanımı için kritik değerin % 0.5 ile % 1 arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Nomer (2019), yapmış olduğu çalışmada, karbon elyaf ve epoksiden imal edilen boru numunelerin ve nanopartikül takviye edilmiş karbon elyaf/epoksi boru numunelerin, tekrarlı darbe tepkilerini ve oluşan hasar mekanizmalarını incelemiştir. Yapılan deneysel sonuçlar ve oluşturulan grafikleri yorumlayarak, darbenin tekrar etmesi esnasında, nanopartikül takviyesinin malzemede iyileştirdiği özellikleri oluşan hasarın incelemeleri ile belirlemiştir. Sonuçlara göre; nanopartikül katılmış numunelerin tekrarlı darbe durumunda beklenenin altında hasar oluşturarak ana yapıya olumlu

katkıda bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca nanopartikül katkı numunelerde yer değiştirme (çökme) değişimlerinin böylece hasar miktarının azaldığı saptanmıştır.

Belevi ve ark. (2021), yapmış oldukları çalışmada, darbe testi sıcaklığının ve levha malzemesinin, kompozit levhaların darbe sonrası basma mukavemetine etkisi üzerine çalışmışlar. Deneylerde mukayese için 3 tabakalı cam elyaf/epoksi, karbon elyaf/epoksi ve aramid elyaf/epoksi plakalar hazırlanmıştır. Bu kompozit numuneler -20 °C, 20 °C ve 60 °C olmak üzere farklı sıcaklıklarda 50 J sabit darbe enerjisine maruz bırakılmış daha sonra ise sıkıştırma testleri uygulanmıştır. Testler ASTM D7137 standardına göre hazırlanan Boeing test aparatı ve yük hücresi ile yürütülmüştür. Kuvvet verileri kullanarak kuvvet-deplasman eğrisi oluşturulmuş ve numunelerin taşıyabileceği azami kuvvet değeri elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre, sıcaklık değişimleri tüm numunelerde darbe sonrası basma davranışını etkilemiştir. Levha malzemesinin de hasarın büyüklüğünde etkili olduğu görülmüştür.

Karaoğlu (2022), yapmış olduğu çalışmada karbon elyaf dokuma / epoksi kompozitlere ağırlıkça % 1 ve % 3 oranında karbon nanotüp (CNT) ve nanokil takviye ederek düşük hızlı darbe tepkileri araştırmıştır. ASTM D7136 M-12 standartlarına göre 5, 10 ve 15 J olmak üzere üç farklı enerji seviyesinde deneyler yürütülmüştür. Kuvvet, emilen enerji, yer değiştirme ve sekme enerjisini hesaplamıştır. Sonuç olarak karbon nanotüp ve nanokil takviyesinin saf karbon elyaf numunelerin darbe tepkilerini iyileştirdiği tespit etmiştir.

2.2. Hibrit Elyaf Kompozitler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Katia ve ark. (2020), yapmış oldukları çalışmada hibritleşmenin kompozitlerdeki darbe ve kalıntı mukavemet üzerindeki etkisini ve darbelerin neden olduğu hasar türlerini analiz etmek ve test numunelerinin delaminasyon alanını ölçmeye çalışmışlar. Biri çift yönlü cam elyaf dokumalı, diğeri ise cam elyafın dış katmanlarını ve orta katmanını değiştiren üç katmanlı çift yönlü aramid elyaftan oluşan bir hibrit olmak üzere iki adet 11 katmanlı kompozit laminat geliştirmişler. Malzemeler, hibrit laminatın 76 J'lük bir darbeye dayandığında daha büyük darbe mukavemeti elde ettiğini, ancak hasarlı alanda 64 - 85 cm² arasında bir artış olduğunu ve bunun neredeyse tüm test numunesi boyunca mekanik özelliklerde bir düşüşe neden olduğunu ortaya koymuştur. Bu, çarpma cihazının kenarından 35 mm'lik bir mesafe için mekanik özelliklerinin % 80'inden fazlasını geri kazanan cam elyaf laminantlarda meydana gelen ile çelişmekte

olduğu, dahası kalıntı mukavemetteki değişimin bir denklemlle gösterilebileceğini ve hasar alanı ile cam elyaf malzemenin kalıntı özellikleri arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Esendemir ve ark. (2021), yapmış oldukları çalışmada cam elyaf/aramid elyaf-epoksi hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini ve darbe davranışını incelemişler. Aramid elyaf olarak kevlar kullanılmış, ayrıca fonksiyonellendirilmiş nanokil takviyesinin etkisini araştırmışlar. Saf epoksi matrikse karşılaştırma olarak %1 ve %3 oranlarında fonksiyonellendirilmiş nanokil katılarak el yatırma yöntemiyle tabakalı kompozitler imal edilmiş. Kompozit numunelerin mekanik mukavemetleri ve 30J enerjideki darbe davranışları değerlendirilmiş. Kuvvet, deplasman, enerji, hız ve zaman verileri kullanılarak saf ve nanokil takviyeli numuneler arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlara göre % 1 oranında nanokil takviyeli kompozit malzemenin hem mekanik özellikler açısından hem de darbe direnci açısından en iyi bir performansı verdiği tespit edilmiş. Kilin matriks-elyaf ara yüzeyinde iyi dağılması sonucu deplasman değerleri % 10 azalmış ve yük taşıma kapasitesini % 22 oranında arttırdığını tespit etmişler.

Hasılıcı (2022), yapmış olduğu çalışmada, kuş çarpması durumundaki kompozit malzemenin genel deformasyonunu elde edebilmek için veri üretimi ve tam bağlantılı sinir ağlarından (FCNNs) yararlanan hibrit bir metodoloji geliştirmiş. FCNN kullanılması yoluyla, tabakalı kompozitlerin genel hasar durumunun dikkate değer olarak tahmin edilebileceğini ve kuş çarpması durumunun sonlu elemanlar analizine kıyasla tabakalı kompozit yapının ön tasarımının çok hızlı gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Çalışmada kuş çarpmasına etkisi altındaki kompozit malzemenin performansını; laminat oryantasyon yüzdesi, istifleme sırası, katların orta düzleme göre konumu, toplam kat sayısı ve kuşun hızının çok önemli olduğu ve bunlardan etkilendiğini bulmuştur.

Zhang ve Zhou (2022), kompozit sandviç kavisli plakaların kuş darbesi direncini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ve düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiğini kullanarak çalışmasında kompozitin kuş etkisine karşı güçlendirilmesi için kafes malzemesi, köpük ve kafes-köpük hibrit çekirdekler kullanmış. Farklı panel konfigürasyonlarının ve çekirdek yapılarının darbe tepkisi üzerindeki etkileri dikkate alınmış. Sonuç olarak kafes çekirdekli sandviç yapının, esas yapının küçük deformasyonuna yansıyan kompozit malzemelerin darbe direncini artırabildiğini, bunun da kuşun çarpma kuvvetini önemli ölçüde azaltabildiğini ve kuşun kalan kinetik

enerjisini azaltabildiğini göstermiştir. Kafes malzemeli sandviç plakaya tahsis edilen daha ince bir ön yüz tabakası, darbeye ve deformasyona karşı diğer iki sandviç tipine göre daha iyi direnç sağlayacağı ayrıca, daha kalın bir ön yüz tabakası, kompozit panelin kuş çarpmasından kaynaklanan hasarlarına daha iyi direnç gösterebileceği sonucuna varmıştır.

2.3. Uçak Yapılarında Bal Peteği/Sandviç Yapı Tahribatlı Testler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Aslan ve Karakuzu (2007), yapmış oldukları çalışmada elyaf takviyeli ve tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe testi sonrasındaki dinamik davranışını değerlendirmişler. Değerlendirmede nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerlerini karşılaştırmışlar. Darbeye uğrayan kompozitlerde darbe hızının, vurucu kütlenin, numune boyutlarının önemi araştırmışlar. Darbe testleri 1, 2 ve 3 m/s'lik hızlarda, 135-2600 g vurucu kütlelerinde, karşılıklı iki tarafı ankastre ve diğer iki tarafı serbest olan farklı ebatlarda hazırlanan plakalarda yürütülmüş. Deneylerde 8 tabakalı (0°/0°/90°/90°) elyaf oryantasyonu ve 4.8 mm kalınlığında üretilen cam elyaf/epoksi tabakalı kompozit plakalar kullanılmış. Zamana göre değişen 3D IMPACT programı yardımıyla dinamik sonlu eleman analizi ile nümerik değerlendirme de yapılmış. Kompozit plaka ve vurucu uç arasındaki kuvvet, plakanın azami deplasman değeri, darbe sırasında oluşan gerilmeler ve birim gerilmeler zamanın bağılı olarak elde edilmiş ve numunelerdeki delaminasyon hasarı belirlenmiştir. Darbe zamanı ve darbe kütlesinin birlikte arttığı, kütlenin değişimi ile oluşan kuvvet zaman eğrileri farklı çıktığı, üç plağa bakıldığında 100 x 150 mm'lik plakta darbe kuvveti açısından en büyük değerler bulunmuştur. Delaminasyon hasarı en yüksek yine 100 x 150 mm'lik plakta oluşmuştur. Delaminasyon hasarı en büyük olan tabaka kompozit plakta alt bölgede ve elyaf takviye açılarının değişkenlik gösterdiği iki tabaka arasında olduğu tespit edilmiştir.

Vignjevic ve ark. (2019), oluklu ve boru şeklinde çekirdek takviyeli kompozit sandviç panellerin yumuşak gövde darbe performansını araştırmışlar. Paneller, kuş çarpması testlerinde kullanıldığı gibi yumuşak jelatin mermiyle yüksek hızda darbeye maruz bırakılmış. Panel performansı ayrıca sonlu elemanlar ve SPH özelliğine sahip doğrusal olmayan geçici analiz yazılımı LS-DYNA ile analiz edilmiş. Oluklu takviyeli panel, darbe alan yüzey tabakası, köpük çekirdek ve oluklu takviyeyle sınırlı hasarla iyi bir darbe direnci göstermiş. Aynı kalınlıktaki boru takviyeli panel, 115 m/s'lik aynı

çarpma hızında herhangi bir hasara uğramazken, 235 m/s'lik daha yüksek bir çarpma hızında hasar görmüş. Sayısal çalışmalar deneysel verilerin anlaşılmasına yardımcı olarak ve güçlendirilmiş sandviç panellerin darbe performansının karşılaştırmalı bir geleneksel sandviç panellerle karşılaştırılmasına olanak sağlamış. Önerilen güçlendirilmiş sandviç paneller, tek yönde istenen artırılmış mukavemet ve sertlik ile geleneksel sandviç panellere kıyasla gelişmiş darbe direnci göstermiş ve dolayısıyla bu özelliklerin istendiği havacılık yapılarında uygulama potansiyeline sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Karataş (2020), yapmış olduğu çalışmada 3D yazıcı kullanarak üretilen bal peteği sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarını araştırmış. Sandviç yapının hücresel çekirdek kısmı bal peteği geometrisinde olup bu yapıları düşük hızlı darbe testine maruz bırakarak enerjiyi sönmülemeye karşı tepkileri deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sandviç kompozit yapıların çekirdek kısmı ABS ve PLA'dan oluşan termoplastik malzeme, alt üst kapak kısmı ise cam elyaf/polyester karışımından oluşturulmuş. Bu sandviç kompozit yapıların çekirdek kısmı üretilirken üç boyutlu yazıcı kullanılmış. 2 farklı hücre yüksekliği ve 3 farklı hücre boyutlarına sahip sandviç kompozit numuneleri 3 farklı enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testine maruz bırakarak fiziksel ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Sandviç kompozit yapıdaki numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrasında Solidworks'te modellenerek Ansys Workbench paket programında sayısal analizlerini yapmış. Numunelerin deneysel ve sayısal sonucunda PLA malzemesinin aynı hücre yüksekliğine sahip bal peteği yapılarda hücre boyutu azaldıkça malzemenin darbeye karşı ve enerjiyi sönmüleme kabiliyetinin arttığını gözlemlemiştir.

Erdoğan (2020), yapmış olduğu çalışmada, polipropilen bal peteği ve polistiren köpükten imal ettikleri çekirdekli ve T6 ısıl işlemlili 6061 alüminyum alaşım yüzey plakalı sandviç panellere düşük hızlı darbe uygulayarak darbe tepkilerini incelemiştir ve temas kuvveti ile enerji değişimleri sonucunda delinme dirençlerini irdelemiştir. Deneylerde hasar bölgeleri incelenerek, numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetlerini ortaya çıkarılmış. Sonuç olarak üst yüzey plakası kalınlığının darbe davranışını doğrudan etkileyen baskın bir parametre olduğunu bildirmiştir. Yüzey plakasının rijitliğini kaybetmesinin çekirdeğin davranışı değiştirdiğini, polistiren köpüğün darbe hasarını önlemede daha baskın olduğunu, rijitliğin artmasının ise polipropilen bal peteğinin hasarı önlemede daha baskın olduğunu ortaya koymuştur.

2.4. Düşük Hızlı Darbe İle İlgili Çalışmalar

Potoğlu (2012), yapmış olduğu çalışmada, E-camı/epoksi kaplamalı PVC ve PET köpüğü çekirdek sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe test davranışlarını incelemiştir. Deneylerdeki sandviç kompozit plakaları vakum infüzyon kalıplama yöntemi ile üretmiştir. Deneylerde kuvvet, deplasman, emilen enerji, zaman, hız parametreleri değiştirilerek köpük ve katman sayısı karşılaştırmıştır. Ayrıca, emilen enerji, azami kuvvet, azami deplasman ve toplam temas süresi gibi darbe parametreleri elde edilerek yorumlanarak hasar modları incelemiştir. Darbe testi sonucu oluşan hasarların çekirdek hücresi ezilmesi, elyaflarda delaminasyon ve kırılmalar ayrıca alt kabuk ve çekirdek arasında ayılma olduğu görülmüştür. PET köpüğünün basma dayanımı daha iyi çıkmış ve daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Katman sayısı arttıkça darbe dayanımı da artmıştır.

Kara (2012), yapmış olduğu çalışmada cam elyaf takviyeli plastik malzemeyi filaman sarım metoduyla ($\pm 55^\circ$)₃ sarım açısı ile üretmiştir. E-camı/epoksi kompozit borularını ANSI/AWWA C950 standardına göre 32 bar basınç altında iken 5, 10 ve 15 J olmak üzere üç değişik enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulamış. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda temas kuvveti-zaman, kuvvet-yer değiştirme, enerji-zaman değişimleri elde edilmiş ve numunede oluşan hasar bölgelerini incelemiştir. 2, 4 ve 6 kat yama yapılarak yamasız borulara göre statik patlama basıncına etkileri incelenmiş. Yamanın borular üzerindeki statik basınca olumlu yönde katkı sağladığı ve yama kat sayısı arttıkça statik iç basınç patlama hasar gelişiminin iyileşme gösterdiği özellikle 6 kat yamanın tüm numuneler üzerinde etkili ve yararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Temel (2015), farklı genişliğe sahip melez kompozit levhalar üretmiş ve bunlara düşük hızlı darbe testi uygulayarak levhaların dinamik cevabı ve hasar davranışlarını incelemiştir. Levhalar cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksi tabakalarından oluşturulmuştur. Deney parametreleri farklı darbe hızlarında, sınır şartlarında, konfigürasyonlarda ve numune genişliklerinde gerçekleştirmiştir. Cam ve karbon elyaf/epoksi tabakalarında kalıcı hasarlar oluşmuştur. Numuneler genişledikçe delaminasyon hasarlarından malzemede eğilme rijitliği azalmıştır.

Jasım (2021), yapmış olduğu çalışmada alüminyum plakalarla güçlendirilmiş alüminyum köpük çekirdekli sandviç yapıların düşük hızlı darbe tepkilerini araştırmıştır. Çalışmada Al-köpük çekirdek yoğunluğu ve darbe enerjisi etkilerini

incelenmiştir. Deneyleerde kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafikleri elde edilerek çarpma yüzeylerindeki ve kesitlerdeki kalıcı hasarların durumu incelenmiştir. Darbe enerjisi artınca, temas süreleri azalmış, tepe temas kuvvetleri ve kalıcı deformasyon artmıştır.

Çelik (2022), yapmış olduğu çalışmada, havacılık, uzay teknolojileri ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeleri incelemiştir. Bu amaçla çerçeve destekli kompozit plakaların düşük darbe hızların araştırmış ve mekanik mukavemetini sayısal olarak değerlendirmiştir. Kompozit plakaları 9 ve 25 karesel boşluklu ve 0.1-5 mm cidar kalınlığına sahip çerçeveler tasarlamıştır. Çerçeve içlerine konulan kompozitler 12 tabakalı ve [0,45,45,90]₃ sarım açılıdır. Çerçeve, zırh çeliğinden, kompozit ise cam elyaf/epoksi dokumadan imal edilmiştir. Numuneler 10 J enerji altında düşük hızlı darbeye maruz bırakılmış ve ANSYS programı ile analiz edilmiştir. Sonuçta, şekil ve cidar kalınlığına göre düşük hızlı darbe enerji emme ve hasarlanma durumları incelenmiş, cidar kalınlığının artmasının kompozit numune üzerindeki enerji emme oranını azalttığını vurgulamıştır.

Ödemiş (2023), yapmış olduğu çalışmada, iki farklı hücre genişlik ve 10 ve 30 mm hücre yüksekliğindeki ahşap plakalı sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını araştırmıştır. Karşılaştırma için karbon nanotüp/epoksi nanokompozit takviyesi ile mukavemet geliştirme yoluna gitmiş. Bal peteği numunelere laboratuvar ortamında ve oda sıcaklığında 5, 10 ve 15 J olmak üzere üç farklı enerji değerinde ağırlık düşürme test cihazı ile düşük hızlı darbe testi uygulamıştır. Sonuç olarak temas kuvveti - zaman, temas kuvveti - deplasman ve enerji - zaman grafikleri elde edilmiş ve nanokompozit takviyeli yüzey kaplamalı numunelerin hücre yüksekliği ihtiyacı sonucu ortaya çıkan ağırlık problemini büyük ölçüde azalttığını belirtmiştir.

2.5. Kuş Çarpması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Meo ve ark. (2003) motor kaportası veya hücum kenarı gibi uçak yapılarına düşük hızlı bir darbeden (kuş çarpması, alet düşmesi, pist enkazı vb.) kaynaklanan potansiyel tehlikeler, uçak endüstrisi için uzun vadeli bir endişe kaynağı oluşturduğunu, açıkta kalan uçak bileşenlerinin, kritik hasara uğramadan düşük hızlı darbelere dayanma kapasitelerinin kanıtlanması için test edilmesi gerektiğini ve bunun ile ilgili bir sandviç panelin katı, yuvarlak şekilli bir çarpma tertibatından kaynaklanan darbe ve nüfuz hasarı üzerine deneysel ve sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçları açıklama

üzerine bir çalışma yapmış. Doğru bir matematiksel modelin, tasarımcının testler öncesinde düşük hızlı çarpma olayına dahil olan mekanizmayı anlaması ve dolayısıyla darbeye dayanıklı bir uçak yapısı tasarlaması için önemli bilgiler sağlayabileceğini kanıtlamaya çalışmıştır. Bu çalışmanın bir kısmı, kompozit bir uçak sandviç paneline düşük hızlı darbe tepkisinin malzeme modellemesi ve sayısal simülasyonu konusundaki son gelişmelere odaklanmıştır. Düşük hızlı çarpma koşulları altında uçak sandviç yapılarının davranışını incelemek için açık sonlu elemanlar (FE) analiz kodlarının uygulanmasına dayanmaktadır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiş; özellikle sayısal simülasyon, darbe hasarını ve yapı tarafından emilen darbe enerjisini tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır.

Rajoria ve Celili (2004), karbon nanotüp-epoksi kompozitlerinin mukavemet ve sönümlenme özellikleri incelenmiş. Karbon nanotüpler (Tek Duvarlı ve Çok Duvarlı), termal kimyasal buhar biriktirme işlemi kullanılarak paslanmaz çelik alt tabakalar üzerinde büyütülmüş. Daha sonra nanotüp-epoksi kompozitler, büyütülen nanotüpler üzerine bir epoksi tabakası uygulanarak hazırlanmış ve bu tabaka üzerine bir PZT aktüatör yerleştirilmiştir. Çelik, nanotüp-epoksi tabakası ve PZT aktüatörden oluşan kompozit kiriş, nanotüp-epoksi tabakasının mukavemet ve sönümlenme özelliklerindeki artışı belirlemek amacıyla titreşim deneyleri için konsol kiriş olarak kullanılmış. Bu amaçla birkaç farklı numune hazırlanmış. Bu kirişler üzerinde darbe ve frekans tarama testleri yapılarak darbe tepkisi ve frekans tepkisi fonksiyonları elde edilmiştir. Kompozit kirişin doğal frekansını bulmak için darbe tepkisinin Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Epoksi içerisinde çok duvarlı nanotüpler kullanılarak sertlikte artış, tek duvarlı nanotüpler kullanılarak sönümlenme oranında artış olduğunun sonucuna ulaşılmıştır.

Metin (2008), yapmış olduğu çalışmada, düşük hızlı darbeye maruz bırakılmış E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin burkulma davranışını araştırmıştır. Kompozitlerde darbe sonrası oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbenin oluştuğu yüzeyin harici kısımlarda da oluşabilir veya içyapıda tabakalar arası ayrılma şeklinde oluşabilir. Çalışmada $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$ şeklinde düzenlenmiş tek yönlü E-camı/epoksi kompozit üzerine ağırlık düşürme test cihazı ile değişik hızlarda (2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m/s) düşük hızlı darbe uygulanmış. Vurucu uç 17 kg kütleli ve 24 mm çaplı yarı küresel uçlu seçilmiş. Deney numuneleri farklılıklarına göre kuvvet-zaman, kuvvet-deformasyon ve enerji-hasar alanı gibi grafikler yorumlanmıştır. Hasar alanının darbe hızı ile doğru orantılı arttığı, numunenin üzerindeki yapılan işin de darbe hızıyla

orantılı arttığı ve plastik kısmının malzemeyi deforme ettiği anlaşılmış. Hasarların delaminasyon ve elyaf kopması gibi oluştuğu tespit edilmiştir.

Kahvecioğlu (2019), yapmış olduğu çalışmada Gazelle SA341 ve Dauphin AS365 olmak üzere iki farklı şeffaf helikopter kanopisinin değişken bölümlerine farklı hızlarda çarpma uygulamıştır. Hızlar 90 m/s, 100 m/s, 110 m/s olarak seçilmiştir. Deformasyon ve hasarların sonuçları incelenmiştir. Ayrıca LS-DYNA programında inceleme de gerçekleştirilmiştir. Geometri olarak, yarı küresel uçlu silindir seçilmiştir. Ortaya çıkan farklı sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. SA341 helikopteri kanopisinin maksimum deplasman değerleri daha düşük çıkmıştır.

Güngör (2022), çalışma kapsamında ticari uçak gövdelerindeki kompozit sandviç panel yapısının kuş çarpması darbe dayanımını araştırmıştır. Çarpışma modelleme tekniğini belirlemek amacıyla Lagrange, Euler, Arbitrary Lagrangian-Eulerian, Coupled Eulerian-Lagrangian ve Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) teknikleri incelenmiştir. Modelleme tekniğini seçebilmek amacıyla deforme olmayan kübik bir yapının giriş üzerine çarpmasını esas alan fiziksel bir problem tanımlanmıştır. Kuş çarpmasına karşı dayanımını araştırmak ve iyileştirmek amacıyla iki farklı tasarım tipi (3C2H ve 4C3H) modellenmiş ve geleneksel sandviç kompozit panel yapısı (2C1H) modeli ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. 2C1H modelinin hasara karşı diğer iki modele göre daha dayanıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Işıkdogan (2022), yapmış olduğu çalışmada, jet eğitim uçağı dış yakıt tankının kuş çarpması durumunu analiz etmiştir. Kuş çarpmasını geometri, boyut ve yoğunluk bakımından tanımlamış ve SPH metodu ile, iki ucu küre silindirik modeli ile, hız ve kütleyle uygun analiz gerçekleştirmiştir. Analizler, alüminyum 2024-T3 ve alüminyum 7075-T6 malzemelerinde denenmiştir. Numerik analizler ise, deney çarpışma düzeneği geometrik modeli 4lb kuş çarpması simülasyonu için LS_DYNA programında kabuk element şeklinde yapılmıştır. Numerik analizler kullanılarak, maksimum gerilme ve yer değiştirme hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında darbenin enerji emilimi kuş çarpması için yeterli seviyede çıkmıştır. Maksimum yer değiştirme 25 mm ile 62 mm arasında çıkmıştır. Yakıt deposunun dışında delinme meydana gelmemiştir.

Erteği (2022), kuş çarpışmasına maruz kalmış radom kısımlarının tamirat sonrası çarpmaya karşı performansını incelemiştir. Hasarlı katmanın kaldırılması sonrası kompozit yama uygulanmış, aynı büyüklükte bir darbe tekrarlandıktan sonraki performansı deneysel olarak incelenmiştir. Bu sayede uçuş güvenliğinin sağlanabilirliğinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, numuneler üzerine serbest

düşme test düzeneği ile 50 J enerji uygulanmıştır. Sonuç olarak, tamir yönteminin etkinliği darbe bölgesine alınan tekrarlı darbenin hasar alanı baz alınarak değerlendirilmiş ve radom kısmının tamir sonrası düşük hızlı darbelere karşı orijinale yakın performans verdiği tespit edilmiştir.

Ciğercioğlu (2023), yapmış olduğu çalışmada İHA kuş çarpmasının insansız hava aracı üzerindeki etkilerini problemini ele almıştır. İHA kuş çarpması durumunda kanat kalınlığı 4, 8, 12 ve 16 mm olarak çeşitlendirilmiş. Kanat malzeme yapısı olarak iki farklı kompozit malzeme ve iki izotropik malzeme üzerinde çalışmış. Kanat aerofil kesiti olarak NACA-2408 tercih edilmiş. Problem için seçilmiş kuş modeli yarım küre uçlu silindir modelidir. Model hidrodinamik yapıya sahiptir ve 3 farklı hız değeri (33 m/s, 37 m/s, 42 m/s) ANSYS Workbench ile analiz edilmiştir. Çarpışma hızları açısından bakıldığında 16 mm altındaki kalınlık için karbon elyaf kompozitin emniyetli olmadığı tespitinde bulunulmuş. Tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin hasar kriterlerini karşılamadığı anlaşılmış. Karbon elyaf malzemenin daha rijit bir sonuç verdiği anlaşılmış.

2.6. Tez Çalışmasının Amacı

Bu çalışmanın ana amacı ticari/sportif olarak çalışan hava taşıtlarının bakım/onarım ve periyodik kontroller esnasında karşılaşılabilen, havada asılı kalma ve iniş kalkış manevraları sırasında meydana gelebilecek çarpışmalara karşı oluşacak hasarlanma durumlarını azaltmaktır. Bu amaçlar doğrultusunda farklı malzemelerden üretilmiş ve farklı dokuma özelliklerine sahip olan elyaflar kullanılmıştır. Öncelikli olarak çalışmanın temelini oluşturacak bu elyaf ve havacılık matrikslerinden üretilmiş ve değişik gövde/kanat malzeme adayları imal edilmiştir. Mukavemet artışı elde etmeyi ve ağırlık azaltılması da ayrıca muhtemel çarpışmalar sonrasında hangi numune çeşidinin ne kadar hasar alacağı ve hasarın yayılma durumu gibi morfolojik incelemelerin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bunların yanı sıra hava aracı çarpışmalarında sonucu direk olarak etkileyen enerji emme kabiliyetlerinin ve bunun hasar alanını zamana göre nasıl etkileyeceği, hangi tür aday numunenin daha üstün özellikler göstereceğinin belirlenmesi de çalışmanın amaçları arasındadır. Çalışma mukavemet artırmanın yanı sıra tahribat öncesi ve sonrası değiştirme ve yama teknolojisine de ışık tutacaktır. Aynı zamanda yapmış olduğumuz bu çalışmanın neticesinde değişikliğe fırsat vermeyen ve yama ile yenilemeye imkân tanımayan içyapı

kusurlarının tamamen önüne geçilmesi planlanmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre gittikçe kullanımı artan kompozit uçak parçalarının üretim aşamaları ve bakım şartları hakkında bilgi sahibi olunacaktır. Ağırlık/mukavemet oranının iyileştirilmesi ile sonuçlanacak uzun ömürlü, yüksek mukavemetli, yüksek aşınma dirençli, ucuz, kolay ve hızlı tamir/bakım potansiyelinin artırılması amaçlanmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada akrobasi veya tarımsal amaçlarla kullanılabilen ahşap kaplamalı petek numuneler hazırlanmıştır. Tüm numunelerin belirli enerji seviyelerinde düşük hızdaki darbe tepkileri incelenmiştir. Deneyler ASTM D 7136 ve ASTM D7766 test standartlarında açıklanan rutinler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Ticari/sportif olarak çalışan hava taşıtlarının bakım/onarım ve periyodik kontroller esnasında karşılaşılabilen, yanı sıra havada asılı kalma ve iniş kalkış manevraları sırasında meydana gelebilecek çarpışmalara karşı oluşacak hasarlanma durumlarını azaltma amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda farklı malzemelerden üretilmiş ve farklı dokuma özelliklerine sahip olan elyaf kullanılmıştır. Öncelikli olarak çalışmanın temelini oluşturacak bu elyaf ve havacılık matrikslerinden üretilerek değişik gövde/kanat malzeme adaylarının imal edilmesi hedeflenmektedir. Bu hedef aynı zamanda mukavemet artışı elde etmeyi ve ağırlık azaltılmasını da kapsamaktadır. Ayrıca muhtemel çarpışmalar sonrasında hangi numune çeşidinin ne kadar hasar alacağı ve hasarın yayılma durumu gibi morfolojik incelemelerin tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bunların yanı sıra son olarak hava aracı çarpışmalarında sonucu direk olarak etkileyen enerji emme kabiliyetlerinin ve bunun hasar alanını zamana göre nasıl etkileyeceği, hangi tür aday numunenin daha üstün özellikler göstereceğinin belirlenmesi de çalışmanın hedefleri arasındadır.

Tez çalışmamız ticari/sportif farklı nedenlerle yaşanan muhtemel düşük hızlı çarpma olaylarındaki hasar oluşumunu azaltmak veya ortadan kaldırmak için oluşturulmuştur. Bu bağlamda çalışmada farklı parametreler oluşturularak darbe davranışlarının tespit edilerek karşılaştırılması ve optimum alternatif yapının ortaya çıkarılması yapılacaktır. Bunu sağlamak adına tez çalışması birkaç aşamaya ayrılmıştır. Bu aşamalar ekipman temini ve numune oluşturma, testlerin gerçekleştirilmesi, morfolojik karakterizasyon, testler ve sonuçların değerlendirilmesi kısımlarından oluşmaktadır.

Tez parametrelerini numune kat sayısı, vurucu kütle enerjisi (10J - 20J ve 30J) ve kaplama istif durumu oluşturmaktadır. Bunlar arasında numune kalınlığının 20 mm olacak şekilde vurucu kütle enerjisi seviyesinin 3 ve kaplama istif durumu parametresinin 8 seçenek arasından oluşturulan 24 farklı kombinasyonu bulunmaktadır. Toplamda 24 farklı test numunesine ait deney parametre/seviye çizelgesi aşağıda belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney numunelerinin parametre/seviye tablosu

Numune No	Numune kat sayısı	Vurucu kütle enerjisi (J)	İstif durumu
1	3 kat	10	<u>GGG</u>
2	3 kat	30	<u>GGG</u>
3	3 kat	20	<u>GGG</u>
4	3 kat	10	<u>GCG</u>
5	3 kat	30	<u>GCG</u>
6	3 kat	20	<u>GCG</u>
7	3 kat	10	<u>GGC</u>
8	3 kat	30	<u>GGC</u>
9	3 kat	20	<u>GGC</u>
10	3 kat	10	<u>GCC</u>
11	3 kat	30	<u>GCC</u>
12	3 kat	20	<u>GCC</u>
13	3 kat	10	<u>CCC</u>
14	3 kat	30	<u>CCC</u>
15	3 kat	20	<u>CCC</u>
16	3 kat	10	<u>CGC</u>
17	3 kat	30	<u>CGC</u>
18	3 kat	20	<u>CGC</u>

19	3 kat	10	<u>CCG</u>
20	3 kat	30	<u>CCG</u>
21	3 kat	20	<u>CCG</u>
22	3 kat	10	<u>CGG</u>
23	3 kat	30	<u>CGG</u>
24	3 kat	20	<u>CGG</u>

C: Karbon elyaf plain

C: Karbon elyaf twill

G: Cam elyaf plain

G: Cam elyaf twill

GGG: Üç kat cam elyaf

GCG: İçten dışa cam-karbon-cam

GGC: İçten dışa cam-cam-karbon

GCC: İçten dışa cam-karbon-karbon

CCC: Üç kat karbon elyaf

CGC: İçten dışa karbon-cam-karbon

CCG: İçten dışa karbon-karbon-cam

CGG: İçten dışa karbon-cam-cam

3.1. Malzemeler

Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek performans, yüksek mukavemet, hafiflik ve bunlara bağlı olarak yüksek hareket kabiliyeti olanağı sağlaması gibi avantajlarından dolayı günümüzde savunma, havacılık, uzay ve otomotiv sanayinde kullanılan çok önemli bir malzeme konumundadırlar. (Ahmet Kazım Çelik 2022)

Tez çalışmamızda yapmış olduğumuz numuneler için kullanılan ve havacılıkta kullanılması uygun olan kompozit (elyaf kumaş) malzemelerden 4 ayrı seçim yapılmıştır. Bunlar 200 g karbon elyaf kumaş plain dokuma tipinde tenax-E HTA 40 3k ipinden üretilmiş kumaş, 420 g karbon elyaf kumaş twill dokuma tipinde T700 veya karbon elyaf HS 12k 800 tex ipten üretilmiş kumaş, 200 g cam elyaf kumaş plain dokuma tipine sahip ahşap tekne laminasyonu ve cam elyaf takviyeli kumaş ve 390 g cam elyaf kumaş twill dokuma tipinde üretilmiş kumaştır. Seçilen malzemeler havacılık için gerekli teknik ve mekanik özellikler göz önünde bulundurularak satın alınma marifetiyle temin edilmiştir.

3.1.1. Elyaf dokuma kumaşlar

Plain karbon elyaf kumaş dokuma tipli tenax-E HTA 40 3k ipinden üretilmiş kumaştır. 200 g yoğunluğunda olduğundan hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren için idealdir. Twill karbon elyaf kumaş dokuma tipi T700 veya karbon elyaf HS 12k 800 tex ipten üretilmiştir.

Plain cam elyaf kumaş dokuma tipi ahşap yapı laminasyonu ve elyaf takviyeli kompozit numune üretimlerinde kullanılan bir takviye malzemesidir. İleri kompozit imalatlarında epoksi matriks ile uyumlu, kolay emprenye olan bir kumaştır. Twill cam elyaf kumaş dokuma tipi, kalın plakalar ve kalıplar için tercih edilen standart bir malzemedir. Twill dokuma tipi ile kompozit yüzeylere daha kolay uygulanır.

Tüm elyaf kumaşlar havacılık ve otomotiv uygulamalarında kullanılan standart takviye malzemelerdir. Çalışmada kullanılan kumaşların görüntüleri Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Plain karbon elyaf dokuma, twill karbon elyaf dokuma, plain cam elyaf dokuma ve twill cam elyaf dokuma

3.1.2. Kullanılan epoksi ve sertleştiriciler

Tezde kullanılan epoksi reçine ve epoksi reçine sertleştiricileri seçerken havacılıkta kullanılan ve gerekli teknik ve mekanik özellikleri taşımasına dikkat edilerek satın alma marifetiyle temini sağlanmıştır.

Epoksi reçine ileri kompozit parça imalatlarında yaygın olarak kullanılmakta olup özellikle havacılık alanı başta olmak üzere otomotiv, denizcilik, uzay, enerji ve savunma sanayiine uygundur. Havacılık sertifikasına sahip olan MGS L285 sistemi seçilmiş olup bu sistem oda sıcaklığında kürlenmekte ve postkür işlemiyle SHGM standartlarını sağlamaktadır.

İleri kompozit parça imalatlarında Hexion firmasının ürettiği sistem kullanılmıştır. MGS Laminasyon Epoksi Reçine LR285 ile birlikte kullanılabilir oda sıcaklığında kürlenmiş bir sistem seçilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Ağırlık düşürme testi ve standartları

Düşürme kulesi testi olarak da bilinen bu yöntem, çarpışma ve düşme gibi yüksek hızlı darbeler altında bir malzemenin davranışını değerlendirir. Genel olarak test kurulumu bir düşürme kulesi, bir ağırlık veya çarpma tertibatı ve bir numune tutucudan

oluşur. Ağırlık, önceden belirlenmiş bir yükseklikten numuneye düşürülür ve sensörler çarpma sırasında kuvveti, hızı ve enerjiyi kaydeder [56].

Ağırlık düşürme test standartlarına baktığımızda ASTM D7136 kompozitlerde düşen ağırlık darbe olayına karşı hasar direncinin ölçülmesi olarak görülmektedir [57]. Yoğun düzlem dışı darbe kuvvetlerinden kaynaklanan hasara karşı duyarlılık, gelişmiş kompozit laminatlardan yapılmış birçok yapının başlıca tasarım endişelerinden biridir. Lamine kompozit bir plakanın hasar direnci özelliklerinin bilinmesi, ürün geliştirme ve malzeme seçimi için faydalıdır. Bir elyaf takviyeli polimer matris kompozit numunenin düşen ağırlık darbe olayına karşı hasar direncini ölçmek için geliştirilen standart test yöntemi ASTM D7136'dır [58].

3.2.2. Düşme ağırlığı darbe testinin hizmet alanları

1. Yoğun bir düşme ağırlığı darbe kuvvetine veya enerjisine karşı belirli bir kompozit laminatın hasar direnci üzerinde, istifleme sırasının, elyaf yüzey işleminin, elyaf hacim oranındaki değişimlerin ve işleme ve çevresel değişkenlerin etkilerini nicel olarak belirlemek.
2. Değişken içeriklere sahip kompozit malzemelerin hasar direnci parametrelerinin değerlerini karşılaştırmak. Hasar tepki parametreleri, çentik derinliği, hasar boyutları ve kalınlık boyunca konumlar, F_1 , F_{max} , E_1 ve E_{max} ve kuvvet-zaman eğrisini içerebilir.
3. Test yöntemi D7137/D7137M gibi sonraki hasar toleransı testleri için numuneye hasar vermek.
4. Bu test yöntemi kullanılarak elde edilen özellikler, benzer malzemeden yapılmış kompozit yapıların beklenen hasar direnci kabiliyeti, kalınlık, istifleme sırası vb. ile ilgili rehberlik sağlayabilir. Ancak, bir kompozit yapının hasar direncinin geometri, kalınlık, sertlik, kütle, destek koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörlere büyük ölçüde bağlı olduğu anlaşılmalıdır. Bu parametrelerdeki farklılıklar nedeniyle darbe kuvveti/enerjisi ile ortaya çıkan hasar durumu arasındaki ilişkilerde önemli farklılıklar ortaya çıkabilir. Örneğin, bu test yöntemi kullanılarak elde edilen özellikler, düzlem dışı deformasyona direnen alt yapıya tutturulmuş bir deriden çok, sertleştirilmemiş monolitik bir deri veya ağırlık hasar direnci özelliklerini yansıtır. Benzer şekilde, test numunesi özelliklerinin, darbe enerjisinin daha büyük bir oranını elastik deformasyona yönlendirme eğiliminde olan, test numunesinden önemli ölçüde daha büyük bir panelin özelliklerine kıyasla, eşdeğer uzunluk ve genişlik boyutlarına sahip bir panelin

özelliklerine benzer olması beklenir.

5. Standart darbeleri kırıcı geometrisi, kör, yarım küre şeklinde bir vurucu uca sahiptir. Tarihsel olarak, standart laminat konfigürasyonu ve darbe enerjisi için, bu darbeleri kırıcı geometrisi, keskin vurucu uçlar kullanılarak yapılan benzer darbeler için gözlemlenilenle karşılaştırıldığında, belirli miktarda harici hasar için daha büyük miktarda iç hasar üretmiştir. İncelenen hasar direnci özelliklerine bağlı olarak alternatif darbeleri kırıcılar uygun olabilir. Örneğin, keskin vurucu uç geometrilerinin kullanımı, belirli hasar görünürlüğü ve penetrasyon direnci değerlendirmeleri için uygun olabilir.

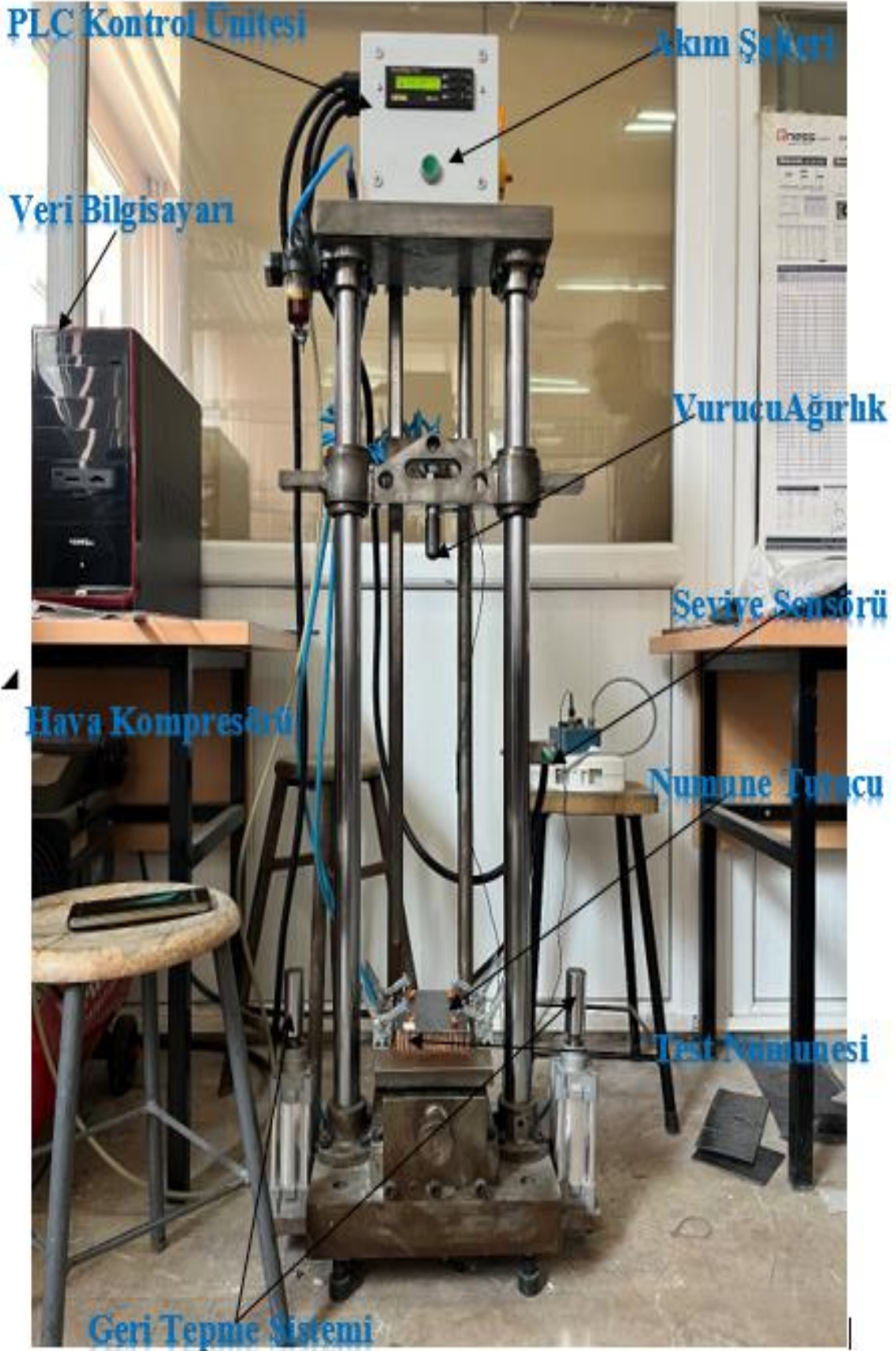
6. Numune kalınlığına göre normalize edilmiş sabit bir darbe enerjisi kullanır. Bazı test kuruluşları, tanımlanmış bir çukur derinliği, hasar geometrisi vb. gibi belirli bir hasar durumu içeren numunelerin basınç kalıntı mukavemetini değerlendirmek için bu test yöntemini D7137/D7137M ile birlikte kullanmak isteyebilir. Bu durumda, test kuruluşu bu test yöntemini kullanarak birkaç numuneyi veya büyük bir paneli çeşitli darbe enerjisi seviyelerinde birden fazla düşük hızlı darbeye tabi tutmalıdır. Daha sonra darbe enerjisi ile istenen hasar parametresi arasında bir ilişki geliştirilebilir. Daha sonra, istenen hasar durumunu üretmesi beklenen bir interpolate edilmiş enerji seviyesinde darbelenen numuneler kullanılarak daha sonraki ağırlık düşürme darbesi ve basınç kalıntı mukavemeti testleri gerçekleştirilebilir.

3.3. Düşük Hızlı Darbe Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Motor kaportası veya hücum kenarı gibi uçak yapılarına düşük hızlı bir darbeden (kuş çarpması, alet düşmesi, pist enkazı vb.) kaynaklanan potansiyel tehlikeler, uçak endüstrisi için uzun vadeli bir endişe kaynağı oluşturduğu, açıkta kalan uçak bileşenlerinin, kritik hasara uğramadan düşük hızlı darbelerle dayanma kapasitelerinin kanıtlanması için test edilmesini şart koşuyor (Meo, Morris, Vignjevic ve Marengo 2003).

Darbe tepkilerini araştırmak için hızı ve yüksekliği ayarlanabilen özel tasarlanmış bilgisayarlı drop tower test standı kullanılmıştır. Bu cihaz, malzemelerin darbe dayanıklılığını ölçmek için kullanılan kritik öneme sahip deneysel araçlardır. Bu cihazlar, belirli bir yükseklikten serbest düşüş yoluyla numunelere darbe uygulayarak malzemelerin enerji emilimi ve kırılma davranışları hakkında bilgi sağlarlar. (Ödemiş 2023)

Test cihazı, serbest bir ağırlığı belirli bir yükseklikten düşürme prensibine göre yani statik enerjinin kinetik enerjiye dönüştürme prensibiyle çalışmaktadır. Cihazda kullanılacak vurucu uç, 24 mm çapında yarı küresel uçlu seçilmiştir. Test numunelerine saplanmaması için sivri uçlardan sakındırılmıştır. Kullanılacak mekanizma bağlantı elemanlarıyla birlikte toplam 6.35 kg kütleye sahip olacaktır. Testler 10J, 20J ve 30 J enerji seviyelerinde yürütülmüştür. Bunu sağlamak için çarpma yükseklik mesafesi ayarlanarak değişiklik yapılmıştır. Sistemde bilgisayara bağlı veri toplama kartına ve yazılımına sahip impuls sinyal şartlandırma birimi kullanılmıştır. Sistemin oluşturduğu kuvvet verileri ASTM D7136 test standardına göre işlenerek deplasman ve enerji emme kabiliyetleri tespit edilmiştir. Sisteme bağlanmış olan bir yakınlık sensörü vurucu ucun önünden geçmesini algılayarak pnömatik pistonları harekete geçirip ve tekrarlı darbe oluşunun önüne geçmiştir. Çarpma esnasında kayma ve geri sekme durumlarının önlenmesi amacıyla numuneler çarpma bölgesine sabitlenmiştir. Kuvvet sensöründen elde edilen veriler zamana karşı kuvvet verileri olduğundan diğer veriler kinematik analiz sonucunda elde edilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan darbe test cihazının ve numune bağlama durumu Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bilgisayar destekli darbe test cihazı ve deney numunesi

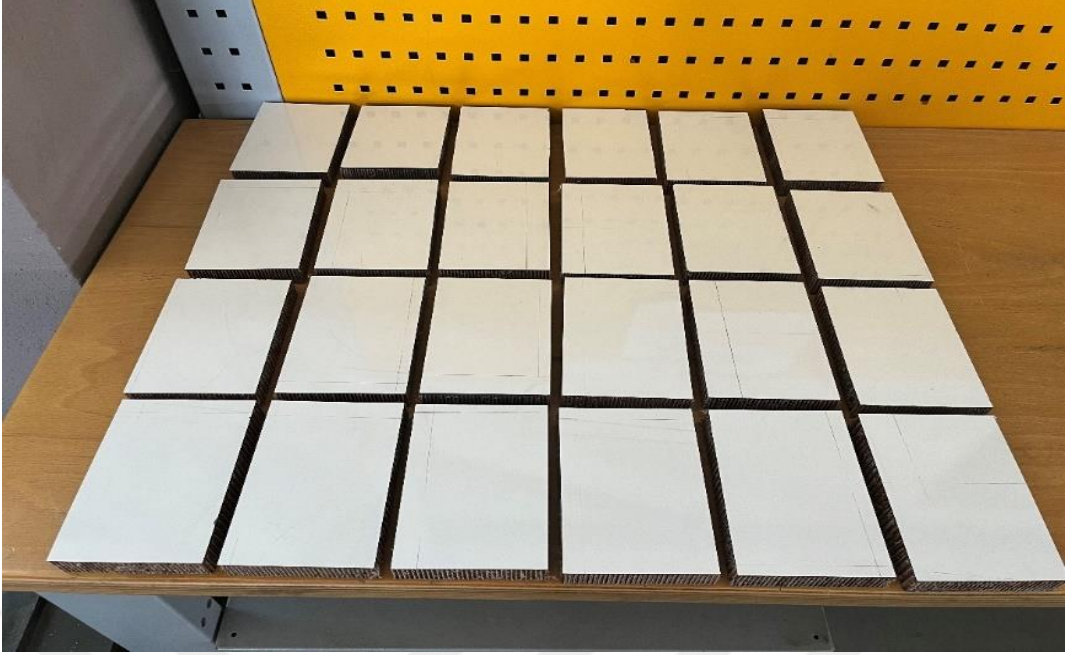
3.4. Testler ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Deney sonucunda düzenekten elde edilecek yaklaşık 50 bin adet veri içerisinde vurucu uç temas anında kaydedilen birkaç yüz adet veri seçilmiş ve önceden oluşturulan makro dosyasına aktarılmıştır. Sonuçlardan elde edilecek kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman ve zaman-deplasman grafikleri ortaya çıkarılacaktır.

3.5. Deney Numunelerinin Üretimi

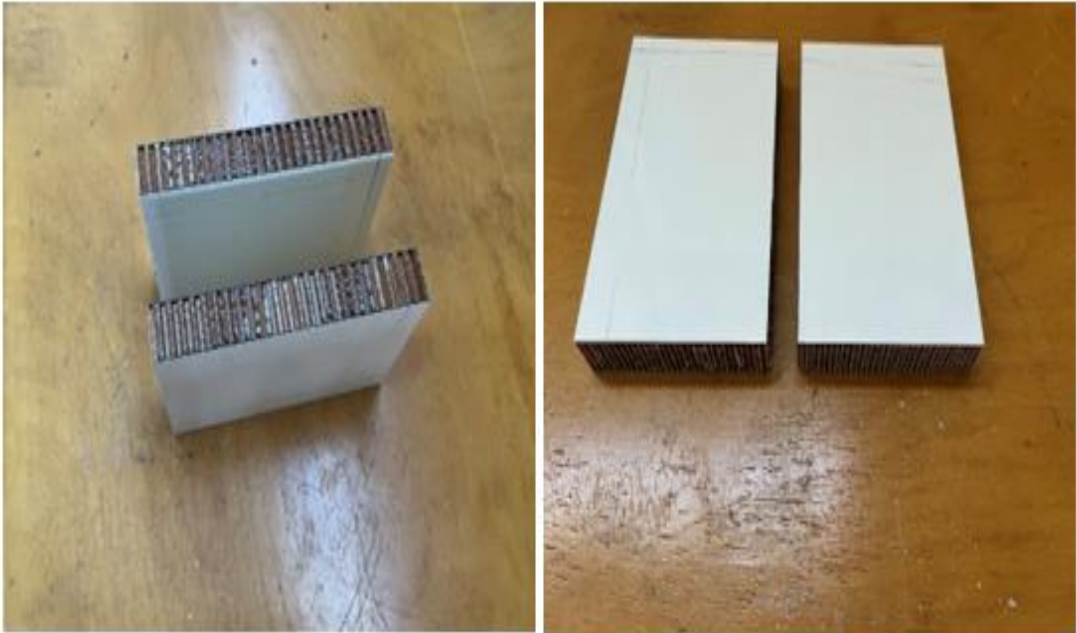
Tez numunelerinin üretimi Konya Selçuk Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümünün Laboratuvar Atölyesinde yapılmıştır. Ahşap plakalı bal peteği sandviç paneller 1993 model akrobasi ve zirai amaçla kullanılan uçak kanat kısmının simüle edilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 4.) ve (Şekil 5.). Hexagonal yapıya sahip olan bal peteği yapı 20 mm hücre yüksekliğine sahip olup her iki yüzeyinden 1er mm kalınlığında ahşap plaka ile kaplanmıştır.

Deney için kanat üzerinden 20 mm kalınlığında 24 adet parça, gönye ve cetvel yardımıyla çizilerek kesime hazır duruma getirilmiş. Daha sonra el testeresi marifeti ile kesilerek 24 adet parça elde edilmiştir (Şekil 3.4.). Deneyler için kullanılacak olan düşük hızlı darbe test cihazının numune tutucularının boyutları ve test standartları göz önüne alınarak deney numuneleri boyutları 100 mm x 150 mm ebatlarında olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Uçak kanadından kesilen 24 adet bal peteği numune

Sandviç kompozit yapılar, düşük ağırlıkları nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. Genellikle yapısal bileşen olarak kullanıldıklarından dolayı, çeşitli yükleme koşulları altında yapısal bütünlük çok önemlidir (Karsandik, Sabuncuoglu, Yildirim ve Silberschmidt 2023).



Şekil 3.4. Uçak kanadından kesilen numune paneller

200 g karbon elyaf kumaş plain dokuma, 420 g karbon elyaf kumaş twill dokuma, 200 g cam elyaf kumaş plain dokuma ve 390 g cam elyaf kumaş twill dokuma rulo şeklinde sarılı silindirlerden sıyrılarak ihtiyacımız olan 100 mm x 150 mm'lik

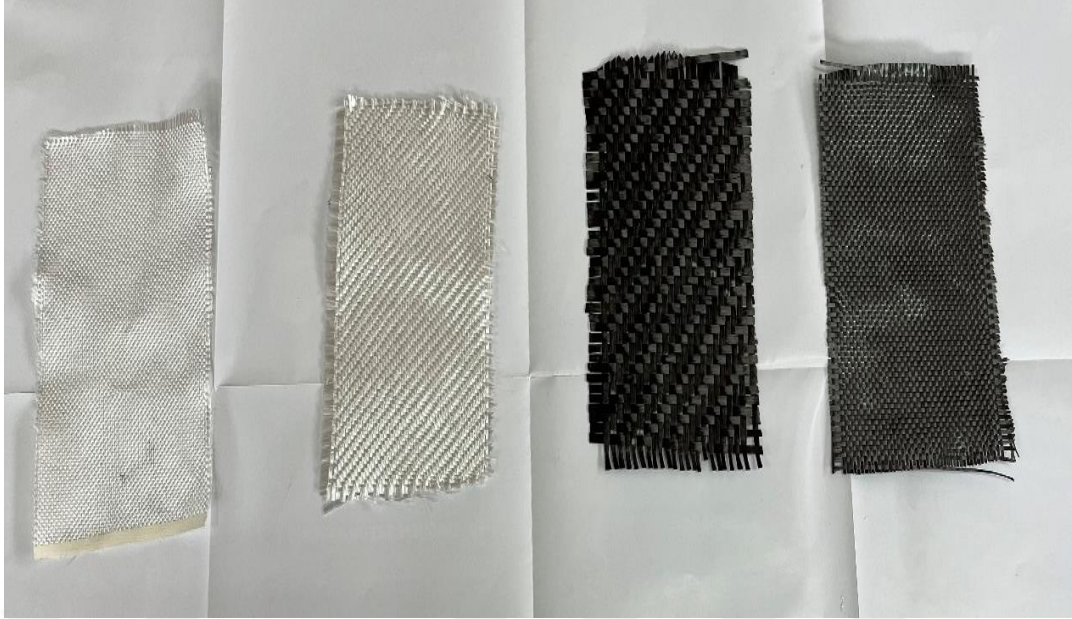
ebatlarda kesilmek üzere kalem ve cetvel yardımıyla işaretlendikten sonra makas yardımıyla kesilmiştir (Şekil 3.5.), (Şekil 3.6.) ve (Şekil 3.7.).



Şekil 3.5. Kesim için hazırlanan cam ve karbon elyaf kumaşlar



Şekil 3.6. Numune panellerin kaplamasında kullanılmak üzere kesilen 100 mm x 150 mm ebatlarındaki elyafların ölçü kontrolü



Şekil 3.7. 100 mm x 150 mm ebatlarında kesilen cam ve karbon elyaf kumaşlar

Uçak kanadından kesilen bal peteği panel numunelerin üzerine yerleştirilecek cam ve karbon elyaf kumaşlar, kullanılacak olan bal peteği panel numunelerin ebatlarına göre kesildikten sonra 1/100 g hassasiyete sahip elektronik hassas terazide tartılmıştır.

Elektronik hassas terazi ile tartımlar sonucunda 4 ayrı cam ve karbon elyaf ağırlıkları aşağıdaki gibi oluşmuştur.

- 1- 200gr Karbon Fiber Kumaş Plain dokuma 3.24 gr
- 2- 420gr Karbon Fiber Kumaş Twill dokuma 6.47gr
- 3- 200gr Cam Fiber Kumaş Plain dokuma 3.73gr
- 4- 390gr Cam Fiber Kumaş Twill dokuma 6.35gr olarak tartılmıştır.

Kesilen ve tartılan cam ve karbon elyaflarla aynı ağırlıkta epoksi ve sertleştirici ajan karışımı, yaklaşık olarak % 60'ını epoksi, % 40'ını sertleştirici olacak şekilde ultrasonik homojenizatör cihazı ile homojenize bir şekilde karıştırılarak karışım hazırlanmıştır. Bu işlem için Bandelin HD 2200 ultrasonik homojenizatör cihazı kullanılmıştır. Karışım süpersonik ses dalgaları yayan homojenizatör yardımıyla 15 dakika süreyle karıştırılmıştır ve karıştırma esnasında hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilmiştir. Karıştırma süresi sonunda sıcaklık yaklaşık 80°C civarındır. Elyaf ve matriks oranları her bir numune için % 50 elyaf hacim oranını elde edecek şekilde oluşturulmuştur.

Hazırlanan epoksi/sertleştirici karışımının katılaşma durumu oluşmadan önce belirli ölçülerde kesilen karbon ve cam elyafların, panel numuneleri ile birleştirme

işlemi süreci başlatılmıştır. El ile yatırma yöntemi tercih edilmiştir. Hazırlanan kompozit malzeme Çizelge 3.1.'de verilen numune istifleme sırasına göre sırası gelen elyaf ile birleştirilerek, elyafların içerisine tamamen nüfuz etmesi sağlanmıştır. Numunelerde elyaflar arası delaminasyonun önüne geçilmesi adına katlar arasında bekleme süresi minimum tutulmuştur.

Hazırlanan panel numuneler ve epoksi/sertleştirici karışımı Çizelge 3.1.'de belirtilen istifleme sırasına uygun olarak panel numunelerin üzerlerine cam ve karbon elyaflar içten dışa sıralanacak şekilde yerleştirilmiş ve her bir istifleme sırasına göre epoksi/sertleştirici karışımı homojen bir şekilde yüzeye uygulanarak elyafların içine nüfuz etmesi sağlanmıştır (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Kürleme fırınına girecek şekilde hazırlanmış panel kaplama numuneler

Matriks sisteminin karışımının kürleme fırınına yapışmaması ve dışarıya taşmaması için 110 mm eninde, 160 mm boyunda ve 25 mm derinliğinde alt tabakası düzgün durması için karton, dış yüzeyleri ise alüminyum folyo malzemeden olacak şekilde kaplar hazırlanmıştır. Daha sonra panel numunelerin daha homojen olarak oluşmasını sağlamak için üzerlerine ağırlık metal parçalar yerleştirilmiştir. Ağırlıklar ile birlikte hazırlanan numuneler alüminyum folyo kaplara yerleştirilerek kürleme fırınına bırakılmıştır. Düşük hızlı deney için hazırlanan numuneler kürleme fırınının içerisinde yerleştirilmiştir. Kürleme fırınında iki aşamada gerçekleştirilen kürleme işlemi ilk 60 dakikada 80 °C'de daha sonraki 30 dakikalık süre zarfında ise 120

°C’de kürlenerek topmada 90 dakikalık sürece maruz kalmıştır. Fiziksel tepkime bu aşamalarda gerçekleştirilmiştir.

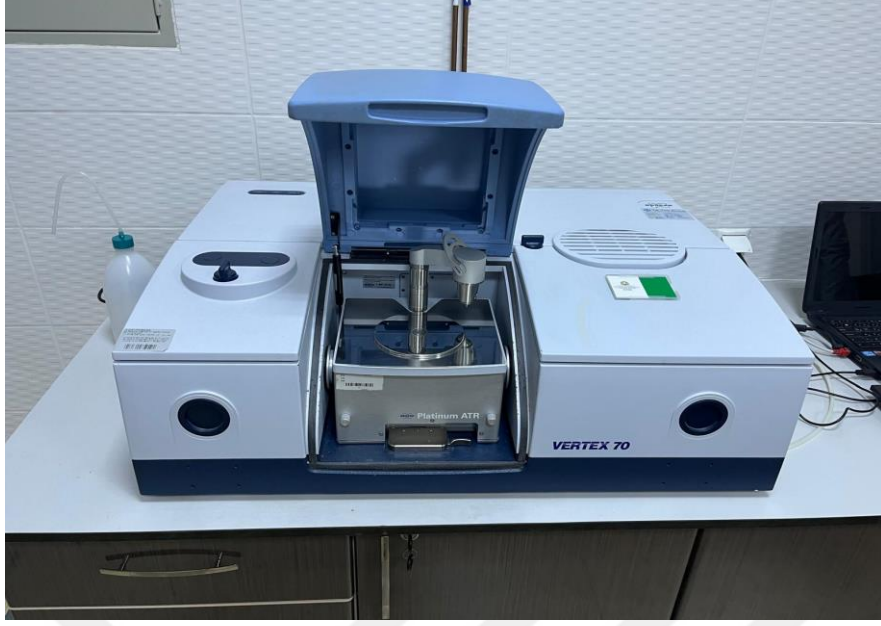
Fırından çıkarılan numuneler 60 dakika süreyle soğumaya (oda sıcaklığında yaklaşık 25 °C) bırakılarak kürlenme işlemi tamamlanmıştır. Düşük hızlı darbe testi için hazırlanan numunelerin keskin ve sivri uçları makas yardımıyla kesilerek son şekilleri verilmiştir.

Hava taşıtı kanat/gövde malzemesi aday numunelerinin darbe davranışını araştırmak için Çizelge 3.1.’de belirtilen parametrelere uygun olarak hazırlanmış hibrit kompozit plakalara düşük hızlı darbe testleri uygulama işlemine geçilmiştir (bkz. Şekil 3.2.).

3.6. FTIR Analizi (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) yöntemi organik, polimerik ve inorganik malzemelerin kimyasal bağ durumunu tanımlamak için kullanılan analitik bir yöntemdir. FTIR analiz yöntemi, test örneklerini taramak ve kimyasal özelliklerini belirlemek için kızılötesi ışık kullanmaktadır. Cihaz tarafından gönderilen radyasyon ile numune molekülleri tarafından titreşimsel bir enerjiye dönüştürülür ve kimyasal yapı spektral bir parmak izi üretir [59].

FTIR, elektromanyetik radyasyon spektrumunun görünür ışıktan daha uzun dalga boyuna ve daha düşük frekansa sahip kızılötesi bölgesini ölçer. Bu spektrum, kızılötesi radyasyona (IR) maruz bırakıldığında bir numunede ölçülebilir. İş başındaki temel teori, farklı atomlar arasındaki bağların farklı frekanslarda ışık emmesidir. FTIR testiyle ışık, kızılötesi spektrum çıktısı üreten bir kızılötesi spektrometre kullanılarak ölçülür. FTIR spektrumu bir grafik olarak gösterilir. Dikey eksen, maddenin ne kadar kızılötesi ışık emdiğini gösterir. Yatay eksen, ışığın frekansını veya dalga boyunu temsil eder. Bilinmeyen malzemeler, geniş bir referans spektrumu aralığına sahip bir veri tabanına karşı IR spektrumu aranarak tanımlanır. Malzemeler, ilgi duyulan bileşenin bilinen konsantrasyonlarının standart bir eğrisi oluşturulabildiği sürece FTIR malzeme karakterizasyon tekniği kullanılarak niceliksel olarak belirlenebilir [60]. FTIR cihazı Şekil 3.9.’de görülmektedir.



Şekil 3.9. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

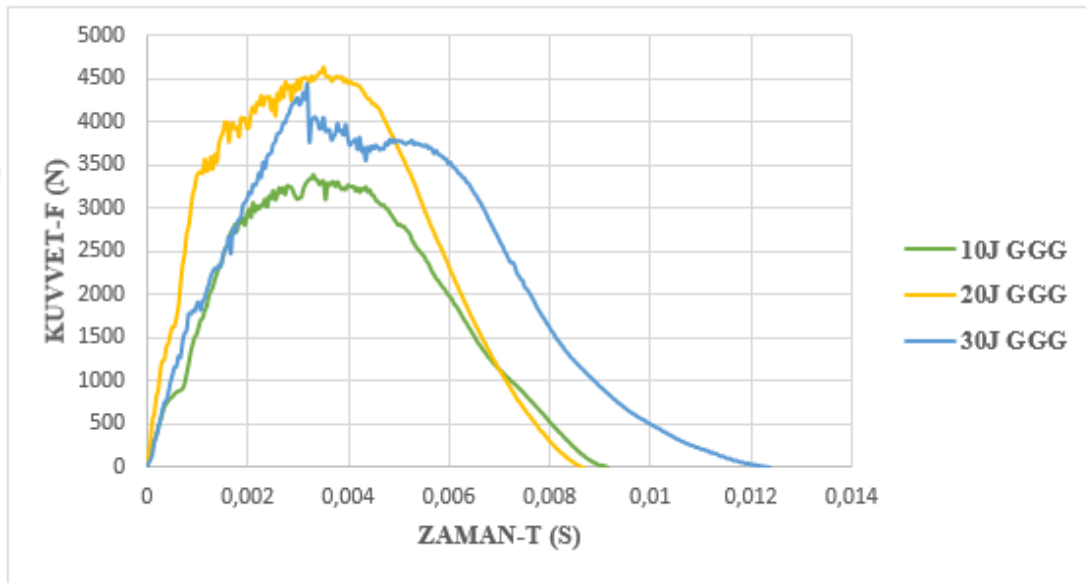
Tez çalışması havacılık alanında var olan taşıtların gövde oluşturma istifleme sıralarını ve hasar alanı azaltma teknolojisini içermektedir. Bu konu hem kaplama teknolojisi hem de malzeme teknolojisi açısından önem arz etmektedir. Çalışma ile küçük çaplı sportif/ticari hava taşıtlarında gövde yapısının mukavemet iyileştirmesi amaçlanmıştır. Çalışma mukavemet artırmanın yanı sıra tahribat öncesi ve sonrası değiştirme ve yama teknolojisine de ışık tutarak aynı zamanda yapmış olduğumuz bu çalışmanın neticesinde değişikliğe fırsat vermeyen ve yama ile yenilemeye imkân tanımayan içyapı kusurlarının tamamen önüne geçilmesi planlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre gittikçe kullanımı artan kompozit uçak parçalarının üretim aşamaları ve bakım şartları hakkında bilgi sahibi olunacaktır.

Düşük hızlı darbe testi uygulanan bal peteği yapısına sahip cam ve karbon elyaf kaplamalı uçak kanatlarının üzerindeki etkiler, standart ve teorik olarak ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Cam elyaf kumaşlar ve karbon elyaf kumaşlar, epoksi ve sertleştirici yöntemler kullanılarak el yatırma yöntemiyle hazırlanmış ve hazırlanması kürleme işlemiyle nihai biçimlendirilmiştir. Elde edilen numune kompozit özelliklerinde, darbe sonrasında ortaya çıkan hasar değişimlerinin boyutu ve özellikleri belirlenmiş; teorik programlamalar ve düzenli sonuçlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Analizler sırasında yüzdesel hata oranları incelenmiştir.

Ayrıca düşük hızlı darbe testleri üç farklı enerji seviyesinde (10J, 20J ve 30J) gerçekleştirilmiş ve bu seviyeler arasındaki performans farklılıkları değerlendirilmiştir. Her enerji seviyesindeki darbe etkisi, malzemenin yapısı ve iç yapısındaki deformasyonlar analiz edilmiştir. Çalışma, bal peteği yapılarının ve farklı elyaf malzemeleri darbelere dayanıklı olan katkılarını ortaya koyarken, optimum malzeme ve tasarım seçimleri konusunda da önemli veriler sunmaktadır. Sonuç olarak, kompozit malzemelerin uçak kanatlarında kullanımı için daha güvenli ve dayanıklı çözümler geliştirilip ışık tutulmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular istifleme sırasına göre alt başlıklar halinde izah edilmiştir.

4.1. Cam Elyaf - Cam Elyaf - Cam Elyaf (GGG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

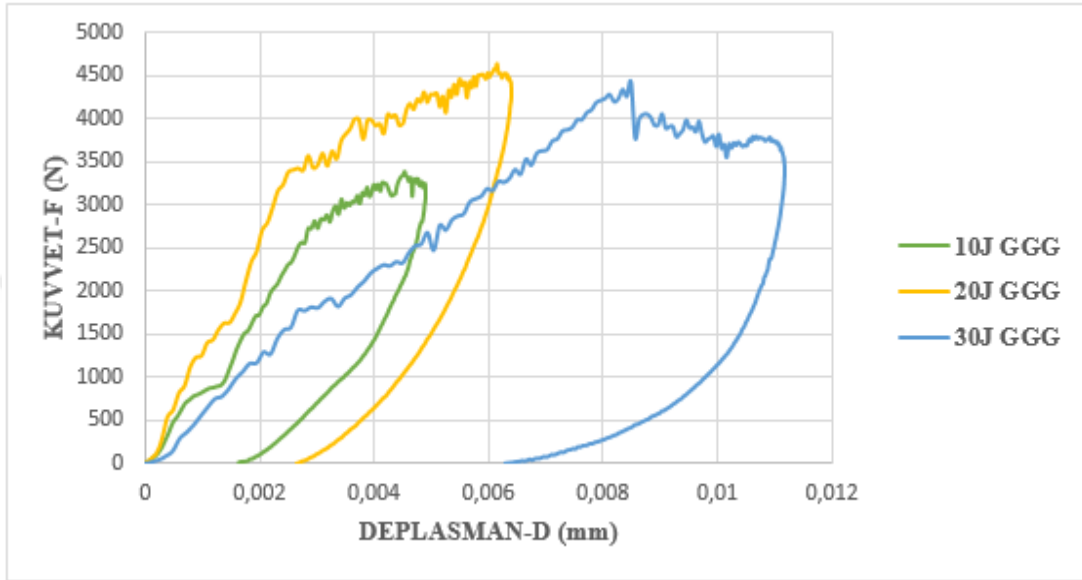
Şekil 4.1., şekil 4.2. ve şekil 4.3. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf - cam elyaf (GGG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürlleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.1.), (Şekil 4.2.) ve (Şekil .4.3.).



Şekil 4.1. GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf - cam elyaf - cam elyaf (GGG) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3300 N seviyesindeyken, 20J'de bu değer yaklaşık 4600 N, 30J'de ise 4500 N'nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süreleri de değişiklik göstermiştir. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.009 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0085 saniyede ve 30J'de bu süre 0.0125 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin iç yapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum

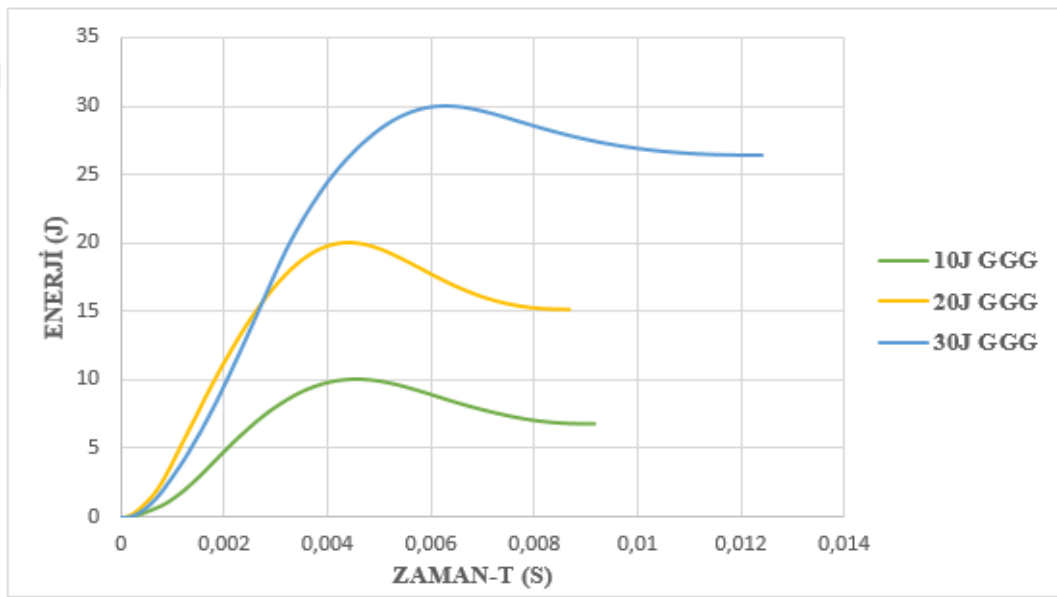
daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.2. GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, cam elyaf - cam elyaf - cam elyaf (GGG) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte, 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3300 N kuvvet taşırken, 20J’de bu değer 4600 N’ye, 30J’de ise 4500 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 1936N, 20J enerji seviyesinde 2729N ve 30J enerji seviyesinde 2112N’ dur. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 23 azalmış, 10J enerji seviyesine göre ise % 9 artmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.0018 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.003 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.065 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum,

malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum, malzemenin süneklik ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



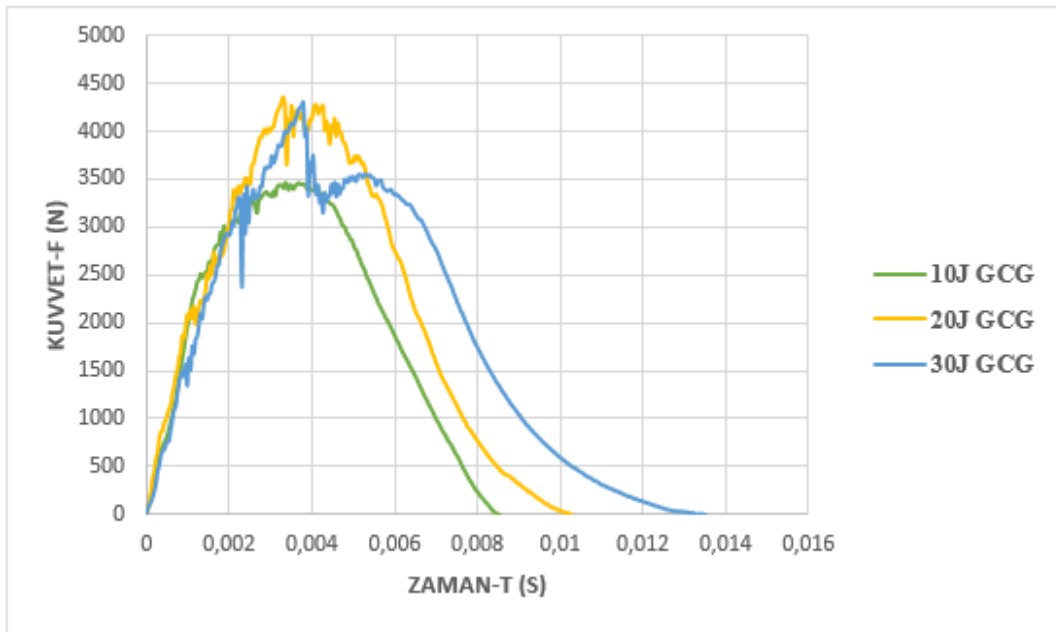
Şekil 4.3. GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf - cam elyaf - cam elyaf (GGG) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlediğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini

kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 15J enerji emilmiş ve geriye kalan 5J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 26.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.2. Cam Elyaf - Karbon Elyaf - Cam Elyaf (GCG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.4., şekil 4.5. ve şekil 4.6. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf - karbon elyaf - cam elyaf (GCG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.4.), (Şekil 4.5.) ve (Şekil 4.6.).



Şekil 4.4. GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

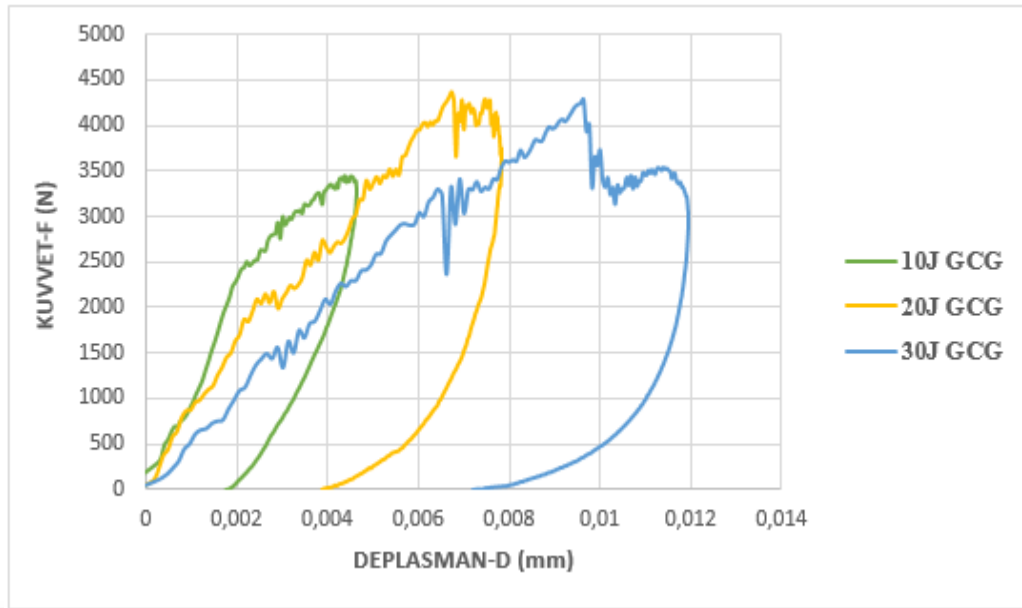
Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (GCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J)

verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3400 N seviyesindeyken, 20J’de bu değer yaklaşık 4350 N’ye, 30J’de ise 4300 N’nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0085 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.010 saniyede ve 30J’de bu süre 0.013 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin içyapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3300 N iken GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3400 N hesaplanmış ve yaklaşık % 2.7 artış gözlemlenmiştir.

GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4600 N iken GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4350 N hesaplanmış ve yaklaşık % 5.7 azaldığı gözlemlenmiştir.

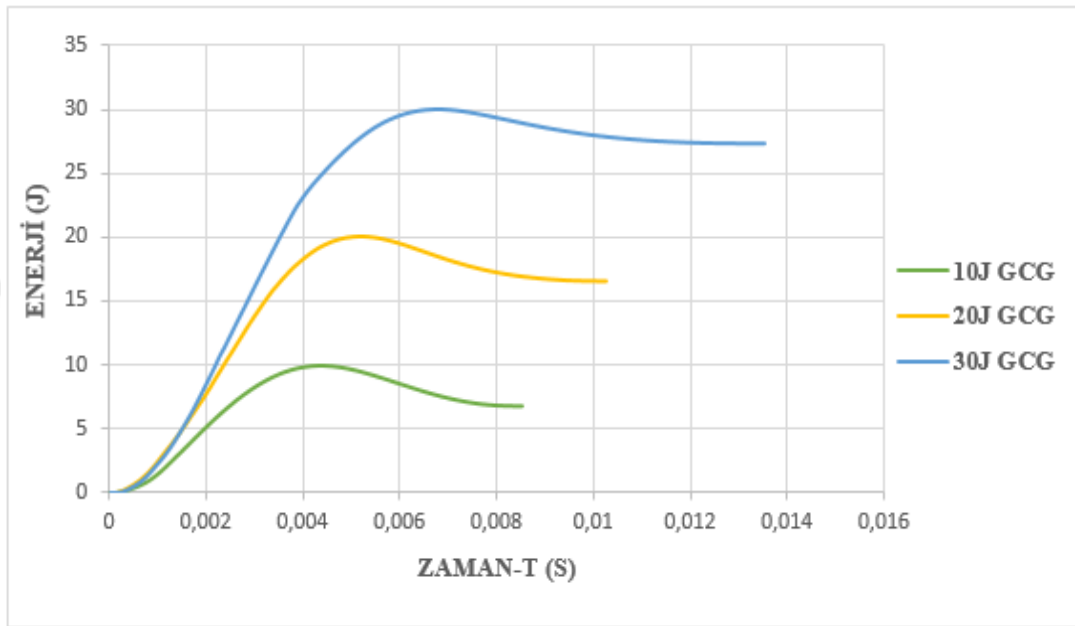
GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4500 N iken GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4300 N hesaplanmış ve yaklaşık % 4.6 azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (GCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3500 N kuvvet taşırken, 20J’de bu değer 4350 N’ye, 30J’de ise 4300 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 2078N, 20J enerji seviyesinde 2203N, 30J enerji seviyesinde 1870’tir. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 15, 10J enerji seviyesine göre ise % 10 düşmüştür. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasmanı 0.0018 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.004 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0072 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum,

malzemenin süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



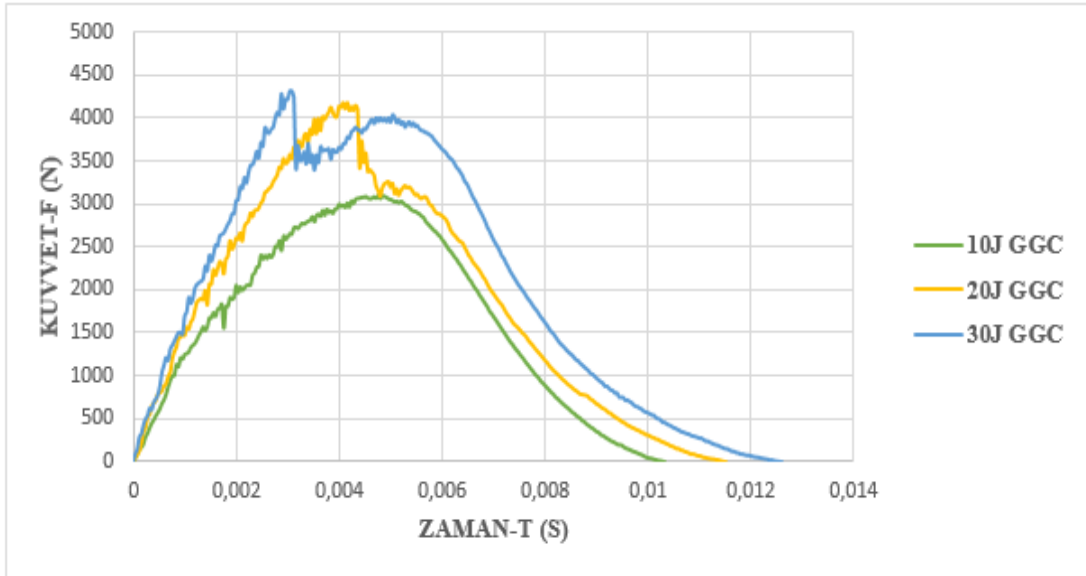
Şekil 4.6. GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (GCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlendiğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu

grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 17J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 27.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 2.5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.3. Cam Elyaf - Cam Elyaf - Karbon Elyaf (GGC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.7., şekil 4.8. ve şekil 4.9. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf – cam elyaf - karbon elyaf (GGC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürlleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.7.), (Şekil 4.8.) ve (Şekil 4.9.).



Şekil 4.7. GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (GGC) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. Uygulanan enerji seviyesinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerinin ve darbe süresinin arttığı açıkça görülmektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3100 N seviyesindeyken, 20J'de bu değer

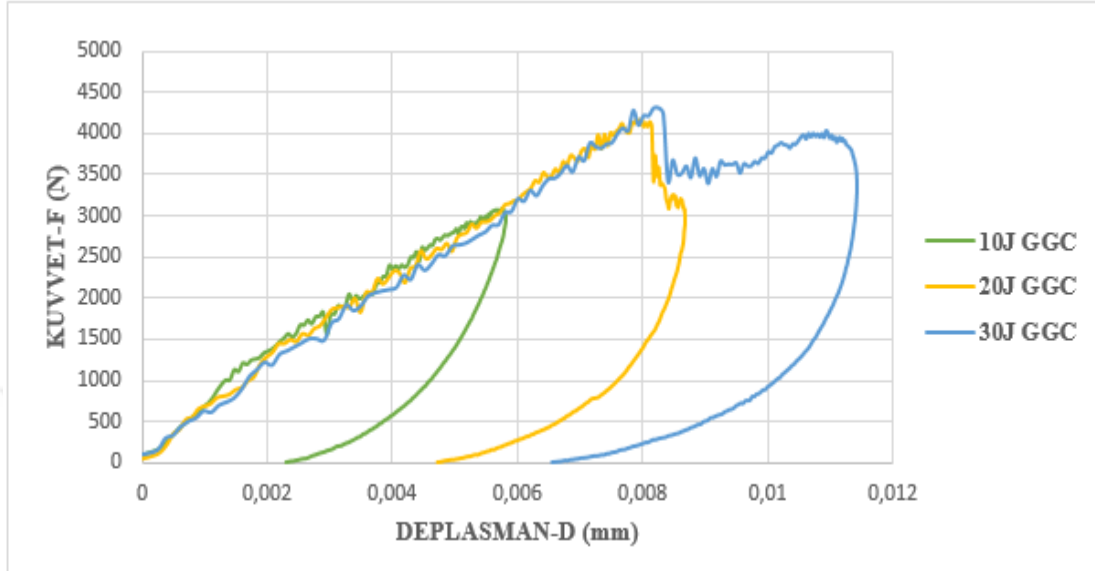
yaklaşık 4200 N'ye, 30J'de ise 4300 N'nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0105 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0110 saniyede ve 30J'de bu süre 0.0127 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin iç yapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3300 N iken GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3400 N hesaplanmış, GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değerine bakıldığında 3100 N hesaplanmış ve GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre % 6.4 azalmış, GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre ise % 9.6 azalmıştır.

GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4600 N iken GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4350 N hesaplanmış, GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değerine bakıldığında 4200 N hesaplanmış ve GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre % 9.5 azalmış, GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre ise % 3.5 azalmıştır.

GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4500 N iken GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4300 N hesaplanmış, GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değerine bakıldığında 4300 N hesaplanmış ve GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre % 4.6 azalmışken

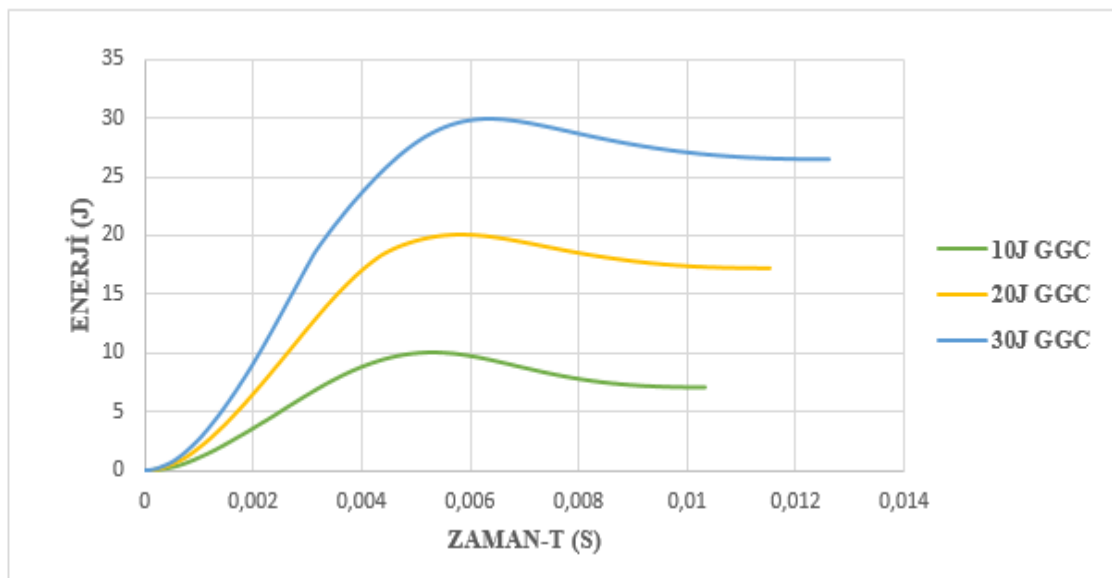
GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısı numuneye göre ise herhangi değişim olmamıştır.



Şekil 4.8. GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, cam elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (GGC) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte, uygulanan darbe enerjisinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet ve toplam deplasman miktarının arttığı gözlemlenmektedir. 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3000 N kuvvet taşıırken, 20J’de bu değer 4200 N’ye, 30J’de ise 4300 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 1687N, 20J enerji seviyesinde 1907N, 30J enerji seviyesinde 2069’dur. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 8.4, 10J enerji seviyesine göre ise % 22.6 artmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.0025 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.0048 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0067 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik

deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum, malzemenin süneklik ve enerji sönümleme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu davranucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



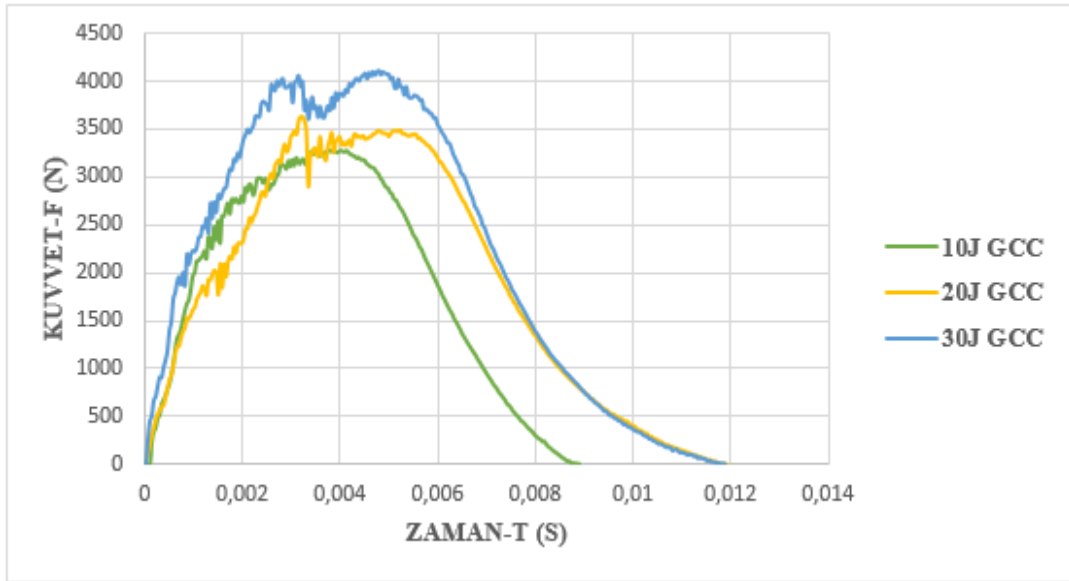
Şekil 4.9. GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (GGC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlendiğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca

absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 17J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 26.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.4. Cam Elyaf - Karbon Elyaf - Karbon Elyaf (GCC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.10., şekil 4.11. ve şekil 4.12. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf – karbon elyaf - karbon elyaf (GCC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.10.), (Şekil 4.11.) ve (Şekil 4.12.).



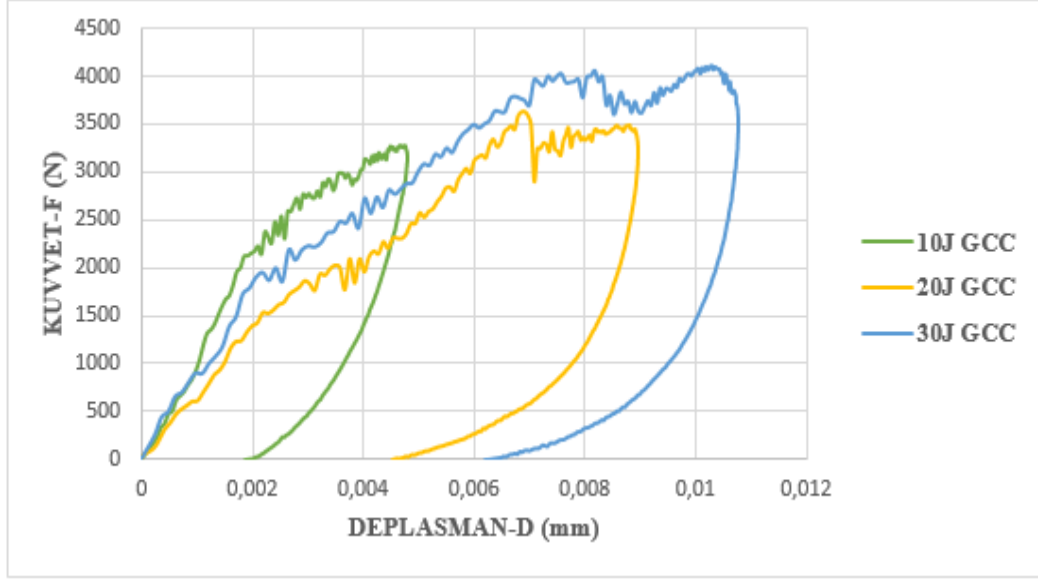
Şekil 4.10. GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (GCC) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3300 N seviyesindeyken, 20J’de bu değer yaklaşık 3700 N’ye, 30J’de ise 4150 N’nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süreleri de değişiklik göstermiştir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0088 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.012 saniyede ve 30J’de bu süre 0.012 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin iç yapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

GGG, GCG, GGC ve GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değerlerine bakıldığında sırasıyla 3300 N, 3400 N, 3100 N ve 3300 N olarak hesaplanmış ve değerlerin birbirine yakın olduğu aralarında çok fazla fark olmadığı görülmüştür.

GGG, GCG, GGC ve GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değerlerine bakıldığında sırasıyla 4600 N, 4350 N, 4200 N ve 3700 N olarak hesaplanmış ve ilk üç numunenin değerlerinin birbirine yakın olduğu fakat GGC numunesinin daha düşük çıktığı görülmüştür.

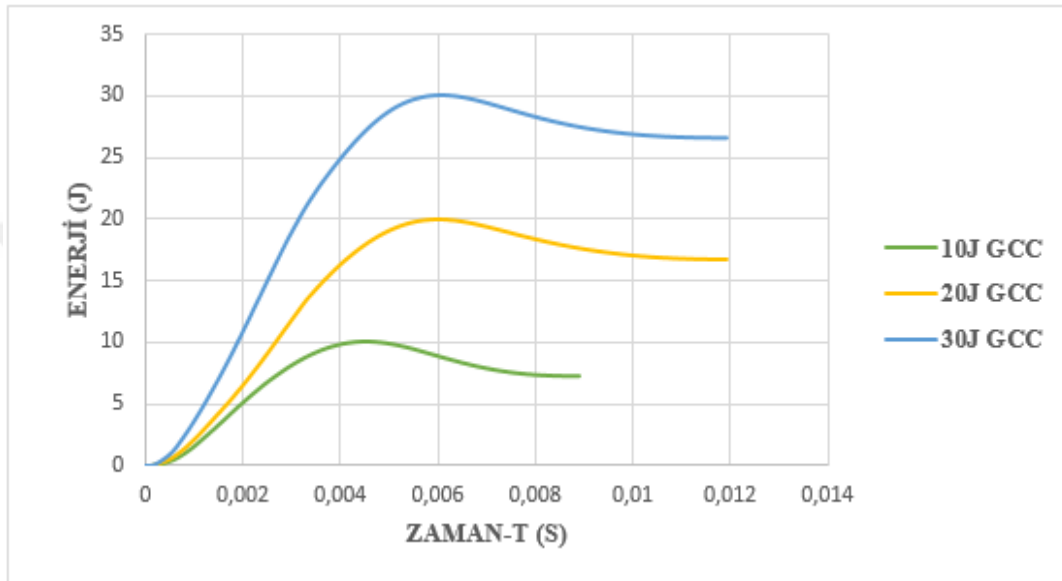
GGG, GCG, GGC ve GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değerlerine bakıldığında sırasıyla 4500 N, 4300 N, 4300 N ve 4150 N olarak hesaplanmış ve ilk numunenin değerinin yüksek olduğu diğer iki numunenin aynı değerlere sahip olduğu ve son numunenin ise diğerlerine göre daha düşük çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.11. GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (GCC) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte, uygulanan darbe enerjisinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet ve toplam deplasman miktarının arttığı gözlemlenmektedir. 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3300 N kuvvet taşıırken, 20J’de bu değer 3650 N’ye, 30J’de ise 4150 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 1939N, 20J enerji seviyesinde 1870N, 30J enerji seviyesinde 2194’tür. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 17.3 10J enerji seviyesine göre ise % 13.1 artmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.0018 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.0045 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0063 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum,

malzemenin süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



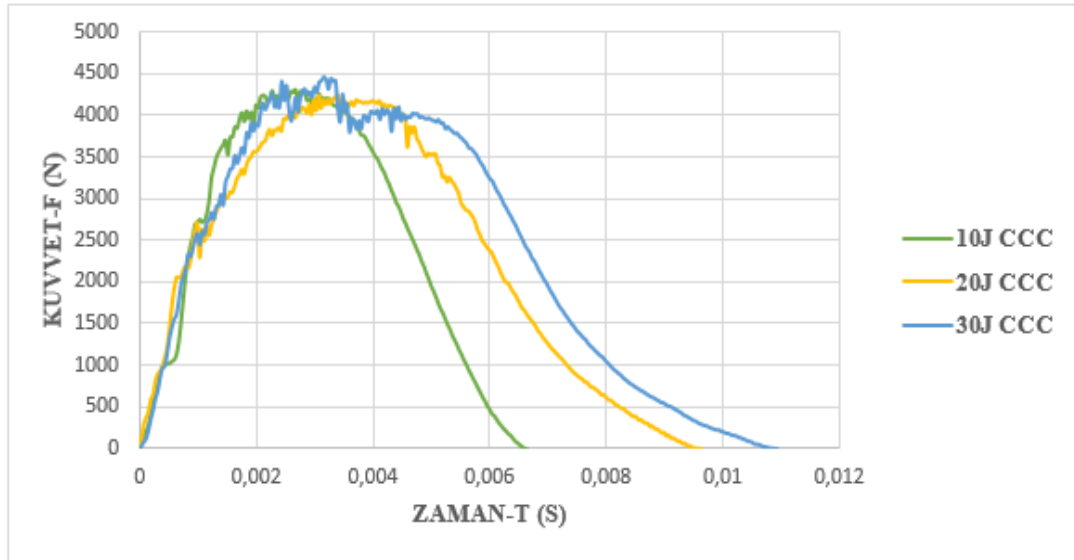
Şekil 4.12. GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, cam elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (GCC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlendiğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu

grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 15J enerji emilmiş ve geriye kalan 5J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 26.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.5. Karbon Elyaf - Karbon Elyaf - Karbon Elyaf (CCC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.13., şekil 4.14 ve şekil 4.15. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm karbon elyaf – karbon elyaf - karbon elyaf (CCC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.13.), (Şekil 4.14.) ve (Şekil 4.15.).



Şekil 13. CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

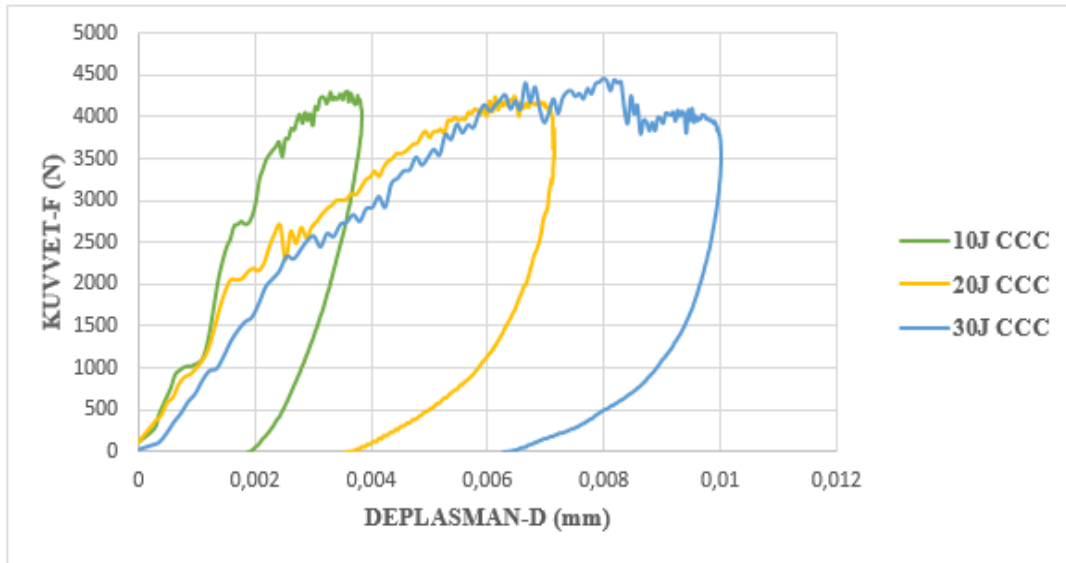
Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (CCC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. Özellikle 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 4300 N seviyesindeyken, 20J'de

bu değer yaklaşık 4250 N'ye, 30J'de ise 4500 N'nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0068 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0095 saniyede ve 30J'de bu süre 0.015 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin iç yapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 4300 N olarak hesaplanmış ve diğer 4 numuneye kıyasla yüksek çıkmıştır.

CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4250 N olarak hesaplanmış ve diğer numunelere bakıldığında GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değerine yakın bir değer ortaya çıkmıştır.

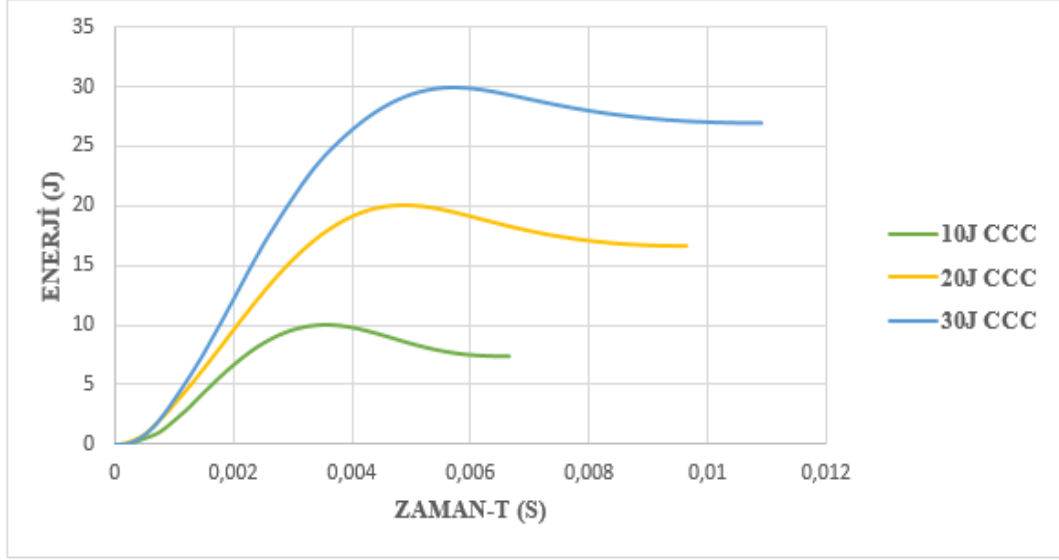
CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4500 N olarak hesaplanmış ve diğer numunelere bakıldığında GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değerine yakın bir değer ortaya çıkmıştır.



Şekil 14. CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (CCC) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 4250 N kuvvet taşırken, 20J’de bu değer 4250 N’ye, 30J’de ise 4500 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 2581N, 20J enerji seviyesinde 2326N, 30J enerji seviyesinde 2343’tür. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 0.7 artmış, 10J enerji seviyesine göre ise % 9.3 azalmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.002 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.0035 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0065 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum, malzemenin süneklik ve enerji sönmüleme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon

kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



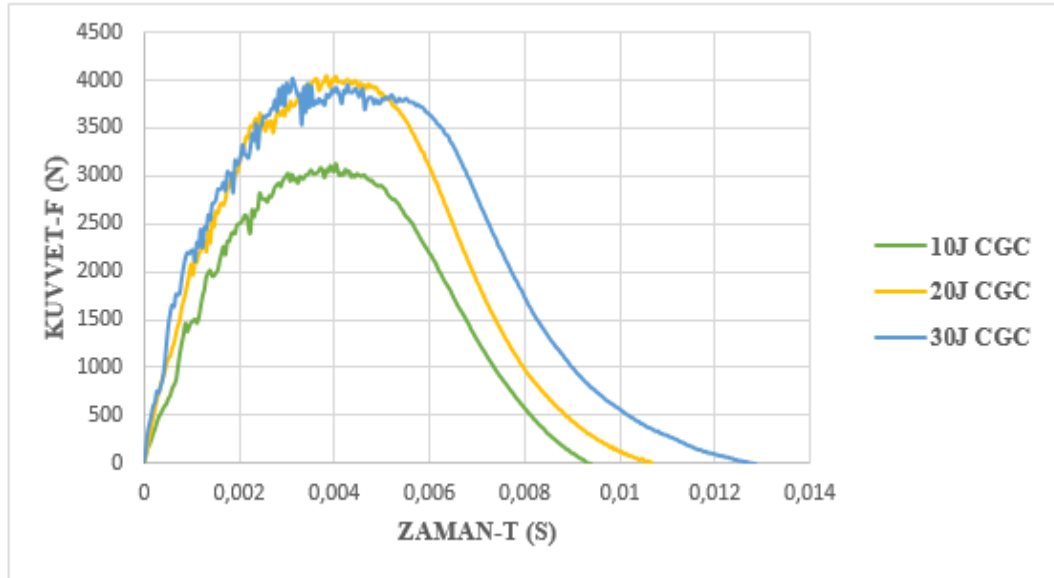
Şekil 15. CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – karbon elyaf (CCC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlediğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7.5J enerji emilmiştir ve geriye kalan 2.5J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 16.5J enerji

emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 27J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.6. Karbon Elyaf - Cam Elyaf - Karbon Elyaf (CGC) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.16., şekil 4.17. ve şekil 4.18. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm karbon elyaf - cam elyaf - karbon elyaf (CGC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.16.), (Şekil 4.17.) ve (Şekil 4.18.).



Şekil 4.16. CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

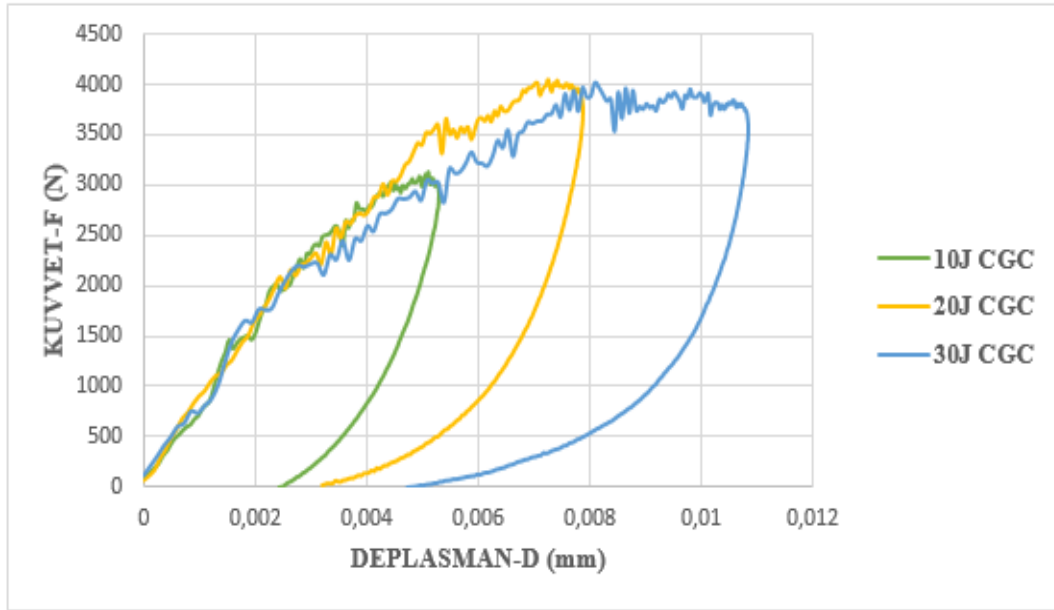
Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (CGC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3100 N seviyesindeyken, 20J’de bu değer yaklaşık 4000 N’ye, 30J’de ise 4000 N’nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep

olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0093 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0105 saniyede ve 30J'de bu süre 0.013 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin içyapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3100 N olarak hesaplanmış ve diğer 5 numuneye ile karşılaştırıldığında GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri ile aynı çıktığı görülmüştür.

CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4000 N olarak hesaplanmış ve diğer numunelere bakıldığında ilk 4 numuneden daha düşük GGC numunesinden daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

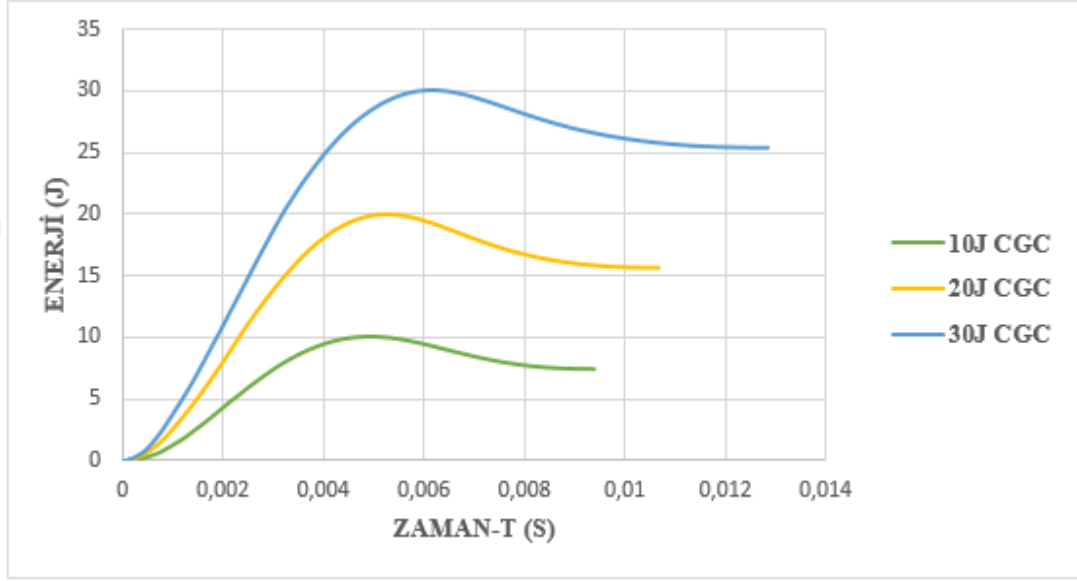
CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4000 N olarak hesaplanmış ve diğer 5 numunenin değerlerine kıyasla daha düşük bir değer ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.17. CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (CGC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3100 N kuvvet taşırken, 20J'de bu değer 4000 N'ye, 30J'de ise 4000 N'ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 1804N, 20J enerji seviyesinde 2179N, 30J enerji seviyesinde 2113'tür. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 3 azalmış, 10J enerji seviyesine göre ise % 17.1 artmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J'de deplasman 0.0027 mm civarında sınırlı kalırken, 20J'de 0.0033 mm'ye ve 30J'de yaklaşık 0.005 mm'ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J'de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum,

malzemenin süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



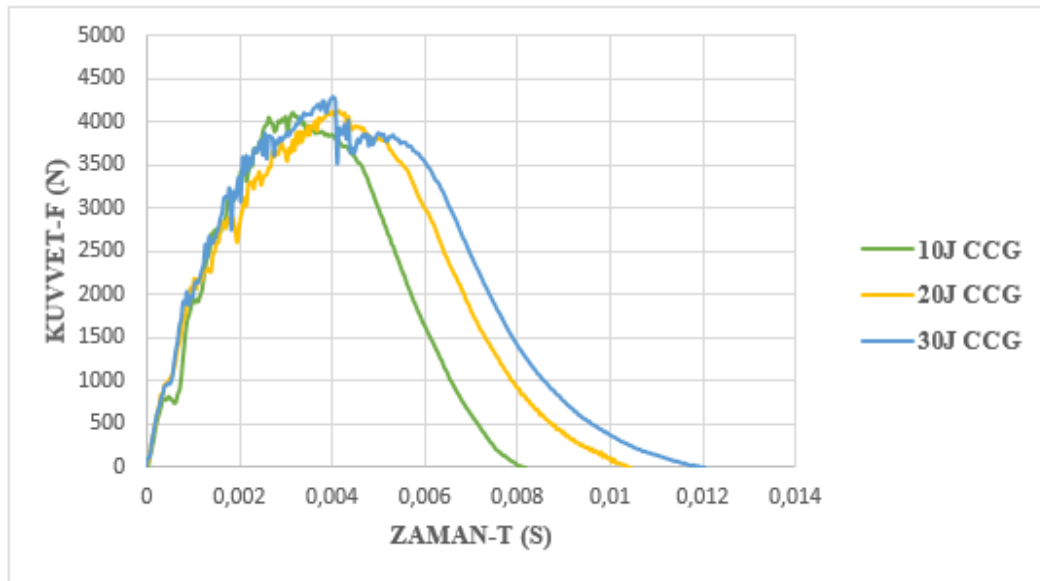
Şekil 4.18. CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – karbon elyaf (CGC) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlediğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu

grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 2.5J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 16J enerji emilmiş ve geriye kalan 4J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 25J enerji emilmiş ve geriye kalan 5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.7. Karbon Elyaf - Karbon Elyaf - Cam Elyaf (CCG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.19., şekil 4.20. ve şekil 4.21. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm karbon elyaf – karbon elyaf - cam elyaf (CCG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürtleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.19.), (Şekil 4.20.) ve (Şekil 4.21.).



Şekil 4.19. CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

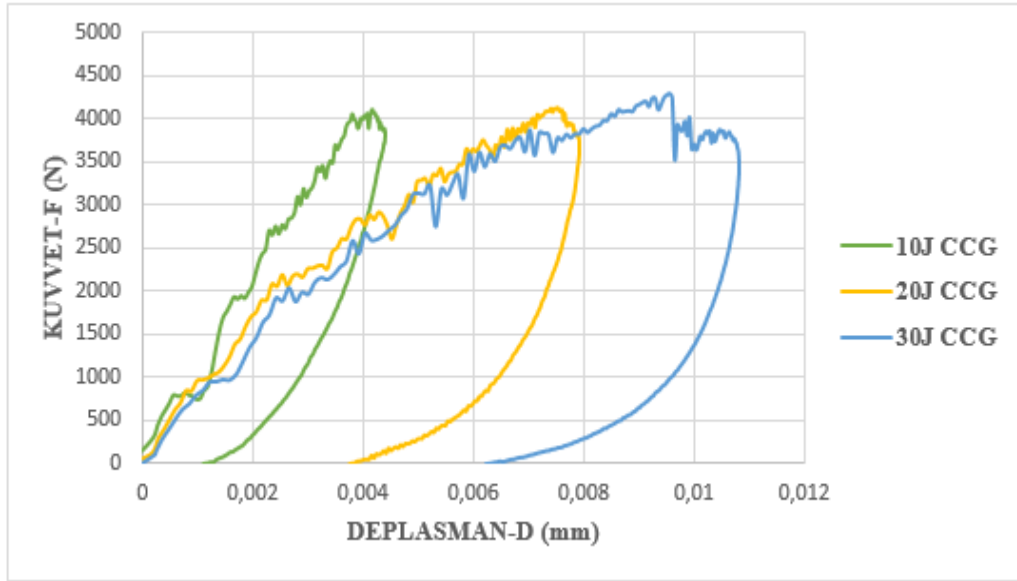
Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (CCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. Uygulanan enerji seviyesinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerinin ve darbe süresinin arttığı açıkça görülmektedir. 10J enerji uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık

4000 N seviyesindeyken, 20J'de bu değer yaklaşık 4100 N'ye, 30J'de ise 4250 N'nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0082 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0105 saniyede ve 30J'de bu süre 0.012 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji artıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin içyapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 4000 N olarak hesaplanmış ve diğer 6 numuneye ile karşılaştırıldığında GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değerinden düşük diğer numunelerin 10J maksimum kuvvet değerinden daha yüksek çıktığı görülmüştür.

CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4100 N olarak hesaplanmış ve diğer 6 numuneye bakıldığında GGC ve GCC numunelerinden daha yüksek, diğer numunelerden daha düşük bir değer hesaplanmıştır.

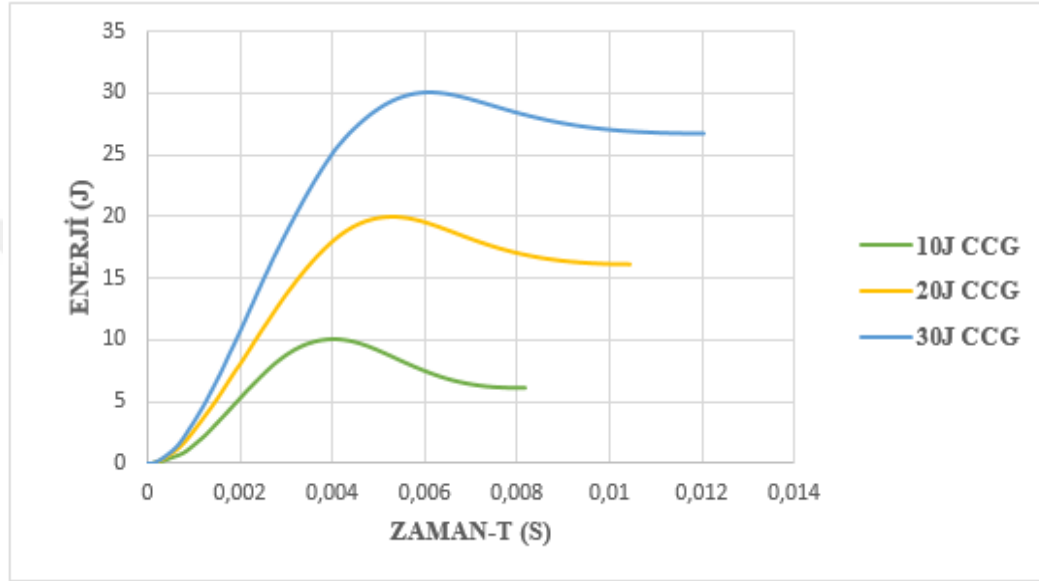
CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4250 N olarak hesaplanmış ve diğer 6 numuneye bakıldığında GGC ve GCC numunelerinden daha yüksek, diğer numunelerden daha düşük bir değer hesaplanmıştır.



Şekil 4.20. CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (CCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte, uygulanan darbe enerjisinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet ve toplam deplasman miktarının arttığı gözlemlenmektedir. 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 4000 N kuvvet taşırken, 20J’de bu değer 4100 N’ye, 30J’de ise 4250 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 2256N, 20J enerji seviyesinde 2188N, 30J enerji seviyesinde 2154’tür. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 1.6, 10J enerji seviyesine göre ise % 4.6 azalmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.0012 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.0038 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0064 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma

gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum, malzemenin süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



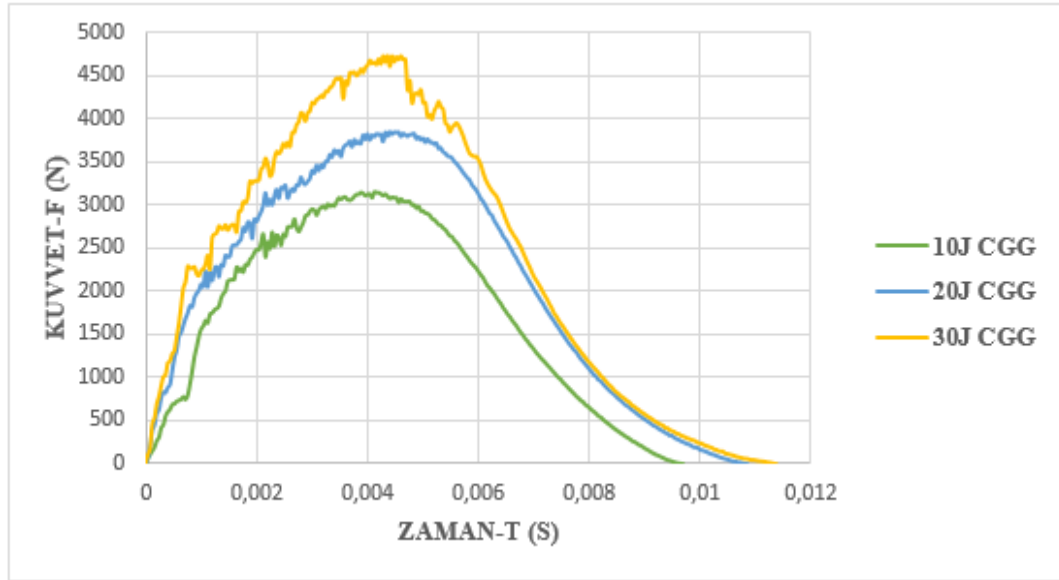
Şekil 4.21. CCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

Grafik, karbon elyaf – karbon elyaf – cam elyaf (CCG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlendiğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu

grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7J enerji emilmiş ve geriye kalan 3J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 15J enerji emilmiş ve geriye kalan 5J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 26.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

4.8. Karbon Elyaf - Cam Elyaf - Cam Elyaf (CGG) Malzemenin Farklı Enerji Seviyelerinde Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Şekil 4.22., şekil 4.23. ve şekil 4.24. Grafikler 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm karbon elyaf – cam elyaf - cam elyaf (CGG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.22.), (Şekil 4.23.) ve (Şekil 4.24.).



Şekil 4.22. CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - zaman grafiği

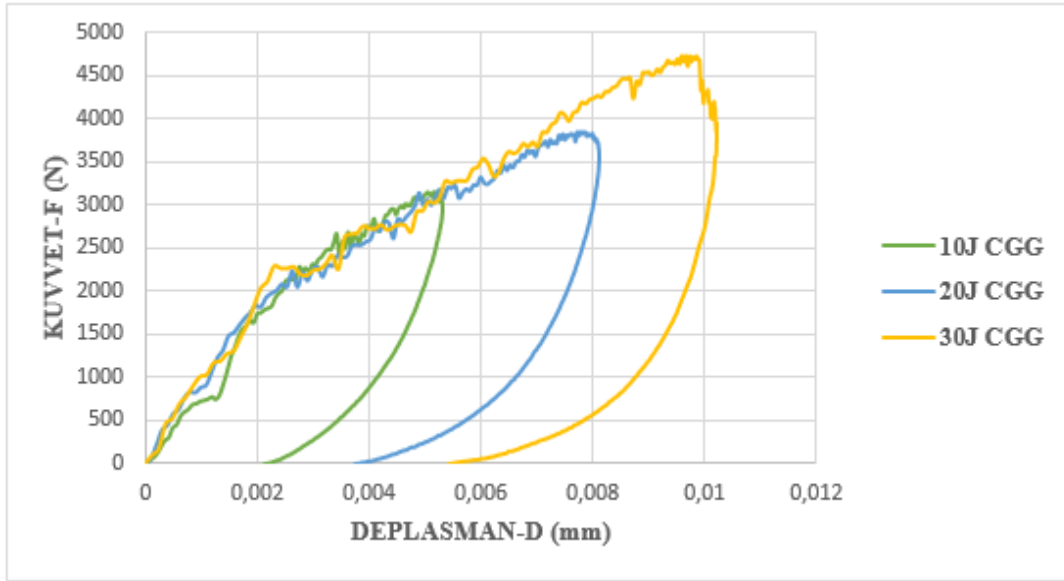
Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – cam elyaf (CGG) malzemesinin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) verdiği tepkiyi zamana bağlı kuvvet eğrileri üzerinden göstermektedir. Uygulanan enerji seviyesinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerinin ve darbe süresinin arttığı açıkça görülmektedir. 10J enerji

uygulandığında maksimum kuvvet yaklaşık 3150 N seviyesindeyken, 20J'de bu değer yaklaşık 3800 N'ye, 30J'de ise 4700 N'nin üzerine çıkmaktadır. Maksimum değerlere ulaşmadan önce ve sonrasında dalgalanmaların görüldüğü ve bu dalgalanmaların numune malzemelerin iç yapılarında mikro çatlaklara ve delaminasyonlara sebep olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji seviyesine bağlı olarak darbe süresi de uzamaktadır. Örneğin, 10J için darbe süresi yaklaşık 0.0095 saniye civarında sonlanırken, 20J için 0.0105 saniyede ve 30J'de bu süre 0.011 saniyeye kadar uzamaktadır. Bu davranış, uygulanan enerjinin malzemenin deformasyon mekanizmalarını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Enerji arttıkça malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasitesi zorlanmakta, bu da malzemenin içyapısında hasar veya çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oluşum daha fazla sayıda kuvvet azalma verilerinden anlaşılabilir. Yüksek enerji seviyesinde görülen ve daha yüksek genlikli veri azalması ise ani çatlak ya da kırılma hasarı olmasıyla yorumlanabilir. Özellikle 30J seviyesindeki kuvvet-zaman eğrisinde, malzemenin daha uzun süre yük taşıdığı görülmektedir, bu da yüksek enerjilere karşı dirençli olduğunu ancak sünek bir davranış sergileyebileceğini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminde darbe direnci kriterlerinin önemini vurgulamaktadır.

CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3150 N olarak hesaplanmış ve diğer 7 numuneye ile karşılaştırıldığında GGC ve CGC numunelerinden daha yüksek, diğer numunelerden daha düşük bir değer hesaplanmıştır.

CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 3800 N olarak hesaplanmış ve diğer 7 numuneye bakıldığında GCC numunesinden daha yüksek, diğer numunelerden daha düşük bir değer hesaplanmıştır.

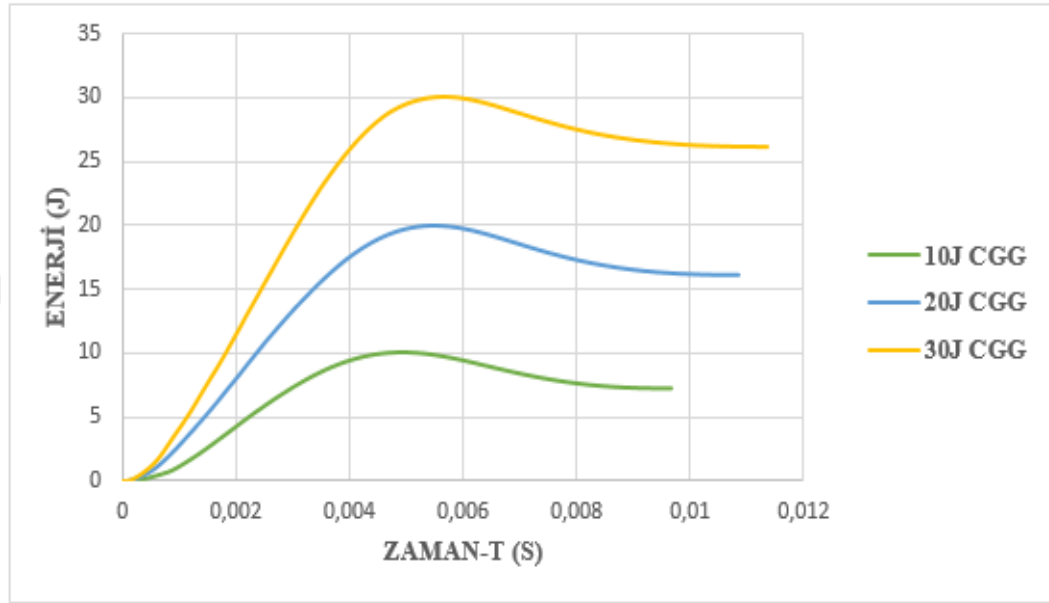
CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4700 N olarak hesaplanmış ve diğer 7 numuneye bakıldığında hepsinden daha yüksek bir değer hesaplanmıştır.



Şekil 4.23. CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki temas kuvveti - deplasman grafiği

Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – cam elyaf (CGG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) bağlı olarak kuvvet (F) ve deplasman (D) eğrilerini göstermektedir. Grafikte, uygulanan darbe enerjisinin artışıyla birlikte maksimum kuvvet ve toplam deplasman miktarının arttığı gözlemlenmektedir. 10J enerji seviyesinde, malzeme maksimum yaklaşık 3200 N kuvvet taşıırken, 20J’de bu değer 3800 N’ye, 30J’de ise 4700 N’ye ulaşmaktadır. Ortalama kuvvet değerleri de hesaplanmıştır. Ortalama kuvvet, 10J enerji seviyesinde 1788N, 20J enerji seviyesinde 2109N, 30J enerji seviyesinde 2330’tür. 30J enerji seviyesinin ortalama kuvvet yüzdesi 20J enerji seviyesine göre % 10.4, 10J enerji seviyesine göre ise % 30.3 artmıştır. Grafikte kuvvetin hızla arttığı ilk bölümde ve daha yatay ilerleyip deplasman ilerlemesinin olduğu ikinci bölgelerde bazı bölümlerde salınımlar görülmektedir. Kuvvet değerinde bölgesel bir azalma olarak görülen bu salınımlar, numunenin hasar görmeye başladığının bir göstergesidir. Ayrıca, enerji seviyesi arttıkça malzemenin toplam deplasmanı da belirgin şekilde artmıştır. 10J’de deplasman 0.002 mm civarında sınırlı kalırken, 20J’de 0.004 mm’ye ve 30J’de yaklaşık 0.0055 mm’ye ulaşmaktadır. Yüksek deplasman değeri kuvvet-zaman eğrisindeki temas zamanının artmasını doğrulamaktadır. Bu durum, malzemenin uygulanan enerjiye karşı elastik deformasyondan plastik deformasyona geçiş gösterdiğini ve daha yüksek enerji seviyelerinde daha fazla deformasyon meydana geldiğini ifade etmektedir. Eğriler, 10J ve 20J seviyelerinde daha keskin bir azalma gösterirken, 30J’de malzemenin enerjiyi daha uzun bir deplasman aralığında absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Bu durum,

malzemenin süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinin arttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, malzemenin enerji absorpsiyon kabiliyeti ve darbe dayanımı açısından uygunluk değerlendirmesi yapılırken önemlidir. Tüm veriler kapalı eğri çizmiştir. Bu da vurucu çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ifade etmektedir.



Şekil 4.24. CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının farklı darbe enerjisi seviyelerindeki enerji - zaman grafiği

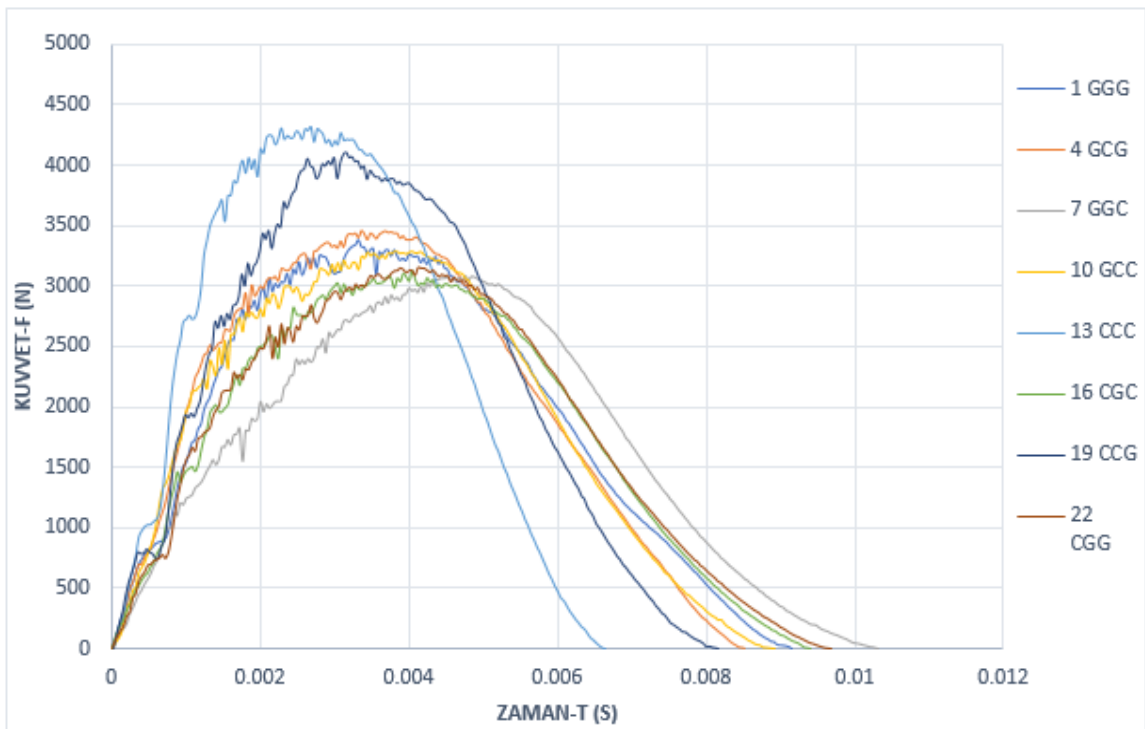
Grafik, karbon elyaf – cam elyaf – cam elyaf (CGG) olarak istiflenmiş numune malzemelerin düşük hızlı darbe testlerinde farklı enerji seviyelerine (10J, 20J, 30J) karşılık zamanla enerji (J) değişimini göstermektedir. Farklı enerji seviyelerinde malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Uygulanan darbe enerjisi arttıkça, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bu durum, malzemenin uygulanan darbe sırasında hasar veya deformasyonu absorbe ederek enerjiyi nasıl sönümlendiğini göstermektedir. Eğriler, enerji absorpsiyonunun ilk aşamalarda daha hızlı olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artması ile numune üzerinde daha hızlı bir hasara uğraticı etkinin söz konusu olduğu grafik ilk kısmının daha dik olmasından anlaşılmaktadır. 30J darbe enerjisinde, malzeme enerjiyi daha uzun süre boyunca absorbe ederek dayanım ve sünekliğini kanıtlamaktadır. Ancak, 10J ve 20J seviyelerinde enerji absorpsiyonunun daha erken sonlandığı, bu da malzemenin daha az deformasyon geçirdiğini veya kırılma sınırına daha erken ulaştığını göstermektedir. Bu

grafik malzemenin darbe direncini ve enerji absorpsiyon davranışını etkili bir şekilde analiz etmeye olanak tanır. 10J enerji seviyesi için yaklaşık 7.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 2.5J enerji geri tepilmiştir. 20J enerji seviyesi için yaklaşık 16.5J enerji emilmiş ve geriye kalan 3.5J enerji geri tepilmiştir. 30J enerji seviyesi için yaklaşık 26J enerji emilmiş ve geriye kalan 4J enerji geri tepilmiştir. Daha çok enerji emiliminin daha derin ve daha geniş yüzeyli hasar oluşumuna neden olduğu hasar analizi bölümünde anlatılmıştır.

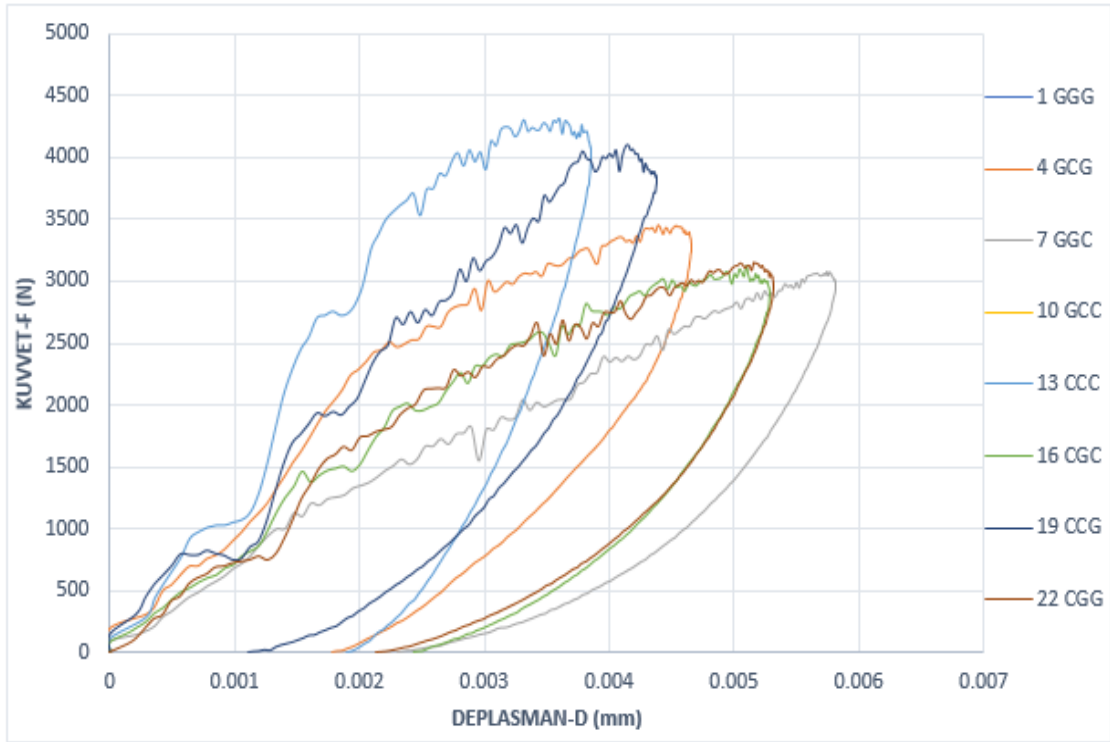
4.9. 10J-20J-30J Enerji Seviyelerinde Kuvvet - Zaman, Kuvvet - Deplasman ve Enerji - Zaman Grafiklerinin Karşılaştırması

4.9.1. 10J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması

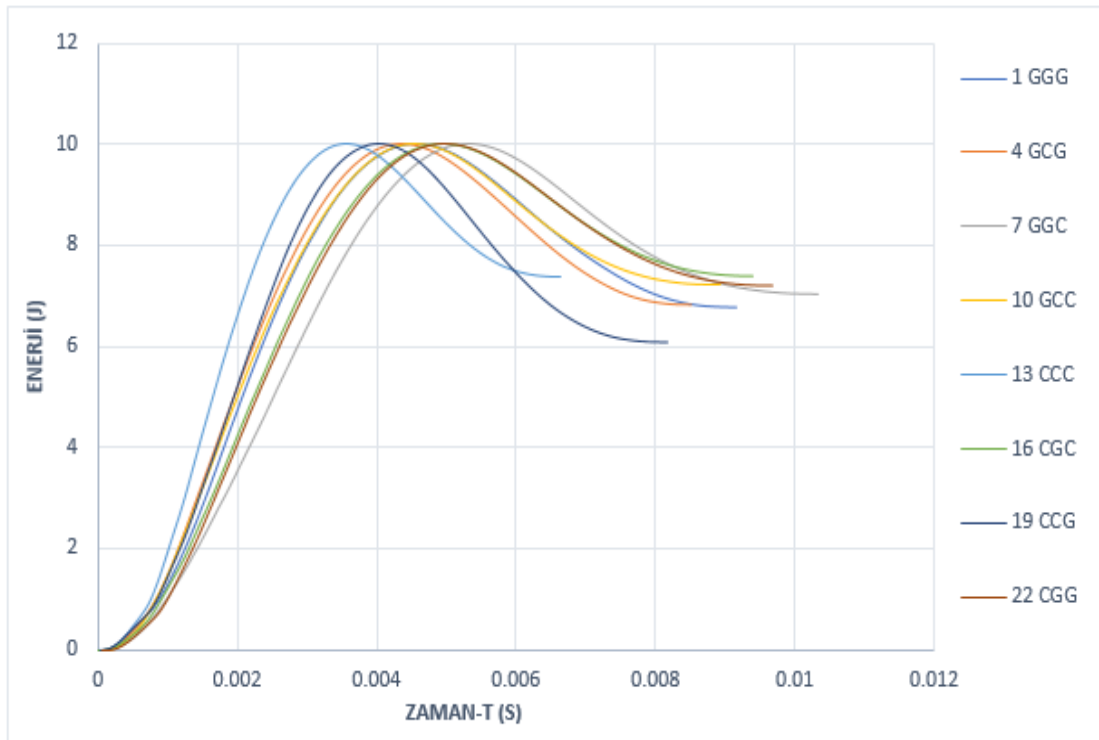
Üretilen numunelere 10J'lük enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerde karşılaştırmalı olarak açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.22.), (Şekil 4.23.) ve (Şekil 4.24.).



Şekil 4.25. 10J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - zaman grafiği



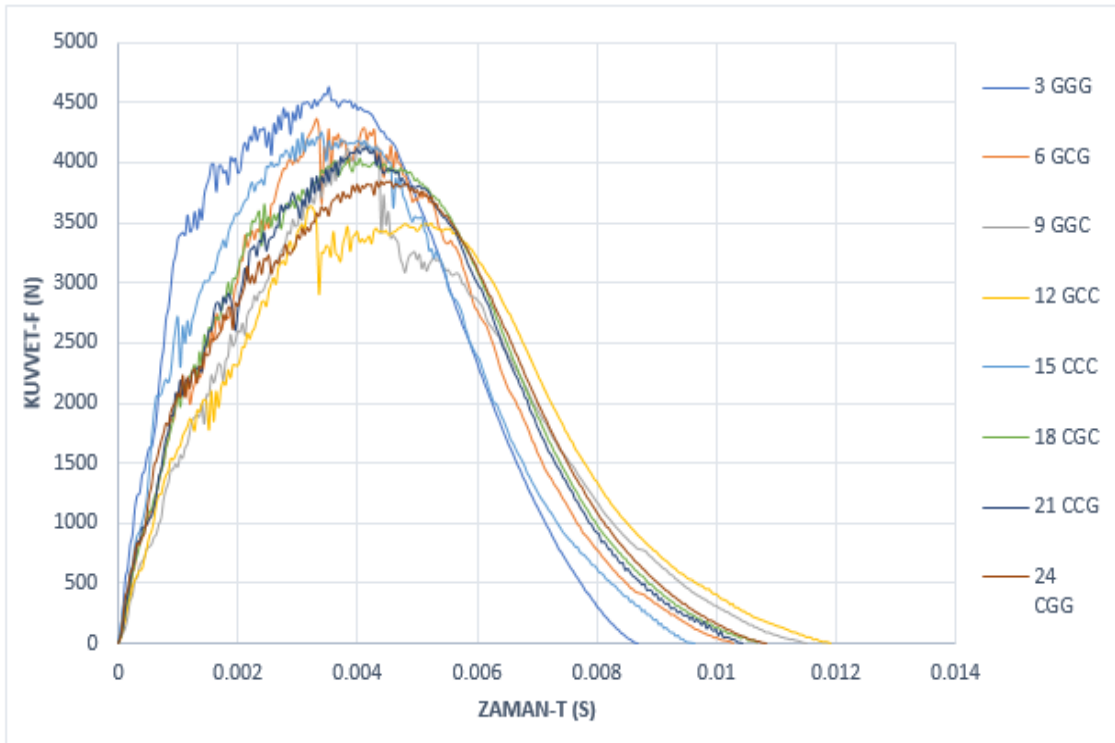
Şekil 4.26. 10J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - deplasman grafiği



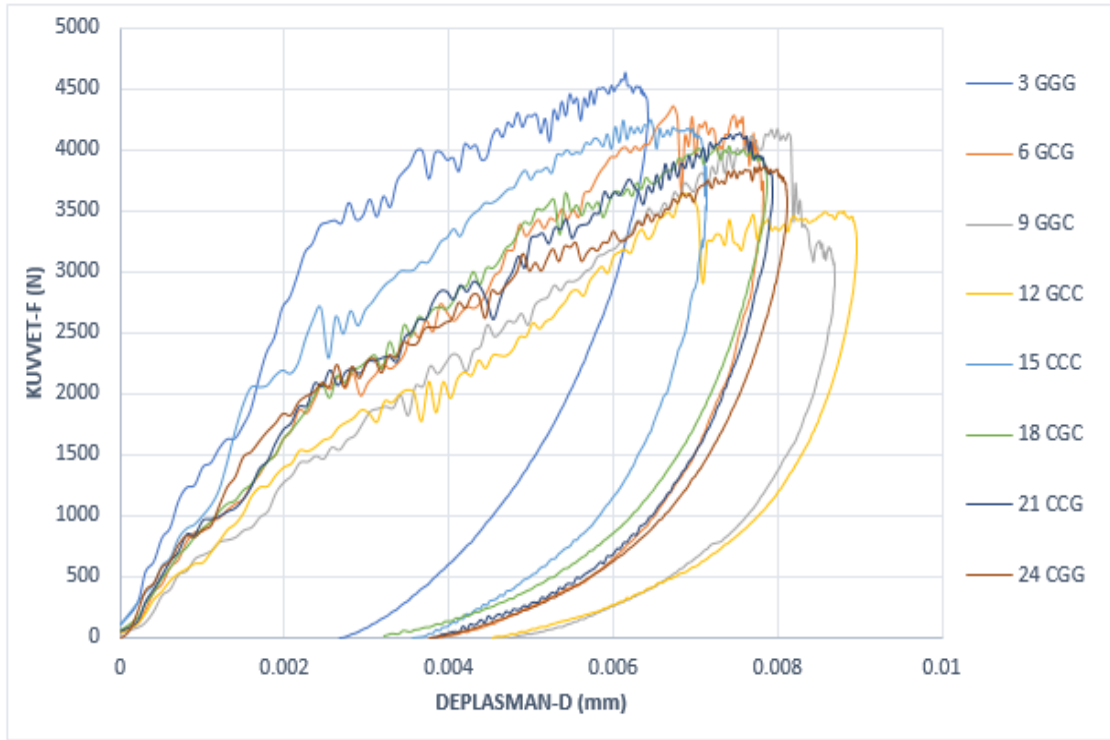
Şekil 4.27. 10J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının enerji - zaman grafiği

4.9.2. 20J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması

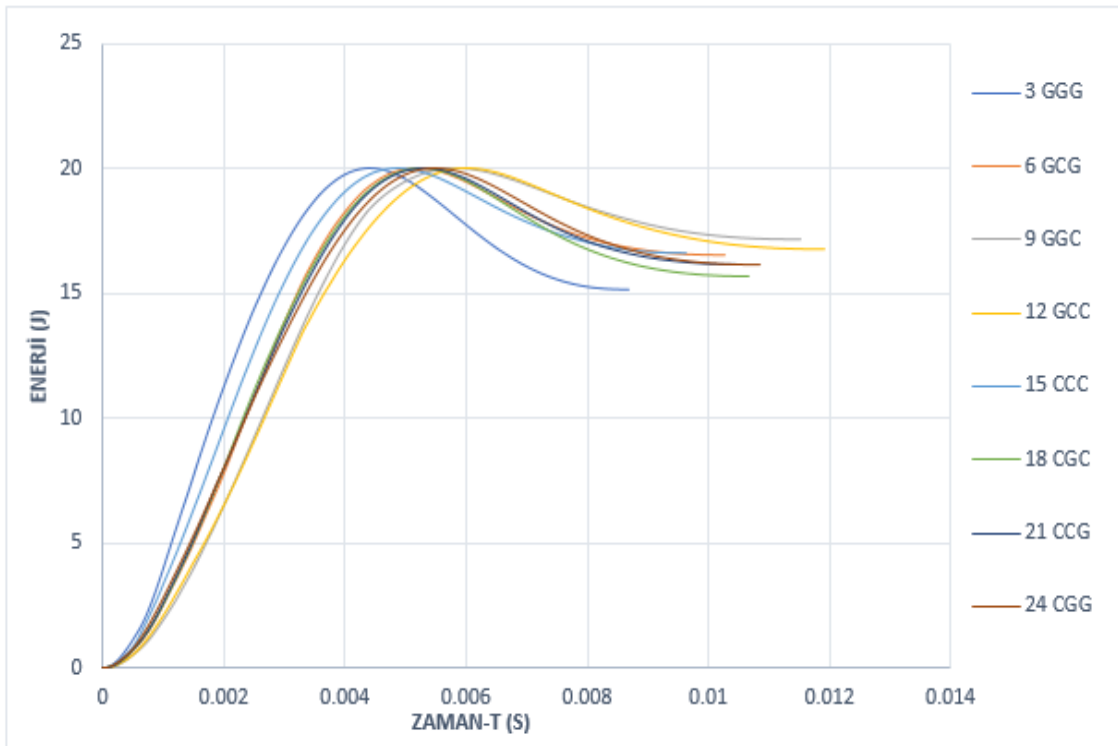
Üretilen numunelere 20J'lük enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerde karşılaştırmalı olarak açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.28.), (Şekil 4.29.) ve (Şekil 4.30.).



Şekil 4.28. 20J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - zaman grafiği



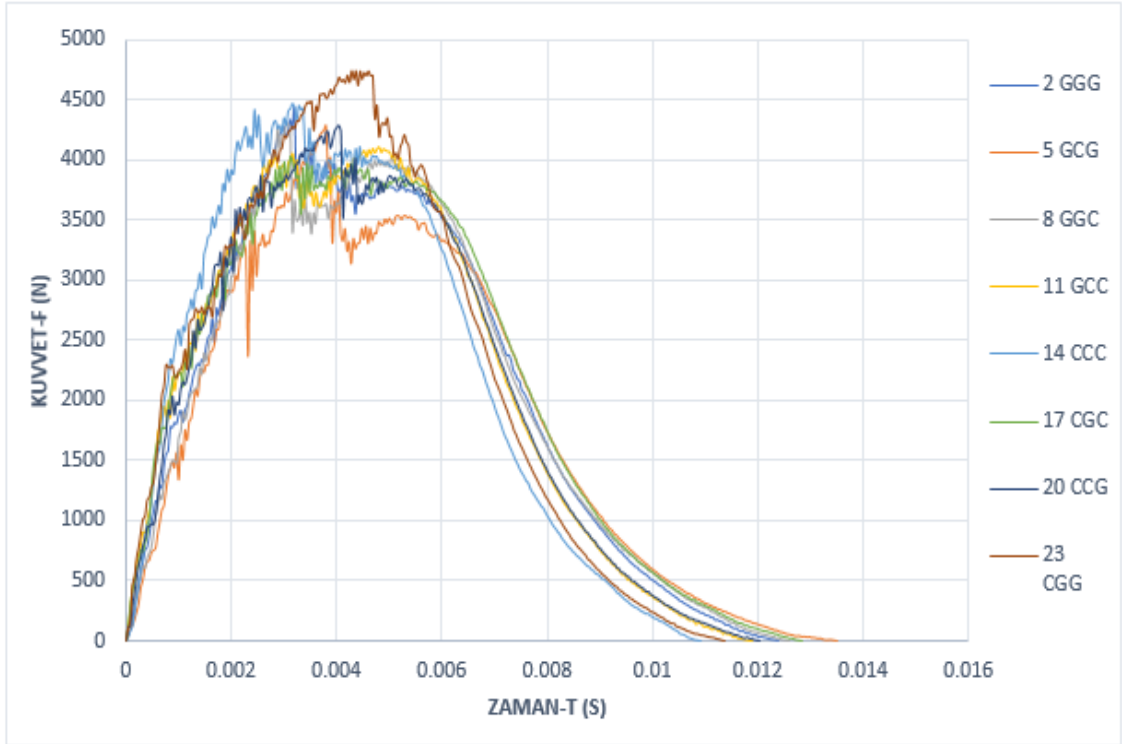
Şekil 4.29. 20J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - deplasman grafiği



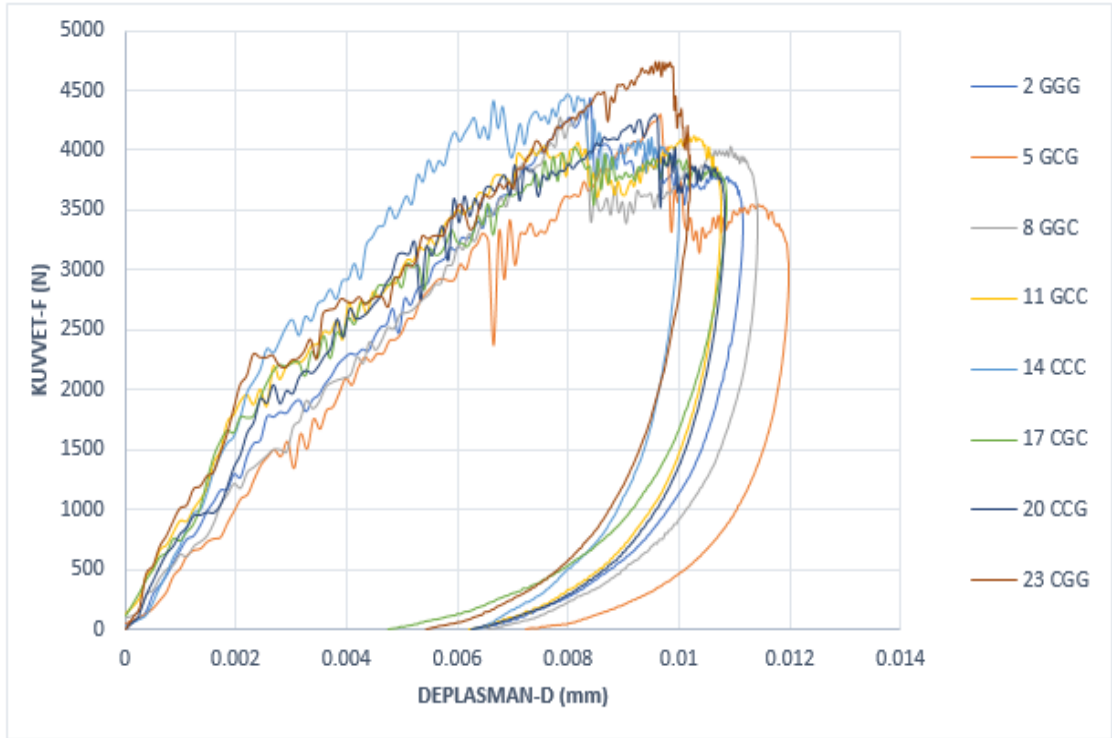
Şekil 4.30. 20J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının enerji - zaman grafiği

4.9.3. 20J enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet – zaman, kuvvet – deplasman ve enerji - zaman grafiklerinin karşılaştırması

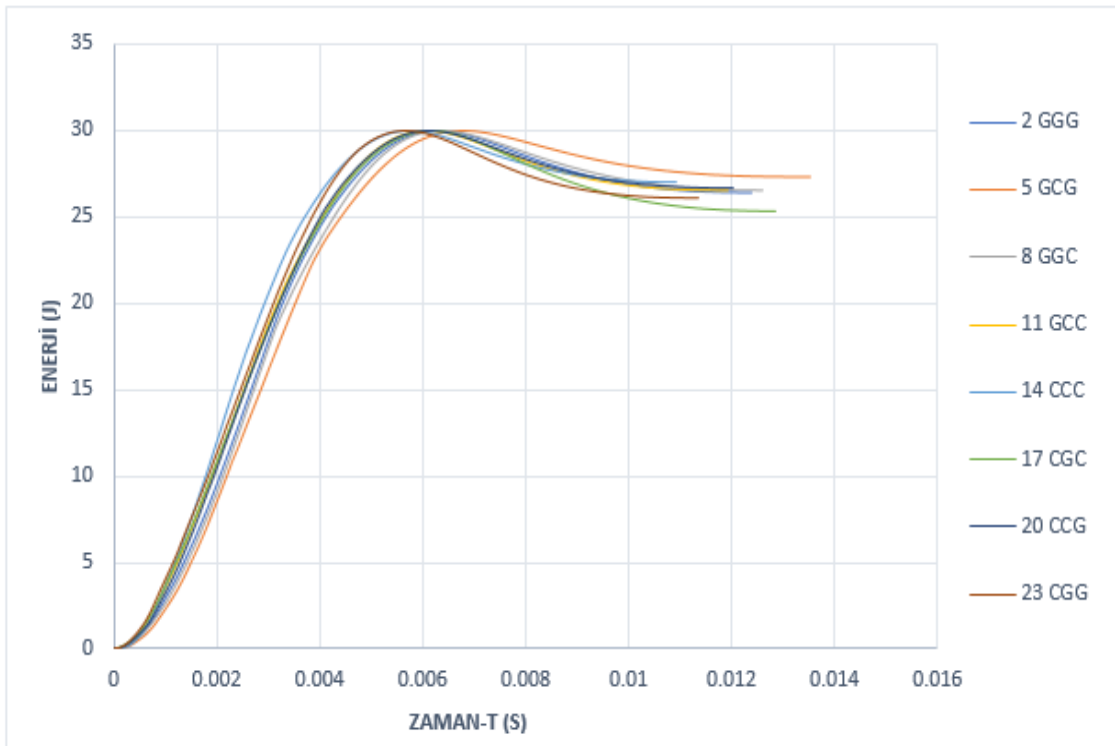
Üretilen numunelere 30J'lük enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerde karşılaştırmalı olarak açıklanmaya çalışılmıştır (Şekil 4.31.), (Şekil 4.32.) ve (Şekil 4.33.).



Şekil 4.31. 30J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - zaman grafiği



Şekil 4.32. 30J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının kuvvet - deplasman grafiği



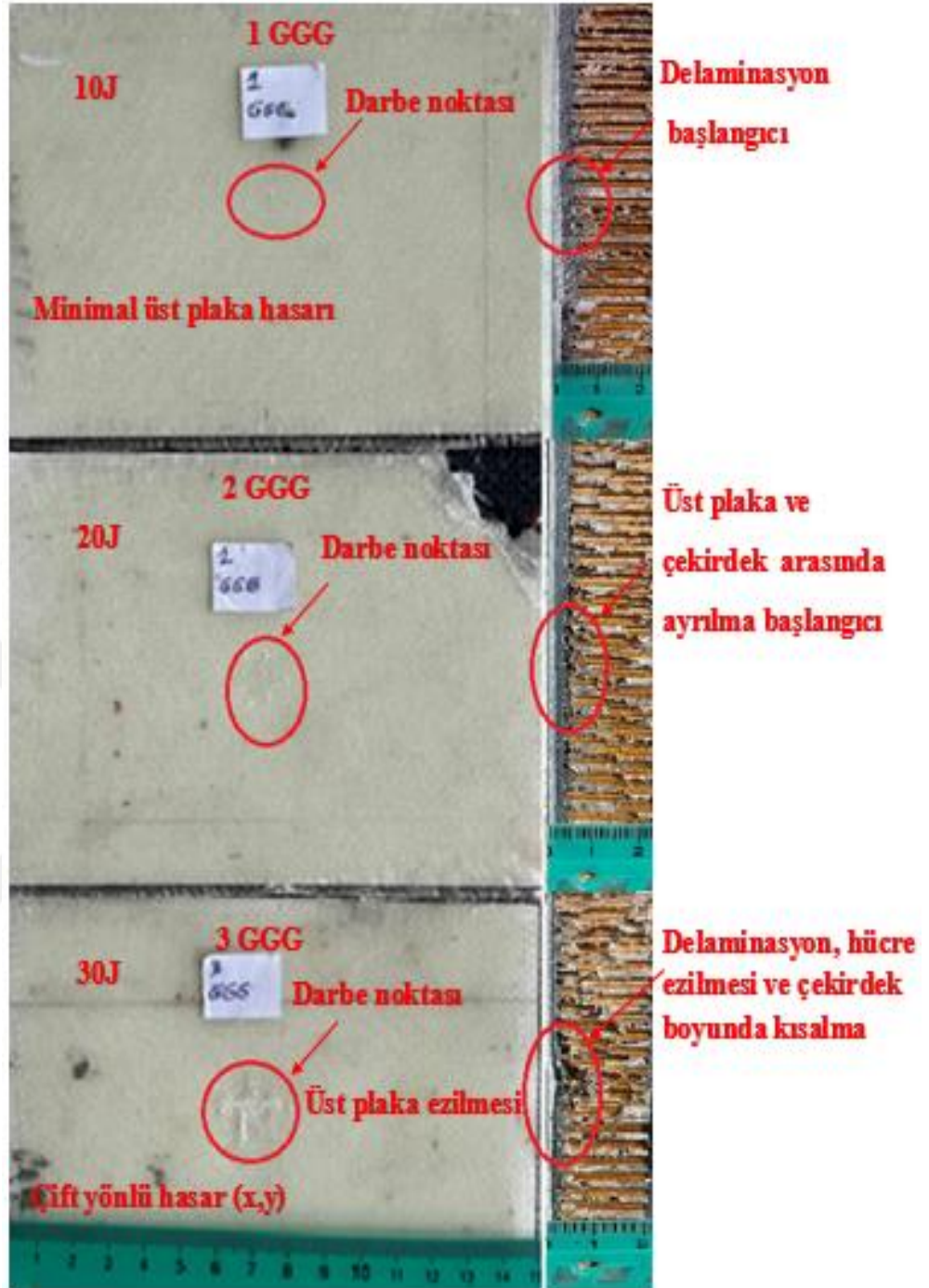
Şekil 4.33. 30J Enerji seviyesinde 8 farklı kaplamanın farklı istif durumuna göre hazırlanan bal peteği kanat yapılarının enerji - zaman grafiği

4.10. Hasar Analizi

4.10.1. Cam elyaf - cam elyaf - cam elyaf (GGG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.25. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (GGG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.25.).





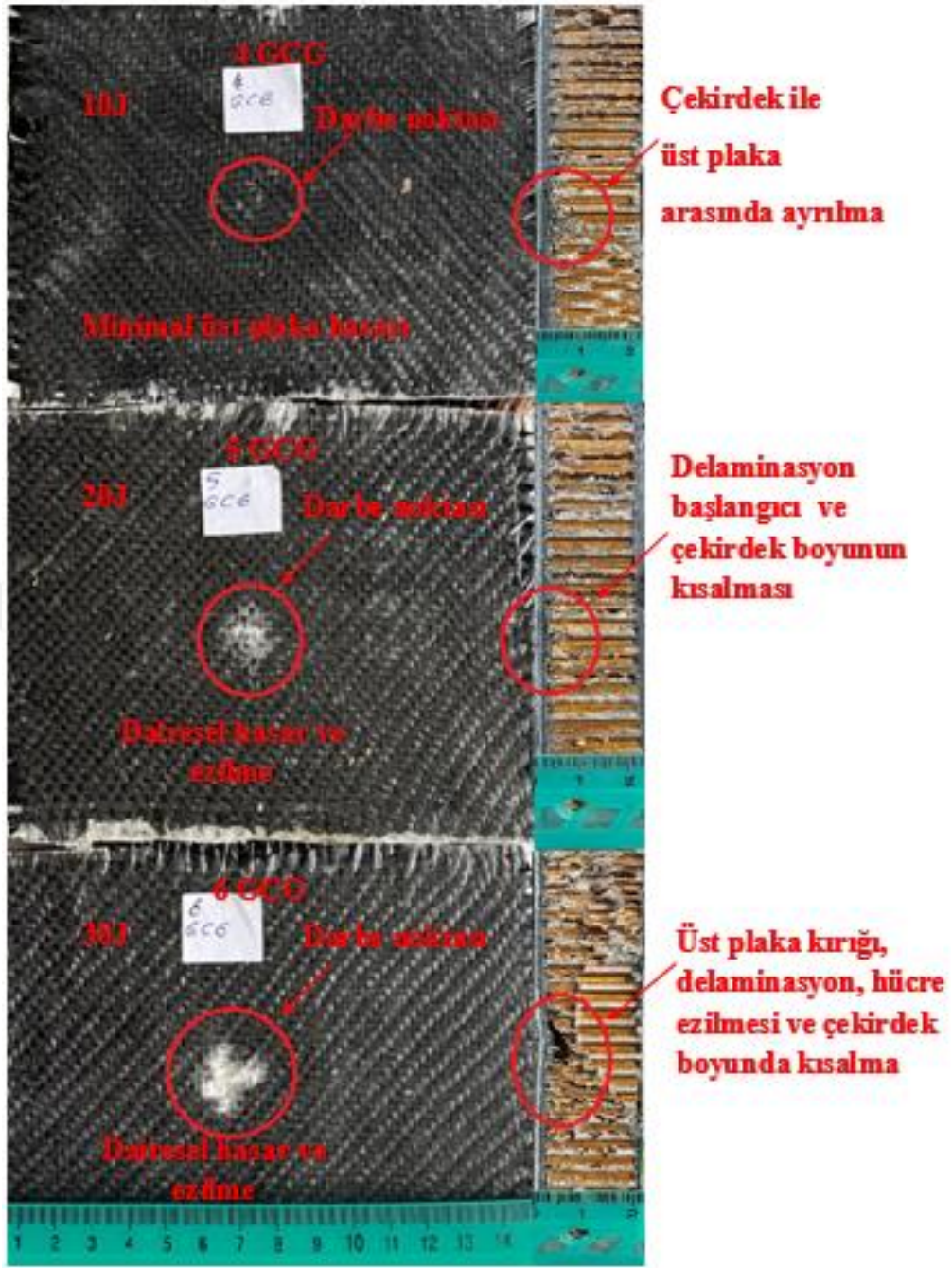
Şekil 4.25. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 1.2.3. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 1. numunenin üst plakasında minimal düzeyde hasar olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı ayrışmaların başlangıç seviyesinde olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 2. numuneye bakıldığında ise yine minimal düzeye yakın bir üst plaka hasarından bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcı seviyesinde olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 3. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın olduğu

hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada ezilmenin olduğu ve hasarın çift yönlü olduğu ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısalmalar olduğu ve bu kısalma miktarı yaklaşık 9 mm olarak ölçülmüştür.

4.10.2. Cam elyaf - karbon elyaf - cam elyaf (GCG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.26. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (GCG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.26.).



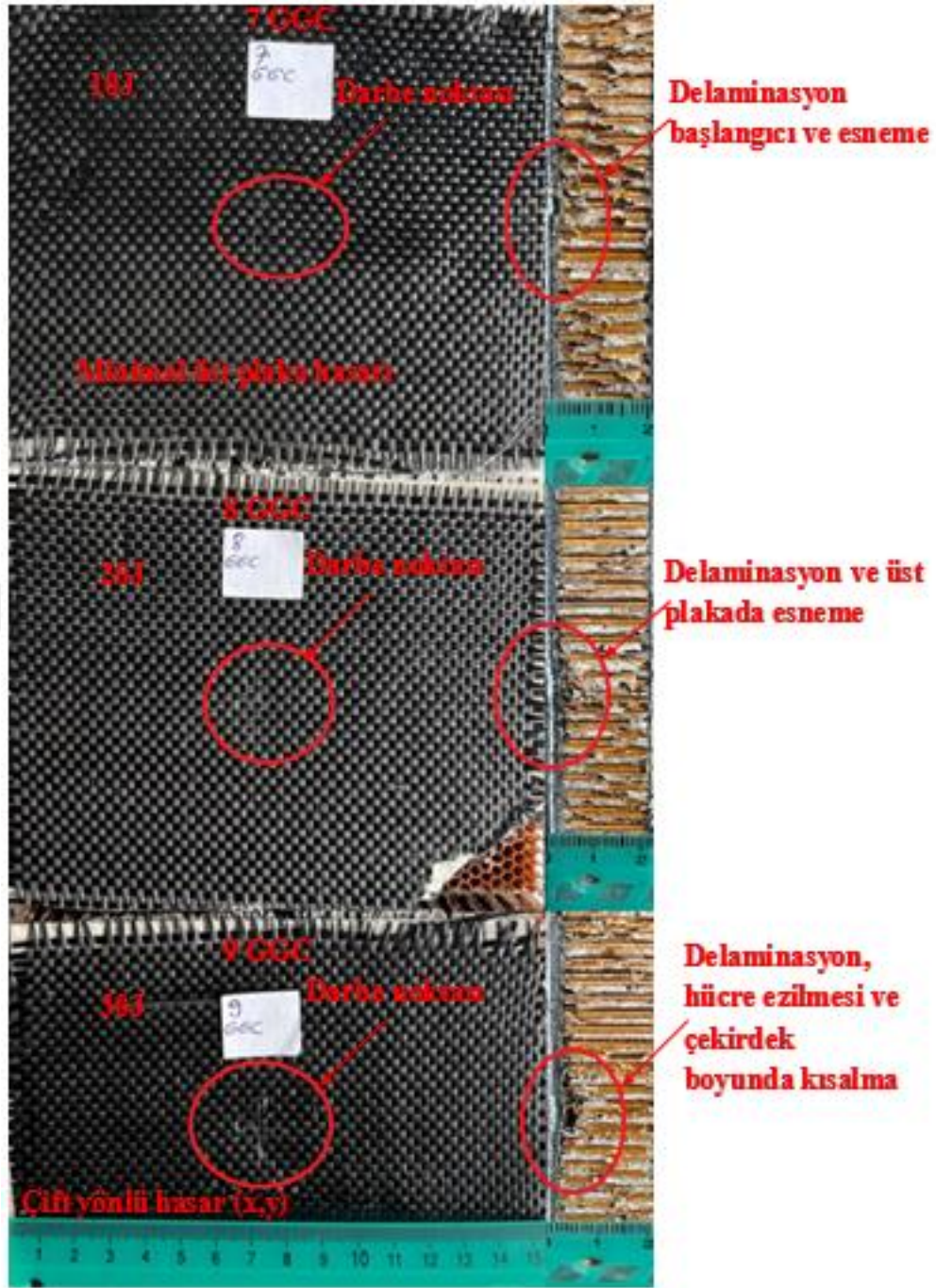
Şekil 4.26. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 4.5.6. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 4. numunenin üst plakasında minimal düzeyde hasar olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı ayrışmaların başlangıç seviyesinde olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 5. numuneye bakıldığında dairesel ve iki yönlü bir üst plaka hasarından bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcı seviyesinde olduğu ayrıca çekirdek boyunda ezilmeden dolayı kısılmalar görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 6. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın olduğu hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada

ezilmenin olduğu ve hasarın çift yönlü ve dairesel bir hasar olduğu ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısalmalar olduğu ve bu kısalma miktarı 8 mm olarak ölçülmüştür.

4.10.3. Cam elyaf - cam elyaf - karbon elyaf (GGC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.27. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (GGC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kürlleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.27.).



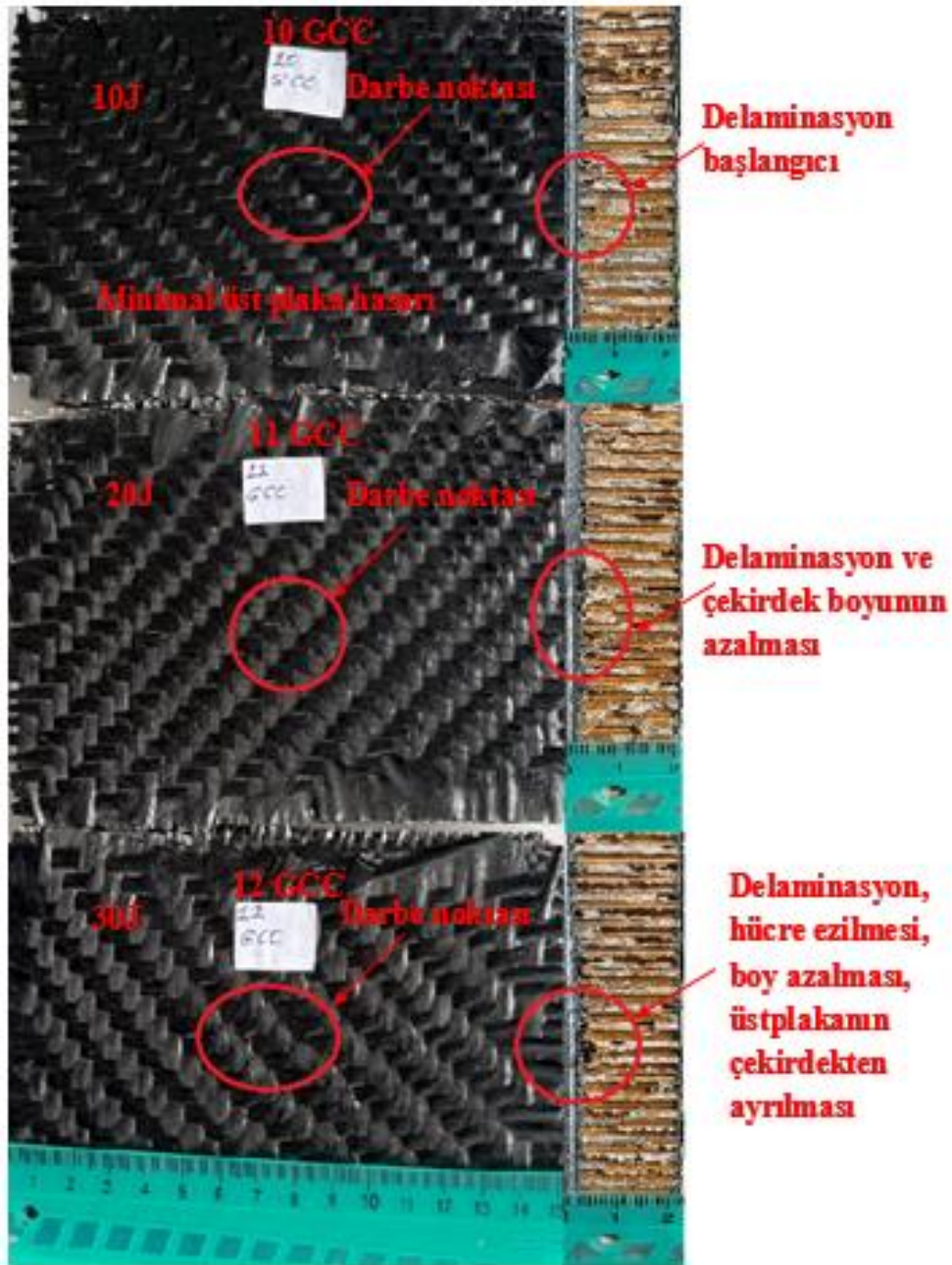
Şekil 4.27. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 7.8.9. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 7. numunenin üst plakasında minimal düzeyde hasar olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı ayrışmaların başlangıç seviyesinde olduğu ayrıca üst plakada esneme olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 8. numuneye bakıldığında yine minimal düzeyde üst plaka hasarından bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon olduğu bunun yanında üst plakada esnemenin olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 9. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye

kıyasla daha büyük bir hasarın olduğu hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada ezilmenin olduğu ve hasarın çift yönlü olduğu ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısaltmalar olduğu ve bu kısalma miktarı yaklaşık 5 mm olarak ölçülmüştür.

4.10.4. Cam elyaf - karbon elyaf - karbon elyaf (GCC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.28. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (GCC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.28.).



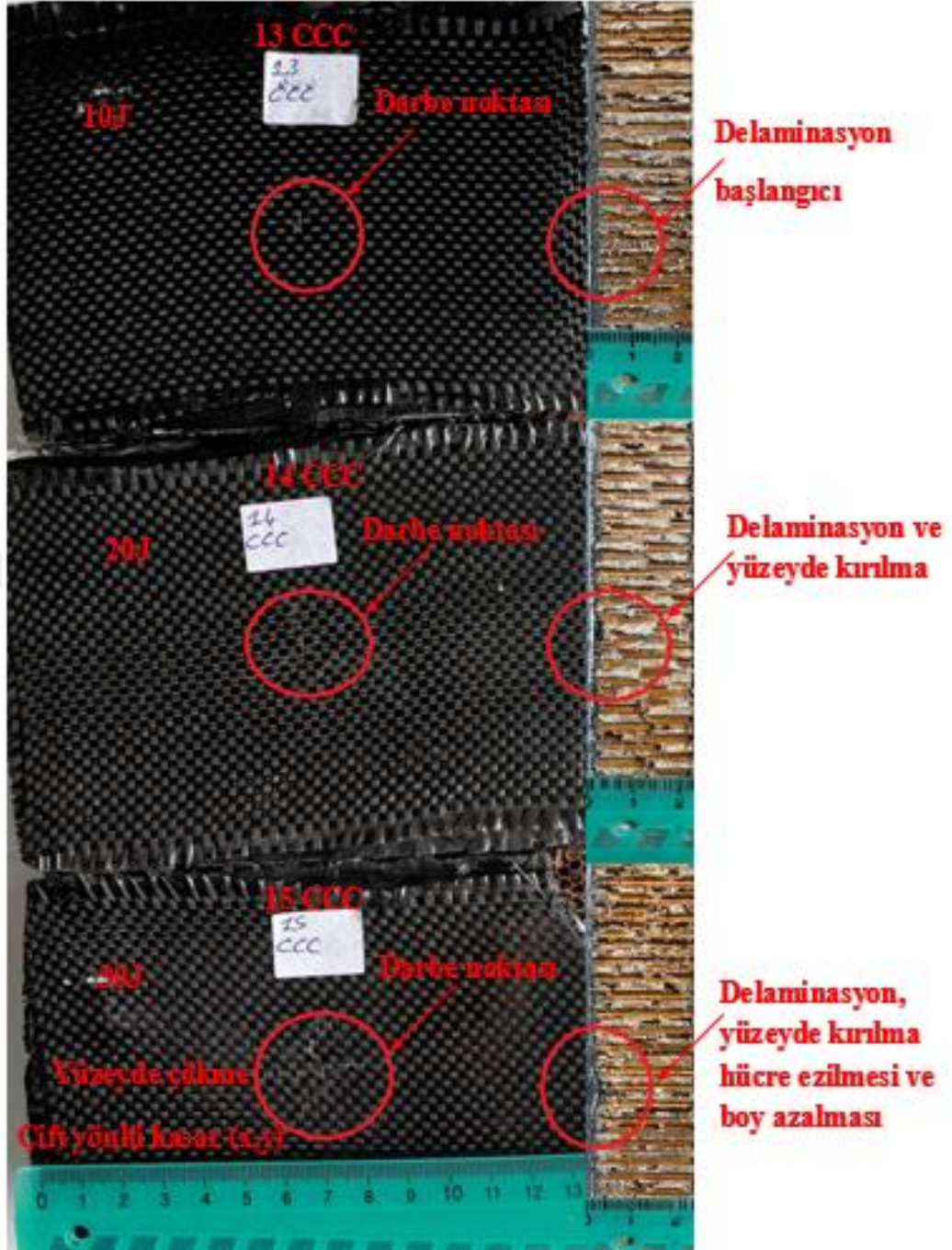
Şekil 4.28. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 10.11.12. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 10. numunenin üst plakasında minimal düzeyde hasar olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı çatlaklara sebep olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 11. numuneye bakıldığında yine minimal düzeyde üst plaka hasarından bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon olduğu bunun yanında çekirdek boyunda kısılmalara neden olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 12. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın olduğu hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada ezilmenin olduğu ve ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek

boyunda kısalmaların olduğu ve bu kısalma miktarı 4 mm olarak ölçülmüştür. Bunun yanında üst plaka ile bal peteği çekirdek yapın birbirinden ayrıldığı görölmektedir.

4.10.5. Karbon elyaf - karbon elyaf - karbon elyaf (CCC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.29. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (CCC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemleri ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.29.).



Şekil 4.29. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 13.14.15. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 13. numunenin üst plakasında minimal düzeyde hasar oluştuğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcına sebep olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 14. numuneye bakıldığında yine minimal düzeyde üst plaka hasarından bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon oluştuğu bunun yanında çekirdek boyunda kısalmalara neden olduğu ayrıca üst plakada kırılmalara neden olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 15. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın oluştuğu hasarın

büyükliğünden dolayı üst plakada ezilmenin olduğu ve ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısaltmaların olduğu ve bu kısalma miktarı 3 mm olarak ölçülmüştür. Bunun yanında üst plakada çökmenin olduğu ve çift yönlü hasara neden olduğu görülmektedir.

4.10.6. Karbon elyaf - cam elyaf - karbon elyaf (CGC) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.30. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (CGC) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.30.).



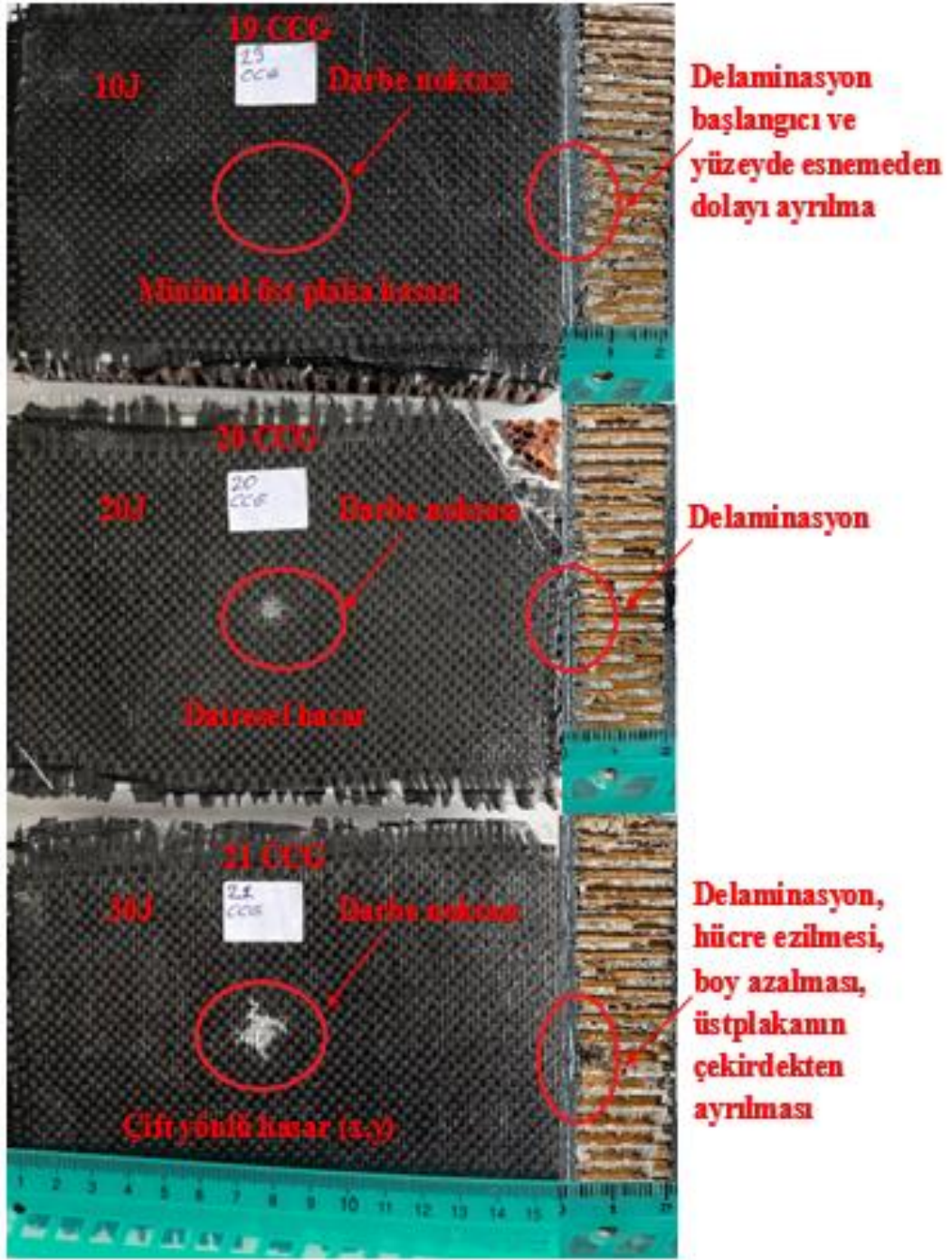
Şekil 4.30. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 16.17.18. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 16. numunenin üst plakasında küçük bir hasar olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcına sebep olduğu bunun yanında üst plakada çatlama neden olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 17. numuneye bakıldığında üst plakada çatlaklardan bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon olduğu bunun yanında çekirdek boyunda kısılmalara neden olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 18. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın olduğu hasarın büyüklüğünden dolayı üst

plakada çökmenin olduğu ve ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısaltmaların olduğu ve bu kısalma miktarı 6 mm olarak ölçülmüştür. Bunun yanında üst plakada çökmenin olduğu ve çift yönlü hasara neden olduğu görülmektedir.

4.10.7. Karbon elyaf - karbon elyaf - cam elyaf (CCG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.31. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (CCG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.31.).



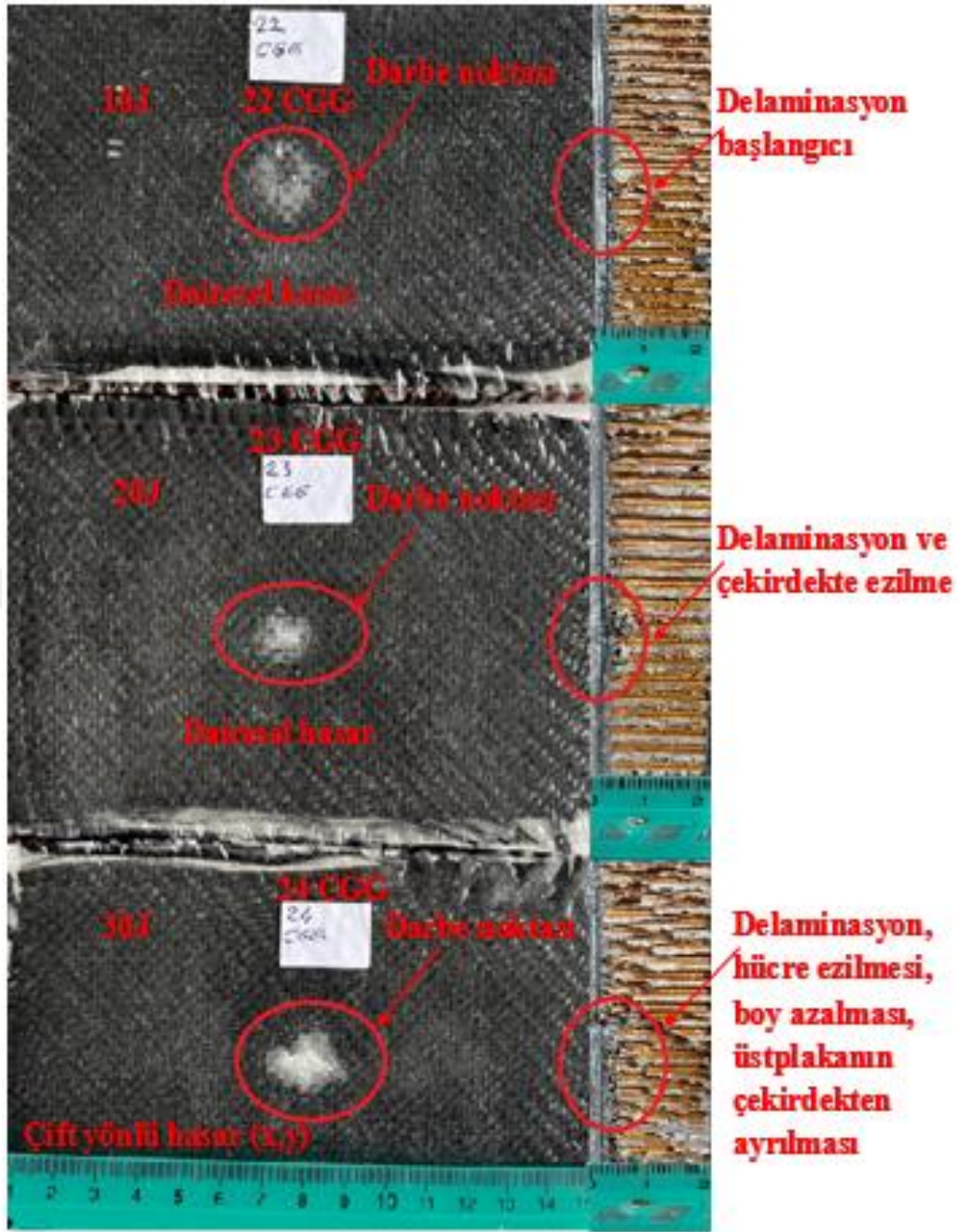
Şekil 4.31. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 19.20.21. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 19. numunenin üst plakasında küçük bir hasar olduğu bu hasarın minimal düzeyde olduğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcına sebep olduğu bunun yanında üst plakada esnemediği dolay ayrılmaya neden olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 20. numuneye bakıldığında üst plakada dairesel bir hasardan bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon olduğu bunun yanında çekirdek boyunda kısalmalara neden olduğu görülmektedir. 30J enerji

seviyesinde 21. numunenin üst plakasında diğerk iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın oluştuğuh hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada çökmenin olduğu ve ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısaltmaların olduğu ve bu kısalma miktarı 6 mm olarak ölçülmüştür. Bunun yanında üst plakada çökmenin olduğu ve çift yönlü hasara neden olduğu görülmektedir.

4.10.8. Karbon elyaf - cam elyaf - cam elyaf (CGG) malzemenin 10J-20J-30J enerji seviyelerinde hasar analizi

Şekil 4.32. İncelendiğinde 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm cam elyaf-cam elyaf – cam elyaf (CGG) malzemenin el yatırma yöntemi ve üst üste istiflenerek kütleme işlemi ile üretilen numunelere farklı enerji seviyelerinde (10J-20J-30J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmış, numuneler el testeresi yardımıyla darbe noktasından kesilerek kesitleri alınmış ve fotoğraf makinesi yardımıyla elde edilen görüntüler üzerinden hasar analizleri yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.32.).



Şekil 4.32. 10J-20J-30J enerji seviyelerinde 22.23.24. numunelerin hasar analiz görüntüsü

10J enerji seviyesinde 22. numunenin üst plakasında dairesel bir hasar oluştuğu ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon başlangıcına sebep olduğu görülmektedir. 20J enerji seviyesi için 23. numuneye bakıldığında üst plakada dairesel bir hasardan bahsetmek mümkün ve üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon oluştuğu çekirdekte ezilmenin olduğu bunun yanında çekirdek boyunda kısılmalara neden olduğu görülmektedir. 30J enerji seviyesinde 24. numunenin üst plakasında diğer iki numuneye kıyasla daha büyük bir hasarın oluştuğu hasarın büyüklüğünden dolayı üst plakada

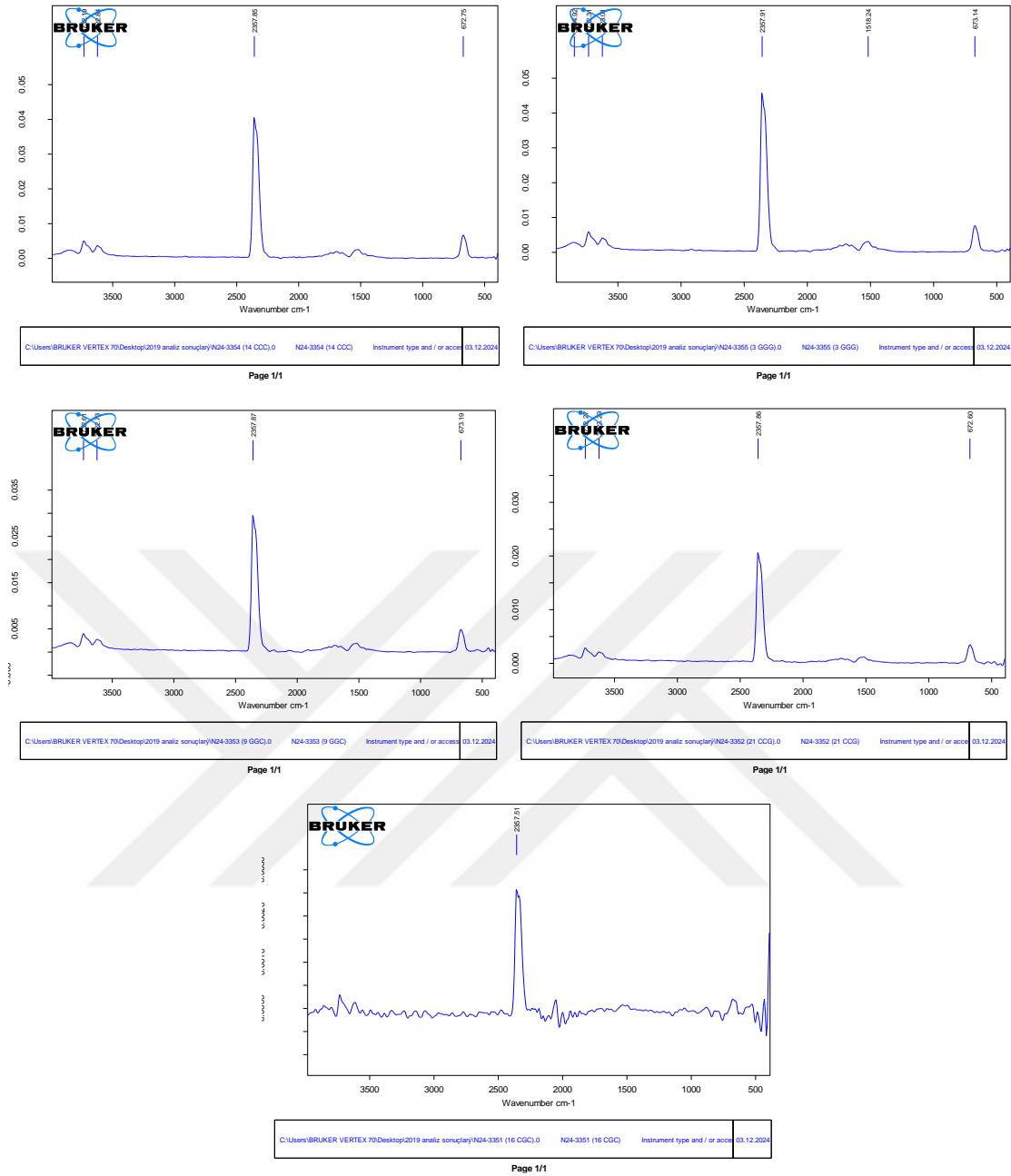
çökmenin olduğu ve ayrıca üst plaka ile bal peteği çekirdek yapı arasında darbeden dolayı delaminasyon, hücre ezilmesi ve çekirdek boyunda kısaltmaların olduğu ve bu kısalma miktarı 2.5 mm olarak ölçülmüştür. Bunun yanında üst plakada çökmenin olduğu ve çift yönlü hasara neden olduğu görülmektedir.

4.11. FTIR Analizi

FTIR (Fourier Transform Infrared Spektroskopi) analizine ait bir spektrumu temsil etmektedir. FTIR analizi, bir numunenin yapısal yapısındaki fonksiyonel parçalar ve bağlantı detaylarının ayrıntıları için kullanılan bir tekniktir. Spektrumda belirgin bir pik, örnek numunede spesifik bir kimyasal bağ veya işlevsel grup varlığına işaretlenir. Grafikte, dalga boyu (genellikle cm^{-1} cinsinden verilir) x içeriğinde ve absorpsiyon veya iletimler (y içeriği) görülür. En yüksek dağılımda görülen pikler, analiz edilen karakteristik seçim modlarını temsil eder. Örneğin, 1700 cm^{-1} civarında bir pik karbonil ayrıştırılabilir (C=O) işaretlenebilirken, $3200\text{-}3600 \text{ cm}^{-1}$ aralığında bir geniş pik oksijene bağlı OH gruplarının varlığını gösterebilir.

2300 cm^{-1} dalga boyunda pik gözlemlenmesi genellikle karbon monoksit (CO) ile ilişkilendirilebilir. Bu pik, karbon elyafın üretiminde kullanılan malzemeler, üretim koşulları veya yüzeydeki kimyasal bileşenler sebebiyle ortaya çıkabilir. 3550 cm^{-1} dalga boyunda gözlemlenen pik genellikle O-H (hidroksil) gruplarının gerilme titreşimleriyle ilişkilendirilir. Bu, karbon veya cam elyafın yüzeyinde bulunan kimyasal gruplar veya çevresel etkilerden kaynaklanabilir. Elyafı kompozit numunelerinde, reçineden kaynaklanan hidroksil grupları bu bölgede pik oluşturmaktadır. $500\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$ aralıkta oluşan küçük tepelikler Si-O-Si gruplarına dayandırılmıştır ve cam elyaf ile ve epoksi matriks etkileşimi ile ilişkilendirilmiştir.

Bu spektruma göre, belirgin pikler numunelerin ürettiği fonksiyonel gruplar hakkında bilgi verir. Keskin pikler, yüksek düzenli bağ yapıları veya güçlü seçim modlarını gösterirken, daha geniş pikler genellikle depolama bağları gibi daha düzenli yapılarla bulunur.



Şekil 4.33. CGC, CCG, GGC, CCC ve GGG düzenine sahip numunelerin FTIR sonuçları

Grafikteki en belirgin özellik, yaklaşık 1500-1800 cm⁻¹ aralığında yer alan keskin bir pik olarak görülmektedir. Bu pik, karbonil seçimi (C=O) ait karakteristik bir seçime işaret edebilir. Karbonil oranları genellikle esterler, ketonlar, asitler veya amidler gibi fonksiyonel gruplarda görülür. Daha geniş bir bant, yaklaşık 3200-3600 cm⁻¹ aralığında yer alabilir ve bu durum, hidrojen bağlarına sahip OH gruplarına atfedilebilir. Grafikteki daha düşük dalga boylarında (400-1500 cm⁻¹) yer alan kompleks pik desenleri, parmak izi bölgesi olarak biliniyor. Bu bölge, numunenin kapsamı benzersiz bir imzasını içerir ve genellikle bir numunenin kesin olarak dağıtılması için

kullanılır. Spektrumda görülen düşük yoğunluk ve geniş pikler, polimerik yapıların varlığına işaret edebilir.

Spektrumda 1500-1800 cm^{-1} genişliğinde belirgin bir pik bulunur ve bu karbonil parçalanmaya (C=O) işaretlenebilir. Karbonil ayrışmasına ait bu karakteristikler pikler, ketonlar, esterler, amidler veya karboksilik asitler gibi fonksiyonel varlığın varlığı ile bulunabilir. Bu özellikler, organik moleküllerin bölgelerinin doğrul

Spektral analizin önemli bir diğer bölgesi, 2800-3200 cm^{-1} aralığında görülen piklerdir. Bu bölge, CH bağlarının zayıflama seçimlerine işaret eder ve genellikle alifatik hidrokarbonların varlıklarını temsil eder. Ayrıca, 3200-3600 cm^{-1} genişliğinde geniş bir bant görülebilmesi durumunda bu, hidrojen bağları içeren OH gruplarının (alkoller veya fenoller gibi) varlığına işaret edebilir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapmış olduğumuz çalışmada 20 mm kalınlık ve 100 mm x 150 mm ölçülerinde farklı dokuma şekilleri ve istif düzenine sahip cam elyaf ve karbon elyaflardan oluşan bal peteği planör gövde / kanat malzemesi el yatırma yöntemi ile istiflenerek başarıyla kürlenmiştir. Üretilen numunelerin 10J - 20J ve 30J enerjide düşük hızlı darbe üzerindeki etkileri araştırılmış ve test sonucunda meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Sonuçlara göre elde edilen çıktılar aşağıdaki gibidir:

1- Üretilen bal peteği numunelerin tümü kapalı deplasman eğrisi çizmiştir. Bu da vurucu ucun çarpması sonrasında numunelerde herhangi bir delinme hasarının oluşmadığını ya da vurucunun numune içerisine saplanmadığını ifade etmektedir.

2- Toplam temas süresinin maksimum yer değiştirme değerini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.

3- Tüm numuneler arasında, CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 4300 N olarak hesaplanarak en yüksek değeri verirken GGC ve CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 10J maksimum kuvvet değeri 3100 N olarak hesaplanarak en düşük değeri vermiştir.

4- GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 4600 N olarak hesaplanarak en yüksek değeri verirken GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 20J maksimum kuvvet değeri 3700 N olarak hesaplanarak en düşük değeri vermiştir.

5- CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4700 N olarak hesaplanarak en yüksek değeri verirken CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısının 30J maksimum kuvvet değeri 4000 N olarak hesaplanarak en düşük değeri vermiştir.

6- Absorbe edilen değerler genellikle birbirine yakın olmakla birlikte 10J enerji seviyesi için en yüksek sonuçlar CCC, CGC ve CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarında (7.5J) elde edilmiştir. Diğer numunelerde ise en düşük sonuçlar (7J) elde edilmiştir. 20J enerji seviyesinde, en yüksek absorbe edilmiş enerji sonuçları GCG ve GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarında (17J) elde edilmiştir. En düşük sonuçlar CCG, GGG ve GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarında (15J) elde edilmiştir. 30J enerji seviyesi için ise GCG formunda hazırlanmış bal peteği

kanat yapısında 27.5 J değeriyle en yüksek enerji emilimi gözlemlenirken en düşük enerji emilimi 25 J ile CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısında elde edilmiştir.

7- Darbe enerjisinin artışı absorbe edilen enerjiyi artırmaktadır. Absorbe edilen enerji 10J enerji seviyesi için CCC, CGC ve CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarındaki numunelerde daha fazla, 20J enerji seviyesi için GCG ve GGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarındaki numunelerde daha fazla ve 30J enerji seviyesi için GCG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde daha fazladır.

8- Darbe enerjisinin artması genel olarak beklenildiği gibi temas kuvvetini dolayısıyla da deplasman değerlerini artırmaktadır. Temas kuvveti açısından en düşük değer GGC ve CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapılarındaki numunelerde 10 J değerinde 3100 N olarak, en yüksek değer ise CCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde 10 J değerinde 4300 N olarak belirlenmiştir. Temas kuvveti açısından en düşük değer GCC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde 20 J değerinde 3700 N olarak, en yüksek değer ise GGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde 20 J değerinde 4600 N olarak belirlenmiştir. Temas kuvveti açısından en düşük değer CGC formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde 30 J değerinde 400 N olarak, en yüksek değer ise CGG formunda hazırlanmış bal peteği kanat yapısındaki numunelerde 30 J değerinde 4700 N olarak belirlenmiştir.

9- Darbe enerjisinin artışına bağlı olarak numunelerde gözlemlenen hasar tipleri ezilme ve çökme şeklindedir.

10- Malzeme zerine uygulanan enerjinin artırılması temas kuvvetinin büyük olmasına dolayısıyla daha büyük bir grafik eğrisi elde edilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte hasar alanlarının da arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Yolcular Karaoglu ve ark. (2021), Aerospace Industry and Aluminum Metal Matrix Composites-International Journal of Aviation Science and Technology, Volume 2, Issue 2, 73-81
2. Ödemiş (2023), Ahşap Plakalı Uçak Kanatlarında Nano Kompozit Takviyeli Farklı Kalınlıklardaki Bal Peteği Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi - Selçuk Üniversitesi - Havacılık Teknolojileri Anabilim Dalı
3. Jasım (2021), Alüminyum Plakalar ile Takviyelendirilmiş Alüminyum Köpük Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi (Erciyes Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi)
4. Işıkdoğan (2022) Analysis Of A Bird Strike On The External Fuel Tank Of A Jet Trainer Aircraft (Hacettepe Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü)
5. McCullough (2015), “The Wright Brothers. Simon and Schuster”.
6. Liu ve ark. (2023), Bird Impact Response And Damage Mechanism Of 3d Orthogonal Woven Composite Aeroengine Blades
7. Çelik (2022), Çerçeve Destekli Kompozit Malzemeler İçin Düşük Hızlı Darbe Dayanımlarının İncelenmesi ve Etkilerinin Belirlenmesi (Başkent Üniversitesi- Savunma Sistemleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı)
8. <https://strasam.org/savunma/havacilik-ve-uzay-sanayii/ucak- yapiminda- kullanılan-malzemeler-1744>
9. Tırpancı (2011), Çeşitli Dokuma Kumaşlar İle Takviyeli Bazı Ahşap Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Uludağ Üniversitesi–Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı)
10. Kara (2012), Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarımlı Çtp Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı (Selçuk Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
11. Aslan ve Karakuzu (2007), Düşük Hızlı Darbe Yüküne Maruz Tabakalı Kompozit Plakaların Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi (XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 3-7, Isparta)
12. Thomas (2003), “100 Years of Sailplane Design and Beyond,” Technical Soaring, 27(3-4), p. 61-74.
13. Metin (2008), E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi (Selçuk Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
14. Karsandik ve ark. (2023), Impact Behavior Of Sandwich Composites For Aviation Applications: A Review

15. Muniraj ve Sreehari (2012), Impact Damage Assessment Of Sandwich Structures With Cfrp Face Sheets Reinforced By Cnts In Thermal Environment (School of Mechanical Engineering, Sastra Deemed to be University, Thanjavur 613401, India)
16. Zang ve Zhou (2022), Investigation of bird-strike resistance of composite sandwich curved plates with lattice/foam cores (College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211100, China)
17. Öztürk ve Gündoğdu (2020), İHA Kanatlarında Kullanılan Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Yapısal Performanslarının Sayısal Simülasyonlar ile İncelenmesi (İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3): 1928-1942, 2020 Journal of the Institute of Science and Technology, 10(3): 1928-1942, 2020 ISSN: 2146-0574, eISSN: 2536-4618)
18. Ciğercioğlu (2023), İnsansız Hava Aracına Kuş Çarpması Probleminin Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizi İskenderun Teknik Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
19. Karaoğlu (2022), Karbon Kompozit Borularda Nanokil Nanotüp Takviyesinin Düşük Hızlı Darbe Etkisinin İncelenmesi Necmettin Erbakan Üniversitesi – Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
20. Işık (2008), Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme ve Burulma Yüğü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi (İstanbul Teknik Üniversitesi - Uçak ve Uzay Mühendisliği)
21. <https://www.turkair.org/planorler-hava-araclari-serisi>
22. Gülcan (2019), Kuş Çarpmaları ve Uçaklara Etkileri Üzerine Bir Gözden Geçirme Çalışması (Mühendis ve Makina cilt 60, sayı 696, s. 192-220, Derleme Makale)
23. Kahvecioğlu (2019), Kuş Çarpmasına Maruz Helikopter Kanopilerinin Yapısal Davranışı (İstanbul Teknik Üniversitesi - Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı)
24. Hasılcı (2022), Kuş Çarpmasına Maruz Kalan Kompozit Yapıların Analizinde Tam Bağlantılı Sinir Ağları Kullanılarak Tahmin Modelinin Geliştirilmesi (Yıldız Teknik Üniversitesi – Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı)
25. Erteği (2022), Kuş Çarpmasına Uğramış Radom'ların Onarıldıktan Sonra Çarpmaya Karşı Performansının İncelenmesi (Başkent Üniversitesi - Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı)
26. Temel (2015), Melez Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Cevabına Numune Genişliğinin Etkisinin İncelenmesi (Selçuk Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)

27. Keskin ve ark. (2019), Motorsuz Uçuş Prensibi: Planör (Mühendis ve Makina cilt 60, sayı 695, s. 165-177, 2019 Derleme Makale)
28. Nomer (2019), Nanopartikül İçeren Karbon Elyaf Epoksi Boruların Tekrarlı Darbe Sonrası Hasar Davranışları (Mersin Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
29. Meo ve ark. (2003), Numerical Simulations Of Low-Velocity Impact On An Aircraft Sandwich Panel (Structures and Materials Group, College of Aeronautics, Cranfield University, Bedford MK43 0AL, UK b GKN Aerospace Services, Cowes, Isle of Wight PO31 6RH, UK)
30. Castanie ve ark. (2020), Review Of Composite Sandwich Structure İn Aeronautic Applications a Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, INSA, ISAE Supaéro, IMT Mines Albi, UPS, Toulouse, France b Elixir Aircraft, Batiment D1 - 6 rue Aristide Bergès, 17180 Périgny, France)
31. Potoğlu (2012), Sandviç Kompozit Plakların Darbe Davranışları (Dokuz Eylül Üniversitesi - Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı)
32. Erdoğan (2020), Sandviç Panellerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı (Erciyes Üniversitesi - Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
33. <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemelerin-ucaklarda-avantaj-ve-dezavantajlari.html>
34. Vignjevic ve ark. (2019), Soft Body Impact Resistance Of Composite Foam Core Sandwich Panels With Unidirectional Corrugated And Tubular Reinforcements
35. Güngör (2022), Tabakalı Kompozit Yapılarda Kuş Çarpmasının Nümerik Analizi (Yıldız Teknik Üniversitesi – Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı)
36. Güler (2003), Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler Ve Özelliklerinin İncelenmesi (Yıldız Teknik Üniversitesi - Kimya-Metalurji Fakültesi - Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü)
37. Karataş (2020), Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Balpeteği Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Araştırılması (Fırat Üniversitesi - Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı)
38. <https://www.kompozitpazari.com/blog/icerik/havacilik-sektorunde-kompozit-malzemelere-dair-bilmeniz-gerekenler>
39. Uyaner ve ark. (2024), Havacılık Sektöründe Yeşil Kompozitler: NACA 4452 Rib Uygulaması (Acar Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi - Cilt/Vol: 6 Sayı/No: 2 Yıl)
40. Tarfaoui ve ark. (2016), Mechanical properties of carbon nanotubes based polymer composites. Composites Part B: Engineering 2016, 103:113-121.

41. Soliman ve ark. (2012), Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes. *International Journal of Impact Engineering* 2012, 47:39-47.
42. Mathivanan ve Jerald (2010), Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of woven glass fiber epoxy matrix composite laminates of EP3 grade. *Materials & Design* 2010, 31(9):4553-4560.
43. Taşyürek ve Tarakçıoğlu (2017), Enhancing fatigue life of filament winding laminar and curved pipes containing carbon nanotubes, and their fatigue failure. *Polymers and Polymer Composites* 2017, 25(2):167-176.
44. H. Rajoria ve N. Celili : Determination of strength and damping characteristics of carbon nanotube- epoxy composites. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: 2004*. 1461-1466.
45. Gojny ve ark. (2005), Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. *Composites science and technology* 2005, 65(15-16):23002313.
46. Ağır (2012), Kıvrımsız Dikişli Cam Elyaf Kumaşlardan Üretilen Kompozit Plakların Darbe Davranışının İncelenmesi (Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü - Makine Mühendisliği)
47. <https://www.serdarkorkut.com/2017/01/22/kompozit-malzemeler/>
48. <https://dckompozit.com/havacilik-sektorunde-kompozit-malzemelerin-yeri-ve-onemi/>
49. Armatlı Kayrak (2012), Uçak Bakımında Darbe Hasarının Tahribatsız Kontrolü (Anadolu Üniversitesi- Sivil Havacılık Yüksekokulu)
50. Esendemir ve Caner (2018), Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi (Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 22, Sayı 1, 207-215)
51. Yapıcı ve Yapıcı (2012), E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi (Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, 48-60)
52. Parkı ve Kong (2011), A study on low velocity impact damage evaluation and repair technique of small aircraft composite structure (*Sciencedirect- Cilt 42, Sayı 9* ,Eylül 2011, Sayfalar 1179-1188)
53. Termek (2021), Nano Katkılı Biyokompozitlerin Otomotiv Malzemelerinde Kullanılması (Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği)

54. Esendemir ve ark. (2021), Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ve Darbe Davranışına Fonksiyonelleştirilmiş Nanokil İlavesinin Etkisi (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi)
55. Santos ve ark. (2020), The variation in low speed impact strength on glass fiber/kevlar composite hybrids (Journal of Composite Materials - Cilt 54 , Sayı 21)
56. <https://dewesoft.com/blog/impact-testing-explained>
57. <https://www.instron.com/en/resources/blog/2021/october/pendulum-impact-testing-machine-or-drop-tower>
58. https://www.astm.org/d7136_d7136m-15.html
59. <https://www.laboratuvar.org/tekstil/kimyasal-ve-ekolojik-testler/materyal-analizi-ftir-analizi/>
60. <https://www.innovatechlabs.com/newsroom/672/stuff-works-ftir-analysis/#process>
61. <http://merlab.metu.edu.tr/tr/termogravimetrik-analiz-cihazı>
62. https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu
63. http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_97.html