



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**CAM ELYAF KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK
HIZDA DARBE DENEYİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

ÖZLEM ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Özlem ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “**CAM ELYAF KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE DENEYİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**” adlı tez çalışması 10/10/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** / ~~oy çokluğu~~ ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Murat MAYDA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Üye

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

ÖZLEM ÖZDEMİR

Tarih

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM ELYAF KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZDA DARBE DENEYİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

ÖZLEM ÖZDEMİR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Mehmet KAYIRICI
İkinci Danışman: Dr.Onur GÖK

2024, 53 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof. Dr. Murat MAYDA

Bu çalışmada, [90/90/90/90], [90/0/90/0], [90/+45/-45/0], [+45/-45/+45/-45], [+55/-55/+55/-55] fiber doğrultularından oluşan dört katmanlı kompozit yapıların düşük hızda darbe davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Her bir numunenin kalınlığı 2 mm olup boyutları 50x50,100x100,150x150,200x200mm dir ASTM-7130 standardına göre yapılan analizlerde numunelerin fiber yönelimi ve numune boyut farklılıklarından oluşan darbe hasarları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam Elyaf, Sonlu Elemanlar Analizi, Kompozit Malzeme, Düşük Hızlı Darbe Deneyi

ABSTRACT

MSTHESIS

**MATHEMATICAL MODELING OF LOW SPEED IMPACT TEST OF GLASS
FIBER COMPOSITES**

Özlem ÖZDEMİR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assist.Prof.Dr.Mehmet KAYRICI
Second Advisor: Dr.Onur GÖK**

2024, 53 Pages

**Jury
Dr. Lecturer Member Mehmet KAYRICI
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof. Dr. Murat MAYDA**

In this study, the low velocity impact behavior of four-layer composite structures consisting of [90/90/90/90/90], [90/0/90/0], [90/+45/-45/0], [+45/-45/+45/-45], [+55/-55/+55/-55] fiber orientations were investigated by finite element method. The thickness of each specimen is 2 mm and the dimensions are 50x50,100x100,150x150,200x200 mm. In the analyses performed according to ASTM-7130 standard, impact damages caused by fiber orientation and specimen size differences were investigated.

Keywords: Glass Fiber, Finite Element Method, Composite Material, Low-Velocity Impact Test

ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca katkılarını esirgemeyen danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Mehmet KAYRICI hocama teşekkürlerimi iletirim. Çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen 2.Danışmanım Dr.Onur GÖK hocama, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Prof.Dr.Hüseyin ARIKAN Hocama ve Dr.Öğr.Üyesi Hakan Burak KARADAĞ hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Öğretim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini sunan aileme sozsuz teşekkürler.

Özlem ÖZDEMİR
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. CAM ELYAFLAR.....	13
3.1. Cam Elyafların Sınıflandırılması ve Özellikleri	13
3.1.1.A- Cam.....	14
3.1.2.Yün Cam Elyafları	14
3.1.3.Alkaliye Dayanıklı Cam Elyaflar	14
3.1.4.Bazalt Cam Elyafları.....	15
3.1.5.E- Cam	15
3.1.6.R ve S Camları Yüksek Mukavemetli Camlar.....	15
3.1.7.D -Camlar	16
4. KOMPOZİT MALZEMELERİN HASAR DAVRANIŞI.....	16
4.1. Düşük Hızda Darbe Testi (LVI)	16
4.2.Balistik Test	18
4.3.Hiper Hız Etkisi	18
5. KOMPOZİT MALZEMELER HASAR KRİTERLERİ	19
5.1. Makro Mekaniksel Hasar Kriterleri	20
5.1.1. Maksimum Hasar Gerilme Kriteri	20
5.1.2. Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Kriteri	21
5.1.3. Tsai Hill Hasar Kriteri	22
5.1.4. Hoffman Hasar Kriteri	23
5.1.5. Hashin Hasar Kriteri	23
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
6.1. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI.....	26

6.1.1. DAMAGEMC: Matris Fazındaki Hasar Başlangıcı	26
6.1.2. DAMAGEMT: Matris Fazındaki Gerilme Hasarı	27
6.1.3. HSNFCCRT: Fiber Hasar Başlangıç Kriteri	28
6.1.4. HSNFTCRT: Fiber Gerilme Başlangıç Kriteri	29
6.1.5. HSNMCCRT: Matris Hasar Başlangıç Kriteri	30
6.1.6. HSNMTCRT: Matris Gerilme Başlangıç Kriteri.....	31
6.2. Grafik Sonuçları.....	32
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	37
7.1 Sonuçlar	37
7.2 Öneriler	38
8. KAYNAKLAR	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_1 : Lif yönünde gerilme

σ_2 : Liflere dik yöndeki gerilme

σ_6 : Liflere dik yöndeki gerilme

σ_{11} , σ_{22} ve σ_{33} : Hasarın başlangıç gerilme bileşenleri

σ_{12} , σ_{23} , σ_{31} : Gerilme bileşenleri

X_t : Lif yönünde çekme

X_c : Lif yönünde basma

Y_t : Liflere dik yöndeki çekme mukavemeti

Y_c : Liflere dik yöndeki basma mukavemeti

τ_{12} :Düzlem içi kayma gerilmesi

ε_1 , ε_2 , γ_6 : Kompozit malzemenin şekil değiştirme eksenleri

ε_{1t}^u , ε_{2t}^u : Lif yönünde ve lifler arası lif yönünde sırasıyla nihai çekme şekil değiştirmeleri

ε_{2t}^u , ε_{2c}^u : Lif yönünde ve lifler arası lif yönünde sırasıyla nihai basma şekil değiştirmeleri

γ_6^u : Nihai kayma şekil değiştirmesi

F, G, H, L, M, N: Hasar dayanım katsayıları

S: Kayma mukavemeti

S_{12} : Eksenel Kayma Mukavemeti

S_{23} : Enine Kayma Mukavemeti

S_t : Elyaflara dik yöndeki kayma mukavemetidir

S₁ : Elyaf yönünde eksenel kayma mukaveti

Kısaltmalar

CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Polimer

GFRP : Cam Fiber Takviyeli Polimer

FEM : Finit Element Metod

SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi

PDA : Aşamalı Hasar Analizi

PLA : Polilaktik Asit

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

LIV : Düşük Hızlı Darbe

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 6.2. Matris Fazındaki hasar başlangıcı analizi ve değerleri.....	26
Şekil.6.3.Matris Fazındaki gerilme hasarı analizi ve değerleri.....	27
Şekil.6.4.Fiber Başlangıç Hasar Kriteri.....	28
Şekil.6.5.Fiber Başlangıç Hasar Kriteri.....	29
Şekil.6.6.Matriks Başlangıç Hasar Kriteri.....	30
Şekil.6.7.Matriks Gerilme Başlangıç Hasar Kriteri.....	31
6.8.Kuvvet Zaman Grafiği.....	32
6.9.Deplasman Zaman Grafiği.....	33
6.10.Hız Zaman Grafiği	34
6.11.Kinetik Enerji Zaman Grafiği.....	35
6.12.Hasar Enerji Zaman Grafiği.....	36

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, bir dolgu maddesinin bir temel madde ile birleştirilmesiyle üretilirler. Dolgu veya takviye malzemesi, lifler, parçacıklar, sentetik veya doğal malzemelerden üretilirler. Matris adı verilen temel madde, takviye malzemesini çevreleyerek ve birbirine bağlar. Matris, yükün yönlendirilmesini ve birleşik bir şekilde taşınmasını sağlar. Ayrıca, kompozit malzemenin maruz kaldığı gerilmeler yüke iletilebilir. Elde edilen bu malzemeler genellikle anizotropik ve oldukça heterojendir. Takviye ve matris, seramik, metalik veya plastik yapılardan oluşabileceklerinden dolayı çok çeşitli kombinasyonların oluşturulmasında olanak tanır. Bir kompozit malzemenin özelliklerini etkileyen birçok faktör vardır, bunlar arasında en önemli olanları dolgu maddesinin ve matrisin türü, dolgu maddesinin oranı ve şekli, arayüzeyin kalitesi ve üretim yöntemi yer alır [1].

Lif takviyeli kompozitler, metalik malzemelere göre daha fazla mukavemet ağırlık oranı sahip olduklarından ve dolayı havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde birincil ve ikincil yük taşıyan yapılar da yaygın olarak kullanılmaktadırlar [2].

Yüksek özgül mukavemet, yüksek özgül sertlik ve hafiflik gibi özelliklere sahip olan lif takviyeli kompozitler, kullanımları sırasında veya üretim aşamalarından kaynaklanan hasarlara uğrayabilirler. Küçük çaplı hasarlar bile kompozit malzemelerin dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler. Delaminasyon ve çatlaklar gibi hasar türleri, zamanla yapının kararlılığını ve mukavemetini tehlikeye atmakla kalmaz, aynı zamanda uygulama sırasında güvenlik performansını da azaltır. Bu yapılarda, metal malzemelerde gözlenmeyen lif kırılması, ara yüzeyden ayrılma veya delaminasyon gibi karmaşık hasar mekanizmaları meydana gelir[3].Darbe hasarları gözle zor görülebilen darbe hasarı olarak bilinir ve düşük hızdaki darbeler, yüksek hızlı darbelere kıyasla daha tehditkardır çünkü bu tür hasarlar görünmez olduğu için kolayca gözden kaçabilir [4].

Kompozit malzemelerin darbe performansının incelenmesi, malzeme biliminde kritik bir öneme sahiptir çünkü bu, tasarım optimizasyonunu geliştirir ve üretim süreçlerinde inovasyonu teşvik eder. Bu araştırmalar, kompozitlerin yüksek yük durumları altındaki dinamik tepkilerini anlamaya, mekanik özelliklerini tanımlamaya ve hasar nedenlerini belirlemeye yardımcı olur. Elde edilen bulgular, havacılık ve otomotiv

gibi sektörlerde güvenlik ve güvenilirliği artırırken, kompozit davranışını tahmin eden hesaplama modellerini doğrular [1].

Özellikle kompozit malzemelerin darbe davranışına yönelik deneysel çalışmalar, önemli miktarda para, zaman ve kaynak yatırımı gerektirir. Bu tür yatırımlar gerektiren deneysel çalışmaların bir alternatifi olarak, kompozit plakaların farklı yükleme koşulları altındaki dinamik darbe tepkisi, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak modellenebilir. FEM, sınır koşullarını, malzeme türünü, hasar kriterlerini ve etkileşim halindeki parçalar arasındaki temas türünü ayarlayarak, deneysel gözlemlerle kıyaslandığında iyi sonuçlar veren bir çözüm yöntemidir. Kompozit plakaların karmaşık yükleme durumlarını yalnızca düşük hızlı darbe deneysel verileri ile anlamak zordur. FEM ile kompozit plakalar üzerindeki düşük hızlı darbe etkisinin çözümü, gerilme dağılımının ayrıntılı bir analizini sağlar. Bu yöntem, deneysel testler sırasında gözlemlenmesi zor olan darbe hasarları hakkında bilgi verir [5].

Hasar başlangıcını izleyen yük taşıma kapasitesinin kaybı doğrudan hasarın evrimiyle ilişkilidir. İnce duvarlı kompozit elemanların başarısızlığını detaylandıran temel teori "İlk Katman Hasarı Teorisi" (First Ply Failure - FPF) olarak bilinir. Bu teoriye göre, kompozit malzemenin hasar durumu kompozitin ilk katmanında oluştuğunda, yapı başarısız kabul edilir. Sayısal hesaplamalarda, hasar başlangıcı değerlendirilmesi genellikle Hashin hasar başlatma kriteri kullanılarak yapılır [6].

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaiwen Ni ve arkadaşları yatlarda kullanılan laminantların düşük hızlı darbelerde, hasar evrimi ve arıza mekanizmalarını sürekli hasar mekanizmasına bağlı olarak üç boyutlu bir hasar modeli oluşturulmuşlar ve fiziksel-mekanik bir hasar kriteri olarak 3D Hashin ve Puck kriterlerini birleştiren bir yöntem kullanılmışlardır. Bu kriter hem liflerde hem de matriste hasarın başlangıç noktalarını yakalamak için kullanılmıştır. Ayrıca, hasarın evrimini tanımlamak için iki doğrusal hasar yapısal ilişkisi uygulanmışlar katmanlar arası delaminasyon, ara yüzeylerin yapışma davranışını simüle ederek ele alınmıştır [7].

Pankaj Sing Chandel ve arkadaşları, bu çalışma, jüt ve cam elyaflarının epoksi ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerinin deneysel ve sayısal analizi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, bu kompozitin performansı, ayrı ayrı jüt ve cam elyaflarıyla oluşturulan ve epoksi ile takviye edilen kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Kompozitlerin mekanik özellikleri, çekme dayanımı, çentikli Izod darbe dayanımı ve Rockwell sertliği gibi testlerle değerlendirilmiştir. Ayrıca, numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, jüt/cam elyafı kompozitinin, jüt/jüt kompozitine kıyasla çekme dayanımında %37 darbe dayanımında %396 ve sertlikte %60 artış gösterdiğini ortaya koymuştur. SEM analizleri, jüt numunelerinde delaminasyon kaynaklı daha fazla çatlak oluştuğunu, cam elyafı kompozitinde ise esasen cam elyaflarının kırılması nedeniyle hasar meydana geldiğini göstermiştir [8].

Ammar Mustafa Al-Areqi ve arkadaşları, 3D baskı ile darbe yüklerine karşı yapısal tepkileri iyileştirmek amacıyla polimer bazlı kompozit yapılar tasarladılar. Füzyon filament üretimi (FFF) ve çözelti döküm yöntemleri kullanılarak, farklı hacim oranlarında (0'dan %7,5'e kadar) Milled Glass Fiber'lar (MGF'ler) içeren PLA kafes yapılar, epoksi/MGF'lerle doldurularak ürettir. Araştırma, PLA kafes çerçevelerine epoksi reçine ve farklı seviyelerde MGF takviyesi yapılan cam elyaf takviyeli kompozit yapıların darbe davranışına yönelik kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Düşük hızlı darbe testleri aracılığıyla, tepe kuvveti, tepe emilen enerji, artık hız ve yer değiştirme gibi kilit parametreler değerlendirilmiş ve malzemelerin darbe yükleme koşullarına verdiği tepkiler üzerine çalışma yapmışlardır [9].

Tao Zeng ve arkadaşları, 3D dokuma kompozitlerin. Mikro skala düzeyinde, liflerin çeşitli mezoskopik hasar modları, liflerin gerilmeyle kırılması, liflerin basılma sonucu kıvrılması ve lifler arası çatlaklar gibi hasar modları, basitçe matris-dominant ve lif-dominant hasar olarak ikiye ayırmışlardır. Bu çok ölçekli hasar modeli kullanılarak, 3DWC'lerin mekanik performansları ve hasar mekanizması üzerindeki ara yüzey özelliklerinin etkisini araştırmak için karşılaştırmalı sayısal analiz çalışması yapmışlardır [10].

Patryk Jakubczak ve arkadaşları düşük hızda darbe sonrası Fiber Metal Laminatlarını (FML) basma dayanımını değerlendirmektedir. FML'lerin darbe sonrası basma dayanımının değerlendirilmesindeki temel amaç, farklı başlangıç hasar durumlarından ve nihai darbe sonrası dayanımdan kaynaklanan hasar büyüme aralığını, boyutunu ve mekanizmalarını derinlemesine analiz etmektir. Cam fiber/titanyum ve karbon fiber/titanyum Fiber Metal Laminatları testlerini yapıp ve analiz etmişlerdir [11].

Jinyang Xu ve arkadaşları, Deneysel çalışmalara gösterilen büyük ilgiye kıyasla, hibrit CFRP/Ti malzemelerinin kesimiyle ilgili sayısal modelleme üzerine bilimsel literatür oldukça sınırlıdır. Bu eksikliği gidermek için mevcut araştırma, bu konuya özgü bir sonlu elemanlar (FE) modeli önermeyi amaçlamaktadır. FE modeli, Abaqus/Explicit ticari yazılımı üzerinde geliştirilmiştir. CFRP fazı, fiber/matris sisteminin kırılma ve ayrışmasını simüle etmek için Hashin hasar kriterleri kullanılarak eşdeğer homojen malzeme (EHM) olarak modellenmiştir. Ti fazı, izotropik ve elastoplastik davranışla varsayılmış olup, metal fazının yerel hasarını simüle etmek için Johnson-Cook kriterleri kullanılmıştır. CFRP/Ti arayüzü, fiziksel olarak ara bir bileşen olarak tanımlanmış ve yapışkan bölge (CZ) konsepti kullanılarak modellenmiştir. Hibrit CFRP/Ti kesiminde ortaya çıkan işleme tepkilerinin çok yönlü yönleri dikkatle incelenmiş olup, özellikle arayüz hasarının oluşumuna odaklanılmıştır. Sayısal sonuçlar, ilerleme hızının kuvvet oluşumu üzerindeki önemli etkilerini ve iki malzeme arayüz tüketiminin (BIC) arayüz delaminasyonunu nasıl etkilediğini vurgulamaktadırlar [12].

Bangxioung ve arkadaşları, karbon fiber dikilmiş kompozit laminatların düşük hızlı darbe (LVI) altındaki mekanik tepkisi ve hasar gelişimi için ilerleyici bir hasar modeli geliştirilmiştir. Elyaf ve matris hasarını belirlemek için üç boyutlu Hashin ve Hou

hasar kriterleri kullanılmıştır. Delaminasyon hasarını simüle etmek amacıyla yapışma bölgesi modeli benimsenmiş ve malzeme sertliğindeki bozulmayı karakterize etmek için eşdeğer deplasman yönteminin doğrusal bozulma indirgeme yöntemi kullanılmıştır. Buna uygun olarak, VUMAT kullanıcı malzeme alt programı kodlanmıştır. Farklı enerjiler altında dikilmiş kompozit laminatların düşük hızlı darbesinin sonlu elemanlar analizi Abaqus/Explicit ile tamamlanmıştır. Ayrıca, simülasyon tahminleri ile deneysel test sonuçları arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, farklı kalınlık ve dikiş yoğunluklarına sahip kompozit laminatların mekanik tepkisi ve hasar biçimleri analiz etmişlerdir. Sonuçlar, kompozit laminatların başlıca hasarlarının matris çekme hasarı ve delaminasyon olduğunu göstermiştir. Dikiş işlemi, kompozit laminatların darbe toleransını artırmış, delaminasyonu baskılamış ve delaminasyon hasarının alanını azaltmıştır. Dikiş yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, bu baskılayıcı etki o kadar belirgin hale gelmiştir. Laminat kalınlığı da hasar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. İnce plakalar, düşük eğilme rijitliği nedeniyle daha fazla matris çekme hasarına eğilimliken, kalın plakalar daha yüksek eğilme rijitliği nedeniyle delaminasyona daha yatkın olduğunu görmüşlerdir [4].

Ireneusz Lapczyk ve arkadaşları, fiber takviyeli malzemelerdeki hasar ve sonrasında gerçekleşen davranışları tahmin etmek için uygun bir anizotropik hasar modeli sunmaktadır. Modelde düzlem gerilme formülasyonu kullanılmış olup, hasar görmemiş malzemenin doğrusal elastik davranış gösterdiği varsayılmaktadır. Model, kırılma öncesinde önemli bir plastik deformasyon göstermeyen elastik-kırılgan malzemelerin davranışını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Modelde dört farklı hasar modu – fiber çekme, fiber basınç, matris çekme ve matris basınç – ayrı ayrı ele alınmakta ve modellenmişler ve hasarın başlangıcını, Hashin'in başlattığı kriterler kullanılarak hasarın ilerlemesini, bir sonlu eleman kodunda uygulanması kolay olan yeni bir hasar ilerleme yasasıyla kontrol etmişlerdir. Bu ilerleme yasası, hasar süreci sırasında enerji yayılımına dayanmaktadır ve hasarın artışı eşdeğer yer değiştirmelerle kontrol edilmektedir. Ayrıca, modelin sayısal olarak uygulanmasına ilişkin ağ hassasiyeti ve yumuşama rejiminde yakınsama gibi sorunları da ele almışlardır [13].

Duarte A.P.C ve arkadaşları, fiber takviyeli kompozitlerin (FRC) hasarına uygulanan Hashin hasar kriteri ile genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin (XFEM) karşılaştırmalı bir çalışmasını sunmuşlardır. ABAQUS yazılımı kullanılarak farklı tabaka

konfigürasyonlarına sahip kare plakaların, farklı yarıçaplara sahip dairesel delik içeren ve monoton aksenal çekme yüküne tabi tutulan sonlu eleman modelleri tanımlanmıştır. Modeller, sayısal sonuçlar ile bir kıyaslama modelinin sonuçları arasındaki karşılaştırmalarla doğrulanmıştır. Son olarak, tabakaların istiflenme sırası, delik yarıçapı ve hasar kriterlerinin (Hashin ve XFEM) yük-gerilme yolları, gerilme dağılımları ve plakaların çökme konfigürasyonları üzerindeki etkisi göstermişlerdir [14].

K.Zouggar ve arkadaşları, tek yönlü S-Cam/Epoksi kompozit plaka üzerinde düşük enerjili bir darbe testinin analizini ele almaktadır. Eğilme konfigürasyonunda kompozit plakalar üzerinde bir dizi düşük enerjili darbe testi gerçekleştirilmiştir. Darbe yükleri, düşme kütlesi kulesi kullanılarak uygulanmıştır. Darbe kuvveti, eğilme, enerji dağılımı ve hasar gibi mekanik tepkiler vurgulanmış ve analiz edilmiştir. Tüm mekanik tepkileri hesaplamak ve deneylerle karşılaştırmak için güvenilir bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Darbenin neden olduğu gerilme durumu ve hasar yüzeylerinin analizi, Hashin'in hasar kriterine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemenin bozulması üzerindeki düşme yüksekliğinin etkisi, özellikle hasarlı alanın genişliği vurgulanmışlardır. Maksimum eğilme ve maksimum darbe kuvvetinin düşme yüksekliği ile doğrusal bir evrim izlediği göstermişler ayrıca, model katmanlar arası hasar, hasarlı bölge genişliği ve diğer mekanik tepkiler gibi deneysel gözlemleri başarıyla yeniden üretmiştir. Tasarım parametrelerinin kompozit laminantın darbe yüklemesine karşı mekanik tepkisi üzerindeki etkisini vurgulamak için parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [15].

R.C Batra ve arkadaşları, fiber takviyeli polimerik laminant kompozit bir malzemenin düşük hızda bir katı küre tarafından darbe aldığı anda meydana gelen 3 boyutlu (3B) elastoplastik deformasyonlar sırasında hasar başlangıcı, hasarın ilerlemesi ve malzemenin nihai olarak hasar görmesi analiz etmişlerdir. Hesaplanan sonuçlar, literatürdeki deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Hasarın, Hashin'in hasar kriterlerinden biri sağlandığında başladığı varsayılmış ve hasarın ilerlemesi, Matzenmiller, Lubliner ve Taylor tarafından önerilen ampirik bir ilişki ile modellenmiştir. Geçici doğrusal olmayan problem, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile çözülmüştür. Bu çalışmanın katkıları, bir laminat yapının düzlem gerilme durumu yerine 3B deformasyonlarını ve kompozit malzemenin elastoplastik deformasyonlarını dikkate almasıdır. Bu, kullanıcının tanımladığı bir alt programın geliştirilmesi ve FE yazılımı olan

ABAQUS'a uygulanmasıyla başarılmıştır. ABAQUS'un sağladığı gerinimlerden, alt program hücre yöntemi ve bileşenlerin malzeme parametrelerinin kullanıldığı bir mikromekanik yaklaşım ile bir sonlu elemandaki ortalama gerilmeleri hesaplar ve Hashin'in hasar kriterlerine göre hasar başlangıcını başlatmışlardır. Eğer malzeme hasar görmüşse, alt program hasarın ne kadar ilerlediğini değerlendirir, oluşan gerilmeleri hesaplar ve bu verileri ABAQUS'a iletir. Hasarın malzeme noktasında boşaltma sırasında azalmaya izin verilmemektedir. Ayrılma (delaminasyon) hasar modu, ABAQUS'ta mevcut olan yapışkan bölge modeli ile simüle edilmiştir. Çarpıcıya etki eden eksenel yükün hesaplanan zaman geçmişi, literatürde bulunan deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiş, çeşitli hasar ve arıza modları ise testlerde gözlemlenenlerle niteliksel olarak uyuşmuştur [16].

Vaduka Akshitha Sumahi ve arkadaşları, tamponlar araçların çarpmalar sonucunda maruz kaldığı darbe kuvvetlerine karşı koruma sağlamak için önemli bir rol oynar. Aracın ön veya arka kısmında yer alan ve aracın güvenlik sistemlerine zarar vermeden darbelere dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte, günümüzde yakıt verimliliği de önemli bir husus haline gelmiştir. Tampon, aracın daha ağır parçalarından biridir. Bu çalışmada, tamponun ağırlığını azaltmak ve daha iyi darbe emme özelliklerine sahip uygun malzemeyi belirlemek amacıyla malzeme optimizasyonuna odaklanılmıştır. Analiz yöntemi iki aşamadan oluşmaktadır: İlk olarak tamponun Autodesk Inventor kullanılarak kavramsal tasarımı yapılmış, ardından sayısal analiz için hazırlanmıştır. Bu çalışmada, tamponun mevcut malzemesi olan alüminyum yerine kompozit malzemeler, karbon fiber takviyeli polieter imid (PEI) ve S-cam epoksi malzemeleri kullanılarak üç farklı hızda (80 km/s, 100 km/s ve 120 km/s) analiz edilmiştir. Sonuçların kapsamlı bir şekilde incelenmesinden sonra, tampon için en uygun malzeme belirlemişlerdir ve sonuç olarak Alüminyum Alaşımı ve S-Cam Epoksi'nin deformasyon değerleri, karbon fiber takviyeli PEI'ye kıyasla daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [17].

Nassier A. Nassier ve arkadaşları, cam fiber takviyeli epoksi (GF/Epoksi) kompozitlerin düşük hızdaki darbe yüklemesi altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel veriler, bir dizi sonlu elemanlar modeli doğrulamak amacıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, bu kompozit laminatların darbe yüklemesi altındaki tepkisini öngörmek için ABAQUS/Explicit yazılımı kullanılarak simülasyonlar geliştirilmiştir. Kompozit plakalar, Hashin hasar kriterleri kullanılarak modellenmiştir.

Sonuçlar, geliştirilen sonlu eleman modellerinin deneysel verilerle iyi bir şekilde uyum sağladığını göstermiştir. Ardından, GF/Epoksi plakaların davranışı üzerindeki parametrelerin (darbe enerjisi, darbe başlığı çapı ve darbe hızı) etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, darbe enerjisinin artmasıyla birlikte tepe kuvveti ve emilen enerji değerlerinin arttığını göstermiştir. Projeksiyon çapının artması, tepe kuvveti, maksimum yer değiştirme, süre ve delinme enerjisi değerlerinde artışa yol açmıştır. Ayrıca, tepe kuvvetlerinin darbe hızına bağlı olmadığı ve emilen enerji değerlerinin darbe hızı arttıkça belirgin bir azalma gösterdiği de gözlemlenmiştir [18].

Puella Ramalakshmi ve arkadaşları, kayma mukavemeti, bir malzemenin dayanabileceği maksimum kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir. Kayma mukavemeti, kayma kırılma yükü ve kayma yüklü alandan hesaplanır. Laminalar arası kayma gerilmesi (ILSS), bir laminanın katmanları arasında gözlemlenen kayma gerilmesidir. Bu çalışmanın amacı, saf ve CNT (karbon nanotüp) takviyeli S cam epoksi kompozit (CRSE) üzerinde sonlu elemanlar analizi yaparak anlık kayma modülünü (ISM) tahmin etmek ve çentik ayrılmasının ölçülen ILSS üzerindeki etkisini gözlemlenmiştir [19].

Elango Netarajon ve arkadaşları, bu çalışmada, hidrostatik basınca maruz kalan denizaltı gövdesi için S-Cam/karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin uygunluğu araştırılmıştır. Metalik malzemeler, tuzluluk ortamlarına karşı düşük dirençlerinden dolayı bozulma riskleri taşıdığından, polimer kompozitlerin mekanik stabilitesi ve enine ve darbe yüklerine dayanıklılığı incelenmiştir. Bu amaçla, S-Cam/karbon fiber takviyeli polimer kompozitin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmış ve denizaltı gövdesinde kullanılan birçok metalik malzemeye kıyasla daha yüksek özgül mukavemet ve sertlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, denizaltının burun, arka ve pervane kısımlarının statik ve dinamik çarpışma analizlerinde Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile kullanılmıştır; burada deniz seviyesinden 0 ila 7000 m derinlik arasında seyahat derinliği değiştirilmiştir. Daha sonra, her bir parçanın optimum şekil ve kalınlıklarına göre denizaltı montajı geliştirilmiştir. Ayrıca, 3 ila 21 m/s hız aralığında darbe sonrası doğrusal olmayan çarpışma analizi rapor edilmiştir. Çarpışmaya uğrayan denizaltının kinetik enerjisi, ivme zirvesi ve iç enerjisi, 1750 m ve 3500 m seyahat derinliğinin önerilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, denizaltının 1750 m derinlikte çarpışma güvenlik faktörünün sınırlar içinde olduğu bulunmuştur [20].

R.Mohanraj ve arkadaşları, sıkıştırma kalıplama yöntemiyle üretilen Karbon/S-cam takviyeli polimer matris hibrit kompozit laminatların çekme ve düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Sıkıştırma veya açık kalıplama, düşük maliyetli ve erişilebilirliği kolay olduğu için ticari polimer kompozit üretim yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. ASTM standardına göre yapılan çekme ve darbe testleri, kompozit laminatların mekanik davranışlarını etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Termoplastik kompozit laminatların çekme ve darbe dayanımları, mekanik özelliklere etki eden en önemli parametreleri belirlemek için ölçülmüştür. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak, matris-takviye arasındaki bağlanmayı gözlemlemek ve önerilen sonuçların hasar toleransını değerlendirmek amacıyla morfolojik bir analiz de yapılmışlar ve Karbon ve S-Cam liflerinin hibrit takviyesi sayesinde hibrit laminantlarının çekme ve darbe özellikleri son derece yüksek olduğunu görmüşlerdir [21].

Shahriar Chowdhury çalışmasında kalınlık yönünde dikilmiş ve dikilmemiş E- ve S- Cam/Vinil Ester kompozitlerinin dinamik özelliklerini, düşük hızlı darbe ve şok tepkileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Rijitlik ve sönümleme faktörü (doğal sönümleme) özellikleri, çekiş uyarımı yöntemi kullanılarak yapılan darbe-frekans cevabı deneylerinden elde edilmiştir. ASTM D3763 Standardı'na uygun olarak kompozit numuneler üzerinde düşük hızlı zımbalama kesme testleri, düşme ağırlıklı darbe test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, şok tüpü aparatı kullanılarak patlama yüklemesi altında merkez nokta sapması ölçülmüştür. Dikim işlemi, E- Cam/Vinil Ester kompozitlerinin dinamik eğilme modülünü %13, S- Cam/Vinil Ester kompozitlerinde ise %8 oranında artırırken, sönümleme faktöründe minimum değişim göstermiştir. Dikim, E- Cam/Vinil Ester kompozitlerinde toplam enerji absorpsiyonunda yaklaşık %20, kırılma enerjisinde ise yaklaşık %40 artış sağlarken, S- Cam/Vinil Ester kompozitlerinde toplam enerji absorpsiyonunda yaklaşık %12, kırılma enerjisinde ise yaklaşık %30 artış göstermiştir. Şok yüklemesi altında, dikilmiş E- Cam/Vinil Ester numuneleri, merkez noktada 3.7 mm sapma ile en düşük yer değiştirme değerini göstermiş ve bu da daha yüksek direnç sergilediğini ortaya koymuştur. Diğer numuneler ise 4 mm ile 4.5 mm arasında değerler göstermiştir. Maksimum sapma noktasına kadar olan ortalama enerji absorpsiyonu, dikilmemiş numunelerde, dikilmiş numunelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur [22].

Al Omari ve arkadaşları, farklı katman dizilimlerine ve reçinelere sahip kompozit laminantların darbe tepkisi, enerji absorpsiyonunu belirlemek amacıyla Instron 9250G düşme kule sistemi ile incelenmiştir. Üç tür kompozit kullanmışlar karbon fiber, cam fiber ve karışık fiber kompozit laminantlardır. Ayrıca, bu kompozitler, farklı katman dizilimleri ve reçine türleriyle karakterize etmişlerdir. Kompozit plakaların absorbe ettiği enerji üzerinde çeşitli kompozit yapısal parametrelerin etkisi incelenmiştir. Deneysel testlerden elde edilen en iyi özelliklere dayalı olarak darbe direncini iyileştiren optimize edilmiş bir tasarım bulmak için sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak ,Emilen enerji miktarı (darbe performansı), tek bir katmanın kalınlığı, katman sayısı ve katman dizilimindeki değişikliklere bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Deneysel test verileri, fenolik reçine ile yapılan kompozit plakaların enerji absorpsiyonunda artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre, [90/0/45/-45]s dizilimindeki katmanlar, darbe direnci açısından [60/45/-45/-60]s dizilimindekilere kıyasla daha iyi performans göstermiştir [23].

Kiran Kaware ve Mangesh Kotambkar çalışmalarında, Kevlar ve cam liflerinin karbon fiber epoksi kompozit üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve düşük hızlı darbe (LVI) altında darbe dayanımını artırma amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Kevlar, cam ve karbon FRP kompozitlerin çeşitli kombinasyonları kullanılarak dinamik darbe davranışını incelemek için düşme ağırlıklı darbe test cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Instron CEAST 9340 düşme ağırlıklı darbe kulesi kullanılarak beş farklı hibrit kompozit türü test etmişlerdir. Beş kombinasyondan birincisi, yalnızca farklı yönelimlere sahip karbon fiberden oluşmakta olup, diğer dört kombinasyon ise iç içe hibrit liflerden oluşmaktadır (Kevlar-karbon-Kevlar, Cam-karbon-Cam, Kevlar-karbon-cam ve Cam-karbon-Kevlar) ve 8 katmanlı kompozitlerdir. Kevlar ve cam fiberlerin CFRP kompozitin darbe direncini nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla karbon fiber katmanları her bir hibrit kompozit içinde yerleştirilmiştir. Analitik modelleme sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırıp sonuçların birbirlerini doğruladığını görmüşlerdir. Delaminasyon ve hasar yerleri gelişmiş ultrasonik C-tarama yöntemi ile tespit etmişlerdir [24].

Umut çalışkan ve arkadaşları, Düşük hızlı darbe performansını onarılan cam fiber takviyeli plastik kompozitlerin, deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Karbon ve cam fiber gibi farklı fiber malzemelerinden ve kalınlıklardan oluşan çeşitli onarımlar,

farklı darbe enerji seviyeleri altında incelemişler ve sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, dinamik kademeli hasar modeline dayalı sürekli hasar mekaniği kullanılmışlardır ve kompozit yama ile çentikli kompozit plaka arasına kohezyon elemanları eklenmiştir. Üç boyutlu Hashin hasar modellerine dayanan beş farklı hasar kriteri, degradasyon modeli ile ABAQUS-VUMAT explicit sonlu elemanlar alt programında uygulanmış ve deneysel hasar alanları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel temas kuvveti, kinetik enerji geçmişleri ve deneysel hasar alanları hesaplanmış ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel veriler, önerilen modelin etkinliğini doğrularken, sayısal modelle de tutarlı sonuçlar göstermiştir. Sonuç olarak, kompozit yamaların kullanılması darbe hasarını önlemede başarılı olmuştur. Bu araştırma, darbe yüklemesi altında yüksek verimli simülasyonlar elde etmek amacıyla uygun dış kompozit yama tipinin seçimi ve farklı hasar modelleriyle degradasyon modelinin kullanımına yönelik temel bir destek sağlamaktadır [25].

N.Saravana Kumar ve arkadaşları çalışmalarında, rastgele yönlendirilmiş E-cam ve S-cam fiberlerle takviye edilmiş polimer kompozit, el yatırma yöntemi kullanılarak farklı fiber yüzdeleri ile geliştirmişlerdir. Bu özel çalışmada, E-cam-Polyester (E-P) ve S-cam-Polyester (S-P) kompozitlerinin mekanik özellikleri, E-cam ve S-cam-Polyester (ES-P) kompozit kombinasyonu ile karşılaştırılmıştır. Cam fiber oranının, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe mukavemeti gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kompozitlerin sertliği, Brinell sertlik test cihazı ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, artan cam fiber içeriği ile üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli bir iyileşme gösterdiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, mukavemet açısından en uygun fiber-reçine oranını göstermektedir [26].

Eyüp Yeter ve Mehmet Hanife Doğru çalışmalarında, Karbon/Epoksi ve Cam/Epoksi kompozit plakaların düşme ağırlıklı darbe yükü altındaki davranışları simüle etmişlerdir. Kompozit malzemeler, [0C/90G/0G/90G]_s, [0C/90C/0G/90G]_s, [0C/90C/0C/90G]_s, [0G/90C/0C/90C]_s, [0G/90G/0C/90C]_s, [0G/90G/0G/90C]_s, [0C/90G/0C/90G/0C/90G/0C/90G], [0G/90C/0G/90C/0G/90C/0G/90C] simetrik lif yönelimlerine sahip olacak şekilde Karbon/Epoksi ve Cam/Epoksi kompozit plakaların farklı konfigürasyonlarının etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kompozit malzemenin katman sayısı artırılarak plakanın kalınlığı artırılmış ve kalınlık artışının darbe yükü üzerindeki etkisi araştırılmışlardır. Sonuç olarak, Karbon/Epoksi kompozit plakanın, Cam/Epoksi

kompozit plakaya kıyasla daha yüksek darbe direncine sahip olduğu görmüşlerdir. Cam/Epoksi kompozit plakanın deformasyonu, Karbon/Epoksi kompozit plakadan daha fazladır. Her iki malzeme için de kalınlık artışı ile maksimum darbe kuvveti artmıştır [27].



3. CAM ELYAFLAR

Cam elyafı takviyeli polimer (GFRP) kompozitler, inşaat, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi çeşitli endüstriyel alanlarda büyük ilgi görmüştür. Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve korozyon direnci gibi avantajları nedeniyle, cam elyafı takviyeli polimer kompozitler, geleneksel metalik malzemelere alternatif olarak geniş kullanım alanı bulmaktadır. Cam elyafı, polimer matrisler içerisinde mekanik dayanımı artırmak için kullanılan bir takviye malzemesidir. Bu malzemeler, özellikle termoplastik ve termoset polimerlerde kullanıldığında, yüksek mukavemet ve rijitlik sağlar. Bunun yanı sıra cam elyafı, kimyasal olarak inert olması ve düşük maliyetli üretimi nedeniyle de tercih edilir. Kompozit malzemeler, genellikle iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen çok fazlı malzemelerdir. Polimer matris, kompozitlerde sürekli fazı oluştururken, cam elyafı gibi takviye malzemeleri, kompozitin yük taşıma kapasitesini artırır [28].

3.1. Cam Elyafların Sınıflandırılması ve Özellikleri

Sınıflandırma	Fiziksel Özellikler
A camı	Daha yüksek dayanıklılık, mukavemet ve elektrik direnci
C camı	Daha yüksek korozyon direnci
D camı	Düşük dielektrik sabiti
E camı	Yüksek mukavemet ve elektrik direnci
AR camı	Alkali direnci
R camı	Yüksek mukavemet ve asit korozyon direnci
S camı	En yüksek çekme mukavemeti
S-2 camı	Yüksek mukavemet, modül ve stabilite

Şekil 3.1. Cam elyafların sınıflandırılması ve özellikleri [28]

Cam Elyaf Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Lif	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme mukavemeti (GPa)	Young Modülü (GPa)	Uzama (%)	Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁷ /°C)	Poisson Oranı	Kırılma İndisi	Ref.
E-camı	2.58	3.445	72.3	4.8	54	0.2	1.558	17
C-camı	2.52	3.31	68.9	4.8	63	-	1.533	-
S2-camı	2.46	4.89	86.9	5.7	16	0.22	1.521	-
A-camı	2.44	3.31	68.9	4.8	73	-	1.538	-
D-camı	2.11–2.14	2.415	51.7	4.8	25	-	1.465	-
R-camı	2.54	4.135	85.5	4.8	33	-	1.546	-
EGR-camı	2.72	3.445	80.3	4.8	59	-	1.579	-
AR camı	2.7	3.241	73.1	4.4	65	-	1.562	-

Şekil 3.2. Cam elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri [28]

3.1.1.A- Cam

A camları genellikle, şişe ve düz camların üretiminde kullanılan soda, kireç ve silikadan üretilen camlardır. Plastiklerin termal yalıtımı ve güçlendirilmesinde kullanılan camlara göre daha düşük maliyete sahiptirler ve düşük çekme mukavemetine sahip olup asitli ortamlarda daha düşük kimyasal dayanıklılığa sahiptirler [29].

3.1.2.Yün Cam Elyafı

AF olarak adlandırılan yün camları, binalarda ses ve ısı yalıtımı için kullanılmaktadırlar. AF camlarını A camından ayıran özelliği %2 ila %10 arasında B₂O₃ (Borik asit) içermesidir. Bor ilavesi camın ergime noktasını, kimyasal ve ısı iletimi özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [29].

3.1.3.Alkaliye Dayanıklı Cam Elyafı

AR alkali cam elyafları alkali ortamlarda kullanılabilen, betonarme yapılara takviye elyafı olarak geliştirilmişlerdir [29].

3.1.4.Bazalt Cam Elyafları

Bazalt cam elyafları, mineral yünü olarak adlandırılır ve doğada bulunan bazalt kayaları kullanılarak üretilir. Genellikle ısı yalıtımında kullanılmaktadırlar Bazalt kayasında fazlaca bulunan FeO (Demir Oksit) içeriği, camın ergime ve şekillendirme işlemlerinde elektro- manyetik ısı transferini azalttığından dolayı camın termal homojenliğini olumsuz etkilediğinden dolayı güçlendirme uygulamalarında kullanımını büyük ölçüde azaltmıştır [29].

3.1.5.E- Cam

E camlar genellikle organik polimerlerde güçlendirme, oda sıcaklığında yüksek elektrik dirençleri olmasından dolayı baskılı devre kartlarında, güneş enerjisi panellerinde, konutlarda enerji verimliliği sağlamak için kullanılırlar. E camların belirli bir sıcaklıkta yüksek tonajlı cam elyaflardan düz camlardan daha yüksek viskoziteye sahiptirler. Asidik çözeltilere karşı dirençleri çok iyi olduğundan dolayı klor iyonu içeren asitli ortamlarda paslanmaz çeliklere göre daha çok dayanım gösterirler. E camlar da kullanılan başlıca oksitler silika, kalsiyum ve alüminyum oksittir. E camların bir alt sınıfı olan ECR camlar bor ve flor içermezler bu nedenden dolayı bor içeren E-Camlara göre daha yüksek kimyasal dayanıklılık gösterirken yüksek erime noktasına ve viskoziteye sahiptirler [29].

3.1.6.R ve S Camları Yüksek Mukavemetli Camlar

Yüksek mukavemetli camlar yüksek miktarda SiO₂ içerdiklerinden dolayı ergime sıcaklıkları diğer E-camlara göre daha yüksektir. Avrupa'da R camı olarak adlandırılır fakat yüksek miktarlarda ve en yüksek mukavemete sahip olduklarından dolayı S-21 denmektedir. S-21 camları Magnezyum Oksit (MgO), alümina, silika içeriğinden oluşan camın çekme mukavemeti diğer E-camından yaklaşık olarak %50 daha yüksektir. Balistik, rüzgâr türbini kanatlarında ve sıkıştırılmış gaz tanklarında kullanılmaktadır [29].

3.1.7.D -Camlar

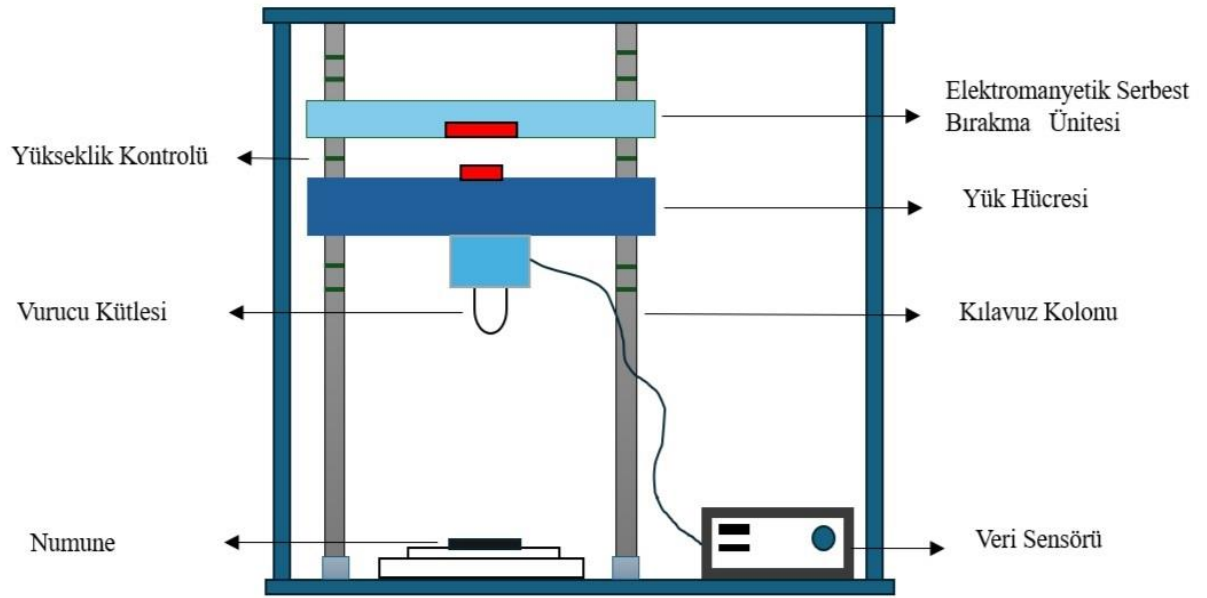
Elektronik devre kartlarının sinyal gücünün daha hızlı olabilmesi için, dielektrik katsayısı içeren camlardır [29].

4. KOMPOZİT MALZEMELERİN HASAR DAVRANIŞI

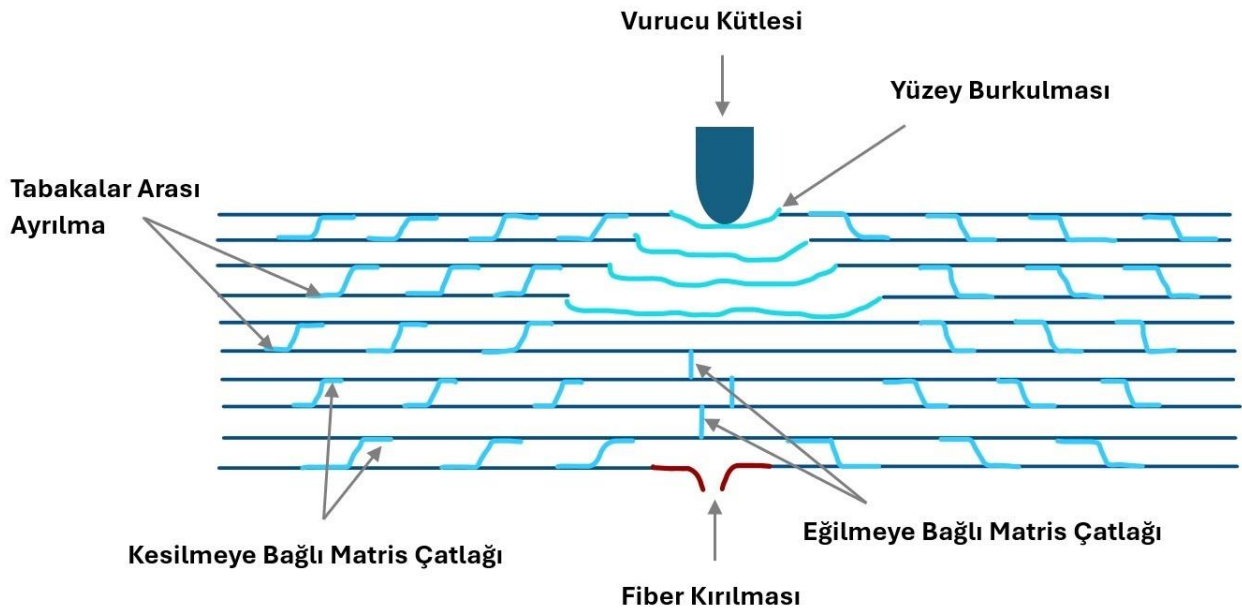
Kompozit malzemelerin hasar davranışları, malzemenin anizotropisine, mimarisine, geometrisine, üretim yöntemine bağlıdır. Hasar davranışlarını incelenirken, kompozit malzemenin çekme, basma, bükülme, yorulma testleri, korozyon direnci ve darbe davranışları ele alınmalıdır [1].

4.1. Düşük Hızda Darbe Testi (LVI)

Düşük hızda darbe deneyleri, kompozitlerde genellikle delaminasyona neden olurlar. 1 ile 10m/sn hızlarda gerçekleşirler ve darbe sırasındaki hasar ve enerji Emilimi malzemenin sertliğine, özelliklerine, vurucunun kütlesine ve sertliğine bağlıdır. Düşük darbe testinde, numuneye belirli bir yükseklikten kütle çarpar ve daha sonrasında serbest bırakılır. Malzemede oluşan hasarı ve geri yaylanma etkisini ölçebilmek için yüksek hızlı fotoğrafçılıktan faydalanılırken darbe sonrası mikro yapı hatalarını görebilmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılır. Kompozit malzemeler darbe enerjisini elastik bölgelerde, metaller ise hem elastik hem de plastik bölgelerde enerji Emilimini sağlarlar [1].



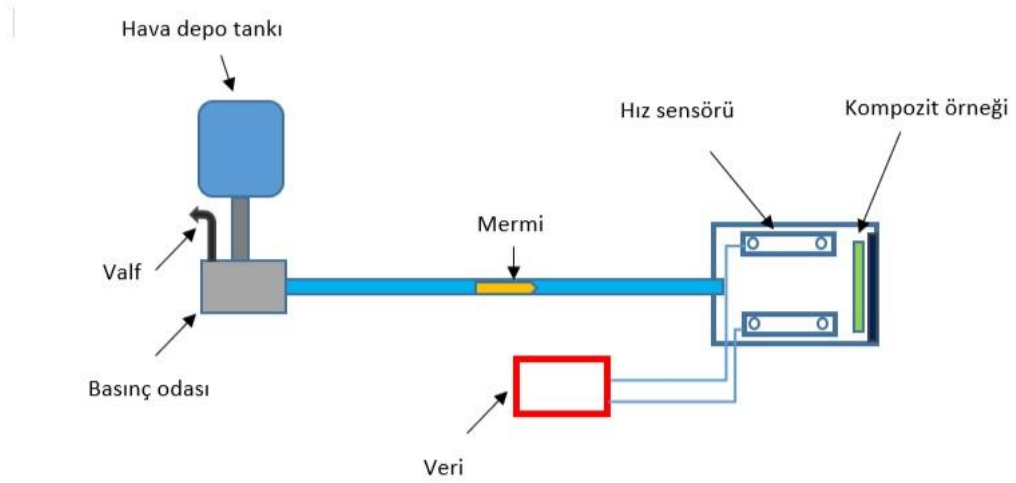
Şekil 4.1. Düşük Hızlı Darbe Deneyi



Şekil 4.2. Kompozit malzemelerde darbe yüklemesine bağlı hasar modları.

4.2.Balistik Test

Yüksek hızlı darbe, 10 ile 1000 m/s arasında değişen hızlarda gerçekleşir. Balistik testlerde, çarpmanın hızı çarpmadan kaynaklanan en küçük titreşim modundan daha yüksektir olduğundan dolayı tahribat süresi daha kısadır. Örneğin bir uçak ile kuş çarpıştığında aralarındaki bağıl hız o kadar büyüktür ki uçağın malzemesi hasar görüp bozulabilir. Balistik darbe süreci, merminin özelliklerine, hedefteki malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır [1].



Şekil.2.4.Balistik Test Düzeneği

4.3.Hiper Hız Etkisi

Hiper hızlı darbeler, çarpmadan oluşan basınç merminin hızını aştığında meydana gelmektedir. Bu durum testteki malzemenin akışkan veya hidrodinamik olarak davranmaya başladığında meydana gelir. Hiper hız çarpışmaları genellikle 2km/sn den daha yüksek hızlar için tanımlanır ancak merminin hızına ve malzemenin şok hızına bağlı olarak değişiklik gösterebilir [1].

5. KOMPOZİT MALZEMELER HASAR KRİTERLERİ

Kırılğan lifli kompozitlerden, özellikle epoksi içinde cam elyaf gibi malzemelerden yapılan yapısal bileşenlerin tasarımında, belirli bir güvenilirlik seviyesinin sağlanabilmesi veya başarı olasılığının arttırılması için, gerilmenin kompozitin mukavemet sınırları içinde kalacağı varsayılır. Ancak, pratik uygulamalarda bu durum çok daha karmaşık hale gelir. Örneğin, üzerinde çentik veya delik bulunan bir lifli kompozit, döngüsel yükleme olmadan tek bir yönde yükleme altında, nihai mukavemet değerinden çok daha düşük gerilme seviyelerinde erken çatlak oluşumuna maruz kalabilir. Bu erken hasar; lif kırılması, delaminasyon, katman ayrılması ya da arayüz kesme çatlakları gibi çeşitli şekillerde meydana gelebilir. Bu hasar bölgesinin oluşumu, çentik ucu gibi bölgelerdeki lokalize gerilme konsantrasyonları gibi faktörlere bağlıdır. Kesin hasar modu, liflerin yönelimi, laminantın katman yerleşimi, matris ve lif-matris arayüzü özellikleri, çevresel koşullar gibi birçok parametreye bağlıdır. Bir laminantın hasar analizi, tek bir laminanın kine kıyasla çok daha karmaşıktır. Bireysel bir laminadaki gerilmeler kritik öneme sahip olup, hasarın laminanttaki başlangıç noktası ve ilerlemesini kontrol eder. Bir laminanın hasar görmesi, mutlaka tüm laminantın hasar gördüğü anlamına gelmez; bu, sadece etkileşimli ve ilerleyici bir hasar sürecinin başlangıcı olabilir. Tek yönlü bir laminantın hasar süreci, mikroskobik düzeyde başlar. İlk mikroskobik hasarlar, aşağıdaki yerel hasar modlarıyla temsil edilebilir [30].

Kompozit malzemeler için geliştirilen teoriler, izotropik malzemelerden üretilen ve uyarlanan hasar teorilerinin genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Bu teoriler arasında Maksimum Gerilme (Rankine), Maksimum Kayma Gerilmesi (Tresca) ve Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi (Von Mises) yer alır [31].

Çoğu teori, homojen ve doğrusal malzeme özellikleri varsayımlarına dayanmaktadır. Ancak, Puck'un modeli gibi bazı fenomenolojik modeller, lamina özelliklerine ek olarak bileşenlerin özelliklerini de dikkate alır ve bu nedenle doğrusal olmayan modeller olarak sınıflandırılır [31].

Sınırlayıcı veya etkileşimsiz teoriler: Hasar modları, başlıca malzeme yönlerinde her bir gerilme bileşeninin (Çekme, Basma veya Kayma) ilgili dayanım özellikleriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir. Gerilme bileşenleri birbirleriyle etkileşime girmez ve

bağımsız olarak ele alınır. Maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme hasar teorileri bu kategoriye girer [31].

Etkileşimli teoriler: Gerilme bileşenleri tek bir denklemde tam olarak birleştirilir. Genel hasar, belirli bir hasar moduna referans verilmeden belirlenir. Tsai-Hill, Yamada-Sun ve Tsai-Wu teorileri etkileşimli teorilere örnek teşkil eder [31].

Kısmen etkileşimli veya hasar modu temelli teoriler: Lif ve lifler arası hasar, ayrı kriterler ile ele alınır. Hashin-Rotem ve Puck'tan türetilen hasar teorileri, kısmen etkileşimli veya hasar modu temelli teoriler olarak sınıflandırılır [31].

5.1. Makro Mekaniksel Hasar Kriterleri

5.1.1. Maksimum Hasar Gerilme Kriteri

Maksimum hasar gerilme kriteri, malzemenin her bir bileşenindeki maksimum gerilme değerlerinin, malzemenin mukavemet sınırlarını aşıp aşmadığını kontrol eder. Eğer bir bileşendeki gerilme, malzemenin o yöndeki mukavemetini aşarsa, kompozit hasara uğrar. Çekme gerilmesi, basma gerilmesi ve kayma gerilmesi eşitsizliklerinden herhangi biri sağlanmadığında kompozitin hasara uğradığı göz önünde bulundurulur [30].

Bu denklemlerde, σ_1 , lif yönündeki gerilme bileşenini temsil eder. X_t ve X_c sırasıyla lif yönündeki çekme ve basma dayanımlarını gösterir. Benzer şekilde, σ_2 lifler arası yönündeki gerilmeyi temsil eder. Y_t ve Y_c , lifler arası yönlerdeki çekme ve basma dayanımlarını sırasıyla ifade eder. Son denklemde ise τ_{12} düzlem içi kayma gerilmesi, S ise kayma dayanımıdır [31].

σ_1 lif yönündeki basma dayanımı X_t 'yi aşarsa (daha negatif bir değere düşerse), lif yönünde hasar oluşur. σ_2 lifler arası yönündeki basma dayanımı Y_t 'yi aşarsa, lifler arası yönde hasar oluşur. Eğer düzlem içi kayma gerilmesi τ_{12} , malzemenin kayma dayanımını S aşarsa, malzeme kayma hasarına uğrar.

Lif Yönünde Çekme ve Basma Gerilmesi

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \chi_t \text{ when } \sigma_1 > 0 \\ \sigma_1 &= -\chi_c \text{ when } \sigma_1 < 0\end{aligned}\quad (5.1)$$

Lifler Arası Çekme ve Basma Gerilmesi

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= Y_t \text{ when } \sigma_2 > 0 \\ \sigma_2 &= -Y_c \text{ when } \sigma_2 < 0\end{aligned}\quad (5.2)$$

Kayma Gerilmesi,

$$|\tau_{12}| < S \quad (5.3)$$

5.1.2. Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Kriteri

Bu kriter, malzemenin herhangi bir bileşenindeki şekil değiştirme değerlerinin, malzemenin elastik bölge sınırlarını aşıp aşmadığını inceler. Şekil değiştirme değerleri belirlenen eşiği aştığı takdirde, malzeme hasar görmeye başlar [30].

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_6$ kompozit malzemenin şekil değiştirme eksenleridir [31]. Malzemenin lif yönündeki şekil değiştirmesi uygulanan kuvvet sonucunda malzemenin uzaması veya kısılmasıdır. Liflere dik yöndeki şekil değiştirme, liflere dik ekseninde oluşan uzama veya kısılmayı ifade eder. Düzlem içi kayma şekil değiştirmesi, lif eksenleri arasındaki kayma deformasyonunu temsil eder ve malzemede kayma gerilmesi sonucunda oluşan şekil değiştirmeyi ifade eder.

Lif yönündeki doğrusal şekil değiştirme,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1t}^u \text{ when } \varepsilon_1 > 0 \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{1c}^u \text{ when } \varepsilon_1 < 0 \quad (5.4)$$

Liflere dik yönündeki doğrusal şekil değiştirme,

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2t}^u \text{ when } \varepsilon_2 > 0 \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{2c}^u \text{ when } \varepsilon_2 < 0 \quad (5.5)$$

Düzlem içi kayma şekil değiştirmesi,

$$|\gamma_6| < \gamma_6^u \quad (5.6)$$

Nihai şekil değiştirmeler,

$$\begin{aligned} \epsilon_{1t}^u &= \frac{X_t}{E_1} & \epsilon_{1c}^u &= -\frac{X_c}{E_1} \\ \epsilon_{2t}^u &= \frac{X_t}{E_1} & \epsilon_{2c}^u &= -\frac{X_c}{E_2} \\ \gamma_6^u &= \frac{S}{G_{12}} \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.1.3. Tsai Hill Hasar Kriteri

Tsai-Hill hasar kriteri, kompozit malzemelerdeki karmaşık gerilme durumlarını dikkate alır. Bu kriter, tüm gerilme bileşenlerini hesaba katarak, malzemenin hasar görme olasılığını öngörür. Bu ifade, ortotropik akma kriterinin, doğrusal elastik davranışın sınırlarını temsil eden bir ortotropik dayanım veya hasar kriteri olarak kullanılacağını belirtmektedir. Bu bağlamda, Hill'in akma gerilmeleri olan F, G, H, L, M ve N hasar dayanım parametreleri olarak kabul edilmektedir [30].

Von Mises kriteri, izotropik bir cismin hacmini değiştirmeden onu şekil bozmaya yönelik kullanılan enerji miktarıyla ilişkilidir. Ancak, ortotropik malzemelerde şekil bozulması (distortion) ve genişleme (dilatation) birbirinden ayrılmaz. Bu nedenle, şekil değiştirme enerjisi ile ilgili değildir [30].

Tsai, hasar dayanım parametreleri olan F, G, H, L, M ve N'yi, bir lamina için yaygın kullanılan dayanım parametreleri olan X, Y ve S ile ilişkilendirmiştir. Eğer sadece τ_{12} malzeme üzerinde etkiliyse ve bu gerilmenin maksimum değeri S ise, hasar S'ye ulaştığında gerçekleşir [31].

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (5.8)$$

5.1.4. Hoffman Hasar Kriteri

Hoffman hasar kriteri, kompozit malzemelerde kullanılan bir diğer kriterdir ve doğrusal elastik özellikleri olan kompozitler için uygundur. Bu kriter, malzemenin farklı yönlerdeki mukavemet farklılıklarını dikkate alarak hasarın ne zaman oluşacağını tahmin eder. Dokuz C_i terimi, temel malzeme koordinatlarındaki dokuz mukavemetle belirlenir; $X_c, X_b, Y_c, Y_b, Z_c, Z_b, S_{23}, S_{31}$ ve S_{12} , (1-2) düzlemindeki düzlemsel gerilmeler ($\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$) [30].

$$C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{31}^2 + C_9\tau_{12}^2 = 1 \quad (5.9)$$

5.1.5. Hashin Hasar Kriteri

Hashin hasar kriteri dört farklı moduna ayrılmaktadır: fiber yönünde çekme ve basma hasarı ile fiber yönüne dik çekme ve basma hasarıdır. Bu modlar, basitleştirilmiş ve Abaqus'a entegre edilebilecek şekilde düzenlenmiştir [32].

Fiber çekme hasarı, Liflerin çekme kuvvetleri altında fazla uzaması sonucu meydana gelen kırılma. Bu tür hasar, liflerin çekme mukavemetini aşmasıyla oluşur ve genellikle kompozit malzemelerde yapısal hasarın bir göstergesidir [31].

$$\sigma_{11} \geq 0$$

$$F_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{31}}{S_{31}} \right)^2 < 1 \quad (5.10)$$

Fiber basma hasarı, liflerin aşırı basma kuvvetleri altında burkulması veya bükülmesi sonucu oluşan kırılma türüdür. Kompozit malzemelerde özellikle kritik olup, liflerin basma mukavemetini aşan kuvvetler sonucunda yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açar [31].

$$\sigma_{11} < 0$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 \geq 1 \quad (5.11)$$

Matris çekme hasarı, matris malzemesinin çekme kuvvetleri altında gerilme sınırını aşarak çatlaması veya liflerden ayrılması sonucu oluşan hasar türüdür. Kompozitlerde, matrisin çekme mukavemetinin yetersiz kalması sonucu yapının zayıflaması ve hasarın yayılmasıyla sonuçlanır [31].

$$\sigma_{22} + \sigma_{23} \geq 0$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{31}}{S_{31}} \right)^2 \geq 1 \quad (5.12)$$

Matris basma hasarı, matris malzemesinin aşırı basma gerilmeleri altında deformasyona uğraması, çatlaması veya bükülmesi sonucu oluşan hasar türüdür. Bu tür bir hasar, kompozit malzemenin liflerini destekleyen matrisin basma mukavemetini aşan kuvvetler nedeniyle yapısal bütünlüğün kaybolmasına yol açar [31].

$$\sigma_{22} + \sigma_{23} < 0$$

$$F_{mc} = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{4S_{23}^2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{31}}{S_{31}} \right)^2 \geq 1$$

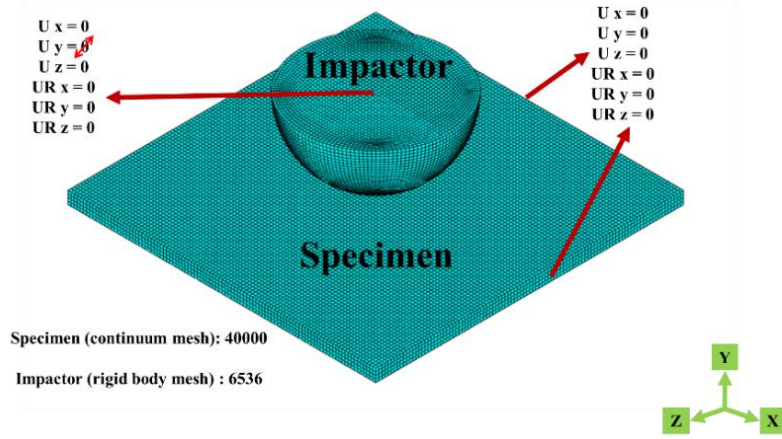
(5.13)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Polimer matrisli, lamine kompozitlerde hasar başlangıcı ve birikiminin tahmin edilmesi, giderek artan bir yapı çeşitliliğinin tasarımı, üretimi, sertifikasyonu ve izlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu konu aynı zamanda oldukça karmaşık ve zor bir konudur. Bu makalede yalnızca enine çekme ve kayma deformasyonlarından kaynaklanan matris çatlaması ele alınmaktadır. Matris çatlaması genellikle hasarın ilk modu olarak kabul edilir. Eğer bu çatlaklar önlenmezse, sıklıkla delaminasyon gibi diğer hasar modlarına yol açar ve yük yeniden dağılımı nedeniyle komşu laminaların fiberlerinin kırılmasına bile neden olabilir [33].

Abaqus'ta bulunan PDA modeli, model, hasar başlamadan önce malzemenin doğrusal elastik davranışını gerektirir ve Hashin'in hasar başlangıç kriterleri ile kullanılır. Abaqus'ta, hasarın başlangıcı, sonlu eleman analizi kodu tarafından hesaplanan görünen (nominal, Cauchy) gerilmeler olan σ cinsinden Hashin hasar başlangıç kriterlerine göre tespit edilir. Hasar başlangıcı, bir malzeme noktasındaki bozulmanın başladığı anı ifade eder. Kriter, dört farklı hasar başlangıç mekanizmasını göz önünde bulundurur ve bunlar birbirinden bağımsız olarak ele alınır [33].

Bu çalışmada Abaqus programında, S-cam ve epoksi kompozit laminantların [90/90/90/90], [90/0/90/0], [90/+45/-45/0], [+45/-45/+45/-45], [+55/-55/+55/-55] kompozitleri her biri tek sarım dört katman 4mm kalınlığında ve 50x50mm, 100x100mm, 150x150mm ve 200x200mm boyutlarında tasarlanmış ve vurucu kütlesi 30 kg çapı 24mm ve vurucu hızı 1m/s olmak üzere düşük hızda darbe deneyi matematiksel modellenerek ve hasar analizi yapılmıştır. Vurucu kütlesi rijit kabul edilerek explicit solver ile analiz koşturulmuştur. Analizde kompozit malzeme için toplam 40000 vurucu kütle için 6536 eleman kullanılmıştır. Oluşturulan CAD modeli matematiksel modele C3D8R eleman kullanılarak matematiksel model ağ yapısına dönüştürülmüştür.

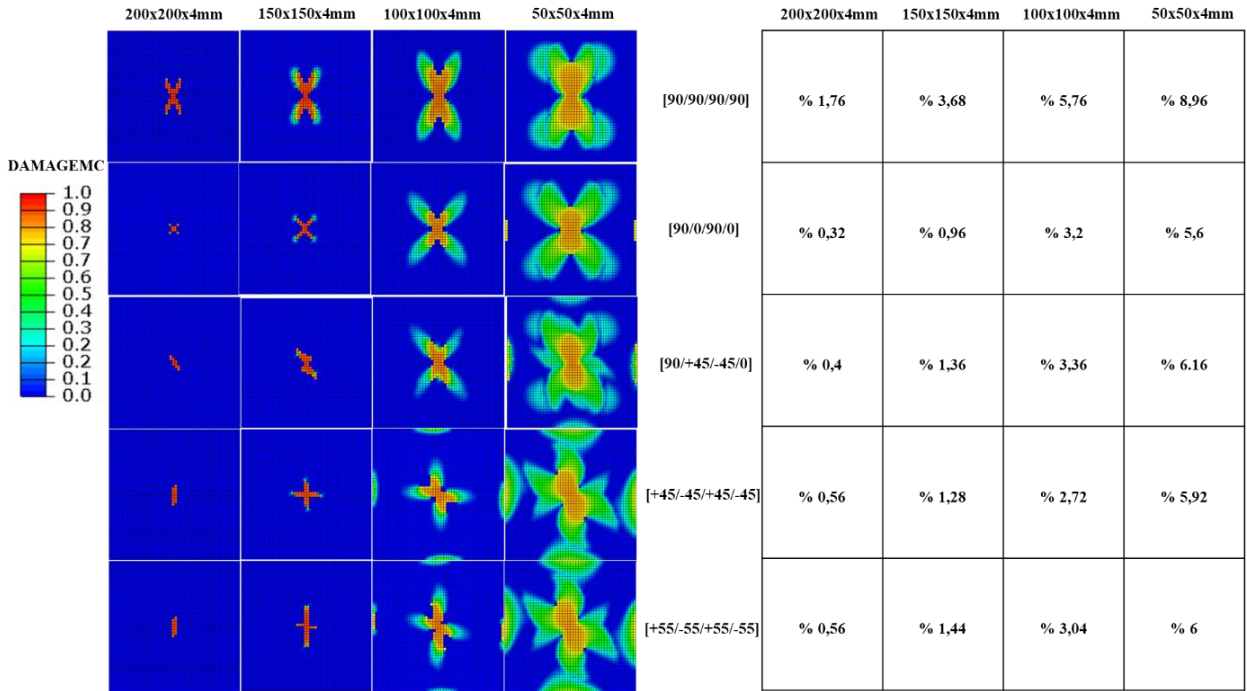


Şekil.6.1.Düşük Hızda Darbe

6.1. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

6.1.1. DAMAGEMC: Matris Fazındaki Hasar Başlangıcı

Laminant kompozitlerde meydana gelen katmanlar arası hasarlar (delaminasyon), fiber kırılması, matris çatlaması, lif-matris ara yüzeyindeki kayma gerilmeleri Damagemc modeli ile analiz edilebilir.

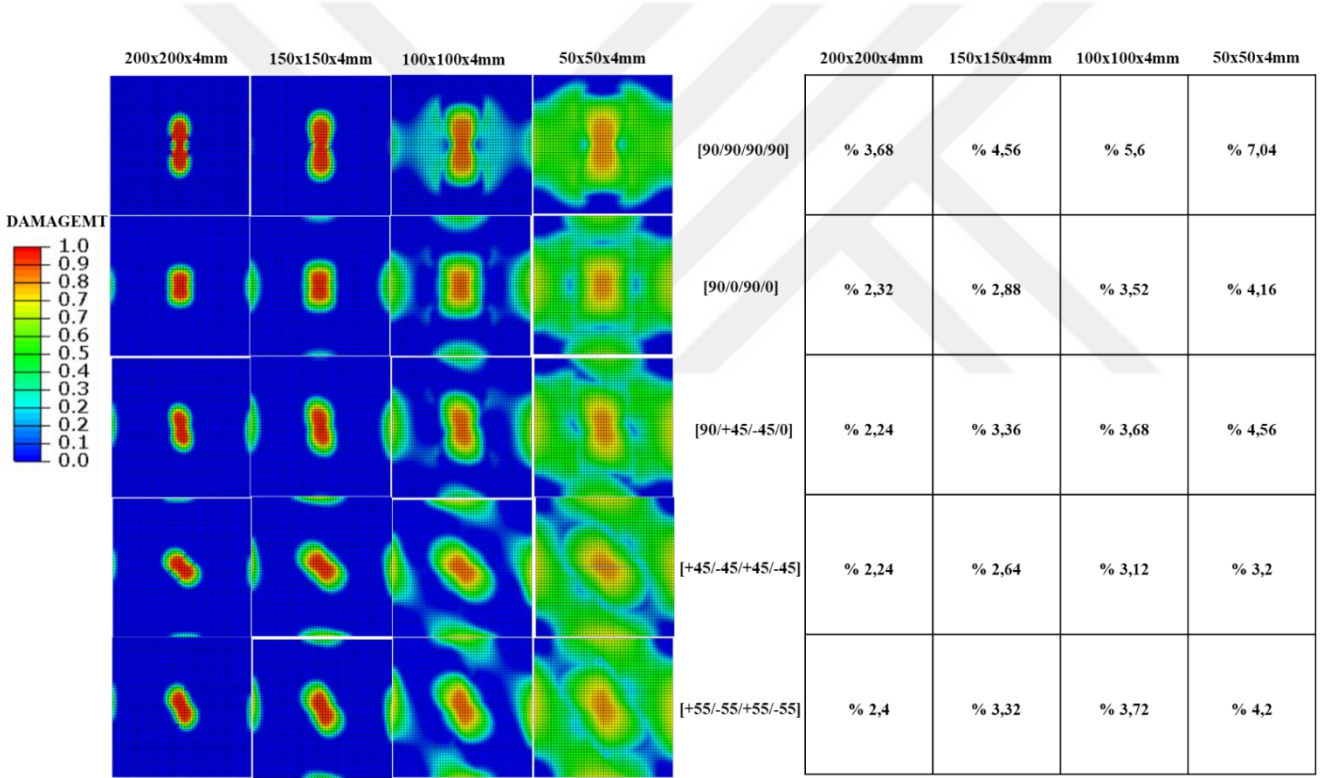


Şekil.6.2.Matris Fazındaki hasar başlangıcı analizi ve değerleri

Matris fazındaki hasar incelendiğinde kısa sürede %8,96 değerinde 50x50x4mm boyutlarında [+90/90/+90/90] diziliminde olan kompozit yapı ve en az hasarlı olan ise 200x200x4 mm boyutlarında %0,32 değerinde [90/0/90/0] dizilimine sahip kompozittir.

6.1.2. DAMAGE-T: Matris Fazındaki Gerilme Hasarı

Sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) gelişmiş yapısal analizler yapabilen bir yazılımdır. DAMAGE-T modeli, Abaqus'ta özellikle kompozit malzemelerin hasarını ve kırılma süreçlerini analiz etmek için kullanılır. Bu yazılım, lif takviyeli kompozit malzemelerin matris çatlaması, delaminasyon, lif kırılması gibi hasar mekanizmalarını simüle edebilir.

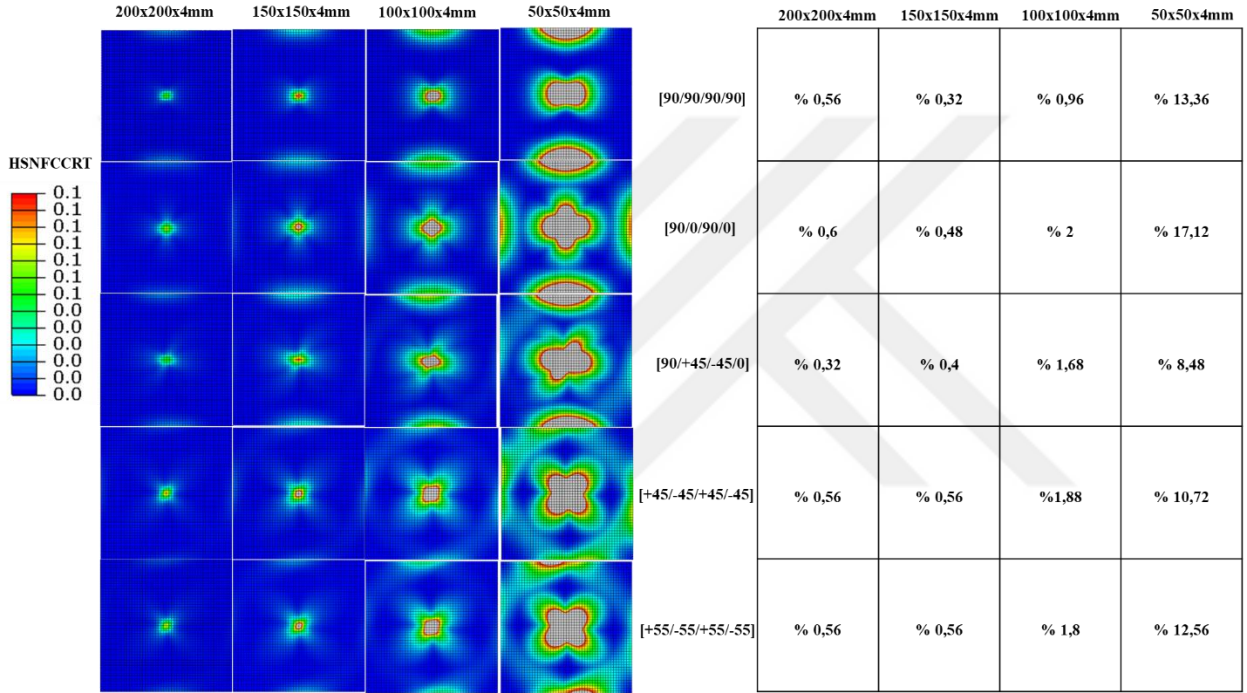


Şekil.6.3. Matris Fazındaki gerilme hasarı analizi ve değerleri

Matris fazındaki gerilme hasarı incelendiğinde en çok hasarı alan 50x50x4mm boyutlarında %7,04 değerinde [90/90/90/90] diziliminde olan kompozit yapı ve en az hasarlı olan ise 200x200x4mm boyutlarında %2,24 değerinde [+45/-45/+45/-45] dizilimine sahip kompozittir.

6.1.3. HSNFCCRT: Fiber Hasar Başlangıç Kriteri

Hashin'in Fiber Basma Hasar Kriteri anlamına gelir ve fiber takviyeli kompozit malzemelerin basma gerilmesi altında nasıl hasara uğrayacağını tahmin etmek için kullanılır. Bu model, fiberlerin basma yükleri altında kırılmasını öngörmek amacıyla kullanılır. Abaqus gibi mühendislik simülasyon yazılımlarında yaygın olarak kullanılır ve fiberlerin basınç altında nasıl davranacağını ve diğer hasar modlarıyla nasıl etkileşime gireceğini analiz eder.

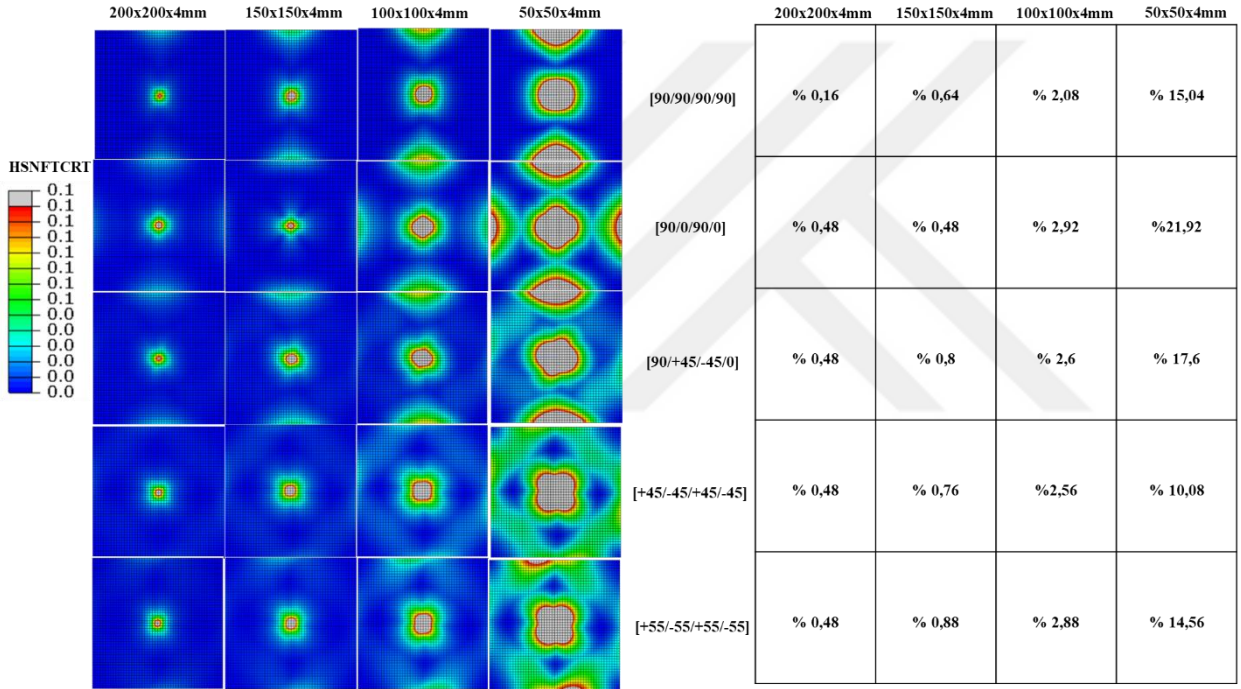


Şekil.6.4.Fiber Başlangıç Hasar Kriteri

Fiber fazındaki basınç hasar kriteri incelendiğinde en çok hasarı alan 50x50x4mm boyutlarında %17,12 değerinde [90/0/90/0] diziliminde olan kompozit yapı ve en az hasarlı olan ise 200x200x4mm boyutlarında %0,32 değerinde [90/+45/90/+45] dizilimine sahip kompozittir. Hasar başlangıç kriterinde delaminasyon meydana gelmeye başlar ve Hashin teoremi kullanılır

6.1.4. HSNFTCART: Fiber Gerilme Başlangıç Kriteri

HSNFTCART, Hashin'in Fiber Gerilme Hasar Kriteri anlamına gelir ve bir kompozit malzemede fiberlerin çekme gerilmesi altında ne zaman hasar göreceğini tahmin etmek için kullanılan bir modeldir. Bu kriter, fiberlerin kopmadan önce dayanabileceği maksimum çekme gerilmesine dayanmaktadır. Bu kriterde, fiber üzerindeki gerilme, fiberin çekme mukavemetini aştığında hasarın meydana geldiği varsayılır. HSNFTCART kriteri, özellikle kompozit malzemelerde çekme yükü altında fiber kırılmalarını değerlendirmek için kullanılır.

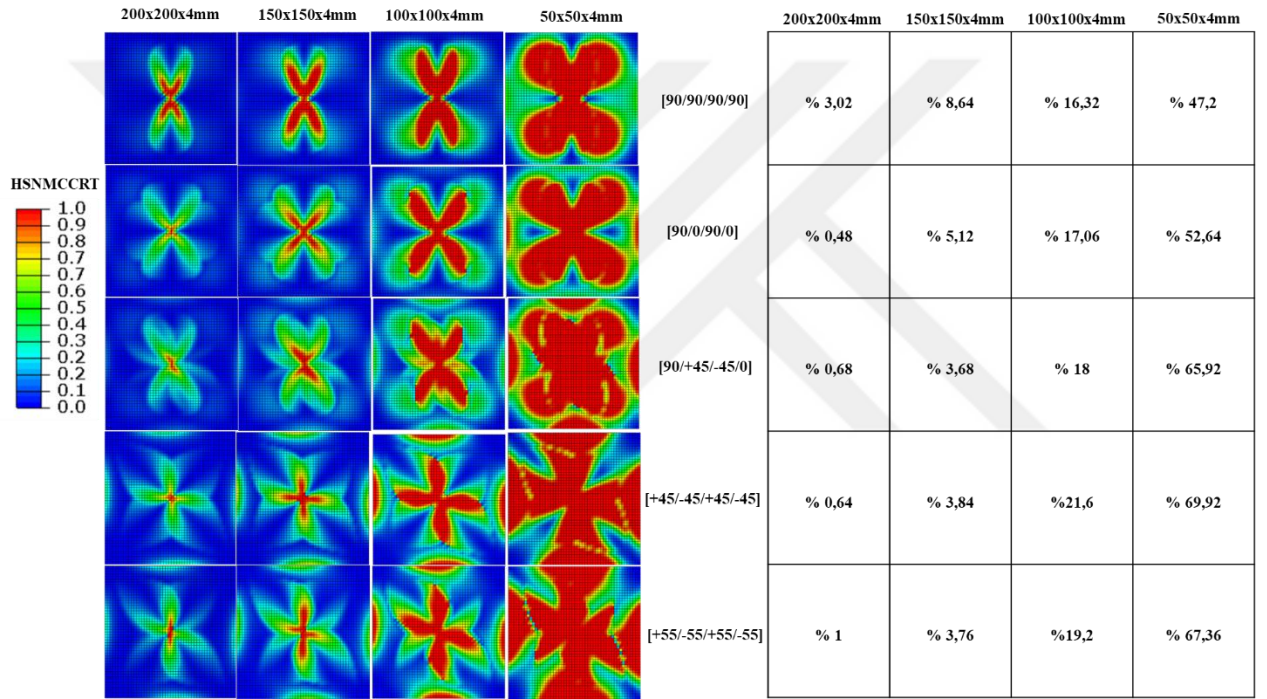


Şekil.6.5.Fiber Başlangıç Hasar Kriteri

Fiber fazındaki gerilme başlangıç kriteri incelendiğinde en çok gerilen alan 50x50x4mm boyutlarında %21,92 değerinde [90/0/90/0] diziliminde olan kompozit yapı ve en az gerilim olan ise 200x200x4mm boyutlarında %0,16 değerinde [90/90/90/90] dizilimine sahip kompozittir.

6.1.5. HSNMCCRT: Matris Hasar Başlangıç Kriteri

HSNMCCRT, Hashin'in Matris Hasar Başlangıç Kriteri anlamına gelir ve kompozit malzemelerde matrisin hasarını öngörmek için kullanılan bir modeldir. Bu kriter, matris malzemesinin çekme veya basma gerilmeleri altında ne zaman hasar göreceğini belirler. Hashin'in hasar kriterleri, fiber ve matris hasar mekanizmalarını dikkate alır. HSNMCCRT kriteri, matrisin çekme ve basma yükleri altında çatlaması, ayrılması veya plastik deformasyona uğraması gibi hasar modlarını değerlendirmek amacıyla kullanılır.

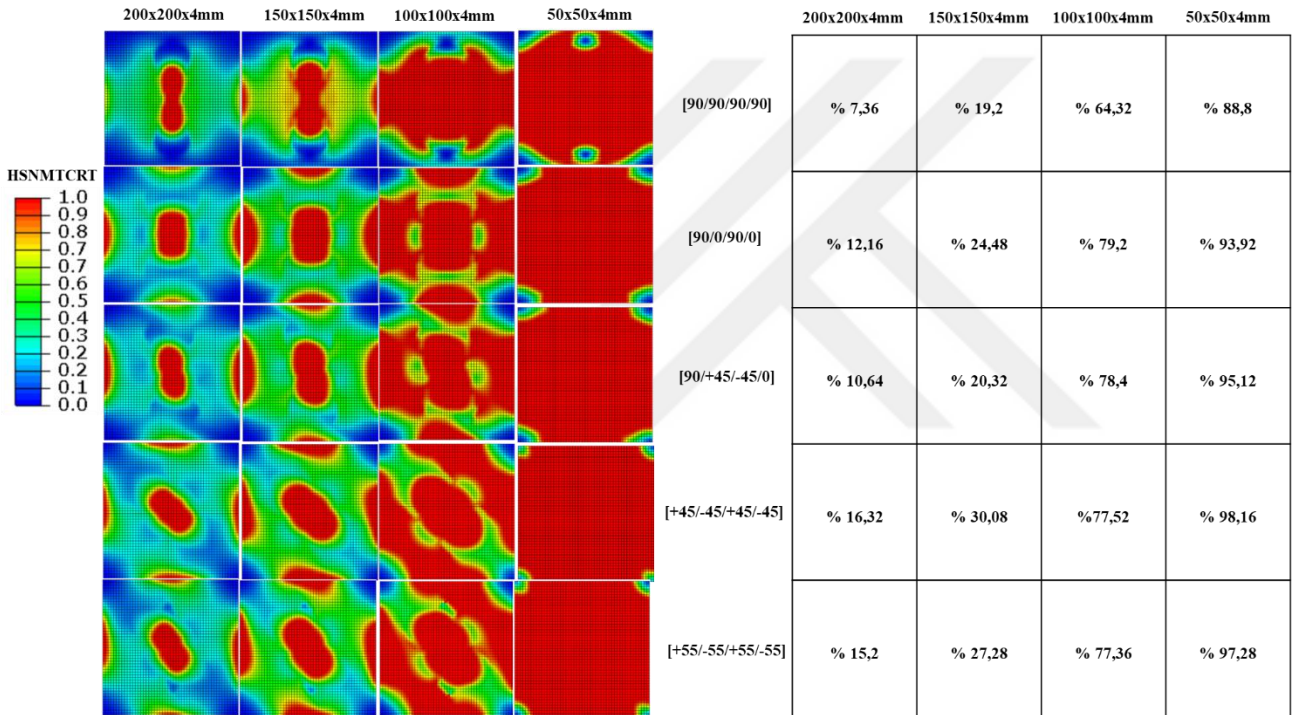


Şekil.6.6.Matriks Başlangıç Hasar Kriteri

Matris fazındaki hasar başlangıç kriteri incelendiğinde en çok hasar alan 50x50x4mm boyutlarında %69,92 değerinde [+45/-45/+45/-45] diziliminde olan kompozit yapı ve en az gerilim olan ise 200x200x4mm boyutlarında %0,48 değerinde [90/0/90/0] dizilimine sahip kompozittir.

6.1.6. HSNMTCRT: Matris Gerilme Başlangıç Kriteri

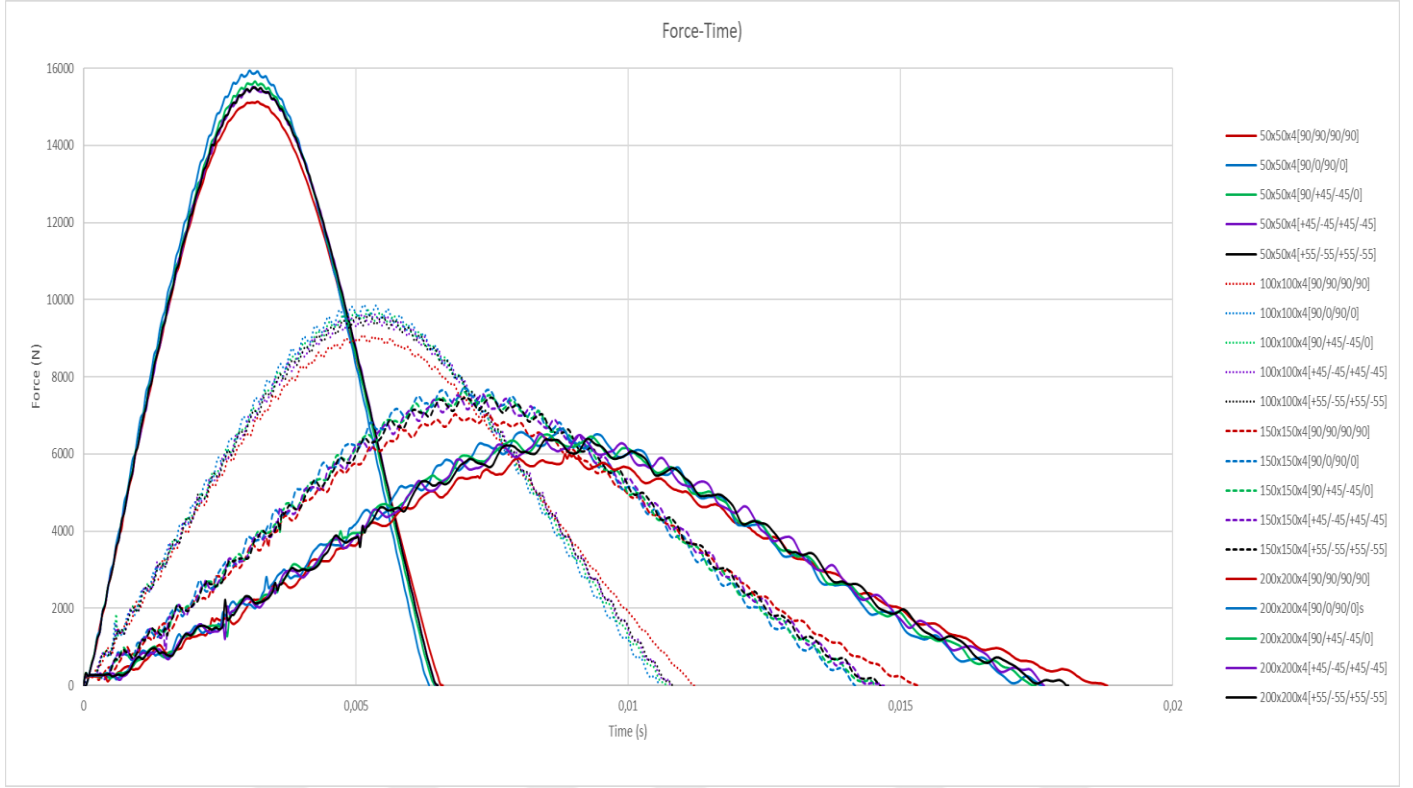
HSNMTCRT, Hashin'in Matris Gerilme Hasar Başlangıç Kriteri anlamına gelir ve kompozit malzemelerde matrisin çekme gerilmesi altında ne zaman hasar göreceğini tahmin etmek için kullanılan bir modeldir. Bu kriter, Hashin'in hasar kriterleri ailesinin bir parçasıdır ve matris malzemesinin gerilme durumlarını dikkate alarak, çekme yükleri altında matrisin çatlama veya ayrılma gibi hasar modlarına ne zaman gireceğini öngörür. Kriter, matrisin çekme gerilmesi altındaki mekanik dayanım sınırına ulaşıldığında hasarın nerede ve ne zaman başlayacağını tahmin eder.



Şekil.6.7.Matriks Gerilme Başlangıç Hasar Kriteri

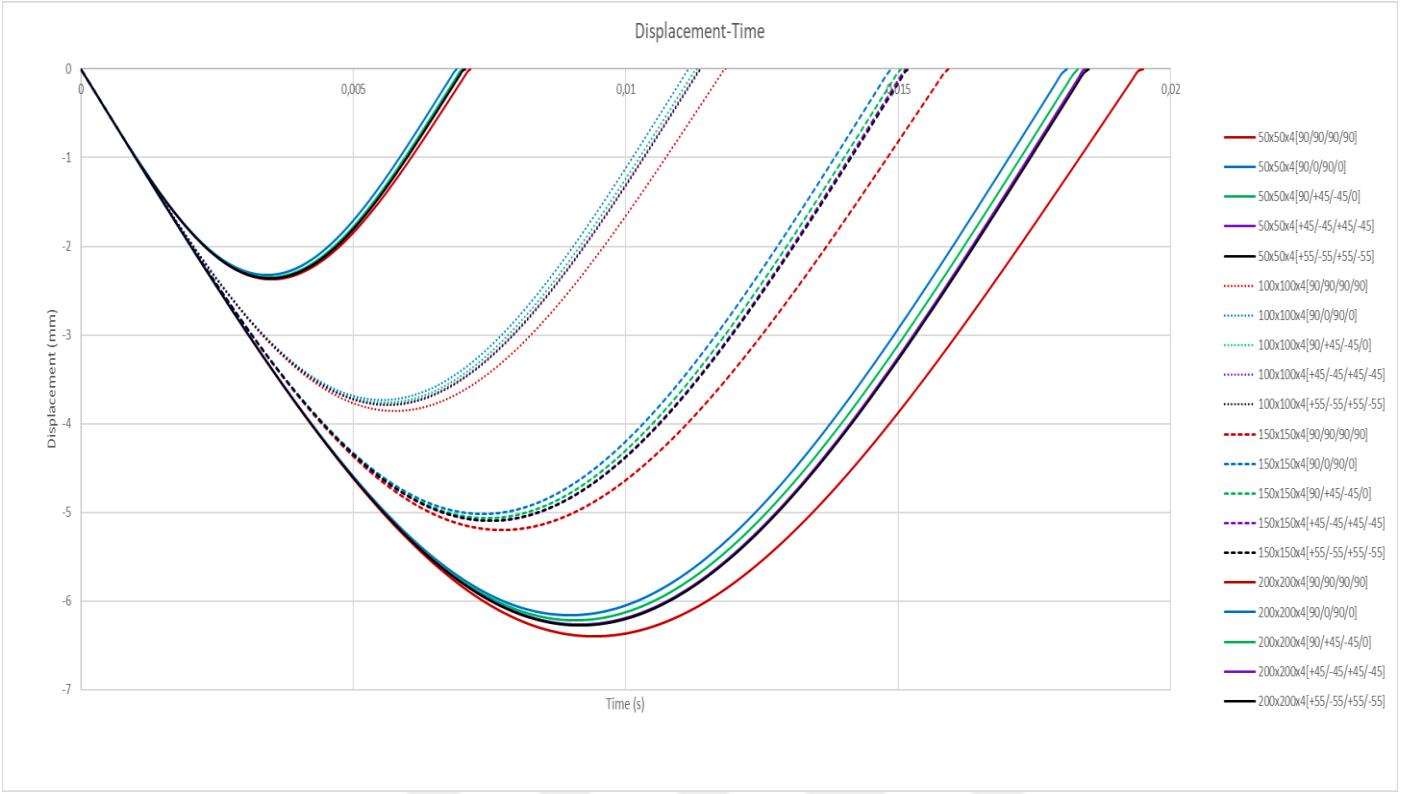
Matris fazındaki basınç hasar kriteri incelendiğinde en çok hasarı alan 50x50x4mm boyutlarında %98,16 değerinde [+45/-45/+45/-45] diziliminde olan kompozit yapı ve en az hasarlı olan ise 200x200x4mm boyutlarında %7,36 değerinde [90/90/90/90] dizilimine sahip kompozittir.

6.2. GRAFİK SONUÇLARI



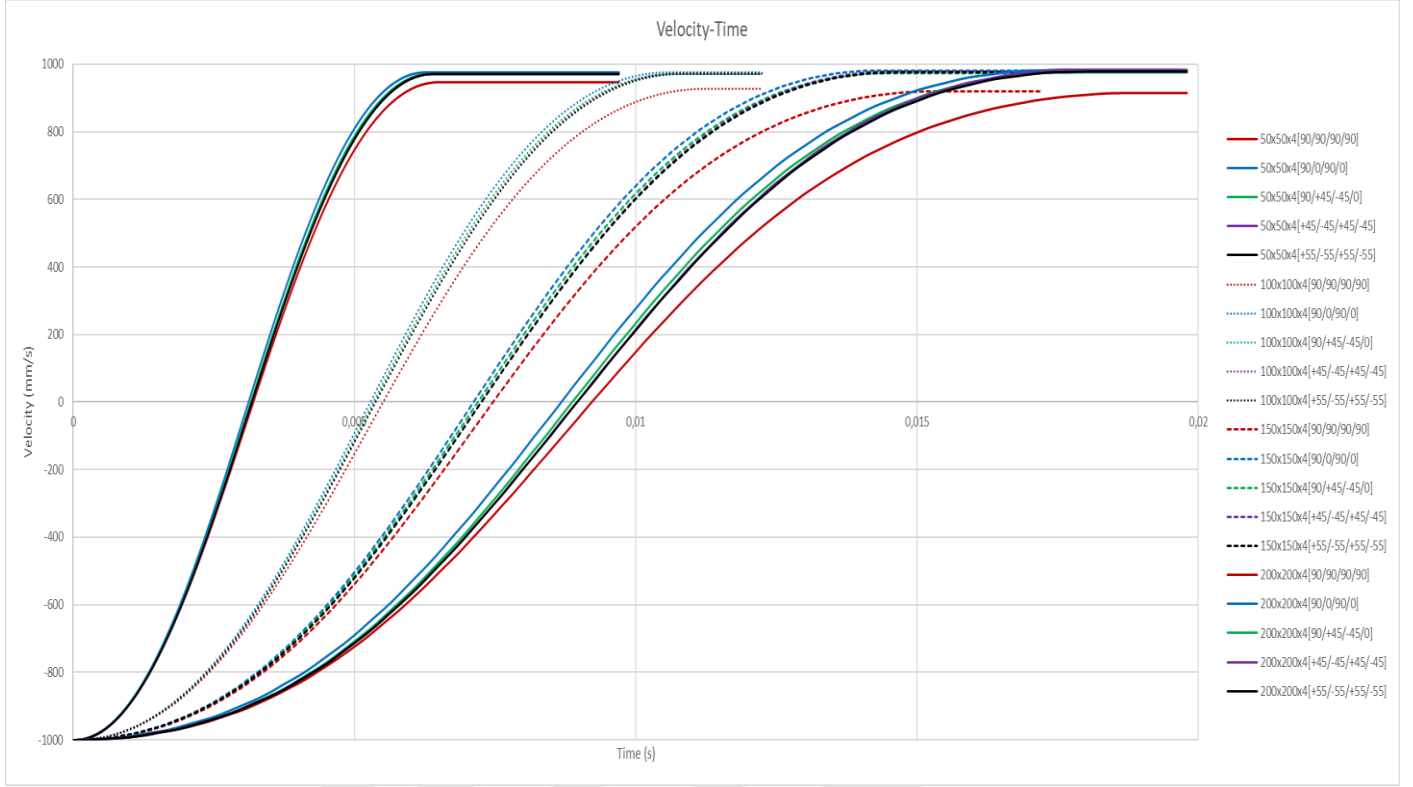
6.8.Kuvvet Zaman Grafiği

Kuvvet Zaman grafiği incelendiğinde, 50x50x4 mm [90/0/90/0] kompozit 0,006sn 15910 N, 200x200x4 mm [90/90/90/90] 0,018 sn'de 5185 N kuvvete ulaşmıştır. Bu aradaki farkın nedenleri yüzey alanı ve fiberlerin dizilimlerinden kaynaklanmaktadır. Küçük yüzey alanı darbe kuvvetinin kısıtlı bir bölgeye uygulanmasından ve [90/0/90/0] dizilimi ise kuvvetin farklı yönlere dağılmasını sağlayarak daha fazla kuvvete maruz kalmasına neden olur. Daha büyük yüzey alanı ise kuvvetin kademeli olarak artmasına [90/90/90/90] dizilimi kuvveti tek eksene yayarlar. Sonuç olarak, 50x50x4 mm [90/0/90/0] kompozit yapısında fiberlerin farklı eksenlerde kuvvet dengeli dağılsa dahi küçük yüzey alanından dolayı kısa sürede hasara uğramıştır.



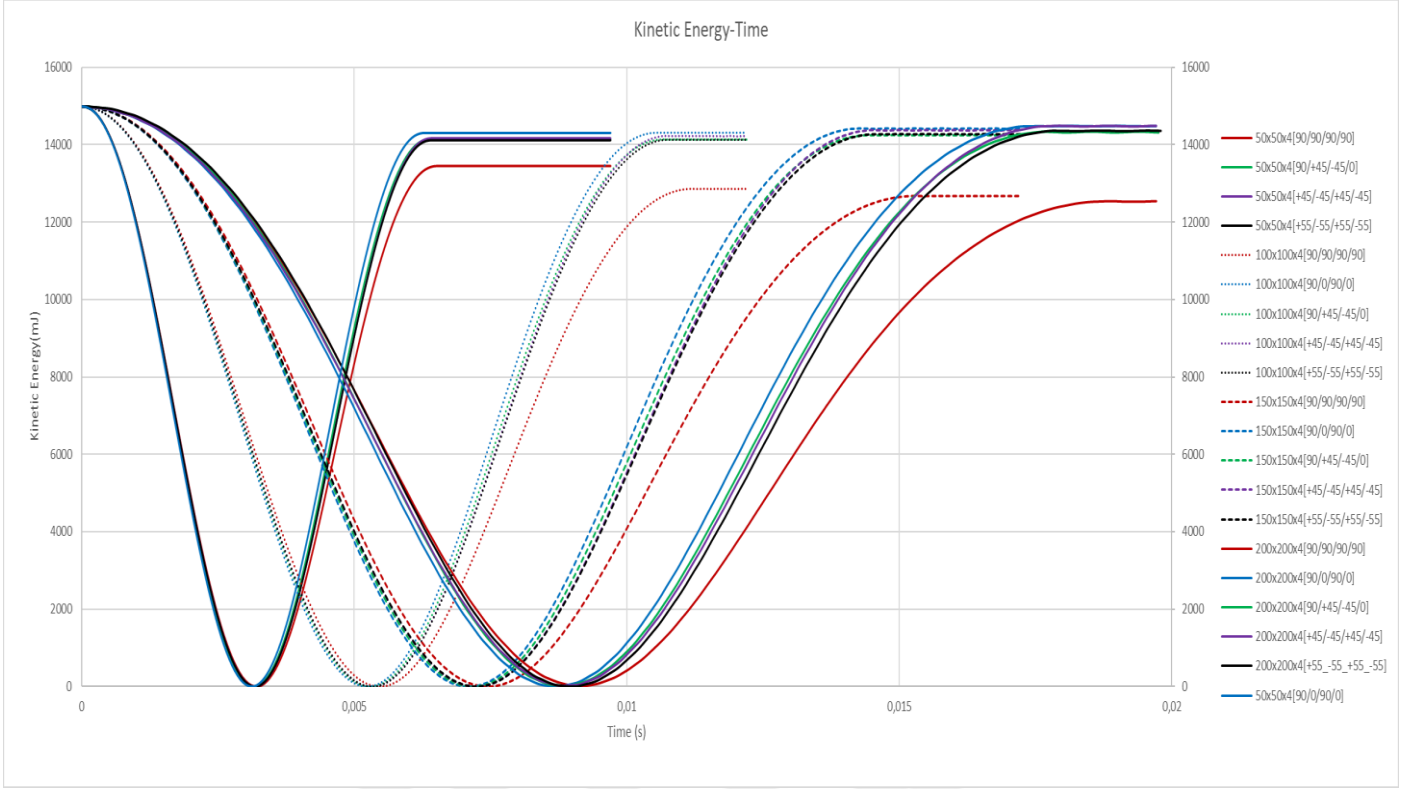
6.9. Deplasman Zaman Grafiği

Deplasman Zaman grafiği incelendiğinde, 50x50x4 mm [90/0/90/0] kompozit 0.003 sn de -2,32 mm, dolay 200x200x4 mm [90/90/90/90] kompozit yapısı ise 0,01sn de -6,37 mm yer değiştirmiştir. Bu sonucun çıkmasının nedenleri yüzey alanı ve fiberlerin dizilimidir. 50x50 mm yüzey alanı darbe kuvvetinin kısıtlı bir alanda yoğunlaşmasına [90/0/90/0] dizilimi ise kuvveti farklı doğrultularda darbe enerjini emerek deplasmanın sınırlı kalmasına neden olur. 200x200 yüzey alanında darbe enerjisi daha fazla yüzey alanına dağılır, [90/90/90/90] diziliminde liflere aktarılan enerjinin tek yönlü dağılmasından dolayı deplasman daha fazla görülür.



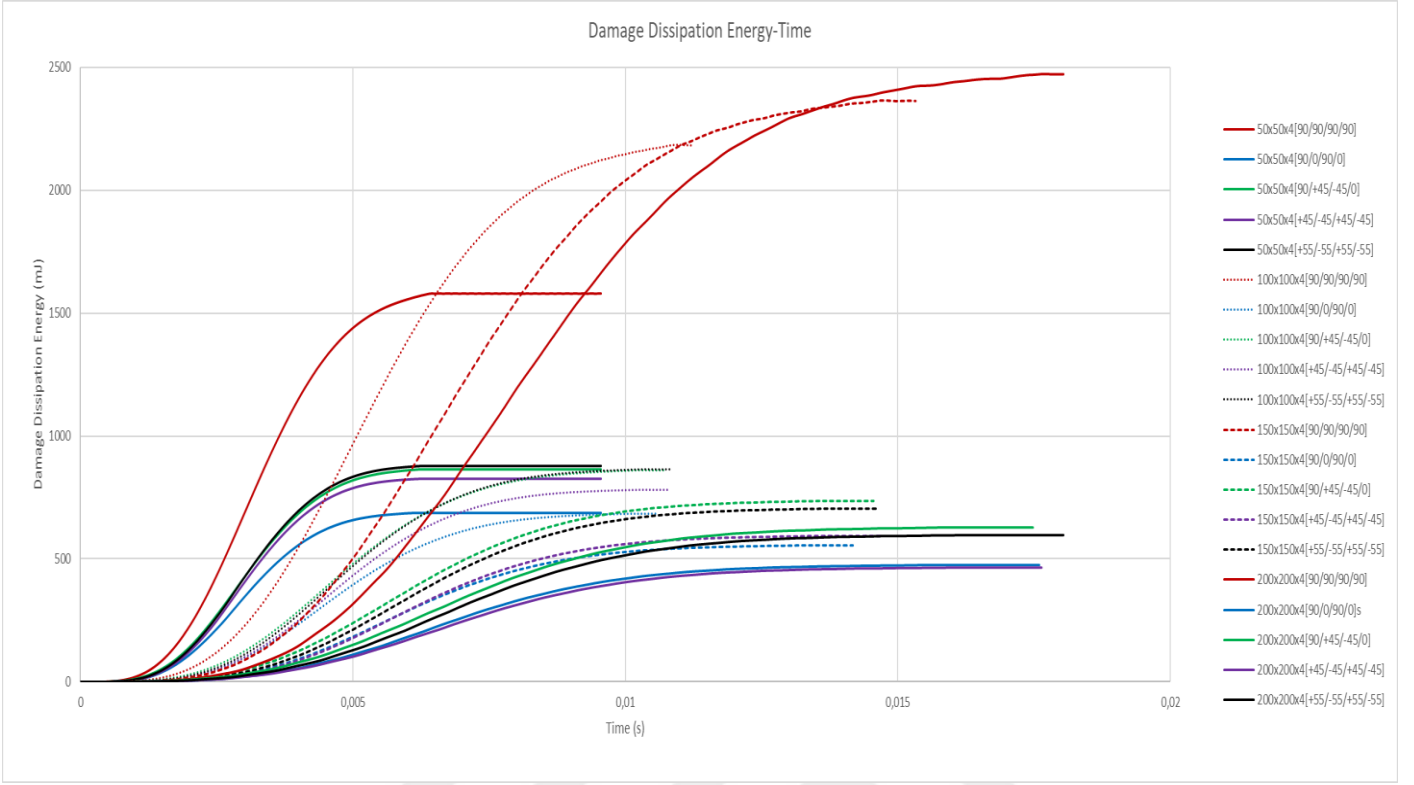
6.10.Hız Zaman Grafiği

Hız zaman grafiği incelendiğinde, 50x50x4 mm [90/0/90/0] kompozit malzeme 0,006 sn de 976 mm/s hızla 200x200x4mm [90/0/90/0] kompozit malzeme 0,06 sn de 973 m/s hızla tepe noktasına ulaşmıştır. Dizilimleri aynı olan kompozitlerdeki tepe noktasına ulaşma sürelerindeki farkın nedeni yüzey alanlarıdır. 50x50 yüzey alanında darbe kuvveti daha küçük alana etki eder daha büyük kuvvete maruz kalacağından dolayı absorbe edilen enerji kısa sürede serbest bırakılacağından dolayı ivmelenme hareketi hızlı gerçekleşir ve hız artışının daha kısa sürede gerçekleşmesine neden olur. 200x200 yüzey alanında ise, kuvvet daha fazla yüzey alanına dağılarak absorbe ettiği enerjiyi daha uzun sürede serbest bırakacağından dolayı ivmelenme daha uzun sürede gerçekleşir ve bunun sonucunda da hızlanma yavaş olur.



6.11.Kinetik Enerji Zaman Grafiği

Enerji zaman grafiği kompozit malzemenin darbe esnasında ne kadar enerji depoladığını gösterir. Kinetik enerjinin başlangıçta maksimum değerde olduğu, ancak çökme anında enerjinin sıfırlanıp vurucu yüzeyin geri sekmesi anında enerji tekrardan değişime uğrar. 50x50x4 mm [90/0/90/0] kompozit malzeme 0,006 sn de 690J 200x200x4mm [90/0/90/0] kompozit malzeme 0,018 sn de 2462J enerji kaybı olmuştur. Bu farkların esas nedeni yüzey alanlarıdır. 50x50 yüzey alanı, darbe enerjisini absorbe enerjisini kısıtlayarak enerjiyi tutmak yerine geri yayılım sağlayarak kaybedilen enerjinin daha az olmasına, 200x200 yüzey alanında enerjiyi daha fazla absorbe ederek kaybedilen kinetik enerji kaybının daha fazla olmasına neden olur.



6.12.Hasar Enerji Zaman Grafiği

Hasar dağılım enerjisi, kompozit yapıda, darbe altında ne kadar enerji kaybettiğini kaybedilen bu enerjinin malzeme içerisinde nasıl dağıldığını göstererek kompozit yapının deformasyona ne kadar uğradığı hakkında bilgi verir. Hasar Dağılım Enerji grafiği incelendiğinde, 50x50x4mm [90/0/90/0] kompozit yapısının 0,005 sn de kaybettiği enerji miktarı 670J, 200x200x4mm [90/90/90/90] kompozit yapının ise 0,018 sn de kaybettiği enerji 2471J dır. 50x50x4mm [90/0/90/0] kompozit malzemede liflerin birbirlerine dik diziliminden kaynaklı malzemenin daha esnek olmasını sağlarken yüzey alanının az olmasından dolayı enerji tek bir bölgede toplanır ve socunda daha az hasara uğramasına neden olur. 200x200x4mm [90/90/90/90] kompozit yapısında lifler tek yönde dizilir ancak yüzey alanı daha büyük olduğundan dolayı absorbe ettiği enerji daha fazladır bu nedenle de daha fazla hasara uğrar.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Liflerin dizilimi, malzemenin rijitliğini, enerji absorpsiyonunu ve darbe kuvvetine karşı gösterdiği direnci etkiler. Rijit dizilimler daha az deformasyon, daha yüksek kuvvet ve düşük enerji kaybı ile sonuçlanırken, açılı dizilimler daha fazla deformasyon, düşük kuvvet ve yüksek enerji absorpsiyonu sağlar.

Yüzey alanı büyüdükçe malzeme daha fazla enerji absorbe eder sonuç olarak da daha fazla deformasyon göstererek daha düşük kuvvetlere dayanır. Küçük yüzey alanları darbe kuvvetini yoğunlaştırır ve malzemenin daha rijit olmasına neden olurlar.

Küçük yüzey alanları, darbe kuvvetini yoğunlaştırarak daha hızlı kuvvet artışına neden olurken, büyük yüzey alanlarında kuvvetin daha geniş bir alana yayılması kuvvetin daha kademeli artmasına neden olur.

Açılı dizilimlerin malzemenin yer değiştirme miktarını artırarak deformasyonu artırdığını, rijit dizilimlerde ise daha düşük yer değiştirmeler gösterir.

Küçük yüzey alanları daha az deformasyon gösterirken, büyük yüzey alanlarının darbe kuvvetini yayarak daha fazla yer değiştirme ve bükülmeye neden olurlar.

Büyük yüzey alanlarının daha fazla enerji absorbe ederek daha yüksek kinetik enerji kaybına neden olurlar.

Esnek dizilimlerin malzemenin daha fazla enerji kaybetmesine ve hasarın yayılmasına neden olduğunu olurlar. Yüzey alanı büyüdükçe hasarın daha fazla yayılır ve daha yüksek hasar dağılım enerjisi oluştururlar.

7.2 Öneriler

FEM (SEY) ile yapılan çalışmalardan çıkan sonuçların deneysel çalışmaları yapılarak karşılaştırılabilir.

Kompozit yapıların katman sayısı artırılarak çalışmalar yapıp, yapılan sonuçlarla karşılaştırmaları yapılabilir.



8. KAYNAKLAR

- A.M. Al-Areqi, B. Aloyaydi, S. Subbarayan, F.A. Al-Mufadi, 2024, Low-velocity impact performance of 3D-printed PLA/Epoxy/Glass fibers of composite structures and latches, *Materials Today Communications*,39.
- A.S. Al Omari, K.S. Al-Athel, A.F.M. Arif, F.A. Al-Sulaiman,2020, Experimental and computational analysis of low-velocity impact on carbon-, glass- and mixed-fiber composite plates, *Journal of Composites Science*,4.
- B. Öztaş, Y. Korkmaz, H.İ. Çelik,2024, Image analyses of artificially damaged carbon/glass/ epoxy composites before and after impact load, *Heliyon* ,10.
- B. Liu, J. Lai, H. Liu, Z. Huang, T. Liu, Y. Xia, W. Zhang,2023, Finite Element Analysis of the Effect for Different Thicknesses and Stitching Densities under the Low Velocity Impact of Stitched Composite Laminates, *Polymers*, 15.
- D. Apc, D.A. Sáez, 2017, Comparative study between xfem and hashin damage criterion applied to failure of composites.
- E. Natarajan, L.I. Freitas, M.S. Santhosh, K. Markandan, A.A. Majeed Al-Talib, C.S. Hassan,2023, Experimental and numerical analysis on suitability of S-Glass-Carbon fiber reinforced polymer composites for submarine hull, *Defence Technology*, 19.
- E. Yeter, M.H. Doğru,2020, Simulation of behavior of carbon/epoxy and glass/epoxy composites under the drop weight impact event, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*,7.
- E.J. Barbero, F.A. Cosso, R. Roman, T.L. Weadon, 2013, Determination of material parameters for Abaqus progressive damage analysis of E-glass epoxy laminates, *Composites Part B: Engineering*, 46 ,211-220.
- F.R. Jones, N.T. Huff,2018, The structure and properties of glass fibers, *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, Elsevier, 757-803.
- F. Şen,2007, Failure analysis of composite pin-loaded joints under preload moments.
- H.E.L. Etri, M.Z. Polat, E.B. Özyılmaz,2024, Classification, applications, and impact behavior of composite materials: A review, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- J. Xu, M. El Mansori, 2015, Cutting modeling using cohesive zone concept of titanium/CFRP composite stacks, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 2091-2100.
- K. Falkowicz, Stability and Failure of Thin-Walled Composite Plate Elements with Asymmetric Configurations, *Materials*.

- K. Ni, Q. Chen, J. Wen, Y. Cai, Z. Zhu, X. Li, 2024, Low-velocity impact and post-impact compression properties of carbon/glass hybrid yacht composite materials, *Ocean Engineering*, 292.
- K. Kaware, M. Kotambkar, 2024, Experimental investigation of hybridization effect of Kevlar and Glass fibers on CFRP composite under low velocity impact, *International Journal of Crashworthiness*, 29, 187-197.
- K. Zouggar, F.B. Boukhoulda, B. Haddag, M. Nouari, 2016, Numerical and experimental investigations of S-Glass/Polyester composite laminate plate under low energy impact, *Composites Part B: Engineering*, 89, 169-186.
- Lapczyk, J.A. Hurtado, 2007, Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2333-2341.
- M. Uyaner, M. Kara, Y. Kepir, A. Gunoz, 2023, Virtual Testing of Laminated Composites Subjected to Low-Velocity Impact, *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, 47.
- M. Can Muyan, 2023, Development of progressive failure models and their application to open hole composite laminates and wind turbine blades a thesis *submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university*.
- N.A. Nassir, R.S. Birch, W.J. Cantwell, Z.W. Guan, 2024, The response of glass fibre reinforced PEKK laminates subjected to single and multiple impact loading, *Polymer Testing*, 131.
- N.A. Nassir, M.R. Gharkan, 2021, Impact response of composite laminates based on epoxy and glass fibre, içinde: *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 1901-1907
- N. Saravana Kumar, G. Vinothkumar, C. Vinothkumar, M. Prabhu, 2018, Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin, www.internationaljournalsrsg.org.
- P. Jakubczak, P. Podolak, M. Drożdżiel-Jurkiewicz, 2023, The assessment of the compressive strength of fibre metal laminates after low-velocity impact, *Composite Structures*, 320.
- P. Ramalakshmi, P. Ravinder Reddy, N. Sarthak, 2022, Finite element analysis on MWNT reinforced S-glass composite, *Materials Today: Proceedings*, 56, 1364-1368.
- P. Singh Chandel, Y.K. Tyagi, N. Kumar Gupta, N. Somani, 2024, Enhanced mechanical performance of jute-glass fiber reinforced epoxy composite: *Fabrication, analysis, and comparison*, *Materials Today: Proceedings*.
- R.C. Batra, G. Gopinath, J.Q. Zheng, 2012, Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates, *Composite Structures*, 94, 540-547.

- R. Mohanraj, T. Praveenkumar, V. Pavunraj, B. Paulraj, R. Ragul, Tensile and Low Velocity Impact Behaviour of Carbon/S-Glass Reinforced Hybrid PMC, 7 (t.y.) 10-15.
- S. Chowdhury, 2022, Low-velocity impact, vibration and shock response of unstitched/ stitched e-and s-glass/vinyl ester composites.
- T. Zheng, J. Huang, K. Huang, H. Yu, C. Hong, L. Guo, 2024, Different effects of interfacial properties on the tensile and compressive damage mechanisms of 3D woven composites: *Multiscale damage model and numerical comparative study, Engineering Fracture Mechanics*, 295.
- T.P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, J. Naveen, 2014, Glass fiber-reinforced polymer composites- A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 33, 1258-1275.
- U. Caliskan, R. Ekici, E. Yildiz, M.K. Apalak, 2020, A study on low-velocity impact performance of notched GFRP composites repaired by different composite patches: *Experiment and modeling, Polymer Composites*, 41, 323-340.
- V.A. Sumahi, S.P. Jani, S. Uppalapati, 2023, Impact study of a car bumper by using carbon fiber reinforced polyetherimide and S-glass/ epoxy composite, içinde: *Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd*, 364-370.
- Z. Zhu, R. Kang, J. Huang, Y. Zhu, X. Sun, 2023, Investigation on cutting damage mechanism of carbon fiber reinforced polymer based on macro/microscopic simulation Investigation on cutting damage mechanism of carbon fiber reinforced polymer based on macro/microscopic simulation.