

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT
PLAKALARIN ÇARPMA AÇISINA BAĞLI
OLARAK DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ
VE DARBE SONRASI BASMA MUKAVEMETİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa YAĞBASAN
1481011**

**Tez Danışmanı
Dr.Öğ.Üyesi Alb.Ayhan AYTAÇ**

ANKARA

2019

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT
PLAKALARIN ÇARPMA AÇISINA BAĞLI
OLARAK DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ
VE DARBE SONRASI BASMA MUKAVEMETİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa YAĞBASAN
1481011**

**Tez Danışmanı
Dr.Öğ.Üyesi Alb.Ayhan AYTAÇ**

ANKARA

2019



MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ

ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Mustafa YAĞBASAN'ın hazırladığı, "Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Plakaların Çarpma Açısına Bağlı Olarak Düşük Hızlı Darbe Davranışının ve Darbe Sonrası Basma Mukavemetinin İncelenmesi" konulu tez çalışması, jürimiz tarafından Teknoloji Yönetimi Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr.Ulvi ŞEKER

Danışman: Dr.Öğ.Üyesi Alb.Ayhan AYTAÇ

Üye: Prof.Dr. Ahmet ÖZDEMİR

İMZA



ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

22/02/2019


Prof. Dr. Öğ. Alb.
Alparslan Sav. Bil. Ens. Md.

Alparslan SAVBEN Md.





T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ



TEZ İNTİHAL RAPORU

Mustafa Yağbasan tarafından hazırlanan "Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Plakaların Çarpma Açısına Bağlı Olarak Düşük Hızlı Darbe Davranışının ve Darbe Sonrası Basma Mukavemetinin İncelenmesi" adlı tez çalışmasının a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan kısımlarına ilişkin, **15/01/2019** tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından

- Kabul ve Onay sayfaları hariç,
- Kaynakça hariç
- Alıntılar hariç
- 5 kelimeden daha az eşleşmeler hariç tutularak yapılan filtreleme sonucuna göre alınmış olan benzerlik oranı **% 3'** tür. Tez çalışmasının herhangi bir intihal içermediğini; beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü hukuki sorumluluğu kabul ve beyan ederim.

Adı Soyadı : Mustafa YAĞBASAN
Öğrenci No : 1481011
Anabilim Dalı : Teknoloji Yönetimi
Program Türü : ☒ Yüksek Lisans ☐ Doktora

Tarih / İmza
15.01.2019

DANIŞMAN ONAYI

Unvanı, Adı Soyadı : Dr.Öğ.Üyesi Alb. Ayhan AYTAÇ

Tarih / İmza
15.01.2019



ETİK BEYAN

Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Mustafa YAĞBASAN

22/02/2019



MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNOLOJİ YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
ANKARA 2019

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT PLAKALARIN ÇARPMA AÇISINA
BAĞLI OLARAK DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ VE DARBE SONRASI
BASMA MUKAVEMETİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa YAĞBASAN

ÖZET

Bu çalışmada, havacılık ve savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışı ve darbe sonrası basma mukavemeti, çarpma açısına ve darbe ucu geometrisine bağlı olarak deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle, kompozit numunelerin çekme ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Numunelerde delinme gerçekleşinceye kadar artan enerji seviyelerinde, yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçları ile 0, 5, 10 ve 15 derece çarpma açılarında ASTM 7136 standardına göre ağırlık düşürme darbe testleri yapılmıştır. Aynı şartlarda darbe sonrası basma mukavemeti testleri için hazırlanan numunelere 30,5 J darbe enerjisi seviyesinde darbe testleri yapılmıştır. Açılı çarpmalardaki ağırlık düşürme testlerinin yapılabilmesi için özel bir destek aparatı tasarlanarak üretilmiştir. Her bir test grubunun darbe davranışları kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri yardımıyla incelenmiştir. Enerji profil diyagramı kullanılarak numunelerin penetrasyon eşik enerjisi değerleri tespit edilmiştir. Ultrasonik c-tarama yapılarak numunelerde oluşan hasar alanları belirlenmiştir. Ayrıca ASTM 7137 standardına uygun olarak darbeye maruz kalan numunelere darbe sonrası basma mukavemeti testleri yapılmıştır. Aynı darbe enerjilerinde ve 0, 5 ve 10 derece çarpma açılarında yapılan testlere ait kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-zaman-enerji grafikleri benzerlik sergilerken, 15 derece çarpma açısına ait eğrilerde farklılıklar gözlemlenmiştir. Yarıküresel darbe ucunun ojival darbe ucuna kıyasla numunede daha fazla hasar alanına neden olduğu ve bunun sonucu olarak yarıküresel uç ile darbeye maruz kalan numunelerin darbe sonrası basma mukavemeti değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ojival darbe ucu

ile darbeye maruz kalan numunelerin penetrasyon eşik enerjisi yarıküresel darbe ucu ile darbeye maruz kalana göre daha fazladır. Darbe sonrası basma mukavemeti darbe enerjisinin artmasıyla büyük ölçüde azalmaktadır. Numuneye dik olarak gerçekleşen normal çarpmaların açılı çarpmalara kıyasla daha fazla hasara neden olduğu görülmüştür. Çarpma açısının artmasıyla darbe sonrası basma mukavemeti de artmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Ağırlık düşürme testi, darbe ucu geometrisi, açılı çarpma, karbon fiber takviyeli kompozit.



**NATIONAL DEFENSE UNIVERSITY
ALPARSLAN DEFENSE SCIENCES INSTITUTE
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY MANAGEMENT
ANKARA 2019**

**DETERMINATION OF LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOR AND
COMPRESSION AFTER IMPACT OF CARBON FIBER REINFORCED
COMPOSITE MATERIALS DEPENDING ON IMPACT ANGLE**

MASTER THESIS

Mustafa YAĞBASAN

ABSTRACT

In this study, low velocity impact behavior and compression after impact (CAI) strength of the carbon fiber reinforced composite materials widely used in aerospace and defense industry were investigated experimentally based on impact angle and impactor geometry. Tensile and three point bending tests of composite samples were performed. Drop weight impact tests were performed according to ASTM 7136 at increasing energy levels until the samples were perforated at the angles of 0, 5, 10 and 15 using hemispherical and ogival impactors. In the same way, impact tests were carried out at 30,5 J impact energy level for the specimens prepared for CAI tests. In order to perform the oblique impacts, newly designed fixture was manufactured. The impact behavior of each test group were investigated with force-time, force-displacement and energy-time curves. The penetration threshold energy values of the samples were determined by using the energy profile diagram. The samples were inspected by using ultrasonic c-scan to determine the damage areas. In addition, the CAI tests were performed in accordance with the ASTM 7137 standard. The force-displacement and force-time-energy graphs of the tests performed at the same impact energies and 0, 5 and 10 degrees impact angles were similar, but differences were observed in the curves of 15 degree impact angle. It has been found that the hemispherical impactor causes more damage in the sample than the ogival impactor does and therefore CAI of the samples exposed to the impact by the hemispherical impactor is lower than that caused by the ogival impactor. The penetration threshold energy of the samples exposed to impact with the ogival impactor is greater than the hemispherical impactor one. On the other

hand, CAI strength greatly decreases with increasing impact energy. It was observed that normal impacts perpendicular to the sample caused more damage than oblique impacts. With increasing impact angle, CAI strength increases.

Keywords : Drop weight test, impactor geometry, oblique impact, carbon fibre reinforced composites.



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada; farklı geometriye sahip darbe uçları ile eğimli olarak darbeye maruz kalan karbon fiber takviyeli kompozit numunelerin düşük hızlı darbe davranışı, hasar yapıları ve darbe sonrası basma mukavemetleri incelenmiştir.

Bu kapsamda, yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçları ile 0^0 , 5^0 , 10^0 ve 15^0 derece çarpma açılarındaki numunelerde delinme gerçekleşinceye kadar farklı darbe enerjilerinde ağırlık düşürme darbe testleri yapılmıştır. Çarpma açısı ve darbe ucu geometrisindeki değişimlerin malzemenin düşük hızlı darbe davranışına ve darbe sonrası basma mukavemetine olan etkileri ortaya konularak yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında tecrübeleri ile bana yol gösteren Sayın Yrd.Doç.Dr. Celal EVCİ'ye ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren ve hiç bir konuda desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr.Öğ.Üyesi Alb.Ayhan AYTAÇ'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Kompozit numunelerin temini, üretimi ve testlerin gerçekleştirilmesi esnasında her türlü desteğini esirgemeyen TUSAŞ çalışanlarına, ağırlık düşürme darbe testlerinin icra edilmesi aşamasındaki yardımlarından dolayı ODTÜ Merkez Laboratuvarı çalışanlarına minnet ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak, tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan, sabır ve anlayış gösteren eşim Betül YAĞBASAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Mustafa YAĞBASAN

Ankara

Şubat 2019



İÇİNDEKİLER

ONAY	iii
TEZ İNTİHAL RAPORU	v
ETİK BEYAN	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	xi
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	xiii
İÇİNDEKİLER.....	xv
TABLolar LİSTESİ	xviii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Yararlanılan Metodoloji	3
1.3. Araştırmanın Önemi	3
1.4. Araştırmanın Kapsamı	4
1.5. Çalışmanın Literatüre Katkısı ve Orijinalitesi	4
1.6. TSK'ya Katkısı	16
1.7. Diğer Bölümler	17
2. KOMPOZİT MALZEMELER	19
2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal Elemanları	19
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	19
2.3. Havacılık Alanında Kompozit Malzemelerin Kullanımı.....	20
2.3.1. Üretim Yöntemleri	21
2.3.2. Kompozit Malzemelerin Havacılıkta Uygulama Alanları	22
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞI	25
3.1. Darbe Sınıflandırması	25
3.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı.....	26
3.3. Darbe Sonucu Oluşan Hasar Türleri	29
3.3.1. Matris Çatlaması.....	30
3.3.2. Delaminasyon (Tabakalar Arası Ayrılma).....	31
3.3.3. Fiber Kopması	31
3.3.4. Penetrasyon ve Perforasyon.....	32
3.4. Darbe Hasarına Etki Eden Parametreler	32

3.4.1. Malzemenin Yapısal Parametreleri	32
3.4.2. Vurucu Kütle Parametreleri	33
3.4.3. Çevre Koşulları.....	34
3.5. Kompozit Malzemelerin Darbe Testleri	34
3.5.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi	34
3.5.2. Sarkaçlı (Charpy ve İzod) Darbe Testi.....	35
3.5.3. Balistik Test Düzeneği.....	35
3.5.4. Hava veya Gaz Silahı Testleri	36
3.5.5. Split Hopkinson Test Düzeneği.....	36
3.6. Darbe Sonrası Muayene ve Test Yöntemleri.....	37
3.6.1. Ultrasonik Muayene.....	37
3.6.2. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti (DSBM) Testi	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE YÖNTEM	39
4.1. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	39
4.1.1. Test Numunelerinin Üretimi	40
4.1.2. Üretim Aşamaları.....	41
4.1.3. Üretim Sonrası Plakaların Muayenesi.....	44
4.1.4. Numunelerin Kesilmesi.....	45
4.2. Çekme Testi	47
4.3. Üç Nokta Eğme Testi.....	48
4.4. Ağırlık Düşürme Darbe Testi.....	49
4.4.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Cihazının Özellikleri	50
4.4.2. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Cihazının Çalışma Prensibi.....	50
4.4.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Numunelerinin Hazırlanması	52
4.4.4. Darbe Testi İçin Kullanılan Parametreler	53
4.4.5. Farklı Çarpma Açıları İçin Destek Aparatı Üretimi.....	54
4.4.6. Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu Üretimi	56
4.5. Çentik Derinliklerinin Ölçülmesi.....	57
4.6. Ultrasonik C-Tarama Muayene Yöntemi ile Hasar Alanlarının Ölçülmesi.....	57
4.7. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti (DSBM) Testi	59
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	63
5.1. Çekme Testi Sonuçları	63
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	64
5.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	65
5.3.1. Enerji Artışının Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi.....	69
5.3.2. Enerji Profil Diyagramı.....	70
5.3.3. Darbe Ucu Şeklinin Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi.....	75

5.3.4. Çarpma Açısının Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi	79
5.3.4.1. Çarpma Açısının En Yüksek Temas Kuvvetine Etkisi	80
5.3.4.2. Çarpma Açısının Darbe Ucu Yer Değiştirmesine Etkisi	83
5.3.4.3. Çarpma Açısının Temas Süresi ve Absorbe Edilen Enerjiye Etkisi	86
5.4. Darbe Sonrası Oluşan Hasarın Tahribatsız Muayene Yöntemleri ile Değerlendirilmesi	92
5.4.1. Gözle Muayene	92
5.4.2. Çentik Derinliğinin Değerlendirilmesi	96
5.4.3. Ultrasonik C-Tarama Sonuçlarının Değerlendirilmesi	97
5.4.3.1. Darbe Ucu Şeklinin Hasar Yapısına Etkisi	98
5.4.3.2. Enerji Artışının Hasar Yapısına Etkisi	99
5.4.3.3. Çarpma Açısının Hasar Yapısına Etkisi	101
5.5. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	104
5.5.1. Çarpma Açısının ve Darbe Ucu Şeklinin DSB Dayanımına Etkisi	106
5.5.2. Darbe Enerjisi Artışının DSB Dayanımına Etkisi	110
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
6.1. Sonuçlar	115
6.2. Öneriler	118
KAYNAKÇA	120
EKLER	125
Ek 1. Ağırlık Düşürme Darbe Testlerine ait Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri ...	125
Ek 2. Ağırlık Düşürme Darbe Testlerine ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri	129
ÖZGEÇMİŞ	133

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1:	Test Numunelerine Ait Bilgiler	45
Tablo 2:	Ağırlık Düşürme Darbe Testleri Durumu	53
Tablo 3:	Numunelerin Etiketlenmesi.....	57
Tablo 4:	Yapılan DSBM Testlerin Miktarı	60
Tablo 5:	Çekme Testi Sonuçları	63
Tablo 6:	Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	65
Tablo 7:	Ağırlık Düşürme Darbe Testleri Enerji Seviyeleri	66
Tablo 8:	Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait 0°, 5°, 10° ve 15° Çarpma Açılarında Penetrasyon Enerji Seviyeleri.....	75
Tablo 9:	30 J ile 95 J Darbe Enerjilerine Ait Ortalama En Yüksek Kuvvet ve Ortalama Hertz Kuvvet Değerlerinin Karşılaştırılması.....	83
Tablo 10:	Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 30 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri	93
Tablo 11:	Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 60 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri	94
Tablo 12:	Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 85 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri	95
Tablo 13:	Farklı Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile 10 J, 30 J, 60 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde Yapılan Testlere Ait C-Tarama Sonuçları Görüntüleri	98
Tablo 14:	Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu İle 10 J, 30 J, 60 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama ve Darbe Yüzeyi Görüntüleri	99
Tablo 15:	DSBM Testi Yapılan Numunelerin Görüntüleri	105
Tablo 16:	Hasarsız Numuneye Yapılan DSBM Testi Sonrası Numunede Oluşan Hasar Görüntüleri.....	106
Tablo 17:	DSBM Test Sonuçları ($E_d=30,5$ J)	107
Tablo 18:	Farklı Çarpma Açılarında ve 20 J, 30,5 J ve 70 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin DSBM Testi Sonrası Yandan Görüntüleri.....	110
Tablo 19:	Sonuçların Karşılaştırması	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1:	Airbus A380 Malzeme Yapısı.....	24
Şekil 2:	Kaza İle Oluşan Hasarın Karakterizasyonu.....	28
Şekil 3:	Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrilerinden Absorbe Edilen Enerjinin Hesaplanması (a) Geri Sekme Durumu, (b) Perforasyona Uğrayan Numune.....	29
Şekil 4:	Matris Çatlağı Türleri a) Çekme Çatlağı, b) Kesme Çatlağı.....	30
Şekil 5:	(a) Kalın Plakalarda, (b) İnce Plakalarda Hasar İlerleme Şekilleri	31
Şekil 6:	Geri Sekme, Kısmi Nüfuziyet ve Tam Delinme Durumlarının Şematik Gösterimi	32
Şekil 7:	Ağırlık Düşürme Test Cihazı Düzeneği	35
Şekil 8:	Charpy (a) ve İzod (b) Darbe Test Numunelerinin Konumu	35
Şekil 9:	Basit Bir Gaz Silah Test Düzeneği	36
Şekil 10:	DSB Dayanımı Testi Uygulanan Numunede Hasar Oluşumu.....	38
Şekil 11:	5'li Saten Dokuma.....	39
Şekil 12:	Tabaka Konfigürasyonu.....	40
Şekil 13:	Kullanılan Reçine Emdirilmiş Örgü Tabaka.....	41
Şekil 14:	$\pm 45^0$ Fiber Yönelimine Sahip Tabakaların Kesimi.....	42
Şekil 15:	Karbon Fiber Örgü Tabakaların Kesilmesi	42
Şekil 16:	Karbon Fiber Tabakaların Yerleştirilmesi	42
Şekil 17:	Vakumlama ve Torbalama İşlemi.....	43
Şekil 18:	Vakum Portu ve Isı Sensörlerinin Yerleştirilmesi.....	43
Şekil 19:	Otoklav İşlemi, (a) Otoklav Fırını, (b) Panellerin Fırına Yerleştirilmesi, (c) Plakaların Kür Edilmesi, (ç) Plakaların Ayrılması	44
Şekil 20:	Plakaların C-Tarama ile Ultrasonik Muayene Görüntüleri	44
Şekil 21:	Numunelerin Kesim İşlemi	46
Şekil 22:	Numunelerin Taşlanması.....	46
Şekil 23:	Çekme Testi Numuneleri	47
Şekil 24:	Çekme Testi Numunesi Ebatları	47
Şekil 25:	Eğme Testi Numune Ebatları.....	48
Şekil 26:	Eğme Testi Numuneleri	49
Şekil 27:	Ağırlık Düşürme Test Cihazı Bölümleri	50
Şekil 28:	Ağırlık Düşürme Darbe Testi Numune Ebatları	52
Şekil 29:	Ağırlık Düşürme Darbe Testi Numuneleri.....	53

Şekil 30:	İmal Edilen Destek Aparatının Ebatları	54
Şekil 31:	(a) Ağırlık Düşürme Test Cihazı Destek Aparatı, (b) 0° , 5° , 10° ve 15° Çarpma Açıları İçin Ayarlanabilen Destek Ayakları, (c) Destek Ayaklarının Montajı	55
Şekil 32:	Destek Aparatına Yerleştirilen Numunenin Üstten Görünüşü	55
Şekil 33:	Destek Aparatının Ağırlık Düşürme Darbe Test Cihazına Yerleştirilmesi.....	56
Şekil 34:	Farklı Çarpma Açıları İçin Destek Aparatının Görünümü	56
Şekil 35:	(a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Uçlarının Ebatları.....	57
Şekil 36:	Ultrasonik C-Tarama Sistemi ile Numunelerin Muayenesi	58
Şekil 37:	Yarıküresel Darbe Ucuyla 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri	59
Şekil 38:	DSB Dayanımı Test Düzeneği.....	59
Şekil 39:	Numunenin Test Düzeneğine Yerleştirilmesi.....	60
Şekil 40:	Çekme Gerilmesi-Şekil Değiştirme Grafiği.....	63
Şekil 41:	Çekme Testi Sonrası Numunelerin Görünümü	64
Şekil 42:	Eğme Testi Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	64
Şekil 43:	Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Numunenin Kırılması	65
Şekil 44:	Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Geri Sekme, Penetrasyon ve Perforasyon Karakterli Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	67
Şekil 45:	Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Geri Sekme, Penetrasyon ve Perforasyon Karakterli Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri.....	69
Şekil 46:	Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Ağırlık Düşürme Testlerine Ait Temas Süresi-Çarpma Açısı Grafikleri.....	70
Şekil 47:	Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısındaki Enerji Profil Diyagramı.....	72
Şekil 48:	Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile (a) 0° , (b) 5° , (c) 10° ve (d) 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Enerji Profil Diyagramları.....	73
Şekil 49:	Penetrasyon Eşik Enerjisi İle Çarpma Açısı Arasındaki İlişki	74
Şekil 50:	20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	76
Şekil 51:	50 J, 70 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	76
Şekil 52:	20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri.....	77
Şekil 53:	30,5 J Darbe Enerjisi ve 0° Çarpma Açısıyla Darbe Maruz Kalan DSBM Testi Numunelerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	78

Şekil 54:	30,5 J Darbe Enerjisi ve 0° Çarpma Açısıyla Darbe Maruz Kalan DSBM Testi Numunelerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	78
Şekil 55:	50 J, 70 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	79
Şekil 56:	Yarıküresel Darbe Ucu İçin Artan Darbe Enerjisi ile En Yüksek Temas Kuvvetinin Değişimi	80
Şekil 57:	Ojival Darbe Ucu İçin Artan Darbe Enerjisi ile En Yüksek Temas Kuvvetinin Değişimi	81
Şekil 58:	Çarpma Açısının Artmasıyla Ortalama En Yüksek Kuvvetinin Değişimi.....	82
Şekil 59:	Çarpma Açısının Artmasıyla Ortalama Hertz Kuvvetinin Değişimi	82
Şekil 60:	(a) Yarıküresel Darbe Ucu, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere ait En Yüksek Temas Kuvvetinin Çarpma Açısıyla Değişimi.....	83
Şekil 61:	40 J Darbe Enerjisi ile 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri	84
Şekil 62:	30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	85
Şekil 63:	(a) 70 J ve (b) 85 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	86
Şekil 64:	40 J Darbe Enerjisi ile 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlerin Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	87
Şekil 65:	30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde ve 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman Eğrileri	88
Şekil 66:	(a) 30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere ait , (b) DSBM Testi İçin 30,5 J Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Temas Süresi Çarpma Açısı Eğrileri	89
Şekil 67:	(a) Yarıküresel (b) Ojival darbe Ucu ile Farklı Çarpma Açılarında 30,5 J Darbe Enerjisi ile Darbeye Maruz Kalan DSBM Testinde Kullanılacak Numunelere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri.....	90
Şekil 68:	20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde, 0° ve 15° Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri	91
Şekil 69:	70 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	91
Şekil 70:	5 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	92
Şekil 71:	(a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucu ile Darbeye Maruz Kalan Numunelerde Çentik Derinliği, Çarpma Açısı ve Darbe Enerjisi Arasındaki İlişki.....	97

Şekil 72:	10 J ve 50 J Darbe Enerjileri Arasında Farklı Çarpma Açılarında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Ortalama Çentik Derinliği Grafiği	97
Şekil 73:	10 J-85 J Arası Darbe Enerjilerinde Yarıküresel Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri	100
Şekil 74:	10 J-85 J Arası Darbe Enerjilerinde Ojival Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri.	100
Şekil 75:	Darbe Enerjisiyle Numunelerde Oluşan İzdüşüm Hasar Alanının Değişimi.	101
Şekil 76:	Yarıküresel Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait İzdüşüm Hasar Alanının Darbe Enerjisi ve Çarpma Açısıyla Değişimi.....	102
Şekil 77:	Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait İzdüşüm Hasar Alanının Darbe Enerjisi ve Çarpma Açısıyla Değişimi.	102
Şekil 78:	10 J ve 50 J Darbe Enerjileri Arasında Farklı Çarpma Açılarında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Ortalama Hasar Alanı- Grafiği	103
Şekil 79:	DSBM Test Cihazı.....	104
Şekil 80:	Yarıküresel Darbe Ucu ile (a) 0°, (b) 5° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelerin DSBM Test Grafikleri.....	105
Şekil 81:	Ortalama DSBM'nin Çarpma Açısıyla Değişimi	107
Şekil 82:	Çarpma Açısıyla DSBM ve İzdüşüm Hasar Alanının Değişimi.....	108
Şekil 83:	Çarpma Açısıyla DSB Mukavemeti ve Ortalama En Yüksek Kuvvetin Değişimi.....	109
Şekil 84:	0° Çarpma Açısı ve 30,5 J Darbe Enerjisiyle Darbeye Maruz Kalan Numunelere ve Hasarsız Numuneye Ait DSBM Değerleri	109
Şekil 85:	Yarıküresel Darbe Ucu ve 15° Çarpma Açısıyla 20 J, 30,5 J ve 70J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Grafiği.....	111
Şekil 86:	Ojival Darbe Ucu ve 15° Çarpma Açısıyla 20 J, 30,5 J ve 70J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Grafiği.....	111
Şekil 87:	DSBM ile Hasar Alanının Darbe Enerjisi ile Değişimi	112
Şekil 88:	Farklı çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile 20 J, 30,5 J ve 70 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Sonuçları.....	113
Şekil 89:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	125
Şekil 90:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 5° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	125
Şekil 91:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 10° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	126
Şekil 92:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 15° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	126

Şekil 93:	Ojival Darbe Ucu ile 0^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	127
Şekil 94:	Ojival Darbe Ucu ile 5^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri.....	127
Şekil 95:	Ojival Darbe Ucu ile 10^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri	128
Şekil 96:	Ojival Darbe Ucu ile 15^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri	128
Şekil 97:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 0^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	129
Şekil 98:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 5^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	129
Şekil 99:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 10^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	130
Şekil 100:	Yarıküresel Darbe Ucu ile 15^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	130
Şekil 101:	Ojival Darbe Ucu ile 0^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri.....	131
Şekil 102:	Ojival Darbe Ucu ile 5^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri.....	131
Şekil 103:	Ojival Darbe Ucu ile 10^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	132
Şekil 104:	Ojival Darbe Ucu ile 15^0 Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri	132

KISALTMALAR VE SİMGELER

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BVID	: Barely Visible Impact Damage (Gözle Zorlukla Görünebilen Hasar)
CRH	: Caliber Radius Head (Kalibre-Yarıçap-Uç Kısım Değeri)
DSBM (CAI)	: Darbe Sonrası Basma Mukavemeti (Compression After Impact)
OJ	: Ojival (Sivri uçlu ve yanal yüzeyleri kavisli)
Prepreg	: Pre-impregnated (Önceden reçine emdirilmiş)
TUSAŞ	: Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
VARTM	: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama)
YK	: Yarıküresel

Simgeler	Açıklama
d	: Numunenin kalınlığı
ed	: En düşük
ey	: En yüksek
E_a	: Absorbe edilen enerji
E_d	: Darbe enerjisi
E_{pen}	: Penetrasyon eşik enerjisi
F_{DSBM}	: Darbe sonrası basma mukavemeti
F_{ey}	: En yüksek kuvvet
F_H	: Hertz kuvveti
L	: Mesnetler arası mesafe
P_{eb}	: En büyük yük
w	: Numunenin genişliği
σ_{ζ}	: Çekme dayanımı
σ_e	: Eğilme gerilmesi

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Kompozit malzemeler, sahip oldukları yüksek dayanım, sağlamlık ve hafiflik sayesinde havacılık sanayisindeki uygulamalar için en uygun yapı malzemesi haline gelmiştir.¹ Uçak yapılarında alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerine yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip olan kompozit malzemelerin kullanılmasıyla birlikte havacılık alanında önemli miktarda ağırlık tasarrufu ve performans artışı sağlanmıştır.

Ayrıca, kompozit malzemeler, daha geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında aerodinamik olarak daha etkin konfigürasyonlar üretmek için kolay şekil verme yeteneğine sahiptir.² Bu sayede hava araçlarında teknolojik gelişmelere uygun olarak meydana gelen tasarımsal yenilikler daha kolay uygulanabilmektedir.

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin sağladığı diğer avantajlar arasında, yüksek hasar toleransı, hurda azalımı, iyileştirilmiş yorulma ömrü ve daha iyi korozyon direnci yer almaktadır. Bazı dezavantajları olarak ise; malzeme ve üretim maliyeti, görülemeyen darbe hasarı, büyük parçaların muayenesi ve onarım yöntemlerindeki farklılık sıralanmaktadır.³

Hava araçlarında kullanılan kompozit malzemeler uçuş, bakım veya üretim esnasında bazı darbelere maruz kalabilirler. Uçak pistindeki çiviler, asfalt parçaları, emniyet telleri, cıvatalar, pullar, tahta veya plastik parçalar gibi döküntüler tekerleklerden sekerek uçağa çarpabilirler. Bakım, onarım ve kargolama esnasında el aleti düşmesi, bakım malzemesi düşmesi, taşınan bir malzemenin düşmesi gibi nedenlerden dolayı hava aracında düşük hızlı darbeye bağlı hasarlar oluşabilir.

¹ Tom Mitrevski ve diğ., "The Effect of Impactor Shape On The Impact Response of Composite Laminates", **Composite Structures**, c. 67, s. 2 (2005): s. 139.

² Constantinos Soutis, "Fibre Reinforced Composites in Aircraft Construction", **Progress in Aerospace Sciences**, c. 41, s. 2 (2005): s. 143.

³ Maria Mrazova, "Advanced Composite Materials of the Future in Aerospace Industry", **Incas Bulletin**, c. ., s. 3 (2013): s. 141.

Periyodik kontrollerde tespit edilmesi güç, zorlukla görünebilen hasarlara neden olabilen düşük hızlı darbeler kompozit yapılar için sorun teşkil etmektedir. Darbe anında yüzeyde gözle görülebilen bir hasar gözlemlenmese bile malzemenin içyapısında matris çatlaması ve delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşabilmektedir. Bu hasarların sonucunda tabakalı kompozit malzemelerin yük taşıma kapasitesi ve basma mukavemeti önemli ölçüde azalmaktadır.⁴

Bu nedenle kompozit malzemelerin maruz kalabileceği düşük hızlı darbe kaynaklı hasarın derecesini tahmin etmek ve farklı durumlar karşısında malzemenin veya yapının ortaya koyabileceği darbe davranışının, hasar mekanizmalarının ve artakalan dayanımlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.⁵

Düşük hızlı darbe durumunda kompozit malzemenin davranışını ortaya koyarken kullanılan hasar direnci ve hasar toleransı terimleri, kompozit malzemenin yapısal tasarımının ve emniyet gereksinimlerinin belirlenmesinde önemli bir role sahiptir. Hasar direnci, malzemenin darbe sonrası oluşabilecek kalıcı yapısal değişime karşı dayanıklılığını ifade etmektedir.⁶ Ağırlık düşürme darbe testi sonrasında kompozit plakalarda oluşan darbe hasarının miktarı ve yapısı incelenerek kompozit malzemenin hasar direnci tespit edilmektedir. Hasar toleransı ise darbeye maruz kalan kompozit malzemenin işlevini yerine getirebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemenin hasar toleransının belirlenmesi için darbe sonrası basma mukavemeti (DSBM) testi yapılmaktadır.

Bu bağlamda; havacılık alanında yaygın olarak kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin düşük hızlı darbe davranışını ortaya koymak maksadıyla farklı çarpma açılarında, yarıküresel ve ojival (sivri uçlu ve yanal yüzeyleri kavisli) geometriye sahip darbe uçlarıyla artan darbe enerjilerinde ağırlık düşürme darbe testleri yapılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz kalan malzemenin artakalan dayanımının belirlenmesi için ise darbe sonrası basma mukavemeti testleri yapılmıştır.

⁴ Manuel De Freitas, Luis Reis, "Failure Mechanisms on Composite Specimens Subjected to Compression After Impact", **Composite Structures**, c. 42, s. 4 (1998): s. 365.

⁵ Memduh Kara, "Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı" (Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012), s.18.

⁶ Alan T. Nettles, "**Damage Tolerance of Composite Laminates From an Empirical Perspective**", NASA Technical Reports Server, 2010. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100005132.pdf> [Erişim Tarihi: 17.04.2017].

1.2. Çalışmanın Amacı ve Yararlanılan Metodoloji

Bu çalışmada; farklı parametreler kullanılarak yapılan testler ve analizler yardımıyla karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin darbe davranışının, hasar yapılarının ve darbe sonrası basma mukavemetinin; darbe enerjisine, çarpan cisim geometrisine ve çarpma açısına bağlı olarak değişiminin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu kapsamda, önceden reçine emdirilmiş karbon fiber örgü tabakalar (prepreg) kullanılarak belli bir konfigürasyonda üretilen karbon fiber takviyeli kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır.

Ardından, ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak, her bir numunede delinme oluşuncaya kadar artan enerji seviyelerinde darbe testlerine tabi tutulmuştur. Ağırlık düşürme darbe testleri ile numunelerin geri sekme, nüfuziyet (penetrasyon) ve tam delinme (perforasyon) esnasındaki darbe davranışları incelenmiştir. Malzemede oluşan hasar türlerinin hangi darbe enerjisinde olduğu kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri kullanılarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda malzemede oluşan hasar yapıları tahribatsız muayene yöntemleri (gözle muayene, ultrasonik c-tarama) vasıtasıyla analiz edilerek darbe enerjisi, çarpma açısı ve darbe ucu ile hasar alanları arasındaki ilişki belirlenmiştir. Son olarak malzemelerin darbe sonrası artakalan dayanımlarının belirlenmesi için 20 J, 30,5 ve 70 J enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan numuneler darbe sonrası basma mukavemeti (DSBM) testine tabi tutulmuşlardır.

Yapılan testler sonucunda darbe enerjisi, çarpma açısı ve çarpan cisim geometrisi gibi değişkenlere bağlı olarak kompozit malzemenin hasar davranışı grafik, resim ve çizelgeler yardımıyla analiz edilerek, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Araştırmanın Önemi

Üstün özellikleri nedeniyle ileri teknoloji gerektiren havacılık ve savunma sanayisinin vazgeçilmezi haline gelen karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, kullanımları esnasında farklı şiddette darbeye maruz kalabilirler. Yüksek hızla gerçekleşen darbeler gözle görülebilir hasara neden olurken düşük hızlarda meydana gelen darbeler malzeme içinde belirlenmesi güç ve gözle görülmeyen hasarlara neden olabilir. Bu nedenle, düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz

kalabilecek kompozit malzemelerin davranışının incelenmesi ve yapıda oluşabilecek hasarın önceden tahmin edilebilmesi büyük öneme sahiptir.

Düşük hızlı darbeye maruz kalan tabakalı kompozit yapıda oluşan hasarın değerlendirilmesi sonucunda; malzemenin bu haliyle kullanılmasına, onarılmasına veya değiştirilmesine karar verilmesi gerekmektedir. Bilinen şartlarda darbeye maruz kalan kompozit malzemenin sergileyeceği performansın ve hasar yapısının tahmin edilebilmesi; üreticilere ve kullanıcılara karar verme sürecinde destek verileri sağlayacaktır. Benzer şekilde, tabakalı kompozit malzemenin hasar direnci ve hasar toleransı özelliklerinin bilinmesi ürün geliştirme ve malzeme seçimi açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Bu nedenle, düşük hızlı darbe yüklemelerine karşı hassas yapıda olan kompozit malzemelerin farklı darbe ucu ve farklı çarpma açılarında gerçekleşebilecek darbelere karşı davranışının, malzemede oluşan hasar mekanizmalarının ve darbe sonrası basma mukavemetinin incelenmesi gerekli görülmüştür.

1.4. Araştırmanın Kapsamı

Ağırlık düşürme darbe testleri, çekme testleri, üç nokta eğme testleri ve darbe sonrası basma mukavemeti testleri için ihtiyaç duyulan kompozit numuneler ASTM standartlarına uygun olarak Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) ve Yüksel Kompozit Teknolojileri A.Ş. tesislerinde üretilmiştir. 5'li saten dokuma dizilimine sahip reçine emdirilmiş karbon fiber tabakadan (prepreg) imal edilen aynı yapısal özelliklere sahip kompozit numuneler, yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçları ile 0° , 5° , 10° ve 15° derece çarpma açılarında ağırlık düşürme darbe testlerine tabi tutulmuşlardır. Ağırlık düşürme darbe testleri ODTÜ Merkez Laboratuvarında, eğme testleri, çekme testleri, c-tarama muayenesi ve darbe sonrası basma mukavemeti testleri TUSAŞ'ta icra edilmiştir.

1.5. Çalışmanın Literatüre Katkısı ve Orijinalitesi

Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışı uygulanan parametrelere göre farklılık göstermektedir. Bu kapsamda, darbe anında malzemenin sergileyeceği darbe davranışını, hasarının oluşması ve ilerlemesini etkileyen parametrelerin anlaşılması için birçok deneysel çalışma yürütülmüştür.

Hong ve Liu⁷, cam epoksi kompozit plakalar üzerinde düşük hızlı darbe testlerini yaptıkları çalışmada, belli bir enerji seviyesinde, bitişik tabakalar arasındaki fiber yönelimlerinin farklılığı arttıkça, delaminasyon hasarının da arttığı sonucuna varmışlardır. Düşük hızlı darbelerin, değişen açılarda yönlenmiş tabakalardan oluşan ara yüzeye sahip kompozitin üst yüzeyinde dikdörtgen şeklinde delaminasyon alanı oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Darbe enerjisi ile delaminasyon alanı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

Cantwell ve Morton⁸, sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe direncini belirleyen temel parametreleri tanımlamışlardır. Yükleme hızının ve malzeme geometrisinin rolünün yanı sıra, fiber, matris ve tabaka diziliminin bu malzemelerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini açıklamışlardır.

Cantwell ve Morton⁹, malzemeye ait geometrik konfigürasyonun, malzemenin enerji absorbe edebilme kapasitesini belirlediği için ayrı bir önemi olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar Shyr ve Pan¹⁰ tarafından yapılan kompozit tabakaların darbe direnci ve darbe karakteristikleri konusundaki çalışmanın sonuçları ile bağdaşmaktadır. Ayrıca, enerji absorbe etme mekanizmasının kompozit plaka içindeki tabaka sayısına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Naik, Sekher ve Meduri¹¹, dengeli ve simetrik yapıdaki düz dokuma kumaş kompozit tabakalar ile aynı özelliklerdeki tek yönlü kumaşlardan üretilen çapraz katlı tabakalı kompozit tabakaları karşılaştırmışlardır. Dokuma kumaş tabakaların düzlem içi hasar fonksiyonunun tek yönlü tabakalardan daha düşük olduğu için dokuma kumaş tabakaların darbe hasarına karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Belingardi ve Vadori¹², tek yönlü ve dokuma kumaş yapısına sahip cam elyaf epoksi kompozit malzemesinin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışını

⁷ Seongho Hong, Dashin Liu, "On the Relationship Between Impact Energy and Delamination Area", *Experimental Mechanics*, c. 29, s. 2 (1989): s. 115.

⁸ Wesley J. Cantwell, John Morton, "The Impact Resistance of Composite Materials—A Review". *Composites*, c. 22, s. 5 (1991): s. 347.

⁹ Wesley J Cantwell, John Morton, "Geometrical Effects in the Low Velocity Impact Response of CFRP", *Composite Structures*, c. 12, s. 1 (1989): ss. 39.

¹⁰ Tien Wei Shyr, Yu Hao Pan, "Impact Resistance and Damage Characteristics of Composite Laminates", *Composite Structures*, c. 62, s. 2 (2003): s. 202.

¹¹ Niranjana K. Naik, Y. Chandra Sekher, Sailendra Meduri, "Damage In Woven-Fabric Composites Subjected to Low-Velocity Impact", *Composites Science and Technology*, c. 60, s. 5 (2000): s. 731.

¹² Giovanni Belingardi, Roberto Vadori, "Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates", *International Journal of Impact Engineering*, c. 27, s. 2 (2002): s. 213.

incelemişlerdir. Deneysel testleri ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak ASTM standartlarına göre yapmışlardır. Malzemenin darbe davranışını tanımlamak için darbe enerjisi, hasar derecesi, ilk hasar kuvveti ve en yüksek kuvvet parametrelerini değerlendirmişlerdir.

Hosseinzadeh, Shokrieh ve Lessard¹³ fiberle güçlendirilmiş kompozit levhaların düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasar durumunu incelemişlerdir. Farklı darbe enerjilerinde ağırlık düşürme ile darbe uygulanan dört farklı elyaf takviyeli kompozit plakalar (ince cam elyaf, kalın cam elyaf, karbon elyaf ve cam/karbon elyaf) üzerinde çalışmışlardır. Hasar alanlarını ultrasonik tahribatsız muayene yöntemi ile incelemişlerdir. Karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar düşük hızlı darbe altında en iyi yapısal davranışı, karbon-cam hibrid plakaların ise yüksek enerjili darbelerde uygun yapısal davranışı gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Numunelerdeki hasar bölgelerinin analizini yaparak darbe enerjisi ile hasar çapı arasındaki değişimi ortaya koymuşlardır.

Aktaş ve diğ.¹⁴, enerji profil diyagramı ve yük-yer değiştirme eğrileri yardımıyla tek yönlü cam/epoksi tabakalı kompozitlerin darbe davranışını incelemişlerdir. 5–80 J arasındaki enerji seviyelerinde darbe testlerini yaparak [0/90/0/90]_s ve [0/90/+45/-45]_s şeklinde iki farklı tabaka dizilimine sahip kompozit malzemelerde meydana gelen hasar modlarını ele almışlardır. Penetrasyon eşik değerini belirlemek için darbe enerjisine (E_d) göre geri sekme (elastik) enerjisinin değişimine dayanan alternatif bir yöntem kullanmışlardır. [0/90/+45/-45]_s dizilime sahip malzemenin penetrasyon eşik değerinin [0/90/0/90]_s dizilime sahip malzemeninkinden daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Daha yüksek darbe enerjileri için temel hasar modunun elyaf kopması olduğunu, daha düşük darbe enerjileri için temel hasar modunun delaminasyon ve matris çatlağı olduğunu tespit etmişlerdir.

Strait, Karasek ve Amateau¹⁵, karbon elyaf takviyeli sertleştirilmiş termoplastik epoksi kompozitler için tabaka dizilim sırası ve kumaş yapısının (tek yönlü-dokuma) etkilerini ortaya koymak için darbe testleri yapmışlardır. Darbe direncini penetrasyon testleri esnasında ölçülen yük ve enerji değerlerine göre karakterize etmişlerdir.

¹³ Ramin Hosseinzadeh, Mahmood M. Shokrieh, Larry Lessard, "Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts", **Composites Science and Technology**, c. 66, s. 1 (2006): s. 61.

¹⁴ Mehmet Aktaş ve diğ., "An Experimental Investigation of The Impact Response of Composite Laminates", **Composite Structures**, c. 87, s. 4 (2009): s. 307.

¹⁵ Larry H. Strait, Mark L. Karasek, Maurice F. Amateau, "Effects of Stacking Sequence On The Impact Resistance of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Toughened Epoxy Laminates", **Journal of Composite Material**, c. 26, s. 12 (1992): s. 1725.

Deney sonuçları hasar başlangıcı ile yük-çökme eğrilerindeki ilk tepe noktası arasında ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Tabakalı kompozitlerde hasar başlangıcı için gerekli olan enerji üzerinde tabaka dizilim sırası veya kumaş yapısının önemli bir etkisinin olmadığını, ancak en büyük yükleme anında absorbe edilen enerji değerinin tabaka dizilimine bağlı olduğunu bulmuşlardır. En yüksek yükleme noktasında, dokuma yapıdaki malzeme tarafından tek yönlüye kıyasla daha az enerji absorbe edildiğini belirlemişlerdir.

Karakuzu, Erbil ve Aktaş¹⁶ darbe enerjisinin, darbe ağırlığının ve darbe hızının cam epoksi tabakalı kompozitlerin en yüksek temas kuvveti, en fazla çökme, temas süresi, absorbe edilen enerji ve hasar alanı üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Aynı darbe enerji seviyesi için, daha yüksek hız ve daha düşük ağırlığa sahip vurucu kütle tarafından darbeye maruz kalan numunede oluşan delaminasyon alanının, daha düşük hız ve daha yüksek ağırlığa sahip vurucu kütle ile darbeye maruz kalan numunedekinden daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hosur ve diğ.¹⁷ vakum destekli reçine emdirme yöntemiyle üretilen düz dokuma ve saten dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Dikişli ve dikişsiz üretilen kompozit tabakalar ağırlık düşürme test cihazı ile 5-50 J enerji seviyelerinde teste tabi tutmuşlardır. Sonuçları; fiber mimarisi ve darbe enerjisiyle değişen azami yük, absorbe edilen enerji ve hasar alanı açısından değerlendirmişlerdir. Ultrasonik tahribatsız muayene yöntemi ile darbe hasarlarını analiz etmişlerdir. Daha az aralıklarla dikişleme yapılan numunelerde hasar alanının daha az olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca saten dokuma kumaş kompozitlerin, düz dokuma kumaşlara kıyasla daha iyi hasar direnci ortaya koyduklarını tespit etmişlerdir.

Evcı ve Güleç¹⁸ yaptıkları çalışmada tek yönlü e-cam, dokuma e-cam ve dokuma aramid kompozit numunelere düşük hızlı darbe testleri uygulayarak Hertz hasarını, en büyük kuvvet eşik değerini ve darbe hasarı ilerlemesini incelemişlerdir. Kompozit malzemelerin geri sekme, penetrasyon ve perforasyon eşik değerlerini

¹⁶ Ramazan Karakuzu, Emre Erbil, Mehmet Aktaş, "Impact Characterization of Glass/Epoxy Composite Plates: An Experimental and Numerical Study", *Composites Part B: Engineering*, c. 41, s. 5 (2010): s. 395.

¹⁷ Mahesh Hosur ve diğ., "Studies on Impact Damage Resistance of Affordable Stitched Woven Carbon/Epoxy Composite Laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 22, s. 10 (2003): s. 927.

¹⁸ Celal Evcı, Müfit Gülgeç, "An Experimental Investigation on the Impact Response of Composite Materials", *International Journal of Impact Engineering*, s. 43 (2012): s. 40.

analiz ederek dokuma kompozit malzemelerin tek yönlü kompozit malzemelere kıyasla düşük hızlı darbelere karşı daha dayanıklı oldukları sonucuna varmışlardır. Ayrıca dokuma kompozit malzemelere ait hasar ilerlemesinin daha küçük bir alanla sınırlandırıldığını gözlemlemişlerdir.

Evcı¹⁹, kalınlıkları 2 mm ile 8 mm arasında değişen dokuma ve tek yönlü cam elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin hasar eşik değerleri, kritik enerji seviyeleri ve hasar davranışı gibi düşük hızlı darbe özelliklerini çalışmıştır. Belli kalınlıktaki tabakalı kompozite ait Hertz hasarı ve ana hasar eşik değerlerinin değişen darbe enerjilerinde büyük ölçüde sabit olduğunu ortaya koymuştur. Tabakaların hasar oluşumu ile enerji eşik değerleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak ve penetrasyon ve perforasyon eşik değerlerini bulmak için enerji profil diyagramlarından yararlanmıştır. Penetrasyon ve perforasyon enerji değerlerinin kalınlıkla beraber doğrusal olmayan şekilde arttığını ortaya koymuştur. Tek yönlü tabakalı kompozit kompozitlerin darbe hasar direncinin daha düşük olduğu, böylece darbe hasarına karşı daha hassas oldukları tespit edilmiştir.

Geçmişte yapılan araştırmalarda yaygın olarak yarıküresel darbe ucu kullanılmıştır. Ancak bakım ve üretim esnasında kompozit panel üzerine alet düşmesi gibi durumlar göz önünde bulundurulduğunda, düşük hızlı darbeler her zaman yarıküresel gibi kör uçlu vurucu kütle ile gerçekleşmemektedir. Bu bağlamda genellikle düz, konik ve ojival gibi darbe uçları kullanarak darbe ucu geometrisinin kompozit malzemelerin darbe davranışına olan etkilerini belirlemek için çalışmalar yapılmıştır.

Kondo ve diğ.²⁰, farklı darbe ucu geometrileri (yarıküresel, konik ve düz) ile 5,9-62 J arasındaki enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan yarı izotropik yapıdaki karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit plakalarda oluşan çentik ve delaminasyon alanları ile darbe sonrası basma mukavemeti arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Aynı enerji seviyelerinde darbe davranışı ve delaminasyonun darbe ucu geometrisine göre değiştiğini, dolayısıyla plakaların darbe sonrası basma mukavemetinin de darbe ucu geometrisine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

¹⁹ Celal Evcı, "Thickness-Dependent Energy Dissipation Characteristics of Laminated Composites Subjected to Low Velocity Impact", **Composite Structures**, s. 133 (2015): s. 508.

²⁰ Hiroshi Kondo ve diğ., "Residual Indentation, Delamination Area and CAI Strength of CFRP Laminates Under Low-Velocity Impact", In Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, 2007, Kyoto, Japan.

Lee, Cheon ve Im²¹, konik, düz, yarıküresel ve yarı-silindirik darbe uçları kullanarak sıcak pres kalıplama pestili ile üretilen tabakalar üzerinde düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Darbe enerjisinin yayılma sürecini deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin karşılaştırılmasıyla incelemişlerdir. Düz ve yarıküresel darbe uçlarının benzer hasar mekanizması ve enerji dağılımı ortaya koyduklarını bulmuşlardır. Düz ve yarıküresel darbe ucunun oluşturduğu bölgesel çökmenin, yarı silindirik darbe ucuna kıyasla enerji yayılımında bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. En düşük darbe enerji yayılımıyla sonuçlanan konik darbe ucunda ise bölgesel penetrasyon gözlemlenmiştir. Ayrıca, darbe sonucunda oluşan hasar mekanizmasının türünün numunenin enerji yayılım kapasitesini etkilediğini bulmuşlardır.

Mitrevski ve diğ.²² dokuma karbon-epoksi tabakalı kompozitlerin darbe davranışı üzerinde darbe ucu geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Ağırlık düşürme test cihazı kullanarak, numunelere yarıküresel, ojiv ve konik şeklindeki darbe uçları ile 4 J ve 6 J enerji seviyelerinde darbeler uygulamışlardır. Kuvvet-zaman değişimini ve numunelerin absorbe ettiği enerji miktarlarını karşılaştırarak darbe ucu geometrilerinin etkilerini incelemişlerdir. Konik uç ile darbe uygulanan numunelerin lokal penetrasyon nedeniyle daha fazla enerji absorbe ettiklerini tespit etmişlerdir. Yarıküresel darbe ucu en yüksek temas kuvveti ve en düşük temas süresini oluşturmuştur. Hasar eşik kuvveti değeri yarıküresel darbe ucu için en yüksek iken, onu sırasıyla ojival ve konik darbe uçları takip etmektedir. Ojiv ve konik şeklindeki uçlar kalıcı iz ve penetrasyona neden olurken, sadece yarıküresel uç 4 J enerji seviyesinde zorlukla görünebilen darbe hasarı oluşturmuştur. Tahribatsız muayene yöntemleri ile 3 darbe ucu şekli için benzer hasar alanları elde edildiği için, iç hasar mekanizmalarının belirlenmesi için tahribatlı test yöntemlerinin yapılması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Mitrevski, Marshall ve Thomson bir önceki çalışmalarının devamı olarak tabakalı kompozitlere farklı darbe ucu geometrileriyle uygulanan darbe sonrası oluşan hasar yapılarını incelemişlerdir. Numuneler yarıküresel, ojiv ve konik şeklindeki darbe uçları belli enerji seviyelerinde ağırlık düşürme testine tabi tutulduktan sonra, oluşan hasar üzerinde darbe ucu geometrisinin etkisini değerlendirmek için tahribatsız muayene ve mikroskopi gibi farklı darbe sonrası analiz yöntemleri uygulanmıştır. Artakalan çekme dayanımlarının belirlenmesi için

²¹ Sang Min Lee, Jae Seung Cheon, Yong Taek Im, "Experimental and Numerical Study of the Impact Behavior of SMC Plates", **Composite Structures**, c. 47, s. 1 (1999): s. 560.

²² Tom Mitrevski ve diğ., **age**, s. 147

hasar bölgesinden kesilen numunelere çekme testi yapılmıştır.²³ Yarıküresel darbe ucu delaminasyona bağlı olarak en büyük hasar alanını oluşturduğunu, bunu sırası ile ojival ve konik olanın izlediğini bulmuşlardır. En fazla penetrasyon derinliği ve bölgesel hasar alanı oluşturan konik ucu en çok elyaf kopmasına yol açtığını gözlemlemişlerdir. En çok hasarın, ince tabakalı kompozitlerdeki fazla eğme gerilmelerinden dolayı alt tabakalarda oluştuğunu belirtmişlerdir. Değişik darbe ucu geometrilerinin, malzemelerin artakalan dayanım özelliklerini etkileyen fiber kopması, matris çatlaması ve tabaka ayrılması gibi hasar yapıları oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca darbe sonucu oluşan hasar mekanizması türünün numunenin enerji yayılım kapasitesini etkilediğini ortaya koymuşlardır.²⁴

Zhou, Lloyd ve McGuirk, yarı-statik yükleme altındaki fitil dokuma karbon-epoksi kompozit plakaların mekanik davranışı üzerinde geometrik faktörlerin etkilerini incelemişlerdir. Farklı çaplardaki yarıküresel ve düz şekildeki darbe uçları ile iki farklı çaptaki yuvarlak kompozit plakalara sabitlenmiş ve serbest olarak yarı-statik yükleme yapmışlardır. Darbe ucu şeklinin ve plaka çapının plakanın darbe davranışı üzerinde darbe ucu çapı ve sabitlenme durumlarına kıyasla daha büyük etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Farklı durumlarda farklı hasar türlerinin karmaşık şekilde görüldüğünü belirtmişlerdir. Sabitlenmiş küçük çaptaki plakalar haricinde yarıküresel darbe uçlarında matris çatlamasının ardından fiber kopmasının oluştuğunu ortaya koymuşlardır.²⁵ Düz uç ile yapılan darbelerde ise darbe ucu altındaki gerilme yığılmasının daha büyük bir alana yayıldığı için en önemli hasar mekanizmasının tabaka kesilmesi olduğunu bulmuşlardır.²⁶

Siow ve Shim²⁷ çalışmalarında düşük eğrilik yarıçapına sahip darbe uçlarının büyük yarıçaplı olanlara göre daha büyük delaminasyon alanına ve daha fazla fiber kopmasına neden olduklarını ortaya koymuşlardır.

İçten ve Kiral²⁸ yaptıkları proje çalışmasında vurucu kütlesi, vurucu hızı, darbe ucu çapı ve şekli, düşük sıcaklık, tekrarlı darbe ve fiber yönlenme açısı

²³ Tom Mitrevski, I. H. Marshall, R. Thomson, „The Influence of Impactor Shape On The Damage to Composite Laminates”, **Composite Structures**, c. 76, s. 1 (2006): s. 116.

²⁴ **age**, s.122.

²⁵ Gang Zhou, John C. Lloyd, James J. McGuirk, „Experimental Evaluation of Geometric Factors Affecting Damage Mechanisms In Carbon/Epoxy Plates”, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, c. 32, s. 1 (2001): s. 83.

²⁶ **age**, s.80.

²⁷ Y. P. Siow, Victor P. W. Shim, „An Experimental Study of Low Velocity Impact Damage In Woven Fiber Composites”, **Journal of Composite Materials**, c. 32, s. 12 (1998): s. 1200.

parametrelerinin polimer kompozitlerin darbeye cevabı ve darbe sonrası performansına etkileri incelenmiştir. Küt ve farklı koniklik açısına sahip darbe uçları ile ağırlık düşürme darbe testleri yapmışlardır. Düşük hızla darbeye maruz bırakılan plakalar daha sonra bası mukavemeti testine tabi tutulmuşlardır. Darbe ucunun koniklik açısı arttıkça aynı darbe enerjisi seviyelerinde en yüksek temas kuvvetinin arttığını, temas süresi ve çökmenin azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca darbe ucunun koniklik açısı arttıkça numunenin delinmesi için gerekli olan darbe enerjisinin azaldığını ortaya koymuşlardır.

Daha önceki çalışmalarda genellikle yarıküresel darbe ucu ile numunenin normali ile 0^0 açısıya sahip yani numune yüzeyine dik olarak darbeler uygulanarak kompozit malzemenin darbe davranışı incelenmiştir. Ancak farklı durumlarda meydana gelebilecek darbelerde vurucu kütle her zaman malzemeye dik olarak çarpmamaktadır. Alet düşmesi, taşıma esnasında çarpma, iş kazaları gibi düşük hızlı darbe durumlarında darbe genellikle farklı açılarda oluşmaktadır. Eğimli darbeler ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı olmakla beraber çoğunluğu balistik darbeler üzerinedir.

Madjidi, Arnold ve Marshall yarıküresel darbe ucu ile farklı açılarda düşük hızlı darbeye maruz kalan cam elyaf keçe takviyeli polyester tabakaların performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Darbe kuvvetinin ve plaka eğiminin etkisini ortaya koymak için 5^0 'lık aralıklarla 0^0 ve 30^0 arasında değişen eğime sahip aparat tasarlanarak farklı yüksekliklerden darbe testleri yapmışlardır. Artakalan çekme dayanımını ve absorbe edilen enerjiyi tahmin etmek için deneysel olarak belirlenen değişkenlere göre bazı denklemler formülize etmişlerdir.²⁹ Çarpma açısındaki artışın hasar alanının ve çentik derinliğinin azalmasına neden olduğunu bulmuşlardır. Herhangi bir çarpma enerjisi için normal çarpmaların açılı çarpmalara kıyasla daha fazla hasara neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Plakanın eğimi (çarpma açısı) arttıkça artakalan çekme dayanımının da arttığını tespit etmişlerdir. Mikroskobik görüntülerin incelemesi sonucu matris çatlamasının çarpma açısına bağlı olmadığını ve kalınlık boyunca çapraz olarak ilerlediğini ortaya koymuşlardır.³⁰

Ivanez ve diğ., karbon fiber epoksi yüzey plakasına sahip sandviç kompozit plakaların düşük hızlı açılı darbe davranışını ağırlık düşürme test cihazında özel

²⁸ Bülent Murat İçten, Gören Kırıl, "Tabakalı Kompozitlerde Darbe Parametrelerinin Darbe Sonrası Bası Mukavemetine Etkilerinin İncelenmesi" (TÜBİTAK, Proje No:107M591, 2010), s.81.

²⁹ Shabnam Madjidi, W. S. Arnold, I. H. Marshall, "Damage Tolerance of CSM Laminates Subject to Low Velocity Oblique Impacts", **Composite Structures**, c. 34, s. 1 (1996): s. 101.

³⁰ age, s. 114.

olarak üretilen bir aparat yardımıyla deneysel olarak incelemiştir. Darbe enerjisinin ve çarpma açısının en yüksek temas kuvveti, en yüksek temas süresi, absorbe edilen enerji, en büyük yer değiştirme ve hasar alanı üzerindeki etkilerini incelemiştir. 20 mm çapında yarıküresel darbe ucu ile 0^0 , 5^0 , 10^0 ve 15^0 çarpma açılarındaki 3j, 5j, 7j ve 10j enerji seviyelerinde darbe testleri yapmışlardır.³¹ Darbe ucu ile numune yüzeyi arasındaki temas alanı eğim açısından dolayı azaldığı için, hasar alanının çarpma açısının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek temas kuvveti ve absorbe edilen enerjinin çarpma açısı arttıkça azaldığını, ancak temas süresi ve en büyük yer değiştirmenin bu parametreden bağımsız olduğunu ortaya koymuşlardır. 0^0 , 5^0 ve 10^0 çarpma açılarındaki sonuçlarının benzer olduğu, 15^0 çarpma açısında ise farkların daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel sonuçları karşılaştırmak ve deneysel olarak yapılamayan 30^0 , 40^0 ve 50^0 açılı çarpmaları simüle ederek en yüksek temas kuvvetinin değişimini analiz etmek için sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. En yüksek temas kuvvetinin çarpma açısı arttıkça azaldığını, ancak darbe enerjisi arttıkça belli bir değere kadar arttığını ve sabit kaldığını ortaya koymuşlardır.³²

Fadzullah ve Cantwell³³ çalışmalarında tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi tabakaların ve sandviç köpük yapıların düşük hızlı darbe davranışını 2-31 J enerji seviyelerinde 0^0 , 10^0 ve 20^0 çarpma açılarındaki incelemiştir. Enerjinin korunumuna dayanan enerji denge modeli kullanarak değişen çarpma açılarındaki en yüksek temas kuvvetinin bulunması için tahminler yürütmüşlerdir. Farklı çarpma açılarındaki cam elyaf takviyeli tabakalı yapıların hasar başlangıcının farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Özellikle 20^0 açı ile darbe uygulanan numunelerde, normal açılı darbelerde oluşan tipik dikdörtgen veya yer fıstığı şeklindeki hasar türleriyle karşılaştırıldığında, açılı darbenin daha oval (eliptik) bir hasar şekline neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Sandviç yapılarda ve tabakalı kompozitlerde normal açılı darbenin daha ciddi hasarlara neden olduğu bulmuşlardır.

Zhou, Hassan, Guan ve Cantwell³⁴, üç farklı çekirdek/dolgu malzemesinden üretilen (PVC ve PET köpük) sandviç plakalara delinme gerçekleşinceye kadar

³¹ Ines Ivanez ve diğ., "The Oblique Impact Response of Composite Sandwich Plates", *Composite Structures*, s. 133 (2015): s. 1127.

³² *age*, s. 1135.

³³ SH Sheikh Md Fadzullah, Wesley J. Cantwell, "The Effect of Angle of Incidence on the Impact Response of Composites and Sandwich Structures", 15th European Conference on Composite Materials, 2012, Venice, Italy.

³⁴ Jin Zhou, Mohamad Z. Hassan, Zhongwei Guan, Wesley J. Cantwell, "The Low Velocity Impact Response of Foam-Based Sandwich Panels", *Composites Science and Technology*, c. 72, s. 14 (2012): s. 1781.

ağırlık düşürme testleri uygulayarak eğim açısının perforasyon dirençleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca eğim açısına bağlı olarak perforasyon enerjisinin değişiminin tahmin etmek için model geliştirmiştir. Sandviç yapının perforasyon enerjisinin doğrudan çekirdek malzemesinin özelliklerine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak bütün plakalarda çarpma açısının artmasıyla birlikte perforasyon enerji seviyesinin de artış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Düşük hızlı darbeler gözle zorlukla görünebilen hasarlar oluştursa bile kompozit malzemenin artakalan dayanımını önemli ölçüde azaltırlar. Darbe sonrası numunede oluşan hasarın malzemenin performansına etkisini ortaya koymak için darbe sonrası basma mukavemetiyle ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Davies, Hitchings ve Zhou³⁵ çalışmalarında farklı ebatlardaki 10 mm ve 25 mm kalınlıklarındaki cam elyaf/polyester kompozit tabakalara düz uçlu vurucu kütle ile 3100 J'e kadar artan enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe uygulamışlardır. Darbe sonrası basma mukavemetleri ölçülerek tabakaların hasar toleranslarını değerlendirmişlerdir. Kuvvet-zaman eğrilerinde tabakalarda oluşan hasarlarla ilgili çıkarımlar yapılabileceğini, darbe kuvveti ve kinetik enerji arasındaki ilişkilerden istifade ederek hasar başlangıcının numuneler incelenmeden tanımlanabileceğini belirtmişlerdir. Artakalan basma dayanımlarının (DSBM), darbe hasarının veya kinetik enerjinin artmasıyla delaminasyon oluşumuna bağlı olarak büyük ölçüde azaldığını ortaya koymuşlardır.

De Freitas ve Reis³⁶ darbe sonrası basma yükü esnasında tabakalı kompozit plakaların hasar büyüme mekanizmalarını belirlemek için karbon fiber takviyeli epoksi reçineden üretilmiş farklı tabaka dizilime sahip kompozit plakalara ağırlık düşürme darbe testleri ve darbe sonrası basma mukavemeti testleri yapmışlardır. Darbe sonrası oluşan hasar alanlarını belirlemek için plakaların ultrasonik c-taramasını yapmışlardır. Darbe yükünden kaynaklanan delaminasyon alanının tabakalar arasındaki ara yüzey sayısına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Darbe sonrası basma mukavemeti testi esnasında tabaka dizilime göre delaminasyon alanından daha fazla etkilenen iki hasar mekanizması tanımlamışlardır. Artakalan dayanımın, darbe enerjisinin bir fonksiyonu olan delaminasyon alanından tabaka dizilimine kıyasla daha fazla etkilendiğini ve ayrıca delaminasyon alanı ile

³⁵ Glyn A. O. Davies, Dennis Hitchings, Gang Zhou, "Impact Damage and Residual Strengths of Woven Fabric Glass/Polyester Laminates", **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, c. 27, s. 12 (1996): s. 1147.

³⁶ Manuel De Freitas, Luis Reis, **age**, s. 365.

numunenin yan kenarları arasındaki mesafeye de bağılı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Naik ve diğ.³⁷ aynı enerji seviyesinde, farklı darbe hızı ve farklı vurucu kütlesi durumlarında düz dokuma e-cam/epoksi tabakaların darbe davranışını incelemişlerdir. Ağırlık düşürme darbe testinin ardından darbe sonrası basma mukavemeti testi yapmışlardır. Düşük kütle ve yüksek hızla yapılan testlerdeki hasar toleransının yüksek kütle ve düşük hızla yapılan testlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Hafif ve hızlı kütlenin, ağır ve yavaş kütleye oranla kompozit levhada daha az hasar oluşturduğu göstermişlerdir. Ayrıca darbe sonrası yapılan basma testinde, ağır ve yavaş kütle ile darbe görmüş kompozit plakaların dayanımının, hafif ve hızlı kütleye göre daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

Ghelli ve Minak³⁸ çalışmalarında farklı ebat ve tabaka dizilimine sahip karbon/epoksi tabakalı kompozitler üzerinde ASTM standartlarına göre ağırlık düşürme ve darbe sonrası basma mukavemeti testleri yaparak sonuçlarını incelemişlerdir. 100x150 mm ve 100x90 mm ebatlarında ve 2.75 mm kalınlıklarında, [0/0/90/90/45/-45/45/-45]_s ve [90/90/0/0/-45/45/-45/45]_s tabaka dizilime sahip tek yönlü prepreglerden üretilen kompozit plakalara 6 J, 12 J ve 18 J enerji seviyelerinde darbe testleri ve ardından darbe sonrası basma mukavemeti testleri uygulamışlardır. Darbeye bağılı hasarların malzemenin basma dayanımını ve davranışını her durumda etkilemediğini ve delaminasyonun boyutuna ve burkulma şekline bağılı olduğunu ortaya koymuşlardır.

González ve diğ.³⁹ ağırlık düşürme darbe yüklemesine maruz kalan polimer esaslı tabakalı kompozit plakalar üzerinde tabaka kümelenmesinin etkilerini incelemişlerdir. Darbe davranışı ve hasar eşik değerlerinin tanımlanması için kullanılan analitik modelleri ve deneysel sonuçları ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Tabaka kümelenmesinin malzemenin hasar direncini azalttığını ve darbe sonrası basma mukavemeti testi ile değerlendirilen hasar toleransının ise tabaka kümelenmesinden etkilenmediğini ortaya koymuşlardır.

³⁷ Niranjan K. Naik ve diğ., "Experimental Studies On Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Effect of Impact Parameters". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 21, s. 15 (2002): ss. 1360.

³⁸ Daniele Ghelli, Giangiacomo Minak, "Low Velocity Impact and Compression After Impact Tests on Thin Carbon/Epoxy Laminates", *Composites Part B: Engineering*, c. 4., s. 7 (2011): s. 2067.

³⁹ Emilio V. González ve diğ., "Effects of Ply Clustering in Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading", *Composites Science and Technology*, c. 71, s. 6 (2011): s. 805.

Liu, Raju ve Dang, çalışmalarında, 2 mm ve 6 mm kalınlıklarında farklı ebatlardaki cam epoksi çapraz kat tabakalı kompozit malzemelere düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. 250x175 mm ebatlarındaki numuneler darbe alanı ebatları 125x125 mm, 84x84 mm ve 42x42 mm olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. CAI testlerini NASA standartlarına göre yapmışlardır. Hasarlı numunelerde bulunan ancak elle çentik açılmış numunelerde bulunmayan içyapıdaki delaminasyonun etkisini incelemek için darbeye maruz kalan plakalara ve hasarlı plakalarla aynı büyüklüğe sahip çentikler açılmış plakalara CAI testleri yapmışlardır.⁴⁰ Sonuçlar, artakalan dayanımının elle çentik açılmış numunelerde daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Deneysel sonuçlar, darbeye maruz kalan kompozit tabakalarda en önemli hasar türünün perforasyon olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte mekanik özelliklerdeki azalmanın karakterize edilmesinde delaminasyonun oldukça önemli etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Darbe enerjisinin absorbe edilen enerjiye eşit olduğu durumda perforasyon eşik değerine ulaşıldığı test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Artakalan basma dayanımının perforasyon enerji seviyesine kadar azaldığını ve darbe enerjisinin perforasyon için gerekli olan enerji seviyesine ulaştıktan sonra ise sabit kaldığı görülmüştür.⁴¹

Literatürde yapılan çalışmalarda, farklı parametrelere bağılı olarak karbon fiber kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışı analiz edilerek, hasara karşı direnci en yüksek olan kompozitin tasarlanması ve üretilmesi amaçlanmaktadır. Kompozit malzemenin yapısal özelliklerinin yanı sıra, çevresel ve vurucu kütle parametrelerinin malzemenin düşük hızlı darbe davranışına ve darbe sonrası basma mukavemetine olan etkilerinin tespit edilmesine yönelik yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Bu çalışmada, vurucu kütle parametrelerinden darbe ucu geometrisinin kompozit malzemenin darbe davranışına olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, yaygın olarak kullanılan kavisli uca sahip yarıküresel darbe ucunun yanı sıra, daha sivri yapıya sahip malzemeler tarafından gerçekleştirilecek darbeleri simüle etmek (taklit etmek) için mermi şeklini anımsatan sivri uçlu ve yanal yüzeyleri kavisli geometriye sahip olan ojival darbe ucu kullanılmıştır.

Ayrıca, düşük hızlı darbelerin her zaman numuneye dik olarak değil, eğimli olarak gerçekleştirilebileceğinden yola çıkarak, farklı çarpma açılarında ağırlık düşürme

⁴⁰ Dahsin Liu, Basavaraju B. Raju, Xinglai Dang, "Size Effects on Impact Response of Composite Laminates", *International Journal of Impact Engineering*, c. 21, s. 10 (1998): s. 837.

⁴¹ age, s.853.

darbe testleri yapılmıştır. Eğimli düşük hızlı darbelerle yönelik yapılan çalışmalarda kullanılan destek aparatlarının her hangi bir test standardına dayanmadığı göz önünde bulundurulduğunda; ASTM 7136⁴² standardına uygun olarak üretilen destek aparatı kullanılarak yapılan bu çalışma, literatürde ilk olması yönünden önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin eğimli darbelerdeki düşük hızlı darbe davranışının tespit edilmesine yönelik yapılan çalışmalar sınırlıdır. 5'li saten dokuma kumaş yapısına sahip karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin çarpma açısında bağlı düşük hızlı darbe davranışının deneysel olarak incelenmesine yönelik geçmişte yapılan çalışma bulunmamaktadır. Bu alandaki boşluğun doldurulması maksadıyla normal ve eğimli olarak darbeye maruz kalan fiber takviyeli kompozit malzemelerin darbe davranışı ve darbe sonrası basma mukavemetinin çarpma açısıyla değişimi incelenmiştir.

1.6. TSK'ya Katkısı

Savunma sanayisinin vazgeçilmezi olan uçak, insansız hava aracı ve helikopter gibi askeri hava araçlarında özellikle karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler önemli miktarda kullanılmaktadır. Gelecekte kompozit malzemelerin hava araçlarının temel yapı malzemesi olmaya devam edeceği ve öneminin gün geçtikçe artacağı göz önünde bulundurulduğunda, ülkemizde kompozit malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların savunma sanayine önemli katkılar sağlayacağı kıymetlendirilmektedir.

Ayrıca, günümüzde insansız hava araçlarında ve yeni nesil sivil hava araçlarında oldukça fazla kullanım alanı olan reçine emdirilmiş karbon fiber örgü tabakaların (prepreg) ülkemizde üretiminin gerçekleştirilmesiyle dışa bağımlılığın ortadan kalkacağı ve bu alandaki çalışmaların hız kazanacağı değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda; bu çalışmadan elde edilecek sonuç ve verilerin, eğimli olarak gerçekleşen düşük hızlı darbelerin kompozit yapının performansını ne derecede etkileyeceği konusunda üreticilere ışık tutacağı ve bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

⁴² "ASTM D7136/D7136M: Standard Test Method for Measuring The Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event" (West Conshohocken, ASTM International, 2012).

1.7. Diğer Bölümler

İkinci bölümde kompozit malzemelerin genel özellikleri, üretim yöntemleri ve uygulama alanları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, kompozit malzemelerde oluşan hasar yapıları ve darbe testlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan test numunelerinin üretim aşamaları, ağırlık düşürme darbe testi, darbe sonrası basma mukavemeti testi ve yapılan diğer test ve analizlerin yöntem ve metodolojisi ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Beşinci bölümde, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. En son bölümde ise tez çalışmasının sonucu ve gelecekteki çalışmalar için öneriler izah edilmiştir.





2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal Elemanları

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin birleşimiyle ortaya çıkan kendine özgü özelliklere sahip yeni bir malzemedir. Kompozit malzemenin üretilmesiyle beraber dayanım, ağırlık, sağlamlık, aşınma dayanımı, korozyon direnci, yorulma ömrü, termal iletkenlik, ses yalıtımı gibi özelliklerin iyileştirilmesi sağlanmıştır.⁴³

Genellikle takviyeli kompozit malzeme, fiberlerin (elyaf) reçine (matris) yardımıyla güçlendirilmesiyle oluşurlar. Kompozitlerin dayanım ve sağlamlığı takviye malzemesi olan fiberler tarafından, rijitliği ve çevresel direnci ise matris tarafından sağlanmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde, fiberler yükü taşıyan ana yapısal elemanlardır. Matris ise yükü fiberlere dağıtmaktadır.

Kompozit malzemelerde başlıca takviye malzemeleri olarak karbon, cam, kevlar, bor ve silisyum karbür kullanılmaktadır. Fiberler temel yapısı olan lif demetleri halinde temin edilmektedir. Lif demetleri dokunarak tek yönlü, düz, fitil veya saten dokuma gibi yapılar elde edilmektedir.

Matris malzemesi kompozit yapının en zayıf tarafıdır ve tabaka özellikleri bakımından fiberlerin tüm potansiyelini ortaya koymasına engel olmaktadır. Matrisin; sıkıştırma durumunda fiberleri sabitlemek (yanal destek sağlayarak), fiber özelliklerini tabakaya aktarmak, plastik deformasyon sergileyerek darbeye bağlı hasarı minimize etmek ve tabakaya düzlem dışı özellikler sağlamak gibi işlevleri bulunmaktadır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel olarak kompozit malzemeler takviye edici malzemesine göre; fiberli, parçacıklı, hibrid ve tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler, yatay olarak hizalanmış tek yönlü fiberler veya dokuma kumaşlardan oluşan katmanların üst üste konulmasıyla üretilmektedir. Günümüzde dokuma kumaş yapısındaki tabakalı kompozitler yapısal uygulamalarda

⁴³ Robert M. Jones, *Mechanics of Composite Materials* (CRC Press, 2014), s.2.

daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada dokuma kumaş yapısında üretilmiş tabakalı kompozit plakalar tercih edilmiştir.

Kompozit malzemeler kullanılan matris fazına göre üç ana kategoride sınıflandırılırlar.

Polimer matrisli kompozitler: Fiber takviyeli polimerler veya reçineli kompozitler olarak da adlandırılırlar. Matris malzemesi olarak genel olarak polimer esaslı reçine, takviye malzemesi olarak ise fiberler yer almaktadır. Kompozit yapıların çoğunda matris malzemesi olarak polyester, epoksi ve vinil ester bulunmaktadır. Epoksi reçine en yüksek performansla sahip matris malzemelerinden birisidir. Fiberler, termoset veya termoplastik özelliğine göre polimer matris ile yapışması için üretim esnasında yüzey işlemine tabi tutulmaktadır.⁴⁴

Metal matrisli kompozitler: Korozyon direnci, yüksek sağlamlık ve yüksek dayanım/yoğunluk oranı gibi malzeme özelliklerinin birleştirildiği gelişmiş malzemelerdir. Özellikle otomotiv sektöründe tercih edilen metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak hafif metaller, takviye malzemesi olarak ise genellikle bor, karbon veya seramik kullanılmaktadır.

Seramik matrisli kompozitler: Seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen ve sert çevre koşullarına karşı yüksek korozyon direncine sahip bir malzemedir. Matris malzemesi seramik olup, takviye malzemesi kısa fiberler veya kristal filamanlardır.

2.3. Havacılık Alanında Kompozit Malzemelerin Kullanımı

Kompozit malzemelerin havacılık alanında uygulama miktarının artmasının en önemli nedeni, yüksek mukavemet/ağırlık oranına ve aerodinamik şekil alabilme özelliğine sahip olmalarıdır. Ayrıca, yorulmaya ve korozyona karşı dayanıklıdır. Kompozit malzemeler sahip olduğu üstün özellikler sayesinde, hava araçlarının tasarım ve performans gereksinimlerini büyük ölçüde karşılamaktadır.

Fiberli kompozitler, 1903 yılında North Caroline'de gerçekleşen ilk uçuştan günümüze kadar askeri ve sivil hava araçlarında, insansız hava araçlarında, uydularda ve uzay araçlarında kullanılmıştır. 1964 yılında İngiltere'deki Kraliyet Uçak Kuruluşu'nda (Royal Aircraft Establishment) karbon fiberin keşfinin ardından kompozit malzemeler uçak yapılarının temel bileşeni olarak benimsenmiştir. Kompozit malzemelerin işlevselliğinin ve uygulama alanlarının artmasıyla birlikte

⁴⁴ Constantinos Soutis, **age**, s. 144.

termoset ve termoplastik malzemeler ve daha iyi mekanik özelliklere sahip ana yapılarda alüminyum ve titanyum gibi malzemelerin yerine kullanılabilen karbon fiber takviyeli plastik kompozitler geliştirilmiştir.⁴⁵

Fiber üretim teknolojilerindeki geliştirmeler PAN (polyacrylonitrile-poliakrilonitril) temelli karbon fiberlerin çekme dayanımının önemli ölçüde artmasına yol açmıştır. PAN temelli karbon fiberler yüksek modüllü (380 GPa), orta modüllü (290 GPa) ve yüksek mukavemetli (230 GPa ve 4,5 GPa çekme dayanımı) olmak üzere üç temel yapıda temin edilmektedir. Çekme gerilmesi-şekil değiştirme davranışı kopmaya kadar elastiktir ve fiberler gevrek şekilde kırıldığında büyük miktarda enerji ortaya çıkmaktadır. Uygun fiber seçimi yapının çalışma şartlarına bağlıdır. Askeri hava araçları için yüksek modüllü ve yüksek mukavemetli karbon fiberler tercih edilmektedir. Uydularda ise antenlerin ve taşıyıcı gövdenin sağlamlığını ve kararlılığını arttıran yüksek modüllü karbon fiberlerden yararlanılmaktadır.⁴⁶

Kompozitlerin hava aracı imalatında kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerde, gevrek epoksi reçine sistemler ile üretilen tabakalı kompozit yapıların düşük enerjili çarpmaya karşı toleransları çok düşüktü. Yeni üretilen toklaştırılmış epoksi sistemler ile bu konuda iyileştirmeler olmasına rağmen hala termoplastik malzemeler kadar hasara dayanıklı değillerdir. Polietereterketon (PEEK) iyi mekanik özelliklere sahip oldukça pahalı bir termoplastiktir. Karbon fiber takviyeli PEEK havacılık sanayindeki karbon fiber/epoksi, Al-Cu ve Al-Li alaşımları ile rekabet etmektedir. 5- 10 J'luk düşük enerjili darbe durumunda, karbon fiber-PEEK tabakalı kompozitlerde sadece darbe yüzeyinde çentik oluşurken, karbon fiber-epoksi kompozitlerde artakalan dayanım ve sağlamlık özelliklerini büyük ölçüde etkileyen delaminasyon oluşmaktadır. Karbon fiber-PEEK kompozitlerin bir avantajı da süresiz raf ömrüne sahip olması ve termosetlere göre üretimlerinin daha kısa sürmektedir.⁴⁷

2.3.1. Üretim Yöntemleri

Ana yapılarda kullanılan karbon fiber kompozitlerin büyük kısmı fiber yönelim gereksinime göre tek yönlü/dokuma tabakaların üst üste yerleştirilmesiyle üretilmektedir. Malzemenin düzgün yerleştirilmesi için daha zahmetli olan elle serme tekniği ve daha yüksek yatırım gerektiren otomatik serme makinaları gibi teknolojiler geliştirilmiştir. Malzemeler uygun tekniğe göre serildikten sonra, kalıp esnek bir torba

⁴⁵ age, s. 143.

⁴⁶ age, s. 144.

⁴⁷ age, s. 145.

ile kapatılarak otoklavın içine konulmaktadır. Reçinenin kür olması için gerekli olan sıcaklık ve basınçta malzeme belirlenen süre kadar otoklavda bekletilmektedir. Alternatif olarak vakum kalıplama (VM), reçine transfer kalıplama (RTM), vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), reçineli film emdirme (RFI) gibi otoklavsız daha düşük maliyetli yöntemler de bulunmaktadır.⁴⁸

Vakum kalıplama yönteminde kür edilirken malzemenin pekiştirilmesi için atmosfer basıncından yararlanılmaktadır, böylece otoklav veya basınç ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Önceden reçine emdirilmiş fiber örgü kumaş, tabakalar halinde kalıp yüzeyine yerleştirilmekte ve üzerine esnek bir örtü serilmektedir. Kalıbın kenarları ile örtü uygun şekilde birleştirilerek dış ortam ile izole edilmektedir. Kalıp ile örtü arasındaki hava tahliye edilerek reçine kür oluncaya kadar vakum uygulanmaktadır.

Reçine transfer kalıplama ve reçineli film emdirme sık kullanılan küreme yöntemlerindendir. Prepreg yapısında reçine zaten fiberlere nüfuz etmiş olduğundan bu yöntemle hava ve kabarcıklar ortadan kaldırılmakta ve malzeme kür edilmektedir. Reçine transfer kalıplama yönteminde önceden hazırlanmış fiber kumaş kalıba yerleştirilmekte ve boşlukları doldurması için basınçla reçine kalıbın içerisine enjekte edilmektedir.

Havacılıkta kullanılan geleneksel reçineler, 120°C-135°C veya 180°C'de otoklavda ya da fırında 8 bar basınca kadar kür edilmek üzere tasarlanmaktadır.⁴⁹

2.3.2. Kompozit Malzemelerin Havacılıkta Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler; uçak, helikopter gibi hava araçlarının gövdelerinde, kanat ve kuyruk elemanlarında, iniş-kalkış takımlarında, zırhlarında ve insansız hava araçlarında tercih edilmektedir.

Uçuşlara öncülük eden yıllarda, hava araçları çoğunlukla ahşaptan (doğal kompozit), tel veya kumaştan üretilen kompozitlerdi. 1930'lu yıllardan yakın döneme kadar havacılık sanayinde alüminyum alaşımları yoğun olarak tercih edilmiştir. Bununla birlikte ahşap yapılar 2'nci Dünya Savaşı'nın sonuna kadar kullanılmıştır. Ahşaptan yapılan De Havilland Mosquito isimli savaş uçağı kontra plak-balsa ağacı-kontra plak sandviç yapıda üretilmiştir. 1940 yılında keten lifleri içeren fenolik reçine

⁴⁸ age, s. 147.

⁴⁹ age, s. 145.

olan Gordon Aerolite malzemesinden yapılan Spitfire uçak gövdesi modern fiber takviyeli plastiklerin öncüsü olarak değerlendirilmektedir.⁵⁰

Kompozitler her türlü hava ve uzay araçlarının yapısal uygulamalarında ve bileşenlerinde yer almaktadırlar. Günümüzde kullanılan başlıca kompozit malzemeler; karbon fiber, cam ve aramid takviyeli epoksilerdir. Havacılık uygulamalarında en yaygın olarak tercih edilen ise karbon fiber kompozitlerdir.⁵¹

Günümüzdeki sivil hava araçları uygulamalarında ikincil yapı malzemelerinin yerine karbon, cam, kevlar veya hibrid gibi takviye malzemelerinden oluşan fiberli kompozitlerin kullanılmasına yönelik çalışmalara ağırlık verilmektedir. Bu bağlamda kompozitlerin yoğun olarak görüldüğü uygulamalara örnek olarak Boeing 757, 767, 777 ve Airbus A310, A320, A340 ve A380 yolcu uçakları verilebilir. Airbus A310'da bulunan temel aerodinamik parçası olan dikey dengeleyici kısmının tamamı karbon kompozitten üretilmiştir. Böylece, A1 alışıma sahip bir önceki versiyonu ile karşılaştırıldığında yaklaşık 400 kg ağırlık tasarrufu yapılmıştır. A320'de bulunan yatay dengeleyici, panellerde ve kumanda yüzeylerinde kompozit miktarının artırılmasıyla A1 alışımlı gövde kaplamasına kıyasla 800 kg ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Bu şekilde ağırlığın 1 kg azaltılmasıyla yılda yaklaşık 2900 litre yakıt tasarrufu yapılacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, Airbus A380'nin ön gövde kısmında ağırlık tasarrufu sağlayan, hasar toleransı artıran ve yorulma ömrünü iyileştiren alüminyum-cam fiber takviyeli (GLARE) hibrid kompozit malzeme bulunmaktadır.⁵²

Airbus A380'in gövde kaplamasını oluşturan malzemeler ve uygulama yerleri Şekil 1'de verilmiştir. Kompozit malzemeler Bell helikopterlerinde 20% ağırlık tasarrufu sağlamayı başardıkları 1980'lerden beri kullanılmaktadır. Yeni modellerinde pervane kanatlarının tamamı kompozitten üretilmiştir.

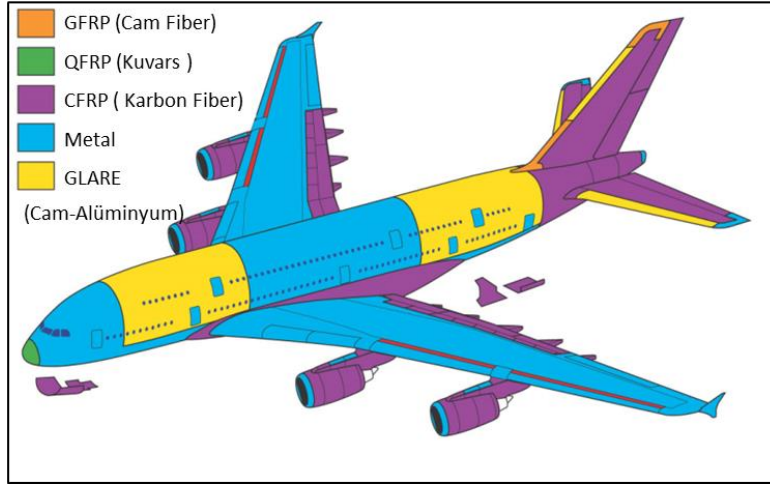
Savaş uçaklarının çoğu kütleli olarak yaklaşık 40% kompozit malzeme içermektedir ve yüzey alanının yaklaşık 70%'i kompozit malzemeden oluşmaktadır. Eğer bu miktarda kompozit malzeme tercih edilmezse, yapının ağırlığının artacağından dolayı savaş uçağının gerekli atikliği kaybolacaktır.⁵³

⁵⁰ age, s. 149.

⁵¹ Maria Mrazova. age, s. 142.

⁵² Soutis, age, s. 149.

⁵³ age, s. 150.



Şekil 1: Airbus A380 Malzeme Yapısı

“A380-800 Materials Overview”, <https://www.flightglobal.com/assets/getAsset.aspx?ItemID=9116> [Erişim tarihi: 25 Nisan 2016].

Kompozit malzemelerin havacılık sanayisinde kullanılması hala gelişme sürecindedir ve tam potansiyeline ulaşması için özellikle üretim aşamasında yeniliklerin ve gelişmelerin gerçekleşeceği değerlendirilmektedir. Kompozit sanayisinin gelecekte genişlemeye devam edeceği ve yenilikçi ürünler ve uygulamalara sürekli açık olacağı düşünülmektedir.

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞI

3.1. Darbe Sınıflandırması

Darbe olayında, vurucu kütlenin hızı değiştikçe vurucu kütle ile numune arasındaki enerji transferinde ve hasar ilerlemesinde büyük değişiklikler meydana gelmektedir. Bu yüzden darbe hızının sınıflandırması önem taşımaktadır.⁵⁴

Darbeler genellikle düşük hızlı, yüksek hızlı ve aşırı hızlı olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadırlar. Ancak kategorilerin tanımları ve limitleri hakkında araştırmacılar arasında görüş birliği bulunmamaktadır.

Sjoblom, Hartness ve Cordell⁵⁵ ve Shivakumar, Elber ve Illg⁵⁶ düşük hızlı darbeyi malzemenin sağlamlığına, özelliklerine ve vurucu darbe kütlesine bağlı olarak 1-10 m/s aralığında gerçekleşen çarpmalar şeklinde tanımlamaktadırlar.

Cantwell ve Morton⁵⁷ darbe olayını simüle eden test yöntemlerini göz önünde bulundurarak 10 m/s'ye kadar olan hızları düşük darbe hızı olarak sınıflandırmıştır. Abrate⁵⁸ ise çalışmasında 100 m/s'nin altındaki çarpmaları düşük hızlı darbe olarak değerlendirmiştir.

Robinson ve Davies⁵⁹, darbe süresince numunede kalınlık boyunca oluşan gerilim dalgalarının, gerilme dağılımının önemli bir parçası olmadığı durumları düşük hızlı darbe olarak tanımlamışlardır. Yüksek hızlı darbeye geçiş sınırlarını veren basit bir model ortaya koyarak gerilme dalgalarının baskın olduğu darbelerin 10-20 m/s arasındaki hızlarda gerçekleştiğini hesaplamışlardır.

⁵⁴ Niranjan K. Naik, P. Shirao, "Composite Structures Under Ballistic Impact", **Composite Structures**, c. 66, s. 1 (2004): s. 579.

⁵⁵ Peter O. Sjoblom, J. Timothy Hartness, Tobey M. Cordell, "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials", **Journal of Composite Materials**, c. 22, s. 1 (1988): s. 31.

⁵⁶ Kunigal N. Shivakumar, Wolf Elber, Walter Illg, "Prediction of Low-Velocity Impact Damage In Thin Circular Laminates", **AIAA Journal**, c. 23, s. 3 (1985): s. 442.

⁵⁷ Wesley J. Cantwell, John Morton, 1991, s. 348.

⁵⁸ Serge Abrate, "Impact On Laminated Composite Materials", **Applied Mechanics Reviews**, c. 44, s. 4 (1991): s. 155.

⁵⁹ Paul Robinson, Glyn A. O. Davies, "Impactor Mass and Specimen Geometry Effects In Low Velocity Impact of Laminated Composites", **International Journal of Impact Engineering**, c. 12, s. 2 (1992): s. 190.

Vaidya⁶⁰ ise çarpma hızlarını; el aleti düşürme gibi 10 m/s'nin altındaki hızlarda oluşan darbeleri düşük hızlı darbeler, dolu veya yoldaki döküntülerin çarpması gibi 10 m/s ile 50 m/s arasındaki hızlarda gerçekleşen darbeleri orta hızlı darbeler, mermi çarpması gibi 50 m/s ile 1000 m/s arasındaki hızlarda gerçekleşen darbeleri yüksek hızlı veya balistik darbeler ve 1 km/s ile 5 km/s arasındaki hızlarda gerçekleşen darbeleri ise aşırı hızlı darbeler olarak sınıflandırmıştır.

Bu çalışmada her ne kadar malzemede penetrasyon ve perforasyon oluşsa da, ağırlık düşürme darbe testlerinin tamamında vurucu kütlenin hızı 5,2 m/s'nin altında olduğundan yapılan darbeler düşük hızlı darbe olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Genel olarak, yüksek miktarda enerji sönümleyebilmesinden ve sünek yapısından dolayı metal malzemelerde düşük hızlı darbe hasarı tehdit olarak değerlendirilmemektedir. Ancak kompozit malzemeler düşük hızlı darbeye maruz kaldığında malzemenin yapısal dayanıklılığını önemli ölçüde azaltan gözle zorlukla görünebilen hasarlar oluşabilmektedir. Kompozitlerin çoğu gevrek yapıda olduğu için darbe enerjisini sadece elastik şekil değiştirmeye ve çeşitli hasar mekanizmaları aracılığıyla sönümlemektedirler.

Düşük hızlı darbede, vurucu kütle ile numune arasındaki temas süresi kompozit malzemenin bütün olarak darbeye tepki verebileceği kadar uzundur. Bu nedenle düşük hızlı darbelerde kompozit malzemenin dinamik yapısal tepkisi çok önemlidir.

Tabakalı kompozit malzemelerin kalınlıkları boyunca fiber veya takviye malzemesi bulunmadığı için enlemesine (kalınlık doğrultusundaki) dayanımları ve hasar dirençleri zayıftır. Bu nedenle düzlem dışı darbe yüklemesi hasarın fark edilmemiş olabileceği için riskli kabul edilir. Kompozit malzemeler darbeye maruz kaldığında çentik, matris çatlaması, fiber/matris ayrılması, delaminasyon ve daha yüksek enerjili darbelerde ise fiber kopmaları ve delinme meydana gelir. Bu hasarların sonucunda tabakalı kompozit malzemelerin yük taşıma kapasitesi ve basma mukavemeti önemli ölçüde azalır. Düşük enerji seviyelerinde oluşan delaminasyonlar malzemenin çekme dayanımını çok az etkilerler, ancak basma mukavemetini önemli ölçüde azaltırlar.⁶¹

⁶⁰ Uday K. Vaidya, "Impact Response of Laminated and Sandwich Composites", *Impact Engineering of Composite Structures*, ed. Serge Abrate (Birmingham: Springer Vienna, 2011): ss. 97-191.

⁶¹ Manuel De Freitas, Luis Reis, *age*, s. 365.

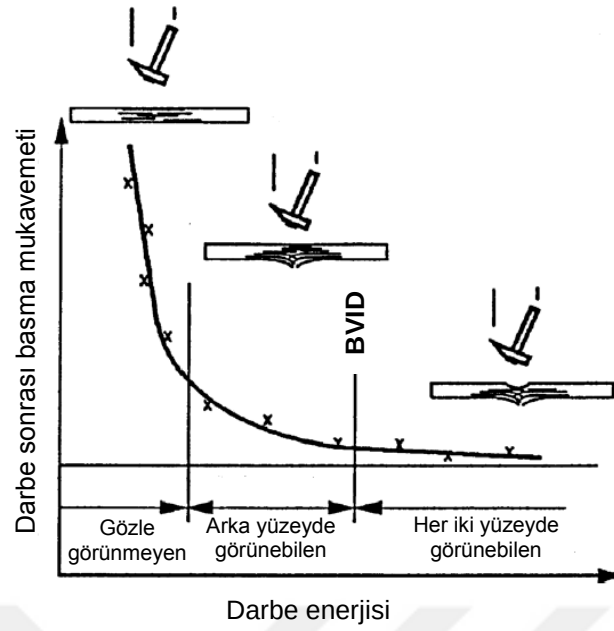
Kompozit malzemelerde düşük hızlı darbeden kaynaklanan hasarlar zorlukla görülebilirler veya fark edilmeyebilirler. Ancak bu tür hasarlar kompozit yapının dayanımında azalmaya neden olabileceği için ilerleyen zamanlarda kötü sonuçlar doğurabilir. Hava aracının hasar toleransı gereksinimlerini karşılamak için, düşük hızlı darbe sonucu oluşması varsayılan en kötü hasar durumunda, kompozit hava aracının yeterli artakalan dayanımına sahip olduğundan emin olmak gerekmektedir.⁶²

Kompozit yapıların ömrü boyunca dolu sağanağı, uçak pisti döküntüsü veya el aleti düşmesi gibi çeşitli sebeplerden dolayı kompozit malzemelerde oluşan hasar malzemenin ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Hava aracının işletim süresi içinde herhangi bir sebepten dolayı hasar oluştuğunda, hasar tespit edilinceye kadar yapının ciddi deformasyona uğramadan belli bir yük dayanımına sahip olması ve emniyetli şekilde kullanılması amaçlanmaktadır. Şekil 2’de belirtildiği gibi kazayla oluşan hasarlar görsel olarak tespit edilebilirliğine göre karakterize edilmektedir. Darbe enerjisi arttıkça hasar miktarı da artmakta, dolayısıyla darbe sonrası basma mukavemeti azalmaktadır. Düşük hızlı darbelerde malzemenin yüzeyinde oluşan zorlukla görünebilen darbe hasarı (BVID-Barely visible impact damage), hasar toleransı ile ilgili önemli bir kavramdır.⁶³

Darbe enerjisi (E_d) ve absorbe edilen enerji (E_a) darbe sonrası kompozit malzemelerdeki hasar ilerlemesinin değerlendirilmesinde kullanılan parametrelerdir. Absorbe edilen enerji darbe olayı sonunda kompozit malzeme tarafından sönmölenen veya vurucu kütle tarafından kompozit malzemeye transfer edilen enerji miktarını ifade ederken, darbe enerjisi ise çarpma meydana gelmeden hemen önce vurucu kütlenin sahip olduğu kinetik enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır.

⁶² Richard H. Bossi, Giurgiutiu, Victor, “Nondestructive Testing of Damage in Aerospace Composites”, *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, ed. P.E. Irving, Constantinos Soutis (Elsevier -- Woodhead Publishing, 2014): ss. 413-448.

⁶³ Sandrine Petit ve diğ., “Impact and Compression After Impact Experimental Study of a Composite Laminate With a Cork Thermal Shield”, *Composites Science and Technology*, c.67, s. 15 (2007): s. 3286.

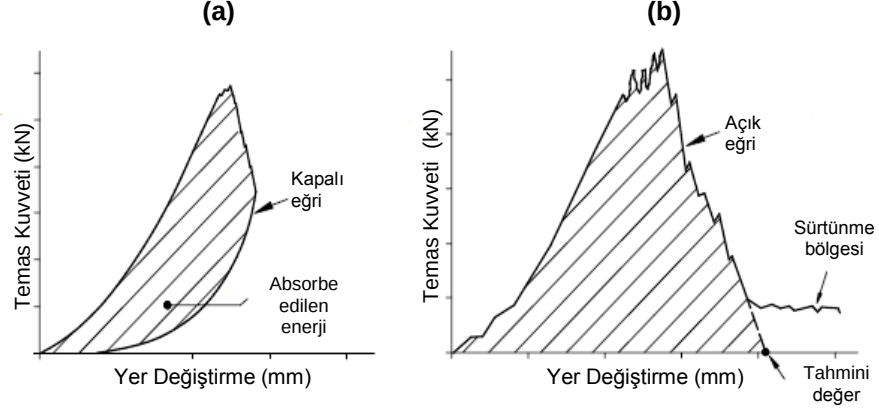


Şekil 2: Kaza ile Oluşan Hasarın Karakterizasyonu

Sandrine Petit ve diğ., "Impact and Compression After Impact Experimental Study of a Composite Laminate With a Cork Thermal Shield", *Composites Science and Technology*, c.67, s. 15 (2007): s. 3287.

Absorbe edilen enerji kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden hesaplanabilmektedir. Şekil 3'de darbe olayında karşılaşılan iki eğri gösterilmektedir. Şekil 3.a'da kapalı uçlu ve Şekil 3.b'de açık uçlu eğrilerdeki taralı bölgeler numune tarafından absorbe edilen enerji miktarını göstermektedir.⁶⁴ Kapalı eğride, darbe ucu numunede hasara neden olabilecek yeterli enerji seviyesine sahip olmadığı için numuneden geri sekmektedir. Açık uçlu eğrinin sonunda görülen yatay bölge perforasyon sonrası oluşan sürtünmeyi ifade etmektedir. Absorbe edilen enerjinin doğru tanımlanması için bu bölge eğriden kaldırılarak dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle şekilde görüldüğü gibi eğrinin aşağı yönelen bölgesinin son kısmı yer değiştirme eksenini ile birleştirilmiştir.

⁶⁴ Cesim Ataş, Onur Sayman, "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates", *Composite Structures*, c. 82, s. 3 (2008): s. 338.



Şekil 3: Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrilerinden Absorbe Edilen Enerjinin Hesaplanması (a) Geri Sekme Durumu, (b) Perforasyona Uğrayan Numune

Cesim Ataş, Onur Sayman, "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates", *Composite Structures*, c. 82, s. 3 (2008): s. 338.

3.3. Darbe Sonucu Oluşan Hasar Türleri

Darbeye karşı dirençli kompozit yapıların tasarımı için yüksek ve düşük hızlarda oluşan darbe hasar yapılarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar, düşük hızlı darbe sonucunda kompozit malzemelerde genellikle delaminasyon (tabakalar arası ayrılma), matris çatlaması ve fiber kopması gibi temel hasar türlerinin meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Daha yüksek hızlı darbelerde ise kompozit malzemelerde, darbe yüzeyinde çentik (iz) oluşumu, penetrasyon (nüfuziyet) ve perforasyon (tam delinme) gibi makroskopik boyutta hasar türleri oluşmaktadır.

Bitişik tabakaların ayrılmasına bağlı olarak plakanın dayanımının önemli ölçüde azalmasından dolayı delaminasyonlar en çok ele alınan konulardan biri olmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda, delaminasyonların sadece farklı fiber yönelimine sahip tabakalar arasındaki yüzeylerde olduğu tespit edilmiştir.

Tabakalı kompozit malzemeler düşük hızlı darbeye maruz kaldığında tabakalar arasında takviye olmadığından yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Bunun sonucunda delaminasyon oluşarak tabakalar ayrılır. Daha şiddetli darbeler fiberlerin kırılmasına neden olur. Darbe sonrası malzemenin içyapısında oluşan hasar malzemenin dayanımını azaltmakta ve darbe bölgesi çevresinde genişlemektedir.

Fiber kopması, matris çatlaması, fiber matris yüzeylerinin ayrılması ve delaminasyon gibi enerji sönmeme mekanizmalarının yanı sıra çoğu fiber takviyeli kompozit malzemelerin gevrek yapısı, hasar tiplerinin ilerlemesinde ve kompozit yapıların enerji sönmeme kapasitesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Düşük

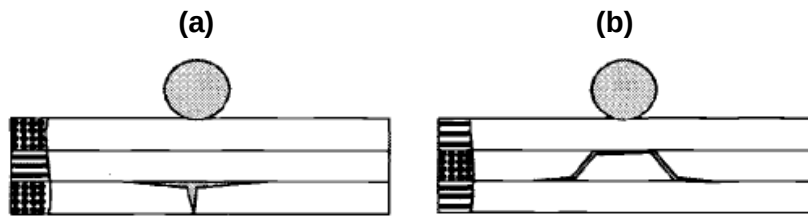
hızlı darbe yüklemesi altında oluşan bu hasar tipleri, fiber ve reçine türüne, tabaka dizilimine, kalınlığa, çarpma hızına ve darbe ucu geometrisine bağlıdır.⁶⁵

Metal ve plastik malzemelerde enerji, çatlak ucu bölgesinde elastik olmayan deformasyon şeklinde dağılmaktadır. Bu enerji, metallerde dislokasyonlara aktarılarak, polimerlerde ise viskoelastik akma veya çatlak oluşumuyla kaybolmaktadır. Kompozitlerde ise fiberler çatlak ilerlemesine engel olurlar, fakat bu etki fiberlerin matrise ne kadar kuvvetle bağlı olmalarına bağlıdır. Örneğin; fiber/matris bağının kuvvetli olduğu, yani kompozitin tokluğunun düşük ve neredeyse ayrı ayrı bileşenlerinin tokluğunun toplamına eşit olduğu durumlarda; çatlak, fiber ve matrislerin arasından sapmadan ilerleyebilmektedir. Eğer fiber/matris bağı zayıfsa, çatlak ilerlemesi karmaşık bir hale gelmekte ve ardından farklı hasar mekanizmaları kompozitin bütünündeki hasar sürecine etki edebilmektedir.⁶⁶

3.3.1. Matris Çatlaması

Düşük hızlı darbe anında malzemede ilk olarak çıplak gözle görülemeyen matris çatlağı oluşmaktadır. Ardından matris çatlakları tabaka ara yüzlerinde ayrılmaya (delaminasyona) neden olmaktadır. Matris çatlaması matrisin veya fiber/matris ara yüzünün sahip olduğu tabakalar arası kayma mukavemeti ve basma dayanımı özelliklerinin azalmasına neden olabilmektedir.

Matris çatlakları, gerilme ve kesme çatlağı olmak üzere iki şekilde görülmektedirler. (Şekil 4). Gerilme çatlağı düzlemsel normal gerilmelerin, tabakanın enine çekme dayanımını aştığında ortaya çıkmaktadır. Kesme çatlağının oluşumlarında enine kesme gerilmeleri rol oynamaktadır.⁶⁷



Şekil 4: Matris Çatlağı Türleri a) Çekme Çatlağı, b) Kesme Çatlağı

Serge Abrate, *Impact on Composite Structures* (Cambridge University Press, 2005): s. 143.

⁶⁵ Sandeep Agrawal, Kalyan Kumar Singh, P. K. Sarkar, "Impact Damage on Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composite—A Review", *Journal of Composite Materials*, c. 48, s. 3 (2014): s. 317.

⁶⁶ Constantinos Soutis, *age*, s. 146.

⁶⁷ Serge Abrate, *Impact on Composite Structures* (Cambridge University Press, 2005): s. 143.

Kalın plakalara darbe uygulandığında, çatlaklar bölgesel temas gerilmeleri sonucu plakanın üst yüzeyine yakın bölgede oluşurlar. Hasar çam ağacı şeklinde yukarıdan aşağı doğru ilerler (Şekil 5a). İnce plakalarda çatlak eğilmeye bağlı çekme gerilmeleri sonucu plakanın alt tabakalarında oluşur. Matris çatlakları ve delaminasyonlar ters çam ağacı şeklinde aşağıdan yukarı doğru ilerlerler (Şekil 5b).⁶⁸



Şekil 5: (a) Kalın Plakalarda, (b) İnce Plakalarda Hasar İlerleme Şekilleri

Serge Abrate, *Impact on Composite Structures* (Cambridge University Press, 2005): s. 144.

3.3.2. Delaminasyon (Tabakalar Arası Ayrılma)

Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemelerde görülen hasar türlerinden birisidir. İki komşu tabakanın iç yüzeyinde görülür ve tabakalı yapıların basma dayanımını önemli ölçüde azaltır. Delaminasyonlara malzemedeki mekanik kusurlar, düzlem dışı yüklemeler ve düşük hızlı darbeler neden olmaktadır. Düşük hızlı darbe farklı açılı yönelimlere sahip tabakaların ara yüzeyi boyunca gerilmeye neden olur ve ara yüzey malzemesinin ayrılması sonucunda delaminasyon oluşur.⁶⁹ Delaminasyonlar, farklı fiber yönelimine sahip tabakalar arasındaki yüzeylerde oluşmaktadır.

Darbeye uğrayan tabakalı kompozit malzemelerin artakalan mekanik özelliklerinin büyük ölçüde delaminasyon alanlarına bağlı olduğu için delaminasyon önemli bir hasar türüdür.⁷⁰

3.3.3. Fiber Kopması

Matris çatlaması ve delaminasyonun oluşmasının ardından fiber kopmaları başlamaktadır. Fiber kopması yüksek gerilmelere ve ezilme (çentik) etkilerine bağlı olarak darbe bölgesinde ve eğilme gerilmelerine bağlı olarak numunenin arka yüzeyinde meydana gelmektedir.

⁶⁸ *age*, s. 144.

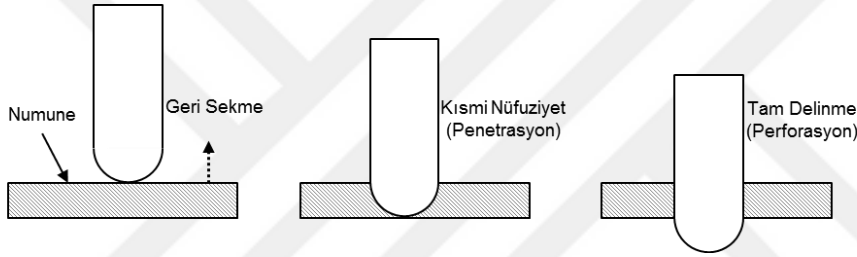
⁶⁹ Shuchang Long, Yao Xiaohu, Zhang Xiaoqing, "Delamination Prediction in Composite Laminates under Low-Velocity Impact", *Composite Structures*, s. 132 (2015): s. 290-298.

⁷⁰ Dahsin Liu, Basavaraju B. Raju, Xinglai Dang, *age*, s. 853.

3.3.4. Penetrasyon ve Perforasyon

Fiber kırılmaları kritik boyutlara ulaştığında darbe ucu numuneye nüfuz etmesiyle oluşan hasar türleridir. Genellikle, balistik sınırlardaki darbelerde görülen penetrasyon ve perforasyon hasarı, düşük hızlı darbe testlerinde yüksek enerji seviyelerinde incelenmektedir. Kısmi nüfuziyet (penetrasyon) vurucunun kompozit malzemeye saplanmasıdır. Tam delinme (perforasyon) ise vurucunun kompozit malzemeyi delme durumudur (Şekil 6).

Delaminasyon ve fiber kopması hasarının arttığı ve malzemenin dayanımının büyük ölçüde azaldığı darbe enerjisi seviyelerinde, darbe ucu numuneye nüfuz etmeye (penetrasyon) başlamaktadır. En yüksek temas kuvveti, temas süresi ve absorbe edilen enerji numunede tam delinme (perforasyon) oluştuğunda kritik seviyeye ulaşmaktadır.



Şekil 6: Geri Sekme, Kısmi Nüfuziyet ve Tam Delinme Durumlarının Şematik Gösterimi

3.4. Darbe Hasarına Etki Eden Parametreler

Darbe hasarı matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kopması gibi farklı hasar mekanizmaları arasındaki etkileşimlerden meydana gelmektedir ve darbe parametrelerine bağlı olarak ilerlemektedir. Darbe hasarına etki eden parametreler yapısal, vurucu kütle ve çevresel parametreler olmak üzere üç grupta incelenmektedir.

3.4.1. Malzemenin Yapısal Parametreleri

Malzemenin şekli, kalınlığı, büyüklüğü, tabaka türü, tabaka dizilimi, malzemenin yoğunluğu ve sınır şartları gibi parametreler yapının sağlamlığını doğrudan etkilediği için malzemenin darbe davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.⁷¹

⁷¹ Emilio V. González ve diğ., *age*, s. 816.

Matris, fiber ve matris-fiber ara yüz özellikleri de darbe hasarının başlamasını ve ilerlemesini belirleyen önemli parametrelerdendir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri kendisini oluşturan bileşen malzemelerin türüne, miktarına, boşluk oranına, fiber dizilimi ve oranına bağlıdır. Bu özelliklerin yanında ara yüzeylerin birbirine yapışma özelliği ve ara yüzeylerdeki yük transfer mekanizmaları önemli rol oynamaktadır.⁷²

Malzemenin kalınlığı yönündeki sağlamlığı, oluşan hasarın boyutunu belirleyen en yüksek temas kuvvetinin büyüklüğü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca tabaka dizilimi ile ilgili yapılan çok sayıda çalışmada tabaka diziliminin kompozitlerin hasar direncini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir.⁷³

Bütün fiberlerin tek yönlü dizilime sahip olduğu tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon oluşmamaktadır. Tabakalar arasındaki açı farkı arttıkça darbe sonucu oluşan delaminasyon alanı da artmaktadır. Her bir tabakanın kalınlığının artması da delaminasyonun artmasına neden olmaktadır. Darbe sırasında ulaşılan azami yük veya azami yük anındaki enerji miktarı tabaka dizilimine doğrudan bağlıdır.⁷⁴

3.4.2. Vurucu Kütle Parametreleri

Vurucu kütlenin geometrisi, büyüklüğü, malzeme yapısı, ağırlığı, çarpma hızı ve çarpma açısı darbe hasarını etkileyen önemli parametrelerdir.⁷⁵

Farklı darbe ucu geometrileri kompozit plakalarda farklı hasar mekanizmalarına ve hasar alanlarına neden olmaktadır. Böylece malzemenin darbe sonrası artakalan özellikleri darbe ucu geometrisine göre değişkenlik göstermektedir.⁷⁶

Düşük hızlı darbe testinde vurucu kütlenin hızı yüksekliğine göre ayarlanmaktadır. Çarpma hızı şiddetinin artmasıyla numuneye uygulanan enerji miktarı da artacağından, malzemenin darbe davranışını etkilemektedir.

⁷² Sandeep Agrawal, Kalyan Kumar Singh, P. K. Sarkar, **age**, s. 321.

⁷³ **age**, s. 322.

⁷⁴ Serge Abrate, 1991, s. 185.

⁷⁵ Emilio V. González ve diğ., **age**, s. 805.

⁷⁶ Sandeep Agrawal, Kalyan Kumar Singh, P. K. Sarkar, **age**, s. 320.

3.4.3. Çevre Koşulları

Kompozit malzemelerin farklı sıcaklıklarda ve farklı nem oranlarındaki darbe davranışları farklılık göstermektedir. Bu sebeple darbe testleri esnasında ve muhafazasında çevresel koşulların sağlanması önem taşımaktadır.

3.5. Kompozit Malzemelerin Darbe Testleri

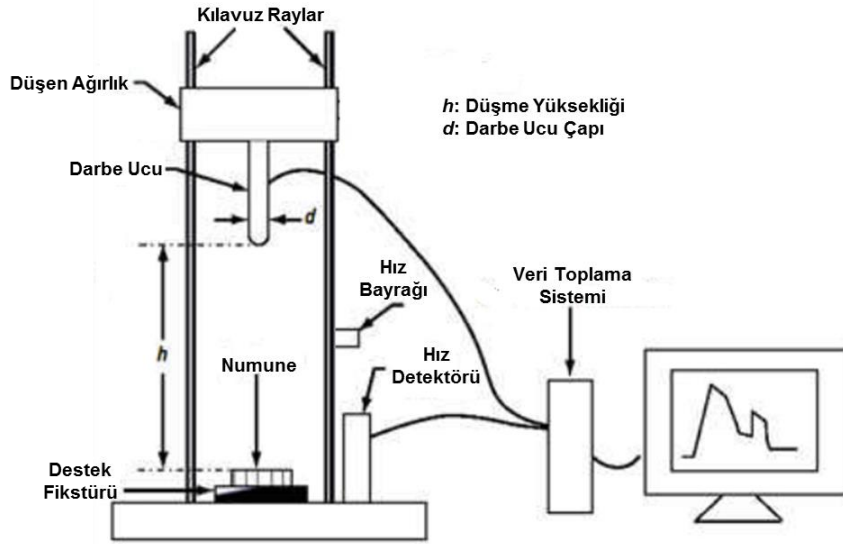
Kompozit malzemeler kullanım alanları göz önüne alındığında sıklıkla darbe hasarına maruz kalabilirler. Darbe testleri düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe olmak iki kategoride incelenmektedir. Düşük hızlı darbeler için ağırlık düşürme darbe test cihazı ve sarkaçlı darbe testleri, yüksek hızlı darbeler için balistik test düzeneği, hava veya gaz silahı testleri veya split hopkinson test düzeneği kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin darbe durumunda mekanik davranışının belirlenmesi için belirli şartlar altında gerçek durum senaryolarının oluşturulmasına dayanan deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin el aletinin yanlışlıkla malzemenin üzerine düşmesiyle oluşan düşük hızlı darbe ağırlık düşürme darbe test cihazıyla, uçağın kalkışı ve inişi esnasında pistten fırlayan döküntülerin oluşturduğu hasar gaz silahı testiyle simüle edilmektedir.

3.5.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Kompozit malzemelerin darbe davranışını ölçmeye yarayan en çok kullanılan test yöntemidir. Farklı tasarımlarda yoğun olarak kullanılan ağırlık düşürme test cihazları, vurucu kütlenin kılavuz raylar doğrultusunda belirli bir yükseklikten serbest düşmeye bırakılması prensibine göre çalışmaktadır. Vurucu kütlenin geri sıçraması sonrası oluşacak çoklu darbeleri engellemek için tasarlanmış olan mekanik parça ile donatılmıştır. Vurucu kütle üzerinde bulunan sensörler vasıtasıyla darbe anındaki veriler toplanmaktadır (Şekil 7).

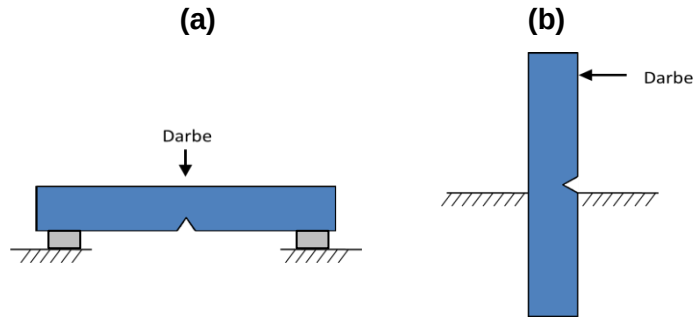
Darbe sonucunda gözle açıkça görülebilen veya gözle zorlukla görülebilen hasarlar oluşmaktadır. Darbe sonrası yapılan testler ile bu iki hasar tipi değerlendirilebilmektedir.



Şekil 7: Ağırlık Düşürme Test Cihazı Düzenegi

3.5.2. Sarkaçlı (Charpy ve İzod) Darbe Testi

Çentikli veya çentiksiz olarak hazırlanan numuneler sarkaçlı bir düzeneğe yerleştirilir. Sarkaç belirli bir yükseklikten serbest düşmeye bırakılarak numuneye çarpmakta ve numuneyi kırmaktadır. Sarkacın darbe ile numuneyi kırmasının ardından ilk yüksekliği ile ulaştığı yüksekliği arasındaki farkın ölçülmesiyle, numunenin enerji sönmüleme miktarı, bir başka deyişle malzemenin tokluğu belirlenmektedir. Numunenin kırılmasından kaynaklanan enerji kaybı sarkacın ilk ve son yüksekliği arasındaki farkla orantılıdır. Charpy ve izod testleri yöntem olarak birbirine benzemektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi charpy darbe testinde numune yatay olarak basit bir kiriş yardımıyla iki kenarından desteklenirken, izod darbe testinde numune dik olarak bir kenarından iki taraflı desteklenmektedir.



Şekil 8: Charpy (a) ve İzod (b) Darbe Test Numunelerinin Konumu

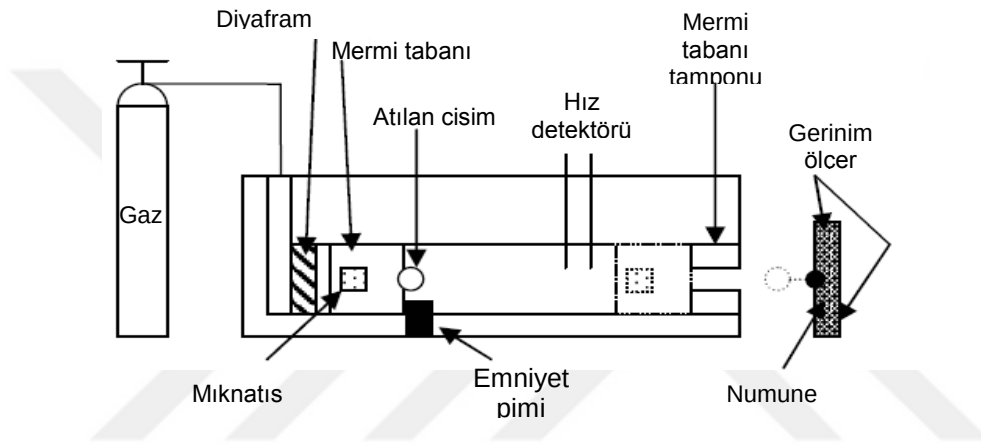
3.5.3. Balistik Test Düzenegi

Yüksek hızlı darbeler için balistik test düzeneği, hava veya gaz silahı testleri veya split hopkinson test düzeneği kullanılmaktadır. Yüksek hızlarda ateşlenen

merminin numuneye gönderilmesi ve çarpma sonrası oluşan hasarın değerlendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Kompozit zırhların test edilmesinde kullanılmaktadır.

3.5.4. Hava veya Gaz Silahı Testleri

Gaz silah test düzeneği diyafram içine gaz verilerek mermi tabanına basınç uygulanmasıyla çalışır. Emniyet piminin açılmasıyla mermi tabanı namlu içinde hızla ilerlemeye başlar. Mermi tabanının tampon tarafından durdurulmasıyla cismin numuneye çarpması sağlanır. Darbe sonrası numunede oluşan şekil değiştirmeler gerinim ölçer vasıtasıyla ölçülür (Şekil 9).⁷⁷



Şekil 9: Basit Bir Gaz Silah Test Düzeneği

3.5.5. Split Hopkinson Test Düzeneği

Split Hopkinson test düzeneği, yüksek şekil değiştirme hızlarında malzemenin dinamik davranışını belirlemek için geliştirilmiştir. Test düzeneği darbe çubuğu, aralarına numunenin yerleştirildiği iki adet çubuk ve çubuklar üzerinden birim şekil değiştirme değerlerinin alındığı gerinim ölçerlerden oluşmaktadır. Gaz basıncı ile fırlatılan darbe çubuğu birinci elastik çubuğa çarpması sonucu oluşan basma gerilmeleri numune ve çubuklar arasında aktararak ilerlemektedir. İki çubukta bulunan gerinim ölçerler vasıtasıyla şekil değiştirme bilgiler kayıt altına alınmaktadır.⁷⁸

⁷⁷ Joshua M. Duell, "Impact Testing of Advanced Composites", *Advanced Topics in Characterization of Composites*, ed. Michael R. Kessler (Trafford Publishing, 2004): s. 106.

⁷⁸ Celal Evci, "Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi" (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010), s. 67.

3.6. Darbe Sonrası Muayene ve Test Yöntemleri

Kompozit malzemenin darbe davranışının karakterizasyonu için sadece darbe testi yapmak yeterli olmayabilir. Darbe sonrası oluşan hasar mekanizmalarını veya hasar türlerini ortaya koymak için hasarlı numune, bazı muayene ve test işlemine tabi tutulabilir. Bu testler tahribatlı veya tahribatsız şekilde yapılabilir. Tahribatlı test yöntemleri ile malzemenin mekanik özellikleri ile ilgili sayısal sonuçlar, tahribatsız test yöntemleriyle ise nitel sonuçlar elde edilmektedir. Tahribatsız muayene yöntemleri arasında x-ışınlarıyla muayene, taramalı elektron mikroskopuyla muayene, optik muayene, ultrasonik muayene ve termografik test yöntemleri yer almaktadır. Tahribatlı muayene yöntemleri olarak ise darbe sonrası basma mukavemeti testi, eğme testi ve çekme testi kullanılmaktadır.⁷⁹

3.6.1. Ultrasonik Muayene

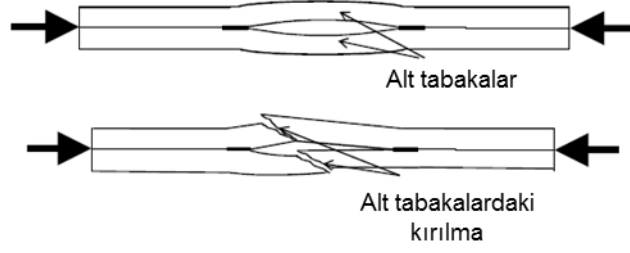
Ultrasonik yöntem, numuneye sürekli ses dalgalarının gönderilmesi ve yansıyan ses dalgalarının kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır. Yansıyan ses dalgaları nesnenin görüntüsünü resmederek kusurların şeklini ve boyutunu belirlemektedir. Numunelerde özellikle delaminasyona bağlı oluşan hasar alanının büyüklüğü ultrasonik c-tarama yöntemiyle belirlenmektedir. Tahribatsız muayene sonucunda kusurların iki boyutlu görüntüsü elde edilmektedir.

3.6.2. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti (DSBM) Testi

Ağırlık düşürme darbe testinden sonra hasarlı numunenin artakalan dayanımının belirlenmesi için tahribatlı muayene yöntemlerinden birisi olan darbe sonrası basma mukavemeti testi yapılmaktadır. Test sonucunda elde edilen en yüksek basma mukavemeti verileri hasarlı numunenin dayanımının ne kadar azaldığı ve işlevlerini yerine getirip getiremeyeceği konusunda bilgi sunmaktadır.

Ağırlık düşürme darbe testleri sonucunda tabakalar arasında ayrılmalar (delaminasyon) oluşmaktadır. DSB dayanımı testi esnasında uygulanan basma kuvveti ile tabakalar dışa doğru burkularak fiberler kırılmaktadır ve hasar numunenin eni boyunca ilerlemektedir (Şekil 10).

⁷⁹ Joshua M. Duell, **age**, s. 110.



Şekil 10: DSB Dayanımı Testi Uygulanan Numunede Hasar Oluşumu

NASA, SACMA ve Boeing gibi kuruluşlar kendilerine özgü darbe sonrası basma mukavemeti test yöntemlerini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada testler en yaygın olarak kullanılan ASTM 7137⁸⁰ standardına göre yapılmıştır.

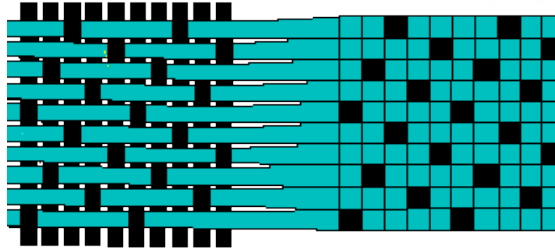
⁸⁰ "ASTM D7137/D7137M: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates" (West Conshohocken: ASTM International, 2007).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE YÖNTEM

4.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Kompozit numuneler Şekil 11’de gösterilen 5’li saten dokuma yapıya sahip önceden reçine emdirilmiş karbon fiber tabakalar (prepreg) kullanılarak üretilmiştir.

Numunelerin tasarımı ve üretimi ASTM 7136 standardında belirtilen kriterlere uygun olarak yapılmıştır. Kompozit malzemenin tabaka dizilimi simetrik, dengeli ve yarı-izotropik yapıda olacak şekilde tasarlanmıştır. Plakaların simetrik olması, orta eksenin altında ve üstünde bulunan tabakaların aynı dizilime sahip olması demektir. Dengeli yapıda olması ise, “0°” ve “90°” dışındaki bütün açılı tabakaların simetri eksenine göre $\pm$ çiftler şeklinde olması demektir. Yarı-izotropik yapı, +45° ve -45° açılarla yönlendirilmiş tabaka sayılarının eşit olduğunu ifade etmektedir.⁸¹ Otoklav sonrası plakalarda eğilme veya burkulma olmaması için tabakaların simetrik ve dengeli yerleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 11: 5'li Saten Dokuma

"Woven materials", <http://www.favonius.com/soaring/materials/material.htm> [Erişim tarihi: 21 Mart 2016].

ASTM 7136 standardı gereğince kompozit plakaların kalınlığının yaklaşık 4-5 mm arasında olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda çalışmada kullanılan reçine emdirilmiş karbon fiber tabakanın kür edilmiş nominal tabaka kalınlığının 0,35 mm olduğu dikkate alınmış ve istenen kalınlığa ulaşmak için toplam tabaka sayısı 12 olarak belirlenmiştir.

⁸¹ J. Kim Bailie, Robert P. Ley, Arun Pasricha, "A Summary and Review of Composite Laminate Design Guidelines" (NASA Langley Research Center, Hampton, VA. Technical Report No. NASA, NAS1-19347, 1997), s. 4-4.

Malzemeye ait tabaka konfigürasyonu $[(+45/-45)/(0/90)]_{3S}$ şeklinde tanımlanmış olup, tabaka dizilimi Şekil 12’de görülmektedir. Burada, “s” ifadesi simetrik yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Tabaka Numarası	Tabaka Yerleşimi
12	± 45
11	0/90
10	± 45
9	0/90
8	± 45
7	0/90
6	0/90
5	± 45
4	0/90
3	± 45
2	0/90
1	± 45

Simetri
Eksen

Şekil 12: Tabaka Konfigürasyonu

4.1.1. Test Numunelerinin Üretimi

Yapılacak olan testler için ihtiyaç duyulan test numuneleri TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ’nin desteği ile Yüksel Kompozit Teknolojileri A.Ş. tesislerinde üretilmiştir. Şekil 13’de görülen HexPly 6376C-926 marka 5’li saten dokuma yapısına sahip reçine emdirilmiş karbon tabakalar (prepreg) kullanılarak otoklav kalıplama metodu ile üretim yapılmıştır. Homojen ve düzgün dağılmış elyaflarla matris emdirilerek oluşturulmuş ince tabakalara prepreg denilmektedir.⁸² Kullanılan reçine emdirilmiş örgü tabakaya ait malzeme bilgileri aşağıda özetlenmiştir.

Üretici Firma: Hexcel

Reçine Türü: 6376 Epoksi reçine

Dokuma Türü: 5’li Saten Dokuma

Fiber Referansı: G0926, HTA 6K (Tenax Toho)

Fiber Türü: Yüksek Mukavemetli Karbon Fiber

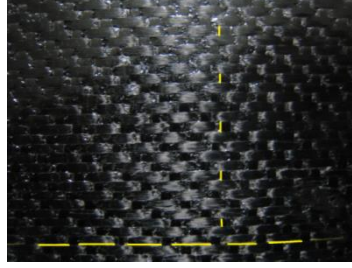
Reçine Oranı: $35 \pm 2,5 \%$

Fiber yoğunluğu: $1,80 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$

Reçine yoğunluğu: $1,27 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$

⁸² Dilek Karaca, “Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi” (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010): s. 41.

Fiber Birim Ağırlığı: 370 ± 14 g/m²
Prepreg Birim Ağırlığı: 570 ± 35 g/m²
Kür Edilmiş Nominal Kat Kalınlığı: 0,35 mm
Atkı/Çözücü Sayısı: 4,6 adet/cm.



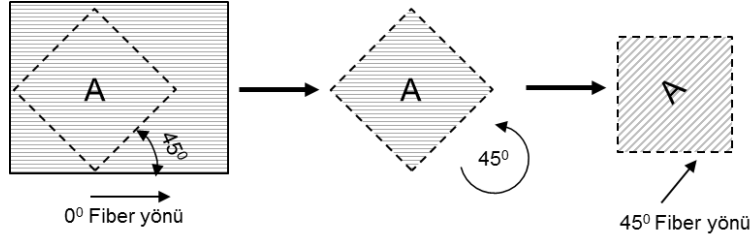
Şekil 13: Kullanılan Reçine Emdirilmiş Örgü Tabaka

Ağırlık düşürme darbe testi ve darbe sonrası basma mukavemeti testine ait numuneler ASTM 7136 ve ASTM 7137 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda üretilen 500x500 mm'lik kompozit plakalardan test numuneleri kesilmiştir. Numunelerin üretimi esnasında şu esaslar göz önünde bulundurulmuştur;

- Tabaka dizilimi yapılırken, 0^0 fiber yönlenmesi numunenin uzun kenarı boyunca yerleştirilmiştir.
- Tabakalar yerleştirilirken fiberlerin açısal hizalaması hassasiyetle yapılmıştır ($\pm 1^0$).
- Kompozit plakalar tüm yüzey boyunca düzgün kesite sahiptir.
- Herhangi bir yöndeki uçlara doğru incelme 0,08 mm'den büyük olmamasına dikkat edilmiştir.

4.1.2. Üretim Aşamaları

Tasarımdaki $0^0/90^0$ ve $\pm 45^0$ açılı tabakaların toplam sayısı hesaplanmış ve buna uygun olarak kesme planı çıkarılmıştır. Rulo halinde bulunan reçine emdirilmiş karbon fiber tabakaların 0^0 fiber dizilim yönü uzun kenarı doğrultusunda olduğundan, $\pm 45^0$ fiber yönelimine sahip tabakaların kesimi Şekil 14'de gösterildiği gibi yapılmıştır.



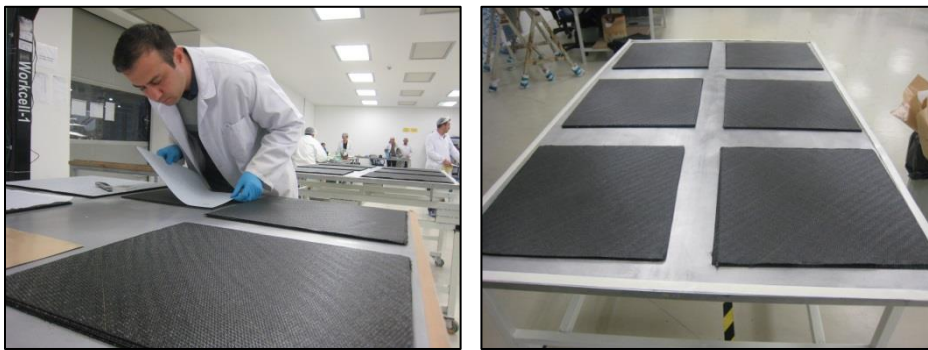
Şekil 14: $\pm 45^\circ$ Fiber Yönelimine Sahip Tabakaların Kesimi

Ply Cutter (DCS 2600–8.3 FT Pivex-Gerber Technology) cihazı ile kesme planında belirlenen açılara göre, 500x500 mm'lik boyutlarda dikdörtgen parçalar kesilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15: Karbon Fiber Örgü Tabakaların Kesilmesi

Kesilen reçine emdirilmiş karbon fiber tabakaların üst ve alt yüzeylerindeki koruyucu kâğıtlarının çıkarılarak elle serme yöntemi ile belirtilen dizilime göre alüminyum panellerin üzerine üst üste yerleştirilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16: Karbon Fiber Tabakaların Yerleştirilmesi

Tabakalar halinde serimi tamamlanan reçine emdirilmiş karbon fiber tabakalar vakumlama ve torbalama işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada malzemeler panellerin üzerine yerleştirildikten sonra tabakaların yapışmaması için üzerine bir kat ayırıcı film ve onun üzerine de bir kat vakum keçesi yerleştirilmiştir (Şekil 17).

Vakum keçesi ile panel arasına vakumlama esnasındaki hava kaçaklarını önlemek amaçlı çift taraflı sızdırmazlık bandı çekilmiştir.



şekil 17: Vakumlama ve Torbalama İşlemi

Vakum keçesinin üzerine 4 adet vakum portu yerleştirilmiş ve panelin kenarlarına 2 adet ısı sensörü sabitlenmiştir (şekil 18). Vakum portlarından bir tanesi vakum okuyucu, diğeri  ise vakum ayarlayıcısı olarak görev yapmaktadır. En üste vakum torbası yerleştirilerek sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır. Son olarak vakum portları bağlanarak basınç kaçak testi yapılmıştır.



şekil 18: Vakum Portu ve Isı Sensörlerinin Yerleştirilmesi

şekil 19’da görüldüğü üzere vakum torbalama yöntemi ile hazırlanan kompozit plakalar paneller üzerinde otoklavın içine yerleştirildikten sonra, vakum kablolarının ve ısı sensörlerinin bağlantıları yapılmıştır. Paneller ile vakum torbası arasında hava kaçağını önlemek amacıyla vakum kontrolü yapılmıştır. Otoklavda, 180 C’de 7 bar altında 120-180 dk. kr döngüsü ile toplam 307 dk. kr edilmiştir. Sıcaklık, reçinenin sertleşmesini ve camsı geçiş sıcaklığının artmasını sağlamaktadır. Basınç ise iki şekilde uygulanmaktadır. Oluşturulan 7 bar pozitif basınç ile karbon fiber tabakaların birbiri ile daha iyi yapışması ve sertleşmesi sağlanırken, vakum uygulaması yani negatif basınç ile karbon fiber tabakaların arasındaki havanın ve fazla reçinenin dışarı çekilmesiyle gözenek ve boşluk oluşumu en aza indirgenmektedir.

Plakalar alüminyum panellerden ayrılarak numunelerin üretim süreci tamamlanmıştır. Otoklav işlemine ait parametreler aşağıda verilmiştir.

Otoklav Donanımı: ASC Econoclave EC2,5mX7,0m – 10 Bar, 250°C,

Basınç: 7 ($\pm 0,2$) bar

Basınç değişim miktarı: $\leq 0,5$ bar/dk.

Basınç tahliyesi: Tam basınç $\leq 80^\circ\text{C}$ 'ye kadar

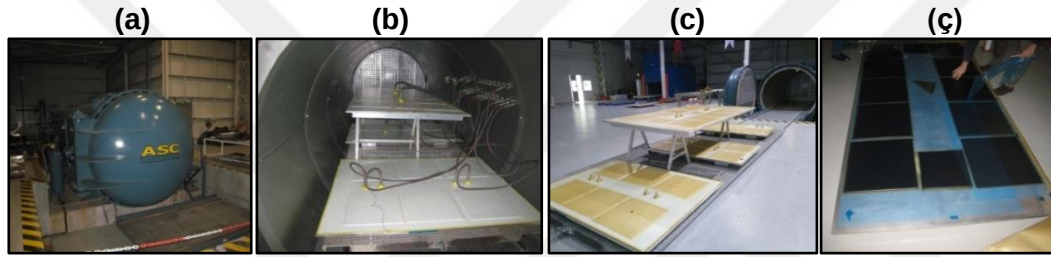
Isıtma hızı: 1 ($+1/-0$) $^\circ\text{C}$

Kür (sertleşme) sıcaklığı: 180 (± 5) $^\circ\text{C}$

Kürleme süresi: 120 ($-0/+40$) dk.

Soğutma hızı: ≤ 3 $^\circ\text{C}/\text{dk}$.

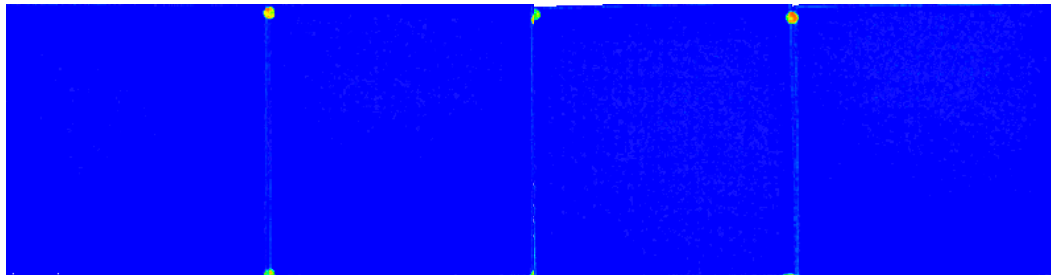
Vakum: 0,8 ($\pm 0,2$) bar, [600 (± 150) mm/hg]



Şekil 19: Otoklav İşlemi, (a) Otoklav Fırını, (b) Panellerin Fırına Yerleştirilmesi, (c) Plakaların Kür Edilmesi, (d) Plakaların Ayrılması

4.1.3. Üretim Sonrası Plakaların Muayenesi

Otoklav işlemi sonrası 500x500 mm ebatlarında üretilen plakalar yüzeysel ve boyutsal hataların kontrolü için gözle muayene edilmiştir. Daha sonra plakaların içyapısında oluşabilecek delaminasyon, gözenek ve yabancı madde kalıntısı gibi kusurların tespiti için örneklem olarak seçilen 4 adet plakanın c-tarama ile ultrasonik muayenesi yapılmıştır. Plakalara ait Matec Analysis programından alınan c-tarama görüntüleri Şekil 20'de verilmiştir. Tarama görüntülerinin üst ve alt kenarlarında bulunan süreksizlikler plakaların sabitlenmesi için kullanılan mıknatıslara aittir.



Şekil 20: Plakaların C-Tarama ile Ultrasonik Muayene Görüntüleri

4.1.4. Numunelerin Kesilmesi

Test numuneleri için üretilen 500x500 mm ebatlarındaki plakalar kesme planına uygun olarak TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'de elmas emdirilmiş daire testere ile kesilmiştir.

Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme ve eğme testi ile darbe dayanımını özelliklerini ortaya koyan ağırlık düşürme darbe testi ve darbe sonrası basma mukavemeti testi numunelerinin tamamı aynı şartlarda üretilen ve aynı özelliklere sahip plakalardan kesilmiştir. Böylece test numunelerinin mümkün olduğunca homojen bir yapıya sahip olmaları sağlanmıştır. Hazırlanan test numunelerinin miktar ve ebatlarına ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Test Numunelerine Ait Bilgiler

S.Nu	Testler	Standart	Ebat (mm)	Numune Miktarı
1	Ağırlık Düşürme ve Darbe Sonrası Basma Mukavemeti	ASTM 7136 ASTM 7137	150x100	150
2	Çekme Testi	ASTM 3039	250x25	10
3	Üç Nokta Eğme Testi	ASTM 790	180x13	10

Kesim esnasında numunede oluşabilecek delaminasyonlar (özellikle malzeme yüzeyinde), çizikler, çentik veya kusurlar test sonuçlarını doğrudan etkileyeceği için uygun kesim yönteminin kullanılması çok önemlidir. Numune kesimi yapılmadan önce kenarlarda oluşabilecek hatalardan kaçınmak için üretilen plakaların kenarlarından 25'şer mm kırılmıştır. Test numunelerinin plakalardan kesme işleminde gereken itina gösterilmiştir. Bu kapsamda;

- Numuneler kesilirken çentik, çizik, kusur, pürüzlü yüzey veya oluşmamasına dikkat edilmiştir.
- Uzun kenar 0° fiber yönlenmesine sahip olacak şekilde numuneler kesilmiş ve fiber yönelimi bilgisi numune üzerinde etiketlenmiştir.
- Ağırlık düşürme darbe testine tabi tutulacak numunelerin ebat toleransının $\pm 0,25$ mm olmasına ve numune kenarlarının diklik ve paralellik toleransının 0,02 mm'den fazla olmamasına özen gösterilmiştir.
- 150x100 mm ebatlarındaki numunelerin uzun kenarların yüzey pürüzlülüğü en az Ra 3,2 μ m, kısa kenarların yüzey pürüzlülüğü ise Ra 0,8 μ m olacak şekilde kenar yüzeyleri taşlanmış ve zımparalanmıştır.

Plakalar yukarıda belirtilen kriterler göz önünde bulundurularak Şekil 21’de görüldüğü gibi Martin T75 cihazı ile elmas emdirilmiş daire testere ile kesilmiştir.



Şekil 21: Numunelerin Kesim İşlemi

Kesimi tamamlanan test numunelerinin istenen ebat toleranslarının sağlanması için Cincinnati marka taşlama tezgâhında düz çanak tip zımpara taşı (AW46) kullanılarak taşlama işlemi yapılmıştır (Şekil 22). Özellikle kısa kenarlarda düşük yüzey pürüzlülüğü elde edebilmek için numunelerin kısa kenarları zımparalama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 22: Numunelerin Taşlanması

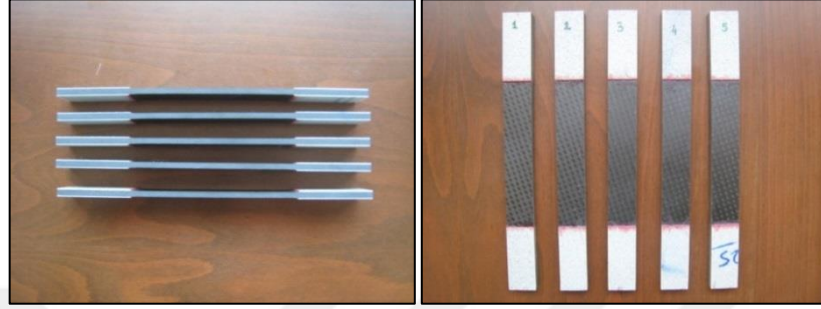
Test numunelerinin kesimi ve taşlanması işlemlerinden sonra kenarların yüzey pürüzlülüğü ve ebat toleransının kontrolü yapılmıştır. Bütün numunelerin darbe noktasına yakın 2 noktadan genişliği ve boyu, 4 noktadan ise kalınlığı ölçülerek ortalama değerleri bulunmuştur ve numuneler etiketlenmiştir.

Ölçümler 0,01 mm hassasiyete sahip dijital kumpas ve 0,001 mm hassasiyete sahip dijital mikrometre ile elde edilmiştir. Ölçüm sonucunda istenilen kriterleri sağlamayan numuneler testlerde kullanılmamıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazıyla; örneklem olarak seçilen numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kısa kenarlar için Ra 0,5-1 μ m arasında, uzun kenarlar için Ra 1-2 μ m arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıkların deneyler için önemli kabul edilebilecek hataya yol açmayacağı düşünülmüştür.

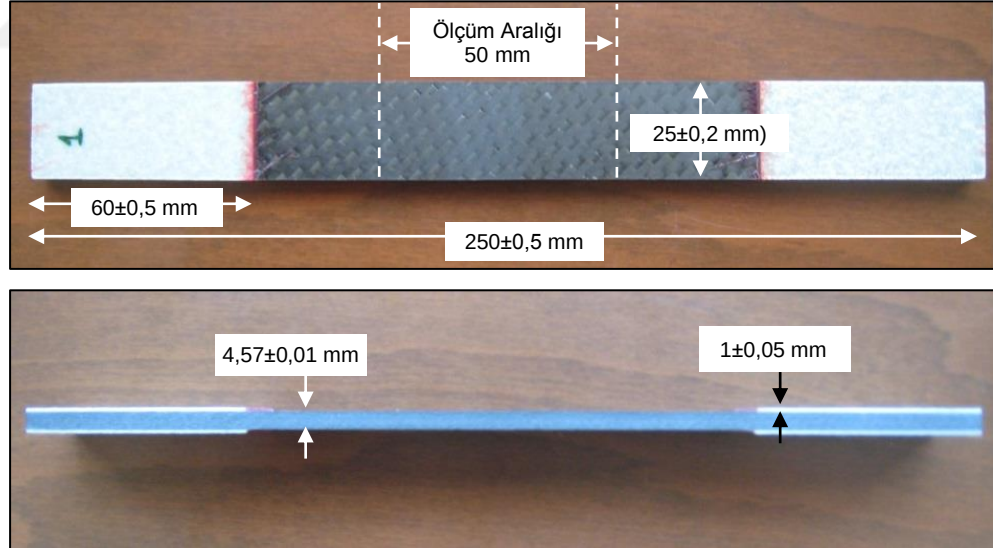
4.2. Çekme Testi

Çekme testi numuneleri ASTM 3039⁸³ standardına uygun olarak $250\pm0,5 \times 25\pm0,2$ mm ebatlarında kesilmiştir (Şekil 23). Test numunelerinin 3 noktadan kalınlığı ölçülmüş ve ortalama kalınlığı $4,57\pm0,01$ mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 23: Çekme Testi Numuneleri

Çekme testi numunelerinin her iki kenarı $60\pm0,5$ mm uzunluğunda, $1\pm0,05$ mm kalınlığında $[+45/-45]_s$ dizilime sahip 4 kat E-cam elyaf takviyeli epoksi malzeme ile kaplanmıştır. Çekme testi numunelerinin ölçüleri Şekil 24’de verilmiştir.



Şekil 24: Çekme Testi Numunesi Ebatları

250 kN kapasiteli Instron 5985 model universal test cihazı kullanılarak ASTM 3039 standartlarına uygun olarak hazırlanan 5 adet numuneye çekme testleri yapılmıştır. Çekme dayanımı Eş. 4.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

⁸³ “ASTM D3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” (West Conshohocken: ASTM International, 2000).

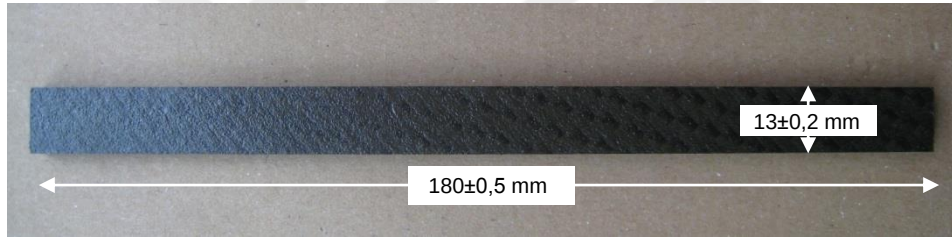
$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{eb}}{wxd} \quad (4.1)$$

- σ_{ζ} : En yüksek çekme dayanımını (MPa),
 P_{eb} : En büyük yük (N),
 d : Numunenin kalınlığını (mm),
 w : Numunenin genişliğini (mm) ifade etmektedir.

4.3. Üç Nokta Eğme Testi

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM 790⁸⁴ standardına göre üç nokta eğme testi yapılmıştır.

Eğme testi numuneleri, mesnetler arası mesafe / kalınlık oranı 1/32 olacak şekilde $180 \pm 0,5 \times 13 \pm 0,2$ mm ebatlarında hazırlanmıştır (Şekil 25). Test numunelerinde 0^0 fiber açısı uzun kenar yönündedir.



Şekil 25: Eğme Testi Numune Ebatları

Her bir numunenin ortalama kalınlığı, numunenin orta noktasına yakın 3 yerden yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekil 26'da görülen 5 adet eğme testi numunesinin ortalama kalınlık değeri $4,58 \pm 0,1$ mm olarak hesaplanmıştır.

⁸⁴ "ASTM D790/D790M: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials" (West Conshohocken: ASTM International, 2010).



Şekil 26: Eğme Testi Numuneleri

Üç nokta eğme testleri ASTM 790 standartlarına göre 10 kN kapasiteli Instron 5966 model test cihazıyla icra edilmiştir. Mesnetler arası mesafe 146 mm, destek ve yükleme burnu yarıçapı 5 mm olup, yükleme hızı 7,7 mm/dk'dır.

Eğme testinde, test numunesine kuvvet uygulanmaya başladığında numunenin üst yüzeyinde basma gerilmesi, alt kısmında ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Test cihazı tarafından numuneye uygulanan kuvvet yavaşça artırılırken, malzemede oluşan çökme miktarı kaydedilmektedir. Numuneye kırılıncaya kadar cihaz tarafından kuvvet uygulanmaktadır. Test cihazında ölçülen değerler yazılım programı yardımıyla grafik ve veri olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Her bir numune için eğilme gerilmesi Eş. 4.2 ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2wd^2} \quad (4.2)$$

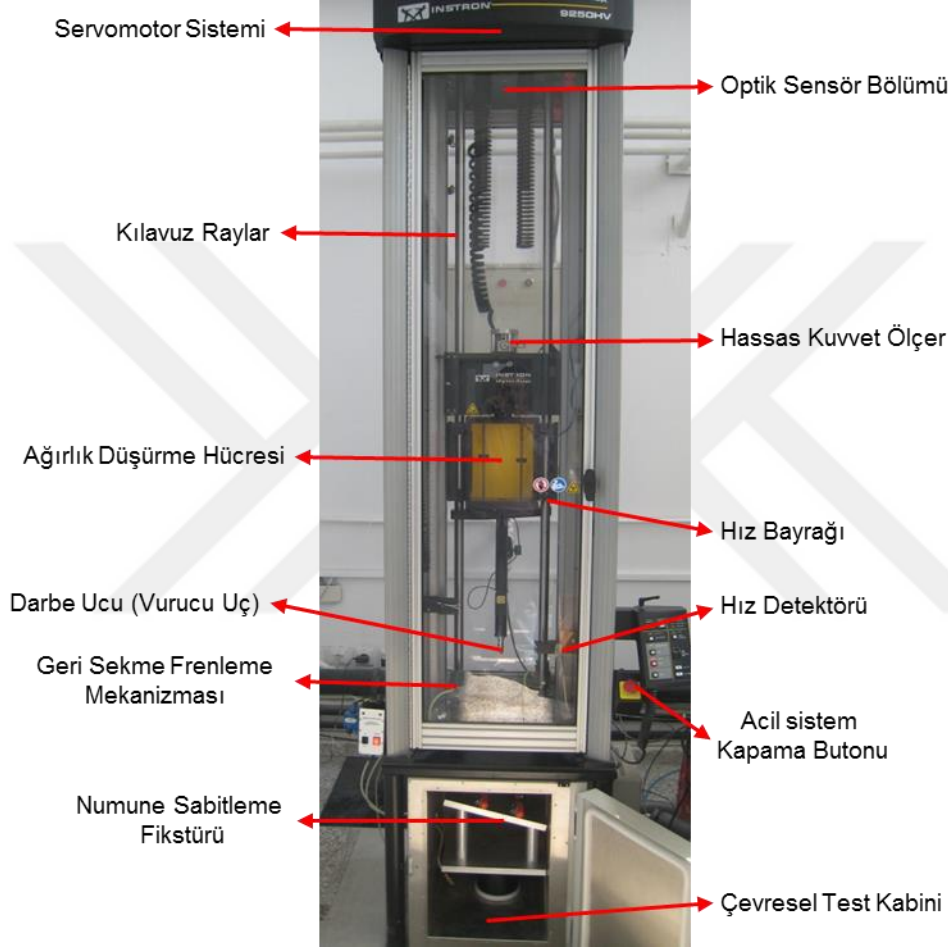
- σ_e : Eğilme gerilmesini (MPa),
P : Belli noktadaki kuvveti (N),
L : Mesnetler arası mesafeyi (mm),
w : Numunenin genişliğini (mm),
d : Numunenin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

4.4. Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Düşük hızlı darbe testleri Ankara ODTÜ Merkez Laboratuvarında Instron Dynatup 9250 marka ağırlık düşürme darbe test cihazı yardımıyla yapılmıştır. Numuneler, 16 mm çapında özel olarak üretilen yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçları tercih edilerek ve farklı darbe enerjilerinde, 0°, 5°, 10° ve 15° çarpma açılarında darbe testlerine tabi tutulmuşlardır.

4.4.1. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Cihazının Özellikleri

Dynatup 9250 test düzeneği, yüksek performansa sahip platform, sensör düzeneği, hız detektörü, dijital sinyal sistemi, hassas kuvvetölçer, darbe kontrol ve veri toplama yazılımı ile donatılmıştır. Dynatup 9250 ağırlık düşürme test cihazı ile çeşitli çap ve şekillerde darbe uçları kullanılarak, 2,6 J - 1603 J arasında darbe enerjisiyle, en fazla 20 m/s hıza varan ağırlık düşürme darbe testleri gerçekleştirilebilmektedir. Test cihazının yapısal elemanları Şekil 27’de verilmiştir:



Şekil 27: Ağırlık Düşürme Test Cihazı Bölümleri

4.4.2. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Cihazının Çalışma Prensibi

Ağırlık düşürme darbe testi, sensörlerle donatılmış bir kütlenin belirli yükseklikten serbest bırakılarak numuneye çarpması sonucunda numunenin mekanik davranışı ile ilgili verilerin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır.

Öncelikle test edilecek plakalar el klempleri yardımıyla sabitlenerek destek fikstürüne yerleştirilir. Vurucu kütle istenen darbe enerjisine göre cihaz tarafından belirlenen yüksekliğe konumlanır. Cihazın ayarları yapıldıktan ve veri toplama programı çalıştırıldıktan sonra kütle serbest düşmeye bırakılır ve plakaya çarpar.

Numuneye çarpmadan hemen önce vurucu kütlenin hızı (V_i) sensör tarafından ölçülmektedir. Test cihazı numunede geri sekmeye bağlı çoklu darbeleri önlemek için havalı fren sistemi ile donatılmıştır.

Vurucu kütlenin darbe enerjisi numuneye aktarıldığında numunede deformasyon oluşmaktadır. Vurucu kütlenin ucundaki kuvvet sensörü tarafından vurucu kütle numuneye çarptığı andan itibaren temas kuvveti $F(t)$ sürekli ölçülmektedir. Temas kuvveti zamanla artmakta, en yüksek seviyeye ulaştıktan sonra sıfıra düşmektedir. Bu arada geçen süre temas süresidir.

Darbe kuvveti algılayıcısı, hız detektörü ve darbe sinyali konumlandırma ünitesinden oluşan Impulse veri toplama sistemi; kullanıcıya kuvvet-yer değiştirme, kuvvet-zaman, hız-zaman, enerji-zaman gibi grafikleri vermektedir. Bu grafikler yardımıyla numunenin darbe direnci değerlendirilir. Darbe sonrası yapılan testler ile plakanın artakalan basma dayanımı tespit edilebilir ya da numunede oluşan hasar türleri tespit edilebilir.

Impulse yazılım programı tarafından aşağıda verilen hız, yer değiştirme, ivme ve enerji denklemleri esas alınarak grafikler elde edilmektedir.⁸⁵

İvme, $a(t)$, elde edilen $F(t)$ değerinin vurucu kafasının toplam ağırlığına, m , bölünmesiyle elde edilir (Eş.4.3);

$$a(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (4.3)$$

Hız değerleri, $V(t)$, Eş. 4.4'de görüldüğü gibi ivmenin, $a(t)$, integralinin alınmasıyla hesaplanır. Bu eşitlikteki ilk hız, V_i değeri hız detektörü tarafından tespit edilmektedir.

$$V(t) = V_i + \int_0^t a(t) dt \quad (4.4)$$

Yer değiştirme değeri, $\partial(t)$, hızın, $V(t)$ integralinin alınmasıyla bulunur (Eş.4.5).

$$\partial(t) = \int_0^t V(t) dt \quad (4.5)$$

Kuvvet ve yer değiştirme arasındaki bağlantı $F(\partial)$ işleviyle bulunur. Absorbe edilen enerji, E_a , Eş. 4.6'da verilen formül ile hesaplanır. Aynı zamanda kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan numunenin tarafından absorbe (yutulan) edilen enerji, E_a , değerini vermektedir.

⁸⁵ Bülent Mutlu İçten, "Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Low Velocity impact" (Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2006), s. 30.

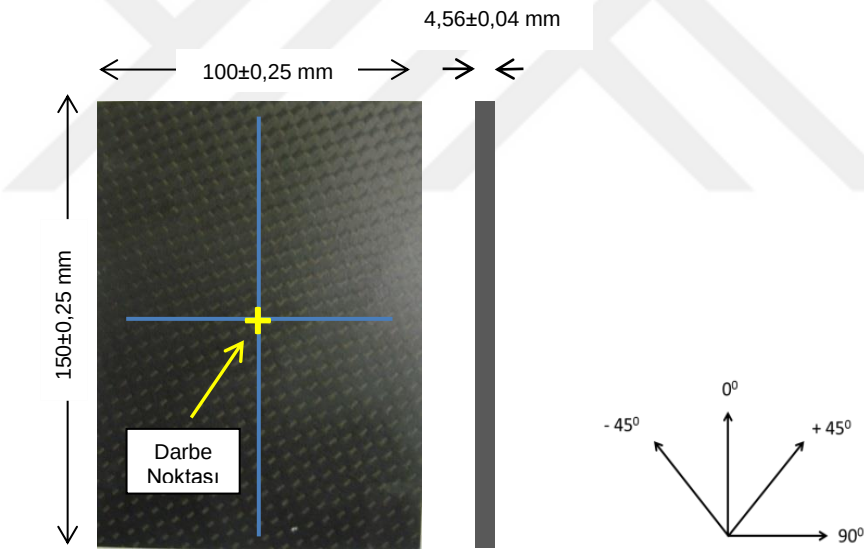
$$E_a = \int_0^{\partial t} F(\partial) d\partial \quad (4.6)$$

Vurucu kütlenin darbe enerjisi (E_d), Eş. 4.7 ile ifade edilmektedir. Elastik enerji ($E_{elastik}$) numune tarafından açığa çıkan enerji olup geri sekme anındaki ivmeye, kuvvet ve yer değiştirmeye göre hesaplanmaktadır. Absorbe edilen enerji (E_a) ise darbe enerjisi (E_d) ile elastik enerji ($E_{elastik}$) arasındaki fark olup, numunede matris çatlaması ve fiber kopması gibi hasarları oluşturan enerjidir. Ayrıca, titreşim ve ısı şeklinde numune tarafından ve vurucu kütlenin ve bağlantılarının elastik olmayan davranışıyla darbe test düzeneği tarafından absorbe edilen enerjidir.⁸⁶

$$E_d = \frac{1}{2} M V_i^2 = E_{elastik} + E_a \quad (4.7)$$

4.4.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Numunelerinin Hazırlanması

ASTM 7136 standardına göre hazırlanan ağırlık düşürme darbe testi numunelerinin boyutları Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28: Ağırlık Düşürme Darbe Testi Numune Ebatları

Test numuneleri Şekil 29’da görüldüğü gibi 150x100 (±0,25) mm boyutlarında kesilmiştir. Her bir test numunesinin darbe noktasına yakın 4 noktadan kalınlıkları ölçülerek ortalama kalınlıkları bulunmuştur. Ağırlık düşürme darbe testine maruz kalan numunelerin ortalama kalınlığı 4,56±0,04 mm olarak hesaplanmıştır.

⁸⁶ Daniel Delfosse, Anoush Poursartip, “Energy-Based Approach to Impact Damage in CFRP Laminates”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 28, s. 7 (1997): s. 648.



Şekil 29: Ağırılık Düşürme Darbe Testi Numuneleri

4.4.4. Darbe Testi İçin Kullanılan Parametreler

Ağırılık düşürme darbe testleri numuneleri iki gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki numuneler 10 J-95 J arasında artan darbe enerjilerinde delinme oluşuncaya kadar farklı darbe uçları ve çarpma açılarında ağırılık düşürme darbe testine tabi tutulmuşlardır. İkinci grup numuneler ise darbe sonrası basma mukavemeti (DSBM) testi için 30,5 J darbe enerjisinde farklı darbe uçları ve çarpma açılarında ağırılık düşürme darbe testine tabi tutulmuşlardır. Ağırılık düşürme darbe testlerine ilişkin bilgiler Tablo 2’de verilmiştir. Toplam 130 numuneye ağırılık düşürme darbe testi yapılmıştır.

Tablo 2: Ağırılık Düşürme Darbe Testleri Durumu

Darbe ucu şekli	Darbe enerjisi	Çarpma açısı	Numune miktarı	Toplam numune	DSBM testi numuneleri darbe enerjisi	Numune miktarı	Toplam numune miktarı
Yarıküresel (YK)	10-85 J	0°	12	48	30,5 J	5	20
		5°	12			5	
		10°	12			5	
		15°	12			5	
Ojival (OJ)	10-95 J	0°	12	50	30,5 J	3	12
		5°	12			3	
		10°	13			3	
		15°	13			3	

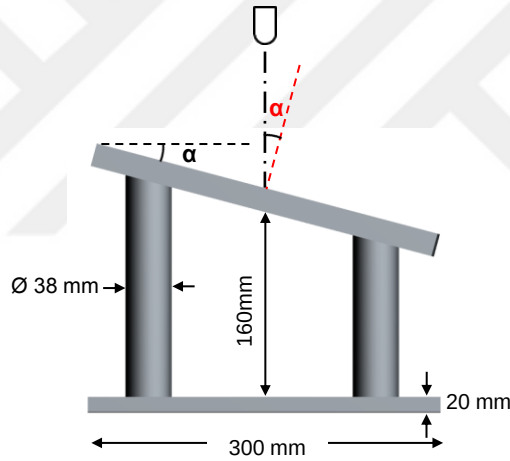
Kuvvet, yer değiştirme ve enerji verilerinin yanında en yüksek temas kuvveti, temas süresi ve absorbe edilen enerji darbe yüklemesine maruz kalan tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışını ortaya koyan önemli özelliklerdir. Ağırılık düşürme test cihazından alınan grafik ve veriler doğrultusunda her bir numunenin en yüksek kuvvet değeri, absorbe edilen enerji değeri, Hertz eşik kuvveti ve kritik eşik enerji değerleri elde edilmiştir.

Tabakalı kompozit plakaların darbe davranışı aşağıda parametreler doğrultusunda incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

- Darbe enerjisinin etkisi
- Çarpma açısının etkisi
- Darbe ucu geometrisinin etkisi

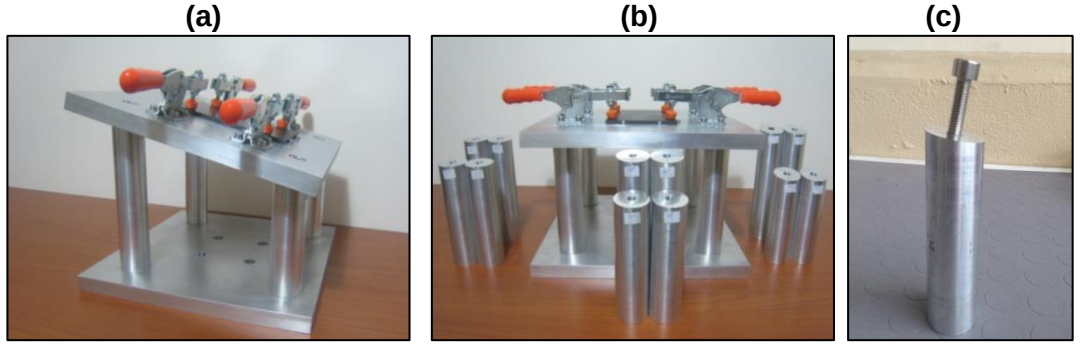
4.4.5. Farklı Çarpma Açıları İçin Destek Aparatı Üretimi

Ağırlık düşürme darbe test cihazının orijinal aparatı ile numune düzlemine dik darbeler yapılabilir. Yani numunenin normali ile çarpma eksenindeki açı 0° 'dir. Farklı çarpma açılarındaki darbe ve hasar davranışını gözlemleyebilmek amacıyla ASTM 7136 standartlarına uygun olarak yeni bir destek aparatı tasarlanmıştır. Bu çalışmada, çarpma açısı (α), darbe ucunun eksenine ile kompozit plakanın normali arasındaki açıyı ifade etmektedir. Bir başka deyişle, destek aparatının zemin eğim açısı, çarpma açısına eşittir (Şekil 30).



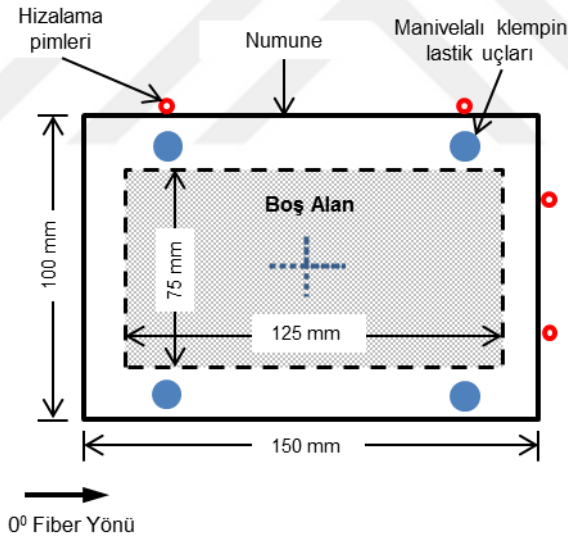
Şekil 30: İmal Edilen Destek Aparatının Ebatları

Şekil 31'de görüldüğü üzere özel olarak tasarlanan destek aparatı sayesinde normal (dik) darbelerin yanı sıra destek ayakları değiştirilerek 5° , 10° ve 15° çarpma açılarındaki eğimli darbeler yapılabilir. Her bir çarpma açısı için numunenin yerden yüksekliği sabit olacak şekilde (160 mm) destek ayaklarının uzunlukları ayarlanmıştır. Ayrıca destek ayakları ile üst parçanın birbirine düzgün olarak sabitlenebilmesi için destek ayakların üst yüzeyine açılı olarak diş açılmıştır (Şekil 31.c). Destek aparatı Al-6061-T6 alüminyum alaşım malzemeden imal edilmiştir.



Şekil 31: (a) Ağırlık Düşürme Test Cihazı Destek Aparatı, (b) 0°, 5°, 10° ve 15° Çarpma Açıları İçin Ayarlanabilen Destek Ayakları, (c) Destek Ayaklarının Montajı

Darbe esnasında numunelerin kaymaması için numuneler el klempleri yardımıyla dörtkenarından aparata sabitlenmiştir. Numunenin her defasında aynı şekilde yerleştirilmesi için hizalama pimleri kullanılmıştır. Numunenin uzun kenarı eğim düzlemine paralel olacak şekilde görüldüğü gibi cihaza yerleştirilmiştir (Şekil 32).



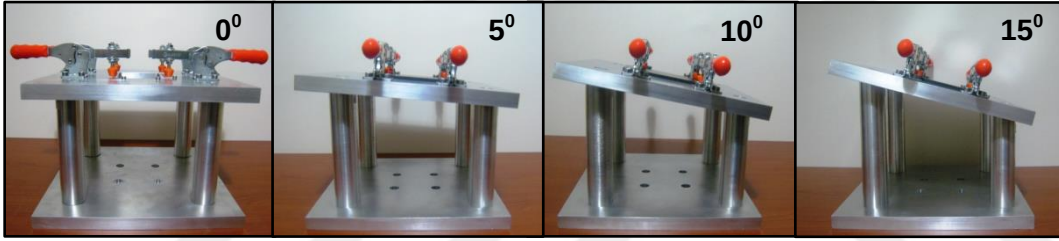
Şekil 32: Destek Aparatına Yerleştirilen Numunenin Üstten Görünüşü

İmal edilen aparat Dynatup 9250 ağırlık düşürme darbe test cihazına Şekil 33'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 33: Destek Aparatının Ağırlık Düşürme Darbe Test Cihazına Yerleştirilmesi

0° , 5° , 10° ve 15° çarpma açılarında darbeye imkân verecek şekilde hazırlanan destek aparatına ait görüntüler Şekil 34’de sunulmuştur.

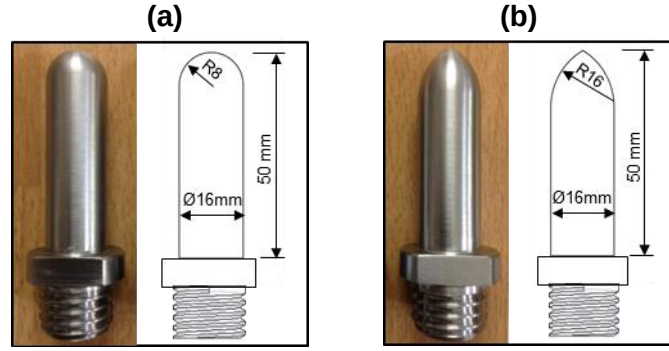


Şekil 34: Farklı Çarpma Açıları İçin Destek Aparatının Görünümü

4.4.6. Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu Üretimi

Ağırlık düşürme testleri 16 mm çapındaki yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçları kullanılarak yapılmıştır. Darbe uçları soğuk iş takım çeliğinden (DIN 1.2550) Şekil 35’de belirtilen ölçülerde 60 HRC sertlikte üretilmiştir. Darbe ucu eğrilik yarıçapının (s) darbe ucunun çapına (d) oranı (s/d) olarak tanımlanan kalibre-yarıçap-uç kısım (CRH) değeri ojival darbe ucu için 1, yarıküresel darbe ucu için 0,5’dir.⁸⁷ CRH değeri arttıkça darbe ucu sivrileşmektedir.

⁸⁷ Zvi Rosenberg, Erez Dekel, *Terminal Ballistics*, 2.bs. (Berlin: Springer, 2012), s.25.



Şekil 35: (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Uçlarının Ebatları

Artan darbe enerji seviyelerinde farklı darbe ucu ile farklı çarpma açılarında darbeye maruz kalan numunelerin etiketlenmesinde kullanılan kısaltmalar Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Numunelerin Etiketlenmesi

Etiket Nu.	10	$0^{\circ} / 5^{\circ} / 10^{\circ} / 15^{\circ}$	YK /OJ	10 J- 95 J
Açıklama	Numune numarası	Çarpma açısı	Darbe Ucu Şekli	Enerji Seviyesi

4.5. Çentik Derinliklerinin Ölçülmesi

Çentik, darbe yükü sonucunda numune yüzeyinde kalıcı plastik şekil değiştirmeyeyle oluşan çökmedir. Çentik derinliği, numunenin yüzeyinin normali doğrultundaki en derin çökme noktasından numunenin yüzey düzlemi arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır.

Hasar yapısı değerlendirilirken öncelikle darbe yükü sonucunda numunelerde oluşan makroskopik boyuttaki hasarlar gözle incelenmiş ve numune yüzeyinde reçinenin kalıcı plastik şekil değiştirmesiyle oluşan çentik derinlikleri 0,001 mm hassasiyetinde Mitutoyo marka komparatör ile ölçülmüştür. Öncelikle numunede oluşan en büyük çentik derinliği ölçülmüştür. Ardından darbe noktasına 25 mm mesafedeki 4 noktadan ölçüm yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. En büyük çentik değerinden yüzeylerin ortalama değerinin çıkarılmasıyla her bir numunenin çentik değeri bulunmuştur.

4.6. Ultrasonik C-Tarama Muayene Yöntemi ile Hasar Alanlarının Ölçülmesi

Darbeye uğramış tabakalı kompozit malzemelerde makroskopik boyutta çentik oluşumu, yüzey çatlağı, delaminasyon ve delinme (nüfuziyet) gibi hasar türleri

meydana gelmektedir. Mikroskobik boyuttaki hasarlar ise fiber kopması, matris çatlaması, fiber-matris ayrılması gibi hasarları kapsamaktadır.⁸⁸

Ultrasonik c-tarama muayene yönteminde; kontrol edilecek malzemenin iç ve dış yapısındaki hasarlı bölgeleri, üretim hatalarını, yapısal kusurları tespit edebilmek için yüksek frekanstaki ultrasonik dalgalar muayene ucundaki sensör tarafından malzemeye gönderilir. Malzemenin yüzeyinden iç kısmına doğru yayılan ses dalgaları, malzemenin olması gereken yapısından farklı bir durumla karşılaştığında tekrar ölçme ucuna yansır ve bu uç tarafından algılanan dalgalar süreksizliğin konumu ve büyüklüğü hakkında bilgileri kullanıcıya sunar. Elde edilen sonuçlar görüntü işleme ve analiz programları yardımıyla değerlendirilir.

Bu kapsamda, Matec marka ultrasonik c-tarama sistemi kullanılarak malzemenin içyapısında delaminasyona ve fiber kopmalarına bağlı olarak oluşan hasar alanı görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 36).

Eğer birden çok delaminasyon mevcutsa, c-tarama sadece üst yüzeye en yakın olan delaminasyonun alanını belirlemektedir. Böylece üst yüzeyden itibaren karşılaşılan ilk delaminasyonun altındaki delaminasyonların boyutu hakkında herhangi bir bilgi sunmamaktadır. Her bir tabakanın ara yüzündeki delaminasyon alanı ve konumunun belirlenmesindeki zorluklardan dolayı bu çalışmada her bir numunedeki hasar alanı, ultrasonik c-tarama cihazıyla tüm ara yüzlerdeki delaminasyon alanının tek bir düzleme yansıtılması yöntemiyle tespit edilmiştir.

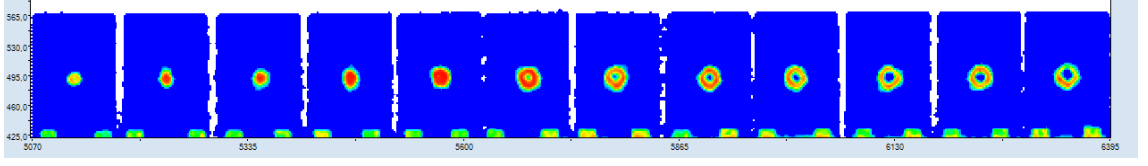


Şekil 36: Ultrasonik C-Tarama Sistemi ile Numunelerin Muayenesi

Matec Analysis programı yardımıyla görüntü işleme teknikleri kullanılarak elde edilen c-tarama görüntülerinin hasar alanları ölçülmüştür (Şekil 37). Farklı darbe ucu ve farklı çarpma açılarında darbeye maruz kalan tabakalı kompozit malzemelerde

⁸⁸ Liu, Dahsin, Basavaraju B. Raju, Xinglai Dang, **age**, s. 839.

oluşan izdüşüm hasar alanları karşılaştırılarak, mekanik özelliklerine ve hasar yapılarına etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 37: Yarıküresel Darbe Ucuyla 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri

4.7. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti (DSBM) Testi

Tahribatsız muayene yöntemleri ile numunelerde oluşan hasar yapılarının değerlendirilmesinin ardından darbe sonrası basma mukavemeti (DSBM) testleri ASTM 7137 standardına göre 250 kN kapasiteye sahip Instron 8502 test cihazı (Şekil 38) ile TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ tesislerinde yapılmıştır.

Farklı darbe ucu ve farklı çarpma açıları için hazırlanan 5'er adet numuneye öncelikle ASTM 7137 standardına uygun olarak Eş. 4.8 sonucu hesaplanan 30,5 J darbe enerjisi seviyesinde ağırlık düşürme darbe testi yapılmıştır.

$$Ed = 6,7 \text{ j/mm} \times 4,56 \text{ mm} = 30,552 \text{ J}$$

(4.8)



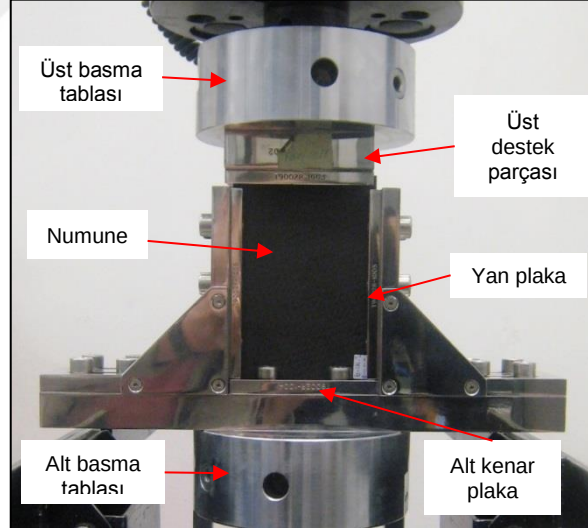
Şekil 38: DSB Dayanımı Test Düzeneği

ASTM 7137 Standardına göre 30,5 J darbe enerjisi ile darbeye maruz kalan numunelere ve farklı enerji seviyelerinde darbe sonrası basma mukavemetinin değişimini gözlemlemek için 20J ve 70J enerji seviyelerinde ağırlık düşürme darbe testi yapılan numunelere darbe sonrası basma mukavemeti testi uygulanmıştır. Toplam 50 numune DSBM testine tabi tutulmuştur (Tablo 4).

Tablo 4: Yapılan DSBM Testlerin Miktarı

Numune Türü (Darbeye Maruz Kalan)	Darbe Enerjisi			Toplam
	20 J	30,5 J	70 J	
Yarıküresel Darbe Ucu	4	20	4	28
Ojival Darbe Ucu	4	12	4	20
Hasarsız Numune	-	-	-	2

Darbeye maruz kalan numune, test düzeneğine Şekil 39'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Test esnasındaki eğilmeyi önlemek için numune yan ve alt plakalar ile desteklenmiş ve cıvataları elle sıkılmıştır. Ardından üst destek parçası numunenin üst kenarına oturtulmuştur. Düzenek test cihazının alt basma levhasına düzgünce yerleştirilerek cihazın dikey ve yatay eksenleriyle hizalanmıştır. Numunenin tam olarak yerleştirildiğinden emin olmak için 450 N'luk ön yükleme yapılmıştır. Ön yükleme kuvveti 150 N'a düşürülerek cıvatalar iyice sıkılmıştır. 0,5 mm/dk hızla numuneye basma kuvveti uygulanmaya başlamıştır. Numunede tamamen hasar oluncaya kadar (uygulanan kuvvette %30'dan fazla azalma olduğunda) veri toplama yazılımı yardımıyla kuvvet, yer değiştirme ve gerilme verileri kaydedilmiştir.



Şekil 39: Numunenin Test Düzeneğine Yerleştirilmesi

Numunenin sahip olduğu darbe sonrası basma mukavemeti (F_{DSBM}) basma testi sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme verileri ve Eş. 4.9 yardımıyla hesaplanmıştır. Her bir çarpma açısında 3 veya 5 defa teste tabi tutulan numunelerin DSBM değerlerinin ortalaması alınarak F_{DSBM} değeri hesaplanmıştır.

$$F_{DSBM} = \frac{P_{eb}}{wxd} \quad (4.9)$$

P_{eb} : Numuneye uygulanan en büyük kuvveti,
 w : Numunenin genişliğini,
 d : Numunenin kalınlığını ifade etmektedir.

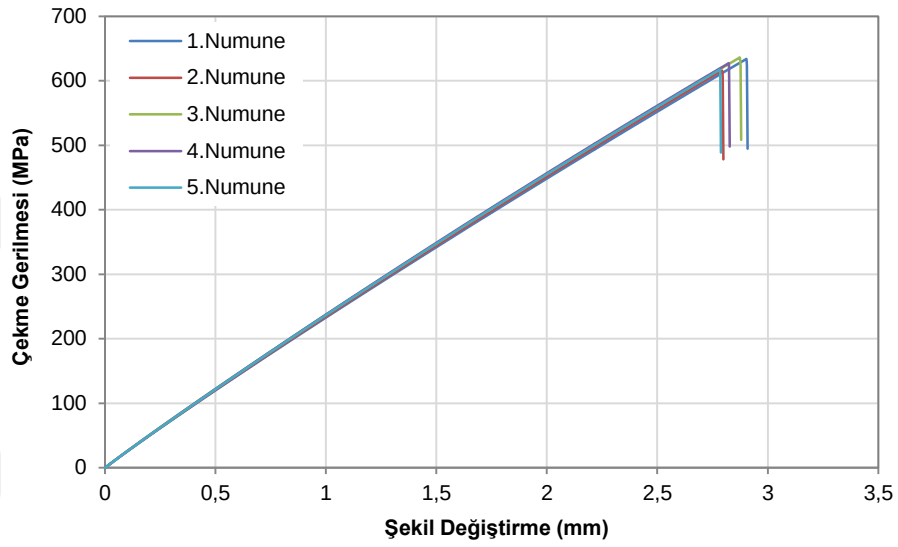




5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Çekme Testi Sonuçları

ASTM 3039 standartlarına göre 5 numune çekme testine tabi tutulmuştur. Testlere ait çekme dayanımı-uzama eğrileri Şekil 40'da verilmiştir.



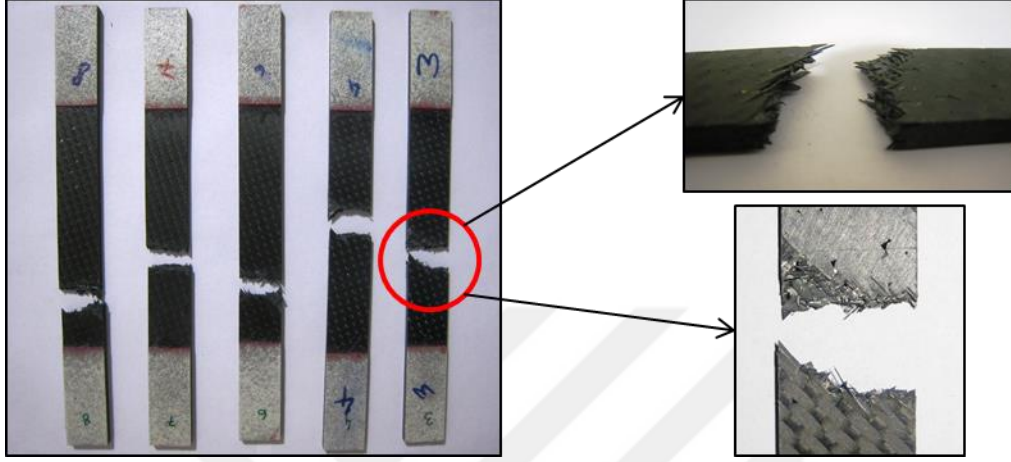
Şekil 40: Çekme Gerilmesi-Şekil Değişirme Grafiği

Yapılan testler sonucunda numunelerin ortalama çekme dayanımı 625,60 MPa olarak hesaplanmıştır (Tablo 5). Elde edilen değer, kullanılan karbon fiber örgü malzemenin üretici firma dokümanında beyan edilen en düşük değeri karşılamaktadır.

Tablo 5: Çekme Testi Sonuçları

Test Numunesi	Ortalama Kalınlık, d (mm)	Ortalama Genişlik, w (mm)	En Büyük Yük, P_{eb} (N)	En Yüksek Çekme Dayanımı σ_c (MPa)	En Büyük Şekil Değişirme (mm)
1	4,58	25,13	72.782	633,34	3,00
2	4,57	25,16	70.796	615,32	2,92
3	4,56	25,12	72.895	635,96	2,97
4	4,57	25,09	71.840	626,95	2,92
5	4,57	25,11	70.735	616,42	2,89
Ortalama	4,57	25,12	71.810	625,60	2,94

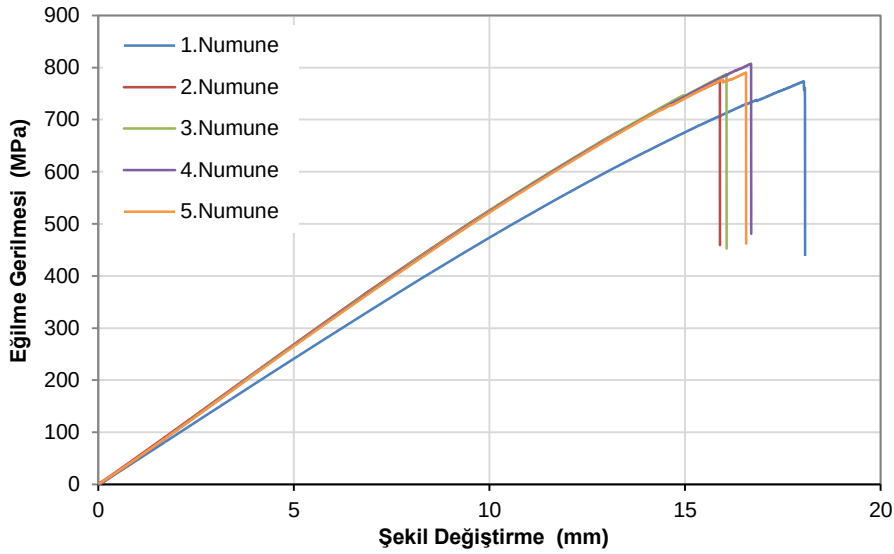
Tüm numunelerde kopma, numunelerin orta bölgesinde ve enlemesine gerçekleşmiştir (Şekil 41). Numunenin çekme dayanımının beklenen seviyede çıkması ve kopmaların kabul edilebilir şekilde gerçekleşmesi nedeniyle malzemede yapısal sorun bulunmadığı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 41: Çekme Testi Sonrası Numunelerin Görünümü

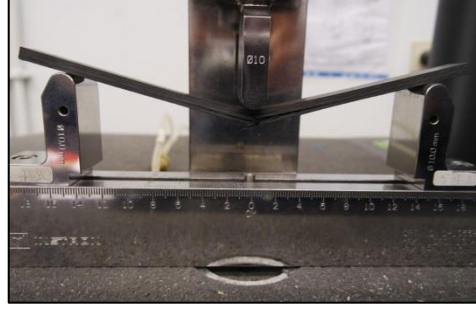
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ASTM 790 standartlarına göre hazırlanan 5 adet numuneye üç noktadan eğme testleri yapılmıştır. Üç nokta eğme testine ait eğilme gerilmesi-şekil değiştirme grafiği Şekil 42'de verilmiştir.



Şekil 42: Eğme Testi Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği

Numunelere uygulanan basma kuvveti en yüksek değere ulaştığında en dıştaki tabakaların kalıcı deformasyonu sonucu numuneler kırılmıştır (Şekil 43).



Şekil 43: Üç Nokta Eğme Testi Sonrası Numunenin Kırılması

Üç nokta eğme testine ait veriler Tablo 6'da verilmiştir. Yapılan testler sonucunda ortalama en yüksek eğilme gerilmesi 786,62 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler aldığı ve çekme testi sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 6: Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Test Numunesi	Ortalama Kalınlık, d (mm)	Ortalama Genişlik, w (mm)	En Büyük Yük, P_{eb} (N)	En Yüksek Eğilme Gerilmesi, σ_e (MPa)	En Büyük Şekil Değiştirme (Uzama), (mm)
1	4,58	13,18	976,8	773,77	18,52
2	4,57	13,03	958,3	774,60	16,50
3	4,58	13,05	983,8	787,05	16,61
4	4,59	13,07	1015,2	807,38	17,25
5	4,59	13,08	994,5	790,31	16,68
Ortalama	4,58	13,08	985,7	786,62	17,11

5.3. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kompozit plakalara farklı çarpma açılarında ve farklı darbe uçları ile numunede delinme gerçekleşinceye kadar, artan enerji seviyelerinde darbe uygulanarak malzemenin darbe davranışına ilişkin veriler elde edilmiştir. Ağırlık düşürme darbe testleri sonucunda Impulse programıyla kuvvet-yer değiştirme-zaman eğrilerinden enerjiye ait veriler hesaplanmıştır.

Ağırlık düşürme testlerinde 10 J ile 95 J darbe enerjisi aralığında yapılan darbeler sonucunda numunelerde oluşan hasar yapıları incelenmiştir. Tablo 7'de darbe testlerine ait enerji seviyeleri verilmiştir. Özellikle penetrasyon eşik

enerjilerinin hassasiyetle tespit edilmesi maksadıyla penetrasyon eşik enerjisine yakın seviyelerde darbe enerjisi aralıkları daha küçük tutulmuştur.

Tablo 7: Ağırlık Düşürme Darbe Testleri Enerji Seviyeleri

Darbe Ucu	Test No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Yarıküresel	0 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	62,5J	63,5J	65J	70J	75J	85J	
	5 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	63,5J	64,5J	65J	70J	75J	85J	
	10 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	65J	66,5J	67,5J	70J	75J	85J	
	15 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	70J	71J	72,5J	75J	80J	85J	
Ojival	0 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	70J	72,5J	73,5J	75J	80J	85J	
	5 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	70J	75J	76,5J	78J	80J	85J	
	10 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	70J	77,5J	78,5J	79J	80J	85J	90J
	15 Derece	10J	20J	30J	40J	50J	60J	70J	80J	81J	82,5J	85J	90J	95J

Ağırlık düşürme darbe test cihazından elde edilen kuvvet eğrileri, hasarın oluşması ve ilerlemesiyle ilgili çok önemli bilgiler sunmaktadır. Kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbeye ait kuvvet eğrileri, Hertz eşik değeri ve en yüksek temas kuvveti olmak üzere iki kritik eşik noktasını ortaya koymaktadır. Kuvvet-zaman veya kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde ilk ani yük düşmesinin olduğu Hertz hasarı eşik değeri olarak tanımlanan seviye, matris çatlaması veya bölgesel ezilme şeklindeki ilk hasarın oluşumuna karşılık gelmektedir.⁸⁹

En yüksek temas kuvveti, kompozit malzemenin taşıyabildiği en büyük temas kuvvetidir.⁹⁰ Darbe enerjisi arttıkça en yüksek temas kuvveti de belli enerji seviyesine kadar artmaktadır. Doğrusal olmayan eğrilerden, durağan veya sabit değerlere geçilen dönüm noktaları kritik noktalardır. Bu noktalardaki darbe enerjisi seviyeleri de kritik enerji seviyesi olarak adlandırılmaktadır.

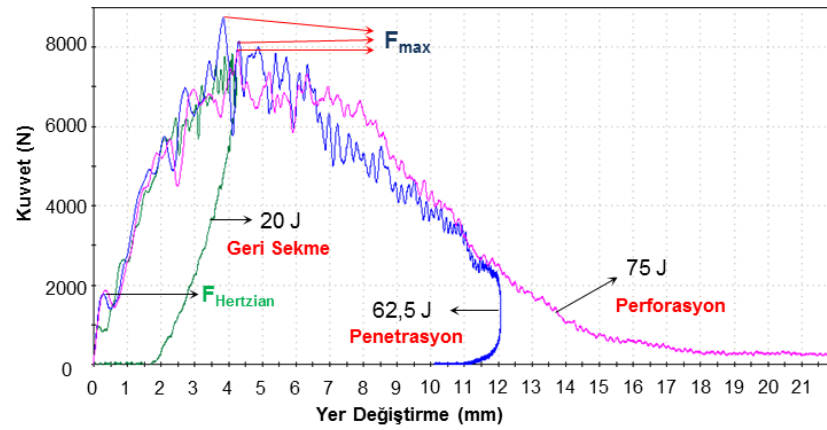
Darbe yüklemesine maruz kalan kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmekte kullanılan önemli parametrelerden birisi de delinmedir. Şekil 44 ve Şekil 45’de yarıküresel darbe ucu ile 0° çarpma açısıyla darbeye maruz kalan numunelere ait geri sekme, penetrasyon ve perforasyon karakterli kuvvet-yer

⁸⁹ Tien Wei Shyr, Yu Hao Pan, **age**, s. 193.

⁹⁰ Giovanni Belingardi, Roberto Vadori, **age**, s. 221.

değiştirme ve kuvvet-zaman-enerji eğrileri verilmiştir. Her üç darbe karakterinde de kuvvet eğrisindeki ilk ani düşme noktası numunede ilk hasarın olduğu Hertz kuvvetine karşılık gelmektedir.

20 J darbe enerjisiyle yapılan geri sekme karakterli kuvvet-yer değiştirme eğrisinde (Şekil 44), en yüksek temas kuvveti değerine ulaşıldıktan sonra yer değiştirmenin artmasıyla temas kuvveti değeri azalmaktadır. Bunun nedeni, numunede delaminasyon ve fiber kopmaları gibi hasarların oluşması ve ilerlemesidir. Temas kuvveti azalmaya devam ederken vurucu ucun geriye hareketi ile eğri tekrar orijine doğru dönerek kapanmaktadır. 62,5 J darbe enerjisi ile yapılan penetrasyon karakterli darbeye, en büyük yer değiştirme değerine ulaşıldıktan sonra darbe ucunun numuneye saplanmasıyla kuvvet sıfırlanmaktadır ve yer değiştirme sabit bir değerde kalmaktadır. Penetrasyon durumunda eğri orijine doğru yönelmeden tam olarak kapanmaktadır. Tam delinmenin gerçekleştiği 75 J darbe enerjisindeki perforasyon karakterli darbeye ise vurucunun hareketi devam ettiği için, yer değiştirme sürekli olarak artmaktadır. Perforasyon durumunda temas kuvveti sıfırlanmamakta ve bir süre sabit değerde kalmaktadır. Bunun nedeni, vurucu ile numune arasında oluşan sürtünme kuvvetidir. Bundan dolayı tam delinme durumunda temas kuvvetinin sıfıra düşme hali gerçekleşmemektedir.⁹¹ (Şekil 44).



Şekil 44: Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Geri Sekme, Penetrasyon ve Perforasyon Karakterli Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

Düşük hızlı darbe enerjilerinde kompozit malzemede oluşan hasar küçük çaplıdır ve kompozit malzeme elastik davranış sergilemektedir. 20 J darbe

⁹¹ Ramazan Karakuzu ve diğ., "Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi" (TÜBİTAK, Proje No : 104M426, İzmir, 2007), s. 25.

enerjisiyle yapılan geri sekme karakterli kuvvet-zaman eğrisi (Şekil 45) incelendiğinde, yükleme ve yük kaldırma eğrilerinin en yüksek temas kuvvetine göre simetrik oldukları görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça delaminasyon gibi hasarlar daha büyük boyutlara ulaşmakta ve kompozit malzemenin dayanımı azalmaktadır. Buna bağlı olarak penetrasyon karakterli 62,5 J darbe enerjisine ait kuvvet eğrisinde, yük kaldırma eğrisi sağa doğru uzamaktadır. 75 J darbe enerjisinde ise kompozit malzemede perforasyon (delinme) oluştuğunun göstergesi olarak temas süresi ilk aşamada aniden düşmektedir. İkinci aşamada ise delinme sonrasında darbe ucu ile numune arasındaki sürtünmeden dolayı temas süresi eğrisi sabit seyretmektedir.

Enerji-zaman eğrilerinde (Şekil 45); numune tarafından absorbe edilen enerji giderek artmakta, en yüksek seviyeye ulaştıktan sonra; geri sekme karakterli darbelerde azalarak bir değerde sabit kalmakta, penetrasyon karakterli darbelerde sabit kalmakta ve perforasyon karakterli darbelerde hafif artmaktadır. Enerji-zaman grafiğinde enerji eğrisinin sabit değere ulaştığı son nokta absorbe edilen enerji miktarını vermektedir.

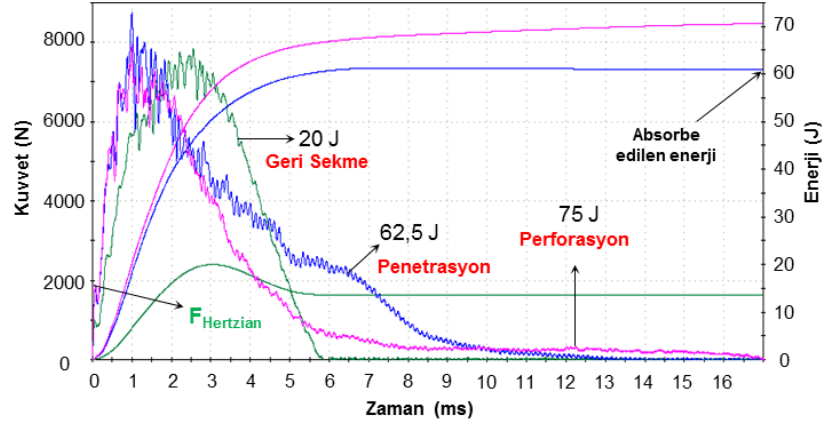
Literatürde yer alan bilgiler ile bu çalışmadaki darbe testi bulgularının örtüşmekte olduğu görülmüştür. Ağırlık düşürme testlerinde darbenin oluşmaya başlamasıyla birlikte kompozit numune, darbe enerjisini absorbe etmeye başlamaktadır. Darbe enerjisi malzemenin dayanabileceği enerji seviyesinin altında olduğunda malzeme tarafından vurucunun sahip olduğu enerjinin tamamı absorbe edilememektedir. Geri sekme durumunda darbe enerjisi absorbe edilen enerjiden büyüktür. Darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki artan enerji ve darbe altında eğilmeye uğrayarak şekil değiştiren kompozit levhanın kazandığı elastik enerji, vurucunun geri sekmesine neden olmaktadır.⁹² Darbe enerjisi arttıkça numunede penetrasyon (nüfuziyet) oluşmaya başlamaktadır. Nüfuziyet durumunda numune vurucunun sahip olduğu tüm enerjiyi yutabilmekte ve vurucu numune içerisine gömülerek hızı sıfırlanmaktadır.⁹³

Perforasyon durumunda ise, absorbe edilen enerjinin artması normal değildir. Daha önce de bahsedildiği gibi darbe ucu ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklanan fazlalığın ihmal edilmesi gerekmektedir.⁹⁴

⁹² Celal Evci, 2010, s. 123.

⁹³ Dahsin Liu, "Characterization of Impact Properties and Damage Process of Glass/Epoxy Composite Laminates", *Journal of Composite Materials*, c. 38, s. 16 (2004): s. 1430.

⁹⁴ Cesim Ataş, Onur Sayman, *age*, s. 338.



Şekil 45: Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Geri Sekme, Penetrasyon ve Perforasyon Karakterli Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

5.3.1. Enerji Artışının Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi

Yarıküresel ve ojival darbe uçları ile farklı çarpma açılarındaki darbelere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri Ek 1’de verilmiştir. Darbe ucunun numune ile temas etmesinin ardından kuvvet eğrisi hızla artarak en yüksek değerine ulaşmakta ve daha sonra düşüşe geçmektedir. Kuvvet en yüksek değerine ulaşınca kadar hasar oluşumu hızla devam etmektedir.

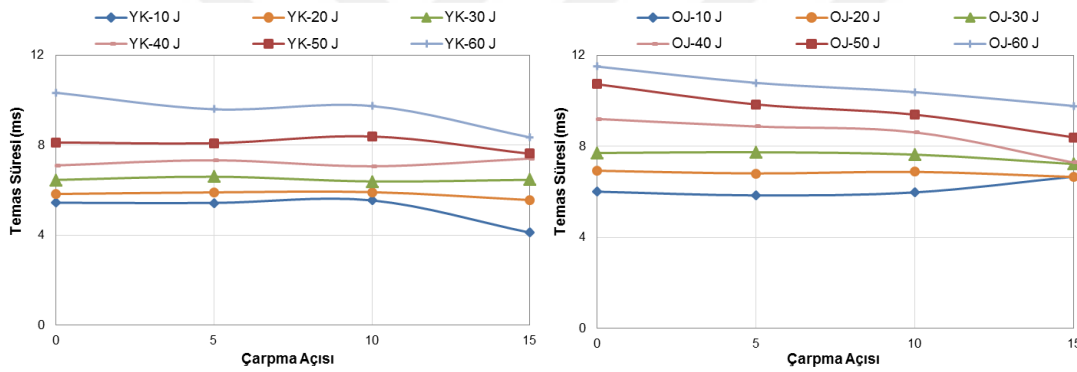
Ağırlık düşürme darbe testlerinden elde edilen grafikler ayrıntılı olarak analiz edilerek numunelerin penetrasyon eşik enerji değerleri tespit edilmiştir. Geri sekme karakterli darbelerde en büyük yer değiştirme noktasında vurucu kütlenin hızı sıfırlanmakta ve vurucu uç geri sekerken numune de aksi yönde hız kazanarak ters yönde yer değiştirme olmaktadır. Penetrasyon durumunda, en büyük yer değiştirme noktasında vurucu uç numuneye nüfuz etmeye başlamakta ve hız sıfırlanmaktadır. Perforasyon karakterli darbelerde ise numunenin kalınlığı boyunca delinme gerçekleşmekte, sürtünmeden dolayı kuvvet sıfırlanmamaktadır.⁹⁵

Darbe enerjisi arttıkça ojival darbe ucuna ait kuvvet eğrisi en yüksek değere ulaştıktan sonra bir süre yatay seyretmektedir. Bunun sebebi, ojival darbe ucunun sivri yapısından dolayı numuneye nüfuz etmesidir. Yarıküresel darbe ucunda ise buna benzer yatay hareket darbe ucunun kaymasına bağlı olarak sadece 15° çarpma açısında yapılan darbelerde görülmektedir. Her iki darbe ucuyla yapılan testlerde darbe enerjisi arttıkça darbe ucunun yer değiştirme miktarı da artmaktadır.

⁹⁵ Celal Evci, 2010, s. 147.

Yarıküresel ve ojival şeklindeki darbe uçlarıyla yapılan testlere ait kuvvet-zaman-enerji grafikleri Ek 2’de verilmiştir. Tüm grafiklerde temas süresinin ve absorbe edilen enerjinin artan darbe enerjisiyle beraber giderek arttığı görülmektedir. Geri sekme karakterli test numunelerinde absorbe edilen enerji, darbe enerjisinden küçük çıkmıştır. Düşük darbe enerjilerinde vurucu kütle numune yüzeyinden geri sekerken, darbe enerjisi arttıkça, darbe ucu numuneye nüfuz etmeye başlamakta ve delinme oluşmaktadır. Yüksek darbe enerjilerinde kompozit tabakaların daha fazla enerji sönümledikleri görülmektedir.

Temas süresinin artan darbe enerjisi ve çarpma açısıyla değişimini gösteren grafikler Şekil 46’da sunulmuştur. Darbe enerjisi arttıkça, darbe ucunun numuneye temas süresinin de arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, numune içerisinde oluşan hasarlardır. Darbe enerjisinin artmasıyla beraber en büyük temas süresi biraz artmaktadır.⁹⁶



Şekil 46: Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Ağırlık Düşürme Testlerine Ait Temas Süresi-Çarpma Açısı Grafikleri

5.3.2. Enerji Profil Diyagramı

Belingardi ve Vadori, düşük hızlı darbe yüklemeleri esnasında absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine oranıyla hesaplanan hasar derecesi yardımıyla numunenin penetrasyon eşik enerjisi seviyesinin tespit edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Hasar derecesinin 1 değerine yaklaştığı enerji seviyelerinde numunenin tam penetrasyona uğradığını saptamışlardır.⁹⁷

Kompozit malzemelerin penetrasyon eşik enerjisi değeri eşit enerji yöntemiyle tespit edilebilmektedir. Eşit enerji yönteminde; darbe enerjisi ile absorbe edilen enerjinin birbirine çok yaklaştığı noktada numunede delinmenin başladığı eşik enerji

⁹⁶ Ines Ivanez ve diğ., *age*, s. 1132.

⁹⁷ Giovanni Belingardi, Roberto Vadori, *age*, s. 225.

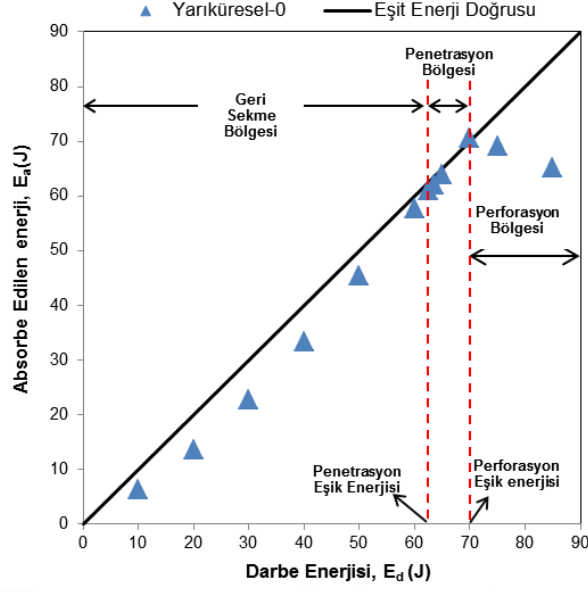
değerleri tespit edilmektedir. Diğer bir ifadeyle penetrasyon, vurucu kütlenin kinetik enerjisinin neredeyse tamamının kompozit malzemeye aktarıldığında oluşmaktadır. Darbe enerjisinin tamamının malzeme tarafından absorbe edildiği en küçük darbe enerjisi değeri penetrasyon eşik enerjisi olarak tanımlanmaktadır.⁹⁸

Penetrasyon eşik enerjisi değeri, düşük hızlı darbeye maruz kalan fiber takviyeli kompozit malzemelerin temel karakteristik özelliklerinden birisidir. Temel hasar modları ile karakteristik darbe özellikleri arasındaki ilişki enerji profili diyagramı kullanılarak ortaya konulmaktadır.⁹⁹

Enerji profil diyagramı kullanılarak geri sekme, penetrasyon ve perforasyon bölgeleri belirlenebilmektedir. Yarıküresel darbe ucu ile 0° çarpma açısında artan darbe enerjilerinde yapılan darbe testlerine ait enerji profil diyagramı Şekil 47’de görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça absorbe edilen enerji miktarı eşit enerji çizgisine yaklaşmaktadır. 62,5 J darbe enerjisi seviyesinde numune tarafından absorbe edilen enerji miktarı ilk defa darbe enerjisi seviyesine ulaşmaktadır. 62,5 J’dan daha düşük darbe enerjileri geri sekme karakterli darbe davranışı olarak tanımlanmaktadır. Absorbe edilen enerji değerinin eşit enerji doğrusuna yakın olduğu 62,5 J ile 70 J darbe enerjileri arasında ise numunede penetrasyon hasarı oluşmaktadır. Penetrasyon bölgesindeki darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki küçük fark test cihazının ve numunenin titreşimiyle oluşan korunamayan enerjiden kaynaklanmaktadır. 70 J’dan daha büyük darbe enerjilerinde ise absorbe edilen darbe enerjisi azalmakta ve sabit değer almaktadır. Perforasyon bölgesinde artan darbe enerjisi sayesinde darbe ucu numuneye tam nüfuz ederek, tam delinme gerçekleşmektedir. (Şekil 47).

⁹⁸ Dahsin Liu, **age**, s. 1429.

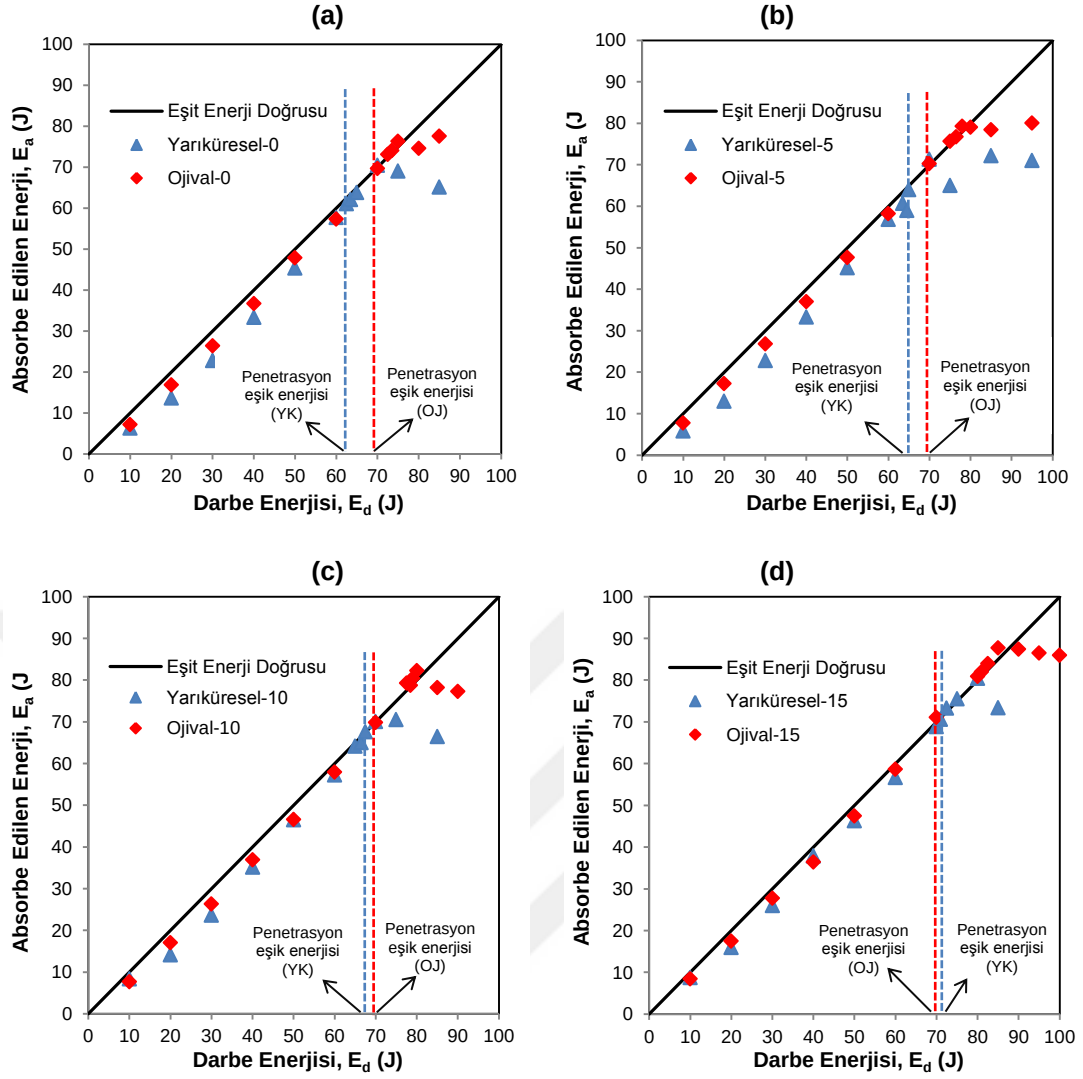
⁹⁹ Dahsin Liu, **age**, s. 1425.



Şekil 47: Yarıküresel Darbe Ucu ve 0° Çarpma Açısındaki Enerji Profil Diyagramı

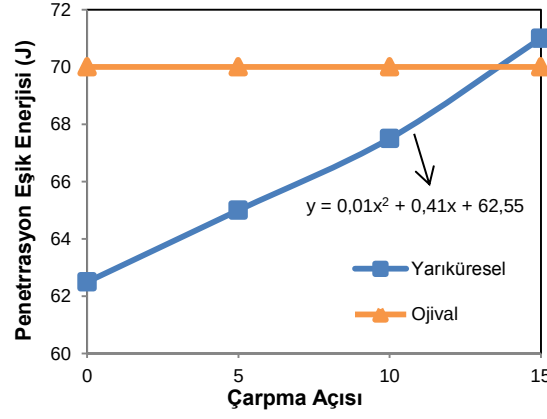
Farklı çarpma açılarındaki yarıküresel ve ojival darbe ucuyla yapılan darbe testlerine ait enerji profil diyagramları Şekil 48'de verilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça numune tarafından absorbe edilen enerjinin de lineer olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca aynı enerji seviyelerinde ojival darbe ucuyla yapılan testlerde numune tarafından daha fazla enerji absorbe edildiği görülmektedir. Penetrasyon ve perforasyon için gerekli olan enerji değerleri darbe ucu geometrisine ve çarpma açısına bağlı değişim göstermektedir.

Ojival uç ile yapılan darbelerde penetrasyon eşik değerinin 0, 5, 10 ve 15 derece çarpma açılarındaki yaklaşık 70 J seviyesinde olduğu, ancak eğim açısı ile beraber penetrasyon enerji aralığının yani perforasyon eşik enerjisini değerinin de arttığı görülmektedir. Yarıküresel darbe ucunda ise penetrasyon ve perforasyon eşik enerjisinin çarpma açısının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir (Şekil 48 ve Tablo 8).



Şekil 48: Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile (a) 0° , (b) 5° , (c) 10° ve (d) 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Enerji Profil Diyagramları

Yarıküresel ve ojival darbe ucuyla 0° , 5° , 10° ve 15° çarpma açılarındaki yapılan ağırlık düşürme darbe testlerinden elde edilen penetrasyon eşik enerji değerlerine ait grafikler Şekil 49’da, sayısal veriler ise Tablo 8’de verilmiştir. 0° çarpma açısında, ojival darbe ucuyla yapılan testlerde, numunede penetrasyon oluşması için gerekli olan enerji değeri yarıküresel uçla elde edilenden daha fazladır. Benzer şekilde enerji profili diyagramları incelendiğinde, ojival darbe ucuyla darbe uygulanan numunelerin penetrasyon eşik enerji değeri daha fazladır. Darbe ucu sivrildikçe numunenin delinmesi için gerekli olan enerji miktarı artmaktadır.



Şekil 49: Penetrasyon Eşik Enerjisi İle Çarpma Açısı Arasındaki İlişki

Yarıküresel darbe ucu ile yapılan testlerde çarpma açısı arttıkça numunenin penetrasyon eşik enerjisi artmaktadır. Bir başka ifadeyle çarpma açısı arttıkça numunede penetrasyon oluşması için daha fazla enerjiye ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu artışın, eğimli darbelerde darbe ucunun kayma hareketinden ve numuneye etki eden dikey kuvvetin azalmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ojival darbe ucuyla yapılan testler esnasında penetrasyon eşik enerjisinin tespit edilmesi için 70 J'un üzerindeki darbe enerjisi seviyelerine yoğunlaşıldığı ve 60-70 J arasında darbe testleri yapılmadığı için her bir çarpma açısı için en düşük olan penetrasyon eşik enerjisi değeri (70 J) dikkate alınmıştır. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde ise numunenin penetrasyon eşik enerjisinin, çarpma açısının artmasıyla sivri uç yapısından dolayı kaymanın az olmasına bağlı olarak birbirine yakın değerler aldığı değerlendirilmektedir.

Eğimli darbelerde numunenin dikey doğrultudaki kalınlığının artmasına bağlı olarak her iki darbe ucuyla yapılan testlerde çarpma açısı arttıkça numunelerin perforasyon enerji değerleri artmaktadır. Elde edilen bulgularla uyumlu olarak, Cantwell ve Morton perforasyon eşik enerjisi değerinin karbon fiber takviyeli kompozitlerde kalınlıkla beraber hızla arttığını ortaya koymuşlardır.¹⁰⁰

¹⁰⁰ Wesley J. Cantwell, John Morton, 1989, s. 50.

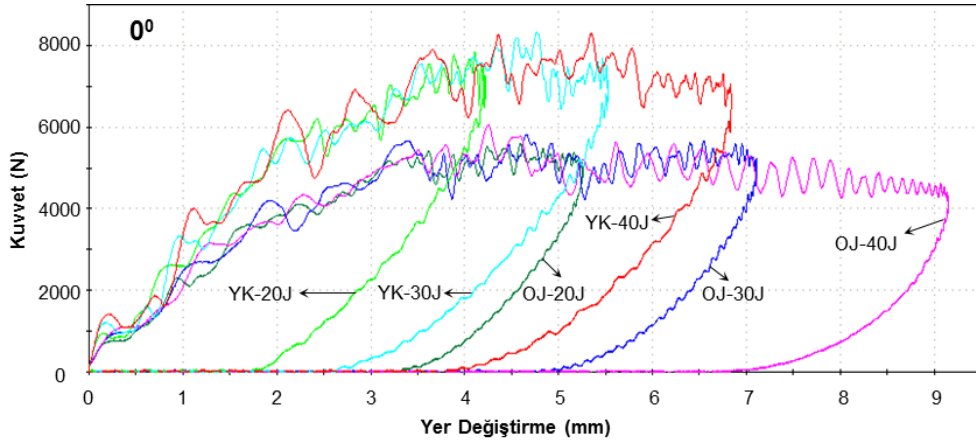
Tablo 8: Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait 0°, 5°, 10° ve 15° Çarpma Açılarında Penetrasyon Enerji Seviyeleri

Çarpma Açısı	Yarıküresel			Ojival		
	En düşük penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen_{ed}}$ (J)	En yüksek penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen_{ey}}$ (J)	Penetrasyon enerji aralığı (J)	En düşük penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen_{ed}}$ (J)	En yüksek penetrasyon eşik enerjisi $E_{pen_{ey}}$ (J)	Penetrasyon enerji aralığı (J)
0	62,5	70	7,5	70	75	5
5	65	71,5	6,5	70	78	8
10	67,5	73	5,5	70	80	10
15	71	80	9	70	85	15

5.3.3. Darbe Ucu Şeklinin Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi

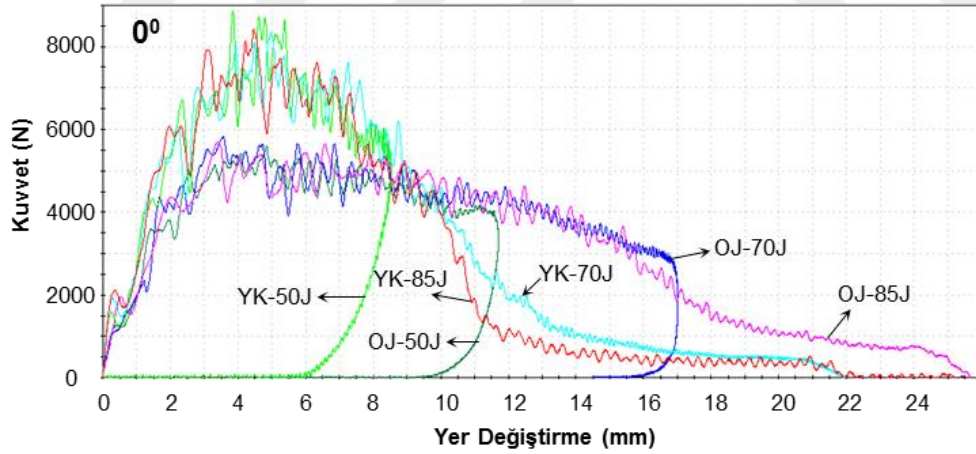
Darbe ucu şeklinin malzemenin darbe davranışına olan etkisini görebilmek için farklı darbe enerjilerinde yapılan testlere ait eğriler birleştirilerek grafik üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Darbe enerji seviyelerinin tamamının aynı grafikte göstermenin yorumlama açısından zorluk yaratabileceği düşünülerek örneklem olarak seçilen darbe enerjisi seviyelerine ait eğriler kullanılarak bulgular değerlendirilmiştir. Yarıküresel ve ojival darbe ucu ile yapılan darbelerde numunenin sergilediği darbe davranışının çarpma açısına göre değişkenlik gösterdiği göz önünde bulundurularak; darbe ucu geometrisinin numunenin darbe davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymak için 0° çarpma açısında yapılan testlerin sonuçları incelenmiştir.

Yarıküresel ve ojival darbe ucuyla 0° çarpma açısında 20J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde yapılan testlere ait eğriler Şekil 50 ve Şekil 51’de sunulmuştur. Grafiklerde de görüldüğü gibi numunenin darbe davranışı darbe ucu şekli ile değişmektedir. Yapılan testlerde ojival darbe ucunun sivri uç yapısından dolayı numuneye daha fazla nüfuz ettiği, dolayısıyla yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazla yer değiştirme değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 50).



Şekil 50: 20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

Şekil 51’de verilen delinmenin gerçekleştiği yüksek darbe enerjilerindeki eğriler incelendiğinde; yarıküresel darbe ucuna ait kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin en yüksek temas kuvvetinden sonra ani düşüş sergilerken, ojival darbe ucuna ait eğrilerinin en yüksek yükten sonra yatay eksene neredeyse paralel şekilde ilerlediği görülmektedir. Yük değerinin çökme ile fazla değişmemesi, darbe ucunun numuneyi delip geçmek isterken açılı olan yüzeylerin numuneye dayandığını ve numunenin direndiğini göstermektedir.¹⁰¹



Şekil 51: 50 J, 70 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

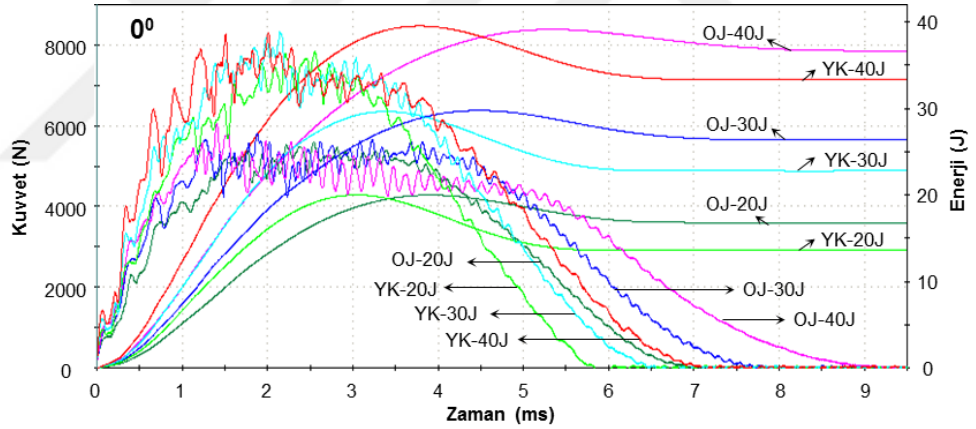
Ojival darbe ucu ile yapılan darbelerin yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazla temas süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 46 ve Şekil 52).

Mitrevski ve diğ.’nin yaptığı çalışmayla uyumlu olarak, yarıküresel darbe ucu, ojival darbe ucuna kıyasla daha fazla temas kuvvetine neden olmaktadır. Ojival

¹⁰¹ İçten, Bülent Murat, Gören Kırıl, *age*, s. 46.

darbe ucunun daha düşük temas kuvveti üretmesi ojival darbe ucunun neden olduğu penetrasyona bağlıdır, bu penetrasyon darbe ucu ile numune arasında sürtünmeye yol açarak temas süresini arttırmaktadır.¹⁰²

20 J, 30 J ve 40 J darbe enerjilerinde 0° çarpma açısıyla ojival darbe ucu ile yapılan testlerde numune tarafından absorbe edilen enerji yarıkürele kıyasla daha yüksektir (Şekil 52). Elde edilen sonuç ile uyumlu olarak, Mitrevski ve diğ., ojival şekilindeki darbe ucu ile darbeye maruz kalan numuneler tarafından yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazla enerji absorbe edildiğini ortaya koymuşlardır. Absorbe edilen enerji değerleri arasındaki farkın darbe ucu şekline göre değişen iç hasar mekanizmalarına ve sürtünme etkisine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Darbe ucu ile numune arasında daha fazla sürtünme ve penetrasyon olduğu için ojival darbe ucu tarafından daha fazla enerji absorbe edildiği sonucuna varmışlardır.¹⁰³ Düşük darbe enerjilerinde (10-50J) ve 15° çarpma açısında yapılan testlerde ise darbe ucunun numune üzerinde kaymasına bağlı olarak, yarıküresel darbe ucunun daha fazla absorbe edilen enerjiye neden olduğu görülmüştür.

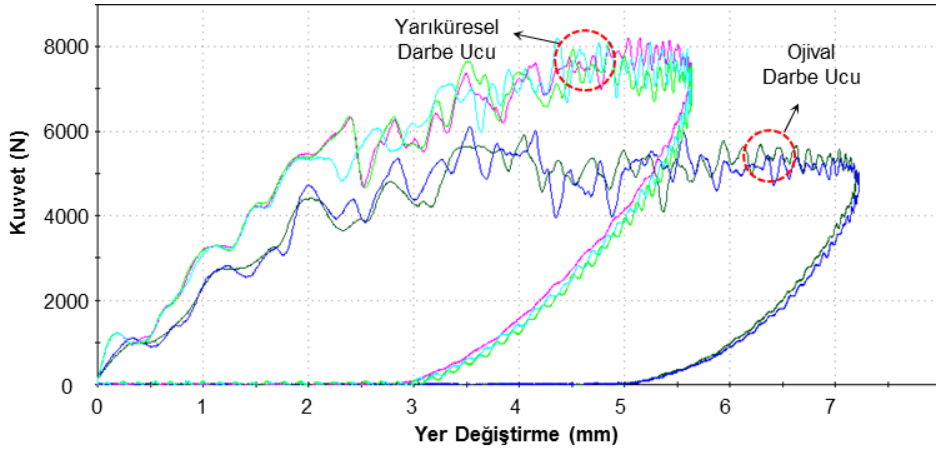


Şekil 52: 20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

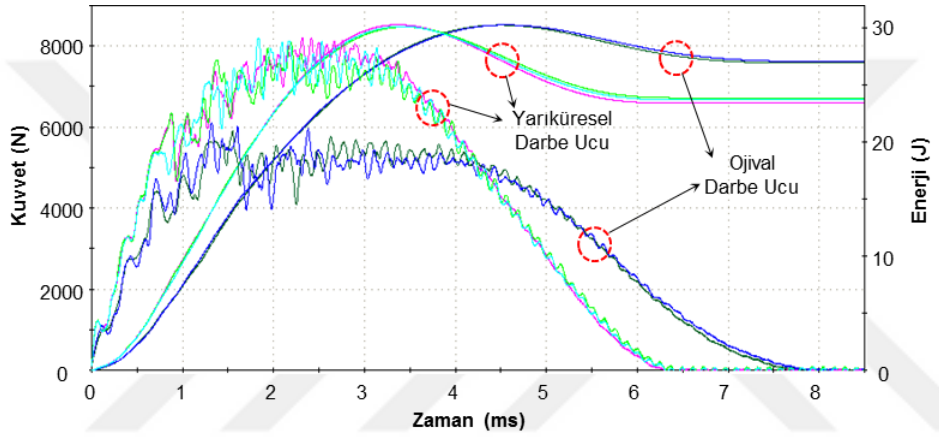
DSBM testi için 30,5 J darbe enerjisi ve 0° çarpma açısıyla tekrarlı ağırlık düşürme darbe testine tabi tutulan numunelere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 53'de, kuvvet-zaman eğrileri ise Şekil 54'de verilmiştir. Ojival darbe ucunun yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha uzun temas süresine, daha fazla yer değiştirmeye ve daha fazla absorbe edilen enerjiye neden olduğu gözlemlenmiştir.

¹⁰² Tom Mitrevski ve diğ., *age*, s. 142.

¹⁰³ Tom Mitrevski ve diğ., *age*, s. 147.

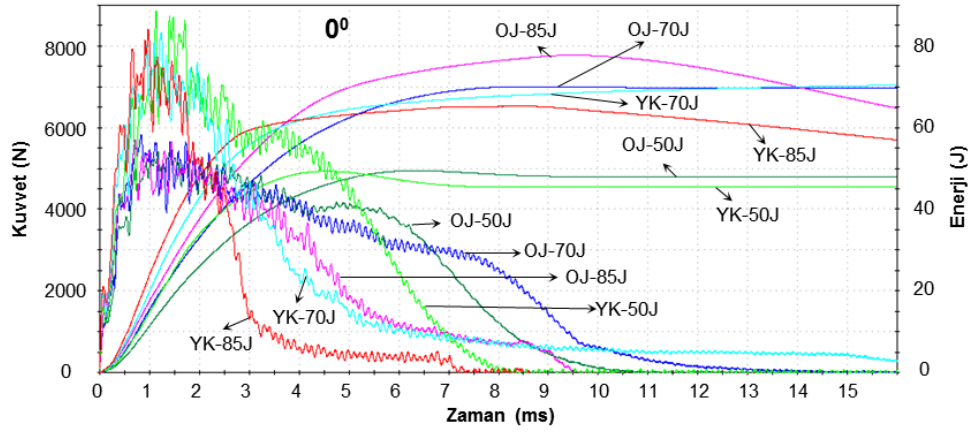


Şekil 53: 30,5 J Darbe Enerjisi ve 0° Çarpma Açısıyla Darbe Maruz Kalan DSBM Testi Numunelerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri



Şekil 54: 30,5 J Darbe Enerjisi ve 0° Çarpma Açısıyla Darbe Maruz Kalan DSBM Testi Numunelerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

Yüksek darbe enerjisi seviyelerinde ve 0° çarpma açılarında, yarıküresel ve ojival darbe ucu ile yapılan testlerin kuvvet, zaman ve absorbe edilen enerji değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 55’de sunulmuştur. Genel olarak ojival darbe ucunun daha fazla temas süresine neden olduğu ve ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin yarıküresele kıyasla daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir. Penetrasyon ve perforasyon karakterli 70 J ve 85 J darbe enerjilerinde absorbe edilen enerji değerleri darbe enerjisinden daha azdır veya eşittir. Yüksek darbe enerjilerinde darbe ucu geometrisinin absorbe edilen enerji üzerindeki etkisi delinmeden dolayı değişkenlik sergilemektedir. Ayrıca delinme esnasında darbe ucu ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklanan alan absorbe edilen enerji değerinden çıkarılmamıştır.



Şekil 55: 50 J, 70 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde ve 0° Çarpma Açısında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

Darbe ucu geometrisinin numunenin darbe davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi sonucunda; 0°, 5°, 10° çarpma açılarında ve düşük darbe enerjilerinde temas süresi, yer değiştirme ve absorbe edilen enerji eğrilerinin benzer davranış sergilediği, yüksek darbe enerjilerinde ise yarıküresel ve ojival darbe uçlarının neden olduğu eğrilerin değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

5.3.4. Çarpma Açısının Malzemenin Darbe Davranışına Etkisi

Darbe ucunun numuneye açılı olarak çarpmasının malzemenin darbe davranışına olan etkisini görebilmek için farklı çarpma açılarında yapılan testlere ait eğriler birleştirilerek grafik üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

Kompozit malzemelerin sahip olduğu takviye malzemesinden dolayı enlemesine dayanımları yüksek iken düzlemsel darbelere karşı hassastırlar. Eğimli darbelerde, darbe ucu tarafından numuneye uygulanan kuvvetin bir kısmı numunenin enlemesine dayanımıyla karşı karşıya kalmakta ve darbe ucu fiberleri kırmak için daha fazla kuvvete ihtiyaç duymaktadır. Bir başka deyişle darbe ucu daha zor ilerlemektedir.

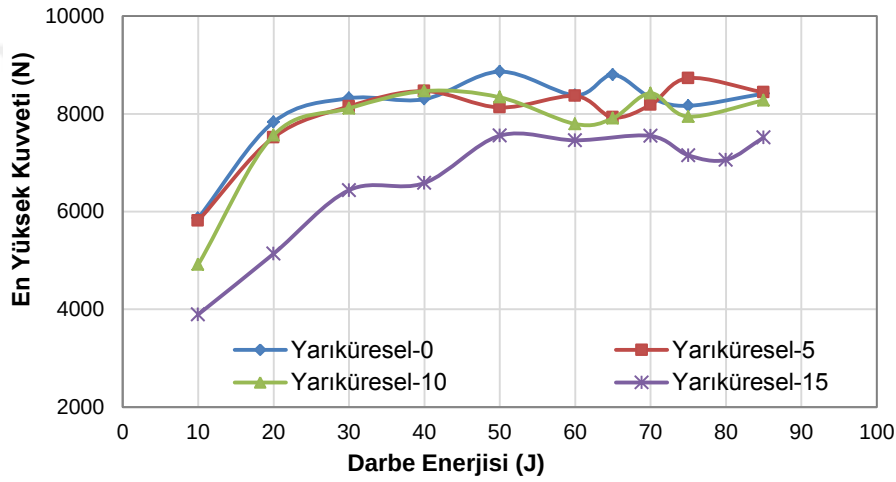
Fadzullah & Cantwell, eğimli çarpmalarda kılavuz raylara daha fazla kinetik enerji transfer edilmesinin dikey kuvvet bileşeninde azalmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır.¹⁰⁴ Aynı şekilde, bu çalışmada eğimli ağırlık düşürme darbe testlerinde numuneye etki eden kuvvet değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan testlerde, eğimli çarpma sonucu test cihazının kılavuz raylarının esnemesiyle oluşan gerilme enerjisi ihmal edilmiştir.

¹⁰⁴ SH Sheikh Md Fadzullah, Wesley J. Cantwell, *age*, s. 3.

5.3.4.1. Çarpma Açısının En Yüksek Temas Kuvvetine Etkisi

Genel olarak darbe enerjisinin artmasıyla en yüksek temas kuvvetinin, malzemede oluşan delaminasyon ve matris hasarlarından dolayı penetrasyon oluşuncaya kadar arttığı, daha büyük darbe enerjilerinde ise fiber kırılmaları ve delinmenin etkisiyle en yüksek temas kuvveti değerlerinde az da olsa bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

En yüksek temas kuvveti; yarıküresel darbe ucu için 0^0 , 5^0 ve 10^0 çarpma açılarındaki 30 J'a kadar artmakta, sonra birbirine yakın değerler almaktadır. 15^0 çarpma açısı için ise 50 J'a kadar artmakta, daha yüksek darbe enerjilerinde birbirine yakın değerler almaktadır (Şekil 56).

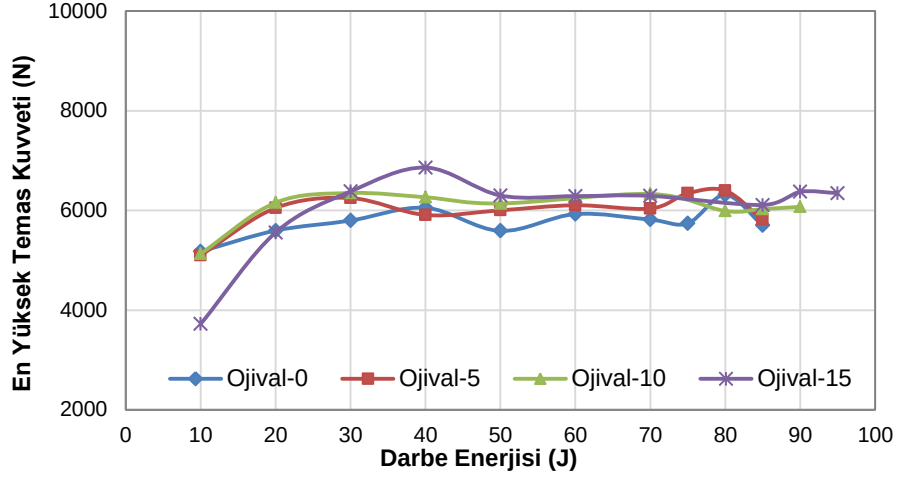


Şekil 56: Yarıküresel Darbe Ucu İçin Artan Darbe Enerjisi ile En Yüksek Temas Kuvvetinin Değişimi

Ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerde ise en yüksek temas kuvveti 0^0 , 5^0 , 10^0 ve 15^0 çarpma açılarındaki 20J darbe enerjisine kadar artarken, daha yüksek darbe enerjilerinde birbirine yakın değerlere sahip olmaktadır. (Şekil 57)

Yarıküresel darbe ucu için 15^0 çarpma açısındaki bütün darbe enerjilerinde en yüksek kuvvet değeri en düşük değere sahiptir. Elde edilen bulgu, literatür ile uyumlu bulunmuştur. Fadzullah & Cantwell, en yüksek temas kuvvetinin 0^0 açılı darbelerde en yüksek değere, 20^0 açılı darbelerde ise en düşük değere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.¹⁰⁵

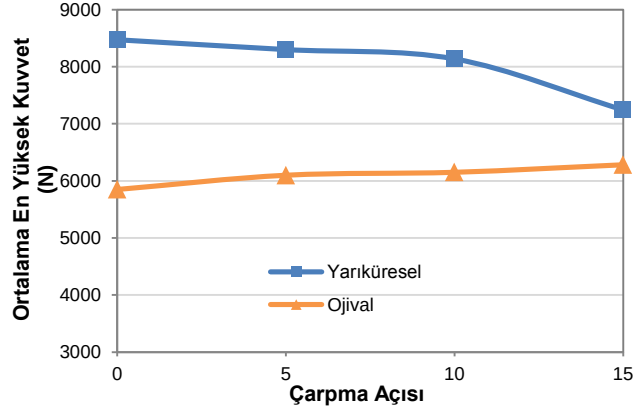
¹⁰⁵ SH Sheikh Md Fadzullah, Wesley J. Cantwell, *age*, s. 3.



Şekil 57: Ojival Darbe Ucu İçin Artan Darbe Enerjisi ile En Yüksek Temas Kuvvetinin Değişimi

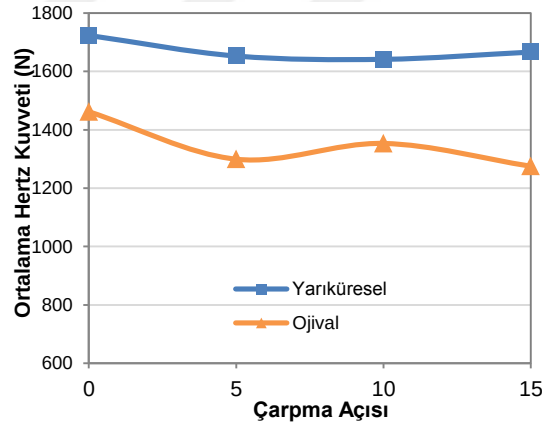
10 J ve 20 J darbe enerjileri hariç diğer tüm darbe enerjilerinde yapılan testlere ait $F_{ey(en\ yüksek)}$ değerlerinin ortalamasının çarpma açısıyla değişimi gösteren grafik Şekil 58'de verilmiştir. 10 J ve 20 J darbe enerjili ağırlık düşürme testlerindeki yükleme yeterince yüksek olmadığı için malzemeye özgül en yüksek kuvvet değerinin bulunmasında bu iki teste ait veriler ortalama hesaplamada dikkate alınmamıştır.¹⁰⁶ Yapılan ağırlık düşürme darbe testlerinde, yarıküresel darbe ucu tarafından numuneye uygulanan en yüksek temas kuvveti değeri ojival darbe ucundan daha fazladır. Yarıküresel darbe ucu için çarpma açısı arttıkça ortalama F_{ey} azalma eğilimi sergilemektedir. 0, 5 ve 10 derece çarpma açılarındaki darbelerde F_{ey} çok az azalırken, 15 derece çarpma açılarındaki darbede gözle görülür azalma gözlemlenmiştir. Bunun darbe ucunun kaymasından ve yatay kuvvet bileşeninin değerinin eğimden dolayı daha fazla olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ojival darbe ucu için çarpma açısı arttıkça ortalama F_{ey} değerleri birbirine yakın olmakla birlikte artma eğilimi göstermektedir.

¹⁰⁶ Celal Evci, 2010, s. 126.



Şekil 58: Çarpma Açısının Artmasıyla Ortalama En Yüksek Kuvvetinin Değişimi

Ortalama Hertz kuvveti değerleri karşılaştırıldığında, yarıküresel darbe ucuyla yapılan darbelerin ojival darbe ucuna kıyasla daha fazla ortalama Hertz kuvvetine neden olduğu bulunmuştur. Ojival darbe ucunun sivri yapısından dolayı numunede ilk hasar daha düşük kuvvet değerlerinde gerçekleşmektedir.¹⁰⁷ Yarıküresel ve ojival darbe ucu için çarpma açısının artmasıyla beraber ortalama Hertz kuvveti (10J ve 20J darbe enerjileri hariç) değerinin azaldığı, 0° çarpma açısında en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 59).



Şekil 59: Çarpma Açısının Artmasıyla Ortalama Hertz Kuvvetinin Değişimi

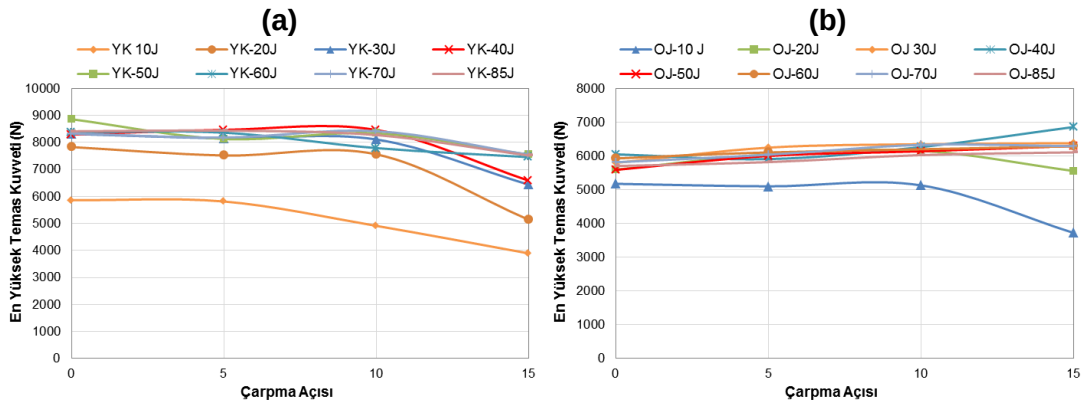
30 J ile 95 J darbe enerjilerine ait ortalama en yüksek kuvvet ve ortalama Hertz kuvvet değerlerinin çarpma açısına bağlı olarak değişimi Tablo 9'da verilmiştir. Hertz hasar eşik kuvveti ve en yüksek kuvvet değerleri yarıküresel darbe ucu ve 0° çarpma açısında en yüksek değere sahip olup, çarpma açısı arttıkça darbe ucuna göre değişim göstermektedir.

¹⁰⁷ Tom Mitrevski ve diğ., **age**, s. 143.

Tablo 9: 30 J ile 95 J Darbe Enerjilerine Ait Ortalama En Yüksek Kuvvet ve Ortalama Hertz Kuvvet Değerlerinin Karşılaştırılması

Darbe ucu geometrisi	Çarpma açısı	Ortalama en yüksek kuvvet, F_{ey} (N)	Değişim %	Ortalama Hertz kuvveti, F_H (N)
Yarıküresel	0	8471,58	-	1723
	5	8299,63	-2,03	1652,5
	10	8136,39	-1,97	1641,2
	15	7242,58	-10,99	1665,9
Ojival	0	5849,25	-	1461,8
	5	6098,74	4,27	1299,2
	10	6150,23	0,84	1353,2
	15	6281,77	2,14	1275,2

Çarpma açısının (eğimin) fazla olduğu düşük enerjili darbelerde, numuneye etki eden normal kuvvet düşüktür ve darbe ucunun kaymasından dolayı enerji kaybı söz konusudur. Özellikle çarpma açısı 10^0 'den 15^0 'ye çıktığında yarıküresel darbe ucunun kaymasına bağlı olarak F_{ey} ciddi oranda düşmektedir (Şekil 60). Ancak eğimin fazla olduğu daha yüksek enerjili darbelerde, darbe ucunun kısmi penetrasyonundan dolayı kaymanın daha az olması veya darbe ucunun hemen altında oluşan aşırı basma hasarına bağlı olarak malzemenin yumuşaması sonucunda numunede büyük hasarlar oluşabilmektedir.

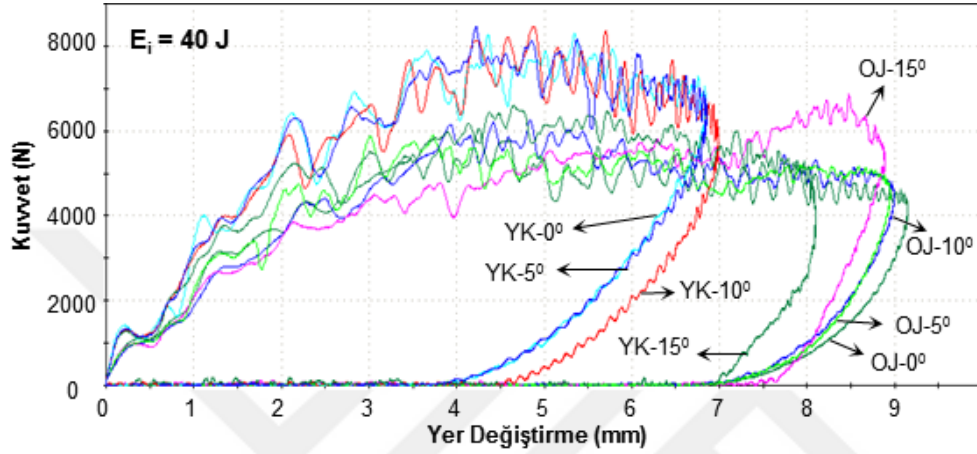


Şekil 60: (a) Yarıküresel Darbe Ucu, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere ait En Yüksek Temas Kuvvetinin Çarpma Açısıyla Değişimi

5.3.4.2. Çarpma Açısının Darbe Ucu Yer Değiştirmesine Etkisi

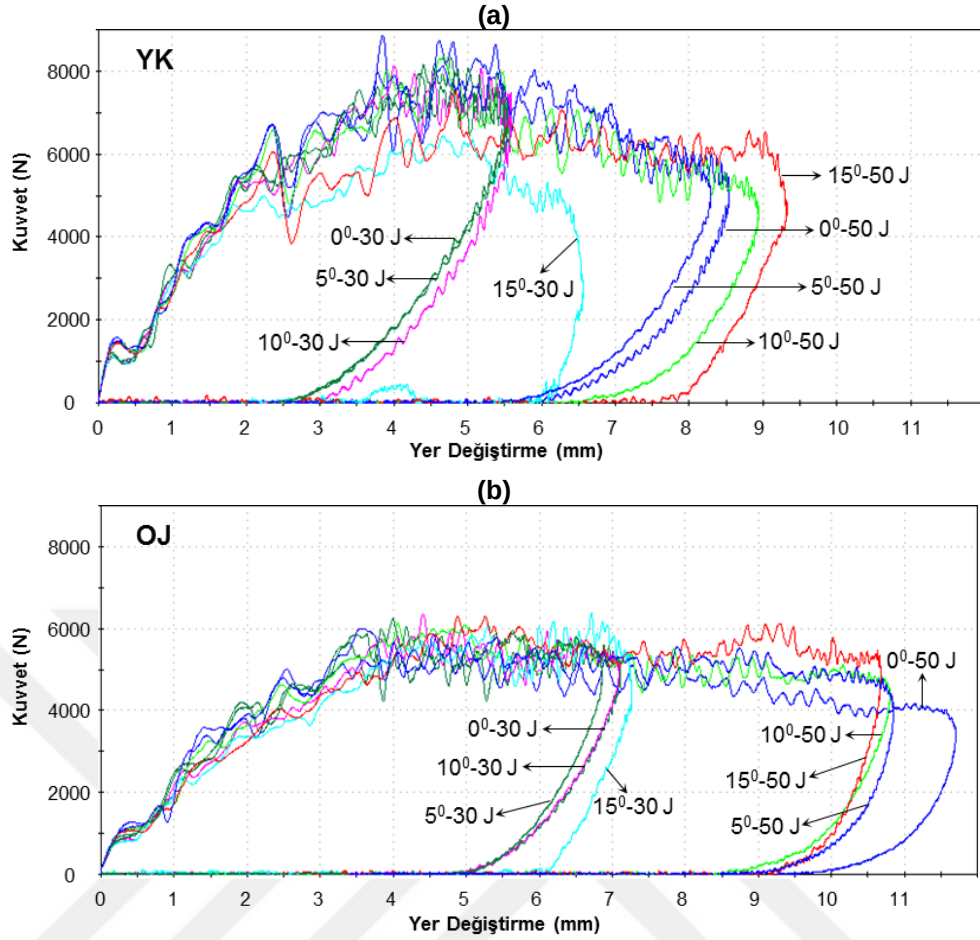
Farklı çarpma açılarında yarıküresel ve ojival darbe ucu kullanılarak 40 J darbe enerjisi ile yapılan testlere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğine (Şekil 61); 0^0 , 5^0 ve 10^0 çarpma açılarında birbirine yakın olmakla birlikte 15^0 çarpma

açısında yarıküresel darbe ucunun yer değiştirme miktarı artmaktadır. Bu artışın darbe ucunun kaymasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ojival darbe ucuna ait testlerde ise çarpma açısı arttıkça yer değiştirme değerleri birbirine yakın olmakla beraber azalma eğilimindedir. Normal darbelerde dikey kuvvet bileşeninin açılı darbelerle kıyasla daha fazla olmasından dolayı darbe ucunun darbe anında daha fazla ilerlediği değerlendirilmektedir.



Şekil 61: 40 J Darbe Enerjisi ile 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

30 J ve 50 J enerjisi seviyelerinde yapılan darbelerle ilgili kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde (Şekil 62); yarıküresel darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerde çarpma açısı arttıkça darbe ucunun yer değiştirme miktarının arttığı görülmektedir. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde, 30J darbe enerjisiyle yapılan darbelerde 0°, 5° ve 10° çarpma açılarındaki yer değiştirme değerleri birbirine yakındır ancak 15° çarpma açısında yer değiştirmenin miktarı hafif artmaktadır. 50J darbe enerjisinde ise 0° çarpma açısının en yüksek yer değiştirme değerine sahip olduğu ve 5°, 10° ve 15° çarpma açılarındaki yer değiştirme miktarının birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.



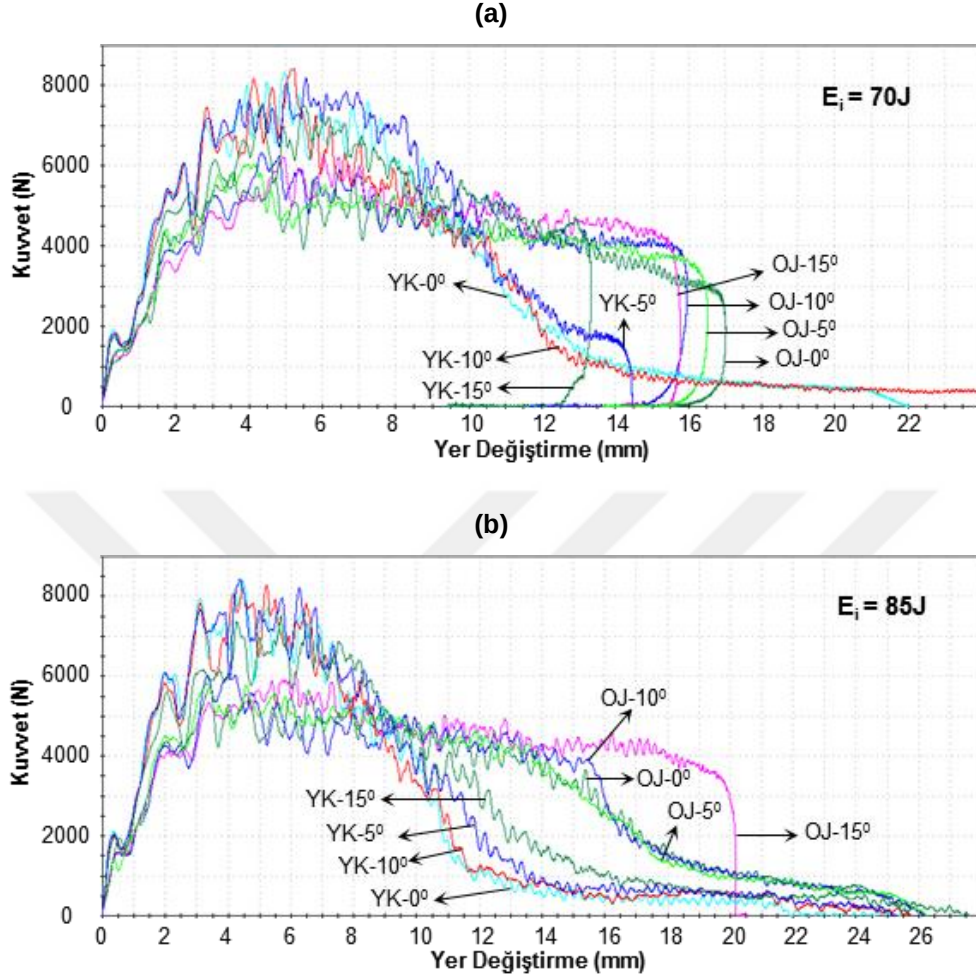
Şekil 62: 30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

Çarpma açısı ile darbe ucunun yer değiştirmesi arasındaki ilişki darbe enerjisine göre değişkenlik sergilemektedir. Yarıküresel darbe ucu ile düşük enerji seviyelerinde (10-60J) darbeye maruz kalan numunelerde darbe ucunun yer değiştirme miktarı 15° çarpma açısında artmaktadır. Yüksek darbe enerjilerinde (70-85J) ise birbirine yakın veya düşük değerler almaktadır (Şekil 62.a ve Şekil 63).

Yarıküresel darbe ucunun 15° çarpma açısındaki kayma hareketi 10-60J darbe enerjilerinde etkili olmakta ve darbe ucunun yer değiştirmesinde artışa neden olmaktadır. 60 J'dan fazla darbe enerjilerinde ise darbe ucunun kayma davranışının etkisini kaybederek numunede delinme gerçekleşmeye başlamasıyla, 0°, 5° ve 10° çarpma açılarındaki yer değiştirme miktarı benzer değerler alırken 15° çarpma açısında darbe ucunun numuneye daha az nüfuz etmesine bağlı olarak yer değiştirme miktarının azaldığı düşünülmektedir.

Ojival darbe ucunda ise; 10-30J enerji seviyelerinde darbe ucunun yer değiştirme miktarı 15° çarpma açısında hafif artarken, daha yüksek darbe

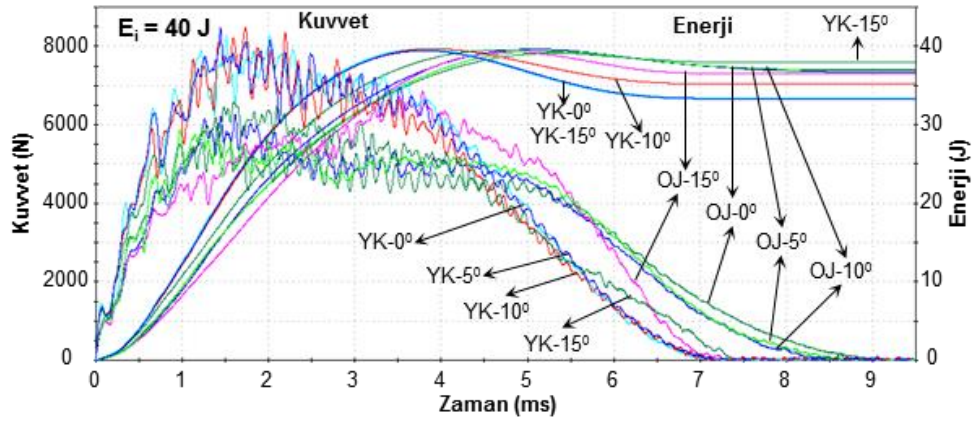
enerjilerinde (40-85J) çarpma açısı arttıkça yer değiştirme miktarı birbirine yakın veya düşük değerler almaktadır (Şekil 62.b ve Şekil 63).



Şekil 63: (a) 70 J ve (b) 85 J Darbe Enerjilerinde 0° , 5° , 10° , 15° Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

5.3.4.3. Çarpma Açısının Temas Süresi ve Absorbe Edilen Enerjiye Etkisi

40 J darbe enerjisi ile yapılan testlere ait kuvvet-zaman-enerji eğrileri Şekil 64'de verilmiştir. 0° , 5° ve 10° açılı darbelerde kuvvet-temas süresi eğrileri hemen hemen çakışmaktadır. Çarpma açısı arttıkça; yarıküresel darbe ucu ile yapılan testlerde temas süresi birbirine yakın değerler alırken, ojival darbe ucu ile yapılan testlerde temas süresi azalmaktadır. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde en kısa temas süresi 15° çarpma açısında elde edilmiştir. Yarıküresel darbe ucu ile yapılan testlerde çarpma açısı arttıkça numune tarafından absorbe edilen enerji miktarı artarken, ojival darbe ucu ile yapılan testlerde farklı çarpma açılarında absorbe edilen enerji miktarı değerleri birbirine yakındır.



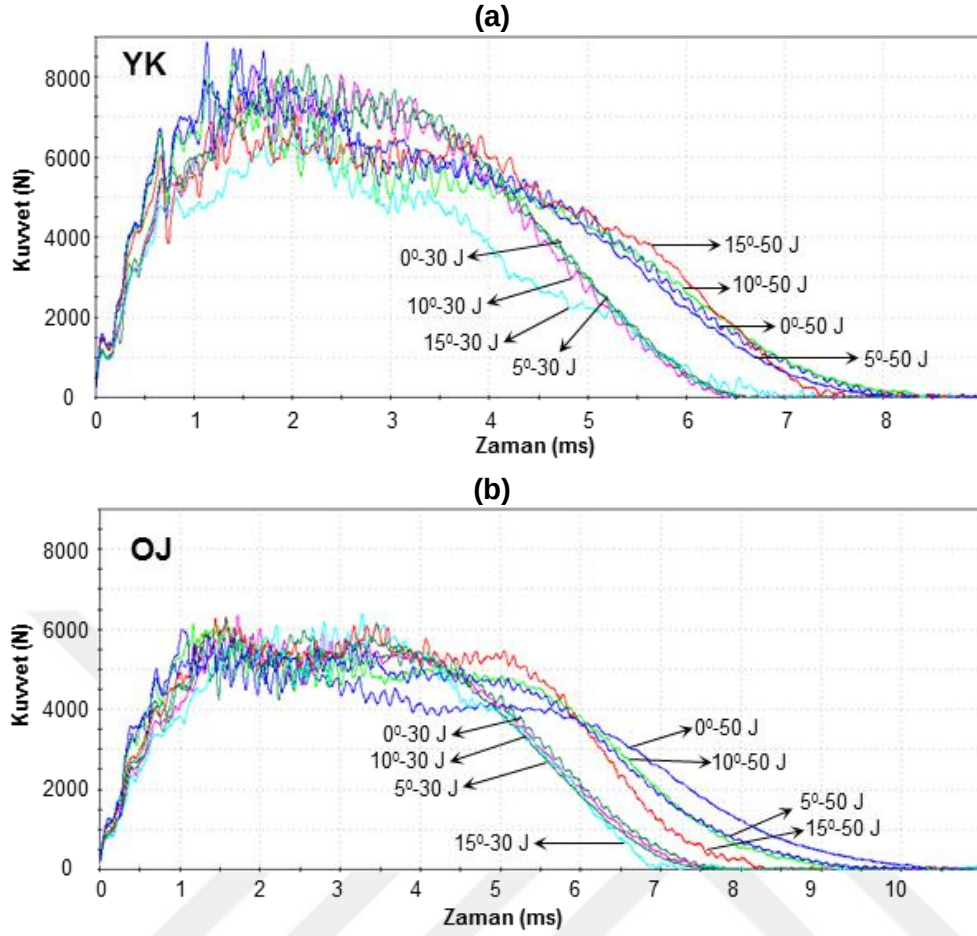
Şekil 64: 40 J Darbe Enerjisi ile 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlerin Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

Absorbe edilen enerji miktarı kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alana eşit olduğu göz önünde bulundurulduğunda; 15° çarpma açıları darbe ucunun yana kayma hareketinin yer değiştirme eğrisinin sağa uzamasına neden olduğu ve bunun sonucu olarak absorbe edilen enerji (E_a) miktarının da arttığı değerlendirilmektedir.

Ivanez ve diğ., genel olarak 0° ve 5° çarpma açılarındaki sonuçların hemen hemen aynı ve aralarındaki farkların ihmal edilebilir seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte 0°, 5° ve 10° çarpma açılarındaki sonuçların birbirine çok yakın olduğunu, 15° çarpma açısındaki enerji sönümleme miktarının diğer sonuçlarla kıyaslandığında biraz fazla olduğunu; bu durumda çarpma açısı arttıkça absorbe edilen enerjinin de arttığını ortaya koymuşlardır.¹⁰⁸

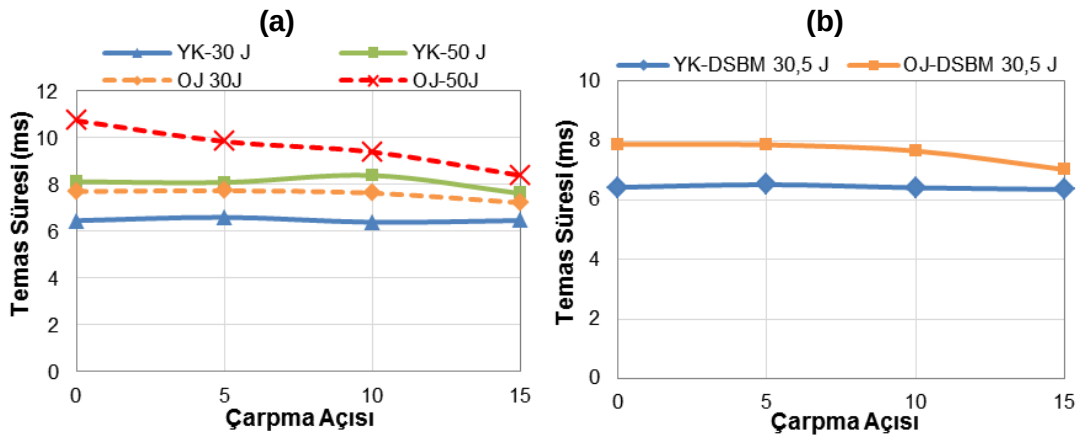
Yarıküresel ve ojival darbe ucu ile 30 J ve 50 J darbe enerjisiyle farklı çarpma açılarındaki testlerin kuvvet-zaman eğrileri Şekil 65'de, temas süresinin çarpma açısına göre değişim eğrileri ise Şekil 66.a'da sunulmuştur. Yarıküresel darbe ucu ile 30 J ve 50 J darbe enerjilerinde ve farklı çarpma açılarındaki testlerde temas süreleri birbirine yakın değerler almaktadır (Şekil 65.a). Ojival darbe ucuna ait grafik incelendiğinde ise, 30 J darbe enerjisinde farklı çarpma açılarındaki temas süreleri birbirine yakın iken, 50 J darbe enerjilerinde çarpma açısı arttıkça ojival darbe ucunun eğimli darbelerde numuneye daha az nüfuz etmesine bağlı olarak temas süresi azalmaktadır (Şekil 65.b).

¹⁰⁸ Ines Ivanez ve diğ., *age*, s. 1133.



Şekil 65: 30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde ve 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman Eğrileri

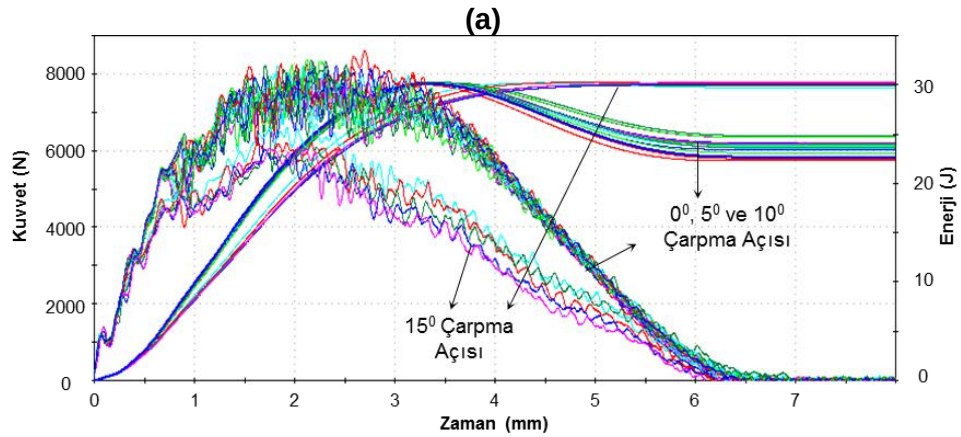
DSBM testi için darbeye maruz kalan numunelerin kuvvet-zaman eğrilerinden elde edilen ortalama temas süreleri grafiği Şekil 66.b'de verilmiştir. Yarıküresel darbe ucu ile yapılan darbe testlerinde çarpma açısının artmasının ortalama temas süresi üzerinde bir fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde ise çarpma açısı arttıkça ortalama temas süresi hafif azalmaktadır.



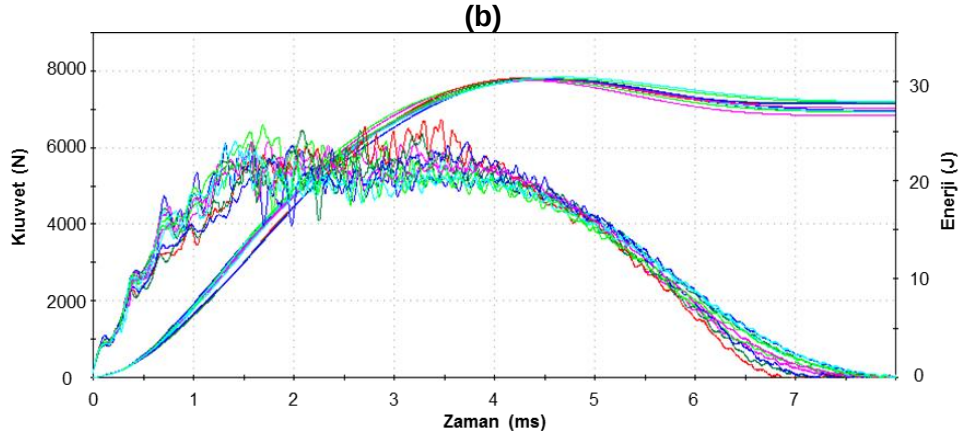
Şekil 66: (a) 30 J ve 50 J Darbe Enerjilerinde 0° , 5° , 10° , 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere ait, , (b) DSBM Testi İçin 30,5 J Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Temas Süresi Çarpma Açısı Eğrileri

Çarpma açısının artmasıyla beraber temas süresindeki farklılıklar ihmal edilebilir seviyededir.¹⁰⁹ Yüksek darbe enerjilerinde yüklemenin ortadan kalktığı kısımda farklı çarpma açılarının temas süresi eğrileri üst üste binmektedir. Sadece ojival darbe ucu için 40J'dan büyük darbe enerjilerinde 15° çarpma açılarında yapılan testlerde temas süresinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek darbe enerjilerindeki eğimli darbelerde ojival darbe ucunun numuneye daha az nüfuz etmesine bağlı olarak temas süresi azalmaktadır. Bu kapsamda, temas süresinin çarpma açısından bağımsız olduğu değerlendirilmektedir.

DSBM testi öncesinde 30,5 J darbe enerjisinde ağırlık düşürme darbe testine tabi tutulan numunelere ait kuvvet-zaman grafikleri Şekil 67'de verilmiştir. Yarıküresel darbe ucu ile 0° , 5° ve 10° çarpma açılarında yapılan tekrarlı testlere ait kuvvet-zaman eğrileri benzer davranış sergilerken, 15° çarpma açısı ile yapılan testlerde numune tarafından absorbe edilen enerjinin (E_a) daha fazla olduğu ve en yüksek temas kuvvetinin daha düşük değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 67.a). Ojival darbe ucuna ait kuvvet-zaman eğrileri incelendiğinde ise çarpma açısının artmasının en yüksek temas kuvveti üzerinde bariz bir etkisinin olmadığı, absorbe edilen enerjinin ise 15° çarpma açısında yapılan darbelerde hafif artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 67.b).



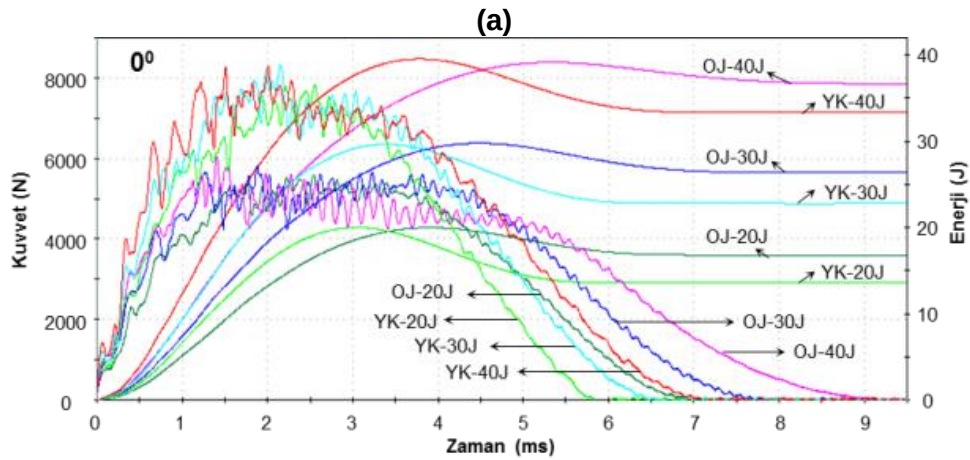
¹⁰⁹ age, s. 1132.

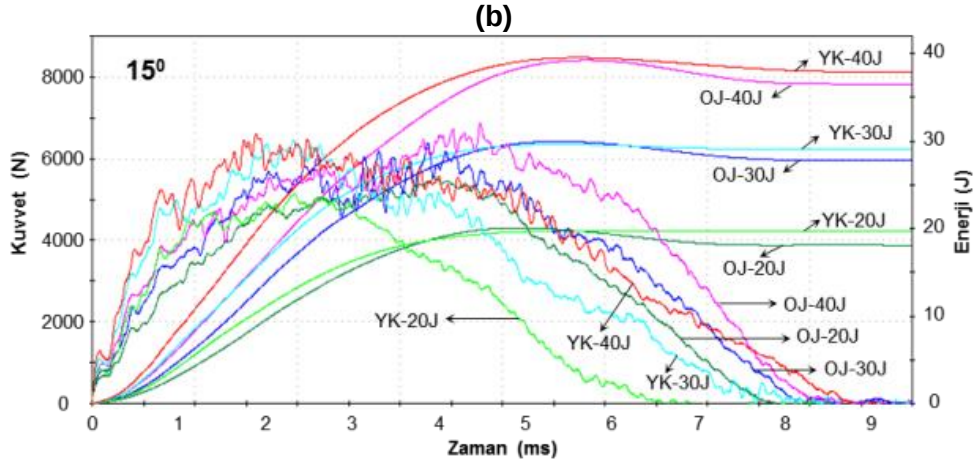


Şekil 67: (a) Yarıküresel (b) Ojival darbe Ucu ile Farklı Çarpma Açılarında 30,5 J Darbe Enerjisi ile Darbeye Maruz Kalan DSBM Testinde Kullanılacak Numunelere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri

20 J, 30 J ve 40 J enerji seviyesinde, 0° , 5° ve 10° çarpma açılarında ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numuneler tarafından absorbe edilen enerji miktarı yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazladır. Aynı şartlarda 15° çarpma açısıyla yapılan testlerde ise yarıküresel darbe ucunun daha fazla absorbe edilen enerjiye neden olduğu görülmektedir (Şekil 68).

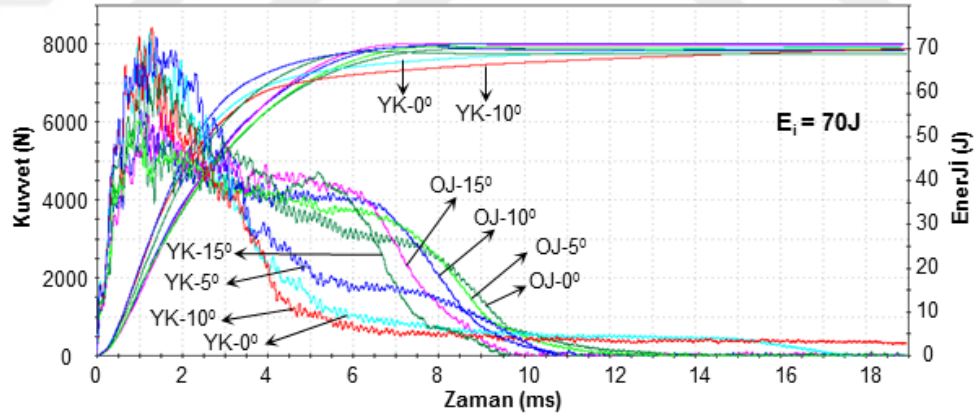
Yarıküresel ve ojival darbe uçları ile 0° , 5° ve 10° çarpma açılarında absorbe edilen enerji miktarı birbirine yakın değerler almaktadır. 15° çarpma açısında ise; yarıküresel darbe ucu ile 10-40 J darbe enerji aralığında, ojival darbe ucunda ise 10-30 J darbe enerjisi aralığında darbeye maruz kalan numuneler tarafından daha fazla enerji absorbe edildiği; daha büyük darbe enerjilerinde ise çarpma açısındaki artışın absorbe edilen enerji üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.





Şekil 68: 20 J, 30 J ve 40 J Darbe Enerjilerinde, 0° ve 15° Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucuna Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri

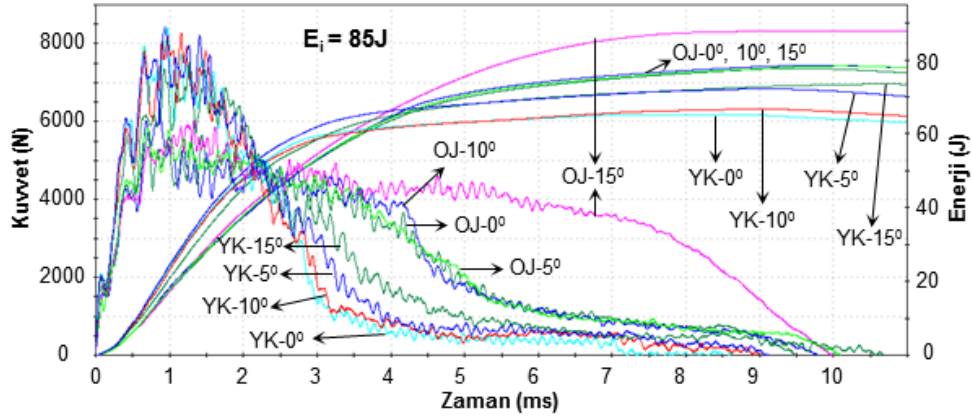
70 J darbe enerjilerinde yapılan testlere ait kuvvet-zaman-enerji eğrileri Şekil 69'da verilmiştir. Yarıküresel darbe ucunda çarpma açısı arttıkça temas süresi değişkenlik gösterirken, ojival darbe ucunda çarpma açısı arttıkça temas süresi azalmaktadır. 70 J darbe enerjisinde yapılan testlerde numune tarafından absorbe edilen enerji miktarı yarıküresel ve ojival darbe ucu için birbirine yakın değerler almaktadır.



Şekil 69: 70 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

85 J darbe enerjilerinde yapılan testlere ait kuvvet-zaman-enerji eğrileri Şekil 70'de verilmiştir. 85 J darbe enerjisiyle yarıküresel ve ojival darbe ucuyla yapılan testlerde ise çarpma açısı arttıkça temas süresi değerleri birbirine yakın olmakla beraber aralarında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numuneler tarafından absorbe edilen enerji miktarı 15° çarpma

açısında daha fazladır. Ayrıca numune tarafından absorbe edilen enerji miktarı ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerde daha fazladır.



Şekil 70: 85 J Darbe Enerjilerinde 0°, 5°, 10°, 15° Çarpma Açılarında Yapılan Testlere Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

5.4. Darbe Sonrası Oluşan Hasarın Tahratsız Muayene Yöntemleri ile Değerlendirilmesi

Malzemede oluşan hasar yapıları incelendiğinde; darbe ucu temasına bağlı olarak yüzeysel hasar, matris çatlamları, delaminasyon gibi içyapı hasarlarının ve darbe enerjisinin artmasıyla numunenin arka yüzeyinde gerilmeden kaynaklanan hasarların olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin yüzeyinde oluşan gözle görülebilen başlıca hasar türleri çöküntü, çatlak, çizik, çentik, fiber kırılması ve delinmedir.

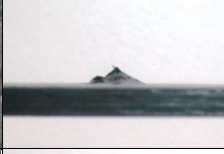
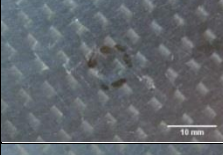
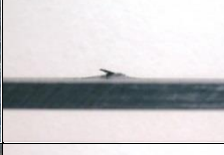
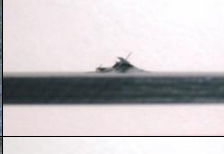
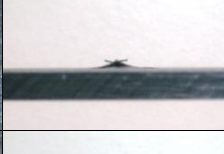
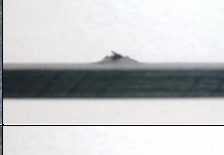
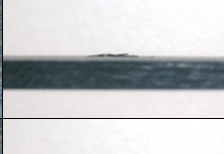
Numunelerin yüzeyinde oluşan çentiklerin görünüşleri darbe açısının etkisinin değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Farklı çarpma açıları yarıküresel ve ojival darbe ucunun oluşturduğu çentik biçimi farklılık göstermektedir.

5.4.1. Gözle Muayene

Darbe ucu şeklinin numunede oluşan hasar yapısına etkisini ortaya koymak amacıyla farklı çarpma açıları 30 J, 60 J ve 85 J enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan numunelerin görüntüleri incelenmiştir. Düşük hızlı darbeye maruz kalan numuneler üzerinde ezilme, çatlak, çentik oluşumu, matris kırılmaları şeklinde hasarlar gözlemlenmiştir. Enerjinin artmasıyla birlikte fiber kırılmalar, alt tabakalarda fiber matris ayrılmaları ve delinme olmuştur. Düşük hızla yapılan darbelerde, numunelerin darbe yüzeyinde basmadan kaynaklanan hasarın arka yüzeyde çekmeden kaynaklanan hasardan daha az olduğu görülmektedir.

30 J darbe enerjisi ile yapılan testlerde numunede oluşan hasar görüntüleri Tablo 10'da verilmiştir. Yarıküresel darbe ucunun ojival darbe ucuna göre numunenin arka yüzeyinde daha belirgin hasara neden olduğu görülmektedir. 15° çarpma açısında ise yarıküresel darbe ucunun numune yüzeyinde kaymasına bağlı olarak yarıküresel darbe ucu ojival darbe ucuna kıyasla numune yüzeyinde daha az matris çatlamasına neden olmaktadır.

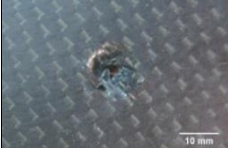
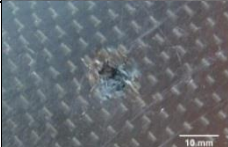
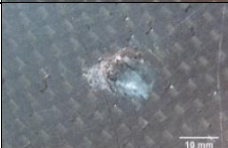
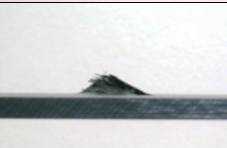
Tablo 10: Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 30 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri

Çarpma Açısı	Darbe Ucu Geometrisi	Darbe (Ön) Yüzeyi (0° fiber yönü →)	Arka Yüzey	Yandan Görünüş
0°	Yarıküresel			
	Ojival			
5°	Yarıküresel			
	Ojival			
10°	Yarıküresel			
	Ojival			
15°	Yarıküresel			
	Ojival			

Tablo 11'de verilen 60 J darbe enerjisi ile yapılan testlerde numunede oluşan hasar görüntüleri incelendiğinde, darbe enerjisinin artmasına bağlı olarak

yarıküresel ve ojival darbe uçları için numunelerin arka yüzeyinde meydana gelen hasar yapıları benzerlik sergilemektedir. Ayrıca 15^0 çarpma açısında yapılan testlerde, darbe enerjisi arttıkça yarıküresel darbe ucunun darbe yüzeyinde kayması azalmaktadır.

Tablo 11: Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 60 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri

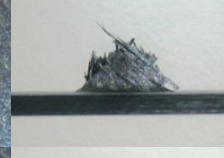
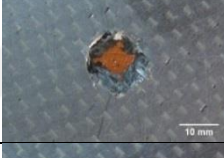
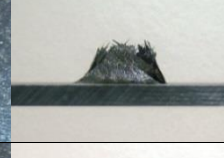
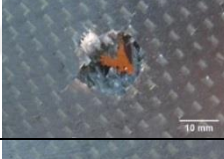
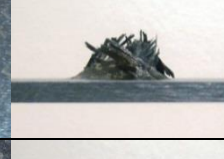
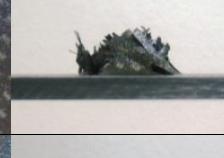
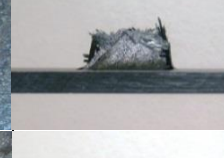
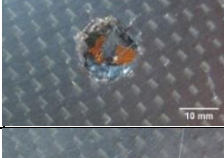
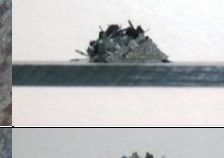
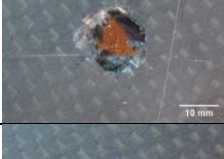
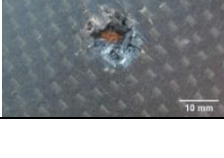
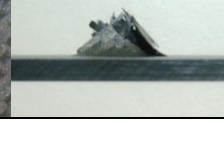
Çarpma Açısı	Darbe Ucu Geometrisi	Darbe (Ön) Yüzeyi (0^0 fiber yönü →)	Arka Yüzey	Yandan Görünüş
0^0	Yarıküresel			
	Ojival			
5^0	Yarıküresel			
	Ojival			
10^0	Yarıküresel			
	Ojival			
15^0	Yarıküresel			
	Ojival			

Dokuma kompozitlerin doğası gereği numunelerin arka yüzeyinde dairesel hasar görülmektedir. 30 J darbe enerjinde yapılan testlerde ojival darbe ucu numunenin arka yüzeyinde daha çıkıntılı hasara neden olmuştur. Arka yüzeyde

oluşan hasar belli bir enerji seviyesi aşıldıktan sonra (50 J'den yüksek darbe enerjilerinde) darbe ucu geometrisinden bağımsız hale gelmektedir.

85 J darbe enerjisinde ise numunelerin tamamında perforasyon meydana gelmiş olup yarıküresel ve ojival darbe ucuna ait hasar yapıları benzerlik göstermektedir (Tablo 12). 85 J darbe enerjisinde 15° çarpma açısıyla yapılan testlerde daha sivri geometriye sahip olan ojival darbe ucunun her bir tabakadaki fiberleri parçalayarak ilerlemesinden ve eğime bağlı olarak numunenin dikey kalınlığının fazla olmasından dolayı delinme çapının daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 12: Farklı Çarpma Açılarında, Yarıküresel ve Darbe Ucu ile 85 J Darbe Enerji Seviyesinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin Görüntüleri

Çarpma Açısı	Darbe Ucu Geometrisi	Darbe (Ön) Yüzeyi (0° fiber yönü $\rightarrow$)	Arka Yüzey	Yandan Görünüş
0°	Yarıküresel			
	Ojival			
5°	Yarıküresel			
	Ojival			
10°	Yarıküresel			
	Ojival			
15°	Yarıküresel			
	Ojival			

Sivri darbe uçlarının daha fazla yüzey ve fiber hasarı oluştururken, küt yapıdaki darbe uçlarının daha çok numunenin içyapısında hasarlara neden olduğu görülmektedir.¹¹⁰

Yarıküresel darbe ucu numunede daha geniş alanda hasar yaratmakta ve alt tabakalarda ayrılmaya (delaminasyona) neden olabilmektedir. Ojival darbe ucu ise daha sivri olmasından dolayı daha derin ve bölgesel hasara sebep olduğu gözlemlenmiştir. Ojival darbe ucu ile yapılan darbeler sonucunda numune yüzeyinde daha fazla fiber kopması oluşmaktadır.

Malzemede oluşan hasar alanı değerlendirildiğinde, darbe enerjisinin çarpma açısına kıyasla daha belirleyici parametre olduğu görülmektedir.

5.4.2. Çentik Derinliğinin Değerlendirilmesi

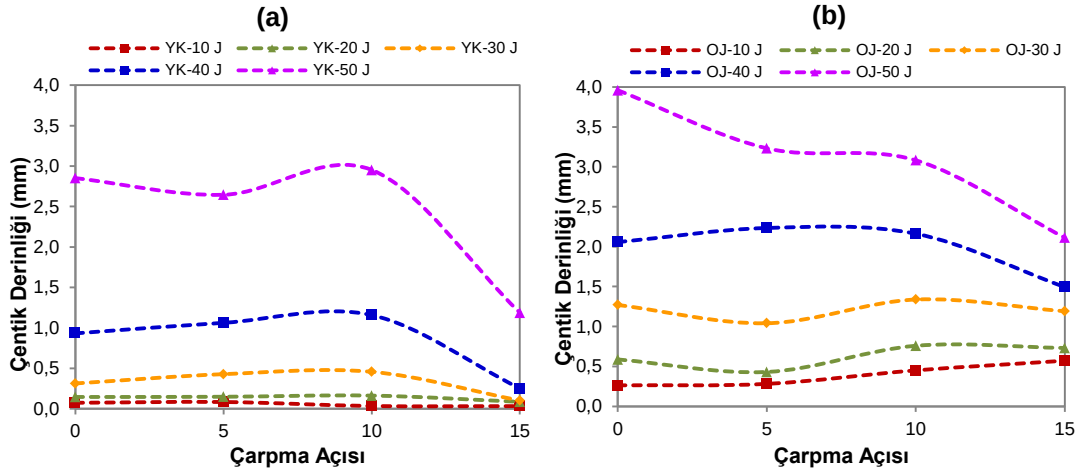
50 J'den fazla enerji seviyelerinde darbe ucunun numuneye nüfuz etmeye başlamasından dolayı 10-50 J darbe enerjileri arasındaki çentik derinlikleri dikkate alınmıştır. 10-50 J darbe enerjileri arasında darbeye maruz kalan numunelerin yüzeyinde oluşan çentik derinliği miktarını gösteren grafikler incelendiğinde; darbe enerjisi arttıkça çentik derinliğinin de arttığı görülmektedir (Şekil 71).

Yarıküresel darbe ucu ile yapılan testlerde çarpma açısı arttıkça çentik derinliği 10 J ve 20 J darbe enerjilerinde birbirine yakın değerler alırken, 30 J-50 J darbe enerjilerinde 0°-10° çarpma açısı arasında az miktarda artarken, 15° çarpma açısında azalmaktadır. Ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerde ise çarpma açısı arttıkça 10 J-30 J darbe enerjileri arasında çentik derinliği hafif artarken, 40 J – 50 J darbe enerjilerinde ise çentik derinliği 0°-10° çarpma açısı arasında değişkenlik göstermekle birlikte 15° çarpma açısında azalmaktadır. Sonuç olarak 40J'dan daha yüksek darbe enerjilerinde 15° çarpma açısıyla yapılan testlerde numunede oluşan çentik derinliği hızla azalmaktadır (Şekil 71).

Mitreviski ve diğ.'nin¹¹¹ yaptıkları çalışmada ile uyumlu olarak yarıküresel darbe ucu ojival darbe ucuna kıyasla daha az çentik derinliğine ancak daha fazla izdüşüm hasar alanına neden olmaktadır (Şekil 71 ve Şekil 78). Sonuç olarak, yarıküresel darbe ucunun daha geniş çaplı hasara neden olduğu ve numunenin içyapısında daha fazla delaminasyona sebebiyet verdiği için hasar tesirinin daha fazla olduğu değerlendirilmektedir.

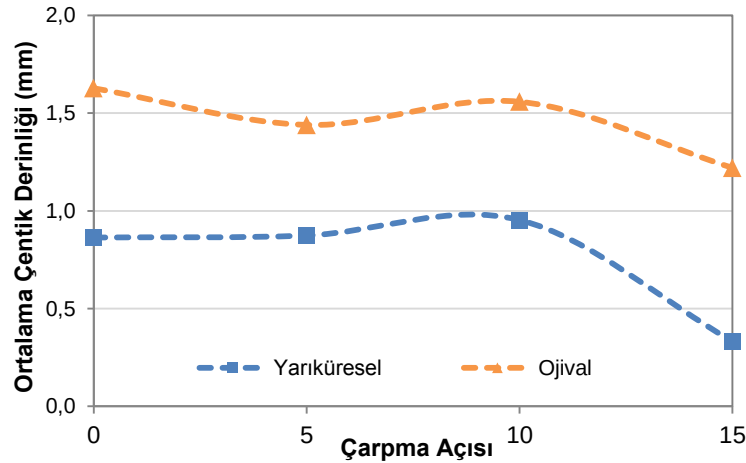
¹¹⁰ Uday K. Vaidya, **age**, ss. 110.

¹¹¹ Tom Mitrevski ve diğ., **age**, s. 147.



Şekil 71: (a) Yarıküresel, (b) Ojival Darbe Ucu ile Darbeye Maruz Kalan Numunelerde Çentik Derinliği, Çarpma Açısı ve Darbe Enerjisi Arasındaki İlişki

10-50 J darbe enerjileri arasında yapılan testler sonucunda numunelerde oluşan çentiklerin derinliklerinin ortalamasının çarpma açısına bağlı göre değişimini gösteren grafik Şekil 72’de verilmiştir. Yarıküresel darbe ucunun neden olduğu ortalama çentik derinliği 0° - 10° çarpma açısı arasında birbirine yakın iken, 15° çarpma açısında ise azalmaktadır. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde ise ortalama çentik derinliği genel olarak 0° - 10° arası çarpma açılarında birbirine yakın değerler alırken 15° çarpma açısında hafif azalmaktadır.



Şekil 72: 10 J ve 50 J Darbe Enerjileri Arasında Farklı Çarpma Açılarında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Ortalama Çentik Derinliği Grafiği

5.4.3. Ultrasonik C-Tarama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numunelerde oluşan hasar alanları c-tarama görüntülerinden hesaplanmıştır. Hasar bölgesinin merkezinde görülen mavi ve kırmızı alanlar c-taraması boyunca ses sinyallerindeki kayıpları göstermektedir. Ses sinyallerindeki bu kayıplar darbe

sonucu oluşan kalıcı çentiklerden, delaminasyonlardan, fiber kopmalarından ve delinmeden kaynaklanmaktadır.

5.4.3.1. Darbe Ucu Şeklinin Hasar Yapısına Etkisi

Artan darbe enerjilerinde farklı çarpma açılarında yarıküresel ve ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerde meydana gelen hasar yapılarının c-tarama görüntüleri Tablo 13’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, yarıküresel darbe ucunun daha fazla hasar alanına neden olduğu görülmektedir.

Tablo 13: Farklı Çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile 10 J, 30 J, 60 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde Yapılan Testlere Ait C-Tarama Sonuçları Görüntüleri

Darbe enerjisi	Darbe Ucu Geometrisi	0°	5°	10°	15°
10 J	Yarıküresel				
	Ojival				
30 J	Yarıküresel				
	Ojival				
60 J	Yarıküresel				
	Ojival				
85 J	Yarıküresel				
	Ojival				

0° fiber
yönü

20 mm
↔

Belli enerji seviyelerinde ve farklı çarpma açılarında, yarıküresel ve ojival darbe ucu ile ağırlık düşürme testine tabi tutulan numunelerin darbe yüzeyi görüntüleri ile c-tarama muayenesi görüntüleri Tablo 14’de verilmiştir. Yarıküresel darbe ucu ile özellikle 10 J gibi düşük darbe enerjilerinde yapılan testlerde numune yüzeyinde gözle zorlukla görünebilen hasar meydana gelirken, numunenin

içyapısında delaminasyona bağlı olarak meydana gelen hasarın daha büyük boyutlarda olduğu c-tarama sonuçlarından anlaşılmaktadır. Düşük darbe enerjilerinde ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerde fiber kırılmalarına neden olan penetrasyon ve az da olsa matris çatlaması gözlemlenmiştir. Yarıküresel darbe ucu ise daha fazla ve daha belirgin matris çatlamalarına neden olmaktadır.

Ayrıca 15° çarpma açısıyla 10 J enerji seviyesinde yapılan testlerde, yarıküresel darbe ucunun numunenin yüzeyinde matris ezilmesi şeklinde hasara neden olduğu, ojival darbe ucunun ise numune yüzeyinde daha fazla çentik derinliğine neden olduğu gözlemlenmiştir.

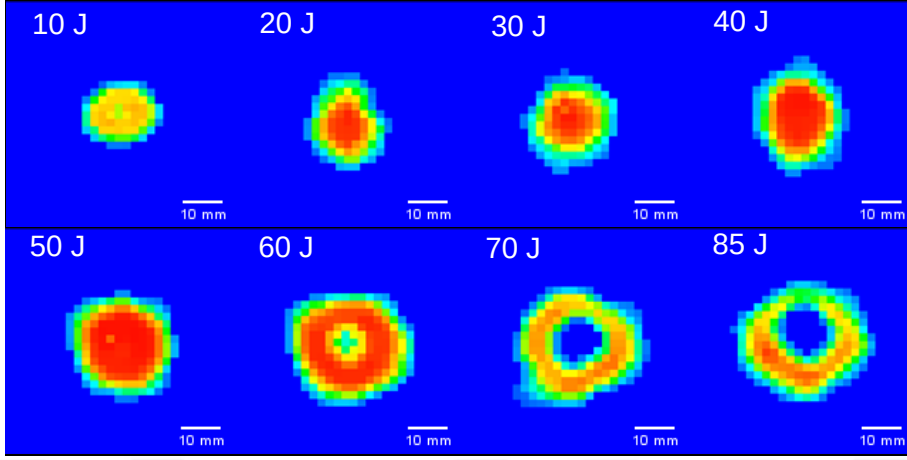
Tablo 14: Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu İle 10 J, 30 J, 60 J ve 85 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama ve Darbe Yüzeyi Görüntüleri

Darbe Enerjisi	Darbe ucu Geometrisi	0°	5°	10°	15°
10 J	YK				
	OJ				
30 J	YK				
	OJ				
60 J	YK				
	OJ				
85 J	YK				
	OJ				

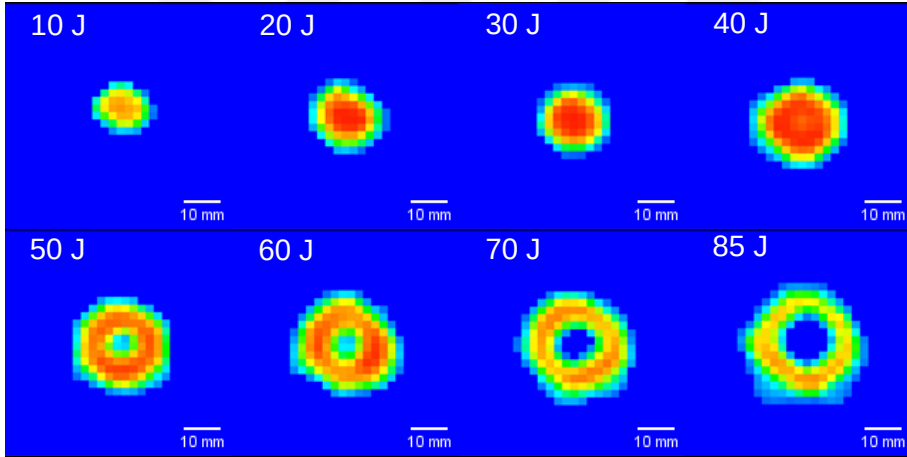
5.4.3.2. Enerji Artışının Hasar Yapısına Etkisi

Delaminasyona bağlı olarak oluşan izdüşüm hasar alanı, ana hasar eşik değerine ulaşıncaya kadar (penetrasyon başlangıcına kadar) darbe enerjisiyle

birlikte artmaktadır. Ana hasar eşik değeri aşıldıktan sonra izdüşüm hasar alanının artan darbe enerjisiyle çok fazla değişmediği Şekil 73 ve Şekil 74’de görülmektedir.



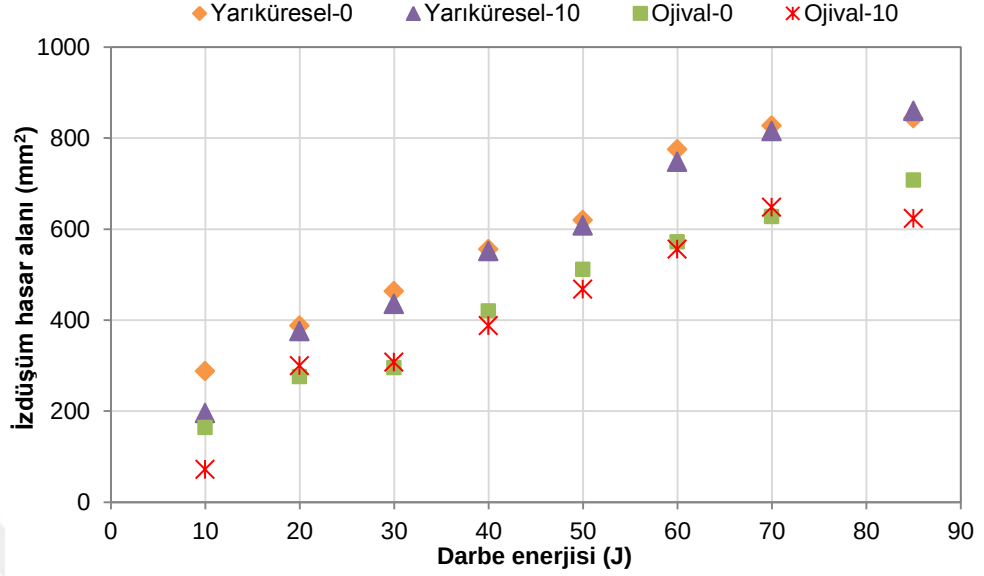
Şekil 73: 10 J-85 J Arası Darbe Enerjilerinde Yarıküresel Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri



Şekil 74: 10 J-85 J Arası Darbe Enerjilerinde Ojival Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait C-Tarama Görüntüleri.

Yarıküresel ve ojival darbe ucuyla 0° ve 10° çarpma açılarında artan darbe enerjilerinde yapılan testlere ait hasar alanı-darbe enerjisi grafiği Şekil 75’de verilmiştir. Darbe enerjisi artmasıyla izdüşümü hasar alanı gözle görülür şekilde artmaktadır. Düşük enerji seviyelerinde izdüşüm hasar alanı lineer bir artış sergilerken, darbe enerji seviyesi arttıkça delinmeden dolayı hasar alanı sabit kalmaktadır.

Fadzullah & Cantwell yaptıkları çalışmada hasar alanın penetrasyonun başlamasıyla birlikte çok fazla artış göstermediğini ortaya koymuşlardır.¹¹²



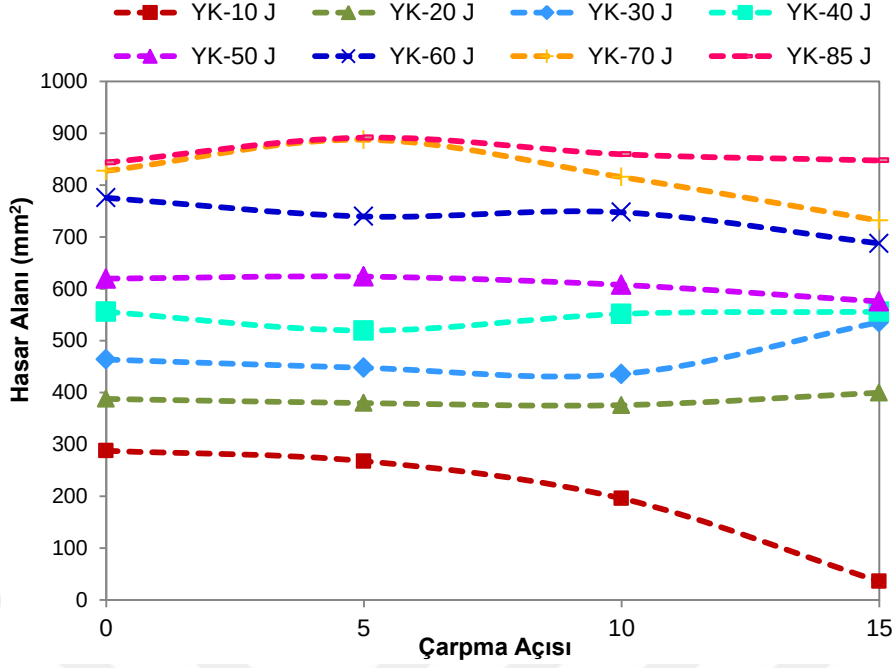
Şekil 75: Darbe Enerjisiyle Numunelerde Oluşan İzdüşüm Hasar Alanının Değişimi.

5.4.3.3. Çarpma Açısının Hasar Yapısına Etkisi

C-tarama görüntülerinden hasar alanlarının hesaplanmasıyla elde edilen hasar alanı-çarpma açısı grafikleri Şekil 76 ve Şekil 77’de verilmiştir. 10 J darbe enerjisiyle yapılan testlerde, çarpma açısının artmasıyla her iki darbe ucunun neden olduğu izdüşüm hasar alanı gözle görülür şekilde azalmaktadır. 60 J’dan daha yüksek darbe enerjilerinde ise, çarpma açısı artıkça izdüşüm hasar alanı her iki darbe ucu için birbirine yakın değerler olarak değişken eğilim sergilemektedir. En düşük izdüşüm hasar alanı 15° çarpma açısıyla 10 J darbe enerjisine maruz kalan numunelerde gerçekleşmiştir.

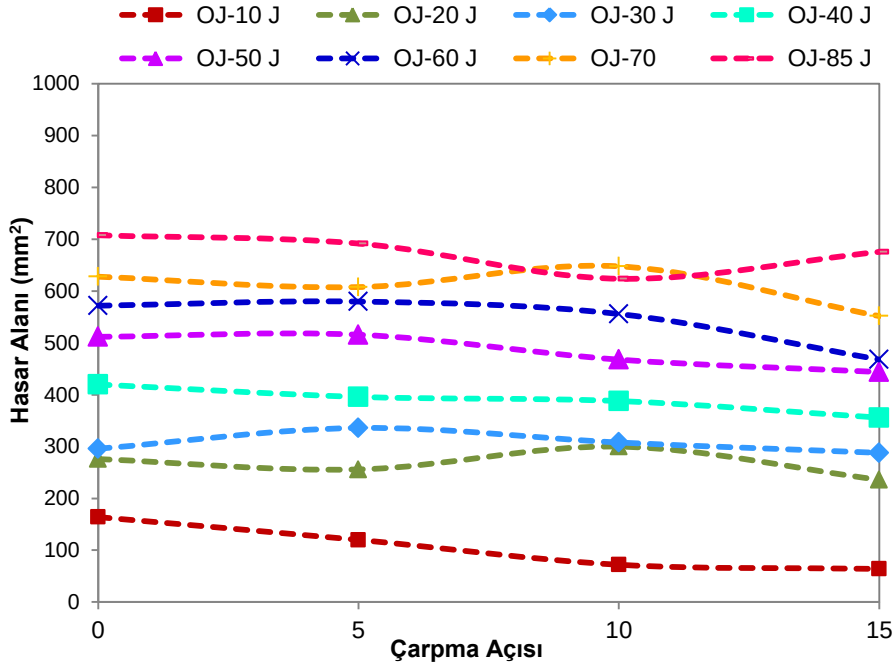
Bütün çarpma açıları için darbe enerjisiyle beraber oluşan hasar alanı büyümektedir. Yarıküresel darbe ucuyla 20 J-60 J darbe enerjilerinde yapılan darbeler sonucu numunelerde oluşan hasar alanları; 0°-10° çarpma açılarında birbirine yakın değerler olarak genel olarak azalma eğilimi gösterirken, 15° çarpma açısında değişkenlik sergilemektedir (Şekil 76).

¹¹² SH Sheikh Md Fadzullah, Wesley J. Cantwell, *age*, s. 3.



Şekil 76: Yarıküresel Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait İzdüşüm Hasar Alanının Darbe Enerjisi ve Çarpma Açısıyla Değişimi

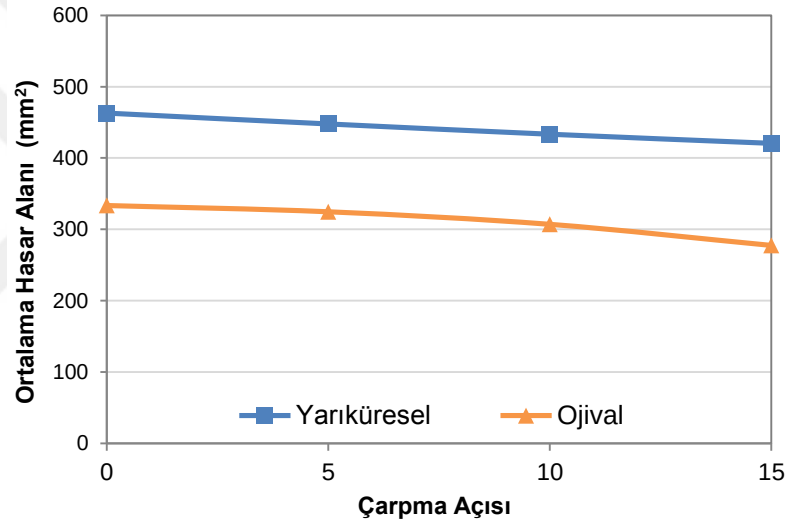
Ojival darbe ucuyla 20 J-60 J darbe enerjilerinde yapılan darbeler sonucu numunelerde oluşan hasar alanlarının çarpma açısı arttıkça birbirine yakın değerler almakla beraber, hafif azaldığı görülmektedir (Şekil 77).



Şekil 77: Ojival Darbe Ucuyla Yapılan Testlere Ait İzdüşüm Hasar Alanının Darbe Enerjisi ve Çarpma Açısıyla Değişimi.

Çalışmamızda elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak, Ivanez ve diğ.'nin sandviç kompozit plakalar üzerine yaptıkları çalışmada; hasar alanının boyutunun 0° , 5° ve 10° çarpma açılarında birbirine yakın, 15° 'de ise daha küçük olduğu ortaya koymuşlardır.¹¹³

Hasar alanının, penetrasyonun başlamasıyla birlikte çok fazla değişim göstermediği ve darbe enerjisinin temel belirleyici parametre olduğu göz önünde bulundurularak, 10-50 J darbe enerjilerinde numunelerde oluşan hasar alanlarının ortalaması alınmıştır. Farklı çarpma açıları için 10-50 J arasındaki darbe enerjilerinde numunelerde meydana gelen izdüşüm hasar alanlarının ortalaması çarpma açısı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca, Mitrevski, Marshall ve Thomso'nun çalışmasıyla¹¹⁴ uyumlu olarak; yarıküresel darbe ucunun ojival darbe ucuna kıyasla daha fazla hasar alanına neden olduğu görülmektedir (Şekil 78).



Şekil 78: 10 J ve 50 J Darbe Enerjileri Arasında Farklı Çarpma Açılarında Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait Ortalama Hasar Alanı-Grafiği

Madjidi, Arnold ve Marshall yaptıkları çalışmada herhangi bir enerji seviyesinde, çarpma açısının artmasıyla hasar alanının ve yüzey çentik derinliğinin azaldığını ortaya koymuşlardır. Düz plakaya yapılan darbenin eğimli plakaya yapılan darbeden daha ağır sonuçlar doğurduğunu ve daha fazla hasara neden olduğunu tespit etmişlerdir.¹¹⁵ Söz konusu çalışmadaki sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

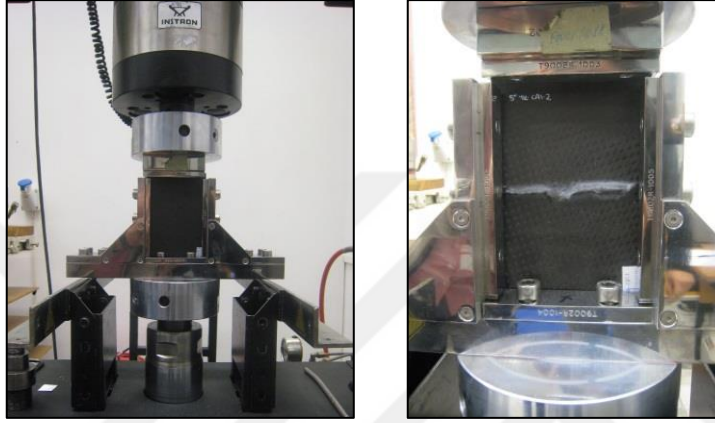
¹¹³ Ines Ivanez ve diğ., **age**, s. 1133.

¹¹⁴ Tom Mitrevski, I. H. Marshall, R. Thomson, **age**, s. 122.

¹¹⁵ Shabnam Madjidi, W. S. Arnold, I. H. Marshall, **age**, s. 114.

5.5. Darbe Sonrası Basma Mukavemeti Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

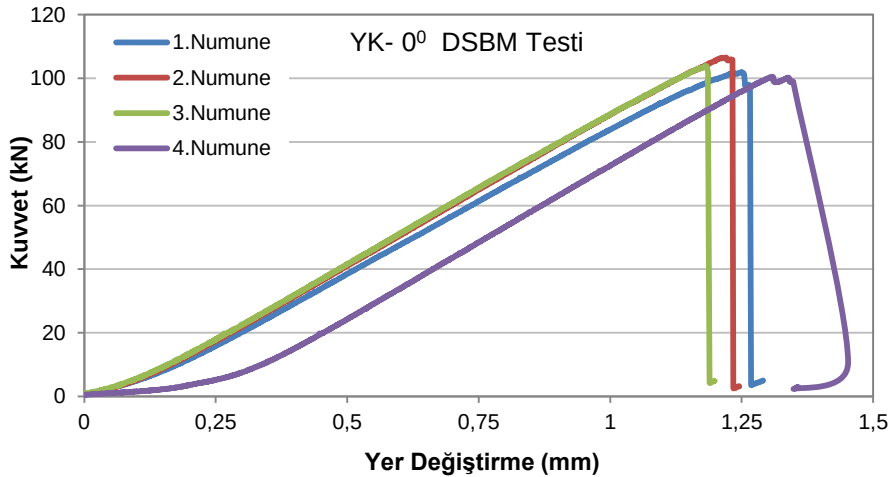
Tahribatsız muayene yöntemlerinin ardından, 30,5 J enerji seviyesinde yarıküresel ve ojival darbe ucu ile farklı çarpma açılarında tekrarlı ağırlık düşürme darbe testlerine maruz kalan numuneler, artakalan basma dayanımlarının belirlenmesi maksadıyla darbe sonrası basma mukavemeti testine tabi tutulmuşlardır (Şekil 79). Her bir darbe ucu ve çarpma açısı için DSBM testine maruz kalan numunelerin ortalama darbe sonrası basma mukavemeti değerleri bulunmuştur.

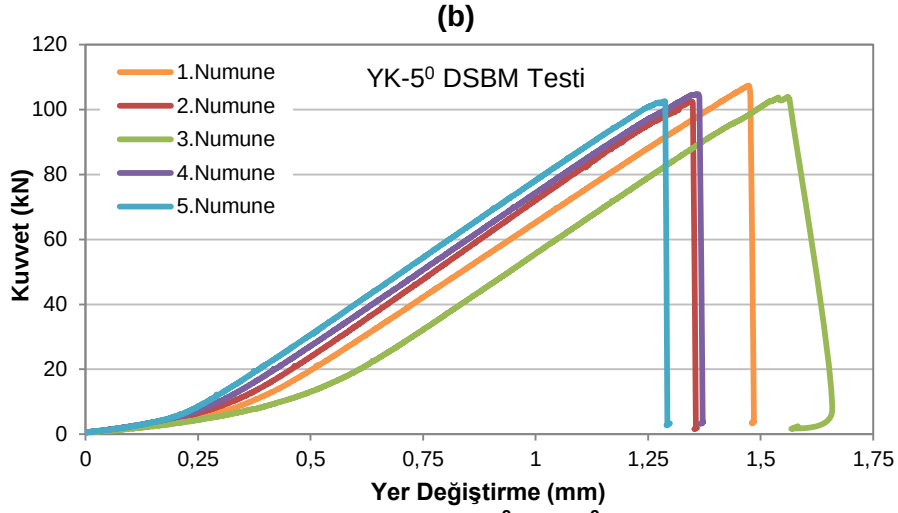


Şekil 79: DSBM Test Cihazı

Yarıküresel darbe ucuyla 0° ve 5° çarpma açılarından darbeye maruz kalan numunelere uygulanan darbe sonrası basma mukavemeti testleri sonucunda cihazdan alınan verilerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri örnek olması açısından Şekil 80'de sunulmuştur. En yüksek kuvvet değerinin numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanan DSBM değerlerinin her bir test grubu için ortalaması alınmıştır.

(a)





Şekil 80: Yarıküresel Darbe Ucu ile (a) 0°, (b) 5° Çarpma Açısıyla Darbeye Maruz Kalan Numunelerin DSBM Test Grafikleri

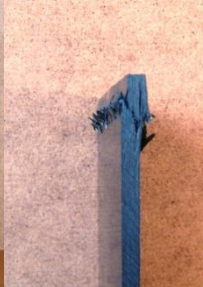
Yük en yüksek değere ulaştığında yüksek bir kırılma sesiyle numunede hasar oluşmaktadır. Numunelerdeki hasar türleri gözle incelendiğinde, DSB hasarının darbe bölgesinde başlayarak numunenin genişliği boyunca kenarlarına doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. Meydana gelen hasar türlerinin tamamı ASTM 7137 standardına göre kabul edilebilir seviyededir. DSBM testi sonrası örneklem olarak seçilen numunelere ait ön, arka ve yan yüzey görüntüleri Tablo 15’de verilmiştir.

Tablo 15: DSBM Testi Yapılan Numunelerin Görüntüleri

Çarpma Açısı	Yarıküresel			Ojival		
	Ön Yüzey (darbe yüzeyi)	Arka Yüzey	Yandan Görünüş	Ön Yüzey (darbe yüzeyi)	Arka Yüzey	Yandan Görünüş
0°						
5°						
10°						
15°						

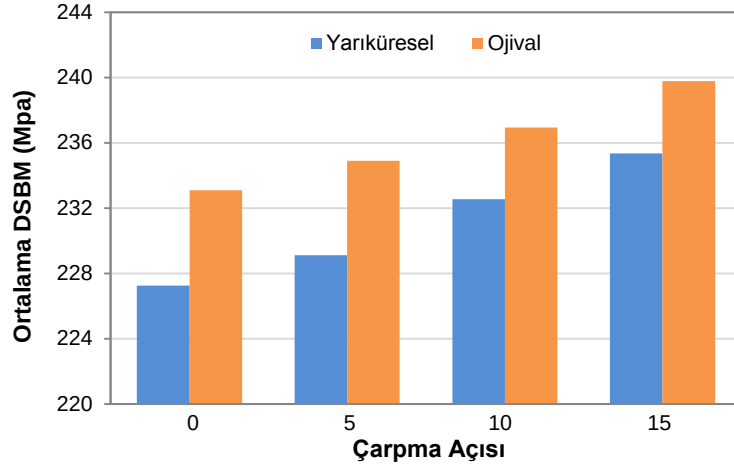
Darbeye maruz kalmamış hasarsız numunenin basma dayanımını ortaya koymak amacıyla iki adet numune basma testine tabi tutulmuştur. Tablo 16'da görüldüğü üzere basma testi sonucunda hasar, numunelerin üst kısa kenarına yakın bölgede meydana gelmiştir.

Tablo 16: Hasarsız Numuneye Yapılan DSBM Testi Sonrası Numunede Oluşan Hasar Görüntüleri

	Ön Yüzey	Arka Yüzey	Yandan Görünüş
Hasarsız Numune-1			
Hasarsız Numune-2			

5.5.1. Çarpma Açısının ve Darbe Ucu Şeklinin DSB Dayanımına Etkisi

Yarıküresel ve ojival darbe ucuyla 30,5 J enerji seviyesinde darbeye maruz kalan numunelere ait ortalama darbe sonrası basma mukavemeti değerlerini gösteren grafik Şekil 81'de verilmiştir. Yarıküresel darbe ucu malzemede daha fazla hasara yol açtığı için darbe sonrası basma mukavemetinin ojival darbe ucuna kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Ojival darbe ucu ile yapılan testlerde numunenin sahip olduğu DSBM değeri, yarıküresel darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerin DSBM değerinden 0° çarpma açısı için %2,6, 5° çarpma açısı için %2,5, 10° ve 15° çarpma açıları için %1,9 kadar fazladır.



Şekil 81: Ortalama DSBM'nin Çarpma Açısıyla Değişimi

Yarıküresel ve ojival darbe ucu ile farklı çarpma açılarında tekrarlı olarak yapılan darbe sonrası basma mukavemeti testlerinden elde edilen ortalama darbe sonrası basma mukavemeti değerleri Tablo 17'de verilmiştir. Çarpma açısının artmasıyla; yarıküresel darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin ortalama DSBM %3,6 artarken, ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin ortalama DSBM %2,87 oranında artmıştır.

Tablo 17: DSBM Test Sonuçları ($E_d=30,5$ J)

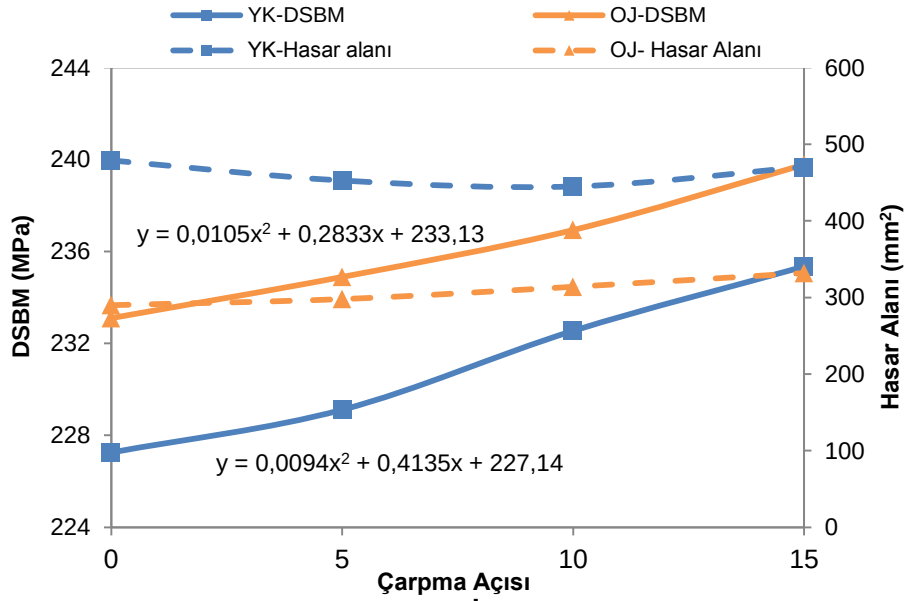
Darbe Ucu Geometrisi	Ortalama DSB Mukavemeti, (Mpa)/ Değişim %				Genel Ortalama/ Toplam Değişim %
	0°	5°	10°	15°	
Yarıküresel	227,25 -	229,11 % 0,82	232,55 % 1,50	235,34 % 1,20	231,06 % 3,6
Ojival	233,10 -	234,89 % 0,77	236,93 % 0,87 %	239,78 % 1,20	236,17 % 2,87
Hasarsız Numune	354,44				

Her iki darbe ucu için çarpma açısı arttıkça numunenin sahip olduğu darbe sonrası basma mukavemeti artmaktadır. Çarpma açısı arttığında numuneye etki eden dikey kuvvet değerinin azalmasına bağlı olarak numunede oluşan hasar miktarı da azalmaktadır. Hasar miktarının azalmasından dolayı numunenin sahip olduğu basma dayanımı artmaktadır.

Yarıküresel ve ojival darbe uçları ile 30,5 darbe enerjisiyle ağırlık düşürme testine tabi tutulan numunelerin ortalama darbe sonrası basma mukavemeti ile numunede oluşan ortalama izdüşüm hasar alanı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 82'de verilmiştir. Normal açılı darbelerde izdüşüm hasar alanı arttığında

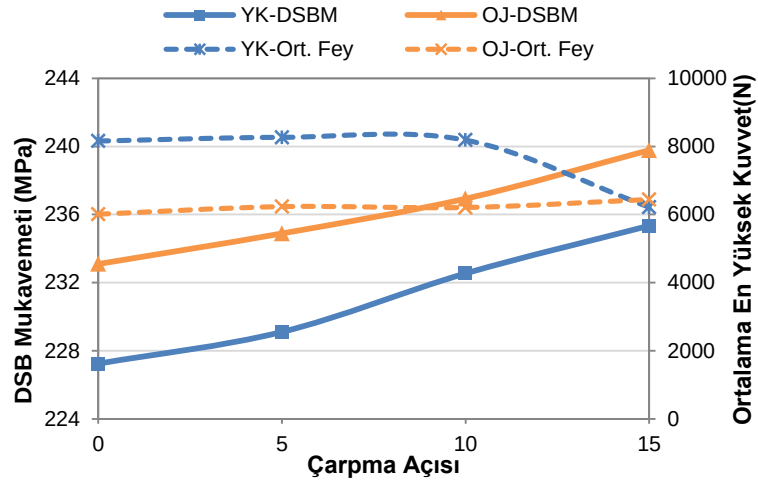
numunenin sahip olduğu DSBM azalması beklenmektedir (Şekil 87). Ancak ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerde çarpma açısının artmasıyla izdüşüm hasar alanı artarken numunenin DSBM değeri de artmaktadır. Bunun nedeni yüzeysel hasarın daha etkin olduğu eğimli darbelerde izdüşüm hasar alanının numunenin toplam hasar miktarını tam olarak yansıtmamasıdır. Eğimli darbelerin numunenin içyapısında daha az hasara neden olduğu, bu sebeple numunede oluşan hasar miktarının azaldığı değerlendirilmektedir.

Yarıküresel darbe ucuyla 0^0 ve 10^0 arasındaki çarpma açılarında yapılan darbelerde izdüşüm hasar alanı nispeten azalırken DSBM artmaktadır. Aynı çarpma açısı aralığında ojival darbe ucunun neden olduğu izdüşüm hasar alanı grafiği ile karşılaştırıldığında, yarıküresel darbe ucunun numunenin içyapısında daha fazla hasara neden olduğu değerlendirilmektedir. 15^0 çarpma açısında ise darbe ucunun kaymasına bağlı olarak numunede oluşan hasar miktarı azalırken izdüşüm hasar alanı ve DSBM artmaktadır.



Şekil 82: Çarpma Açısıyla DSBM ve İzdüşüm Hasar Alanının Değişimi

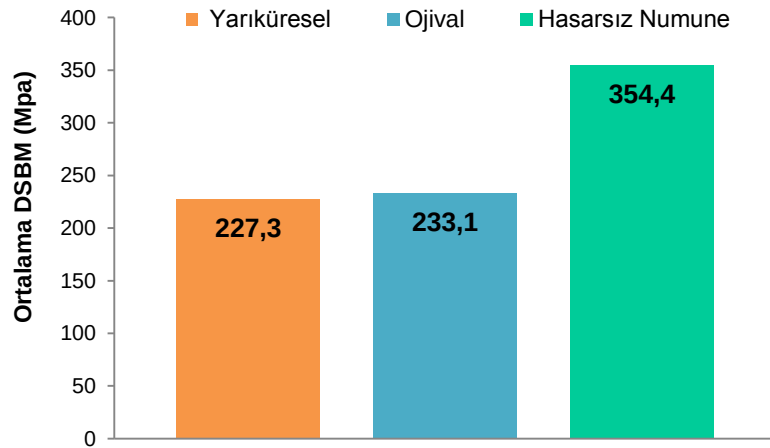
DSBM testi öncesi 30,5 J darbe enerjisi ile ağırlık düşürme darbe testine maruz kalan numunelere ait ortalama en yüksek temas kuvveti değerleri ile DSBM değerleri karşılaştırıldığında; ojival darbe ucunun yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha düşük ortalama en yüksek kuvvet değerine ve daha yüksek darbe sonrası basma mukavemeti değerine neden olduğu Şekil 83'de görülmektedir. En yüksek kuvvet değerinin fazla olması numunede daha fazla hasara neden olmakta, bunun sonucunda numunenin darbe sonrası basma mukavemeti daha az çıkmaktadır.



Şekil 83: Çarpma Açısıyla DSB Mukavemeti ve Ortalama En Yüksek Kuvvetin Değişimi

Hasarsız numunenin basma dayanımı ile yarıküresel ve ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin ortalama basma dayanımı Şekil 84’de verilmiştir. Malzemenin hasar toleransı, darbe sonrası basma mukavemetinin (F_{DSBM}) hasarsız numuneye ait ortalama basma dayanımına oranı olarak tanımlanmaktadır.¹¹⁶

Çarpma açısının 0° olduğu durumda; yarıküresel darbe ucu için DSB dayanımı değerinin hasarsız numunenin basma dayanımının % 36’sı kadar, ojival darbe ucu için ise % 34’ü kadar azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 84: 0° Çarpma Açısı ve 30,5 J Darbe Enerjisiyle Darbeye Maruz Kalan Numunelere ve Hasarsız Numuneye Ait DSBM Değerleri

¹¹⁶ Paul Akangah, Kunigal Shivakumar, “Assessment of Impact Damage Resistance and Tolerance of Polymer Nanofiber Interleaved Composite Laminates”, *Journal of Chemical Science and Technology*, c. 2, s. 2 (2013): s. 51.

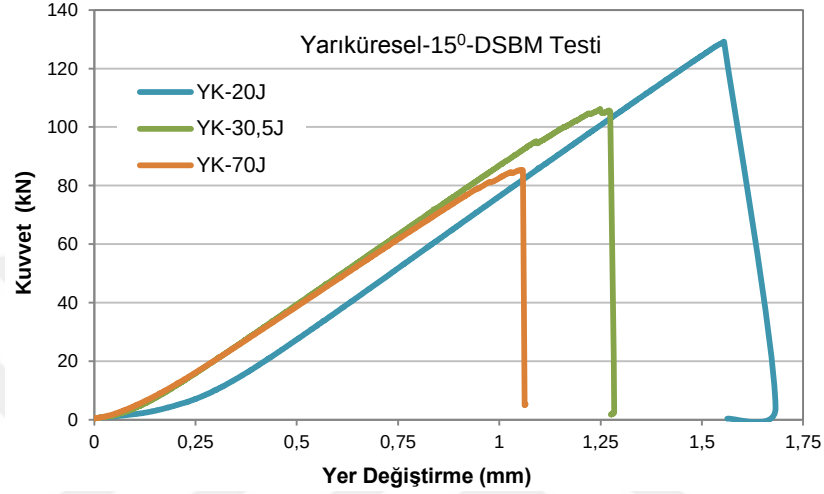
5.5.2. Darbe Enerjisi Artışının DSB Dayanımına Etkisi

Darbe enerjisi ile darbe sonrası basma mukavemeti arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla 20 J ve 70 J darbe enerjisiyle ağırlık düşürme darbe testine maruz kalan numunelere de darbe sonrası basma mukavemeti testi yapılmıştır. 20 J, 30,5 J ve 70 J darbe enerjilerinde darbeye maruz kalan numunelerin DSBM testi sonrası yandan görüntüleri Tablo 18’de verilmiştir. Düşük enerji ile darbeye maruz kalan numunelerde DSBM testi sonrası oluşan hasarın boyutu daha fazladır.

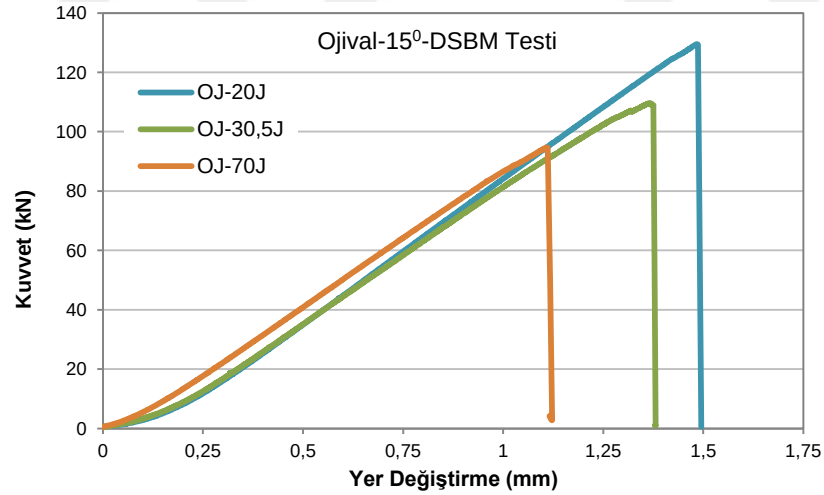
Tablo 18: Farklı Çarpma Açılarında ve 20 J, 30,5 J ve 70 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelerin DSBM Testi Sonrası Yandan Görüntüleri

Darbe Enerjisi	Darbe Ucu Geometrisi	0°	5°	10°	15°
20 J	Yarıküresel				
	Ojival				
30,5 J	Yarıküresel				
	Ojival				
70 J	Yarıküresel				
	Ojival				

15° çarpma açısıyla 20J, 30,5 J ve 70 J enerjilerinde darbeye maruz kalan numunelere uygulanan darbe sonrası basma mukavemeti testlerine ait grafikler Şekil 85 ve Şekil 86’da verilmiştir. Her iki darbe ucu için darbe enerji seviyesi arttıkça numunenin hasara uğraması için gerekli olan en yüksek yükleme değeri azalmaktadır. Sonuç olarak numunenin darbe sonrası basma mukavemeti darbe enerjisi arttıkça azalmaktadır.



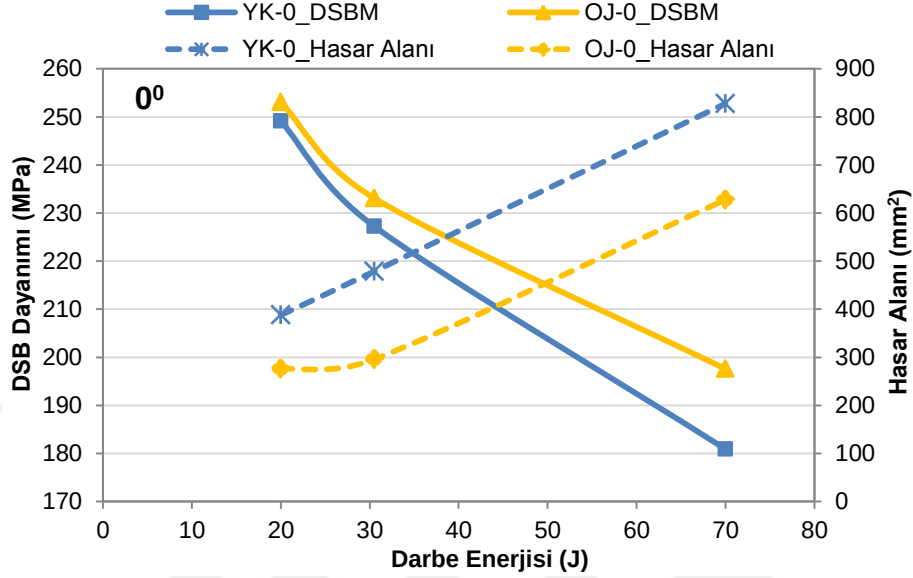
Şekil 85: Yarıküresel Darbe Ucu ve 15° Çarpma Açısıyla 20 J, 30,5 J ve 70J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Grafiği



Şekil 86: Ojival Darbe Ucu ve 15° Çarpma Açısıyla 20 J, 30,5 J ve 70J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Grafiği

Darbe sonrası basma mukavemeti ile hasar alanın darbe enerjisine göre değişimini gösteren grafik Şekil 87’de verilmiştir. Her iki darbe ucu ile 0° çarpma açısında 20 J, 30,5J ve 70 J darbe enerjisiyle yapılan test sonuçları incelendiğinde; darbe enerjisi arttıkça hasar alanın da arttığı, buna bağlı olarak DSBM’nin azaldığı tespit edilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça yarıküresel darbe ucu ile yapılan darbelerin

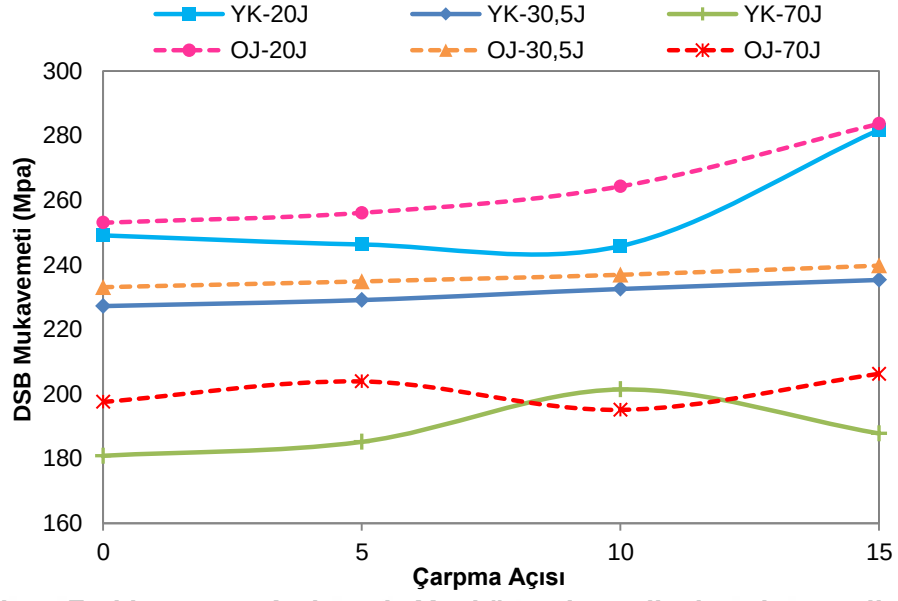
numunenin artakalan dayanımında daha fazla azalmaya neden olduğu görülmüştür. Sonuç olarak yarıküresel darbe ucu yüksek darbe enerjilerinde numunede daha geniş alanda hasarlara yol açmaktadır.



Şekil 87: DSBM ile Hasar Alanının Darbe Enerjisi ile Değişimi

Petit ve diğ.'nin¹¹⁷ çalışma sonuçlarıyla uyumlu olarak, darbe enerjisi arttıkça hasar miktarı da artmakta, dolayısıyla darbe sonrası basma mukavemeti azalmaktadır (Şekil 88). 20 J ve 30,5 J enerji seviyelerindeki darbelerde çarpma açısı arttıkça numunelerin darbe sonrası basma mukavemeti artma eğilimi gösterirken, 70 J darbe enerjisiyle ağırlık düşürme testi yapılan numunelerde ise çarpma açısı arttıkça darbe sonrası basma mukavemeti birbirine yakın değerler olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durum yüksek darbe enerjilerinde numunede büyük miktarda delinme oluşması ve hasar yapılarının benzer olmasından kaynaklanmaktadır. Darbe sonrası basma mukavemetinin değerlendirilmesinde çarpma açısından ziyade darbe enerjisinin daha önemli bir role sahip olduğu görülmektedir.

¹¹⁷ Sandrine Petit ve diğ., *age*, s. 3298.



Şekil 88: Farklı çarpma Açılarında Yarıküresel ve Ojival Darbe Ucu ile 20 J, 30,5 J ve 70 J Darbe Enerjilerinde Darbeye Maruz Kalan Numunelere Ait DSBM Testi Sonuçları



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında $[(+45/-45)/(0/90)]_{3S}$ tabaka dizilimine ve 5'li saten dokuma yapıya sahip karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit levhalar üretilerek, darbe enerji artışının, çarpma açısının ve vurucu uç geometrisinin malzemenin düşük hızlı darbe davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca kompozit plakaların darbe sonrası basma mukavemetleri tespit edilerek malzemede oluşan hasar yapıları değerlendirilmiştir. Tablo 19'da özet halinde sunulan çalışma sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

- **Darbe enerjisi artıkça**, darbe ucunun numuneye temas süresinin, yer değiştirmenin, numunede oluşan çentik derinliğinin ve numune tarafından absorbe edilen enerjinin arttığı görülmektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla en yüksek temas kuvveti ve numunede oluşan hasar alanı belli bir enerji seviyesine kadar artmakta, daha yüksek darbe enerjilerinde birbirine yakın değerlere sahip olmaktadır.

- **Darbe ucu geometrisinin** temas süresi, yer değiştirme ve absorbe edilen enerji üzerindeki etkilerini ortaya koymak için düşük enerjilerde gerçekleşen darbelerle ait eğriler karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Yüksek darbe enerjilerinde yapılan testlerde elde edilen sonuçların ise darbe ucu geometrilerinin karşılaştırılması konusunda değişkenlik gösterdiği görülmüştür (Tablo 19).

- Ojival darbe ucu ile yapılan darbelerin yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazla temas süresine ve yer değiştirme değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ojival darbe ucunun fiberleri kırarak malzemeye nüfuz etmesi sonucunda darbe ucu ile numune arasında oluşan sürtünme temas süresini arttırmaktadır.

- Düşük enerjili ve 0^0 , 5^0 ve 10^0 eğimli darbelerde, ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin yarıküresel darbe ucuna kıyasla daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir.

- Numunede penetrasyon oluşması için gerekli olan enerji miktarı darbe ucu geometrisine ve çarpma açısına bağlı olarak değişim göstermektedir. 0^0 çarpma açısı ile yapılan testlerde ojival darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerin penetrasyon eşik enerjisi, yarıküresel darbe ucu ile darbeye maruz kalan

numunelerinin penetrasyon eşik enerjisi değerinden %12 fazladır. Darbe ucu sivrileştikçe numunenin delinmesi için gerekli olan darbe enerjisi miktarının da arttığı görülmüştür.

- Yapılan ağırlık düşürme darbe testlerinde, yarıküresel darbe ucu tarafından numuneye uygulanan en yüksek temas kuvveti değerinin ojival darbe ucunun sahip olduğundan daha fazladır. Ojival darbe ucunun numuneye daha kolay nüfuz etmesi nedeniyle daha düşük temas kuvvetine neden olduğu değerlendirilmektedir.

- Ojival darbe ucunun sivri yapısından dolayı numunede ilk hasar daha düşük kuvvet değerlerinde gerçekleşmektedir. Yarıküresel darbe ucuyla yapılan darbelerin ojival darbe ucuna kıyasla daha fazla ortalama Hertz kuvveti değerine sahip olduğu bulunmuştur.

- Yarıküresel darbe ucu, ojival darbe ucuna kıyasla numunede daha az çentik derinliğine ancak daha fazla izdüşüm hasar alanına neden olmaktadır. Sonuç olarak, yarıküresel darbe ucunun daha geniş çaplı hasara neden olduğu ve numunenin içyapısında daha fazla delaminasyona sebebiyet verdiği için hasar tesirinin daha fazla olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 19: Sonuçların Karşılaştırması

Parametreler		Darbe Enerjisi ↑	Darbe Ucu Geometrisi			Çarpma Açısı ↑			
						YK		OJ	
			Ed	0°-5°-10°	15°	0°-5°-10°	15°	0°-5°-10°	15°
Düşük Hızlı Darbe Davranışı	Temas Süresi	↑	Ed≤60J	OJ > YK		≈	≈	≈	Ed≤30J Ed≥40J
			Ed≥70J	Değişken	Değişken	≈	≈	≈	≈ ↓
	Yer Değiştirme	↑	Ed≤60J	OJ > YK		≈	Ed≤60J Ed≥70J	≈	Ed≤30J Ed≥40J
			Ed≥70J	Değişken	Değişken	≈	↑ ↓	≈	↑ ↓
	Absorbe Edilen Enerji	↑	Ed≤40J	OJ > YK	YK > OJ	≈	Ed≤40J Ed≥50J	≈	Ed≤30J Ed≥40J
			Ed≥50J	Değişken	Değişken	≈	↑ ≈	≈	↑ ≈
	En Yüksek Temas Kuvveti	↑	YK > OJ			≈	↓	≈	
Hasar Alanı		↑	YK > OJ			↓ (≈)		↓ (≈)	
DSBM		↓	OJ > YK			↑		↑	

- **Çarpma açısının** sonuçlar üzerindeki etkilerini değerlendirecek olursak; yarıküresel darbe ucu için; çarpma açısı arttıkça numunede penetrasyon oluşması için gerekli olan darbe enerjisi miktarının da arttığı tespit edilmiştir. Ojival darbe ucunda ise, çarpma açısı arttıkça darbe ucunun sivri uç yapısına bağlı olarak numune üzerinde daha az kaymasından dolayı penetrasyon eşik enerjisi birbirine yakın değerler almaktadır.

- Yarıküresel darbe ucu ile 0° , 5° ve 10° çarpma açılarında yapılan testlere ait kuvvet-zaman-enerji eğrileri benzer davranış sergilerken, 15° çarpma açısı ile yapılan testlerde numune tarafından absorbe edilen enerjinin düşük darbe enerjilerinde daha fazla olduğu ve en yüksek temas kuvveti değerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ojival darbe ucuna ait kuvvet-zaman-enerji grafikleri incelendiğinde ise; çarpma açısı ile en yüksek temas kuvveti arasında doğrusal bir ilişki olmadığı, numune tarafından absorbe edilen enerjinin düşük darbe enerjilerinde ve 15° çarpma açısında yapılan testlerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 15° çarpma açısı ile 40 J ve üzerindeki enerjilerde yapılan darbelerde temas süresinin azaldığı, diğer durumlarda benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 19).

- Çarpma açısı ile darbe ucunun yer değiştirmesi arasındaki ilişki darbe enerjisine göre değişkenlik sergilemektedir. Yarıküresel darbe ucunun 15° çarpma açısındaki kayma hareketi 10-60J darbe enerjilerinde etkili olmakta ve darbe ucunun yer değiştirmesinde artışa neden olmaktadır. 70 J ve üzerindeki darbe enerjilerinde ise darbe ucunun kayma davranışının etkisini kaybetmesine bağlı olarak, 15° çarpma açısında darbe ucunun yer değiştirme miktarı azalmaktadır. Ojival darbe ucunda ise; benzer davranış 40 J ve üzerindeki darbe enerjilerinde görülmektedir

- Herhangi bir darbe enerjisi için normal çarpmalar, açılı çarpmalara kıyasla daha fazla hasara neden olmaktadır. 10-50 J arasındaki darbe enerjilerinde yapılan testlerde numunelerde meydana gelen izdüşüm hasar alanlarının ortalaması çarpma açısı arttıkça birbirine yakın değerler almakla birlikte hafif azalmaktadır. Farklı darbe enerjilerinde yapılan değerlendirmelerde ise, çarpma açısının artmasıyla izdüşüm hasar alanının birbirine yakın değerler almakla beraber, darbe enerjisine göre artma ve azalma eğilimi gösterdiği değerlendirilmektedir.

- **Darbe sonrası basma mukavemeti** (DSBM) darbe enerjisinin artmasıyla birlikte, darbe hasarı ve delaminasyon oluşumuna bağlı olarak büyük ölçüde azalmaktadır.

- Farklı darbe ucu geometrileri, malzemelerin darbe sonrası dayanım özelliklerini etkileyen farklı hasar yapılarının oluşmasına neden olmaktadır.

Yarıküresel darbe ucunun ojival darbe ucuna kıyasla numunede daha fazla en yüksek kuvvet değerine ve daha fazla hasara neden olmasının sonucu olarak, numunenin darbe sonrası basma mukavemeti değerinin daha düşük çıktığı değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, ojival darbe ucu ile yapılan testlerde numunenin sahip olduğu DSBM değerinin, yarıküresel darbe ucu ile darbeye maruz kalan numunelerin DSBM değerinden 0° çarpma açısı için %2,6, 5° çarpma açısı için %2,5, 10° ve 15° çarpma açıları için %1,9 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Çarpma açısının artmasıyla; yarıküresel darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin ortalama DSBM %3,6 artarken, ojival darbe ucuyla darbeye maruz kalan numunelerin ortalama DSBM %2,87 oranında artmıştır. En yüksek DSB mukavemeti değerleri 15° çarpma açısıyla darbeye maruz kalan numunelerde gözlemlenmiştir.

- Darbe enerjisi arttıkça numunede oluşan hasar miktarı da artmakta, dolayısıyla darbe sonrası basma mukavemeti azalmaktadır. Düşük enerji seviyelerindeki darbelerde çarpma açısı arttıkça numunelerin darbe sonrası basma mukavemeti artarken, yüksek darbe enerjilerinde ise çarpma açısı ile darbe sonrası basma mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır.

- Sonuç olarak; 1 kg ağırlığındaki bir malzemenin 1 m yükseklikten kompozit yapı üzerine düşmesi sonucunda oluşan yaklaşık 10 J şiddetindeki darbe, kompozit yapının dayanımında ciddi azalmaya neden olabilmektedir. Bu nedenle kompozit bir yapının üzerine düşme riski olan malzemelerin ve donanımların bağlantılarının uygun yapılması ve el aletleri kullanılırken dikkatli olunması üzerinde durulması gereken konulardandır. Bu kapsamda, sanayici, üretici, kullanıcı ve ilgili diğer personel tarafından tabakalı kompozit malzemelerin üretim, kullanım, taşıma ve bakım esnasında düşük hızlı darbelerle maruz kalmalarının önlenmesi için her türlü tasarımsal ve donanımsal faktörlerin değerlendirilerek gerekli emniyet tedbirlerin alınması, kompozit yapının ömür devri boyunca emniyetle kullanılması açısından büyük öneme sahiptir.

6.2. Öneriler

- Farklı tabaka dizilimine ve takviye malzemesine sahip kompozit numunelerin eğimli darbe durumunda ortaya koyacağı darbe davranışları ve artakalan dayanımları karşılaştırılarak eğimli darbelerde tabaka diziliminin etkisi incelenebilir.

- Kompozit malzemenin eğimli olarak gerçekleşen düşük hızlı darbe davranışı ve numunelerde oluşan delaminasyon hasarı, daha düşük darbe enerjisi seviyelerinde daha ayrıntılı olarak analiz edilerek çarpma açısının delaminasyonlar üzerindeki etkileri incelenebilir.

- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak eğimli darbeler sonucunda malzemenin sergileyeceği darbe davranışının sayısal modellemesi yapılabilir. Ayrıca, çarpma açısının malzemenin darbe davranışı ve hasar yapıları üzerinde etkileri teorik olarak hesaplanarak nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılabilir. Böylece, eğimli darbe testleri esnasında ağırlık düşürme test cihazının kılavuz rayları üzerine uygulanan yatay kuvvet bileşeni de analitik yöntemlerle hesaplanarak malzemenin darbe davranışı belirlenirken göz önünde bulundurulabilir.

- Darbeye maruz kalan numunelerde oluşan hasar yapıları mikroskopik boyutta detaylı olarak incelenerek malzemenin içyapısında meydana gelen hasarlar tespit edilebilir. Böylece çarpma açısının malzemenin hasar davranışına olan etkileri ortaya koyulabilir.

KAYNAKÇA

- Abrate, Serge. **Impact on Composite Structures**. Cambridge University Press, 2005.
- _____. "Impact On Laminated Composite Materials". **Applied Mechanics Reviews**. c. 44. s. 4 (1991): ss. 155-190.
- Agrawal, Sandeep, Kalyan Kumar Singh, P. K. Sarkar. "Impact Damage on Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composite—A Review". **Journal of Composite Materials**. c. 48. s. 3 (2014): ss. 317-332.
- Akangah, Paul, Kunigal Shivakumar. "Assessment of Impact Damage Resistance and Tolerance of Polymer Nanofiber Interleaved Composite Laminates". **Journal of Chemical Science and Technology**. c. 2. s. 2 (2013): ss. 39-52.
- Aktaş, Mehmet, Cesim Ataş, Bülent Murat İçten, Ramazan Karakuzu. "An Experimental Investigation of the Impact Response of Composite Laminates". **Composite Structures**. c. 87. s. 4 (2009): ss. 307-313.
- ASTM D7136/D7136M: Standard Test Method for Measuring The Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. (West Conshohocken: ASTM International, 2012).
- ASTM D3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (West Conshohocken: ASTM International, 2000).
- ASTM D7137/D7137M: Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. (West Conshohocken: ASTM International, 2007).
- ASTM D790/D790M: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. (West Conshohocken: ASTM International, 2010).
- Ataş, Cesim, Onur Sayman. "An Overall View on Impact Response of Woven Fabric Composite Plates". **Composite Structures**. c. 82. s. 3 (2008): ss. 336-345.
- Bailie, J. Kim., Robert P. Ley, Arun Pasricha. "A Summary and Review of Composite Laminate Design Guidelines". NASA Langley Research Center, Hampton, VA. Technical Report No. NASA, NAS1-19347, 1997.
- Belingardi, Giovanni, Roberto Vadori. "Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates". **International Journal of Impact Engineering**. c. 27. s. 2 (2002): ss. 213-229.

- Bossi, Richard H., Giurgiutiu, Victor. "Nondestructive Testing of Damage in Aerospace Composites". ***Polymer Composites in the Aerospace Industry***. ed. P.E. Irving, Constantinos Soutis. Elsevier -- Woodhead Publishing, 2014: ss. 413-448.
- Cantwell, Wesley J., John Morton. "Geometrical Effects in the Low Velocity Impact Response of CFRP". ***Composite Structures***. c. 12. s. 1 (1989): ss. 39-59.
- _____. "The Impact Resistance of Composite Materials—A Review". ***Composites***. c. 22. s. 5 (1991): ss. 347-362.
- Davies, Glyn A. O., Dennis Hitchings, Gang Zhou. "Impact Damage and Residual Strengths of Woven Fabric Glass/Polyester Laminates". ***Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***. c. 27. s. 12 (1996): ss. 1147-1156.
- De Freitas, Manuel, Luis Reis. "Failure Mechanisms on Composite Specimens Subjected to Compression After Impact". ***Composite Structures***. c. 42. s. 4 (1998): ss. 365-373.
- Delfosse, Daniel, Anoush Poursartip. "Energy-Based Approach to Impact Damage in CFRP Laminates". ***Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***. c. 28. s. 7 (1997): ss. 647-655.
- Duell, Joshua M. "Impact Testing of Advanced Composites". ***Advanced Topics in Characterization of Composites***. ed. Michael R. Kessler. Trafford Publishing, 2004: ss. 97-112.
- Evcı, Celal. Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi. (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010).
- Evcı, Celal. "Thickness-Dependent Energy Dissipation Characteristics of Laminated Composites Subjected to Low Velocity Impact". ***Composite Structures***. s. 133 (2015): ss. 508-521.
- Evcı, Celal. Müfit Gülgeç. "An Experimental Investigation on the Impact Response of Composite Materials". ***International Journal of Impact Engineering***. s. 43 (2012): ss. 40-51.
- Fadzullah, SH Sheikh Md, Wesley J. Cantwell. "The Effect of Angle of Incidence on the Impact Response of Composites and Sandwich Structures". 15th European Conference on Composite Materials, 2012, Venice, Italy.
- Ghelli, Daniele, Giangiacomo Minak. "Low Velocity Impact and Compression After Impact Tests on Thin Carbon/Epoxy Laminates". ***Composites Part B: Engineering***. c. 42. s. 7 (2011): ss. 2067-2079.
- González, Emilio V., Pere Maimí, Pedro Camanho, Claudio S. Lopes, Norbert Blanco. "Effects of Ply Clustering in Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading". ***Composites Science and Technology***. c. 71. s. 6 (2011): ss. 805-817.

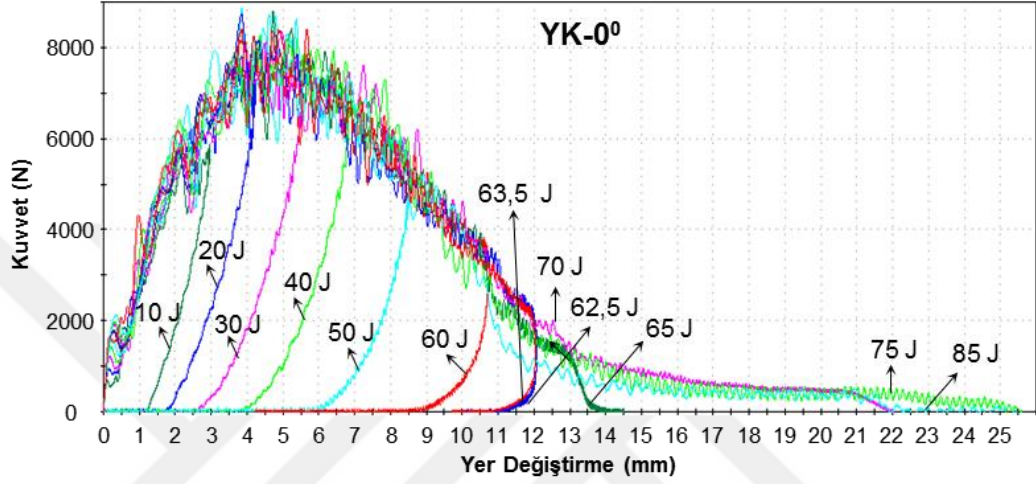
- Hong, Seongho, Dashin Liu. "On the Relationship Between Impact Energy and Delamination Area". **Experimental Mechanics**. c. 29. s. 2 (1989): ss. 115-120.
- Hosseinzadeh, Ramin, Mahmood M. Shokrieh, Larry Lessard. "Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts". **Composites Science and Technology**. c. 66. s. 1 (2006): ss. 61-68.
- Hosur, Mahesh, M. Adya, J. Alexander, Shaik Jeelani, Uday Vaidya, A. Mayer. "Studies on Impact Damage Resistance of Affordable Stitched Woven Carbon/Epoxy Composite Laminates". **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. c. 22. s. 10 (2003): ss. 927-952.
- İçten, Bülent Murat, Gören Kiral. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Parametrelerinin Darbe Sonrası Bası Mukavemetine Etkilerinin İncelenmesi. (TÜBİTAK, Proje No:107M591, 2010).
- İçten, Bülent Mutlu. Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Low Velocity impact. (Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2006).
- Ivañez, Ines, Marta Maria Moure, Shirley K. Garcia-Castillo, Sonia Sanchez-Saez. "The Oblique Impact Response of Composite Sandwich Plates". **Composite Structures**. s. 133 (2015): ss. 1127-1136.
- Jones, Robert M. **Mechanics of Composite Materials**. CRC Press, 2014.
- Kara, Memduh. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı. (Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012).
- Karaca, Dilek. Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelemindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010).
- Karakuzu, Ramazan, Bülent Murat İçten, Mehmet Aktaş, Mustafa Toparlı, Cesim Aktaş, Yusuf Arman. Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi. (TÜBİTAK, Proje No : 104M426, İzmir, 2007).
- Karakuzu, Ramazan, Emre Erbil, Mehmet Aktaş. "Impact Characterization of Glass/Epoxy Composite Plates: An Experimental and Numerical Study". **Composites Part B: Engineering**. c. 41. s. 5 (2010): ss. 388-395.
- Kondo, Hiroshi, Yuichiro Aoki, Katsumi Hiraoka, Hiroshi Hatta. "Residual Indentation, Delamination Area and CAI Strength of CFRP Laminates Under Low-Velocity Impact". In Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, 2007, Kyoto, Japan.
- Lee, Sang Min, Jae Seung Cheon, Yong Taek Im. "Experimental and Numerical Study of the Impact Behavior of SMC Plates". **Composite Structures**. c. 47. s. 1 (1999): ss. 551-561.
- Liu, Dahsin. "Characterization of Impact Properties and Damage Process of Glass/Epoxy Composite Laminates". **Journal of Composite Materials**. c. 38. s. 16 (2004): ss. 1425-1442.

- Liu, Dahsin, Basavaraju B. Raju, Xinglai Dang. "Size Effects on Impact Response of Composite Laminates". *International Journal of Impact Engineering*. c. 21. s. 10 (1998): ss. 837-854.
- Long, Shuchang, Xiaohu Yao, Xiaoqing Zhang. "Delamination Prediction in Composite Laminates under Low-Velocity Impact". *Composite Structures*. s. 132 (2015): ss. 290-298.
- Madjidi, Shabnam., W. S. Arnold, I. H. Marshall. "Damage Tolerance of CSM Laminates Subject to Low Velocity Oblique Impacts". *Composite Structures*. c. 34. s. 1 (1996): ss. 101-116.
- Mitrevski, Tom, I. H. Marshall, Rodney Thomson, Rhys Jones, Brendan Whittingham. "The Effect of Impactor Shape On The Impact Response of Composite Laminates". *Composite Structures*. c. 67. s. 2 (2005): ss. 139-148.
- Mitrevski, Tom, I. H. Marshall, R. Thomson. "The Influence of Impactor Shape On The Damage to Composite Laminates". *Composite Structures*. c. 76. s. 1 (2006): ss. 116-122.
- Mrazova, Maria. "Advanced Composite Materials of the Future in Aerospace Industry". *Incas Bulletin*. c. 5. s. 3 (2013): ss. 139-150.
- Naik, Niranjan K., Swaroop V. Borade, Hemendra Arya, Meduri Sailendra, S. V. Prabhu. "Experimental Studies On Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Effect of Impact Parameters". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. c. 21. s. 15 (2002): ss. 1347-1362.
- Naik, Niranjan K., P. Shrira. "Composite Structures Under Ballistic Impact". *Composite Structures*. c. 66. s. 1 (2004): ss. 579-590.
- Naik, Niranjan K., Y. Chandra Sekher, Sailendra Meduri. "Damage In Woven-Fabric Composites Subjected to Low-Velocity Impact". *Composites Science and Technology*. c. 60. s. 5 (2000): ss. 731-744.
- Nettles, Alan T. "Damage Tolerance of Composite Laminates From an Empirical Perspective". NASA Technical Reports Server, 2010. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100005132.pdf> [Erişim Tarihi: 17.04.2017].
- Petit, Sandrine, C. Bouvet, A. Bergerot, J. J. Barrau. "Impact and Compression After Impact Experimental Study of a Composite Laminate With a Cork Thermal Shield". *Composites Science and Technology*. c.67. s. 15 (2007): ss. 3286-3299.
- Robinson, Paul, Glyn A. O. Davies. "Impactor Mass and Specimen Geometry Effects In Low Velocity Impact of Laminated Composites". *International Journal of Impact Engineering*. c. 12. s. 2 (1992): ss. 189-207.
- Rosenberg, Zvi, Erez Dekel. *Terminal Ballistics*. 2.bs. Berlin: Springer, 2012.
- Shivakumar, Kunigal N., Wolf Elber, Walter Illg. "Prediction of Low-Velocity Impact Damage In Thin Circular Laminates". *AIAA Journal*. c. 23. s. 3 (1985): ss. 442-449.

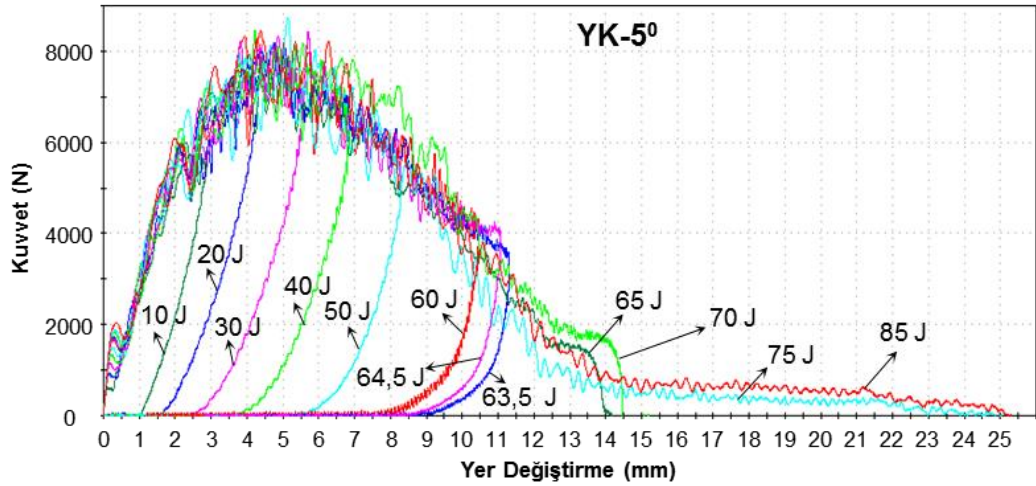
- Shyr, Tien Wei, Yu Hao Pan. "Impact Resistance and Damage Characteristics of Composite Laminates". **Composite Structures**. c. 62. s. 2 (2003): ss. 193-203.
- Siow, Y. P., Victor P. W. Shim. "An Experimental Study of Low Velocity Impact Damage In Woven Fiber Composites". **Journal of Composite Materials**. c. 32. s. 12 (1998): ss. 1178-1202.
- Sjoblom, Peter O., J. Timothy Hartness, Tobey M. Cordell. "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials". **Journal of Composite Materials**. c. 22. s. 1 (1988): ss. 30-52.
- Soutis, Constantinos. "Fibre Reinforced Composites in Aircraft Construction". **Progress in Aerospace Sciences**. c. 41. s. 2 (2005): ss. 143-151.
- Strait, Larry H., Mark L. Karasek, Maurice F. Amateau. "Effects of Stacking Sequence On The Impact Resistance of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Toughened Epoxy Laminates". **Journal of Composite Material**. c. 26. s. 12 (1992): ss. 1725-1740.
- Vaidya, Uday K. "Impact Response of Laminated and Sandwich Composites". **Impact Engineering of Composite Structures**. ed. Serge Abrate. Birmingham: Springer Vienna, 2011: ss. 97-191.
- "Woven materials". <http://www.favonius.com/soaring/materials/material.htm> [Erişim tarihi: 21 Mart 2016].
- "A380-800 Materials Overview". <https://www.flightglobal.com/assets/getAsset.aspx?ItemID=9116> [Erişim tarihi: 25 Nisan 2016].
- Zhou, Gang, John C. Lloyd, James J. McGuirk. "Experimental Evaluation of Geometric Factors Affecting Damage Mechanisms In Carbon/Epoxy Plates". **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. c. 32. s. 1 (2001): ss. 71-84.
- Zhou, Jin, Mohamad Z. Hassan, Zhongwei Guan, Wesley J. Cantwell. "The Low Velocity Impact Response of Foam-Based Sandwich Panels". **Composites Science and Technology**. c. 72. s. 14 (2012): ss. 1781-1790.

EKLER

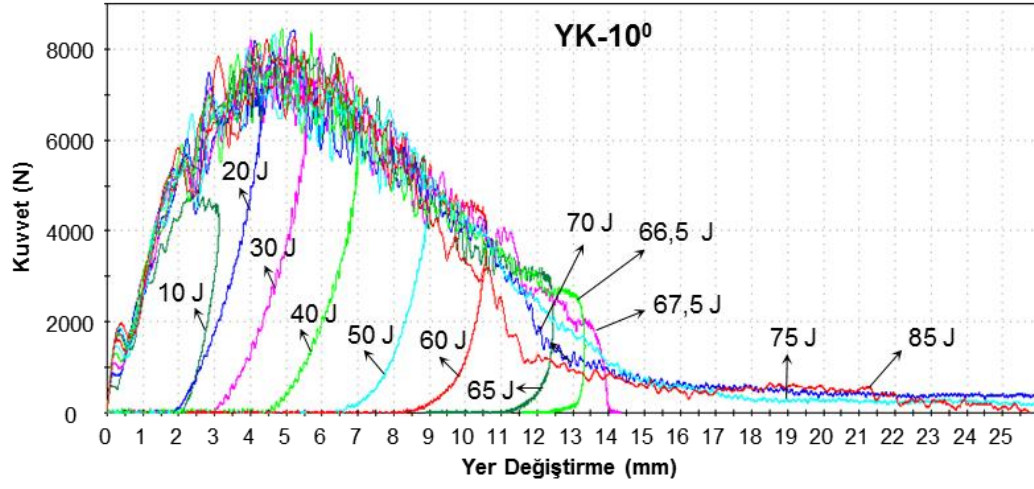
Ek 1. Ağırlık Düşürme Darbe Testlerine ait Kuvvet-Yer Değişirme Grafikleri



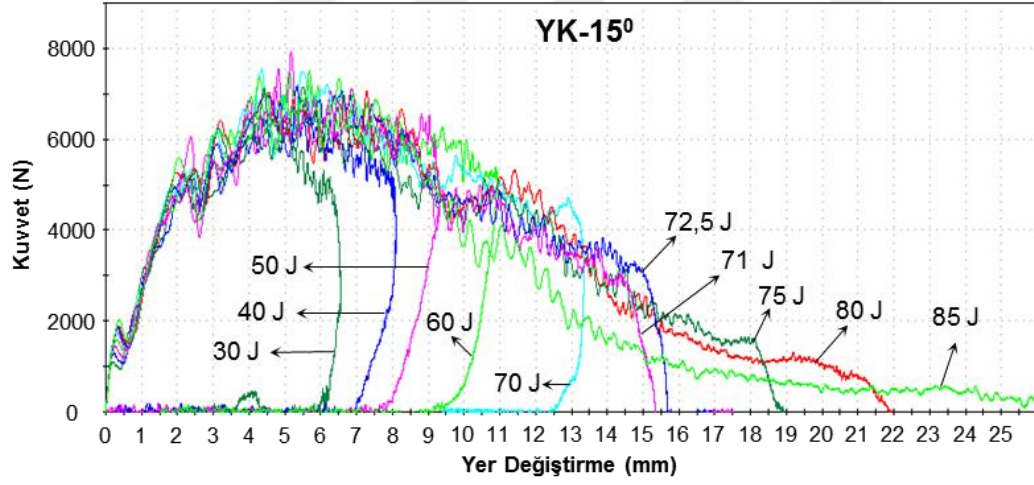
Şekil 89: Yarıküresel Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değişirme Eğrileri



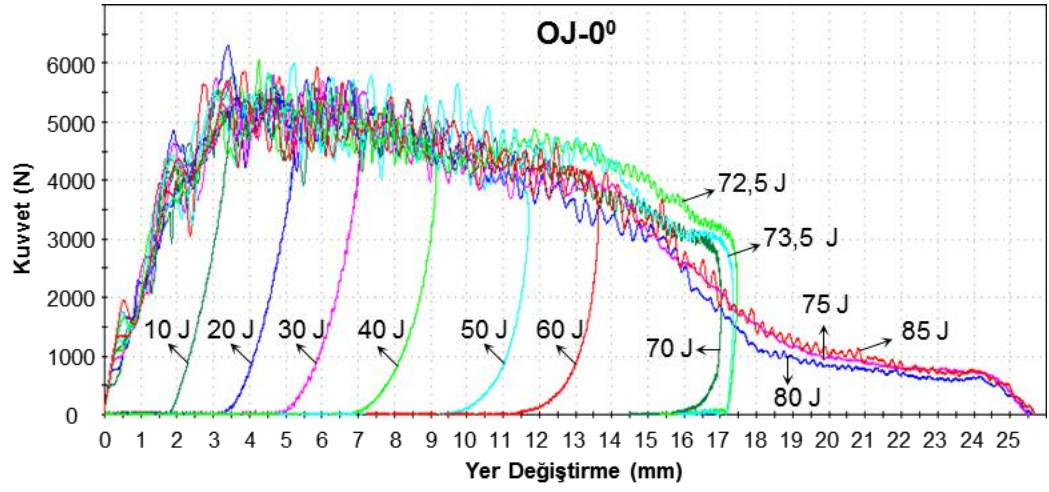
Şekil 90: Yarıküresel Darbe Ucu ile 5° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değişirme Eğrileri



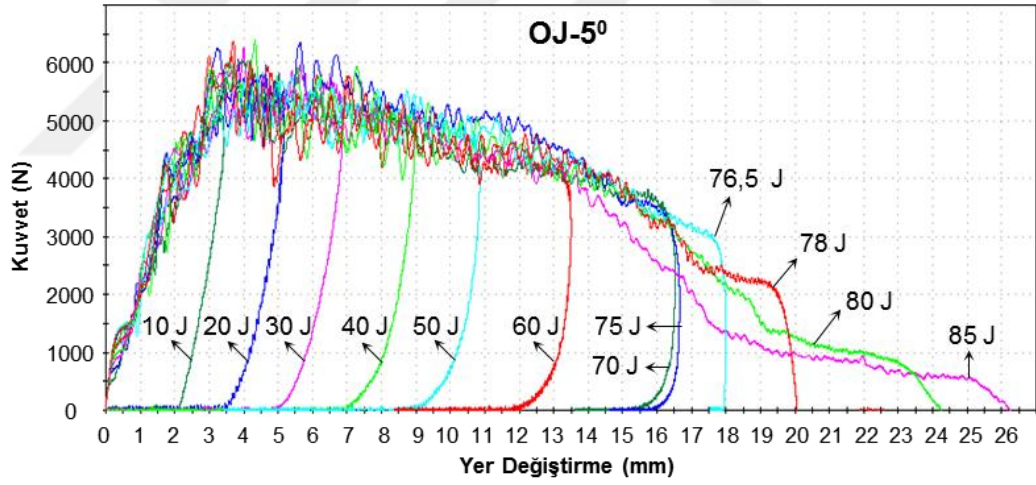
Şekil 91: Yarıküresel Darbe Ucu ile 10° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri



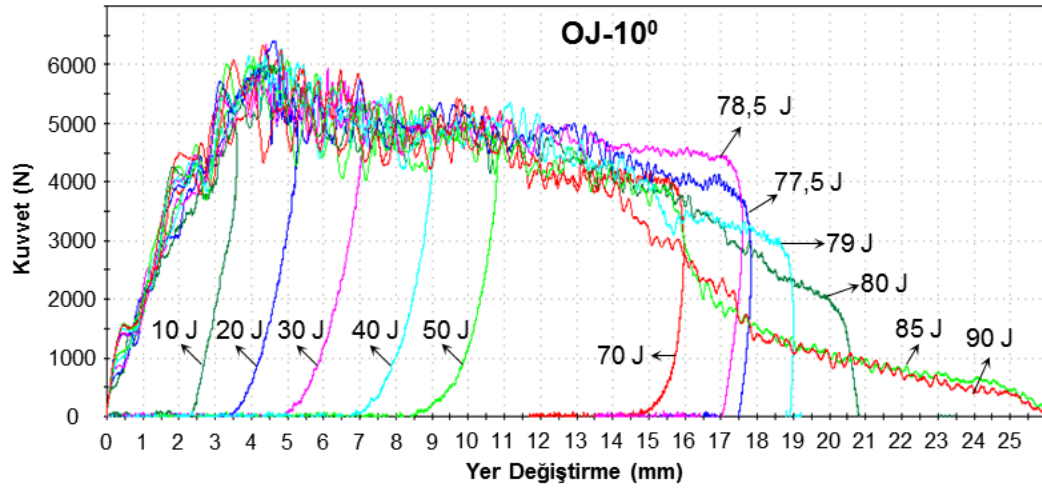
Şekil 92: Yarıküresel Darbe Ucu ile 15° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri



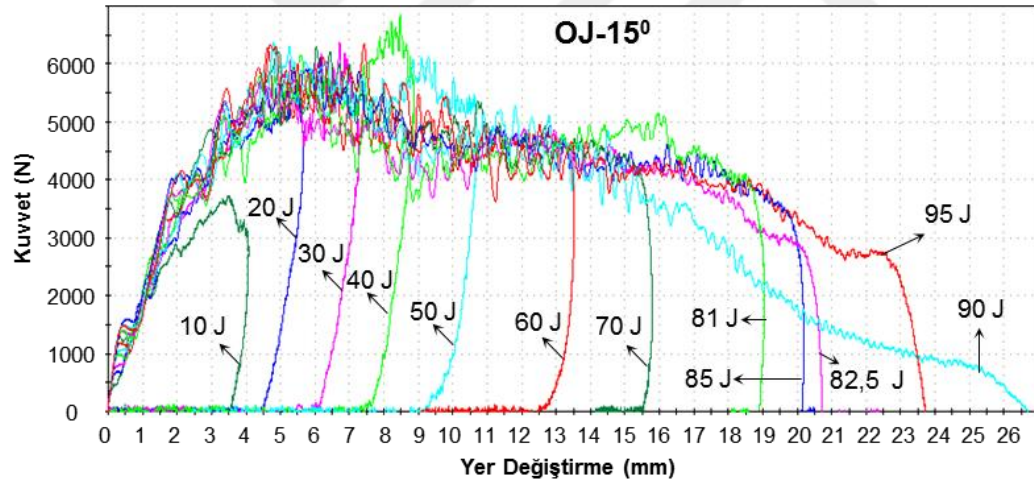
Şekil 93: Ojival Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri



Şekil 94: Ojival Darbe Ucu ile 5° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

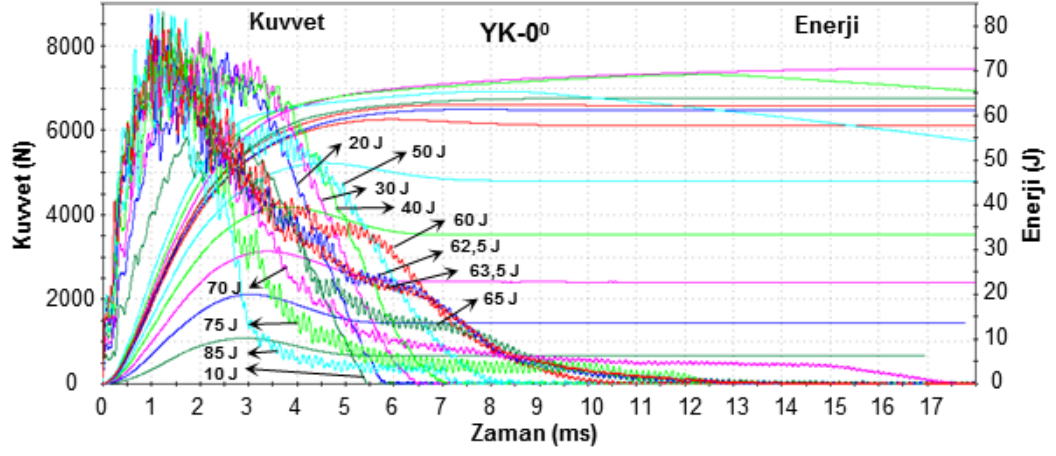


Şekil 95: Ojival Darbe Ucu ile 10° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

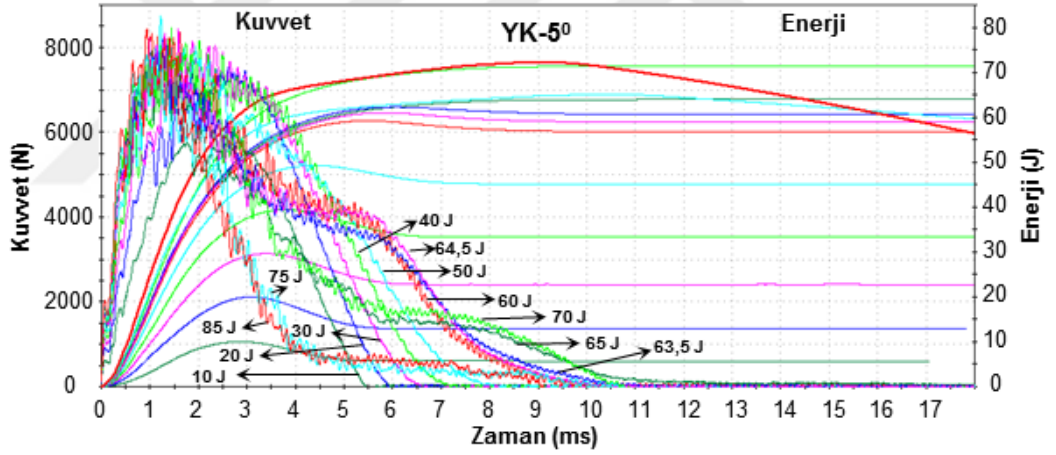


Şekil 96: Ojival Darbe Ucu ile 15° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri

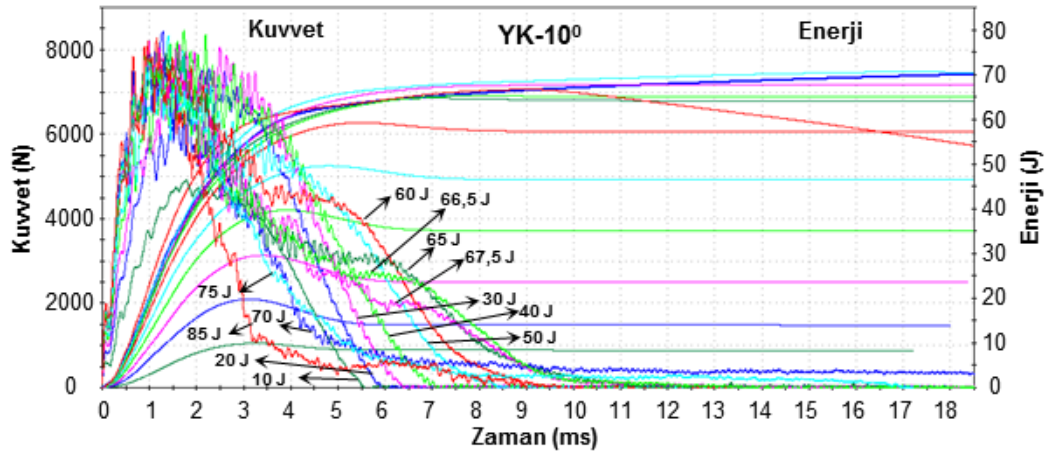
Ek 2. Ağırlık Düşürme Darbe Testlerine ait Kuvvet-Zaman-Enerji Grafikleri



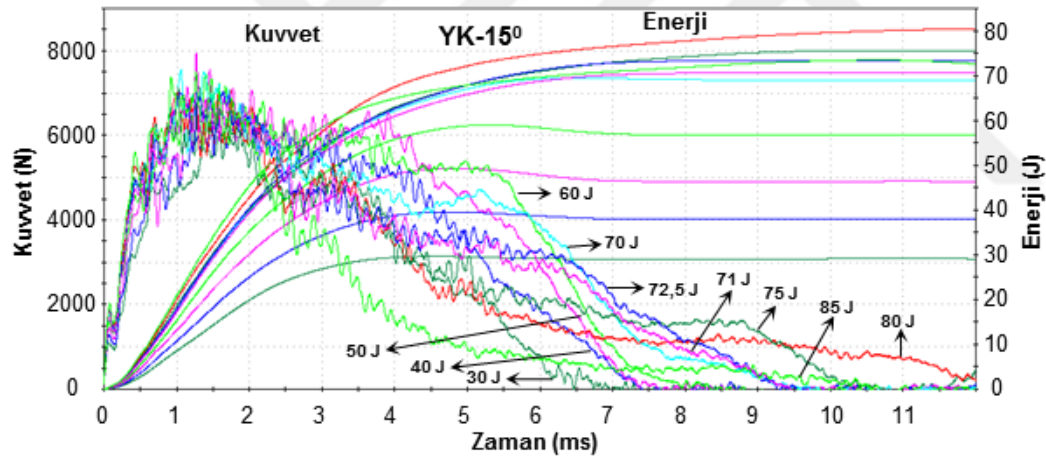
Şekil 97: Yarıküresel Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



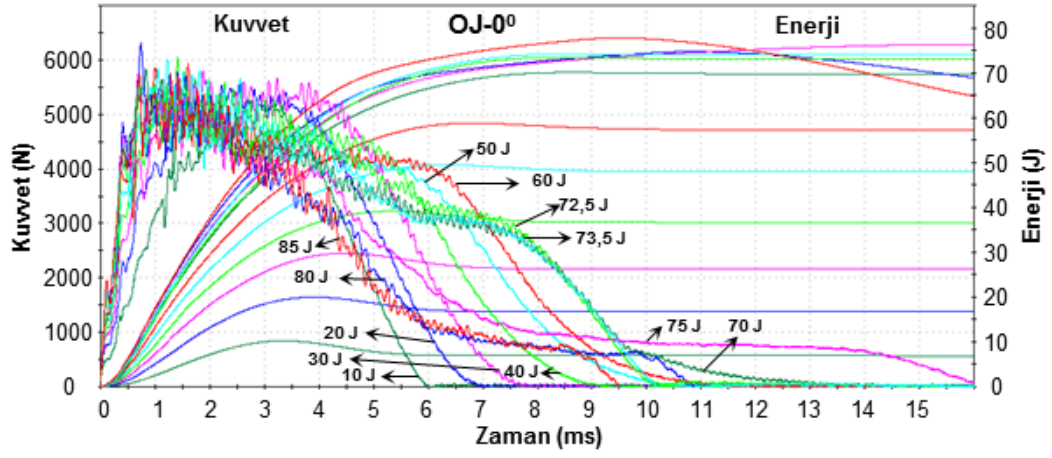
Şekil 98: Yarıküresel Darbe Ucu ile 5° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



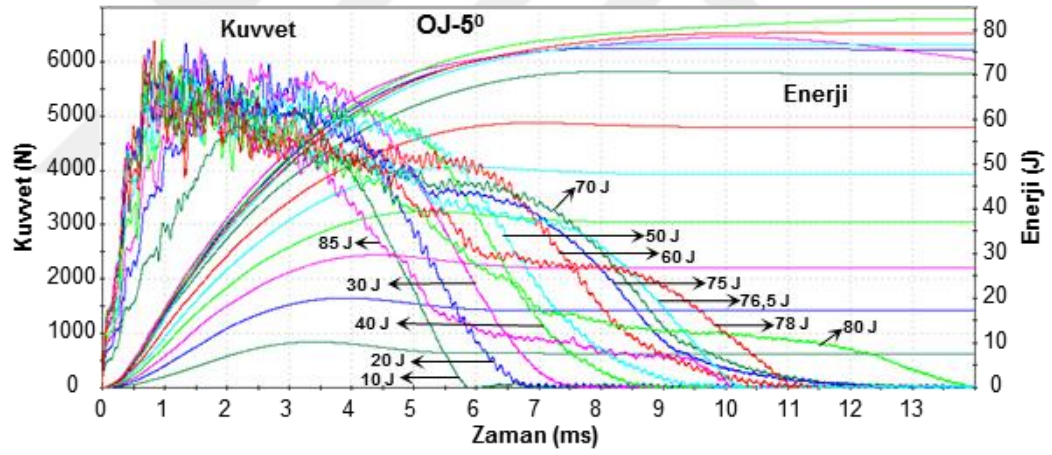
Şekil 99: Yarıküresel Darbe Ucu ile 10° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



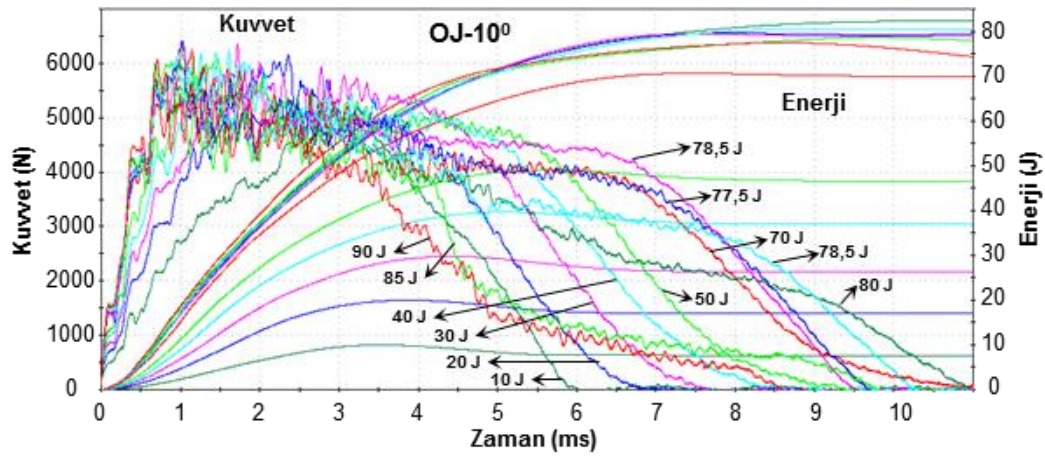
Şekil 100: Yarıküresel Darbe Ucu ile 15° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



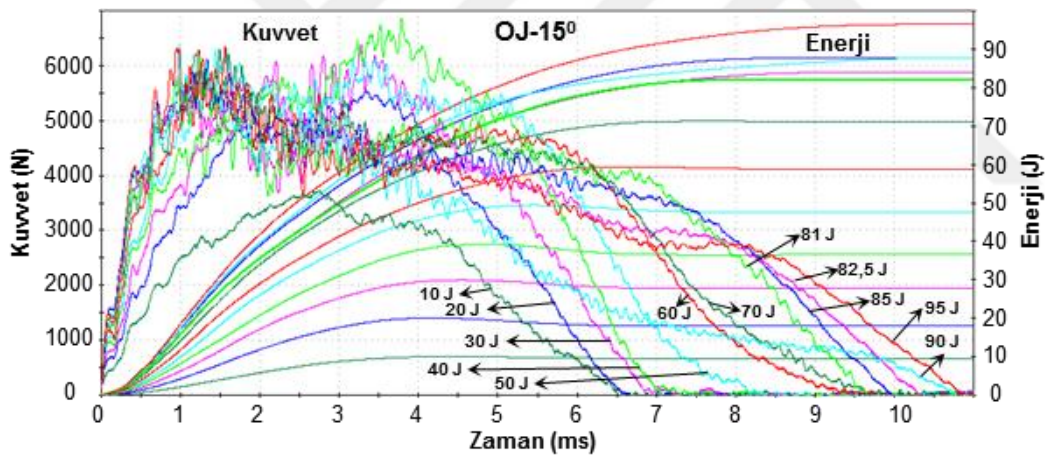
Şekil 101: Ojival Darbe Ucu ile 0° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



Şekil 102: Ojival Darbe Ucu ile 5° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



Şekil 103: Ojival Darbe Ucu ile 10° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri



Şekil 104: Ojival Darbe Ucu ile 15° Çarpma Açısında Yapılan Darbe Testlerine Ait Kuvvet-Zaman-Enerji Eğrileri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Adı Soyadı : Mustafa YAĞBASAN
Doğum Tarihi : 02.10.1981
Doğum Yeri : Kırıkkale
E mail : myagbasan81@hotmail.com
Telefon : 0533 038 92 75

Eğitim Bilgileri:

<u>Derece:</u>	<u>Eğitim Birimi:</u>	<u>Mezuniyet Tarihi:</u>
Lisans	Kara Harp Okulu	30 Ağustos 2003
Lise	Kuleli Askeri Lisesi	01 Temmuz 1999

Yabancı Dil:

İngilizce

Bildiriler / Yayınlar:

“The Oblique Impact and Compression After Impact Response of CFRP Laminates”.
19th International Conference on Composite Structures, 2016, Porto.