

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN DARBE
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OLUŞAN HASARLARIN
MİKRO TOMOGRAFİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Sinan FİDAN

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği
Danışman: Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK**

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN DARBE
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OLUŞAN
HASARLARIN MİKRO TOMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

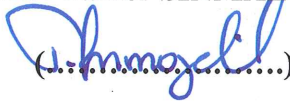
DOKTORA TEZİ

Sinan FİDAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 EKİM 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 27 EKİM 2011

**Tez Danışmanı
Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK**


(.....)

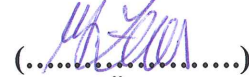
**Üye
Prof.Dr. İsmail CÜRGÜL**


(.....)

**Üye
Prof.Dr. Ahmet ÜNAL**


(.....)

**Üye
Prof.Dr. Muzaffer ZEREN**


(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. Taner YILMAZ**


(.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ

Dünyada, artan insan ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok yenilik ve gelişme olmaktadır. Hemen her alanda meydana gelen bu teknolojik gelişmeler, en temel alanlardan biri olan malzeme alanında da yeni çalışmaları beraberinde getirmiştir. Gelişen teknolojiyle beraber tabiatta bulunan malzemelerin mevcut özellikleri yetersiz kalmış, malzeme özelliklerin geliştirilmesi gerekmiştir. Mevcut malzemelere oranla daha ekonomik, daha mukavemetli, hafif, ergonomik, imalatı kolay malzeme türleri için yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Böylece, değişik özelliklere sahip mevcut malzemeleri fiziksel yöntemlerle birleştirerek oluşturulan kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır. Basit temel gereçlerden uzay uygulamalarında kritik görevleri yürüten parçalara kadar birçok alanda kompozit malzeme kullanım oranı giderek artmaktadır.

Çeliğin bulunmasından beri mühendislik tasarımlarında metaller ilk tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Yüksek mekanik özelliklere, yüksek rijitlik /ağırlık oranına ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle metal malzemelerin yerine kompozit malzemelerin askeri alanlarda kullanılmak üzere kurşun geçirmez yeleklerde, tank yapılarında ve savaş jetlerinde kullanımını arttırmıştır. Kompozit malzemeler ayrıca sivil havacılık uygulamalarında, otomotiv endüstrisinde ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler yüksek özgül modülleri ve dayanımları ile birlikte düşük üretim maliyetleri sayesinde otomotiv ve uçak sanayinde yaygın kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin artan kullanım alanları çalışma şartlarında maruz kaldıkları yüklerin çeşitliliğini artırmıştır. Polimer kompozitlerin maruz kaldıkları düşük hızlı darbeler sonrası yapılarında ortaya çıkan hasar mekanizmalarının ortaya konması ve nedenleriyle sonuçlarının deneysel incelemeleri darbe - yorulma ömrü, darbe direnci gibi olguların anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Düşük hızlı darbe yüklemesi sırasında kompozit malzemelerde ortaya çıkan yapısal değişimler ve darbe yükü uygulaması sonrası malzeme iç yapısında ortaya çıkan hasar mekanizmaları; bu malzemelerin üretim parametrelerinde yapılacak iyileştirmeler için hayati önem taşımaktadır. Kompozit yapıların tasarımındaki en önemli ilgi darbe yüklemesine karşı duyarlılıklarıdır. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe yüklemeleri de dâhil enine yüklemeler nedeni ile yapı içerisinde oluşan iç hasara karşı yüksek oranda hassas oldukları bilinmektedir. Örneğin yapısal havacılık uygulamalarında kullanılan polimer kompozitlerin uçuş pisti kırıntıları, dolu, bakım hasarları (alet düşmesi), servis araçlarının ya da kargo ile yapı arasındaki çarpışma, kuş çarpmaları, pervanedeki buzların gövdeye çarpması, motor enkazı ve lastik kopması gibi darbe yüklemesine maruz kaldığı saptanmıştır. Darbe yüklemelerine karşı kompozit malzemelerin bu duyarlılıkları sebebiyle endüstriyel uygulamalarda kullanım alanları ciddi bir şekilde sınırlandırılmaktadır. Bu malzemelerin darbe esnasında oluşan enerjiyi matris hasarı (tabakalar içi ve tabakalar arası çatlaklar), fiber kırılması, fiber-matris ayrılması, tabaka yarılması, delaminasyon, fiber soyulması ve fiber çekme hasarı şeklindeki hasar mekanizmaları ile sönmülediği belirtilmektedir. Bu nedenle yapısal uçak, helikopter ve araba parçalarında kullanılan kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yüklemeleri gibi yapıyı hasara uğratabilecek potansiyel dış yüklemelere karşı

davranışı ve yapıda oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi gereken önemli bir konudur.

Düşük hızlı darbe yüklemelerinde malzemenin hem yüzeyinde hem de iç kısmında oluşan hasar mekanizmalarının hangi darbe enerjisinde oluştuğu kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-darbe ucunun yer değiştirmesi eğrilerinden anlaşılabileceği gibi darbe uygulanan numuneye yapılan tahribatsız muayene yöntemleri yardımı ile de belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada düşük hızlı darbe hasarı ayrıntılı bir şekilde incelenirken, hedef malzeme olarak (0/90)_s oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit ve (0/90)_s oryantasyonlu aramid / cam fiber takviyeli hibrit kompozit seçilmiştir. Böylece aynı özellikte iki kompozitte sadece aramid takviye elemanının eklenmesinin kompozitin düşük hızlı darbe davranışına etkisi ortaya konmuştur. Darbe testleri uygulanırken darbe ucu olarak yarı küresel ve düz geometrili olmak üzere iki farklı tipte ve her geometri için dört farklı çapta darbe uçları kullanılmıştır. Böylece darbe ucu geometrisi ve çapının darbe davranışına etkileri ortaya konmuştur.

Yapılan çalışmada, polimer matrisli kompozit malzemeler için düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucunda ortaya çıkan hasar mekanizmaları röntgen ışınları, termal kamera ile fotoğraflama, ultrasonik C-taraması, optik inceleme, bilgisayarlı tomografi (CT) ve mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) yöntemleri ile incelenmiştir. Düşük hızlı darbe yüklemeleri sonrası kompozit yapılarda ortaya çıkan hasar mekanizmalarını numuneye zarar vermeden ortaya koymak için mikro-CT taramasının en iyi alternatif metot olduğu bulunmuştur. Kompozit numunenin iç yapısında oluşan matris hasarları, fiber kırılmaları ve tabakalar arası ayrılmalar net bir şekilde mikro-CT yöntemiyle gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, teorik ve deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince gelişme raporlarımda değerli katkılarıyla yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. İsmail CÜRGÜL ve Prof. Dr. Muzeffer ZEREN'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarımın deneysel bölümlerini gerçekleştirmemde bana her türlü yardımı sağlayan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. TÜBİTAK MAM, Malzeme Enstitüsü gerçekleştirilen çalışmalarım süresince vermiş oldukları destek nedeniyle Enstitü Müdür Yardımcısı Doç. Dr. Volkan GÜNAY başta olmak üzere, arkadaşlarım Volkan TUNA, Zafer YÜCEL ve tüm enstitü çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden Arş. Gör. Egemen AVCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen anne ve babama minnetlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren eşim Fadime ve biricik kızım Gökçen'e en içten sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER.....	xv
ÖZET.....	xvi
İNGİLİZCE ÖZET.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1.Kompozit Malzeme Tanımı.....	4
2.2.Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri.....	5
2.3.Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	5
2.4.Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	7
2.4.1.Takviye elemanına göre kompozit malzemeler.....	7
2.4.1.1.Elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	7
2.4.1.2.Partikül takviyeli kompozit malzemeler.....	12
2.4.1.3.Dolgu kompozit malzemeler.....	12
2.4.1.4.Tabakalı kompozit malzemeler.....	12
2.4.2.Matris tipine göre kompozit malzemeler.....	12
3. KOMPOZİT MALZEMELERDE DARBE HASARI.....	15
3.1. Kompozit Malzemelere Uygulanan Darbe Testi Türleri.....	16
3.1.1.Charpy sarkaç testi.....	17
3.1.2.Izod testi.....	18
3.1.3.Düşen ağırlık tipi darbe testi.....	18
3.1.4.Hidrolik test cihazları.....	19
3.1.4.1.Hopkinson çubuk testi.....	20
3.1.4.2.Gaz tabancası darbe testi.....	21
3.2.Düşük Hızlı Darbe Tanımı.....	22
3.3.Düşük Hızlı Darbe Hasarı Türleri.....	23
3.3.1.Matris hasarı.....	23
3.3.2.Delaminasyon Hasarı.....	25
3.3.3.Fiber Hasarı.....	28
3.3.4.Delinme.....	29
3.4.Kompozit Yapı Bileşenlerinin Düşük Hızlı Darbe Hasarına Etkileri.....	30
3.4.1.Fiberler.....	30
3.4.2.Matris.....	32
3.4.3.Ara yüzey.....	33
3.5.Karmaşık Geometrilik Kompozit Numunelerin Düşük Hızlı Darbe Performansı.....	33
3.6.Düşük Hızlı Darbe Sonrası Kompozitlerin Kalıntı Dayanımları.....	34
3.6.1. Artık çekme gerilmesi.....	34
3.6.2. Artık basma gerilmesi.....	35
3.6.3. Artık eğilme gerilmesi.....	35

3.6.4. Artık yorulma ömrü.....	36
3.7. Düşük Hızlı Darbe Hasarıyla İlgili Genel Sonuçlar	36
4. TEKNİK BİLGİLER.....	37
4.1.Ağırlık Düşürme Darbe Test Cihazı.....	37
4.1.1.Ağırlık düşürme darbe testi cihazı özellikleri.....	37
4.1.2.Ağırlık düşürme darbe testi cihazı veri toplama yazılımı.....	39
4.2.Röntgen Işınları ile İçyapı Hasar Tespiti.....	41
4.3.Termal Kamera ile Darbe Hasar Tespiti	43
4.4.Ultrasonik Tarama ile Darbe Hasarı İncelemesi	45
4.5.Bilgisayarlı Tomografi (CT) ile Darbe Hasarı İncelemesi	47
4.6.Mikro-Bilgisayarlı Tomografi ile Darbe Hasarı İncelemesi	49
5. MALZEME VE YÖNTEM	53
5.1.Kullanılan Malzemeler.....	53
6. DENEYSEL BULGULAR	54
6.1. Enerji Zaman Grafikleri	54
6.2. Kuvvet Zaman Grafikleri	74
6.3.Kuvvet Yer Değiştirme Grafikleri	103
6.4.Enerji, Geri Gelme Deplasmanı ve Plastik Deplasman Grafikleri.....	117
6.5.Yer Değiştirme Zaman Grafikleri	124
6.6.Darbe Sonrası Kompozitlerin Mikro Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleri	128
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	137
KAYNAKLAR	140
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	148
ÖZGEÇMİŞ	149

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	7
Şekil 2.2: Fiber takviyeli kompozit malzeme çeşitleri	9
Şekil 2.3: Tipik bir cam elyaf örneği	9
Şekil 3.1: Charpy darbe testi	17
Şekil 3.2: Izod darbe testi	18
Şekil 3.3: Düşen ağırlık darbe testi	19
Şekil 3.4: Hopkinson çubuğu çekme testi [38]	20
Şekil 3.5: Gaz tabancası darbe testi düzeneği [39]	21
Şekil 3.6: 0/90/0 yönelimli kompozit plakada darbeye bağlı ilk hasar oluşumu	24
Şekil 3.7: Enine tabakada eğilme matris çatlağının oluşmasına katkıda bulunan gerilim bileşenlerinin diyagramı.	25
Şekil 3.8: 0/90/0 yönelimli plakada darbeye bağlı delaminasyon ve matris çatlağı şekilleri	27
Şekil 3.9: Darbe enerjisine bağlı artık gerilme eğrisi	34
Şekil 4.1: Instron Dynatup 9250HV darbe test cihazı ve kısımları	38
Şekil 4.2: Impulse Data Acquisition programı ekran görüntüsü	40
Şekil 4.3: Balteau GM 300/5D Endüstriyel X-Işınları cihazı	42
Şekil 4.4: Röntgen çekimi şematik gösterimi	42
Şekil 4.5: Termal kamera	43
Şekil 4.6: Darbe sonrası kompozit numuneye ait termal kamera görüntüsü	44
Şekil 4.7: Su püskürtmeli otomatik ultrasonik muayene sistemi	45
Şekil 4.8: Ultrasonik tarama verileri	45
Şekil 4.9: Bilgisayarlı tomografi (CT) temel çalışma prensibi	48
Şekil 4.10: Bilgisayarlı tomografi (CT) cihazı iç yapısı	49
Şekil 4.11: Mikro-bilgisayarlı tomografi çalışma prensibi	49
Şekil 4.12: SkyScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazı	50
Şekil 4.13: Mikro-CT taraması şematik gösterimi	52
Şekil 6.1: Düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafiği	54
Şekil 6.2: Kompozit plakaya ait tipik bir enerji profil diyagramı	56
Şekil 6.3: Cam fiber takviyeli kompozitte düz geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	57
Şekil 6.4: Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin düz uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi	58
Şekil 6.5: Cam fiber takviyeli kompozitte yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	59
Şekil 6.6: Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin yarıküresel uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi	60
Şekil 6.7: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	61
Şekil 6.8: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	61

Şekil 6.9: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 J darbe enerjileriyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	62
Şekil 6.10: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 25, 40, 60 ve 80 J darbe enerjileriyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	62
Şekil 6.11: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrileri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm.....	63
Şekil 6.12: Aramid/Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin düz uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi	64
Şekil 6.13: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm.....	65
Şekil 6.14: Aramid/Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin yarıküresel uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi	66
Şekil 6.15: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	67
Şekil 6.16: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	67
Şekil 6.17: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 J darbe enerjileriyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	68
Şekil 6.18: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 25, 40, 60 ve 80 J darbe enerjileriyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması	68
Şekil 6.19: Darbe enerjisine bağlı emilen enerji miktarları (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı yarıküresel darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı yarıküresel darbe uçları.....	69
Şekil 6.20: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı uç geometrisi ve çaplarında darbe enerjisine bağlı emilen enerji grafikleri.....	69
Şekil 6.21: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı uç geometrisi ve çaplarında darbe enerjisine bağlı emilen enerji grafikleri.....	70
Şekil 6.22: Farklı çaplı düz darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı emilen enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması	70
Şekil 6.23: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı emilen enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması	71
Şekil 6.24: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı darbe ucu çaplarında darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin uç geometrileri açısından karşılaştırılması	71
Şekil 6.25: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı darbe ucu çaplarında darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin uç geometrileri açısından karşılaştırılması	72

Şekil 6.26: Farklı çaplı düz darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması.....	72
Şekil 6.27: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması.....	73
Şekil 6.28: Cam fiber takviyeli ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin enerji zaman eğrilerinden elde edilen açış değişimleri (a) cam fiber takviyeli, farklı çaplı düz uçlar (b) cam fiber takviyeli, farklı çaplı yarıküresel uçlar (c) aramid / cam fiber takviyeli, farklı çaplı düz uçlar (d) aramid / cam fiber takviyeli, farklı çaplı yarıküresel uçlar	73
Şekil 6.29: Cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	74
Şekil 6.30: Cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	74
Şekil 6.31: Cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	75
Şekil 6.32: Cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	75
Şekil 6.33: Cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	76
Şekil 6.34: Cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	76
Şekil 6.35: Cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	77
Şekil 6.36: Cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	77
Şekil 6.37: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	78
Şekil 6.38: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	78
Şekil 6.39: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 6.40: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	79
Şekil 6.41: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	80
Şekil 6.42: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	80
Şekil 6.43: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	81
Şekil 6.44: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	81
Şekil 6.45: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	82

Şekil 6.46: Cam fiber takviyeli kompozite 20 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	82
Şekil 6.47: Cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 6.48: Cam fiber takviyeli kompozite 30 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 6.49: Cam fiber takviyeli kompozite 35 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	84
Şekil 6.50: Cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	84
Şekil 6.51: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	85
Şekil 6.52: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	85
Şekil 6.53: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	86
Şekil 6.54: Cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	86
Şekil 6.55: Cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	87
Şekil 6.56: Cam fiber takviyeli kompozite 60 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	87
Şekil 6.57: Cam fiber takviyeli kompozite 80 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	88
Şekil 6.58: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	88
Şekil 6.59: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	89
Şekil 6.60: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	89
Şekil 6.61: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri.....	90
Şekil 6.62: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri	90
Şekil 6.63: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri	91
Şekil 6.64: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri	91
Şekil 6.65: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri	92

Şekil 6.84: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	101
Şekil 6.85: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 60 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	102
Şekil 6.86: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 80 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması	102
Şekil 6.87: Düşük hızlı darbe sonrası ortaya çıkan kuvvet yer değiştirme eğrileri ..	103
Şekil 6.88: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı düz darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm ..	104
Şekil 6.89: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm ..	105
Şekil 6.90: Cam fiber takviyeli kompozitin 3 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J ..	105
Şekil 6.91: Cam fiber takviyeli kompozitin 5 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J ..	106
Şekil 6.92: Cam fiber takviyeli kompozitin 7 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J ..	106
Şekil 6.93: Cam fiber takviyeli kompozitin 10 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J ..	107
Şekil 6.94: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı düz darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm ..	107
Şekil 6.95: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm ..	108
Şekil 6.96: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 3 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J ..	108
Şekil 6.97: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 5 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J ..	109
Şekil 6.98: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 7 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J ..	109
Şekil 6.99: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 10 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J ..	110
Şekil 6.100: 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleşen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J ..	110
Şekil 6.101: 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleşen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J ..	111
Şekil 6.102: 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleşen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer	

değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J.....	111
Şekil 6.103: 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleşen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J	112
Şekil 6.104: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	112
Şekil 6.105: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	113
Şekil 6.106: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	113
Şekil 6.107: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm.....	114
Şekil 6.108: Farklı çaplı darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin uç geometrisine göre karşılaştırmalı elastik açı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	114
Şekil 6.109: Farklı çaplı darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin uç geometrisine göre karşılaştırmalı elastik açı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	115
Şekil 6.110: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen elastik açıların fiber takviyesine göre karşılaştırmalı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm.....	115
Şekil 6.111: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen elastik açıların fiber takviyesine göre karşılaştırmalı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm	116
Şekil 6.112: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3mm çaplı darbe ucu (b) 5mm çaplı darbe ucu (c) 7mm çaplı darbe ucu (d) 10mm çaplı darbe ucu.....	117
Şekil 6.113: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3 mm çaplı darbe ucu (b) 5 mm çaplı darbe ucu (c) 7 mm çaplı darbe ucu (d) 10 mm çaplı darbe ucu	117
Şekil 6.114: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3mm çaplı darbe ucu (b) 5mm çaplı darbe ucu (c) 7mm çaplı darbe ucu (d) 10mm çaplı darbe ucu	118
Şekil 6.115: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3 mm çaplı darbe ucu (b) 5 mm çaplı darbe ucu (c) 7 mm çaplı darbe ucu (d) 10 mm çaplı darbe ucu.....	118
Şekil 6.116: Kompozitlerin 3 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	119
Şekil 6.117: Kompozitlerin 5 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	119

Şekil 6.118: Kompozitlerin 7 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	120
Şekil 6.119: Kompozitlerin 10 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	120
Şekil 6.120: Kompozitlerin 3 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	121
Şekil 6.121: Kompozitlerin 5 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	121
Şekil 6.122: Kompozitlerin 7 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	122
Şekil 6.123: Kompozitlerin 10 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli	122
Şekil 6.124: Geri gelme deplasmanının darbe enerjisine bağlı değişim eğrileri (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları (c) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları	123
Şekil 6.125: Plastik deplasmanının darbe enerjisine bağlı değişim eğrileri (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları (c) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları	123
Şekil 6.126: 3 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri	124
Şekil 6.127: 5 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri	124
Şekil 6.128: 7 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri	125
Şekil 6.129: 10 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri	125
Şekil 6.130: 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri.....	126
Şekil 6.131: 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri.....	126
Şekil 6.132: 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri.....	127
Şekil 6.133: 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri.....	127

Şekil 6.134: Düz 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması.....	128
Şekil 6.135: Düz 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması.....	128
Şekil 6.136: Yarıküresel 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması.....	129
Şekil 6.137: Yarıküresel 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması.....	129
Şekil 6.138: Düz 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması	130
Şekil 6.139: Düz 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması	130
Şekil 6.140: Yarıküresel 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması	131
Şekil 6.141: Yarıküresel 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması	131
Şekil 6.142: 3 mm çaplı düz geometrilili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri.....	132
Şekil 6.143: 3 mm çaplı yarıküresel geometrilili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri.....	132
Şekil 6.144: 10 mm çaplı düz geometrilili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri.....	133
Şekil 6.145: 10 mm çaplı yarıküresel geometrilili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri.....	133
Şekil 6.146: 3 mm çaplı düz geometrilili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri	134
Şekil 6.147: 3 mm çaplı yarıküresel geometrilili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri.....	134
Şekil 6.148: 10 mm çaplı düz geometrilili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri	135
Şekil 6.149: 10 mm çaplı yarıküresel geometrilili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri.....	136

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları	5
Tablo 2.2: Kompozit malzeme kullanılan sektörler ve kullanım yerleri	6
Tablo 2.3: Takviyeli kompozit malzeme türleri.....	8
Tablo 2.4: Cam elyafların özellikleri	10
Tablo 2.5: Başlıca cam elyaf çeşitleri ve sahip oldukları özellikler	10
Tablo 2.6: Polimer matrisler ve genel özellikleri	13
Tablo 2.7: Metal matrisli kompozitler ve genel özellikleri	13
Tablo 2.8: Seramik matrisli kompozitler ve genel özellikleri.....	14
Tablo 4.1: Darbe test cihazı genel ölçüleri	37
Tablo 4.2: Darbe test cihazı kullanılan ağırlığa bağlı ortaya çıkan darbe enerjisi miktarları	37
Tablo 4.3: Darbe test cihazında uygulanabilen test standartları	38
Tablo 4.4: Instron Dynatup 9250HV darbe test cihazı parçaları ve işlevleri	39
Tablo 4.5: Impulse Data Acquisition programı ile elde edilebilen temel grafikler	40
Tablo 4.6: Impulse Data Acquisition programı ile elde edilebilen temel değişkenler	41
Tablo 4.7: Röntgen çekim parametreleri ve değerleri	42
Tablo 4.8: Farklı çapta düz darbe uçlarıyla gerçekleşen testler sonrası cam elyaf takviyeli kompozite ait ultrasonik tarama görüntüleri.....	46
Tablo 4.9: Farklı çapta yarıküresel darbe uçlarıyla gerçekleşen testler sonrası cam elyaf takviyeli kompozite ait ultrasonik tarama görüntüleri	47
Tablo 4.10: SkayScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihaz özellikleri	51
Tablo 4.11: Kompozitlere ait mikro-CT tarama parametreleri	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

m	: Metre
cm	: Santimetre
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
Kg	: Kilogram
s	: Saniye
σ	: Eğme dayanımı
E_f	: Eğilme modülü
w	: Genişlik
L	: Desteksiz uzunluk
t	: Zaman
F	: Kuvvet
τ	: Tabakalar arası kesme dayanımı

Kısaltmalar

ASTM	: American Society of Testing Materials
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
IR	: Kızıl Ötesi
Mikro-CT	: Mikro-Bilgisayarlı Tomografi

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ VE OLUŞAN HASARLARIN MİKRO TOMOGRAFİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Sinan FİDAN

Anahtar kelimeler: Darbe yüklemesi, polimer matrisli kompozit, darbe hasarı

Özet: Bu çalışmada ilk olarak polimer matrisli cam fiber ve aramid+cam fiber takviyeli hibrit kompozitlerin Dynatup 9200 düşen ağırlık tipi test cihazında düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilerek kompozitlerin darbe sonrası hasar mekanizmalarının ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Test standartlarına göre hazırlanan numuneler yarıküresel ve düz olmak üzere iki farklı geometrideki darbe uçlarıyla düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmıştır. Her uç geometrisi için dört farklı çapta darbe ucu çapı kullanılarak darbe ucu çapının etkisi ortaya konmuştur. Düşük hızlı darbe testleri sonrası numuneler; görsel, ultrasonik tarama, termal kamera incelemesi, röntgen, bilgisayarlı tomografi (CT) ve mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) gibi yöntemlerle tahribatsız olarak incelenerek iç yapı hasarları ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, (0/90)_s oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit ve (0/90)_s oryantasyonlu aramid / cam fiber takviyeli hibrit kompozit farklı darbe enerjileriyle ön testlere tabi tutulmuş; farklı hasar tiplerinin ortaya çıktığı enerji eşik değerleri tespit edilerek her iki malzeme için sekiz farklı darbe ucuyla testler gerçekleştirilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitte tam delinmenin gerçekleştiği enerji seviyesi 80 Joule olarak tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının diğer amacı, düşük hızlı darbe testleri sonrası kompozit malzemelerin iç yapısında ortaya çıkan hasar mekanizmalarını net şekilde gözlemleyecek alternatif tahribatsız muayene ve inceleme tekniklerini ortaya koymaktır. Bu kapsamda yapılan incelemelerde son on yılda tıp alanında yaygın olarak kullanılan mikro-CT incelemelerinin kompozit malzeme incelemelerinde yüksek bir potansiyele sahip oldukları görülmüştür. Mikro-CT cihazlarında mikron seviyesinde çözünürlüklerde içyapı görüntüleri elde edilebilmesi, kompozitlerde ortaya çıkan matris hasarı, fiber kırılması ve delaminasyon gibi hasar mekanizmalarını incelemede avantajlar sağlamaktadır.

EXAMINING LOW VELOCITY IMPACT DAMAGE BEHAVIOURS OF POLYMER MATRIX COMPOSITES AND EMERGING DAMAGES EXAMINATION WITH MICRO TOMOGRAPHY METHOD

Sinan FİDAN

Keywords: Impact loading, polymer matrix composite, impact damage

Abstract: In this study, main objective is to characterize post impact damage behavior of glass reinforced and aramid+glass fiber reinforced hybrid composite after their examination in Dynatup 9200 free fall low velocity impact device in detail. Test samples prepared according to low velocity impact test standards and impacted with flat and hemispherical impactor noses. Both impactor nose geometries have four different diameters (3, 5, 7 and 10mm respectively) and by this way the effect of impactor nose diameter effect on impact behavior was investigated. Test samples were examined with non-destructive inspection methods like ultrasonic scanning, thermal camera, radiography, computerized tomography (CT) and micro-computerized tomography (micro-CT) and internal damage mechanisms were characterized.

In the first stage of the experimental investigations, (0/90)_s oriented glass fiber reinforced polyester composite and (0/90)_s oriented aramid / glass fiber reinforced hybrid composites were pre-impacted at different energy levels for determination of energy threshold values for different damage modes. Tests were done with eight different impactors. Full penetration occurred at 80 J energy level for glass fiber reinforced composite.

Another aim of the study is to put forward the new non-destructive inspection methods for post-impact damage monitoring of the composites. It was seen that achieving this purpose could be possible by using micro-CT which is widely used in medical investigations for past two decades. Micro-CT promises a good potential for material investigations. Obtaining internal images at micron resolution gives an opportunity of investigation matrix cracks, fiber breakages and delaminations occurred in composites after low velocity impact loading.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, metallere göre daha pahalı olmalarına rağmen yüksek özgül mukavemetleri ve amaca yönelik yük taşıma kapasiteleri sayesinde son otuz yılda mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Fiber takviye elemanına sahip ve tabakalı olarak üretilen kompozit malzeme tipleri özellikle havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında giderek artan oranda kullanılmaktadırlar. Diğer taraftan tabakalı kompozitlerin düşük olan düzlem dışı yük taşıma kapasiteleri, yüksek üretim maliyetleri dezavantajları arasında sayılabilir.

Kompozit malzemeler, servis şartları altında maruz kaldıkları yüklemeler dışında olağandışı darbe yüklemeleri ile de yüz yüze gelebilirler. Uçaklarda olduğu gibi kuş çarpması, taksi yolunda pistten kopan taş parçalarının çarpması ya da bakım işlemleri sırasında teknisyenlerin dikkatsizliği sonucu düşen anahtar takımlarının kompozit yapısına zarar vermesi bu tür olağandışı anlık darbe yüklemelerine örnek verilebilir. Ortaya çıkan hasarlar kimi zaman gözle görülebilir olurken kimi zaman da sadece kompozitin içyapısında hasarlar meydana getirir ve özel inceleme yöntemleri kullanılmadığı takdirde fark edilmesi çok zordur.

Kompozit içyapısında ortaya çıkan matris çatlağı, fiber kopması ve delaminasyon gibi hasar türleri yapının yük taşıma kapasitesini önemli derecede azaltır. Dışarıdan gözle yapılan rutin kontrollerde sadece küçük bir çatlak şeklinde görünen veya hiç görünmeyen bu hasarlar, kompozit matrisinin görevini yerine getirememesine ve yorulma hasarlarının normal süresinden önce ortaya çıkmasına sebep olabilir.

Darbe yüklemelerine bağlı hasarların kritik boyuta ne zaman ulaşacağı hakkında önceden bilgi sahibi olmak, malzemenin kullanıldığı yapısal parçanın servis ve bakım zamanını kestirmede önemli rol oynayabileceği gibi aynı zamanda ölümcül kazalarla sonuçlanabilecek süreçlerin de önüne geçecektir.

Darbe hasarları, literatürde yapılan bazı çalışmalarda darbenin ortaya çıkma hızına göre sınıflandırılırken diğer çalışmalarda darbe sonucu oluşan hasar türlerine göre sınıflandırma yapılmıştır. Her iki sınıflama mantığında da asıl amaç darbeye bağlı ortaya çıkan hasar hakkında kestirimde bulunabilmek ve kritik eşik enerji yükleme değerlerine ulaşmadan malzemenin uzun süre emniyetle servis şartlarını yerine getirebilmesini sağlayabilmektir.

Bu çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemeler enstrümante edilmiş düşen ağırlık darbe test cihazında düşük hızlı darbe testlerine tabii tutulmuştur. Darbe testi gerçekleştirilen tabakalı kompozitlerde takviye elemanı olarak cam fiber ve aramid fiber kullanılmıştır. Birinci kısım deneylerde takviye elemanı olarak sadece cam fiberler kullanılmış, ikinci kısım deneylerde ise cam fiber takviyesinin yanında aramid fiber takviyesi de eklenerek aramid fiber tipinin yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Her iki kompozitte de toplam fiber ağırlık oranları eşittir. Aramid fiberler tek başlarına yük taşıyıcı eleman olarak kullanıldıklarında kompozit malzemenin maliyetini önemli oranda artırmaktadır. Diğer taraftan maliyetin önemli olmadığı uzay uygulamaları gibi kritik uygulamalarda gösterdikleri yüksek performanslı yük taşıma kapasiteleri bu takviye elemanını tercih sebebi yapmıştır. Günümüzde kompozit malzemelerde her farklı takviye elemanını tek başına kompozitin içinde kullanmak yerine karma takviye elemanları aynı kompozit sistem içinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da hibrit takviye elemanı uygulamasının kompozit maliyetini fazla artırmadan dayanımda bir iyileştirmeye sebep olacak şekilde optimizasyonunu sağlamak için cam ve aramid fiber takviyeleri hibrit şekilde kullanılarak bir ön optimizasyon çalışması yapılmaya çalışılmış; cam fiberlerin yanında aramid fiber takviyesinin kullanımının kompozitin darbe direncini önemli oranda artırdığı görülmüştür.

Tez çalışmasının 2. bölümünde kompozit malzemelerin tanımı, genel özellikleri, kullanım alanları ve sınıflandırılması anlatılmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde kısaca kompozitlerde darbe ve darbe hasarı çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca 3. Bölümde geniş bir literatür taraması yapılarak kompozitlerde darbe hasarı ve darbe hasarında etkin olan parametreler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tez çalışmasının 4. bölümünde teknik bilgiler başlığı altında, deneysel çalışmalarda numunelerin darbe testlerinde kullanılan yöntem uygulamaya yönelik bir anlatımla verilmiştir. 4. bölümde ayrıca darbe hasarı inceleme yöntemleri anlatılmış ve sonuçları ortaya konmuştur. 5. bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme ve yöntem

açıklanmıştır. Tez çalışmasının 6. Bölümünde darbe testi uygulanan kompozitlere ait grafikler irdelenmiş, hasarsız muayene yöntemi olarak kullanılan mikro-CT görüntüleri ortaya konarak içyapı hasarları değerlendirilmiştir. Tez çalışmasının son bölümünde deneysel çalışmalar sonrasında çıkarılan sonuçlar özetlenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1.Kompozit Malzeme Tanımı

Kompozit malzemeler yeni bulunan bir malzeme grubu olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir [1].

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılmıştır [2].

Kompozit malzemelerin mühendislikteki asıl önemi, birbirinden farklı iki veya daha çok ögenin oluşturduğu kompozit malzemenin, karışım içindeki her bir ögenin özelliğinden daha üstün bir özelliğe sahip olmasıdır [3].

Teknolojide kompozit malzemeler, 1940'lı yıllarda havacılık sektörüne hizmet vermek üzerine geliştirilmeye başlanmıştır. Amaç çelik ve alüminyum alaşımları gibi konvansiyonel malzemelerin yerine daha düşük ağırlıklı ancak daha mukavemetli ve daha yüksek sertlik değeri, aşınma dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerine sahip malzemelerin geliştirilmesiydi [1].

Kompozit malzemelerde, çekirdek olarak kullanılan bir takviye elamanı ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzemesi bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye elamanı kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır.

Matris malzemesi ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlamanın yanında çoğu takviye elemanı gevrek ve kırılgan olduğundan onların dış yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruma özelliğini sağlamaktadır [2]. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye elemanını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviye elemanları arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

2.2.Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzemelerin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

<u>AVANTAJLARI</u>	<u>DEZAVANTAJLARI</u>
Yüksek dayanım	Metallere göre yüksek maliyet
Yüksek rijitlik	Üretim güçlüğü
Yüksek yorulma dayanımı	Üretim ve tasarımla ilgili az bilgi birikimi
Mükemmel aşınma direnci	Nem tutabilme özelliği
Yüksek sıcaklıklara dayanma kapasitesi	Geri dönüşümünün olmaması
İyi korozyon direnci	Kırılma uzamasının düşük olması
İyi termal ve ısı iletkenliği	
Düşük ağırlık	
Çekicilik ve estetik görünüm	

Özetle, kompozit malzemeler mukavemet, rijitlik ve hafiflikleri nedeniyle metallerin yerini almaktadır. Bugün, uçaklar, uzay araçları, denizaltı araçları ve malzeme özellikleri kritik olan birçok makine elemanı kompozit malzemelerden üretilmektedir [2].

2.3.Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

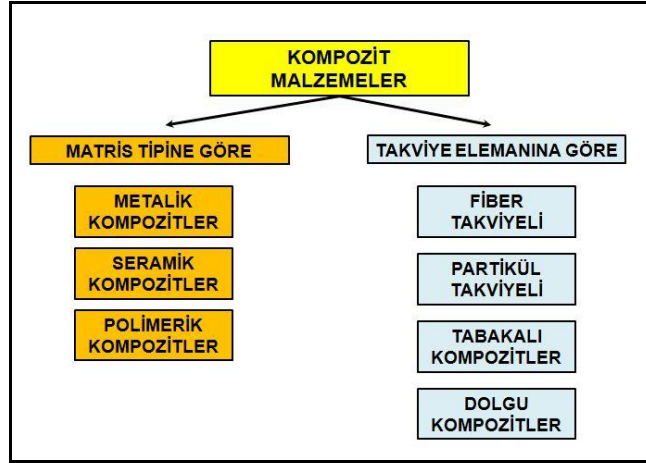
Kompozit malzemeler, genellikle kendisini oluşturan malzemelerin en iyi özelliklerini alacak tarzda imal edilirler. Başlangıçta hafiflikleri sebebiyle uzay sanayinde kullanılmışlardır, günümüzde gıda sektöründen otomotiv sektörüne, inşaat sektöründen denizcilik sektörüne kadar her alanda kullanım imkânları araştırılmaya devam edilmektedir. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler ve bu sektörlerde kullanım yerleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Kompozit malzeme kullanılan sektörler ve kullanım yerleri

SEKTÖR	KULLANIM YERİ
Savunma sanayi ve havacılık	• Uçak ve helikopter gövde parçaları • Uçak burun ve kanat parçaları • Havan topu gövdeleri ve sandıkları • Kurşun geçirmez panel imali • Miğferler • Mayın tarama gemisi, hücumbot parça ve gövdeleri • Barınaklar
Otomotiv ve taşımacılık	• Otomobil kaportaları • Kamyon ve otobüs yan panelleri • Kamyon rüzgârlık ve ön panelleri • Karayolu işaret levhaları • Karayolu kenar dikmeleri
Denizcilik	• Yelkenli / motorlu tekneler • Can kurtarma filikaları • Şamandıralar • Kanolar • Sörf tahtası, dubalar, iskeleler, • Marina ekipmanları
Elektrik	• Sigorta-panel kutuları • Aydınlatma gövdeleri • Antenler • İzolatörler, devre kesiciler • Yalıtkan platformlar • Elektrik ve aydınlatma direkleri • Kablo taşıyıcıları • Kablo kanalları • Merdivenler
İnşaat ve yapı	• Dış ve iç cephe kaplamaları • Prefabrik binalar • Çatı kaplama levhaları • Dekoratif uygulamalar • Beton kalıpları • Taşıyıcı profiller • Yağmur suyu taşıma sistemleri • Muhtelif amaçlı yalıtım işleri • Köprüler
Kimya	• Asit tankları ve kaplamaları • Muhtelif boru ve bağlantı parçaları • Kimyasal tesis zemin ızgaraları • Arıtma ekipmanları • Endüstriyel platform ve korkuluklar • Havalandırma kanalları
Isı	• Güneş enerjisi sistemleri • Yalıtım cıdarları • İzolasyonlu tanklar ve kaplar • Soğutma kuleleri • Havalandırma kanalları

2.4.Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi matris ve takviye elemanlarına göre sınıflandırma yapabilmek mümkündür [4].



Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

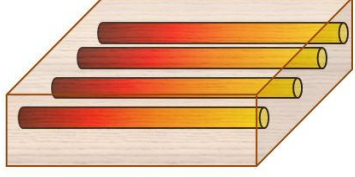
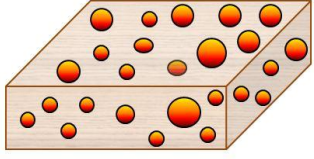
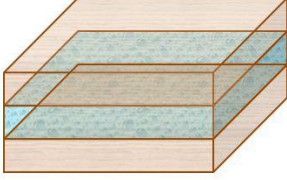
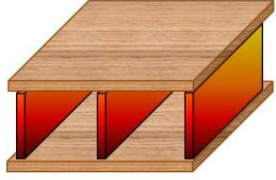
2.4.1.Takviye elemanına göre kompozit malzemeler

Ana matrisin içerisinde özel mukavemet sağlanması istenen yönlerde kuvvetlendirici takviye elemanı kullanılır. Kompozit malzemeler Tablo 2.3’de gösterildiği gibi takviye elemanlarına göre dört grupta değerlendirilir.

2.4.1.1.Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

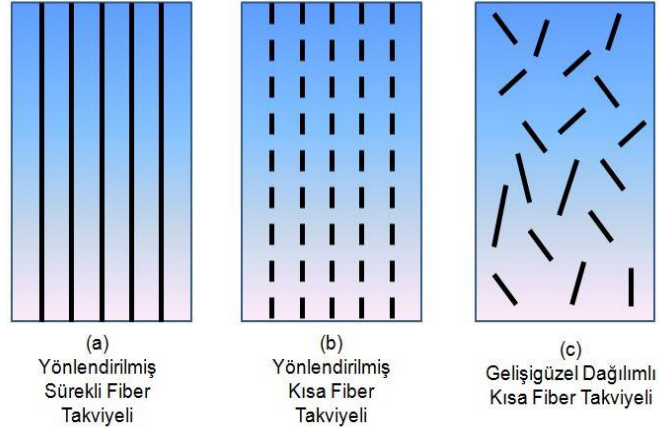
Fiberlere değişik kaynaklarda lifler veya elyaflarda denilmektedir. Bu malzemeler matris malzemenin içinde yer alıp kompozit malzemelerin en önemli mukavemet elemanlarıdır. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinin çok üstünde olabilmektedir. Karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten elli kat, rijitliği üç kat daha yüksektir [4].

Tablo 2.3: Takviyeli kompozit malzeme türleri

(a) Fiber Takviyeli Kompozit	
(b) Partikül Takviyeli Kompozit	
(c) Tabakalı Kompozit	
(d) Dolgu Kompozitler	
	

Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozitler Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, sürekli elyaf takviyeli, kesikli elyaf takviyeli ve rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş elyaf takviyeli olarak sıralanabilir [2].

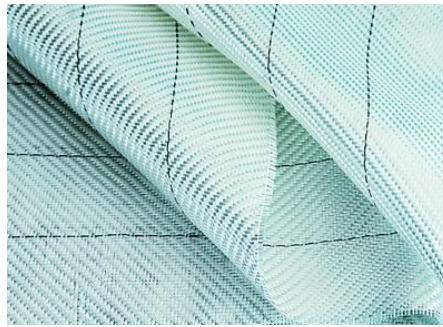
Elyaf formu; uygulama alanına ve kompozit malzeme üretim metoduna göre seçilir. Yapısal uygulamalar için filament veya uzun lifler önerilir, yapısal olmayan uygulama alanlarında ise kısa lifler tavsiye edilir. Enjeksiyon ve baskı kalıplamada kesikli lifler kullanılırken, elyaf sarma, profil çekme, rulo sarımda filament lifler kullanılır [2, 5].



Şekil 2.2: Fiber takviyeli kompozit malzeme çeşitleri

Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan elyaflara örnek olarak cam, bor, silisyum karbür, alümina, aramid, karbon elyaf sayılabilir.

Cam elyafın esasını silis-kum meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur (Şekil 2.3). Polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanıdır [2].



Şekil 2.3: Tipik bir cam elyaf örneği

Cam elyafların bazı özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4: Cam elyafların özellikleri

ÖZELLİK	AÇIKLAMA
Çekme Mukavemeti	Yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Birim ağırlık başına mukavemeti çelikten daha yüksektir.
Isıl Direnç	Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
Kimyasal Direnç	Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
Nem Tutma	Nem tutma özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
Elektrik İletkenliği	Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanırırlar [1, 6].

Başlıca cam elyaf çeşitleri ve sahip oldukları özellikler Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5: Başlıca cam elyaf çeşitleri ve sahip oldukları özellikler

TİP	ÖZELLİK
FİTİL	Mukavemetleri çok yüksektir.
KUMAŞ	Mukavemeti yüksektir. İki yönlü takviye için elverişlidir. Birim ağırlığı arttıkça mukavemeti azalır. Fiyatı ucuzdur.
KEÇE	Belli uzunluklarda kırılan demetlerin belli bir boyda bir bağlayıcı ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilir. Mukavemeti ve fiyatı kumaş tipi elyaftan daha düşüktür.
KÜÇÜK LİF	Liflerin 0,5 - 1 - 1,5 - 2 cm boylarında doğranmaları ile keçe imalinin ara ürünü olarak imal edilir. Presle takviye parçası yapımında ve tabanca ile püskürtmede kullanılır [7].

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler.

Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.

Bor elyafların silisyum karbür veya bor karbür ile kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanım artar. Özellikle bor karbür kaplanmasıyla çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040 °C civarındadır [1].

Silisyum karbür elyaflar; bor gibi, silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0,1 mm ile 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370°C'ta mukavemetinin sadece %30'unu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640°C'tır. Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum ve alüminyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak silisyum karbür elyaflar bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür [1, 6].

Alümina, alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alümina 0,02 mm çapındaki alümina flamanın silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadır [1].

Aramid elyaflar; uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerin iyi olmamasının yanı sıra kevlar /epoksi kompozitlerinin nem tutma özellikleri kötüdür [1].

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar [1, 8].

Doktora tez çalışmasında cam elyaf ve cam elyaf + aramid elyaf karışımı olmak üzere iki farklı tipte takviye elemanı ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

2.4.1.2.Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Öncelikle rijitlikte, kısmen mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilir. Bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül kompozitler; dispersiyonla sertleştirilmiş kompozit malzemeler ve büyük ölçekli partikül kompozit malzemeler olarak iki gruba ayrılabilir [4].

2.4.1.3.Dolgu kompozit malzemeler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması veya emprenye edilmesi ile oluşan malzemelerdir. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip olabilmesi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir. Bu tür kompozitler sandviç kompozitleri olarak da bilinir [4].

2.4.1.4.Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemenin de yapılabilir. Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilir. Burada ilke birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır. Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tek bir türden malzeme kullanılabilir [9]. Bu çalışmada tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır.

2.4.2.Matris tipine göre kompozit malzemeler

İçine yerleştirilmiş yük taşıyıcı elyafları katılaştığında belli bir yönelimde tutacak ve toplam mukavemette de bir görev üstlenecek üniform dolguya matris denir. Matrisler, fiberlere göre genellikle düşük yoğunluk, rijitlik ve dayanıma sahiptir.

Matrisler, kırılğan, elastik veya plastik olabilir. En genel kullanıma sahip matrisler seramik, metal ve polimerlerdir. Her biri özel yararlar sağıp olduğı gibi sınırlamalara da sahiptir.

Tablo 2.6: Polimer matrisler ve genel özellikleri

	ÖZELLİK
Polimer matris türleri	Termoset : Bir defa ısı-basınç altında şekillendikten sonra tekrar yeniden şekillenmeyen <u>polimer</u> yapılarıdır. Isı ve basınç muamelesinden sonra katı, sert ve plastik olmayan bir madde elde edilir. (Örnek: Kauçuk) Termoplastik: Molekül yapılarında çapraz bağ içermediklerinden dolayı ısı ve basınç altında plastik özelliklerini koruyan polimer yapılarıdır. Bu maddelere ısı ve basınç altında defalarca şekil vermek mümkündür. (Örnek: <u>AYPE</u>, <u>YYPE</u>, <u>PVC</u>, <u>PP</u>)
Kullanıldıkları ortamda dikkat edilmesi gereken hususlar	- Isı - Nem
En çok kullanılan reçine türleri	- Polyester reçine matris - Epoksi reçine matris
Üretim metotları	- Elle sıvama - Flaman sarma - Kese kalıplama - Sıvı akış - Enjeksiyon kalıplama - Ekstrüzyon
Beraber kullanıldıkları takviye elemanları [7]	- Cam fiberler - Bor fiberler - Karbon fiberler

Tablo 2.7: Metal matrisli kompozitler ve genel özellikleri

	ÖZELLİK
Metal matrisli kompozit	- Yüksek elastik modül - Yüksek mukavemet - Yüksek sıcaklıklarda çalışabilme - Metal kısımda süneklik ve tokluk, seramik kısımda yüksek mukavemet ve yüksek modül - Tekrar üretilebilir olma - Düşük yoğunluk - Isıl şoklara karşı düşük hassasiyet - Yüksek yüzey dayanımı - Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik
Bileşenleri [7]	- Metal matris (genelde bir metal alaşımı) - Takviye elemanı (oksit, karbür veya nitrür)

Tablo 2.8: Seramik matrisli kompozitler ve genel özellikleri

	ÖZELLİK
Seramik matrisli kompozit	• Gevrek yapı • Çekme dayanımı düşük • Basma dayanımları çok yüksek • Kayma dirençleri yüksektir • Plastik şekil verilemezler • Gevrek kırılma karakteristiği
Bileşenleri [2,10]	• Metal ve metal olmayan elemanlardan oluşan inorganik maddelerdir. • Kaolen ve kil gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilirler.

3. KOMPOZİT MALZEMELERDE DARBE HASARI

Karbon, cam ve aramid fiber takviyeli plastikler gibi fiber takviyeli kompozit malzemeler düşük ve ileri teknoloji mühendislik uygulamalarında giderek artan oranda kullanım alanı bulmaktadırlar. Kompozitler, alüminyum ve çelik gibi geleneksel malzemelere göre belirgin birçok avantaj sağlamaktadırlar. Bu avantajlar arasında yüksek özgül dayanımları, sertlikleri, çok yüksek korozyon mukavemetleri ve yorulmaya karşı gösterdikleri yüksek direnç gösterilebilir. Kompozitlerin dayanımlarıyla gösterdikleri bu yüksek performanslarının yanında, geleneksel metallerin üretim maliyetinden daha düşük üretim maliyetleriyle fiber takviyeli plastik malzemelerin üretilabiliyor olması diğer büyük avantajlarıdır. Kompozitlerin düşük üretim maliyetleri, sadece basit uygulamalar için kullanılan tabaka kompozitler için değil aynı zamanda sınırlı sayıda işlem basamağıyla üretilen kritik yük taşıma görevleri olan uzay ve havacılık uygulamalarında da geçerlidir. Havacılık ve uzay sanayinde kullanılan kompozitler aynı zamanda parça birleştirme ve montajlarında zamandan tasarruf sağlarlar.

Kompozitler, avantajlarının yanında ciddi kullanım sınırlamalarıyla karşı karşıyadırlar. Bu sınırlamalardan belki de en önemlisi servis şartları altında yabancı maddelerin çarpmasıyla maruz kaldıkları bölgesel darbe yüklemelerine karşı gösterdikleri tepkilerdir. Geçmiş yıllarda kompozit malzemelerin darbe tepkilerini ölçmek için birçok araştırma yürütülmüştür [1-9]. Bu çalışmaların ana ekseninde darbe hasarının sıkça ortaya çıkabildiği askeri ve sivil uçak yapıları gibi yüksek performanslı sürekli fiber takviyeli kompozitlerin giderek artan oranda kullanıldıkları mühendislik uygulamaları bulunmaktadır.

Kompozit malzemelerin olay anında darbeye karşı verdikleri tepkiler ve darbe ucunun kinetik enerjisini uzaklaştırma biçimi metallerden çok farklıdır. Düşük ve orta seviye darbe enerjilerinde metaller enerji sönmemesini elastik ve plastik deformasyona uğrayarak gerçekleştirirler [10]. Her ne kadar darbe daha sonra yapıda bir miktar kalıcı deformasyona sebep olsa da yapının yük taşıma kapasitesi genellikle düşüktür [11].

Yüksek darbe enerjilerinde hedef malzemede delinme gerçekleşebilir ve darbe ucunun geçişi genellikle yapraklanma, çatlama ve pullanmayla sonuçlanır [12]. Her ne kadar bu tür hasar malzemenin yük taşıma kapasitesini azaltsa da, etkileri genellikle kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak açıklanır [12]. Diğer taraftan kompozitlerde plastik deformasyona uğrama yeteneği çok sınırlı olduğundan, kompozit enerjiyi büyük kırılma bölgeleri oluşturarak emer ve bunun sonucu sırasıyla kompozitin dayanım ve sertliğinde azalmalar ortaya çıkar [1,13]. Ayrıca, kompozitlerde hasar bölgesinin doğası çok karmaşık ve karakterize edilmesi güç olduğundan, hasara uğramış bir kompozit yapının darbe sonrası yük taşıma kabiliyetleri hakkında tahmin yapmak metal malzemelere göre daha zordur [12]. Problem, kompozit malzemelerde darbe hasarı için standart test tekniklerinin saptanmamış olmasıyla ve mevcut standartlardaki eksikler sebebiyle daha karmaşık bir hal almaktadır. Literatürde yapılan çalışmaların birçoğunda amaca yönelik üretilmiş cihazlar ve elverişli malzeme geometrileri kullanılmıştır. Sonuç olarak, farklı malzeme sistemlerini karşılaştırmak ve çabuk sonuçlara ulaşmak çoğu zaman zordur.

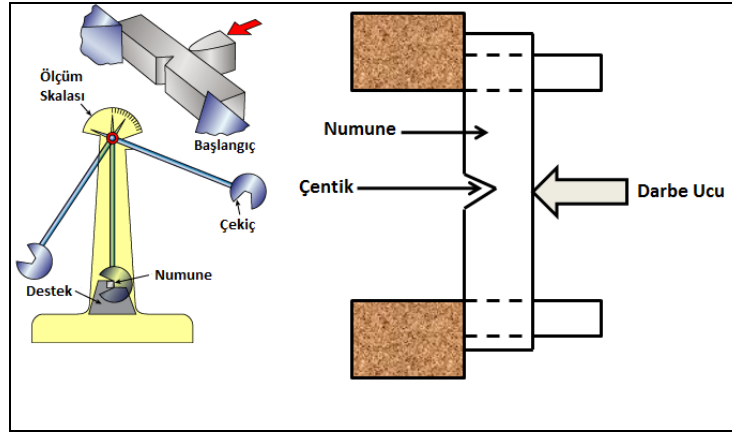
3.1. Kompozit Malzemelere Uygulanan Darbe Testi Türleri

Darbe testi gerçekleştirmede kullanılan deneysel düzeneklerin, kompozitlerin servis şartları altında çalışırken maruz kalacakları yükleme koşullarını taklit etmesi ve böylece gerçekte ortaya çıkacak hasar türlerini oluşturması gerekir. Basit olarak ifade etmek gerekirse darbe olayı iki temel biçimde ortaya çıkabilir: büyük bir kütleyle oluşan düşük hızlı darbe (takım anahtarı düşmesi gibi) ve küçük bir kütleyle oluşan yüksek hızlı darbe (yoldan sıçrayan taşlar, tabanca mermisi gibi). Düşük hızlı darbe genellikle düşen ağırlık veya sarkaç sistemiyle oluşturulurken yüksek hızlı darbe için gaz tabancası veya balistik test düzeneği kullanılır. Bununla birlikte deneysel standartlardaki eksikler sebebiyle takviyeli plastiklerin darbe davranışlarını incelemek için çok farklı türde test düzenekleri kullanılmaktadır ve bu yüzden malzemeler arasında doğru bir karşılaştırma yapmak güçtür [11-14, 24-27].

Kompozitlerin düşük hızlı darbe yüküne tepkilerini ölçmek için kullanılan test düzenekleri Charpy ve Izod sarkaçları, Gardner gibi düşen ağırlık test düzenekleri ve 10 m/sn hıza kadar darbeleri örnekleyen hidrolik kumandalı bilgisayar kontrollü düzlem içi ve düzlem dışı testlerde kullanılan test cihazlarıdır.

3.1.1.Charpy sarkaç testi

Kompozit malzemelerde darbe çalışmalarının ilk evrelerinde gerçekte metaller için tasarlanmış Charpy test düzeneği kullanılmıştır [21,28,29]. Bu düzeneğin kullanılmasındaki temel iki sebep basit olması ve ayarlanabilir olmasıdır; böylece kompozitlerdeki enerji sönümlene ve uzaklaştırma mekanizmaları hakkında bilgi verebilmektedir. Test numunesi genellikle kalın bir kiriştir ve bazen tam orta kısmında Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir çentik açılmıştır. Numune yatay bir düzlemde desteklenmiştir ve çentiğin tam zıt tarafından salınım yapan bir çekiçle darbe yüklemesine maruz bırakılır. Darbe esnasında harcanan enerji test cihazının üzerinde bulunan bir ölçekli kadran vasıtasıyla ölçülür. Daha fazla bilgi elde etmek için darbe ucuna bir gerinim ölçer monte edilir ve darbe kuvvetinin zamana bağlı değişimi elde edilebilir. Darbe süresince sönümlenen enerji kuvvet / zaman sinyalinin tümleştirilerek tanımlanabilir.

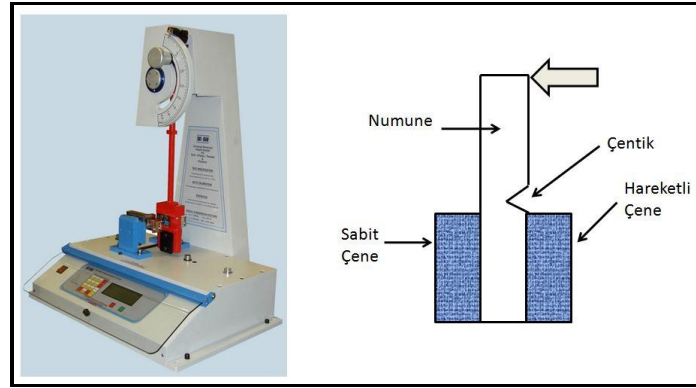


Şekil 3.1: Charpy darbe testi

Test düzeneğinin; kuvvet zaman eğrilerinde darbe ucunun doğal tepkisinden ortaya çıkan yüksek frekanslı harmonik salınımlar ortaya çıkarması gibi dezavantajları vardır. Bu etkiler farklı malzemelere ait harmonik salınımların belirlenmesiyle ortadan kaldırılabilir [30]. Daha önce bahsettiğimiz gibi test numunesi kısa, kalın bir kiriş şeklindedir ve bu yüzden tipik mühendislik parçalarının bir örneği sayılamaz. Ayrıca test tahribatlı tiptedir ve malzemelerde normal çalışma şartları altında ortaya çıkmayacak olan hasar türlerinin de ortaya çıkmasına sebep olur. Bader ve Ellis karbon fiber takviyeli plastiklerde Charpy enerjisinin numune geometrisiyle değiştiğini görerek test şeklinin uygunluğundan şüphelenmişlerdir [31]. Charpy testi yalnızca sürekli fiber takviyeli kompozitlerin darbe performanslarını ölçmek ve ilk basamakta bu malzemelerin dinamik tokluklarını tanımlamak için uygundur.

3.1.2.Izod testi

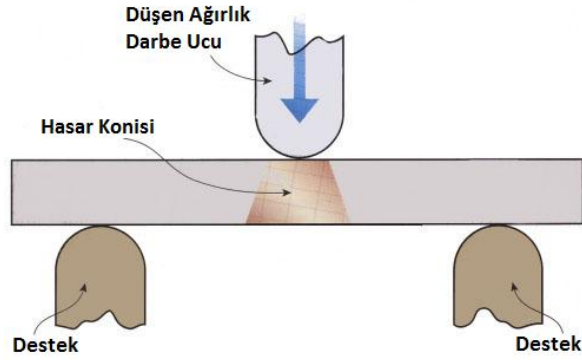
Izod darbe testi Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Test düzeneği ve işlem basamakları Charpy testinde bahsedilenlerle benzerdir. Izod testinde numune düşey düzleme bir ucundan sabit bir kiriş olarak bağlanır ve desteksiz ucundan salınan bir sarkaçla darbe yüküne uğratılır. Charpy testinde bahsedilen dezavantajların aynısı Izod testi içinde geçerlidir ve aynı zamanda sadece kompozit malzemelerin darbe dayanımlarını belirlemek için en uygun yöntemlerden bir tanesidir.



Şekil 3.2: Izod darbe testi

3.1.3.Düşen ağırlık tipi darbe testi

Bu tip testte yatay düzlemde sabitlenmiş numuneye belirli bir yükseklikten ağırlık bırakılarak çarptırılır (Şekil 3.3). Genellikle darbe olayı numunenin tamamen deformasyona uğramasına sebep olmaz fakat istendiğinde ölçülebilecek artık enerjinin kalmasına izin vererek bir miktar geri sıçrar. Darbe ucunun çarpma anındaki hızı hareket denklemlerinden ya da numunenin hemen üzerine yerleştirilen optik algılayıcılar yardımıyla ölçülebilir. Genelde darbe ucu kuvvet zaman özelliklerini belirleyebilecek şekilde tasarlanmıştır ve darbe olayı boyunca enerji dağılımını ölçebilecek bir yer değiştirme dönüştürücüsüne sahip olabilir. Charpy ve Izod testlerine göre bu testin avantajı, farklı geometride numunelere uygulanabilir olması sebebiyle daha karmaşık malzeme sistemlerini test edebiliyor olmasıdır. Çoğunlukla yarıküresel geometrili darbe ucu kullanılmasına rağmen düz ve sivri uç geometrili uçlar da kullanılabilir.



Şekil 3.3: Düşen ağırlık darbe testi

Farklı düzenlemede düşen ağırlık test düzeneklerine örnek olarak yarıküresel darbe ucunun küçük bir daire plaka içine vurmasıyla gerçekleşen Gardner testi ve yarıküresel algılayıcılı küçük bir ok şeklinde ucun numune içine önceden belirlenmiş oranda batırılmasıyla yapılan testler verilebilir [32].

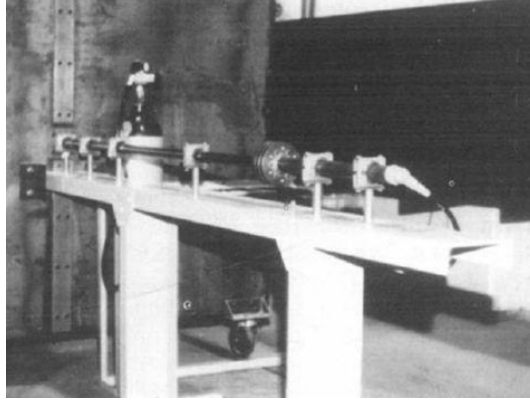
3.1.4.Hidrolik test cihazları

Geçmiş yıllarda bazı araştırmacılar yüksek oranda gerilmeler altında malzemelerin deformasyon ve hasarlarını incelemek için hidrolik test makineleri kullanmışlardır [33,34]. Burada kemik şeklinde veya tek mesnetten sabit kiriş düzenlemeli numuneler çok farklı gerilme değerlerinde test edilebilir. Numunelerin gerilme değerlerinin kayıtları, yapıştırılan gerinim ölçer veya optik dönüştürücüler kullanılarak ölçülebilir. Eğer gerinim ölçer veya diğer yer değiştirme ölçümünde kullanılan cihazlar kompozite yapıştırılarak bağlandıysa yapıştırıcının gerinim tepkisi de göz önünde tutularak değerlendirme yapılmalıdır. Bu test tekniğinin avantajı çekme dayanımı, modül ve tabaka içi kırılma tokluğu gibi temel malzeme özelliklerinin değerlendirilmesine düşen ağırlık ucuna bağlı temas etkilerinden arındırılmış olarak tanınmasıdır. Yük hücresinin kütlesinden ve numune tutma sisteminden kaynaklı etkilerin olabildiğince az olmasına dikkat edilmelidir çünkü bu sistemlerin eylemsizliklerinden kaynaklanan etkiler malzemelerin gerçek tepkilerini ölçmeyi ciddi olarak tehdit edebilir [34]. Bir başka dikkat edilmesi gereken nokta da malzeme geometrilerine kırılma mekaniği prensipleri uygulanırken gösterilmesi gereken özendir çünkü numune statik olarak yüklenmiş durumundakinden farklı şekilde hasara uğrayabilir [34].

kompozit malzemeler test edilirken nispeten uzun numune boyları (yaklaşık 60 mm) tercih edilmelidir.

3.1.4.2. Gaz tabancası darbe testi

Balistik hızlarda darbe testi Şekil 3.5'te gösterilen gaz tabancası test düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilir [39].



Şekil 3.5: Gaz tabancası darbe testi düzeneği [39]

Düzenekte namlunun bir ucunda bulunan odacığa nitrojen yada benzeri bir gazla besleme yapılır. Burada gaz plastik bir diyafram yardımıyla tutulur. Diyafram, kullanılan gaz belirlenen basınca ulaştığında patlar (elektrik ısıtması veya mekanik bir darbe yardımıyla) ve namlu içinde bulunan darbe ucunu ivmelendirerek dikey olarak diğer uca sabitlenmiş test numunesine çarpmasını sağlar. Darbe ucunun numuneye çarpma anındaki hızı ya optik algılayıcılar yardımıyla ya da basit bir telkoparma düzeneğiyle ölçülür [39,40]. Genelde test tamamen tahribatlı değildir fakat çoğunlukla büyük ölçekli hasar ve/veya numunede nüfuziyetle sonuçlanır. Son zamanlara kadar bu tip deneylerin en büyük dezavantajı çok az bilgi edinebilmesi idi. Diğer taraftan enstrümente edilmiş gaz tabancası test düzeneklerinin günümüzde geliştirilmiş ve ölçülmesi gereken kuvvet – yerdeğiştirme grafikleri elde edilerek darbe olayı detaylı olarak analiz edilir hale gelmiştir [41,42]. Gaz tabancası testleri büyük parçaların test edilmesinde kullanılabilir ve bu yüzden kompozit malzemelerin yüksek hızlı darbe tepkilerini ölçmek için çok kullanışlıdır.

Günümüzde standart olarak kabul edilebilecek bir darbe testi prosedürü henüz geliştirilememiştir. Sonuç olarak çok farklı türde uygulanan test prosedürleri, numune geometrileri ve darbe sonuçlarının sınıflandırılmasındaki çeşitlilik bu standardın oluşmasına engel olmuştur. Charpy ve Izod gibi sarkaç darbe deneyleri belirlenmiş numune geometrilerinde ve ölçülerinde yapıldığı için bütün kompozit

yapının darbe tepkisini göstermede yetersiz kalmaktadırlar. Düşen ağırlık ve gaz tabancası testleri tüm kompozit yapının darbe davranışı hakkında daha detaylı bilgi vermektedirler. Enstrümante edilmiş darbe test düzenekleri ise enerji sönümleme ve uzaklaştırma mekanizmalarının derinlemesine anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

3.2.Düşük Hızlı Darbe Tanımı

Darbe hasarı, düşük ve yüksek hızlı darbe olmak üzere genelde iki farklı kategoride sınıflandırılmıştır. Diğer taraftan literatürdeki çalışmalarda darbe hasarının sınıflandırılması hakkında net bir ortak görüşe varılamamış, araştırmacılar kendilerine ait sınıflandırmalar yapmışlardır.

Sjöblom ve Shivakumar düşük hızlı darbeyi; yarı-statik ve üst hız sınırı malzeme sertliğine, malzeme özelliklerine, darbe ucunun sertliğine ve kütlesine bağlı olarak 1-10 m/sn arasında değişen değerlerle tanımlamışlardır [43, 44]. Yüksek hızlı darbe tepkisinde gerilim dalgalarının malzeme kalınlığı boyunca yayılması baskın mekanizma olarak ortaya çıkar. Burada malzeme darbeye karşı tepki gösterecek yeterli süreye sahip olmadığından bölgesel hasarlar ortaya çıkar. Sınır şartların etkileri göz ardı edilebilir çünkü gerilim dalgaları malzemenin uçlarına ulaşmadan çok önce darbe olayı bitmiştir. Düşük hızlı darbede test edilen malzemenin dinamik yapısal tepkisi çok büyük öneme sahiptir. Çünkü darbe ucunun temas süresi hedef malzemenin tepki vermesi için yeterince uzundur ve sonuçta elastik olarak daha fazla enerji emilir.

Cantwell ve Morton düşük hızlı darbeyi 10 m/sn hıza kadar olan sınırlar içinde tutarken, Abrate tabakalı kompozitlerle yaptığı çalışmada 100 m/sn hızın altında kalan hızları düşük hızlı darbe olarak tanımlamıştır [45, 46].

Liu ve Malvern ile Joshi ve Sun ise darbe sınıflandırmasının ortaya çıkan hasara göre yapılabileceğini söylemişlerdir [47, 48]. Böylece yüksek hızlı darbe delinmeden kaynaklanan fiber kırılmalarıyla; düşük hızlı darbe de delaminasyon ve matris çatlaklarıyla tanımlanmıştır.

Davies ve Robinson düşük hızlı darbede kalınlık boyunca gerilim dalgalarının hasar dağılımında önemli bir rolü olmaması nedeniyle bunu daha basite indirgeyerek yüksek hızlı darbeye geçişte basit bir model oluşturmuşlardır [49, 50]. Gerilim

dalgaları plaka boyunca tekdüze yayıldığı için darbe ucunun hemen altında silindirik bir gerilim bölgesi oluşturur. Burada basma gerinmesi şu şekilde ortaya çıkar [49]:

$$\varepsilon_c = \frac{\text{Darbe hızı}}{\text{Malzeme içindeki ses hızı}} \quad (3.1)$$

% 0.5 ve % 1 civarındaki gerinim hasar oranları, epoksi kompozitler için 10 – 20 m/sn arasındaki geçişi verir.

3.3.Düşük Hızlı Darbe Hasarı Türleri

Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde heterojen ve anizotropik yapısından dolayı temelde dört farklı tipte hasar tipine rastlanır.

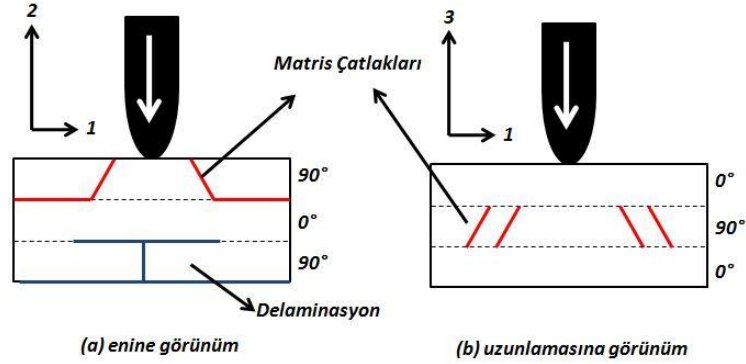
Matris hasarında; çekme, basma veya kesilmeye bağlı çatlaklar fiberlere paralel şekilde oluşur. Delaminasyon hasarı tabakalar arası gerilimlere bağlı ortaya çıkar. Fiber hasarı; çekme esnasında fiber kırılmasıyla ve basma esnasında fiber eğilmesiyle ortaya çıkar. Delinme hasarı, darbe ucunun malzeme yüzeyini delmesiyle ortaya çıkar.

Hasar türünün tespit edilmesi büyük öneme sahiptir. Hasar türünün tespiti sadece darbe olayı hakkında değil aynı zamanda darbeye uğrayan malzemenin kalıntı dayanımı hakkında da önemli bilgiler verir. Ayrıca hasar türleri arasındaki bağıntının anlaşılması da önem arz etmektedir çünkü bu hasar başlangıcı ve yayılımı hakkında detaylı bilgi verir [47].

3.3.1.Matris hasarı

Literatürde yapılan çalışmaların çoğunluğunu 1 ile 5 J enerji seviyeleri arasında kalan düşük hızlı darbe çalışmaları oluşturmaktadır. Bu tür çalışmalar matris çatlakları ve delaminasyon başlangıçlarıyla ilgili bilgileri veren çalışmalardır. Matris hasarı enine düşük hızlı darbe ile ortaya çıkan ilk hasar türüdür ve matris çatlamasıyla sonuçlanır. Matris çatlaması bünyesinde aynı zamanda matris ile fiber arasındaki ayrılmayı da barındırır. Matris çatlakları fiber ve matris arasındaki yön uyumsuzluğundan ortaya çıkar ve genellikle tek yönlü tabakalarda fiberlere paralel yönde bir yerleşimi vardır. Joshi ve Sun Şekil 3.6'da görülen tipik bir çatlak ve delaminasyon şekliinden bahsetmişlerdir [51].

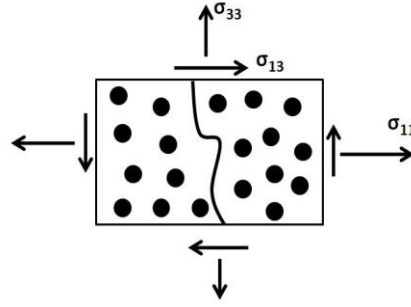
Üst katmanlardaki (Şekil 3.6.a) ve orta katmanlardaki (Şekil 3.6.b) matris çatlakları darbe ucunun kenarındaki bölgeden başlar. Bu kesme çatlakları, malzeme boyunca oluşan çok yüksek enine kesme gerilmeleriyle oluşur ve 45° eğime sahiptirler [52]. Enine kesme gerilmeleri, darbe temas kuvveti ve temas yüzeyi alanıyla doğrudan ilişkilidir. Şekil 3.6.(a)'da alt tabakada görülen yüksek gerilmeye bağlı eğmeden kaynaklanan çatlak, eğme çatlağı olarak adlandırılır ve dikey karaktere sahiptir. Eğme gerilmesi, tabakanın eğilme hasarıyla yakından ilişkilidir. Lee ve Sun analizlerinde aynı sonuca ulaşmışlardır [54]. Cantwell ve Morton oluşan matris çatlağının darbeye maruz kalan malzemenin bütün yapısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [55]. Uzun ince kompozitlerde alt tabakada oluşan eğilme çatlakları aşırı enine yerdeğiştirmeye bağlı olarak ortaya çıkarken, kısa ince plakalar daha sert olduklarından enine kesme çatlakları daha yüksek temas kuvvetlerinde darbe ucunun altında kalan üst tabakalarda ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.6: 0/90/0 yönelimli kompozit plakada darbeye bağlı ilk hasar oluşumu

Liu ve Malvern yukarıdaki araştırmacıların bahsettiği matris çatlama şekillerine katılırken Wu ve Springer farklı dizilime sahip grafit / epoksi kompozitlerde detaylı matris çatlağı haritaları yayınlamışlardır [47, 56].

Chang ve arkadaşları bu alanda birçok çalışma gerçekleştirmişler ve sonuç olarak 90° yönelimli tabakadaki eğme çatlağının σ_{33} , σ_{11} ve σ_{13} kombinasyonu ile ortaya çıktığını öne sürmüşlerdir (Şekil 3.7) [48,52,57,59 - 61]. Ayrıca darbe olayı boyunca σ_{33} 'ün, σ_{11} ve σ_{13} 'e göre çok küçük olduğunu ve altında kaldığında hiçbir hasarın oluşmadığı kritik bir enerji seviyesinin bulunduğunu bulmuşlardır.



Şekil 3.7: Enine tabakada eğilme matris çatlaklarının oluşmasına katkıda bulunan gerilim bileşenlerinin diyagramı.

3.3.2.Delaminasyon Hasarı

Delaminasyon, farklı dizilimlerdeki fiber tabakaları arasında reçine yönünden zengin kısımda oluşan çatlak hasar türüdür. Aynı tabakadaki katlar arasında oluşmaz [56,62,63].

Liu ve Malvern, matris çatlaklarının bulunduğu alanlarla delaminasyonlar arasında detaylı bağlantılar kurmuşlardır [47]. Liu, delaminasyonları; komşu tabakalar arasındaki eğme dayanımı farklılıklarının sonucuna veya tabakalar arasındaki farklı fiber yönelimlerine bağlamıştır [64]. Deneysel çalışmasında, delaminasyon alanlarının dikdörtgen şekilli olduklarını ve dikdörtgenin ana ekseninin, alt tabakadaki fiberlerin yönüyle aynı olduğunu bulmuştur. 0 / 90 yönlü tabakalarda şeklin ayrık fıstık şekline dönüştüğünü bulmuştur. Bu sonuçlar literatürde birçok araştırmacı tarafından da raporlanmıştır [51,56,57,65-68]. Ayrıca eğilme kaynaklı gerilmelerin delaminasyonların temel sebebi olduğunu ve deneysel çalışmalarında fiber yönünde plakanın içbükey olarak eğilmeye meyilliyken, eğilmenin enine kesitte dışbükey olduğunu bulmuştur. Liu komşu tabakalar arasında eğme sertleşmesini içeren bir eğme uyumsuzluğu katsayısı tanımlamış ve 0/90 yönelimli tabakalar için rapor edilmiş fıstık geometrisini tahmin etmiştir. Daha büyük açılarda uyumsuzluğun (en büyük fiber uyumsuzluk açısı 0/90 yönelimlidir) daha büyük delaminasyon alanı anlamına geleceğini söylemiştir. Delaminasyon alanı ayrıca malzeme özellikleri, tabakaların üst üste konma biçimi ve tabaka kalınlığı ile de etkilenmektedir [69].

Dorey bu alanda çalışma yapan bir başka araştırmacı olarak, delaminasyon hasarının olduğu noktada emilen enerjiyi tanımlayan elastik gerilme enerjisi E 'yi basit bir ifadeyle anlatmıştır [70-72].

Bu hasar türünün kısa ve kalın numunelerle, düşük tabakalar arası kesilme dayanımına sahip kalın plakalarda daha çok ortaya çıktığını belirtmiştir.

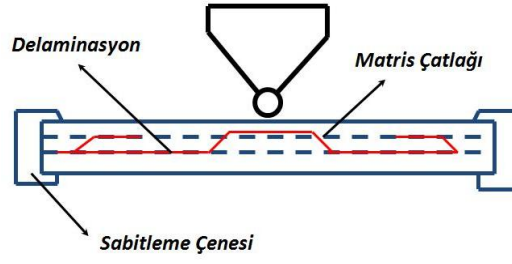
$$Enerji = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (3.2)$$

Burada t = kalınlık, τ = tabakalar arası kesme dayanımı, w = genişlik, L = desteksiz uzunluk, E_f = eğilme modülüdür.

Enine darbeye oluşan delaminasyon, belirli bir eşik enerjisine ulaşıldıktan sonra ortaya çıkar. Bu delaminasyonun sadece bir matris çatlağı olması durumunda görüldüğü rapor edilmiştir [58]. Bu durumu ve etkileşime sebep olan gerilim hallerini açıklamak için birçok çalışma yürütülmüştür.

Takeda ve arkadaşları, matris çatlağı ve delaminasyon arasındaki bağlantıyı ortaya koymak için çalışmışlar ve delaminasyonların her zaman ara yüz bölgesinde değil bazen de yan kısımlarda ortaya çıkabildiğini göstermişlerdir [73]. Joshi ve Sun noktasal enine darbeye uğramış 0/90/0 yönelimli tabakalarda delaminasyon matris çatlağı arasındaki etkileşimi çalışmışlardır [51]. Üst tabakadaki eğimli kesilme gerilmesinin (Şekil 3.6.a) ara yüze ulaştığında fiberlerin yönelimindeki değişimle durduğu ve tabakalar arasında delaminasyon olarak yayıldığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu delaminasyon genellikle ortadaki enine çatlakla sınırlanmıştır (Şekil 3.6.b). Dikey eğilme çatlağının (Şekil 3.6.b) büyümesi sınırlanmamış alt ara yüzey delaminasyonunu başlattığı düşünülmüştür. Matris çatlaklarına öncülük eden delaminasyonlar kritik matris çatlakları olarak bilinirler [57].

Chang ve arkadaşları zamana bağlı düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmişler ve 0/90/0 yönelimli kompozit için Şekil 3.8'de gösterildiği gibi bir hasar biçimi ortaya koymuşlardır [52,57,58,74].



Şekil 3.8: 0/90/0 yönelimli plakada darbeye bağlı delaminasyon ve matris çatlakları şekilleri

Change ve Choi üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinde bu matris çatlaklarını simule ederek çatlakların yakınındaki gerilim dağılımlarını incelemiştir [57]. Matris çatlaklarının varlığıyla ortaya çıkan yüksek seviyedeki düzlem dışı gerilmelere ve ara yüzey boyunca oluşan yüksek tabakalar arası kesme gerilmelerine bağlı olarak delaminasyonun mode 1 kırılma çatlakları şeklinde başladığını ortaya koymuşlardır. Delaminasyon hakkındaki bu incelemede Garg, matris çatlaklarıyla başlayan delaminasyonun, tabakalar arasındaki normal ve ara yüzeylerdeki kesme gerilmelerine bağlı olarak ortaya çıktığını söylemiştir [75].

Liu ve arkadaşları kırılma mekaniği yaklaşımını kullanarak çizgisel darbe yüklemesine bağlı hasar mekanizmaları arasındaki etkileşimi çalışmak için bir analitik model geliştirmişlerdir [74]. Araştırmacılar eğme ve kesme çatlaklarının her ikisinin de delaminasyonu başlatabileceğini; fakat kesme çatlaklarıyla başlayan delaminasyonun düzensiz bir yapı gösterirken eğme çatlaklarıyla başlayan delaminasyonların düzenli bir şekilde büyüdüğünü ve uygulanan yük doğru orantılı olduğunu bulmuşlardır.

Finn ve Springer darbeye bağlı delaminasyon başlattığını düşündükleri gerilmeleri detaylı olarak tanımlamışlardır [69,76]. Darbe eğilmesi, bükülmesi veya enine kesme ile başlayabilecek olan tüm hasar türleri düşünülmüştür.

Delaminasyon başlangıcı ve ilerlemesiyle ilgili birçok kırılma mekaniği analizinin uygulaması zordur çünkü bu analizler sadece ilk kusur ve çatlak boyutu hakkında varsayımda bulunurlar [77]. Diğer taraftan Davies ve Robinson orta tabakadaki dairesel delaminasyona ait çatlak büyümesinin kritik eşik kuvvetini belirlemek için bir çalışma yapmışlar ve şaşırtıcı olarak mode-II gerilme enerjisi salınım oranının delaminasyon çapından bağımsız olduğunu bulmuşlardır [50]. Bu nedenle ilk hata boyutuna ihtiyaç duyulmaz ve eşik kuvvet değerini veren ifade şu şekildedir:

$$P_c^2 = \frac{2\pi^2 E h^3 G_{IIc}}{9(1-\nu^2)} \quad (3.3)$$

Bu ifadede P_c = eşik yük; G_{IIc} = kritik gerilim enerjisi salınım oranı; ν = Poisson oranı; h = plaka kalınlığı ve E = modüldür.

Delaminasyon başlangıcı ile ilgili bu denklemden yapılan tahminler, yarı-izotropik tabakalar için yapılan deneylerle bire bir örtüşmüştür.

Delaminasyon büyüme süreci; delaminasyona uğramış ara yüzeyin altında kalan katmanda, tabakalar içi boyuna kayma gerilmeleri (σ_{13}) ve enine düzlemsel gerilmelerle (σ_{22}) yönetilirken; ara yüzeyin üzerinde kalan katmanda tabaka içi kayma gerilmesi (σ_{23}) tarafından yönetilir [67].

Bazı araştırmacılar, bilinen bir hasar başlangıç boyutundan delaminasyon büyümesi değerlerine ulaşmak için üretim süreci esnasında katlar arasına ince bir folyo koyarak yapay delaminasyonlar oluşturmuşlardır [78]. Dooze ve arkadaşları delaminasyon büyümesi birim alanı içindeki enerji sönümlene miktarını hesaplamışlar ve bu değerin sabit olduğunu bulmuşlardır (596 J/m^2) [79]. Jih ve Sun tabaka içi kırılma tokluğunun delaminasyon büyüklüğünden bağımsız olduğunu ve maksimum darbe kuvvetinden delaminasyon alanının tahmin edilebileceğini söylemişlerdir [53]. Wu ve Shyu da aynı şekilde maksimum kuvvetle delaminasyon alanı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu bulmuşlar ve sonuçları yorumlama yoluyla delaminasyon başlangıcı için bir eşik kuvvet değeri bulmuşlardır [66].

Darbeye başlayan delaminasyon büyümesinin sayısal simülasyonunu yaptıklarında Razi ve Kobayshi [80] yayılma esnasında mode-II'nin baskın hasar modu olduğunu öngörmüşlerdir. Aynı sonuç Guild ve arkadaşları tarafından da ortaya konmuştur [65].

3.3.3.Fiber Hasarı

Bu tür hasar kırılma sürecinde genellikle matris çatlağı ve delaminasyondan daha sonra ortaya çıkar ve araştırmalar daha çok düşük enerjili hasarlara odaklandığı için

bu alanda daha sınırlı bilgi edinilmiştir. Fiber hasarı; darbe ucunun altında bölgesel yüksek gerilim ve batma etkilerine bağlı oluşurken (genellikle kesme kuvvetleri tarafından ortaya çıkan); darbeye maruz kalmayan bölgelerde yüksek eğme gerilmeleriyle oluşur. Fiber hasarı kötü sonuçlanan bir delinme hasarının ön habercisidir. Dorey tarafından arka yüzeydeki eğilmeye bağlı oluşacak fiber hasarı için gerekli olan enerji şu denklemle ortaya konmuştur [71]:

$$Enerji = \frac{\sigma^2 wtL}{18E_f} \quad (3.4)$$

Burada σ = eğme dayanımı; E_f = eğilme modülü; w = genişlik, L = desteksiz uzunluk, t = numune kalınlığıdır.

3.3.4.Delinme

Delinme makroskopik bir hasar türüdür ve fiber hasarı, darbe ucunun malzemeye tamamen batmasına izin verecek kadar büyüdüğünde ortaya çıkar [81]. Darbe delinmesine yönelik çalışmaların çoğu balistik hızlarda olmasına rağmen bazı düşük hızlı darbe delinmesi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Cantwell ve Morton karbon fiber takviyeli plastiklerde darbe enerjisine bağlı delinme eşik değerinin malzeme kalınlığının artmasıyla hızlı bir biçimde arttığını ortaya koymuşlardır [55]. Ayrıca delinme sürecini; kayma, delaminasyon ve elastik eğilme aracılığıyla emilen enerji miktarını hesaplamak için analiz etmişlerdir. Bu basitleştirilmiş analiz ortaya çıkan kaymanın ana enerji emme mekanizması olduğunu saptamıştır (malzeme kalınlığına bağlı olarak emilen enerjinin yaklaşık %50 - %60 kadarı).

El-Habak farklı cam fiber takviyeli plastik kompozitleri delinme yükü altında test etmiş ve cam fiberlere uygulanan işlemlerin delinme eşik yükünü tanımlamada anahtar bir rol oynadığı sonucuna varmıştır [82]. Her ne kadar matris malzemesinin delinmeye etkisi çok az olsa da polyester matris epoksi matrise göre daha tercih edilebilir çıkmıştır. Dorey emilen enerjiyi hesaplamak için çok basit bir analitik model geliştirmiştir [83]:

$$Enerji = \pi \gamma t d \quad (3.5)$$

Burada γ = kırılma enerjisi, d = darbe ucu çapı, t = plaka kalınlığıdır.

Buraya kadar bahsi geçen darbe testleri tek yönlü farklı dizilimde fiber tabakalarından oluşan kompozit malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fiberlerin tek yönlü dizilime sahip olduğu katlarda matris çatlaklarının yönü hakkında tahminde bulunmak zor değildir. Fiberler gelişigüzel dizildiğinde çatlak modeli hakkında tahminde bulunmak zorlaşır. Tabaka halinde kalıplanan paneller ve sürekli lif şeklinde sarılmış hasırlar düzensiz uzun ve kısa fiber tabakalarına örnektir.

Bu karmaşık yapılı kompozitlerin hasar türlerini tanımlamak için farklı bir yaklaşıma ihtiyaç duyulur. Liu ve Malvern plaka kalıplarda ürettikleri kompozitlerle yaptıkları çalışmada darbeye maruz kalmış yüzeydeki matris çatlaklarının kısa ve darbe noktasından uzakta bir dizi dairesel halka oluşturduğunu görmüşler ve bunların darbe noktasından dışarıya doğru ilerleyen çekme gerilmesi yayılım dalgaları ile oluştuğu sonucuna varmışlardır [60]. Chaturvedi ve Sierakowski ile Khetan ve Chang gaz tabancası test düzenekleriyle cam/polyester plaka kompozitleri üzerinde çalışmışlardır [83, 84]. Son zamanlarda çalışma yapan araştırmacılar hasarın bir hasar alanı ile tanımlanabileceğini öne sürerlerken, eski araştırmacılar sertlik ve dayanımdaki azalmalar hakkında tahminde bulunabilmek için hasar modları hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulan kalıntı gerilme mukavemet testlerinden yararlanmışlardır. Liu ve arkadaşları otomotiv endüstrisinde kullanılan plaka kalıp ile üretilmiş kompozitlerde tamir edilebilirlik üzerine yaptıkları çalışmada üç tür darbe ile başlayan hasar türünden bahsetmişlerdir [85]: 1) çentik (darbe ucunun altında kalan matriste ezilme) 2) eğme kırılması 3) delinme.

3.4.Kompozit Yapı Bileşenlerinin Düşük Hızlı Darbe Hasarına Etkileri

Bir fiber takviyeli kompozit fiber ve matris olmak üzere iki temel bileşenle bu ikisi arasında kalan yapıştırma ara yüzeyinden oluşur. Bu bileşenlerin özellikleri, kompozitin darbeye bağlı oluşan hasar türleri için gerekli olan kritik gerilme veya enerji değerlerini etkiler.

3.4.1.Fiberler

Fiberler, kompozitin sertlik ve dayanımını sağlayan temel yük taşıyıcı elemanlarıdır. En sık kullanılan fiber türleri cam, karbon ve Kevlar'dır. Karbon en yüksek sertlik ve dayanım değerlerine sahip olduğundan havacılık endüstrisinde yapısal elemanlarda kullanılmasına rağmen diğer taraftan çok kırılıgandır ve %0.5 ile %2.4 arasında

gerinme değerlerinde hasara uğrar. Cam fiberler daha düşük dayanım ve sertliğe sahiptirler fakat daha yüksek gerinme değerlerinde hasara uğrarlar (%3.2) [86] ve karbon fiberlere göre daha ucuzdurlar. Kevlar fiberin mekanik özellikleri cam ve karbon arasında bir değere sahiptir [87]. Karbon fiberin tasarımda şekil vermek için kullanılabilecek gerinme miktarı %0.4 iken bu değer hasar tolerans performansında yapılacak iyileştirmelerle %50 artırılabilir [88]. Darbeye karşı gösterdikleri zayıflık nedeniyle fiberlerin çok sayıdaki üstün özelliği onların avantajı olarak kabul edilemez.

Düşük hızlı darbe dayanımı açısından enerjiyi fiberler üzerinde elastik olarak depolayabilmek temel bir parametredir [45]. Bunun sayısal karşılığı, fiber modülü ve hasar gerilmesinin belirlediği gerilme genleme eğrisinin altında kalan alana karşılık gelen değerdir. Bu yüzden E-camı karbona göre üç kat daha fazla elastik enerji emer. Hibrit kompozitler genellikle karbon takviyeli kompozite darbe dayanımını artırmak için cam veya Kevlar eklenerek üretilir [77,87]. Fakat fiberler arasında ortaya çıkan modül uyumsuzluğu hibrit kompozitlerin tasarım karmaşıklığını artırır.

Fiber hasarları içinde değinilmesi gereken bir başka başlıkta cam fiberlerin gerilme oranı hassasiyetidir. Cam fiberlerin gerilme oranı hassasiyetiyle ilgili literatürde çelişkili bilgilere rastlanmaktadır. Genellikle, karbon fiberlerin gerilme oranı ile bir bağlarının olmadığı düşünülürken [43,70,89,90] cam fiberlerin gerilme oranını artıran bir modüle ve sertliğe sahip oldukları düşünülmektedir [70,90-92]. Ancak cam fiberlerle ilgili 1983 yılında yapılan kapsamlı çalışmada, Sierakowski ve Chaturvedi kompozit sistemin gerilim oran hassasiyetinin rolü hakkında yeterli bilginin olmadığı sonucuna varmışlardır [93]. Bu durum geçerliliğini günümüzde de korumaktadır.

1 ile 5.5 m/s hızlar arasında gerçekleştirdikleri darbe testlerinde Caprino ve arkadaşları cam/polyester için herhangi bir gerilme oranı etkisinden bahsetmemişlerdir [94]. Ancak daha geniş gerilme oranı aralıklarında Sims, cam keçe/polyester tabakalı malzeme için 10^{-6} ile 10^{-1} m/s aralığında gerçekleştirilen Cahrpy darbe testinde artan eğilme dayanımını raporlamıştır [95].

Hayes ve Adams çekme gerilme oranı etkilerini çalışmak için özel sarkaçlı bir darbe test düzeneği yapmışlar, hızı 2.7 m/s'den 4.9 m/s'ye kadar artırarak cam/epoksi malzemede testleri gerçekleştirmişlerdir [96]. Ayrıca statik çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Elastisite modülü ve dayanımı genellikle artan darbe hızıyla

artmış fakat dinamik yüklemde bu değişim gözlemlenememiştir. Karbon fiberlerin gerilme oranından bağımsız oldukları genel inanişına zıt olarak bu araştırmacılar grafit/epoksi modülünün artan darbe hızıyla azaldığını raporlamışlardır. Dinamik yüklerdeki son dayanımın ve nihai gerilmedeki enerjinin statik yüklemdekilerden daha düşük olduklarını belirtmişlerdir.

Li ve arkadaşları yarı-statik oranlardaki gerilmeden (10^{-3} 'ten 10 s^{-1} kadar) yüksek hızlı darbeye geçiş yapan (350 'den 1100 s^{-1}) cam için çekme ve basma dayanımlarıyla sertlikte bir artıştan söz etmişlerdir [97]. Ayrıca cam için kalınlık boyunca dayanımın arttığını ortaya koymuşlardır. Ancak düşük hızlı darbe gerilme oranı, Li'nin çalışmasından daha dar aralıkta kalır ve bu yüzden genellikle düşük hızlı darbe testi için fiber gerilme oranı etkileri görmezden gelinebilir.

3.4.2. Matris

Bir fiber takviyeli plastikte polimer matris (genellikle termosettir) bazı kritik görevleri yerine getirir: yükün fiberlere transferini sağlar, fiberlerin kendilerine zarar vermelerini önler ve yapı içinde yönlendirmelerini/sabitlenmelerini sağlar. Yapısal uygulamalarda epoksi reçineler ana malzeme olarak kullanılırlar çünkü sıcak/ıslak basma dayanımı gereksinimlerini karşılarlar. Diğer taraftan epoksi kırılgan yapıdadır ve çatlak büyümesine karşı direnci düşüktür. Termoset reçinelerde matris hasarını azaltmak ve tabakalar arası kırılma tokluğunu artırmak için akışkan düzenleyiciler veya kauçuk veya termoplastik reçineler matrise eklenerek bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [88]. Diğer taraftan artırılmış tabakalar arası kırılma tokluğu her zaman mekanik özellikleri azaltır ve saf matris malzemesinde yapılan geliştirmeler, matris içinde plastik bölgelerin büyümesini engelleyen kırılgan fiberlerin varlığından ötürü kompozite tam olarak aktarılamaz [45]. Tokluğu yüksek, yüksek kesme gerilmesi dayanımına sahip ince bir tabakanın eklenmesi de delaminasyonları azaltmak açısından bir çözüm olabilir [98]. Termoplastik reçinelerin kullanımda termoset reçinelere oranla daha fazla tercih edilmelerinin sebebi yüksek kırılma tokluğuna sahip olmalarıdır. Geçmişte termoplastik kompozitlerin kullanımını sınırlayan faktörler arasında düşük termal kararlılıkları ve kimyasal dirençleri, fiber-matris ara yüzeyindeki yapışma problemleri ve sürünme problemi sayılabilir [88]. Yeni üretim tekniklerine olan ihtiyaç termoplastiklerin kullanımını hala sınırlandırmaktadır fakat bu problemin üstesinden gelindiği takdirde termoplastik esaslı kompozitlerin kullanımı daha yaygın hale gelecektir.

3.4.3.Ara yüzey

Fiber ve matris arasındaki ara yüzey bölgesi hayati öneme sahiptir. Genellikle karbon fiberlerin yüzeyleri fiber matris arasındaki yapışma derecesini artırmak için oksidatif işlemlerden geçirilirken cam fiberler bir bağlantı ajanıyla işleme tabi tutulurlar. Ara yüzey bölgesi belirli bir yükte ortaya çıkan hasar tipini etkileyebilir; örneğin zayıf yapışma geride temiz fiberler bırakarak düşük enine gerilmelerde hasarla sonuçlanabilir. Bağlanma dayanımı, fiber-matris ara yüzeyinden enerji emilerek tokluğun artırılması yoluyla yükseltilebilir; diğer taraftan bu mekanik özellikleri azaltmaktadır.

3.5.Karmaşık Geometrilili Kompozit Numunelerin Düşük Hızlı Darbe Performansı

Darbe testlerinin büyük çoğunluğu kiriş üzerinde düz kupon veya plaka formatında geometrilerde, sabitlenmiş veya basitçe desteklenmiş şekilde yapılmışlardır. Geometri basitleştirilerek yapısal etkiler minimize edilmiş ve malzeme hakkında daha fazla bilgi elde etmek mümkün olmuştur. Diğer taraftan birçok kompozit bileşen karmaşık geometriye sahiptir ve sertleşmiş panellerin tepkileri önemli bir alandır.

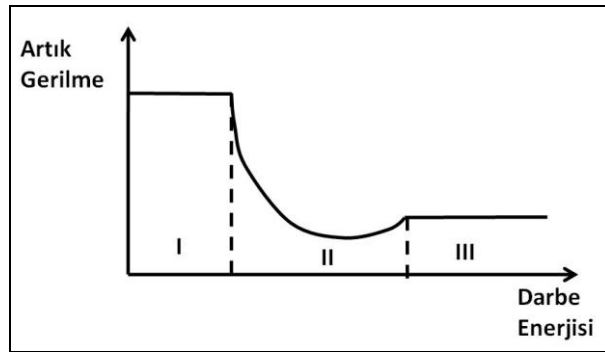
Dorey gözle görülebilir darbe hasarının sertleştiricilerin yakın bölgesinde önemli oranda azaldığını, yapının daha uyumsuz olduğunu ve sertleştiricilerin yapıda oluşturdukları heterojen sertleşmeden dolayı, darbe yayılma alanının asimetrik olduğunu raporlamıştır [70]. Davies ve arkadaşları darbe kuvvetlerinin sertleşmiş bölgelerde daha yüksek olduğunu fakat azalan deplasmanların daha az gerilmelere ve dolayısıyla daha az gerilme kaynaklı hasarlara yol açacağını öngörmüşlerdir [50,68]. Sertleştiricinin tam üzerine gelen darbeler plaka ve sertleştirici arasında ayrışmalara sebep olurken sertleştiricilerin sınırlarında delaminasyonlar oluşur. Basma yüküne maruz kalmış panelde yıkıcı etkilere sebep olabilecek hasar, sertleştirici boyunca genişleme eğilimindedir (çünkü oluşan kuvvetler en sert yolu izleyecektir). Sertleşen bölgelerde oluşan çok yüksek kuvvetler ayrıca krater oluşmasına sebep olur. Sertleştirici kullanımında ortaya çıkabilecek bu kusurlar, birçok üreticinin mekanik birleştirme tekniklerini tercih etmesinin sebebidir.

3.6.Düşük Hızlı Darbe Sonrası Kompozitlerin Kalıntı Dayanımları

Kompozit malzemelerin darbe hasarına karşı olan güçsüzlükleri, kalıntı dayanımlarında ve yapısal bütünlüklerinde büyük düşmelere sebep olur. Hasar toleransı terimi, bir kompozitin darbe-sonrası işlevini yerine getirme derecesini tanımlamak için kullanılır. Darbe sonrası içyapıda oluşan gözle görülemeyen hasarlar, kompozitin dayanımını %50 oranında azaltabilir. Çekme, basma, eğilme ve yorulma sonrası ortaya çıkan kalıntı dayanım değerleri hasar türüne bağlı olarak yapılacak iyileştirmelerle azaltılabilir.

3.6.1. Artık çekme gerilmesi

Artık çekme gerilme eğrisi Şekil 3.9'da görüldüğü gibidir [46]. Grafikte bir numaralı bölgede darbe enerjisi hasar başlangıcı için gerekli olan eşik enerji değerinden düşük olduğu için herhangi bir hasar gözlemlenmez. Eşik enerji değeri bir defa geçildi mi ikinci bölgede artık gerilme değeri hasar yayılımındaki hızlı artışa bağlı olarak ani bir azalma gösterir. Üçüncü bölgede artık çekme gerilmesi sabit bir değerde yatay seyir izler çünkü darbe hızı net bir delinme oluşturacak seviyededir. Bu bölgede oluşan artık çekme gerilmesi, darbe ucunun boyutlarına bağlı olarak ortaya çıkan deliğin ortaya çıkardığı hasara eşit olduğu varsayılarak değerlendirilebilir. İkinci bölgedeki minimum değer üçüncü bölgedeki sabit değerden daha düşüktür. Çünkü daha yüksek hızda ortaya çıkan hasar daha bölgesel olduğundan (net şekilde görülen bir delik oluşur), ikinci bölgede oluşan düşük hızla bağlı hasar daha fazla alana yayılır [70].



Şekil 3.9: Darbe enerjisine bağlı artık gerilme eğrisi

Fiberler çekme yükünün büyük bir kısmını uzunlamasına ekseninde taşıdıkları için fiber hasarı kritik hasar türüdür. Caprino, artık çekme gerilmesini darbe kinetik enerjisinin bir fonksiyonu olarak tanımlamayı sağlayan bir doğrusal elastik kırılma

mekaniği modeli geliştirmiştir [90]. Bu model, deneysel sonuçlarla iyi bir uyuřma göstermiştir.

3.6.2. Artık basma gerilmesi

Kompozit malzemelerin artık dayanım türleri içinde en zayıf oldukları tür artık basma gerilmesidir. Basma dayanımında büyük oranda azalmaların sebebi, delaminasyonlardan kaynaklanan bölgesel kararsızlıklardır [70,99]. Delaminasyonlar düşük enerjili darbelerle ortaya çıkabildiğinden, gözle görülemeyen hasarlar için basma dayanımında büyük düşüşler ortaya çıkabilir. Delaminasyonlar tabakaları daha düşük eğme dayanımına sahip alt-tabakalara böler ve burulma yüklerine karşı dayanım düşer [88]. Basma yükü altında delaminasyon  tür eğilme hasarından bir tanesini ortaya çıkarır [46], bunlar (a) malzemenin tamamında ortaya çıkan kararsızlık / tabakanın tamamında eğilme (b) bölgesel kararsızlıklar (daha ince olan alt-tabakalardaki eğilme) (c) her iki hasar türünün birleşimi. Delaminasyon boyu uzadıkça, hasar türü malzemenin tamamındaki kararsızlık önce bölgesel kararsızlığa dönüşür, daha sonra da her iki hasarın birleşimi gözlemlenir.

Artık basma gerilmesi testleri gerçekleştirilirken ortaya çıkan en büyük zorluk hasarın yayılma alanını gözlemleyebilecek kadar büyük bir algılayıcının malzeme üzerine yerleştirilmesidir. Bunun sonucu olarak tüm malzemede ortaya çıkan eğilmeyi önlemek için karmaşık burkulma-önleyici kılavuzlar kullanılması gerekirken diğerk taraftan bu kılavuzların kullanımı bölgesel kararsızlıklara engel olmamalıdır [100].

3.6.3. Artık eğilme gerilmesi

Bu konuda yapılan çalışmalar çok sınırlı olmakla birlikte eğme modülü ve dayanım değerklerinin her ikisinin de artan düşük hızlı darbe enerjileriyle yumuşak malzemeler için (cam/epoksi) azaldığı görülürken grafit/epoksi gibi sert malzemelerde tam hasar ortaya çıkana kadar bu değerklerde bir kaybın olmadığı ortaya konmuştur [46]. Eğilme testi numune üzerinde karmaşık bir gerilim modeli ortaya çıkardığından hasarın artık dayanım üzerindeki etkisini analiz etmek kolay değildir.

3.6.4. Artık yorulma ömrü

Jones ve arkadaşları basma-basma ve çekme-basma yüklerinin en kritik yorulma yüklemeleri olduğunu ortaya koyarak basmanın statik yükleme şartları altında en çok hasara neden olan tür olduğunu söylemişlerdir [101]. Statik hasar yüküne (S) bölünen maksimum artık basma yükü, ilk hasar boyuna bağlı olarak, 10^6 çevrim sonrası 1 değerinden 0.6 değerine düşer. Azalma miktarı en yüksek değerine ilk yüz çevrimde ulaşır ve sonrasında herhangi bir azalma gözlemlenmez. Bu yüzden $S = 0.6$ değeri yorulma eşik değeri olarak değerlendirilebilir. Bütün bu çıkarımların sonucu olarak yorulma yüklemesi artık özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılacak uygun bir yöntem değildir.

3.7. Düşük Hızlı Darbe Hasarıyla İlgili Genel Sonuçlar

Düşük hızlı darbe hasarı, laboratuvar ortamında test cihazlarıyla yapılan testlerin sonucuna göre 1 ile 10 m/s arasında değişen hızlarda ortaya çıkan hasar olarak tanımlanmıştır. Darbe ucu ile malzeme arasındaki temas süresi, bütün malzemenin darbeye tepki verebileceği yeterli uzunlukta olmalıdır. Fiber hasarı ve delinmeyle ortaya çıkan darbe hasarı türleri, matris çatlağıyla başlayarak delaminasyona kadar değişim gösterir. Bir tür hasarın başlangıcı ve yayılması hakkında tahminde bulunabilmek için hasar türleri arasındaki ilişkilerin de net bir şekilde ortaya konması gereklidir. Her ne kadar sertleştirilmiş reçineler veya termoplastiklerle baskın matris hasarı azaltılabiliyor olsa da, malzemenin darbe tepkisini belirlemede en büyük faktör fiberlerin yük taşıma kapasitesidir. Diğer taraftan dar darbe hızı aralıklarıyla yapılan çalışmalarda fiberlerin gerilme oranı hassasiyeti göz ardı edilebilir. Darbe sonrası malzemeye ait performansı etkileyen temel faktör hasar türüdür. Bu yüzden çekme ve basma artık dayanımlarının birleşimiyle yapılacak testler, tabakalı kompoziti karakterize etmek için gereklidir.

Fiber yönelimleri bilinen kompozitlerle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerine literatürde rastlanabiliyorken, gelişigüzel fiber dağılımına sahip kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları hakkında çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca hem gelişigüzel dağılımlı ve hem de yönlenmiş fiberlere sahip hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları hakkında da yeterli çalışma gerçekleştirilmemiştir.

4. TEKNİK BİLGİLER

4.1. Ağırlık Düşürme Darbe Test Cihazı

Düşük hızlı darbe testleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü Kompozit Laboratuvarında bulunan INSTRON DYNATUP 9250HV cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz; test numune yüzeyine sadece bir defa vuruş yapıldıktan sonra darbe ucunu yakalayan pnömatik geri sekme önleme sistemi ve darbe verilerinin otomatik olarak toplanmasını sağlayan Impulse Data Acquisition programı ile donanmıştır. Bu program sayesinde farklı malzemelere ait darbe dirençleri, darbe anından enerji sönümlemesinin bitimine kadar olan zaman aralığındaki sayısal veriler toplanarak grafik haline getirilebilmektedir.

4.1.1. Ağırlık düşürme darbe testi cihazı özellikleri

Tablo 4.1: Darbe test cihazı genel ölçüleri

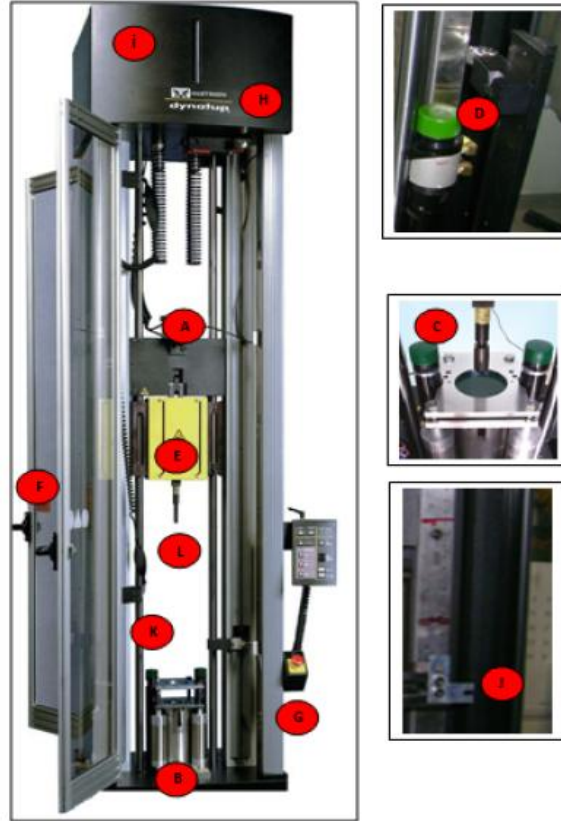
Yükseklik	2858 mm
Genişlik	584 mm
Derinlik	508 mm
Ağırlık	336,5 kg

Tablo 4.2: Darbe test cihazı kullanılan ağırlığa bağlı ortaya çıkan darbe enerjisi miktarları

Sınıflama	Kullanılan Ağırlık Miktarı	Ortaya Çıkan Darbe Enerjisi
Enerji Aralığı	Düşük Ağırlıklı Kafa	2,6 J – 826 J
Enerji Aralığı	Orta Ağırlıklı Kafa	4,6 J – 945 J
Enerji Aralığı	Büyük Ağırlıklı Kafa	25 J – 1603 J
Maksimum Darbe Hızı	20 m/s	
Maksimum Düşme Yüksekliği	20,4 m simüle eder.	

Tablo 4.3: Darbe test cihazında uygulanabilen test standartları

ASTM D-3763	Sert plastiklerin delinmesi
ISO 6603-2	Sert plastiklerin delinmesi
ASTM D-256	Charpy
ASTM D-6110	Izod
ISO 179	Charpy
ISO 180	Izod
ASTM E-23	Charpy ve Izod
NASA ST-1	Kompozitlerin hasar dayanıklılığı



Şekil 4.1: Instron Dynatup 9250HV darbe test cihazı ve kısımları

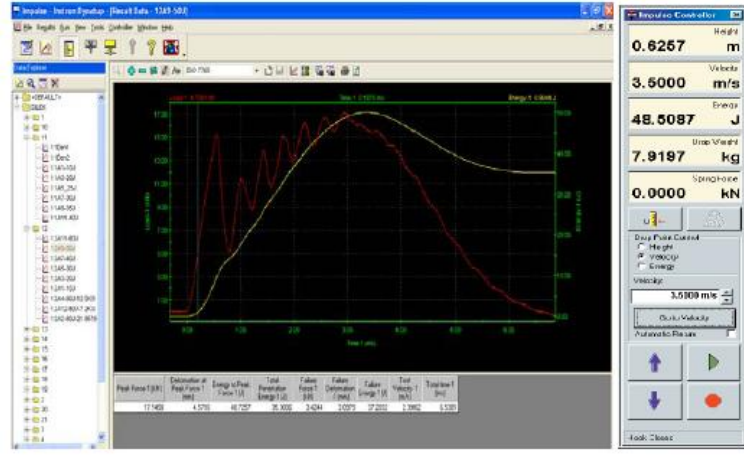
Tablo 4.4: Instron Dynatup 9250HV darbe test cihazı parçaları ve işlevleri

Harf Kodu	İsmi	İşlevi
A	Yük Hücresi	Düşen ağırlıkları, test kafasını, darbe ucu ağırlıklarını kapsayan hassas yük hücresidir.
B	Pnömatik Tutucu Çeneler	ASTM 3763 ve ISO 6603 standartlarına uygundur ve darbe testi sırasında numuneyi tutmaya yaramaktadır. Numunenin ortasında 76 mm çapındaki dairesel alanı serbest bırakacak şekilde bağlanan pnömatik bağlantı çeneleri, numuneyi tüm kenarlarından sıkı bir şekilde tutmakta ve kenarların hareketini engellemektedir.
C	Fren Mekanizması	Tekrarlı darbe olmasını önlemektedir. Bu mekanizma amortisör ve fren bloklarından oluşmaktadır.
D	Hız Dedektörü	Hız sensör bayrağı ile birlikte vurucu hızın ölçümünde kullanılır.
E	Piston Kafası	Ağırlıkların güvenli, hızlı ve kolay bir şekilde ayarlanmasına yarar. Piston kafası serbest bırakma mekanizmasına sahiptir. Üst tarafında bir kanca ile yapıya bağlanır.
F	Test Kapısı	Kilitleme mekanizmasına sahiptir ve polikarbonat malzemeden yapılmıştır. Operatöre test sırasında yabancı madde çarpmasını ve test sırasında içeriye girilmesini önler.
G	Acil Durdurma Düğmesi	Acil durumda sistemi kapatmaya yarar.
H	Optik Kodlayıcı	Düşme yüksekliği ve vurucunun ilk konuma gelmesini sağlayan optik kodlayıcıdır.
İ	DC Servo-motor	Sayısal kapalı döngülü yüksek torklu hassas pozisyon kontrolü sağlar ve çarpmadan sonra vurucu kütleyi hızlı bir şekilde yukarı doğru çeker.
J	Hız Bayrağı	Hız detektörü ile birlikte vurucunun hızını ölçmek için kullanılır.
K	Kılavuz Rayları	Piston kafasının üzerinde hareket etmesini sağlar. 15,4 mm çapında ve çelikten yapılmıştır.
L	Vurucu Uç	Çelikten yapılmıştır ve yarıküreseldir. Bu tez çalışmasında yarıküresel ve düz geometrili darbe uçları kullanılmıştır. Her bir geometri için 3, 5, 7 ve 10 mm çapında dört farklı uç kullanılmıştır.

4.1.2.Ağırlık düşürme darbe testi cihazı veri toplama yazılımı

DYNATUP 9250 cihazı ile gerçekleştirilen testlerin verileri Impulse Data Acquisition isimli bilgisayar programı yardımıyla toplanmıştır. Bu program numuneye ait tüm sayısal bilgileri takip edebilmek için kullanılır. Programa ait bir ekran resmi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Program ara yüzünde düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilirken iki temel değişken test prosedüründen biri seçilir. Bu test prosedürleri hız ve enerjidir. Bu doktora tez çalışmasında düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilirken enerji değişkeni kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Program

ara yüzünde ilgili kısma enerji değeri girilerek düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2: Impulse Data Acquisition programı ekran görüntüsü

Tablo 4.5: Impulse Data Acquisition programı ile elde edilebilen temel grafikler

Grafik İsmi	Açıklama
Kuvvet – Zaman Grafiği	Numunenin vurucu uca uyguladığı tepki kuvvetinin zamanla değişimini veren grafiklerdir.
Hız – Zaman Grafiği	Farklı darbe enerjilerinde hızın zamanla değişimini veren grafiklerdir.
Kuvvet – Yerdeğiştirme Grafiği	Temas kuvvetine göre numunedeki yer değişimini veren grafikten yutulan enerji de görülebilir.
Enerji – Zaman Grafiği	Darbe enerjisini ve yutulan enerjiyi veren grafiklerdir.

Tablo 4.6: Impulse Data Acquisition programı ile elde edilebilen temel değişkenler

Değişken	Açıklama
Darbe Enerjisi	Vurucu uç tarafından uygulanan çarpma anındaki enerjidir. Yüksekliğin ve ağırlığın fonksiyonu kullanılarak hesaplanır.
Maksimum Yükteki Enerji	Numunenin maksimum yükteki enerjisidir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın, maksimum yükteki noktasıdır.
Yutulan Enerji	Numunenin test sonuna kadar yuttuğu enerjidir (yükün tekrar sıfır olduğu nokta). Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın, testin başladıktan bitene kadar olan alanıdır.
Darbe Hızı	Zamanın sıfır noktasındaki düşen ağırlığın çarpma hızıdır.
Maksimum Temas Kuvveti	Darbe testi boyuca oluşan maksimum kuvvettir.
Toplam Zaman	Toplam zaman milisaniye biriminden ifade edilir. Çarpma anından testin bitişine kadar (yani kuvvet sıfırlanana kadar) olan süreyi içerir.
Toplam Yer değiştirme	Toplam yer değiştirme kuvvetin sıfır olduğu noktadaki numunenin toplam deformasyonudur.

4.2.Röntgen Işınları ile İçyapı Hasar Tespiti

Kompozit numunelerle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası malzeme içyapısında ortaya çıkan hasar mekanizmalarını incelemek amacıyla TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Tahribatsız Muayene Laboratuvarında bulunan Balteau GM 300/5D Endüstriyel X-Işınları cihazı (Şekil 4.3) ile vakumlu Kodak Industrex kurşun ekransız Mx 125 film kullanılarak röntgen çekimleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde X-ışınları radyografi cihazı ile girici radyasyon üretilip malzeme içine nüfuz ettirilir. Malzemedен geçen radyasyonun film üzerindeki etkisi değerlendirilerek malzemenin içyapısı hakkında bilgi elde edilir.



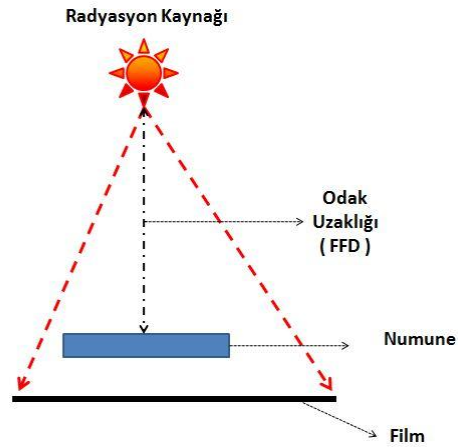
Şekil 4.3: Balteau GM 300/5D Endüstriyel X-Işınları cihazı

Röntgen çekim parametreleri Tablo 4-7’de verilmiştir.

Tablo 4.7: Röntgen çekim parametreleri ve değerleri

Parametre	Değer
Voltaj	60 kV
Akım	3 mA
Süre	240 saniye
FFD (odak mesafesi)	78 cm

Malzeme içyapı hasar incelemesinde kullanılan röntgen çekiminin şematik gösterimi Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.4: Röntgen çekimi şematik gösterimi

Düşük hızlı darbe sonrası ortaya çıkan içyapı hasarlarının görsel olarak ortaya konmasında röntgen ışınları kullanımının çok az bilgi verdiği ortaya çıkmıştır. Çekim metodunun uygulama şeklinden dolayı röntgen ışınları numuneye dik yönde

gelmekte bu da malzeme içyapısında ortaya çıkan tabakalara göre hasar mekanizmalarının ortaya konmasına olanak tanımamaktadır. Malzemede darbe sonrası ortaya çıkan hasar tam delinme dışında bir hasar türü ise yine röntgen ışınları bunu algılayamamaktadır. Röntgen ışınları ile darbe sonrası hasar muayenesinde sadece malzemede bir delinme olup olmadığı gözlemlenebilmiştir. Röntgen ışınları ile darbe sonrası hasar tespitinin sınırlı bilgi veren bir yöntem olduğu ve ihtiyaçlara cevap veremediği ortaya konmuştur.

4.3.Termal Kamera ile Darbe Hasar Tespiti

Yapılan doktora çalışmasında düşük hızlı darbe testleri sonrası malzeme içyapısında ortaya çıkan hasar mekanizmalarını ortaya koymak için termal kamera çekimleri de gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezinde bulunan termal kamera (FLIR A300) ve yazılımı kullanılarak (Şekil 4.5) darbeye maruz kalmış kompozit numunelerin içyapıları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Termal kamera, görüntüleme yöntemi olarak gözle görülmeyen IR enerjisi (ısıyı) esas alan ve görüntünün genel yapısını IR enerjisi göre oluşmuş renkler ve şekillerin belirlendiği görüntüleme sistemidir. Genelde güvenlik amaçlı da kullanılabilir ama çok çeşitli sektörlerin de kullanımına açıktır. Özellikle ısıya güdümlü füze, gece görüş sistemleri ve benzeri askeri tekniklerin gelişmesi ile önemi artmıştır.

Elektrik sektöründe ise, elektriksel problemlerin tespitinde kullanılır. Elektrik akımının geçişi sırasında materyalde oluşan ısınma termal kameralar ile gözlenerek problem tespiti kolaylıkla yapılabilir. Aşırı yük altındaki güç transformatörleri, kablolar, kontak noktaları, kapasitörler, termal kamera ile gözlenerek ısınan noktalardaki problemler herhangi bir elektriksel ölçüm yapmadan tespit edilebilir.

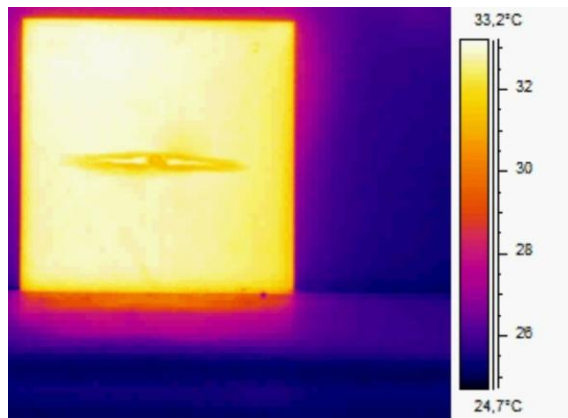
İnşaat mühendisliği alanda ise çelik yapılarda metal yorgunluğunun tespiti için, sıva altında oluşan küf nem veya çatlakların tespiti içinde kullanılır. IR (kızıl ötesi) algılayıcılarıyla cisimlerin ısılarını algırlarlar. Siyah beyaz veya renkli (kırmızı sıcak, siyah soğuk) gibi renklerden siyah - kırmızı arasında oluşan bir görüntü verir.



Şekil 4.5: Termal kamera

Normal kameralar görüntüyü ışık sayesinde oluştururken termal kameralar görüntüyü ısı sayesinde oluştururlar. Benzer şekilde insan beyni ve gözü görüntüyü oluşturmada renkleri ve ışığı kullanırken renk farklılıkları önemlidir. Beyaz bir duvar önünde bulunan beyaz bir objenin fark edilmesi son derece zor olduğu gibi ortam sıcaklığına eşit bir sıcaklıktaki bir objenin termal kamera ile görüntülenmesi de son derece zordur. Bu tür kameralarda kullanılan objektifler çok küçük sıcaklık farklarını yakalayabilen (0.01 °C gibi) ve bu farklılıktan görüntü oluşturabilen özelliklerdedir. Ayrıca görüntü oluşturabildikleri belli bir sıcaklık aralığına sahiptirler. Her sıcaklık değerinde farklı IR yayılımlar olduğu ve her IR yayılımının farklı dalga boyuna sahip olmasından dolayı da bu objektifler belli sıcaklık aralıklarında görüntü verebilirler. Askeri amaçlı olanlar genellikle doğada bulunan cisimlerin ortak IR yayılımlarının olduğu 8 ile 14 mikrometre dalga boyuna duyarlı oldukları gibi endüstriyel tipte olanlar daha düşük dalga boylarına hassas üretilirler ve daha yüksek veya daha düşük sıcaklıklarda da görüntü oluşturabilme özelliklerine sahip olabilmektedir.

Kompozit numuneler darbe sonrası termal kamera görüntülemesi yapmak amacıyla kompozit pişirme fırınına sokularak ısı artırılmış (34°C) ve termal kamera görüntüsü elde edilmiştir. Kompozit iç yapısında darbe sonrası ortaya çıkan hasar ve boşluklar, termal görüntülemeye ısı farkları yaratarak renge bağlı bir sıcaklık dağılım ölçeği yaratmıştır. Numunenin termal görüntüsü çekilirken dış ortamda soğuyan hasarlı bölgeleri hasarsız bölgelerine göre daha farklı ısı iletim katsayısına sahiptir. Bu fark termal görüntüde ayırt edilebilmiştir. Termal görüntüleme darbe hasarı bölgesiyle ilgili bilgi vermesine rağmen yüzeydeki ısı dağılım farkına bağlı olduğundan iç yapı hasarlarını gözlemlemek mümkün olmamaktadır. Şekil 4.6'da darbe sonrası kompozit plakaya ait termal kamera görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.6: Darbe sonrası kompozit numuneye ait termal kamera görüntüsü

4.4.Ultrasonik Tarama ile Darbe Hasarı İncelemesi

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen darbe testleri sonrası kompozitlerin içyapı hasarlarını ortaya koymak amacıyla cam elyaf takviyeli kompozit numuneler Ankara'da bulunan TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TAI) tesisleri kalite ve muayene laboratuvarında bulunan su püskürtmeli otomatik ultrasonik muayene sistemi ile incelenmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Su püskürtmeli otomatik ultrasonik muayene sistemi

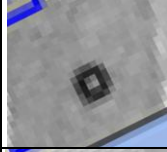
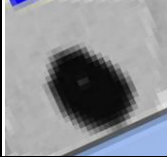
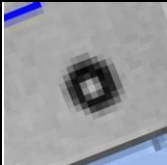
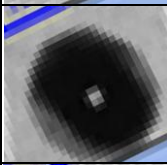
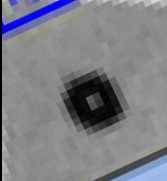
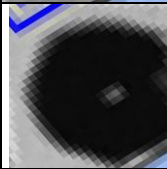
Darbeye maruz kalmış cam elyaf takviyeli kompozitlerin ultrasonik taramaları sonucu elde edilen görüntülerde içyapıda oluşan delaminasyonlar renk ve ton farkıyla net bir şekilde ortaya konmuştur. Bu inceleme yönteminin yetersizliği ortaya çıkan hasarların kompozitin hangi tabakasında bulunduğu hakkında bilgi vermemesidir. Yapılan ultrasonik taramaya ait veriler Şekil 4.8'de verilmiştir.

TAI Report Entry Form	
Project	KOCAELI UNIVERSITESI
Part Number	NA
Part Name	TEST PANELI
SOIR Number	NA
Part Serial Number	NA
TDS Number	NA
IRP Number	NA
Date	Sunday, May 30, 2010 2:32:07 PM
Velocity (mm/sec)	200.00
Scan Increment (mm)	1.00
Index Increment (mm)	1.00
Transducer - Receiver(s)	5MHz 638
Transducer - Transmitter(s)	5MHz 639
Part to Nozzle Y1 (mm)	20
Part to Nozzle Y2 (mm)	20
Nozzle Diameter	4.5mm

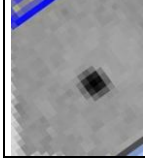
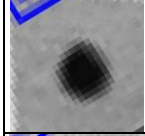
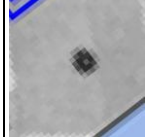
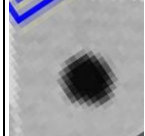
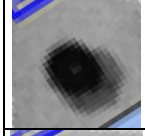
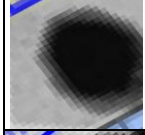
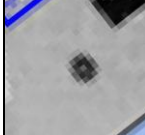
Şekil 4.8: Ultrasonik tarama verileri

Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da cam elyaf takviyeli kompozite uygulanan darbe testleri sonrasında gerçekleştirilen ultrasonik taramalara ait görüntüler verilmiştir.

Tablo 4.8: Farklı çapta düz darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası cam elyaf takviyeli kompozite ait ultrasonik tarama görüntüleri

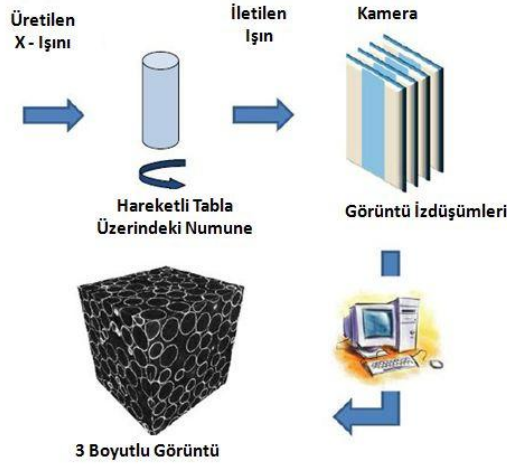
	3mm Düz Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	3mm Düz Uç 15 Joule Darbe Enerjisi
	5mm Düz Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	5mm Düz Uç 25 Joule Darbe Enerjisi
	7mm Düz Uç 10 Joule Darbe Enerjisi
	7mm Düz Uç 40 Joule Darbe Enerjisi
	10mm Düz Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	10mm Düz Uç 10 Joule Darbe Enerjisi
	10mm Düz Uç 80 Joule Darbe Enerjisi

Tablo 4.9: Farklı çapta yarıküresel darbe uçlarıyla gerçekleşen testler sonrası cam elyaf takviyeli kompozite ait ultrasonik tarama görüntüleri

	3mm Yarıküresel Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	3mm Yarıküresel Uç 15 Joule Darbe Enerjisi
	5mm Yarıküresel Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	5mm Yarıküresel Uç 15 Joule Darbe Enerjisi
	7mm Yarıküresel Uç 5 Joule Darbe Enerjisi
	7mm Yarıküresel Uç 15 Joule Darbe Enerjisi
	7mm Yarıküresel Uç 40 Joule Darbe Enerjisi
	10mm Yarıküresel Uç 5 Joule Darbe Enerjisi

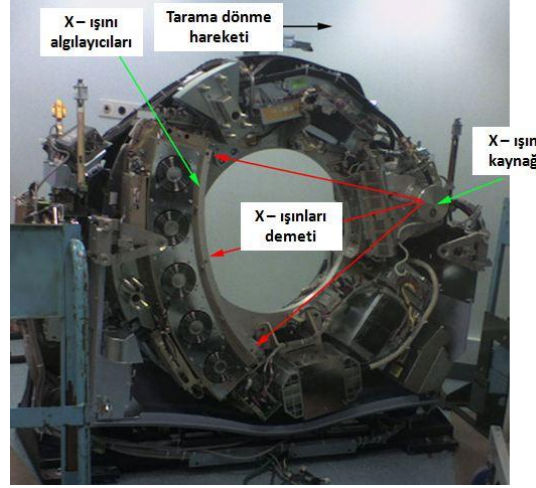
4.5.Bilgisayarlı Tomografi (CT) ile Darbe Hasarı İncelemesi

Doktora çalışmasında düşük hızlı darbe yüklemesi sonrası ortaya çıkan iç yapı hasarlarını ortaya koymak için klasik inceleme yöntemlerinden farklı olarak bilgisayarlı tomografi (CT) cihazıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi (CT) ile görüntüleme tekniğinin malzeme iç yapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için de uygun olabileceği düşünülmüş, deneysel çalışması yapılan malzemeye denemeler yapılarak görüntüler elde edilmiştir. Bilgisayarlı tomografiye (CT) ait temel çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9: Bilgisayarlı tomografi (CT) temel çalışma prensibi

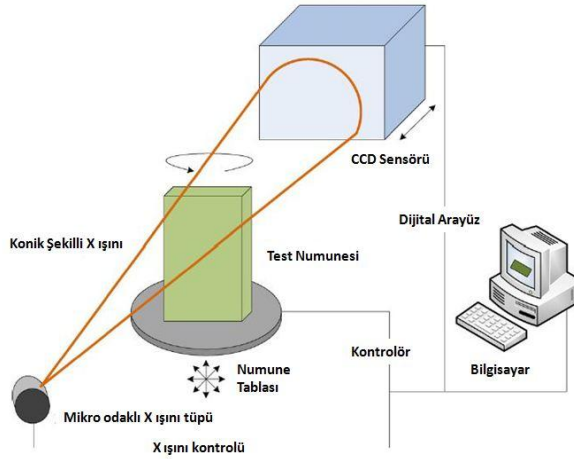
Elde edilen görüntüler malzeme içyapısında ortaya çıkan delaminasyon ve hasar konisi geometrisi hakkında önemli ipuçları vermiştir. Bilgisayarlı tomografi (CT) görüntüleri, Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesinde bulunan Toshiba Aquilion 64 marka cihazla elde edilmiştir. Malzeme iç yapısını gösteren görüntüler tomografi cihazında 40 miliamper akım değerinde 120 kiloVolt ile elde edilmiştir. Tomografi çekim programında FOV değeri olarak 120 seçilmiştir. FOV (field of view) değeri; bilgisayarlı tomografide ekrana yansıyan görüntüye uyan numunenin büyüklüğüdür. İç yapıdaki hasar mekanizmalarını ortaya çıkarmada önemli olan bir başka tomografi çekim parametresi de doku cinsi ve çözünürlüğüdür. Cam fiber takviyeli polyester kompozit numunenin tomografi çekimlerinde kullanılacak en uygun doku cinsinin kemik dokusu olduğu yapılan denemelerde görülmüş ve bu değer kullanılmıştır. Ayrıca içyapı hasarlarının netliği açısından yüksek çözünürlük değeri seçilmiştir. Tomografi görüntüleri çekilirken aksiyal ve sagittal ilerleme hızı olarak sırasıyla $0,5 \times 0,3$ mm seçilmiştir. Tomografi çekimleri sadece cam fiber takviyeli kompozitlerde gerçekleştirilmiş, aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerde ışın geçirgenlik faktöründen ötürü görüntü elde edilememiştir. Bilgisayarlı tomografi görüntülerinde darbe sonrası cam fiber takviyeli kompozit plakalarda ortaya çıkan içyapı hasar bölgeleri gözlemlenebilmiş, fakat çözünürlük değerinde yüksek derecelere çıkılamadığından fiber ve matrisler arasındaki hasar bölgeleri çok net ortaya konamamıştır. Bilgisayarlı tomografi (CT) cihazının iç yapısı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10: Bilgisayarlı tomografi (CT) cihazı iç yapısı

4.6.Mikro-Bilgisayarlı Tomografi ile Darbe Hasarı İncelemesi

Mikro-bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) esas olarak tıp alanındaki araştırmalarda kullanılmak üzere ortaya çıkmış, çalışma prensibi bilgisayarlı tomografi (CT) yöntemiyle eş olan fakat odak mesafesi kısalığından ötürü daha yüksek çözünürlükte içyapı görüntüleri olarak yeni görüntü işleme teknikleriyle üç boyutlu katı modeller elde etmeye yarayan güncel bir görüntüleme tekniğidir.



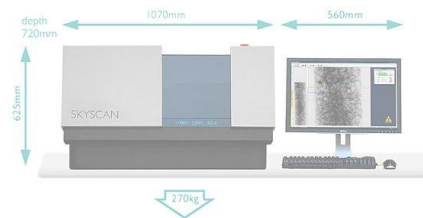
Şekil 4.11: Mikro-bilgisayarlı tomografi çalışma prensibi

Mikro-bilgisayarlı tomografi yönteminde X ışını kaynağı olarak kullanılan tüp mikro boyutta odaklama özelliğine sahiptir. Mikro boyutta odaklama, incelenen numunenin birim alanına etki eden X ışını yoğunluğunu artırmayı ve dolayısıyla birim alan çözünürlük miktarını artırmayı olanaklı kılar. X ışını kaynağından yayılan konik geometrilili ışınlar incelenen numuneye nüfuz ederek geçerler. Bu geçiş esnasında numune içyapısı ve katmanları arasındaki farklı yoğunluklu bölgeler farklı X ışını emilim değerlerine sahiptir. Bu emilim değerleri malzemeyi geçen X ışını

yoğunluğunu direk olarak etkiler. Numuneden geçen x ışınlarını algılamak için bir CCD (charge coupled device = ışığa duyarlı yüzey) algılayıcı kullanılır. CCD algılayıcı, bir tabakanın üstüne dizilmiş ışığa duyarlı foto diyotlardan oluşur. Bunlar, düşen ışığı elektrik gerilimine çevirir. Ne kadar aydınlık olursa ışık hücresinde (fotosel) biriken gerilim de o kadar yüksek olur. Matrix gerilim, bir analog-dijital çevirici (ADC) ve işlemci vasıtası ile resme çevrilir. X ışınlarının kaynaktan çıkışı ile CCD algılayıcı tarafından algılanması bütün test numunesi yüzeyleri taranana kadar devam eder. Bu tarama esnasında test numunesi kendi etrafında bir derecelik açısal hızla döndürülür. Bu sayede numunenin 3 boyutlu taraması iki boyutta gerçekleştirilmiş olur. Daha sonra iki boyutlu açısal dilimler halinde elde edilmiş numuneye ait bir dizi görüntü bilgisayar görüntü işleme yazılımları sayesinde üst üste getirilerek birleştirilir. Bu birleştirme sonrasında iki boyutlu çekilmiş görüntü dilimleri üst üste konarak numunenin üç boyutlu bir katı modeli ortaya çıkarılmış olur (Şekil 4.11).

Mikro-bilgisayarlı tomografi çekimi yapılan numunenin iç yapısındaki doku yoğunluğu farklılıklarından ortaya çıkan ton farkları arasındaki geçiş her zaman keskin olmayabilir. Birbirine yakın yoğunluktaki bölgeler arasındaki mikro boyutlu hasarları ortaya koymak için çözünürlük değerinin iyi ayarlanması gerekir. Ayrıca görüntüde parazit olarak bilinen istenmeyen noktacıklar diye isimlendirilebilecek olay, çekimi gerçekleştiren teknisyenin tecrübesi sayesinde numuneye en uygun çekim parametrelerinin belirlenmesiyle en az düzeye indirgenebilir. Parazit, algılayıcıların kendisine düşen ışığı doğru analiz edememesi ile ilgili bir durumdur ve noise seviyesi yükseldikçe, görüntü kalitesi düşer.

Doktora çalışması kapsamında darbe testi uygulanan kompozit numunelere ait mikro-CT taramaları Belçika Kontich'te bulunan SkyScan firmasında SkyScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: SkyScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazı

SkyScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihazının özellikleri Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10: SkyScan 1173 yüksek enerjili spiral taramalı mikro-CT cihaz özellikleri

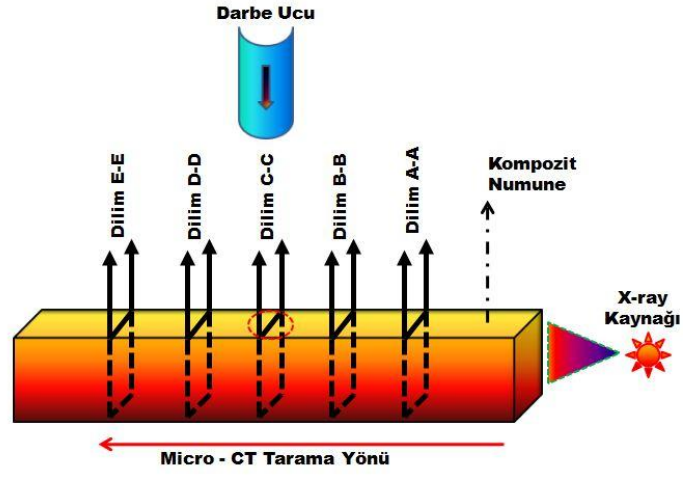
X – ışını kaynağı	40-130 kV, 8 W, <5µm nokta büyüklüğü
X – ışını algılayıcısı	Düz panel sensörlü 2240×2240 pixel, 12-bit
Maksimum numune boyutu	140 mm çapında, 200 mm boyunda (100-140 mm tarama boyu)
Uzaysal çözünürlük	< 4 - 5µm detayları yakalayabilme 7 - 8µm düşük kontrastta çözünürlük
Radyasyon Yayılımı	< 1 µSv / saat cihazın herhangi bir noktasında

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait SkyScan 1173 cihazında gerçekleştirilen mikro-CT tarama parametreleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11: Kompozitlere ait mikro-CT tarama parametreleri

Kompozit Mikro-CT Tarama Parametreleri	
Kaynak Voltaj	130 kV
Kaynak Akım	61 µA
Görüntü Pixel Boyutu	12.5 µm
Numune Kaynak Arası Mesafe	92.125 mm
Kamera Kaynak Arası Mesafe	364 mm
X-ışını uygulama süresi	1300 ms
Açısal Dönüş	0.1 derece
Yeniden Yapılandırma Programı	NRecon
Halka Doku Düzeltme Faktörü	17
Işın Sertleştirme Düzeltmesi	% 20
Merkez Işın Açısı - Yatay	17.2 derece
Merkez Işın Açısı - Dikey	17.2 derece

Kompozit numunelerden elde edilen mikro-CT taramalarına ait görüntü dilimleri, darbe hasarının olduğu merkez noktası ile iki uç arasında tüm iç hasar bölgesini kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Böylece görüntü dilimlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan içyapı hasar bölgesinin üç boyutlu görüntüsü, darbe noktasından uçlara doğru gidildikçe hasar yapısının nasıl değiştiğini daha iyi ortaya koymuştur. Kesit dilimler arası mesafe 1,5 mm'dir. Mikro-CT taramasına ait şematik gösterim Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13: Mikro-CT taraması şematik gösterimi

5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1.Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada gerçekleştirilen darbe testlerinde kullanılan kompozit plakalar Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü'nden tedarik edilmiştir.

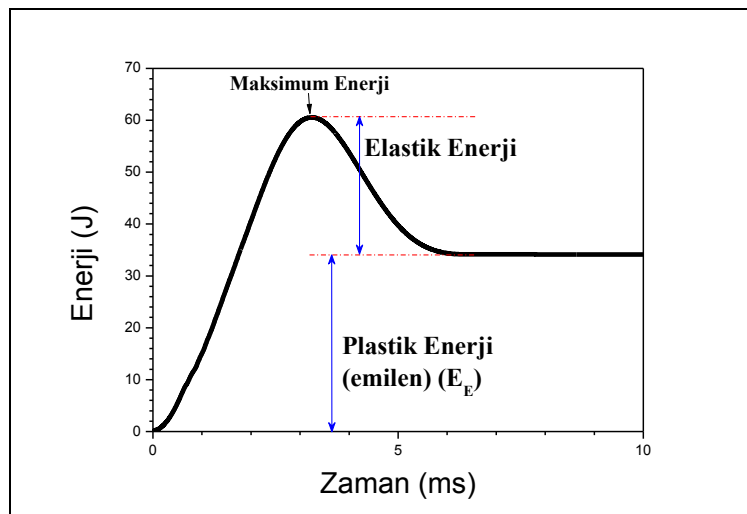
Cam fiber takviyeli polyester matrisli kompozit $[0/90]_s$ yönelime sahiptir. Cam fiber takviye elemanının hacimsel oranı %60'tır. Çapraz katlı kompozitin fiber takviye elemanı olarak içinde bulunan cam fiber, E-camıdır. Kompozit plakaların kalınlığı 5 mm'dir. Kompozit plakalar üst üste on bir tabakadan oluşmaktadır. Cam fiber takviyeli polyester kompozitler 200 mm × 200 mm boyutlarında olduğundan darbe testine girmeden önce 100 mm × 100 mm boyutlarına inecek şekilde kesilmiştir. Kesme işlemi içyapıda herhangi bir hasara yol açmamak için düşük devirde yüksek torka sahip elmas kesici diskler ve özel numune tutucular vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Aramid / cam fiber takviyeli hibrit polyester matrisli kompozit $[0/90]_s$ yönelime sahiptir. Takviye elemanları olan aramid ve cam fiberlerin hacimsel oranı birbirine eşit ve her biri için %30'dur. Çapraz katlı kompozitin fiber takviye elemanı olarak içinde bulunan cam fiber, E-camıdır. Kompozit plakaların kalınlığı 5 mm'dir. Kompozit plakalar üst üste on bir tabakadan oluşmaktadır. Satın alınan aramid / cam fiber takviyeli polyester kompozitler 200 mm × 200 mm boyutlarında olduğundan darbe testine girmeden önce 100 mm × 100 mm boyutlarına inecek şekilde kesilmiştir. Kesme işlemi içyapıda herhangi bir hasara yol açmamak için su jeti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitten farklı olarak kesme işleminde su jetinin kullanılması kompozitte bulunan aramid fiberlerin esnek yapısından kaynaklanmaktadır. Kesme işleminde elmas kesici disk kullanılması aramid fiberlerin liflerine ayrılmasına ve matris ile fiberler arasında ayrışmalara sebep olacağından tercih edilmemiştir.

6. DENEYSEL BULGULAR

6.1. Enerji Zaman Grafikleri

Düşük hızlı darbe testleri sonrası darbeye maruz bırakılan malzemenin dayanımı hakkında bilgi sahibi olmak için değerlendirilmesi gereken en önemli grafiklerden bir tanesi enerjinin zamana bağlı değişimini veren grafiklerdir. Şekil 6.1’de verilmiş olan tipik bir düşük hızlı darbe enerji zaman grafiği görülmektedir. İstenen darbe enerjisine kadar artış gösteren enerji eğrisi test edilecek numuneyle temas sağladıktan sonra enerji düşüş göstermeye başlamış; darbe mekanizması devam ederken bir noktadan sonra enerji değişmeden sabit kalarak yatay bir seyir izlemiştir. Bu genel eğrinin kısımları incelenecek olursa maksimum enerji ile enerjinin yatay seyir izlemeye başladığı nokta arasındaki fark elastik enerji olarak; maksimum darbe enerjisinden elastik enerji miktarının çıkarılmasıyla elde edilen değer ise plastik enerji (malzemenin emdiği enerji) olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle maksimum darbe enerjisi, elastik ve plastik enerjiler toplamına eşittir. Plastik enerjide meydana gelebilecek bir düşme, darbe uygulayan ucun geri sıçramasına sebep olan depolanan elastik enerjiyle açıklanabilir. Malzemede emilerek kalan enerji plastik enerji ile hasarı oluşturan enerjilerin toplamıdır ve malzemede hasara sebep olan mekanizmanın göstergesidir.



Şekil 6.1: Düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafiği

Daha düşük plastik enerji seviyesinin gözlemlenmesi malzemenin darbeye karşı direncinin daha yüksek olduğunu gösterir ve malzeme darbe ucundan gelen tüm enerjiyi sönümlendiği için ucun geri sıçramasına sebep olur. Plastik enerjinin yorumlanması için düşük hızlı darbe testleri sonrası çizilen hız zaman grafiklerinin de yorumlanmasından faydalanılacaktır.

Darbe enerjisi (E_D) ve emilen enerji (E_E), kompozitlerin darbe davranışları ve dayanımları hakkında değerlendirme yapabilmek için önemli iki parametredir. Darbe enerjisi, testi gerçekleştirilen kompozit numuneye aktarılan toplam enerji olarak tanımlanır. Emilen enerji, darbe olayı süresince kompozit tarafından içyapıda oluşan hasar bölgeleri ile emilen enerji miktarıdır.

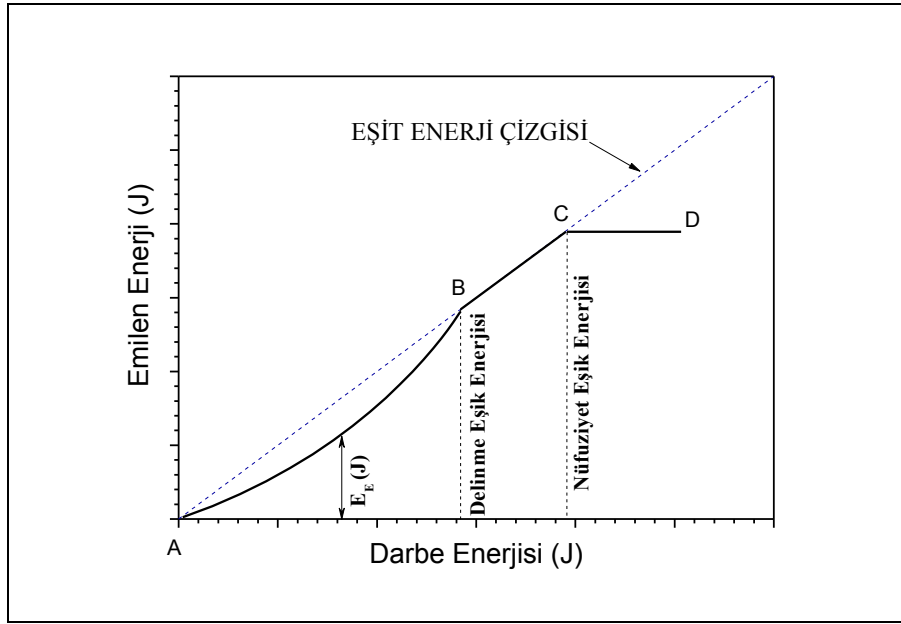
Darbe enerjisi (E_D) ve emilen enerji (E_E) arasındaki bağıntıyı ortaya koyan diyagram enerji profil diyagramı olarak adlandırılır. Darbe sonrası elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılarak, enerji profil diyagramı ve hasarlı kompozit numunelerin görüntüleri yardımıyla, kompozitin iç yapısındaki her bir tabakadaki hasar mekanizmasını yorumlamak olanaklı hale gelmektedir. Enerji profil diyagramı yardımıyla yalın elastik limit, delinme ve nüfuziyet eşik değerleri hakkında bilgi sahibi olmak mümkün hale gelir.

Enerji profil diyagramı şeklini etkileyen faktörlerden en önemlileri darbe ucu ve malzeme özellikleridir. Malzeme ilgili özellikler olarak kompozitin ana yapısını oluşturan ana yapı, fiberlerin geometrisi ve yerleşim düzeni ile kompozit kalınlığı sayılabilir. Darbe ucunun etkilerini değiştiren faktör olarak darbe ucu geometrisi verilebilir. Şekil 6.2’de enerji profil diyagramının genel gösterimi verilmiştir. Şekilde diyagramı oluşturan üç ana bölgeden bahsedilebilir; AB, BC ve CD bölgeleri.

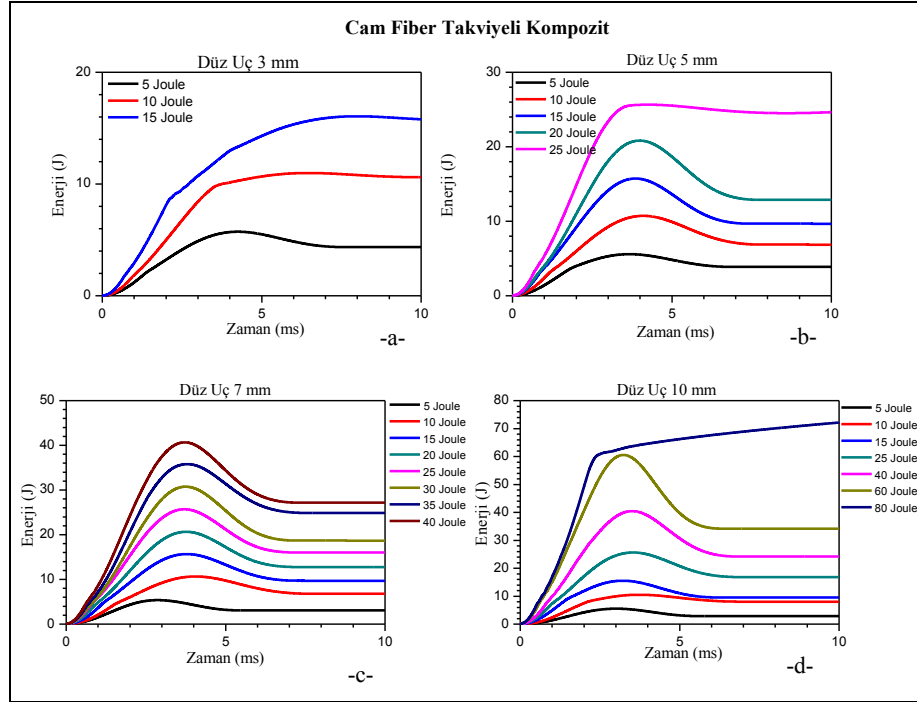
AB bölgesi numunenin delinme olmadan kaldığı alanı ifade eder. Beklendiği gibi, numune üzerinde hasar bölgesinin boyutu darbe enerjisine doğrudan bağlıdır. Darbe enerjisinin artmasıyla numune üzerindeki toplam hasar alanı artar. Bu bölgede, eğri eşit enerji çizgisinin altında kalarak fazladan darbe enerjisinin varlığını kanıtlar (eğri ile eşit enerji çizgisi arasındaki fark). Fazla enerji darbe ucunda tutulur ve darbe olayının sonunda darbe ucunun numuneden geriye doğru sıçramasında kullanılır.

BC bölgesi, bütün darbe enerjisinin numune tarafından emildiği delinme bölgesi olarak adlandırılır. CD bölgesi ise darbe ucunun delinmeden sonra malzeme içine nüfuz ederek ilerlediği bölgedir. Bütün bunlara ek olarak, B noktası delinme eşik

enerjisi değeri; C noktası ise nüfuziyet eşik enerjisi değeri ifade eder. Delinme eşik enerjisi değeri; numune tarafından emilen enerjinin darbe enerjisine eşit olduğu ilk noktayı gösterir. Nüfuziyet eşik enerjisi değerinde, darbe ucu numune içine sıkışarak kalır ve bir daha geri sıçrama yapmaz. Nüfuziyet eşik değerinden sonra numune tarafından emilen enerji neredeyse sabit kalır. Bunun anlamı darbe enerjisi artsa bile bu noktadan sonra darbe ucunun numune içinde herhangi bir hasara sebep olamayacağıdır. Grafikte kesik çizgiyle gösterilen eşit enerji çizgisi, darbe enerjisiyle emilen enerji arasındaki eşit enerji çizgisini ifade eder.

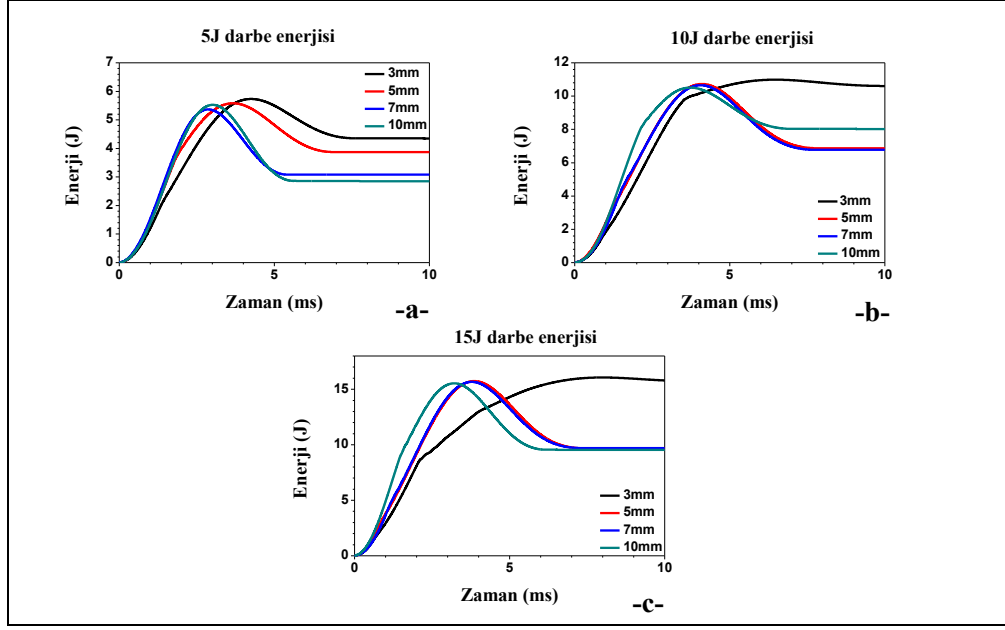


Şekil 6.2: Kompozit plakaya ait tipik bir enerji profil diyagramı



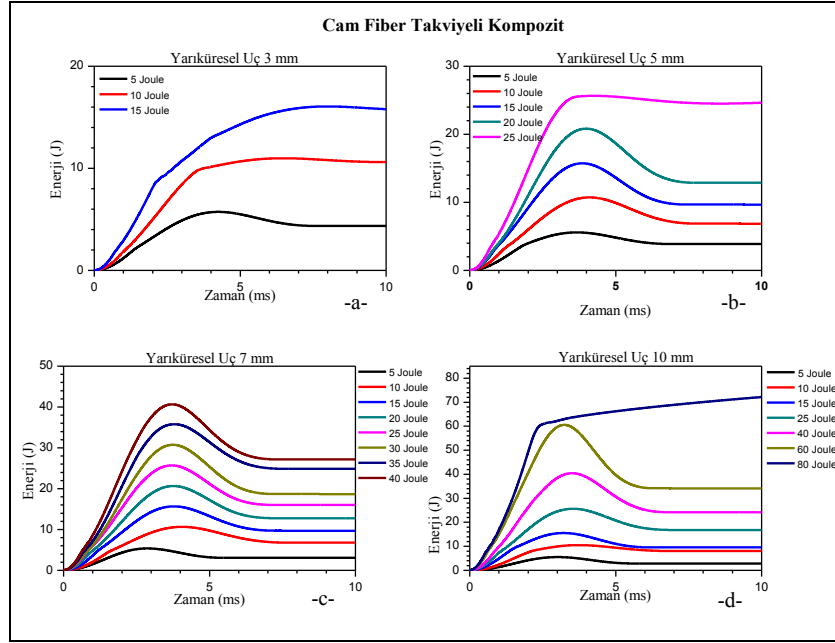
Şekil 6.3: Cam fiber takviyeli kompozitte düz geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.3’de cam fiber takviyeli kompozitde düz geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.3 (a)’da 3 mm düz darbe ucuyla yapılan test sonrası numunede tam delinmenin 15 J darbe enerjisinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Delinmenin bu kadar düşük enerji seviyesinde ortaya çıkması darbe ucu çapının çok küçük olması ve darbe enerjisinin numuneye transferinin çok küçük bir alandan gerçekleşmesidir. Bu duruma bağlı olarak numunenin darbe sönümleme kabiliyeti işlevselliğini kazanamadığından delinme gerçekleşmiştir. Şekil 6.3 (b) ve Şekil 6.3 (c)’de sırasıyla 5 mm ve 7 mm düz darbe uçlarıyla yapılan testler sonrası numunede tam delinmenin 25 J ve 40 J enerji seviyelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji zaman eğrilerinden darbe ucu çapı arttıkça malzemenin enerji sönümleme kabiliyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.3 (d)’de en büyük çaplı düz darbe ucu olan 10 mm çaplı darbe ucu enerji zaman grafiği görülmektedir. Bu darbe ucunda maksimum darbe sönümleme kabiliyeti 60 J enerji seviyesinde ortaya çıkmış; 80J enerji seviyesinde ise tam delinmenin gerçekleştiği görülmüştür.



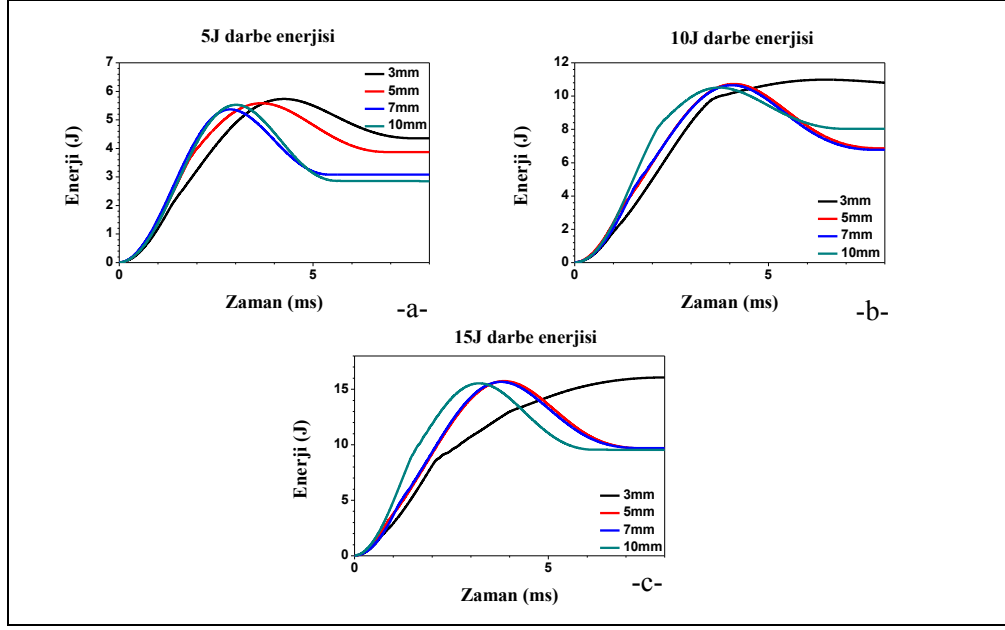
Şekil 6.4: Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin düz uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi

Şekil 6.4’de cam fiber takviyeli kompozite aynı enerji ile farklı düz uç çaplarıyla darbe uygulanması sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere uç çapı arttıkça maksimum enerji seviyesine ulaşma zamanı kısalmıştır. Bu durum her üç enerji seviyesi için de geçerli olmuştur. Şekil 6.4 (a)’da 3 ve 5 mm çaplarının enerji eğri karakteristikleri farklı iken 10J ve 15J enerji seviyelerinde sadece 3mm çap farklı bir eğri ortaya çıkarmakta bunun dışında kalan 5,7 ve 10mm çaplarındaki darbe uçlarındaki enerji eğrilerinde belirgin bir fark ortaya çıkmamaktadır.



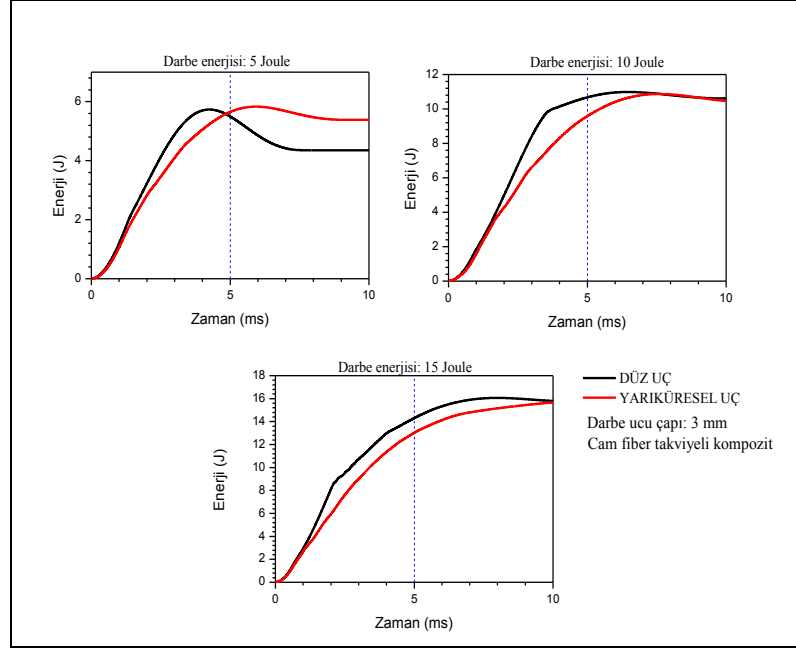
Şekil 6.5: Cam fiber takviyeli kompozitte yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.5'de cam fiber takviyeli kompozite yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.5 (a)'da 3 mm yarıküresel darbe ucuyla yapılan test sonrası numunede tam delinmenin 15 J darbe enerjisinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Delinmenin bu kadar düşük enerji seviyesinde ortaya çıkması darbe ucu çapının çok küçük olması ve darbe enerjisinin numuneye transferinin çok küçük geometriye bağlı olarak noktasal bir alandan gerçekleşmesidir. Bu duruma bağlı olarak numunenin darbe sönümleme kabiliyeti işlevselliğini kazanamadığından delinme gerçekleşmiştir. Şekil 6.5 (b) ve Şekil 6.5 (c)'de sırasıyla 5 mm ve 7 mm yarıküresel darbe uçlarıyla yapılan testler sonrası numunede tam delinmenin 15 J ve 40 J enerji seviyelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Yarıküresel uç geometrisinde hem 3 mm hem de 5 mm çaplı darbe uçlarının her ikisinde de delinmenin 15 J enerji seviyesinde ortaya çıkması uç çapının bu iki değer için önem arz etmediği ortaya çıkmıştır. Şekil 6.5 (d)'de en büyük çaplı yarıküresel darbe ucu olan 10 mm çaplı darbe ucu enerji zaman grafiği görülmektedir. Bu darbe ucunda maksimum darbe sönümleme kabiliyeti 60 J enerji seviyesinde ortaya çıkmış; 80 J enerji seviyesinde ise tam delinmenin gerçekleştiği görülmüştür. Yarıküresel darbe uçlarıyla yapılan deneyler sonrasında bu uçlarda enerji transferinin geometriye bağlı olarak noktasal bir alandan numuneye transferinden dolayı enerji sönümleme mekanizmasının etkin olarak ortaya çıkmadığı gözlemlenmiştir. Darbe sönümlemesinin bu uç geometrisinde etkin olmaması, delinme mekanizmasının baskınlığını artırmaktadır.



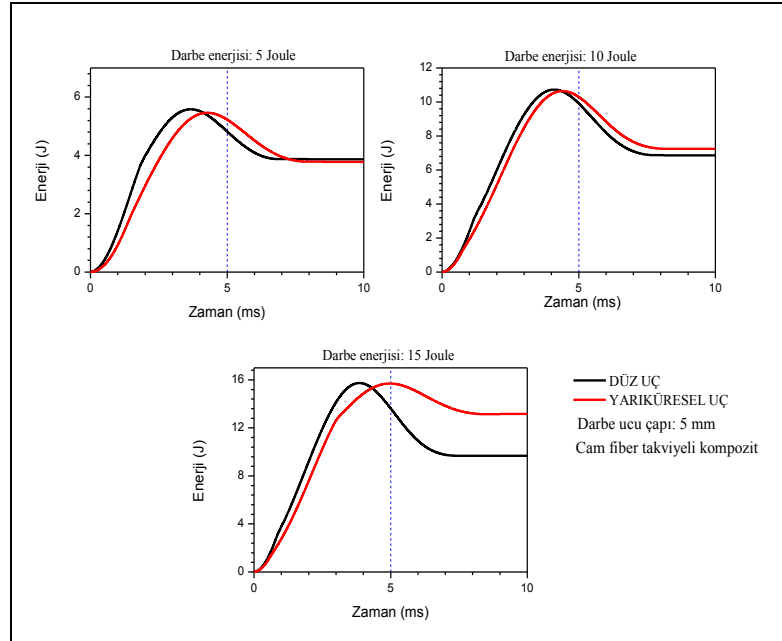
Şekil 6.6: Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin yarıküresel uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi

Şekil 6.6'da cam fiber takviyeli kompozite aynı enerji ile farklı yarıküresel uç çaplarıyla darbe uygulanması sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere uç çapı arttıkça maksimum enerji seviyesine ulaşma zamanı kısalmıştır. Bu durum her üç enerji seviyesi için de geçerli olmuştur. Şekil 6.6 (a)'da 3 ve 5 mm çaplarının enerji eğri karakteristikleri farklı iken 10J ve 15J enerji seviyelerinde sadece 3mm çap farklı bir eğri ortaya çıkarmakta bunun dışında kalan 5,7 ve 10mm çaplarındaki darbe uçlarındaki enerji eğrilerinde belirgin bir fark ortaya çıkmamaktadır.

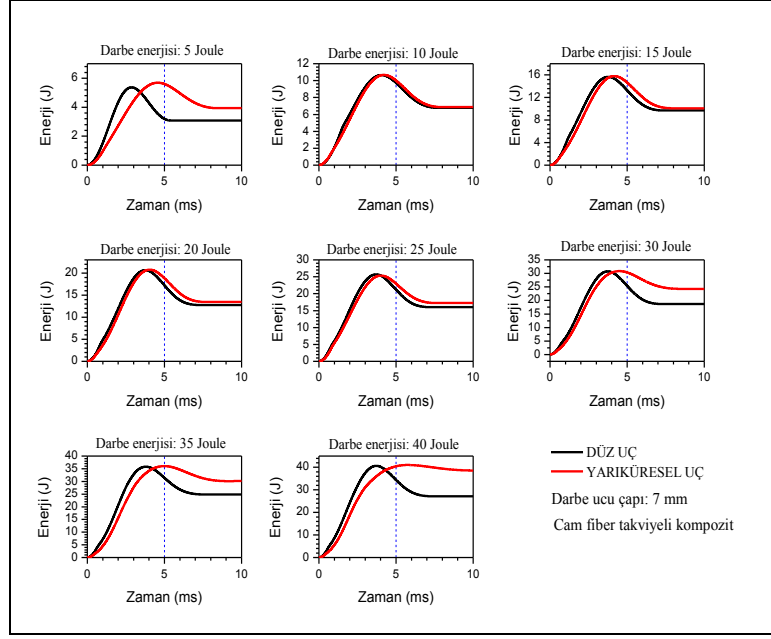


Şekil 6.7: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.7’de 5 J darbe enerjisinde maksimum değere yarıküresel uçla daha geç ulaşılmış, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde ise maksimum enerji düz uca göre daha fazla olmuştur. Şekil 6.8’de 5 ve 10 J enerjide her iki geometrili uç benzer karakter göstermiştir, 15 J darbe enerjisinde yarıküresel uçta maksimum enerjiye daha uzun sürede ulaşılmıştır.

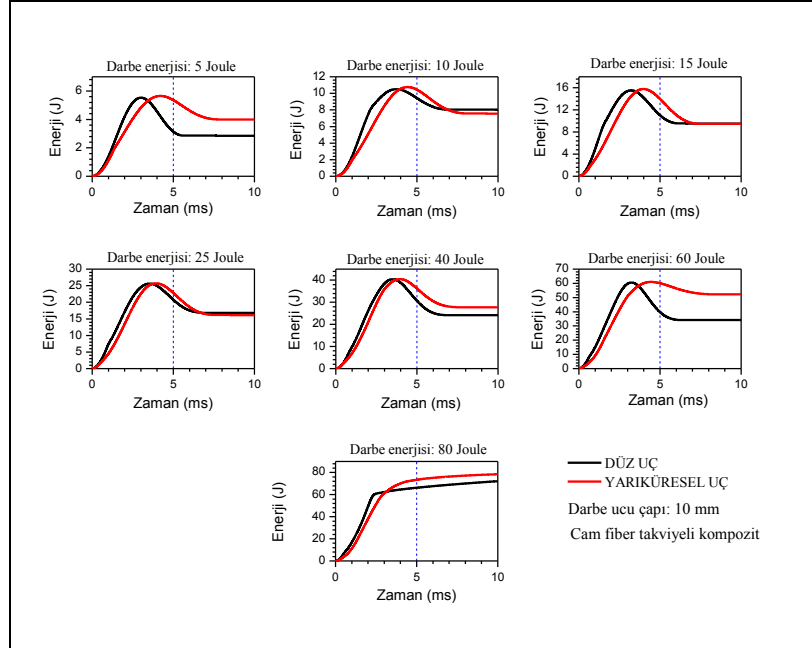


Şekil 6.8: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

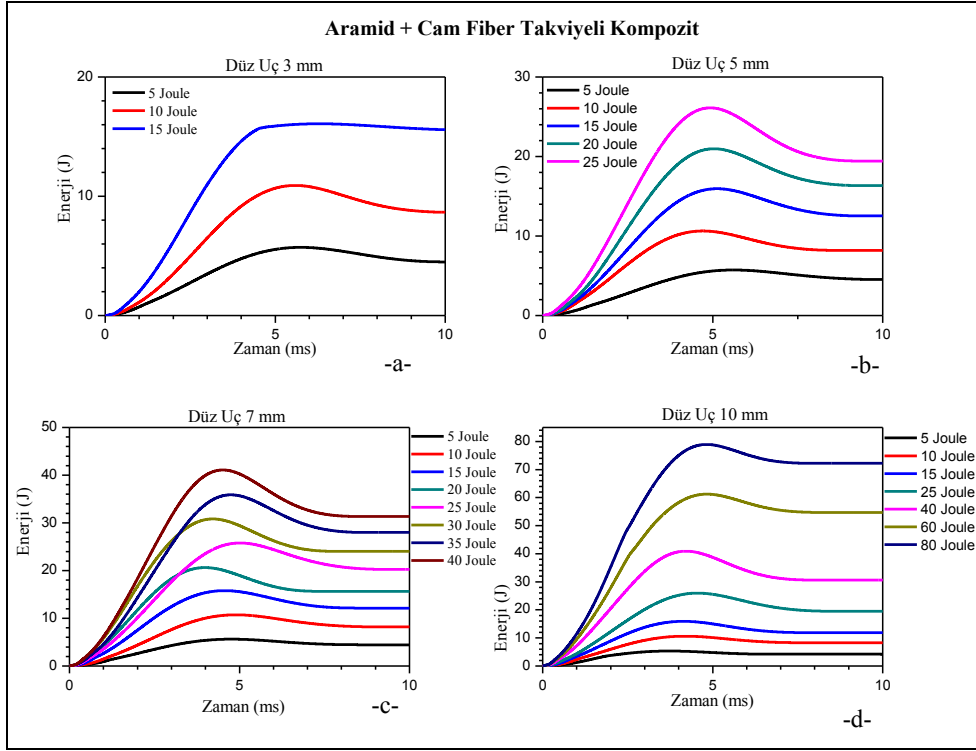


Şekil 6.9: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 J darbe enerjileriyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.9'da 7 mm çaplı yarıküresel uçta 40 J darbe enerjisinde enerji sönümleme yeteneği ortadan kalkmışken, düz darbe ucunda malzeme enerji sönümlmeye devam etmiştir. Şekil 6.10'da düz ve yarıküresel uç geometrileri arasındaki fark artmış, 80 J darbe enerjisinde her iki uç geometrisinde de malzeme tam hasara uğramıştır.

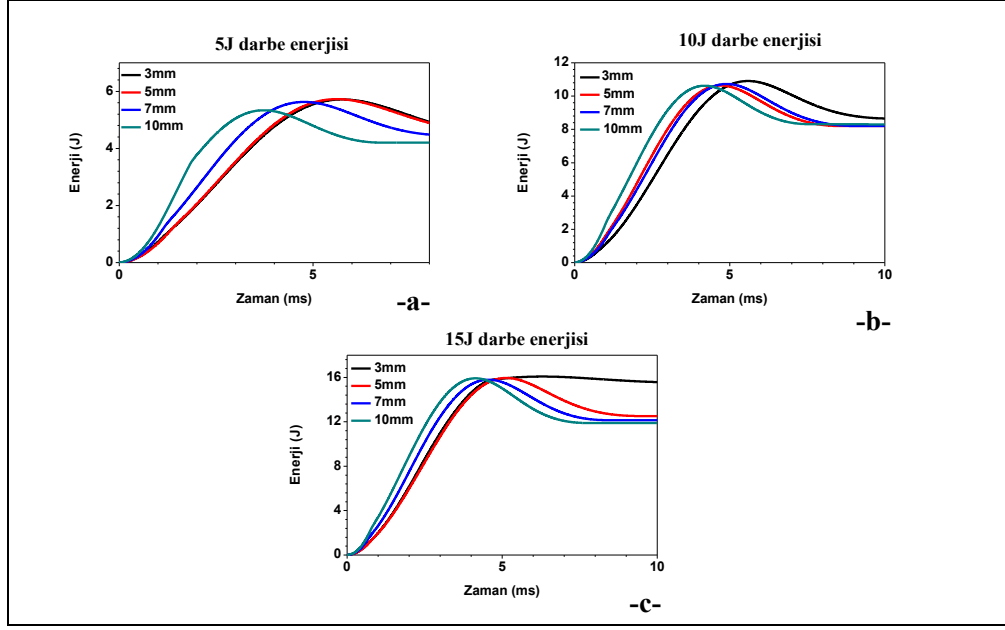


Şekil 6.10: Cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 25, 40, 60 ve 80 J darbe enerjileriyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması



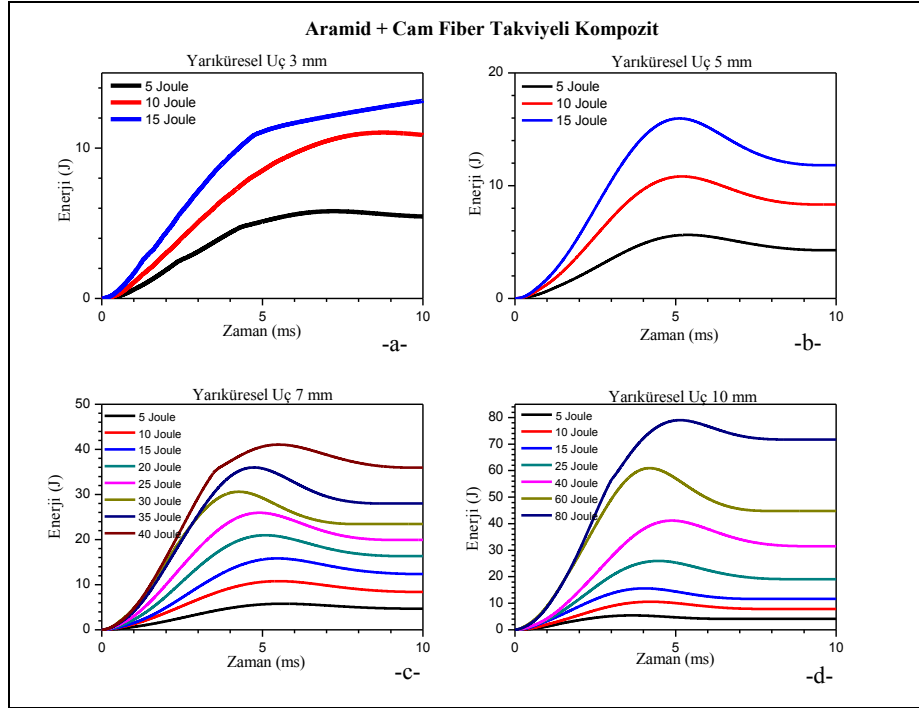
Şekil 6.11: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrileri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.11'de aramid/cam fiber takviyeli hibrit kompozit kullanılarak düz geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.11 (a)'da 3 mm düz darbe ucuyla yapılan test sonrası numunede tam delinmenin 15J darbe enerjisinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Delinmenin bu kadar düşük enerji seviyesinde ortaya çıkması darbe ucu çapının çok küçük olması ve darbe enerjisinin numuneye transferinin çok küçük bir alandan gerçekleşmesidir. Bu duruma bağlı olarak numunenin darbe sönümlene kabiliyeti işlevselliğini kazanamadığından delinme gerçekleşmiştir. Benzer durum sadece cam fiber takviyeli kompozitte de aynı şekilde gerçekleşmiştir. Bu yüzden aramid takviyesinin küçük çaplı darbe uçlarında dayanıma çok fazla bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.11 (b) ve Şekil 6.11 (c)'de sırasıyla 5 mm ve 7 mm düz darbe uçlarıyla yapılan testler sonrası numunede tam delinmenin 25 J ve 40 J enerji seviyelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji zaman eğrilerinden darbe ucu çapı arttıkça malzemenin enerji sönümlene kabiliyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.11 (d)'de en büyük çaplı düz darbe ucu olan 10 mm çaplı darbe ucu enerji zaman grafiği görülmektedir. Bu darbe ucunda maksimum darbe sönümlene kabiliyeti 60 J ve 80 J enerji seviyelerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



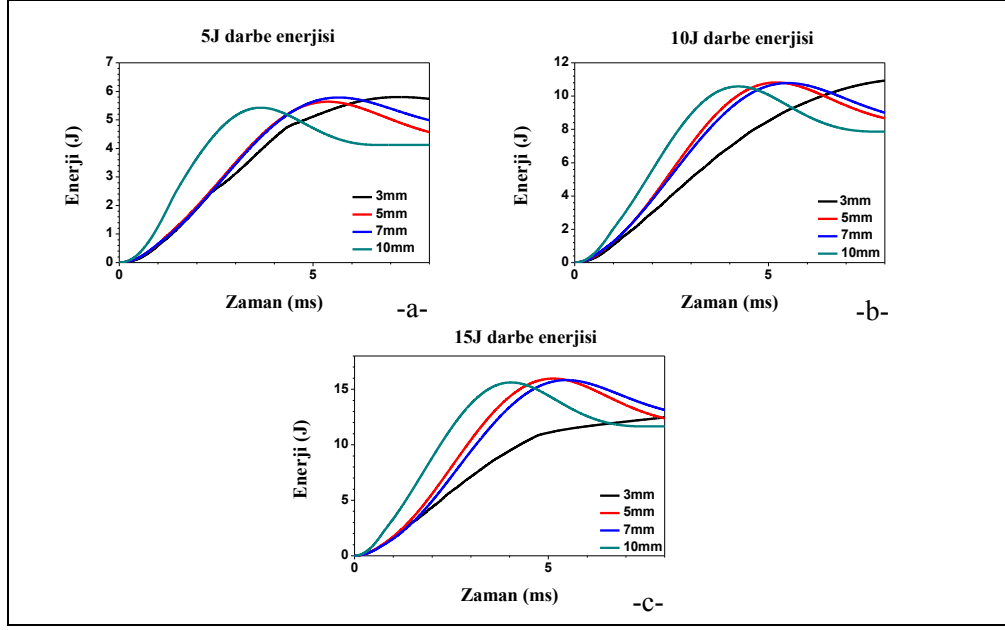
Şekil 6.12: Aramid/Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin düz uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi

Şekil 6.12’de aramid/cam fiber takviyeli kompozite aynı enerji ile farklı düz uç çaplarıyla darbe uygulanması sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.12 (a)’da 5J darbe enerjisinde maksimum enerji noktasına 3 ve 5mm çaplarda aynı anda; 7mm çapta ilk çaptaki darbe ucundan daha erken zamanda; 10mm çaplı darbe ucundaysa maksimum enerji seviyesine en kısa sürede ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 6.12 (b) ve Şekil 6.12 (c) grafiklerinde artan uç çapıyla farklı enerjilerde maksimum enerjiye ulaşma zamanının kısaldığı gözlemlenmiştir.



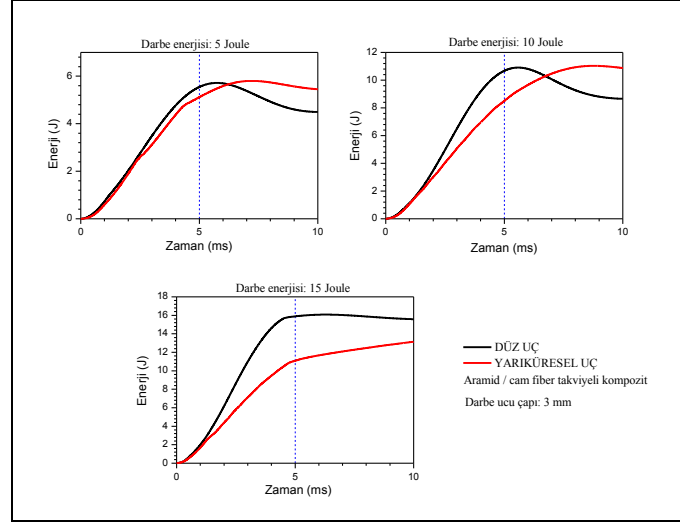
Şekil 6.13: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.13'de aramid/cam fiber takviyeli hibrit kompozit kullanılarak yarıküresel geometrili darbe ucuyla gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.13 (a)'da 3 mm düz darbe ucuyla yapılan test sonrası numunede tam delinmenin 15J darbe enerjisinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Delinmenin bu kadar düşük enerji seviyesinde ortaya çıkması darbe ucu çapının çok küçük olması ve darbe enerjisinin numuneye transferinin çok küçük bir alandan gerçekleşmesidir. Bu duruma bağlı olarak numunenin darbe sönümleme kabiliyeti işlevselliğini kazanamadığından delinme gerçekleşmiştir. Benzer durum sadece cam fiber takviyeli kompozitte de aynı şekilde gerçekleşmiştir. Bu yüzden aramid takviyesinin küçük çaplı darbe uçlarında dayanıma çok fazla bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.13 (b) ve Şekil 6.13 (c)'de sırasıyla 5 mm ve 7 mm düz darbe uçlarıyla yapılan testler sonrası numunede tam delinmenin 15 J ve 40 J enerji seviyelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji zaman eğrilerinden darbe ucu çapı arttıkça malzemenin enerji sönümleme kabiliyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.13 (d)'de en büyük çaplı düz darbe ucu olan 10 mm çaplı darbe ucu enerji zaman grafiği görülmektedir. Bu darbe ucunda maksimum darbe sönümleme kabiliyeti 60 J ve 80 J enerji seviyelerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



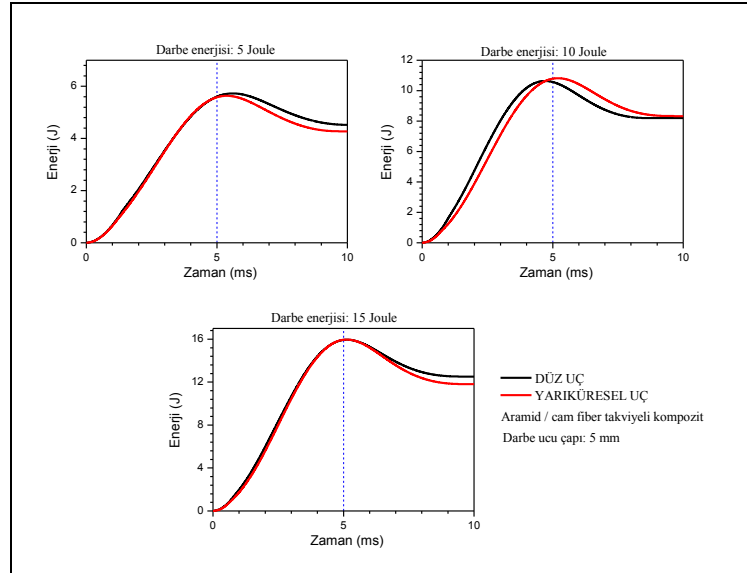
Şekil 6.14: Aramid/Cam fiber takviyeli kompozitle gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri enerji zaman eğrilerinin yarıküresel uç çapı etkisine göre değişimi (a) 5J darbe enerjisi (b) 10J darbe enerjisi (c) 15J darbe enerjisi

Şekil 6.14’de aramid/cam fiber takviyeli kompozite aynı enerji ile farklı yarıküresel uç çaplarıyla darbe uygulanması sonrası ortaya çıkan enerji zaman grafikleri verilmiştir. Şekil 6.14 (a)’da 5J darbe enerjisinde 3,5 ve 7 mm çaplı uçlarda maksimum enerji noktaları neredeyse aynı seviyede kalırken; 10 mm uç çapında maksimum enerji seviyesi diğer uçlara göre daha düşük olmuştur. 5 J enerji seviyesinde 3, 5 ve 7 mm çaplı uçlarda tam delinme gerçekleşirken, en büyük çap olan 10 mm çapta numune darbe enerjisi emme kabiliyetini kazanmıştır. Şekil 6.14 (b) ve Şekil 6.14 (c) grafiklerinde artan uç çapıyla farklı enerjilerde maksimum enerjiye ulaşma zamanının kısaldığı gözlemlenmiştir.

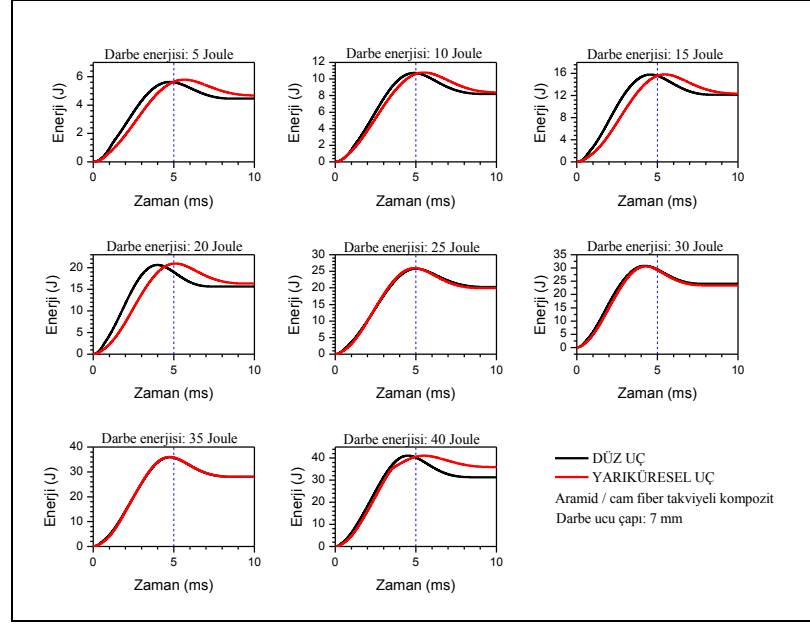


Şekil 6.15: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.15'de 3 mm çaplı yarıküresel uçta aramid / cam fiber takviyeli kompozitte 5 ve 10 J darbe enerjilerinde maksimum değer düz uçla aynı seviyedeyken, 15 J darbe enerjisinde yarıküresel uçta ulaşılan maksimum nokta düz uçta ulaşılan noktanın altında kalmıştır. Şekil 6.16'da 5 mm çaplı düz ve yarıküresel uç geometrileri enerji eğrileri her darbe enerjisi için benzer özellik göstermiştir.

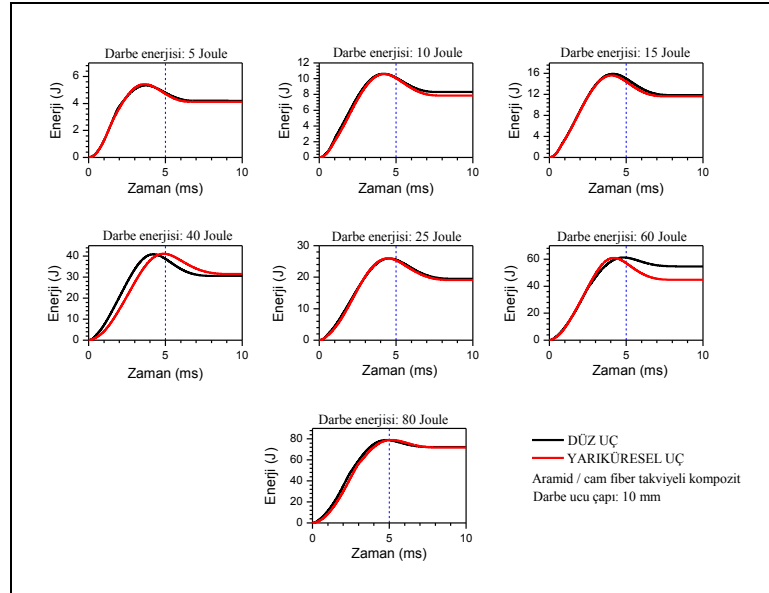


Şekil 6.16: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10 ve 15 J darbe enerjileriyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

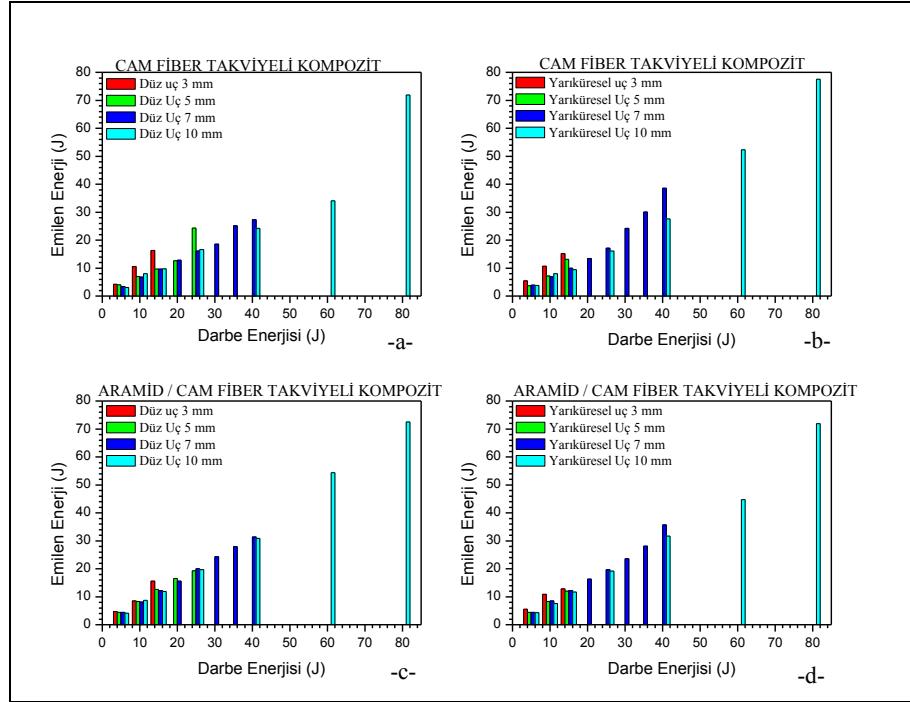


Şekil 6.17: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 J darbe enerjileriyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de aramid / cam fiber takviyeli kompozit, 7 ve 10 mm çaplı yarıküresel ve düz geometrili darbe uçlarının her ikisinde de birbirine paralel enerji zaman eğrileri ortaya koymuştur.

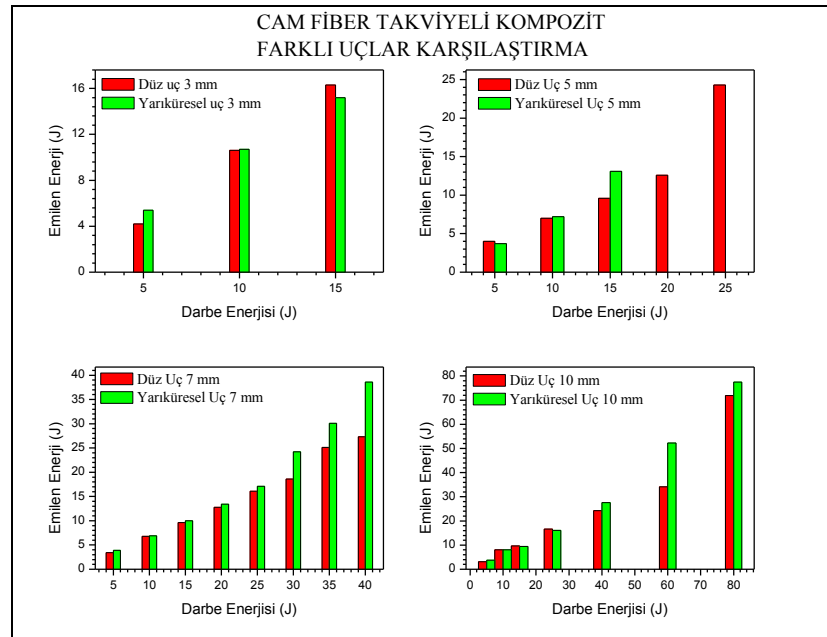


Şekil 6.18: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5, 10, 15, 25, 40, 60 ve 80 J darbe enerjileriyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi enerji zaman eğrilerinin karşılaştırılması

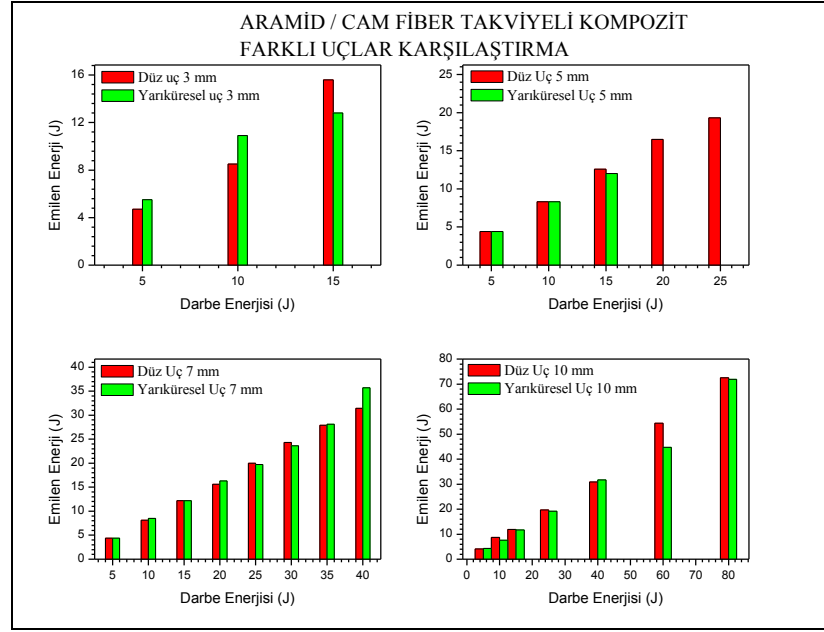


Şekil 6.19: Darbe enerjisine bağlı emilen enerji miktarları (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı yarıküresel darbe uçları (c) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çaplı yarıküresel darbe uçları

Şekil 6.19'da her iki kompozitte en fazla darbe enerjisi emme kabiliyeti her uç geometrisi ve çapında 80 J enerji seviyesinde ortaya çıkmıştır. Şekil 6.20'de cam fiber takviyeli kompozitin 3 ve 5 mm çaplı darbe uçlarında enerji emme kabiliyeti düz uça fazla iken; 5 ve 7 mm çaplı uçlarda yarıküresel uça fazla olmuştur.

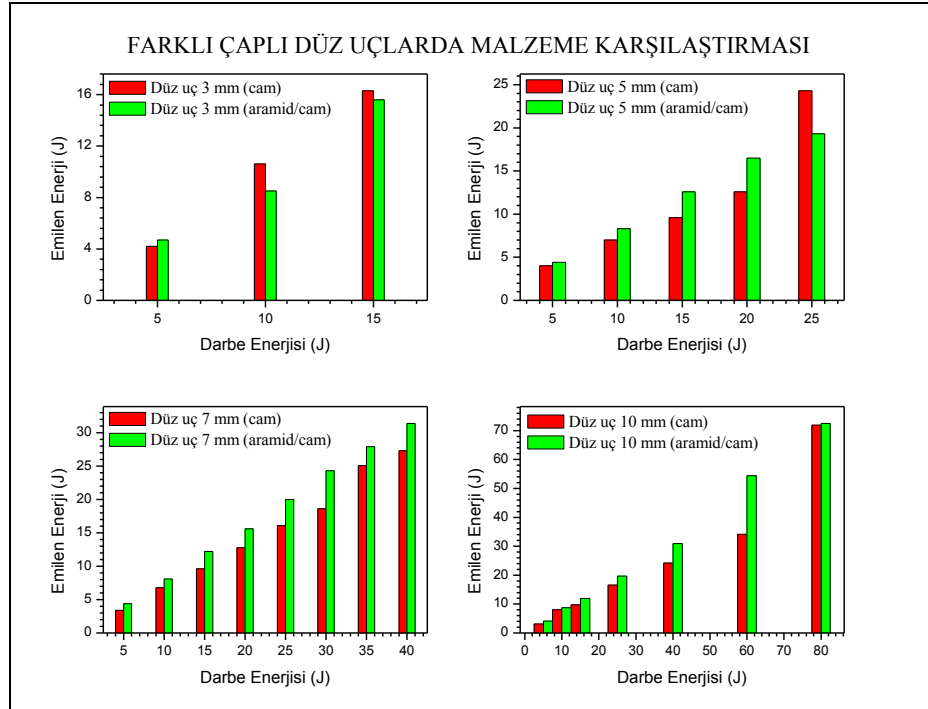


Şekil 6.20: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı uç geometrisi ve çaplarında darbe enerjisine bağlı emilen enerji grafikleri

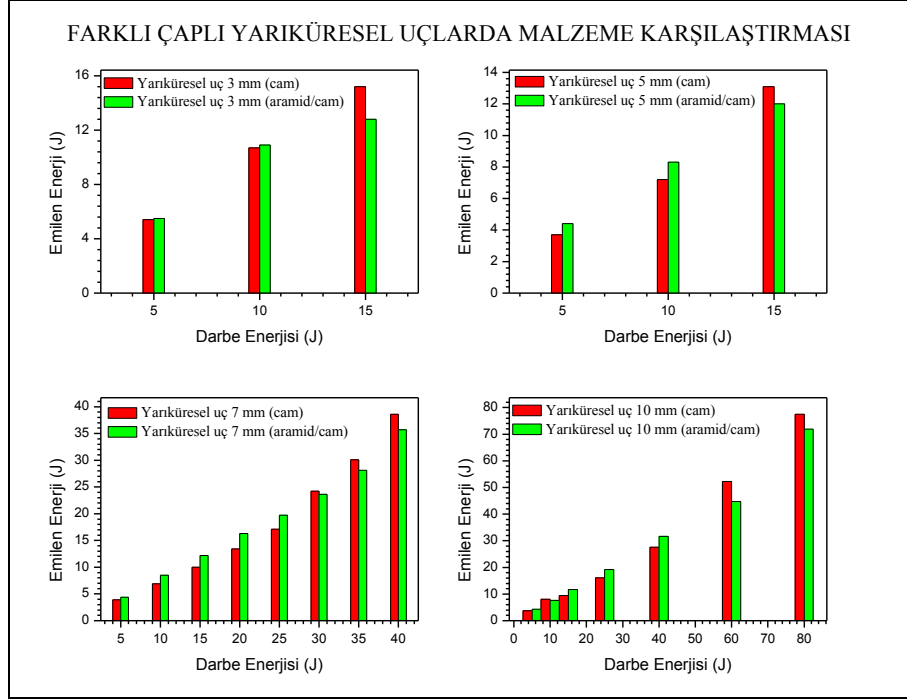


Şekil 6.21: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı uç geometrisi ve çaplarında darbe enerjisine bağlı emilen enerji grafikleri

Şekil 6.21’de aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 3, 5 ve 10 mm çaplı darbe uçlarında enerji emme kabiliyeti düz uçta fazla iken; 7 mm çaplı uçta yarıkürensel uçta fazla olmuştur. Şekil 6.22’de 3 ve 5 mm çaplı düz darbe uçlarında cam fiber takviyeli kompozitin enerji emme kabiliyeti daha iyi iken; 7 ve 10 mm çaplı düz uçlarda aramid / cam fiber takviyeli kompozitin enerji emme kabiliyeti daha iyidir.

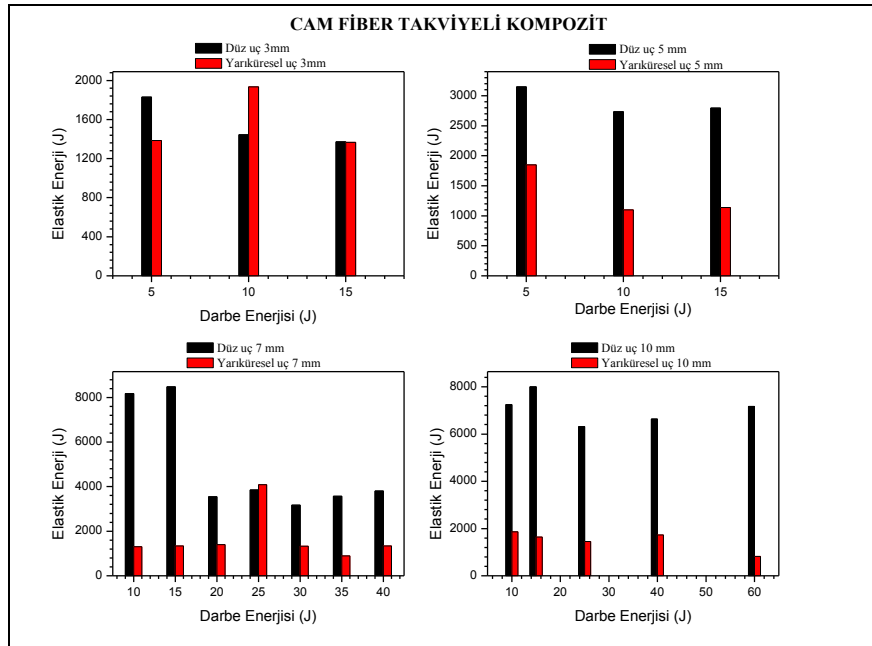


Şekil 6.22: Farklı çaplı düz darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı emilen enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması

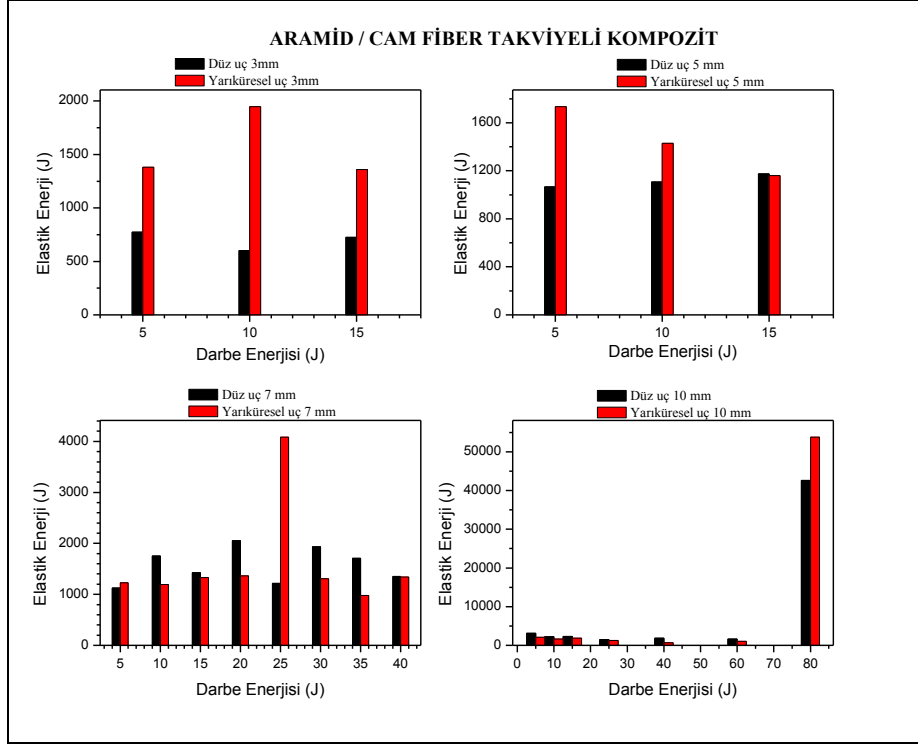


Şekil 6.23: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı emilen enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması

Şekil 6.23’de her çapta düz darbe uçlarında cam fiber takviyeli kompozitin enerji emme kabiliyeti aramid / cam fiber takviyeli kompozitten daha iyidir. Şekil 6.24’te cam fiber takviyeli kompozitin 5, 7 ve 10 mm çaplı uçlarda düz geometride elastik enerji değerleri daha yüksek iken 3 mm çapta yarıküresel geometrinin değerleri daha yüksektir.

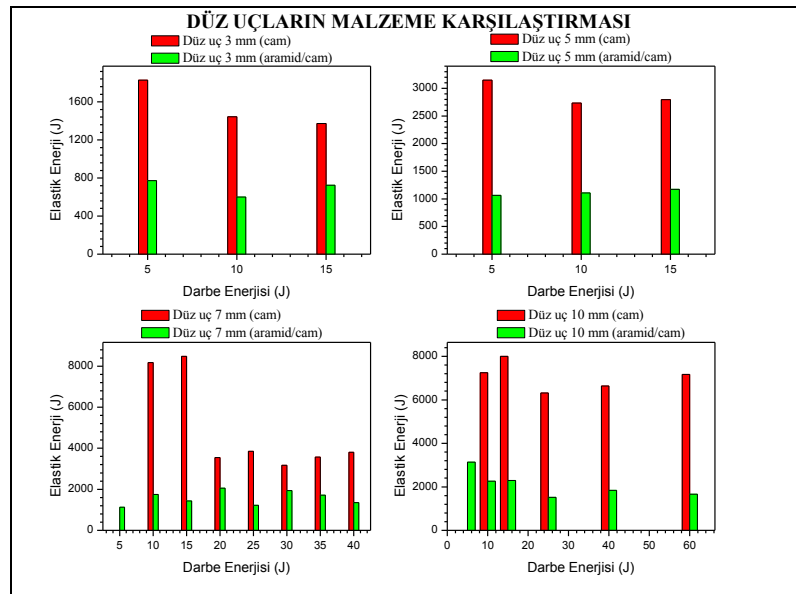


Şekil 6.24: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı darbe ucu çaplarında darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin uç geometrileri açısından karşılaştırılması

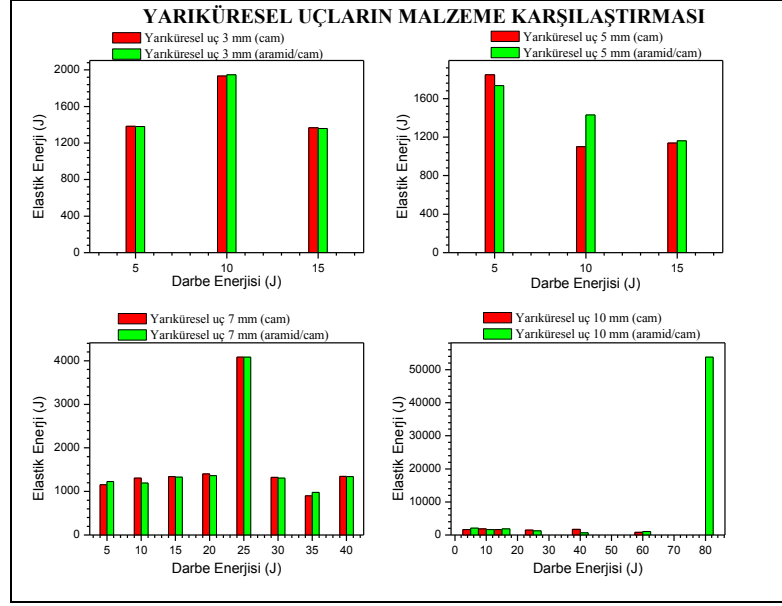


Şekil 6.25: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı darbe ucu çaplarında darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin uç geometrileri açısından karşılaştırılması

Şekil 6.25'te aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik enerji değeri 3, 5 ve 10 mm çaplı uçlarda yarıkürsel geometride daha yüksek iken; 7 mm çaplı uçlarda 25 J darbe enerjisi dışında diğer enerjilerde düz uçların elastik enerji değerleri daha yüksektir. Şekil 6.26'da düz uç geometrisinde her çapta cam fiber takviyeli kompozitin elastik enerji değerleri aramid / cam fiber takviyeli kompozitten yüksektir.

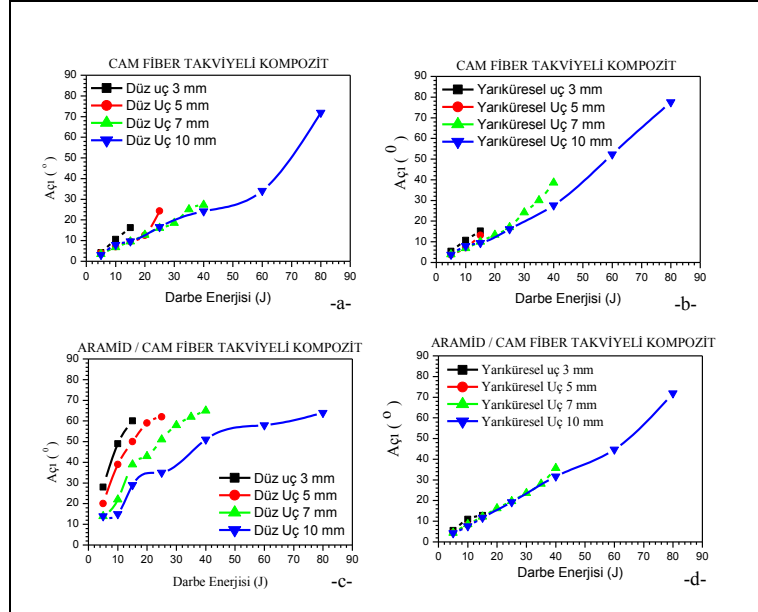


Şekil 6.26: Farklı çaplı düz darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması



Şekil 6.27: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının darbe enerjisine bağlı elastik enerji değişimlerinin cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitler için karşılaştırılması

Şekil 6.27’de yarıküresel uç geometrisinde her uç çapında cam fiber takviyeli ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin elastik enerji değerleri benzerken; 10 mm çaplı uçta 80 J darbe enerjisinde sadece aramid / cam fiber takviyeli kompozit elastik enerji değerine sahiptir. Şekil 6.28’de sadece düz uçla aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yapılan testlerden elde edilen elastik açı değerleri farklı bir dağılım özelliği göstermiştir.

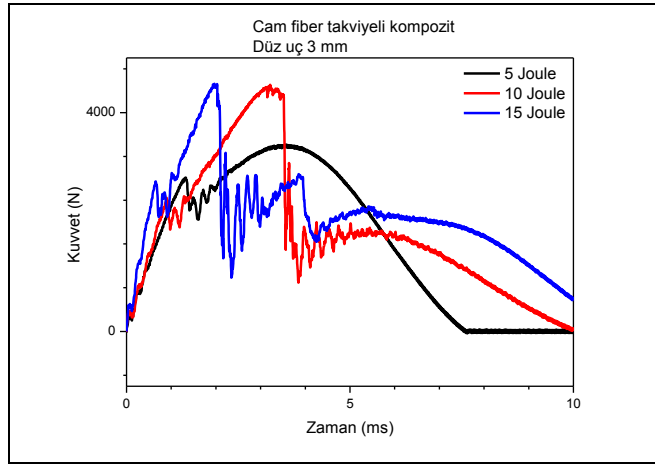


Şekil 6.28: Cam fiber takviyeli ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin enerji zaman eğrilerinden elde edilen açı değişimleri (a) cam fiber takviyeli, farklı çaplı düz uçlar (b) cam fiber takviyeli, farklı çaplı yarıküresel uçlar (c) aramid / cam fiber takviyeli, farklı çaplı düz uçlar (d) aramid / cam fiber takviyeli, farklı çaplı yarıküresel uçlar

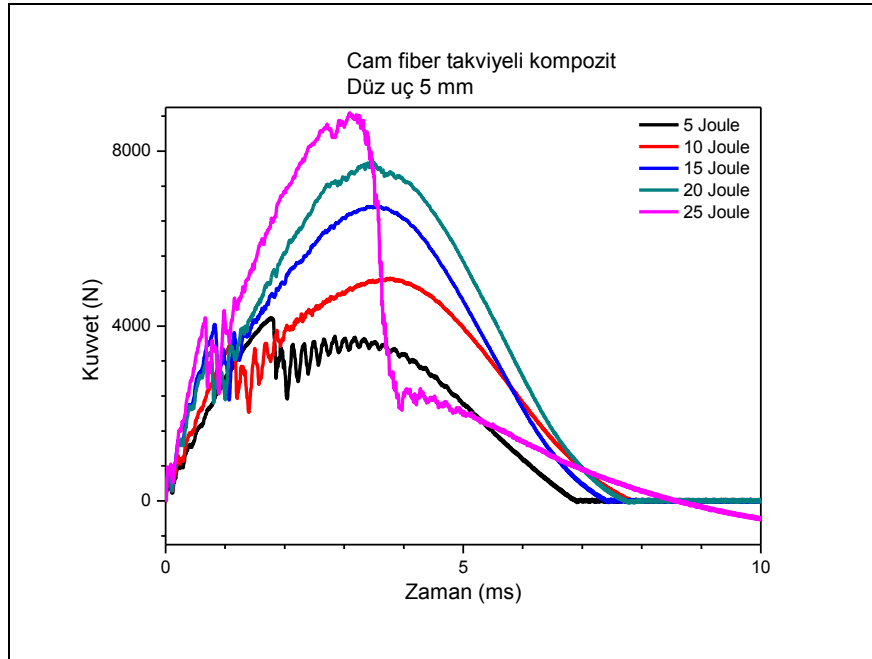
6.2. Kuvvet Zaman Grafikleri

Düşük hızlı darbe testleri sonrası darbeye maruz bırakılan malzemenin dayanımı hakkında bilgi sahibi olmak için değerlendirilmesi gereken en önemli grafiklerden bir tanesi kuvvet zaman değişimini veren grafiklerdir.

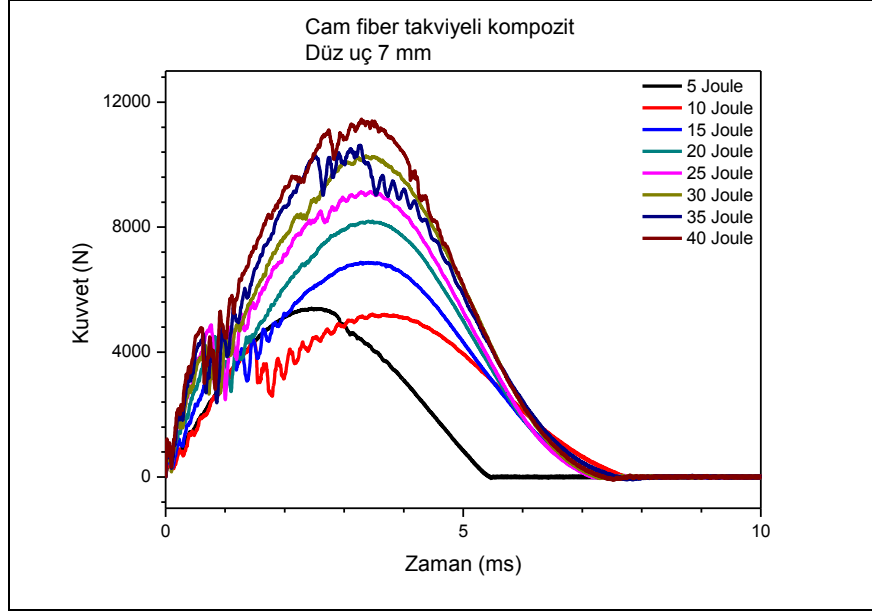
Doktora tezi kapasamında gerçekleştirilen deneylerde iki farklı geometride (düz ve yarıküresel) uçlar için 4 farklı çapta (3, 5, 7 ve 10 mm) darbe ucuyla gerçekleştirilen darbe testleri sonucu elde edilen kuvvet zaman grafikleri bu bölümde verilmiştir.



Şekil 6.29: Cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

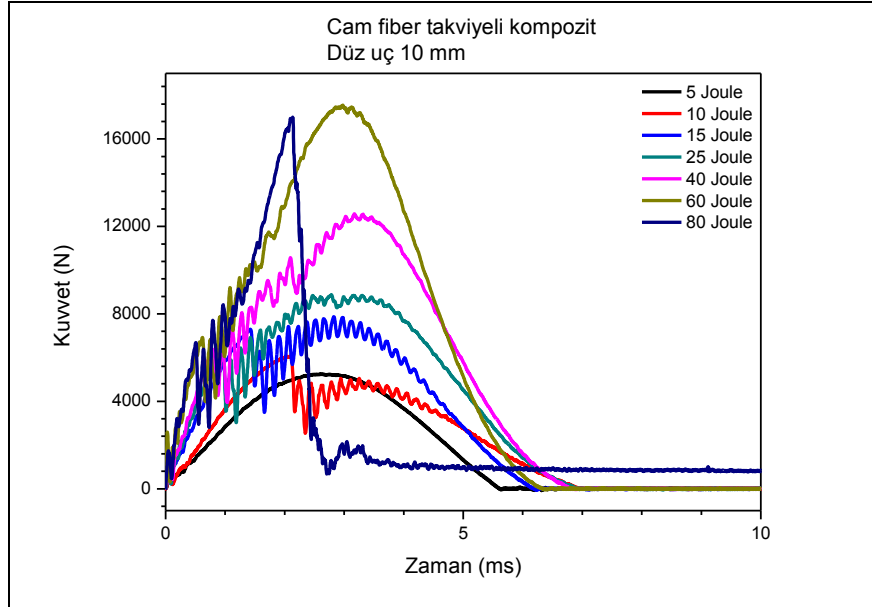


Şekil 6.30: Cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

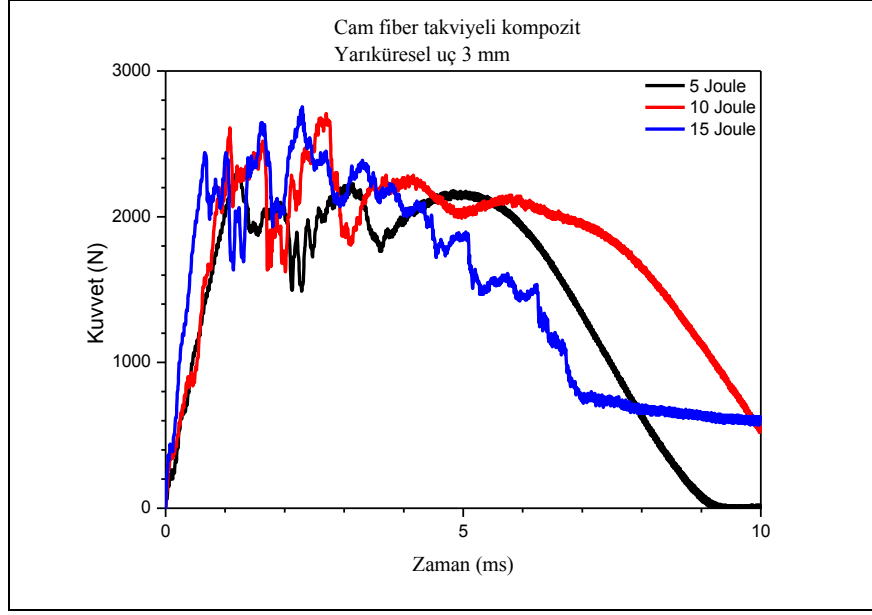


Şekil 6.31: Cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.31’de cam fiber takviyeli kompozitte 7 mm çaplı düz uçla gerçekleştirilen testlerde 40 J darbe enerjisinde 11200 N kuvvet değerlerine çıkılırken, Şekil 6.32’de 10 mm çaplı uçta 80 J darbe enerjisinde 17600 N kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. Düz darbe ucu çapının 3 mm artması ulaşılan maksimum kuvvet değerinde %60’lık bir artışa sebep olmuştur.

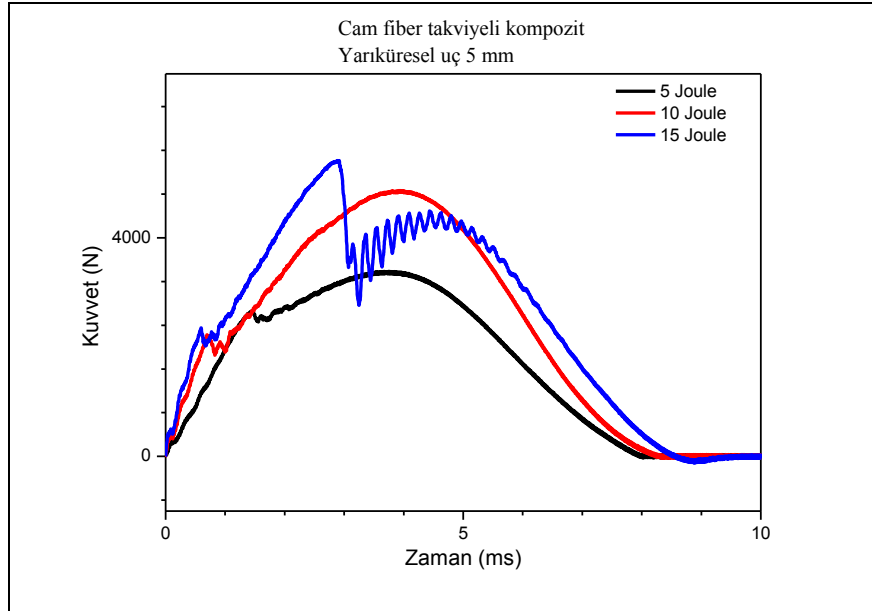


Şekil 6.32: Cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

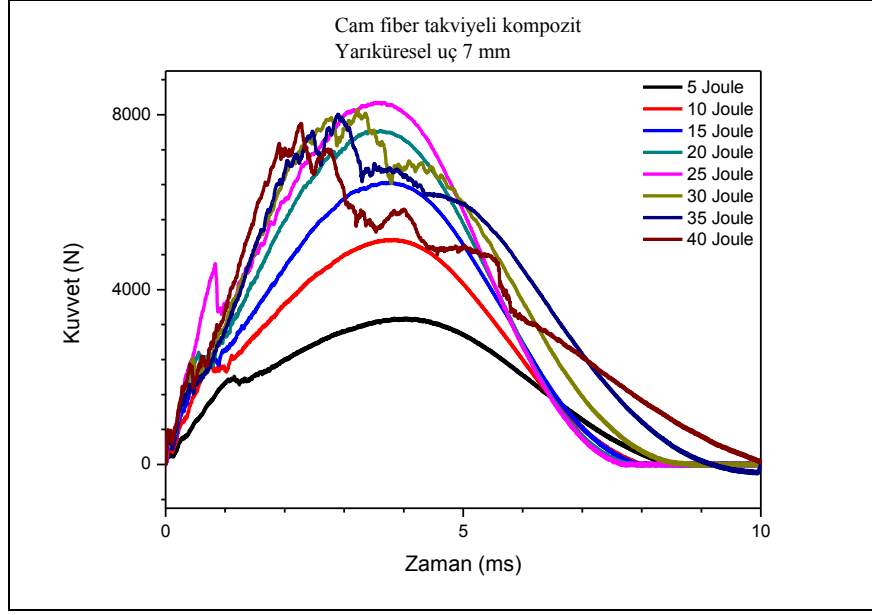


Şekil 6.33: Cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.33'te 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucunda 5 J darbe enerjisi seviyesinde malzemede geri gelme gözlemlenirken, 10 J enerjisinde ucun malzemeye nüfuziyeti başlamış, 15 J enerjisinde tam delinme gerçekleşmiştir. Şekil 6.34'te yarıküresel uç çapı 5 mm olurken tam delinme 15 J darbe enerjisinde ortaya çıkmıştır.

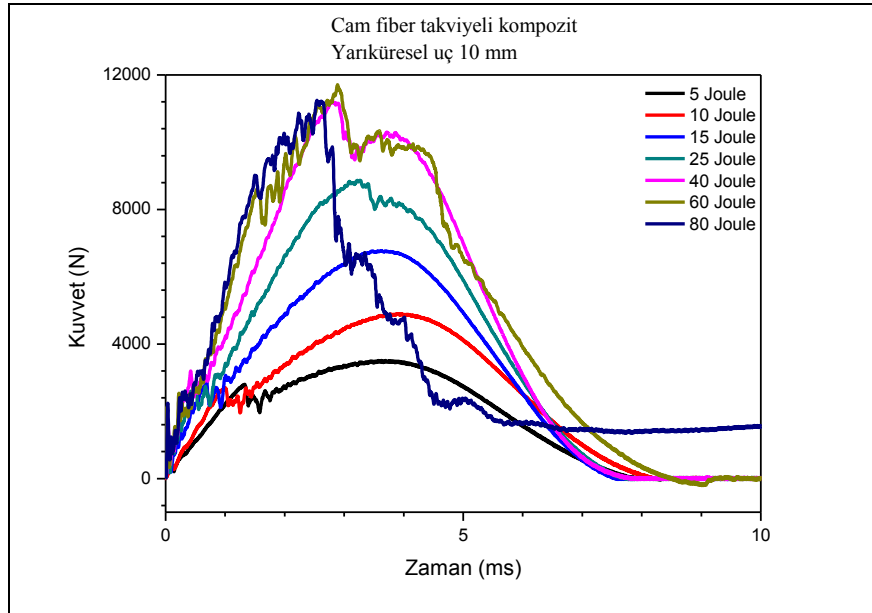


Şekil 6.34: Cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

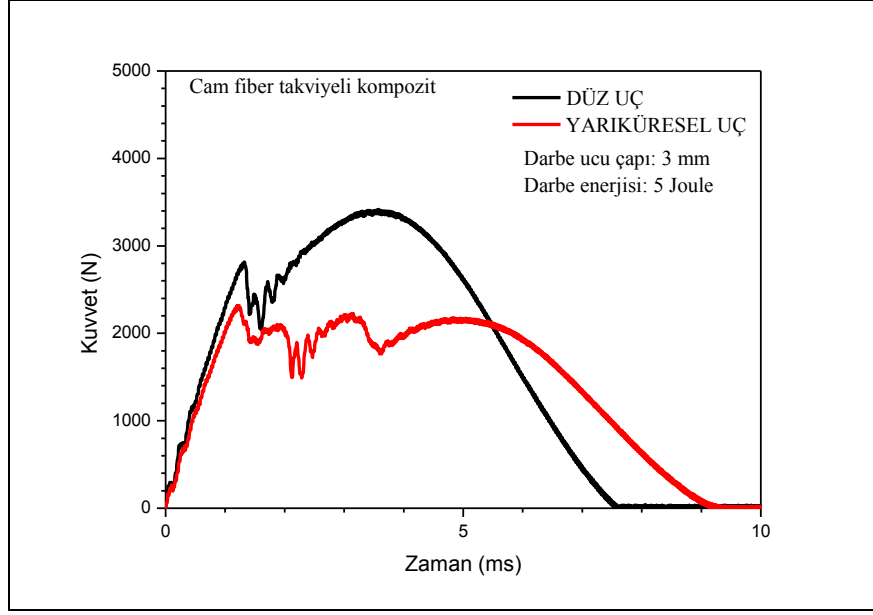


Şekil 6.35: Cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.35'te cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı yarıküresel uçla uygulanan darbelerde 30 J darbe enerjisi nüfuziyet kritik enerji eşiği olarak ortaya çıkmıştır. 30 J darbe enerjisinden malzemenin tam delinmeye gittiği 40 J darbe enerjisine kadar her enerji değerinde uç malzeme içinde daha derin bir batma izi oluşturmuştur. Şekil 6.36'da 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucunda 40 J seviyesinden 80 J seviyesine kadar nüfuziyet giderek artmış, 80 J darbe enerjisinde tam delinme gerçekleşmiştir.

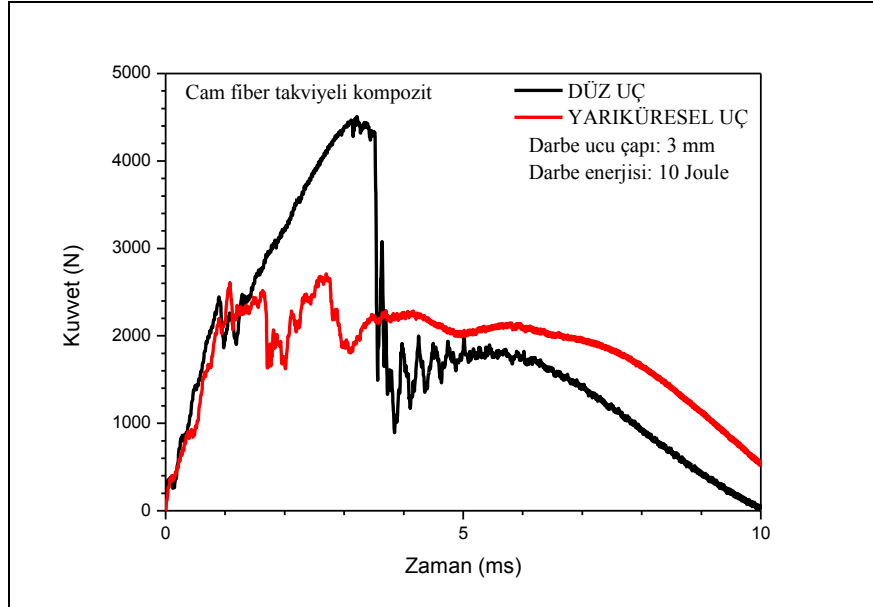


Şekil 6.36: Cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

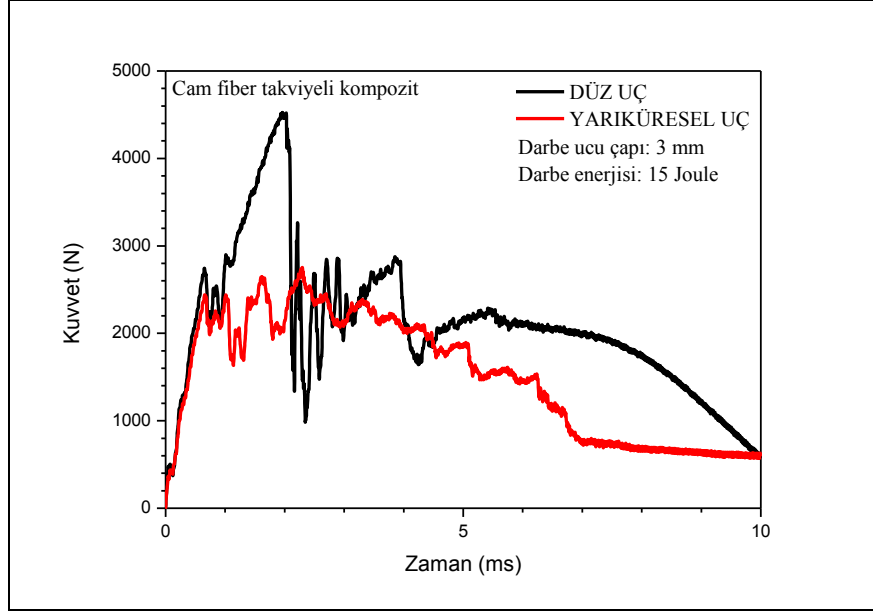


Şekil 6.37: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.37’de cam fiber takviyeli kompozit her iki geometride 3 mm çaplı uçla 5 J darbe enerjisiyle test edilmiş, düz uç geometrisinde daha yüksek kuvvet değerine ulaşılmıştır. Şekil 6.38’de darbe enerjisi 10 J olduğunda düz ucun kuvvet değeri tek vuruşta oluşan hasar nedeniyle 5 J seviyesinden daha yüksek olmuştur.

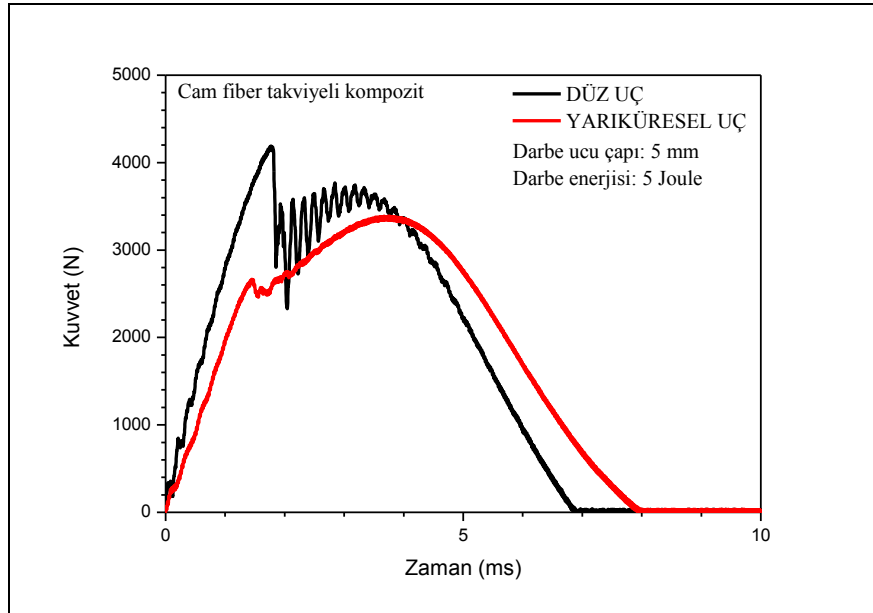


Şekil 6.38: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

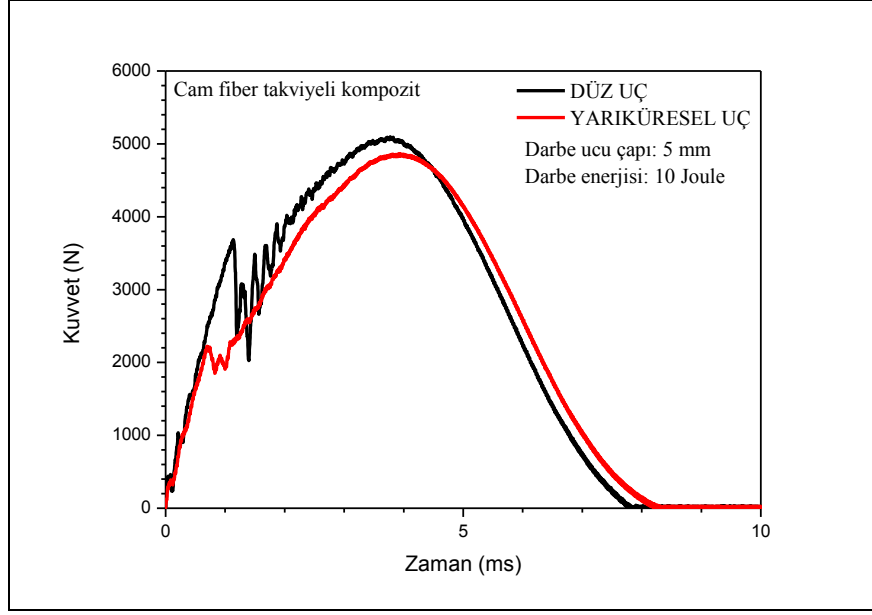


Şekil 6.39: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.39'da 15 J darbe enerjisinde yarıküresel uç geometrisinde kompozit tam delinmeye giderken, düz uç geometrisinde kompozite darbe ucunun nüfuziyeti gözlemlenmiştir. Şekil 6.40'da 5 mm çaplı her iki uç geometrisinde 5 J darbe enerjisinde geri gelme gözlemlenmiş, düz uçta ulaşılan kuvvet değeri daha büyük olmuştur.

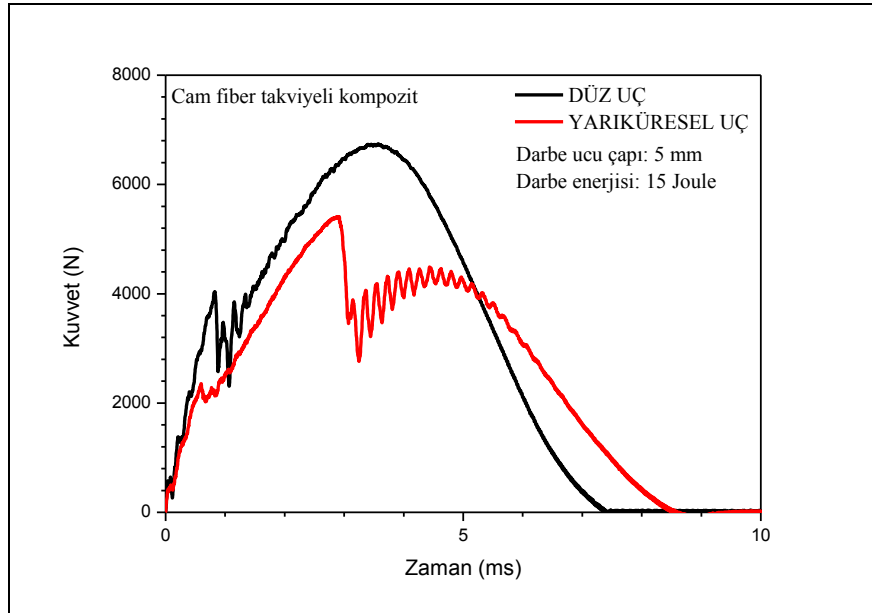


Şekil 6.40: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

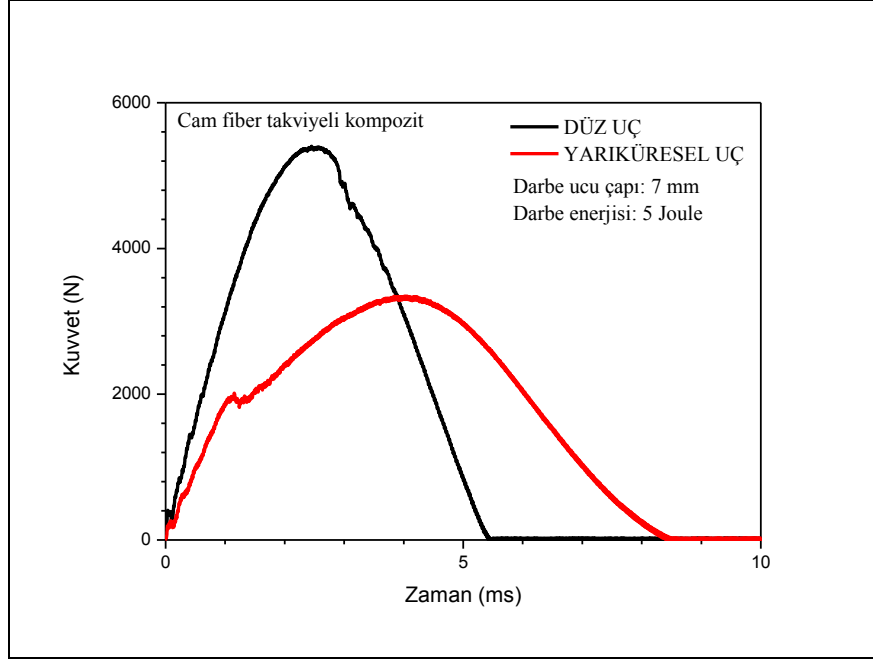


Şekil 6.41: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.41’de 5 mm çaplı her iki geometrideki darbe uçlarının 10 J enerji seviyesinde kuvvet değişim eğrileri benzer özellik göstermiştir. Şekil 6.42’de düz geometrili 5 mm çaplı düz darbe ucuyla gerçekleşen test sonrası kuvvet eğrisi yarıküresel uca göre daha yüksek kuvvet değerlerine erişmiştir. Her iki uç geometrisinde de kompozit geri gelme karakteristiği göstermiştir.

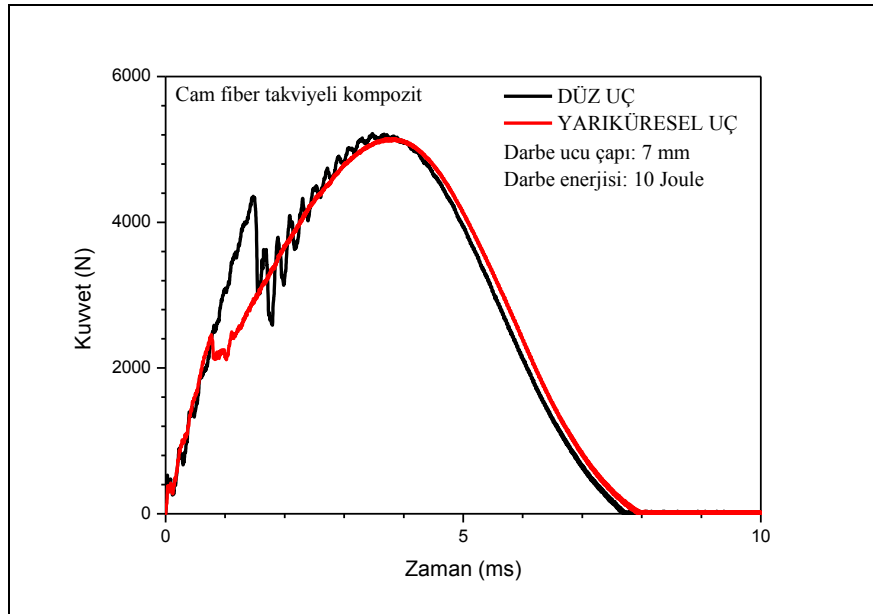


Şekil 6.42: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

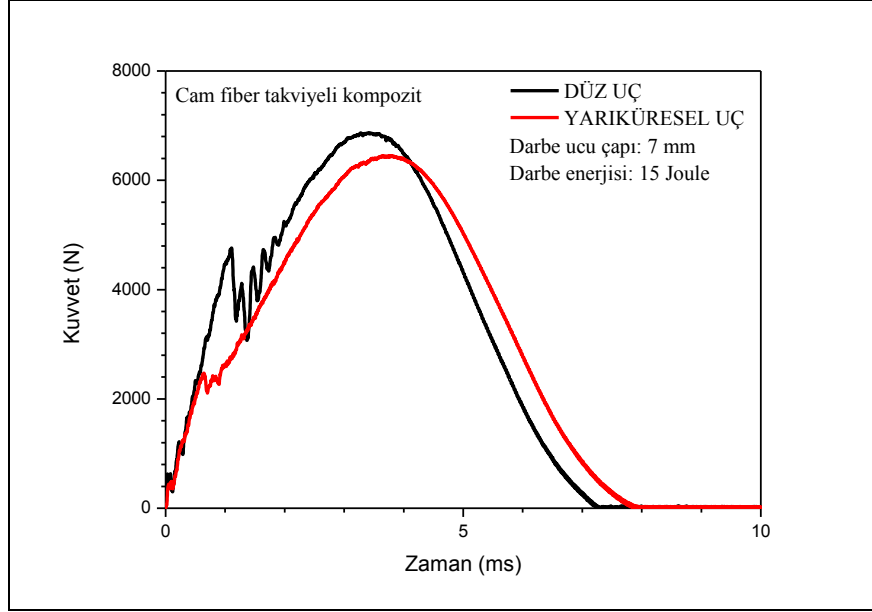


Şekil 6.43: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.43'te 7 mm çaplı düz darbe ucu kompozite yarıküresel uca göre daha kısa süre temas etmiş fakat daha yüksek kuvvet değerine çıkmıştır. Şekil 6.44'te aynı çaplı darbe ucunda enerji 10 J seviyesine çıktığında temas süreleri ve ulaşılan maksimum kuvvetler arasındaki farkın ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.

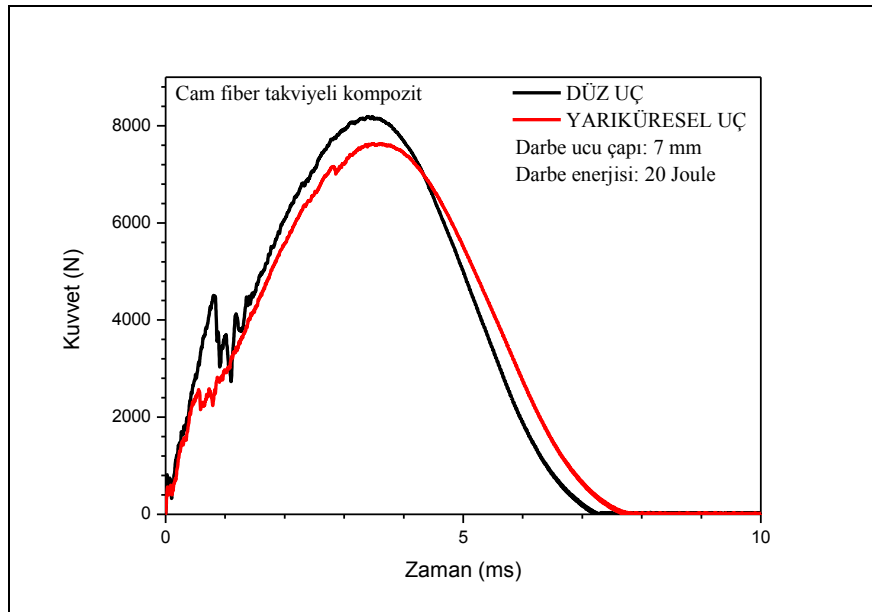


Şekil 6.44: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

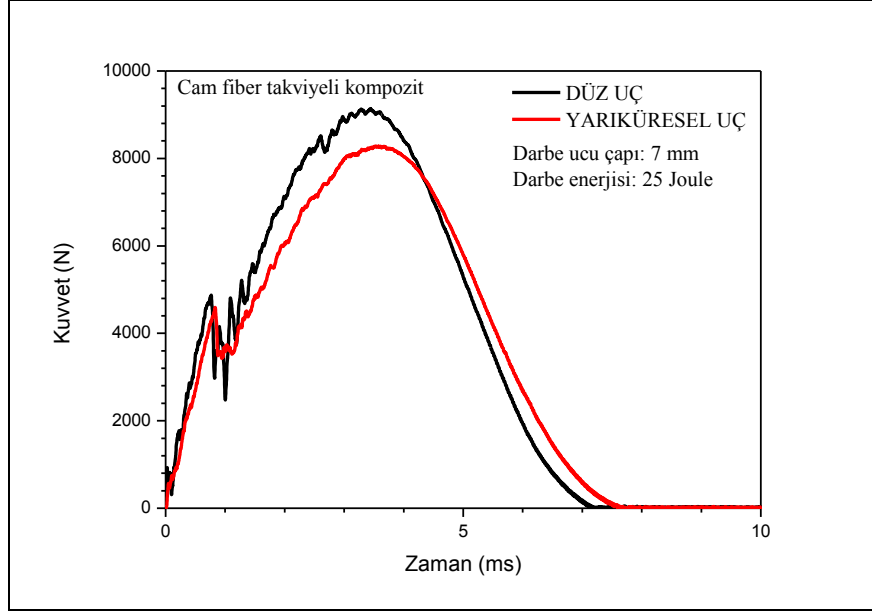


Şekil 6.45: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıkÜRESEL geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'da 7 mm çaplı darbe uçlarında enerjiler sırasıyla 15 ve 20 J seviyelerinde iken uç geometrisi farkının maksimum kuvveti temas süresini kayda değer ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte her iki enerji seviyesinde de yarıkÜRESEL geometriyle elde edilen maksimum kuvvet çok az da olsa daha düşük, temas süresi biraz daha uzun olmuştur.

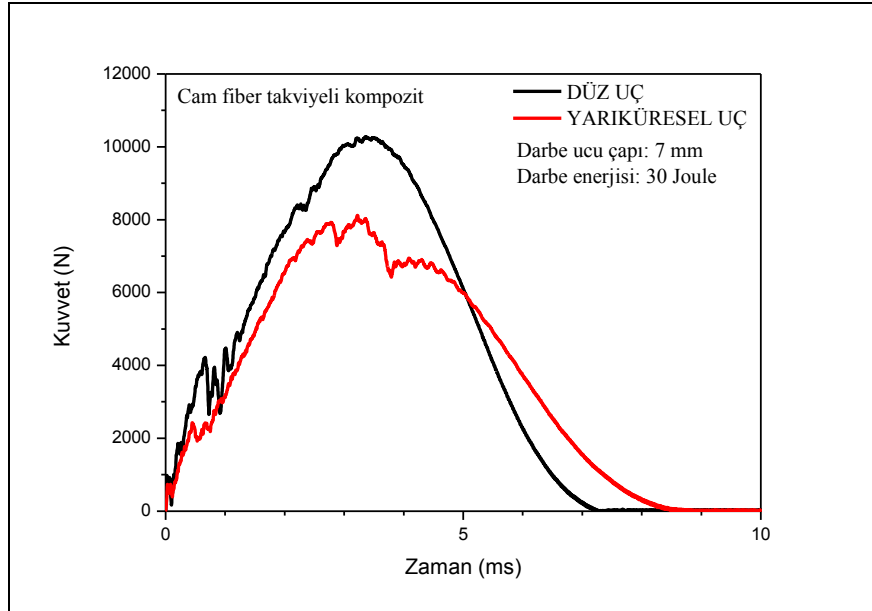


Şekil 6.46: Cam fiber takviyeli kompozite 20 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıkÜRESEL geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

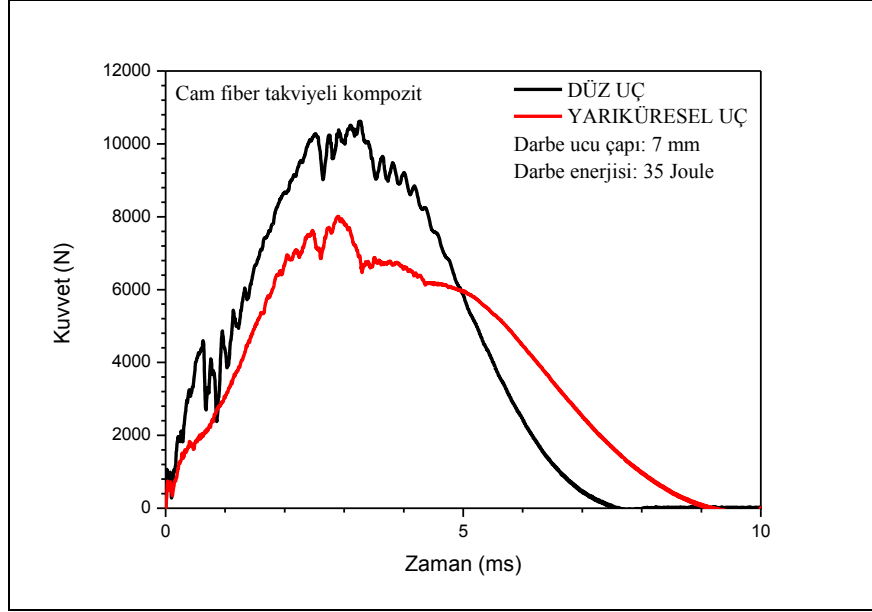


Şekil 6.47: Cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.47 ve Şekil 6.48'de 7 mm çaplı yarıküresel ve düz geometrili darbe uçlarıyla testler sonrası ulaşılan maksimum kuvvetler arasındaki fark artan darbe enerjisi miktarıyla artmıştır.

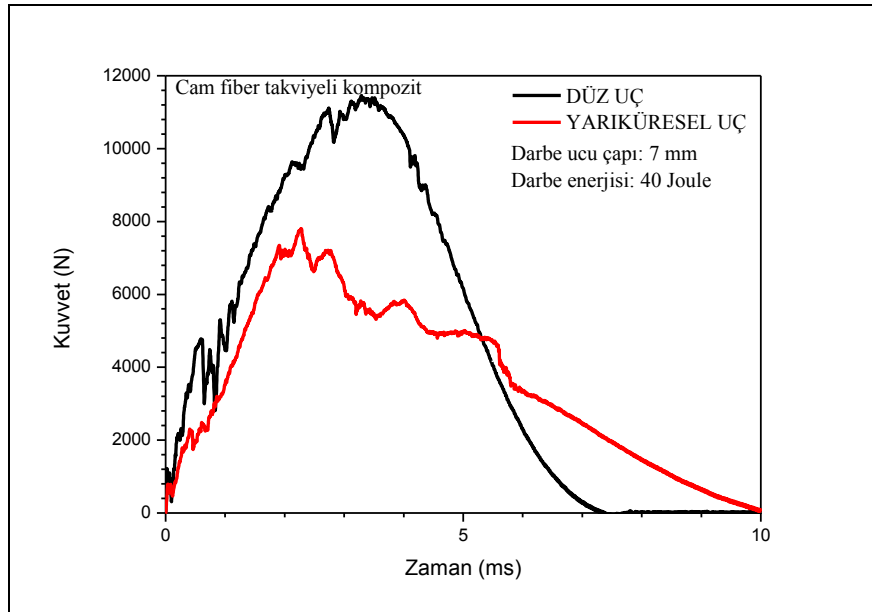


Şekil 6.48: Cam fiber takviyeli kompozite 30 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

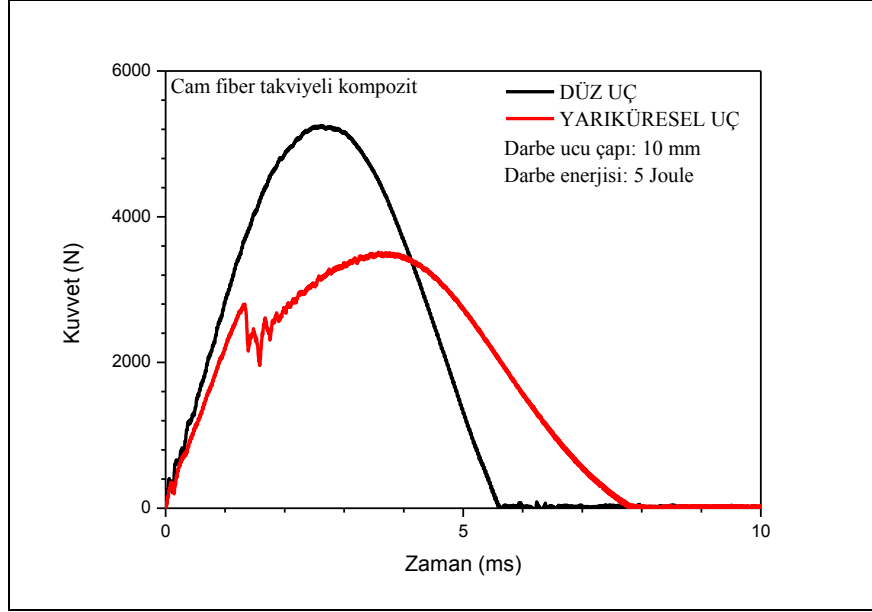


Şekil 6.49: Cam fiber takviyeli kompozite 35 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.49 ve Şekil 6.50’de 7 mm çaplı düz ve yarıküresel uçların 35 ve 40 J enerji seviyelerindeki kuvvet zaman grafikleri görülmektedir. İki darbe ucu geometrisi arasındaki maksimum kuvvet değeri farkı çoğalarak 40 J darbe enerjisinde yarıküresel geometrili uç ile gerçekleşen darbe sonrası malzemede nüfuziyet gerçekleşirken düz geometrili uçla gerçekleşen test sonrası malzeme geri gelme potansiyelini koruyarak yükü taşımaya devam etmiştir.

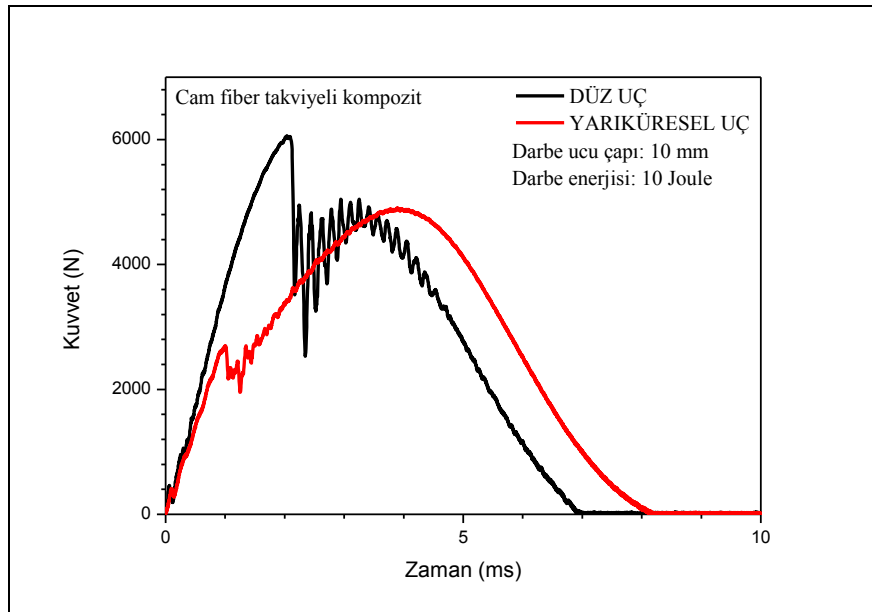


Şekil 6.50: Cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

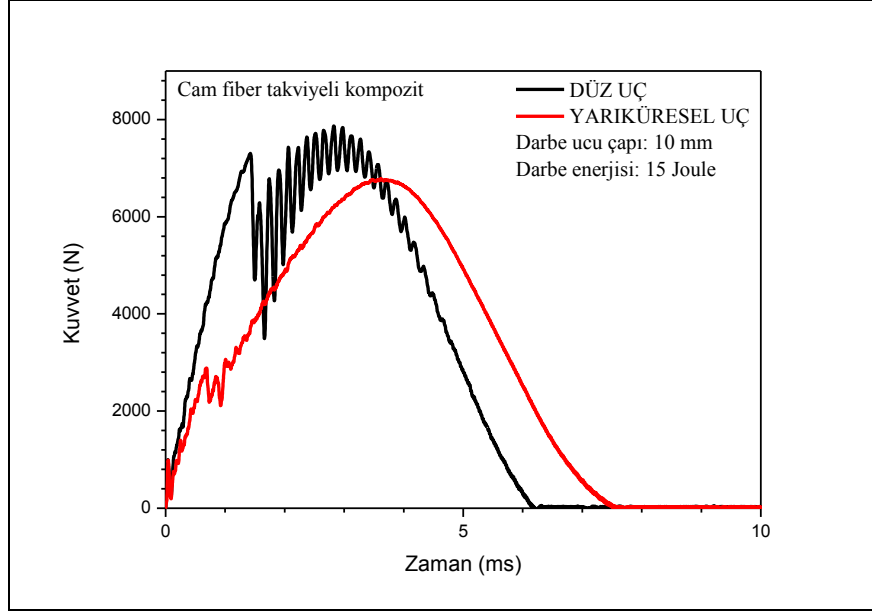


Şekil 6.51: Cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.51’de 5 J darbe enerjisinde 10 mm çaplı yarıküresel uçta matris hasarı ortaya çıkarken, düz uçta matris hasarı gözlemlenmemiştir. Temas süresi düz uca göre daha uzun olmuştur. Şekil 6.52’de 10 J darbe enerjisinde her iki uç geometrisinde de matris hasarı ortaya çıkarken düz uçta ortaya çıkan maksimum kuvvet daha yüksek olmuştur.

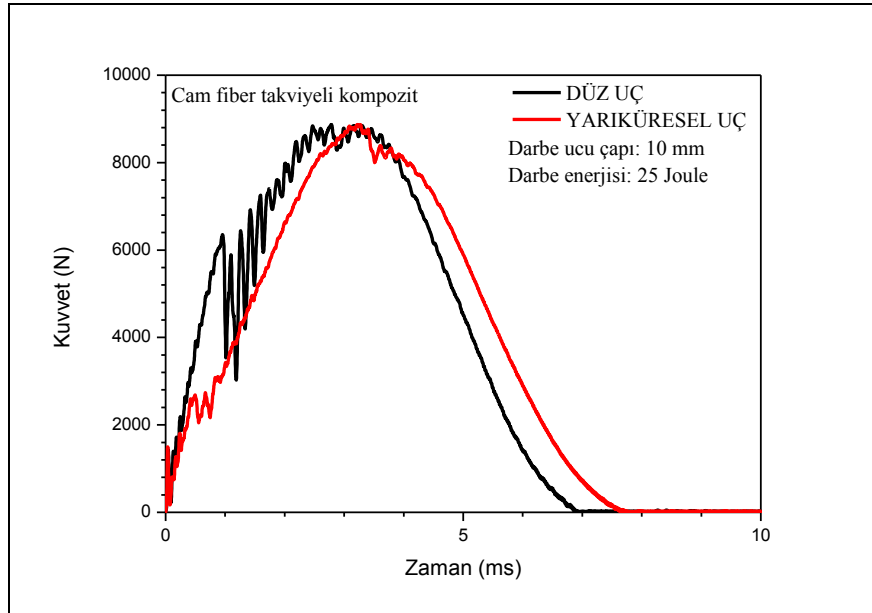


Şekil 6.52: Cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

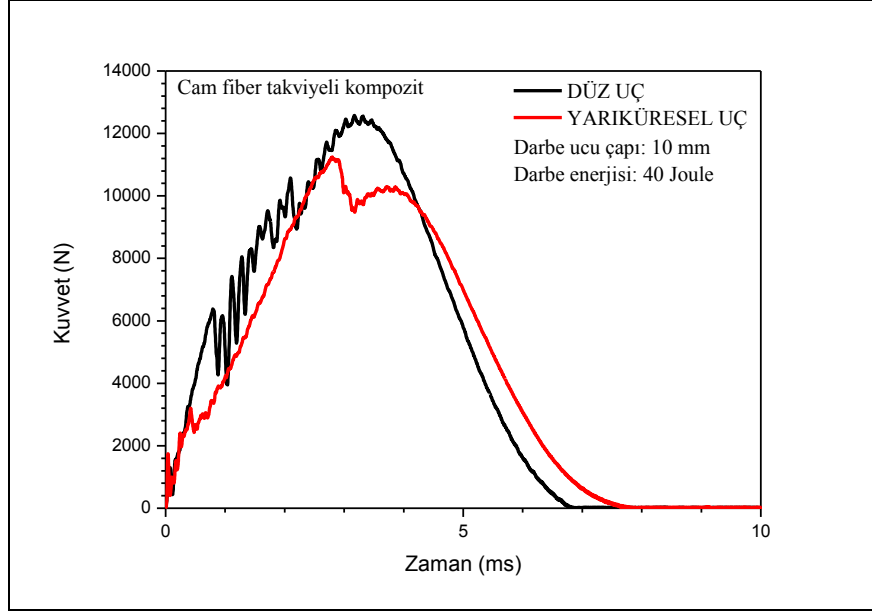


Şekil 6.53: Cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.53 ve Şekil 6.54'te 10 mm çaplı darbe uçlarında darbe enerjileri arttıkça farklı geometriler arasındaki maksimum kuvvet farkı azalmıştır. Her enerji seviyesinde her iki uç geometrisiyle gerçekleşen darbe testleri sonrası kompozit geri gelme kabiliyetini yitirmemiştir. Temas süreleri her iki enerji seviyesinde de yarıküresel uç için daha uzun gerçekleşmiştir.

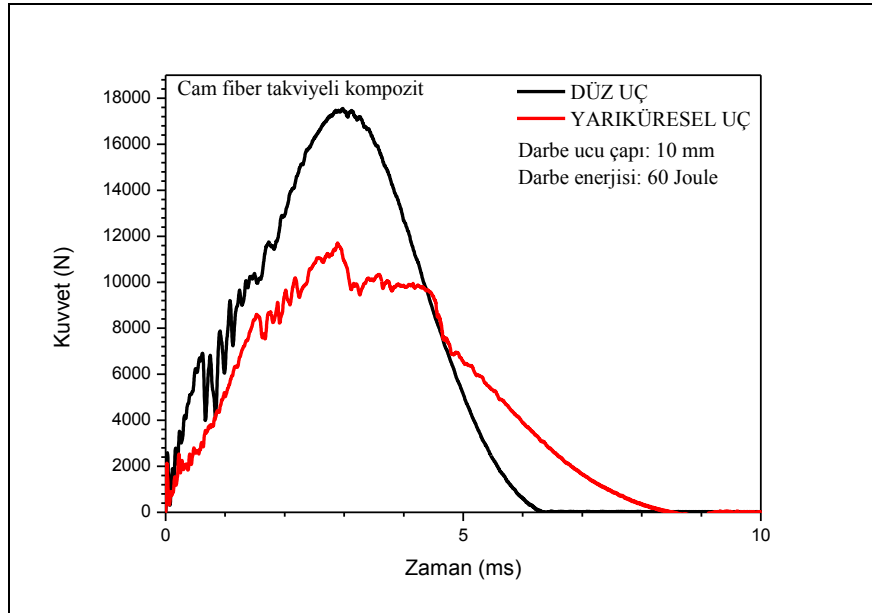


Şekil 6.54: Cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

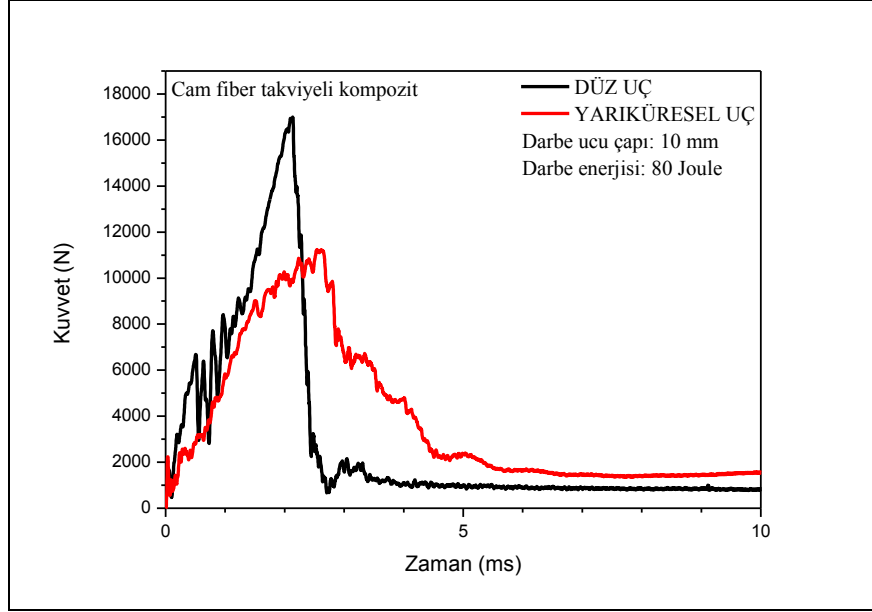


Şekil 6.55: Cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.55'te 40 J darbe enerjisinde 10 mm çaplı uçlardan yarıküresel geometrili uçta düz uca göre daha düşük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. Yarıküresel uçta temas süresi daha uzun olmuştur. Şekil 6.56'da yarıküresel uçta 60 J darbe enerjisinde nüfuziyet gerçekleşirken düz uçta geri gelme gözlemlenmiştir. Ulaşılan maksimum kuvvetler arasındaki fark artmıştır.

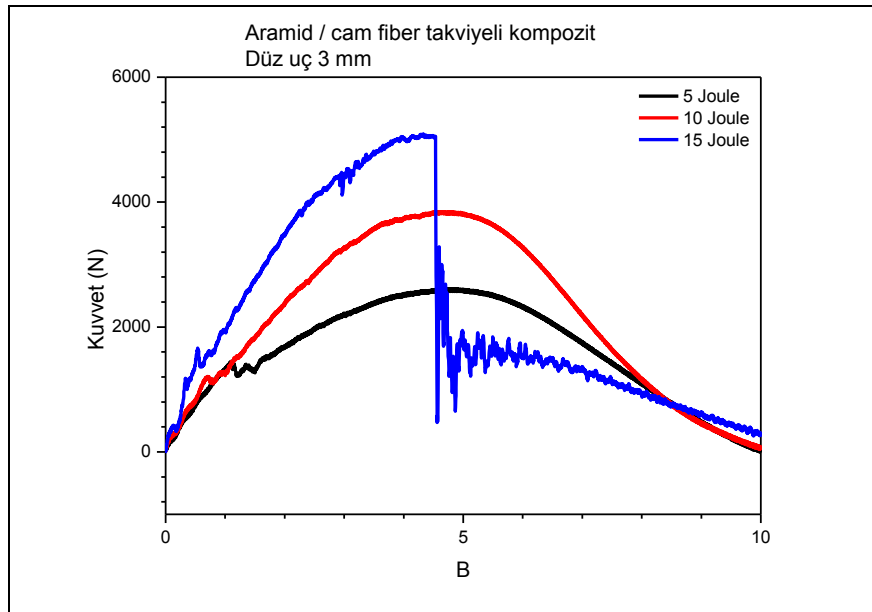


Şekil 6.56: Cam fiber takviyeli kompozite 60 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

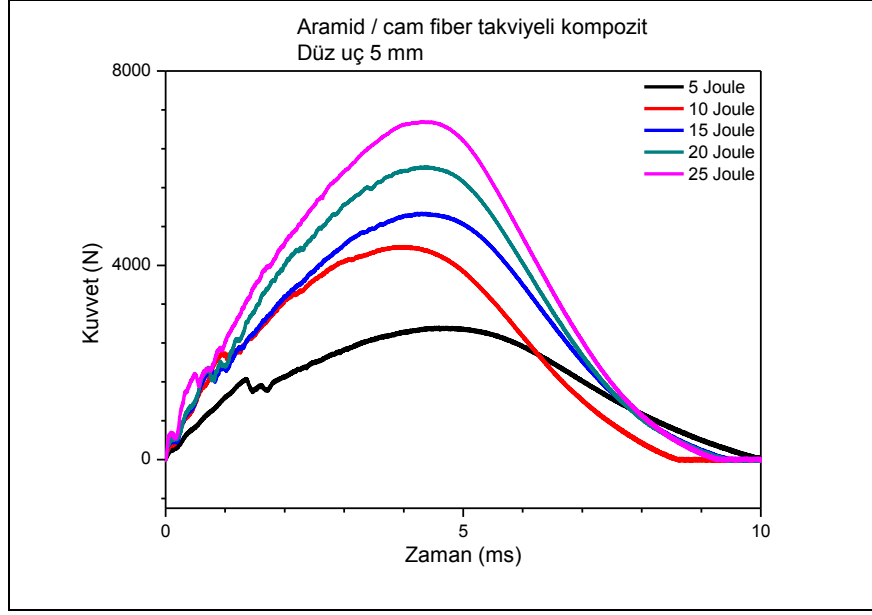


Şekil 6.57: Cam fiber takviyeli kompozite 80 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.57’de 80 J darbe enerjisinde 10 mm çaplı her iki geometrideki darbe ucunda da delinme gerçekleşmiştir. Düz geometrili uçla ulaşılan maksimum kuvvet daha yüksek olmuştur. Şekil 6.58’de aramid / cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı düz darbe ucuyla test uygulanmış, 15 J darbe enerjisinde delinme gerçekleşmiştir. En büyük kuvvet değerine 15 J darbe enerjisinde ulaşılmıştır.

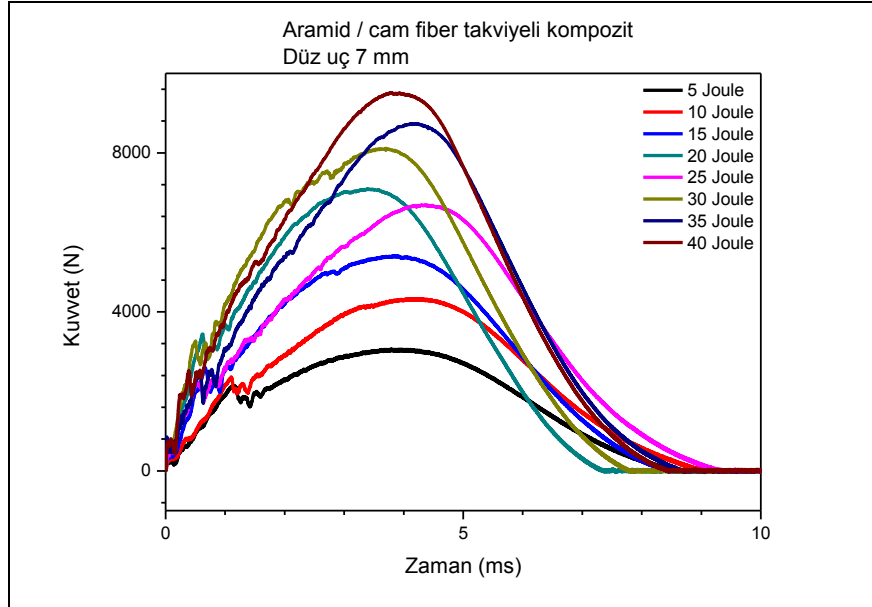


Şekil 6.58: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

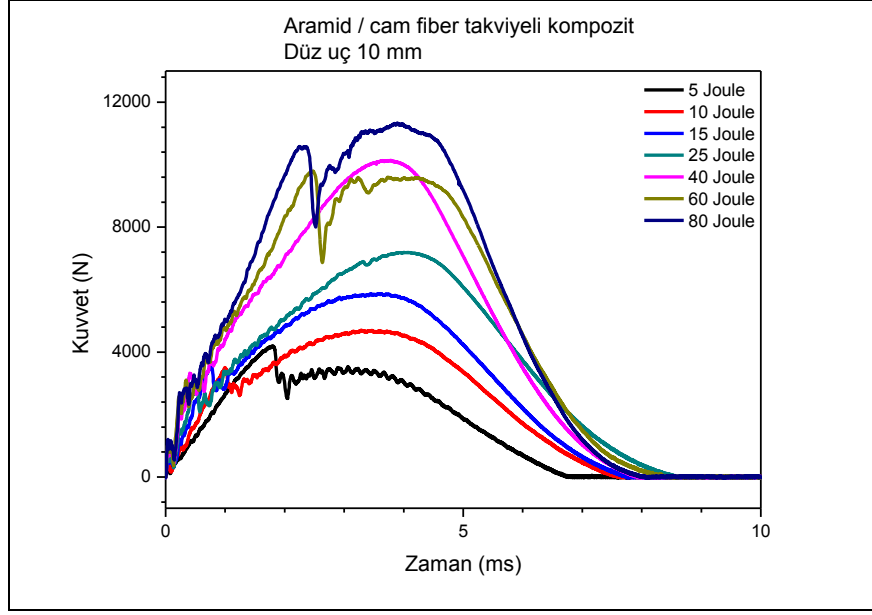


Şekil 6.59: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.59'da aramid / cam fiber takviyeli kompozite düz geometrili 5 mm çaplı darbe ucuyla testler uygulanmış, artan darbe enerjisiyle maksimum kuvvet değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.60'da 7 mm çaplı düz uçla darbe uygulanmış, en uzun temas süresine 25 J darbe enerjisinde ulaşılırken, artan darbe enerjisiyle kuvvet değeri artış göstermiştir.

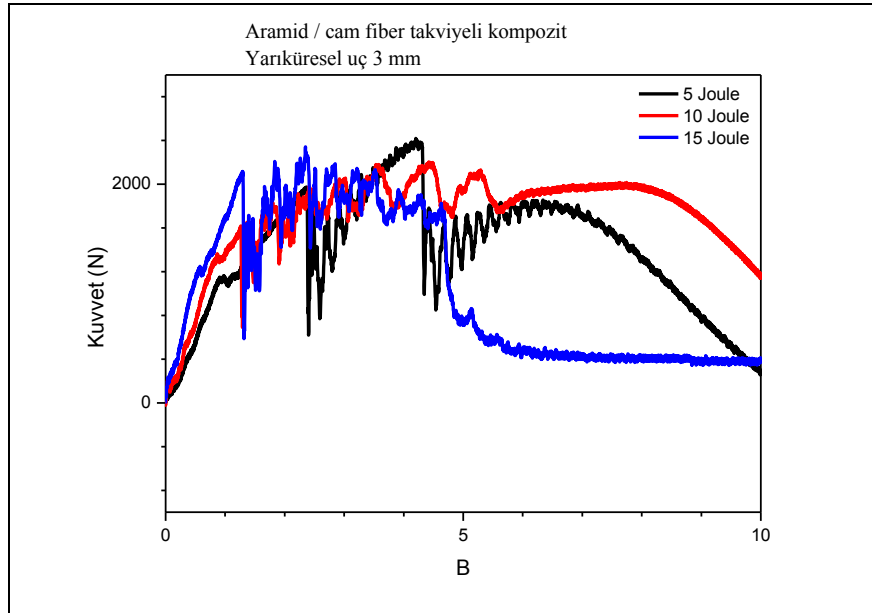


Şekil 6.60: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

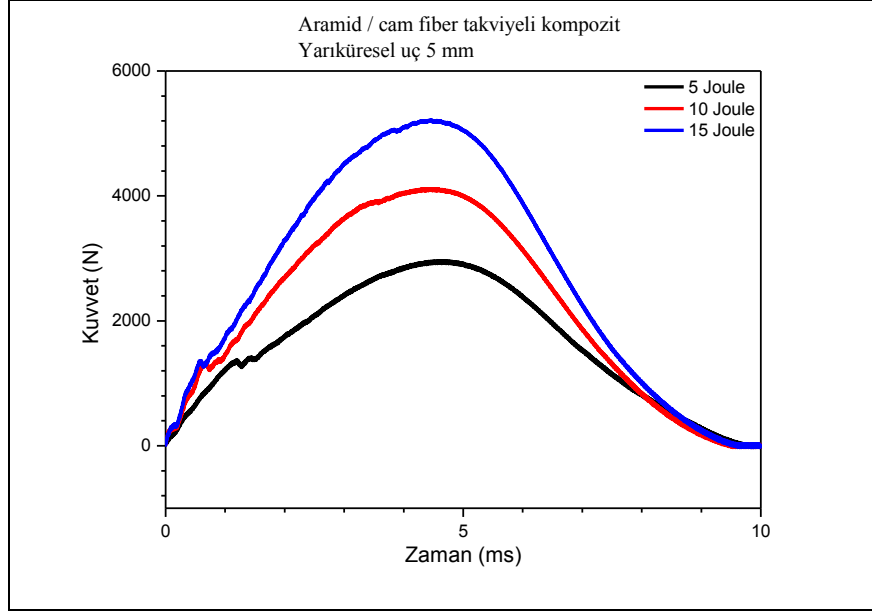


Şekil 6.61: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.61’de 10 mm çaplı düz uçla gerçekleştirilen test sonrası 60 J ve 80 J enerji seviyelerine çıkıldığında malzemede darbeye bağlı nüfuziyet gözlemlenmiştir. En yüksek kuvvet değerine 80 J darbe enerjisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.62’de 3 mm çaplı yarıküresel uçla gerçekleşen testler sonrası 5 J enerjisinde geri gelme gerçekleşirken 10 J enerjide nüfuziyet gerçekleşmiş, 15 J enerjide delinme ortaya çıkmıştır.

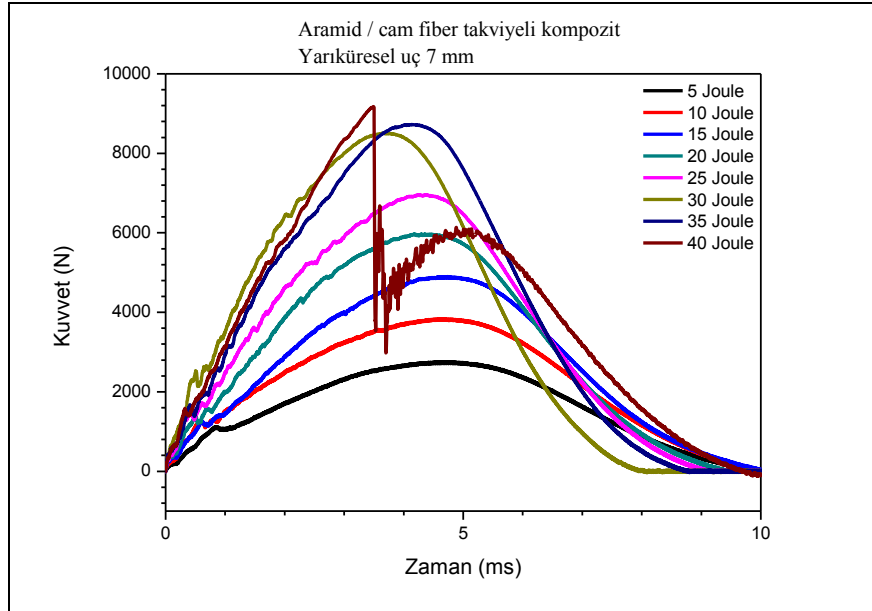


Şekil 6.62: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

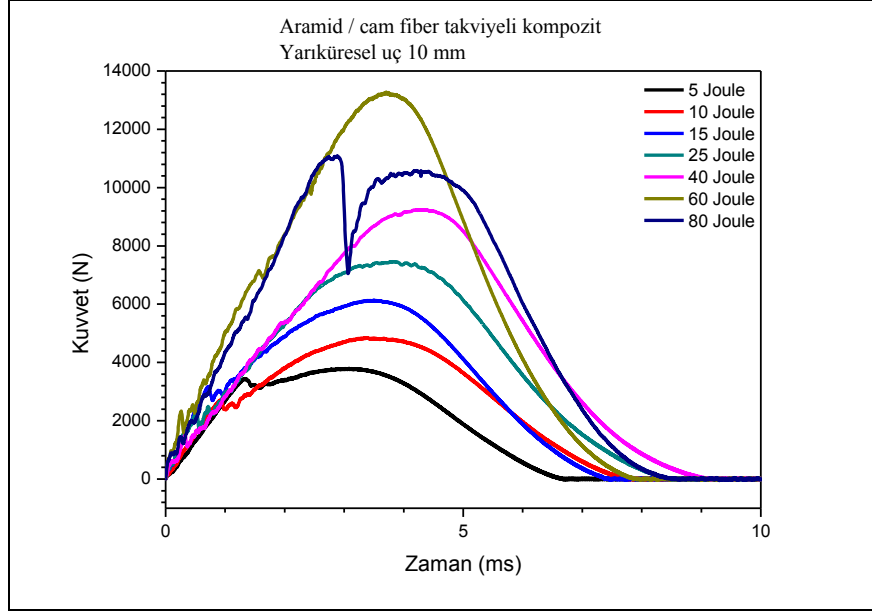


Şekil 6.63: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.63'te yarıküresel 5 mm çaplı uçla gerçekleşen test sonrası her enerji seviyesinde geri gelme gerçekleşmiştir. Artan darbe enerjisi değeriyle kuvvet değeri de artmıştır. Şekil 6.64'te 7 mm çaplı yarıküresel geometrili uçla gerçekleşen testler sonrası malzemeye nüfuziyet 40 J darbe enerjisinde ortaya çıkmıştır.

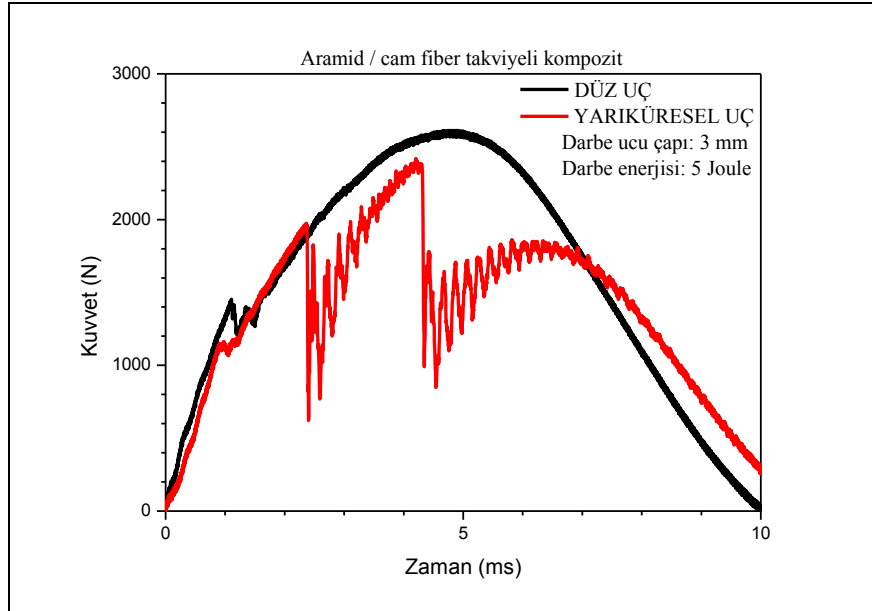


Şekil 6.64: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

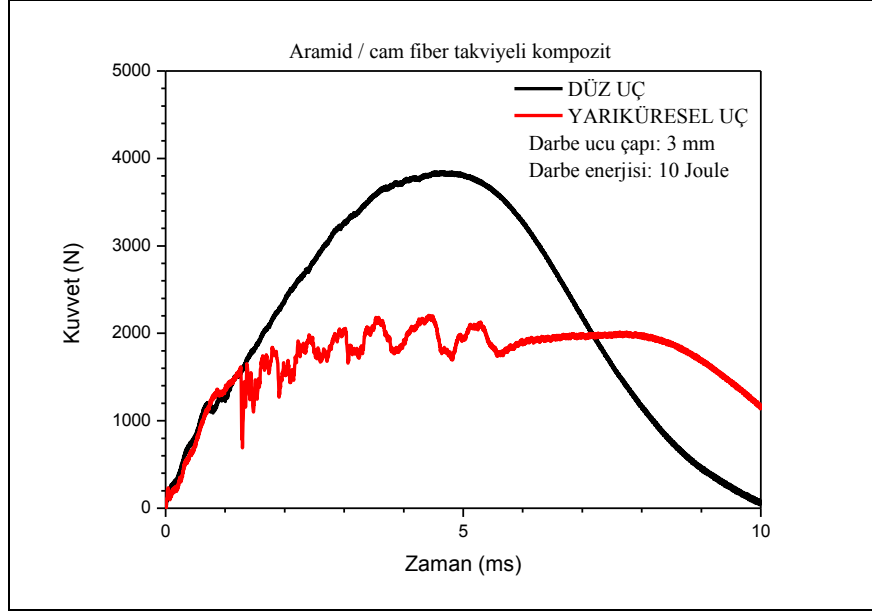


Şekil 6.65: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri kuvvet zaman eğrileri

Şekil 6.65'te 10 mm çaplı yarıküresel uçta malzemeye nüfuziyet 80 J enerji seviyesinde gerçekleşmiştir. En yüksek kuvvet değerine 60 J darbe enerjisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.66'da 5 J darbe enerjisinde düz uçta geri gelme gözlemlenirken yarıküresel uçta nüfuziyet gözlemlenmiştir.

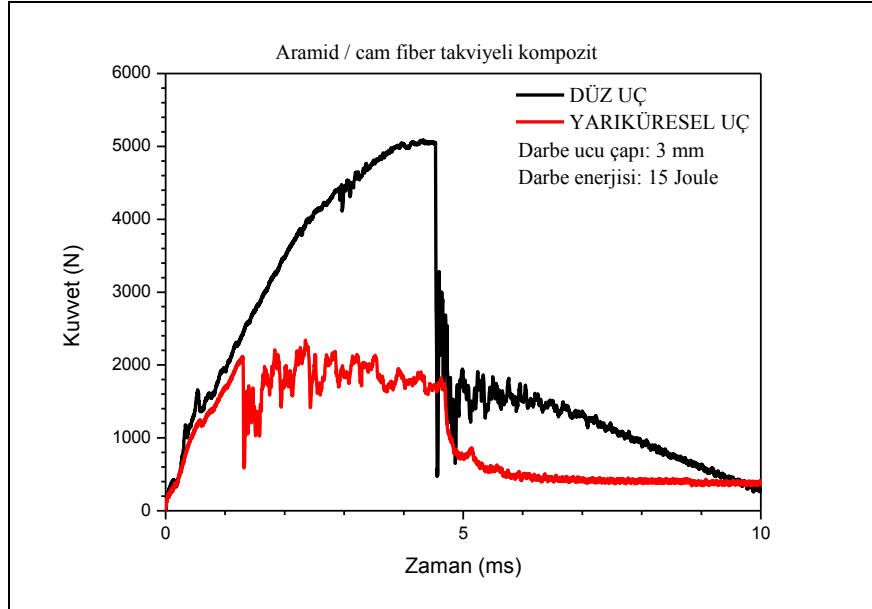


Şekil 6.66: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

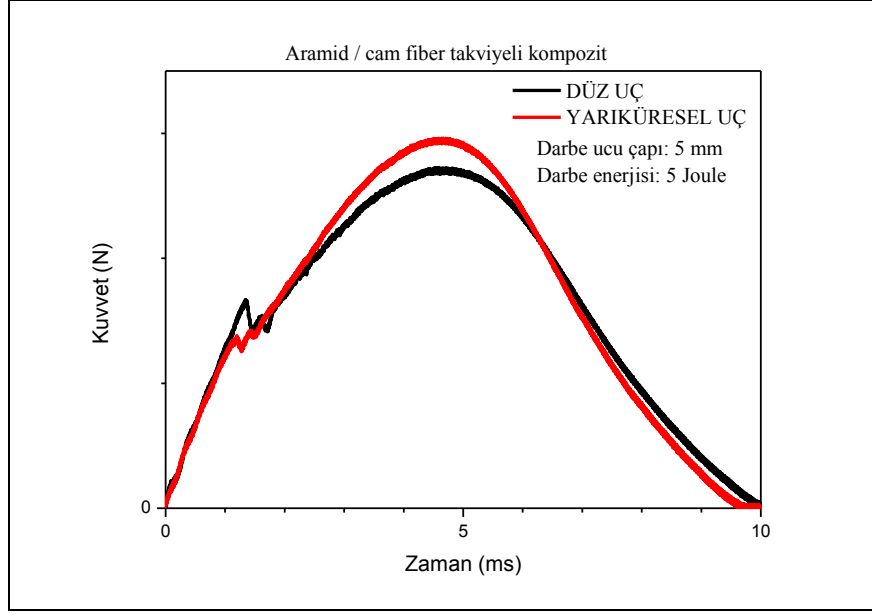


Şekil 6.67: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrilili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.67’de 10 J darbe enerjisinde 3 mm çaplı düz uçta geri gelme gözlemlenirken yarıküresel uçta malzemeye nüfuziyet gözlemlenmiştir. Temas süresi yarıküresel uçta uzun olmuştur. Şekil 6.68’de 15 J enerjide düz uçta malzemeye nüfuziyet gerçekleşirken yarıküresel darbe ucuyla test sonrası malzeme delinmiştir.

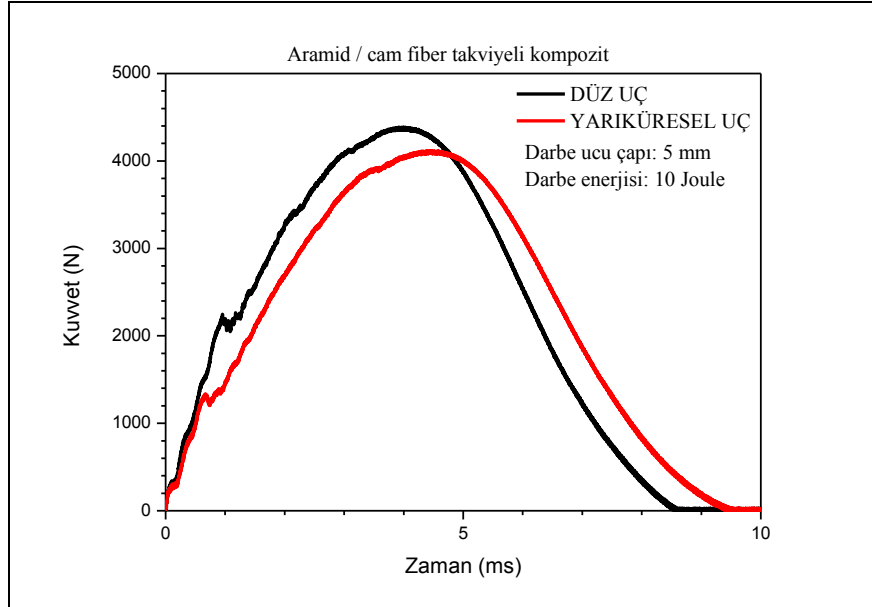


Şekil 6.68: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 3 mm çapında düz ve yarıküresel geometrilili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

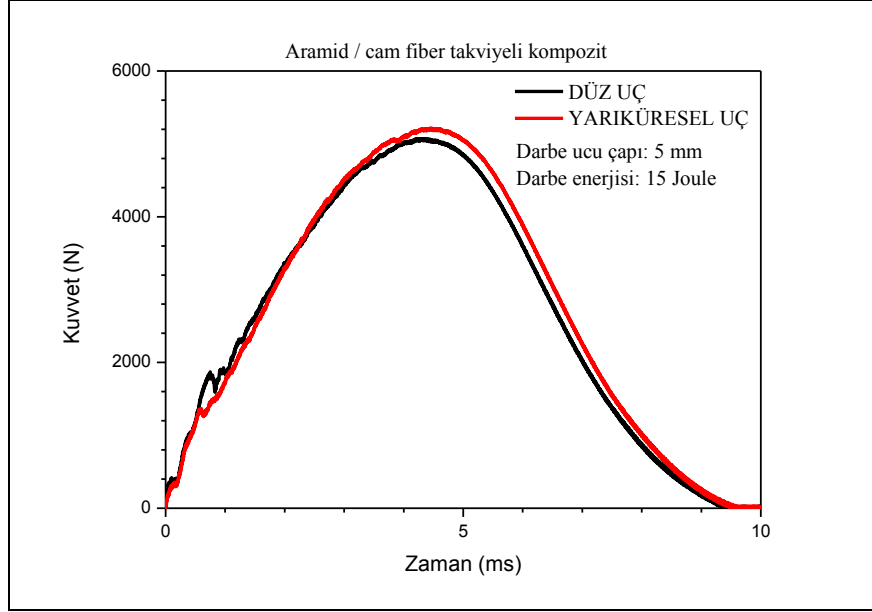


Şekil 6.69: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.69'da 5 J darbe enerjisinde 5 mm çaplı yarıküresel geometrili uç düz uçtan daha yüksek kuvvet değerine ulaşmıştır. Aynı uç çapı için darbe enerjisi Şekil 6.70'de olduğu gibi 10 J seviyesine çıktığında düz uç geometrisiyle ulaşılan maksimum kuvvet yarıküresel geometrisininkinden yüksek olmaktadır.

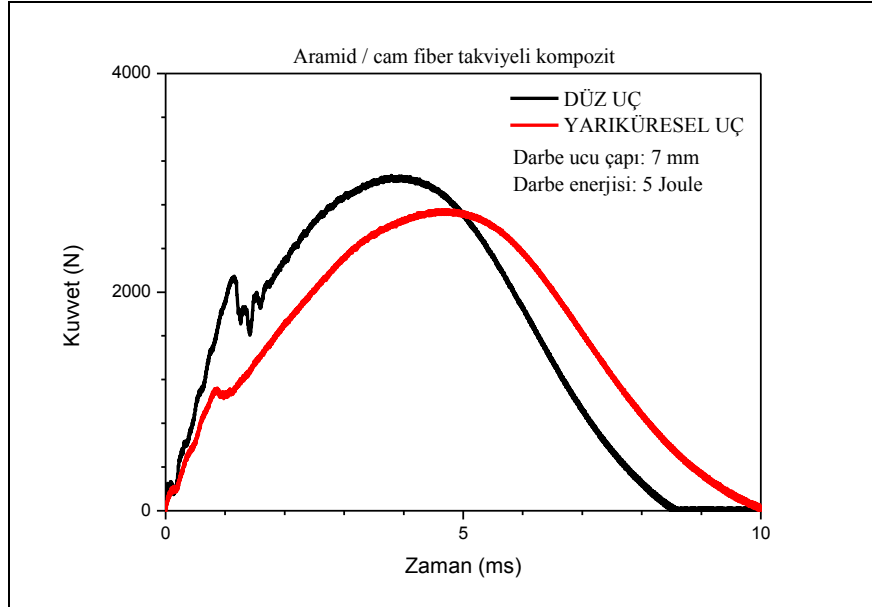


Şekil 6.70: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

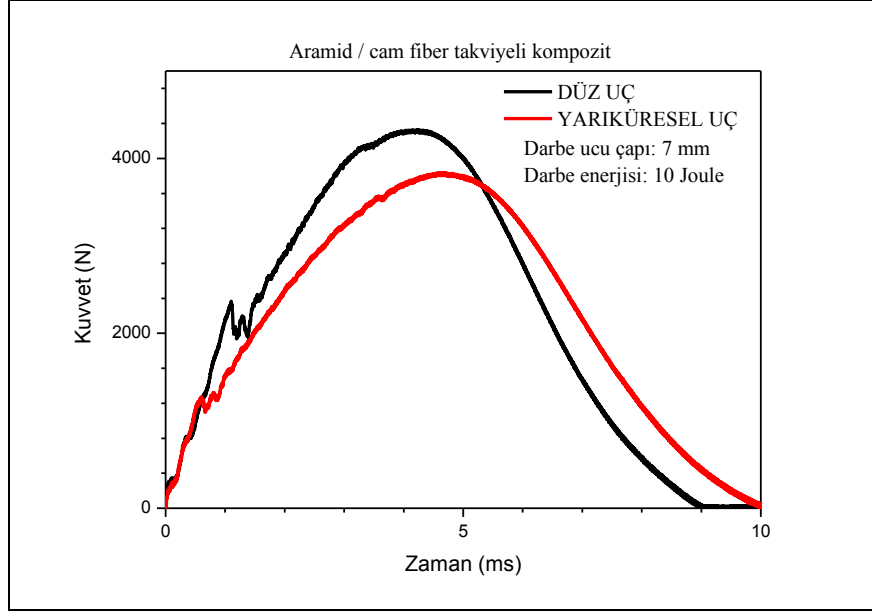


Şekil 6.71: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 5 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.71’de 5 mm çaplı uçlarda 15 J darbe enerjisinde her iki geometrisinde de benzer özellikte eğriler ortaya çıkmıştır. Şekil 6.72’de 5 J darbe enerjisinde 7 mm çaplı darbe uçlarında yarıküresel geometride düz geometriye göre daha düşük kuvvet değerlerine daha uzun temas sürelerinde ulaşılmıştır.

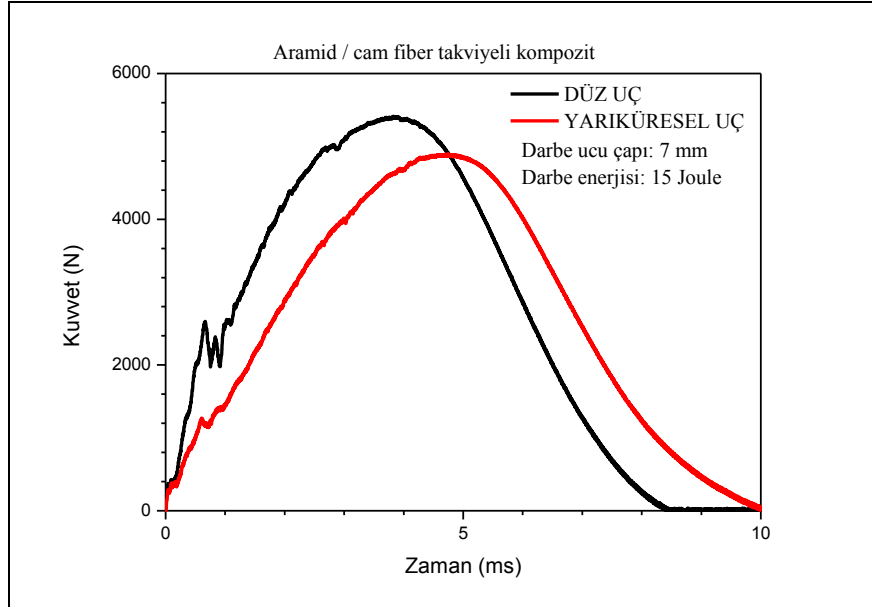


Şekil 6.72: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

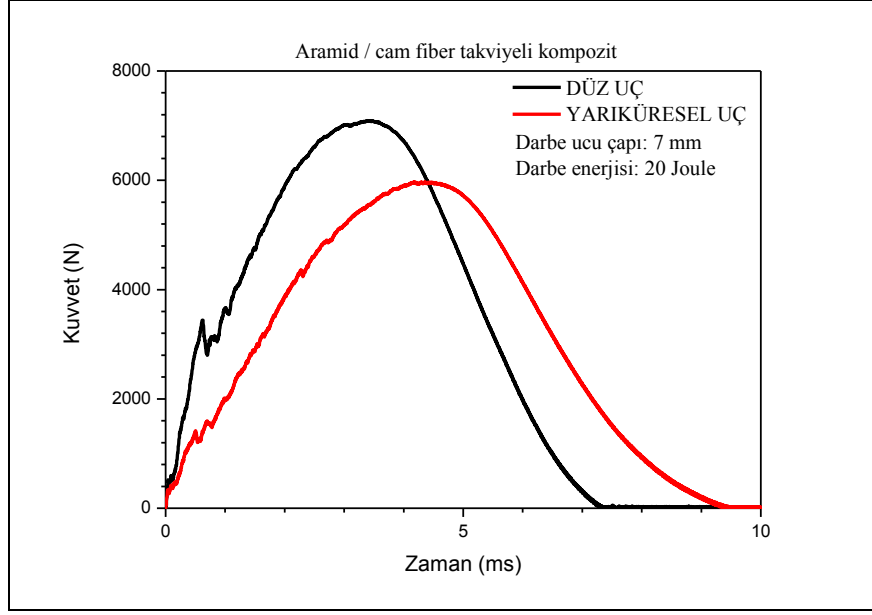


Şekil 6.73: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.73 ve Şekil 6.74'te artan darbe enerjisi miktarıyla düz ve yarıküresel geometrili uçlarla darbe sonrası ortaya çıkan kuvvet eğrilerinin arasındaki fark artmıştır. Yarıküresel geometrili darbe ucu daha uzun temas süresine sahip olmuştur.

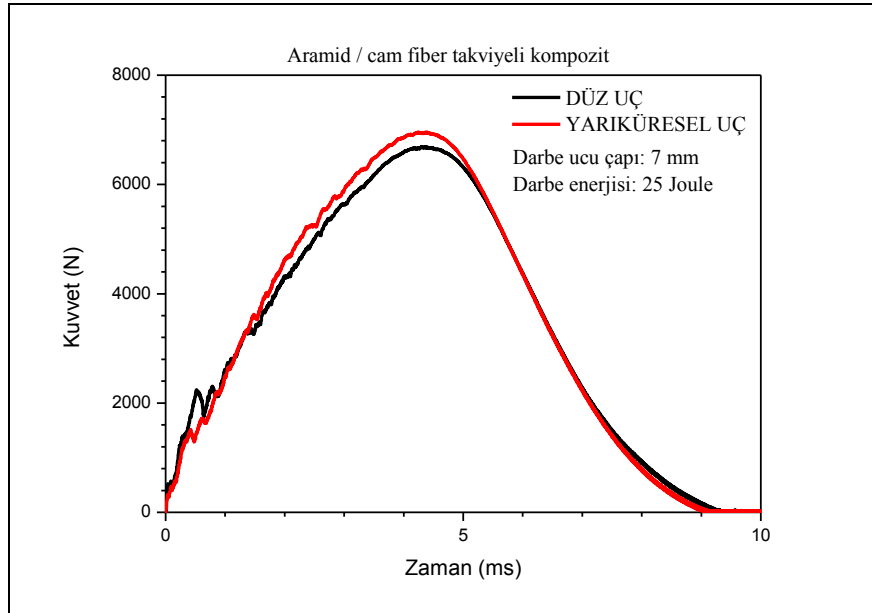


Şekil 6.74: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

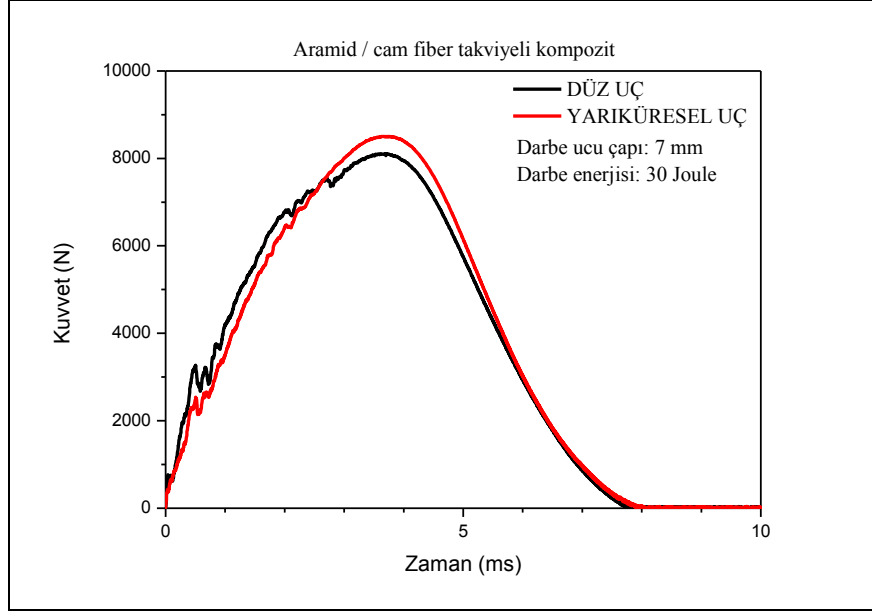


Şekil 6.75: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 20 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.75'te 20 J darbe enerjisinde düz ve yarıküresel uç geometrileri kuvvet eğrileri arasında fark net olarak gözlemlenebilirken, darbe enerjisi 25 J seviyesine çıktığında eğriler benzer özellikler göstermeye başlamıştır. Şekil 6.76'da 25 J darbe enerjisinde 7 mm çaplı düz ve yarıküresel uçlara ait kuvvet zaman eğrileri benzer özellikler göstermiştir.

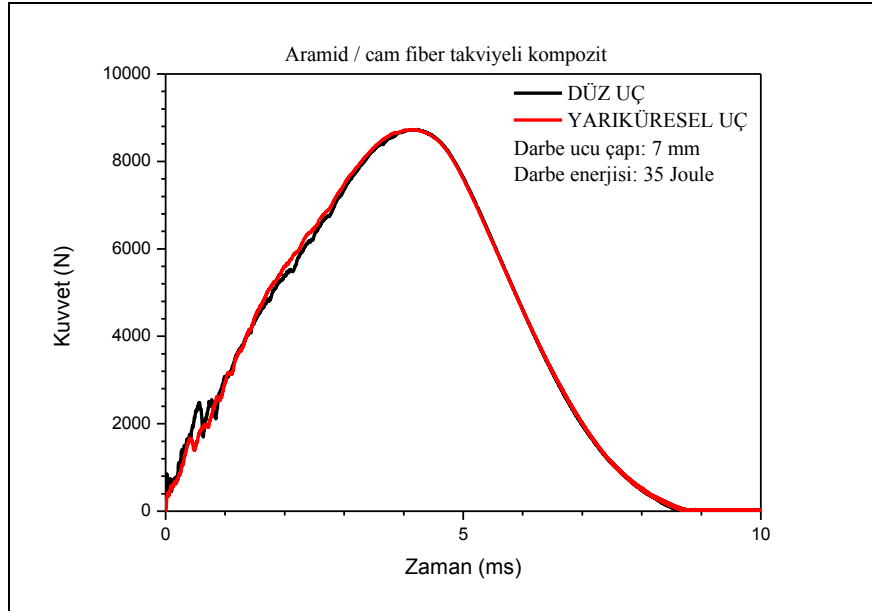


Şekil 6.76: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

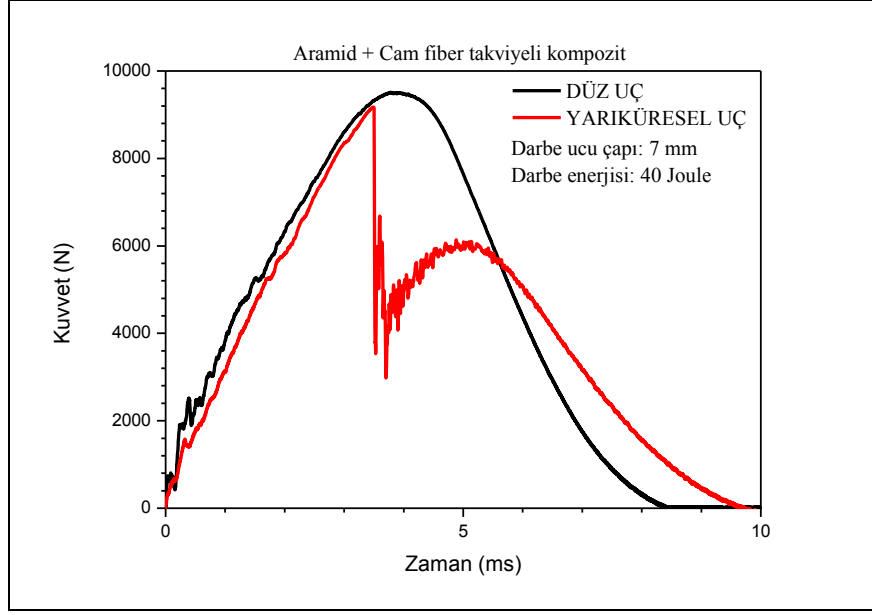


Şekil 6.77: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 30 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.77 ve Şekil 6.78’de 30 ve 35 J darbe enerjileriyle gerçekleşen testler sonrasında elde edilen kuvvet zaman eğrilerinde düz ve yarıküresel geometrinin benzer özellikte olduğu gözlemlenmiştir.

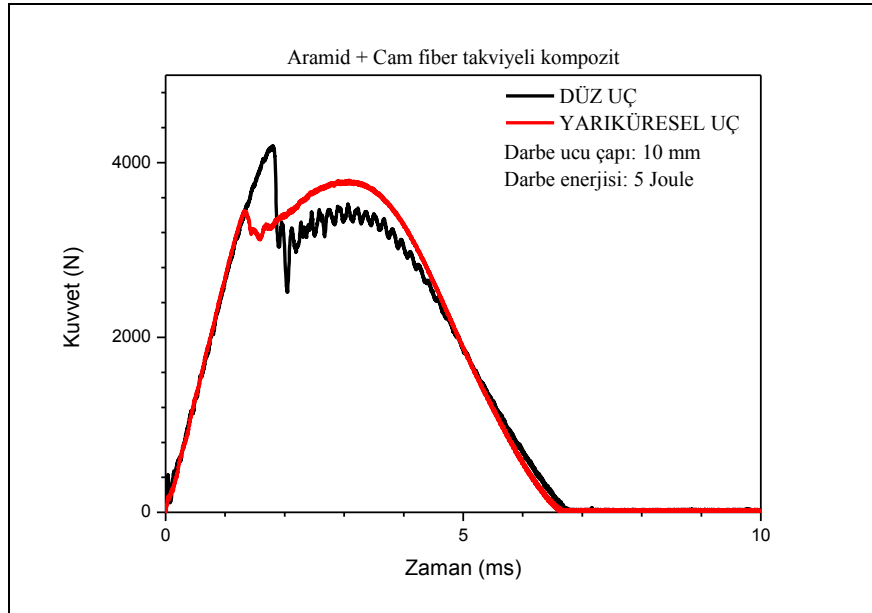


Şekil 6.78: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 35 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

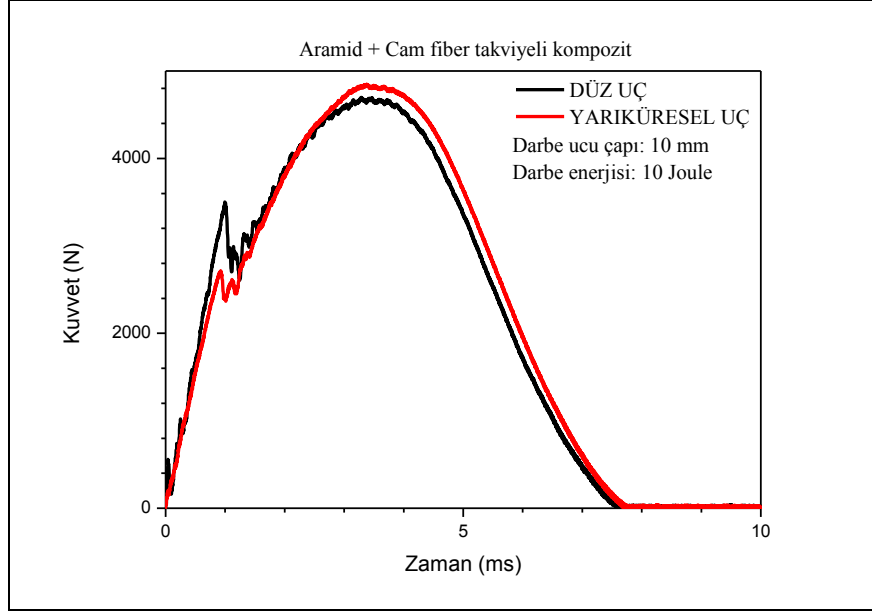


Şekil 6.79: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 7 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.79'da 7 mm çaplı uçlarda 40 J darbe enerjisinde yarıküresel uçta ortaya çıkan hasar kompozitin kuvvet taşıma kapasitesinde ani bir düşüşe sebep olmuştur. Bununla birlikte temas süresi yarıküresel uçta düz uca göre daha uzun olmuştur. Şekil 6.80'de 10 mm çaplı uçlarla 5 J darbe enerjisiyle gerçekleştirilen testler sonrası düz uçta çıkılan maksimum kuvvet değeri daha yüksek olmuştur.

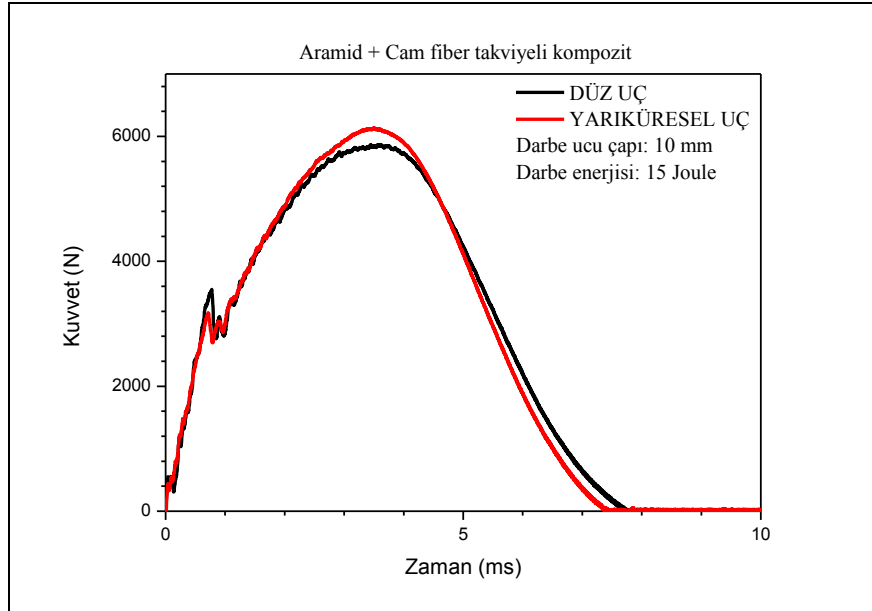


Şekil 6.80: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 5 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

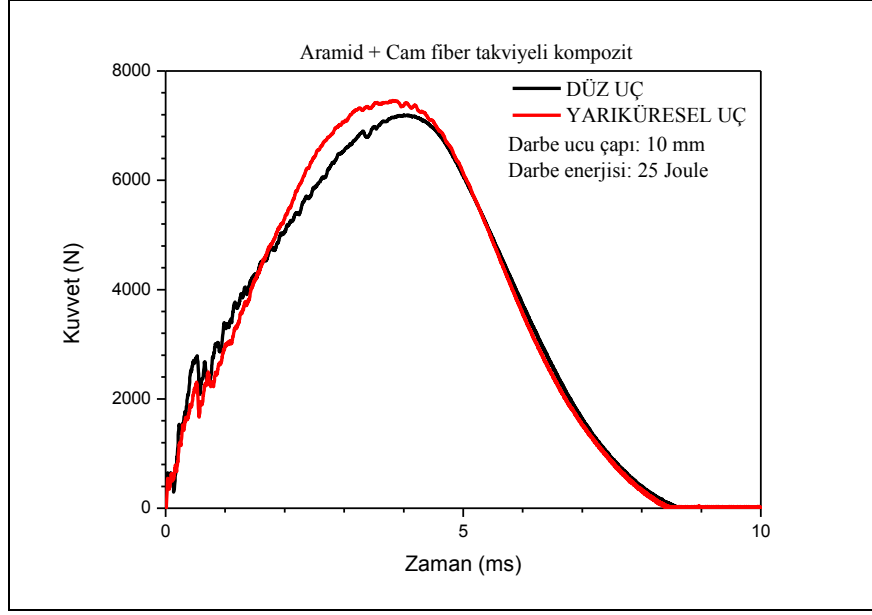


Şekil 6.81: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 10 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.81 ve Şekil 6.82’de 10 ve 15 J darbe enerjileriyle gerçekleşen testler sonrası ortaya çıkan kuvvet zaman eğrileri benzer özelliktedir. Bununla birlikte yarıküresel uçla ulaşılan maksimum kuvvet değeri düz uçla ulaşılandan fazla olmuştur.

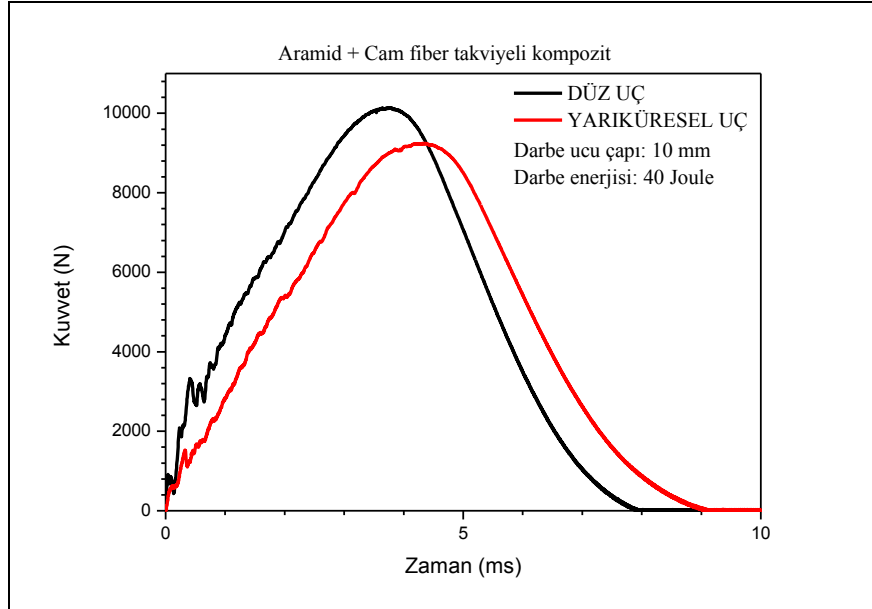


Şekil 6.82: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 15 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

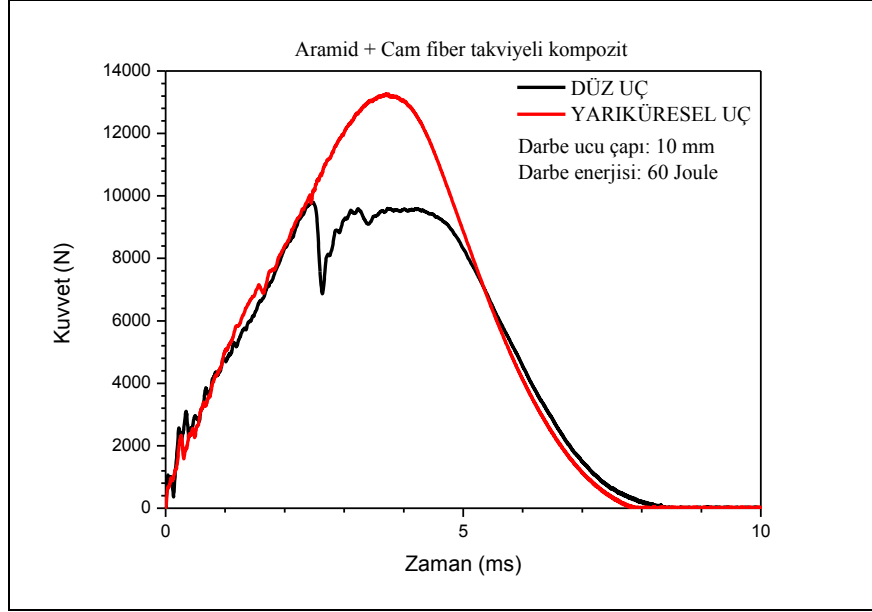


Şekil 6.83: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 25 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.83'te düz ve yarıküresel geometrilere ait kuvvet zaman eğrileri benzer özellikte iken, 40 J darbe enerjisinde (Şekil 6.84) yarıküresel uçta ulaşılan maksimum kuvvet değeri düz uca göre daha düşük seviyede kalmıştır. Yarıküresel ucun kompozite temas süresi daha uzun olmuştur.

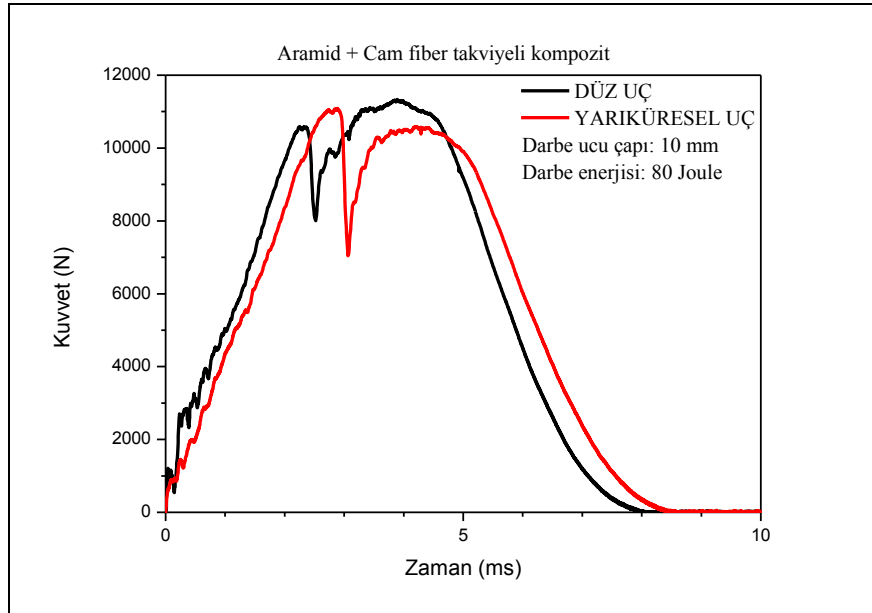


Şekil 6.84: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 40 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.85: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 60 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

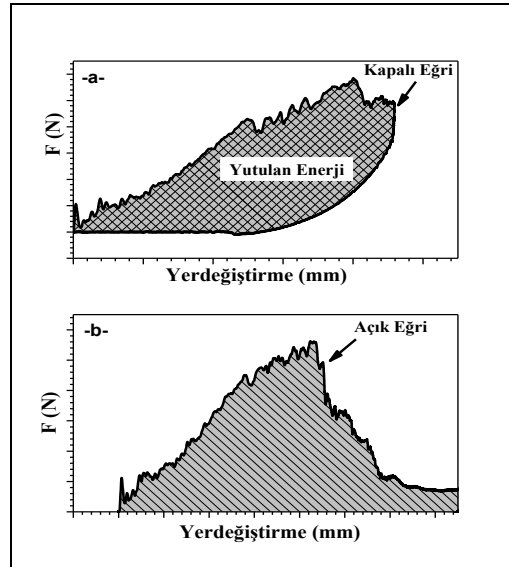
Şekil 6.85'te 10 mm çaplı uçla 60 J darbe enerjisinde gerçekleşen testler sonrası yarıküresel uç geometrisinde ulaşılan maksimum kuvvet düz uç geometrisinden çok daha yüksek olmuştur. Şekil 6.86'da 80 J darbe enerjisinde yarıküresel uç geometrisinde ortaya çıkan kuvvet düşüşü düz uç geometrisinden daha fazla olmuştur. Temas süresi yarıküresel uçta daha uzun olmuştur.



Şekil 6.86: Aramid / cam fiber takviyeli kompozite 80 J darbe enerjisiyle 10 mm çapında düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla uygulanan düşük hızlı darbe testi kuvvet zaman eğrilerinin karşılaştırılması

6.3.Kuvvet Yer Değiştirme Grafikleri

Düşük hızlı darbe testleri sonrası darbeye maruz bırakılan malzemenin dayanımı hakkında bilgi sahibi olmak için değerlendirilmesi gereken en önemli grafiklerden bir tanesi kuvvet yer değiştirme değişimini veren grafiklerdir. Kuvvet yer değiştirme eğrileri düşük hızlı darbe testleri sonrası malzemelerin yuttukları enerji miktarını belirlemede kritik bir öneme sahiptirler (Şekil 6.87). Kuvvet yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alan malzeme tarafından yutulan enerji miktarını verir. Kuvvet yerdeğiştirme eğrisinin kapalı olması halinde (Şekil 6.87.a) eğrinin altında kalan alan, darbe ucundan malzeme yüzeyine aktarılan ve bunu takiben malzeme yüzeyinden de tekrar darbe ucuna aktarılacak darbe ucunun geri sıçramasına sebep olan hasar enerjisini verir. Kuvvet yerdeğiştirme eğrisinin açık olması halinde ise yerdeğiştirme bir noktadan sonra yatay seyirde devam ederek darbe süreci boyunca malzemenin emdiği enerji miktarını gösterir.

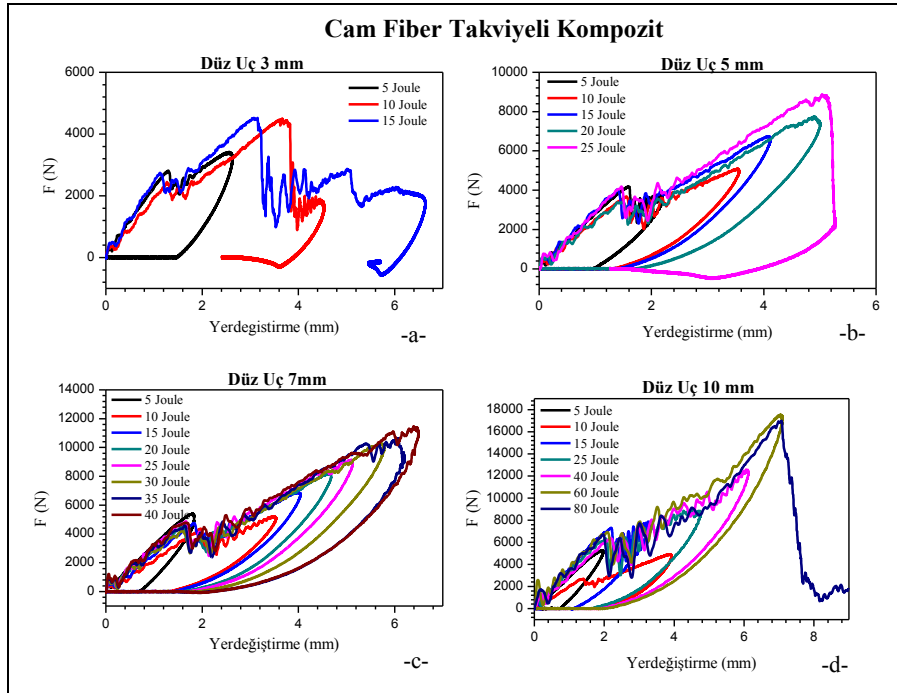


Şekil 6.87: Düşük hızlı darbe sonrası ortaya çıkan kuvvet yer değiştirme eğrileri

Doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen deneylerde iki farklı geometride (düz ve yarıküresel) uçlar için 4 farklı çapta (3, 5, 7 ve 10 mm) darbe ucuyla gerçekleştirilen darbe testleri sonucu elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri bu bölümde verilmiştir. Cam fiber takviyeli gerçekleştirilen darbe testlerinde düz geometrili darbe ucunda en düşük çap olan 3 mm sadece 5 J darbe enerjisinde kapalı eğri elde edilmiş, darbe enerjisi büyüdükçe eğriler açık hale gelmiştir. Düz geometrili diğer uç çaplarında eğriler kapalı karakter gösterirken sadece 10 mm 80 J enerji seviyesinde açık eğri gözlemlenmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit için yarıküresel darbe

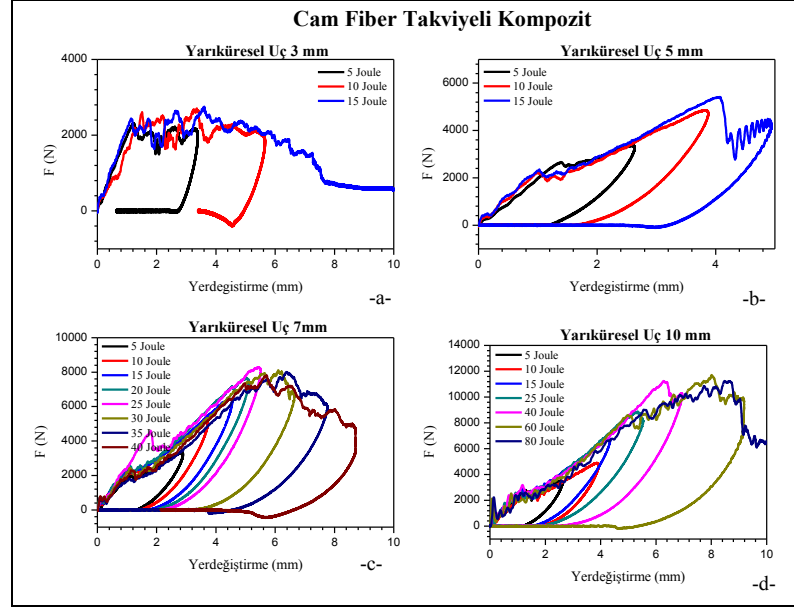
uçlarına ait grafikler şekil 6.89'da verilmiş, bu geometrideki uçlarda düz uçlara göre yer değiştirme miktarının daha yüksek değerlere çıktığı görülmüştür.

Şekil 6.94 ve şekil 6.95'te ise aramid / cam fiber takviyeli hibrit kompozitin düz ve yarıküresel darbe uçlarıyla testleri sonrası ortaya çıkan kuvvet yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Bu kompozit yapısında açık eğrilere sadece cam fiber takviyeli kompozitte olduğu gibi rastlanmamış; aramid takviyesinin malzemenin darbe enerjisini emme kabiliyetine artı katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.



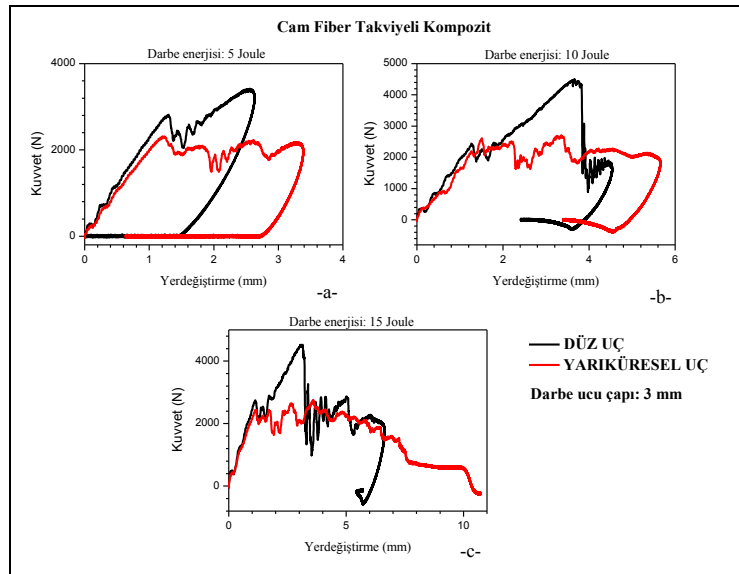
Şekil 6.88: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı düz darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.88'de cam fiber takviyeli kompozite düz geometrili farklı darbe uçlarıyla farklı enerjilerde gerçekleşen darbe testleri sonrası ortaya çıkan kuvvet yerdeğiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 6.88 (a)'da 3 mm çaplı düz darbe ucuyla gerçekleştirilen testler sonrası 5 J darbe enerjisinde kompozit geri toparlanmaya giderek darbe yükünü kaldırabilirken, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde kuvvet yerdeğiştirme eğrisi açık eğri haline gelmiştir. Darbe ucu çapı 5 mm olduğunda malzemenin çıkabildiği maksimum enerji 25 J, 7 mm olduğunda ise 40 J olarak gözlemlenmiştir. Darbe ucu çapı 10 mm'ye çıktığında uygulanan darbe enerjisi 80 J olmuştur. 80 J darbe enerjisinde kuvvet yerdeğiştirme eğrisi açık eğri haline gelmiştir.

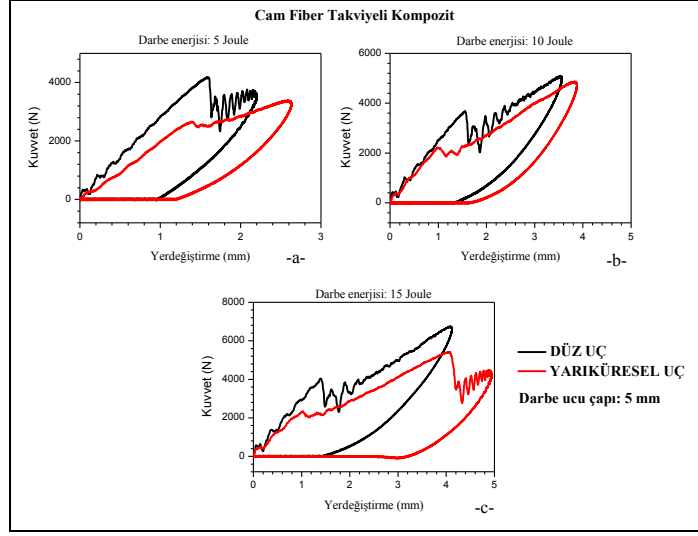


Şekil 6.89: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.89’da cam fiber takviyeli kompozite farklı çaplı yarıküresel uçlarla gerçekleştirilen testler sonrası elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 6.89 (a)’da en küçük çap olan 3 mm çaplı uça bütün kuvvet eğrileri açık eğrilerdir. Uç çapı büyüdükçe uygulanan darbe enerjilerine bağlı olarak ortaya çıkan kuvvet yer değiştirme eğrileri kapalı eğriler ortaya çıkarak malzemenin darbe yükü kaldırıldığında normal eksenine geri dönerek yükü karşılayabildiği gözlemlenmiştir. Yarıküresel 10 mm çaplı uça 80 J darbe enerjisine ulaşıldığında kuvvet yer değiştirme eğrisi açık eğri haline gelmiştir.

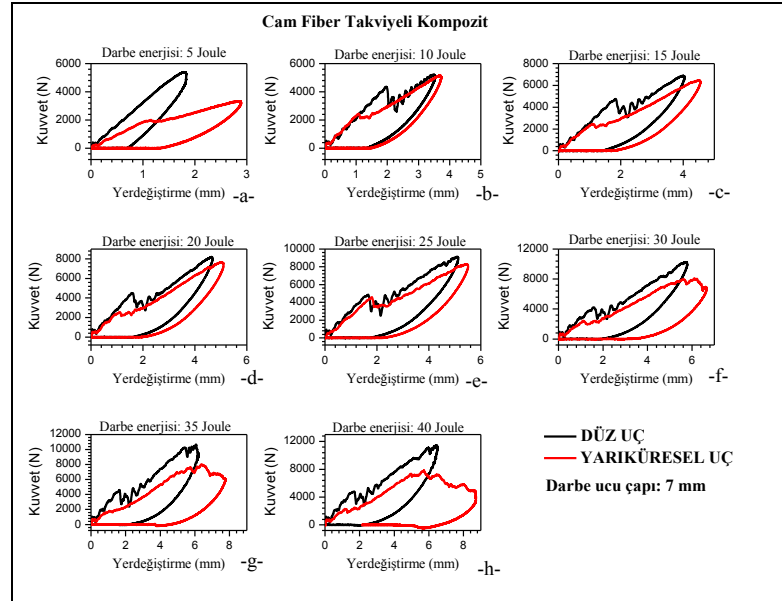


Şekil 6.90: Cam fiber takviyeli kompozitin 3 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uça elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J

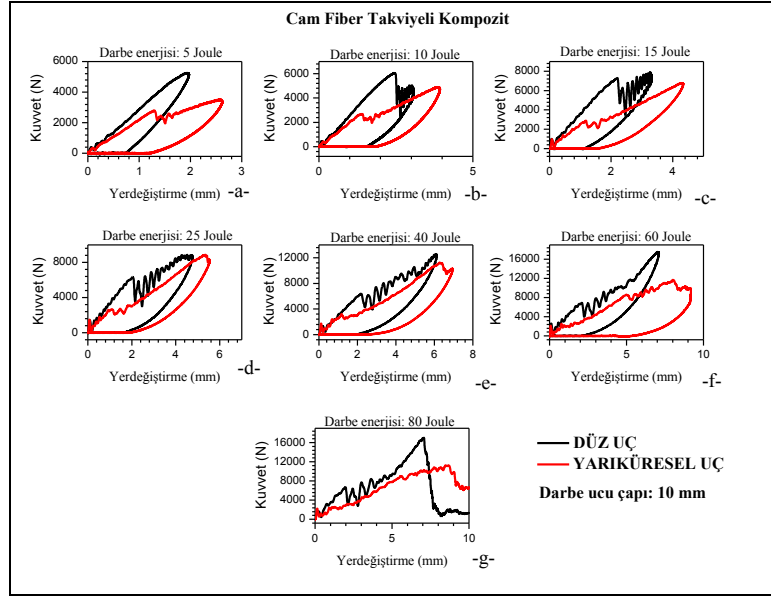


Şekil 6.91: Cam fiber takviyeli kompozitin 5 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J

Şekil 6.91’de verilen 5 mm çaplı darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan kuvvet yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde her enerji seviyesinde eğrilerin kapalı özellik göstererek darbe malzeme üzerinden kaldırıldığında malzemenin geri gelerek enerjiyi sönümleyebildiği gözlemlenmiştir. Yarıküresel uç geometrisinde yerdeğiştirme miktarı düz uca göre daha fazla olurken maksimum kuvvet değeri düz uç geometrisinde daha büyük olmuştur. Şekil 6.92’de 7 mm çaplı uçlarla gerçekleştirilen testler sonrası maksimum yerdeğiştirme yarıküresel uç geometrisinde 40 J darbe enerjisinde elde edilmiştir.

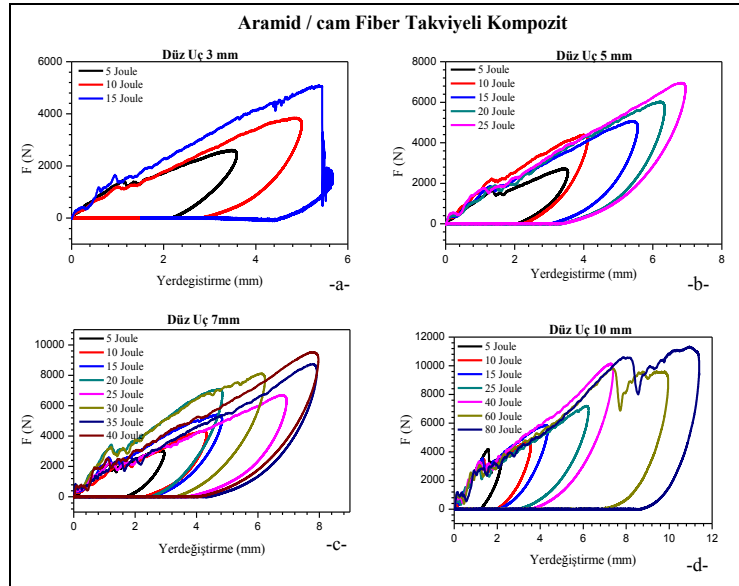


Şekil 6.92: Cam fiber takviyeli kompozitin 7 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J

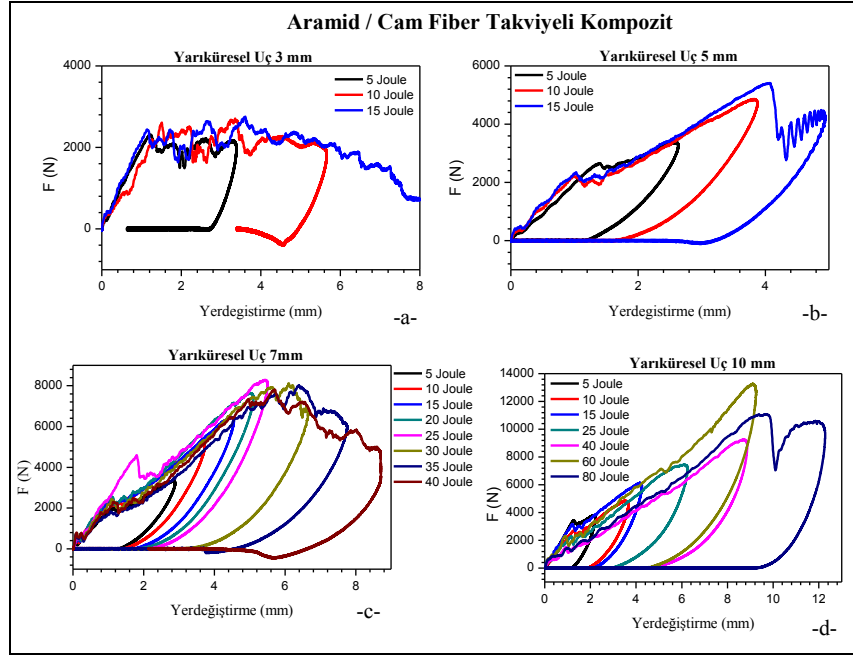


Şekil 6.93: Cam fiber takviyeli kompozitin 10 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J

Şekil 6.93'te 10 mm çaplı darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testlerin grafikleri verilmiş, maksimum yer değiştirme değerine yarıküresel uçta 60 J enerjide ulaşılırken 80 J darbe enerjisinde her iki uç için kuvvet yer değiştirme eğrileri açık hale gelmiştir. Şekil 6.94'te aramid / cam fiber takviyeli kompozite farklı çaplı düz uçlarla gerçekleştirilen testler sonrası kuvvet yer değiştirme eğrileri verilmiş, maksimum yer değiştirme ve maksimum kuvvet değerlerine 10 mm çapta 80 J enerjide ulaşılmıştır.

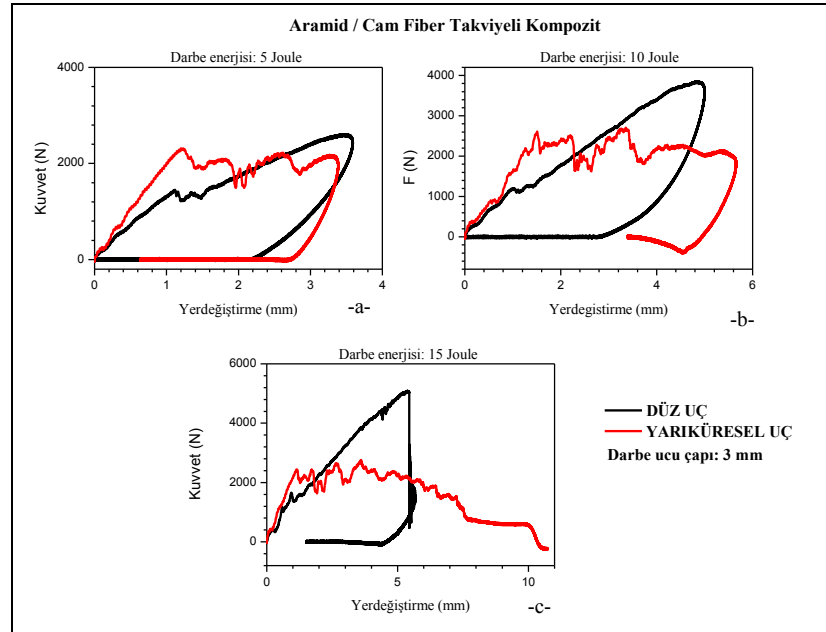


Şekil 6.94: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı düz darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

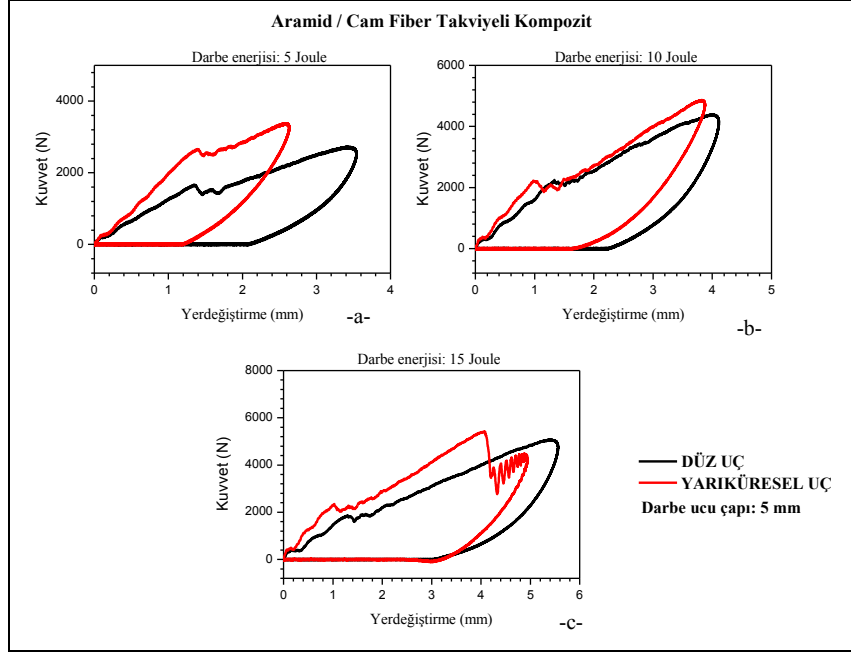


Şekil 6.95: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarıyla elde edilen kuvvet yer değıştirme grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.95'te aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerle gerçekleştirilen testlerde yarıküresel uç geometrisinde maksimum kuvvet değeri 10 mm çaplı uçta 60 J darbe enerjisinde ulaşılırken, maksimum yerdeğıştirme miktarına aynı uçta 80 J darbe enerjisinde ulaşılmıştır. Şekil 6.96'da 3 mm çaplı darbe uçlarında tüm enerjilerde yarıküresel uçlarda açık eğriler ortaya çıkarken düz uç geometrisinde sadece 15 J enerjide açık eğri gözlemlenmiştir.

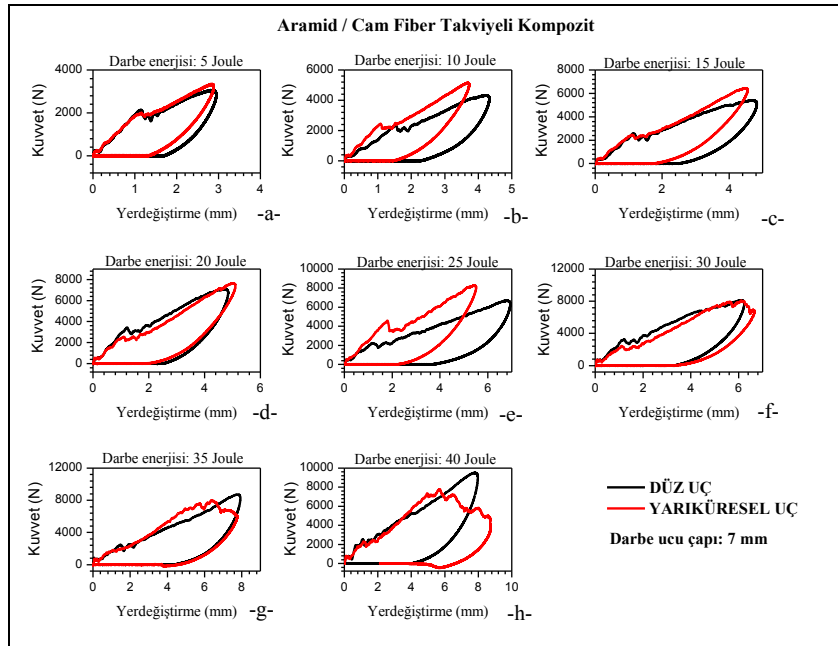


Şekil 6.96: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 3 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değıştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J

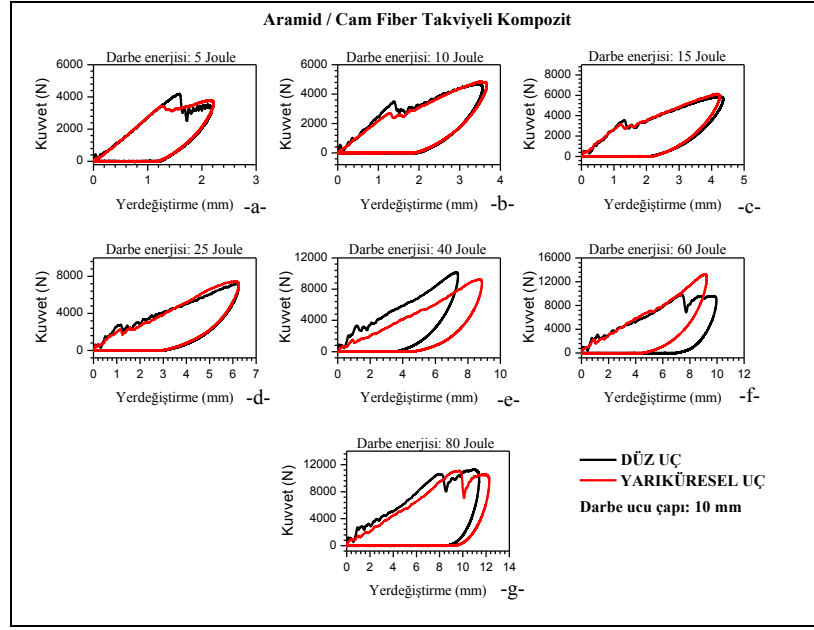


Şekil 6.97: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 5 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J

Şekil 6.97’de 5 mm çaplı darbe ucundaki testlerde maksimum kuvvet değeri her enerji seviyesinde yarıküresel uçta büyük iken, maksimum yerdeğiştirme değeri düz uç geometrisinde daha büyük olmuştur. Şekil 6.98’de 7 mm çaplı uçta maksimum yerdeğiştirme yarıküresel geometride 40 J’da ortaya çıkmış, maksimum kuvvet değerine düz geometride 40 J’da ulaşılmıştır.

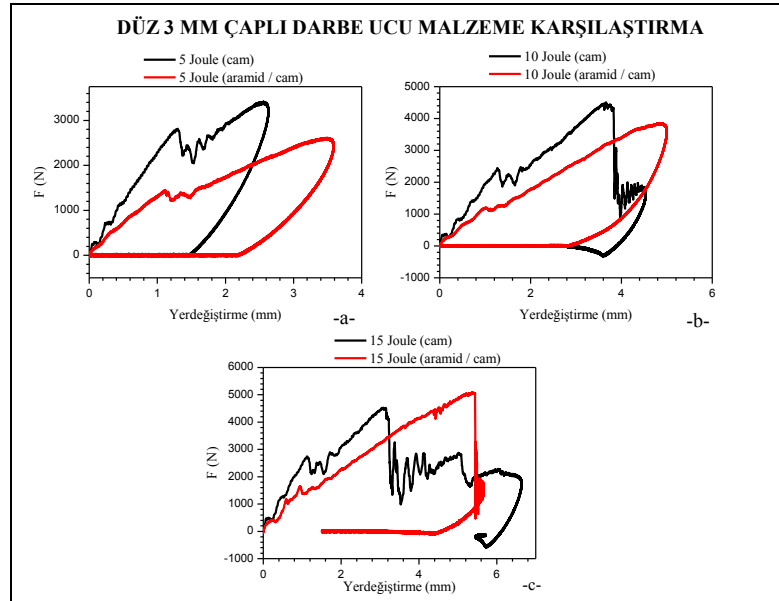


Şekil 6.98: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 7 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J

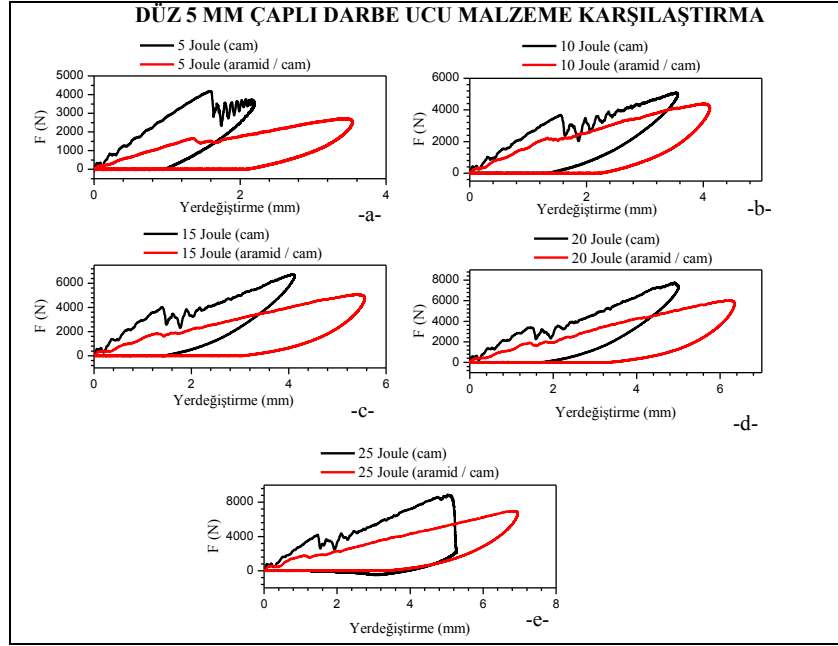


Şekil 6.99: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin 10 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili uçla elde edilen karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J

Şekil 6.99'da 10 mm darbe ucu çapında en yüksek yerdeğiştirme değerine 80 J darbe enerjisinde yarıküresel uçta ulaşılmış, en yüksek kuvvet değerleri de aynı enerji değerinde her iki uç geometrisinde de ulaşılmıştır. Her iki geometrinin eğrileri de kapalı olmuştur. Şekil 6.100'de 3 mm çaplı düz darbe ucunda aramid / cam fiber takviyeli kompozit daha fazla yerdeğiştirme yeteneğine sahipken, sadece 15 j darbe enerjisinde cam fiber takviyeli kompozitin yerdeğiştirmesi fazla olmuştur.

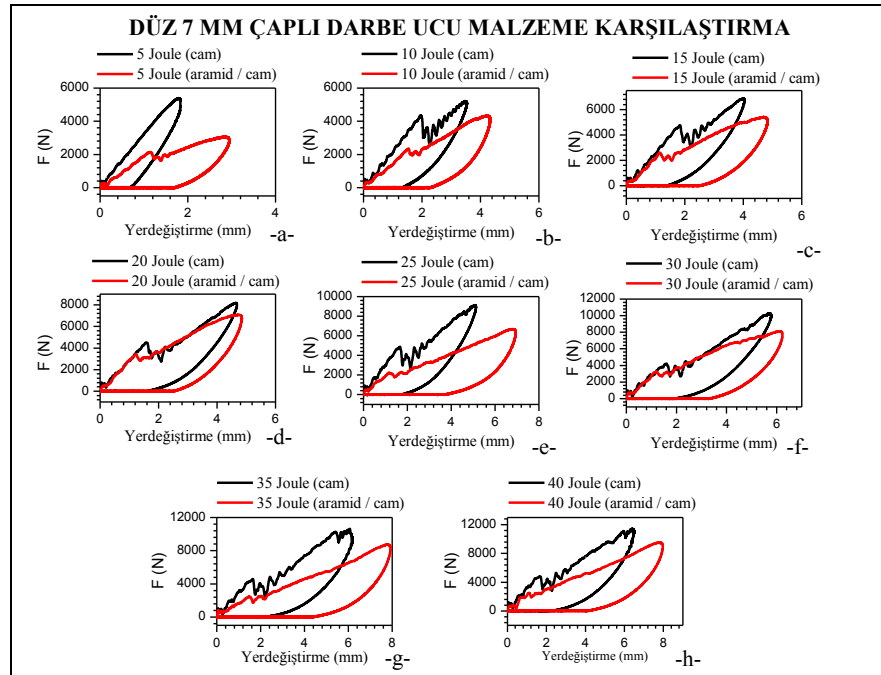


Şekil 6.100: 3 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J

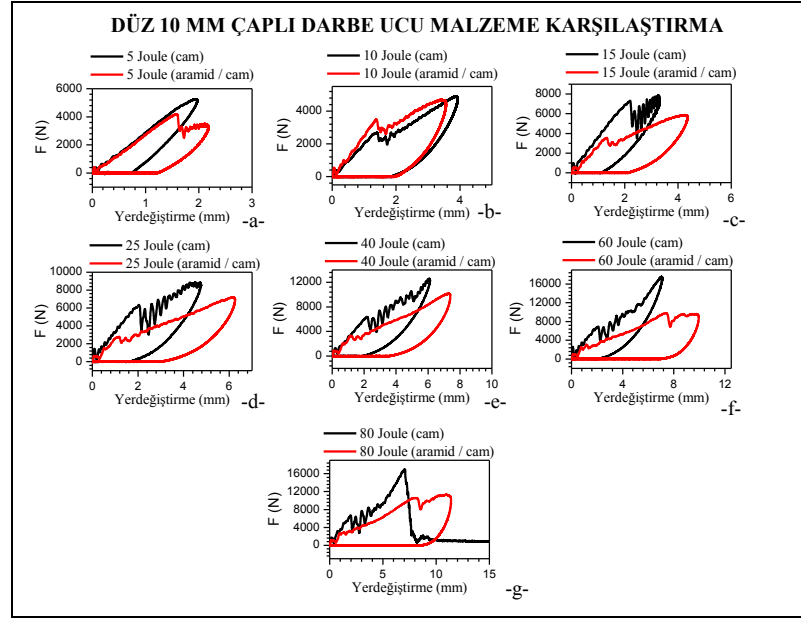


Şekil 6.101: 5 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J

Şekil 6.101’de 5 mm çaplı düz darbe ucunda her enerji seviyesinde aramid / cam fiber takviyeli kompozit daha büyük yerdeğiştirme miktarına sahipken, cam fiber takviyeli kompozit daha yüksek kuvvet değerine sahiptir. Şekil 6.102’de, düz 5 mm çaplı uçta ortaya çıkan sonuçların 7 mm uç için de aynı olduğu görülmektedir.

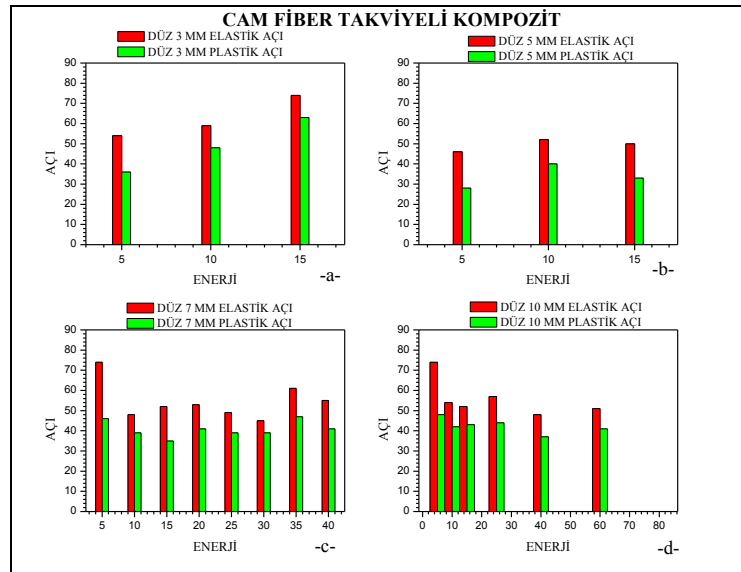


Şekil 6.102: 7 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 20 J (e) 25 J (f) 30 J (g) 35 J (h) 40 J

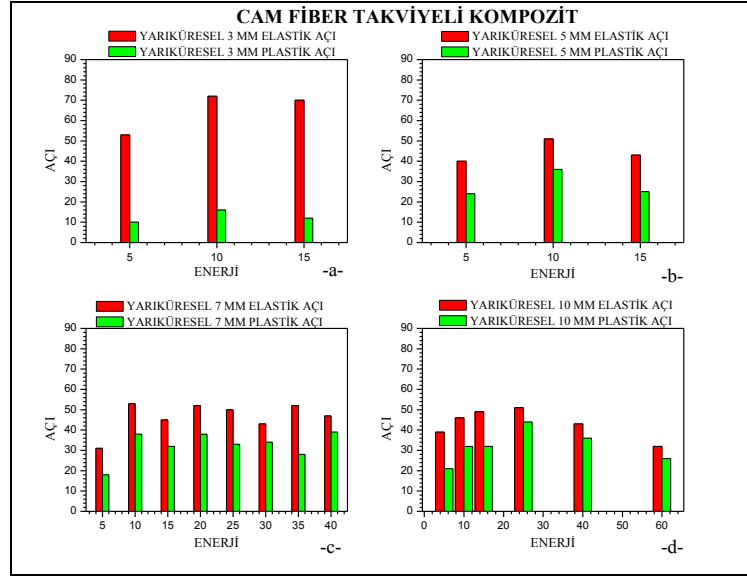


Şekil 6.103: 10 mm çaplı düz darbe ucu ile gerçekleştirilen test sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı kuvvet yer değiştirme grafikleri (a) 5 J (b) 10 J (c) 15 J (d) 25 J (e) 40 J (f) 60 J (g) 80 J

Şekil 6.103'te düz 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen testler sonrası yer değiştirme değerleri her enerji seviyesinde aramid / cam fiber takviyeli kompozitte cam fiber takviyeli kompozite göre daha yüksek çıkmıştır. Şekil 6.104'te kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozite ait elastik açı plastik açı değişim grafiklerinde elastik açı değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

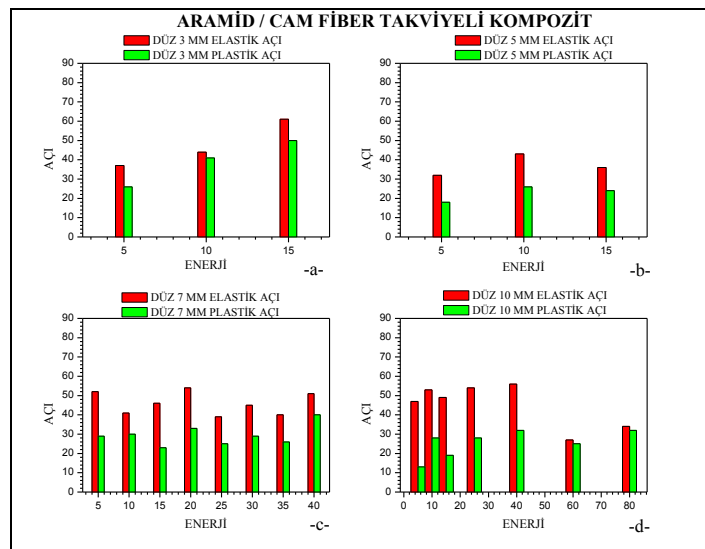


Şekil 6.104: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

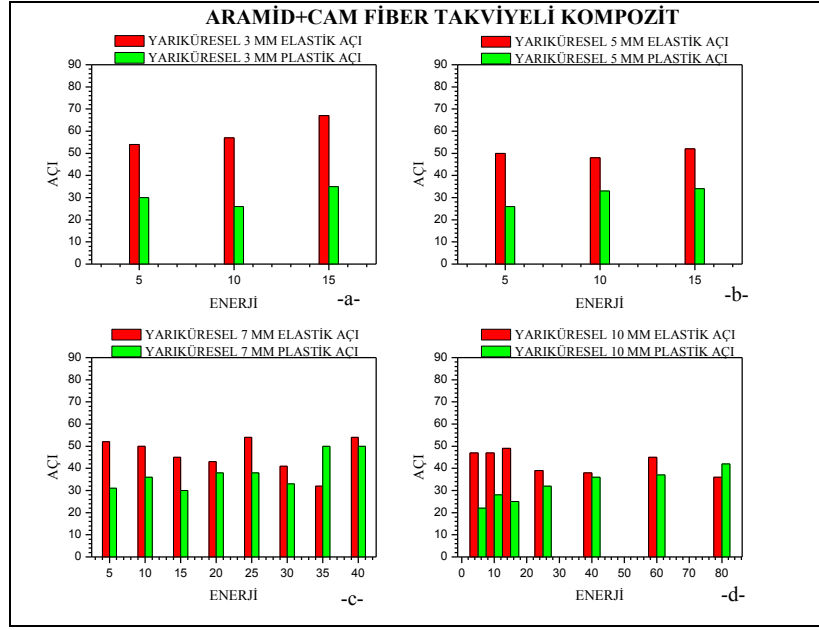


Şekil 6.105: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.105'te yarıküresel uçların kuvvet yerdeğiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozite ait elastik açı plastik açı değişim grafiklerinde elastik açı değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Elastik ve plastik açılar arasındaki fark en fazla 3 mm çapta ortaya çıkmıştır. Şekil 6.106'da düz uçların kuvvet yerdeğiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozite ait elastik açı plastik açı değişim grafiklerinde elastik açı değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Elastik ve plastik açılar arasındaki fark en fazla 10 mm çapta ortaya çıkmıştır.

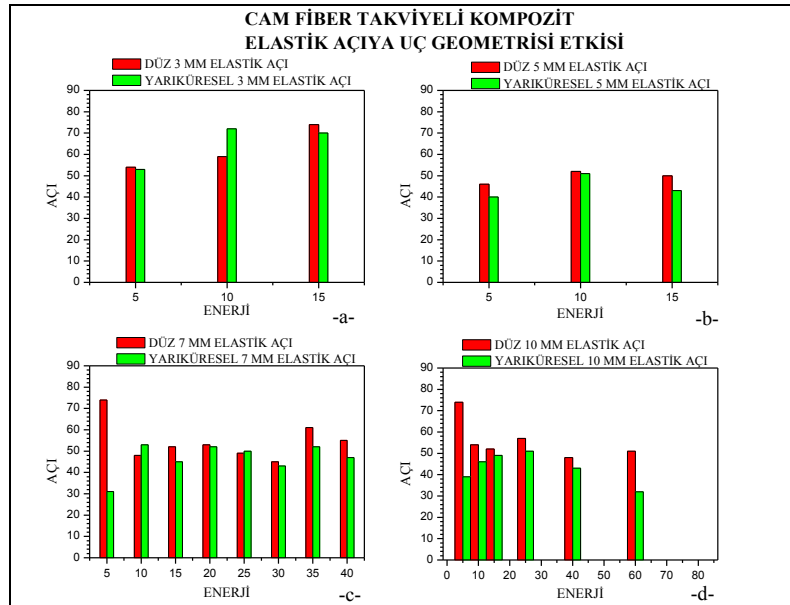


Şekil 6.106: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

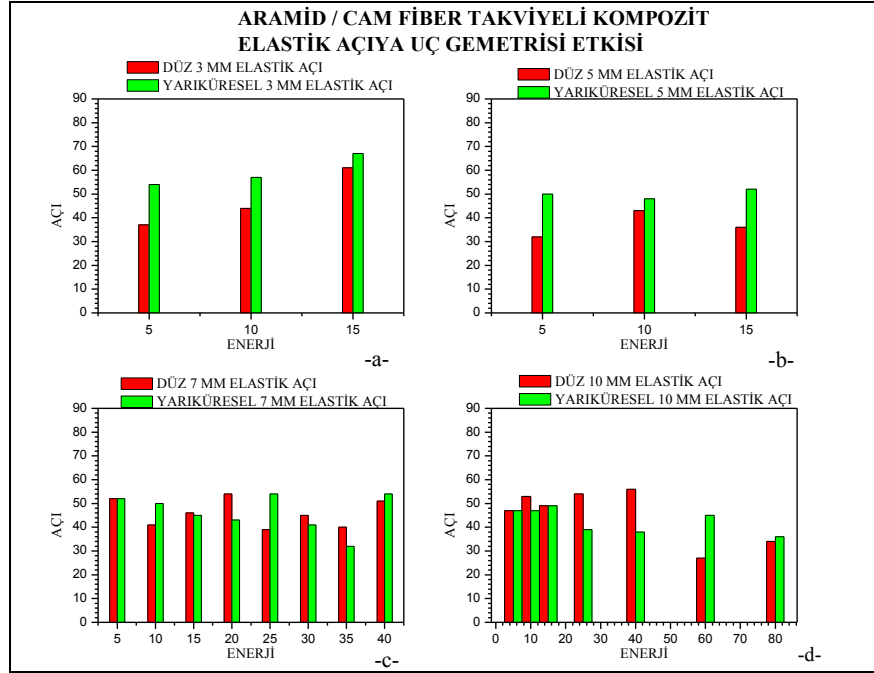


Şekil 6.107: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açısının enerjiye bağlı değişim grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.107'de yarıküresel uçların kuvvet yerdeğiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozite ait elastik açı plastik açı değişim grafiklerinde elastik açı değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Elastik ve plastik açıları arasındaki fark en fazla 3 mm çapta ortaya çıkmıştır. Şekil 6.108'de elastik ve plastik açıları arasındaki farka uç geometrisi etkisinin en fazla 7 ve 10 mm çaplı uçlarda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

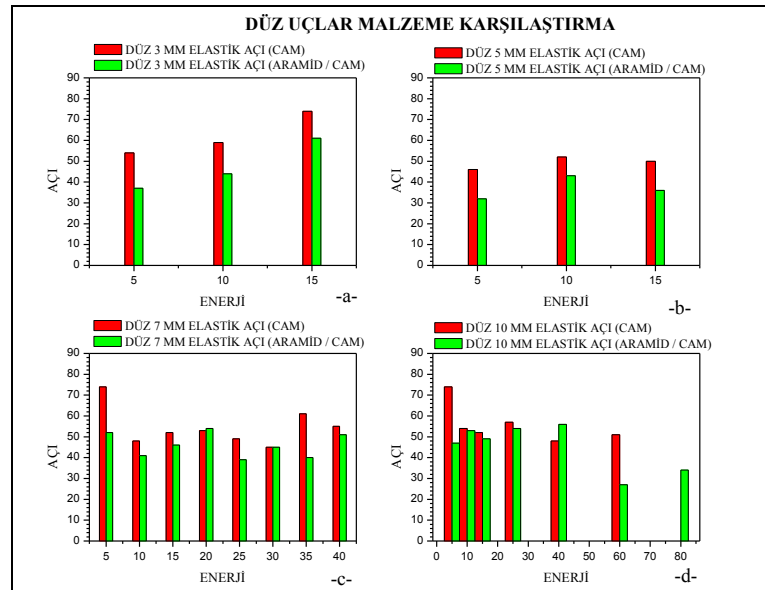


Şekil 6.108: Farklı çaplı darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen cam fiber takviyeli kompozitin uç geometrisine göre karşılaştırmalı elastik açı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

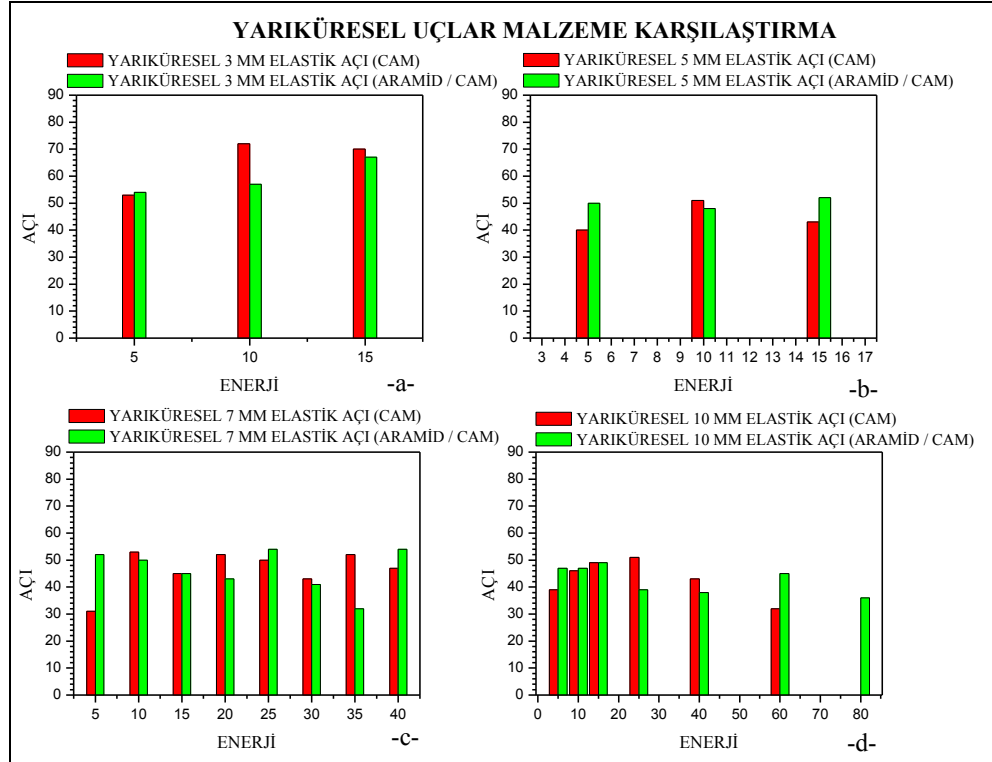


Şekil 6.109: Farklı çaplı darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen aramid / cam fiber takviyeli kompozitin uç geometrisine göre karşılaştırmalı elastik açı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

Şekil 6.109'da elastik ve plastik açılar arasındaki farka uç geometrisi etkisinin aramid / cam fiber takviyeli kompozitte en fazla 10 mm çaplı uça ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.110'da düz geometrili darbe uçlarında cam fiber takviyeli kompozitin elastik açı değerlerinin her uç çapında aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açı değerlerinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



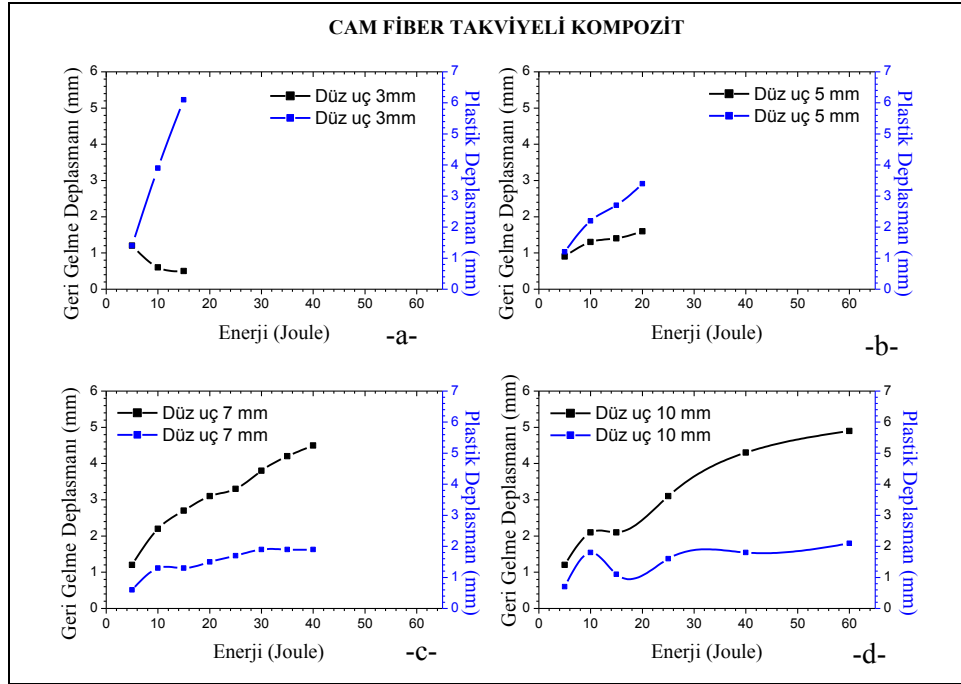
Şekil 6.110: Farklı çaplı düz darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen elastik açılarının fiber takviyesine göre karşılaştırmalı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm



Şekil 6.111: Farklı çaplı yarıküresel darbe uçlarının kuvvet yer değiştirme eğrilerinden elde edilen elastik açılarının fiber takviyesine göre karşılaştırmalı grafikleri (a) 3 mm (b) 5 mm (c) 7 mm (d) 10 mm

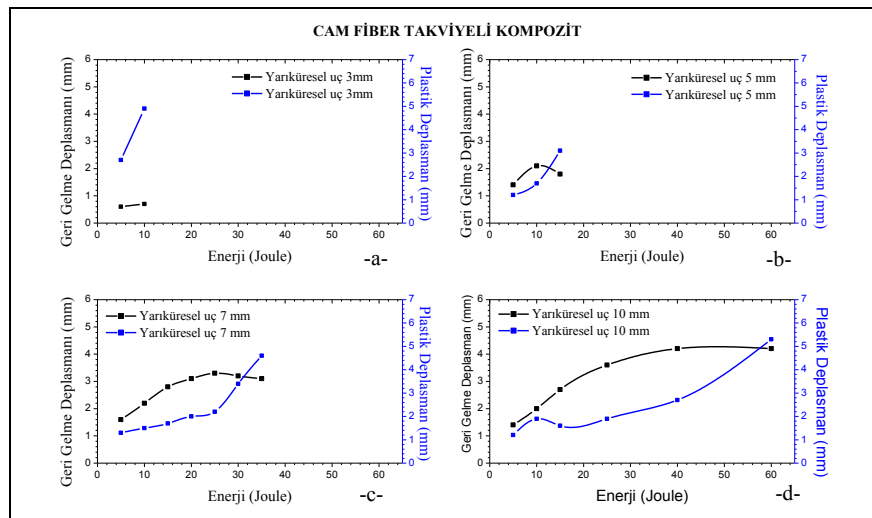
Şekil 6.111’de düz geometrili darbe uçlarından 3 mm çapta cam fiber takviyeli kompozitin elastik açı değeri aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açı değerlerinden yüksek olduğu gözlemlenirken; 5, 7 ve 10 mm çaplı uçlarda aramid / cam fiber takviyeli kompozitin elastik açı değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

6.4. Enerji, Geri Gelme Deplasmanı ve Plastik Deplasman Grafikleri

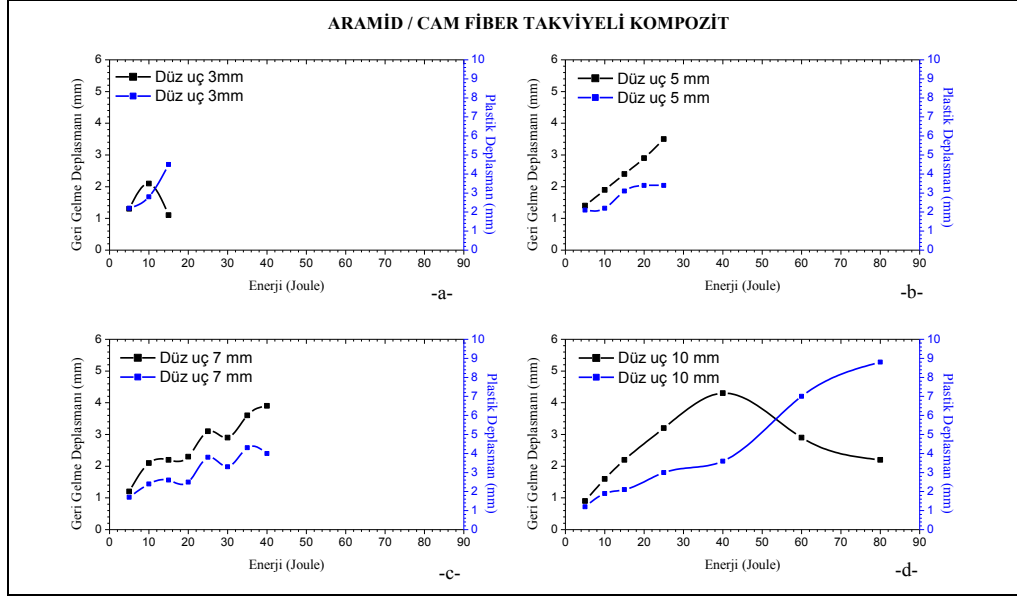


Şekil 6.112: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3mm çaplı darbe ucu (b) 5mm çaplı darbe ucu (c) 7mm çaplı darbe ucu (d) 10mm çaplı darbe ucu

Şekil 6.112’de cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı en büyük değerini 10 mm çaplı düz uçta kazanırken, en büyük plastik deplasman değeri 3 mm çaplı düz uçta gerçekleşmiştir. Şekil 6.113’te cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı ve plastik deplasman en büyük değerlerini 10 mm çaplı yarıküresel uçta kazanmıştır.

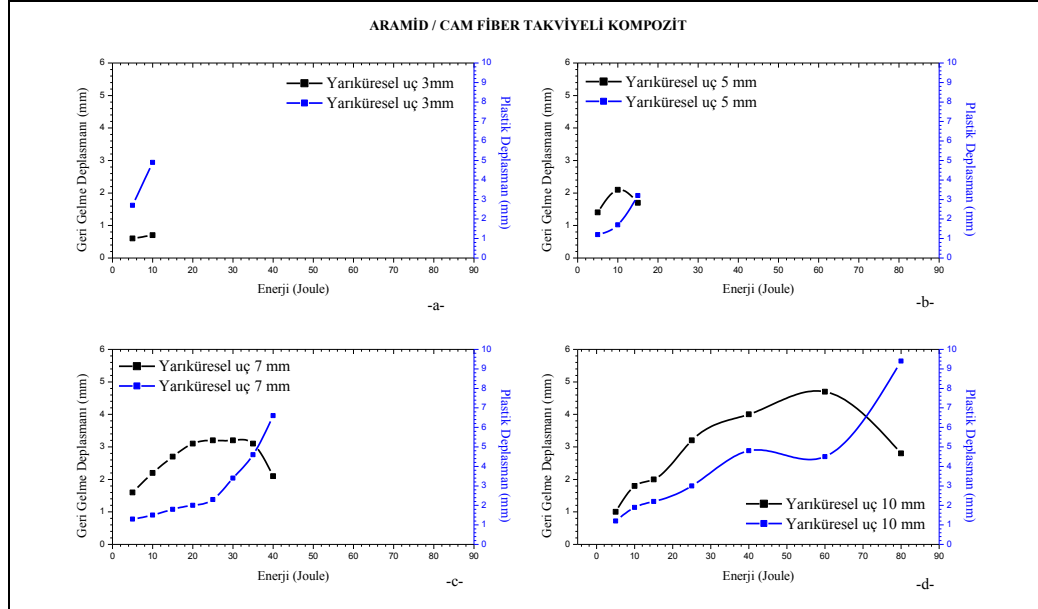


Şekil 6.113: Cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3 mm çaplı darbe ucu (b) 5 mm çaplı darbe ucu (c) 7 mm çaplı darbe ucu (d) 10 mm çaplı darbe ucu

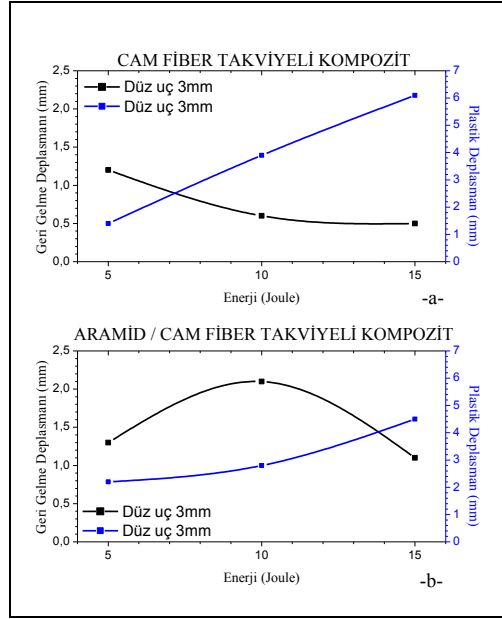


Şekil 6.114: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3mm çaplı darbe ucu (b) 5mm çaplı darbe ucu (c) 7mm çaplı darbe ucu (d) 10mm çaplı darbe ucu

Şekil 6.114'te aramid / cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı ve plastik deplasman en büyük değerlerini 10 mm çaplı düz uçta kazanmıştır. Şekil 6.115'te aramid / cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı ve plastik deplasman en büyük değerlerini 10 mm çaplı yarıküresel uçta kazanmıştır.

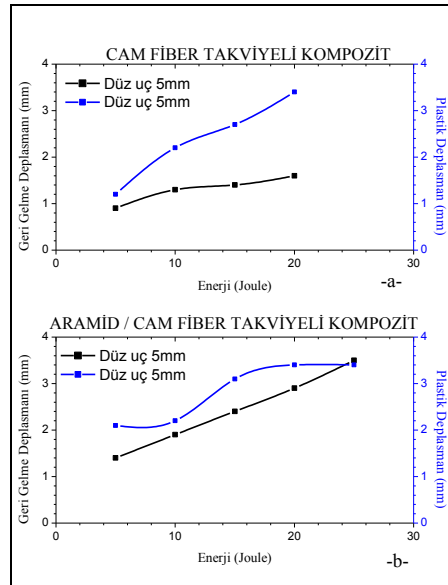


Şekil 6.115: Aramid / cam fiber takviyeli kompozitin farklı çapta yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri (a) 3 mm çaplı darbe ucu (b) 5 mm çaplı darbe ucu (c) 7 mm çaplı darbe ucu (d) 10 mm çaplı darbe ucu

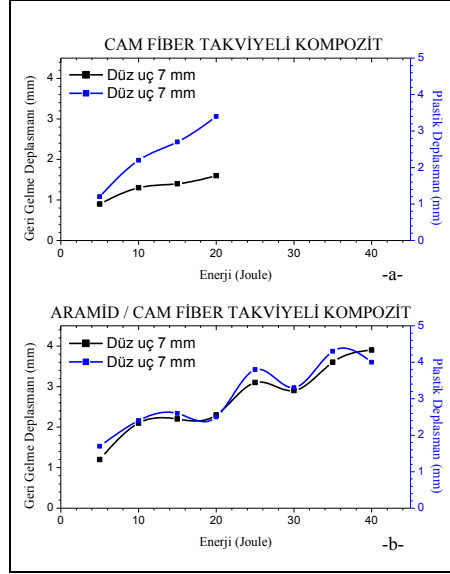


Şekil 6.116: Kompozitlerin 3 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

Şekil 6.116'da cam fiber takviyeli kompozitte plastik deplasman doğrusal artış gösterirken aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yatay seyir izleyerek 10 J darbe enerjisinden sonra artış eğilimine girmiştir. Geri gelme deplasmanı ise cam fiber takviyeli kompozitte azalma eğilimi göstererek 10 J enerjiden sonra yataya yakın seyir izlerken; aramid / cam fiber takviyeli kompozitte 10 J darbe enerjisine kadar artma eğiliminde sonrasında ise azalma eğiliminde olmuştur.

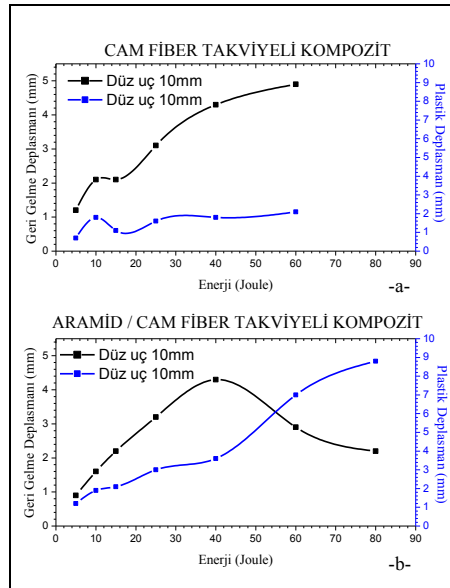


Şekil 6.117: Kompozitlerin 5 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

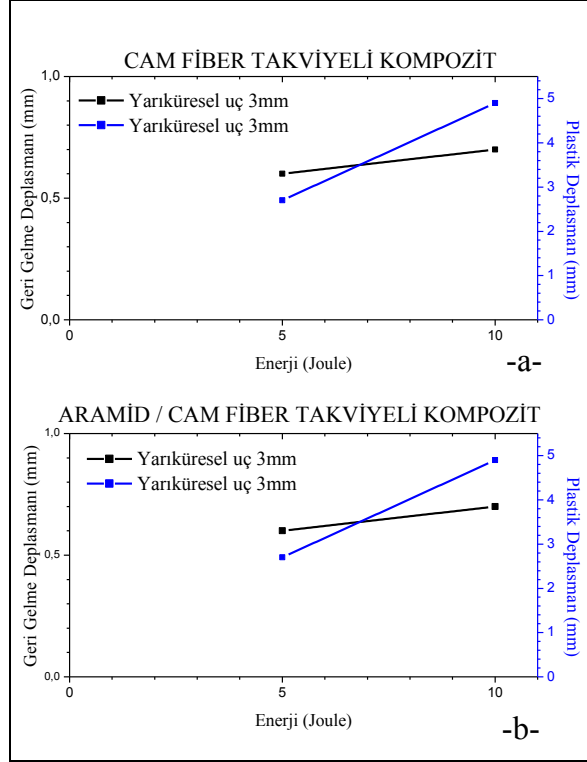


Şekil 6.118: Kompozitlerin 7 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

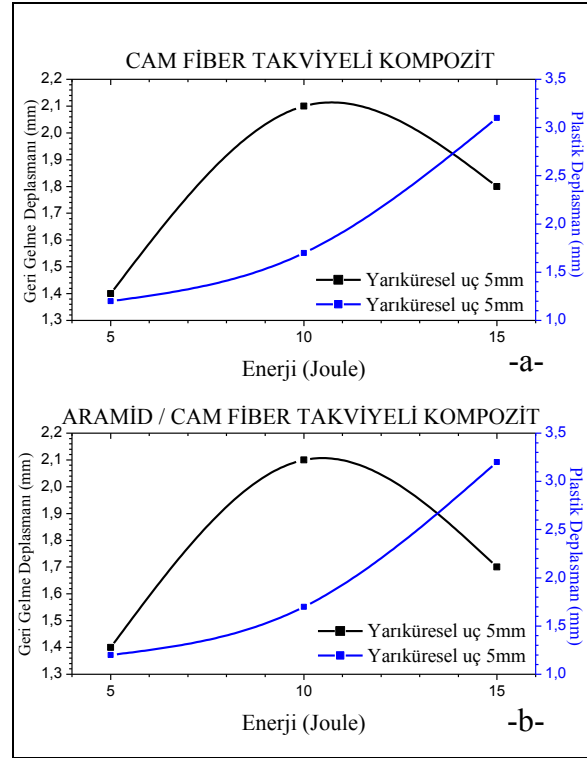
Şekil 6.118'de cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı ve plastik deplasman arasındaki fark darbe enerjisi arttıkça artarken; aramid / cam fiber takviyeli kompozitte eş değişim özelliği göstermişlerdir. Şekil 6.119'da cam fiber takviyeli kompozitte geri gelme deplasmanı ve plastik deplasman arasındaki fark darbe enerjisi arttıkça artarken; aramid / cam fiber takviyeli kompozitte 55 J darbe enerjisine kadar aradaki fark azalmış, sonrasında yine farkta bir artış gözlemlenmiştir.



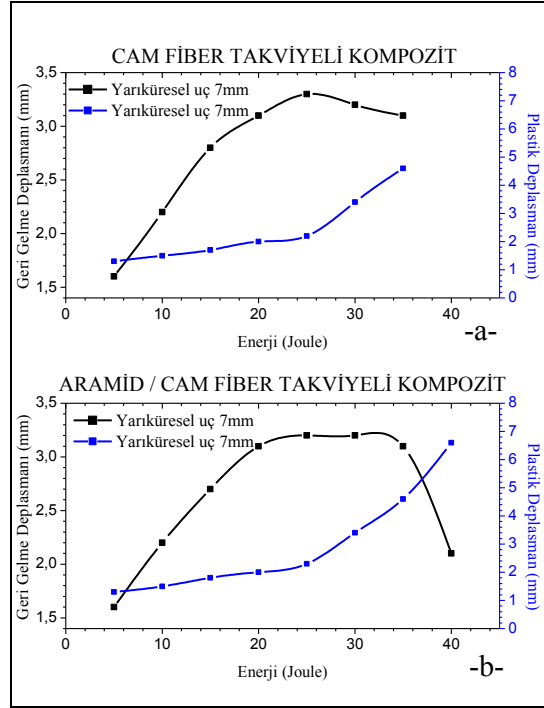
Şekil 6.119: Kompozitlerin 10 mm çaplı düz darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli



Şekil 6.120: Kompozitlerin 3 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

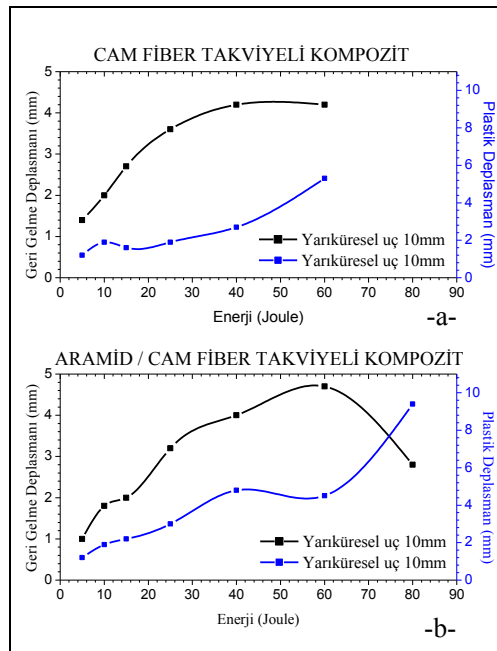


Şekil 6.121: Kompozitlerin 5 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

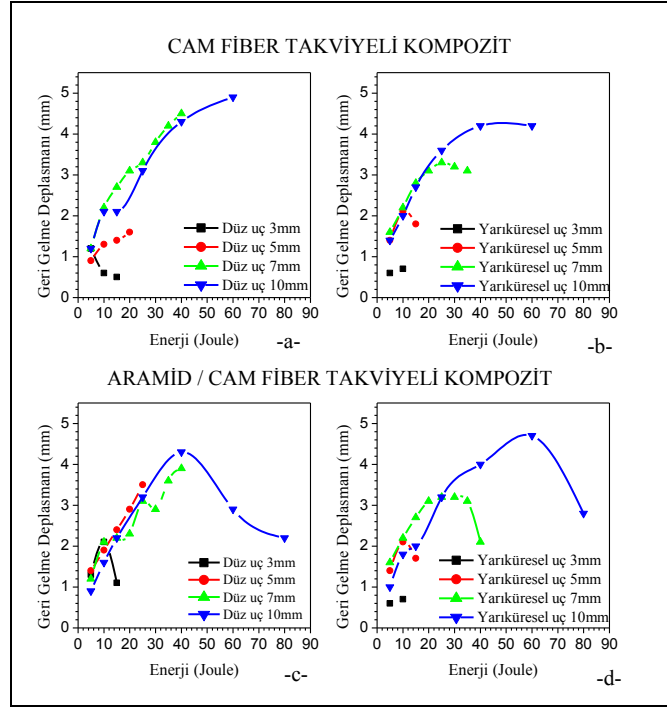


Şekil 6.122: Kompozitlerin 7 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli

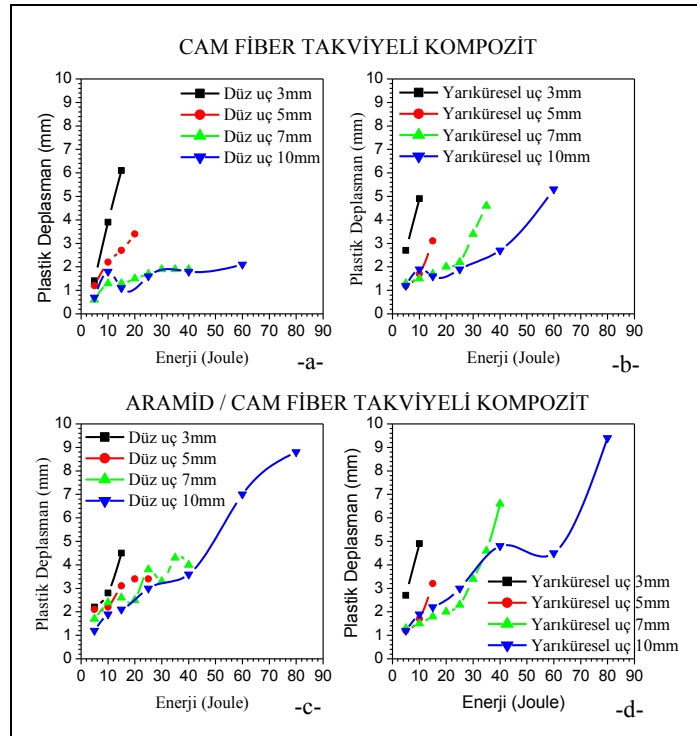
Yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrasında cam fiber takviyeli ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin geri gelme deplasmanları ve plastik deplasman eğrileri birbirine yakın özellikler sergilemişlerdir.



Şekil 6.123: Kompozitlerin 10 mm çaplı yarıküresel darbe uçlarında geri gelme deplasmanı, enerji ve plastik deplasman eğrileri karşılaştırması (a) cam fiber takviyeli kompozit (b) aramid / cam fiber takviyeli



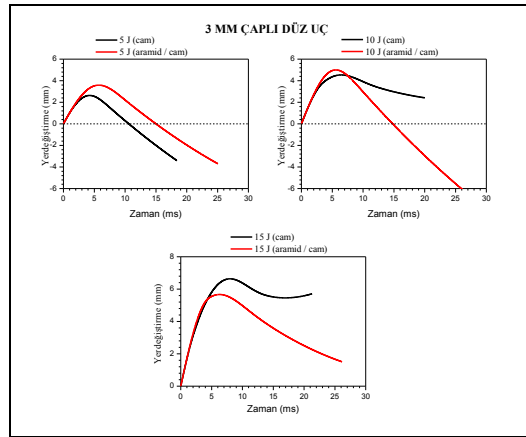
Şekil 6.124: Geri gelme deplasmanının darbe enerjisine bağlı değişim eğrileri (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları (c) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları



Şekil 6.125: Plastik deplasmanının darbe enerjisine bağlı değişim eğrileri (a) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (b) cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları (c) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta düz darbe uçları (d) aramid / cam fiber takviyeli kompozit farklı çapta yarıküresel darbe uçları

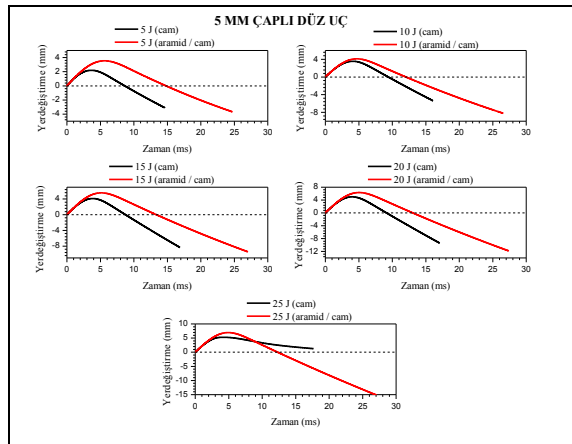
6.5.Yer Değiştirme Zaman Grafikleri

Şekil 6.126'da 3 mm çaplı düz darbe ucuyla uygulanan testler sonrasında 5 J darbe enerjisinde her iki kompozitte yerdeğiştirme yeteneğini korumuştur. Aramid / cam fiber takviyeli kompozit daha fazla yerdeğiştirme gerçekleştirmiştir. 10 J enerji seviyesine çıktığında cam fiber takviyeli kompozit hasara uğrayarak yerdeğiştirme yeteneğini kaybederken aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yerdeğiştirme devam etmiştir. 15 J enerji seviyesinde her iki kompozitte yerdeğiştirme gerçekleştirerek geri gelme ortaya çıkmamıştır.

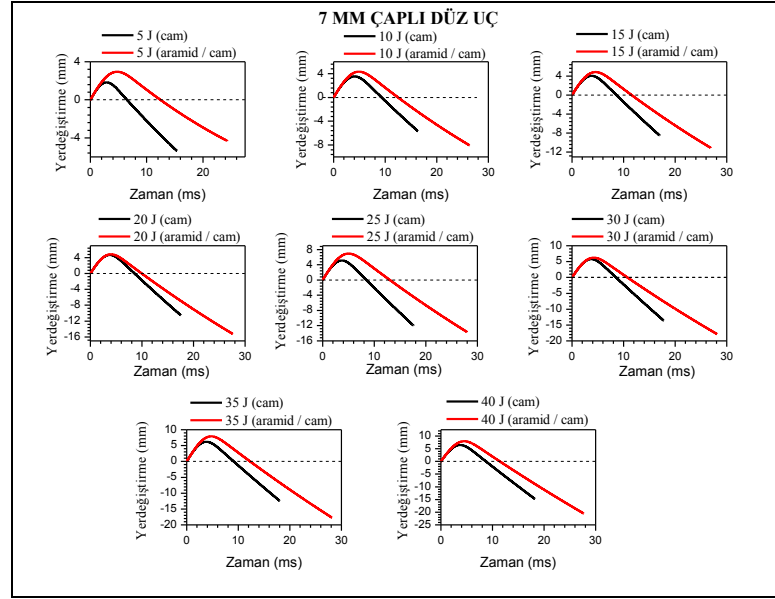


Şekil 6.126: 3 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

Şekil 6.127'de 25 J darbe enerjisine kadar her iki kompozitte yerdeğiştirme gerçekleştirmiş ve geri gelme yeteneklerini kaybetmeden korumuşlardır. 25 J enerjide cam fiber takviyeli kompozit hasara uğrayarak geri gelme özelliğini kaybetmiştir.

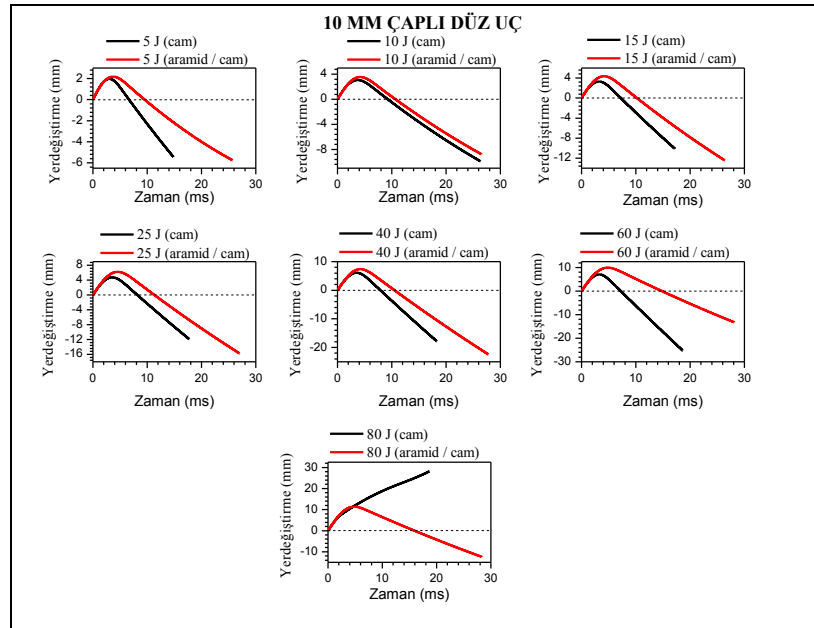


Şekil 6.127: 5 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

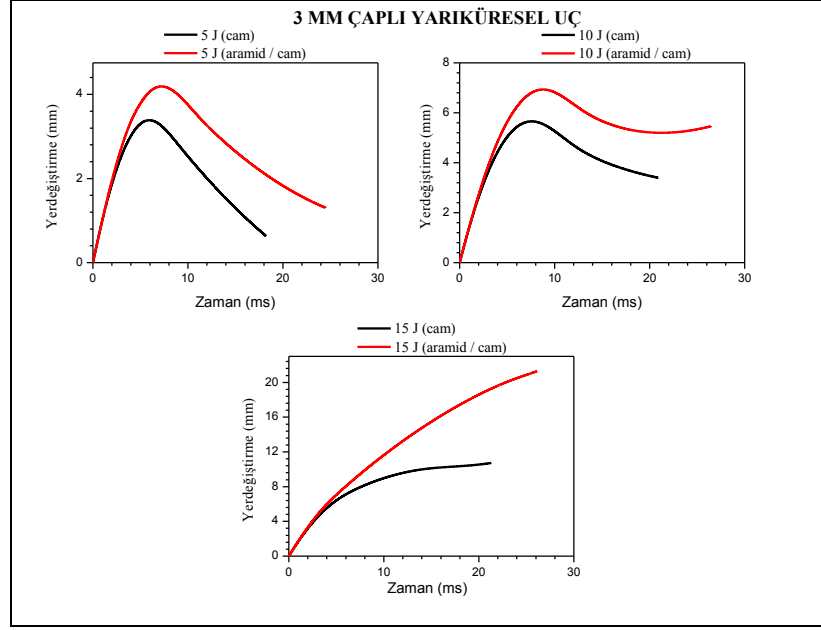


Şekil 6.128: 7 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

Şekil 6.128'de 7 mm çaplı düz darbe ucuyla gerçekleştirilen testler sonrasında cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin her ikisinin de yer değiştirme özelliklerini sürdürdüğü görülmüş, aramid / cam fiber takviyeli kompozitin daha fazla yer değiştirme kabiliyeti olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.129'da 10 mm çaplı düz uçta 80 J enerji seviyesine kadar her iki kompozitte yer değiştirme ile yükü karşılamış, 80 J darbe enerjisinde cam fiber takviyeli kompozit hasara uğrayarak geri gelme gerçekleştirememiştir.

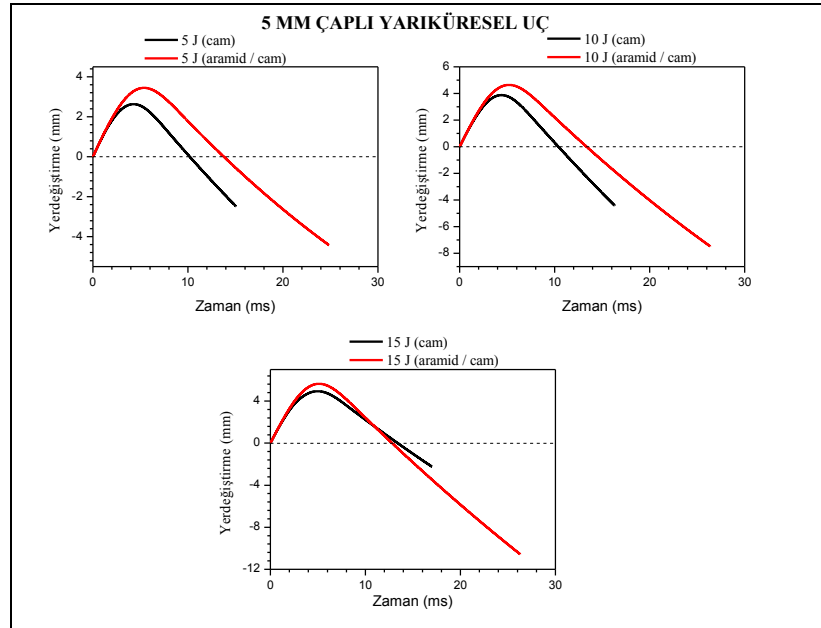


Şekil 6.129: 10 mm çaplı düz darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

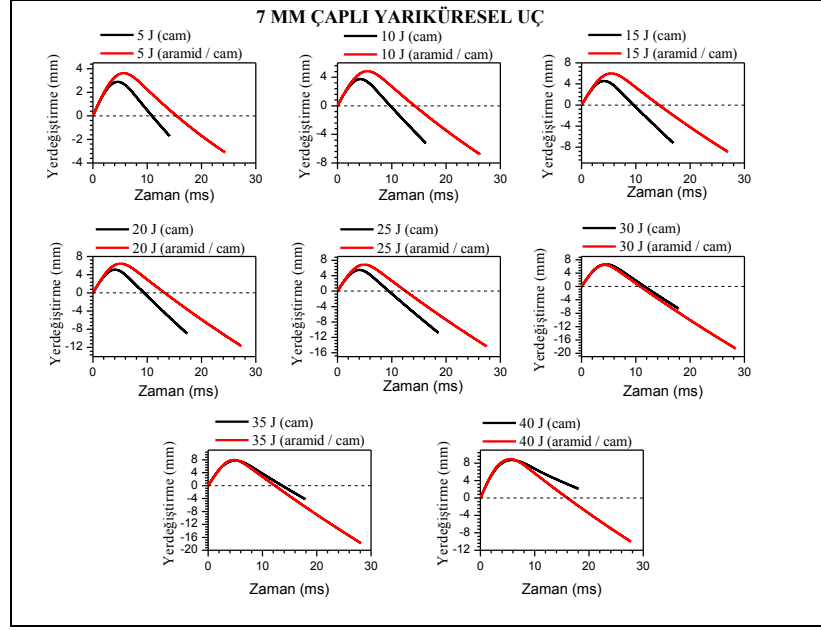


Şekil 6.130: 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

Şekil 6.130'da 3 mm çaplı yarıküresel darbe ucuyla gerçekleştirilen testler sonrasında kompozitler darbe enerjisi arttıkça yerdeğiştirme miktarlarını artırırken, yerdeğiştirmeden sonra geri gelme miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Şekil 6.131'de 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucuyla gerçekleşen testler sonrasında her enerji seviyesinde aramid / cam fiber takviyeli kompozitin yerdeğiştirme miktarı cam fiber takviyeli kompozitten fazla olmuştur.

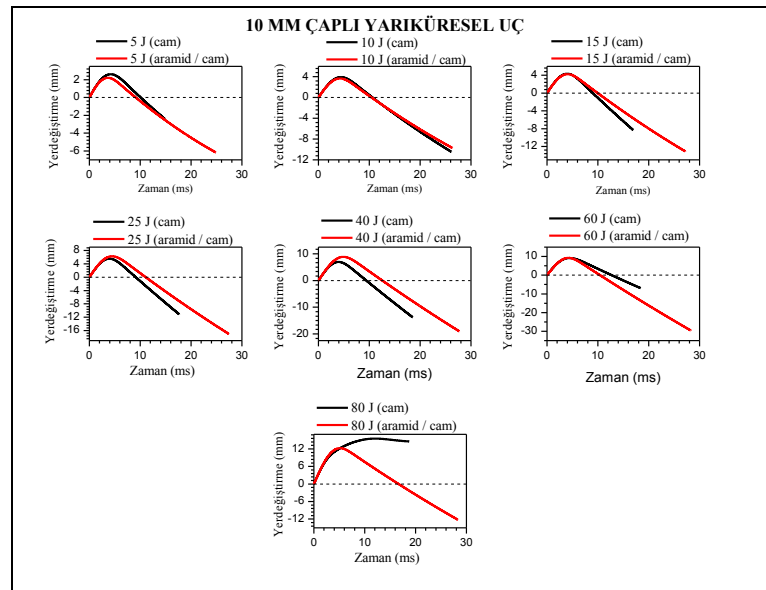


Şekil 6.131: 5 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri



Şekil 6.132: 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

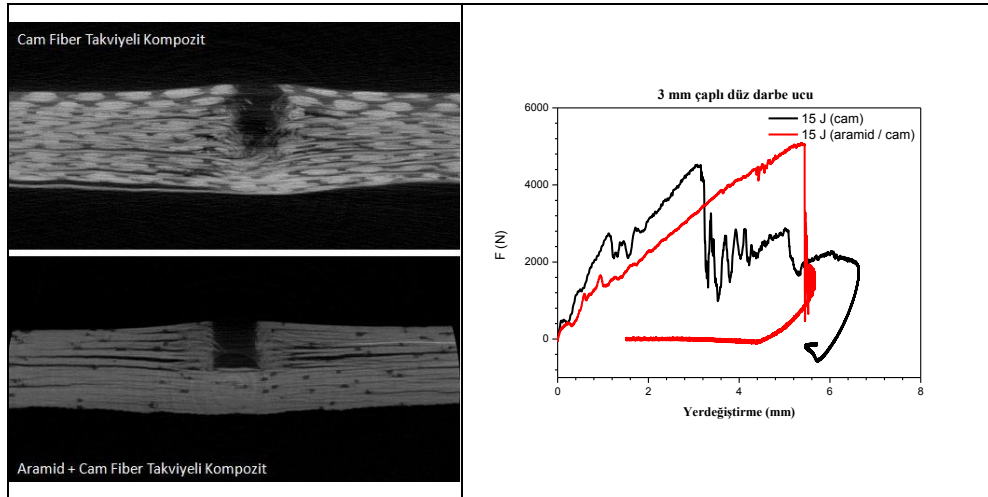
Şekil 6.132’de 7 mm çaplı yarıküresel darbe ucuyla 40 J enerjide gerçekleşen testler sonrasında cam fiber takviyeli kompozit yerdeğiştirme yaptıktan sonra kalıcı şekil değişikliğine uğrarken aramid / cam fiber takviyeli kompozit geri gelme gerçekleştirerek orijinal şekline dönmeye çalışmıştır. Şekil 6.133’de 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucuyla gerçekleşen testler sonrası 80 J darbe enerjisinde cam fiber takviyeli kompozit delinmeye giderek yerdeğiştirme sonrası şekli kalıcı olurken, aramid / cam fiber takviyeli kompozit geri gelme özelliğini korumaya devam etmiştir.



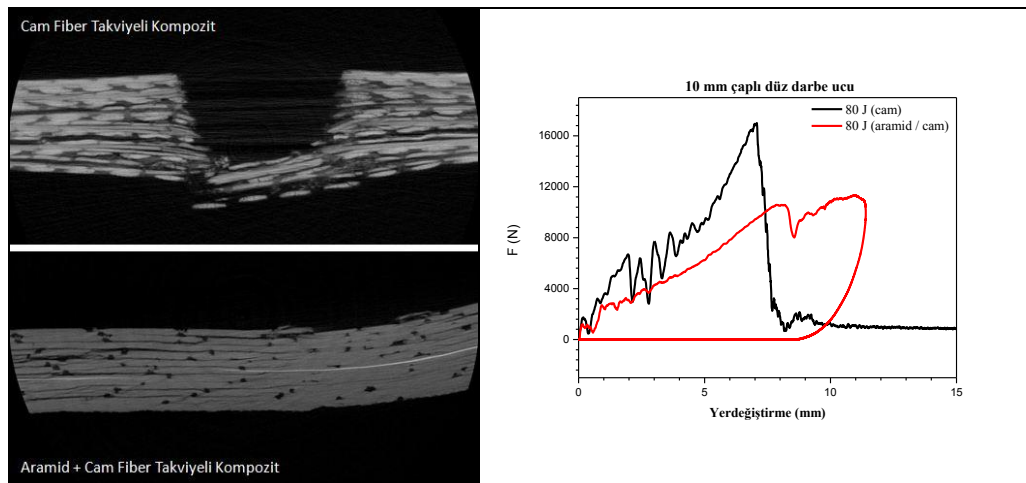
Şekil 6.133: 10 mm çaplı yarıküresel darbe ucu ile yapılan testler sonrası cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin karşılaştırmalı yer değiştirme zaman grafikleri

6.6. Darbe Sonrası Kompozitlerin Mikro Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleri

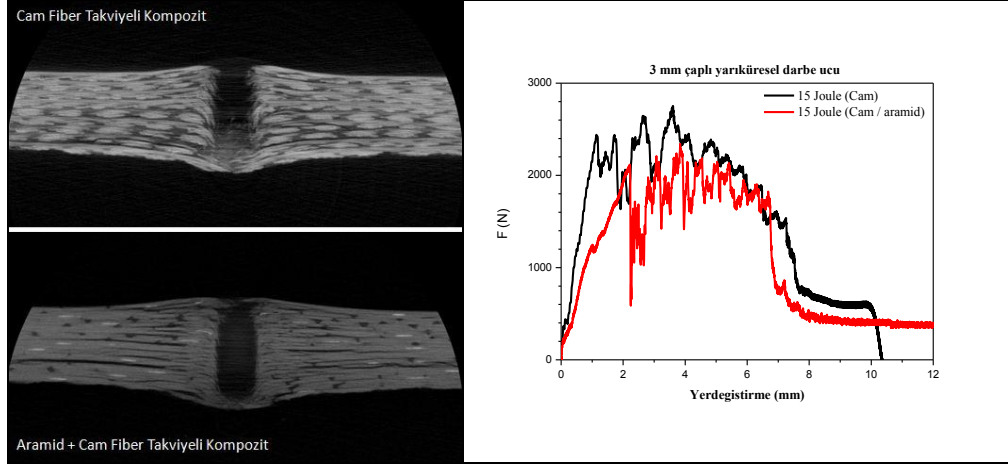
Düz geometrili 3 mm çaplı darbe uçlarıyla 15 J enerjide gerçekleştirilen darbe testleri sonrası cam fiber ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlerin darbe ucunun temas noktası altında kalan kısmın kesit mikro-CT görüntüleri Şekil 6.134’de verilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitte batma izi eliptik şekilli olmasına rağmen aramid / cam fiber takviyeli kompozitte dikdörtgen batma izi gözlemlenmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitte delaminasyon uzunluğu malzemenin arka yüzeyinde artarken aramid / cam fiber kompozitte batma izinin bitişinde delaminasyon boyunun en uzun değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.135’de 10 mm çaplı darbe ucuyla 80 J darbe enerjisi sonrası cam fiber takviyeli kompozitte belirgin batma izi ortaya çıkarken aramid / cam fiber takviyeli kompozitte böyle bir iz gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.134: Düz 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

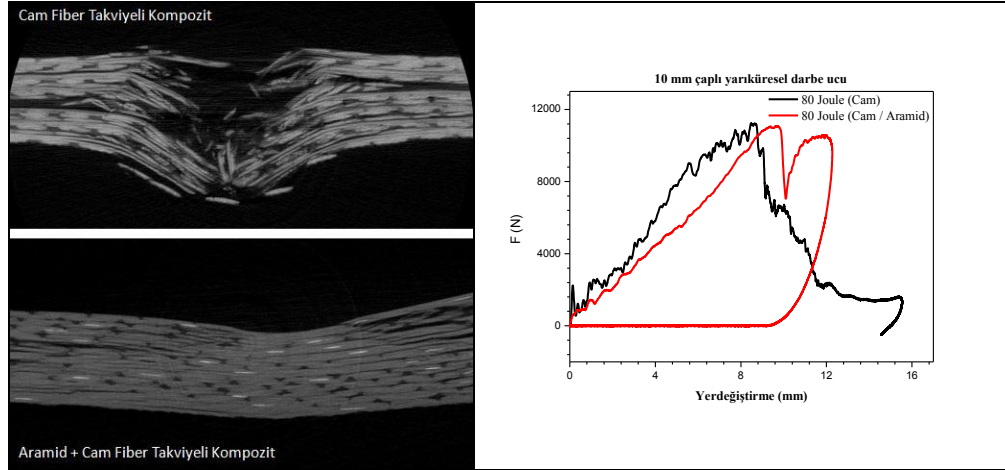


Şekil 6.135: Düz 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

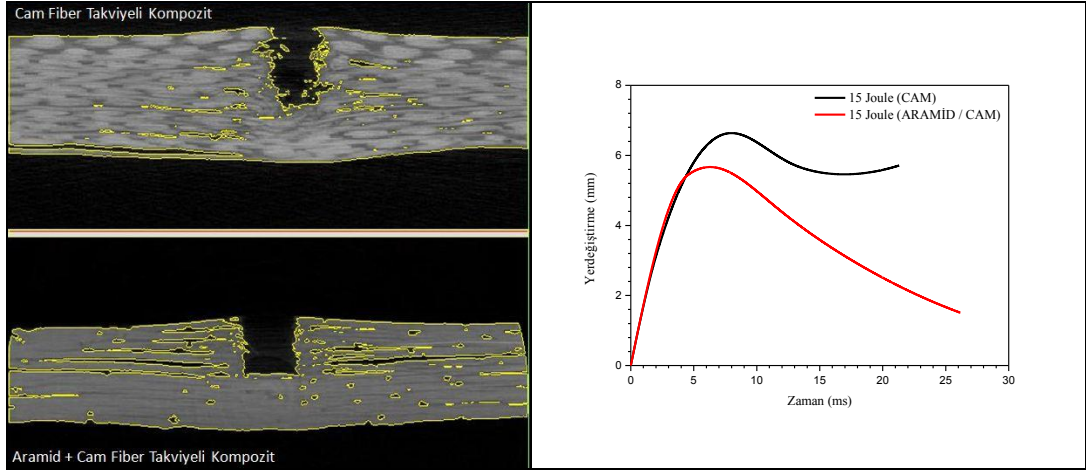


Şekil 6.136: Yarıküresel 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

Şekil 6.136'da 3 mm çaplı yarıküresel uçla gerçekleşen testler sonrası her iki kompozitte ortaya çıkan batma izleri görülmektedir. Aramid / cam fiber takviyeli kompozitte batma izi ve delaminasyon bölgeleri net şekilde gözlemlenebilmektedir. Şekil 6.137'de 10 mm çaplı 80 J darbe enerjisi sonrası ortaya çıkan hasar görüntü kesitleri verilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitte batma gerçekleşerek yaklaşık numune kalınlığının yarısı kadar derinlikte en belirgin delaminasyon hasarı ortaya çıkmıştır. Aramid / cam fiber takviyeli kompozitte ise batma izi gözlemlenmezken kompozitte darbeye bağlı oluşan eğilme net şekilde gözlemlenebilmiştir.

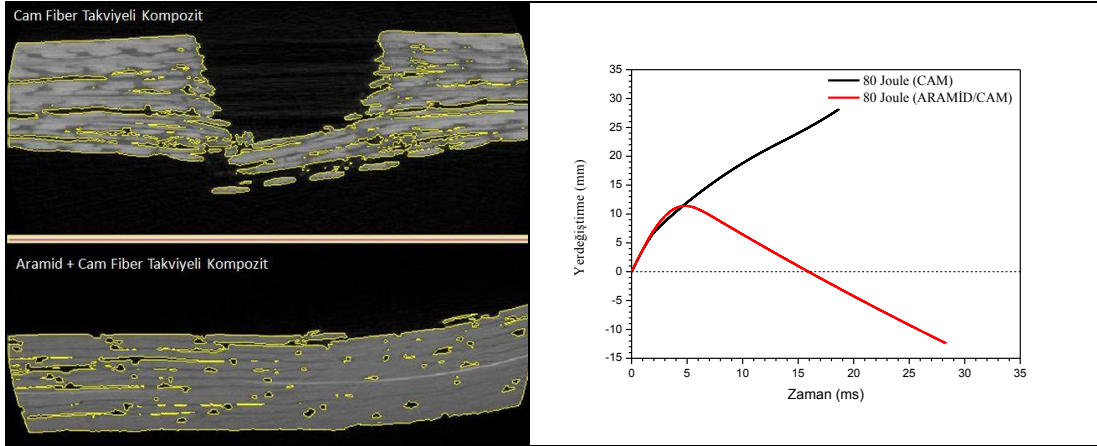


Şekil 6.137: Yarıküresel 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

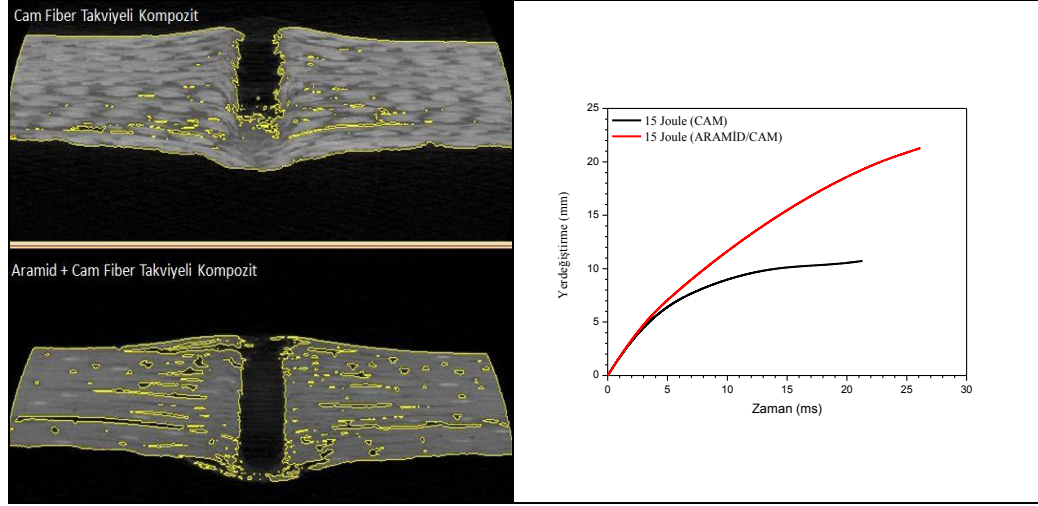


Şekil 6.138: Düz 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

Şekil 6.138 ve Şekil 6.139'da düz darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan delaminasyon sınırlarını net şekilde ortaya koyabilmek amacıyla sınırlar kullanılan yazılım yardımıyla sarı renkle belirtilmiştir. Dağılım incelendiğinde düz 3 mm çapta aramid / cam fiber takviyeli kompozitte daha uzun delaminasyon boyları gözlemlenmiştir. Düz 10 mm çaplı uçta delaminasyonlar cam fiber takviyeli uçta batma izinin sonunda uzun şekilde ortaya çıkarken, aramid / cam fiber takviyeli uçta bölgesel delaminasyonlar gözlemlenmiştir.

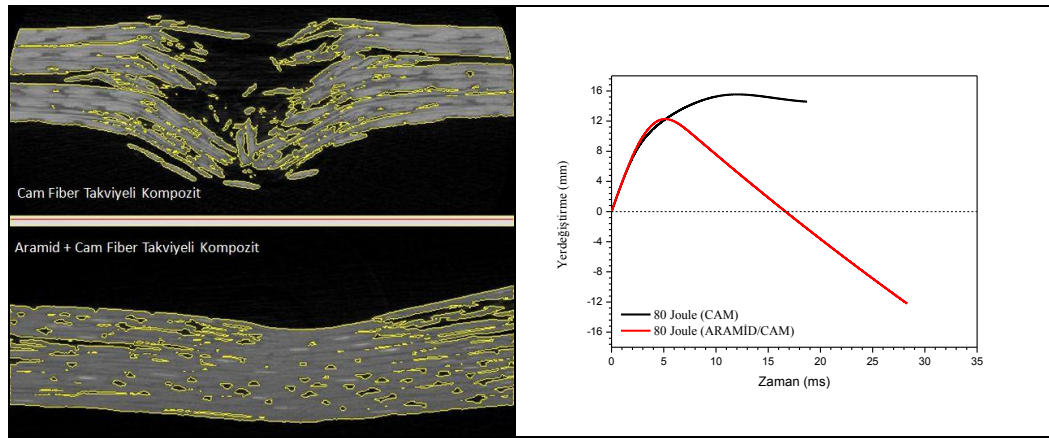


Şekil 6.139: Düz 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

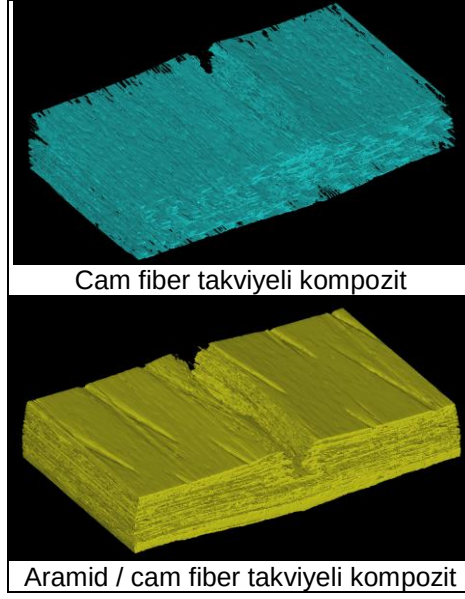


Şekil 6.140: Yarıküresel 3 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (15 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

Şekil 6.140 ve Şekil 6.141’de yarıküresel darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan delaminasyon sınırlarını net şekilde ortaya koyabilmek amacıyla sınırlar kullanılan yazılım yardımıyla sarı renkle belirtilmiştir. Dağılım incelendiğinde yarıküresel 3 mm çapta aramid / cam fiber takviyeli kompozitte yüzeyden başlayarak batma izi boyunca uzunluğu artan delaminasyon boyları gözlemlenmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitte ise sadece batma izinin bitiminde uzun bir delaminasyon gözlemlenmiştir. Yarıküresel 10 mm çaplı uçta delaminasyonlar cam fiber takviyeli uçta batma izinin kenarlarından başlayarak yayılım göstermiştir. Aramid / cam fiber takviyeli uçta delaminasyonlar malzeme kalınlığının yarısına kadar derinlikte ortaya çıkmış, diğer bölgelerde küçük bölgesel hasarlara rastlanmıştır.

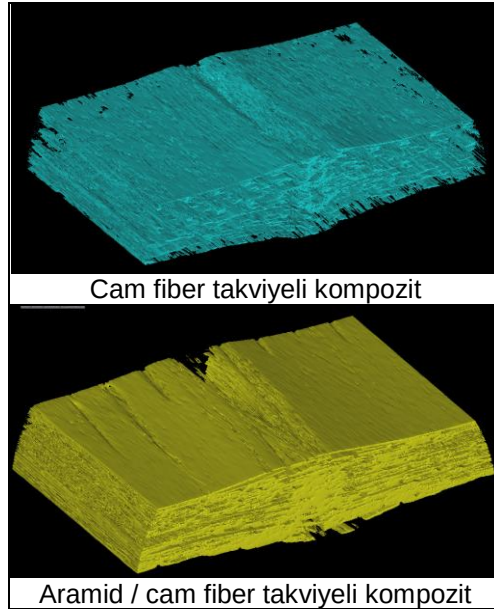


Şekil 6.141: Yarıküresel 10 mm çaplı darbe ucuyla gerçekleştirilen test sonrası (80 J) cam ve aramid / cam fiber takviyeli kompozitlere ait delaminasyon alanları mikro-CT görüntüleri karşılaştırması

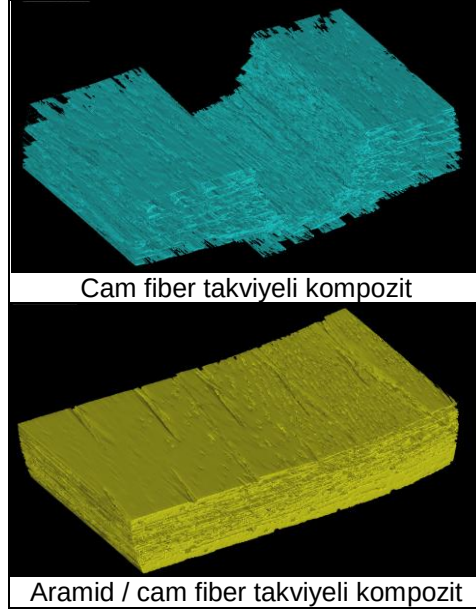


Şekil 6.142: 3 mm çaplı düz geometrili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri

Şekil 6.142 ve Şekil 6.143'te 3 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası kompozitlere ait üç boyutlu katı modelleri ortaya koyabilmek amacıyla, mikro-CT görüntü dilimleri görüntü işleme yazılımları kullanılarak bir araya getirilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit mavi renkle, aramid / cam fiber takviyeli kompozit sarı renkle belirtilmiştir.

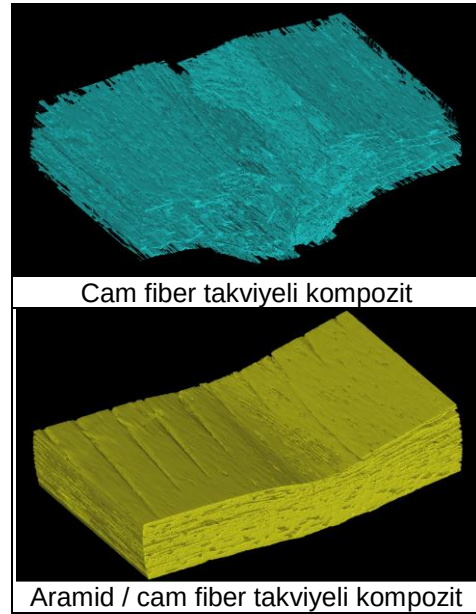


Şekil 6.143: 3 mm çaplı yarıküresel geometrili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri

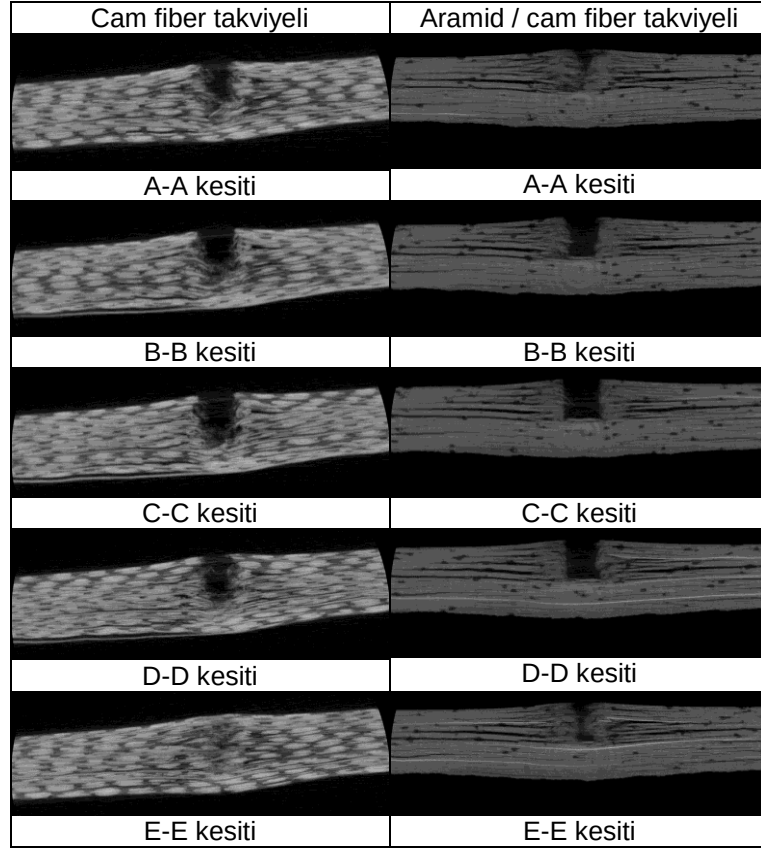


Şekil 6.144: 10 mm çaplı düz geometrili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri

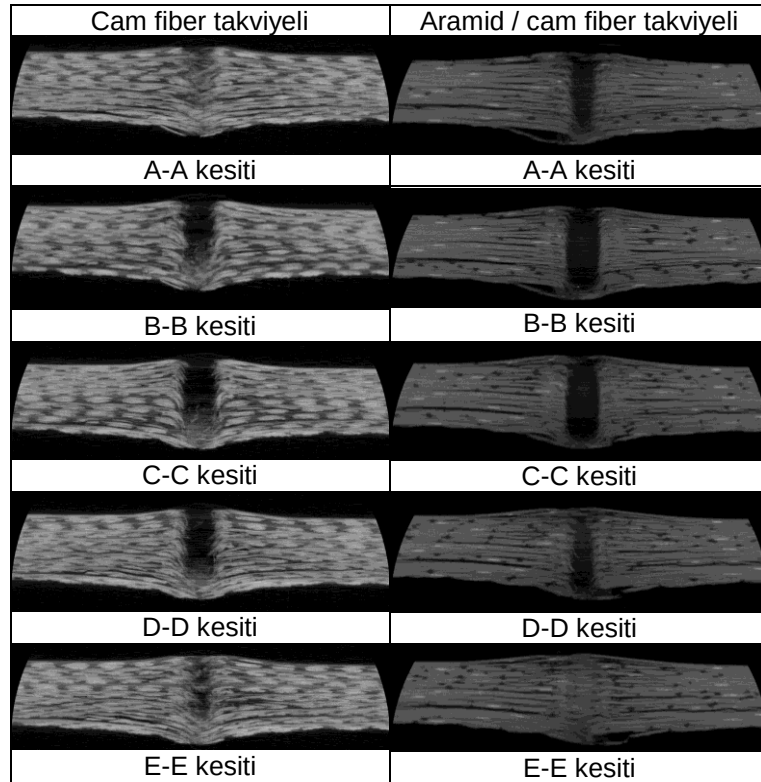
Şekil 6.144 ve Şekil 6.145'te 10 mm çaplı düz ve yarıküresel geometrili darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası kompozitlere ait üç boyutlu katı modelleri ortaya koyabilmek amacıyla, mikro-CT görüntü dilimleri görüntü işleme yazılımları kullanılarak bir araya getirilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit her iki uç geometrisinde de belirgin bir hasara uğrayarak batma izi net şekilde gözlemlenirken, aramid / cam fiber takviyeli kompozit eğilme ile yükü karşılamış fakat net bir batma izi kompozitte ortaya çıkmamıştır.



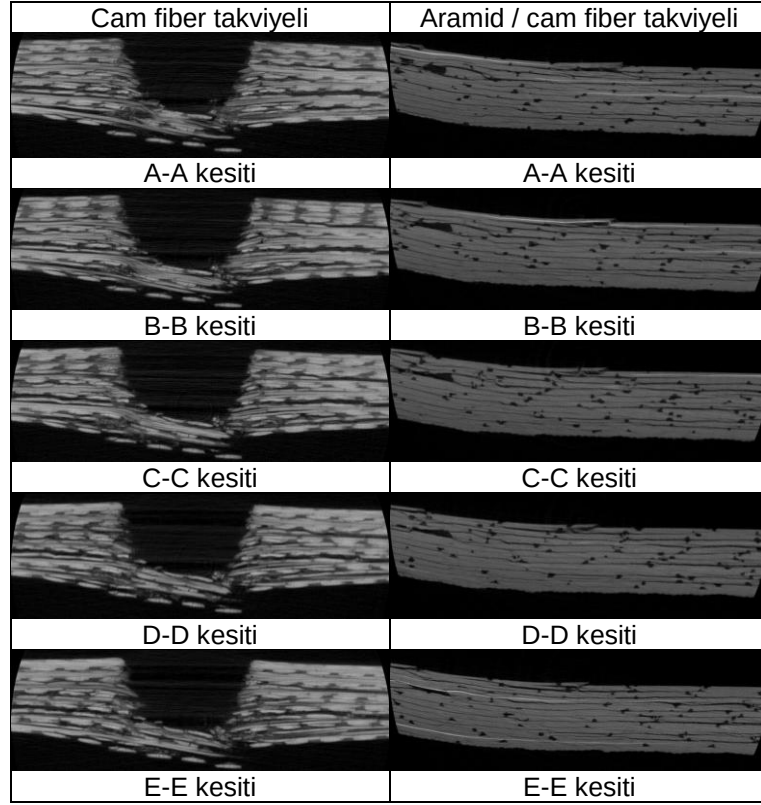
Şekil 6.145: 10 mm çaplı yarıküresel geometrili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait üç boyutlu mikro – CT görüntüleri



Şekil 6.146: 3 mm çaplı düz geometrili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri

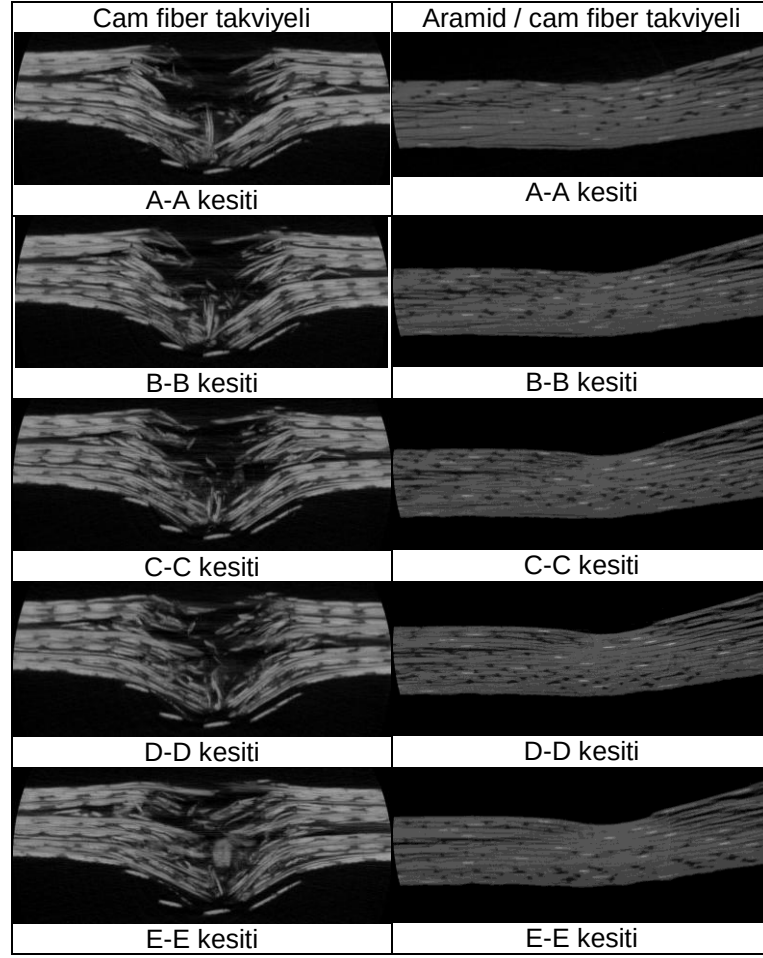


Şekil 6.147: 3 mm çaplı yarıküresel geometrili darbe ucuyla 15 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri



Şekil 6.148: 10 mm çaplı düz geometrili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri

Mikro-CT taramalarından elde edilen görüntülerle gerçekleştirilen incelemelerde, sadece darbe ucunun altında kalan kısımdaki kesitlerin görüntüleri incelenmemiştir. Darbe sonrası kompozit içyapısında ortaya çıkan hasar dağılımının darbenin uygulandığı noktadan uçlara doğru gidildikçe nasıl değiştiğini gözlemlemek için hasar bölgesi içinde kalan kesit görüntü dilimleri de kullanılmıştır. 3 mm çaplı darbe uçları kullanıldığında her iki darbe ucu geometrisinde de kompozitlerde darbe temas noktasından uzaklaşıldıkça batma izinin ortadan kaybolduğu net olarak gözlemlenmiştir. Uç çapları 10 mm'ye çıktığında, darbe ucunun etkisi hasar bölgesinin daha büyük kısmına yayıldığı için bu değişim gözlemlenememiştir. 10 mm uç çapında her iki geometrideki darbe uçlarıyla gerçekleştirilen testler sonrası cam fiber takviyeli kompozitte belirgin uç batma izi gözlemlenirken aramid / cam fiber takviyeli kompozit eğilme göstermiş fakat kompozitte batma izine rastlanmamıştır.



Şekil 6.149: 10 mm çaplı yarıküresel geometrili darbe ucuyla 80 J enerjiyle gerçekleştirilen test sonrası kompozitlere ait hasar eksenindeki mikro – CT görüntü kesitleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tabakalı kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemelerinin yerini almada son otuz yılda çok büyük gelişmeler göstermişlerdir. Tabakalı kompozitlerin görev yaptıkları servis şartları altında maruz kaldıkları değişken yüklemeler güvenilir servis ömürlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yorulma ömürlerini etkileyen başlıca faktörleri ortaya net olarak ortaya koyabilecek çalışmaların yapılması, kompozitlerin servis ömürlerini hesaplamada etkin olacaktır.

Tabakalı kompozitlerin servis şartları altında en sık maruz kaldıkları yükleme tiplerinden biri darbeli yüklemelerdir. Bu doktora çalışmasında tabakalı kompozitlerin darbe yüklemelerine karşı verdikleri tepkilere aşağıdaki faktörlerin nasıl etki ettiğini ortaya koymak amaçlanmıştır.

- Darbe ucu geometrisinin darbe hasarına etkisi
- Darbe ucu çapının darbe hasarına etkisi
- Fiber takviye elemanının darbe hasarına etkisi (cam fiber ve cam + aramid fiber)

Gerçekleştirilen doktora çalışmasının amaçlarından bir diğeri de darbe hasarına uğramış tabakalı kompozit malzemelerin içyapı hasarlarını en net şekilde ortaya koyacak inceleme yöntemini belirlemek olmuştur. Bu amaçla literatürde daha önce uygulanmış muayene ve inceleme yöntemlerinden röntgen ışınları ve ultrasonik tarama gibi yöntemler uygulanmıştır. Yapılan incelemelerde bu yöntemlerin günümüz gelişmiş üretim teknolojileriyle ortaya çıkarılan karmaşık yapılı ve tabakalı kompozitlerin darbe sonrası içyapı hasarlarını ortaya koymada sınırlı kabiliyetleriyle cevap verebildikleri görülmüştür. İlk ortaya çıktıklarında tek tabakalı ve basit takviye elemanı yönlenmesine sahip olan kompozitler günümüzde çok tabakalı ve karmaşık yönlü takviye elemanlarını bünyelerinde barındırmaktadırlar. Bu yapılarından ötürü bahsi geçen inceleme ve muayene teknikleri darbe sonrası içyapı hasarlarına ait çok genel ve çözünürlüğü düşük, hasar sınırlarını net şekilde ortaya koyabilme yeteneğinden yoksundur.

Darbe enerjinin malzeme takviye elemanlarına iletilme biçimi ve süresi, görev yapacak takviye elemanının seçiminde önemli bir parametredir. Bu parametreler yardımıyla darbe yüklemesi altında çalışacak kompozitlerin daha güvenli tasarlanıp üretilmeleri gerçekleştirilebilir.

Gevrek yapıdaki takviye elemanlarında, geniş temas yüzeyinden geçişte malzemenin taşıyabildiği kuvvet değerleri daha yüksek iken noktasal temaslarda bu değer azalmaktadır. Gevrek ve sünek özellikte takviye elemanları birlikte kullanıldığında, noktasal temas yüzeyinden geçişte taşınan kuvvet değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Noktasal darbe yüklemelerine maruz kalan parçalarda hibrit takviye elemanlı kompozitlerin kullanımı, malzeme servis süresini artırıcı bir etki yapacaktır.

Farklı tipte takviye elemanlarını yapı içinde bir arada kullanarak malzemelerin elastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinde iyileştirmeler yapmak olanaklıdır. Özellikle uçak yapısal parçalarında akıllı malzemeler veya şekil hafızalı malzemeler olarak bilinen parçaların kullanım nedeni budur. Uçak yapılarında aerodinamik yapının hıza bağlı olarak değişebildiği malzemeler üzerine AR-GE çalışmaları devam etmektedir.

Farklı takviye elemanlarının bir arada kullanıldığı hibrit kompozitlerin darbe yüklemeleri sonrası orijinal şekillerine geri dönme kabiliyetlerinin yüksek olduğu literatürde birçok çalışmada ortaya konmuştur. Endüstriyel anlamda son yıllarda özellikle düşük hızlardaki darbeler sonrası araba tamponlarının orijinal şekillerine dönebilmeleri bu çalışmaların ışığında olmuştur. Gelecekte bu çalışmaların artmasıyla uçak yapılarında yabancı cisim çarpması sonucu oluşan bölgesel hasarlar malzemenin oto-kontrolünde giderilecektir.

Hibrit kompozitlerin kullanımıyla malzemenin yer değiştirme miktarı ve gerçekleşme süresi artmaktadır. Endüstriyel anlamda bu, ısıtma işlemi uygulama kalıplarında kullanılacak alternatif bir malzemedir. Uygulanan ısıtma işlemine göre istenilen zamanda kalıp kompozitin gerekli yer değiştirmeyi yaparak üretim malzemesine istenilen şekli vermesi sağlanabilir.

Tahribatsız muayene teknikleri kompozitlerin içyapı hasarları değerlendirmesinde büyük bir öneme sahiptir. Mikro tomografi tıp alanında kullanılmak için geliştirilmiş bir teknik olmasına rağmen yapılan doktora çalışmasında kompozit içyapı hasarlarını ortaya koymak içinde iyi bir alternatif metot olduğu görülmüştür. Yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesi, görüntülerden hasar bölgelerinin 3 boyutlu katı modellerinin oluşturulması yöntemin önemli avantajlarıdır. Sahada kullanılabilecek mikro tomografi cihazlarının geliştirilmesiyle uçak komponentlerinde olduğu gibi yapısal kompozitlerin ana gövdeden sökülmeden incelenebilecek olması zaman ve maliyetlerde önemli bir kazanca sebep olacaktır.

Darbe yükleme sırasında kompozitlerde ortaya çıkan anlık ısı ve sürtünme ile ilgili çalışmaların yapılması kompozitlerin darbe davranışları hakkında farklı bilgiler elde edilmesini olanaklı kılacaktır. Darbe anının yüksek hızlı kamera gibi görüntüleme cihazlarıyla kaydedilmesi malzemelerin darbeye bağlı dinamik hareketlerini gözlemlemede etkin bir yöntem olabilir. Bu görüntülerle mikro tomografi gibi tahribatsız muayene tekniklerini beraber kullanabilecek sistemler geliştirmek, darbe anında hasarların nasıl ortaya çıktığı konusunda detaylı bilgiler verebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kayrak, M.A. "Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri", **Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları**, No.09, Eskişehir, 1, 12-13, 69, (1999).
- [2] Şahin, Y. "Kompozit Malzemelere Giriş", **Gazi Kitapevi**, Ekim, 1, 8, 40, 87, (2009).
- [3] Smith, W.F. "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Üçüncü basım", Çeviri Editörü, Nihat G. Kınıkoğlu, **Literatür Yayınları**, İstanbul, 724, (2001).
- [4] Eren, Y. "Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 8-20, (2007).
- [5] Mazumdar, S.K. "Composites Manufacturing: Material, Product and Process Engineering", **CRC Pres**, Boca Raton London New York Washington, D.C, 24, (2002).
- [6] Anonim, A.S.M. "International, Composite materials I the basics", **Materials Engineering Institute**, Ohio, 10-15, (1984).
- [7] Ekinci, V.Ş., "Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 21, 27, (2007).
- [8] Rouchan, J., "Materiaux composites pour d'aeronefs", **Ecole Nationale Supérieure d'Ingenieurs de Constructions Aeronautiques**, 95, (1987).
- [9] Kara, M., "Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı", Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 12-13, (2006).
- [10] Karaca, D., "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, 10-24, (2010).
- [11] Mmders, P.W. and Harris, W.C. 'A parametric study of composite performance in compression-after-impact testing', **SAMPE Journal**, 22, pp 47-51, (1986).

- [12] Almy, M. 'Post damage capability of carbon fibre reinforced matrices', **Proc Int Conf on Polymers for Composites**, The Plastics and Rubber Inst, London, UK, pp 11.1-11.10, (1987).
- [13] Stellbrink, K.K.U. 'Improved impact damage tolerance' **Proc European Symp on Damage Development and Failure Processes in Composite Materials**, edited by I. Verpoest and M. Wevers, Leuven, Belgium, (1987).
- [14] Curson, A.D., Leach, D.C. and Moore, D.R. 'Impact failure mechanisms in carbon fiber/PEEK composites', **J Thermoplastic Composite Mater**, 3, pp 24-31, (1990).
- [15] Redmk, S. and Sna, C.T. 'Optimal use of adhesive layers in reducing impact damage in composite laminates', **Composite Structures**, Vol 2, Damage Assessment and Material Evaluation (Elsevier Applied Science Publ) pp 2.18-2.31, (1987).
- [16] Hong, S. and IAu, D. 'On the relationship between impact energy and delamination area', **Exptl Mech**, 13, pp 115-120, (1989).
- [17] Boll, D.J., Bracero, W.D., Weidaer, J.C. and Man'i, W.J. 'A microscopy study of impact damage on epoxy-matrix carbon fibre composites', **Proc Int Conf on Post Failure Analysis Techniques for Fiber Reinforced Composites**, OH, USA, paper 8, (1985).
- [18] Takeda, N., Sierakowski, R.L., Ross, C.A. and Malvera, L.E. 'Delamination-crack propagation in ballistically impacted glass/epoxy composite laminates' **Expil Mech.**, 4, pp 19-25, (1980).
- [19] Takeda, N., Sierakowski, R.L. and Malvern, L.E. 'Transverse cracks in glass/epoxy cross-ply laminates impacted by projectiles', **J. Mater. Sci.**, 16, pp 2008-2011, (1981).
- [20] Shadbelt, P.J., Cerraa, R.S.J. and Ruiz, C. 'A preliminary investigation of plate perforation by projectiles in the subordnance range' **Report No 1372/81 (Univ of Oxford)**, UK, (1981).
- [21] Bradshaw, F.J., Derey, G. and Skley, G.R. 'Impact resistance of carbon reinforced plastics', **RAE TR 72240**, MOD, (1972).
- [22] Avery, J.G. Design Manual for Impact Damage Tolerant Aircraft Structures, **AGARDograph No 238**, NATO, (1981).
- [23] Retem, A. 'Residual flexural strength of FRP composite specimens subjected to transverse impact loading', **SAMPE Journal**, 124 No 2, pp 19-25, (1988).
- [24] Rea, C.A. and Sierakowski, R.L. 'Studies on the impact resistance of composite plates', **Composites**, 4, pp 157-161, (1973).
- [25] Broatman, L.J. and Retem, A. 'Impact strength and toughness of fiber composite materials' in Foreign Object Impact Damage to Composites', **ASTM STP 568 (American Society for Testing and Materials)**, pp 114—133, (1975).

- [26] Helflmtim, J.D. 'Charpy impact of unidirectional graphite/ aramid/epoxy hybrid composites', **Composite Materials Testing and Design (Fourth Conference)**, ASTM STP 617 (American Society for Testing and Materials), pp 375-388, (1977).
- [27] Husmn, G.E., Whitney, J.M. and Halpin, J.C. 'Residual strength characterization of laminated composites subjected to impact loading', **Foreign Object Impact Damage to Composites**, op.cit, pp 92-113.
- [28] Beaumont, P.W.R., Riewald, P.G. and Zweben, C. 'Methods for improving the impact resistance of composite materials' *ibid.* pp 134-158.
- [29] Novak, R.C. and de Crescente, M.A. in Composite Materials: Testing and Design (Second Conference), **ASTM STP 497 (American Society for Testing and Materials)**, pp 311-323, (1972).
- [30] Cheresh, M.C. and McMichael, S. 'Instrumented impact test data interpretation', **Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials**, ASTM STP 936 edited by S.L. Kessler, G.C. Adams, S.B. Driscoll and D.R. Ireland (American Society for Testing and Materials), pp 9-23, (1987).
- [31] Bader, M.G. and Ellis, R.M. 'The effect of notches and specimen geometry on the pendulum impact strength of uniaxial CFRP', **Composites**, 5, pp 253-258, (1974).
- [32] Kakarala, S.N. and Roche, J.L. 'Experimental comparison of several impact test methods', **Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials**, op. cit., pp 144-162.
- [33] Gillespie Jr, J.W., Carlsson, L.A. and Smlley, A.J. 'Rate dependent Mode I interlaminar crack growth mechanisms in graphite/epoxy and graphite/PEEK', **Composites Sci and Technol.**, 28, pp 1-15, (1987).
- [34] Beguefin, P. and Barbezat, M. 'Caracterisation mecanique des polymeres et compositest l'aide d'une machine d'essais rapides', **Proc 5th Journe Nationale D YMA T**, Bordeaux, France, 1989.
- [35] Harding, J. 'Impact damage in composite materials', **Sci. and Engng. of Composite Mater.**, I, pp 41—68, (1989).
- [36] AmiJima, S. and Fujli, T. 'Compressive strength and fracture characteristics of fiber composites under impact loading', **Progress in Science and Engineering of Composites, Proc 4th Int Confon Composite Mater**, edited by T. Hayashi, K. Kawata and S. Umekawa (Okasan & Co Ltd, Tokyo), pp 399-413, (1982).
- [37] Bai, Y. and Harding, J. 'Fracture initiation in glass reinforced plastics under impact compression', **Structural Impact and Crashworthiness**, Vol 2 edited by J. Morton (Elsevier Applied Science Publishers), pp 482—493, (1984).
- [38] Harding, J. and Welsh, L. 'A tensile testing technique for fibre.reinforced composites at impact rates of strain', **J Mater. Sci.**, 18, pp 1810-1826, (1983).
- [39] Cantwell, W.J. 'Impact damage in carbon fibre composites' PhD thesis, **Univ. of London**, UK, (1985).

- [40] Rhodes, M.D., Williams, J.G. and Starnes Jr, J.H. 'Low velocity impact damage in graphite-fiber reinforced epoxy laminates', **Proc 341h Ann Tech Conf**, Society of the Plastics Inst, section 20-D pp 1-10, (1979).
- [41] Morton, J., manuscript in preparation.
- [42] Degreleck, J. and Dechaene, R. 'Real time recording of transverse impact experiments on composite laminates', **Composites Evaluation, Proc 2nd Int Conf on Testing, Evaluation and Quality Control of Composites (TEQ C 87)**, (Butterworths, London, UK), pp 61—68, (1987).
- [43] Sjoblom, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M., 'On low-velocity impact testing of composite materials.', **J. Compos. Mater.**, 22, 30-52, (1988).
- [44] Shivakumar, K.N., Elber, W. and Illg, W., 'Prediction of low velocity impact damage in thin circular laminates', **AZAA J.**, 23(3), 442-449, (1985).
- [45] Cantwell, W.J. and Morton, J., 'The impact resistance of composite materials-a review.', **Composites**, 22(5), 347-362, (1991).
- [46] Abrate, S., 'Impact on laminated composite materials.', **Appl. Mech. Rev.**, 44(4), 155-190, (1991).
- [47] Liu, D. and Malvern, L.E., 'Matrix cracking in impacted glass/ epoxy plates.', **J. Compos. Mater.**, 21, 594-609, (1987).
- [48] Joshi, S.P. and Sun, C.T., 'Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact.', **In 'Proc. American Society of Composites 2nd Tech. Conf.**, DE, pp. 177-185, (23-25 September 1987).
- [49] Robinson, P. and Davies, G.A.O., 'Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites.', **Znt. J. Zmoact Enz.**, 12(2). 189-207, (1992).
- [50] Davies, d.A.O. and Robinson; P., 'Predicting failure by debonding/delamination.', **AGARD: 74th Structures and Materials Meeting**, 1992.
- [51] Joshi, S.P. and Sun, C.T., 'Impact induced fracture in a laminated composite.', **J. Compos. Mater.**, 19, 51-66, (1985).
- [52] Choi, H.Y., Wu, H.-Y.T. and Chang, F.K., 'A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part II Analysis.', **J. Compos. Mater.**, 25, 1012-1038, 1991.
- [53] Jih, C.J. and Sun, C.T., 'Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact.', **J. Compos. Mater.**, 27(7), 684-701, (1993).
- [54] Lee, S.-W.R and Sun, C.T., 'A quasi-static penetration model for composite laminates.', **J. Compos. Mater.**, 27(3), 251-271, (1993).
- [55] Cantwell, W.J. and Morton, J., 'Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP.', **Compos. Struct.**, 12, 39-59, (1989).

- [56] Wu, H.-Y.T. and Springer, G.S., 'Measurements of matrix cracking and delamination caused by impact on composite plates.', **J. Compos. Mater.**, 22, 518-532, (1988).
- [57] Chang, F.-K., Choi, H.Y. and Jeng, S.-T., 'Study on impact damage in laminated composites.', **Mech. Mater.**, 10, 83-95, (1990).
- [58] Choi, H.Y., Downs, R.J. and Chang, F.-K., 'A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I: Experiments.', **J. Com. Mater.**, 25, 992-1011, (1991).
- [59] Chbi, H.Y. and Chadg, F.-Y., 'Impact damage threshold of laminated composites.', In **'Failure Criteria and Analysis in Dynamic Response', AMD Vol. 107**, ASME Applied Mechanics Division, Dallas, TX, pp. 31-35, November 1990.
- [60] Choi, H.-Y., Wang, H.S. and Chang, F.-K., 'Effect of laminate configuration and impactor's mass on the initial impact damage of graphite/epoxy composite plates due to line loading impact.', **J. Compos. Mater.**, 26(6), 804-827, (1992).
- [61] Chang, F.-K. and Chang, K.-Y., 'A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations.', **J. Compos. Mater.**, 21, 834-855, (1987).
- [62] Cui, W. and Wisnom, M.R., 'A combined stress-based and fracture mechanics-based model for predicting delamination in composites.', **Composites**, 24(6), 467-474, (1993).
- [63] Wang, S.S., 'Delamination crack growth in unidirectional fiberreinforced composites under static and cyclic loading.', In **'Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)**, ASTM STP 674 (Ed. S.W. Tsai), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 642-663, (1979).
- [64] Liu, D., 'Impact-induced delamination-a view of bending stiffness mismatching.', **J. Compos. Mater.**, 22, 674-692, (1988).
- [65] Guild, F.J., Hogg, P.J. and Prichard, J.C., 'A model for the reduction in compression strength of continuous fibre composites after impact damage.', **Composites**, 24(4), 333-339, (1993).
- [66] Wu, E. and Shyu, K., 'Response of composite laminates to contact loads and relationship to low-velocity impact.', **J. Compos. Mater.**, 27(15), 1443-1464, (1993).
- [67] Choi, H.T. and Chang, F.-K., 'A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact.', **J. Compos. Mater.**, 26(14), 2134-2169, (1992).
- [68] Davies, G.A.O., Zhang, X. and Edlund, A., 'Predicting damage in composite aircraft structures due to low velocity impact.', **Aerotech Conference**, Birmingham, UK, January 1994.
- [69] Finn, S.R., He, Y.-F. and Springer, G.S., 'Delaminations in composite plates under transverse impact loads-experimental results.', **Compos. Struct.**, 23, 191-204, (1993).

- [70] Dorey, G., 'Impact damage tolerance and assessment in advanced composite materials.', **Seminar on Advanced Composites**, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, UK, 1986.
- [71] Dorey, G., 'Impact damage in composites-development, consequences, and prevention.', **Proc. 6th Int. Conf. on Composite Materials and 2nd European Conf. on Composite Materials**, Imperial College, London, Vol. 3, pp. 3.1-3.26, (1988).
- [72] Dorey, G., Sigety, P., Stellbrink, K. and Hart, W.G.J., 'Impact damage tolerance of carbon fibre and hybrid laminates.', **RAE Technical Report 87 057**, Royal Aerospace Establishment, Farnborough, UK, 1987.
- [73] Takeda, N., Sierakowski, R.L. and Malvern, L.E., 'Microscopic observations of cross sections of impacted composite laminates.', **Compos. Technol. Rev.**, 4(2), 40-44, (1982).
- [74] Liu, S., Kutlu, Z. and Chang, F.-K., 'Matrix cracking and delamination in laminated composite beams subjected to a transverse concentrated line load.', **J. Compos. Mater.**, 27(5), 436-470, (1993).
- [75] Garg, A.C., 'Delamination-a damage mode in composite structures.', **Eng. Fract. Mech.**, 29(5), 557-584, (1988).
- [76] Finn, S.R. and Springer, G.S., 'Delaminations in composite plates under transverse static or impact loads-a model.', **Compos. Struct.**, 23, 177-190, (1993).
- [77] Dorey, G., Sidey, G.R. and Hutchings, 'J. Impact properties of carbon fibre/Kevlar 49 fibre hybrid composites.', **Composites**, 9, 25-32, (1978).
- [78] Clarke, M.P. and Pavier, M.J., 'Artificial damage techniques for low velocity impact in carbon fibre composites.', **Compos. Struct.**, 25, 113-120, (1993).
- [79] Doxsee, L.E., Rubbrecht, P., Li, L., Verpoest, I. and Scholle, M., 'Delamination growth in composite plates subjected to transverse loads.', **J. Compos. Mater.**, 27(8), 764-781, (1993).
- [80] Razi, H. and Kobayashi, A.S., 'Delamination in cross-ply laminated composite subjected to low-velocity impact.', **AZAA J.**, 31(8), 1498-1502, (1993).
- [81] Lee, S. and Zahuta, P., 'Instrumented impact and static indentation of composites.', **J. Compos. Mater.**, 25, 204-222, (1991).
- [82] El-Habak, A.M., 'Effect of impact perforation load on GFRP composites.', **Composites**, 24(4), 341-345, (1993).
- [83] Chaturvedi, S.K. and Sierakowski, R.L., 'Effects of impactor size on impact damage-growth and residual properties in an SMCR50 composite.', **J. Compos. Mater.**, 19, 100-113, (1985).
- [84] Khetan, R.P. and Chang, D.C., 'Surface damage of sheet molding compound panels subject to a point impact loading.', **J. Compos. Mater.**, 17, 182-194, (1983).

- [85] Liu, D., Lee, C.Y. and Lu, X., 'Repairability of impact induced damage in SMC composites.', **J. Compos. Mater.**, 27(13), 1257-1271, (1993).
- [86] Hull, D., 'An Introduction to Composite Materials', **Cambridge University Press**, Cambridge; 1981.
- [87] Jang, B.Z., Chen, L.C., Hwang, L.R., Hawkes, J.E. and Zee, R.H., 'The response of fibrous composites to impact loading.', **Polym. Compos.**, 11(3), 144-157, (1990).
- [88] Sela, N. and Ishai, O., 'Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review.', **Composites**, 20(5), 423-435, (1989).
- [89] Moon, F.C., 'Wave propagation and impact in composite materials.', *In 'Composite Materials Vol. 7: Structural Design and Analysis- Part 1' (Eds L.J. Broutman and R.J. Krock)*, Academic Press, London, pp. 259-332, (1975).
- [90] Caprino, G., 'Residual strength prediction of impacted CFRP laminates.', **J. Compos. Mater.**, 18, 508-518, (1984).
- [91] Davies, G.A.O., Zhang, X., Zhov, G. and Watson, S., 'Numerical modellina of imoact damage.', **Composites**, 25(5). 342-350, (1994).
- [92] Broutmai, L.J. and Rotem, A., 'Impact strength and toughness of fiber composite materials.', *In 'Foreign Object Impact Damage to Composites', ASTM STP 568, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, pp. 114-133, (1975).
- [93] Sierakowski, R.L. and Chaturvedi, S.K., 'Impact loading in filamentary structural composites.', **Shock Vibration Digest**, 15(10), 13-31, (1983).
- [94] Caprino, G., Crivelli Visconti, I. and Di Rio, A., 'Elastic behaviour of composite structures under low velocity impact.', **Composires**, 15(3), 231-234, (1984).
- [95] Sims, G.D., 'Understanding Charpy impact testing of composite laminates.', *In 'Proc. 6th Int. Conf. on Composite Materials and 2nd European Conf. on Composite Materials'*, Imperial College, London, Vol. 3, pp. 3.494-3.507, (1988).
- [96] Hayes, S.V. and Adams, D.F., 'Rate sensitive tensile impact properties of fully and partially loaded unidirectional composites.', **J. Tesfing Ed.**, 10(2), 61-68, (1982).
- [97] Li, Y.L., Harding, J. and Ruiz, C., 'Modelling of the impact response of fibre reinforced composites.', **Report OU-DESQUEL 1863/90**, University of Oxford Department of Engineering Science, (1990).
- [98] Ruiz, C. and Xia, Y.R., 'The significance of interfaces in impact response of laminated composites.', *In 'Composite Material Technology'*, PD Vol. 37, ASME Petroleum Division, New York, pp. 161-166, (1991).
- [99] Wu, H.-Y.T. and Springer, G.S., 'Impact induced stresses, strains, and delaminations in composite plates.', **J. Compos. Mater.**, 22, 5333560, (1988).

[100] Nettles, A.T. and Hodge, A.J., 'Compression-after-impact testing of thin composite materials.', *In 'Proc 23rd Int. SAMPE Tech. Conf.'*, pp. 177-183, (21-24 October 1991).

[101] Jones, R., Paul, J., Tay, T.E. and Williams, J.F., 'Assessment of the effect of impact damage in composites: some problems and answers.', *Compos. Struct.*, 10(1), 51 -73, (1988).

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- "Residual mechanical properties of carbon / polyphenylenesulphide composites after solid particle erosion", Tamer Sınmazçelik, Sinan Fidan, Volkan Günay, Materials & Design, 29, 1419 - 1426, (2008).
- "Composite Impact Damage Investigation with Micro-CT", Sinan FİDAN, Egemen AVCU, Tamer SINMAZÇELİK, SkyScan Micro-CT User Meeting Abstract Book 2011, SkyScan User Meeting 2011, Leuven / Belgium, 187-191, (2011).
- "Detecting Impact Damages in an Aramid/Glass Fiber Reinforced Hybrid Composite With Micro Tomography", Sinan Fidan, Tamer Sınmazçelik, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban, 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, İstanbul, (2011).
- "The influence of different circular hole formations on interlaminar shear strength of a novel fiber metal laminates", M. Özgür BORA, Onur ÇOBAN, Egemen AVCU, Sinan FİDAN, Tamer SINMAZÇELİK, İsmail CÜRGÜL, , 5th Edition of International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites THEPLAC 2011, Italy, (2011).
- "Kompozit Uçak Yapılarında Gömülü Tahribatsız Muayene Sensörleriyle Eş Zamanlı Hasar İzleme Yöntemleri", Sinan FİDAN, Egemen AVCU, Mühendis ve Makina, Cilt: 52 Sayı:614, 94-102, (2011).
- "Düşük Hızlı Darbe Yüklemeleri Sonucu Kompozit Malzemelerde Ortaya Çıkan Hasar Mekanizmaları", Sinan Fidan, Tamer Sınmazçelik, Mustafa Özgür Bora, Onur Çoban, Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt:51 SAYI:611, (2010).
- "Düşük Hızlı Darbe Yüklemeleri Sonrası Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Ortaya Çıkan Hasar Konisinin İncelenmesi", Sinan Fidan, Tamer Sınmazçelik, Onur Çoban, Mustafa Özgür Bora, 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, K102, (2010).
- "Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitte Tekrarlı Darbe Yüklemeleriyle Oluşan Hasar Mekanizmaları", Sinan Fidan, Egemen Avcu, Tamer Sınmazçelik, 1. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, K24, (2011).

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İzmir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Manisa / Salihli’de tamamladı. 1996 yılında Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. kazandı ve 1998 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldu. 1998 yılı eylül ayında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği bölümünü kazandı ve 2002 yılı bahar yarıyılı sonunda bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2003 yılı güz yarıyılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve 2005 yılında mezun oldu. 2007 bahar yarıyılı başlangıcında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı.

2004 yılı Ocak ayında Kocaeli Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu’nda öğretim görevlisi olarak işe başladı. 2006 – 2009 yılları arasında Sivil Havacılık Yüksekokulunda bölüm başkanı olarak görev yaptı. 2009 yılında atandığı Kocaeli Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Müdür Yardımcılığı görevini halen asaleten yürütmektedir. Ayrıca Kocaeli Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu yönetim kurulu üyeliği 2005 yılından beri devam etmektedir.