

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BALİSTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN
KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE
DAVRANIŞINA DEĞİŞİK FORMLARDAKİ
VURUCU UÇLARIN ETKİSİ

Sonay DOĞAN

Eylül, 2020
İZMİR

**BALİSTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN
KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE
DAVRANIŞINA DEĞİŞİK FORMLARDAKİ
VURUCU UÇLARIN ETKİSİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

Sonay DOĞAN

Eylül, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SONAY DOĞAN, tarafından **PROF. DR. YUSUF ARMAN** yönetiminde hazırlanan “**BALİSTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞINA DEĞİŞİK FORMLARDAKİ VURUCU UÇLARIN ETKİSİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Yönetici

Dr. Öğr. Üyesi Aytaç GÖREN

Jüri Üyesi

Doç. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, eğitim sürecimde değerli bilgilerini benimle paylaşan ve destekleyen saygıdeğer danışman hocam, Prof. Dr. Yusuf ARMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans yapmama destek olan, beni her zaman cesaretlendiren ve güvenen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU ve Dr. Öğr. Üyesi Aytaç GÖREN'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmam boyunca teknik bilgi desteğinden ve yardımlarından ötürü saygıdeğer Araş. Gör. Akar DOĞAN'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince beni her zaman destekleyen aileme ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Sonay DOĞAN

BALİSTİK UYGULAMALARDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞINA DEĞİŞİK FORMLARDAKİ VURUCU UÇLARIN ETKİSİ

ÖZ

Fiber takviyeli polimer matris kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemetleri ve sertlik özelliklerinden dolayı savunma sanayi, otomotiv endüstrisi, uçak üretimi vb. yüksek performans gerektiren birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler kullanım süresi boyunca çeşitli dış etkilere maruz kalmaktadır ve bu etkiler yüzey tabakasının bölgesel olarak kaymasına ve delaminasyona neden olmaktadır. Bu çalışmada balistik uygulamalara uygun olarak seçilen ve aynı kalınlıkta üretilen farklı takviye malzemelerine sahip kompozit plakaların düşük hız darbe davranışları farklı açıdaki darbe uçlarıyla ve farklı ortam sıcaklıklarında deneysel olarak araştırılmıştır.

Düşük hız darbe testinde kullanmak amacıyla 300 g/m^2 alan yoğunluğuna sahip 3/1 dimi dokuma Kevlar kumaş, 200 g/m^2 alan yoğunluğuna sahip bezayağı dokuma karbon kumaş ve 190 g/m^2 alan yoğunluğuna sahip bezayağı dokuma S-2 cam kumaş kullanılmıştır. Epoksi reçine kullanılarak vakum destekli reçine infüzyon üretim yöntemi ile termoset kompozit plakalar üretilmiştir. Düşük hız darbe testi 12,7 mm çapına sahip yarı-küresel, konik 1 ($d=9 \text{ mm}$, $D=12,7 \text{ mm}$) ve konik 2 ($d=2 \text{ mm}$, $D=12,7 \text{ mm}$) darbe uçları ile gerçekleştirilmiştir. Farklı darbe uçlarının karakteristik performanslarının sonuçları belirlenerek 20J, 40J ve 60J enerji değerleri için kuvvet deformasyon grafikleri elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca üç farklı kompozit plaka için 23°C , 50°C ve 80°C sıcaklıklarında yarı-küresel ve konik 1 uçları ile darbe testi yapılarak farklı ortam sıcaklıklarının etkisi enerji grafikleri çizilerek karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Düşük hız darbe, darbe ucu etkisi, balistik kompozitler

EFFECT OF IMPACTOR NOSES IN DIFFERENT FORMS ON IMPACT BEHAVIOUR OF COMPOSITE MATERIALS USED IN BALLISTIC APPLICATIONS

ABSTRACT

Composite materials are widely used in many high-performance applications such as, defence industry, automotive industry ve aircraft industry due to their high specific strength and stiffness properties. One of the most important problem that has restricted the full potential of composites is their response to impact loading. Composite materials are exposed to various external influences over the life of the product and these impacts can cause local deflection of the face sheet and delamination.

This study reports on the results of an experimental investigation on the influence of impactor shape and ambient temperature on low velocity impact behavior of the composite panels manufactured different type of reinforcement at the same thicknesses. 3 / 1 twill Kevlar woven fabric with areal density of 300 g/m², plain weave carbon woven fabric with areal density of 200 g/m² and plain weave S-2 glass woven fabric with areal density of 190 g/m² and epoxy matrix were used to produced thermoset composite with the vacuum-assisted resin infusion molding (VARIM) method. Impact tests were performed by using Fractovis Plus test machine with 12.7 mm diameter hemispherical, conical 1 (d= 9 mm, D= 12.7 mm) and conical 2 (d= 2 mm, D= 12.7mm) impactor noses. The result of impactor shape characteristic and performance are indicated and compared for 20J, 40J and 60J energy levels by comparing te results on the force-deformation graphics. In addition, three different composite panels are tested with hemispherical and conical 1 impact noses and results are compared for effect of 23°C, 50°C 80°C ambient temperatures by the energy graphics.

Keywords: Low-velocity impact, impact nose effect, ballistic composites

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1 Kompozit Malzeme Bileşenleri	7
2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	8
2.2.1 Elle Tabakalama Yöntemi	8
2.2.2 Vakum Destekli Reçine Transfer İnfüzyonu Yöntemi	9
2.2.3 Sprey Kalıplama / Püskürtme Yöntemi	10
2.2.4 Filament Sarma Yöntemi	11
2.2.5 Pultrüzyon Yöntemi	11
2.2.6 Pres Kalıplama	12
2.3 Kompozit Malzemelerde Darbe Testi Yöntemleri	13
2.3.1 Yüksek Hız Darbe Testi Yöntemi	13
2.3.2 Düşük Hız Darbe Testi Yöntemi	15
2.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	16
BÖLÜM ÜÇ – MALZEME VE YÖNTEM	19
3.1 Kullanılan Malzemeler	19
3.1.1 Kevlar Fiber	19
3.1.2 Karbon Fiber	19

3.1.3 S-2 Cam Fiber.....	20
3.1.4 Epoksi Reçine	20
3.2 Yöntem	20
3.2.1 Kullanılan Cihazlar	21
3.2.2 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Masası	21
3.2.3 Düşük Hız Darbe Test Cihazı	22
BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1 Kompozit Malzemelerin Üretimi	23
4.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması	25
4.3 Darbe Deneyi.....	26
BÖLÜM BEŞ – DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	27
BÖLÜM ALTI –YARGILAR VE SONUÇLAR	39
KAYNAKLAR	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin matris ve takviye bileşenlerinin gösterimi	7
Şekil 2.2 Elde yatırma yönteminde kumaşa reçine emdirilmesi	9
Şekil 2.3 Vakum destekli reçine transfer infüzyonu yöntemi ile malzeme üretimi ...	10
Şekil 2.4 Püskürtme Yöntemi	10
Şekil 2.5 Filament Sarma Yöntemi	11
Şekil 2.6 Pultrüzyon Yöntemi	12
Şekil 2.7 Pres Kalıplama Yöntemi	12
Şekil 2.8 Split Hopkinson yüksek hız darbe test cihazı	14
Şekil 2.9 Split Hopkinson yüksek hız darbe testi deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.10 Düşük darbe test cihazı	16
Şekil 2.11 Uçak üretiminde kompozit malzeme kullanım	17
Şekil 2.12 Askeri araçlarda balistik kompozitlerin kullanımı.....	17
Şekil 4.1 a) Çalışmada kullanılan vakum destekli reçine infüzyon masası b) Manuel kontrol ekranı.....	21
Şekil 4.2 a) Düşük hızlı darbe test cihazı b) Ön yükleme aparatı	22
Şekil 4.3 a) Kumaşların vakum masasına serilmesi, b) Kumaşların vakum torbasıyla vakum masasına bağlanması ve c) kumaşların vakumlanması ve reçine infüzyon	24
Şekil 4.4 Darbe numunelerinin hazırlanması	25
Şekil 4.5 a) Yarı-küresel uç çapı: Ø12.7 mm, Konik Uç 2 çapı: d= 2 mm, D= 12.7mm A= 900, Konik uç 1 çapı: d= 9 mm, D= 12.7 mm A= 450 b) Konik uçların geometrisi (mm)	26
Şekil 5.1 Konik 1 darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C).....	28
Şekil 5.2 Konik 2 darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C).....	29
Şekil 5.3 Yarı-küresel darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C).....	30
Şekil 5.4 Darbe testi sonrası konik darbe ucu 1 ile test edilen numunelerin arka ve ön	

yüzünün görüntüsü	31
Şekil 5.5 Darbe testi sonrası konik darbe ucu 2 ile test edilen numunelerin arka ve ön yüzünün görüntüsü	31
Şekil 5.6 Darbe testi sonrası yarı-küresel darbe ucu ile test edilen numunelerin arka ve ön yüzünün görüntüsü.....	32
Şekil 5.7 Absorbe edilen enerjinin 23 °C’de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune	33
Şekil 5.8 Absorbe edilen enerjinin 50 °C’de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune	34
Şekil 5.9 Absorbe edilen enerjinin 80 °C’de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune	35
Şekil 5.10 S-2 Cam kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C’deki enerji profil diyagramları	37
Şekil 5.11 Karbon kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C’deki enerji profil diyagramları	37
Şekil 5.12 Kevlar kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C’deki enerji profil diyagramları	38

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Üretimde kullanılan kumaşların yapısal parametreleri	23
Tablo 4.2 Kompozit numunelerin kat sayıları ve kalınlıkları	25



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kompozit malzemeler ağırlık oranlarına rijitlikleri, sertlikleri ve yüksek enerji emme potansiyeline sahip olmaları sebebiyle otomotiv, savunma sanayi, uzay ve denizcilik sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Matrisin, takviyelerin özelliklerinin ve ara yüzeylerindeki yapışma dayanımlarının kompozit malzemelerin mekanik davranışlarında önemli rol oynadığı bilinmektedir (Vasiliev, 1988). Matris çatlaması, lif kırılması ve özellikle tabakaların delaminasyonu kompozit plakalarda meydana gelen bozulmaların ana nedenlerinden bazılarıdır. Kompozit malzemelere uygulanan düşük hız darbe testi sırasında meydana gelen bozulmaların ana nedenleri ise darbe ucunun formu, yükleme hızı, malzeme kalınlığı ve katların yerleşimi ile alakalıdır (Agrawal, Singh, ve Sarkar, 2014). Konuyla ilgili çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir. Darbe yüklemesi testi ile delaminasyon direnci ve darbe ucu etkisini araştırmak üzere yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir:

AA1100 dereceli alüminyum ince plakanın düşük hız darbe karakteristiğini keskin olmayan, yarı-küresel, sivri ve konik şekle sahip darbe uçları ile araştırmışlardır. Darbe ucunun temas kuvvetine, absorbe edilen enerji dağılımına, delinmeye ve hata türlerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 2, 4, 6, 10, 14, 16, 18 ve 22 J enerji değerleri ile 1,15–3,80 m/s hız aralıkları kullanılmıştır. Sonuç olarak, darbe ucu yarıçapının artışının temas kuvvetindeki artış nedeniyle delinme süresini azalttığı görülmüştür. Ayrıca keskin olmayan darbe ucu yüksek darbe dayanımı göstermiş ve yarı-küresel uç yüksek enerji emme kapasitesi kazanmıştır (Sahu ve Ansari, 2019).

Khalkhali, Geran, ve Bozorgi (2018), çalışmasında farklı geometrik şekillere sahip darbe uçlarını kullanarak karbon nanotüp takviyeli kompozit yüzey plakaları ile basitçe desteklenmiş bir sandviç tabakanın doğrusal olmayan düşük hız darbe etkisini incelemişlerdir. Sonuca göre baştaki kinetik enerjinin incelenen parametrelerden biri olarak değişmesinin konik ve silindirik darbe uçlarında merkezi yer değiştirme, temas kuvveti ve çentik üzerinde önemli etkileri olduğu ayrıca

silindirin yarıçapındaki değişimin merkezi yer değiştirme üzerinde önemsiz bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

Kursun, Senel, ve Enginsoy (2016), darbe ucu şekillerinin alüminyum sandviç kompozit levhaların düşük hız darbe performansı üzerindeki etkilerinin deneysel ve sayısal analizini yapmışlardır. Malzemelere 12mm çapındaki çelik konik, yarı küresel, düz ve keskin olmayan uçlarla ağırlık düşürme test cihazında 29,43 J ve 44,15 J gibi farklı başlangıç enerji değerleri ile darbe uygulanmıştır. Sonlu elamanlar yönteminin sonuçları, temas kuvveti geçmişleri, enerji geçmişleri ve absorbe edilen enerji geçmişleri açısından deneysel veriler ile iyi bir ilişki göstermiştir fakat sandviç kompozitlerin deneysel verilerinde hatalar olduğu saptanmıştır.

Doğan ve Arman (2019), sıcaklık ve darbe ucu çapının dokuma cam takviyeli poliamid 6 (PA6) ve polipropilen (PP) termoplastik kompozitlerin darbe davranışına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit malzemelerin kalınlığı 4 mm olarak üretilmiştir ve 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130 ve 170 J darbe enerjisi seviyelerinde malzemeler test edilmiştir. Test için 7, 12 ve 20 mm olmak üzere 3 farklı çapa sahip yarı-küresel darbe ucu kullanılmıştır ve malzemeler oda sıcaklığında test edilmiştir (25⁰C ve 75⁰C). Sonuç olarak aynı kalınlıktaki polipropilen (PP) termoplastik kompozitler poliamid 6 (PA6)' dan daha fazla enerji absorbe etmiştir ve her iki malzemeninde absorbe ettiği enerji sıcaklık ile azalmıştır.

Liu ve diğer. (2017), düşük hız darbe testi ile ön yüzeyinde karbon fiber takviyeli polimer ve kor malzemesi olarak alüminyum alaşım kullanarak ürettikleri kıvrımlı hibrit kor sandviç yapıların darbe ucu şeklinin etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak enerji absorbe etme performansı konik darbe ucu ile test edilen malzemede en az ve düz darbe ucuyla delinme olmayan durumlar için en fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Zarei, Sadighi, ve Minak (2017), bir kademeli gaz tabancası kullanarak cam laminat alüminyum takviyeli epoksinin balistik sınırını incelemişlerdir. Malzemeye düz ve konik forma sahip mermiler ile darbe uygulamışlardır. Çalışma sonucunda düz forma sahip mermi ile vurulan malzemenin balistik sınırının konik mermi ile vurulandan daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ansari, Chakrabarti, ve Iqbal (2017), konik uçlu çelik mermiler kullanarak cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin balistik performanslarını deneyler ve sonlu elemanlar simülasyonları yöntemiyle incelemişlerdir. Bu çalışmada, hedef kalınlığın, geometrinin ve sınır koşullarının etkileri temas kuvveti, oluşan hasar ve artık hız üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca, hedeflenen hız limiti ve absorbe edilen enerji kapasitesi değişen hedef kalınlık, boy-en oranı ve sınır şartları ile tartışılmıştır. Sonuca göre, hedef kompozitin balistik performansı boy-en oranı arttıkça artmıştır. Boy-en oranı etkisinin daha kalın hedefte daha belirgin olduğu ve hedefin enerji absorbe etme kapasitesinin en-boy oranı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Ansari ve Chakrabarti (2017), tabakalı cam fiber takviyeli kompozit tabakaların dinamik davranışları üzerinde darbe ucu açısının ve sınır koşullarının etkisini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı sınır koşulları göz önünde bulundurularak konik darbe ucunun açısının yanı sıra deneysel olarak çalışmışlardır ve tabakalı cam fiber takviyeli kompozit plakaya pnömatik tabanca kullanılarak konik uçlu çelik vurucu ile darbe uygulanmıştır.

Çalışmalar sonucunda, kompozit tabakanın arka yüzeyindeki basınç dalgası değişiminin ön yüzeyindekinden fazla olduğu ve bu nedenle arka yüzeyde oluşan hasarında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre, yüzeydeki kesme kırılması aynı zamanda kompozit plakanın arka yüzeyinde de meydana gelmektedir.

Li ve diğer. (2017), düşük hız darbe yüklemelerine maruz kalmış çekmeli cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin darbe davranışını incelemişlerdir. Kompozit malzemeler 16,75 Joule ile 67 Joule arasında değişen daha yüksek darbe enerjileri ile test edilmiştir. Darbe karakteristikleri, yük-yön değiştirme eğrileri, yük-zaman eğrileri ve merkezi sapma zamanı açısından sunulmuştur. Darbe performansı yön ve maksimum yük açısından incelenmiştir ve farklı darbe enerjisi seviyeleri için karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, darbe enerji seviyesinin yükselmesi ile merkezi sapma ve maksimum darbe kuvvetinin doğrusal bir eğilimde arttığı gözlemlenmiştir.

Krollmann ve diğer. (2019), düşük hız darbe yüklemesi altında hibrit matris kompozit tabakaların davranışlarının darbe ve darbe sonrasında özelliklerini farklı enerji seviyelerinde incelemişlerdir. Hibrit matris malzemeler farklı ara katmanlara sahip fiber takviyeli elastomer ve karbon fiber takviyeli elastomer ile üretilmiştir. Malzemeler darbe testi sonrasında hız darbelerine ve sıkıştırmaya maruz bırakılmıştır. Ayrıca malzemelerin hasarı ve tepkisi ultrasonik C-taramaları, görsel hasar incelemesi, mikrografi, kuvvet-zaman eğrisi, sıkıştırma kuvveti ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri açısından analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda karbon fiber takviyeli elastomerin kat sayısı arttıkça maksimum sapma ve enerji absorbe etme kapasitesi de önemli derecede artmıştır.

İçten, Kırıl, ve Deniz (2013), düşük hız darbe yüklemesi altında test edilen dokunmuş cam epoksi tabakalarda darbe ucu çapının etkisini incelemişlerdir. Malzemeler 12,7 mm, 20,0 mm, 25,4 mm ve 31,8 mm çapına sahip 4 farklı yarı-küresel darbe ucu ile farklı enerji seviyelerinde test edilmiştir. Sonuç olarak darbe ucu çapının kompozit malzemelerin darbe ve darbe sonrası sıkıştırma tepkisini etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Taghizadeh ve diğer. (2019), yaptıkları çalışmada alüminyum, Dyneema ve cam dokuma kumaş yüzeylerine sahip silindirik çentik açıcıların çok katmanlı kompozit paneller halinde yarı statik penetrasyon sürecini farklı darbe uçları ile incelemişlerdir.

Körbelin, Derra, ve Fiedler (2018), düşük hız darbe yüklemelerinde sıcaklık ve darbe enerjisinin karbon fiber takviyeli plastiklerde meydana gelen hasar üzerindeki etkisini incelenmiştir. 4,1 mm kalınlığa sahip yarı-izotropik tabakalar 8 ve 21 J enerji seviyelerinde 20 °C ve 80 °C’ de test edilmiştir. Sonuç olarak delaminasyon boyutunun sıcaklık artışıyla azaldığı ve görsel hasar şiddetinin basınç dayanımı ile ilişkili olmadığı gözlemlenmiştir.

Millán ve diğer. (2018), darbe yüklemeleri altında alüminyum alaşım 2024-T351’in mekanik davranışını sayısal ve deneysel teknikleri birleştirerek incelemişlerdir. 4 mm kalınlığa sahip malzemelere 50 m/s ve 200 m/s hızları arasında darbe uygulanmıştır ve konik, yarı-küresel ve keskin olmayan darbe ucuna göre yükleme durumu değiştirilmiştir. Alüminyum alaşım 2024-T351’in darbe yükü

altındaki mekanik davranışını sayısal olarak incelemek için ABAQUS/Explicit'te üç boyutlu bir model geliştirilmiştir. Sonuç olarak, artık ve balistik limit hızları açısından sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Boyd ve diğer. (2018), laminat içindeki yapısal katların ayrılmasına izin verilmesini sağlamak ve delaminasyonu önlemek amacıyla kompozit laminatlarda termoplastik poliüretan kullanarak ara katmanlar oluşturmuşlardır. Bu çalışmada kompozit yapıdaki delaminasyon direncini ve dayanıklılığını arttırmayı hedeflemişlerdir. Farklı ara katman kalınlıkları ile üretilen numuneler, delaminasyon direncindeki önemli iyileşmeyi göstermek amacı ile düşük hız darbe testi ile karakterize edilmiştir. Yapılan deneyler ve sonlu elemanlar analizi sonucunda, kullanılan termoplastik poliüretan ara katmanların, yapısal katların ayrılmasına izin veren tabaka içi kesme geriniminin gelişimine izin verdiği ve böylece katmanlar arasında kesme gerilmelerini azalttığı görülmüştür.

Evcı, ve Gülgeç (2012), üç farklı kompozit yapıda darbe hasarı büyümesini, maksimum kuvvet eşiklerinin ve Hertz kırılmasının belirlenmesi üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, tek yönlü E-cam, dokuma E-cam ve dokuma Aramid kompozit numunelerinin düşük hız darbe etkisi altında geri tepme, delinme ve delinme eşiği limitlerini incelemişlerdir. Yapılan araştırma sonucunda ise, dokuma kompozit yapıların düşük hız darbe etkisinin koruma sınırında tek yönlü kompozit numunelerden daha üstün olduğu fakat tek yönlü kompozitlerin statik yükleme altında dokuma kompozitlerden daha üstün olduğu görülmüştür.

Kazemianfar, Esmaeeli, ve Nami (2020), üç boyutlu (3D) kompozitlerin farklı geometrilere sahip darbe uçları ile düşük hız darbe etkisi altında tepkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında E-cam ve doymamış polyester reçinesi ile üretilen numuneleri kullanarak konik, yarı-küresel ve düz darbe uçları ile test etmişlerdir. Darbe olayının simülasyonunu oluşturmak amacıyla sonlu elemanlar paketi olan ABAQUS programıyla çalışmışlardır. Sonuç olarak, düz geometriye sahip darbe ucunun numunelerde daha büyük hasar alanları ve eşik yükleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, hasarın başlama zamanının darbe ucunun şekli ile herhangi bir bağlantısının olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu alıřmada Kevlar, karbon ve S-2 cam fiber takviyeli kompozitlerin dūřuk hız darbe performansları řekil 4.5'te gōsterildięi gibi konik 1, konik 2 ve yarı-kūresel uca sahip ū farklı formda vurucu ile dūřuk hız darbe testleri yapılarak ile incelenmiřtir. Malzemeler test edildikten sonra sonuçlar 20J, 40J ve 60J darbe enerji seviyeleri ve 23⁰C, 50⁰C and 80⁰C olarak belirlenen farklı sıcaklık seviyeleri için karřılařtırılmıřtır. Sonuç olarak sıcaklıęın malzemelerin darbe tepkisi ūzerinde etkisi olmadığı ve kompozit malzemelerin aynı kalınlıęa sahip olmasına raęmen kumař kat sayısının darbe tepkisini önemli ōlde etkiledięi gōrūlmüřtūr.

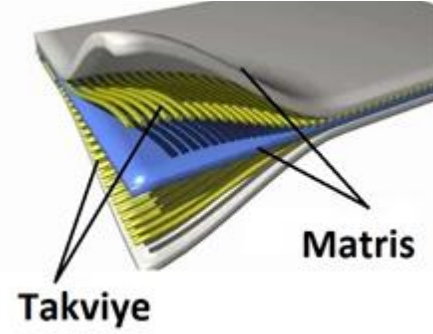


BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Kompozit malzemeler makro ölçüde birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin yüzey boyunca bir araya getirilmesi ile oluşturulmuş, kullanılan malzemelerin iyi özelliklerini barındıran malzeme grubu olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemelerin elde edilmesindeki temel kural bir takviye ve matris malzemelerinden oluşmasıdır. Bu malzemeler kompozit yapıya sertlik, rijitlik, koruma ve esneklik gibi özellikler kazandırmaktadır. Takviye malzemelerinin kompozit malzemedeki temel fonksiyonları, yük taşıma, mukavemet, termal stabilite elektrik iletkenliği veya yalıtımı sağlarken matris malzemeler yapıya rijitlik ve şekil verir. Ayrıca matris malzemeler, kompozit yapıları aşınmalara, hasarlara ve çeşitli kimyasallara karşı lifleri koruyarak iyi bir yüzey kalitesi sağlamaktadır (Dogan, Kayacan, ve Gören, 2018). Şekil 2.1’de bir kompozit malzemenin matris ve takviye bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin matris ve takviye bileşenlerinin gösterimi (Idreva, 2016)

Kompozit malzemelerde takviye ana malzemesi olarak genellikle polimerler, seramik, plastiki, lifler ve metaller kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak ise termoset reçineler (epoksi reçine, polyester vb.), termoplastikler (Alifatik poliamidler, poliesterler (PET), polikarbonatlar, polifenilen sülfid (PPS), polieterimid (PEI) vb.) ve alaşımlar (Alüminyumve alaşımları, titanium alaşımları, magnezyum alaşımları, bakır alaşımları, nikel esaslı süperalaşımlar, paslanmaz çelikler vb.) kullanılmaktadır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılacak takviye malzemeleri, matris malzemeleri ve kullanım alanına göre üretim yöntemi değişebilmektedir. Kompozit üretiminde kullanılan yöntemler:

- Elle tabakalama yöntemi
- Vakum destekli reçine transfer infüzyonu yöntemi
- Sprey kalıplama / püskürtme yöntemi
- Filament sarma yöntemi
- Pultrüzyon yöntemi
- Press Kalıplama

Bu yöntemlerin uygulandığı aşağıdaki başlıklarda incelenmiştir.

2.2.1 Elle Tabakalama Yöntemi

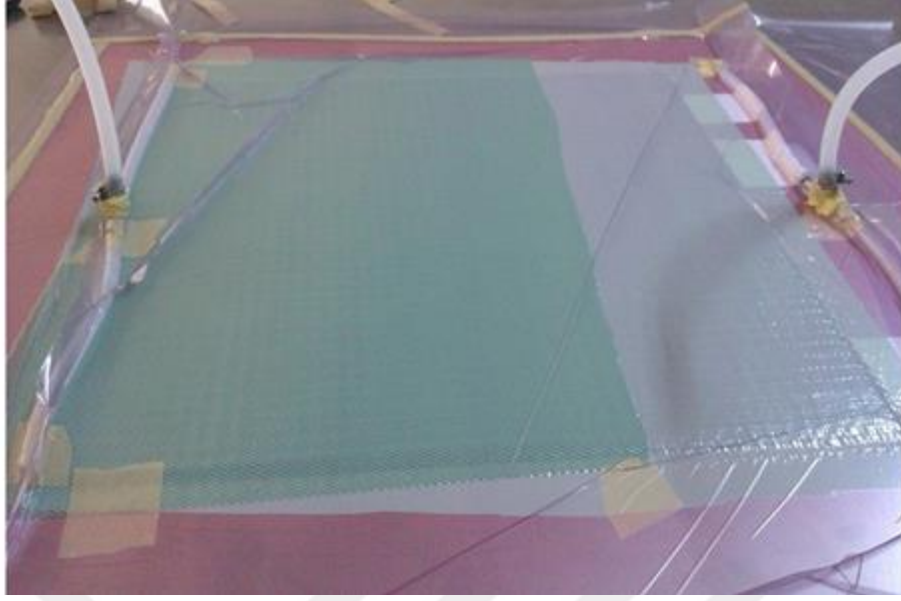
Bu yöntem kullanılan en basit, düşük hacimli ve az üretim düzeylerinde kullanılan en yaygın kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemin üretiminde parça üretilecek parçaların boyutlarında kısıtlama olmaması, maliyetinin düşük olması, yerinde kalıplama yapabilme ve gereken durumlarda tasarımında değişiklik yapabilme gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanında üretimin sadece bir yüzeyinin düzgün olması, üretim kalitesinin üreten kişinin yeteneklerine bağlı olması ve ürünün kalıp özellikleriyle sınırlandırılması dezavantajlarına sahiptir. Şekil 2.2’de elde yatırma yöntemiyle yapılan bir üretimden alınan resim yer almaktadır. İstenilen boyutta serilen kumaşlar üzerine rulo ile reçine-sertleştirici karışımı emdirilip oda sıcaklığında 24 saat kurumaya bırakılmaktadır.



Şekil 2.2 Elde yatırma yönteminde kumaşa reçine emdirilmesi (Kişisel arşiv, 2016)

2.2.2 Vakum Destekli Reçine Transfer İnfüzyonu Yöntemi

Bu yöntemi elde yatırmadan ayıran fark reçine emdirme işleminin vakum altında yapılmasıdır. Üretim özel olarak belli boyutlarda tasarlanan bir masa üzerinde gerçekleştirilir ve vakum torbasına alınıp vakumlandıktan sonra reçine cihaz tarafından verilir. Üretim vakum altında yapıldığı için, üretilen ürünün mukavemeti önemli derecede artırılması, homojen bir reçine dağılımının olması, her iki yüzeyinde pürüzsüz olması ve büyük parçaların üretilmesi gibi avantajları vardır. Üretimin maliyetinin yüksek olması ve üretim hızının düşük olması da bu üretim yönteminin dezavantajlarındandır. Şekil 2.3'te vakum infüzyon masasında üretilen bir ürünün görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.3 Vakum destekli reçine transfer infüzyonu yöntemi ile malzeme üretimi (Kişisel arşiv,2018)

2.2.3 Sprey Kalıplama / Püskürtme Yöntemi

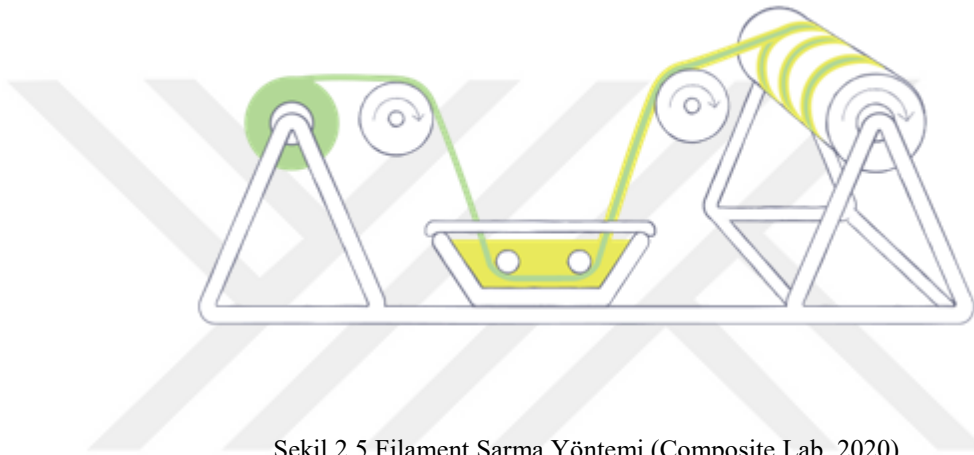
Bu yöntem elle tabakalama yönteminin makineleşmiş hali olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde takviye ve reçine sertleştirici karışımının yüzeye bir sprej tabancası yardımıyla püskürtülerek uygulanmaktadır. Böylece takviye malzemeleri ve reçine yüzeye yapıştırılır (Mazumdar, 2002). Elle tabakalama yöntemine göre maliyeti düşük ve hızlıdır. Şekil 2.4'te püskürtme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Püskürtme Yöntemi (Composite Manufacturing, 2015)

2.2.4 Filament Sarma Yöntemi

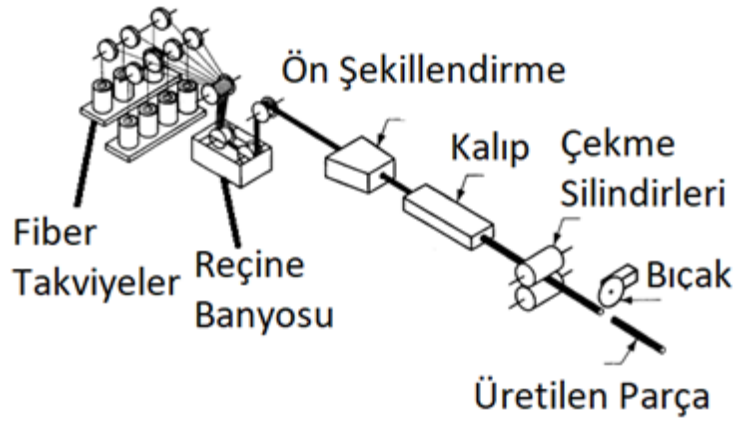
Bu yöntem, sürekli liflerin reçine içerisinde geçirilerek dönen bir mandrel üzerine belirlenen açıda sarılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle çok yüksek lif oranına sahip ve yüksek dayanımda küresel, konik ve silindirik forma sahip basınçlı kap ve tüp gibi yapıların üretiminde kullanılmaktadır (Mazumdar, 2002). Düşük maliyetle ve otomasyonla, büyük parçalar kolay bir şekilde üretilmektedir. Şekil 2.5'te bu yönteme ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 2.5 Filament Sarma Yöntemi (Composite Lab, 2020)

2.2.5 Pultrüzyon Yöntemi

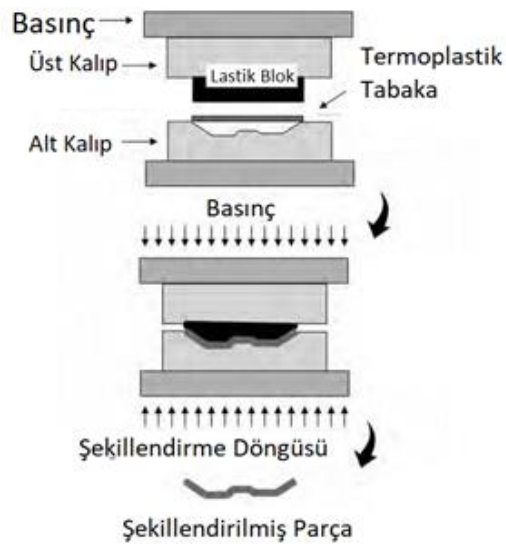
Bu yöntem yanmaya karşı dayanıklılık, tasarım esnekliği, korozyona ve kimyasallara karşı dayanıklılık, boyutsal stabilite, yüksek elastikiyet vb. özelliğe sahip ürünlerin üretilmesine olanak sağladığı için kompozit üretim yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir. Pultrüzyon yönteminde, sürekli takviye liflerinin reçine ile empreylenme edilmesi ve sonrasında katı bir kompozit yapıya dönüştürülmesi işlemidir. Aslı bobin üzerinden çekilerek bir araya getirilen fiberler reçine açık bir reçine banyosuna gönderilir. Daha sonra reçine ile yoğun temasından sonra fazla reçine üzerinden sıyrılır ve ön form verilmiş boyutlara getirilir. Nihai boyuta gelen fiberler sıcak kalıplardan geçirilir ve kalıpların sıcak olması sayesinde fiber üzerindeki reçinenin kalıplardan geçişi esnasında kurlenmesi sağlanarak malzeme sertleştirilmiş olur (Campbell, 2010) Pultrüzyon prosesi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Pultrüzyon Yöntemi (Campbell, 2010)

2.2.6 Pres Kalıplama

Bu yöntem üretimin boyutlarına göre hızlı ve seri bir kalıplama yöntemidir. Ürünün iki yüzeyinin de kalıp ile şekillendirilmesi, farklı cidar kalınlıkları, metal parçalarının ürüne gömülebilmesi ve karmaşık şekillerin üretimine olanak sağlaması gibi avantajlara sahiptir. En yaygın press kalıplama hammaddeleri ise kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan BMC ve SMC malzemeleridir. BMC hamur press kalıplama bileşimleri ve SMC levha pres kalıplama bileşimleridir (Mazumdar, 2002). Şekil 2.7’de press kalıplama üretim yöntemi gösterilmiştir.



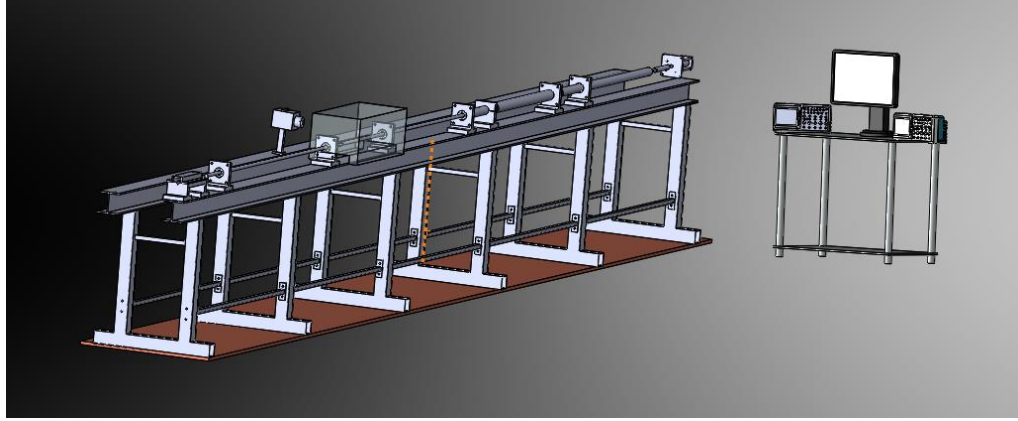
Şekil 2.7 Pres Kalıplama Yöntemi (Campbell, 2010)

2.3 Kompozit Malzemelerde Darbe Testi Yöntemleri

Kompozit/ balistik kompozit malzemelerde darbe deneyi; düşük ve yüksek hızlarda kısa bir süre içerisinde numuneler üzerine uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanmaktadır (Esendemir, ve Caner, 2018). Genellikle mühendislik uygulamalarında imalat, montaj ve malzemelerin kullanım aşamasında meydana gelebilecek hasar oranlarını düşürmek ya da engellemek amacı ile farklı hızlardaki etkiler karşısında malzemelerin darbe davranışının nasıl olacağının bilinmesi beklenir. Bu amaçla, malzemelerin hasar tiplerini, deformasyonunu ve darbe direnci ile malzeme ömrünü belirlemek amacı darbe testleri yapılmaktadır. Numunelerin hangi hızda ve cihazda test edileceği malzemelerin kullanım alanına ve teknik özelliklerine göre değişmektedir. Darbe testleri düşük hız darbe testi ve yüksek hız darbe testi olmak üzere iki ayrı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Her iki test yönteminde de farklı çaplara sahip darbe uçları veya mermiler, farklı hızlar, farklı ortam sıcaklıkları kullanılabilmektedir.

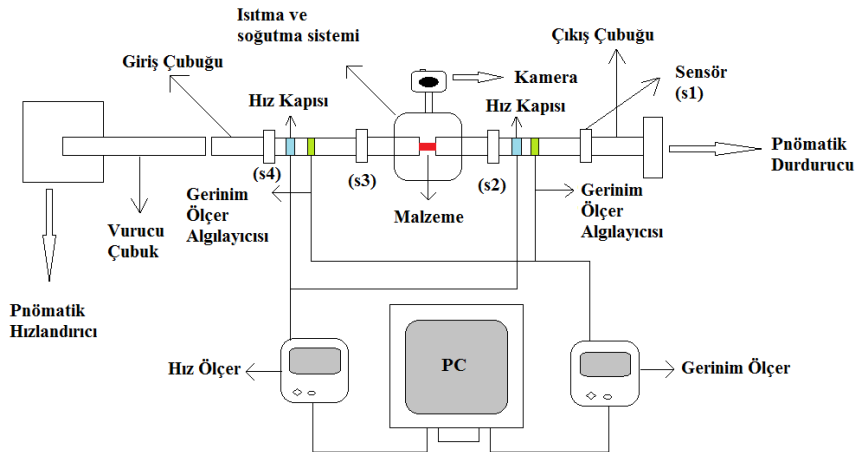
2.3.1 Yüksek Hız Darbe Test Yöntemi

Uçak, savaş tankları, türbin kanatları ve diğer zırh görevi gören yapılarda kullanılan balistik kompozit malzemeler, kullanım ömrü boyunca yüksek hızlı darbe yüklemesi altında kalmaktadır. Yüksek hız darbe test yöntemi bu alanlarda kullanılan kompozit malzemelerin yüksek hız deformasyon özelliklerini ve yapısal denklemlerini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Safri, 2014). Şekil 2.8' de gösterilen Split Hopkinson cihazı en yaygın kullanılan yüksek hız darbe test cihazıdır.



Şekil 2.8 Split Hopkinson yüksek hız darbe test cihazı

Bu cihaz, basınçlı ve serbest bırakılan bir gaz tabancası ile çalışmaktadır. Ayrıca Şekil 2.9’da gösterildiği gibi vurucu, giriş ve çıkış çubukları ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır. Genel olarak test edilecek $100 \times 100 \text{ mm}^2$ boyutuna sahip numune giriş ve çıkış çubuğu arasına yerleştirilir. Farklı çaplardaki çelik mermiler ile malzeme özelliklerine ve kullanım alanına uygun olarak belirlenen hız ile numuneye mermi ile atış (vuruş) yapılır. Daha sonra gerinim ve hız-ölçer üzerinden alınan değerler ile malzeme karakterizasyonu yapılmaktadır (Naghizadeh, 2017). Şekil 2.9’da yüksek hız darbe testi deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9 Split Hopkinson yüksek hız darbe testi deney düzeneğinin şematik gösterimi

2.3.2 Düşük Hız Darbe Test Yöntemi

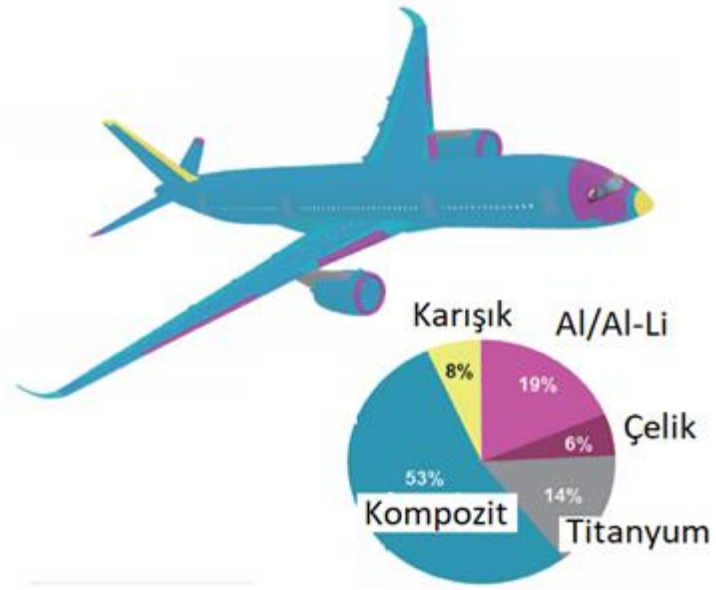
Düşük hızlı darbe testi genellikle 1 ila 10 m/s arasında, farklı ağırlıklarda ve ortam sıcaklıklarında yapılabilmektedir. Deneyin amacına ve malzemenin kullanım alanına uygun olarak belirlenen parametreler yardımıyla farklı açığa sahip darbe uçları ile numuneler test edilebilmektedir. Düşük hızlı darbeler sonucunda kompozit malzemelerin içyapısında matris kırılması, delaminasyon ve lif kırılmaları meydana gelmektedir. Düşük hız darbe testinde elde edilen değer, malzemeye yapılan bir kerelik vuruşun sonucunda numunenin verdiği tepkinin değeridir ve ikinci bir vuruşun engellenmesi için cihazda bulunan frenleme sistemi devreye girmektedir. Test sonrasında alınan değerler ve hasarlar karşılaştırılarak malzeme kullanım alanı ve ömrü belirlenmektedir Düşük hız darbe test cihazı Şekil 2.10'da gösterildiği gibi alt plaka, ağırlık düşürme kulesi, kontrol ünitesi ve frenleme sistemi olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır. (Şenel, Kırılı, ve Kurşun, 2009). Test edilecek numune $10 \times 10 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilerek darbe cihazına yerleştirilir ve gerekli hız, sıcaklık ve ağırlık belirlenerek numuneye darbe uygulanmaktadır. Ağırlık ile vurucu uç arasında bulunan kuvvet sensörü sayesinde darbe oluşumunda tüm veriler bilgisayara aktarılmaktadır.



Şekil 2.10 Düşük hız darbe test cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

2.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte uzay ve havacılık, savunma sanayi, otomotiv sanayi, gemi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Belirtilen alanlarda hafiflik, yüksek darbe dayanımı, aşınma dayanımı ısı ve yorulma dayanımı gibi avantaj sağlayan özelliklerinden dolayı balistik panel, zırh görevi gören giysiler, askeri araçlar, silah, roket, uçak vb. üretiminde tercih edilmektedir (Candan, 2019). Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş bazı örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Uçak üretiminde kompozit malzeme kullanımı (Bachhman, 2017)

Havacılık sektöründe kompozit malzemeler uçaklarda düşük ağırlık, yüksek yorulma dayanımı ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı dış gövde üretiminin %53'ünü oluşturmaktadır (Bachhman, 2017).



Şekil 2.12 Askeri araçlarda balistik kompozitlerin kullanımı (Roketsan, 2020)

Askeri alanda kullanılan araçlar ve giysiler insanları korumaya yönelik olarak üretilen donanımlardır. Üretimde kullanılan kompozit malzemeler hafif, yüksek mukavemet, ısı iletkenliği, sert cisimlerden etkilenmesi durumunda çatlak büyümesi

gibi özelliklerinden dolayı balistik uygulamalarda yaygın kullanım alanına sahiptir (Sözen, Gündüz, ve İmren, 2016).



BÖLÜM ÜÇ

MALZEME VE YÖNTEM

Kompozit malzemeler en yaygın şekliyle yapısında bulunan matris ve takviye malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Matris malzemeler kompozit yapıların üretim tekniklerine ve kullanım amaçlarına göre değişmektedir. Bunlar metal, seramik veya polimer malzemelerden oluşabilmektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak yapıştırıcı özelliği olan polimer esaslı epoksi reçine kullanılmıştır. Kompozit malzemeler fiber takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve karma olarak malzeme formuna göre sınıflandırılmaktadır. Takviye malzemesi olarak Kevlar, karbon ve S-2 cam fiber kullanılarak fiber takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretimde kullanılan Kevlar fiber 300 g/m² alan yoğunluğuna ve 3/1 dimi örgü yapısına, karbon fiber 200 g/m² alan yoğunluğuna ve düz örgü yapısına, S-2 cam fiber ise 190 g/m² alan yoğunluğuna ve düz örgü yapısına sahiptir.

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Kevlar Fiber

Kevlar fiberler düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, yaşlanma karşıtı, yüksek dayanım özelliklerinden dolayı kurşun geçirmez ürünlerde, havacılıkta, koruyucu giysilerde, spor ürünlerinde vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kevlar kumaşların nemden etkilenme, mor ötesi ışınlar altında bozulma gibi dezavantajları vardır. Bunun yanı sıra yüksek hızlarda çarpma etkisine olan dayanımı sayesinde oluşacak hasarı minimuma düşürür. Bu özelliklerinden dolayı balistik korumalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

3.1.2 Karbon Fiber

Karbon lifleri çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen karbon liflerinden yapılmış kompozitler 1020 çelik konstrüksiyonlardan 5 kat daha dayanıklıdır ve yorulma davranışları bilinen tüm metallerden daha iyidir. Karbon lifleri, hafif, yüksek darbe dayanımı, düşük yoğunluğa sahip, düşük sürtünme katsayısı ve titreşim

sönümleme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle uzay ve havacılık sanayisinde, savunma giysilerinde, spor malzemelerinde ve otomobil sektöründe önemli bir kullanım alanına sahiptir. Uygun reçine ile üretilen karbon kompozitlerin korozyona karşı dayanımı iyi olmaktadır ve ısı dayanımı yüksek olan karbon lifleri kolaylıkla erimedikleri için uçak frenlerinde ve roket üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.3 S-2 Cam Fiber

S tipi cam lifleri yüksek mukavemete ve yüksek modüle sahip liflerdir. E tipi cam liflerine göre 3 kat daha pahalıdır , %15 daha serttir ve %30 daha mukavemetlidir. Nem cam liflerinin mukavemetini etkilemektedir, elektriği ve ısıyı iletmezler ve ısıdan etkilenmezler. Ayrıca yüksek çekme ve darbe dayanımına sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle cam lifleri roket üretiminde, uçaklarda, yarış arabalarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

3.1.4 Epoksi Reçine

Epoksi reçineler, termosetler grubunda yer alan çok yüksek yapıştırma gücüne sahip plastik malzemelerdir. Kimyasallara, neme, ısıya ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösterirler ve uzun ömürlüdürler. Kullanımı sırasında sıvı halden katı hale geçmektedirler ve belirli bir süre kürlenme işleminden sonra istenilen sertliğe ulaşırlar. Bu özellikleri nedeniyle, genel amaçlı yapıştırıcılarda, yüzey ve zemin kaplamalarında, fiber takviyeli plastikler, uzay ve havacılık sanayi, otomotiv endüstrisi, spor araçların üretiminde ve müzik aletleri üretiminde kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli gelişmiş kompozitlerin üretiminde epoksi reçineler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır.

3.2 Yöntem

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri takviye malzemesine (elyaf), matris malzemeye (reçine) ve parça şekline, kullanılacağı alana, mekanik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Kompozit malzemelerin üretimde kullanılan yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir: Sprey kalıplama / püskürtme

yöntemi, elle tabakalama yöntemi, filament sarma yöntemi, vakum infüzyon yöntemi ve basınçlı kalıplama yöntemi vb. dir.

Bu çalışmada üretim yöntemi olarak vakum infüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Üretilen numunelere düşük hızda darbe testi uygulanmıştır.

3.2.1 Kullanılan Cihazlar

Bu tez çalışmasında kompozit numunelerin üretiminde ve test edilmesinde kullanılan cihazlar:

- ✓ Vakum destekli reçine infüzyon masası
- ✓ Düşük hız darbe test cihazı

3.2.2 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Masası

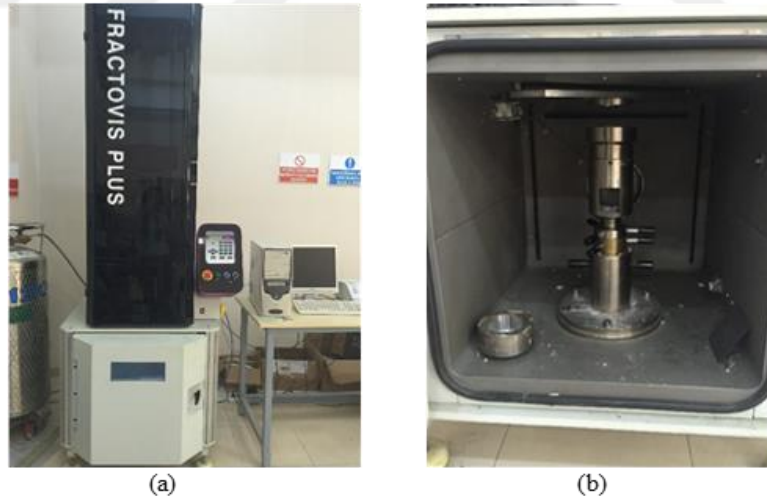
Çalışma kapsamında kullanılan kompozit malzemelerin tamamı vakum destekli reçine infüzyon masasında üretilmiştir. Vakum destekli reçine infüzyonu yüksek kaliteli ve büyük kompozit parçaların üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Cihazın çalışma alanı 1.5 x 2.0 m²'dir. Çalışma sıcaklığı ise 23°C – 130°C arasında değiştirilebilmektedir. Masada bulunan manuel sıcaklık kontrol ve programlama kontrol ekranı ile kontrol edilmektedir. Üretimde kullanılan vakum destekli reçine infüzyon masası ve manuel kontrol ekranı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 a) Çalışmada kullanılan vakum destekli reçine infüzyon masası b) Manuel kontrol ekranı (Kişisel arşiv, 2016)

3.2.3 Düşük Hız Darbe Test Cihazı

Çalışma kapsamında üretilen kompozit numuneler Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarı'nda bulunan CEAST Fractovis Plus düşük hız darbe test cihazı ile test edilmiştir. Düşük hız darbe test cihazı ağırlık düşürme prensibine dayanarak çalışmaktadır ve malzemeler 1800 Joule enerji değerine kadar test edilebilmektedir. Darbe cihazında bulunan iklimlendirme kabini sayesinde numuneler -100°C ile 150°C sıcaklıkları arasında test edilmektedir. Cihazda kullanılan yarı-küresel darbe ucu farklı formdaki darbe uçlarıyla değiştirilebilme özelliğine sahiptir. Darbe ucu 626 gram ağırlığa ve 12,7 mm çapına sahiptir ve darbe ucuna bağlı kuvvet dönüştürücünün yük kapasitesi 22,4 kN'dur. Darbe ucunun bağlı olduğu veri okuyucu üzerinden temas kuvveti, yer değiştirme, enerji ve zaman değerleri istenilen sıklıkta alınabilmektedir. Ayrıca deney sırasında sekme durumunun gözlenmesi halinde tekrarlı darbenin oluşmasını önleyen bir anti-rebound (geri sekme önleyici) sistemi bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan düşük hızlı darbe cihazının resmi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 a) Düşük hızlı darbe test cihazı b) Ön yükleme aparatı (Kişisel arşiv, 2016)

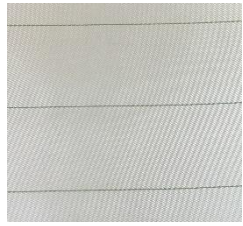
BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kompozit Malzemelerin Üretimi

Çalışma kapsamında test edilecek kompozit numunelerin üretiminde 3/1 dimi örgü yapısına ve 300 g/m² ala yoğunluğuna sahip Kevlar kumaş, 200 g/m² alan yoğunluğuna ve düz örgü yapısına sahip karbon kumaş, 190 g/ m² alan yoğunluğuna ve düz örgü yapısına sahip S-2 cam kumaş kullanılmıştır. Kullanılan kumaşların yapısal parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Üretimde kullanılan kumaşların yapısal parametreleri

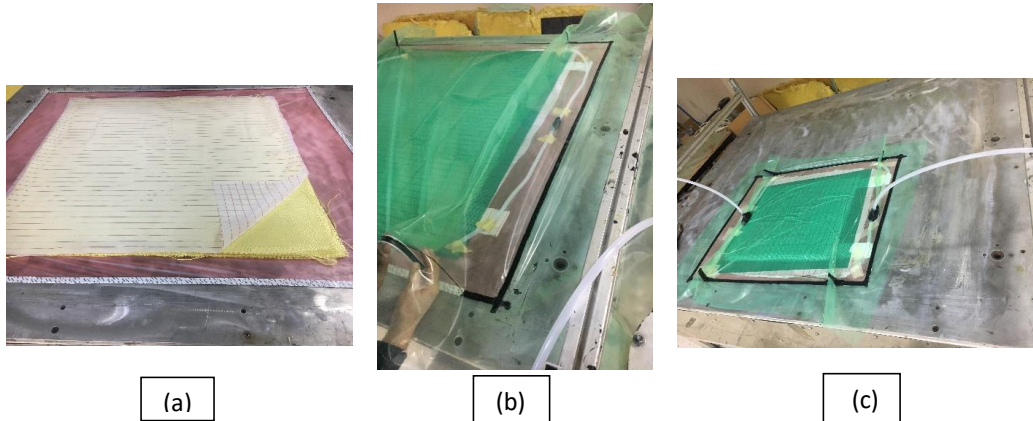
No	Kumaş Türü	Dokuma kumaş örgü tipi	Kumaş m ² ağırlığı	Kumaş görüntüleri
1	Kevlar Kumaş	3/1 Dimi örgü	300 g/m ²	
2	Karbon Kumaş	Düz örgü	200 g/m ²	
3	S-2 Cam Kumaş	Düz örgü	190 g/m ²	

Kompozit üretiminde kullanılan malzemeler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Epoksi reçine & sertleştirici
- İnfüzyon filesi
- İnfüzyon spiral hortum
- İnfüzyon bağlantı

- Vakum sızdırmazlık bandı
- Vakum naylonu
- Vakum pompası
- Soyma kumaşı
- Hassas terazi
- Vakum masası
- Kalıp ayırıcı

Üretimde kullanılan kumaşların alan yoğunlukları farklı olduğu için aynı kalınlığa sahip kompozit malzemelerin üretilmesi amacıyla ön çalışmalar sonrasında her kumaş için farklı kat sayıları belirlenmiştir. Aynı kalınlığa sahip kompozit numunelerin üretiminde 8 kat Kevlar kumaş, 15 kat karbon kumaş ve 18 kat S-2 cam kumaş kullanılmıştır. Vakum masasında ayrı ayrı vakumlanan kumaşlara m² ağırlıklarına uygun olarak balistik malzemeler için kullanılan reçine ve sertleştirici hazırlanmıştır. 100 gram reçineye 34 gram sertleştirici oranında hazırlanan karışım 1 bar’da kumaşlara emdirilmiştir. (Kompozit malzemelerin üretiminde, “warm curing epoxy system based on Laminating resin L160 /Hardener H260S (Momentive) kullanılmıştır). Reçine emdirme işlemi bittikten sonra kumaşlar 80 °C ‘de 480 dakika vakum masasında kürlenmeye bırakılmıştır ve işlem sonucunda oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Üretim aşamaları Şekil 4.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 a) Kumaşların vakum masasına serilmesi, b) Kumaşların vakum torbasıyla vakum masasına bağlanması ve c) kumaşların vakumlanması ve reçine infüzyon (Kişisel arşiv, 2018)

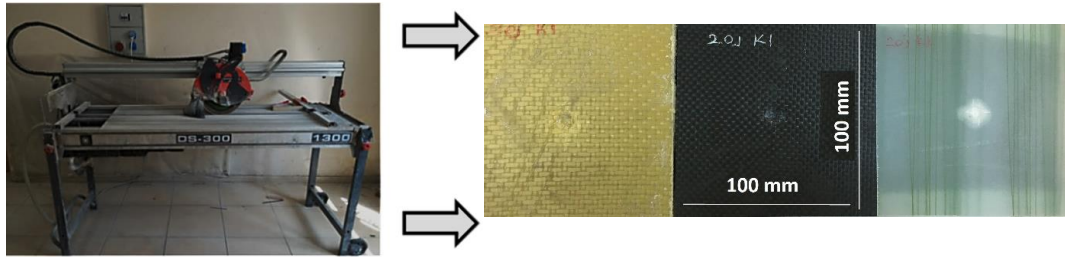
Kürlenme sonrası masadan alınan kompozit plakaların kalınlıkları darbe testine uygunluğunun belirlenmesi amacıyla dijital kumpas ile ölçülmüştür. Üretilen kompozit numunelerin kalınlıkları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Kompozit numunelerin kat sayıları ve kalınlıkları

Kumaş Hammaddesi	Kat Sayısı	Reçine Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)
Kevlar	8	Epoksi	$3,08 \pm 0,05$
Karbon	15	Epoksi	$3,09 \pm 0,07$
S-2 Cam	18	Epoksi	$3,08 \pm 0,04$

4.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

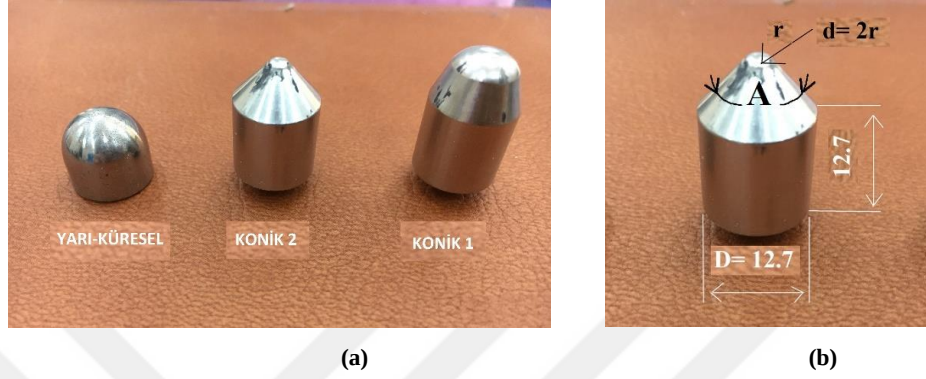
Tez kapsamında yapılan darbe deneyleri Ceast Fractovis Plus darbe cihazında ASTM 3763 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde test edilecek numuneler sulu testere ile 100x100 mm boyutlarında kesilerek darbe deneyine uygun hale getirilmiştir. Darbe numunelerinin uygun hale getirilmesi için yapılan işlem Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Darbe numunelerinin hazırlanması (Kişisel arşiv, 2018)

4.3 Darbe Deneyi

Düşük hız darbe deneyinde farklı açılara sahip konik 1, konik 2 ve yarı-küresel uç olmak üzere 3 farklı darbe ucu kullanılmıştır. Kullanılan darbe uçları ve çapları Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



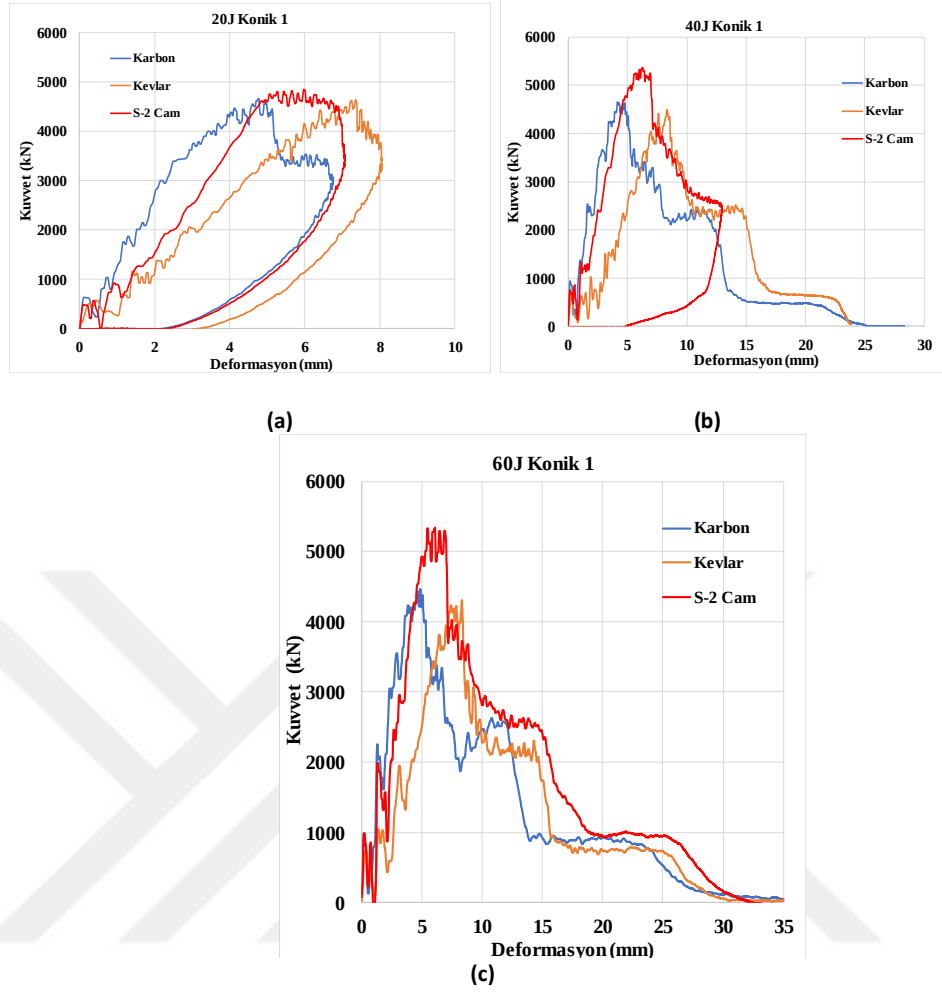
Şekil 4.5 a) Yarı-küresel uç çapı: Ø12,7 mm, Konik Uç 2 çapı: d= 2 mm, D= 12,7mm A= 90°, Konik uç 1 çapı: d= 9 mm, D= 12,7 mm A= 45° b) Konik uçların geometrisi (mm) (Kişisel arşiv, 2020)

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi tüm darbe uçlarının çapı 12,7 mm'dir ve konik uçların geometrik yapısı şekil 4.5-b'de gösterilmiştir. Düşük hız darbe test cihazının maksimum yükleme kapasitesi 22 kN'dur ve vurucu ağırlığının kütlesi 5,02 kg'dır. Bu çalışmada yapılacak düşük hız darbe testinde darbe enerjileri 20J, 40J ve 60J olarak seçilmiştir. Darbe testleri ilk olarak belirtilen enerji seviyelerinde oda sıcaklığında (23 °C) gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar grafiklerde karşılaştırılmıştır. Daha sonra darbe testleri aynı enerji seviyelerinde 50 °C ve 80 °C'de tekrarlanarak 3 farklı ortam sıcaklığının numuneler üzerindeki etkiler karşılaştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda enerji-zaman ve temas kuvveti-deformasyon grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler kullanılarak numunelerin maksimum temas kuvveti, maksimum temas süresi ve absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. İlgili sonuçlar bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

BÖLÜM BEŞ

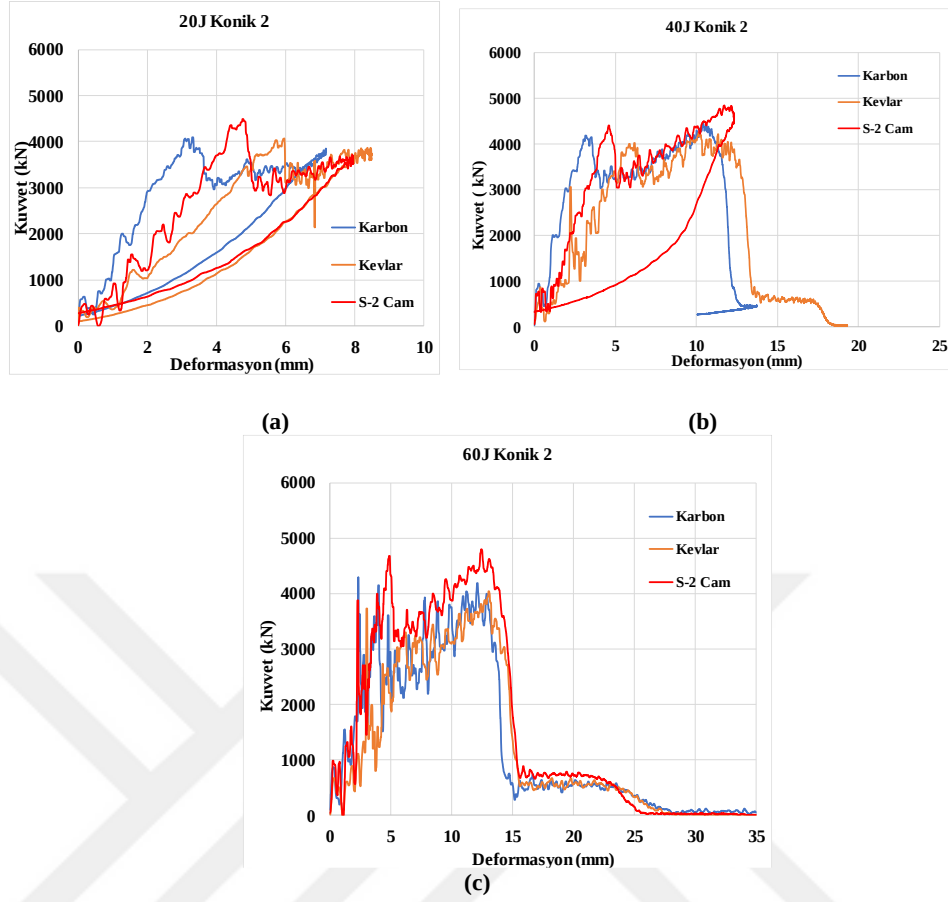
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Karbon, Kevlar ve S-2 cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin farklı enerji seviyelerinde oda sıcaklığında (23 °C), konik 1 darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hız darbe testinin kuvvet deformasyon eğrileri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekil 5.1-a’da görüldüğü gibi 20J enerji seviyesinden eğri kapalı formdadır. Bu durum darbe ucunun numuneye çarptıktan sonra geri sektiğini göstermektedir ve kapalı eğri içinde kalan alan darbe yükü altında numune tarafından emilen enerjiyi vermektedir. Darbe enerjisi 40J seviyesine çıkarıldığında ise Şekil 5.1-b’ de gösterildiği gibi Kevlar ve karbon elyaf takviyeli numunelerde delinme meydana gelmiştir. Ayrıca şekil 5.1-c’ de görüldüğü gibi darbe enerjisi 60J seviyesinde iken tüm numunelerde delinme gözlemlenmiştir. Darbe testi sonucuna göre en büyük temas kuvveti S-2 cam kompozit ve en düşük temas kuvveti Kevlar kompozit numunelerinde meydana gelmiştir. Kevlar elyaf takviyeli malzemelerin sapma değeri 20J darbe enerjisi değeri için en yüksektir. Eğrilerin yüксеle kısımlarının eğimi darbe bükülme direncini vermektedir. Bu nedenle karbon kompozitlerin darbe bükülme direnci en büyük değer sahipken Kevlar kompozitlerin direnci en düşük değere sahiptir.



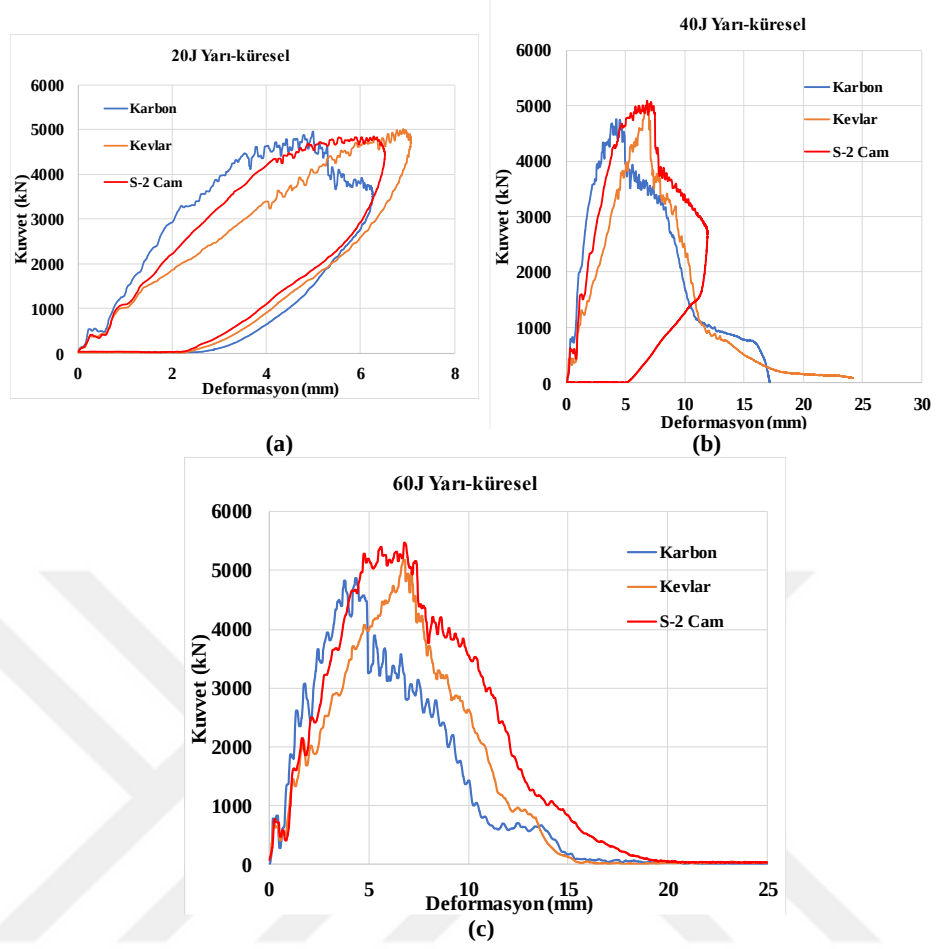
Şekil 5.1 Konik 1 darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C)

Üç farklı enerji seviyesi için karbon, Kevlar ve S-2 cam elyaf takviyeli kompozit numunelerinin konik 2 darbe ucu ile gerçekleştirilen düşük hız darbe testinin kuvvet deformasyon eğrileri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekil 5.2-a’da görüldüğü gibi 20J enerji seviyesinde tüm kompozit numunelerde darbe ucunun geri sektği görülmüştür. Şekil 5.2-b’ye göre 40J enerji seviyesinde karbon kompozit numunede konik 2 darbe ucunun saplanıp kaldığı, kevlar kompozitin delindiği ve S-2 cam kompozit numunede ise darbe ucunun geri sektği gözlemlenmiştir. Darbe enerjisi 60J enerji seviyesine yükseltildiğinde ise Şekil 5.1-c’de görüldüğü gibi tüm numunelerde delinme gerçekleşmiştir. Ayrıca, S-2 cam elyaf takviyeli kompozit numunenin maksimum temas kuvvetine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



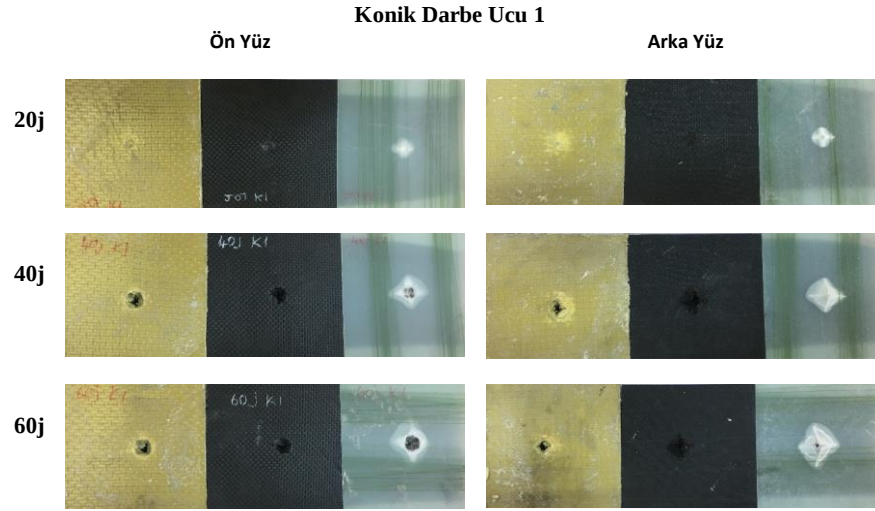
Şekil 5.2 Konik 2 darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C)

Son olarak yarı küresel darbe ucu ile 20J, 40J ve 60J enerji seviyelerinde yapılan düşük hız darbe testi sonrası kompozit numunelerin kuvvet deformasyon eğrileri Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Şekil 5.3-a'da görüldüğü gibi yarı-küresel darbe ucu ile 20J enerji seviyesinde test edilen tüm malzemelerde darbe ucunun ger sektği gözlemlenmiştir. Şekil 5.3-b incelendiğinde ise karbon ve Kevlar kompozit numunelerine ait eğrilerde delinme olduğu, S-2 cam kompozit numune eğrisinde ise geri sekme durumunun olduğu görülmektedir. Tüm darbe uçlarında olduğu gibi yarı-küresel darbe ucu ile 60J enerji seviyesinde yapılan test sonucunda da tüm numuneler delinmiştir (Şekil 5.3-c). Şekil 5.2'de gösterilen tüm grafikler incelendiğinde S-2 cam kompozit numunenin maksimum temas kuvvetine ve darbe bükülme direncine sahip olduğu görülmektedir.

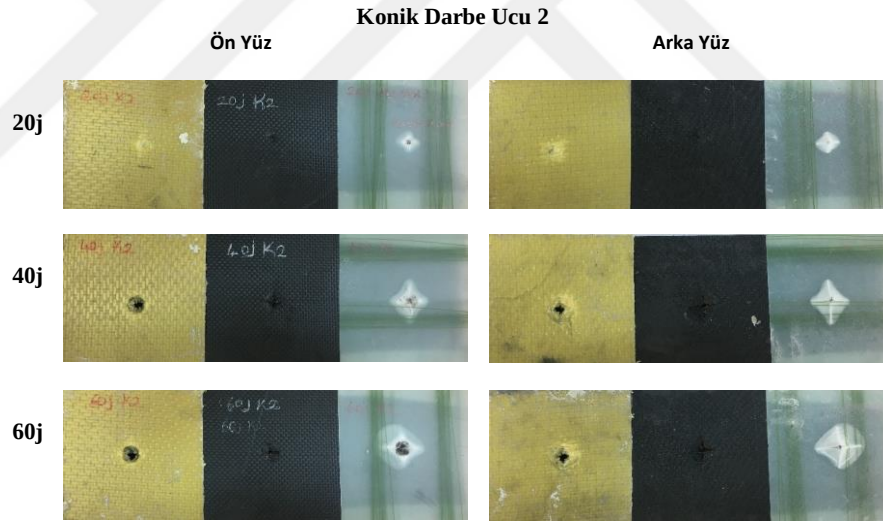


Şekil 5.3 Yarı-küresel darbe ucu ile farklı enerji seviyelerindeki darbe testi sonrası kompozit malzemelerin kuvvet-deformasyon eğrileri (23 °C)

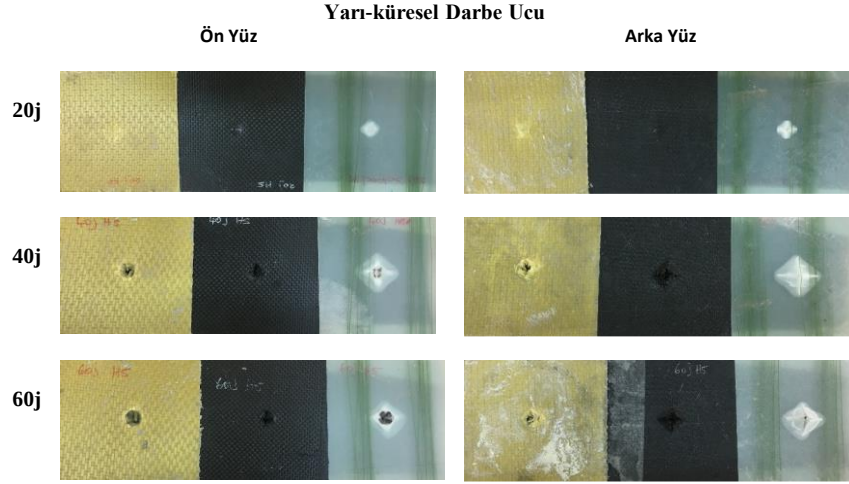
Konik darbe ucu 1, konik darbe ucu 2 ve yarı-küresel darbe ucu ile test edilen numunelerin darbe sonrası görüntüsü farklı enerji değerleri için gruplandırılmıştır ve Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Darbe testi sonrası konik darbe ucu 1 ile test edilen numunelerin arka ve ön yüzünün görüntüsü

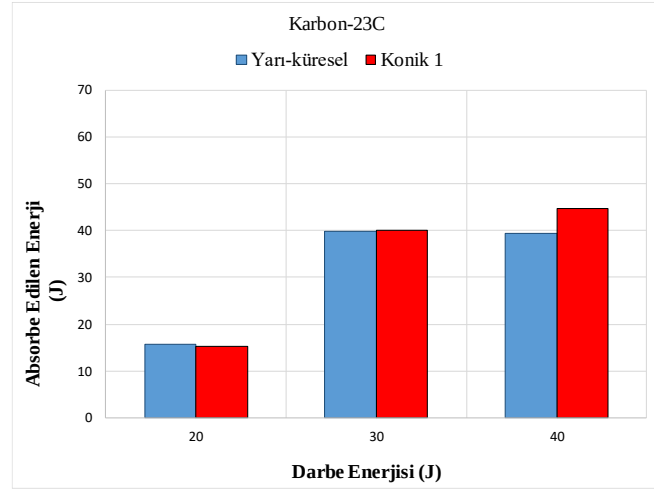


Şekil 5.5 Darbe testi sonrası konik darbe ucu 2 ile test edilen numunelerin arka ve ön yüzünün görüntüsü

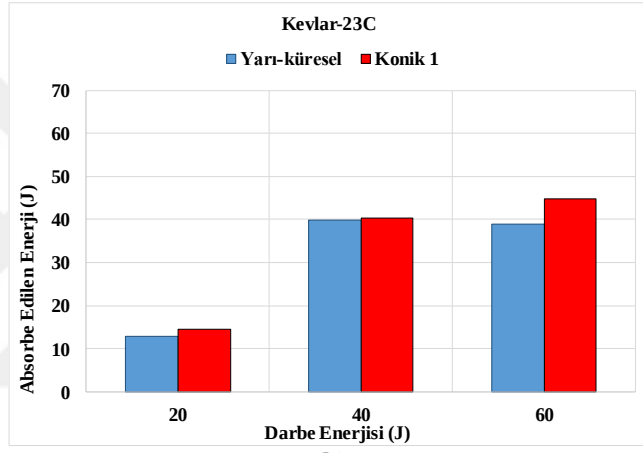


Şekil 5.6 Darbe testi sonrası yarı-küresel darbe ucu ile test edilen numunelerin arka ve ön yüzünün görüntüsü

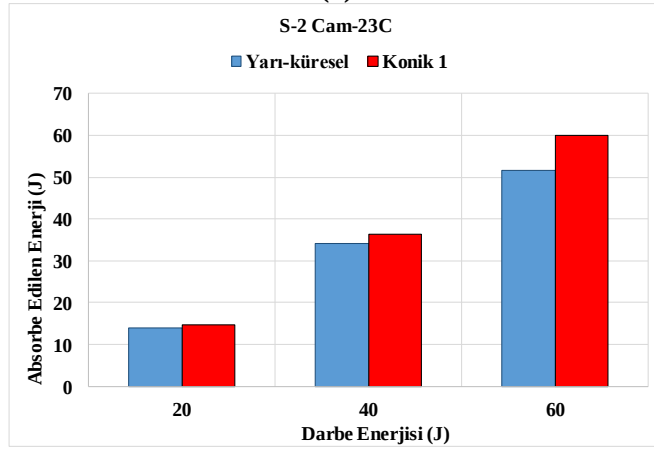
Absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine karşı değişimi enerji profil diyagramı olarak adlandırılır. Şekil 5.7’de 23 °C’de karbon, Kevlar ve S-2 cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin yarı-küresel ve konik 1 darbe ucu için enerji profil diyagramı verilmiştir. Çizilen grafiğe göre en düşük delinme eşiği karbon takviyeli kompozit numuneye ait iken maksimum delinme eşiği S-2 cam kompozit numuneye aittir. Absorbe edilen enerji ile eş enerji çizgisi arasındaki farklar dağılan (geri seken) enerji değerini vermektedir. Bu durumda dağılan enerji miktarı en fazla karbon kompozit numunelerde en yüksektir. Ayrıca, her iki darbe ucu içinde kompozit malzemelerin delinme eşiği birbirine çok yakındır.



(a)



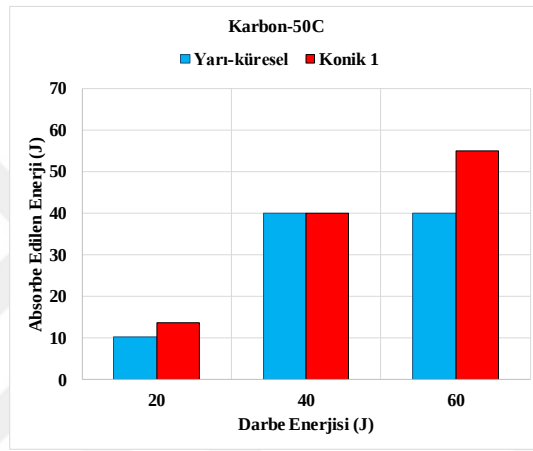
(b)



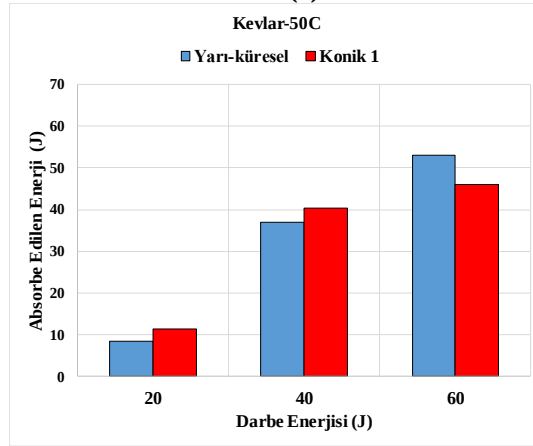
(c)

Şekil 5.7 Absorbe edilen enerjinin 23 °C’de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune

Kompozit numunelerin 50°C'deki enerji profil diyagramları Şekil 5.8'de verilmiştir. 23°C'de yapılan test sonucuyla benzer olarak S-2 cam kompozit numuneleri diğer numunelere göre daha fazla enerji absorbe etmektedir. Delinme eşiği enerjisi ise tüm malzemeler için artmıştır. Karbon ve S-2 cam kompozitlerin enerji diyagramlarında görüldüğü gibi (Şekil 5.8-a ve Şekil 5.8-c) absorbe edilen enerji miktarı her iki darbe ucu içinde delinme enerjisine kadar artmıştır. Oda sıcaklığına göre 50°C'de numuneler daha fazla enerji absorbe etmektedir.

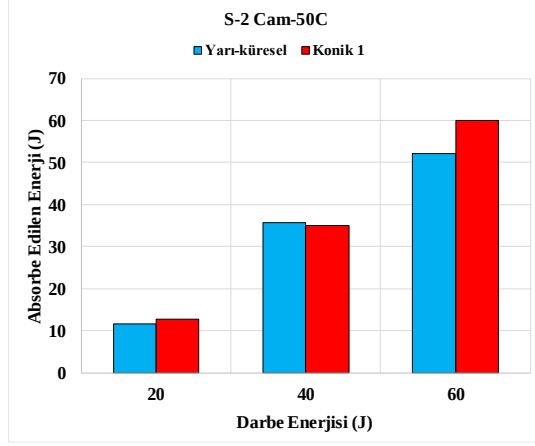


(a)



(b)

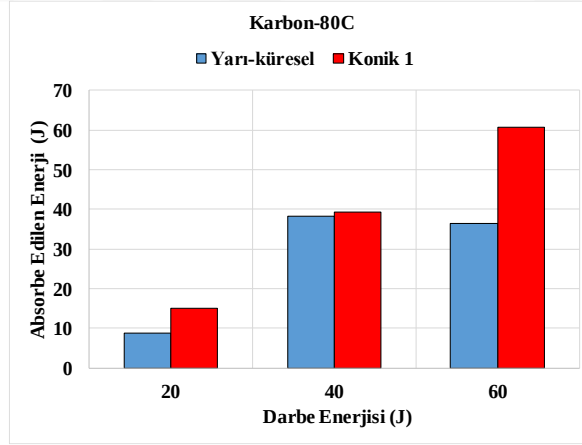
Şekil 5.8 Absorbe edilen enerjinin 50 °C'de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune



(c)

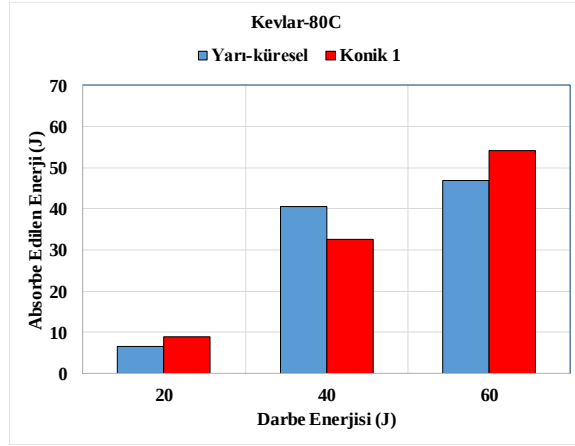
Şekil 5.8 devamı

80°C'de gerçekleştirilen darbe testi sonrası kompozit numunelerin enerji profil diyagramları Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi konik 1 darbe ucu ile vurulan malzemelerde absorbe edilen enerji miktarı sürekli olarak artmıştır.

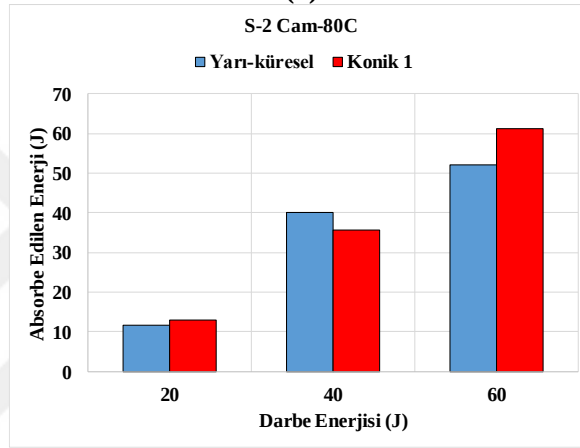


(a)

Şekil 5.9 Absorbe edilen enerjinin 80 °C'de darbe enerjisine karşı değişimi: a) Karbon kompozit numune b) Kevlar kompozit numune c) S-2 cam kompozit numune

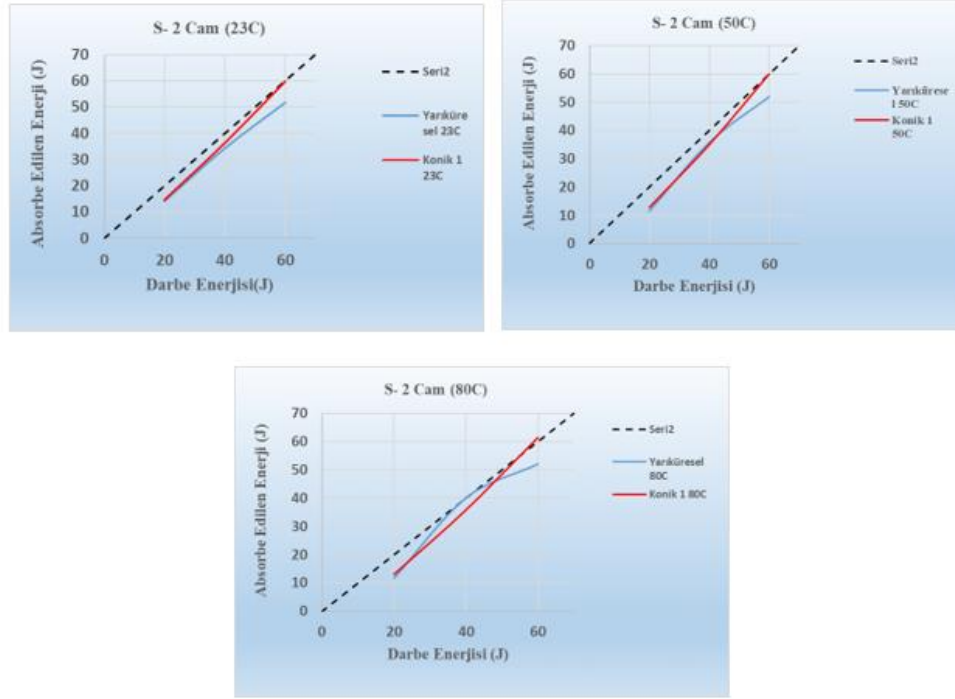


(b)

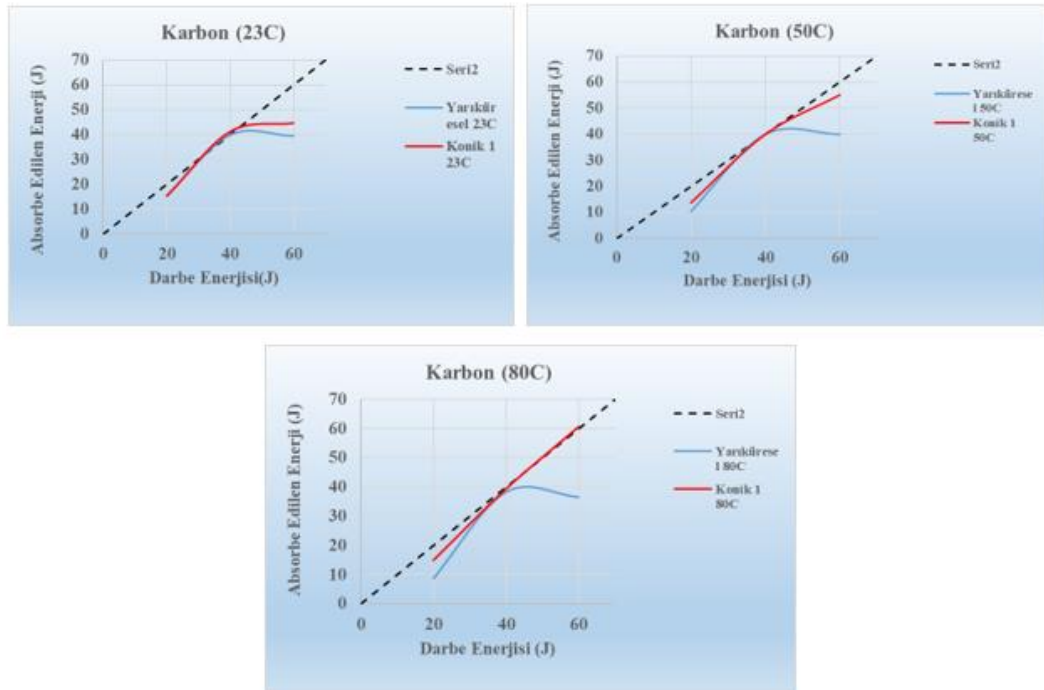


(c)

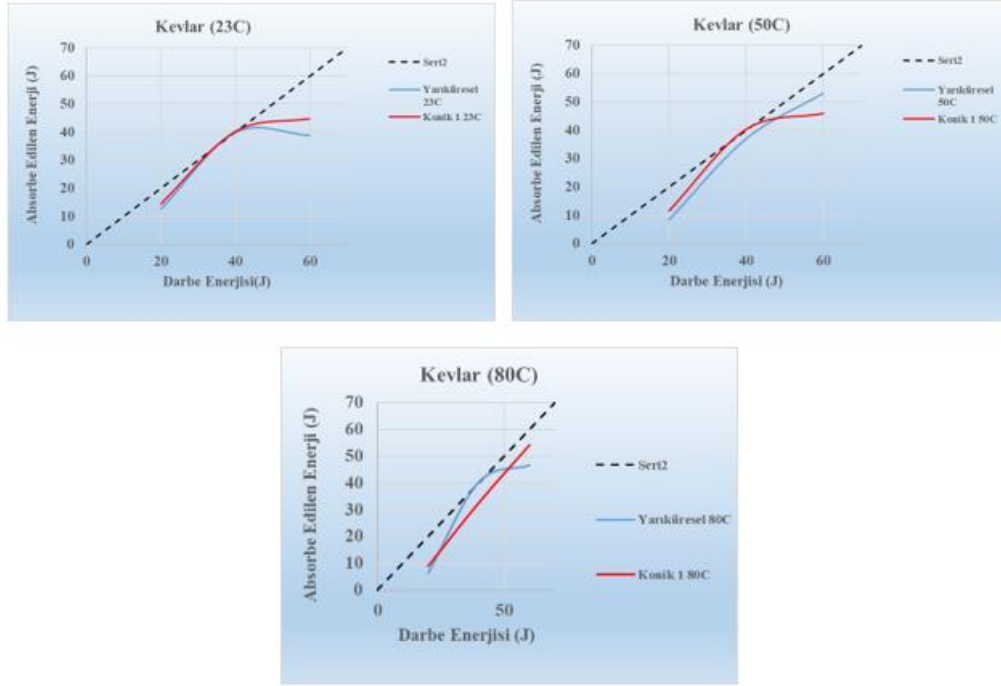
Şekil 5.9 devamı



Şekil 5.10 S-2 Cam kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C'deki enerji profil diyagramları



Şekil 5.11 Karbon kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C'deki enerji profil diyagramları



Şekil 5.12 Kevlar kompozit numunelerin 23C, 50C ve 80C’deki enerji profil diyagramları

Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’ de görüldüğü gibi ortam sıcaklığının kompozit malzemelerin darbe tepkisi üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır.

BÖLÜM ALTI

YARGILAR VE SONUÇLAR

Farklı çaplardaki darbe uçlarının üç farklı kompozit malzemenin düşük hız darbe davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarından çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Daha yüksek sürtünme olması nedeniyle konik darbe ucu ile test edilen kompozit numunelerin delinme eşiği yarı-küresel darbe ucu ile test edilenlere göre daha yüksektir.
- Test edilen kompozit numunelerin balistik uygulamalarda kullanılan epoksi ile üretilmesi nedeni ile sıcaklığın kompozit numuneler üzerinden herhangi bir etkisi olmamıştır hatta delinme eşikleri artmıştır.
- S-2 cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en yüksek delinme eşiğine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Maksimum temas kuvvet S-2 cam elyaf takviyeli kompozit numunelerde görülsede, karbon takviyeli kompozit numuneler en yüksek darbe bükülme direncine sahiptir.

Bu deneysel çalışma sonucunda, kompozit malzemelerin aynı kalınlığa sahip olmasına rağmen kumaş kat sayısının darbe tepkisini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Delaminasyon tabakalı kompozit malzemelerdeki büyük kusur tiplerinden bir tanesidir (Aktaş, Atas ve İçten, 2009). Bu nedende, kumaş kat sayısı arttıkça katlar arasındaki delaminasyon sayısı artacak ve doğru orantılı olarak delinme için gerekli enerji miktarı da artmaktadır. Ek olarak, ortam sıcaklığı literatürdeki çalışmaların aksine (Aktas, Karakuzu ve Arman, 2009), kompozit malzemelerin darbe tepkisini etkilememiştir (Khojin, Bashirzadeh, ve Mahinfalah, 2006).

KAYNAKLAR

- Agrawal, S., Singh, K.K. ve Sarkar, P. (2014). Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite – A review. *Journal of Composite Materials*, 48 (3), 317–332.
- Aktas, M., Karakuzu, R. ve Arman, Y. (2009). Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures. *Composite Structures*, 89 (1), 77-82.
- Aktas, M., Atas, C., Icten, B.M., ve diğer. (2009). An experimental investigation of the impact response of composite laminates. *Composite Structures*, 87 (4), 307-313.
- Ansari, Md.M., Chakrabarti, A. ve Iqbal, M.A. (2017). An experimental and finite element investigation of the ballistic performance of laminated GFRP composite target. *Composites Part B*, 125, 211-226.
- Ansari, Md.M. ve Chakrabarti, A. (2017). Effect of boundary condition and impactor nose angle on impact behaviour of FRP composite: Experimental and FE analyses. *Materials Today: Proceedings*, 4, 9645–9649.
- Bachhmann, J., Hidalgo, C., Bricout, S. (2017). Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 60 (9), 1301-1317.
- Boyd, S.E., Bogetti, T.A., Staniszewski, J.M., ve diğer. (2018). Enhanced delamination resistance of thick-section glass-epoxy composite laminates using compliant thermoplastic polyurethane interlayers. *Composite Structures*, 189, 184-191.

- Campbell, F.C. (2010). *Structural Composite Materials*. 1. Baskı). Ohio: ASM International.
- Candan, C., Seymen, A., Karatutlu, A., Tiken, M., ve diğer. (2019). Performance evaluation of fiber-based ballistic composites against laser threats. *Optics and Lasers in Engineering*, 121, 54-60.
- Composite Manufacturing, “Controlled Spray and NARA” [online]. (2015). 28 Şubat, 2020, <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2015/02/controlled-spray-and-non-atomized-resin-application-best-practices/>.
- Composite Lab, “Filament Winding” [online], (2020). 28 Mayıs 2020, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/filament-winding/>.
- Dogan, A. ve Arman, Y. (2019). Effects of temperature and impactor nose diameter on the impact behavior of PA6 and PP thermoplastic composites. *Journal of Elastomer & Plastics*, 51 (1), 64–74.
- Dogan, S., Kayacan, O. ve Gören, A. (2018). Elektromanyetik kalkanlama özellikli polimer kompozit yapıların geliştirilmesi. *Tekstil ve Mühendis*, 109 (25), 44-52.
- Esendemir, U. ve Caner, A.Y. (2018). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışının deneysel olarak incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (1), 207–215.
- Evcı, C. ve Gülgeç, M. (2012). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 40-51.
- İcten, B.M., Kırıl, B.G., ve Deniz, M.E. (2013). Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates. *Composites: Part B*, 50, 325-332.

- Kazemianfar, B., Esmaeeli, M. ve Nami, M.R. (2020). Response of 3D woven composites under low velocity impact with different impactor geometries. *Aerospace Science and Technology*, 102, 105849.
- Khalkhali, A., Geran, Malek, N., & Bozorgi, Nejad, M. (2020). Effects of the impactor geometrical shape on the non-linear low-velocity impact response of sandwich plate with CNTRC face sheets. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 22 (4), 962–990.
- Kursun, A., Senel, M., Enginsoy, H.M., et al. (2016). Effect of impactor shapes on the low velocity impact damage os sandwich composite plate: Experimental study and modelling. *Composite Part B*, 86, 143-151.
- Körbelin, J., Derra, M. ve Fiedler, B. (2018). Influence of temperature and impact energy on low velocity impact damage severity in CFRP. *Composites Part A*, 115, 76-87.
- Krollmann, J., Schreyer ,T., Veidt, M., ve diğer. (2019). Impact and post-impact properties of hybrid-matrix laminates based on carbon fiber-reinforced epoxy and elastomer subjected to low-velocity impacts. *Composite Structures*, 208, 535–545.
- Khojin, A.S., Bashirzadeh, R., Mahinfalah, M., ve diğer. (2006). The role of temperature on impact of Kevlar/fiberglass composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, 37 (7-8), 593-602.
- Li, Z., Khennane, A., Hazell, P.J., ve diğer. (2017). Impact behaviour of pultruded GFRP composites under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 168, 360–371.

- Liu, J., He, W., Xie, D., et al. (2017). The effect of impactor shape on the low-velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures. *Composites Part B*, 111, 315-331.
- Mazumdar, S. , (2002). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, Boca Raton: CRC Press.
- Millan, M.R., Gonzalez, D.G., Rusinek, A., ve diğer. (2018). Perforation mechanics of 2024 Aluminium aluminium protective plates subjected to impact by different nose shapes of Projectiles. *Thin-Walled Structures*, 123, 1-10.
- Naghizadeh, Z., Faezipour, M., Pol, M. H., Liaghat, G., ve diğer. (2017). High velocity impact response of carbon nanotubes-reinforced composite sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 22 (2), 303-324.
- Roketsan, “Balistik Koruma Sistemleri” [online]. (2020). 28 Mayıs 2020, <https://www.roketsan.com.tr/urun/balistik-koruma-merkezi-bkm/>.
- Safri, S.N.A., Sultan, M.T.H., Yidris, N. ve Mustapha, F. (2014). Low velocity and high velocity impact test on composite materials – A review. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 9 (3), 50-60.
- Sahu, S. ve Ansari, M.Z. (2019). Effect of impactor shapes on low-velocity impact characteristics of Al plate. *Ships and Offshore Structures*, 14 (1), 53–63.
- Sözen, E., Gündüz, G., İmren, E. (2016). Balistik panel ve koruyucu zırh üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeler. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 18 (2), 194-204.
- Şenle, M., Kırılı, A., ve Kurşun A. (2009). Düşük hızlı darbe deney düzeneği için geri sekme (rebound) frenleme ve kontrol sistemi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 1-6.

Taghizadeh, S.A., Liaghat, G., Niknejad, A., ve diğer. (2019). Experimental study on quasi-static penetration process of cylindrical indenters with different nose shapes into the hybrid composite panels. *Journal of Composite Materials*, 53(1), 107–123.

Vasiliev, V.V. (1988). *Mechanics Of Composite Structures*. Lucia, I.M., Translated. Washington: Taylor & Francis.

Zarei, H., Sadighi, M. ve Minak, G. (2017). Ballistic analysis of fiber metal laminates impacted by flat and conical impactors. *Composite Structures*, 161, 65–72.