

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARIN DARBE
DARVANIŞLARI**

Umut POTOĞLU

Haziran, 2012

İZMİR

SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARIN DARBE DAVRANIŞLARI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı

Umut POTOĞLU

Haziran, 2012

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

UMUT POTOĞLU, tarafından DOÇ. DR. CESİM ATAŞ yönetiminde hazırlanan “SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARIN DARBE DAVRANIŞLARI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Cesim ATAŞ

Yönetici



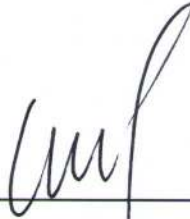
Prof. Dr. Ramazan KARAKUDU

Jüri Üyesi



Trd. Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tez çalışmam süresince beni yönlendiren, değerli bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Cesim ATAŞ'a ve bu çalışmada yardımını eksik etmeyen ve tecrübelerini paylaşan Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN'e ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Mehmet Hayri POTOĞLU ve annem Nermin POTOĞLU'na teşekkür eder, minnetimi sunarım.

Umut POTOĞLU

SANDVIÇ KOMPOZİT PLAKLARIN DARBE DAVRANIŞLARI

ÖZ

Bu tez çalışmasının temel amacı; E-camı/epoksi kabuklu PVC ve PET köpüğü çekirdekli sandviç kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe test davranışlarını deneysel olarak incelemektir. Düşük hızlı darbe deneyinde kullanılacak sandviç kompozit plakalar için vakum destekli infüzyon kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu plakalardan 100 mm x 100 mm şeklinde kesilen numuneler bir test düzeneği kullanılarak düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur. Darbe testine tabi tutulan numuneler için kuvvet, deplasman, absorbe edilen enerji, zaman, hız gibi parametrelerin değişimi kaydedilmiş ve kendi aralarında köpüğe ve katman sayısına göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca, absorbe edilen enerji, maksimum kuvvet, maksimum çökme ve toplam temas süresi gibi darbe parametreleri radar grafik formunda verilmiştir. Radar grafikler hem farklı köpükler hem de farklı kabuk tabaka sayıları için verilmiştir. Düşük hızlı darbe deneyi sonucu numuneler üzerinde oluşan hasar modları incelenmiş, grafiklere ait çeşitli hasarlı numune fotoğrafları sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: sandviç kompozit, darbe, çekirdek, köpük, vakum destekli reçine infüzyonu

IMPACT BEHAVIOR OF SANDWICH COMPOSITE PLATES

ABSTRACT

The main purpose of this thesis is to examine low-velocity impact behavior of sandwich composite materials with PVC, PET foam cores and E-glass/epoxy skin experimentally. Vacuum assisted resin infusion method was used for manufacturing of sandwich composite plates to be used in low-velocity impact tests. Afterwards, the samples with dimensions of cut from the plates 100 mm x 100 mm were subjected to low-velocity impact test by using a test fixture. For the samples tested, the variation of the impact parameters such as force, displacement, absorbed energy, time and velocity were recorded. The mentioned parameters are compared for different foams and thicknesses. In addition, the variation of some parameters such as absorbed energy, maximum force, maximum deflection and contact time are presented in the radar graphic form. The radar graphs are provided for both different foams and varied face-sheet thicknesses.

Keywords: sandwich composite, impact, core, foam, vacuum assisted resin infusion

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
 BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	 1
 BÖLÜM İKİ-SANDVIÇ KOMPOZİTLER	 8
2.1 Sandviç Yapılı Kompozitler.....	8
2.1.1 Tanım	8
2.1.2 Sandviç Kompozitlerin Bileşenleri	8
2.1.2.1 Çekirdek	9
2.1.2.2 Yüzeyler	9
2.1.3 Sandviç Kompozitlerin Özellikleri	10
2.1.4 Sandviç Kompozitlerin Avantajları.....	11
2.1.5 Sandviç Kompozitlerin Dezavantajları	12
2.1.6 Sandviç Kompozitlerin Uygulamaları.....	12
 BÖLÜM ÜÇ-LAMİNE VE SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE DARBE TEPKİSİ.	 14
 3.1 Giriş.....	 14
3.2 Düşük Hızlı Darbe (LVI)	15
3.2.1 Genel Bilgiler	15
3.2.2 Test Ekipmanı	16
3.2.2.1 Aletli Ağırlık Düşürme Darbe Testi.....	16
3.2.3 Darbe Enerjisi	19
3.2.4 Düşük Hızlı Darbelerde Hasar Modları	20

3.2.4.1 Matris Hasarı	21
3.2.4.2 Delaminasyon.....	21
3.2.4.3 Fiber Kırılması	22
3.2.4.4 Nüfuziyet.....	22
3.3 Sandviç Kompozitlerde Düşük Hız Darbeleri.....	23
BÖLÜM DÖRT- SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM VE MALZEME ÖZELLİKLERİ	25
4.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi	25
BÖLÜM BEŞ-DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ VE BASMA DENEYİ SONUÇLARI VE ANALİZLERİ.....	37
5.1 Kuvvet-Deplasman Grafiği	37
5.2 Absorbe Edilen Enerji-Zaman Grafiği	42
5.3 Hız-Deplasman Grafiği	43
5.4 Eş Enerji Grafiği	44
5.5 Karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman-Enerji ve Kuvvet-Deplasman-Enerji Eğrileri	45
5.6 Kuvvet-Deplasman Grafiklerinin Farklı Tabaka Sayılarına ve Farklı Çekirdek Malzemelerine Göre Karşılaştırılması	52
5.7 Radar Grafik ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	62
BÖLÜM 6-SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR	71

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yeni teknoloji uygulamalarında giderek artan performans istekleri, yeni malzeme arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Tek bir malzeme kullanarak yüksek ve tavizsiz performans sağlamak zor olduğunda, bir ya da daha fazla malzemeyi bir araya getirerek yeni malzemeler meydana getirme yoluna gidilmiştir. Tek bir klasik malzemenin veremeyeceği belli özellik kombinasyonlarını verebilen bu tür malzemelere kompozit malzeme denilmektedir. En az iki farklı özellikteki malzemenin bir araya makroskopik olarak getirilmesi ile elde edilen yeni malzemeye kompozit denir.

Kompozit malzemelerin belli başlı avantajlarından bazıları: yüksek mukavemete karşılık hafiflik, korozyon direnç, istenen yönde termal ve fiziksel özelliklerdir.

Matris malzemenin ve takviye malzemesinin özellikleri, bu fazların birbirlerine yapışma kabiliyeti ve takviye malzemesinin yapı içindeki dizilişi bir kompozit malzemenin nihai özelliklerini belirler.

Günümüzde, kompozit malzemeler havacılık ve uzay endüstrilerinde hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeni ile geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bunun dışında enerji sektöründe (rüzgar türbini kanadı gibi), yapılarda, alt yapı amaçlı borularda, basınçlı tanklarda, deniz araçlarında, savunma sanayinde, sportif amaçlı parçalarda ve daha pek çok alanda kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzde, özellikle yüksek eğilme direncinin istendiği yerlerde sandviç kompozit malzemeler çok sıklıkla kullanılmaktadır. Sandviç kompozit malzemelerin ortasında çok hafif ama mukavemeti düşük, üst ve alt kısmında ise kabuk olarak adlandırılan daha ince fakat mukavemeti yüksek kompozit parçalar (cam-epoksi, aramid-epoksi veya karbon-epoksi gibi) yer alır. Bu tür kompozit malzemelerde ortada ara malzeme (veya çekirdek) olarak kullanılan malzemeler genellikle çeşitli köpükler (PVC, PET), balsa ağacı ve bal peteği formundaki alüminyum veya termoplasikten yapılmaktadır. Literatürde sandviç kompozit malzemelerin mekanik davranışları üzerine yapılmış birçok çalışma vardır. Bunlardan bazıları aşağıda yer verilmiştir.

Ataş ve Sevim (2010) balsa ağacı ve PVC köpüğü içeren sandviç kompozitlerin darbe direnci üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, balsa ağacı, PVC köpük malzemelerinden yapılmış sandviç panellerin darbe direnci üzerine bir inceleme içermektedir. Farklı darbe enerjileri kullanılarak birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Sandviç kompozitlerin hasar mekanizmaları, yük-deformasyon eğrileri, enerji profili diyagramları ve hasarlı numune fotoğrafları kullanılarak analiz edilmiştir. Gözlenen başlıca hasar modları üst ve alt yüzeylerde fiber kırılmaları, bitişik cam-epoksi katmanları arasında delaminasyon, çekirdek kırılmaları ve yüzey/çekirdek ayrılmasıdır. Üst ve alt yüzey levhalarının görsel olarak incelenmesine ilave olarak su jeti ile kesit alma şeklinde yapılan tahribatlı incelemeler tabakalardaki ve çekirdeklerdeki hasar mekanizmalarına ilişkin ip uçları verilmiştir. Tekli darbe hasarlarının yanında, numunelerin tekrarlı darbe davranışları da gözlemlenmiştir.

Anderson ve Madenci (2000) sandviç kompozitlerin düşük hızlı çarpışma (darbe) karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sandviç kompozitlerin düşük hızda çarpışmaya (darbeye) verdiği tepkiyi inceleyen deneysel bir inceleme sunulmaktadır. Grafit/epoksi yüzey levhalı ve köpük ya da bal peteği çekirdekli bir takım sandviç kompozit konfigürasyonlarında görülen hasar türlerinin ve miktarlarının karakterize edilebilmesi için darbe testleri yapılmıştır. Köpük çekirdekli numunelerde, önemli miktarda hasara ve 0,13 mm'den fazla kalıcı ezilmeye rastlanmıştır. Bal peteği numunelerde rastlanan 0,25 mm kalıcı ezilme, önemli miktarda iç hasar meydana geldiğini göstermiştir. Ancak, hem bal peteği hem de köpük numunelerin yüzeyleri bu darbe enerjisi seviyelerinde çok az miktarda hasara uğramıştır.

Hosur ve arkadaşları (2007) nanofazlı köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin darbe performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, düzgün ve nanofazlı köpük çekirdek ile üç katmanlı düz örgülü karbon kumaş/Sc-15 epoksi kompozit yüzey levhalarından sandviç paneller üretilmiştir. Ağırlıkça %0,5 ve %1 Nanocor 1-28E nanokil içeren düzgün ve nanofazlı köpük çekirdekler hazırlanmıştır. Bundan sonra da ko-enjeksiyonlu reçine transfer kalıplama prosesi kullanılarak sandviç paneller üretilmiştir. Bu panellerden 100 mm x 100 mm boyutlarında kesilen numuneler düşük hızlı darbe (çarpışma) testine tabi tutulmuştur. Panellerin

çarpmaya tepkisi maksimum kuvvet, absorbe edilen enerji, zaman ve maksimum kuvvetteki deformasyon cinsinden kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Bundan sonra, test edilen numuneler, ikiye bölünmüş ve numunelerin hasarlarının anlaşılabilmesi için tarayıcı, optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile taranmışlardır. Nanofazlı numuneler, düzgün numunelere kıyasla daha büyük kuvvetlere dayanabilmişler ve daha az hasar görmüşlerdir. Nanofazlı köpük çekirdekler nispeten daha gevrek kırılmışlardır.

Mohan ve arkadaşları (2011) alüminyum köpük çekirdekli sandviç yapıların darbe davranışları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Metalik köpük çekirdek ve yüzey plakalarından oluşan sandviç paneller, çoğunlukla darbe ve patlama kuvvetlerine dayanımları nedeniyle kullanılmaktadır. Güncel uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, söz konusu performans yüzey levha dizaynlarında uygun kombinasyonların kullanılması ile artırılabilir. Bu çalışmada, davranışları elastik, elastik-ideal plastik ve elastik-plastik deformasyon sertleşmesi davranışı sergileyen çeşitli özel yüzey levhaları ile alüminyum köpüklerin bileşiminden oluşan kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. Bu deney alüminyum köpük üzerinde yarım küre şeklinde ezici uçlar kullanarak, yüzey levhası varken ve yokken yapılmıştır. Hasarın başlamasına ilişkin hasar modları, enerji absorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması ile tartışılmıştır. Sonuçlar, köpük kalınlığının artışının ve yüzey levhasının kullanılmasının darbe enerjisi emme kapasitesini artırdığını göstermektedir. Yüzey levhasının türü sadece enerji absorpsiyon kapasitesini değil, aynı zamanda köpük blokların hasar modunu etkilemektedir.

Vaidya ve arkadaşları (2000) sandviç kompozit panellerin darbe davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu makalede, hafifliği ve eğilme dayanımının yanı sıra, birçok fonksiyonel fayda sağlayan yeni teknoloji entegre edilmiş oyuklu, E-camı/eğilme çekirdekli sandviç kompozitlerle ilgilidir. Geleneksel köpük ve bal peteği çekirdeklerle karşılaştırıldığında entegre (bütünleşik) boşluklu çekirdek, diğer faydalarının yanı sıra, içinden kablolar/çubuklar geçirmeye, elektronik parçalar koymaya ve yakıt ve yangın tutucu köpük depolamaya uygundur. Mevcut çalışmada, bu yeni teknoloji entegre sandviç çekirdekli kompozitlerin düşük hızdaki darbe (LVI) davranışı araştırılmıştır. Bu çalışmada üç farklı kalınlıkta bütünleşik ve içine

fonksiyonel parça yerleştirilmiş E-cam/epoksi sandviç çekirdek (6,9 ve 17 mm olmak üzere) incelenmiştir. Düşük hız darbe sonuçları, oyuk ve içine fonksiyonel parça yerleştirilmiş entegre çekirdeğin maruz kaldığı lokalize hasar, darbenin bulunduğu bölgedeki çekirdek elemanları ile sınırlı kaldığını göstermiştir.

Schubel ve arkadaşları (2004) kompozit sandviç panelleri düşük hızda darbe (çarpışma) direnci üzerine bir çalışma yapmışlardır. Kompozit sandviç yapıları düşük hızlı darbe hasarına duyarlı olup, hasar esnasında yükleme ve hasar prosesinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi önemlidir. Bu çalışmanın amacı örgü karbon/epoksi yüzey plakalarından ve PVC köpük çekirdekten oluşan sandviç panellerin düşük hızda darbe davranışlarını deneysel olarak incelemektedir. Testten sonra hasar karakterize edilmiş ve sayısallaştırılmıştır. Sonuçlar eşdeğer statik yükleme ile karşılaştırılmış ve düşük hızda darbenin lokalize hasara göre yarı-statik özellikte olduğu sonucuna varılmıştır. Kolay bir maksimum (pik) darbe kuvveti hesaplama metodu, deneysel sonuçlara uygun neticeler vermiştir. Temas yükü-ezilme ilişkisi de, statik yükleme durumu için incelenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılarak sandviç panelin ezilme davranışının tahmininde bunların etkinliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Gustin ve arkadaşları (2004) kevlar/karbon fiber kombinasyonu sandviç kompozitlerin düşük hızdaki darbe davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, karbon fiber/kevlar kombinasyonu sandviç kompozitlerin darbe, darbe sonrası bası ve çekme dayanım özellikleri incelenmiştir. Alt yüzey levhaları, sandviç kompozitlerin yüksek toplam esneklik dayanıklılığını koruyabilmek için tamamen karbon fiberden yapılmıştır. Bu araştırmanın amacı, darbe alan taraftaki karbon fiber yüzey levhaları kevlar ya da hibrit levhalarla değiştirildiğinde darbe özelliklerinde bir iyileşme olup olmadığını gözlemlemektir. Ayrıca darbe testlerinden sonra yapılan bası testi ile darbe almış numunelerle almamış numuneler arasındaki bası özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Karbon fiber, kevlar ve hibritin elastik modülü çekme testleri ile elde edilmiştir. Bu veri karbon fiber tabakaları kevlar veya hibrit tabakalar ile değiştirildiğinden dayanımda meydana gelen değişimi karakterize etmek için kullanılmıştır.

Foo ve arkadaşları (2007) alüminyum bal peteği sandviç panellerinin düşük hızdaki darbe bir çalışma yapmışlardır. Bu makalede, düşük hızda darbeye maruz bırakılmış alüminyum sandviç panellerin hasar davranışı gözlenmiştir. Bal peteği sandviç kompozit ABAQUS yazılımı kullanarak modellenmiştir. Bu modelleme yaklaşımı çarpışma hasarının yapı içinde yayılmasını etkileyen parametrelerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Alüminyum alaşımlarının deformasyon sertleşmesi davranışı ve bal peteği çekirdeğinin yoğunluğunun darbe davranışını etkilediği gösterilmiştir.

Bhuiyan ve arkadaşları (2009) nanofazlı köpük çekirdek ve ($\pm 45^\circ$) dizilimdeki örgülü kabuktan oluşan sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu makalede, farklı çekirdek yapılarına sahip sandviç panellerin düşük hızda darbe davranışlarını inceleyen bir çalışma sunmaktadır. Çalışmadaki sandviç paneller, düzgün ve nanofazlı köpük çekirdek ve iki eksenli ($\pm 45^\circ$) karbon kumaş/SC-15 epoksi kompozit yüzey levhalarından oluşmuştur. Çalışma için ağırlıkça %0,2, %0,4 ve %0,6 karbon nanofiber içeren düzgün ve nanofazlı köpük çekirdekler hazırlanmıştır. Bundan sonra, sandviç paneller vakum destekli reçine transfer kalıplama prosesi (VARTM) kullanılarak üretilmiştir. Bundan sonra 80 mm x 80 mm büyüklüğünde numuneler kesilerek, düşük hızda darbe testleri 15, 29 ve 44 J olmak üzere üç farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Panellerin darbe davranışı maksimum kuvvet, absorbe edilen enerji, zaman ve maksimum kuvvetteki deformasyon cinsinden kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Test edilen numuneler bundan sonra ikiye bölünmüş ve kırılma yüzeylerinin dijital bir görüntüsünü almak üzere bir tarayıcı ile taranmıştır. Hasar bölgesi ve numune hasarlarının görülmesi için de tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Nanofazlı köpük içeren numuneler, normal numunelere göre daha yüksek pik kuvvetler vermiştir. Nanofazlı yapılar normal numunelerle karşılaştırıldıklarında düşük enerji seviyesinde daha fazla enerji, yüksek enerji seviyesinde de daha az enerji absorbe etmişlerdir. Nanofazlı sistemler arasında ağırlıkça %0,2'lik nanofazlı sistem en iyi performansı sergilemiştir.

Hosur ve arkadaşları (2004) hibrid yüzey levhalı köpük sandviç kompozitlerin imalatı ve düşük hızda darbe karakterizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Kullanılan sandviç kompozitler vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Sandviç plakanın kabuk kısmında S2 camı ve karbon kumaşlar kullanılmıştır. Bir kenarı 100 mm olan kare şeklinde numuneler, bir darbe test cihazı kullanılarak 15, 30 ve 45 J'luk üç farklı enerji seviyesinde darbe testine tabi tutulmuştur. Her üç numune de her enerji seviyesinde test edilmiştir. Maksimum kuvvet, maksimum kuvvet-zaman, maksimum kuvvet-deformasyon ve absorbe edilen enerji değerleri farklı tabaka dizilişleri için tespit edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Hasar modları, numunelerin kesidini alarak ve optik mikroskop altında gözlemleyerek incelenmiştir. Farklı yüzeyler arasından, cam yüzeyler en büyük kuvvet değerini vermiş, bunu sırası ile cam-karbon hibrid, karbon-cam hibrid ve karbon yüzeyler takip etmiştir.

Hosur ve arkadaşları (2006) nanokil dolgulu sandviç kompozitlerin işlenmesi ve bunların düşük darbe kuvvetlerine tepkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, düzgün ve nanofazlı köpük çekirdeklerden ve üç tabakalı düz örgülü karbon kumaş/SC-15 epoksi nanokil yüzey levhalarından oluşan sandviç paneller üretilmiştir. Ağırlıkça %0,5 ve %1 Nanocor I-28E nanokil içeren düzgün ve nanofazlı köpük çekirdekler hazırlanmıştır. Bundan sonra sandviç paneller ko-enjeksiyon reçine transfer kalıplama prosesi kullanılarak üretilmiştir. Yüzey levhaları ağırlıkça %1 ve %2 nanokil içeren SC-15 epoksi malzemenin 3 tabaka düz örgülü karbon kumaşa infüzyonu ile imal edilmiştir. Bundan sonra panellerden 100 mm x 100 mm büyüklüğünde numuneler kesilmiş ve düşük hızda darbe testine tabi tutulmuşlardır. Bundan sonra numunelerin darbe davranışı kaydedilmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha sonra test edilen numuneler ikiye bölünmüş ve numunelerin hasarlarını anlayabilmek için tarayıcı, optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak taranmışlardır. Deneylerde, nanofazlı köpük içeren numunelerde daha yüksek temas kuvvetleri meydana gelmiş ve normal numunelerle karşılaştırıldıklarında daha düşük hasar bölgeleri oluşmuştur. Nanofazlı köpük çekirdekler gevrek kırılma sergilemişlerdir.

Hazizan ve Cantwell (2003) bir alüminyum bal peteği sandviç kompozitin düşük hızda darbe davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Düşey ağırlıklı bir darbe test cihazı kullanılarak, iki alüminyum sandviç kompozit yapısının düşük hızda darbe

davranışları incelenmiştir. Başlangıçta, cam fiber katkılı/epoksi yüzeyli ve alüminyum çekirdekli kompozitlerin deformasyon hızı duyarlılığı bir takım bükülme, kayma ve ezilme testleri ile araştırılmıştır.

Bu tez kapsamında ise, iki farklı çekirdek malzemesi (PVC, PET) kullanılarak cam elyaf-epoksi sandviç kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. Sandviç yapının üst ve alt kabuk kısmında iki yönlü $\pm 45^0$ kumaşlar kullanılmıştır. Üst ve alt kabuktaki tabaka sayıları $(\pm 45^0)_n$ şeklinde seçilmiştir. Yani iki farklı çekirdek ve dört farklı kabuk kalınlığına sahip sandviç kompozitler için araştırma yapılmıştır. Deney verilerinden yararlanarak, numunelere ait çeşitli darbe parametrelerinin (maksimum kuvvet, maksimum çökme, absorbe edilen toplam enerji gibi) farklı dizilişteki numuneler için değişim grafikleri oluşturulmuş, sonuçlar hasarlı numune fotoğrafları da kullanılarak karşılaştırılmış ve hasar mekanizmalarına ilişkin yorum ve değerlendirmeler yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

SANDVIÇ KOMPOZİTLER

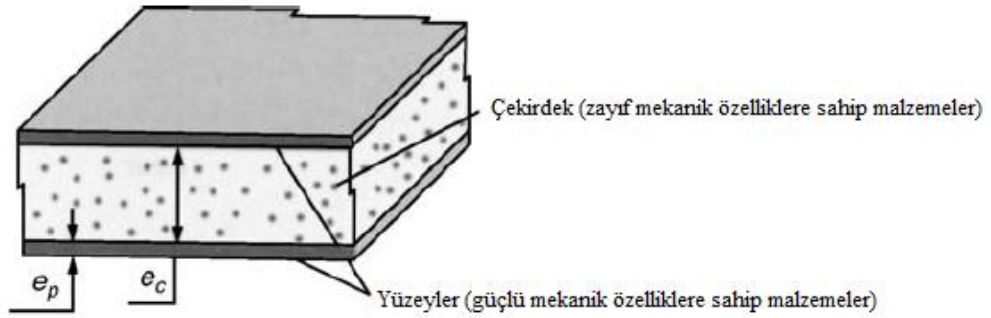
2.1 Sandviç Yapılı Kompozitler

Sandviç yapılı kompozitler özellikle hafiflikleri ve yüksek eğilme dayanımları nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu alanların başında hava araçları ve deniz araçları gelmektedir.

Sandviç yapılı kompozit malzemelerin bir konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılma potansiyeli, İkinci Dünya Savaşı esnasında fark edilebilmiştir. Havacılıktaki gelişmeler, hafif, yüksek mukavemetli ve eğilme direnci gösteren malzemeler gerektirmiş, bu gereksinimleri yerine getiren sandviç yapılı kompozitler de yapısal bileşenler de dâhil olmak üzere birçok uygulama için ilk tercih olmuşlardır.

2.1.1 Tanım

Sandviç kompozitler, çekirdek adı verilen, hafif ve kalın bir tabakanın her iki tarafına eklenmiş iki ince ama sağlam yüzey levhasından oluşurlar. Çekirdek, malzemenin toplam yoğunluğunu azaltırken sert tabakalar da mukavemeti sağlarlar. Sandviç kompozitlerin yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Sandviç kompozit malzemenin yapısı (Gay, 2003)

Yüzey ve çekirdek arasındaki iç bağlar uygulanan kuvvetler arasında ara yüzün bozulmasını önler ve sandviç kompozitin esneklik özelliklerini güçlendirir. Yüzey ve çekirdek kalınlığı arasında herhangi bir genel kural yoktur. Tamamen uygulamaya ve gerekli özelliklere bağlıdır. Sandviç yapılı kompozitlerin en büyük avantajı gerekli

bileşen malzemeleri ve bunların hacimsel fiber yoğunluğu seçerek özelliklerin ayarlanabilmesidir (Gupta, 2003).

2.1.2 Sandviç Kompozitlerin Bileşenleri

Sandviç kompozitlerin başlıca iki bileşeni vardır, bunlar Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yüzey ve çekirdektir. Eğer yüzeyi çekirdeğe yapıştırmak için bir yapıştırıcı kullanılırsa, bu yapışkan tabaka aynı zamanda yapıdaki ilave bir bileşen olarak da değerlendirilir. Bu yapışkan tabakanın kalınlığı genelde, yüzeyin ya da çekirdeğin kalınlığından çok daha az olduğu için ihmal edilir. Sandviç kompozitlerin özellikleri çekirdek ve yüzeylerin özelliklerine, bunların bağıl kalınlıklarına ve aralarındaki bağın karakteristiğine bağlıdır.

2.1.2.1 Çekirdek

Performans gereksinimlerine bağlı olarak, birçok malzeme çekirdek olarak kullanılır. Sık kullanılan çekirdek malzemeleri aşağıdaki gibi üç sınıfa bölünür:

1. Düşük yoğunluklu katı malzemeler: Açık ve kapalı hücre yapılı köpükler, balsa ve diğer ağaç türleri
2. Hücre formundaki genişlemiş yüksek yoğunluklu malzemeler: Bal peteği, ağ çekirdek
3. Oluklu formdaki genişlemiş yüksek yoğunluklu malzemeler: Kiriş, oluklu levhalar

Genişlemiş çekirdek yapımında kullanılan yüksek yoğunluklu malzemeler alüminyum, titanyum ve çeşitli polimerleri içerirler. Çekirdek malzemesinin yapımı yüzeyler ve çekirdek arasındaki ara yüz temas bölgesini etkiler. Genişlemiş yüksek yoğunluklu malzemeler normalde düşük yoğunluklu malzemelere göre çok daha küçük temas alanı sağlarlar. Çekirdek için uygun yapının seçimi, verilen spesifikasyonlara ya da hizmet koşullarına göre bir sandviç kompozit tasarlamak için gerekli bir diğer parametredir.

Kapalı hücre yapılı köpük gibi çekirdeklerin kullanımının, açık hücre yapılı köpük ve çekirdeklere göre büyük avantajları vardır. Kapalı hücre yapılı köpüklerin

spesifik bası mukavemeti çok daha yüksek olup, açık hücre yapılı köpükten çok daha fazla enerji absorbe ederler (Gupta, 2003).

2.1.2.2 Yüzeyler

Yüzey olarak birçok malzeme kullanılmaktadır. Yüzey malzemelerine örnek olarak, alüminyum, titanyum ve çelik gibi malzemelerin levhaları ile fiber katkılı plastikler örnek verilebilir. Fiber katkılı yüzeyler kullanılması durumunda, malzeme özellikleri, sandviç kompozitin özelliklerini ayarlamak için doğrudan kontrol edilebilir. Fiber katkılı polimerler, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül mukavemetleri nedeni ile yaygın olarak kullanılırlar. Polimer kompozitlerin yüzey olarak kullanılmalarındaki diğer bir avantaj da, aynı polimerin hem yüzey hem de çekirdek yapımında kullanılabilecek olmasıdır. Çekirdek ve yüzey arasındaki çapraz polimer bağları, polimer mukavemetine yakın bir adezyon mukavemetine sahiptir. Yüzey ve çekirdeği birbirine bağlamak için bir yapıştırıcı madde kullanıldığı taktirde, bu maddenin seçimi çok büyük önem kazanır, zira bu malzemeler hem yüzey hem de çekirdek malzemeleri ile uyumlu olmalıdırlar. Adezyon kuvveti istenilen mukavemeti sağlamalıdır ve çalışma ortamından etkilenmemelidir.

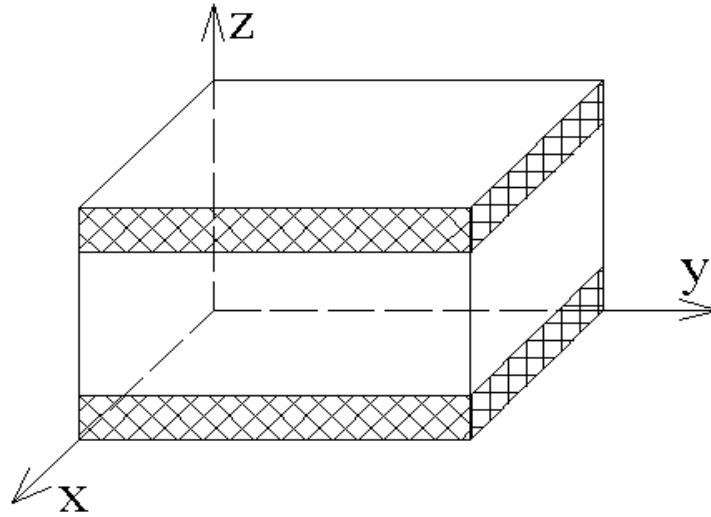
Metalik bileşenler söz konusu olduğunda, yüzey ve çekirdeği bağlamak için kaynak ya da lehim metotları kullanılır. Yapıştırıcıların kullanımı da mümkündür, ancak sadece bileşenlerden bir yada daha fazlasının kaynak/lehim ısısına dayanıklı olmadığı durumlarla sınırlıdır.

Yüzey seçimi çalışma ortamı açısından önemlidir zira yapının bu kısmı dış ortam ile doğrudan temas halinde olmaktadır. Korozyon, ısı transfer karakteristikleri, ısı genleşme karakteristikleri, nem emme ve bütün bir sandviç kompozitin diğer özellikleri uygun yüzey malzemesinin seçimi ile kontrol edilebilir. Çoğu durumda sandviçin her iki yüzeyi de aynı tiptedir, ancak belli özelliklere bağlı olarak değişik tiplerde olabilir. Fark malzeme, kalınlık, fiber oryantasyonu, fiber hacimsel yoğunluğu ve diğer formlarda olabilir (Gupta, 2003).

2.1.3 Sandviç Kompozitlerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin temel avantajı uygulamaya bağlı olarak özelliklerinin ayarlanabilmesidir. Aynı avantaj sandviç kompozitler için de geçerlidir. Uygun yüzey ve çekirdek seçimi sandviç kompozitlerin birçok uygulama ve çevresel koşula uyum sağlayabilmelerini mümkün kılar. Sandviç kompozitlerin birtakım karakteristikleri aşağıda sıralanmıştır.

1. Düşük yoğunluk: Hafif çekirdek ya da genişlemiş yapıli yüksek yoğunluklu malzeme seçimi, sandviç kompozitin toplam yoğunluğunu düşürür. Sandviç kompozitte, çekirdek hacmi yüzey hacmine göre oldukça fazladır, dolayısı ile çekirdek malzemesinin yoğunluğundaki her azalış, toplam sandviç yoğunluğunda önemli etkiye sahiptir.
2. Eğilme dayanımı: Yüzeylerdeki dayanımı yüksek kısımlar (kabuk) ile kalınlığı yüksek çekirdek birlikte sandviç yapının eğilme dayanımını ve eğilme rijitliğini önemli ölçüde arttırır.
3. Çekme ve basma dayanımı: Şekil 2.2’de görüldüğü gibi z-yönü özellikleri çekirdek özelliklerine ve x ve y özellikleri yüzey özellikleri ile kontrol edilir.



Şekil 2.2 Sandviç kompozit malzemenin eksenler üzerinde gösterimi
(Gupta, 2003)

4. Hasar toleransı: Çekirdek olarak esnek köpük ya da ezilebilir malzemenin kullanımı sandviç malzemesini hasara çok dayanıklı bir yapı halinde getirir.

Bu sebepten ötürü köpük çekirdek ya da oluklu çekirdek sandviç yapıları malzemeler, paketleme uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar (Gupta, 2003).

2.1.4 Sandviç Kompozitlerin Avantajları

Sandviç kompozitlerin avantajları şunlardır:

- Özelliklerin gereksinimlere göre ayarlanması
- Çekirdek ve yüzeyler için bol miktarda içerik alternatifi bulunması
- Düşük yoğunluk ve buna bağlı olarak ağırlıktan kazanma
- Yüksek eğilme dayanımı
- Daha yüksek hasar toleransı
- Yerinde imalat
- İyi titreşim sönümlene özelliği

2.1.5 Sandviç Kompozitlerin Dezavantajları

Sandviç kompozitlere özgü, yeni malzemelerin ve imalat metotlarının geliştirilmesi ile aşılabilecek belli eksiklikler vardır. Bunların bir kısmı şunlardır:

- Sandviç kompozitlerin nispeten daha kalın olması
- Sandviç kompozitlerin konvansiyonel malzemelere göre daha pahalı olması
- Sandviç kompozitleri işlemenin daha pahalı olması
- Birleştirme işleminin daha zor olması
- Hasar görmeleri durumunda tamirlerinin zor olması

2.1.6 Sandviç Kompozitlerin Uygulamaları

Düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve yüksek hasar toleranslı malzemeler gerektiren birçok uygulama vardır. Hafiflikleri nedeniyle sandviç kompozitler hava, yer ve deniz taşımacılığında kullanılan birçok araçta yer alırlar. Sandviç kompozitlerin belli başlı uygulama alanlarından bazıları şunlardır:

1. Yapısal uygulamalar: Uçaklar, uzay araçları, denizaltılar, gemiler ve tekneler, yüzey ulaştırma araçları, yapı malzemeleri vs.

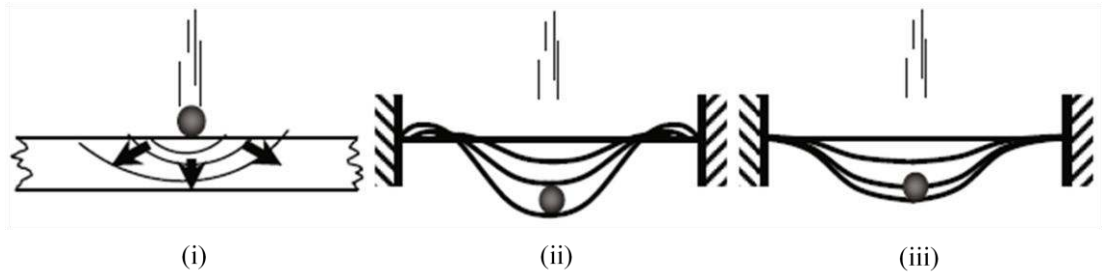
2. Paketleme malzemeleri
3. Isıl ve elektriksel yalıtım
4. Depolama tankları

BÖLÜM ÜÇ

LAMİNE VE SANDVİÇ KOMPOZİTLERDE DARBE TEPKİSİ

3.1 Giriş

Malzemelerin darbe tepkisi, genellikle düşük hız, orta hız, yüksek/balistik hız ve aşırı yüksek hız durumları için incelenir. Şekil 3.1’de de resimlerle gösterildiği gibi, (i) Düşük hız etkisi genelde 10 m/s’nin altındaki hızlarda gerçekleşen ağırlık düşmelerinden meydana gelir. (ii) Patlama yıkıntıları, hortum ve kasırga yıkıntıları, yol ve geçitlerdeki yabancı nesne yıkıntılarının orta hızlı darbe etkisi sistemine girdiği düşünülmektedir. Orta hızlı darbe olayları genellikle 10 m/s ile 50 m/s aralığında gerçekleşir. (iii) Yüksek hız (balistik) etkisi, genellikle küçük silah ateşlemelerinden ya da patlayıcı savaş başlığı parçalarından kaynaklanır. Yüksek hız etkisinin yanısıra, yapının tepki vermeye zamanının olmadığı ve dolayısıyla daha çok bölgesel bir hasarın meydana geldiği durumlardır. Sınır koşulu etkileri göz ardı edilebilir; çünkü darbe olayı gerilme dalgaları sınırına ulaşmadan önce tamamlanır. Yüksek hız etkisi, 50 m/s ile 1000 m/s aralığındadır. (iv) 2-5 km/s’den hızlı aşırı yüksek hız etkisi de, atılan cisim çok yüksek hızda hareket etmektedir ve hedef malzeme, bir sıvı gibi davranır. Bu tür darbeler sıklıkla, Dünya yörüngesi yakınında bulunan cisimler ve çalışanların mikro meteorlara karşı koruma geliştirmesi bağlamında incelenmektedir (Abrate, 2011).



Şekil 3.1 Darbe sistemleri; (i) balistik darbe, çok kısa darbe süreleri ile genişmeli dalganın baskın olduğu tepki; (ii) orta hızlı darbe, kısa darbe süreleri ile bükülgen ve keskin dalganın baskın olduğu tepki; (iii) düşük hızlı darbe, uzun darbe süreleri ile yarı statik tepki (Abrate, 2011).

3.2 Düşük Hızlı Darbe

3.2.1 Genel Bilgiler

Polimer matris kompozitler, düşük hızlı darbenin sebep olduğu iç hasara karşı hassastır. Pek çok durumda hasar yüzeyde görülmemektedir; ancak iç hasar çok önemli olabilir ve kompozit yapının hasar mukavemetini ve hizmet ömrünü azaltır. Kompozitlerin darbe hasarları hakkındaki araştırmalar genellikle hasar mekanizmalarına ve darbe sonrası mekanik performanslarına odaklanmıştır.

Düşük hızlı darbede, hedefin dinamik yapısal yanıtı önemlidir. Çünkü temas süresi, tüm yapının darbeye tepki vermesine yetecek kadar uzundur ve sonuçta, daha fazla enerji esnek şekilde emilir.

Cantwell ve Morton, Charpy, Izod ve aletli ağırlık düşürme deneylerini göz önüne alarak, 10 m/s'ye kadar olan hızları düşük hız olarak sınıflandırır. Liu ve Malvern, darbe türünün uğranılan hasara göre sınıflandırılabileceğini ifade etmektedir. Abrate ve Davies ve Robinson, düşük hızlı darbeyi, bir tabakadan diğer tabakaya kalınlık basınç dalgasının, basınç dağıtımında önemli bir rol oynamadığı darbe olarak tanımlar ve yüksek hıza geçişi belirlemek için bir model önerir.

Darbe çarpma ucunun altında bulunan silindirik bölgenin, basınç dalgası levha boyunca yayılırken tek biçim bir deformasyondan geçtiği ve bunun sonucunda da bir basınç gerinimi, ε_c olduğu düşünülmektedir.

$$\varepsilon_c = \frac{V_i}{V_s} \quad (3.1)$$

Bu formülde, V_i darbe hızı ve V_s malzemedeki sesin hızıdır.

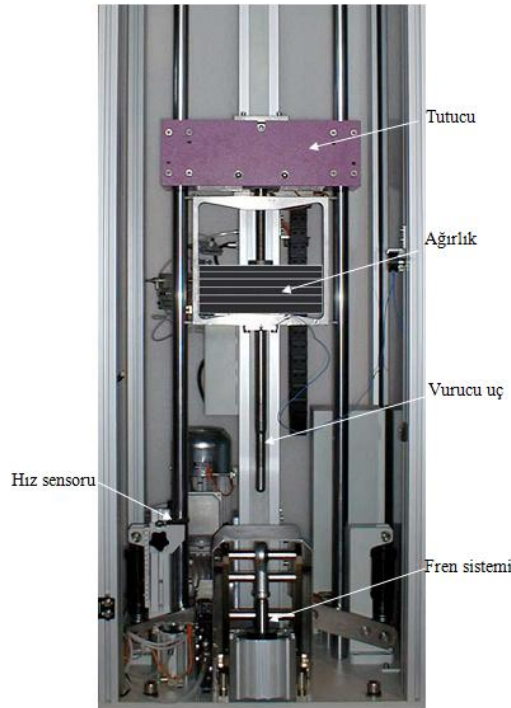
Hasar modu yükleme durumuna bağlıdır. Düşük hızlı darbe için, hasar modu ve absorbe edilen enerji; numunenin boyutuna, rijitliğine ve sınır koşullarına çok bağlıdır. Düşük darbe enerjisine maruz kompozitlerde darbe enerjisi genellikle matris kırılması, fiber kırılması ve ara yüzey ayrılmaları (delaminasyon) şeklinde harcanır.

3.2.2 Test Ekipmanı

Kompozitlere düşük hızlı darbe testi yapılması, birkaç çeşit donanım düzeneği kullanılarak gerçekleştirilebilir. Genelde darbe; sarkaç çekici, düşen ağırlık, dönen çark ya da gaz tüfeğinden atılan bir merminin kullanılması aracılığı ile verilir. Düşük hızlı darbe çalışmalarının en bilinen ekipmanı, Izod ve Charpy Darbe Testleri ve Ağırlık Düşürme Darbe Testidir (Abrate, 2011).

3.2.2.1 Aletli Ağırlık Düşürme Darbe Testi

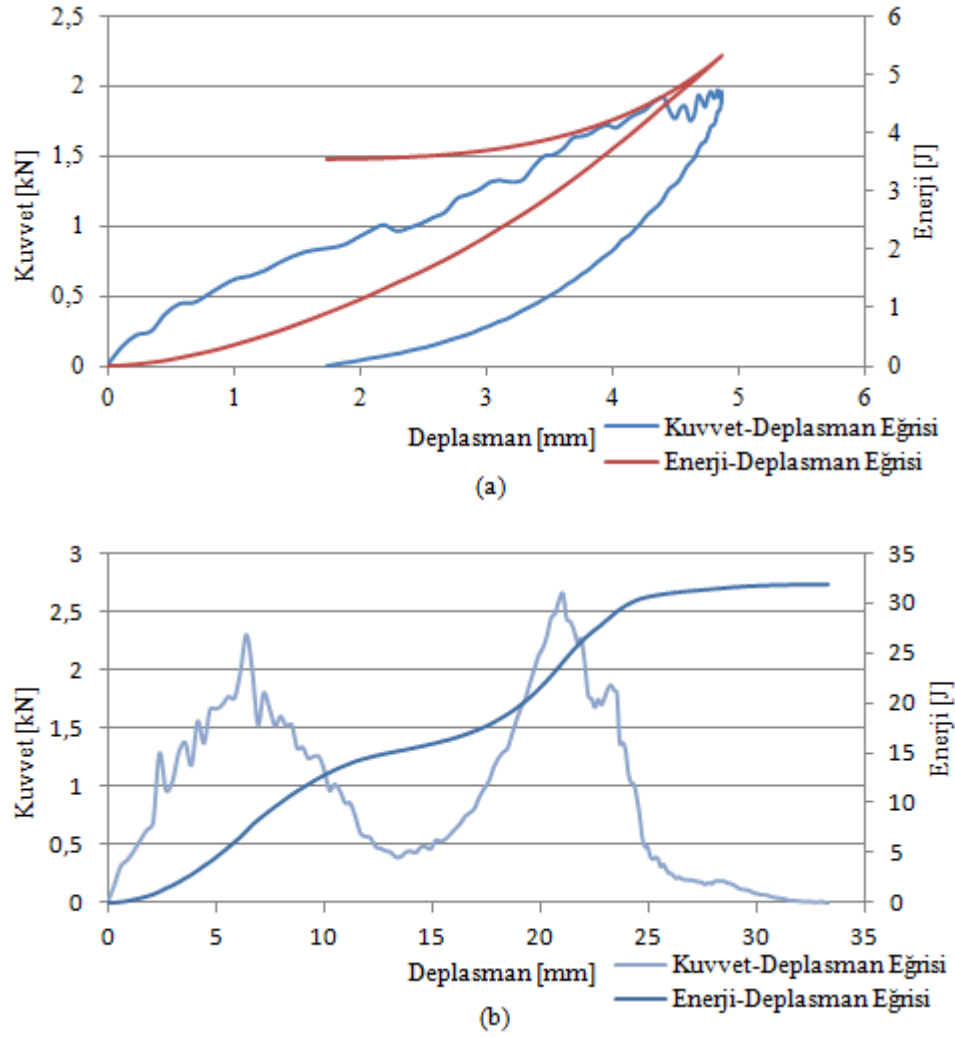
Bu test daha çok katmanlı ya da sandviç kompozite enine darbe gerçekleştiren fiziki senaryoları temsil etmektedir. Şekil 3.2’de serbest düşen ağırlık ile birlikte düşen darbe ucu görülebilmektedir. Vurucu uca bir kuvvet dönüştürücüsü (load cell) yerleştirilmiştir. Darbe enerjisini arttırmak için vurucu uç tutamağına ağırlıklar eklenir. Vurucu ucun numuneye çarpma hızı bir hız sensörü ile ölçülmektedir. Böylece kinematik denklemlerde kullanılacak başlangıç hız değeri tespit edilmektedir.



Şekil 3.2 Serbest düşen ağırlık darbe test cihazının iç gösterimi (Akgün, 2010)

Kinematik denklemler kullanılarak darbeye ait kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, ve enerji zaman gibi grafikler elde edilebilir. bir kuvvet-deplasman grafiğinin altında kalan alan absorbe edilen enerji miktarını vermektedir.

Bir darbe testinde kuvvet-deplasman eğrileri hasar gelişimi ve hasar mekanizmaları hakkında önemli ipuçları içerir. Şekil 3.3a ve 3.3b’de delinmemiş ve delinmiş bir numuneye ait kuvvet-deplasman ve absorbe edilen enerji-deplasman grafikleri verilmiştir.



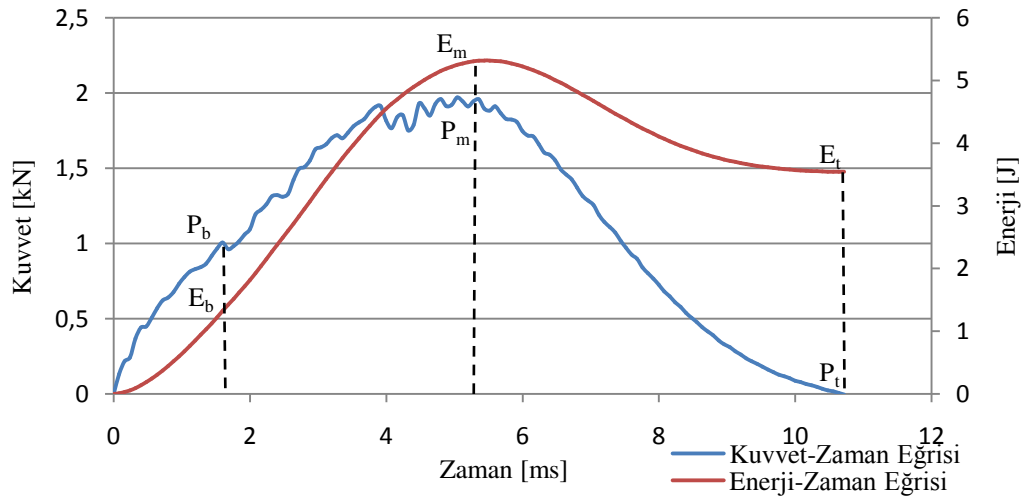
Şekil 3.3 Tipik kuvvet-deplasman ve enerji-deplasman eğrileri; (a) delinmemiş numune, (b) delinmiş numune.

Kompozitler üzerinde gerçekleştirilen literatürdeki bazı çalışmalarda, ayarlanabilir ağırlık düşürme 1 ile 15 kg arasındadır. Düşme yüksekliği birkaç

santimetreden 3-4 metreye kadardır, hız 10 m/s'den genellikle azdır, darbe enerjisi 1 ile 150 J arasındadır ve vurucu ucun çapı da 12 mm ile 19 mm arasındadır. Keskin uç ve düz alan vurucu uçları da kullanılmıştır.

Vurucu ucun numuneye çarpıp geri döndüğü bir darbe durumunda, tek bir darbenin karşılığı olmayan ve aşırı bir hasara sebep olabilecek tekrarlı darbeler meydana gelebilir. Tekrarlı darbeleri engellemek için pnömatis olarak harekete geçen ve ilk darbeden sonra sıçrayarak vurucu ucu tutan mekanizmalar kullanılmaktadır.

Ağırlık düşürme sistemine; düz levhaları, silindirik ve diğer şekillerdeki numuneleri bağlamak için kullanılan çeşitli aparatlar vardır. Genelde malzemenin darbeye tepkisini incelemek için düz bir levha kullanılır. 150 mm x 150 mm, 100 mm x 100 mm ve 150 mm x 100 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmaktadır. 150 mm x 100 mm'lik numune, darbe testine maruz kalmış numune üzerine sıkıştırma testi uygulanacağı zaman kullanılır. Darbe sonrası bası testinde (CAI) numune önce ve daha sonra bası mukavemetini ölçmek için düzlem içi bası testine tabi tutulur. Şekil 3.4'de bir darbe deneyinde veri okuma sisteminden alınan kuvvet-zaman diyagramı ve kinematik denklemler ile elde edilen enerji-zaman diyagramlarının tipik değişimi verilmiştir.



Şekil 3.4 Tipik kuvvet ve enerjiye karşı zaman eğrisi ve darbe sonrası analizleri için ayırt edici noktalar.

Düşük hızlı darbe testinde çeşitli parametreler kapsamaktadır. Bunlar darbe enerjisi, darbe hızı, hasarın yeni başladığı enerji (E_b), toplam absorbe edilen enerji (E_t), toplam hasar (δ_t), hasarın başladığı noktadaki kuvvet (P_b), maksimum kuvvet (P_m), toplam kuvvet noktası (P_t), maksimum kuvvetteki hasar (δ_m) ve enerjide ($E_p=E_t-E_m$) ve maksimum kuvvetten sonraki oluşan hasar ($\delta_p=\delta_t-\delta_m$). Hasarın yeni başladığı nokta (P_b ve E_b), kuvvet-zaman eğrisinin ilk bölümünden ilk önemli hasar ya da kırılmadır. Bu nokta fark edilebilir kılcal matris çatlamasına, fiber hasarına ya da fiber başlangıç ayrılmasına ve darbe uygulanan yüzeyin parçalanmasına (sandviç kompozitlerde) işaret etmektedir. Maksimum kuvvet (P_m) ve enerji (E_m) noktaları vurucu ucun maksimum nüfuziyetine ve geri sekmenin başladığına işaret eder. Pek çok durumda, hasarın yeni başladığı nokta ve maksimum kuvvet noktası aynı zamanda meydana gelmektedir. Hasarlı noktadaki kuvvet (P_t) ve enerji noktaları (E_t), vurucu ucun geri sekme aşamasının sonu numune tepkisini simgelemektedir ve akabinde olayın sonu sırasıyla, P_t ve E_t olarak temsil edilir. Bu parametrelerin her biri numunenin kalınlığı ve tabaka dizilişi, sınır şartları ve vurucu uç geometrisi (keskin, küresel, keskin ya da sivri uçlu olmayan) gibi bir dizi faktörden etkilenmektedir.

3.2.3 Darbe Enerjisi

Çekiçte (Charpy, Izod için) ya da aletli ağırlık düşürme düzeninde numuneye çarpma öncesi maksimum enerjiyi E_0 veren formül şudur:

$$E_0 = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (3.2)$$

Bu formülde, V_0 çekicinin darbeden önceki hızı ve m vurucu ucun kütlesidir.

w , sistemin toplam ağırlığı (vurucu ucun ve test numunesinin) ise; sarkacın darbe etkisi:

$$w = w_h + \left(\frac{1}{3}\right) w_b \quad (3.3)$$

Burada, w_h vurucu ucun ağırlığı ve w_b de test numunesinin ağırlığıdır. Vurucu uc serbest düşen bir nesne olarak görülebilir. O zaman $V_0 = \sqrt{2gh_0}$ olur. Buradaki h_0

düşme yüksekliğidir. Vurucu uç test numunesine temas ettiği zaman, darbe cihazının enerjisi ΔE_0 miktarı kadar düşer.

$$\Delta E_0 = E_0 - E_f = \left(\frac{1}{2}\right) m(V_0^2 - V_f^2) \quad (3.4)$$

Burada, E_f numune ile vurucu ucun ilk temas ettiği andan sonraki t zamanının kinetik enerjisidir ve V_f ’de buna karşılık gelen hızdır.

İmpuls ve momentum arasındaki ilişkiden yola çıkarak;

$$\int_0^\tau P dt = m(V_0 - V_f) \quad (3.5)$$

Burada P, τ zamanındaki kuvvettir.

3.5. denklem, 3.4. denkleminde yerine yerleştirilirse:

$$\Delta E_0 = E_a \left[1 - \frac{E_a}{4E_0}\right] \quad (3.6)$$

Burada,

$$E_a = V_0 \int_0^\tau P dt \quad (3.7)$$

3.6. denklem şu şekilde yazılabilir.

$$\Delta E_0 = \bar{V} \int_0^\tau P dt \quad (3.8)$$

Burada, tanım gereği;

$$\bar{V} = \left(\frac{1}{2}\right) (V_0 + V_f) \quad (3.9)$$

3.2.4 Düşük Hızlı Darbelerde Hasar Modları

Darbeye maruz fiber takviyeli plastik (FRP) levhaların heterojen ve anizotropik yapısı farklı hasar modları verir. Pek çok durumda, bu hasarlar (1) çeki ve bası gerilmeleri ya da kesme etkisiyle fiberlere paralel oluşan matrix kırılmaları (2) tabakalar arasında ayrılma (delaminasyonu) (3) fiber kırılması ve (4) nüfuziyet /delinme şeklinde sıralanabilir. Hasar modları arasındaki etkileşim hasar modunun başlamasını ve yayılmasını etkiler.

3.2.4.1 Matris Hasarı

Matris hasarı düşey düşük hızlı darbe uygulanmasından dolayı gerçekleşir ve genelde matris kırılması, fiber/matris yapışkanlığının azalması ya da ayrılması ve delaminasyonun başlaması şeklinde gerçekleşir. Bazen gözle zor görülebilen matris hasarları düşük hızlı darbe enerjisi seviyelerinde (1 ile 5 J) gerçekleşir. Matris kırılmaları tek yönlü fiber kompozitlerde fiber yönüne paralel düzlemlere yönelir. Üst tabakalardaki matris kırılmaları vurucu ucun temas ettiği kenarlarda başlar. Kesme kırılmaları malzeme boyunca çok yüksek enine kesme gerilmesi tarafından oluşur. Düşey kesme gerilmeleri temas kuvveti ve temas alanıyla ilgilidir.

İnce numunelerde hasar genellikle alt katmanlarda eğilme kırıkları şeklinde oluşur. Kalın numunelerde ise membran gerilmeleri ağır basar ve daha yüksek pik temas kuvvetlerine ulaşır. Bu da darbe noktasında kesmeden kaynaklanan hasarlara (kırılmalara) neden olur.

3.2.4.2 Delaminasyon

Delaminasyon tabakalar arası ayrılma şeklinde tanımlanan bir hasar modudur. Delaminasyon, bitişik tabakalar arasındaki farklı eğilme rijitlikleri nedeniyle örneğin farklı fiber oryantasyonları ortaya çıkar. Delaminasyon alanı genelde dikdörtgen şeklindedir ve ana eksenini, ara yüzün altındaki tabakanın fiber oryantasyonu ile çakışır. 0/90 levhalar için, genelde yer fıstığı şeklinde bir hasar oluşur. Eğilmenin sebep olduğu gerilmeler, delaminasyonun temel sebebidir. Bazı çalışmalar, iki bitişik levha arasında bir eğilme uyumsuzluğu katsayısı tanımlamıştır. Uyumsuzluk büyüdükçe, delaminasyon alanı da büyür. Malzemelerin özellikleri, istifleme sırası ve levhanın kalınlığı da bunu etkilemektedir.

Elastik şekil değiştirme enerjisini hesaplamak için deneysel bir ilişki, enine darbe altında delaminasyon hasar noktasında absorbe olan enerji E , şu denklemle verilir.

$$E = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (3.10)$$

Bu denklemde, t =kalınlık, τ =tabaka içi kesme mukavemeti (ILSS), w =genişlik, L =desteksiz uzunluk ve E_f =eğilme katsayısıdır. Absorbe edilen elastik gerinim enerjisi, kalınlığın ve eğilme katsayısının (yüksek rijitlik) artması ile azalır.

3.2.4.3 Fiber Kırılması

Fiber kırılması, genellikle hasar sürecinde matris kırılması ve delaminasyondan sonra gerçekleşir. Fiber kırılması bölgesel olarak yüksek eğilme gerilmeleri dolayısıyla vurucunun tam altında darbe uygulanmamış yüzeyde başlar. Fiber kırılması, ciddi nüfuziyet hasarının öncü oluşumudur. Arka yüzeyin eğilmesi nedeniyle gerçekleşen fiber kırılması için gereken enerjiyi aşağıdaki denklem vermektedir:

$$E = \frac{\sigma^2 w t L}{18 E_f} \quad (3.11)$$

Bu denklemde, σ =bükülme mukavemeti, E_f =bükülme katsayısı, w =genişlik, L =desteksiz uzunluk ve t =numune kalınlığıdır (Abrate, 2011).

3.2.4.4 Nüfuziyet

Nüfuziyet, çıplak gözle görülebilen bir hasar türüdür ve fiber kırılması kritik bir büyüklüğe ulaşarak vurucu ucun malzemeye tamamen nüfuziyeti sağladığında oluşur. Darbe enerjisi nüfuziyet eşiği numunenin kalınlığı ile hızla artar. Levhaya nüfuziyet sırasındaki temel enerji absorbe biçimleri şunlardır: kesme, delaminasyon ve elastik eğilme. Bu mekanizmalardan biri olan “kesme” levha kalınlığına bağlı olarak, %50-60’ının sebebini göstermektedir. Numune boyutu, fiber boyutları, oryantasyon, dokuma tarzı ve tabaka dizilişi, matris türü ve ara yüz yapışma özellikleri gibi çeşitli faktörlerin nüfuziyet süreci üzerine etkisi vardır.

Absorbe edilen enerjiyi elde etmek için önerilen analitik nüfuziyet bağıntısı şöyledir:

$$E = \pi \gamma^2 t d \quad (3.12)$$

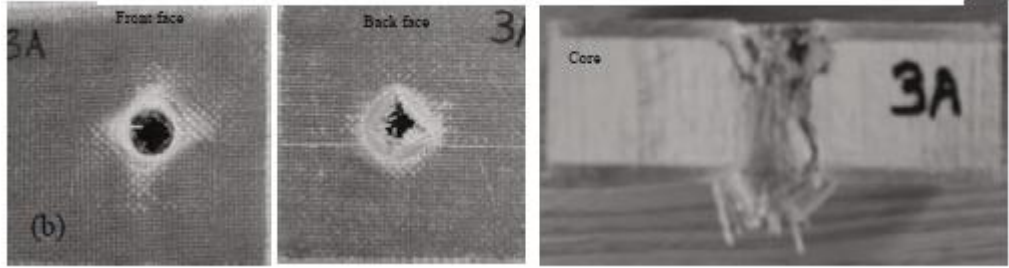
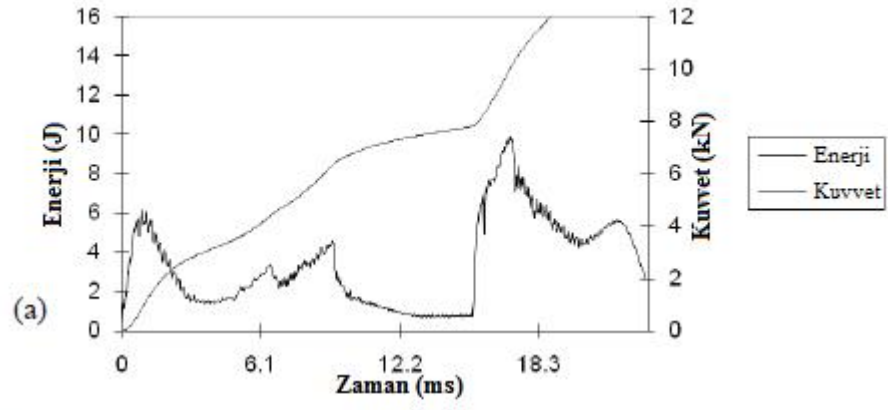
Burada, γ =kırılma enerjisi, d =vurucu ucun çapı ve t =levha kalınlığıdır.

3.3 Sandviç Kompozitlerde Düşük Hız Darbeleri

Sandviç kompozit düşük yoğunluklu bir çekirdek ile ayrılan yüksek mukavemetli, yüksek modüllü yüzeylerden meydana gelir. Çekirdek genellikle hafiftir ve kalınlığı, yüzeylerinkinden daha fazladır. Yüzeyler kalınlık, malzeme ya da fiber oryantasyonu bakımından farklılık gösterse de, iki yüzey malzeme ve kalınlık bakımından genellikle aynıdır. Yüzeyler, düz ve yanal (eğilme) kuvvetlere direnç gösterir. Çekirdeğin birincil görevi, kesmeye ve düşey sıkıştırma kuvvetlerine dayanmaktır. Yüzeyler, bileşenler arasında yük aktarımını sağlamak için, çekirdeğe yapışkan bir şekilde bağlıdır. Sandviç yapısının çekirdeği, neredeyse tüm malzemelerden ya da mimari yapıda olabilir ancak, genellikle dört tür çekirdek vardır: (a) köpük ya da katı çekirdek, (b) bal peteği çekirdek, (c) makaslı çekirdek, (d) oluklu çekirdek.

Sandviç kompozitte tipik düşük darbe hasarı şu şekilde oluşur: (a) darbe tarafındaki yüzey tabakası, düşey kesme kuvvetine maruz kalır. Yüzey tabakası nüfuziyete direnç gösterirse, darbe tarafındaki yüzey tabakası ile sınırlı olan yoğun hasar vardır. Aralarındaki şekil değiştirme uyumsuzluğu nedeniyle, darbe noktasına bitişik yüzey tabakası ve çekirdek arasında ayrılmalar meydana gelebilir. Daha yüksek darbe enerjilerinde, vurucu uç en üstteki yüzey tabakasına nüfuz eder ve çekirdeğe doğru ilerler; (b) çekirdekteki hasar; hücre ezilmesi, kesme kırılması ve yüzey tabakasının çekirdeğe olan yapışmasının azalması şeklindedir; (c) vurucu uç, arka yüzey tabakasına yüklenerek arka yüzeyde eğilme gerilmelerine sebep olur. Sonuç olarak, arka yüzey tabakası ile çekirdek ara yüzeyinde önemli ayrılmalar meydana gelir.

Sandviç kompozitte oluşacak darbe hasarının türü; panel destek durumu, atılan cismin şekline, yüzey tabakasının ve çekirdeğin geometrik ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Yüzey tabakası inceldikçe hasarlar büyüme eğilimindedir ve yüksek normal gerilme kuvvetleri, çekirdekte mod I gerilme kırılmasına sebep olur. Buna karşılık yüzey tabakası kalınlığı arttıkça, hasar küçülür. Atılan cismin etrafını çevreleyen bölgelerdeki düşey kesme kuvvetleri çekirdekte mod II kesme kırıklarına neden olur. Şekil 3.7’de sandviç kompozit bir yapının darbe testine karşılık gelen enerji-zaman, kuvvet-zaman grafikleri ve hasarlı numune fotoğrafları verilmiştir.



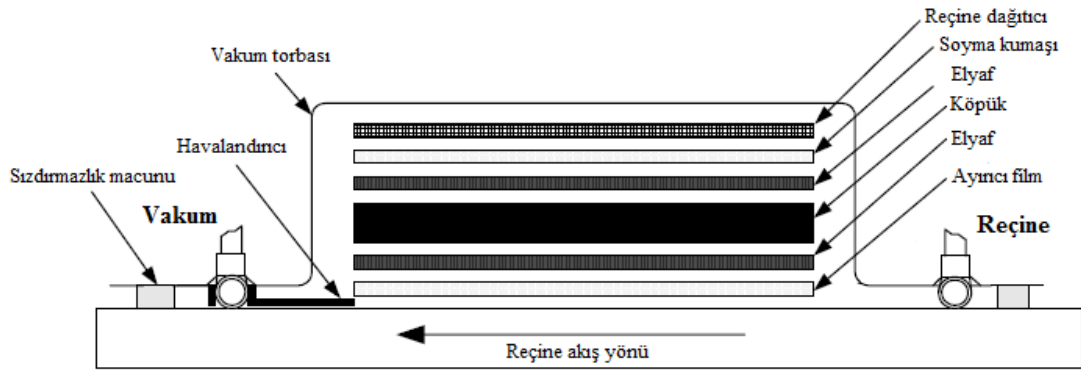
Şekil 3.7 Balsa ağacı çekirdekli/E-camı vinil ester sandviç kompozitin düşük hızlı darbe hasarı. (a) Kuvvet-zaman ve enerji-zaman eğrisi; (b) Üst yüzey, çekirdek ve alt yüzeyde delinme (Abrate, 2011).

BÖLÜM DÖRT

SANDVIÇ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

4.1 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan sandviç kompozit paneller vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi ile üretilmiştir. Çekirdek malzemesi olarak PVC ve PET köpükler, kabuk malzemesi olarak da E-camı/epoksi kullanılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi kısaca kalıp ayırıcı sürülmüş bir kalıbın içerisine cam elyaf, karbon, aramid vb. kumaşların belirlenen tabaka dizilişine uygun olarak yerleştirilmesi, ve bu kumaşların kalıp çevresine yerleştirilen macun bantlar ve vakum folyosu (torbası) vasıtasıyla dış ortamdan izole edilmesi, yapının vakum ortamına alınması ve daha sonrada reçine nüfuz ettirilmesi esasına dayanır. Şekil 4.1’de söz konusu yönteme ait şematik bir gösterim verilmiştir. Aşağıda bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen üretim basamakları verilmiştir.



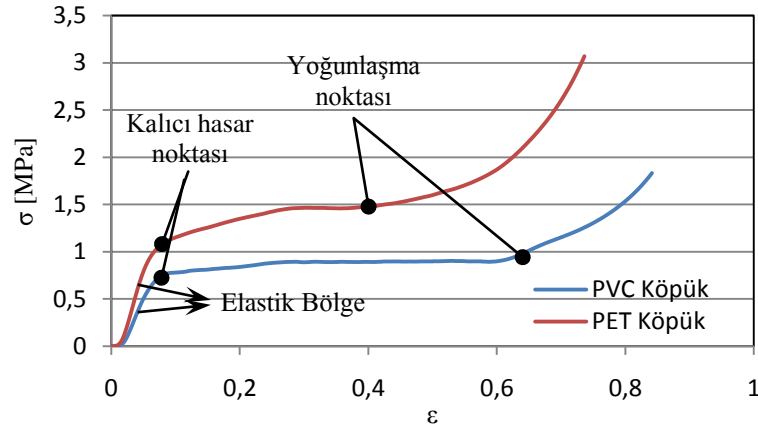
Şekil 4.1 Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile sandviç kompozit malzeme üretiminin şematik gösterimi (Gören, 2008).

Bu çalışmada kullanılan PVC ve PET köpüklerin özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan PET köpük (AIREX® T92.100) ve PVC köpüğün (AIREX® C70.55) mekanik ve fiziksel özellikleri

	AIREX® T92.100	AIREX® C70.55
Yoğunluk (kg/m ³)	105	60
Basma mukavemeti (N/mm ²)	1,4	0,9
Basma modülü (N/mm ²)	90	69
Çekme mukavemeti (N/mm ²)	2,3	1,3
Çekme modülü (N/mm ²)	110	45
Kayma mukavemeti (N/mm ²)	0,9	0,85
Kayma modülü (N/mm ²)	21	22
Kopmadaki kayma uzaması (%)	15	16
Oda sıcaklığında ısı iletkenliği (W/m.K)	0,034	0,031

Kullanılan PVC ve PET köpüklere ait bası testleri de yapılmıştır. Darbe testlerini yorumlamada yol gösterici olan bu testler aşağıda verilmiştir.

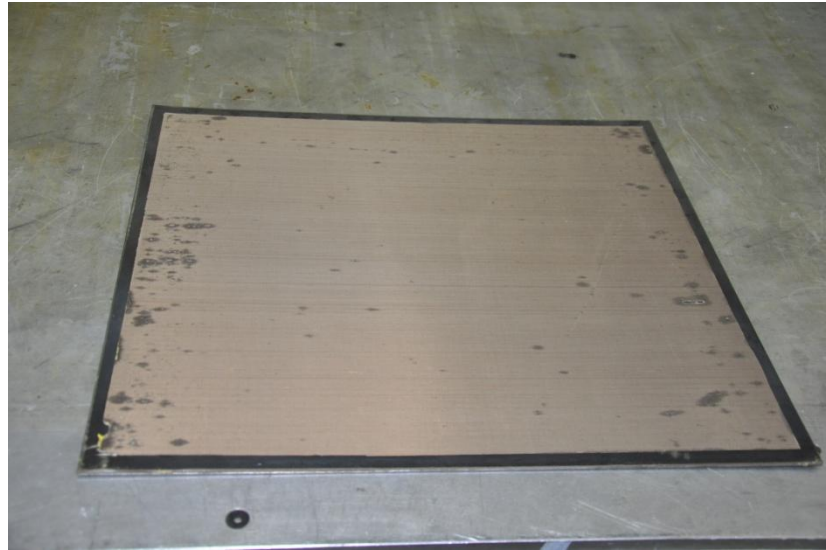


Şekil 4.2 PVC ve PET köpüklerinin 5 mm/s ile yapılan basma testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrisi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi PET köpüğün basma testine dayanımının daha iyi olduğu görülmüştür. Yaklaşık olarak PET köpüğün basma testine dayanımının 1.1 MPa, PVC köpüğün basma testine dayanımının 0.8 MPa civarında olduğu görülmüştür.

Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi için işlem basamakları aşağıda özetlenmiştir:

1. Üretim yapılacak plakanın yüzeyi: Üretim yapılacak plaka, öngörülen kompozit tabakayı içine almaya yetecek düzlemsel boyutlara sahip düz metal bir levhadır. Burada kalıp ayırıcı olarak kimyasal bir malzeme yerine teflon filmler kullanılmıştır. Metal levha üzerine teflon yüzey kaplamadan önce daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için kalıp olarak kullanılan metalin üzeri zımpara kâğıdı ve asetonla temizlenir. Bu işlemten sonra temizlenmiş yüzeyin üzerine yapılacak kompozit malzemenin metal yüzeye yapışmaması ve kolay ayrılması için teflon ile kaplanır. Bu teflon birden fazla üretimde kullanılacağından her üretim öncesinde aseton ile temizlenmelidir ve sızdırmazlık macununun yapışacağı bölgelerde sızdırmazlığı engelleyecek elyaf parçaları vb. kalıntılar temizlenmelidir.



Şekil 4.3 Üzeri teflon ile kaplanmış metal levha.

2. Sızdırmazlık macunu: Vakum torbasının etrafından herhangi hava girişi veya reçine çıkışı olmasını engellemek amacıyla kullanılır. Sızdırmazlık macunu yaklaşık olarak yarısı teflona yarısı metale yapıştırarak bir çerçeve oluşacak şekilde uygulanır. Sızdırmazlık macununu korumak için sızdırmazlık macunu üzerindeki koruyucu kâğıt çıkartılmaz.



Şekil 4.4 Yaklaşık olarak yarısı teflona yarısı metal levhaya çerçeve oluşacak şekilde yapıştırılmış sızdırmazlık macunu.

3. Elyaf ve köpüklerin yerleştirilmesi: Elyaf ve köpükler teflon yüzey üzerine macun çerçevesinin içine istenilen oryantasyonlarda yerleştirilerek istiflenir. Boru sistemi için sızdırmazlık macunu ile elyaflar arasında yeterli boşluk bırakılmalıdır.



Şekil 4.5 Teflon yüzeyin üzerine elyaf ve köpüklerin yerleştirilmesi.

4. Soyma kumaşı: Gözenekli soyma kumaşı yerleştirilen elyafların üzerini örtecek şekilde kesilir ve elyafların üzerine örtülür. Soyma kumaşı, üretilen tabakadan diğer yardımcı malzemelerin kolaylıkla ayrılmasını sağlayacaktır.



Şekil 4.6 İstiflenmiş elyaf ve köpüklerin üzerini tamamen örtecek şekilde serilmiş soyma kumaşı.

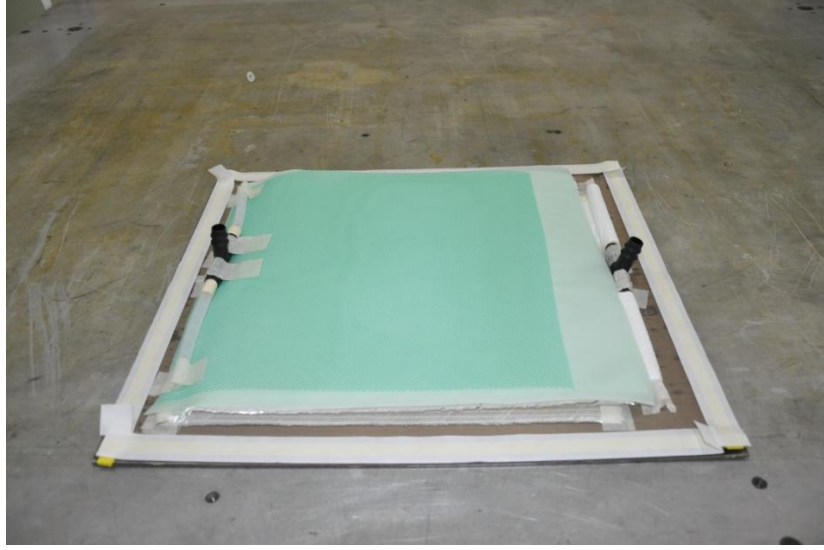
5. Reçine dağıtıcı: Yüksek geçirgenlikte reçine dağıtıcısı üretilecek parçaya uygun olacak şekilde kesilir ve soyma kumaşının üzerine serilir. Reçine dağıtıcı reçinenin daha hızlı ve mümkün olduğunca eşit şekilde dağılmasını sağlayan kumaştır. Sistemin en üstüne yerleştirilir.



Şekil 4.7 Soyma kumaşı üzerine yerleştirilmiş reçine dağıtıcı.

6. Reçine dağıtıcı spiral borular: Reçine dağıtıcı spiral boru reçine verilecek tarafta reçine dağıtıcının üzerine levhanın genişliği boyunca yerleştirilir. Reçine verilecek taraftaki spiral boru reçinenin dağıtım ortamına ve kalıba

sürekli bir hat şeklinde eni boyunca çabucak ilerlemesini sağlar. Vakum tarafına yerleştirilen spiral boru levhadan yeterli boşluk bırakılarak yerleştirilir. Bu spiral borular ile elyaf arasındaki temas havalandırma kumaşı yerleştirilerek sağlanır. Aksi halde vakum torbası vakum altında teflon tabakaya yapışacağından elyaflara vakum sağlanamamış olur. Spiraller üretim bittikten sonra sertleşmiş reçineden temizlenerek tekrar kullanılabilirler.



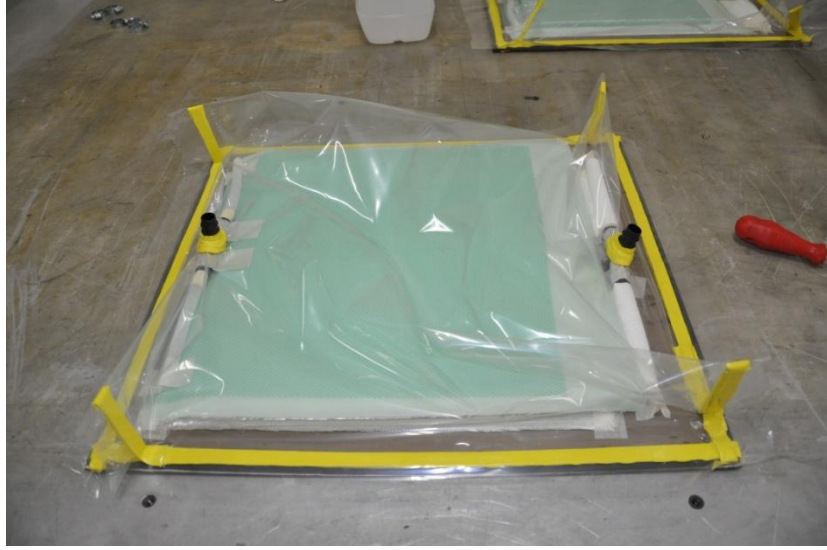
Şekil 4.8 Reçine dağıtıcı spiral borular: Reçine verilecek taraftaki spiral boru reçine dağıtıcının üzerine ve vakum yapılacak taraftaki spiral boru elyaflardan belirli bir mesafe bırakılarak teflon üzerine yerleştirilir.

7. Vakum torbası: Tabaka tamamlandıktan ve spiral boru sistemi yerleştirildikten sonra, parça uygun bir film kullanılarak torbalanabilir. Vakum torbasında kırışıklık bırakmamaya dikkat edilir. Üretim yapılacak plakanın yüzeyi ile vakum torbası arasında hava geçirmez sızdırmazlık macunu kullanılır. Sandviç kompozit malzeme üretiminde vakum torbası yeterince büyük (yani üretilecek parçadan dah büyük) tutmak gerekir. Çünkü vakum altında ve fırında kür işlemi sırasında vakum torbasında gerilmeler ve dolayısıyla yırtılmalar olabilir. Bu yüzden kulak dediğimiz yeterli boşluklar bırakılır.

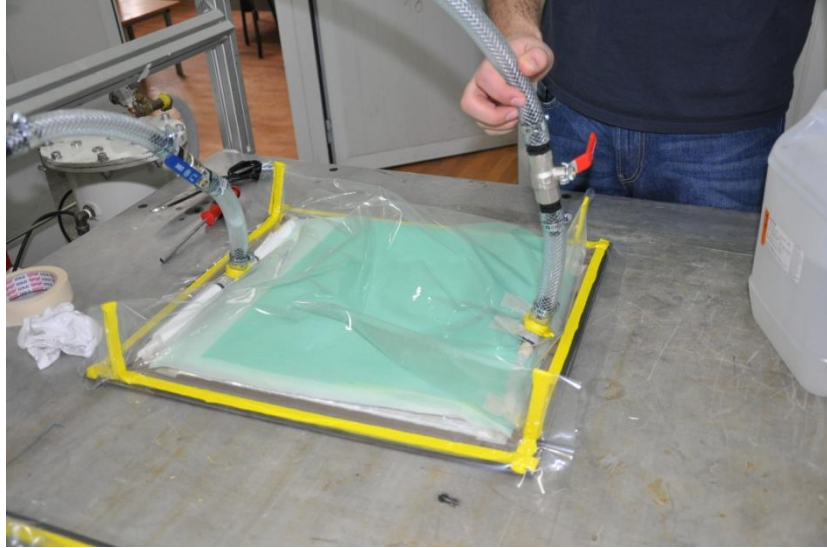


Şekil 4.9 Vakum torbasına alınmış üretilecek tabaka.

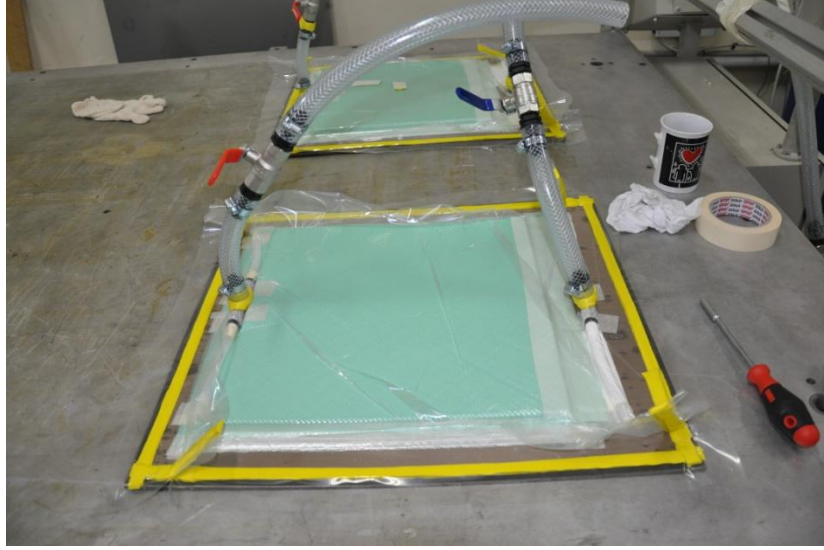
8. Reçine verme ve vakum boru sistemi: Reçine verme ve vakum yapmak için plastik esaslı örgülü hortumlar kullanılmıştır. Vakum torbası içinde kalan spiral boruların T bağlantılarının olduğu yerden delinir. T bağlantıları vakum torbası dışına çıkarılır ve sızdırmazlık macunu ile etrafı iyice sarılır. Vanalı boru sistemi reçine verilecek ve vakum yapılacak yerlere takılarak kelepçe ile iyice sıkılır. Sonra reçine giriş vanası kapatılır ve vakum pompası çalıştırılarak 1 atm'e kadar vakum yapılır. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra vakum tarafındaki vana kapatılır. Dinleme cihazı kullanarak ya da vakum hattına yerleştirilmiş vakum ölçer kullanarak varsa hava kaçakları tespit edilebilir. Sistemdeki küçük bir sızıntı bile, kompozit parçada boşluklara ve zayıf birleşmelere sebep olabilir.



Şekil 4.10 Vakum torbası delinerek çıkartılmış spiral boruların T bağlantıları.



Şekil 4.11 Reçine verme ve vakum boru sistemi spiral boru sisteminin T bağlantılarına kelepçe ile bağlanır.



Şekil 4.12 Vakum altına alınmış reçine verilmeye hazır tabaka.

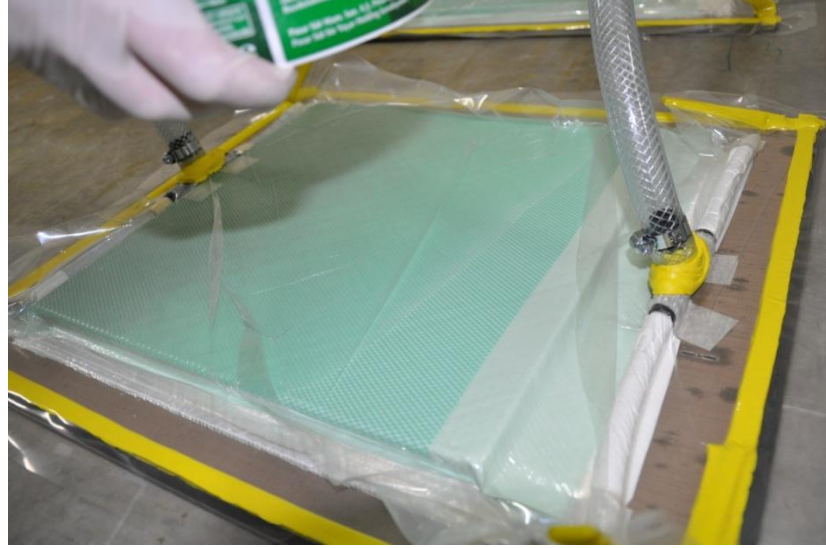
9. Reçine hazırlanması ve gazdan arındırılması: Üretici firmanın belirttiği oranlarda reçine ve sertleştirici karıştırılır. Karıştırma işlemi bir mikser yardımıyla yapılabilir.



Şekil 4.13 Belli oranlardaki reçine ve sertleştiricinin karıştırılması.

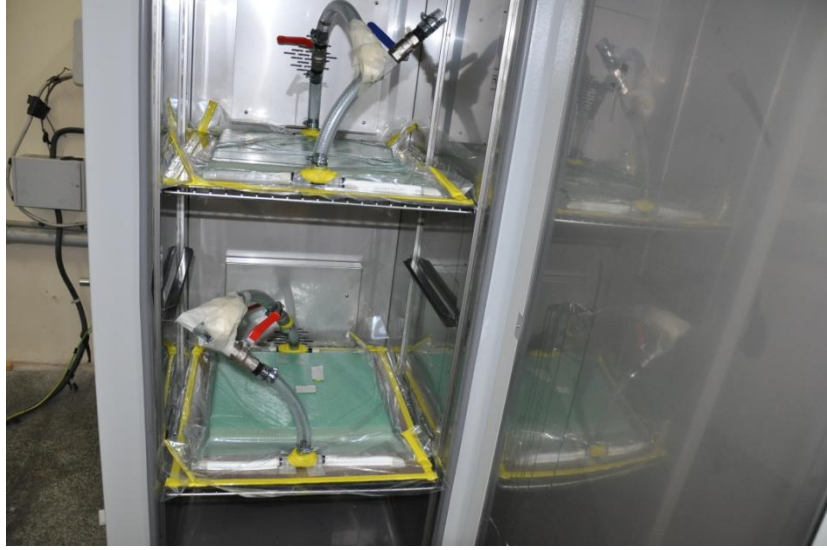
10. Reçinenin sızdırılması: Tabaka torbalanmış ve tam vakumlu hale gelmişken, reçine verme borusunun ucu gazı alınmış reçine kovasına daldırılır. Boruya ve reçinenin önündeki kısma hava girmesini engellemek için borunun ucu kovaya daldırılmış haldeyken vana açılır. Vakum pompası çalıştırılır. Reçine, reçine verme borusundan geçerek spiral borulara akar. Spiral şeklindeki

dağıtıcı boru reçinenin dağıtıcı file üzerinden, tabakanın eni boyunca çabucak yayılmasını sağlar. Reçine dağıtıcı file reçinenin hem plaka düzleminde hem de kalınlık boyunca daha kolay yayılmasını ve nüfuz etmesini sağlar.

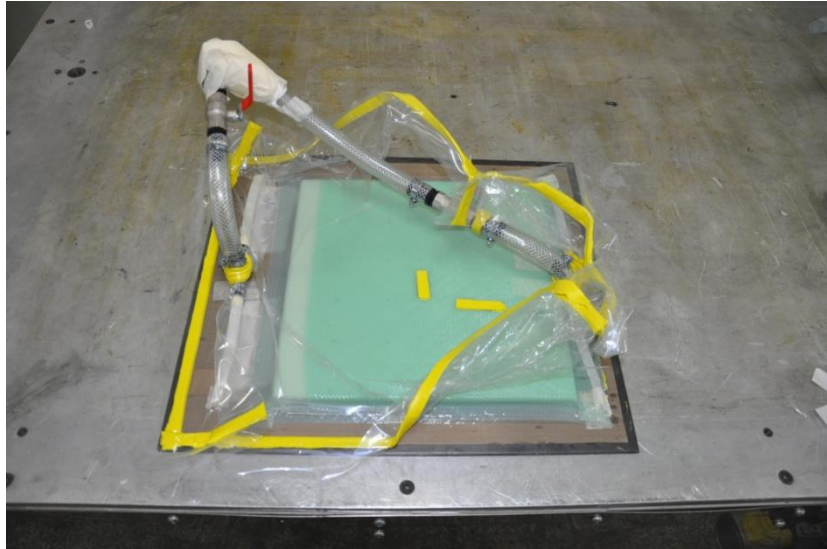


Şekil 4.14 Vakum altındaki tabakaya reçinenin verilmesi.

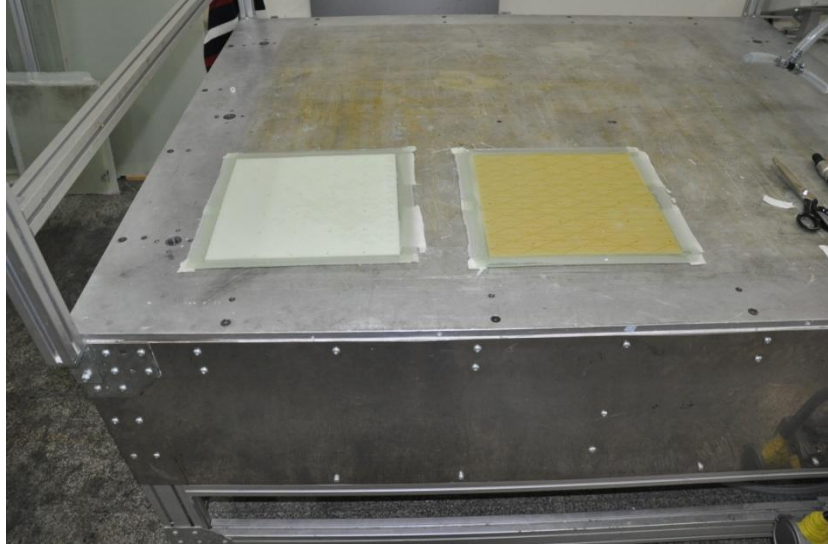
11. Sızdırma işleminin tamamlanması: Reçinenin tabaka içerisinden akışı, vakum torbasından görülür. Reçine kumaşlara tamamen nüfuz ettiğinde reçine verme işlemi tamamlanmış olur. Önce reçine verme borusunun vanası ve ardından, vakum borusunun vanası kapatılarak reçine akışı durdurulur. Bu vanaların hava geçirmez bir yalıtım sağlamaları gerekmektedir. Çünkü kürleme sırasındaki herhangi sızıntı, parça kalitesinde problemlere yol açacaktır. Son olarak parça fırına yerleştirilir ve reçine tedarikçisi tarafından öngörülen kürleme döngüsüne göre ısıtılır ve soğuduktan sonra kompozit parça diğer yardımcı malzemelerden ayrılır.



Şekil 4.15 Reçine verme işlemi tamamlanan tabakalar kürleşme işlemi için fırına yerleştirilir.



Şekil 4.16 Kürleşme işlemi tamamlanmış ve fırın içinde soğutulmuş tabaka üzerindeki vakum torbası, reçine dağıtıcı, soyma kumaşı, spiral borulardan temizlenir.



Şekil 4.17 Vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilen sandviç kompozit malzemeler.

BÖLÜM BEŞ

DÜŞÜK HIZLI DARBE DENEYİ VE BASMA DENEYİ SONUÇLARI VE ANALİZLERİ

Bu bölümde darbe deneylerinde düşen ağırlık esasına dayalı çalışan, termal şartlandırma kabini (-100°C ile $+150^{\circ}\text{C}$ arasında), ilave enerji sistemi (1800 J enerji ve 24 m/s hız değerine çıkabilen), darbe sonrası fren sistemi (vurucu ucun geri sekme sonrası tekrar numuneye düşmesini engelleyen), vurucu ucu yağlama sistemi gibi özelliklere sahip Ceast marka Fractovis Plus darbe test cihazı kullanılarak elde edilen veriler analiz edilmiştir. Kuvvet-deplasman grafiği, absorbe edilen enerji-zaman grafiği, hız-zaman grafiği, eş enerji grafiği, karşılaştırmalı kuvvet-zaman-enerji grafiği, karşılaştırmalı kuvvet-deplasman-enerji grafiği, kuvvet-deplasman grafiklerinin farklı tabaka sayılarına ve farklı çekirdek malzemelerine göre karşılaştırmalı grafikleri çizilerek yorumlanmıştır.

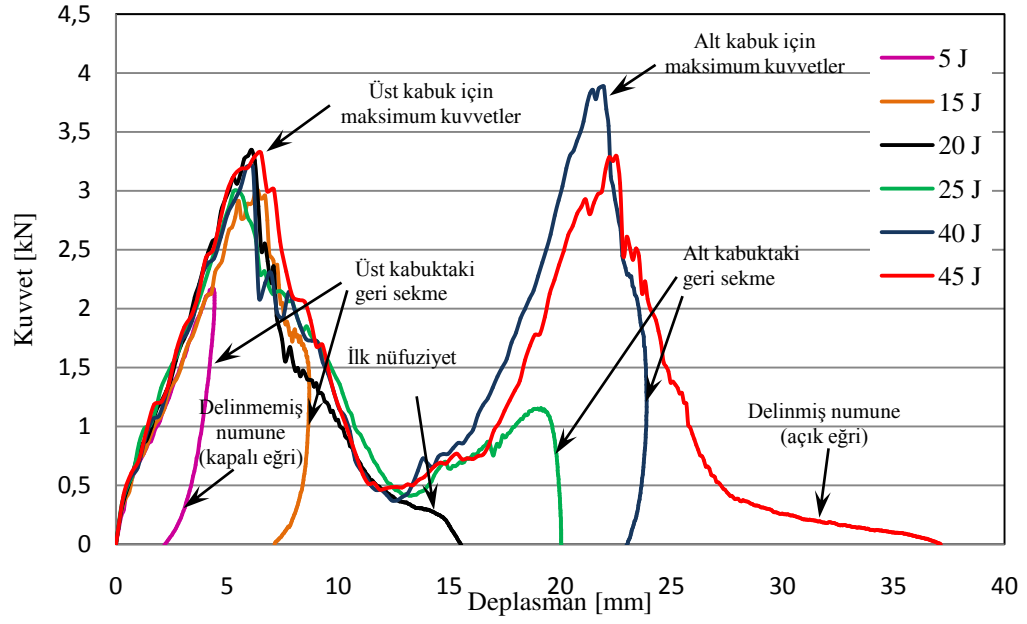
5.1 Kuvvet-Deplasman Grafiği

Düşük hızlı darbe testi uygulanan bir sandviç kompozit malzemenin verdiği darbe tepki karakteristiklerini kuvvet-deplasman grafiğinde görebiliriz. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi açık ve kapalı eğriler olmak üzere iki tip eğri vardır. Sandviç malzeme için kapalı eğriler üst kabuğu geçmeyen hasarlar için artan ve azalan, çekirdekte kalan hasarlar için artan azalan, alt kabuğa ulaşan fakat delinme gerçekleşmeyen artan-azalan ve tekrar artan azalan bölümlerden oluşmaktadır. Artan bölüm aynı zamanda eğilme rijitliğini karakterize eder. Darbe enerjisine bağlı olarak üç farklı eğri elde edilebilir. Bunlar vurucu ucun numuneden geri sekmesi ile oluşan geri sekme eğrisi, yumuşak bir geri sekme yani nüfuziyet eğrisi ve delinme eğrisi olabilir. Azalan eğri tamamen delinmiş bir hasarlı numuneye aitse kuvvet-deplasman eğrisi açık eğri olur. Darbe enerjisi düşük olduğu durumlarda kuvvet-deplasman eğrisi kapalı bir eğri olur geri sekme sonucu kuvvet ve deplasman azalır ve aynı noktaya gelir. Darbe enerjisinin artmasıyla kuvvet maksimum noktaya yükselir bu noktaya maksimum kuvvet denir. Sandviç kompozit malzemede üst ve alt kabuk için iki maksimum kuvvet noktası oluşur. Kısmi hasarlı dolayısıyla kısmi geri sekmeli durumlarda grafiğin azalan kısmında geri sekme olana kadar deplasmanın arttığı görülür. Darbe enerjisi arttıkça hasar artar ve geri sekme azalır. Darbe enerjisi

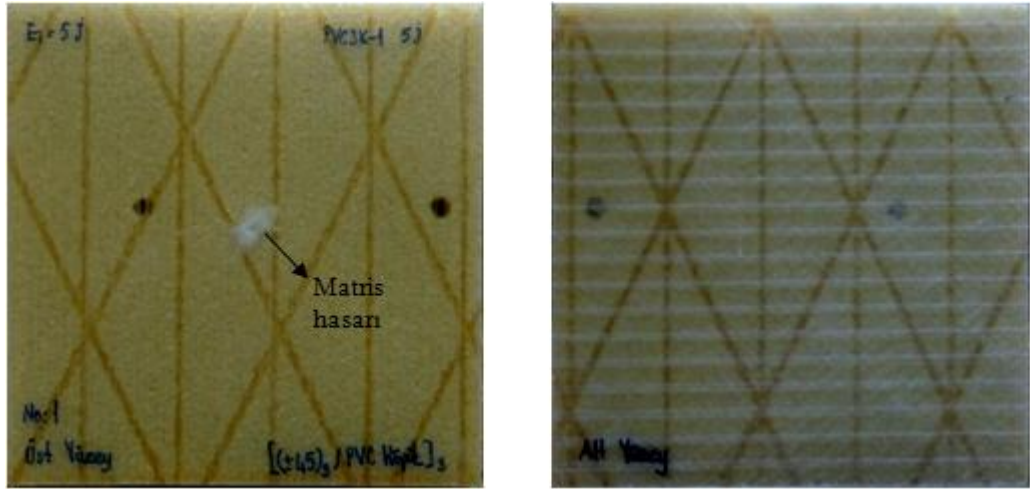
tamamen delinme görülünceye kadar arttığında eğri açık eğri olur ve geri sekme gözlenmez. Açık eğri nüfuziyetin ve delinmenin olduğunu gösterir. Delinme eğrisindeki açık kısımda devam eden yatay kısım hasar sonrasında numune ile vurucu ucun arasındaki sürtünmeden dolayı oluşur. Sandviç kompozit malzemelerde alt kabuktaki nüfuziyet eğrisinde görüldüğü üzere eğrinin son ucu delinme eğrisine yakındır bu durum delinmeye yakın nüfuziyet olduğunu gösterir. Kuvvet-deplasman eğrisi integre edilirse eğri altında kalan alan absorbe edilen enerjiye karşılık gelir. Bu eğriler her bir numune için integre edilerek absorbe edilen enerji hesap edildikten sonra kompozit malzemeye ait absorbe edilen enerji-darbe enerjisi grafiği çizilebilir.

$[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numunelere uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta küçük matris hasarları (matris kırılması, fiber/matris yapışkanlığının azalması yada ayrılması ve delaminasyon başlaması), 15 J’de üst kabukta matris hasarı, delaminasyon (tabakalar arasındaki reçine bakımından zengin alanda ilerleyen tabakalar arası ayrılma) ve gözle görülebilen ezik, 20 J’de üst kabukta matris hasarı, delaminasyon, fiberlerde kırılma, nüfuziyet ve çekirdekte hasar (üst kabuğa nüfuz etme ve çekirdeğe doğru ilerleme, hücre ezilmesi), 25 J’de üst kabukta matris hasarı, delaminasyon başlaması, fiberlerde kırılma, nüfuziyet, çekirdekte hasar ve alt yüzeyde ufak matris çatlakları, 40 J’de üst kabukta delaminasyon başlaması, fiberlerde kırılma, nüfuziyet, çekirdekte hasar, alt kabukta delaminasyon başlaması, fiberlerde kırılma ve arka yüzeyde kabuk-çekirdek ara yüzeyinde ayrılmalar, 45 J’de delinme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.1’de $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemenin 5 J, 15 J, 20 J, 25J, 40 J ve 45 J’lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir.

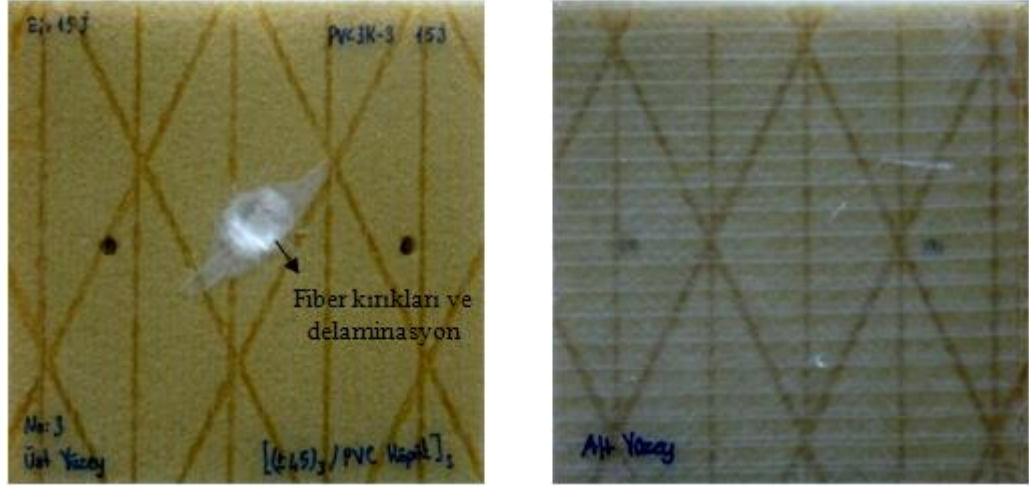
Şekil 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7’de sırasıyla $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ tabaka dizilişine sahip sandviç kompozit numunelerin 5 J, 15 J, 20 J, 25 J, 40 J ve 45 J’luk enerjiler ile yapılmış darbe testlerine ait darbe sonrası hasar fotoğrafları (üst ve alt yüzeyler için) verilmiştir.



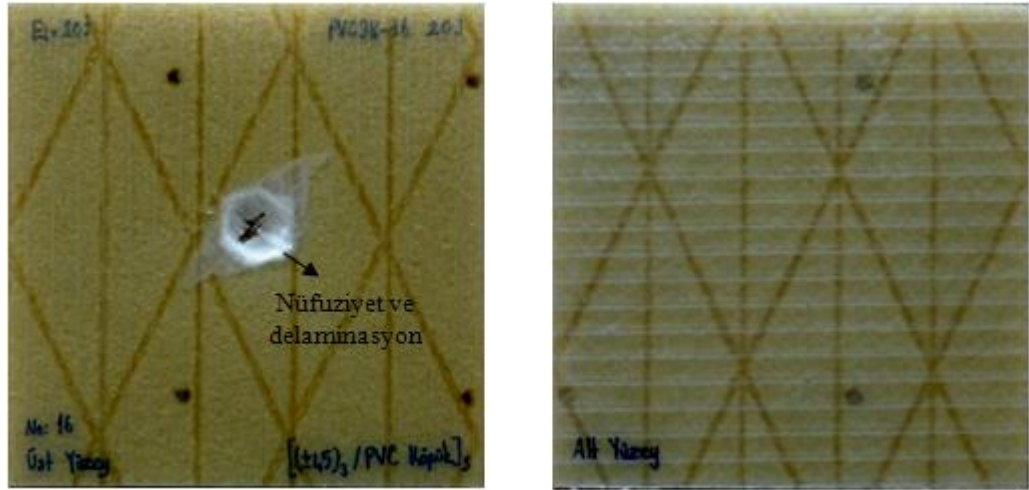
Şekil 5.1 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzeme için 5 J, 15 J, 20 J, 25 J, 40 J ve 45 J değerlerinde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.



Şekil 5.2 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 5 J'de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



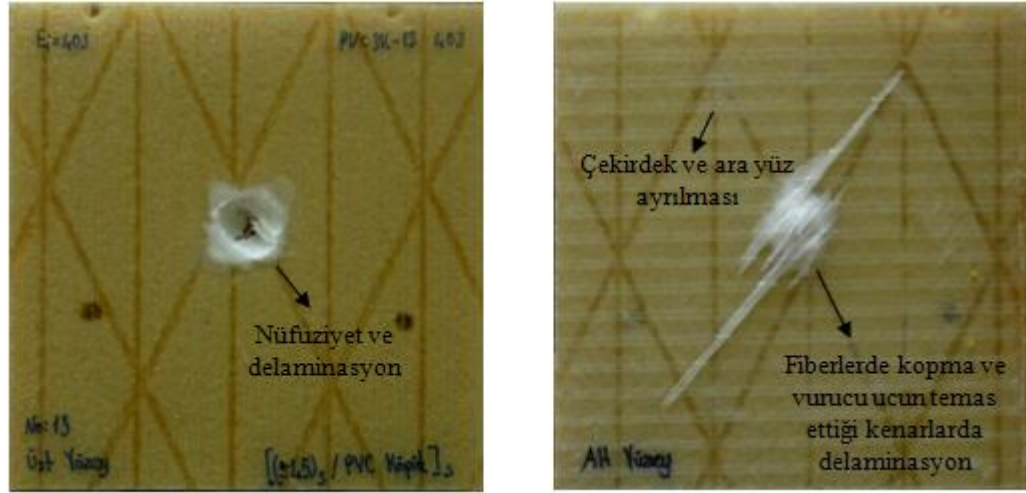
Şekil 5.3 $[(\pm 45)_3 / \text{PVC Köpük}]_3$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 15 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.4 $[(\pm 45)_3 / \text{PVC Köpük}]_3$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 20 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.5 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_3$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 25 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



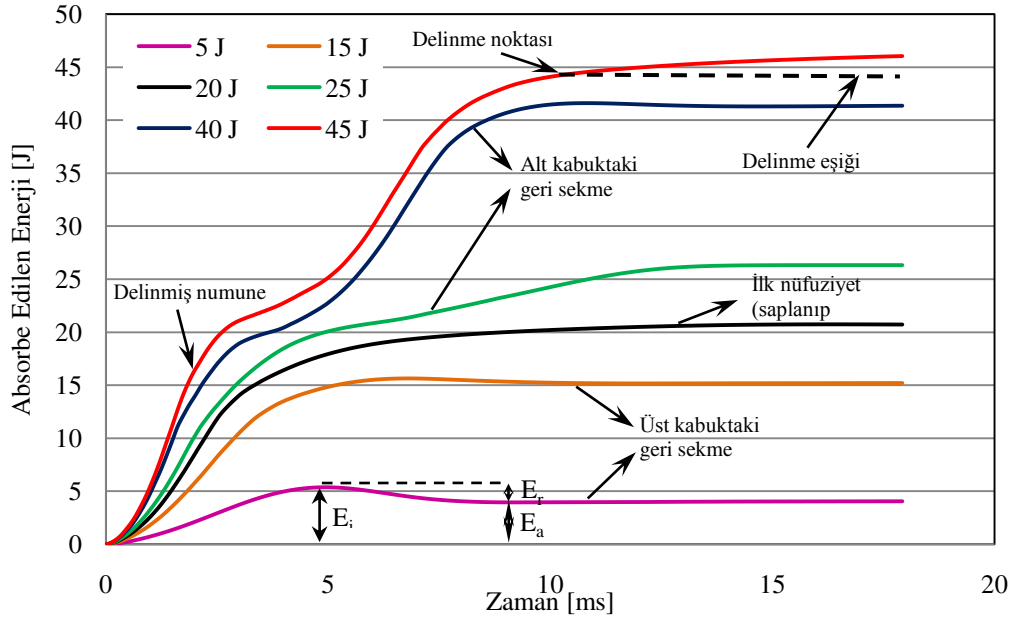
Şekil 5.6 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_3$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 40 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.7 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 45 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları

5.2 Absorbe Edilen Enerji-Zaman Grafiği

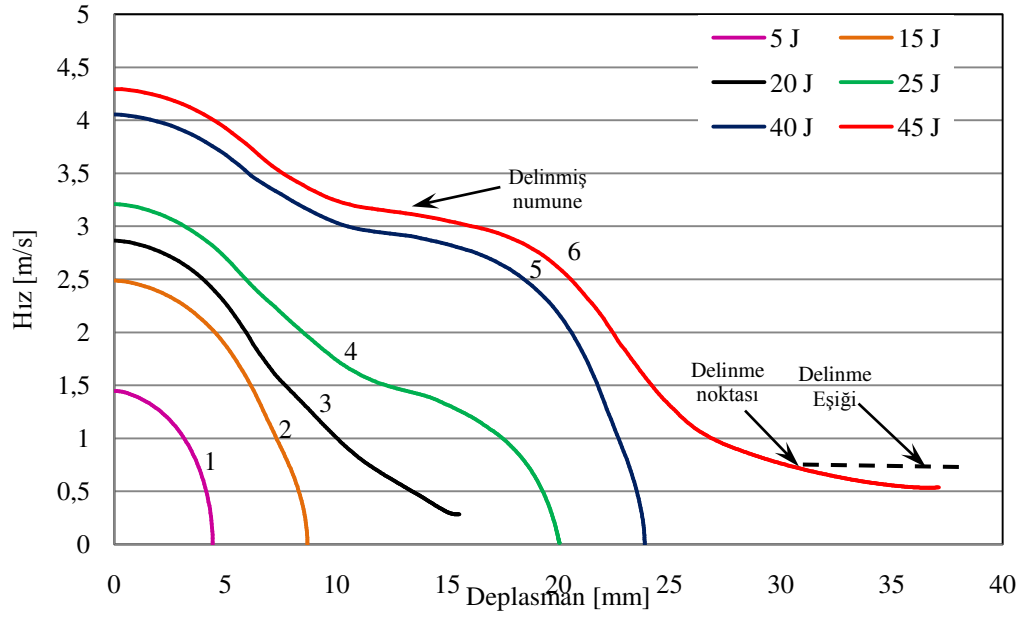
Kuvvet-deplasman eğrileri integre edilerek elde edilen absorbe edilen enerjinin zamana göre değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Düşük hızlı darbe testinde vurucu uçtan sandviç kompozit malzemeye geçen enerji miktarı darbe enerjisine ulaşınca kadar artar. Bu maksimum absorbe edilen enerji değerinin içinde hem elastik şekil değişimlerine hem de kalın hasarlara karşılık gelen bir miktar vardır. Absorbe edilen enerji-zaman eğrisi yükleme sırasında artıyor ve yük azalmasıyla birlikte ulaştığı maksimum değerden düşer, akabinde sabit bir değerde yatay karakteristik gösterir. Buradaki maksimum nokta darbe enerjisini (E_i), yatayda ulaştığı nokta absorbe edilen enerjiyi (E_a), bu ikisi arasındaki fark geri sekme enerjisini (E_r) göstermektedir. Şekil 5.8’de $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzeme için 5 J, 15 J, 20 J, 25J, 40 J, 45 J’lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen absorbe edilene enerji-zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 5.8 [(±45)₃/PVC Köpük]_s tabakalı sandviç kompozit malzeme için 5 J, 15 J, 20 J, 25 J, 40 J, 45 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen absorbe edilen enerji-zaman grafiği

5.3 Hız-Deplasman Grafiği

Şekil 5.9'de farklı enerjiler için vurucu ucun hızında ve deplasmanda olan değişimler verilmiştir. Hızın en büyük olduğu anda numune ile vurucu arasında temas başlamıştır. Sandviç kompozit malzemelerde hız-deplasman eğrisi parabolik olarak azalmaktadır. Alt kabuğa ulaşan hasarlarda iki basamak şeklinde bir karakteristik göstermiştir. Çekirdekte saplanıp kalan vurucu uçta hız-deplasman eğrisi açıkta kaldığı gözlemlenmiştir. 1 ve 2 nolu eğrilerde üst kabukta geri sekme, 3 nolu eğride çekridekte nüfuziyet, 4 ve 5 nolu eğrilerde alt kabuktan geri sekme, 6 nolu eğride delinme görülmüştür. Şekil 5.9'de [(±45)₃/PVC Köpük]_s tabakalı sandviç kompozit malzeme için 5 J, 15 J, 20 J, 25J, 40 J, 45 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen hız-deplasman grafiği verilmiştir.



Şekil 5.9 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzeme için 5 J, 15 J, 20 J, 25 J, 40 J, 45 J’lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen hız-deplasman grafiği

5.4 Eş Enerji Grafiği

Kompozit yapıların darbe tepkilerini ve darbe mukavemetini incelemeye göz önüne alınan en önemli parametreler darbe enerjisi (E_i) ve absorbe edilen enerjidir (E_a). Darbe enerjisi çarpan vurucu uç tarafından kompozite aktarılan enerji olarak, absorbe edilen enerji ise darbe enerjisinin numune tarafından deformasyonlar sonucu absorbe edilen kısmı olarak tanımlanabilir.

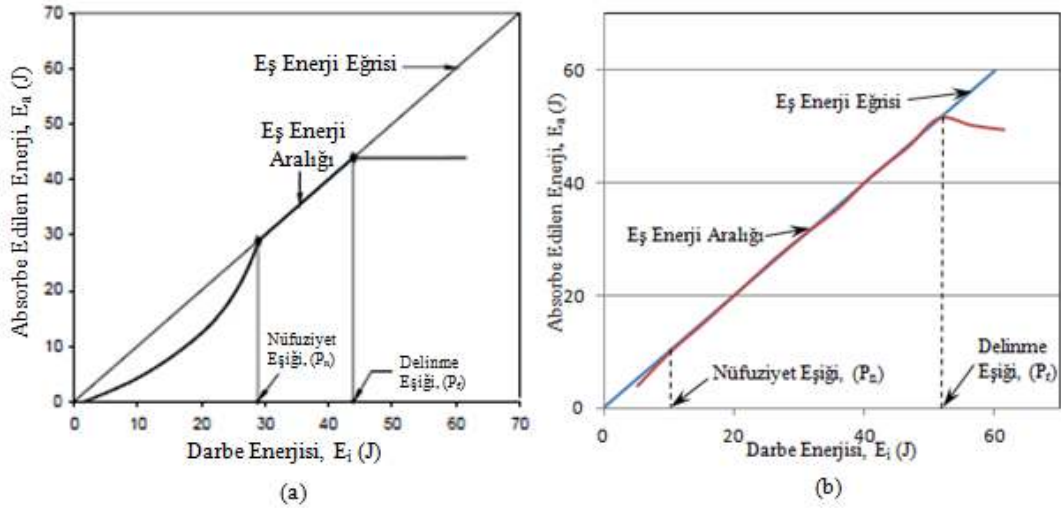
Absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi arasındaki ilişkiyi gösteren grafik enerji profili diyagramı olarak adlandırılmıştır. Enerji profili diyagramı ile kuvvet-deplasman eğrilerini ve hasarlı numuneleri bir arada karşılaştırarak incelemek hasar mekanizmalarının tespitinde önemli avantajlar sağlar.

Bu enerji profili diyagramı şeklini çarpan uç ve numune ile ilişkili bir takım parametreler belirler. Kompozit yapıyı meydana getiren bileşenler, fiber geometrisi, çekirdek yapısı, numunelerin kalınlıkları ve tabaka dizilişi ve çarpan ucun geometrisi gibi faktörler buna örnek olarak verilebilir. Şekil 5.10’da bir enerji profili diyagramı verilmiştir. Diyagram genel olarak üç ana bölgeye ayrılabilir.

1. Bölge: çarpan ucun numuneye saplanmadığı, çarpma sonrası geri sekmenin gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede eş enerji çizgisi ile deney verileri arasındaki fark absorbe edilmeyen artık enerjiye karşılık gelmektedir.

2. Bölge: çarpan ucun numuneye nüfuz etmeye başladığı ve darbe enerjisi değerine bağlı olarak farklı derinlikte numuneye saplanıp kaldığı aralıktır. Bu bölgede darbe enerjisinin tamamına yakını numune tarafından absorbe edildiği için deney verileri eş enerji çizgisinin neredeyse üzerinde yer alırlar.

3. Bölge: bu bölgede çarpan uç delinme eşiğinden daha büyük bir enerjiye sahiptir. Bu bölgede darbe enerjisinin arttırılması meydana gelen hasar miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır.



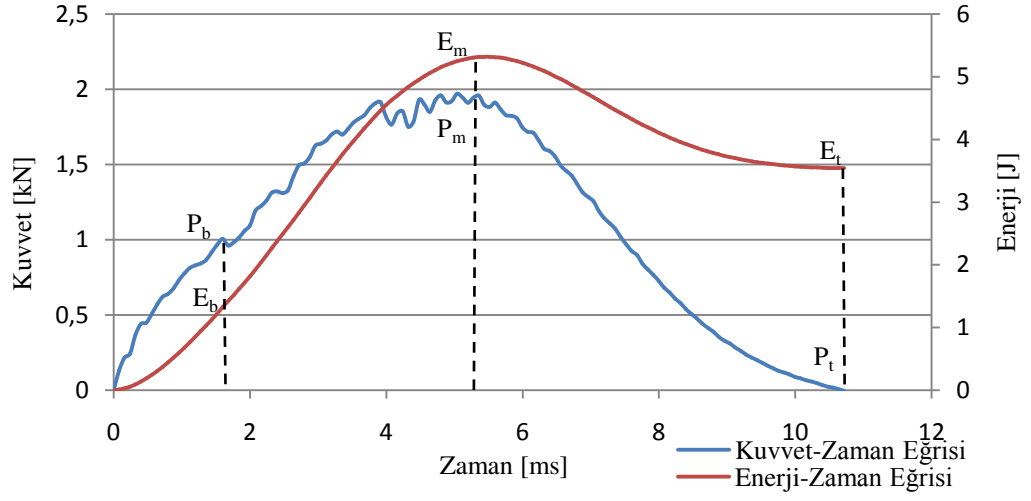
Şekil 5.10 (a)Tipik bir enerji profili diyagramı (Ataş, 2004), (b) bu tez kapsamında elde edilen enerji profil diyagramı.

5.5 Karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman-Enerji ve Kuvvet-Deplasman-Enerji Eğrileri

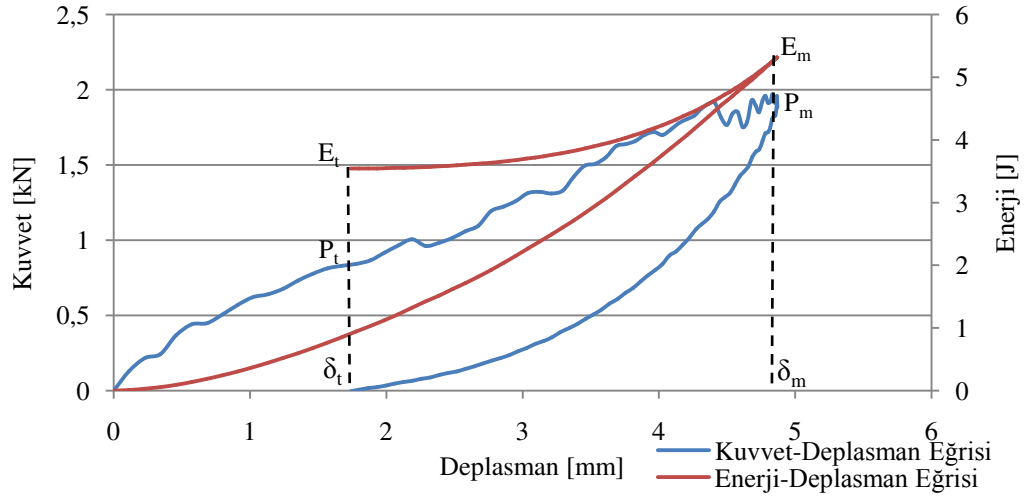
Düşük hızlı darbe testinde çeşitli parametreler göz önüne alınarak inceleme yapılmaktadır. Bunlar darbe enerjisi, darbe hızı, hasarın yeni başladığı enerji (E_b), toplam absorbe edilen enerji (E_t), toplam hasar (δ_t), hasarın başladığı noktadaki kuvvet (P_b), maksimum kuvvet (P_m), toplam kuvvet noktası (P_t), maksimum kuvvetteki enerji (E_m), maksimum kuvvetteki hasar (δ_m) ve enerjide ($E_p=E_t-E_m$) ve maksimum kuvvetten sonraki oluşan hasar ($\delta_p=\delta_t-\delta_m$). Hasarın yeni başladığı nokta P_b ve E_b ile temsil edilmiştir. Bu nokta fark edilebilir matris hasarlarına ve fiber

başlangıç ayrılımlarına işaret etmektedir. Maksimum kuvvet (P_m) ve enerji (E_m) noktaları vurucu ucun maksimum nüfuziyetine ve geri sekmenin başladığına işaret eder. Pek çok durumda, hasarın yeni başladığı nokta ve maksimum kuvvet noktası aynı zamanda meydana gelmektedir. Hasarlı noktadaki kuvvet (P_t) ve enerji noktaları (E_t), vurucu ucun geri sekme aşamasının sonucu simgelemektedir ve akabinde olayın sonu sırasıyla, P_t ve E_t ile temsil edilmiştir.

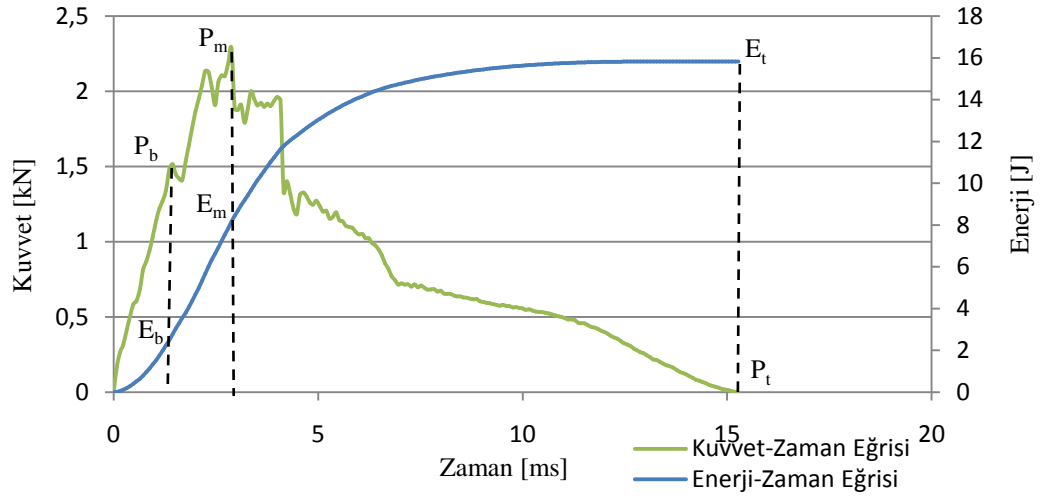
$[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlarındaki sandviç kompozit numuneye 5 J'luk enerjide uygulanan düşük hızlı darbe testine ait kuvvet-zaman-enerji grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir. Grafikte hasarın yeni başladığı noktaya ait kuvvet (P_b) ve enerji (E_b), maksimum kuvvet (P_m) ve enerji (E_m), hasarlı noktadaki kuvvet (P_t) ve enerji noktası (E_t) gösterilmiştir. Şekil 5.12'da maksimum kuvvet (P_m) ve enerji (E_m), hasarlı noktadaki kuvvet (P_t) ve enerji noktası (E_t), maksimum deplasman (δ_m) ve hasarlı noktadaki deplasman (δ_t) gösterilmiştir. Şekil 5.13'de $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye ait 15 J'de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği ve Şekil 5.14'de ise kuvvet-deplasman-enerji grafiği verilmiştir. 15 J'de yapılan deneyde üst kabukta tabakalar arası delaminasyon ilerlemesi, fiberlerde kırılma ve çekirdek ezilmesi (hücre ezilmesi) görülmüştür. Şekil 5.15'de $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ için 30 J'de yapılan darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği ve Şekil 5.16'da ise yine kuvvet-deplasman-enerji grafiği verilmiştir. 30 J'de yapılan deneyde üst kabukta tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, fiberlerde kırılma, çekirdek ezilmesi, alt kabukta fiber ayrılması ve çatlağı, çekirdek ve alt kabuk arası yapışma azalması gözlemlenmiştir. Benzer şekilde 35 J'lük enerjide yapılan testlere ait grafikler Şekil 5.17 ve 5.18'de verilmiştir. 35 J'de yapılan deneyde üst kabukta tabakalar arası delaminasyon, delinme ve çekirdek ve alt kabuk arası yapışma azalması meydana geldiği gözlemlenmiştir.



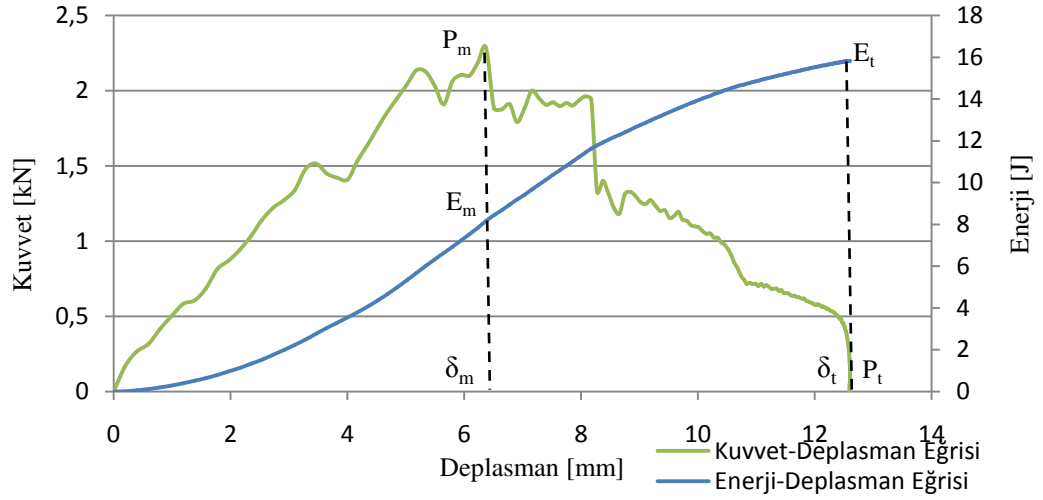
Şekil 5.11 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 5 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği



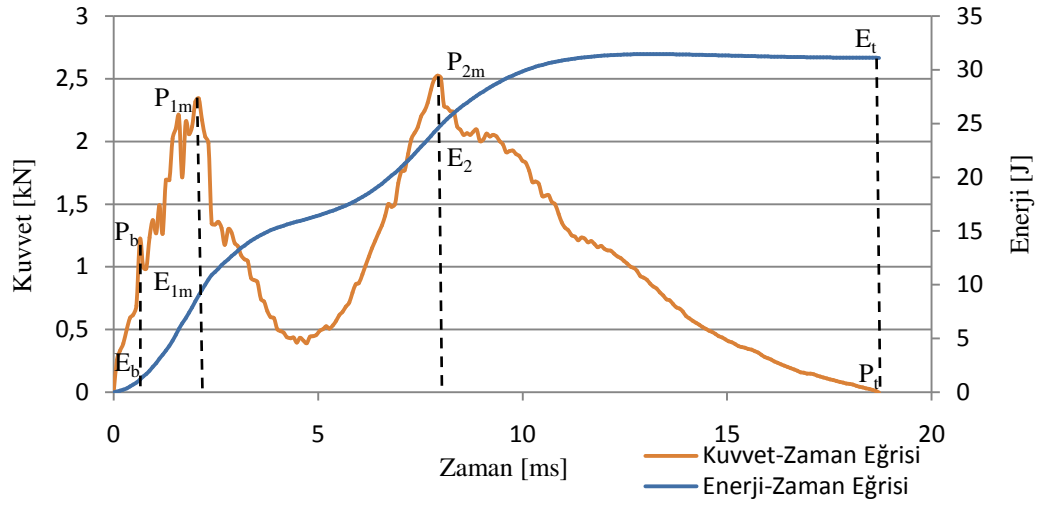
Şekil 5.12 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 5 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman-enerji grafiği



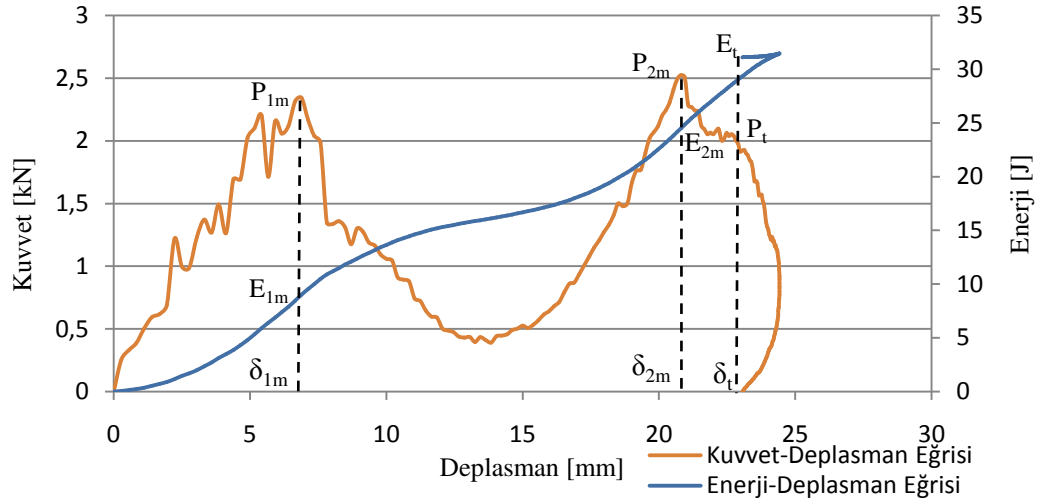
Şekil 5.13 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 15 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği



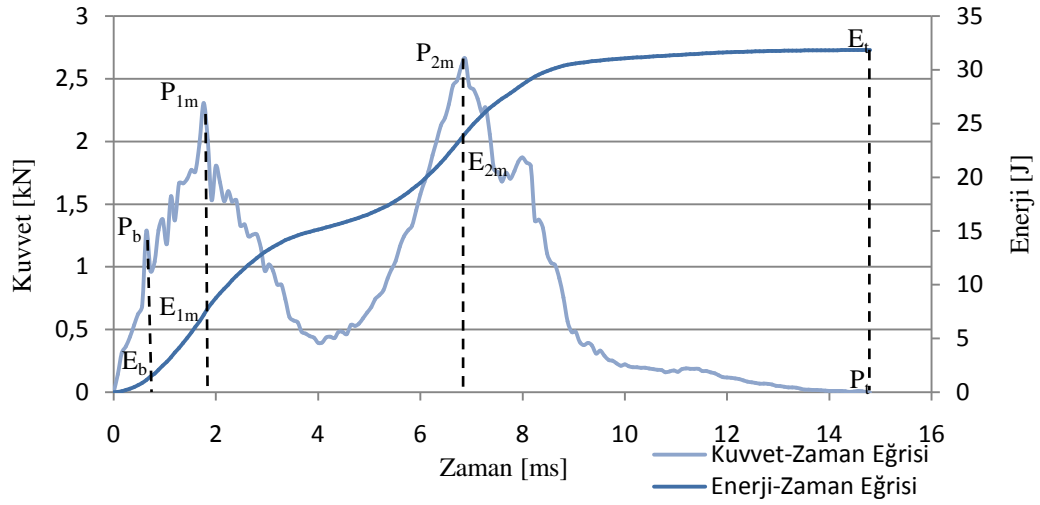
Şekil 5.14 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 15 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman-enerji grafiği



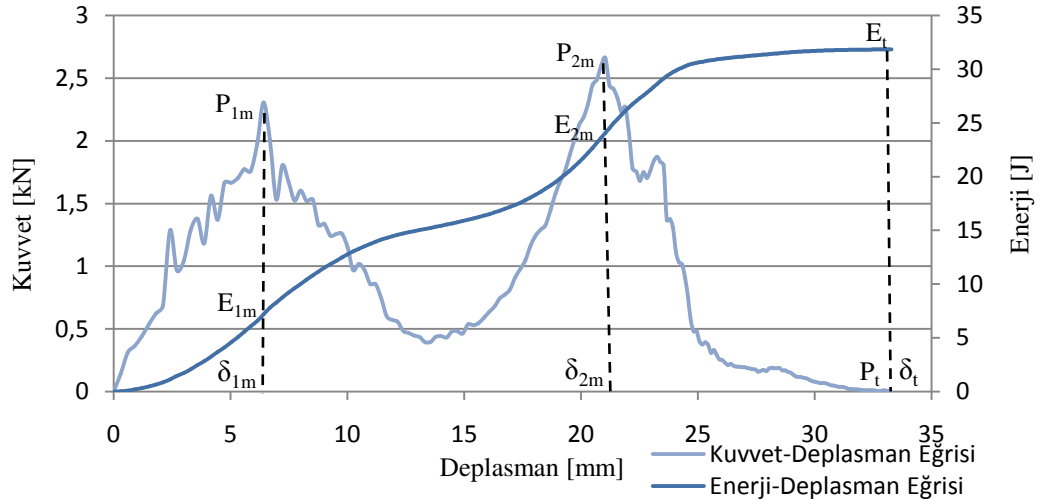
Şekil 5.15 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 30 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği



Şekil 5.16 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 30 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman-enerji grafiği

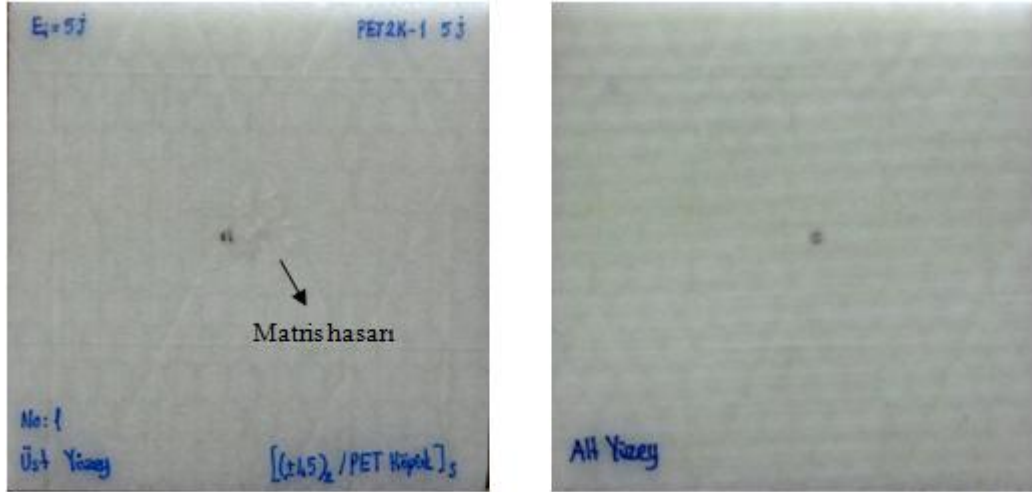


Şekil 5.17 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 35 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman-enerji grafiği

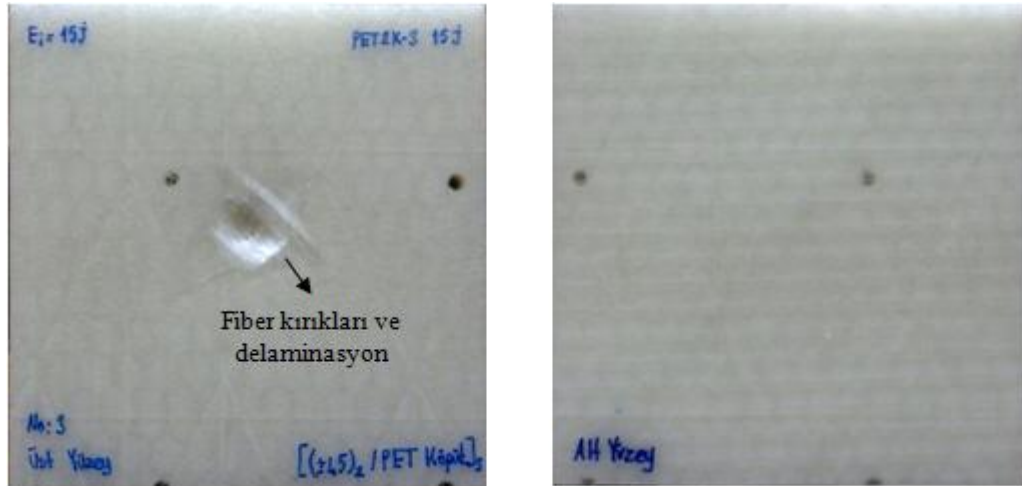


Şekil 5.18 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemeye 35 J’de yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman-enerji grafiği

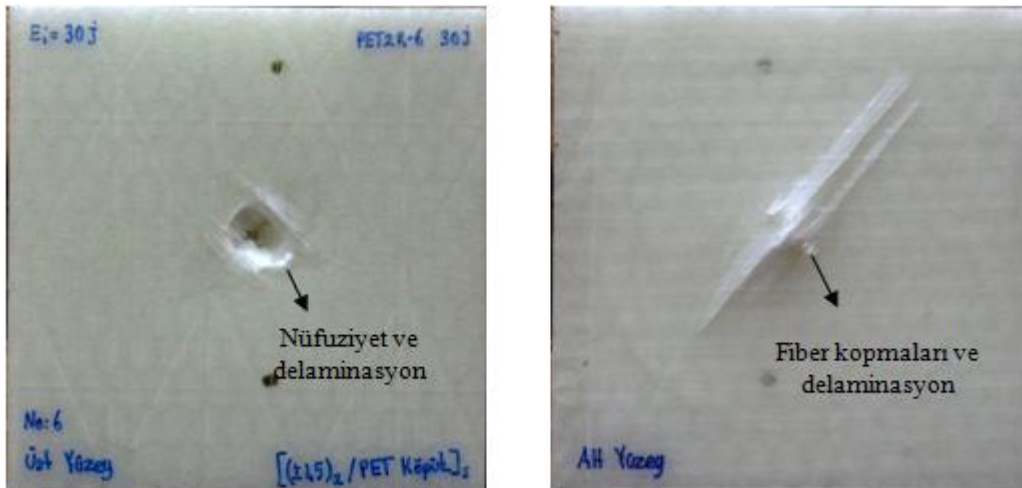
Şekil 5.19, 5.20, 5.21 ve 5.22’de $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabaka dizilişine ait sandviç kompozit numunelerin sırasıyla 5 J, 15 J, 30 J ve 35 J’lük darbe enerjilerinde yapılan testlere ait üst ve alt tabaka fotoğrafları (darbe hasarı sonrası) verilmiştir.



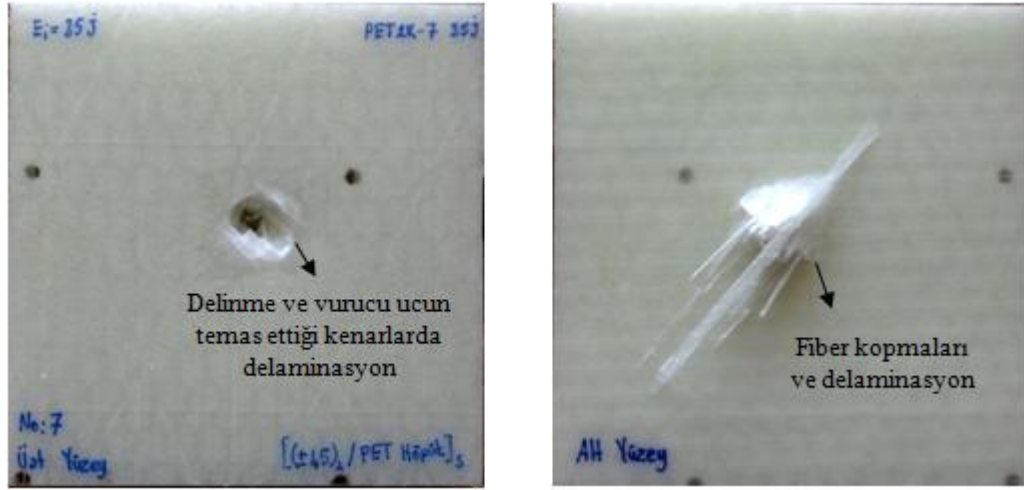
Şekil 5.19 $[(\pm 45)_2 / \text{PET Köpük}]_5$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 5 J'de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.20 $[(\pm 45)_2 / \text{PET Köpük}]_5$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 15 J'de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.21 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 30 J'de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları



Şekil 5.22 $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 35 J'de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları

5.6 Kuvvet-Deplasman Grafiklerinin Farklı Tabaka Sayılarına Ve Farklı Çekirdek Malzemelerine Göre Karşılaştırılması

$[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J'de üst kabukta tabakalar arası delaminasyon ilerlemesi, fiber kırıkları ve az miktarda çekirdekte ezilme 15 J'de üst kabukta tabakalar arası delaminasyon, fiber kırıklar, nüfuziyet, çekirdekte ezilme, alt kabukta fiber ayrılması, çekirdek ve alt kabuk arası ayrılma 25 J'de üst kabukta tabakalar arası delaminasyon, fiber kırıkları, delinme, alt kabukta fiber kırıkları, çekirdek ve alt kabuk arası ayrılma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

$[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J'de üst kabukta küçük görünür matris hasarı/çatlakları ve delaminasyon başlaması 15 J'de üst kabukta fiber kırıkları ve az miktarda tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezilme 25 J'de üst kabukta fiber kırıkları ve tabakalar arası delaminasyon çekirdekte ezilme, nüfuziyet, alt kabukta fiber çatlakları ve ayrılmaları, çekirdek ve alt kabuk arası ayrılma 40 J'de delinme, üst ve alt kabukta delaminasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir.

$[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta küçük matris hasarı, 15 J’de üst kabukta matris hasarı, tabakalar arası delaminasyon, gözle görülebilir ezik ve fiber çatlakları, 25 J’de üst kabukta fiber kırıkları ve az miktarda tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezilme, nüfuziyet, alt kabukta matris çatlakları, 40 J’de üst kabukta fiber kırıkları ve az miktarda tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezilme, nüfuziyet, alt kabukta fiber kopmaları ve alt kabuk ile çekirdek arası yapışkanlık azalması, 60 J’de delinme, üst ve alt kabukta tabakalar arası delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

$[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta küçük matris hasarı, 15 J’de üst kabukta matris hasarı, çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon, çok küçük fiber çatlakları, 25 J’de üst kabukta matris hasarı ve çatlakları, az miktarda tabakalar arası delaminasyon, gözle görülebilir bir ezik, 40 J’de üst kabukta fiber kırıkları ve tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, çekirdekte ezilme, alt kabukta matris çatlakları ve çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon, 60 J’de üst kabukta fiber kırıkları, tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, çekirdekte ezilme, alt kabukta fiber ayrılmaları ve az miktarda tabakalar arası delaminasyon, 75 J’de delinme, üst ve alt kabukta tabakalar arası delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

$[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta fiberlerde kırık, tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezik, 15 J’de üst kabukta fiberlerde kırık, tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, çekirdekte ezik, alt kabuk ile çekirdek arası yapışma azalması, 25 J’de delinme, üst ve alt kabukta tabakalar arası delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

$[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta matris çatlağı ve çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon, 15 J’de üst kabukta fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon ve çekirdekte ezik, 25 J’de üst kabukta fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezik ve alt kabukta matris çatlağı, 40 J’de

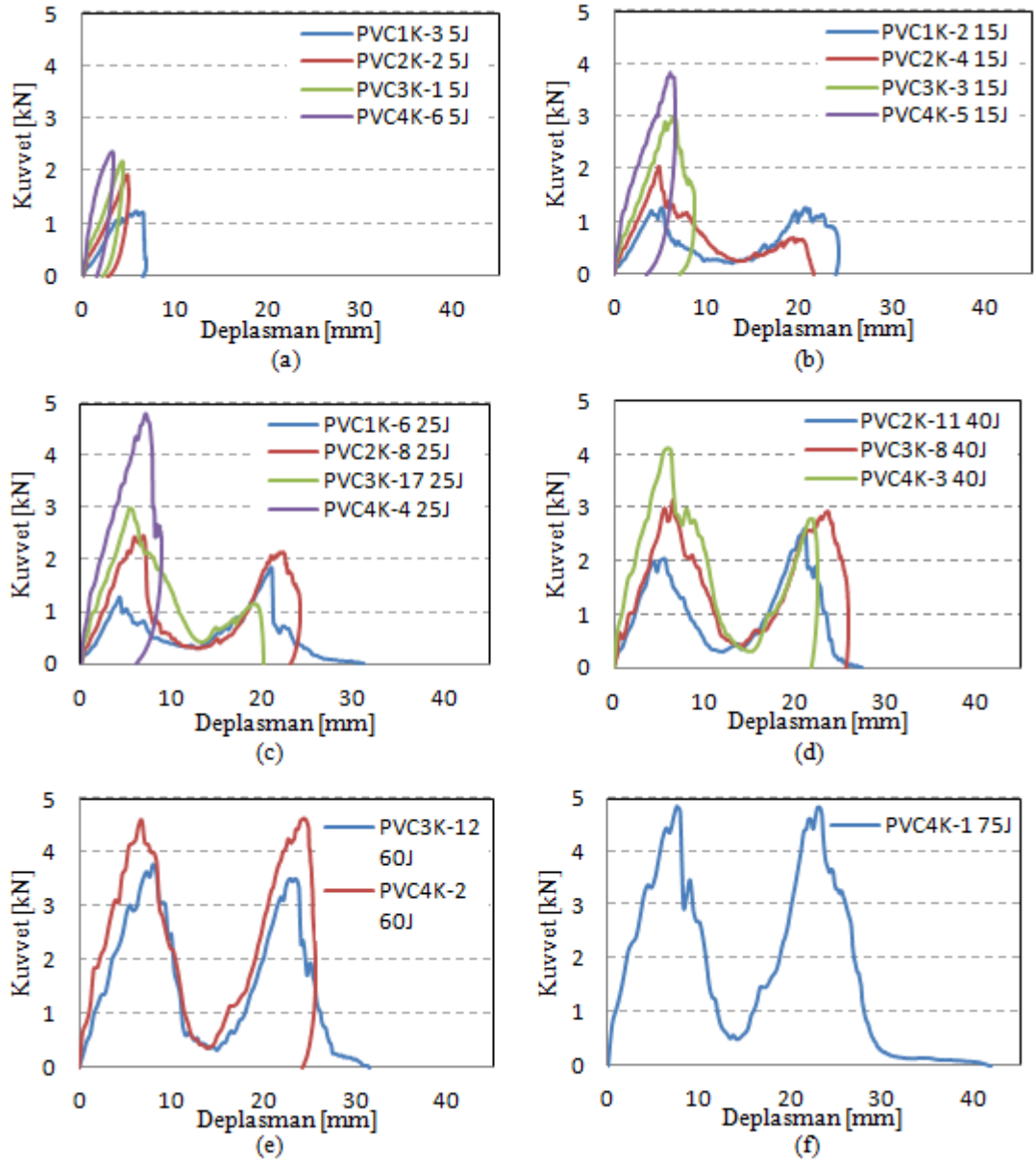
delinme, üst kabukta tabakalar arası delaminasyon ve çekirdek ile alt kabuk arasında yapışma azalması meydana geldiği görülmüştür.

$[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta matris çatlağı ve çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon, 15 J’de üst kabukta fiber çatlakları, çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon, 25 J’de üst kabukta fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, 40 J’de üst kabukta fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, çekirdekte ezilme, alt kabukta fiber kopmaları ve delaminasyon, 60 J’de delinme, üst ve alt kabukta tabakalar arası delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

$[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu 100 mm x 100 mm boyutlu sandviç kompozit numuneye uygulanan düşük hızlı darbe testinde 5 J’de üst kabukta matris hasarı ve çok az miktarda tabakalar arası delaminasyon başlaması, 15 J’de üst kabukta çok az miktarda fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, çok az miktarda ezik, 25 J’de üst kabukta çok az fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, çekirdekte ezilme, 40 J’de üst kabukta fiber kırılmaları, tabakalar arası delaminasyon, nüfuziyet, çekirdekte ezilme, alt kabukta matris çatlakları, 60 J’de delinme, üst ve alt kabukta tabakalar arası delaminasyon meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 5.23’de $[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 15 J, 25 J, 40 J, 60 J, 75 J’lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.24’de $[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 15 J, 25 J, 40 J, 60 J’lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı gibi tabaka sayısı arttıkça darbe mukavemeti de artmaktadır.

PVCnK-m kJ kodlamasında n alt ve üst kabuktaki katman sayısını, m kaçınıcı numune olduğunu, k ise uygulanan darbe enerjisini göstermektedir. Ayrıca PVC ve PET köpük türünü göstermektedir.



Şekil 5.23 $[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 15 J, (c) 25 J, (d) 40 J, (e) 60 J, (f) 75 J

Şekil 5.24, 5.25, 5.26, 5.27’de katman sayısı farklı 25 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzey fotoğrafları verilmiştir.

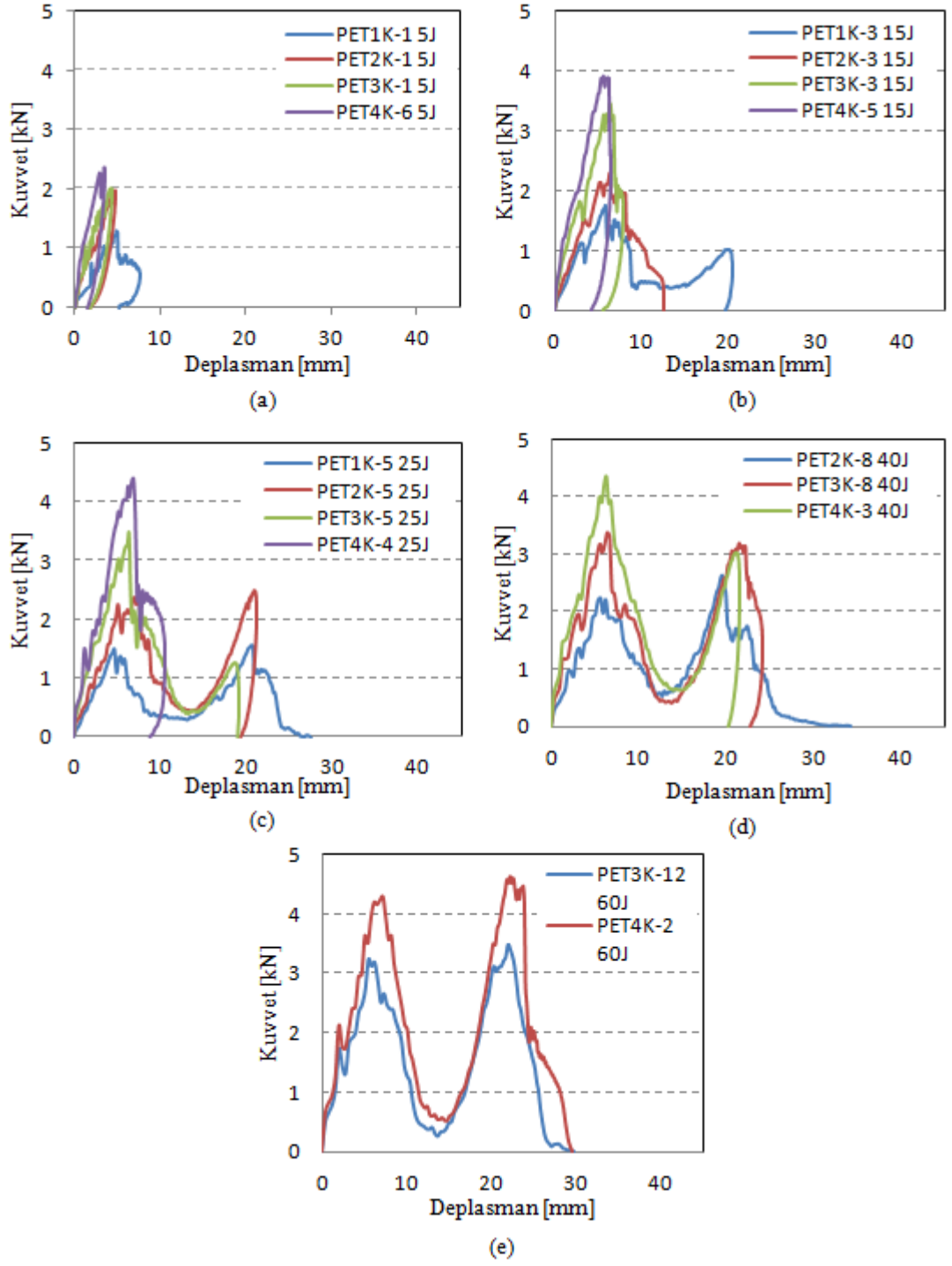




Şekil 5.26 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 25 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları

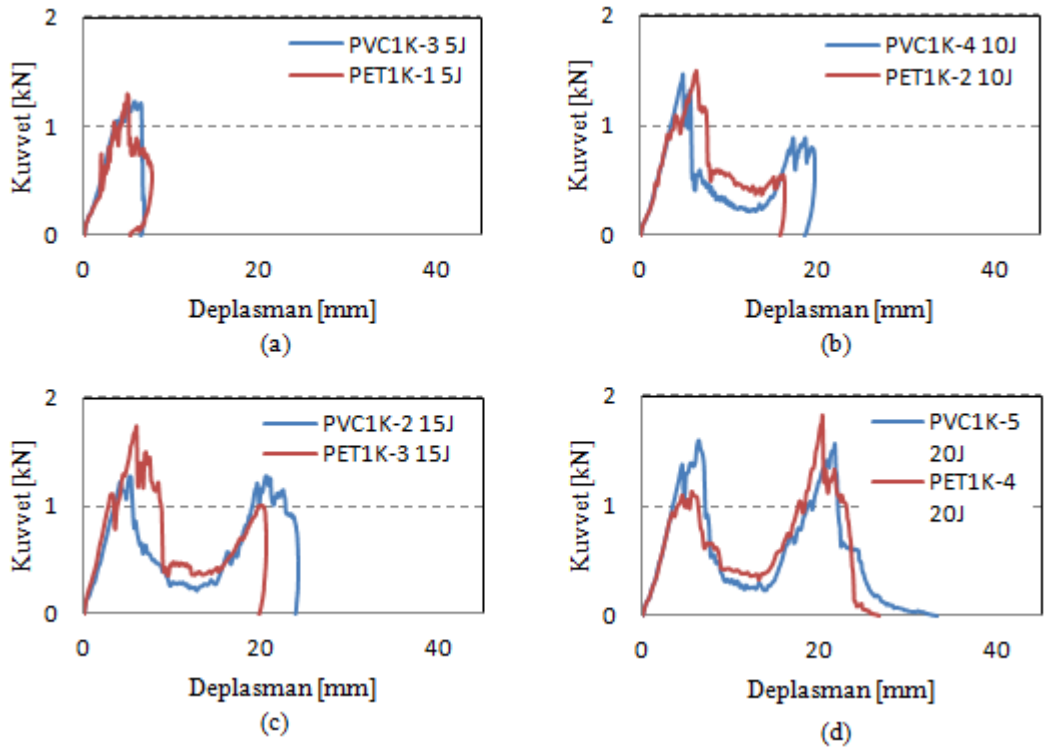


Şekil 5.27 $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit numunenin 25 J’de yapılmış darbe deneyi sonrası üst ve arka yüzeylerinden fotoğrafları

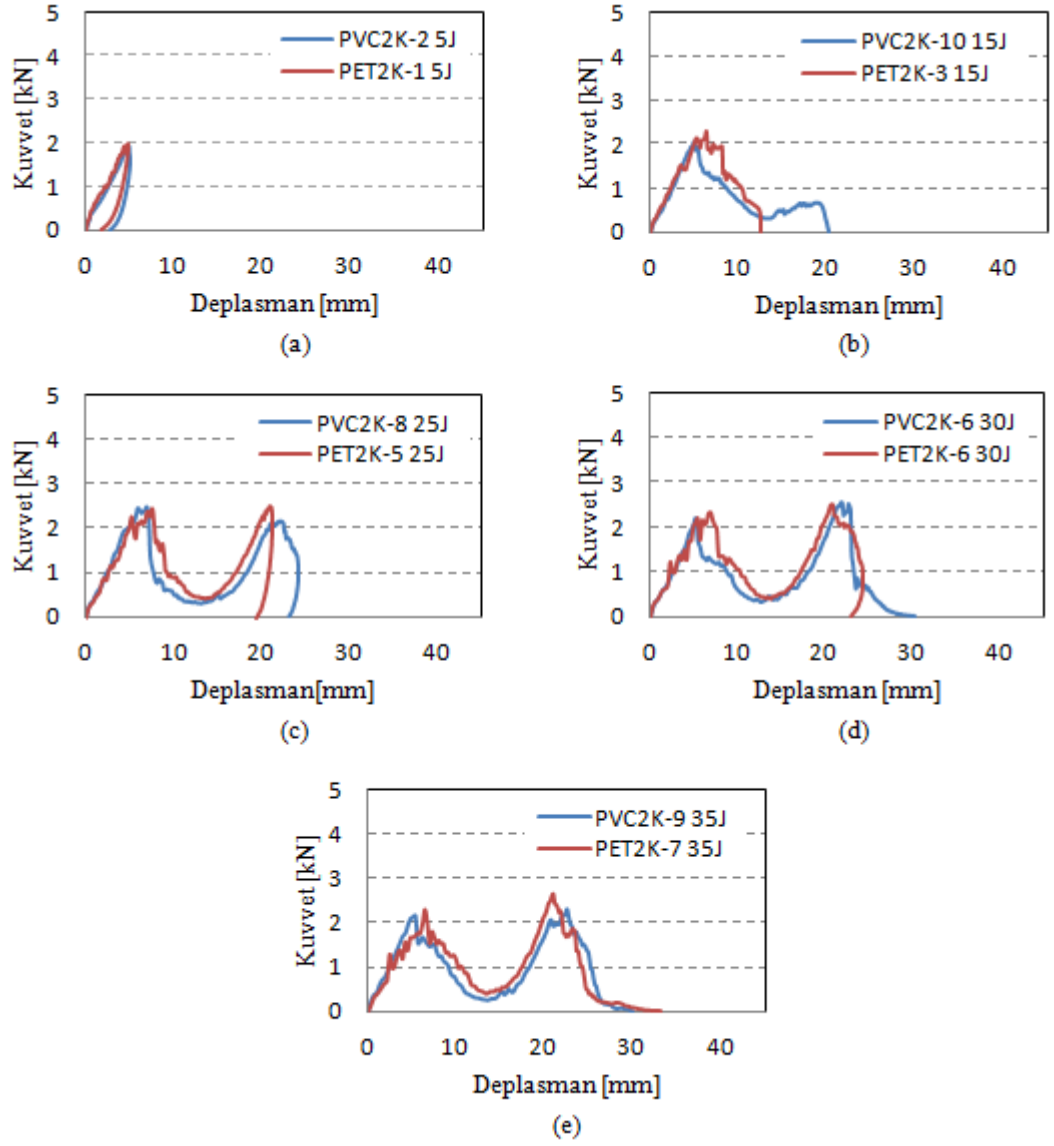


Şekil 5.28 $[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 15 J, (c) 25 J, (d) 40 J, (e) 60 J

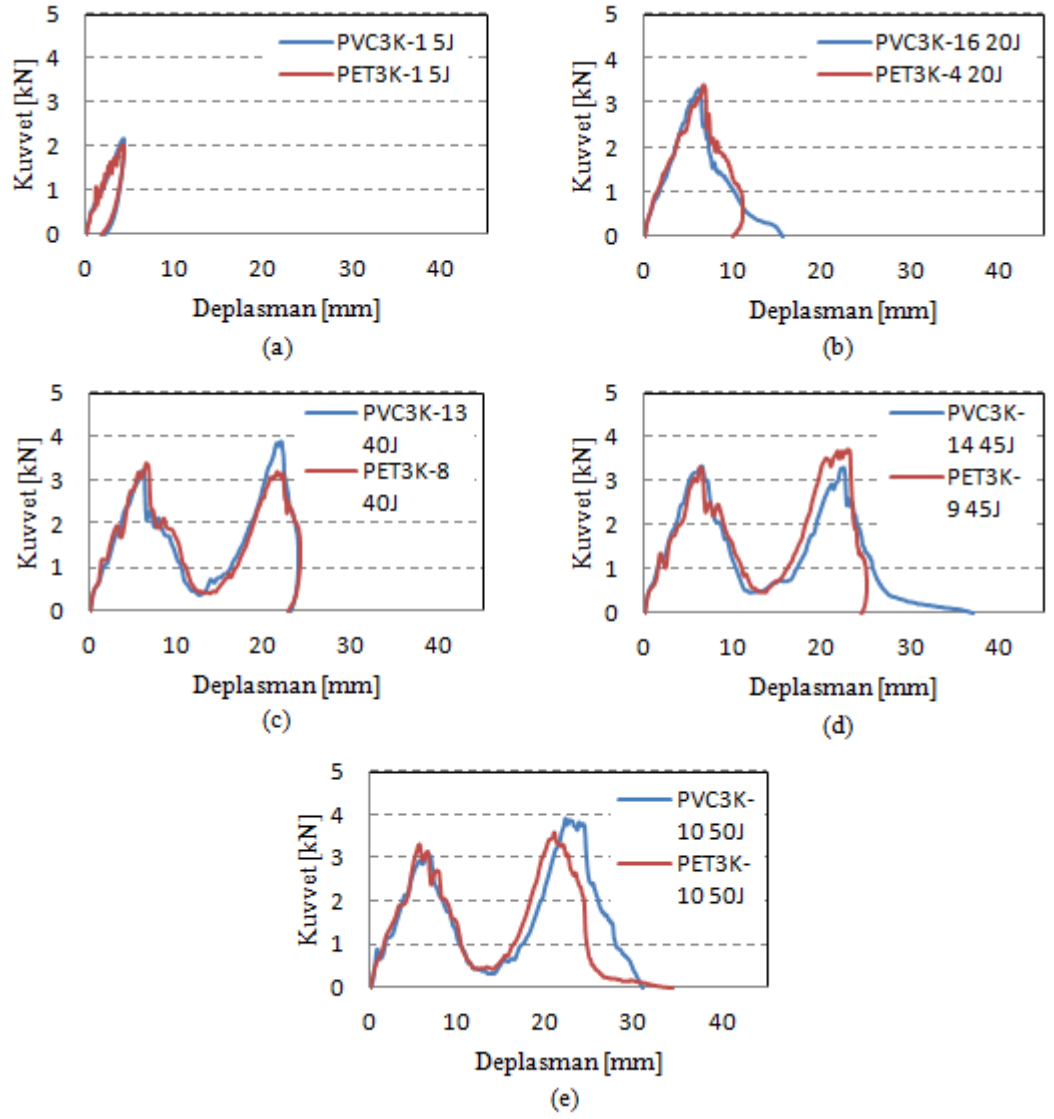
Şekil 5.29'de $[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 10 J, 15 J, 20 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.30'de $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 15 J, 25 J, 30 J, 35 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.31'de $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 20 J, 40 J, 45 J, 50 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.32'de $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere 5 J, 25 J, 40 J, 60 J, 75 J'lerde yapılan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri aynı skalalı grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



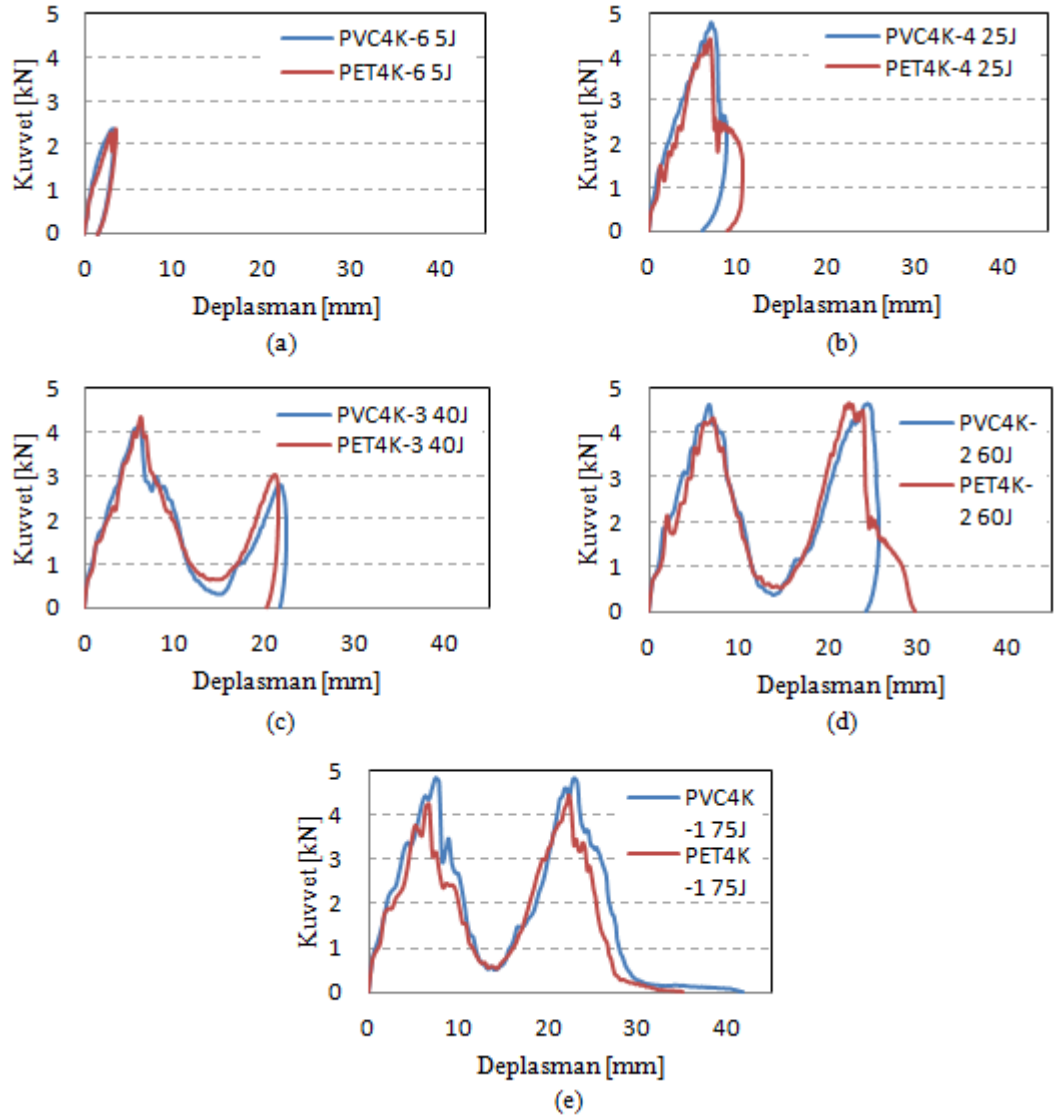
Şekil 5.29 $[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 10 J, (c) 15 J, (d) 20 J



Şekil 5.30 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 15 J, (c) 25 J, (d) 30 J, (e) 35 J



Şekil 5.31 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 20 J, (c) 40 J, (d) 45 J, (e) 50 J



Şekil 5.32 $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ tabakalı sandviç kompozit malzemelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalı kuvvet-zaman grafikleri; (a) 5 J, (b) 25 J, (c) 40 J, (d) 60 J, (e) 75 J

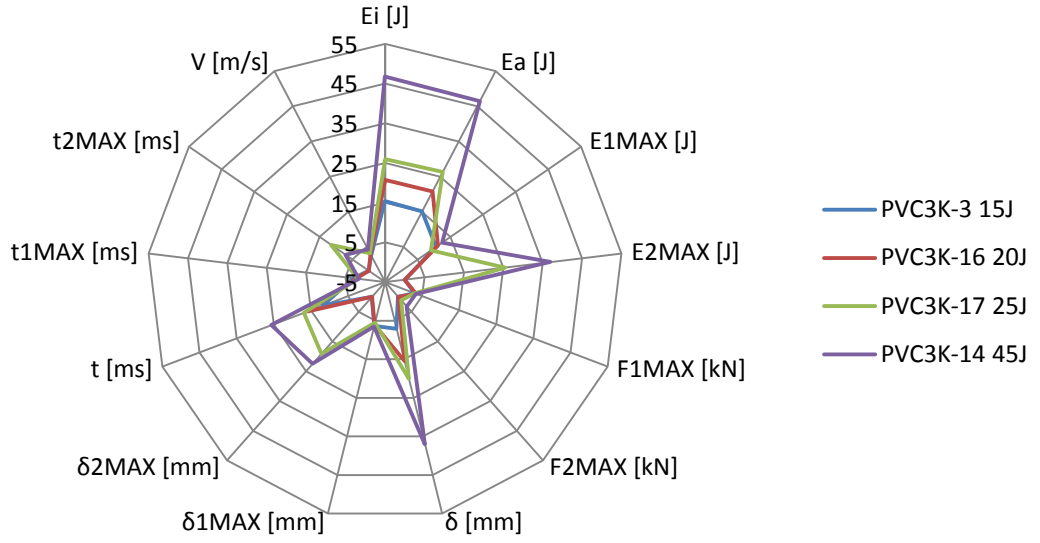
5.7 Radar Grafik ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Radar grafik ile PVC ve PET köpüklü sandviç kompozit malzemelerin; darbe enerjileri, absorbe edilen enerjileri, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki enerjileri, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki enerjileri, üst kabuktaki maksimum kuvvetleri, alt kabuktaki maksimum kuvvetleri, toplam deplasman, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasmanları, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasmanları, toplam temas süreleri, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süreleri, alt kabuktaki

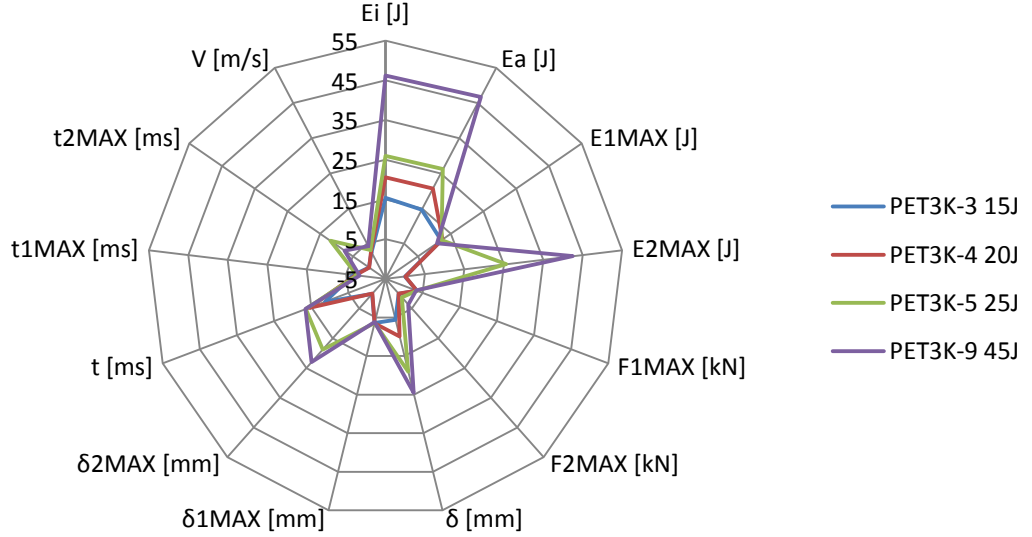
maksimum kuvvetteki temas süreleri ve darbe enerjisine denk gelen hızları $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu numunelerin 15 J, 20 J, 25 J, 45 J'lerdeki verileri, tabaka sayısı artışına göre karşılaştırmaları ve $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ 5J, 20J ve 30 J'deki verileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Darbe enerjisi artıkça absorbe edilen enerjide arttığı, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki enerjinin yaklaşık aynı değerlerde olduğu, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki enerjinin arttığı, üst kabuktaki enerjinin arttığı, alt kabuktaki enerjinin arttığı, deplasmanın arttığı, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasmanın yaklaşık aynı değerlerde olduğu, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasmanın arttığı, temas süresinin arttığı, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süresinin yaklaşık aynı değerlerde olduğu, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süresinin delinme eşiğine kadar arttığı, darbe enerjisine bağlı olarak hızında artacağından dolayı hızın arttığı görülmüştür. Diğer oryantasyonlarda da benzer karakteristikler göstermiştir.

Şekil 5.33 $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 15 J, 20 J, 25 J ve 45 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.34 $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 15 J, 20 J, 25 J ve 45 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 5.33 [(±45)₃/PVC Köpük]_s oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 15 J, 20 J, 25 J ve 45 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması

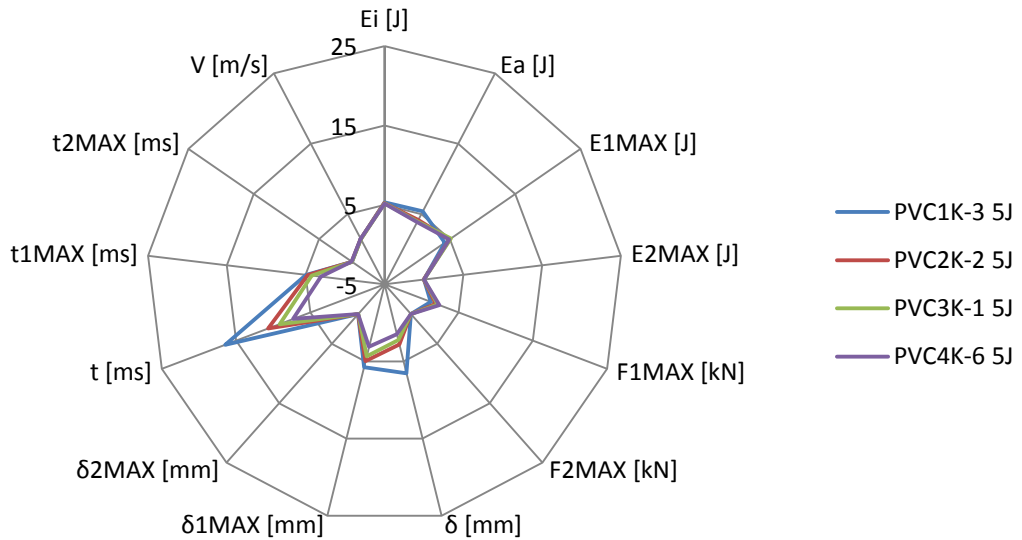


Şekil 5.34 [(±45)₃/PET Köpük]_s oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 15 J, 20 J, 25 J ve 45 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması

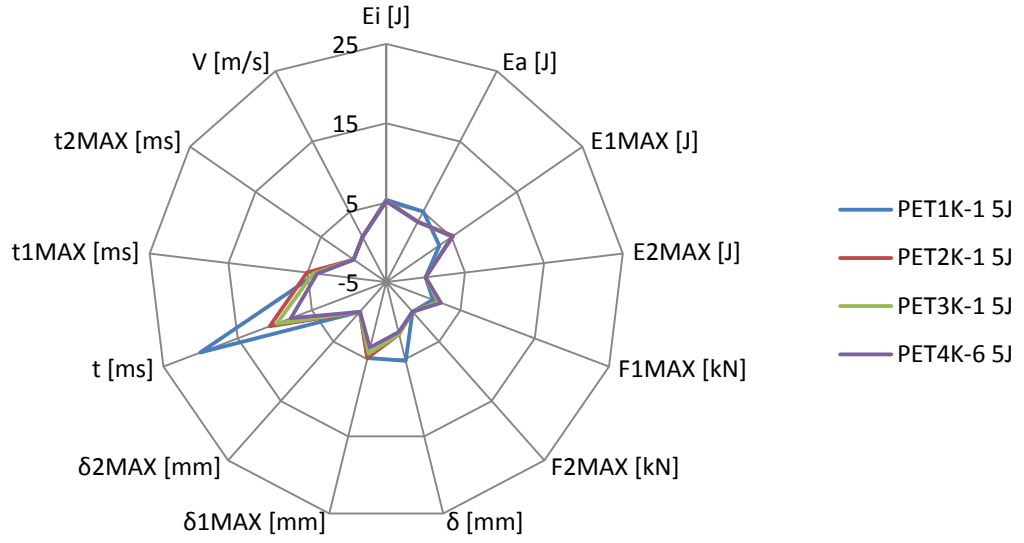
Aynı enerjide farklı tabaka sayılarına göre yapılmış düşük hızlı darbe deneyinde tabaka sayısı arttıkça absorbe edilen enerjinin arttığı, toplam deplasmanın azaldığı,

üst kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasman azaldığı, toplam temas süresinin azaldığı ve üst kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süresinin azaldığı görülmüştür. Diğer verilerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

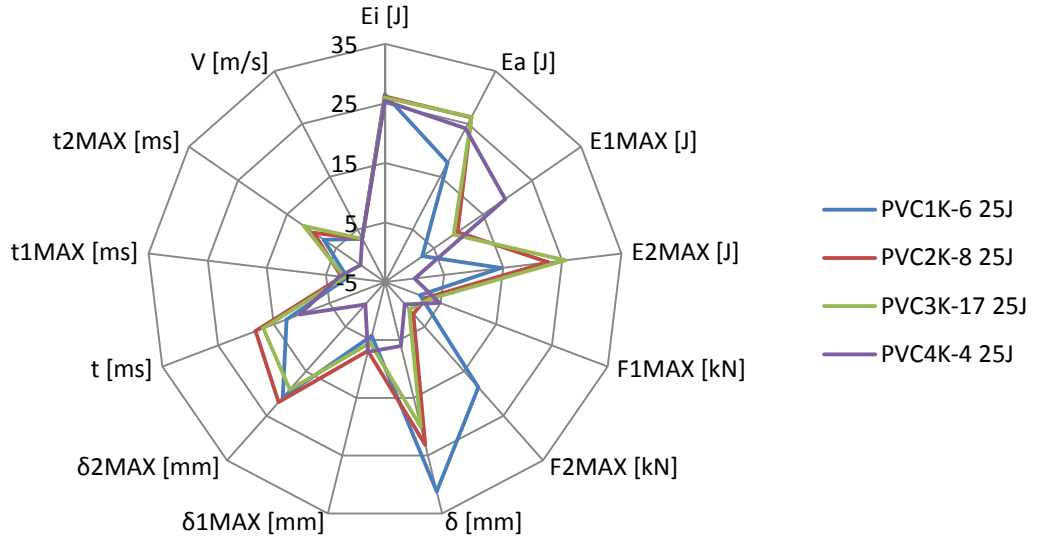
Şekil 5.35 $[(\pm 45)_1/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.36 $[(\pm 45)_1/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.37 $[(\pm 45)_1/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 25 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.38 $[(\pm 45)_1/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 25 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması verilmiştir.



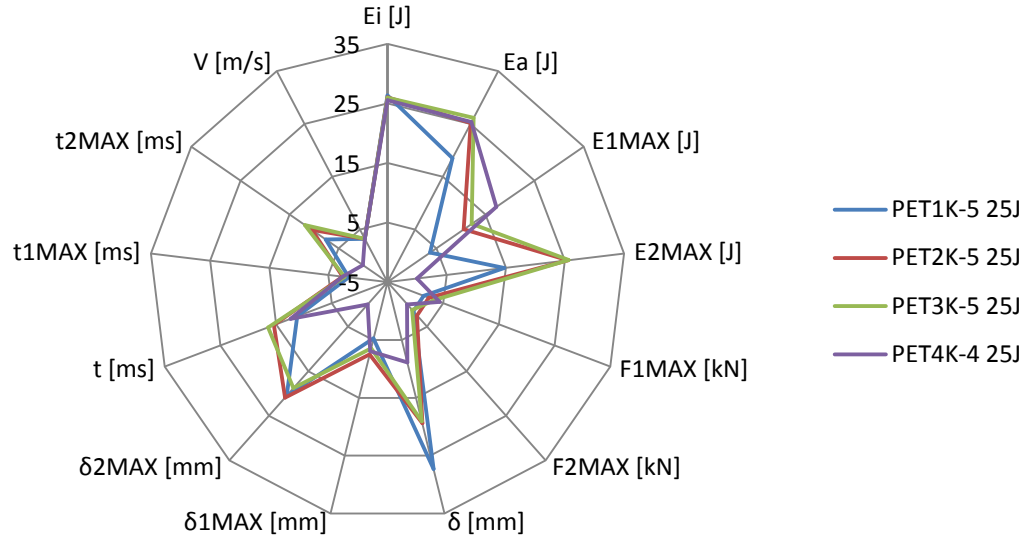
Şekil 5.35 $[(\pm 45)_1/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması



Şekil 5.36 [(±45)₁/PET Köpük]_s, [(±45)₂/PET Köpük]_s, [(±45)₃/PET Köpük]_s, [(±45)₄/PET Köpük]_s, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması



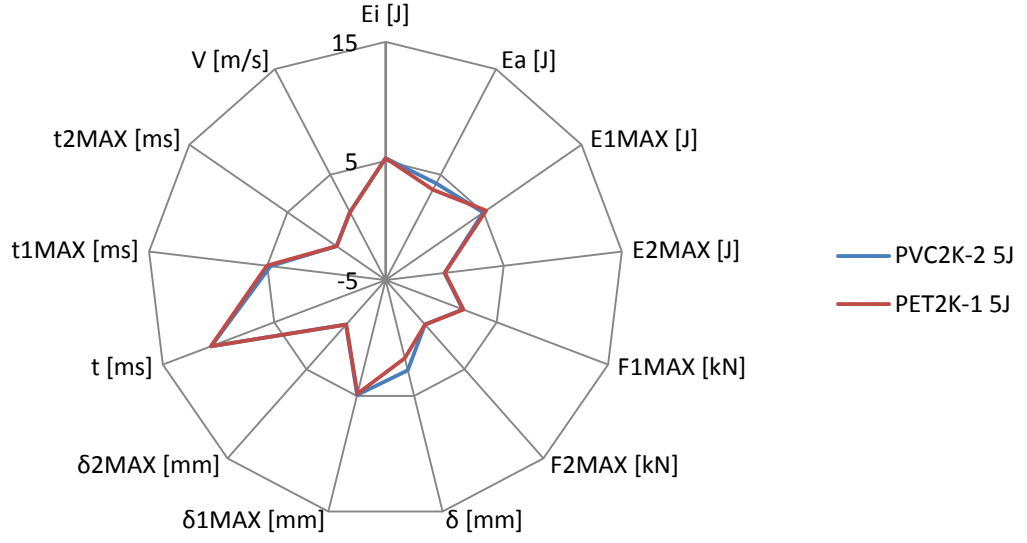
Şekil 5.37 [(±45)₁/PVC Köpük]_s, [(±45)₂/PVC Köpük]_s, [(±45)₃/PVC Köpük]_s, [(±45)₄/PVC Köpük]_s, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 25 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması.



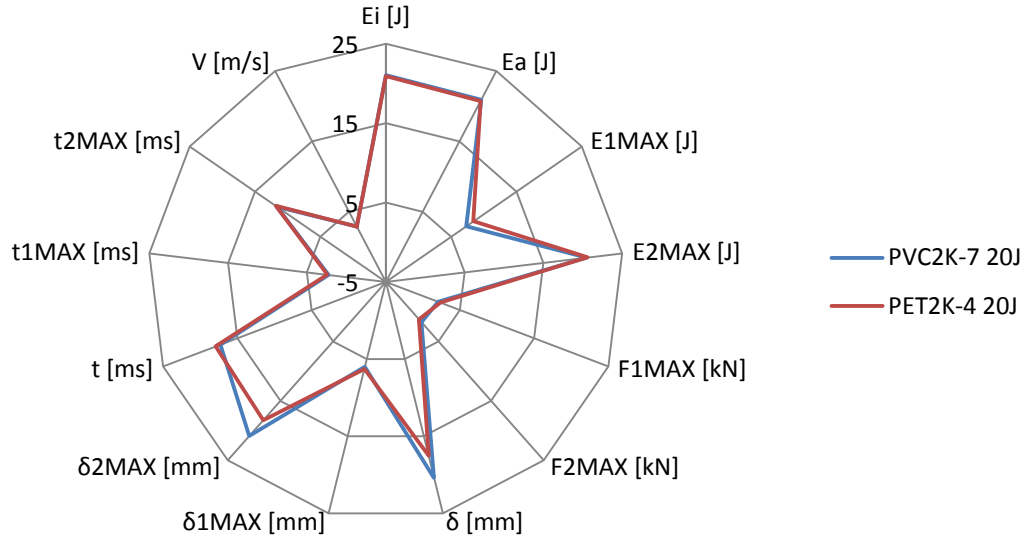
Şekil 5.38 $[(\pm 45)_1/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$, oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 25 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması.

Aynı tabakalı farklı köpüklü sandviç malzemeler aynı enerjilerdeki düşük hızlı darbe deneyi uygulandığında benzer özellikler gösterdiği pet köpüğün çok az üstün olduğu görülmüştür.

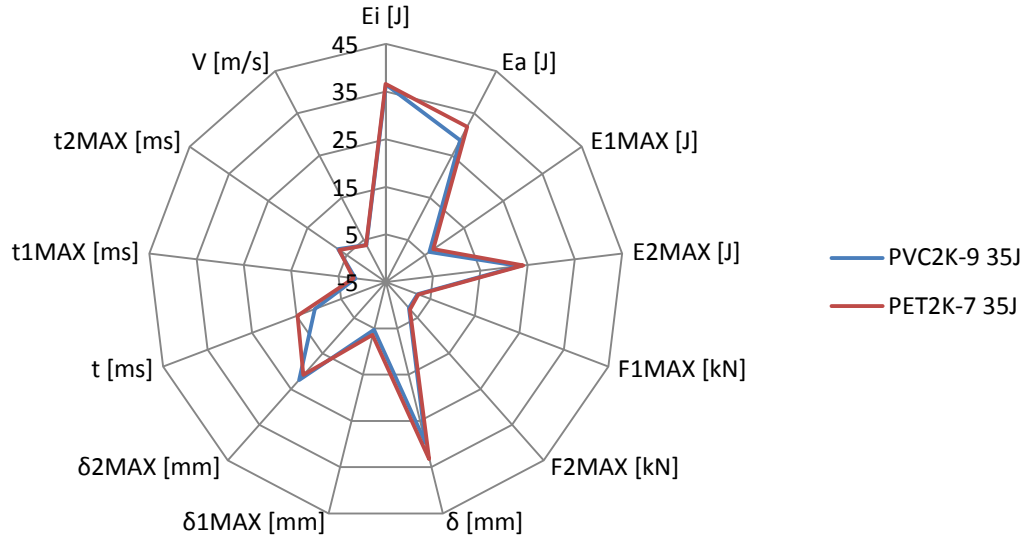
Şekil 5.39 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.40 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 20 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması, Şekil 5.41 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 35 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 5.39 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 5 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması.



Şekil 5.40 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 20 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması.



Şekil 5.41 $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$ ve $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu sandviç kompozit malzemelerin 35 J'deki kritik verilerinin radar grafik ile karşılaştırması.

Aşağıdaki Tablo 5.1'de PVC ve Tablo 5.2'de PET köpüklü sandviç kompozit numunelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarından elde edilen darbe enerjisi, absorbe edilen enerji, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki enerji, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki enerji, üst kabuktaki maksimum kuvvet, alt kabuktaki maksimum kuvvet, toplam deplasman, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasman, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasman, toplam temas süresi, üst kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süresi, alt kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süresi ve darbe enerjisine denk gelen hız verilmiştir.

Tablo 6.1 PVC köpüklü sandviç kompozit numunelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçları

Organizasyon	Numune Kodu	E ₁ [J]	E _a [J]	E _{1max} [J]	E _{2max} [J]	F _{1max} [kN]	F _{2max} [kN]	δ [mm]	δ _{1max} [mm]	δ _{2max} [mm]	t [ms]	t _{1max} [ms]	t _{2max} [ms]	V [m/s]
[±45/PVC] _s	PVC1K-3 5I	5,33	5,40	4,24	0,00	1,22	0,00	6,53	5,75	0,00	16,47	4,96	0,00	1,44
	PVC1K-4 10I	10,95	10,88	3,36	9,19	1,47	8,91	18,53	4,77	17,24	24,12	2,48	12,40	2,03
	PVC1K-2 15I	16,17	16,18	3,72	12,34	1,27	12,70	23,94	5,12	20,54	21,66	2,16	10,88	2,47
	PVC1K-5 20I	21,61	18,85	5,37	15,74	1,60	15,65	33,34	6,35	21,77	19,68	2,32	9,68	2,87
	PVC1K-6 25I	26,51	17,61	2,63	14,64	1,28	18,62	31,19	4,30	20,90	12,67	1,36	7,52	3,21
[(±45) ₂ /PVC] _s	PVC2K-2 5I	5,25	4,17	4,98	0,00	1,94	0,00	2,80	4,95	0,00	10,66	4,72	0,00	1,43
	PVC2K-3 10I	10,43	10,34	4,88	0,00	1,98	0,00	7,51	4,87	0,00	15,84	2,64	0,00	2,03
	PVC2K-10 15I	15,98	16,20	5,00	15,53	2,05	0,66	20,21	4,89	18,76	20,78	2,08	14,24	2,49
	PVC2K-7 20I	21,03	20,88	7,33	20,47	2,06	1,80	20,40	5,99	20,91	17,26	2,24	11,68	2,86
	PVC2K-8 25I	26,17	26,22	9,77	22,61	2,47	2,15	23,12	6,91	21,95	18,23	2,32	9,60	3,21
	PVC2K-6 30I	31,47	27,82	5,53	22,33	2,21	2,58	30,36	5,16	21,85	14,08	1,52	7,84	3,50
	PVC2K-9 35I	36,45	28,59	6,14	23,17	2,15	2,30	29,79	5,31	22,46	10,97	1,44	7,20	3,80
	PVC2K-11 40I	41,33	27,98	6,90	22,86	2,05	2,61	27,42	5,66	21,00	8,71	1,44	6,08	4,05
	PVC3K-1 5I	5,21	3,95	5,15	0,00	2,18	0,00	2,20	4,33	0,00	9,14	4,24	0,00	1,45
	PVC3K-2 10I	10,32	10,06	9,53	0,00	2,72	0,00	4,96	6,05	0,00	10,94	4,00	0,00	2,04
[(±45) ₃ /PVC] _s	PVC3K-3 15I	15,42	15,18	10,68	0,00	3,01	0,00	7,13	6,38	0,00	11,89	3,04	0,00	2,49
	PVC3K-16 20I	20,75	20,76	11,19	0,00	3,35	0,00	15,52	6,10	0,00	15,93	2,40	0,00	2,86
	PVC3K-17 25I	25,97	26,34	9,03	25,50	3,00	1,16	20,05	5,50	19,13	16,87	1,84	11,52	3,21
	PVC3K-6 30I	31,04	31,07	8,98	30,22	2,87	2,23	20,69	5,85	20,93	15,00	1,76	9,92	3,51
	PVC3K-7 35I	36,10	35,59	10,61	33,61	3,40	2,95	21,34	6,01	21,81	14,56	1,68	8,88	3,78
	PVC3K-13 40I	41,15	41,32	10,07	36,72	3,21	3,89	23,00	5,88	21,96	14,49	1,52	7,52	4,05
	PVC3K-14 45I	46,79	46,51	12,52	36,95	3,32	3,29	37,13	6,52	22,53	25,60	1,60	7,04	4,29
	PVC3K-10 50I	51,50	51,64	11,73	34,43	3,11	3,94	30,96	6,59	22,17	15,60	1,52	6,08	4,53
	PVC3K-11 55I	56,60	50,35	13,94	43,04	3,70	3,81	33,05	6,73	23,89	10,58	1,44	6,24	4,88
	PVC3K-12 60I	61,52	49,59	16,75	40,48	3,79	3,52	31,38	7,99	22,86	9,10	1,68	5,68	5,01
[(±45) ₄ /PVC] _s	PVC4K-6 5I	5,16	3,85	4,91	0,00	2,39	0,00	1,51	3,11	0,00	7,30	3,04	0,00	1,44
	PVC4K-5 15I	15,32	13,31	13,46	0,00	3,84	0,00	3,53	6,02	0,00	8,97	3,20	0,00	2,49
	PVC4K-4 25I	25,43	24,15	19,54	0,00	4,79	0,00	6,07	7,05	0,00	10,24	2,72	0,00	3,21
	PVC4K-3 40I	41,08	41,07	14,54	39,59	4,11	2,79	21,68	6,01	21,67	13,83	1,60	9,28	4,05
	PVC4K-2 60I	61,24	62,40	18,33	58,36	4,62	4,66	24,21	6,80	24,40	13,26	1,44	7,20	5,01
	PVC4K-1 75I	77,02	73,27	21,26	55,07	4,85	4,83	41,77	7,49	22,86	18,63	1,44	5,36	5,51

Tablo 6.2 PET köpüklü sandviç kompozit numunelere uygulanan düşük hızlı darbe deneyi sonuçları

Örüntüasyon	Numune Kodu	E ₁ [J]	E ₂ [J]	E _{1max} [J]	E _{2max} [J]	F _{1max} [kN]	F _{2max} [kN]	δ [mm]	δ _{1max} [mm]	δ _{2max} [mm]	t [ms]	t _{1max} [ms]	t _{2max} [ms]	V [m/s]
[(±45) ₂ /PET] _s	PET1K-1 5İ	5,37	5,03	3,13	0,00	1,29	0,00	5,22	4,86	0,00	20,02	3,84	0,00	1,43
	PET1K-2 10İ	10,79	10,87	5,00	10,82	1,49	0,55	15,87	6,33	16,20	23,79	3,44	16,16	2,03
	PET1K-3 15İ	16,00	15,92	5,54	15,60	1,74	1,01	19,77	5,91	20,08	21,42	2,56	14,16	2,48
	PET1K-4 20İ	21,29	18,75	3,81	14,67	1,13	1,82	26,70	5,52	20,39	14,25	2,00	8,80	2,85
	PET1K-5 25İ	26,33	18,47	3,68	14,76	1,49	1,55	27,34	4,74	20,53	11,22	1,52	7,60	3,20
[(±45) ₂ /PET] _s	PET2K-1 5İ	5,24	3,54	5,25	0,00	1,97	0,00	1,77	4,83	0,00	10,69	5,04	0,00	1,44
	PET2K-2 10İ	10,51	9,91	6,18	0,00	2,04	0,00	5,97	5,55	0,00	14,50	3,12	0,00	2,03
	PET2K-3 15İ	15,61	15,83	8,16	0,00	2,29	0,00	12,60	6,37	0,00	15,23	2,88	0,00	2,49
	PET2K-4 20İ	20,90	20,72	8,41	20,61	2,38	1,30	17,56	6,29	18,27	17,93	2,40	11,84	2,86
	PET2K-5 25İ	26,03	25,15	10,59	25,55	2,46	2,51	19,44	7,53	20,95	15,37	2,56	10,40	3,20
[(±45) ₂ /PET] _s	PET2K-6 30İ	31,18	31,12	9,01	24,52	2,34	2,52	23,07	6,89	20,82	18,71	2,08	7,92	3,51
	PET2K-7 35İ	36,61	31,85	7,19	24,08	2,31	2,66	33,25	6,42	21,04	14,77	1,76	6,88	3,78
	PET2K-8 40İ	41,65	33,76	6,51	24,77	2,24	2,64	34,13	5,65	19,56	13,39	1,44	5,84	4,04
	PET3K-1 5İ	5,21	3,62	5,04	0,00	2,02	0,00	1,78	4,30	0,00	9,72	4,24	0,00	1,44
	PET3K-2 10İ	10,29	7,75	10,19	0,00	2,93	0,00	2,85	5,97	0,00	9,27	4,32	0,00	2,03
[(±45) ₂ /PET] _s	PET3K-3 15İ	15,38	14,63	12,09	0,00	3,45	0,00	5,56	6,42	0,00	11,25	3,20	0,00	2,49
	PET3K-4 20İ	20,53	20,64	12,43	0,00	3,44	0,00	9,93	6,56	0,00	15,58	2,64	0,00	2,87
	PET3K-5 25İ	25,93	26,16	12,20	25,64	3,48	1,27	19,08	6,47	18,77	16,45	2,24	11,84	3,20
	PET3K-6 30İ	31,02	30,54	9,86	30,26	2,99	2,63	19,59	6,05	20,61	14,60	1,84	9,60	3,51
	PET3K-7 35İ	36,15	36,13	7,44	31,47	2,54	3,13	22,32	5,26	21,57	16,38	1,44	7,92	3,80
[(±45) ₂ /PET] _s	PET3K-8 40İ	41,17	41,19	12,07	35,06	3,39	3,20	22,80	6,43	21,54	15,74	1,68	7,44	4,06
	PET3K-9 45İ	46,22	46,74	10,75	42,50	3,31	3,72	24,59	6,26	23,00	16,50	1,52	7,52	4,30
	PET3K-10 50İ	51,66	47,79	9,39	35,16	3,35	3,63	34,40	5,59	20,92	14,96	1,28	5,84	4,51
	PET3K-11 55İ	56,53	45,84	7,66	33,50	2,89	3,22	31,70	5,34	21,34	9,20	1,12	5,20	4,88
	PET3K-12 60İ	61,44	45,05	8,75	36,05	3,25	3,50	29,62	5,48	21,93	7,88	1,12	5,20	5,02
[(±45) ₂ /PET] _s	PET4K-6 5İ	5,17	3,59	5,15	0,00	2,38	0,00	1,50	3,52	0,00	7,86	3,76	0,00	1,43
	PET4K-5 15İ	15,32	14,16	12,47	0,00	3,91	0,00	4,29	5,73	0,00	8,80	2,88	0,00	2,49
	PET4K-4 25İ	25,51	25,36	17,21	0,00	4,40	0,00	8,88	6,97	0,00	12,40	2,56	0,00	3,21
	PET4K-3 40İ	41,04	40,80	14,95	40,57	4,36	3,04	20,25	6,33	21,20	13,50	1,68	9,12	4,06
	PET4K-2 60İ	61,43	63,35	17,89	48,12	4,31	4,66	29,60	7,22	22,27	14,59	1,52	5,84	5,02
[(±45) ₂ /PET] _s	PET4K-1 75İ	76,70	60,48	16,03	47,57	4,24	4,45	35,06	6,78	22,44	9,65	1,28	4,96	5,52

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

E-camı/epoksi kabuklu PVC ve PET köpüğü çekirdekli sandviç kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışları pek çok parametre göz önüne alınarak incelenmiştir. Öncelikle darbe tepkisinin karakteristiğini çok iyi gösteren kuvvet-deplasman eğrileri çıkarılmıştır. Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi ile üretilen $[\pm 45/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PVC Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PVC Köpük}]_s$, $[\pm 45/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_2/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_3/\text{PET Köpük}]_s$, $[(\pm 45)_4/\text{PET Köpük}]_s$ oryantasyonlu numuneler için önce katman sayıları aynı tutularak farklı köpüklerdeki darbe karakteristikleri sonrada aynı köpüğün farklı sayıdaki katmanları için darbe karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca absorbe edilen enerji-zaman grafiği, hız-deplasman grafiği, eş enerji grafiği, karşılaştırmalı kuvvet-zaman-enerji ve karşılaştırmalı kuvvet-deplasman-enerji grafikleri kullanılarak da darbe davranışları incelenmeye çalışılmıştır. Son olarak radar grafik ile darbe enerjisi, absorbe edilen enerji, üst ve alt kabuktaki maksimum kuvveteki enerjiler, alt ve üst kabuktaki maksimum kuvvetler, toplam deplasmanlar, üst ve alt kabuktaki maksimum kuvvetteki deplasmanlar, toplam temas süreleri, üst ve alt kabuktaki maksimum kuvvetteki temas süreleri ve darbe enerjisine denk gelen hızlar karşılaştırılmıştır. Gözlenen başlıca hasarlar ise ufak matris hasarları, üst ve alt kabukta fiber kırılmaları, delaminasyon, çekirdekte hücre ezilmesi ve alt kabuk ile çekirdek ara yüzünde ayrılmalar şeklindedir.

Ayrıca PVC ve PET köpüklerin basma özellikleri incelenmiştir. PET köpüğün daha iyi basma dayanımı gösterdiği görülmüştür.

Sonuç olarak 60 kg/m^3 yoğunluklu PVC ve 105 kg/m^3 yoğunluklu PET köpüğü karşılaştıracak olursak benzer karakteristikler gösterdiği fakat PET köpüğün kısmen daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Katman sayılarına göre karşılaştırdığımızda doğal olarak katman sayısı arttıkça darbe dayanımının da arttığı ve daha iyi karakteristikler gösterdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abrate, S. (2005). *Impact on composite structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Abrate, S. (Ed.) (2011). *Impact engineering of composite structures*. Udine: Springer.
- Adams, D. F., & Carlsson, L. A., & Pipes, R. B. (2003). *Experimental characterization of advanced composite materials* (3rd ed.). Florida: CRC Press.
- Akgün, Y. (2010). *Onarılmış kompozit plakların darbe davranışları*, İzmir.
- Anderson, T., & Madenci, E. (2000). Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composite Structures*, 50, 239-247.
- Ataş, C. (2004). *Large deformations in composite laminated plates*. İzmir.
- Ataş, C., & Sevim, C. (2010). On the impact response of sandwich composites with core of balsa wood and PVC foam. *Composite Structures*, 93, 40-48.
- Bhuiyan, A., & Hosur, M. V., & Jeelani, S. (2009). Low- velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial (± 450) braided face sheets. *Composites: Part B*, 40, 561-571.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. Ohio: ASM International
- Carlsson, L. A., & Kardomateas, G. A. (2011). *Structural and failure mechanics of sandwich composites*. NY: Springer.
- Daniel, I. M. (Ed.), & Gdoutos, E. E. (Ed.), & Rajapakse, Y. D. S (Ed.). (2009). *Major accomplishments in composite materials and sandwich structures*. NY: Springer.
- Dear, J. P., & Lee, H., & Brown, S. A. (2005). Impact damage processes in composites sheet and sandwich honeycomb materials. *Internatiol Journal of Impact Engineering*, 32, 130-154.

- Foo, C. C., & Seah, L. K., & Chai, G. B. (2008). Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels. *Composites Structures*, 85, 20-28.
- Gay, D., & Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). *Composite materials design and applications*. Florida: CRC Press.
- Gören, A., & Ataş, C. (2008). Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. *Archives of Material Science and Engineering*, 34, 117-120.
- Grant, P., & Rousseau, C. Q. (2000). *Composite structures: theory and practice*. Philadelphia: ASTM.
- Groover M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing materials, processes, and systems* (3rd ed.). NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Gupta, N. (2003). *Characterization of syntactic foams and their sandwich composites: modelling and experimental approaches*. Bangalore.
- Gustin, J., & Joneson, A., & Mahinfalah, M., & Stone, J. (2005). Low velocity impact of combination kevlar/carbon fiber sandwich composites. *Composite Structures*, 69, 396-406.
- Hazizan, A., & Cantwell, W. J. (2003). The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure. *Composites: Part B*, 34, 679-687.
- Heimbs, S., & Cichosz, J., & Klaus, M., & Kilchert, S., & Johnson, A.F. (2010). Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads. *Composite Structures*, 92, 1485-1497.
- Herup, E. J., & Palazotto, A. N. (1997). Low-velocity impact damage initiation in graphite/epoxy/nomex honeycomb-sandwich plates. *Composites Science and technology*, 57, 1581-1598.
- Hosur, M. V., & Abdullah, M., & Jeelani, S. (2005). Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets. *Composite Structures*, 69, 167-181.

- Hosur, M. V., & Mohammed, A. A., & Zainuddin, S., & Jeelani, S. (2008). Processing of nanoclay filled sandwich composites and their response to low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 82, 101-116.
- Hosur, M. V., & Mohammed, A. A., & Zainuddin, S., Jeelani, S. (2008). Impact performance of nanophased foam core sandwich composites. *Materials Science and Engineering A*, 498, 100-109.
- Jones, M. J. (1999). *Mechanics of composite materials* (2nd ed.). Philadelphia: CRC Press.
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2nd ed.). NW: CRC Press.
- Mallick; P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). NW: CRC Press.
- Mohan, K., & Yip, T. H., & Idapalapati, S., & Chen, Z. (2011). Impact response of aluminum foam core sandwich structures. *Materials Science and Engineering A*, 529, 94-101.
- Schubel, P. M., & Luo, J., & Daniel, I. M. (2005). Low velocity impact behavior of composite sandwich panels. *Composites: Part A*, 36, 1389-1396.
- Schubel, P. M., & Luo, J., & Daniel, I. M. (2007). Impact and post impact behavior of composites sandwich panels, *Composites: Part A*, 38, 1051-1057.
- Vaidya, U. K., & Hosur, M. V., & Earl, D., & Jeelani, S. (2000). Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels. *Composites: Part A*, 31, 761-772.