

## DÜŞÜK HIZLI DARBE YÜKLEMELERİ SONUCU KOMPOZİT MALZEMELERDE ORTAYA ÇIKAN HASAR MEKANİZMALARI

**Sinan FİDAN\***

Kocaeli Üniversitesi, Sivil Havacılık  
Yüksekokulu, Arslanbey Kampüsü - İzmit  
sinan\_fidan@hotmail.com

**Tamer SINMAZÇELİK**

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Umuttepe Kampüsü, İzmit  
TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi,  
PK 21, Malzeme Enstitüsü, Gebze-İzmit  
tamercs@yahoo.com

**Mustafa Özgür BORA**

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği  
Bölümü, Umuttepe Kampüsü, İzmit  
ozgur\_bora@yahoo.com

**Onur ÇOBAN**

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makina Mühendisliği  
Bölümü, Umuttepe Kampüsü, İzmit  
onur\_coban@yahoo.com

### ÖZET

Kompozit malzemeler; taşıt gövdeleri, yapısal uçak parçaları ve askeri araçlarda spesifik modül ve spesifik dayanımları nedeniyle konvansiyonel metal malzemelerin yerine günümüzde giderek artan oranda tercih edilmektedirler. Kompozit malzemeler çalışma esnasında darbe yüklemesi nedeniyle gözle görülemeyen veya gözle görülebilen deformasyona maruz kalmaktadırlar. Bu çalışmada, (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyeester kompozit numunelerin matris çatlama hasarı eşik değerinden tam penetrasyon eşik değerine kadar enerji seviyeleri tespit edilerek, belirlenen darbe enerji seviyelerinde numunede oluşan hasar mekanizmaları kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde gösterilmiştir. Bununla birlikte darbe yüklemeleri sonrası kompozitlerde ortaya çıkan hasar mekanizmaları tomografi yöntemiyle incelenerek hasar mekanizmaları hakkında bilgi verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polimer matrisli kompozit, düşük hızlı darbe yüklemeleri, hasar mekanizması, tomografi

## Damage Mechanisms Arised in Composite Materials Due To Low Velocity Impact Loadings

### ABSTRACT

Nowadays composite materials are increasingly preferred due to the specific modulus and specific strengths at vehicle body parts, structural parts of aircraft and military vehicles instead of traditional alloy metal materials. Composite materials are exposed to invisible or visible deformation due to impact loading during service. In this study, the range of energy levels of (0/90)<sub>s</sub> oriented glass fiber reinforced polyester composite samples's matrix cracking damage threshold to full penetration threshold have been determined, at determined impact energy levels the damage mechanisms which are created in sample are shown in force-time, energy- time and force-displacement curves. In addition, after low-velocity impact loadings, damage mechanisms which are ocured at glass fiber reinforced polyester matrix composite are examined with tomography method and detailed information about damage mechanisms was given.

**Keywords:** Polymer matrix composite, low-velocity impact loadings, damage mechanism, tomograph

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 05.10.2010  
Kabul tarihi : 15.12.2010

## GİRİŞ

Çeliğin bulunmasından beri mühendislik tasarımlarında metaller ilk tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Yüksek spesifik mekanik özellikler, yüksek rijitlik /ağırlık oranı ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle metal malzemelerin yerine kompozit malzemelerin askeri alanlarda kullanılmak üzere kurşun geçirmez yeleklerde, tank yapılarında ve savaş jetlerinde kullanımını arttırmıştır. Kompozit malzemeler ayrıca sivil havacılık uygulamalarında, otomotiv endüstrisinde ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Kompozit yapıların tasarımındaki en önemli ilgi darbe yüklemesine karşı duyarlılıklarıdır. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin düşük hızlı darbe yüklemeleri de dahil enine yüklemeler nedeniyle yapı içerisinde oluşan iç hasara karşı yüksek oranda hassas oldukları bilinmektedir[2]. Örneğin yapısal havacılık uygulamalarında kullanılan polimer kompozitlerin uçuş pisti kırıntıları (enkazları), dolu, bakım hasarları (alet düşmesi), servis araçlarının ya da kargo ile yapı arasındaki çarpışma, kuş çarpmaları, pervanedeki buzların gövdeye çarpması, motor enkazı ve lastik kopması gibi darbe yüklemesine maruz kaldığı saptanmıştır [3]. Darbe yüklemelerine karşı kompozit malzemelerin bu duyarlılığı nedeniyle endüstriyel uygulamalarda daha fazla kullanılmaları ciddi bir şekilde etkilemesine rağmen, bu malzemelerin darbe esnasında oluşan enerjinin matris hasarı (tabakalar içi ve tabakalar arası çatlaklar), fiber kırılması, fiber-matris ayrılması, tabaka yarılması, delaminasyon, fiber soyulması ve fiber çekme hasarı şeklindeki hasar mekanizmaları ile absorbe edildiği belirtilmektedir [2, 4, 5]. Bu nedenle yapısal uçak, helikopter ve araba parçalarında kullanılan kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe yüklemeleri gibi yapıyı hasara uğratabilecek potansiyel dış yüklemelere karşı davranışı ve yapıda oluşan hasar mekanizmalarının incelenmesi gereken önemli bir konudur.

Düşük hızlı darbe yüklemelerinde malzemenin hem yüzeyinde hem de iç kısmında oluşan hasar mekanizmalarının hangi darbe enerjisinde oluştuğu kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-darbe ucunun yer değiştirmesi eğrilerinden

anlaşılabacağı gibi darbe uygulanan numuneye yapılan tahribatsız muayene yöntemleri yardımıyla da belirlenebilmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, polimer matrisli kompozit malzemeler için düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucunda ortaya çıkan hasar mekanizmaları ultrasonik C-tarama, hızlı kamera ile fotoğraflama, X-ray, optik mikroskop ve termografi yöntemleriyle açıklanmıştır [6-12]. Bu çalışmada ise (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyeester kompozit numunelerin matris çatlama hasarı eşik değerinden tam penetrasyon eşik değerine kadar enerji seviyeleri tespit edilerek, belirlenen darbe enerji seviyelerinde numunede oluşan hasar mekanizmaları kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden belirlenmiştir. Bununla birlikte malzemede oluşan hasar mekanizmaları tomografi yöntemiyle detaylı olarak saptanarak, uygulanan darbe enerjisi ile oluşan hasar mekanizmaları arasındaki ilişki belirlenmiştir.

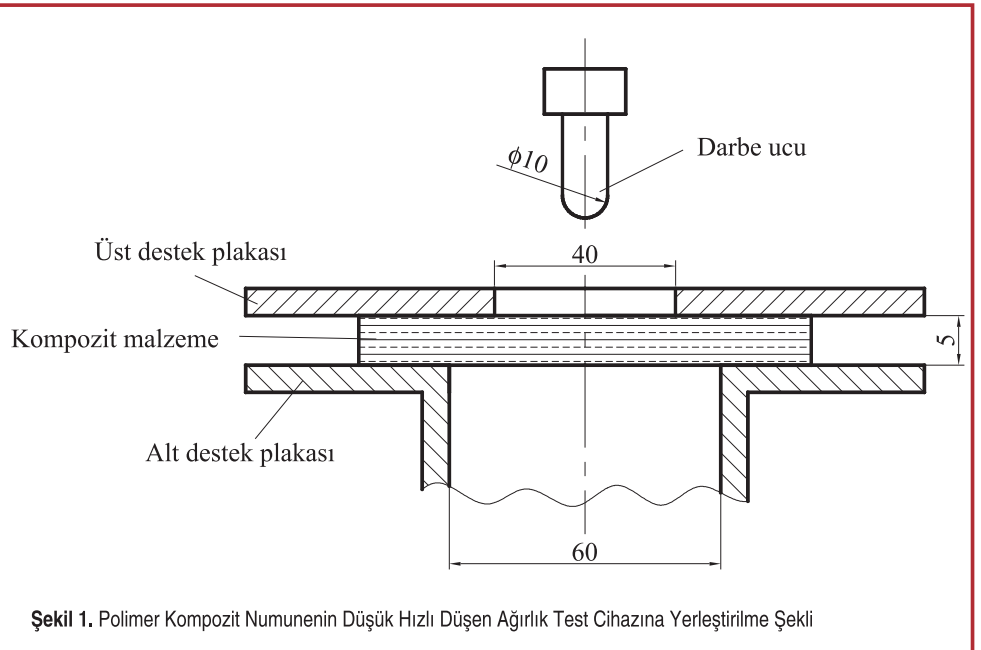
## MALZEME VE DENEYSEL YÖNTEM

### Malzeme

Gerçekleştirilen çalışmada (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyeester kompozit kullanılmış olup TeknoMa firmasından temin edilmiştir. Fiber hacim oranı %60 olan 5 mm kalınlığa sahip (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu E-cami/polyester tabakalı kompozitlere düşük hızlı düşen ağırlık darbe testi uygulanmıştır. Düşük hızlı darbe testleri için kompozit plakalar 100 mm x 100 boyutunda şerit testerede kesilmiştir.

### Düşük Hızlı Düşen Ağırlık Darbe Testi

Düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmış olan (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu polimer matris kompozit plakaların hasar



direncini belirleyebilmek için ASTM D 7136 standardına göre düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri yapılmıştır. Testler Instron Dynatup 9250 HV darbe test cihazında yapılmış olup, numuneleri hasara uğratabilecek darbe ucunun toplam ağırlığı 10.02336 kg'dır. Çapı 10 mm olan yarı küresel darbe ucu seçilmiştir. Test cihazının maksimum düşme yüksekliği 2 m olup bu yükseklikte uygulayabileceği maksimum darbe enerjisi 196 J'dür. Düşen ağırlık aparatı motorize edilmiş kaldırma hattı ile donatılmıştır. Veriler her darbe yüklemesi sonrası Impulse Data Acquisition programı ile kayıt altına alınabilmektedir ve darbe ucuda uygulanan başlangıç enerjisine geri dönmektedir. Düşük hızlı darbe testlerinde, 100 mm x 100 mm x 5 mm boyutuna sahip kare kompozit plakalar 40 mm iç çapa sahip üst metal plaka ile 60 mm çapa sahip alt destek plakası arasına yerleştirilmiştir. Şekil 1'de numunenin düşük hızlı düşen ağırlık test cihazına yerleştirilme şekli sembolik olarak gösterilmiştir. Numunenin desteklenme sistemi tüm sıkıştırılan alanda uniform bir basınç sağlayacak şekilde tasarlanmış olup, darbe ucunun test edilen numuneye ikinci kez vurmasını önlemek amacıyla test cihazına tutucu yerleştirilmiştir.

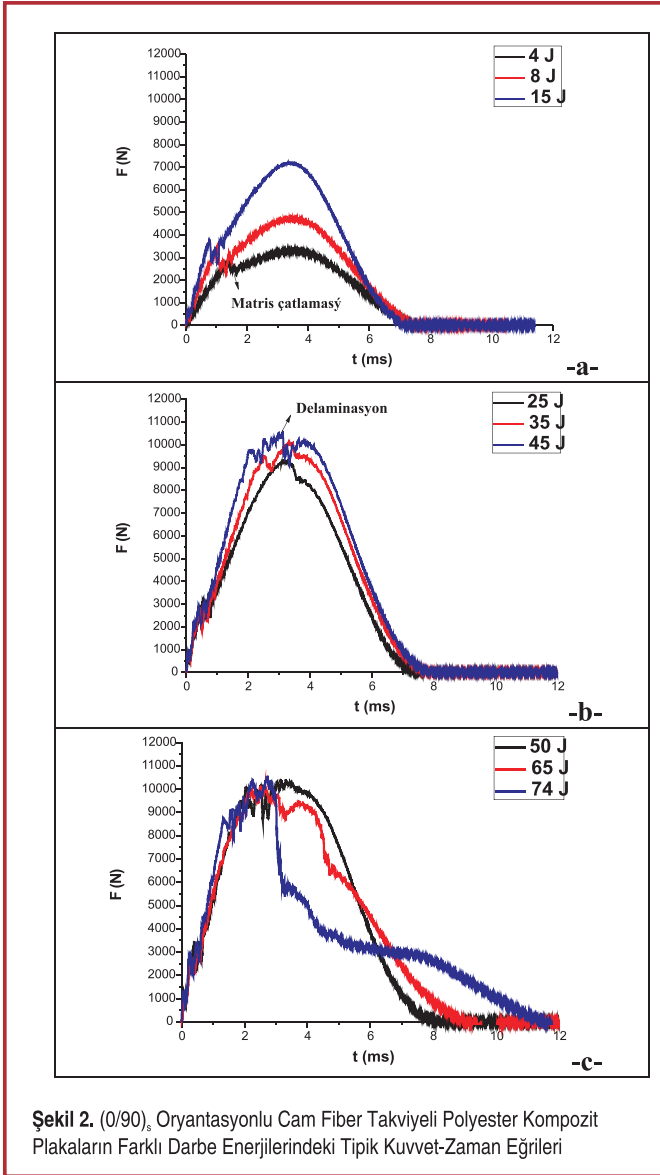
## Tomografi Yöntemiyle Hasar Analizi

Yapılan çalışmada düşük hızlı darbe yüklemesi sonrası ortaya çıkan iç yapı hasarlarını ortaya koymak için klasik inceleme yöntemlerinden farklı olarak bilgisayarlı tomografi cihazıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme tekniğinin malzeme iç yapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için de uygun olabileceği düşünülmüş, deneysel çalışması yapılan malzemeyle denemeler yapılarak görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler malzeme iç yapısında ortaya çıkan delaminasyon ve hasar konisi geometrisi hakkında önemli ipuçları vermiştir. Bilgisayarlı tomografi görüntüleri Toshiba Aquilion 64 marka cihazla elde edilmiştir. Malzeme iç yapısını gösteren görüntüler tomografi cihazında 40 miliamper akım değerinde 120 kilovolt ile elde edilmiştir. Tomografi çekim programında FOV değeri olarak 120 seçilmiştir. FOV (field of view) değeri; bilgisayarlı tomografide ekrana yansıyan görüntüye uyan numunenin büyüklüğüdür. İç yapıdaki hasar mekanizmalarını ortaya çıkarmada önemli olan bir başka tomografi çekim parametresi de doku cinsi ve çözünürlüğüdür. Cam fiber takviyeli polyester kompozit numunenin tomografi çekimlerinde kullanılacak en uygun doku cinsinin kemik dokusu olduğu yapılan denemelerde görülmüş ve bu değer kullanılmıştır. Ayrıca iç yapı hasarlarının netliği açısından yüksek çözünürlük değeri seçilmiştir. Tomografi görüntüleri çekilirken axial ve sagittal ilerleme hızı olarak sırasıyla 0,5 × 0,3 mm seçilmiştir.

## ELDE EDİLEN VERİLER VE DEĞERLENDİRME

(0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit plakalarda düşük hızlı darbe testleri nedeniyle meydana gelen hasar mekanizmalarının gözlemlendiği darbe enerjisi seviyelerinin belirlenebilmesi için ön düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ön testler ile kompozit malzemenin tam penetrasyona uğradığı enerji eşik değerinin, numunenin tek bir darbe yüklemesi ile delindiği, 74 J olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte matris çatlaması hasarı, numunenin uygulanan darbe yüklemesine karşı gösterdiği ilk hasarlanma, 4J darbe enerjisi seviyelerinde numunede olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan ön düşük hızlı darbe testleri ile (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit malzemesi için uygulanması gereken darbe enerji seviyesi aralığı belirlenerek, 4J, 8J, 15J, 25J, 35J, 45J, 50J, 65J ve 74J darbe enerjileri ile polimer kompozit malzemenin düşük hızlı düşen ağırlık darbe testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Şekil 2'de (0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik kuvvet-zaman eğrileri gösterilmiştir. Şekil 2'den genel olarak artan darbe enerjisi ile kuvvetin 45 J darbe enerjisine kadar arttığı daha sonra ise polimer kompozit malzemedeki delaminasyon hasarının oluşması ile kuvvet değerlerinde az da olsa bir düşüş gözlemlendiği belirlenmiştir. Diğer önemli bir husus ise delaminasyon hasarının oluşumundan sonra (Şekil 2-b) polimer kompozit malzemenin uygulanan darbe enerjisi ile hasara uğrama süresinin azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 2-a'da polimer kompozit malzemenin ilk matris çatlaması hasarının gözlemlendiği enerji seviyesinin 4J olduğu belirtilmiştir. Collombet vd. [13] matris çatlamasının enine gerilme kriteri ile hesaba katılması gerektiğinin ve matris çatlaması hasarının tabakalar içi ve tabakalar arası hasar oluşumuna öncülük ettiğini belirterek, delaminasyon hasarının sadece alt tabakanın yeterli oranda matris çatlaması ile doyurulmasından sonra ortaya çıkabileceğini tespit etmişlerdir [13,14]. Matris çatlaması hasarı ile kuvvet-zaman eğrisinin eğiminin değiştiği ve kuvvet değerlerinde ilk ani düşüşün yaşandığı görülmüştür. Şekil 2-a'dan da görüldüğü üzere matris çatlaması hasarının darbe sonrası tüm tabakanın rijitliğini çarpıcı olarak etkilemediği Sjöblom vd. [15]'nin belirttiğine benzer olarak saptanmıştır. Şekil 2-b'de ise polimer kompozit malzemedeki düşük enerjilerde ana hasar mekanizmasının matris çatlaması olarak ortaya çıkarken, artan darbe enerjisi ile hasar mekanizmasının delaminasyon olarak ortaya çıktığı görülmüştür. 25J darbe enerjisi seviyesinde ilk olarak delaminasyon hasarı saptanmıştır. Şekil 2-b'den belirlenen diğer bir eşik değeri ise 45J değeridir. 45J darbe enerjisi seviyesinde kompozit numune ciddi bir şekilde delaminasyon hasarının olduğu gözlemlenmiştir. Hosur vd. [16]

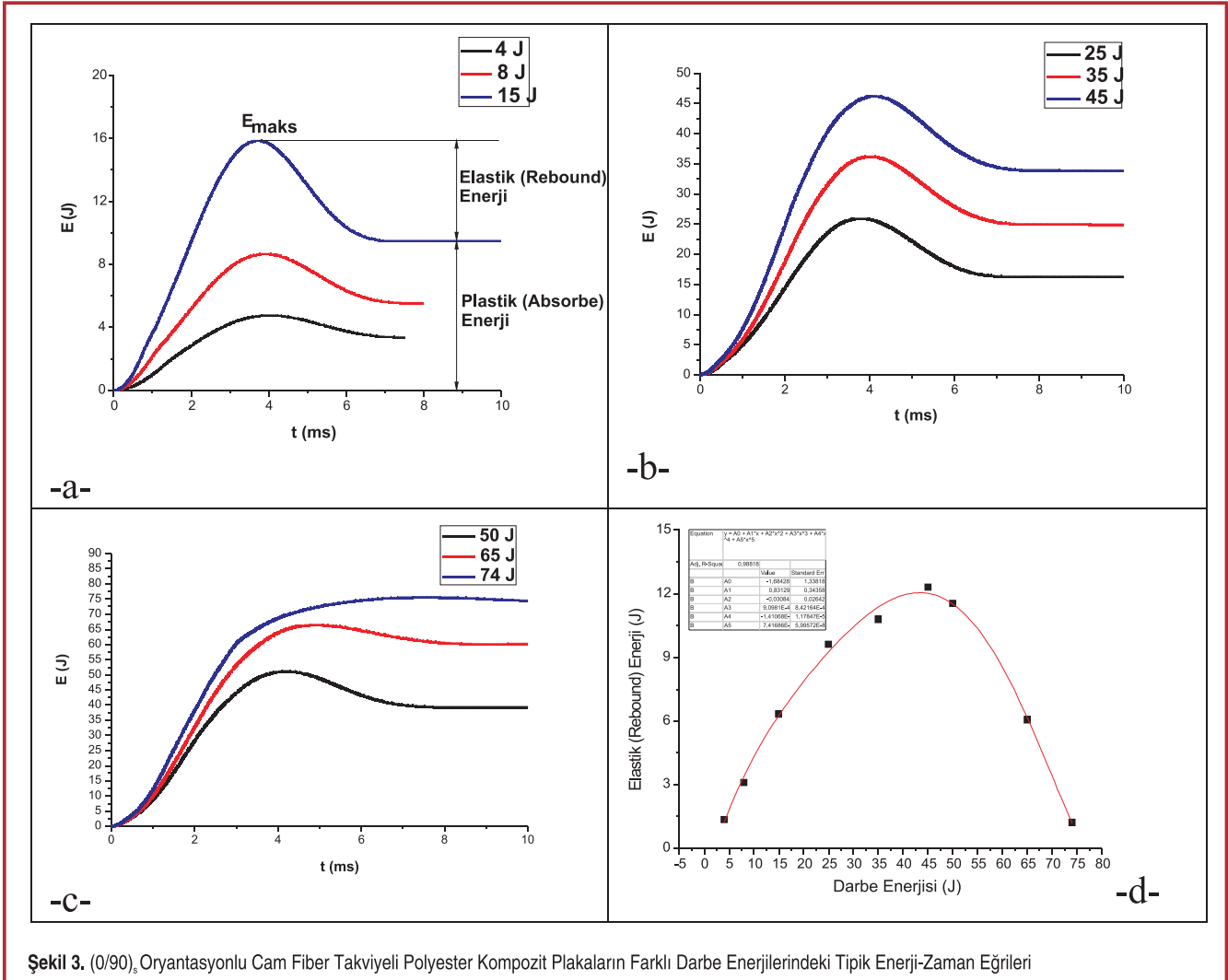


nin belirttiği gibi delaminasyon hasarının oluşumundan sonra kompozit malzemenin rijitliğinin ve basma dayanımının ciddi bir şekilde etkilendiği saptanmıştır. Şekil 2-c'den görüldüğü gibi kompozit malzemede ilk delaminasyon hasarının oluştuğu 25 J'den daha yüksek darbe enerji seviyelerinde Azouaoui vd. [17]'nin belirttiğine benzer olarak darbe uygulanan noktadan daha uzak bir arayüzeyde oluşmuş delaminasyon hasarının daha sonra diğer arayüzeylerde yeni delaminasyona uğramış yüzeyler ortaya çıkarttığı (45 J) ve bu nedenle kompozit malzemenin 45J darbe enerjisi seviyesinden sonra uygulanan daha yüksek darbe enerji seviyelerinde dayanamayarak tam penetrasyona uğradığı saptanmıştır.

(0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki enerji-zaman eğrileri

Şekil 3'te belirtilmiştir. Enerji dengelerinin darbe olayı esnasında hasar gelişimi seviyesinin belirlenmesinde genellikle kullanıldığı belirtilmiştir [18-20]. Belingardi vd. [18-20] düşük hızlı darbe yüklemeleri esnasında darbe enerjisi ile absorbe (plastik) enerji arasındaki orandan saptanan hasar derecesi ile numunenin ne zaman tam penetrasyona uğrayacağını belirlemişlerdir. Hasar derecesi değeri 1 değerine yaklaştıkça yani absorbe edilen enerjinin değerinin uygulanan darbe enerjisi seviyesine yaklaşmasıyla numunenin tam penetrasyona uğradığı saptanmıştır. Şekil 3-a'da sembolik olarak düşük hızlı darbe sonrası numunede enerjinin iki şekilde depolandığı gösterilmiştir. Rebound enerji (elastik enerji) darbe ucunun geri dönmesine sebep olan enerji değerini simgelerken, kalan enerji numune tarafından absorbe edilen enerji olup numuneyi hasara uğratmayı sağlayan plastik enerjiyi simgelemektedir [21]. Şekil 3-a-b ve c'den artan darbe enerjisi ile numunenin hasar derecesi değerinin 1'e yaklaştığı ve 74 J değerinde ise tam penetrasyona uğradığı saptanmıştır. Şekil 3-d'de uygulanan darbe enerjileri ile elastik enerji arasındaki ilişki gösterilmiştir. Kuvvet-zaman eğrilerinde belirtildiği gibi 25 J değerine kadar numune ciddi bir şekilde hasarlanmadığı için elastik enerji değerlerinde artış gözlenmiştir. İlk delaminasyon hasarının 25 J'de yaşandığı darbe enerjileri-elastik enerji eğrisinde de görülebilmektedir. 25J enerji seviyesinde numunede ilk delaminasyonun oluşmasıyla eğrinin eğiminin azaldığı ve artan darbe enerjisiyle (45J) hızlı bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. İkinci delaminasyon eşik değeri olan 45J'de artık numunenin ciddi bir şekilde hasara uğrayarak uygulanan enerjiyi elastik olarak depolayamadığı tespit edilmiştir. 74J değerinde ise Belingardi vd. [18-20] belirttiği gibi absorbe enerjisinin uygulanan darbe enerjisine yaklaştığı bu sebeple de numunenin tam penetrasyona uğradığı saptanmıştır.

(0/90)<sub>s</sub> oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Çeşitli darbe enerjilerinde yapılan düşük hızlı darbe deneylerinde kuvvet-zaman eğrileri kompozit malzemenin darbe yüklemesine karşı davranışını belirleyebilmektedir [22]. Kuvvet-zaman eğrilerinde kapalı ve açık eğri olarak iki tip eğri biçimi bulunmaktadır [23]. Kapalı eğri biçiminde uygulanan darbe enerjisi numuneyi tam penetre hasarına uğratmadığı için darbe ucu numuneden geri çıkmaktadır. Darbe ucunun numuneden geri çıkmasıyla kuvvet-yer değiştirme eğrisi kapanır (Şekil 4-a). Kısacası numune uygulanan darbe enerjisinin bir kısmını elastik enerji olarak harcayabilmektedir. Açık eğri biçiminde ise uygulanan darbe enerjisi numunenin tam penetrasyonuna neden olabilecek bir enerji seviyesidir ki bu enerji seviyesinde darbe yüklemesi sonrası darbe ucu numuneden geri dönemez (Şekil 4-c). Şekil 4-a'dan düşük darbe enerjilerinde sadece matris çatlaması hasarının numunede ana hasar mekanizması



olarak ortaya çıktığı, artan darbe enerjisi seviyesi ile (Şekil 4-b) hasar mekanizmasının delaminasyon hasarı olarak kuvvet-yer değiştirme eğrisinin pik yaptığı yerde oluştuğu saptanmıştır. Şekil 4-b'de gösterildiği gibi oluşan ilk delaminasyon hasarı (25J) kuvvet-zaman eğrisinin geri dönüşünde bir bekleme yaşatmıştır. Diğer önemli darbe eşik enerjisinin 45J olduğu kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde de görülebilmektedir. 25J darbe enerjisi ile oluşan ilk delaminasyon hasarı 45J ile maksimum değerlerine ulaşmıştır. Delaminasyon hasarının malzemede artmasıyla kuvvet- yer değiştirme eğrisinin pik bölgesinde yatay kırılmalarla ilerlediği tespit edilmiştir. Şekil 4-c'de ise kompozit malzemenin tek vuruşta tam penetrasyonuna neden olan darbe enerji değeri belirlenmiştir. 74J darbe enerjisi ile yapılan darbe yüklemesi ile açık eğri biçimi oluşmuştur.

Şekil 5'te tomografi yöntemiyle farklı darbe enerjilerinde

düşük hızlı darbe yüklemesine maruz bırakılmış kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden saptanan hasar mekanizmaları görsel olarak sunulmuştur. Kompozit malzemenin yıkıcı olarak deforme eden delaminasyon hasarı, çekme bölgesindeki (numunenin arka yüzeyi) fiber kırılmaları ve darbe ucunun yarattığı bölgesel delinme hasarı tomografi yöntemiyle tespit edilebilirken, matris çatlaması hasarı saptanamamıştır. Şekil 5'ten 25J darbe enerjisinde ilk delaminasyon hasarının oluştuğu ve darbe enerjisi seviyesinin 45 J'e çıkartılmasıyla Gama ve Gillespie [24]'nin çalışmasında belirtildiği gibi kısmi penetrasyon oluşumu gözlenmiştir. Kısmi penetrasyon oluşumu uygulanan darbe enerjisinin numuneyi ciddi bir şekilde deforme ettiği ama bununla birlikte uygulanan darbe enerjisinin numuneyi tam penetrasyona uğratmadığını belirtmektedir. 45 J darbe enerjisi ile yapılan darbe testinde