Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
6(3), 435 – 447, 2018
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.363292

Araştırma Makalesi Research Article

TABAKALI CAM ELYAF/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN DARBE DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ayşe ÖNDÜRÜCÜ[1]*, Ali KARACAN[2]

[1] Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
[2] Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği A.B.D., Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler
Cam elyaf/epoksi
Tabakalı kompozitler
Düşük hızlı darbe
Darbe enerjisi
Hasar

Öz

Darbe, bir malzeme veya yapı üzerine düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir süre içerisinde uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanır. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Bu çalışmada, artan darbe enerji değerleri için farklı oryantasyon açılarına sahip cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Darbe deneyleri için 50cm x 50cm boyutlarında 8 ve 12 tabakalı cam elyaf/epoksi kompozit plaka üretimi yapılarak 150mm x 100 mm boyutlarında numune kesimi yapılmıştır. Bu numuneler 4 ayrı gruba ayrılmıştır. Her grup numuneler için 10J, 20J ve 30J'lük artan darbe enerjisi değerleri altında darbe testi uygulanarak fiber takviye açılarının ve tabaka kalınlıklarının darbe davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Artan darbe enerjisi değerlerinde maksimum kuvvet ve çökme miktarı değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 30J darbe enerjisi için en fazla çökmenin $[0^{\circ}/30^{\circ}/60^{\circ}/0^{\circ}]_s$ dizilimine sahip G_3^8 numunelerinde oluştuğu görülmüştür. Darbe deneyleri sonucunda, 8 tabakalı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin ve darbe dayanımlarının 12 tabakalı numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Darbe testi uygulanan cam elyaf/epoksi kompozit numunelerde darbe uygulanan üst yüzeyde ezilme izi, fiber uzamaları ve matris kırılmaları görülürken, darbe uygulanmayan alt yüzeyde fiber ayrılmaları, fiber kırılmaları ve delinme hasarlarının meydana geldiği görülmüştür. Darbe enerjisinin arttırılmasıyla hem üst hem de alt yüzeydeki hasar bölgelerinin genişlediği görülmüştür.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE IMPACT BEHAVIOR OF LAMINATED GLASS FIBER/EPOXY COMPOSITES

Keywords
Glass fiber/epoxy
Laminated composites
Low velocity impact
Impact energy
Damage

Abstract

Impact can be defined as the momentary external force applied to a material or structure at a low, medium, or high speed within a very short period of time. Depending on the application and the purpose of use, the impact that the material may be subjected to can be very different. In this study, the impact behaviors of glass fiber / epoxy laminated composite specimens with different orientation angles for increasing impact energy values were experimentally investigated. For impact tests, 8 and 12 layered glass fiber/epoxy composite materials were manufactured in dimensions of 50cm x 50 cm, and specimens were cut in dimensions of 150mm x 100 mm. These samples are divided into 4 separate groups. For each group of samples, impact tests were performed under increasing impact energy values of 10J, 20J and 30J to investigate the effects of fiber reinforcement angles and layer thickness on impact behavior. As a result of the impact tests, It was also observed that the maximum force and the displacement

* İlgili yazar / Corresponding author: ayseondurucu@sdu.edu.tr

increased with increasing impact energy values. it was seen that the load carrying capacities of the 8 layered samples and the impact strengths were lower than those of the 12 layered samples. It has been observed that the maximum collapse for 30J impact energy is in the specimens with $[0^{\circ}/30^{\circ}/60^{\circ}/0^{\circ}]_s$ array. It was observed that small fiber segregations and matrix fractures were observed on impacted top face of glass fiber/epoxy composite samples for low impact energies. In addition, it was seen that fiber breakage and perforation damage occurred by increasing the impact energy. Fiber segregations, fiber breakages and perforation damage were observed on the bottom faces of the composite specimens where no impact was applied. It is also observed that the areas of the damage have grown with increasing impact energy values.

Alıntı / Cite

Öndürücü, A., Karacan, A., (2018). Tabakalı Cam Elyaf / Epoksi Kompozitlerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(3), 435-447.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. ÖNDÜRÜCÜ, 0000-0002-0319-4256	**Başvuru Tarihi /Submission Date**	06.12.2017
A.KARACAN, 0000-0001-9225-4830	**Revizyon Tarihi / Revision Date**	18.07.2018
	Kabul Tarihi / Accepted Date	26.07.2018
	Yayım Tarihi / Published Date	21.09.2018

1. Giriş

Havacılık, denizcilik ve otomotiv sanayi, yapı sektörü, spor araçları, sağlık ve ulaşım gibi birçok alanda kullanılan kompozit malzemelerin düşük hız altında aldıkları darbeler büyük önem arz etmektedir. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkendir. Bu nedenle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder (Uyaner vd., 2007). Darbe, bir malzeme veya yapı üzerine düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir süre içerisinde uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanır. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir (Kara, 2012). Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir; hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ile 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadırlar (Ceyhun ve Turan, 2003).

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu tabaka veya fibere dik yükleme halidir. Malzeme kalınlık doğrultusunda tabaka düzlemine nazaran daha zayıf olduğundan, enine darbeye maruz

kaldığında toplam yük taşıma kapasiteleri düşer ve hasara uğrar (Ceyhun ve Turan, 2003). Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Kompozit yapının üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında darbeden kaynaklanan hasarlar ortaya çıkabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak, uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların sebep olduğu darbe verilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasarlar kimi zaman gözle görülebilir. Bazı durumlarda ise düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmamasına rağmen kompozitin iç yapısında matris çatlağı, matris kırılması, fiber-matris arayüzey hasarı, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu hasarlar, mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur (Ceyhun ve Turan, 2003). Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı bu çalışmada, cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenerek tabaka kalınlığının ve oryantasyon açılarının cam elyaf/epoksi kompozitlerin darbe davranışına etkileri araştırılmıştır.

Çalışmanın bilimsel yazın taraması bölümünde tabakalı malzemelerin düşük hızda darbe davranışı ile ilgili çalışmalara, materyal yöntem kısmında numune üretimi ve darbe test cihazı hakkında bilgilere yer verilmiştir. Araştırma bulguları kısmında numunelerin darbe davranışlarını gözlemlemek için darbe enerjisi-maksimum kuvvet grafiği, darbe enerjisi-maksimum çökme grafiği, kuvvet-çökme eğrileri, absorbe edilen enerji-zaman eğrileri, kuvvet-zaman eğrileri, çökme-zaman eğrileri ve hız - zaman eğrileri oluşturulmuştur. Sonuç ve tartışma kısmında ise çalışma kısaca özetlenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışları üzerine deneysel çalışmalar yapılmış ve analitik yöntemler geliştirilmiştir: Kompozit malzemelerin dinamik yükleme altındaki davranışı üzerine ilk çalışmalar 1970'lerin başında yapılmıştır (Sierakowski vd., 1971). Bu alandaki ilerlemeler darbe modelleri ve muayene yöntemleri geliştirilerek devam etmiştir (Sierakowski ve Chaturvedi, 1997; Abrate, 1998). Tabakalı kompozit malzemelerin farklı oryantasyon açılarında dizilimlerinin belirlenmesi, farklı tabaka kalınlıklarında darbeye maruz bırakılması ve uygulanan darbe enerji değerlerinin değiştirilmesinin darbe davranışları üzerine etkileri ile ilgili araştırmalar yapılmıştır (Kessler ve Bledzki, 1999; Datta vd., 2004; Caprino vd., 2004; Hosur vd., 2005).

Tabakalı kompozit numunelerin düşük hızlı darbe yükü altındaki davranışları, vurucu hızlarının ve tabaka dizilimlerinin, kompozit levhanın darbe davranışına etkileri, farklı vurucu ağırlığına göre numunelerin darbe davranışları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca farklı çarpışma hızlarında yapılan testlerde kuvvet-yer değiştirme grafikleri yardımıyla malzemenin enerji absorbsiyon yeteneği de araştırılmıştır (Mili ve Necib, 2001; Naik vd., 2002; Belingardi ve Vadori, 2003). Önceki çalışmaların ışığında E-camı/epoksi tabakalı kompozitler üzerine düşük hızlı darbenin düzlem boyuttaki etkileri ve plaka boyutlarının malzemede oluşan hasara etkileri araştırılmıştır (Aslan vd., 2003; Uyaner vd., 2007). Düşük hızlı darbeye maruz E-camı/epoksi kompozit yapılardaki hasar ilerlemeleri, farklı darbe enerjilerindeki hasar modları, darbe hasarının neden olduğu hasarlar ve kritik burkulma yüklerinin darbe davranışına etkilerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Baucom ve Zikry, 2005; Aktaş vd., 2009; Kıratlı, 2012). Başka bir çalışmada, S2 cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozit plakların iki farklı enerji seviyesindeki (20J ve 30J) darbe davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir (Berk vd., 2016).

Bu çalışmada, farklı oryantasyon açısına sahip cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin artan darbe enerji değerlerindeki darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Düşük hızlı darbe deneyleri için 8 ve 12 tabakalı farklı kalınlıkta cam elyaf/epoksi kompozit numuneler kullanılmıştır. Bu kompozitlerin fiber takviye açılarının ve tabaka kalınlıklarının darbe davranışı üzerine etkileri incelenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

Deneysel çalışmada kullanılan 8 ve 12 tabakalı 50cm x 50cm boyutlarında cam elyaf / epoksi kompozit plakalar Fibermak Mühendislik firması tarafından imal edilmiştir. Kompozitin üretiminde **f**iber malzeme olarak 300 gr/m^2 yoğunluğa sahip tek yönlü cam fiber kumaş kullanılmıştır. Reçine malzemesi olarak da F-21P epoksi ve F-22P sertleştirici kullanılmıştır. 100 gr epoksiye 21 gr sertleştirici karıştırılarak reçine sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra el yatırma yöntemi ile üzerlerine epoksi-sertleştirici karışımından oluşan reçine sistemi sürülen prepregler bir gün boyunca bekletilmiştir. Reçine jelleştikten sonra sıcak pres yöntemi ile kompozit malzeme imalatı gerçekleştirilmiştir. 120 °C'de 8-10 bar basınç altında 1 saat boyunca kürleme işlemi uygulanmıştır. Şekil 1'de kompozit plakaların üretimi ile ilgili bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 1. Kompozit plakaların üretimi

Üretimi yapılan kompozit malzemeler 4 ayrı gruba ayrılmıştır. 3 grup 8 tabakalı, 1 grup da 12 tabakalı olarak tasarlanan kompozit numunelerin tabaka dizilim açıları ve ortalama tabaka kalınlıkları Tablo 1'de verilmiştir. Tabaka kalınlığını karşılaştırabilmek için G_1^8 ve G_1^{12} grupları aynı dizilimde seçilmiştir.

Tablo 1. Kompozit plakaların gruplandırılması

Adlandırma	Tabaka Dizilim Açıları	Ortalama Kalınlığı (mm)
G_1^8	$[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	2
G_2^8	$[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$	2
G_3^8	$[0^\circ/30^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$	2
G_1^{12}	$[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	2.8

G_x^y: x grup numarasını, y: tabaka sayısını gösterir.

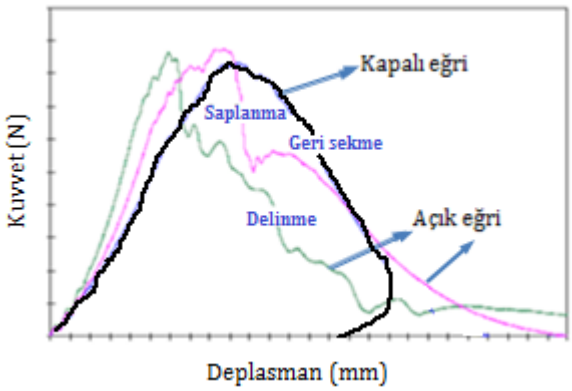
Üretimi yapılan plakaların kesimleri ve darbe testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır. Darbe testi için kompozit plakalar Rubi Diamant DS-300-1500 profesyonel kesme makinesi (sulu kesim) yardımıyla 150 mm x 100 mm ebatlarında kesilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri oda sıcaklığında Fractovis Plus ağırlık düşürme test cihazında yapılmıştır (Şekil 2). Test cihazında bulunan ucu yarım küre şekline sahip olan vurucu 12.7 mm çapa sahiptir. Testler sırasında kullanılan vurucu kütlesi 4.926 kilogramdır.



Şekil 2. Fractovis Plus darbe test cihazı

Cihaz içerisindeki pnömatik bir düzenek yardımıyla numunelerin ankastre sınır şartlarında darbe deneylerinin yapılması sağlanmıştır. Numuneler 10J, 20J ve 30J'lük üç farklı enerji seviyesinde darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Visual Impact adlı bir yazılımla donatılan cihaz, zamana bağlı olarak vurucu ile numune arasında meydana gelen temas kuvvetini, vurucunun hızını ve numunenin çökme miktarlarını vermektedir. Darbe enerjilerine göre vurucunun numunelere ilk çarpma hızları 10J, 20J ve 30J için sırasıyla 2.02 m/s, 2. 85 m/s ve 3.49 m/s'dir.

Darbe testlerinde genellikle geri sekme, nüfuziyet ve delinme olmak üzere üç hasar modu oluşur (Şekil 3). Şekil 3'ten görüldüğü üzere, düşük enerjili darbelerde (örneğin geri sekme eğrisi gibi), eğri parabolik bir eğridir ve dağa benzeyen bir şekle sahiptir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmakta, saplanma ve delinme eğrilerinde de görüldüğü üzere maksimum kuvvet değeri de hemen hemen sabit bir değer olmaktadır. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması gerekir fakat vurucu ve numune arasındaki sürtünme nedeniyle eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel şekilde ilerler.



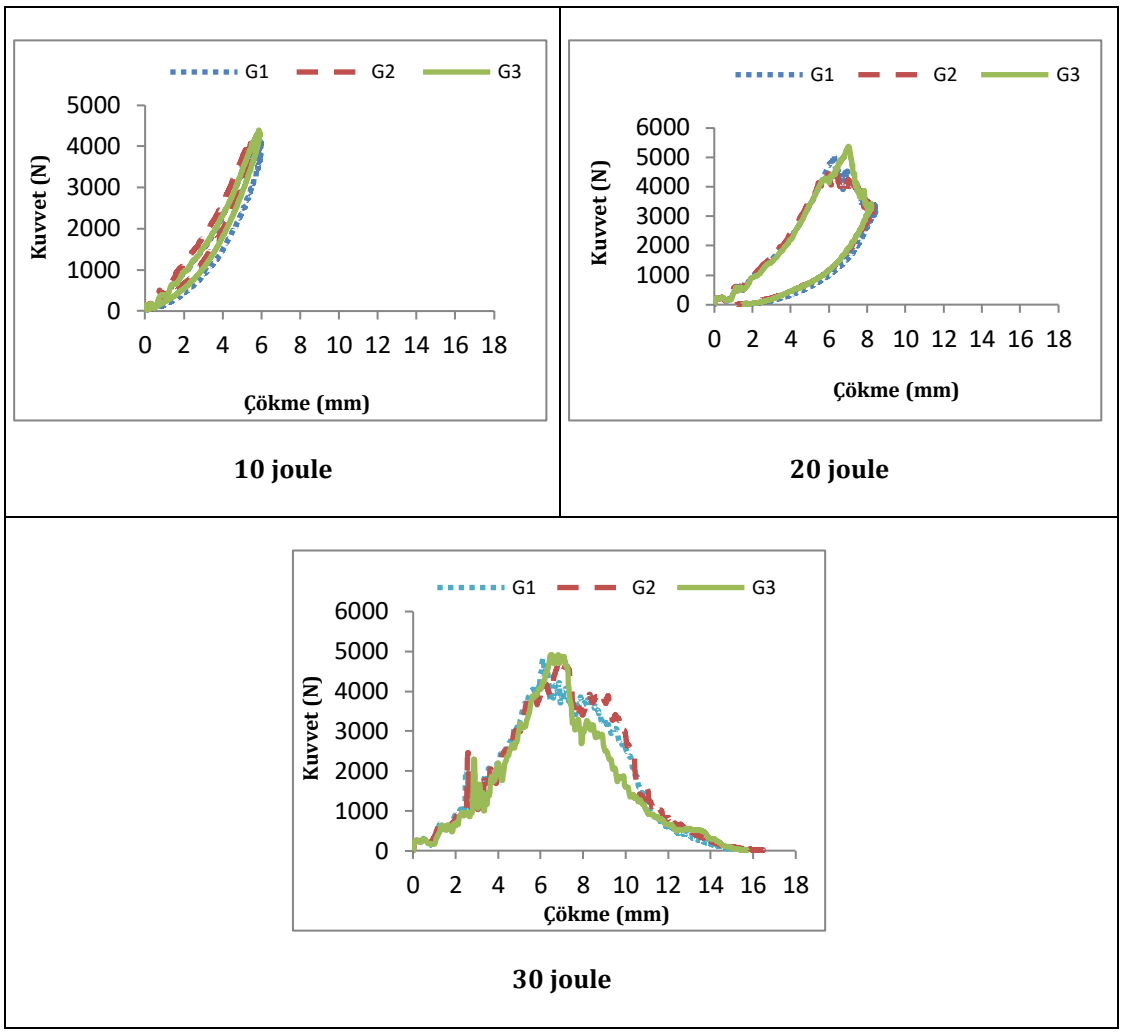
Şekil 3. Kuvvet – yer değiştirme eğrileri

Artan darbe enerjisi altında oluşan eğriler kapalı tip ve açık tip eğri olmak üzere iki kısma ayrılır. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından absorbe edilmiş, absorbe edilmeyen enerji de vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır (Şekil 3). Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökme de artar. Eğer bir eğri açık tip ise vurucu numuneye ya saplanmıştır ya da numune delinmiştir. Buna göre numuneye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Darbe enerjisi daha da arttırıldığında vurucu numuneye saplanır (penetration), numune kalınlığı boyunca hareket eder ve sonunda da numuneyi delerek alt yüzeyden çıkar yani delinme (perforation) olayı gerçekleşmiş olur. Eğrilerin uç kısımlarına bakılacak olursa, yatay eksenin sonuna doğru kapanan bu kısım numune ve vurucu arasında oluşan sürtünme kısmını ifade etmektedir. Dolayısıyla ulaşılan darbe enerjisi değeri ne kadar arttırılırsa arttırılsın kompozitin daha fazla darbe enerjisini absorbe edemeyeceği anlaşılmaktadır (Sayer, 2009; Yıldızhan, 2013).

4. Araştırma Bulguları

4.1. Deneysel Sonuçlar

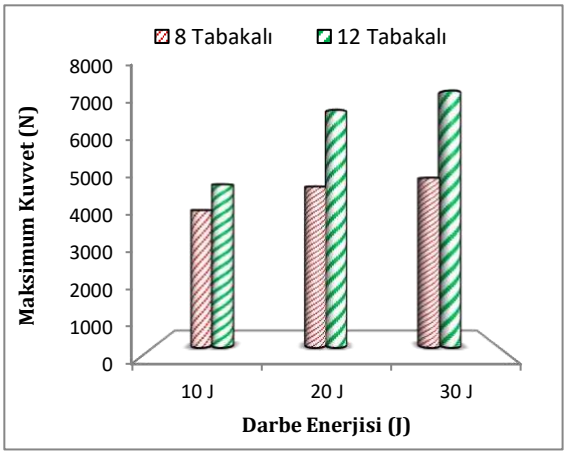
Üç farklı tabaka dizilimine sahip 8 tabakalı kompozit numuneler için 10j, 20J ve 30J enerji değerlerinde darbe deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 gruplarına ait kuvvet -çökme eğrileri çizilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Farklı tabaka dizilimine sahip 8 tabakalı kompozit numunelerinin kuvvet - çökme eğrileri

Şekil 4'te verilen kuvvet–çökme eğrileri incelendiğinde, her üç joule darbe enerji değeri için de G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 numunelerinin benzer darbe davranışı gösterdikleri görülmektedir. Her üç grup için de 10J ve 20J darbe enerji değerlerinde kapalı eğri oluşurken, 30J darbe enerji değerinde ise açık eğri oluşmuştur. Kapalı eğri görülen numunelerde geri sekme meydana gelirken, açık eğri görülen numunelerde delinme meydana gelmiştir. Tüm darbe enerji değerleri için de $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip G_3^8 grubu numunelerinin diğer gruplara nazaran daha fazla maksimum kuvvet taşıdığı görülmektedir.

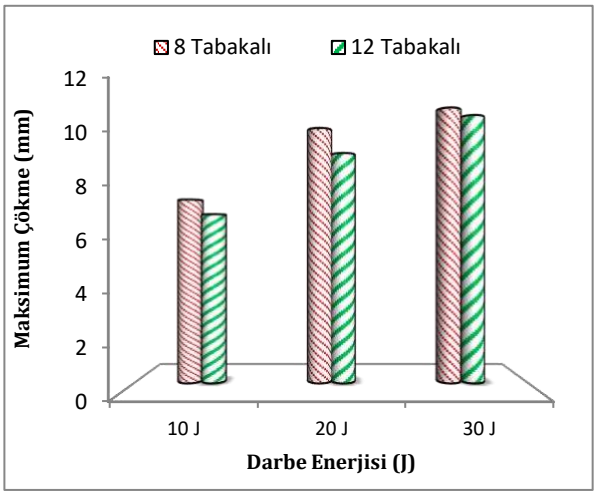
Tabaka kalınlıklarının darbe davranışı üzerine etkisini araştırmak amacıyla Şekil 5'te 8 tabakalı G_1^8 ve 12 tabakalı G_1^{12} numuneleri için maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği çizilmiştir. Şekilden darbe enerji değerlerinin artışı ile maksimum kuvvet değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca 12 tabakalı numunelerin 8 tabakalı numunelere göre maksimum kuvvet değerlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. 12 tabakalı numunelerin 8 tabakalı numunelere göre maksimum kuvvet değerlerindeki artış; 10J darbe enerjisi için %18.77 iken, 30J darbe enerjisi için %51,36'dır. Buradan hareketle 12 tabakalı numunelerin 8 tabakalı numunelere göre yük taşıma kapasitelerinin daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Elde edilen bu sonuç literatür ile uyum içindedir. Morais ve arkadaşları da, kompozit tabaka kalınlığının artmasıyla darbe direncinin arttığını belirtmişlerdir (Morais vd., 2005).



Şekil 5. 8 ve 12 tabakalı numuneler için maksimum kuvvet-darbe enerjisi grafiği

Şekil 6'da 8 tabakalı G_1^8 ve 12 tabakalı G_1^{12} konfigürasyonlarına ait kompozit numuneler için

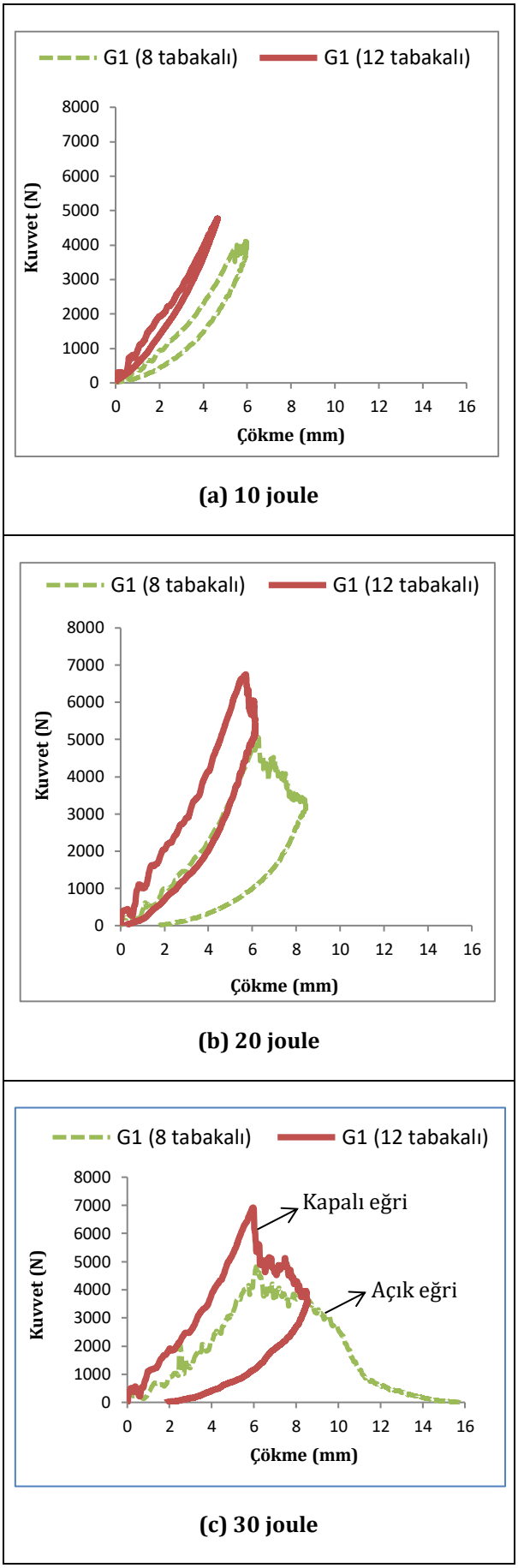
maksimum çökme-darbe enerjisi grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 8 ve 12 tabakalı numuneler için maksimum çökme-darbe enerjisi grafiği

Şekil 6'dan, darbe enerjisinin artmasıyla çökme değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca üç joule enerji değeri için de 2mm kalınlığa sahip 8 tabakalı numunelerin çökme değerlerinin, 2.8 mm kalınlığa sahip 12 tabakalı numunelerin çökme değerlerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan hareketle plaka kalınlığı arttıkça çökmelerin azaldığı dolayısıyla darbe dayanımının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç literatür ile de örtüşmektedir. Naik ve arkadaşları tarafından kompozitlerin darbe davranışı üzerine yapılan çalışmada da, plaka kalınlığı arttıkça çökmelerin azaldığı ve numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin (yük taşıma kapasitelerinin) arttığı rapor edilmiştir (Naik vd., 2000).

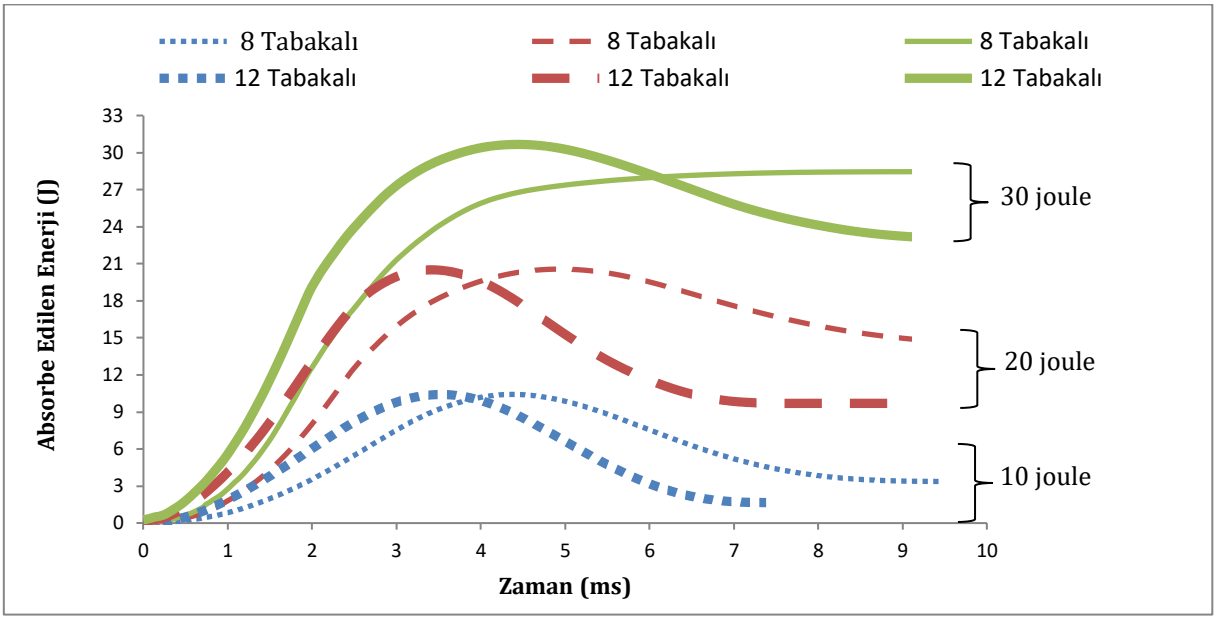
Şekil 7'de artan darbe enerjisine maruz G_1^8 ve G_1^{12} numunelerinin kuvvet-çökme eğrileri verilmiştir. Bu şekilden 8 tabakalı G_1^8 numunelerinde 10J ve 20J için kapalı eğri görülürken, 30J değerinde açık eğri meydana geldiği görülmektedir. Dolayısıyla G_1^8 numunelerinde 10J ve 20J enerji değerleri için geri sekme davranışı, 30J enerji değerinde ise delinme meydana gelmiştir. 12 tabakalı G_1^{12} numuneleri için ise her üç joule (10J, 20J ve 30J) darbe enerji değeri için de kapalı eğri oluştuğu görülmektedir. Kapalı eğri vurucunun kompozit numune yüzeyinden geri sekme yaptığının ve numunenin daha az hasara uğradığının göstergesidir. Dolayısıyla 12 tabakalı numunelerde bütün joule değerleri için kapalı eğri oluştuğundan geri sekme davranışı meydana gelmiştir. Bunun yanısıra eğrilerden 12 tabakalı numunelerin 8 tabakalı numunelere nazaran daha fazla kuvvet taşıdığı, çökme değerlerinin de 8 tabakalı numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla aynı joule değerleri için 12 tabakalı numuneler 8 tabakalı numunelere nazaran daha az hasara uğrarlar.



Şekil 7. 8 ve 12 tabakalı 1. grup numuneleri için kuvvet-çökme eğrileri

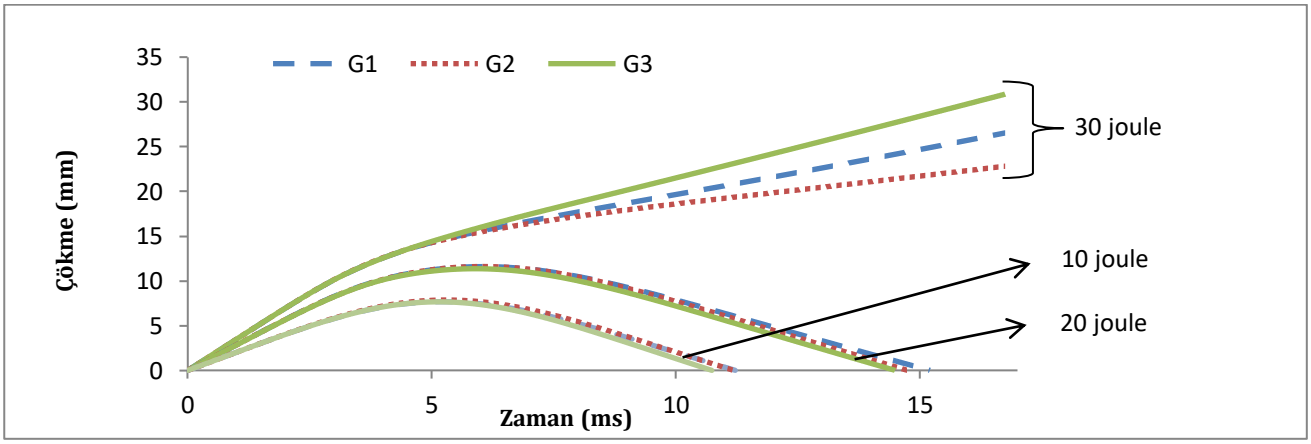
Absorbe edilen enerji - zaman eğrilerinde vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin tamamı numune tarafından absorbe edilemez. Bu durumda absorbe edilemeyen darbe enerjisi vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin tamamı numune tarafından absorbe edilir. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise vurucu ile numune arasındaki sürtünme eğrisinin altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğri yukarı doğru yönlenir (Sayer, 2009).

Şekil 8'de 8 tabakalı G_1^8 ve 12 tabakalı G_1^{12} konfigürasyonlarına ait numunelerinin artan darbe enerjisi altındaki absorbe edilen enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Bu şekilden, 8 tabakalı G_1^8 numunesi için 30J darbe enerji değerinde eğrinin yukarı doğru yönlendiği dolayısıyla delinme meydana geldiği görülmektedir. Bu numune haricindeki diğer 8 ve 12 tabakalı kompozit numuneler için ise tüm darbe enerji seviyelerinde geri sekme meydana geldiği görülmektedir. Dolayısıyla diğer numunelerin hepsi için vurucunun sahip olduğu enerjinin tamamı absorbe edilememiş ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi, vurucunun deney numunelerinden geri sekmesi için harcanmıştır.

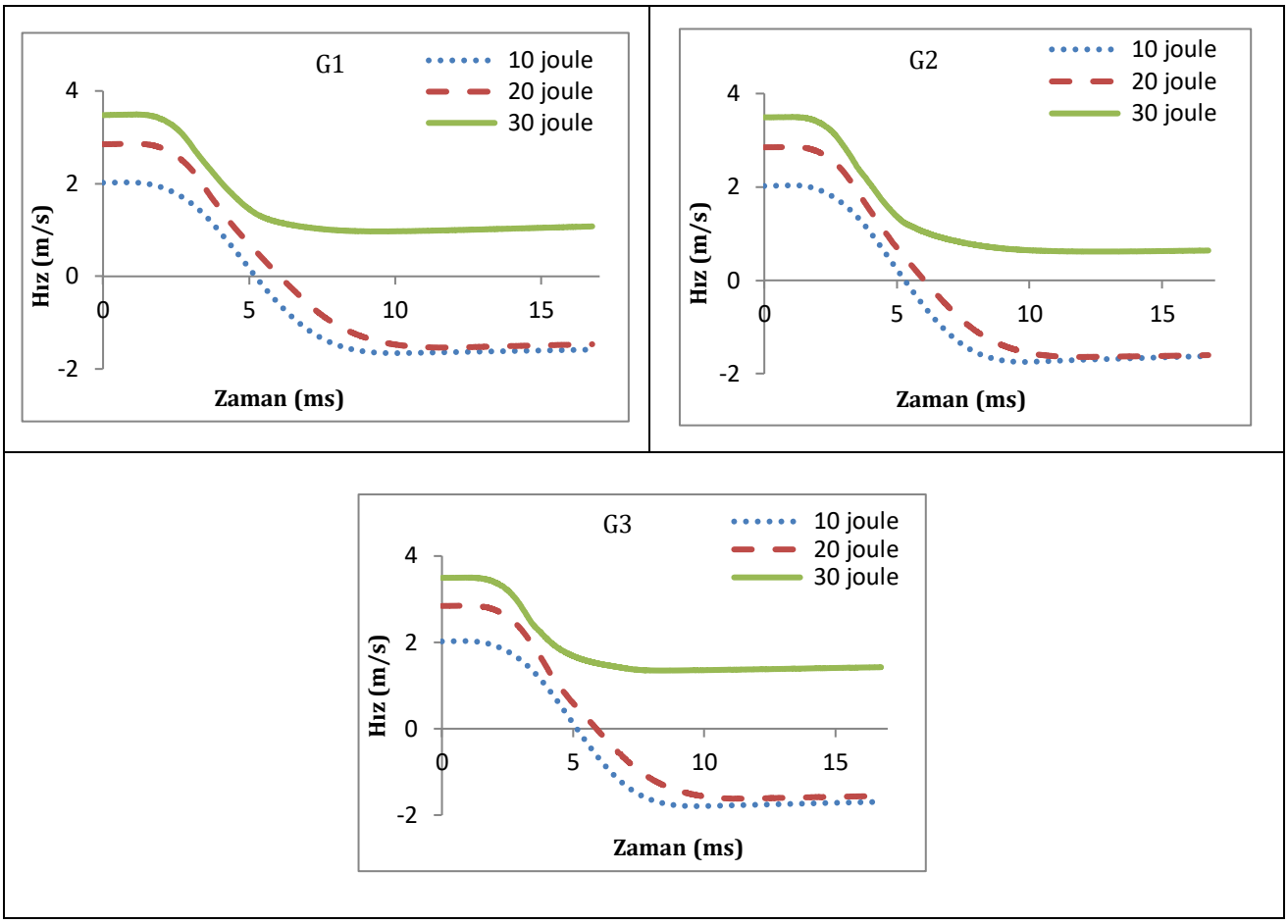


Şekil 8. 8 ve 12 tabakalı 1. grup numunelerin absorbe edilen enerji-zaman eğrileri

Şekil 9'da farklı oryantasyon açılarına sahip G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 konfigürasyonlarına ait numunelerin çökme-zaman eğrileri verilmiştir (Karacan, 2018). Şekilden görüleceği üzere G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 numunelerinde 30J darbe enerjisi altında delinme meydana gelirken, 10J ve 20J darbe enerjileri altında geri sekme meydana gelmiştir. Ayrıca 30J darbe enerji seviyesinde $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ dizilimine sahip G_1^8 numunesinde meydana gelen çökmenin, $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$ dizilimine sahip G_3^8 numunesinden az, $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ dizilimine sahip G_2^8 numunesinden ise fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda en büyük çökme miktarı G_3^8 numunesinde meydana gelmiştir.



Şekil 9. Farklı oryantasyon açılarına sahip 8 tabakalı numunelerin çökme-zaman eğrileri



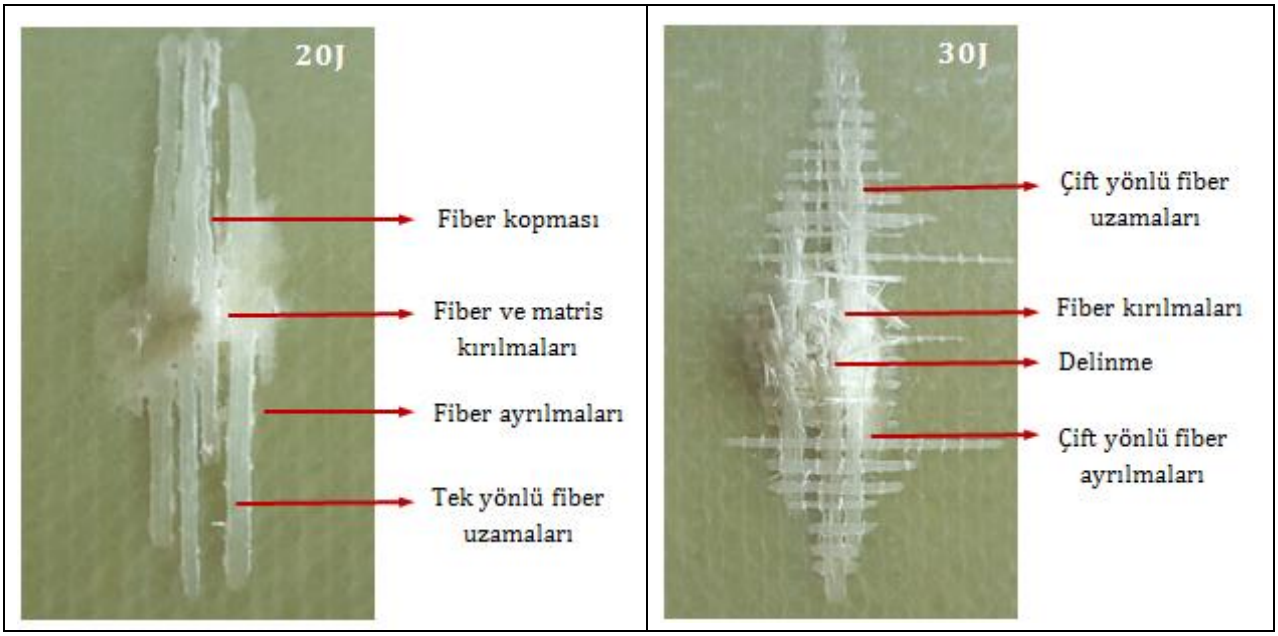
Şekil 10. Farklı oryantasyon sahip 8 tabakalı numunelerin hız – zaman eğrileri

Şekil 10'da G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 numuneleri için 30J darbe enerji değerinde belli bir hız ile numuneye saplanıp kalınlık boyunca ilerleyen vurucunun hızı sürtünmeden dolayı yavaşlamıştır. Bu yavaşlamadan dolayı geri sekme meydana gelmemiş, numune delinme davranışı göstermiştir. 10J ve 20J darbe enerji değerlerinde ise ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalmıştır ve yukarı doğru hareket eden vurucunun negatif bir hız değeri alması ile geri sekme meydana gelmiştir.

Tabakalı kompozit malzemelerde üst yüzeye darbe uygulanması sonucu öncelikle matriste hasar oluşur. Matristeki hasar çatlak oluşumu ile başlar ve bu çatlak ilerleyerek matris kırılmalarına neden olur. Matrisin aşırı zorlanması sonucu gerilmeler liflere aktarılır ve lifler zorlanmaya başlar. Ayrıca matris kırılmaları delaminasyonun (tabakalar arası ayrılmaların) başlamasında da etken rol oynar. Üst katmanlardaki çatlak ve kırıklar arayüzeye ulaştığında diğer katman tarafından durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerlemeye başlar. Delaminasyon aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında meydana gelen bir hasardır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı fiber yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri de farklılıklar gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi tabaka arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyuşmazlık ne kadar büyük olursa delaminasyon alanı o kadar büyük olur (Ceyhun ve Turan, 2003). Üst yüzeydeki katmanlarda darbe sonucu meydana gelen bası ve kesme gerilmeleri sonucu matriste oluşan kırılmalar kompozitin iç bölgesinde delaminasyonlara sebebiyet verir. Kompozitin iç bölgelerinde oluşan düşey eğilme kırıklarının büyümesi sonucu zorlanmayan en alt ara yüzeyde de delaminasyon başlar. Alt yüzeydeki katmanlarda meydana gelen eğilme gerilmeleri sonucu ise, eğilmeye bağlı olarak fiber-matris arayüzey bağı kopar, matriste ve fiberde kırılmalar oluşur. En alt yüzeyde, eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmelerinin en fazla olması ve bu yüzeydeki liflerin en fazla çekme uzamasına maruz kalmasından dolayı fiber ve matris malzemesinde kırılmalar artar ve delinme hasarı meydana gelir.

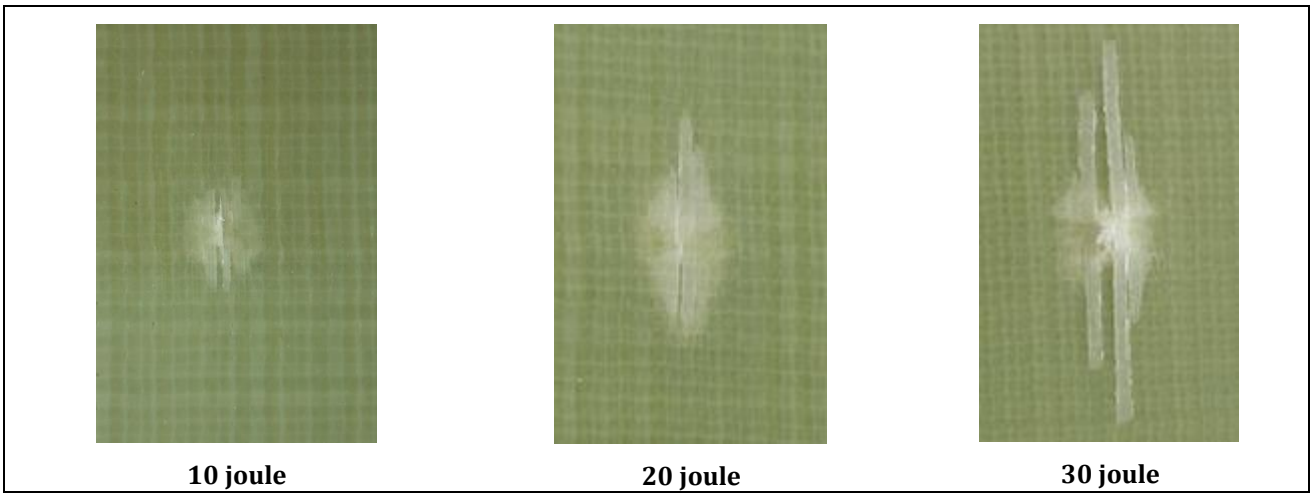
Şekil 11'de 20J ve 30J darbe enerjisi uygulanan G_3^8 numunelerinin darbe sonrası alt yüzey hasar bölgelerinin fotoğrafları örnek olarak verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, 20J uygulanan G_3^8 numunesinin en alt katmanında eğilmeden kaynaklı

çekme gerilmelerinin fazla olması nedeniyle dış yüzeyde tek yönlü fiber uzamaları ve fiberin matris malzemeden ayrılması durumu sözkonusudur. 20J darbe enerjisinde fiber uzamalarının en alt tabakadaki fiberlere paralel doğrultuda oluştuğu görülmektedir. 30J darbe enerji seviyesinde numunenin alt yüzeyinde oluşan hasar bölgesinin daha da genişlediği görülmektedir. Numuneye daha büyük darbe enerjisi uygulandığından alt yüzeydeki tabakalarda eğilme gerilmelerinin etkisi daha büyük olacaktır. Bunun sonucu olarak da numunenin alt yüzeyinin en dış tabakasındaki fiberlerde çift yönlü uzamaların yanısıra çift yönlü kalıcı fiber ayrılmalarının oluştuğu görülmektedir. Alt yüzeyde eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmeleri en fazla olacağından hasar bölgesinin orta kısmında fiber ve matris malzeme eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmelerini daha fazla taşıyamadığından numunede delinme meydana gelmiştir.

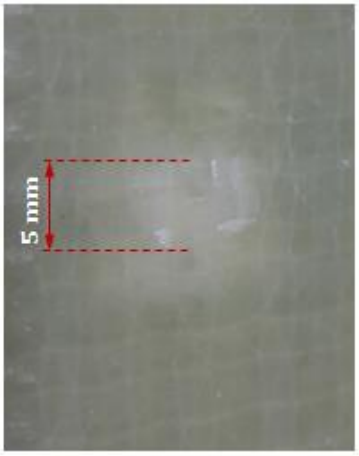
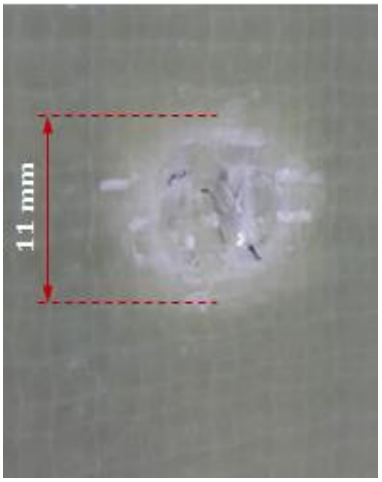
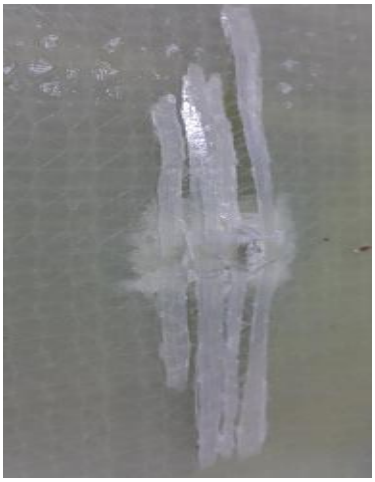
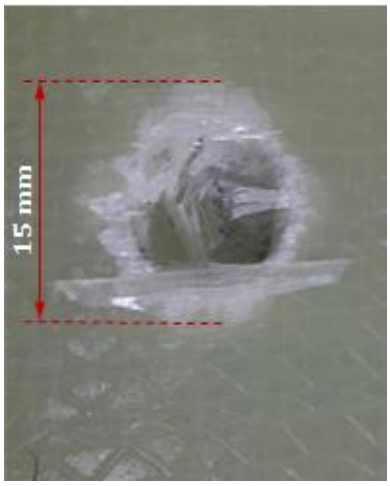


Şekil 11. 20j ve 30 joule darbe enerjisi uygulanan G_3^8 numunelerinin darbe sonrası alt yüzey hasar fotoğrafları

Şekil 12'de 8 tabakalı 2. grup G_2^8 numunelerinin darbe sonrası alt yüzeylerinde oluşan hasar görüntüleri verilmiştir. Şekilden artan darbe enerjilerinde hasar bölgesinin genişlediği bariz bir şekilde görülmektedir. G_2^8 numunelerinde 20J ve 30J için oluşan hasarlar Şekil 11'de verilen G_3^8 numunelerinin darbe sonrası hasar bölgeleri ile karşılaştırıldığında, G_2^8 numunelerinin darbe sonrası alt yüzey hasar bölgelerinin G_3^8 numunelerinin alt yüzey hasar bölgelerine nazaran küçük olduğu görülmektedir. G_2^8 numuneleri $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ dizilimine sahip olduğundan kompozitin ara bölgesi aynı yönlü fiberlere sahip iki katmandan oluşmakta ve bunun sonucu olarak ta darbe sonucu oluşan eğilmeye karşı kompozitin direnci daha fazla olmaktadır. $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$ dizilimine sahip G_3^8 numunelerinde ise katmanlar farklı yönlü fiberlerden oluştuğundan G_3^8 numunelerinin darbeye karşı cevabı, G_2^8 numunelerine nazaran daha düşük olmaktadır.



Şekil 12. 8 tabakalı 2. grup G_2^8 numunelerin darbe sonrası alt yüzeylerinde oluşan hasar görüntüleri

 **Darbe uygulanan üst yüzey (10J)**	 **Alt yüzey (10J)**
 **Darbe uygulanan üst yüzey (20J)**	 **Alt yüzey (20J)**
 **Darbe uygulanan üst yüzey (30J)**	 **Alt yüzey (30J)**

Şekil 13. Farklı joule değerleri için G_1^8 numunelerinin darbe sonrası üst ve alt yüzey hasar bölgesi fotoğrafları

Şekil 13'de üç farklı darbe enerjisi için 8 tabakalı 1. grup G_1^8 numunelerinin üst ve alt yüzeylerinin hasar bölgesi fotoğrafları verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere 10J enerji seviyesi için darbe uygulanan üst yüzeyde matris malzemesinde ezilme izi görülürken, 20J darbe değerinde ezilme alanının genişlediği, matris çatlaklarının oluştuğu ve çökmenin başladığı görülmektedir. 30J'lük darbe değerinde fiberlerin konkav şekil almaya zorlanması ile fiber boyları uzamaya çalışır. Buna bağlı olarak fiber kırılmaları ve delinme meydana gelmiştir. Bunun yanısıra darbe enerjisinin artmasıyla hasar bölgesinin matris malzemeyle birlikte fiberleri de içerecek şekilde daha da genişlediği gözlenmektedir. 10J enerji seviyesi için üst yüzeydeki hasar bölgesinin genişliği 5mm iken, 20J seviyesinde 11mm olarak ölçülmüştür. 30J seviyesinde bu genişliğin 15mm'ye çıktığı, çukurlaşmanın arttığı, çukurlaşmanın olduğu bölgedeki fiberlerde kopmaların meydana geldiği görülmektedir. G_1^8 numunelerinin darbe uygulanmayan alt yüzeyinde ise 10J darbe değeri için fiberlerin tek yönlü olarak uzadıkları ve matris malzemeden ayrılmaya başladıkları görülürken, 20J darbe değerinde fiberlerin daha fazla uzadığı ve kalıcı fiber ayrılmalarının meydana geldiği görülmektedir. 30J'lük darbe değerinde ise eğilme gerilmelerinden dolayı hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik yönde çift yönlü fiber uzamalarının oluştuğu görülmektedir. Ayrıca çoklu fiber ayrılmaları meydana gelmiştir. Eğilmede en fazla çekme gerilmelerinin ve fiberlerin çekme uzama değerlerinin numunenin bu kısmında oluşmasının sonucu olarak da numunede fiber ve matris kırılmaları ile delinme hasarı oluşmuştur. 10J ve 20J darbe değerlerinde alt yüzeyde oluşan fiber uzamaları tek yönlü (en dış tabakadaki fiber doğrultusunda) iken, 30J darbe değerinde bu yüzeyde çift yönlü fiber uzamalarının oluştuğu görülmektedir. Sonuç olarak, her iki yüzeyde de darbe enerji değeri arttıkça hasar bölgesinin genişlediği görülmektedir. Tüm darbe enerji değerleri için darbe uygulanmayan alt yüzeydeki deformasyon alanının, darbe uygulanan üst yüzeydeki deformasyon alanına göre daha büyük olduğu görülmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma

Yapılan deneysel çalışma sonucunda, artan darbe enerjisi altındaki cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerinin darbe davranışı üzerine fiber takviye açılarının ve tabaka kalınlıklarının etkileri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Artan darbe enerjisi değerlerinde maksimum kuvvet ve çökme miktarı değerleri de artmaktadır.
- Darbe uygulanmayan alt yüzeydeki deformasyon alanının darbe uygulanan üst yüzeydeki deformasyon alanına göre daha büyük olduğu görülmüştür.
- 8 tabakalı G_1^8, G_2^8 ve G_3^8 numuneleri için 10J ve 20J enerji değerlerinde kapalı eğri oluşurken, 30J enerji değerinde açık eğri oluşmuştur. 12 tabakalı G_1^{12}numunelerinde ise tüm joule değerleri için kapalı eğri oluşmuştur.
- Artan darbe enerji değerlerinde, tabaka sayısının azalması durumunda kuvvet-çökme eğrileri kapalı eğriden açık eğriye geçme eğilimi göstermiştir.
- 8 tabakalı G_1^8 numunelerinin yük taşıma kapasiteleri ve darbe dayanımları 12 tabakalı G_1^{12} numunelerine göre daha düşüktür.
- Farklı oryantasyon açılarına sahip olan 8 tabakalı (G_1^8, G_2^8 ve G_3^8) numuneler artan darbe enerjisi altında benzer darbe davranışları göstermişlerdir. 8 tabakalı üç grupta oluşan çökme miktarları ve maksimum kuvvetler açısından sıralamanın $G_2^8 < G_1^8 < G_3^8$ şeklinde olduğu görülmüştür.
- 30J darbe enerjisi için en fazla çökmenin $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/0^\circ]_s$ dizilimine sahip G_3^8 numunelerinde, en az çökmenin ise $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ dizilimine sahip G_2^8 numunelerinde oluştuğu görülmüştür.
- Cam elyaf/epoksi kompozit numunelerde düşük darbe enerjisinde, darbe uygulanan üst yüzeyde ezilme izi ve matris çatlakları gözlemlenmiştir. Darbe enerjisinin arttırılmasıyla matris çatlaklarının ilerleyerek kırılmalara dönüştüğü ve hasar bölgesinin genişlediği görülmüştür. Darbe uygulanmamış olan alt yüzeyde düşük darbe enerjisinde fiber uzamaları ve fiber ayrılmaları gözlenmiştir. Darbe enerjisinin arttırılmasıyla bu yüzeyde oluşan fiber uzamalarının ve hasar bölgesinin daha da genişlediği, dış katmanlardaki matris ve fiberlerin birlikte kırılması sonucu delinme hasarının gerçekleştiği görülmüştür.
- Kompozitin darbe uygulanmayan yüzeyinde eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmelerinin en fazla olması ve bu yüzeydeki liflerin en fazla çekme uzamasına maruz kalmasından dolayı fiber ve matris malzemesinde kırılmalar artarak delinme hasar modu oluşmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 4941-YL1-17 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. SDÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Başkanlığı'na katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştiren Fibermak Kompozit Firmasına ve

deneyleri gerçekleştirdiğimiz Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne de teşekkürlerimizi sunarız.

Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar

Abrate, S., 1998. Impact on Composite Structures. Cambridge University Press, 289s, United Kingdom.

Aktaş, M., Ataş, C., İçten, B.M. Karakuzu, R., 2009. An Experimental Investigation of the Impact Response of Composite Laminates. Composite Structures. 87, 307-313.

Aslan, Z., Karakuzu, R., Okutan, B., 2003. The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading. Composite Structures. 59, 119-127.

Baucom, J.N., Zikry, M.A., 2005. Low Velocity Impact Damage Progression in Woven E-Glass Composite Systems. Composites, 36, 658-664.

Belingardi, G., Vadori, R., 2003. Influence of the Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate. Composite Structures, 61, 27-38.

Bulut, B., Karakuzu, R., İçten B. M., Arıkan, V., Arman, Y., Ataş, C., Gören, A., 2016. An Experimental and Numerical Investigation on Low Velocity Impact Behavior of Composite Plates. Journal of Composite Materials, 50 (25), 3551-3559.

Caprino, G., Spataro, G., Luongo, S.D., 2004. Low-Velocity Impact Behaviour of Fiber Glass–Aluminium Laminates. Composites: Part A, 35, 605-616.

Ceyhun, V., Turan, M., 2003. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. Mühendis ve Makine, 44 (516), 35-41.

Datta S., Krishna, A. V., Rao, R. M. V. G. K., 2004. Low Velocity Impact Damage Tolerance Studies on Glass-Epoxy Laminates-Effects of Material, Process and Test Parameters. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23 (3), 327-345.

Hosur, M.V., Adbullah, M., Jeelani, S., 2005. Studies on the Low-Velocity Impact Response of Woven Hybrid Composites. Composite Structures, 67, 253-262.

Kara, M., 2012. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 126s, Konya.

Karacan, A., 2018. Darbe Sonrası Farklı Ortam Koşullarına Maruz Bırakılan Kompozit Plakaların Basma Mukavemetlerinin Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Isparta.

Kessler, A., Bledzki, A.K., 1999. Low Velocity Impact Behavior of Glass/Epoxy Cross-Ply Laminates with Different Fiber Treatments. Polymer Composites, 20 (2), 269-278.

Kıratlı, S., 2012. Darbe Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Burkulma ve Esneklik Davranışı. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Sivas.

Mili, F., Necib, B., 2001. Impact Behaviour of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities. Composite Structures, 51, 273-244.

Morais, de W. A., Monteiro, S.N., d'Almeida J. R. M., 2005. Effect of the Laminate Thickness on the Composite Strength to Repeated Low Energy Impacts. Composite Structures, 70, 223–228.

Naik, N. K., Borade, S. V., Arya, H., Sailendram, M., Prabhu, S. V., 2002. Experimental Studies on Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Effect of Impact Parameters. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 21 (15), 1347-1362.

Naik, N. K., Meduri, S., Sekher, Y. C., 2000. Polymer Matrix Woven Fabric Composites Subjected to Low Velocity Impact: Part II-Effect of Plate Thickness. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 19 (13), 1031-1055.

Sayer, M., 2009. Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 134s, Denizli.

Sierakowski, R.L., Nevil, G.E., Ross, A. Jones, E.R., 1971. Dynamic Compressive Strength and Failure of Steel Reinforced Epoxy Composites. Journal of Composite Materials, 5, 362-377.

Sierakowski, R.L. and Chaturvedi, S.K., 1997. Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites. New York, Wiley.

Uyaner, M., Kara, M., Ataberk, N., 2007. E Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışına Numune Boyutlarının Etkisi. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı. 7-9 Kasım, İstanbul, 361-368.

Yıldızhan, İ., 2013. Hibrit Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Isparta.