

## TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI

Vural CEYHUN, Mesut TURAN\*

*En geniş anlamda, bir kompozit malzeme iki veya daha fazla bileşenden meydana gelen malzemedir. Bu bileşenler makroskobik seviyede bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Takviye elemanı olarak adlandırılan bileşen; fiber, partikül veya ince levha şeklinde olabilir. Diğer bileşen ise matris fazıdır. Bu malzemelerin bir araya getirilmesi, bir takım çalışma karakteristiklerinin bu bileşenler tek olarak değerlendirildiği durumdakinden daha iyi olmasına müsaade eder. Buna karşılık bu malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede bazı güçlükler mevcuttur. Bu durum kompozit malzemelerin metalik malzemelere nazaran daha kompleks bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yazıda tabakalı kompozit malzemelerin düşük ve yüksek hızlı darbelere karşı göstermiş olduğu davranış tartışılacaktır. Darbe türünün belirlenmesinde hasar türü ve darbe enerjisinin önemi açıklanacaktır.*

**Anahtar sözcükler :** Tabakalı kompozit malzeme, darbe hasarı, delaminasyon, kırılma.

*In a broad sense, a composite is a material that consists of two or more constituent. These are combined at a macroscopic level and are not soluble in each other. One constituent, called the reinforcing phase, may be in the form of fibre, particle, or flake. The other form is the matrix phase. Combining of these materials allows us to obtain a material of which the sets of performance characteristics are greater than that of the components taken separately. However, there are some difficulties in determining the mechanical properties of these materials. This is due to the complex nature of composite materials in comparison with metallic materials. In this paper it will be discussed the behaviour of laminated composites against low and high velocity impacts. Furthermore, it will be explained the importance of damage type and impact energy. In determining the impact type.*

**Keywords:** Laminated composite materials, impact damage, delamination, crack.

\* Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

### GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla , çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü; metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi

metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir deyişle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nisbeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

## DÜŞÜK HIZLI DARBENİN BELİRLENMESİ

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 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [1,2]. Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da kullanılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin iç yapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir. Yüksek hızlı darbe cevabı malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası tarafından hakim olunur ki bu durumda malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur. Cantwell ve Morton, kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi bilinen darbe deneylerini kullanmışlar ve düşük hızı 10 m/s,e kadar olan hızlar olarak sınıflandırmışlardır [3]. Bununla birlikte Abrate, tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak belirlemiştir [4]. Darbe türünün, darbe hız sınırını belirleyerek tespit edilmeye çaba gösterildiği bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır. Bu nedenle yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matris kırılması ile belirlenir. Davies ve Robinson düşük hızlı darbeyi kalınlık boyunca gerilme dalgasının gerilme dağılımında önemli bir rolü olmadığı bir darbe türü olduğunu belirtmekte ve yüksek hıza geçişi veren bir model önermektedir [5]. Çarpan cismin altında dairesel bir bölge, gerilme dalgası tabaka boyunca yayılırken üniform bir şekil değişikliğine uğrar. Şıkıştırma şekil değiştirmesi olarak aşağıdaki eşitlik kullanılır:

## Çarpma hızı

$\varepsilon_c =$

Malzeme içindeki ses hızı

Bu değer %0.5 ila 1 arasındaki kopma uzamaları için, epoksi kompozitler durumunda 10-20 m/s hızda gerilme dalgasının baskın olduğu duruma geçişi verir.

## ENİNE DARBE

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olmandır çünkü; kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar. Sonuç olarak, enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşümlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok komplekstir. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapısal konfigürasyona da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini karakterize etmede önemli bir rol oynar. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu, mukavemette önemli derecede bir düşüme sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle dramatik değildir. Yüksek hızlı çarpmada malzeme üzerinde oluşan hasar, çarpışma temas bölgesindeki küçük bir bölgede yoğunlaşır.

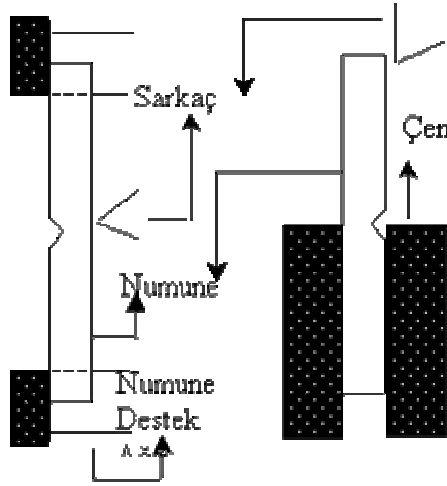
## DARBE TESTLERİ

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncinin, bir cismin kompozit malzemeye enine doğrultudaki darbesini simule eden testlerle karakterize edilebileceği açıktır. Birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılırlar. Bununla birlikte kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standard bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla günümüzde aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar genellikle üç kategoride sınıflandırılabilirler:

1. Ağırlık düşürme testleri,
2. Sarkaç testleri (Izod ve Charpy),
3. Hava veya Gaz silah testleri (düşük hız veya balistik testler).

Bu testlerden Izod ve Charpy test düzenek şemaları Şekil-1'de görüldüğü gibidir.

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, absorbe edilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Şekil-1). Bu test yöntemleri ile elde edilmiş bazı sonuçlar Tablo-1'de görülmektedir [6].



a ) Charpy

b ) Izod

Şekil 1. Charpy ve Izod Darbe Test Düzenekleri

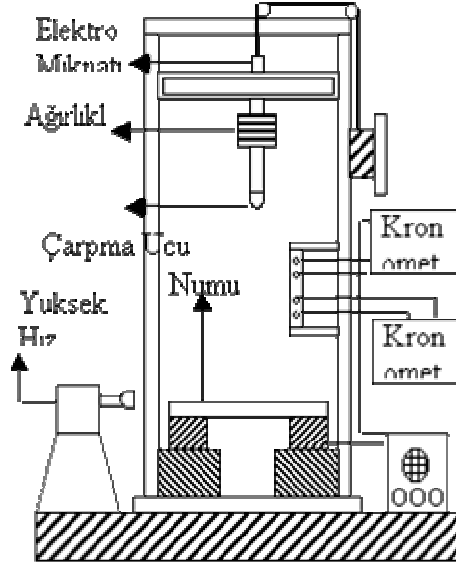
Tablo-1 Farklı Malzemelerin Standart V-Çentik Charpy ve Izod Darbe Enerjileri

Malzeme	Darbe Enerjisi (kJ/m <sup>2</sup> )	
	Charpy	Izod
S-Cam/Epoksi(%55 fiber)	734	-
B / Epoksi (%55 fiber)	109-190	-
Kevlar/Epoksi (%60 fiber)	317	158
AS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	101-132	33-67
HMS Karbon/Epoksi (%60 fiber)	23	7.5
4340 Çelik (R <sub>c</sub> =43-46)	214	-
7075-T6 Alüminyum	153	-

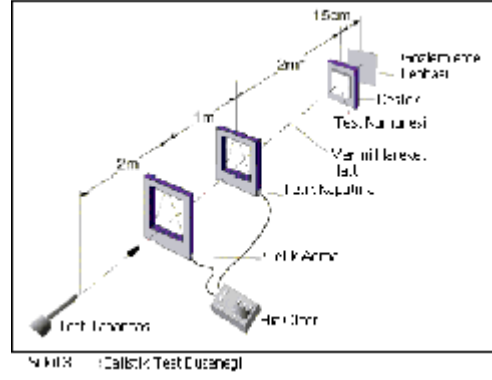
Alaşımı		
6061-t6 Alüminyum Alaşımı	67	-

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi mümkündür ve sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir.

Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil-2'de görüldüğü gibidir. Böyle bir cihazı meydana getiren ekipmanlar: platformları destekleyen numuneye veya tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazları (yük hücresi), çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır. Balistik testler için yüksek hızlar gerektiğinden, kompozit malzemeye bu hızla bir cisim çarptırmak için tabanca veya silah sistemlerinden faydalanılır. Bu testlere ilişkin basit bir deney düzeneği Şekil-3'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Ağırlık Düşürme Test Düzeneđi



Şekil 3. Balistik Test Düzenegi

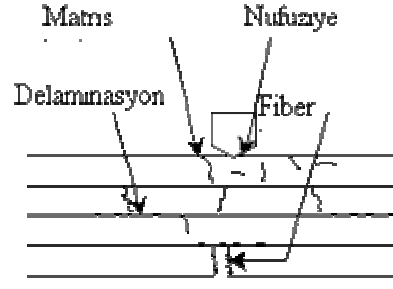
Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin konfigürasyonu (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi v.b) etkilemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğu zaman tüm bu kriterlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

## TABAKALI KOMPOZİT MALZEMEDE DARBE SONUCU OLUŞAN HASAR MODLARI

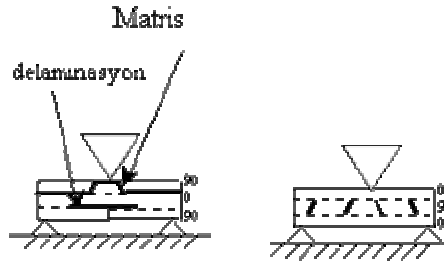
Fiber takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil-4'de görüldüğü gibidir.

- i. Matris modu : kırılma fiberlere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.
- ii. Delaminasyon modu : tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.
- iii. Fiber modu : gerilme altındaki fiber kopar, sıkıştırma altındaki fiber eğilir.
- iv. Nüfuziyet : çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

Yorulma modunun belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Yorulma modları arasındaki etkileşmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir.



Şekil-4 Darbe Sonucu Kompozit Malzemede Oluşan Hasar Çeşitleri



(a) enine görüntü

(b) boyuna görüntü

Şekil-5 Matris Kırılması Ve Delaminasyon Hasar Oluşumu [7]

## MATRİS HASARI

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Bu enerji seviyesi yaklaşık olarak 1-5J arasında değişmektedir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris kırılması şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca fiber ve matris arayüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris kırılmaları, tek yönlü fiberlerden oluşmuş tabakalarda genellikle fiber doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur. Tipik bir matris kırılması ve delaminasyon modeli Şekil-5'deki gibi açıklanabilir.

Üst ve orta katmanlardaki matris kırılmaları, çarpan cismin kenarının altında başlar (Şekil 5-b). Bu kesme gerilmeleri, malzeme boyunca oluşan çok yüksek enine kesme gerilmeleri tarafından oluşurlar, ve genellikle  $45^{\circ}$  eğime sahiptirler. Enine kesme gerilmeleri, temas kuvveti ve temas alanıyla ilişkilendirilirler. Alt katmanlardaki kırılmalar, eğilme kırılması olarak isimlendirilirler çünkü bunlar yüksek eğilme gerilmeleri sonucunda oluşurlar ve karakteristik olarak dikeydirler. Eğilme gerilmesi, tabakaların eğilme deformasyonu ile ilişkilidir.

## DELAMİNASYON

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir kırılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı fiber yönelmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Bu konudaki deneyler ve analizler, eğilmenin enine doğrultuda dış bükey olduğu ve fiber doğrultusu boyunca tabakanın konkav eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir [8]. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyumsuzluk ne kadar büyük olursa, ki 0/90 en kötü fiber doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, yığılma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir.

Delaminasyon hasarının olduğu noktada absorbe edilen elastik şekil değiştirme enerjisi,  $E_k$ , için basit bir ifade aşağıda ki gibidir [9].

$$(E_k) = \frac{2t^2 w L^3}{9 E_f f}$$

Burada t:kalınlık, t: tabakalar arası kesme mukavemeti, w:genişlik, L:desteklenmemiş uzunluk ve  $E_f$  : eğilme modülüdür.

Enine darbeden dolayı oluşan delaminasyon, bir eşik enerjisine ulaşıldıktan sonra ve sadece matris kırılması mevcut ise meydana gelir.

Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası arayüzey bölgesinde meydana gelirler. Fakat bu bölge her zaman tam olarak arayüzey bölgesi olmamakla beraber ayrıca her iki tarafta da bir miktar olabilir. Enine darbeye maruz 0/90/0 tabakaları için delaminasyon ve matris kırılması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğilmenmiş kırıklar arayüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler (Şekil 5-a). Oluşan kırıkların arayüzeye ulaşınca durdurulması; fiber oryantasyonundaki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine kırılma tarafından zorlanır (şekil 1b). Düşey eğilme kırığı büyümesi, zorlanmayan en alt arayüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris kırılmaları, kritik matris kırılmalarıdır. Delaminasyon, matris kırılmalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve arayüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı mod I kırılma olarak başlamaktadır. Hem eğilme kırılmaları hem de kesme kırılmaları delaminasyonu başlatabilir. Fakat kesme gerilmeleri nedeniyle oluşan delaminasyon, kararsız ve eğilme kırılması tarafından oluşan delaminasyon ise, kararludur ve uygulanan yük ile orantılıdır.

Kırılma mekaniği analizlerinde bir başlangıç çatlak ve kırılma boyutu tahmin etmek gerektiğinden, delaminasyonun başlaması ve büyümesine ilişkin bu analizleri uygulamak zordur. Bu amaçla, izotropik olarak kabul edilebilecek tabakalar için bir başlangıç çatlak boyutu tahmin etmeye gerek kalmadan eşik kuvvetinin bulunabileceği basit bir eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$D_c^2 = \frac{8\pi^2 E H^3 G_{II}}{9(1-\nu^2)}$$



Burada  $P_c$ =eşik (geçiş) yükü,  $G_{IIc}$ =kritik şekil değiştirme enerjisi azalma hızı,  $n$  = Poisson oranı,  $h$ = tabaka kalınlığı ve  $E$ = elastisite modülü.

## FİBER KOPMASI

Hasar modlarından bir diğeri olan fiber kopması, genellikle matris kırılması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Fiber kopmasına neden olan en önemli iki faktör:

1. Yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin yaratmış olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay çarpan cismin hemen altında gerçekleşir
2. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelir.

Fiberlerin yorulması nüfuziyetin başlamasında en önemli etkiyi gösterir. Çarpma olayının olmadığı, fakat yüksek eğme gerilmelerinin olduğu arka yüzdeki fiberlerin yorulması için gerekli olan enerjiyi ifade eden eşitlik aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Enerji} = \frac{\sigma^2 w t L}{18 E_f}$$

Burada;  $\sigma$  = eğme gerilmesi,  $E_f$  = Elastisite modülü,  $w$  = genişlik,  $L$  = desteklenmeyen uzunluk,  $t$  = nümunenin kalınlığı.

## NÜFUZİYET

Nüfuziyet, HASARIN makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzemeye tamamıyla nüfuz etmesine müsaade eden, fiberin kritik bir uzamaya ulaştığı zaman meydana gelir. Nüfuziyetin meydana geldiği darbeler esas olarak balistik ve üzeri hız düzeylerindeki darbeleri oluşturmaktadır. Delme için gerekli olan darbe enerjisi eşiği karbon-fiber takviyeli plastik kompozit malzemeler (CFRP) için kalınlığın artmasıyla hızlı bir şekilde artmaktadır. Balistik hızda meydana gelen darbe olayında kompozit malzemede nüfuziyetin olduğu bölgeden (genellikle çarpan cismin büyüklüğünde bir bölgedir) bir parça kesilip dışarı çıkar. Malzemeden bu parçanın kopup dışarı çıkartılmasıyla absorbe edilen enerji, toplam olarak absorbe edilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturur (tabaka kalınlığına bağlı olarak %50-60) [11].

Balistik darbede fiber iyileştirmesi, delip geçmek için gerekli olan enerjiyi karşılamada matris malzemesinden çok daha büyük bir öneme sahiptir. Tek yönlü katmanlardan oluşan tabakalı bir kompozit malzemeyi delmek için gerekli olan absorbe edilen enerji aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir [9].

$$\text{Enerji} = \pi \gamma t d$$

Burada,  $\gamma$  = kırılma enerjisi,  $t$  = tabaka kalınlığı,  $d$  = çarpan cismin çapı

Fiberlerin tek yönlü olduğu katmanlarda matris kırılmalarını tahmin etmek oldukça kolaydır. Fiberler gelişi güzel düzenlendikleri zaman, kırılma modellerini oluşturmak çok daha zordur.

## SONUÇ

Enerjisi düşük olan darbeler (1-5J) düşük hızlı darbeler olarak adlandırılırlar. Bu tür darbelerde çarpma hızı 1-10 m/s arasında değişmektedir. Her ne kadar darbe türünü belirlemede hız ve enerji miktarları kullanılsa da bazen hasarın türü de sınıflandırmada önem kazanmaktadır. Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından matris kırılması, delaminasyon oluşumu ve fiber kopmalarının görüldüğü darbelerdir. yüksek hızdaki darbeler ise çarpan cismin kompozit malzemeye tamamen nüfuziyetinin söz konusu olduğu darbe türüdür. Kompozit malzemelerin darbe davranışının tespitinde kullanılan test düzenek ve yöntemleri ile ilgili henüz uluslararası bir standart olmamasına karşın, Izod ve Charpy, ağırlık düşürme ve balistik deneyler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuda uluslararası kabul edilmiş bir standardın olmayışı yapılan çalışmaların birbiriyle mukayeselerini zorlaştırmaktadır.

## KAYNAKÇA

- 1. Sjoblem, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M.** On low-velocity impact testing of composite materials. J. Compos. Mater. 1988, 22, 30-52.
- 2. Shivakumar, K.N., Elber, W. and Illg, W.** Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, AIAA J. 1988, 23(3), 442-449
- 3. Cntwell, W.J. and Morton, J.** Geometrical effects in the Low velocity impact response of CFRP. Comp. Struct. 1989, 12, 39-59.
- 4. Abrate, S.** Impact on Laminated Composite Materials. Appl. Mech. Rev. 1991, 44(4), 155-190.
- 5. Rabinson, P. and Davies, G.A.O.** Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. Int. J. Impact Eng. 1992, 12(2), 189-207.
- 6. Mallik P.K.,** Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design, Marcel Dekker, New York, 1990.
- 7. Joshi, S.P. and Sun, C.T.** Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact. In 'Proc. American Society of Composites 2<sup>nd</sup> Tech. Conf.', DE, 23-25 September 1987, pp. 177-185.
- 8. Liu, D.** Impact-Induced Dealmination A View of Bending Stiffness Mismatching. J. Compos. Mater. 1988, 22, 674-692.

**9. Dorey, G.** Impact Damage in Composites Development, Consequences, and prevention. In 'Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. On Composite Materials and 2<sup>nd</sup> European Conf. On Composite Materials', Imperial College, London, 1988, vol.3. pp3.1-3.26.

**10. Liu,S., Kutlu, Z. and Chang, F.K.** Matrix Cracking and Delamination in Laminated Composite Beams Subjected to Transverse Concentrated Line-Load.

**11. Cantwell, W.J. and Morton, J.** Geometrical Effects In The Low Velocity Impact Response of CFRP. Comp. Struct. 1989, 12, 39-59.

**12. Mallick P.K.,** Composites Engineering Handbook, Marcel Dekker, Inc. 1997.