

## DOKUMA CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE TABAKALAR ARASI KIRILMA TOKLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

**Mete Onur KAMAN**

[mkaman@firat.edu.tr](mailto:mkaman@firat.edu.tr) Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119-Elazığ

### ÖZET

Bu çalışmada, dokuma cam fiber takviyeli epoksi reçineli tabakalı kompozit levhalarda tabakalar arası kırılma tokluğu deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada  $[0^{\circ}_5/15^{\circ}_5]$ ,  $[0^{\circ}_5/30^{\circ}_5]$  ve  $[0^{\circ}_5/45^{\circ}_5]$  tabaka dizilimlerine sahip kompozitlere DCB (Double Cantilever Beam) testi uygulanmıştır. Deneysel; çekme yükü etkisi altında çatlak ilerleme başlangıcını sağlayan kritik yük-yer değiştirme değerleri tespit edilmiş ve daha sonra yük artışına bağlı olarak çatlak ilerleme miktarları ölçülmüştür. Sonuçta, Mod I yükleme durumu için tabakalı kompozitlerin kırılma toklukları MBT (Modified Beam Theory), CC (Compliance Calibration) ve MCC (Modified Compliance Calibration) metotları ile bulunmuştur. Sayısal çalışmada ise tabakalı kompozitlerin üç boyutlu modelleri ANSYS sonlu elemanlar paket programında hazırlanmıştır. Kritik yer değiştirme değeri altında, çatlak ucundaki Mod I kırılma tokluğu ( $G_{IC}$ - Critical Strain Energy Release Rate) VCC (Virtual Crack Closure) tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar ile uyumlu sayısal sonuçlar grafik halinde sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Tabakalar arası kırılma tokluğu, sonlu elemanlar metodu, kompozit malzemeler, DCB, VCCT.

### ABSTRACT

In this study, interlaminar fracture toughness of woven glass fiber/epoxy laminated composite plates is investigated experimentally and numerically. In the experimental study, DCB (Double Cantilever Beam) test is applied to laminated composites with  $[0^{\circ}_5/15^{\circ}_5]$ ,  $[0^{\circ}_5/30^{\circ}_5]$  and  $[0^{\circ}_5/45^{\circ}_5]$  laminae configurations. At the end of the tests, Mode I fracture toughness is calculated by using MBT (Modified Beam Theory), CC (Compliance Calibration) and MCC (Modified Compliance Calibration) methods. In the numerical study, three dimensional models of laminated composite plates are prepared in ANSYS finite element package program. Mod I fracture toughness ( $G_{IC}$ - Critical Strain Energy Release Rate) in the neighborhood of the crack zone is found by using VCCT (Virtual Crack Closure Technique) for critical displacement values. The between compatible results with experimental and numerical studies are presented with graph.

**Keywords:** Interlaminar fracture toughness, finite element method, composite materials, DCB, VCCT.

## 1. GİRİŞ

Tabaklı kompozitler hafifliklerinin yanı sıra yüksek rijitlik ve dayanımları nedeniyle deniz, havacılık ve uzay endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Endüstride kullanılan bu kompozit levhalar uygulanacağı yerlere göre farklı fiber takviye açılarında tabakalandırılırlar. Ancak bu durumda tabakaların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir ve yükün yeterli derecede küçük ani artışına bağlı olarak tabakalar arasında çatlakların oluşmasına ve büyümesine neden olur. Delaminasyon olarak adlandırılan bu hasar tipinin en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. İşte bu noktada kompozitlerin performansını düşüren ve önemli bir hasar tipi olan delaminasyonu engellemek için yapılacak hasar toleransı analizlerinde tabakalar arası kırılma tokluğuna ihtiyaç duyulur. Tabakalar arası kırılma tokluğu; kompozitteki delaminasyonun yük altında ilerlemesini engellemek için gösterdiği direnç ile ölçülür ve kritik şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı ( $G_C$ -Critical Strain Energy Release Rate) ile tanımlanır. Delaminasyon için kırılma mekaniğinde Mod I kırılması en önemli hasar olarak kabul edilir ve bu durumda kırılma tokluğu  $G_{IC}$  olarak tanımlanır. Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu ( $G_{IC}$ ) değerleri genellikle DCB (Double Cantilever Beam) testi ile ölçülür [1-4].

$G_C$ ; matris tokluğu/gevrekliği, fiber hacim oranı/oryantasyonu, kompozit üretim ve deney şartları ile değişir. Bu değişim, literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından farklı çözüm metodları ile incelenmiştir. Gordnian ve diğ.[5] tabakalı kompozit DCB numunesinde enerji yayılım hızını kompliyans denklemini kullanarak analitik olarak hesaplamış ve kompozitin yapışma dayanımını bulmuşlardır.  $[0^\circ]_6$ ,  $[\pm 30^\circ]_5$ , ve  $[\pm 45^\circ]_5$  tabaka dizilimi için yaptıkları çalışmada analitik sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlar ile uyumlu elde etmişlerdir. Fiber açısının artmasının kırılma tokluğunu azalttığını gözlemlemişlerdir. Shetty ve diğ.[6] tek yönlü cam fiber/epoksi kompozitlerin kırılma tokluğunu  $0^\circ, +45^\circ/-45^\circ, +60^\circ/-60^\circ$  ve  $90^\circ$  fiber oryantasyonları için deneysel olarak araştırmışlardır. Fiber takviye açısının  $0^\circ$  'den  $90^\circ$  'ye (çatlak ilerleme doğrultusu) kadar değişmesiyle kırılma tokluğu artmıştır. Bonhomme ve diğ.[7] tek yönlü AS4/8552 karbon/epoksi tabakalı kompozit levhaların kırılma tokluğunu VCC (Virtual Crack Closure) tekniği ve TSEM (Two-Step Extension Method) ile sayısal olarak hesaplamışlardır. Sonuçlar DCB testi ile uyumlu elde edilmiştir. Simetrik dizimli dokuma cam fiber/polyester tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğu ve kürleşme basıncının etkisi Beng ve diğ.[8] tarafından araştırılmıştır. Çalışmada; Mod I kritik tabakalar arası kırılma tokluğunun ( $G_{IC}$ ) basıncın artmasıyla değişmediğini ancak kritik yük değerinden sonra çatlak ilerlemesi için gerekli kırılma tokluğunun basıncın artmasıyla azaldığı görülmüştür. Dokuma cam fiber/epoksi kompozitlerin kırılma tokluğu üzerinde poliüretan takviyesinin etkisini Sampath ve diğ.[9] incelemiştir. Belirli bir limit değerine kadar (%17) poliüretan artışının kompozitin çekme, eğilme ve darbe dayanımı ile birlikte kırılma tokluğunu da artırdığı tespit edilmiştir. Hug ve diğ.[10] tek yönlü karbon fiber takviyeli/epoksi T300/914 kompozitlerin kırılma tokluğu üzerinde yükleme hızının etkilerini araştırmışlardır. 0.1 mm/dak değerine kadar hızın Mod I kırılma tokluğu üzerinde çok fazla etkili olmadığı belirlenmiştir.

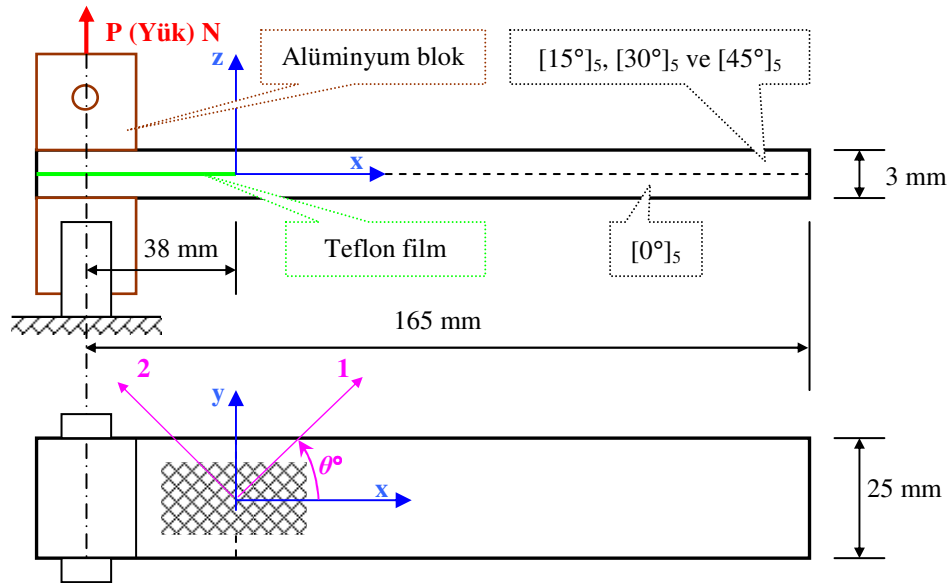
Araştırmalar; genellikle deneysel çalışmalar üzerine yoğunlaştırılmış, yapılan sayısal çalışmalarda ise sonuçlar literatürdeki farklı deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, laboratuvar şartlarında üretilmiş, dokuma örgülü cam fiberle takviyelendirilmiş ve epoksi matriksten oluşan tabakalı kompozit levhaların  $0^\circ/\theta^\circ$  tabakalar arası kırılma tokluğunun deneysel ve sayısal olarak belirlenmesidir. İlk bölüm olan deneysel çalışmada, hazırlanan on tabakalı kompozit DCB test numunelerinin Mod I

kırılma tokluğu MBT (Modified Beam Theory), CC (Compliance Calibration) ve MCC (Modified Compliance Calibration) metotları ile bulunmuştur. Sayısal çalışmada ise çatlak ilerlemesi başlangıcı için gerekli olan kritik yer değiştirme değeri yardımıyla, çatlak bölgesindeki düğümlerde meydana gelen tepki kuvvetlerini belirlemek için ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılmıştır. Sonuçta Mod I kırılma tokluğu ( $G_{IC}$ - Critical Strain Energy Release Rate) VCC (Virtual Crack Closure) tekniği ile hesaplanmıştır. Deneysel MBT, CC ve MCC ile uyumlu sayısal (VCC)  $G_{IC}$  değerleri tablo halinde sunulmuştur.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. DCB Test Numunelerinin Hazırlanması

Tabakalı kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak çapraz örgülü dokunmuş cam fiber, matris malzemesi olarak ise *Admiral* epoksi kullanılmıştır. 100 birim epoksi içerisine 5 birim *Akiş-MEK Peroksit* hızlandırıcı ve *Akiş-Kobalt Oktoat* sertleştirici katılarak oluşturulan matris, cam fiber tabakalarına elle yayma metoduyla emdirilerek kalıplara yerleştirilmiştir.  $[0^{\circ}_5/15^{\circ}_5]$ ,  $[0^{\circ}_5/30^{\circ}_5]$  ve  $[0^{\circ}_5/45^{\circ}_5]$  tabaka dizilimlerinde üretilen kompozitlerde çatlak oluşumu için  $0^{\circ}$  ve  $\theta^{\circ}$  fiber oryantasyon açısı ( $\theta = 15, 30$  ve  $45$ ) arasına teflon film konulmuştur. Daha sonra kalıp içerisindeki on tabaka cam fiber takviyeli kompozit levhalar, laboratuvar şartlarında  $100\text{ C}^{\circ}$  sıcaklıkta ve pres altında bir saat bekletilmiştir. En son aşamada oda sıcaklığında kalıptan çıkarılan levhalar 25 mm genişlik ve 175 mm uzunluğunda tel testere ile kesilmiştir. Çekme testi cihazına bağlanacak levha uçlarına alüminyum bloklar yapıştırılmıştır (Şekil 1). Sayısal çalışmada kullanılmak üzere tabakalı cam fiber/epoksi kompozitin mekanik özellikleri tespit edilmiş ve Tablo 1’de verilmiştir.



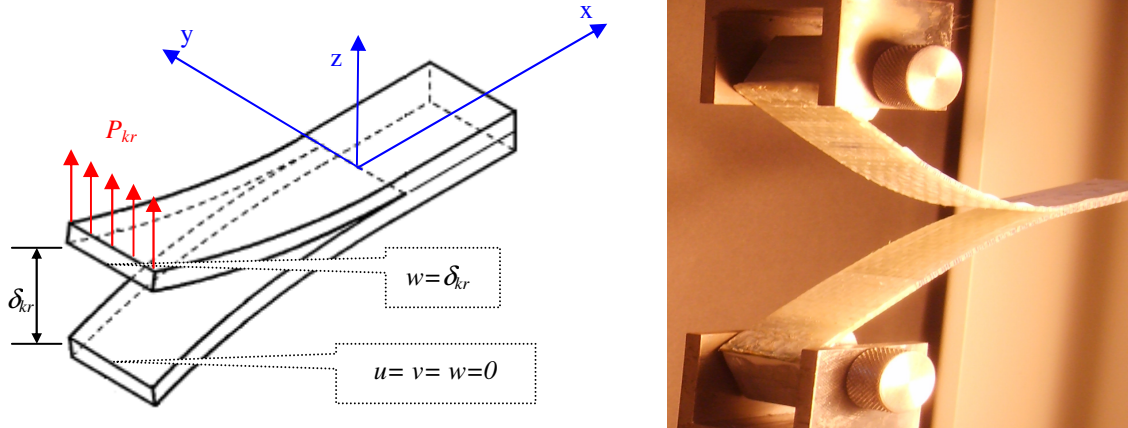
Şekil 1. DCB test numunesi ve boyutları.

Tablo 1. Malzeme özellikleri.

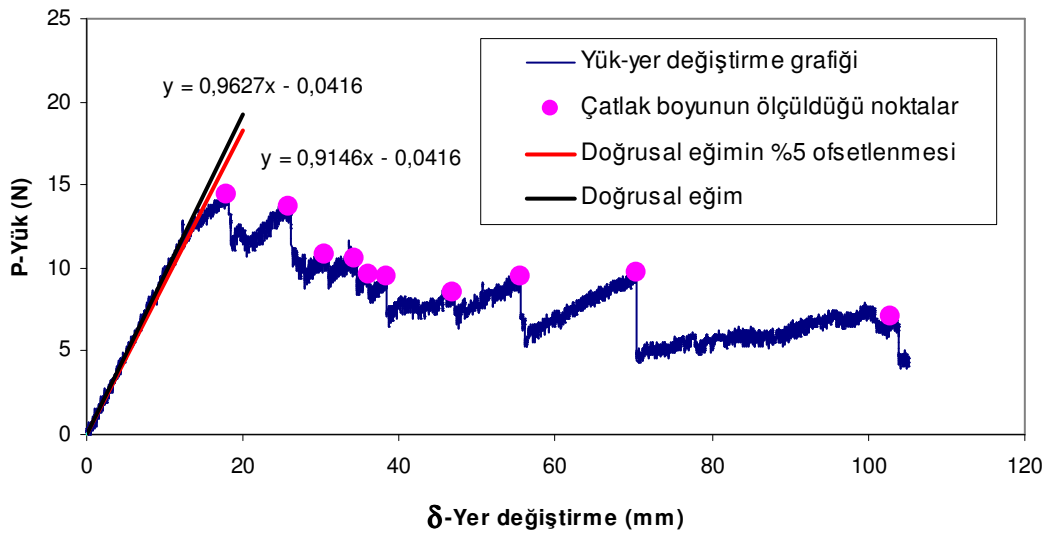
Takviye doğrultusundaki elastisite modülü	$E_1$ (MPa)	5697.10
Takviye doğrultusuna dik doğrultudaki elastisite modülü	$E_2$ (MPa)	5697.10
Kayma modülü	$G_{12}$ (MPa)	1396.57
Poisson oranı	$\nu_{12}$ (-)	0.1
Çekme dayanımı	$X$ (MPa)	284.78
Kayma dayanımı	$S$ (MPa)	124.43

## 2.2. DCB Testi

Deneyler 10 kN kapasiteli *UTEST* universal çekme cihazında 0.5 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler iki çene arasına alüminyum bloklara rijit pimler ile mesnetlenmiştir. Cihazın alt çenesi sabit tutulurken üst çeneye ise levhanın eksenine doğrultusunda (z-ekseni) hareket verilerek çekme yükü uygulanmıştır. Sabit çeneye  $0^\circ$  tabakalar, hareketli çeneye ise  $\theta^\circ$  tabakalar gelecek şekilde numuneler bağlanmıştır (Şekil 1). Deney sırasında z-ekseni boyunca çatlak açılma miktarına karşılık ( $\delta$ ), çatlak ilerleme miktarları belirli noktalar için belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yük etkisi altında DCB test numunesi ve sınır şartları.



Şekil 3.  $[0^0_5/15^0_5]$  kompozit levha için yük-yer değiştirme grafiği.

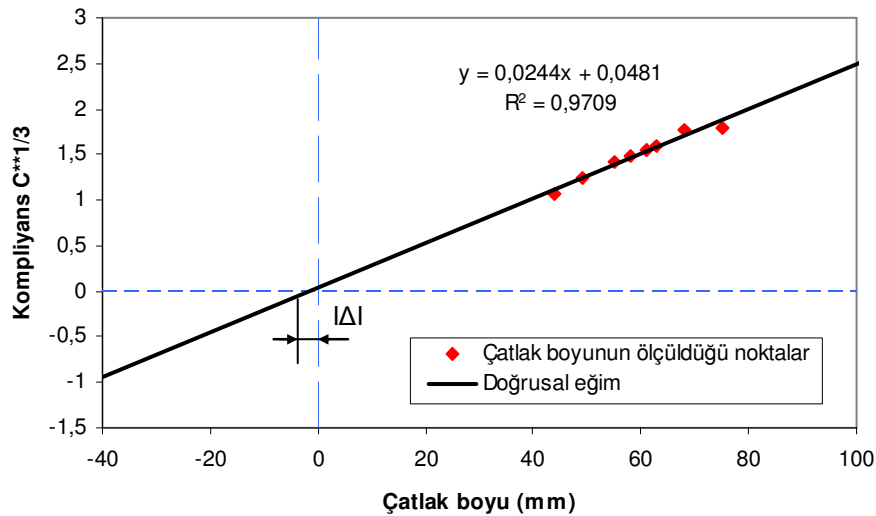
Deney sonucunda ise levhaların yük-yer değiştirme grafikleri çizilerek çatlak ilerlemesini başlatan kritik yük ( $P_{kr}$ ) ve yer değiştirme ( $\delta_{kr}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3'te  $[0^\circ_5/15^\circ_5]$  tabaka dizilimli kompozit levha için yük-yer değiştirme grafiği gösterilmiştir. Grafikte başlangıçtaki doğrunun denklemi çıkarılmış daha sonra ise %5 daha az eğimi alınarak (ofsetlenerek) elde edilen doğrunun grafiği kestiği nokta elde edilmiştir [11,12]. Bu noktanın koordinatları DCB testi için kritik yük ve yer değiştirme değeridir. DCB testinden elde edilen veriler kullanılarak,  $G_{IC}$  değerini hesaplamak için üç farklı metot kullanılmıştır.

### 2.3. MBT (Modified Beam Theory) Metot

Bu metoda göre  $G_{IC}$  [3, 8, 12]

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a_0 + |\Delta|)} \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Burada  $P$  ve  $\delta$  sırasıyla deneysel olarak elde edilen kritik yük ve yer değiştirme değerleridir.  $b$ : levha genişliği,  $a_0$ : yük uygulama ekseninden itibaren başlangıçtaki çatlak uzunluğu,  $\Delta$  ise düzeltme faktörü olarak tanımlanır.  $\Delta$ , yer değiştirmenin deplasmana oranı olan ( $\delta/P$ ) kompliyansın ( $C$ )  $1/3$ . kuvvetinin çatlak ilerleme miktarı ile değişim grafiğinin çizilmesi ile elde edilir (Şekil 4).



Şekil 4.  $[0^\circ_5/15^\circ_5]$  kompozit için MBT metoduna göre düzeltme faktörünün hesaplanması.

### 2.4. CC (Compliance Calibration) Metot

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{ba} \quad (2)$$

Denklem 2' ye göre,  $n$ , yatayda  $\log(a)$  ve düşeyde  $\log(C)$  için çizilecek olan grafikten elde edilen doğrusal eğimdir [4,7]. Burada  $a$ , çatlak ilerleme miktarıdır.

## 2.5. MCC (Modified Compliance Calibration) Metot

Bu metoda göre tabakalar arası kırılma tokluğu [6,7]

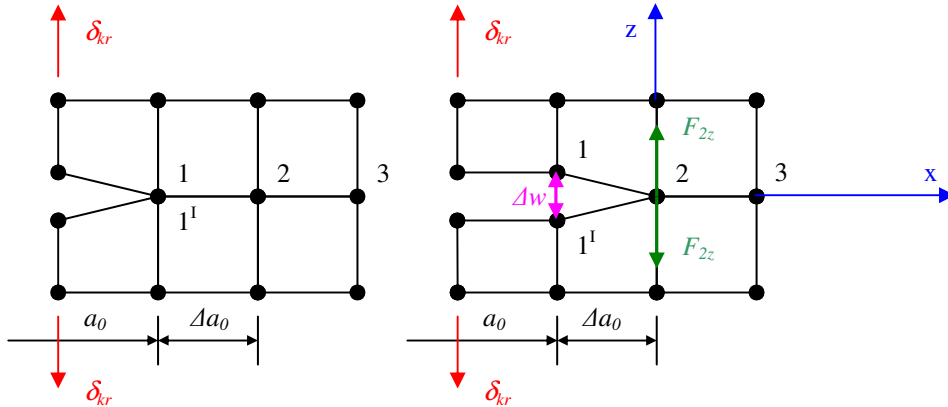
$$G_{IC} = \frac{3P^2 C^{\frac{2}{3}}}{2A_1 b h} \quad (3)$$

Burada  $h$ : levha kalınlığıdır.  $A_1$  ise yatayda kompliyansın ( $C$ )  $1/3$ . kuvvetine karşılık düşeyde  $a/h$  oranı için çizilecek olan grafikten elde edilen doğrunun eğimidir.

## 3. SAYISAL ÇALIŞMA

### 3.1. VCC (Virtual Crack Closure) Tekniği

VCC tekniği (VCCT) kompozit tabakalarında hasarı tahmin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır [13,14]. Bu metoda göre başlangıç çatlak  $a_0$  olan bir tabakada  $\Delta a_0$  kadarlık bir çatlak ilerlemesi için; *i*- Yayınım enerjisinin çatlakın kapanması için gerekli enerji ile aynı olduğu *ii*-  $\Delta a_0$  yeteri derecede küçük olduğu zaman çatlak ucundaki gerilme durumunun değişmediği hipotezlerine dayanır [7]. Şekil 5'te VCCT için tipik bir sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



Şekil 5. VCCT için sonlu eleman modeli.

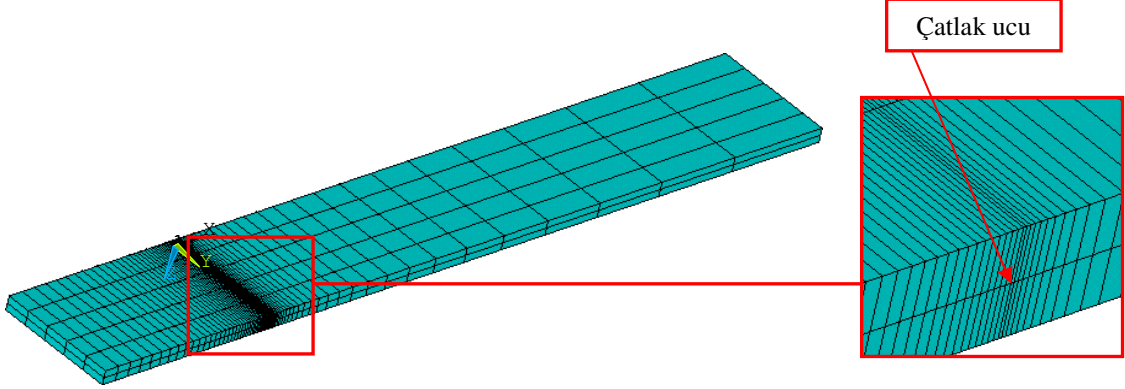
Buna göre; çatlak ucunda başlangıçta aynı koordinatlara sahip ancak birbirinden bağımsız serbest düğümler vardır. Levha ucunun yer değiştirme değeri kritik değere ulaştığında ( $\delta_{kr}$ ); çatlak ucunda aynı koordinatlardaki düğümlerin ayrılmasına izin verilir ve çatlak  $\Delta a_0$  kadar uzar. Daha sonra  $G_{IC}$ ; aynı adımda, yeni çatlak ucundaki tepki kuvvetleri ( $F_{2z}$ ) ve eski çatlak ucundaki düğümlerin yer değiştirme farkı kullanılarak ( $\Delta w = w_{1i} - w_{1'i}$ )

$$G_{IC} = \frac{1}{2b\Delta a_0} \sum_{i=1}^m F_{2zi} (w_{1i} - w_{1'i}) \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $w$ : düğümün z-eksenindeki deplasman miktarı,  $m$ : çatlak ucunda levha genişliğince sıralanan toplam düğüm sayısıdır.

### 3.2. Sonlu Eleman Modeli

Sayısal çözümde VCCT için çatlak ucu bölgesindeki yer değiştirmeleri ve tepki kuvvetlerini hesaplamak amacıyla ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır [15]. Eleman tipi olarak Solid46 seçilmiştir. Bu durumda sonlu eleman modeli 710 eleman ve 1530 düğümden meydana gelmiştir. Çatlak bölgesi dış kenarlara göre daha sık taranmış olup üç boyutlu model Şekil 6'da gösterilmiştir. Sınır şartı olarak; yükün uygulandığı eksen boyunca levhanın alt kenarı sabit mesnetlenmiş ( $u=v=w=0$ ), üst kenarına ise deneysel kritik yer değiştirme değeri ( $w=\delta_{kr}$ ) uygulanmıştır (Şekil 2) [7,16]. Çalışmada  $a_0=38$  mm olup,  $\Delta a_0/a_0$  oranı ise 0.004 olarak alınmıştır.



Şekil 6. DCB test numunesi sonlu eleman modeli.

### 4.SONUÇLAR

$[0^{\circ}_s/\theta^{\circ}_s]$  tabaka dizimli ( $\theta^{\circ}=15, 30$  ve  $45$ ) dokuma cam fiber takviyeli/epoksi kompozit levhaların  $0^{\circ}/\theta^{\circ}$  tabakalar arası kırılma tokluğu deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada;  $0^{\circ}$ 'li tabaka dizilimleri sabitlenmiş ve  $\theta^{\circ}$ 'li tabaka dizilimleri ise çekme yükü etkisine bırakılmış DCB test numunelerinin kritik yük ve yer değiştirme değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Sonuçlar, kritik yük değerlerinin birbirine yakın olduğunu ve takviye açısının değişiminin kritik yük değerini değiştirmediğini göstermektedir.  $\theta=15^{\circ}$  için  $P_{kr}=13.506$  N iken, bu değer  $\theta=45^{\circ}$  için  $13.480$  N'dur. Ancak  $\theta$ 'nin artması yer değiştirme miktarını azaltmıştır.  $\theta=15^{\circ}$  için  $\delta_{kr}=14.42$  mm iken, bu değer  $\theta=45^{\circ}$  için  $12.638$  mm'dir.

Tablo 2. Deneysel kritik yük ve yer değiştirme değerleri.

Tabaka dizilimi	Yük $P_{kr}$ (N)	Yer değiştirme $\delta_{kr}$ (mm)
$[0^{\circ}_s/15^{\circ}_s]$	13.506	14.420
$[0^{\circ}_s/30^{\circ}_s]$	13.933	13.180
$[0^{\circ}_s/45^{\circ}_s]$	13.480	12.638

Kritik yük değerinin her üç açı değeri için de yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen, tabakalar arası kırılma tokluğu yük ve yer değiştirmenin fonksiyonu olduğu için  $\delta_{kr}$  değerinin azalmasına bağlı olarak fiber takviye açısının artması  $G_{IC}$  değerini azaltmıştır (Tablo 3). Bütün  $\theta$  değerleri için en büyük  $G_{IC}$  değerleri CC metot ile elde edilmiştir. Bununla birlikte MBT, CC ve MCC metot sonuçları birbirine yakın değerlerdedir [6,7]. En büyük  $G_{IC}$  değeri  $\theta=15^{\circ}$  için CC metot ile  $0.3073$   $\text{kJ/m}^2$  olarak elde edilirken en düşük

değer MCC metot ile  $0.2874 \text{ kJ/m}^2$  olarak elde edilmiştir. Bu durum diğer fiber açıları için de geçerlidir.  $G_{IC}$  değerinin azalması, fiber takviye açısının artmasına bağlı olarak levhaların eğilme rijitliğinin az da olsa azalmasından kaynaklanmaktadır [16].

Tablo 3. Deneysel kırılma tokluğu değerleri  $G_{IC}$  ( $\text{kJ/m}^2$ )

Tabaka dizilimi	Metot		
	MBT	CC	MCC
$[0^\circ_5/15^\circ_5]$	0.2924	0.3073	0.2874
$[0^\circ_5/30^\circ_5]$	0.2609	0.2738	0.2377
$[0^\circ_5/45^\circ_5]$	0.2498	0.2569	0.2340

Sayısal çözümün amacı deneysel sonuçların kontrolüdür. Sayısal çözüm tekniğinin doğruluğu ise literatürde sayısal sonuçları bulunan  $123.9 \times 23.81 \times 1.62 \text{ mm}$  boyutlarındaki 6 tabakalı çapraz takviyeli dokuma cam fiber/epoksi kompozit DCB test numunesi için yapılmıştır [17]. Çatlak başlangıç boyu  $a_0=31 \text{ mm}$  ve  $\theta=0^\circ$ 'dir. Kompozit levhanın mekanik özellikleri  $E_1=E_2=54500 \text{ MPa}$ ,  $G_{12}=3100 \text{ MPa}$  ve  $\nu_{12}=0.08$ 'dir. Solid46 eleman tipi için sonlu eleman modelinde 560 eleman ve 1218 düğüm vardır. Çözümde elde edilen uyumlu sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Sayısal çalışmada öncelikle sonlu eleman modeline deneysel  $\delta_{kr}$  değerinin uygulanması sonucu levhada elde edilen tepki kuvvetleri hesaplanmış ve Tablo 5'te sunulmuştur.  $[0^\circ_5/15^\circ_5]$  tabaka diziliminde deneysel kompliyans değeri sayısalda daha büyük olup, diğer takviye açılarında ise bu durum tam tersidir. Kompliyans değerleri incelendiğinde  $\theta=15^\circ$  ve  $45^\circ$  için sayısal çözüme yaklaşım oranı %~7,  $\theta=30^\circ$  için ise %6.28' dir.

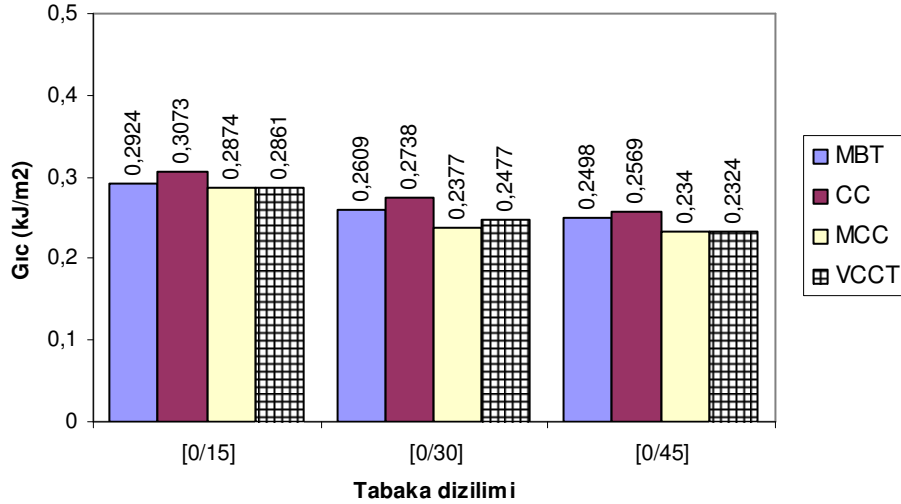
Tablo 4. Çapraz dokuma cam fiber takviyeli /epoksi kompozit levha için VCCT'nin literatür [17] sonuçları ile karşılaştırılması.

$G_{IC}$ ( $\text{kJ/m}^2$ )	Sun ve diğ.[16]	Sunulan	Yaklaşım (%)
Levha ortasında ( $y=0$ )	1.4495	1.4449	0.317
Ortalama	1.3541	1.3266	2.030

Tablo 5. Deneysel ve sayısal kompliyans (C) değerleri (mm/N)

Tabaka dizilimi	Deneysel	Sayısal	Yaklaşım (%)
$[0^\circ_5/15^\circ_5]$	1.0677	1.0061	-7.42
$[0^\circ_5/30^\circ_5]$	0.9459	1.0093	6.28
$[0^\circ_5/45^\circ_5]$	0.9375	1.0108	7.25





Şekil 7. Deneysel ve sayısal kırılma tokluğu değerleri  $G_{IC}$  (kJ/m<sup>2</sup>).

Şekil 7’de deneysel ve sayısal  $G_{IC}$  değerleri verilmiştir. Sayısal sonuçlar deneysel değerlerden daha düşüktür. Sadece [0°<sub>5</sub>/30°<sub>5</sub>] tabaka diziliminde sayısal  $G_{IC}$ =0.2477 kJ/m<sup>2</sup> olup, bu değer MCC metodu ile elde edilen değerden (0.2377 kJ/m<sup>2</sup>) daha yüksektir. Deneysel olarak en düşük değerlerin elde edildiği MCC metot sonuçları sayısal çözüme en yakın metottur. [0°<sub>5</sub>/15°<sub>5</sub>] için sayısal sonuçların deneysel MCC sonuçlarına oranı 0.995 olup, bu değer [0°<sub>5</sub>/45°<sub>5</sub>] için ise 0.993’tür. En düşük yaklaşım oranı ise [0°<sub>5</sub>/30°<sub>5</sub>] ve [0°<sub>5</sub>/45°<sub>5</sub>] dizilimleri için CC metot ile 0.905 olarak elde edilmiştir.

## 5. TARTIŞMA

Bu çalışmada [0°<sub>5</sub>/θ°<sub>5</sub>] tabaka dizilimli (θ=15, 30 ve 45) dokuma cam fiber takviyeli/epoksi kompozit levhaların 0°/θ° tabakalar arası kırılma tokluğu  $G_{IC}$ , DCB testi ile deneysel ve VCCT ile sayısal olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara aşağıda sıralanmıştır;

- Deneysel çalışmada DCB testi sonucu çatlak ilerlemesini başlatan kritik yük değerinin  $\theta$  takviye açısının artmasıyla değişmediği ancak yer değiştirme değerinin azaldığı görülmüştür. Ancak bu değişim oranı düşüktür.
- $G_{IC}$  değerleri deneysel olarak MBT, CC ve MCC metotları ile hesaplanmıştır.  $\theta$  ’nın artması, kritik yer değiştirme değerine bağlı olarak her üç metot için de  $G_{IC}$  değerini azaltmıştır. Bütün takviye açılarında en büyük  $G_{IC}$  değerleri CC için, en küçük  $G_{IC}$  ise MCC metot için elde edilmiştir. Ancak sonuçlar her üç metot için de aynı takviye açısında birbirine yakındır.
- Kritik yük değerleri altında sayısal kompiyans değerlerinin deneysel sonuçlara yaklaşım oranı incelendiğinde [0°<sub>5</sub>/15°<sub>5</sub>] ve [0°<sub>5</sub>/45°<sub>5</sub>] için %~7, [0°<sub>5</sub>/30°<sub>5</sub>] için ise %6.28’ dir.
- Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara oranı, en yüksek MCC metot için [0°<sub>5</sub>/15°<sub>5</sub>] tabaka diziliminde 0.995 olarak, en düşük ise [0°<sub>5</sub>/30°<sub>5</sub>] ve [0°<sub>5</sub>/45°<sub>5</sub>] için CC metot ile 0.905 olarak bulunmuştur.
- Deneysel ve sayısal tabakalar arası kritik kırılma tokluğu arasında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ANSYS sonlu eleman paket programı

kullanılarak farklı tabaka dizilimleri, malzeme özellikleri ve yükleme durumları (Mod II) için bu çalışma genişletilebilir.

## 6.TEŞEKKÜR

Yazar tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde, yardımlarından dolayı ODTÜ Mühendislik Bilimleri Bölümü'ne teşekkür eder.

## 7.KAYNAKÇA

[1] MORAIS, A. B., PEREIRA, A. B., Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates, **Composites: Part A**, 38, 785–794, (2007).

[2] PEREIRA, A. B. ve MORAIS, A. B., Mode I interlaminar fracture of carbon/epoxy multidirectional laminates, **Composites Science and Technology**, 64, 2261–2270, (2004).

[3] GUNDERSON, J. D., BRUECK, J. F., PARIS, A. J., Alternative test method for interlaminar fracture toughness of composites, **International Journal of Fracture**, 143, 273–276, (2007).

[4] MATHEWS, M. J., SWANSON, S. R., Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite, **Composites Science and Technology**, 67, 1489–1498, (2007).

[5] GORDNIAN, K., HADAVINIA, H., MASON, P. J., MADENCI, E., Determination of fracture energy and tensile cohesive strength in Mode I delamination of angle-ply laminated composites, **Composite Structures**, 82, 577–586, (2008).

[6] SHETTY, M. R., KUMAR K. R. V., SUDHIR, S., RAGHU, P., MADHURANATH, A.D., RAO, R.M.V.G.K., Effect of Fibre Orientation on Mode-I Interlaminar Fracture Toughness of Glass Epoxy Composites, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 19, 8, 606-620, (2000).

[7] BONHOMME, J., ARGUELLES, A., VINA, J., VINA, I., Numerical and experimental validation of computational models for mode I composite fracture failure, **Computational Materials Science**, 45, 993–998, (2009).

[8] BENG, Y. K., DALIMIN, M. N., FAIZAL, M. A., Mode-I Toughness and Curing Pressure Characteristic of Symmetrical Lay-Up of Plain-Weave Woven GFRP Composites, **Journal of Applied Sciences**, 7, 15, 2174-2182, (2007).

[9] SAMPATH, P. S., MURUGESAN, V., SAROJADEVI, M., THANIGAIYARASU, G., Mode I and Mode II Delamination Resistance and Mechanical Properties of Woven Glass/Epoxy-PU IPN Composites, **Polymer Composites**, 29, 11, 1227-1234, (2008).

- [10] HUG, G., THE VENET, P., FITOUSSI, J., BAPTISTE, D., Effect of the loading rate on mode I interlaminar fracture toughness of laminated composites, **Engineering Fracture Mechanics**, 73, 2456–2462, (2006).
- [11] MORAIS, A. B., MOURA, M.F.S.F., Evaluation of initiation criteria used in interlaminar fracture tests, **Engineering Fracture Mechanics**, 73, 2264–2276, (2006).
- [12] DUCEPT, F., DAVIES, P., GAMBY, D., An experimental study to validate tests used to determine mixed mode failure criteria of glass/epoxy composites, **Composites Part A**, 28, 719-729, (1997).
- [13] LESKI, A., Implementation of the virtual crack closure technique in engineering FE calculations, **Finite Elements in Analysis and Design**, 43, 261–268, (2007).
- [14] KRUEGER, R., Virtual crack closure technique: history, approach and applications, **Applied Mechanics Reviews**, 57, 2, 109-143, (2004) .
- [15] ANSYS 11.0 Academic Teaching Introductory Help Menu, 2007.
- [16] PEREIRAA, A. B., MORAISA, A. B., MOURAB, M.F.S.F., MAGALHAESC, A. G., Mode I interlaminar fracture of woven glass/epoxy multidirectional laminates, **Composites: Part A**, 36, 1119–1127, (2005).
- [17] SUN, H., RAJENDRAN, S., SONG, D. Q., Finite element analysis on delamination fracture toughness of composite specimens, **Proceedings of 2nd Asian ANSYS User Conference**, 1-8, Singapore, (1998).