مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1393، دوره 14، شماره 4، ص‌ص 1-11

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی جدایش بین‌لایه‌ای و تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در کامپوزیت شیشه/اپوکسی با روش نشرآوایی

میلاد سعیدی‌فر[1]، محمد فتوحی[2]، رضا محمدی[3]، مهدی احمدی نجف‌آبادی[4*]، حسین حسینی‌تودشکی[5]

1-دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3-دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
4- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
5- استاد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق پستی: 1587-4413، ahmadin@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 شهریور 1392
پذیرش: 16 آبان 1392
ارائه در سایت: 31 اردیبهشت 1393

کلید واژگان:
جدایش بین‌لایه‌ای
نشرآوایی
چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای

چکیده

جدایش بین‌لایه‌ای یکی از شایع‌ترین انواع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده که در انواع بارگذاری‌های مود I، II، یا ترکیبی از این مودها اتفاق می‌افتد. پژوهش حاضر، به بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/ اپوکسی پرداخته و با تلفیق روش‌های نشرآوایی و مکانیکی، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را تعیین می‌نماید. نمونه‌های استاندارد با لایه‌چینی‌های مختلف و تحت شرایط مختلف بارگذاری مود I، مود II و مود ترکیبی I و II، قرار گرفتند. در ابتدا، منحنی‌های نیرو- جابجایی و رشد جدایش بین‌لایه‌ای برای نمونه‌های مختلف مقایسه شده و این منحنی‌ها بر اساس رفتار مکانیکی و نشرآوایی آن‌ها، به سه ناحیه با رفتار متفاوت تقسیم شدند. مشخص شد که رشد جدایش در نمونه‌های مود I حالت پایدار داشته و در نمونه‌های مود ترکیبی و مود II، حالت ناپایدار دارد. در ادامه با استفاده از روش آکوستومکانیک که تلفیقی از روش‌های نشرآوایی و مکانیکی بوده، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در نمونه‌ها تعیین شده است. مشخص شد که روش آکوستومکانیک حد پایین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را ارائه‌داده و با نتایج حاصل از روش ذکر شده در استاندارد، مطابقت خوبی دارد. در انتها با استفاده از تصاویر گرفته‌شده از سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، نتایج بدست آمده صحت‌سنجی گردیدند.

Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission

Milad Saeedifar[1], Mohammad Fotouhi[1], Reza Mohammadi[1], Mehdi Ahmadi Najafabadi[1*], Hossein Hosseini Toudeshky[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.
2- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.
* P.O.B.1587-4413, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 September 2013
Accepted 07 November 2013
Available Online 21 May 2014

Keywords:
Delamination
Acoustic Emission
Interlaminar Fracture Toughness

ABSTRACT

Delamination is the most common failure mode in composite materials. It takes place in different modes, i.e. mode I, mode II or the combination of these modes. The present study is concerned with an investigation of mechanical and acoustic emission behavior of delamination. In this work, various lay-ups of glass/epoxy composite laminates have been used to study the delamination behavior when subjected to mode I, mode II and the mixed-mode I/II tests. First, the characterization of load-displacement curves of the specimens is done based on the AE parameters and mechanical responses and the curves were divided into three parts. The crack growth in the mode I was stable state and in the mixed-mode and mode II was unstable. In the next, interlaminar fracture toughness of the specimens, G_c, were measured using standard methodologies and acoustomechanical methodologies which is based on the mechanical behavior and AE information. It was found that the acoustomechanical method presents the lower limit of the interlaminar fracture toughness and agrees with the results that obtained from standard. The images were captured with Scanning electron microscope (SEM) from damage surfaces verifies the results that obtained from Acoustic emission.

1- مقدمه

به دلیل نیاز به ساخت سازه‌هایی با قابلیت اطمینان بالا، تشخیص خرابی و پایش رشد آسیب در سازه‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. کامپوزیت‌های چندلایه به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، همچون نسبت استحکام به وزن

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

بالایی که دارند، امروزه به فراوانی در صنعت استفاده می‌شوند [۲،۱]. علی‌رغم این مزیت، در این مواد امکان وقوع انواع خرابی‌ها وجود دارد. خرابی‌های رایج در چندلایه‌های کامپوزیتی عبارت‌اند از: 1) شکست الیاف 2) ترک‌خوردگی ماتریس 3) جدایش الیاف از ماتریس 4) جدایش بین لایه‌ای [۴،۳]. جدایش بین‌لایه‌ای شایع‌ترین نوع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است که منجر به کاهش استحکام و مدول خمشی کامپوزیت می‌گردد [۶،۵]. این امر به دلیل چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای پایین در چندلایه‌های کامپوزیتی است. چون این نوع خرابی در بین لایه‌های کامپوزیت اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیرقابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. برای تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی ارائه‌شده‌است. از جمله این روش‌ها می‌توان به گرمانگاری[1]، روش فراصوتی[2] و اشعه ایکس[3] اشاره نمود که هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایبی دارند [7]. اغلب روش‌های تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای، جزء روش‌های غیرفعال می‌باشند، در حالی که اگر برای تشخیص جدایش بین‌لایه‌ای، از روش‌های فعالی همچون نشرآوایی استفاده شود، پایش بلادرنگ سیستم امکان‌پذیر بوده و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی[4] گویند [8]. این روش، از جمله روش‌های فعال در بازرسی و پایش وضعیت به شمار می‌آید. از مزایای استفاده از روش نشرآوایی در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت و قابلیت تفکیک انواع مختلف خرابی، همچون ترک‌خوردگی ماتریس، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای اشاره نمود [9].

بنزگاه[5] و همکارش به بررسی تجربی رشد جدایش بین‌لایه‌ای، در نمونه‌های شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری مود I، II و مود ترکیبی I و II پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های متعددی توانستند رابطه‌ای نیمه‌تجربی برای محاسبه چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در این نمونه‌ها ارائه دهند [10]. رفاهی و همکارش، با روش نشرآوایی، رفتار جدایش بین‌لایه‌ای را در چندلایه‌های پلی‌استر/شیشه که تحت بارگذاری مود I قرار داشتند، بررسی کردند. با شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با استفاده از تبدیل فوریه، سیگنال‌ها تحلیل شده و محدوده فرکانسی انواع خرابی‌ها تعیین گردید [11]. فتوحی و همکارانش، رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه‌های شیشه/اپوکسی تحت خمش سه نقطه‌ای بررسی نمودند. با استفاده از تبدیل موجک[6] و دسته‌بندی فازی[7] سیگنال‌ها، انواع خرابی، همچون شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و شکست ماتریس را از یکدیگر تفکیک نموده و درصد هر نوع خرابی را برای هر نمونه تعیین نمودند. تصاویر گرفته‌شده از سطوح شکست نمونه‌ها، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب روش نشرآوایی در تعیین انواع مختلف خرابی‌ها بود [12]. بختیاری و همکاران، با استفاده از نشرآوایی و معرفی تابعی با عنوان تابع سنتری[8] که بیانگر نسبت انرژی مکانیکی به انرژی نشرآوایی نمونه در حین بارگذاری است، موفق شدند، لحظه شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری مود I، شناسایی کنند [13]. رفاهی و همکاران با استفاده از تابع سنتری، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را در کامپوزیت پلی‌استر/شیشه تحت بارگذاری مود I محاسبه نمودند [14]. تاکنون بیشتر محققین به بررسی جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری مود I پرداخته‌اند و چندان به بارگذاری مود II و مود ترکیبی I و II پرداخته نشده‌است؛ اما همان‌طور که مشخص است، در سازه‌های کامپوزیتی، فقط بارگذاری مود I اتفاق نیفتاده و امکان بروز انواع مختلف مودهای بارگذاری همچون مود II و مود ترکیبی I و II وجود دارد. یوسفی و همکاران، رشد جدایش بین‌لایه‌ای را در نمونه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری مود II بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های نشرآوایی را تحلیل نموده و با استفاده از الگوریتم‌های کا-مینز[9] و فازی سی-مینز[10] موفق به تفکیک و دسته‌بندی انواع خرابی‌ها در نمونه‌ها شدند. نتایج نشان داد که انواع مختلف خرابی، از لحاظ توزیع دامنه هم پوشانی زیادی داشته، اما از لحاظ توزیع فرکانسی مرز مشخصی نسبت به هم دارند. شکست الیاف بیش‌ترین فرکانس و انرژی را داشته و شکست ماتریس دارای کمترین فرکانس و انرژی است [15].

اگرچه برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی، تحت بارگذاری مود I و مود ترکیبی I و II، استاندارد تدوین شده [۱۷،۱۶]، اما برای بارگذاری مود II تاکنون استانداردی تدوین نشده است. یکی از مشکلات تعیین چقرمگی شکست در بارگذاری مود II و مودهای ترکیبی نزدیک به مود II، این است که در این مودها، به علت شرایط بارگذاری، شاهد رشد ناپایدار جدایش بین‌لایه‌ای بوده و به علت بسته بودن دهانه نمونه در حین بارگذاری، تشخیص دقیق موقعیت نوک ترک و لحظه رشد جدایش، امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در این مودها همراه با خطای بیشتری است.

بدین منظور، این پژوهش ابتدا به بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی شروع و رشد جدایش بین‌لایه‌ای، در کامپوزیت چند لایه شیشه/ اپوکسی، تحت مودهای بارگذاری I، II و مود ترکیبی I و II می‌پردازد. در ادامه، با استفاده از روش آکوستومکانیک[11] که ترکیب روش‌های نشرآوایی و مکانیکی بوده، چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در این کامپوزیت‌ها تعیین می‌گردد. این روش به ویژه در بارگذاری مود II و مودهای ترکیبیِ نزدیک به مود II که به علت بسته بودن دهانه ترک در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای، امکان مشاهده موقعیت نوک ترک امکان‌پذیر نیست، مفید است. تطابق مطلوب نتایج بدست آمده از این روش با روش‌ارائه شده در استاندارد [۱۷،۱۶]، بیانگر عملکرد مطلوب این روش در تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی است.

در انتها به وسیله تصاویر گرفته‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها، انواع مختلف سازوکارهای خرابی[12] در کامپوزیت تشخیص داده شده و نتایج صحت‌سنجی می‌شوند.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، کامپوزیت شیشه/ اپوکسی است. رزین به‌کار رفته در نمونه‌ها، اپوکسی با چگالی $1/46 g/cm^3$ است. رزین و سفت‌کننده[13] استفاده شده برای نمونه‌ها، به ترتیب اس ار 150[14] و اس دی 7561[15] بوده و

1- Thermography
2- Ultrasonic
3- X Ray
4- Acoustic Emission
5- Benzeggagh
6- Wavelet Transform
7- Fuzzy Clustering
8- Sentry Function

9- K-means
10- Fuzzy C-means
11- Acoustomechanic
12- Damage Mechanisms
13- Hardener
14- SR1500
15- SD7561

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

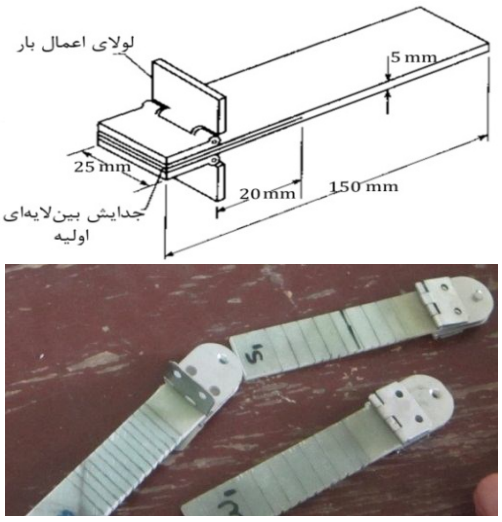
استفاده شده، الیاف شیشه نوع ای[1]است. نمونه‌ها با روش لایه‌چینی دستی ساخته‌شدند. در ادامه قطعات 48 ساعت در هوای آزاد با دمای 20 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. به منظور ایجاد جدایش بین‌لایه‌ای اولیه در نمونه‌ها، یک لایه تفلون با ضخامت تقریبی 20µm در بین دو لایه میانی کامپوزیت قرار گرفته است. از دو نوع لایه‌چینی استفاده شد؛ نمونه چندلایه با الیاف تک جهته و نمونه چندلایه با الیاف بافته‌شده. ابعاد نمونه‌ها 150×25×5 mm³ است. جدول 1 انواع نمونه‌ها و نوع لایه‌چینی هر نمونه را نشان می‌دهد. شکل 1 نمونه کامپوزیتی مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

2-2- روش آزمایش

آزمایش‌ها براساس استانداردهای ASTM D5528 [16] و ASTM D6671 [17] انجام شدند. نمونه‌های آزمایش، شامل نمونه‌های تحت بارگذاری مود I[2]، مود II[3] و مود ترکیبی I وII[4]، در شکل 2 نشان داده شده‌اند. شده‌اند. در نمونه مود I، با اعمال دو نیروی عمود بر نیمه بالایی و پایینی نمونه، بارگذاری مود I اتفاق می‌افتد. در سازوکار اعمال بار در نمونه مود II، یک نیروی عمود به سمت پایین، به وسط نمونه وارد می‌شود و بدین ترتیب بارگذاری مود II اتفاق می‌افتد. بارگذاری نمونه مود ترکیبی، تلفیقی از بارگذاری نمونه‌های مود I و مود II است. در نمونه مود ترکیبی، با تغییر موقعیت نقطه اعمال بار، امکان ایجاد ترکیب‌های مختلفی از بارگذاری مود I و II امکان‌پذیر است. آزمایش‌ها در دمای 24°C و با سرعت پیشروی ثابت 2 mm/min انجام شدند. میزان جابجایی و بار به طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت گردید و طول ترک هم به صورت چشمی در حین رشد جدایش بین‌لایه‌ای، ثبت شد.

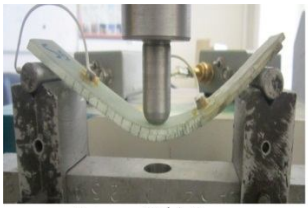
جدول 1 مشخصات نمونه‌های آزمایش

نام نمونه	نوع لایه‌چینی	مود بارگذاری
U1	تک‌جهته	مود I
W1	بافته‌شده	مودI
U2	تک‌جهته	مود ترکیبی I و II با نسبت مود 0/3
W2	بافته‌شده	مود ترکیبی I و II با نسبت مود 0/3
U3	تک‌جهته	مود II
W3	بافته‌شده	مود II



شکل 1 نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش

الف) بارگذاری مود I


ب) بارگذاری مود II

ج) بارگذاری مود ترکیبی I و II

شکل 2 نمونه‌های آزمایش تحت مودهای بارگذاری مختلف

2-3- ماشین آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا[5]، با ظرفیت 5 ton، با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری 0/1-500 mm/min استفاده شد. قطعات با سرعت 2mm/min تحت آزمایش قرار گرفتند. برای ثبت داده‌های آکوستیکی نیز از نرم افزار آی‌ای‌وین[6] و سیستم پی‌سی‌آی-2[7] با نرخ داده‌برداری 1Ms/s استفاده گردید. از دو سنسور پیزوالکتریک تک‌کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو[8]، محصول کمپانی پک[9]، مدل آر-50-دی[10] استفاده گردید. فرکانس تشدید سنسور 513/28kHz و محدوده بهینه کاری آن 100-750 kHz است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب 40dB تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلأ شده، استفاده شد. برای حذف نویزهای زمینه در حین نمونه‌برداری، حد آستانه 35dB در نظر گرفته شد. فرآیند در شکل 2 نشان داده شده است.

3- نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی

کاهش انرژی کرنشی (dU) به ازای تغییر طول جزئی ترک (da)، در یک نمونه آزمایش با عرض واحد، تحت جابجایی ثابت را نرخ آزادشدن انرژی کرنشی[11] می‌نامند و با معادله (1) تعریف می‌شود:

$$G = \frac{dU}{b \cdot da} \quad (1)$$

G نرخ آزادشدن انرژی کرنشی

U مجموع انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه

b عرض نمونه

a طول جدایش بین لایه‌ای

با توجه به سازوکار اعمال بار برای سه نمونه مود I، مود II و مود ترکیبی I و II، با استفاده از تئوری تیر، مقادیر نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در هر یک از نمونه‌ها با معادله‌های (2) تا (4) بدست می‌آید [18]:

مود I:

$$G_I = \frac{12 \cdot P^2 \cdot a^2}{E \cdot b^2 \cdot h^3} \quad (2)$$

1- E-Glass
2- DCB specimens
3- ENF specimens
4- MMB specimens

5- HIWA
6- AEWin
7- PCI-2
8- PICO
9- PAC
10- R50D
11- Energy Release Rate

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

مود II:

$$G_{II} = \frac{9 \cdot P^2 \cdot a^2}{16 \cdot E \cdot b^2 \cdot h^3} \quad (3)$$

مود ترکیبی I و II:

$$G_{\text{mixed-mode}} = G_{\text{I}} + G_{\text{II}} \quad (4)$$

که در این حالت

$$G_{\text{I}} = \frac{12 \cdot P_1^{\,2} \cdot a^2}{E \cdot b^2 \cdot h^3} \quad G_{\text{II}} = \frac{9 \cdot P_2^{\,2} \cdot a^2}{16 \cdot E \cdot b^2 \cdot h^3}$$

$$P_1 = \left(\frac{3C - L}{4L}\right) \cdot P \; ; \; P_2 = \left(\frac{C + L}{L}\right) \cdot P$$

$$\frac{G_{\text{I}}}{G_{\text{II}}} = \frac{4}{3}\left(\frac{3C - L}{C + L}\right)^2 \; , C \geq \frac{L}{3}$$

در معادله‌های (2) تا (4) کمیت‌ها عبارت‌اند از:

G_{I}	نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری مود I
G_{II}	نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری مود II
$G_{\text{mixed-mode}}$	نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری مود ترکیبی I و II
P	بار اعمال شده بر نمونه
a	طول جدایش بین‌لایه‌ای
E	مدول الاستیک نمونه در جهت الیاف
b	عرض نمونه
h	نصف ضخامت نمونه
L	نصف طول نمونه
C	فاصله نقطه اعمال بار تا وسط نمونه، در بارگذاری مود ترکیبی

در روابط (2) تا (4)، با قرار دادن مقدار بار بحرانی متناظر با شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای (P_{cr}) به جای P، نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی کامپوزیت[1]،که چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای[2] نیز نامیده می‌شود، بدست می‌آید.

در بارگذاری مود ترکیبی، نسبت مود از معادله (5) بدست می‌آید.

$$\frac{G_{\text{II}}}{G_{\text{T}}} = \frac{G_{\text{II}}}{G_{\text{I}} + G_{\text{II}}} \quad (5)$$

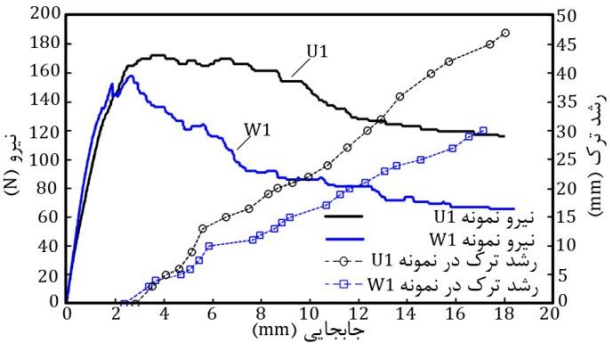
4- نتایج و بحث

4-1- مشاهدات مکانیکی

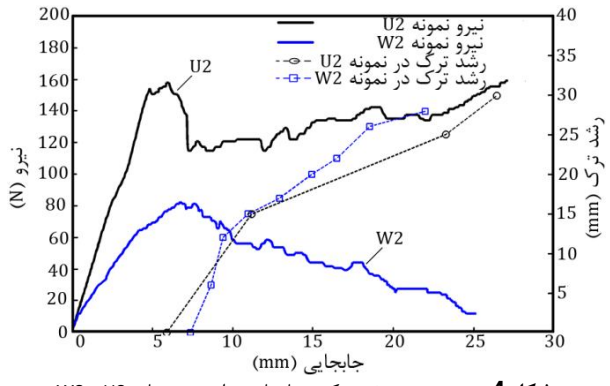
در این قسمت، از داده‌های مکانیکی و نشرآوایی ثبت شده در حین آزمایش، برای بررسی رفتار جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های مود I، مود II و مود ترکیبی I و II، استفاده می‌شود. منحنی‌های نیرو- جابجایی و رشد ترک- جابجایی، برای نمونه‌های تحت مودهای بارگذاری I، II و مود ترکیبی با نسبت مود 0/3، در شکل‌های 3 تا 5 نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های 3 تا 5، می‌توان منحنی نیرو- جابجایی هر نمونه را به سه ناحیه تقسیم نمود: الف) قبل از ناحیه غیرخطی نمودار ب) از ناحیه غیرخطی تا نیروی ماکزیمم ج) بعد از نیروی ماکزیمم. شکل‌های 6 تا 8، این سه ناحیه را برای نمونه‌ها نشان می‌دهند. علی‌رغم وجود این سه ناحیه در تمامی نمونه‌ها، می‌توان برخی تفاوت‌ها را بین رفتار مکانیکی آن‌ها، تحت بارگذاری‌های مختلف مشاهده نمود. نوع مود بارگذاری و تفاوت لایه‌چینی‌ها، از جمله مهم‌ترین دلایل این تفاوت‌هاست. برای هر نمونه با لایه‌چینی و مود بارگذاری خاص، در آغاز بارگذاری، نیرو و جابجایی رابطه‌ای خطی دارند (ناحیه الف). در این ناحیه تقریباً تمام نمونه‌ها رفتار مشابهی دارند، با این تفاوت که مقدار شیب نمودار در این ناحیه برای نمونه‌ها با لایه‌چینی مختلف متفاوت است که این امر به خاطر اختلاف مدول الاستیسیته موثر نمونه‌ها با هم است. در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته، به دلیل قرارگیری تمامی الیاف‌ها در جهت طولی، معمولاً مدول موثر بیشتر از نمونه‌های با الیاف بافته‌شده که در آن‌ها درصد الیاف در راستای طولی نمونه کمتر بوده، است. در ناحیه الف نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در نمونه‌ها کمتر از نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی بوده و جدایش بین‌لایه‌ای اولیه، رشدی نداشته‌است.

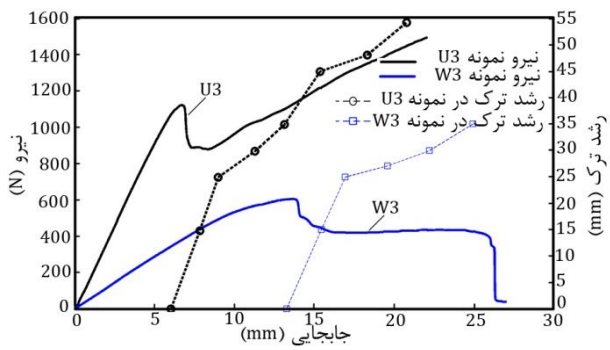
در ناحیه ب که رفتار غیرخطی مشاهده می‌شود، جدایش بین‌لایه‌ای اندکی رشد کرده و متوقف می‌شود. سپس نیرو رفته رفته افزایش یافته تا به نیروی ماکزیمم برسد. در این ناحیه مدول موثر کامپوزیت نسبت به مدول در ناحیه الف افت کرده و کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته به دلیل وقوع پدیده پل زنی الیاف در نوک جدایش بین‌لایه‌ای، مقاومت در برابر رشد جدایش بیشتر شده و در نتیجه میزان کاهش مدول موثر برای این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های با الیاف بافته‌شده، کمتر است. مقادیر مدول موثر برای نمونه‌های تحت مودهای مختلف بارگذاری، مطابق با استاندارد [17] از روابط (6) تا (8) محاسبه می‌شود:



شکل 3 منحنی نیرو- رشد ترک- جابجایی برای نمونه‌های U1 و W1



شکل 4 منحنی نیرو- رشد ترک- جابجایی برای نمونه‌های U2 و W2

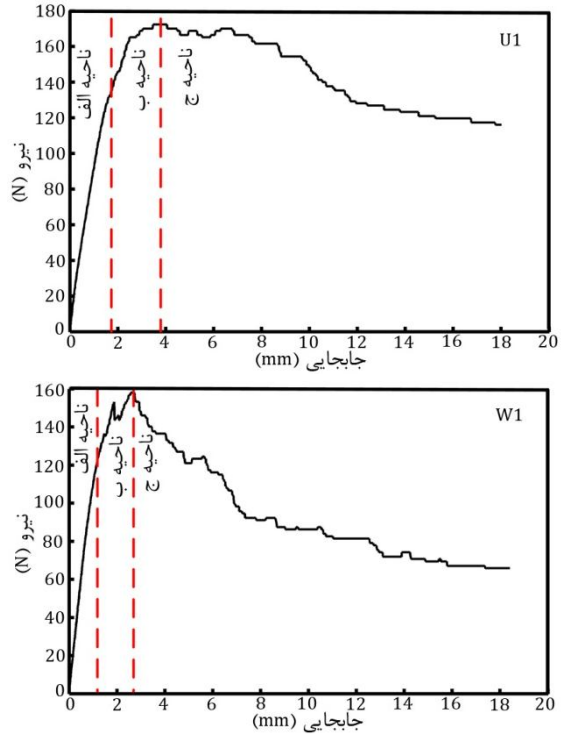


شکل 5 منحنی نیرو- رشد ترک- جابجایی برای نمونه‌های U3 و W3

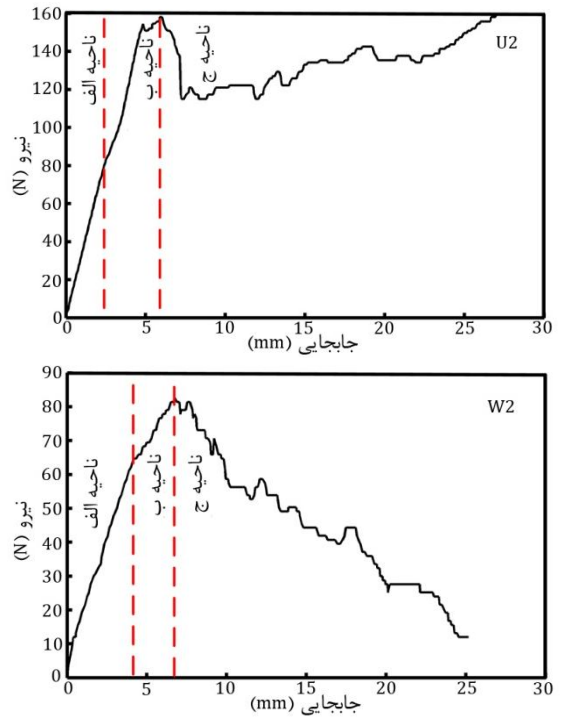
1- Critical Energy Release Rate
2- Interlaminar Fracture Toughness

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]



شکل 6 سه ناحیه الف، ب و ج در نمودار نیرو- جابجایی نمونه U1 و W1



شکل 7 سه ناحیه الف، ب و ج در نمودار نیرو- جابجایی نمونه U2 و W2

بارگذاری مود I

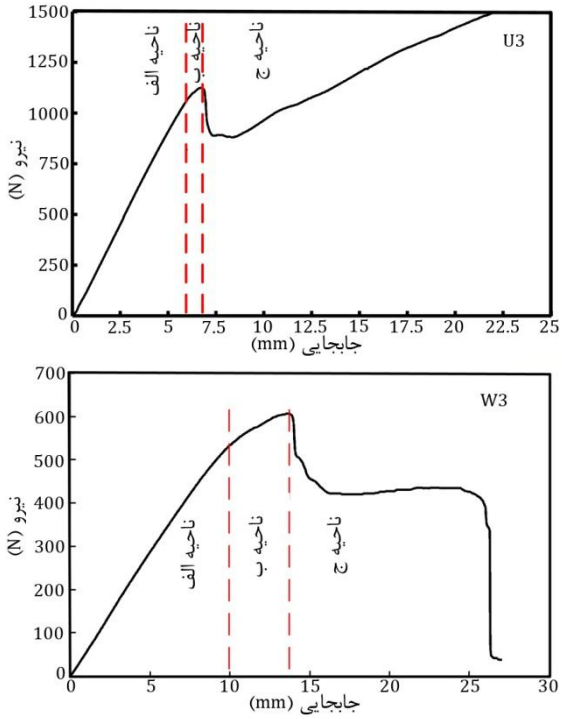
$$E_{\text{eff-mode I}} = \frac{8a^3P}{bh^3\Delta} \quad (6)$$

بارگذاری مود II

$$E_{\text{eff-mode II}} = \frac{2P}{9bh^3\Delta}(2L^3 + 3a^3) \quad (7)$$

بارگذاری مود ترکیبی I و II

$$E_{\text{eff-mixed mode}} = \frac{P}{8bh^3L^2\Delta}[4(3C - L)^2(a + h)^3 + (C + L)^2(2L^3 + 3(a + 0.42h)^3)] \quad (8)$$



شکل 8 سه ناحیه الف، ب و ج در نمودار نیرو- جابجایی نمونه U3 و W3

جدول 2 مدول موثر نمونه‌ها در نواحی الف و ب

نام نمونه	مدول موثر در ناحیه الف (GPa)	مدول موثر در ناحیه ب (GPa)	نیرو در لحظه غیرخطی شدن نمودار (N)	جابجایی در لحظه غیرخطی شدن نمودار (mm)
U1	13/6	6/1	132	1/6
W1	17/3	7	127	1/2
U2	22	16/8	83	2/5
W2	10/4	5	64/7	4/12
U3	27/5	10/4	1076	6/1
W3	8/4	3	532/8	9/9

که در روابط بالا P بار اعمال شده بر نمونه و Δ جابجایی می‌باشند. سایر متغیرها در روابط (1) تا (5) تعریف شده‌اند.

مقدار مدول موثر محاسبه‌شده برای نمونه‌ها در نواحی الف و ب، در جدول 2 آورده شده‌است.

همان‌طور که از جدول 2 مشخص است، با حرکت از بارگذاری مود I به سمت بارگذاری مود II، اختلاف بین مقادیر مدول موثر نمونه‌های با الیاف تک‌جهته و نمونه‌های با الیاف بافته‌شده، افزایش می‌یابد. همچنین در یک مود بارگذاری یکسان، به دلیل وقوع پدیده پل‌زنی الیاف در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته، میزان افت مدول موثر در ناحیه ب برای این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های با الیاف بافته‌شده است.

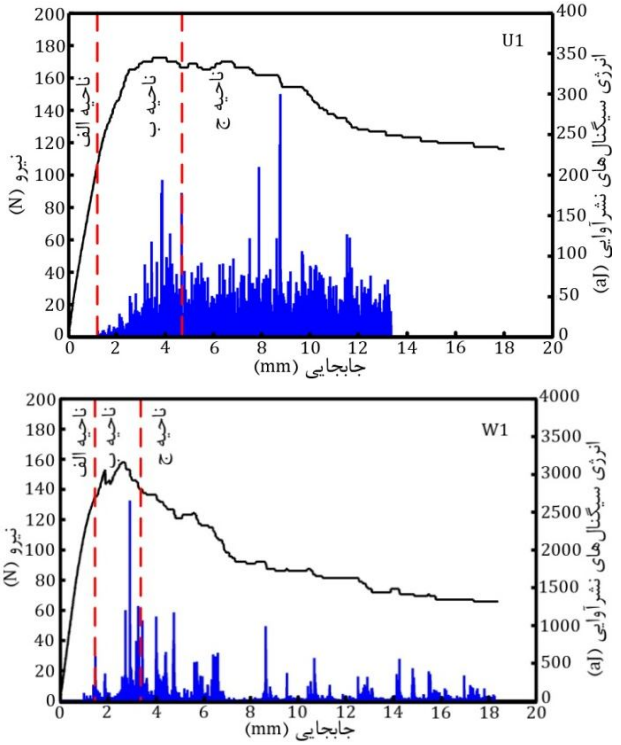
در ناحیه ج، رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای برای نمونه‌ها با هم متفاوت است. مطابق شکل 3 در نمونه‌های تحت بارگذاری مود I، جدایش بین‌لایه‌ای به صورت پایدار، پیوسته و با شیب تقریباً ثابت تا انتهای بارگذاری رشد می‌کند. مطابق شکل 6 در این نمونه‌ها، نیرو پس از مقدار ماکزیمم با یک شیب کم و به صورت آهسته کاهش می‌یابد. همچنین مشخص است که سرعت کاهش نیرو در نمونه با الیاف تک‌جهته کمتر از نمونه با الیاف بافته شده است. دلیل این امر، وقوع پدیده پل‌زنی الیاف در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته است

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

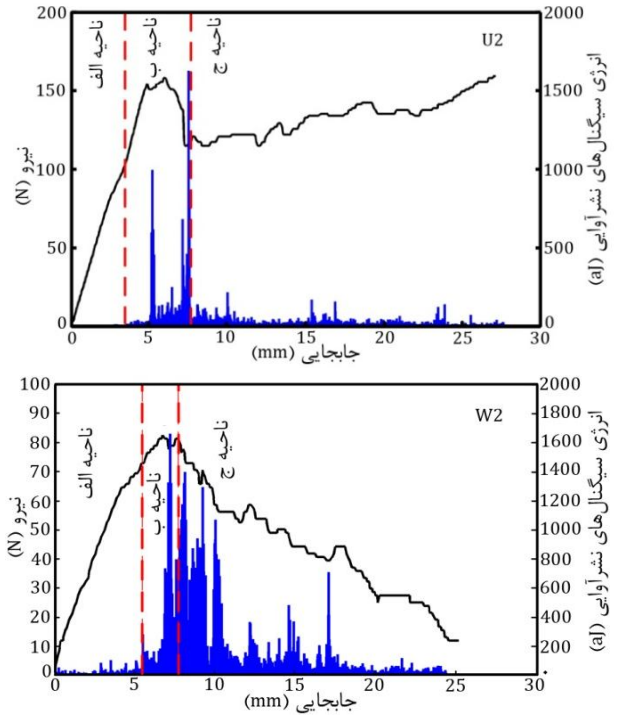
که باعث ایجاد مقاومت بیشتر در برابر رشد جدایش شده و در نتیجه نیرو آهسته‌تر کاهش پیدا می‌کند. در نمونه‌های مود ترکیبی و مود II (شکل‌های 4 و 5)، رشد جدایش بین‌لایه‌ای ابتدا به صورت ناگهانی بوده و در ادامه سرعت رشد آن کم می‌شود؛ بنابراین در این نمونه‌ها، رشد جدایش بین‌لایه‌ای حالت ناپایدار دارد. با توجه به شکل‌های 7 و 8 مشخص است که در نمونه‌های مود ترکیبی و مود II، در ناحیه ج، نیرو رفتاری دوگانه دارد. در ابتدا نیرو به شدت و با سرعتی بیشتر از نمونه‌های مود I کاهش یافته، اما در ادامه از سرعت کاهش نیرو کاسته شده و یا حتی در برخی نمونه‌ها، منحنی نیرو مجدداً افزایش می‌یابد. دلیل کم شدن نرخ کاهش نیرو، این است که در بارگذاری مود ترکیبی و مود II، دو عاملِ نیروی اعمالی بر وسط طول قطعه و پدیده پل‌زنی الیاف، از رشد بیشتر جدایش بین‌لایه‌ای ممانعت به عمل می‌آورند. بدین ترتیب که پس از رشد اولیه جدایش و افت شدید نیرو، نوک جدایش به موقعیت زیر نقطه اعمال بار در وسط نمونه رسیده و نیروی متمرکز وارد بر روی جدایش در آن نقطه، مانع از رشد بیشتر جدایش می‌شود (شکل‌های 2-ب و2-ج). ضمناً پدیده پل‌زنی الیاف نیز با افزایش مقاومت در برابر رشد ترک، سرعت رشد جدایش و کاهش نیرو را کم می‌کند. در نمونه‌های با الیاف تک جهته، به دلیل این‌که هر دو عامل فوق تأثیرگذار هستند، پس از افت اولیه نیرو شاهد افزایش مجدد نیرو هستیم؛ اما در نمونه‌های با الیاف بافته‌شده، تنها عامل نیروی متمرکز وسط، تأثیرگذار بوده و پدیده پل زنی الیاف اتفاق نمی‌افتد. در نتیجه تنها نرخ کاهش نیرو کم شده و دیگر افزایش مجدد قابل توجه نیرو را شاهد نیستیم.

4-2- مشاهدات نشرآوایی

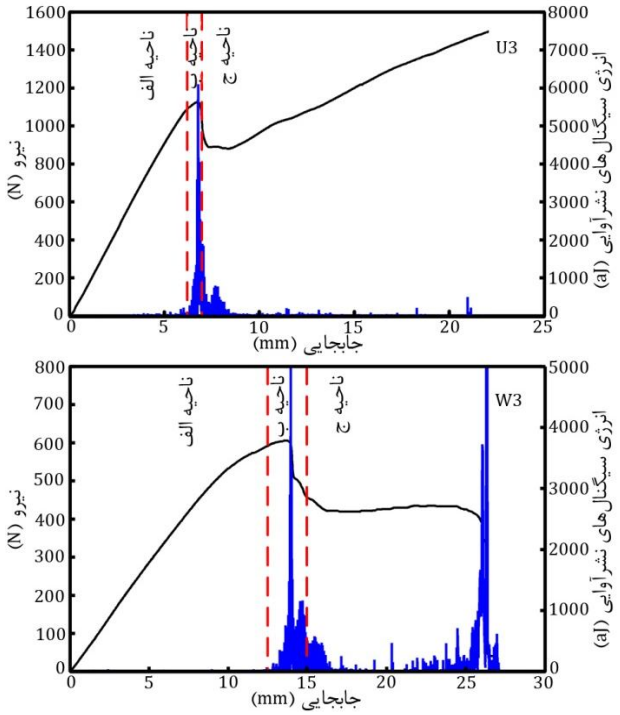
منحنی نیرو - جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی ایجاد شده توسط نمونه‌ها در حین آزمایش، در شکل‌های 9 تا 11 نشان داده‌شده است. بر اساس انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، می‌توان منحنی را به سه ناحیه تقسیم بندی نمود. در ناحیه الف، فعالیت نشرآوایی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.



شکل 9 نمودار نیرو- انرژی سیگنال‌های نشرآوایی- جابجایی برای نمونهU1 و W1



شکل 10 نمودار نیرو- انرژی سیگنال‌های نشرآوایی- جابجایی برای نمونه U2 و W2



شکل 11 نمودار نیرو- انرژی سیگنال‌های نشرآوایی- جابجایی برای نمونه U3 و W3

سیگنال‌های ضعیف اولیه می‌توانند ناشی از جدا شدن تفلون از نمونه و اصطکاک بین لایه‌ای در نمونه باشد. در ناحیه ب با فعال شدن سازوکارهای اولیه خرابی همچون ترک خوردگی ماتریس، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی رفته‌رفته افزایش می‌یابد. در نزدیکی‌های بار ماکزیمم با وقوع انواع خرابی‌ها از جمله شکست الیاف، شکست ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس، سیگنال‌های با انرژی بیشتر مشاهده می‌شوند. پس از این افزایش انرژی سیگنال‌ها، رشد جدایش بین لایه‌ای به صورت چشمی مشاهده شد. در برخی نمونه‌ها که رشد ترک به صورت رشد و توقف است (نمودار نمونه W3 در شکل 11)، در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

زمان توقف ترک و افزایش نیرو، شاهد کم بودن انرژی سیگنال‌ها بوده و در حالت رشد جدایش و کاهش نیرو، انرژی این سیگنال‌ها افزایش می‌یابد. بیش‌ترین تعداد سیگنال‌ها در ناحیه ج منحنی نیرو- جابجایی اتفاق می‌افتد.

تغییرات انرژی سیگنال‌های نشرآوایی می‌تواند نشان از وجود انواع مختلف سازوکارهای شکست در این مواد باشد. براساس مطالعه قبلی انجام شده [11]، سه نوع خرابی غالب در حین رشد جدایش بین لایه‌ای در این کامپوزیت‌ها عبارت‌اند از: شکست ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف. با توجه به خواص ویسکو الاستیک متفاوت این اجزا، خرابی هر کدام از این اجزا، محدوده فرکانسی مشخصی را داراست. شکست ماتریس سیگنال‌هایی با انرژی پایین و شکست الیاف سیگنال‌هایی با انرژی بالا ایجاد می‌کند.

3-4- اندازه‌گیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای

چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای که به آن نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی نیز گفته می‌شود، به عنوان یکی از خواص کامپوزیت‌ها در نظر گرفته می‌شود که بیان‌گر میزان مقاومت ماده در برابر رشد ترک بین‌لایه‌ای است. چون پدیده جدایش بین‌لایه‌ای امری حساس و تأثیرگذار بر خواص کامپوزیت است، به منظور تعیین قابلیت اطمینان سازه، تعیین دقیق چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای امری ضروری به نظر می‌رسد. همان‌طور که در بالا اشاره شد، برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت، در روابط (2) تا (4)، به جای P، مقدار بار بحرانی متناظر با شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای (P_{cr}) را قرار می‌دهیم. برای تعیین مقدار بار بحرانی روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله از سه روش مکانیکی، نشرآوایی و ترکیب روش‌های مکانیکی و نشرآوایی برای تعیین بار بحرانی و به تبع آن تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای استفاده می‌شود.

الف- تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از منحنی نیرو- جابجایی (روش مکانیکی)

در استاندارد ASTM D5528 [16] و ASTM D6671 [17] که برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در مود I و مود ترکیبی I و II به کار می‌روند، برای تعیین بار بحرانی، سه روش پیشنهاد شده‌است:

1- بار متناظر با نقطه‌ای که در آن نقطه، منحنی بار – جابجایی از حالت خطی خارج می‌شود.

2- بار متناظر با افزایش 5% نرمی[1] نمونه

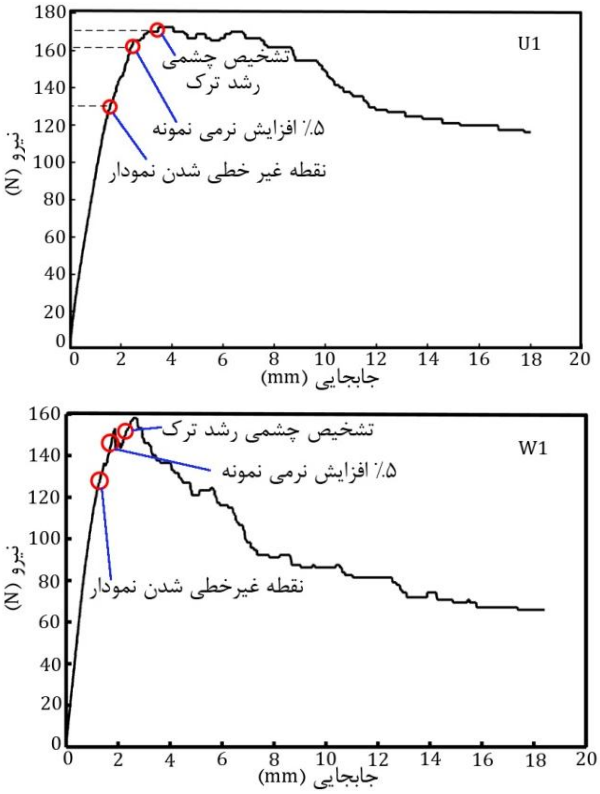
3- بار متناظر با تشخیص چشمی رشد جدایش بین‌لایه‌ای

روش 1 نسبت به دو روش دیگر، بار بحرانی پایین تری را ارائه می‌دهد و بنا به پیشنهاد استاندارد ASTM D5528 و ASTM D6671، نسبت به دو روش دیگر ارجحیت دارد.

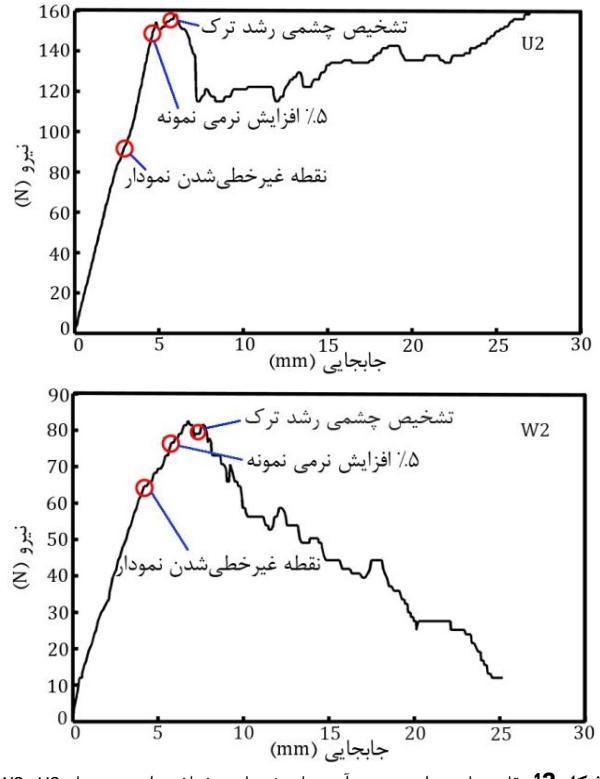
مقادیر بار بحرانی متناظر با هر یک از سه روش فوق برای نمونه‌ها، در شکل‌های 12 تا 14 نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است در تمامی نمونه‌ها، روش نقطه غیر خطی‌شدن نمودار نیرو- جابجایی، حد پایین بار بحرانی را پیش‌بینی نموده و روش تشخیص چشمی رشد ترک، حد بالای بار بحرانی را پیش‌بینی می‌نماید. به همین دلیل، در تعیین بار بحرانی، استاندارد [17،16] روش نقطه غیرخطی‌شدن نمودار نیرو- جابجایی را، نسبت به دو روش دیگر ارجح می‌داند.

ب- تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با روش نشرآوایی

همان‌طور که در قسمت 4-2 بیان شد، در لحظه شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای به علت فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی در نمونه، تعداد و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد.



شکل 12 مقادیر بار بحرانی بدست آمده با روش‌های مختلف برای نمونه U1 و W1



شکل 13 مقادیر بار بحرانی بدست آمده با روش‌های مختلف برای نمونه‌هایU2و W2

برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استفاده از روش نشرآوایی، می‌توان از نمودار مجموع انرژی نشرآوایی- جابجایی، استفاده نمود. در این نمودار، لحظه‌ای که تغییر ناگهانی درشیب منحنی مجموع انرژی نشرآوایی را شاهدیم، متناظر با لحظه شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای درنظرگرفته و بار متناظر با آن نقطه را به عنوان بار بحرانی در نظر می‌گیریم. تعیین چقرمگی

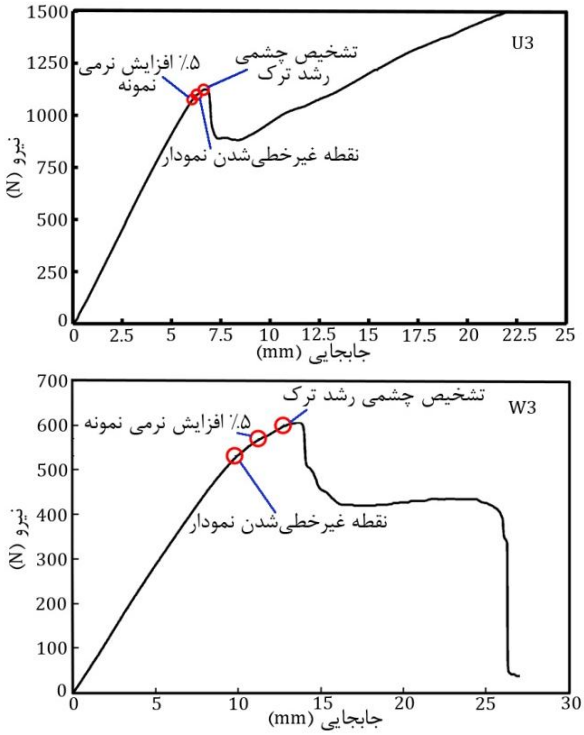
1- Compliance

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

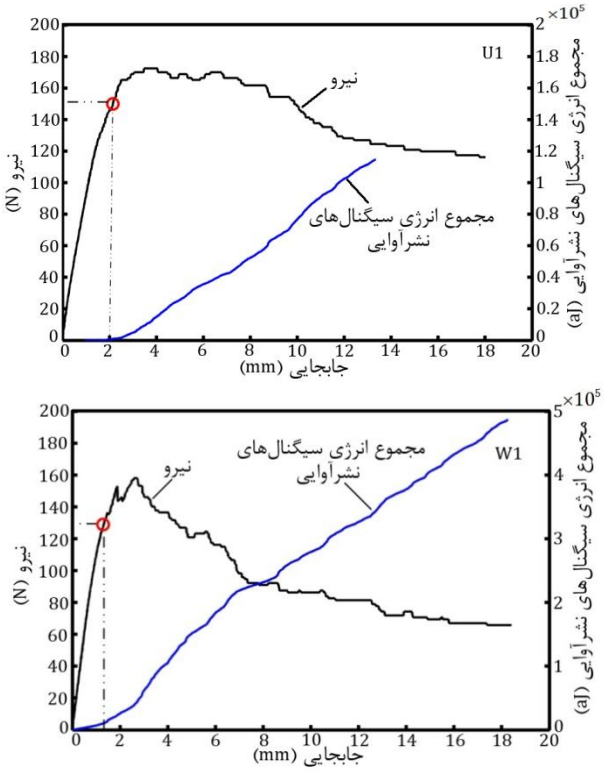
شکست بین‌لایه‌ای با این روش برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های 15تا 17نشان داده شده است.

ج- تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با روش آکوستومکانیکی

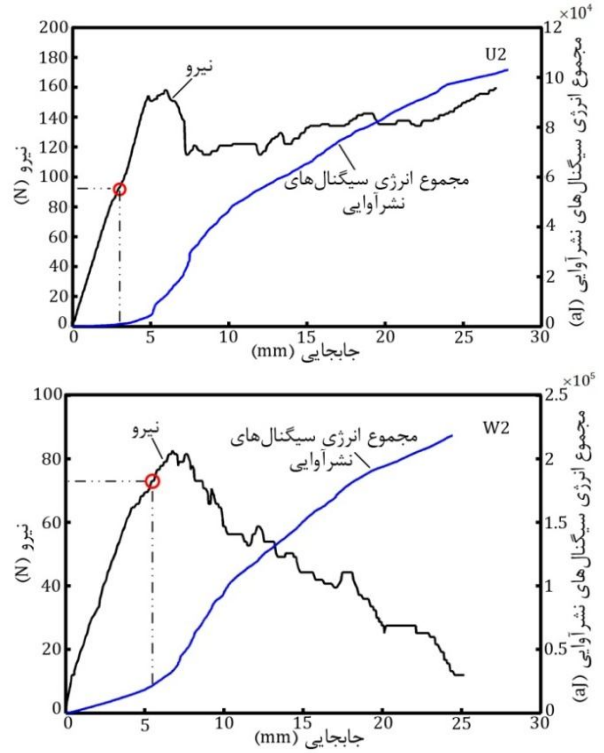
به منظور تعیین دقیق‌تر نرخ بحرانی آزاد شدن انرژی کرنشی، می‌توان از ترکیب دو روش مکانیکی و نشرآوایی استفاده نمود.



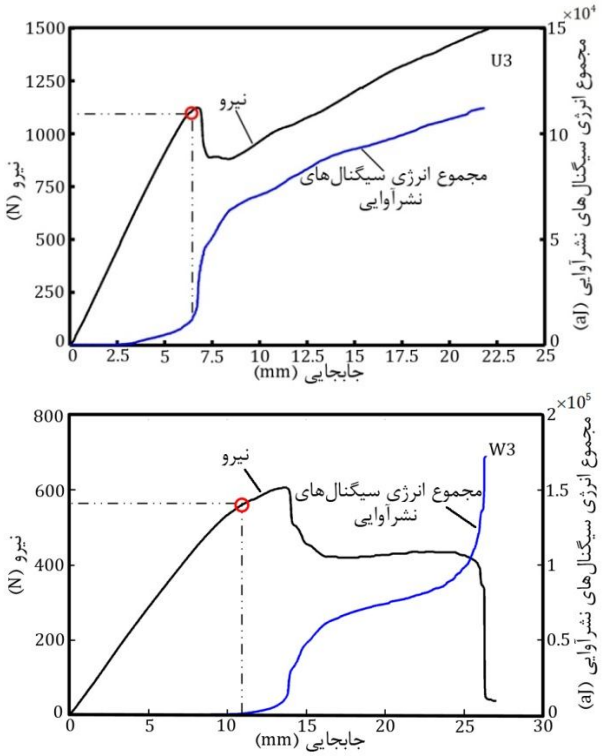
شکل 14 مقادیر بار بحرانی بدست آمده با روش‌های مختلف برای نمونه‌هایU3و W3



شکل 15 تعیین مقدار بار بحرانی با روش افزایش ناگهانی مجموع انرژی نشرآوایی برای نمونه‌های U1 و W1



شکل 16 تعیین مقدار بار بحرانی با روش افزایش ناگهانی مجموع انرژی نشرآوایی برای نمونه‌های U2 و W2



شکل 17 تعیین مقدار بار بحرانی با روش افزایش ناگهانی مجموع انرژی نشرآوایی برای نمونه‌های U3 و W3

این روش به اختصار روش آکوستومکانیکی نام‌گذاری شده‌است. در این روش از تابعی تحت عنوان تابع سنتری برای تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت استفاده می‌شود. تابع سنتری با رابطه (9) بیان می‌شود [13]:

$$f(x) = \ln[\frac{E_s(x)}{E_a(x)}] \quad (9)$$

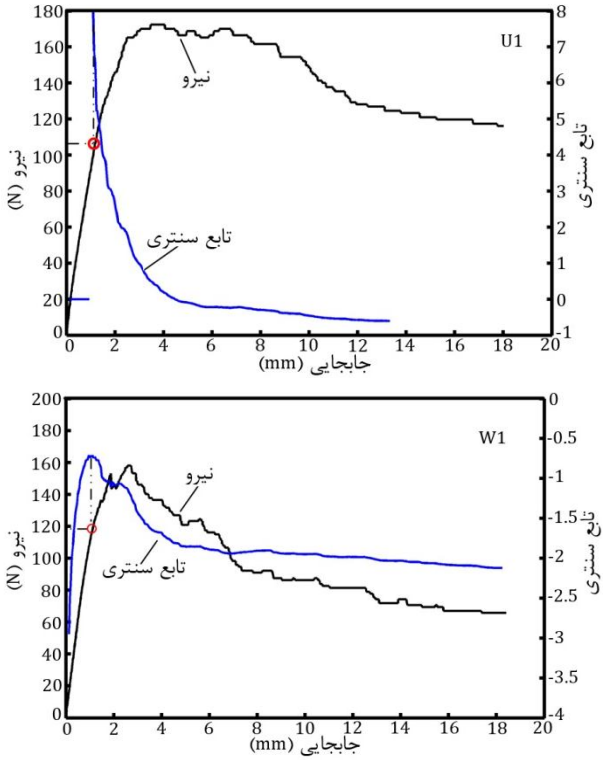
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

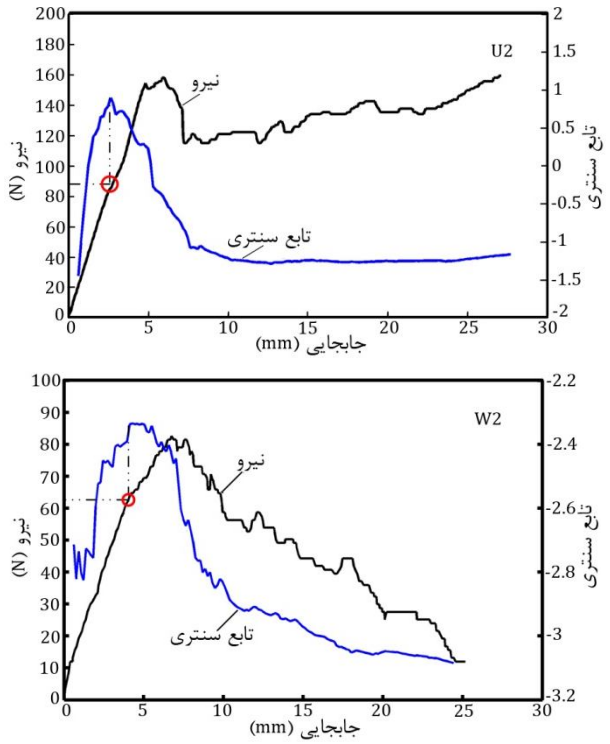
در رابطه فوق، $E_s(x)$ مجموع انرژی مکانیکی بوده و برابر با سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی تا آن لحظه است. $E_a(x)$ نیز برابر با مجموع انرژی سیگنال‌های نشرآوایی تا آن لحظه است.

با توجه به وجود سه ناحیه مختلف در منحنی نیرو- جابجایی نمونه‌ها که در قسمت 4-1 بیان‌شد، تابع سنتری در هر ناحیه، رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. در ناحیه الف که نیرو با جابجایی رابطه‌ای خطی داشته و جدایش بین‌لایه‌ای رشد نکرده، با افزایش مقدار بار، مقدار انرژی مکانیکی افزایش می‌یابد. از طرفی، چون هنوز خرابی غالبی در کامپوزیت اتفاق نیفتاده، مقدار انرژی نشرآوایی کم است. در نتیجه، در این ناحیه، تابع سنتری رفتاری صعودی داشته و مقدارش افزایش می‌یابد. در لحظه شروع رشد جدایش بین‌لایه‌ای که تعداد سیگنال‌های نشرآوایی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، تابع سنتری به صورت لحظه‌ای افت کرده و مقدارش کاهش پیدا می‌کند. با ادامه رشد جدایش بین لایه‌ای و فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی، تعداد سیگنال‌های نشرآوایی افزایش می‌یابند. در نتیجه نرخ افزایش انرژی نشرآوایی بیشتر می‌شود. از طرف دیگر، به خاطر کاهش نیرو، نرخ افزایش انرژی مکانیکی کمتر می‌شود. در نتیجه، افزایش انرژی نشرآوایی بر افزایش انرژی مکانیکی غلبه کرده و تابع سنتری سیر نزولی پیدا می‌کند. شکل‌های 18 تا 20، نمودار نیرو- جابجایی و تابع سنتری را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد.

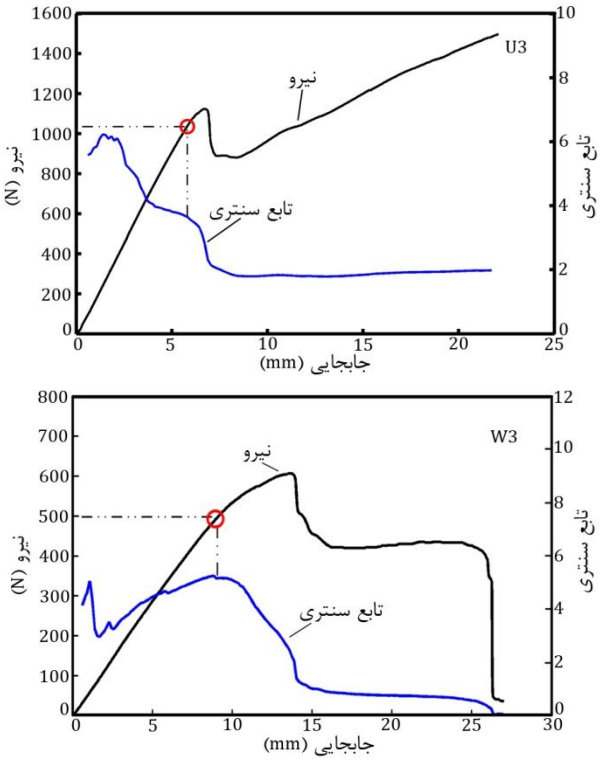
با توجه به شکل‌های 18 تا 20 مشخص است که در مود بارگذاری یکسان، تابع سنتری در نمونه‌های با الیاف تک جهته نسبت به نمونه‌های با الیاف بافته‌شده، افت‌های شدیدتری دارد. دلیل این امر این است که در نمونه با الیاف تک جهته، سازوکار غالب خرابی، شکست الیاف است که براساس تحقیقات پیشین، بیش‌ترین انرژی نشرآوایی را در بین انواع خرابی‌ها داراست.



شکل 18 رفتار تابع سنتری برای نمونه‌های U1 و W1 و تعیین مقدار بار بحرانی با این روش



شکل 19 رفتار تابع سنتری برای نمونه‌های U2 و W2 و تعیین مقدار بار بحرانی با این روش



شکل 20 رفتار تابع سنتری برای نمونه‌های U3 و W3 و تعیین مقدار بار بحرانی با این روش

در نتیجه، در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته، در لحظه شکست الیاف، نرخ افزایش انرژی نشرآوایی زیاد بوده و نرخ کاهش تابع سنتری بیشتر می‌شود. این در حالی است که در نمونه‌های با الیاف بافته‌شده، شکست الیاف به صورت جزئی اتفاق می‌افتد و سازوکار خرابی غالب، شکست و ترک‌خوردگی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

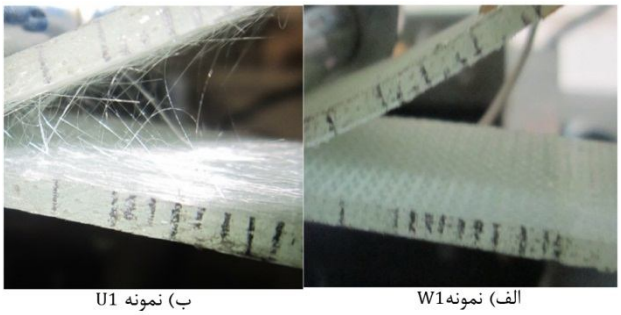
ماتریس است. شکست ماتریس انرژی نشرآوایی کمتری دارد؛ بنابراین نرخ افزایش انرژی نشرآوایی در آن کم بوده و به تبع آن، سرعت کاهش تابع سنتری هم کمتر است. شکل 21، نمونه‌های U1 و W1 را در حین بارگذاری نشان می‌دهد. پدیده پل‌زنی الیاف در نمونه U1 کاملاً مشهود است.

شکل 22 مقدار بار بحرانی بدست آمده با روش‌های ارائه شده در این مقاله را، برای نمونه W2 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، کمترین مقدار بار بحرانی را روش آکوستومکانیکی (تابع سنتری) ارائه داده و بیش‌ترین مقدار را، روش تشخیص چشمی شروع رشد ترک دارد. همچنین مشخص است که نزدیک‌ترین مقدار به بار بحرانی بدست آمده با روش نقطه غیرخطی شدن نمودار نیرو را، روش آکوستومکانیکی دارد.

مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای محاسبه‌شده برای هر نمونه، با استفاده از بار بحرانی بدست آمده از روش‌های فوق، در جدول 3 آورده شده‌است. همان‌طور که از جدول 3 مشخص است، روش آکوستومکانیکی، حد پایین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را ارائه می‌دهد. چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای به‌دست آمده از این روش، نزدیک‌ترین مقدار به چقرمگی شکست بدست‌آمده از روش نقطه غیرخطی شدن نمودار که توسط استاندارد ASTM D5528 توصیه شده‌است را دارا است. روش تشخیص چشمی رشد ترک، بالاترین مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را ارائه می‌دهد.

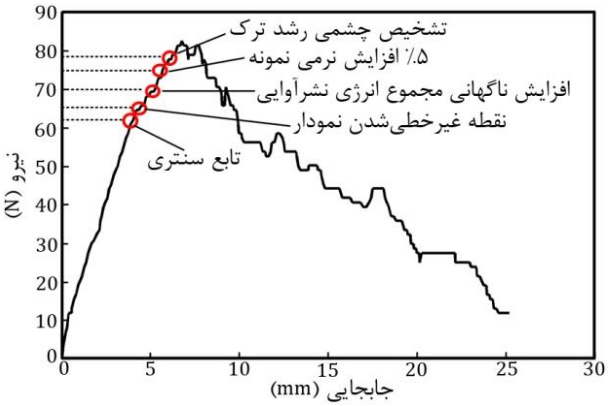
4-4- مشاهده سطوح شکست با میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل 23 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با مقایسه عکس‌های مربوط به نمونه‌های U1، U2 و U3، مشخص است که با تغییر بارگذاری از مود I به مود ترکیبی I و II و مود II، درصد شکست الیاف کمتر شده و در عوض شکست ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس افزایش می‌یابد.

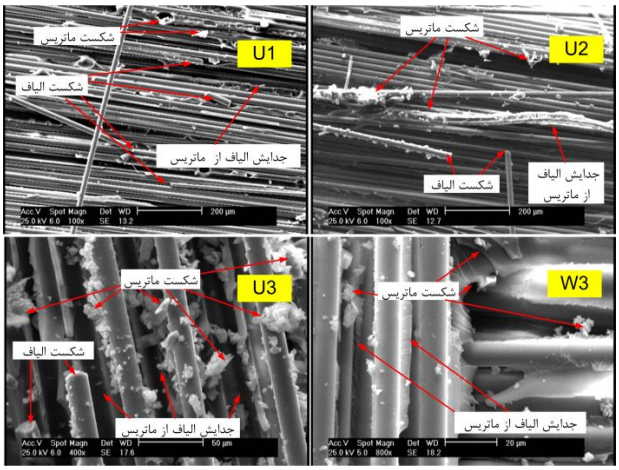


الف) نمونهW1 ب) نمونه U1

شکل 21 نمونه‌های تحت بارگذاری مود I



شکل 22 مقادیر بار بحرانی بدست آمده برای نمونه W2، با روش‌های مکانیکی، نشرآوایی و آکوستومکانیکی



شکل 23 تصاویر سطوح شکست نمونه‌های تحت بارگذاری مود I، مود ترکیبی I و II و مود II

جدول 3 مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای محاسبه‌شده با روش‌های مختلف (kJ/m^2)

نمونه	تابع سنتری	نقطه غیرخطی شدن	5% افزایش نرمی نمونه	مجموع انرژی نشرآوایی	تشخیص چشمی رشد ترک
U1	0/20	0/22	0/26	0/25	0/30
U2	0/30	0/30	0/69	0/34	0/86
U3	1/14	1/24	1/17	1/27	1/27
W1	0/28	0/30	0/50	0/28	0/53
W2	0/29	0/29	0/41	0/35	0/47
W3	0/48	0/50	0/67	0/58	0/71

دلیل این موضوع این است که در بارگذاری مود I به علت اعمال بار در راستای عمود بر لایه‌ها، مقداری از بار توسط الیاف‌های پل‌زده‌شده بین دو لایه تحمل می‌شود و در نتیجه شکست الیاف را شاهدیم. در حالی که در بارگذاری مود II به علت اعمال بار برشی درون صفحه‌ای بر کامپوزیت، اکثر بار برشی اعمالی توسط ماتریس تحمل شده و الیاف‌ها چندان تحت بارگذاری قرار نمی‌گیرند. در نتیجه در بارگذاری مود II و مود ترکیبی، شکست ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس که به خاطر برش پیوند بین آن‌ها است، سازوکار غالب خرابی هستند. ضمناً با مقایسه تصاویر سطح شکست نمونه‌های U3 و W3، مشخص است که در نمونه های بافته شده، شکست الیاف به ندرت مشاهده می‌شود.

5- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های مود I، مود II و مود ترکیبی I و II، با روش نشرآوایی پرداخته شد. نخست با استفاده از داده‌های مکانیکی، رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌های با الیاف تک‌جهته و الیاف بافته شده که تحت بارگذاری مود I، مود ترکیبی I و II و مود II قرار داشتند، بررسی شد. با مقایسه نمودار نیرو- جابجایی و رشد ترک نمونه‌های مختلف، مشخص شد که با تغییر مود بارگذاری، رفتار رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها تغییر می‌کند. در مود I، رشد جدایش بین‌لایه‌ای حالت پایدار دارد، در حالی‌که در مود II شاهد رشد ناپایدار جدایش بین‌لایه‌ای هستیم. ترکیب لایه‌چینی‌ها و مودهای بارگذاری مختلف در هر نمونه، منجر به وقوع سازوکارهای مختلف شکست در کامپوزیت می‌شوند. به طوری که در نمونه‌های با الیاف تک جهته که تحت بارگذاری مود I قرار داشتند، درصد شکست الیاف بیشتر از نمونه‌های بافته شده تحت همان مود بارگذاری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]

بود. همچنین با تغییر بارگذاری از مود I به مود ترکیبی و مود II، به تدریج درصد شکست الیاف کمتر شده، شکست ماتریس و جدایش الیاف از ماتریس افزایش می‌یابد. تفاوت این سازوکارهای شکست، منجر به تغییرات داده‌های مکانیکی نمونه‌ها می‌شود. در بخش دوم، به منظور محاسبه چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی، مقدار بار بحرانی در نمونه‌ها با سه روش مکانیکی، نشرآوایی و روش آکوستومکانیکی تعیین شد. سپس با استفاده از این مقادیر، مقدار چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای هر نمونه محاسبه گردید. در بین روش‌های مذکور، روش آکوستومکانیکی حد پایین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را ارائه داده و تطابق بسیار خوبی با مقادیر بدست آمده از روش غیرخطی شدن نمودار نیرو- جابجایی که توسط استاندارد ASTM D5528 و ASTM D6671 توصیه شده‌است، دارد. به دلیل این تطابق خوب، می‌توان از روش آکوستومکانیکی به منظور تشخیص شروع رشد جدایش و تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای، در نمونه‌های تحت بارگذاری مود ترکیبی، مود II و در سازه‌هایی با اشکال پیچیده که در آن‌ها تشخیص رشد جدایش به طور مستقیم امکان‌پذیر نبوده و رشد جدایش حالت ناپایدار دارد، استفاده شود. تصاویر گرفته‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها، نشان داد که با تغییر مود بارگذاری از مود I به مود ترکیبی و مود II، به تدریج درصد شکست الیاف در نمونه‌ها کمتر شده و شکست ماتریس و جدایش ماتریس از الیاف افزایش می‌یابد.

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

7- مراجع

[1] P. H. Ziehl, Development of a damage based design criterion for fiber reinforced vessels, Phd Thesis, The University of Texas at Austin, 2000.

[2] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, M. Hajikhani, Investigation of damage mechanisms in Glass/Epoxy composites by use of acoustic amission, 1st National Congress Aging Aircraft, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)

[3] M. G. R. Sause, T. Müller, A. Horoschenkoff, S. Horn, Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis, Composites Science and Technology, Vol. 72, No. 2, pp. 167-174, 1/18/, 2012.

[4] M. Fotouhi, F. Pashmforoush, V. Shokri, M. Ahmadi, Investigation of damage mechanisms during delamination in composites by use of Wavelet Transform, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)

[5] M. Fotouhi, H. Heidari, F. Pashmforoush, M. Ahmadi, Composite Materials Damage Characterization under Quasi-static 3-Point Bending Test Using Fuzzy C-Means Clustering, Applied Mechanics and Materials, Vol. 110-116 pp. 1221-1228, 2012.

[6] M. Hajikhani, B. Soltannia, A. R. Oskouei, M. Ahmadi, Monitoring of delamination in composites by use of Acoustic Emission, 3rd Condition Monitoring & Fault Diagnosis Conference, Tehran, Iran, 2009. (In Persian)

[7] I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arraiza, M. Lizaranzu, J. Aurrekoetxea, Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades, Composites Part B: Engineering, Vol. 42, No. 5, pp. 1298-1305, 7, 2011.

[8] R. K. Miller, Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing, 5 ed, American Society for Nondestructive Testing, 1987.

[9] F. Pashmforoush, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage Characterization of Glass/Epoxy Composite Under Three-Point Bending Test Using Acoustic Emission Technique, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, No. 7, pp. 1380-1390, 2012/07/01, 2012.

[10] M. L. Benzeggagh, M. Kenane, Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus, Composites Science and Technology, Vol. 56, No. 4, pp. 439-449, 1996.

[11] A. R. Oskouei, M. Ahmadi, Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in Glass/Polyester Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, April 1, 2010.

[12] M. Fotouhi, H. Heidary, M. Ahmadi, F. Pashmforoush, Characterization of composite materials damage under quasi-static three-point bending test using wavelet and fuzzy C-means clustering, Journal of Composite Materials, February 1, 2012.

[13] A. A. Bakhtiary Davijani, M. Hajikhani, M. Ahmadi, Acoustic Emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials, Materials & Design, Vol. 32, No. 5, pp. 3059-3065, 2011.

[14] A. R. Oskouei, A. Zucchelli, M. Ahmadi, G. Minak, An integrated approach based on acoustic emission and mechanical information to evaluate the delamination fracture toughness at mode I in composite laminate, Materials & Design, Vol. 32, No. 3, pp. 1444-1455, 3, 2011.

[15] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, A. R. Oskouei, F. J. Moghadas, Damage Categorization of Glass/Epoxy Composite Material Under Mode II Delamination Using Acoustic Emission Data: A Clustering Approach to Elucidate Wavelet Transformation Analysis, Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 1-11, 2013/09/08, 2013.

[16] ASTM D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM Standard, 2007, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

[17] ASTM D6671/D6671M – 03, Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

[18] J. H. Crews, J. R. Reeder, A mixed mode bending apparatus for delamination testing, National Aeronautics and Space Administration, 1988.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.4.20.5]