



بررسی جدایش بین لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و خستگی با روش نشرآوایی

میرمحمد موسوی نسب¹، میلاد سعیدی‌فر²، مهدی احمدی نجف‌آبادی^{3*}، حسین حسینی تودشکی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 1587-4413، ahmadin@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 اردیبهشت 1394

پذیرش: 04 خرداد 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

جدایش بین لایه‌ای

نشرآوایی

بارگذاری خستگی

علی‌رغم خواص مکانیکی بسیار مطلوب کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، امکان ایجاد انواع خرابی‌ها در این مواد وجود دارد. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده که تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و خستگی ایجاد می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چند لایه شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و خستگی مود I است. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های استاندارد با دو نوع لایه چینی تک جهت و بافته شده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مود I قرار گرفته، رفتار جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها بررسی شد و مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای آن‌ها تعیین گردید. با استخراج اطلاعات مناسب از آزمون شبه‌استاتیکی، نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند. سپس رفتار مکانیکی و نشرآوایی نمونه‌های تحت بارگذاری خستگی بررسی شد. رابطه‌ای خطی بین انرژی تجمعی نشرآوایی و رشد ترک خستگی ارائه گردید و با استفاده از رابطه حاصل منحنی رشد ترک خستگی با روش نشرآوایی پیش‌بینی شد. در ادامه، از روش نشرآوایی برای پیش‌بینی منحنی تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و منحنی نرخ رشد ترک خستگی استفاده شد. نتایج حاصل از روش نشرآوایی مطابقت مطلوبی با نتایج حاصل از استاندارد داشت. نتایج این پژوهش، نشان می‌دهد که روش نشرآوایی می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای پایش سلامت سازه‌های کامپوزیتی تحت انواع بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و خستگی به کار رود.

Investigation of delamination in laminated composites under quasi-static and fatigue loading conditions by acoustic emission

Mir Mohammad Mousavi Nasab¹, Milad Saeedifar¹, Mehdi Ahmadi Najafabadi^{1*}, Hossein Hosseini Toudeshky²

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 01 May 2015

Accepted 25 May 2015

Available Online 20 June 2015

Keywords:

Delamination

Acoustic Emission

Fatigue Loading

ABSTRACT

Despite the fact that fiber reinforced plastic composites have excellent mechanical properties, various failure mechanisms can still occur in these materials. Delamination is the most common failure mode in laminated composites that can occur under quasi-static and fatigue loading conditions. The present study is concerned with the investigation of mechanical and Acoustic Emission (AE) behavior of delamination in glass/epoxy composites under mode I quasi-static and fatigue loading conditions. First, the unidirectional and woven specimens were subjected to mode I quasi-static loading. The behavior of the delamination in the specimens was investigated and interlaminar fracture toughness of the specimens was calculated. Then, according to the information obtained from quasi-static loading, similar specimens were subjected to the fatigue loading. The mechanical and AE behavior of the delamination under fatigue loading was investigated. A linear relationship was established between cumulative AE energy and fatigue crack growth and fatigue crack growth curve was predicted using the AE method. Then, energy release rate variations curve and fatigue crack growth rate diagram were predicted using AE method. The predicted results by AE have good compatibility with the visually based data that is recommended by the standard. The results indicate that, the AE method has good applicability for health monitoring of composite structures subjected to quasi-static and fatigue loading conditions.

1- مقدمه

که دارند، امروزه به وفور در صنعت استفاده می‌شوند. با این وجود، در این

مواد امکان ایجاد انواع مکانیزم‌های خرابی از قبیل ترک‌خوردگی ماتریس،

چندلایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، به دلیل خواص مکانیکی مطلوبی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. M. Mousavi Nasab, M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of delamination in laminated composites under quasi-static and fatigue loading conditions by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 85-92, 2015 (In Persian)

بارگذاری نوسانی با تعداد سیکل‌های مختلف قرار گرفته بودند، تخمین زدند. نتایج پژوهش، بیان‌گر عملکرد مطلوب این روش در تخمین استحکام باقیمانده قطعات تحت بارگذاری خستگی است. بورچاک و همکاران [18]، از روش نشرآوایی برای تشخیص مراحل مختلف رشد آسیب در نمونه‌های کربن/اپوکسی که تحت بارگذاری نوسانی کششی قرار داشتند، استفاده نمودند. آن‌ها موفق شدند، با بررسی منحنی نرخ تولید و منحنی انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، چهار مرحله مختلف رشد آسیب در نمونه‌ها (ایجاد ترک اولیه در نمونه، رشد آهسته خرابی در نمونه، رشد سریع خرابی و رشد پایدار آسیب) را تشخیص دهند.

در پژوهش حاضر، ابتدا رفتار مکانیکی و نشرآوایی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت چند لایه شیشه/اپوکسی، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی بررسی می‌شود. سپس با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمون شبه‌استاتیکی، نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند. ابتدا، با استفاده از داده‌های مکانیکی و نشرآوایی، رفتار رشد جدایش بین لایه‌ای تحت بارگذاری خستگی بررسی شد. در ادامه، رابطه‌ای خطی بین انرژی تجمعی نشرآوایی و رشد ترک خستگی ارائه شده و با استفاده از رابطه حاصل منحنی رشد ترک خستگی با روش نشرآوایی پیش‌بینی شد. در ادامه، از روش نشرآوایی برای پیش‌بینی منحنی تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و منحنی نرخ رشد ترک خستگی استفاده شد. نتایج حاصل از روش نشرآوایی مطابقت مطلوبی با نتایج حاصل از استاندارد داشت. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که روش نشرآوایی می‌تواند به عنوان ابزاری سودمند در پایش سلامت سازه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و خستگی به کار رود.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، کامپوزیت شیشه/اپوکسی با دو نوع لایه‌چینی تک جهت³ [0] و بافته شده⁴ [0-90] است. رزین به‌کاررفته در نمونه‌ها، اپوکسی با چگالی $1/17 \text{ g/cm}^3$ ساخت شرکت هانتسمن⁵ است. رزین و سفت‌کننده⁶ استفاده‌شده برای نمونه‌ها، به ترتیب آرالایت ال‌وای 5052⁷ و آرادور 5052⁸ بوده و الیاف استفاده شده، الیاف شیشه نوع ای⁹ ساخت شرکت کولان¹⁰ است. الیاف‌های تک‌جهته استفاده شده از نوع آی‌تی 390 یودی¹¹ 038 و الیاف‌های بافته شده از نوع کولان آی‌اف 1207¹² می‌باشند. نمونه‌ها با روش لایه‌چینی دستی ساخته‌شدند. در ادامه قطعات 48 ساعت در هوای آزاد با دمای 20°C درجه سانتی‌گراد، تحت فشار قرار داده شدند. به منظور ایجاد جدایش بین لایه‌ای اولیه در نمونه‌ها، در حین ساخت نمونه‌ها یک لایه تفلون با ضخامت تقریبی $20 \mu\text{m}$ در بین دو لایه میانی کامپوزیت قرار داده شد. ابعاد نمونه‌ها $180 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ است. طول جدایش اولیه نمونه‌ها 70 mm بوده که پس از اتصال لولاهای به نمونه، طول جدایش مؤثر برابر 40 mm می‌شود. شکل 1 نمونه کامپوزیتی مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد. جدول 1 انواع نمونه‌ها و نوع لایه‌چینی هر نمونه را نشان می‌دهد.

شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای وجود دارد [1-3]. جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده، که عبارت است از رشد ترک بین لایه‌ای و جدا شدن دو لایه از یکدیگر در فصل مشترک لایه‌ها [4-5]. جدایش بین لایه‌ای منجر به کاهش صلبیت و استحکام سازه می‌شود. این خرابی تحت انواع مودهای بارگذاری I، II، III و ترکیبی از این مودها اتفاق می‌افتد اما به علت انرژی کمتر لازم برای شروع رشد جدایش بین لایه‌ای در بارگذاری مود I، وقوع جدایش بین لایه‌ای در این مود بارگذاری شایع‌تر است [6-7].

پدیده خستگی در کامپوزیت‌ها، به دلیل ناهمسانگردی و ناهمگنی ساختار ماده، ماهیتی پیچیده دارد [8]. رشد آسیب خستگی در کامپوزیت‌ها، ناشی از انباشت میکروخرابی‌هایی همچون شکست ماتریس، شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس است. بنابراین، روشی که برای پایش سلامت کامپوزیت تحت بارگذاری خستگی استفاده می‌شود، باید قابلیت تشخیص انواع مکانیزم‌های خرابی در سازه را داشته باشد [9].

به دلیل این‌که جدایش بین لایه‌ای در بین لایه‌های کامپوزیت اتفاق می‌افتد، اغلب با بازرسی چشمی غیر قابل تشخیص بوده یا تشخیص آن بسیار مشکل است. برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای تاکنون روش‌های غیرمخرب مختلفی ارائه شده است [10]. یکی از این روش‌ها، روش نشرآوایی است. انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی¹ گویند [11]. این روش، از جمله روش‌های غیرفعال 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 ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس اشاره نمود [12-3].

سعیدی‌فر و همکاران [13]، با روش نشرآوایی رشد جدایش بین لایه‌ای را در کامپوزیت‌های ساندویچی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از ترکیب داده‌های مکانیکی و نشرآوایی توانستند رفتار جدایش بین لایه‌ای را بررسی نموده و چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت را تعیین نمایند. پاکت [14]، از پارامترهای نرخ تولید و دامنه سیگنال‌های نشرآوایی برای مکان‌یابی و تشخیص آسیب‌های به وجود آمده در یک صفحه کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی که تحت بارگذاری نوسانی فشاری قرار داشت، استفاده نمود. رومانی و همکاران [15]، با ارائه یک الگوریتم مکان‌یابی نشرآوایی توانستند رشد ترک خستگی را در نمونه‌های استاندارد مود I (DCB^2) از جنس کربن/اپوکسی که تحت بارگذاری نوسانی قرار داشت، پیش‌بینی نمایند. در روش آن‌ها، با استفاده از دو سنسور نشرآوایی در ناحیه رشد ترک، سیگنال‌های خارج از ناحیه حذف شده، سپس از سیگنال‌هایی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، میانگین گرفته شده و بدین ترتیب منحنی رشد ترک در نمونه تخمین زده شد. سیلورساید و همکاران [16]، با استفاده از نشرآوایی، لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای را در نمونه‌های کربن/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و نوسانی مود I و مود ترکیبی I و II تعیین نمودند. نتایج نشان داد، روش نشرآوایی لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای را زودتر از روش ارائه شده در استاندارد تشخیص می‌دهد. لیون و همکاران [17]، با ترکیب روش‌های نشرآوایی و شبکه‌های عصبی، استحکام باقیمانده قطعات شیشه/اپوکسی که تحت

3- Unidirectional
4- Woven
5- Huntsman
6- Hardener
7- Araldite LY 5052
8- Aradure 5052
9- E-Glass
10- COLAN
11- AT 390 UD 038
12- COLAN AF 207

1- Acoustic Emission (AE)
2- Double Cantilever Beam (DCB)

شدند. نمونه‌های DCB تحت بارگذاری مود I، در شکل 2 نشان داده شده‌اند. در نمونه DCB با اعمال دو نیروی عمود بر لبه بالایی و پایینی نمونه، بارگذاری مود I محقق می‌شود. آزمایش‌ها در دمای 24°C و با سرعت پیشروی ثابت 3 mm/min انجام شدند. میزان جابجایی و بار اعمالی به دو بازوی نمونه، به طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شده و طول ترک هم با استفاده از دوربین فیلمبرداری مدل سونی اچ دی آر- ایکس آر 150⁸ با بزرگنمایی اپتیکال $25\times$ و بزرگنمایی دیجیتال $300\times$ ، در حین رشد جدایش بین لایه-ای به طور پیوسته ثبت گردید. به منظور ثبت سیگنال‌های نشرآوایی در حین آزمایش، دو سنسور بر روی سطح بالایی نمونه‌ها قرار داده شد. یک سنسور 15 mm قبل از نوک جدایش اولیه و سنسور دوم 80 mm بعد از نوک جدایش اولیه، بر روی سطح نمونه قرار داده شد. هدف از این نوع چیدمان، ثبت کلیه سیگنال‌های نشرآوایی مربوط به ناحیه خرابی و امکان مکان‌یابی منبع ایجاد سیگنال‌های نشرآوایی است. استفاده از دو سنسور نشرآوایی، این اجازه را به کاربر داده که سیگنال‌های نشرآوایی تولید شده در خارج از ناحیه خرابی، همچون سیگنال‌های مربوط به اصطکاک بین اجزای ماشین‌آلات آزمایش و سایر نویزهای ایجادشده در حین آزمایش را به سادگی حذف نماید. به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، در هر حالت سه نمونه مشابه مورد آزمایش قرار گرفت.

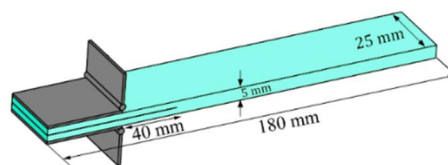
2-4-2- بارگذاری خستگی

آزمایش‌های این بخش، براساس استاندارد ASTM D6115 [20] انجام شدند. نمونه‌های آزمایش تحت بارگذاری خستگی مود I، در شکل 3 نشان داده شده‌اند. آزمایش‌ها در دمای 24°C و با فرکانس بارگذاری 3 Hz انجام شدند. میزان جابجایی و بار اعمالی به لبه نمونه، به طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شد. طول ترک هم با استفاده از دوربین فیلمبرداری مدل سونی اچ دی آر- ایکس آر 150 با بزرگنمایی اپتیکال $25\times$ و بزرگنمایی دیجیتال $300\times$ ، در حین رشد جدایش بین لایه‌ای به صورت پیوسته ثبت گردید. نسبت $R = \frac{d_{\min}}{d_{\max}}$ برای همه نمونه‌ها برابر مقدار ثابت $0/4$ انتخاب شد. به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، در هر حالت سه نمونه مشابه مورد آزمایش قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- بارگذاری شبه استاتیکی

در این بخش، از داده‌های مکانیکی ثبت شده در حین رشد جدایش بین لایه-ای در نمونه‌ها، برای بررسی رفتار جدایش بین لایه‌ای استفاده می‌شود. نمونه‌ها مطابق اطلاعات بخش 2-4-1، تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار



شکل 1 نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش

جدول 1 مشخصات نمونه‌های آزمایش

نام نمونه	نوع لایه چینی	نوع بارگذاری	مود بارگذاری
U_S	تک‌جهته	شبه‌استاتیکی	مود I
W_S	بافته‌شده	شبه‌استاتیکی	مود I
U_F	تک‌جهته	خستگی	مود I
W_F	بافته‌شده	خستگی	مود I

2-2- دستگاه آزمون کشش شبه‌استاتیکی و خستگی

برای بارگذاری شبه استاتیکی نمونه‌ها، از دستگاه آزمون کشش مدل هیوا¹ با ظرفیت 5 ton ، با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری در محدوده $0/1-500\text{ mm/min}$ استفاده شد. قطعات با سرعت ثابت 3 mm/min تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار گرفتند. به منظور بارگذاری نوسانی نمونه‌ها (آزمون خستگی)، از دستگاه دارتک² با ظرفیت 5 ton و با قابلیت بارگذاری در محدوده فرکانسی $1-100\text{ Hz}$ استفاده شد. نمونه‌های آزمون خستگی، با فرکانس 3 Hz تحت بارگذاری نوسانی در حالت کشش-کشش قرار گرفتند.

3-2- دستگاه نشرآوایی

برای ثبت داده‌های نشرآوایی در حین آزمایش‌ها، از سیستم نشرآوایی دوکاناله، به همراه نرم‌افزار آی‌ای‌وین³ و سیستم پی‌سی‌آی-42⁴ با نرخ داده‌برداری 1 Ms/s استفاده گردید. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو⁵، محصول کمپانی پک⁶، مدل آر-50-دی⁷ استفاده شد. فرکانس تشدید سنسور $513/28\text{ kHz}$ و محدوده بهینه کاری آن $100-750\text{ kHz}$ است. فعالیت‌های شناسایی‌شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب 40 dB تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلأ استفاده شد. به دلیل این‌که سنسورهای نشرآوایی به نویزهای مکانیکی و مغناطیسی حساس بوده، لذا برای شناسایی و حذف نویزها، ابتدا دستگاه آزمون کشش شبه‌استاتیکی و خستگی را به صورت بدون بار، چندین مرتبه به سمت بالا و پایین حرکت داده و سیگنال‌های نشرآوایی ثبت‌شده توسط سنسورها که ناشی از نویزهای مغناطیسی و مکانیکی دستگاه و محیط است، با تنظیم سطح آستانه حذف می‌گردند. با انجام این فرآیند، حد آستانه 37 dB برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد، به طوری‌که در حین آزمایش نمونه‌ها، نویزها حذف شده و دستگاه نشرآوایی فقط فعالیت‌های نشرآوایی نمونه‌های آزمایش را ثبت می‌نماید.

4-2- روش آزمایش

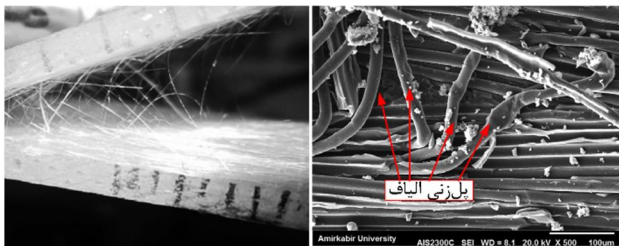
4-2-1- بارگذاری شبه استاتیکی

آزمایش‌های شبه استاتیکی براساس استاندارد ASTM D5528 [19] انجام



شکل 2 آزمون شبه استاتیکی رشد جدایش بین لایه‌ای، تحت بارگذاری مود I

1- HIWA
2- Dartec
3- AEWin
4- PCI-2
5- PICO
6- PAC
7- R50D



شکل 5 وقوع پدیده پل زنی الیاف در نمونه با الیاف تک جهته

این نمونه‌ها با وقوع پدیده پل زنی الیاف در پشت ترک، رشد ترک متوقف شده، بار آهسته آهسته بالا رفته و زمانی که نیرو به حد شکست الیاف‌ها برسد، الیاف‌ها شکسته شده و نوک ترک به صورت ناگهانی رشد کرده و با وقوع پدیده پل زنی مجدد الیاف‌ها، جدایش بین لایه‌ای متوقف می‌شود. هم-چنین حالت افت و خیز نمودار نیرو-جابجایی نمونه U_s در ناحیه III، نشان-دهنده وقوع پدیده پل زنی الیاف در نمونه است.

به منظور انجام آزمایش بارگذاری خستگی، ابتدا نیاز است که مقادیر نیرو و جابجایی متناظر با لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها تعیین شده و با استفاده از این مقادیر مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها تعیین شود. به منظور تعیین مقادیر نیرو و جابجایی بحرانی و چقرمگی شکست بین لایه‌ای، از روش ارائه شده در استاندارد ASTM D5528 [19]، استفاده شد.

مطابق روند ارائه شده در استاندارد ASTM D5528، به منظور تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای در کامپوزیت، ابتدا، بار بحرانی (P_c) و جابجایی بحرانی (d_c) متناظر با لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه DCB را تعیین نموده، با قرار دادن این مقادیر در معادله (1) مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها تعیین می‌گردد. به منظور تعیین لحظه شروع رشد جدایش بین لایه‌ای، در استاندارد ASTM D5528 سه روش پیشنهاد شده است. (I) روش NL: بار و جابجایی متناظر با نقطه غیرخطی شدن منحنی نیرو-جابجایی نمونه، (II) روش VIS: بار و جابجایی متناظر با لحظه تشخیص چشمی رشد جدایش بین لایه‌ای و (III) روش $5\%/max$: بار و جابجایی متناظر با لحظه افزایش 5% نرمی¹ نمونه، یا بار و جابجایی متناظر با لحظه‌ای که نیرو به بیشینه مقدارش می‌رسد.

بر اساس آنچه که در استاندارد ASTM D5528 بیان شده است، روش حد پایین مقادیر چقرمگی شکست را ارائه داده و روش‌های VIS و $5\%/max$ حد بالای مقادیر چقرمگی شکست را ارائه می‌دهند. همچنین بیان شده، که مقادیر بدست آمده با روش NL نسبت به دو روش دیگر ارجحیت داشته و این روش توسط استاندارد ASTM D5528 توصیه می‌گردد [19].

شکل 6 مقادیر بار بحرانی و جابجایی بحرانی بدست آمده توسط هر کدام از سه روش فوق را برای نمونه‌های U_s و W_s نشان می‌دهد. برای تعیین دقیق‌تر چقرمگی شکست بین لایه‌ای باید مقدار طول ترک اصلاح شود [19]. برای تعیین پارامتر اصلاح طول ترک (d)، بایستی منحنی نرمی نمونه-طول ترک را رسم نموده، سپس یک خط مستقیم بر داده‌ها برازش داد. نقطه تلاقی خط برازش داده شده با محور افقی نمودار، بیان‌گر مقدار d است [19]. شکل 7 روند تعیین پارامتر d را برای نمونه U_s نشان می‌دهد. مقدار d برای نمونه‌های U_s و W_s به ترتیب برابر $4/6$ mm و $2/7$ mm بدست آمد.

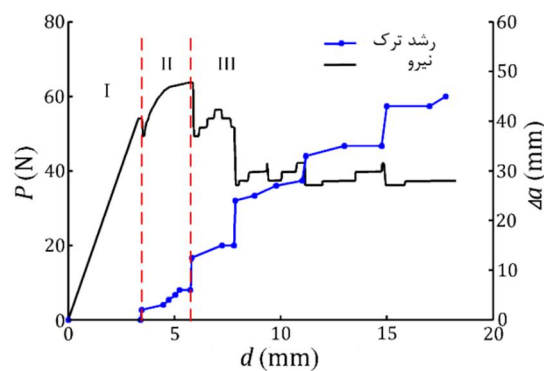
با جایگذاری مقادیر بدست آمده در معادله (1)، مقدار چقرمگی شکست



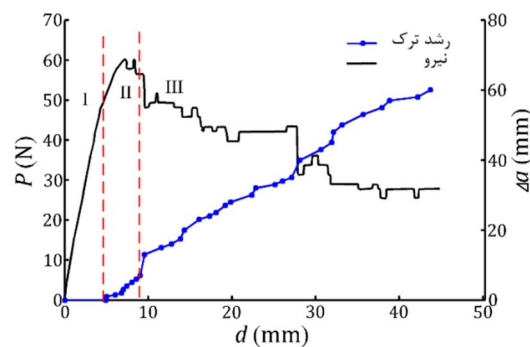
شکل 3 آزمون خستگی رشد جدایش بین لایه‌ای، تحت بارگذاری مود I

گرفتند. شکل 4 نمودارهای نیرو-جابجایی و رشد جدایش بین لایه‌ای-جابجایی نمونه‌های U_s و W_s را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل 4 مشخص است، نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود: (I) ناحیه خطی منحنی نیرو-جابجایی (II) از نقطه غیرخطی شدن منحنی تا نیروی ماکزیمم (III) بعد از نیروی ماکزیمم، در نمودار نیرو-جابجایی نمونه U_s در ناحیه I، نیرو با جابجایی رابطه‌ای خطی داشته و جدایش بین لایه‌ای رشد نکرده است. در ابتدای ناحیه II، یک افت کوچک در نمودار نیرو-جابجایی را شاهدیم، که این افت متناظر با لحظه آغاز جدایش بین لایه‌ای در نمونه است. پس از این رشد لحظه‌ای، مدول مؤثر نمونه کاهش می‌یابد. به دلیل پدیده پل زنی الیاف، نیرو مجدداً افزایش یافته و با رسیدن نیرو به حد تحمل نهایی نمونه، جدایش بین لایه‌ای به سرعت رشد نموده و نیرو افت می‌کند.

با مقایسه نمودار رشد جدایش بین لایه‌ای دو نمونه U_s و W_s ، مشاهده می‌شود که رشد ترک در نمونه W_s حالتی پیوسته و یکنواخت‌تر داشته، درحالی‌که رشد ترک در نمونه U_s ، حالت رشد ناگهانی-توقف دارد. دلیل این امر پدیده پل زنی الیاف در نمونه‌های با الیاف تک جهته است (شکل 5). در



(الف)



(ب)

شکل 4 نمودار نیرو-جابجایی و رشد جدایش بین لایه‌ای-جابجایی نمونه الف) U_s و ب) W_s .

1- Compliance

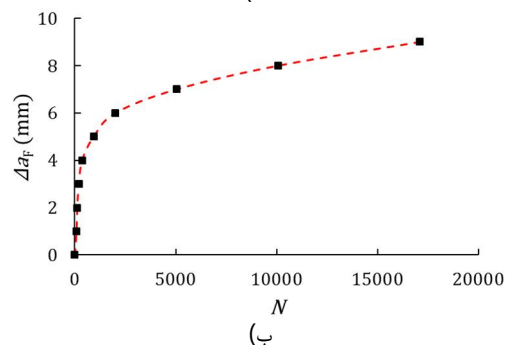
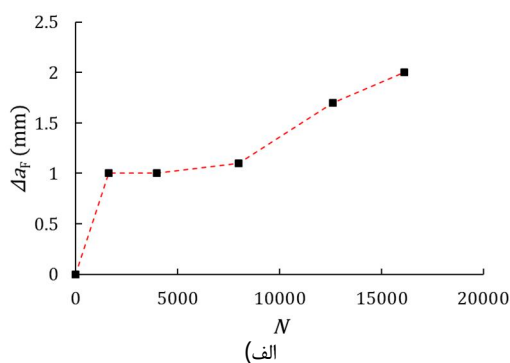
تست‌های شبه استاتیکی انجام شده و مقادیر چقرمگی شکست بدست آمده برای نمونه‌ها، نمونه‌ها براساس پارامترهای بارگذاری جدول 3 تحت آزمون خستگی در حالت بارگذاری کششی- کششی قرار گرفتند.

شکل 8، نمودار رشد ترک خستگی- تعداد سیکل را برای نمونه‌های U_F و W_F نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (8-الف) و (8-ب) مشخص است، که مشابه حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی، رشد ترک در نمونه با الیاف تک جهته (U_F) رفتار رشد-توقف را داشته و رشد ترک در آن به صورت مداوم و پیوسته نیست. دلیل این امر، وقوع پدیده پل زنی الیاف در نمونه است. اما در نمونه با الیاف بافته شده (W_F) مشابه بارگذاری شبه‌استاتیکی، رشد ترک رفتاری پیوسته و یکنواخت دارد. همچنین، مشخص است که به دلیل پدیده پل زنی الیاف در نمونه U_F ، نرخ رشد ترک در این نمونه، نسبت به نمونه W_F کمتر است. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌ها و رشد جدایش بین لایه‌ای، نرخ رشد جدایش بین لایه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که، چون آزمایش در حالت کنترل جابجایی انجام شده، در نتیجه مقدار جابجایی بیشینه و کمینه همواره در طول آزمایش ثابت است، اما با افزایش تعداد سیکل‌ها و رشد ترک، نیروی اعمالی به نمونه کاهش یافته و مطابق معادله (1)، میزان نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی کاهش می‌یابد. در نتیجه، رفته رفته نرخ رشد ترک، کم می‌شود.

شکل 9 نمودار رشد ترک خستگی و انرژی نشرآوایی را برای نمونه‌های U_F و W_F نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، در تعداد سیکل‌های کم، که نرخ رشد ترک و گسترش خرابی در نمونه زیاد است، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی زیاد بوده و با افزایش تعداد سیکل‌ها و کاهش نرخ گسترش آسیب، از انرژی سیگنال‌های نشرآوایی کاسته می‌شود.

جدول 3 مشخصات نمونه‌ها و پارامترهای بارگذاری آن‌ها.

نمونه	$R = \frac{d_{min}}{d_{max}}$	d_{max} (mm)	d_{min} (mm)	فرکانس بارگذاری (Hz)
U_F	0/4	3	1/2	3
W_F	0/4	6	2/4	3



شکل 8 نمودار رشد ترک- تعداد سیکل، برای نمونه‌های الف) U_F و ب) W_F .

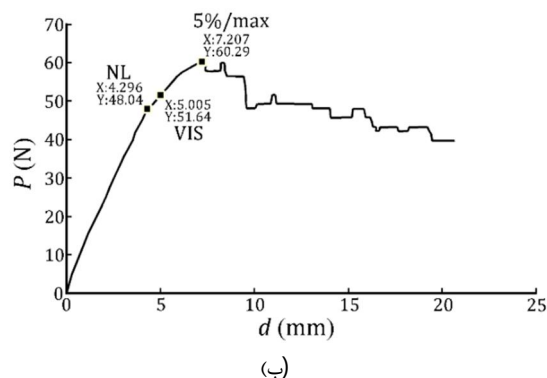
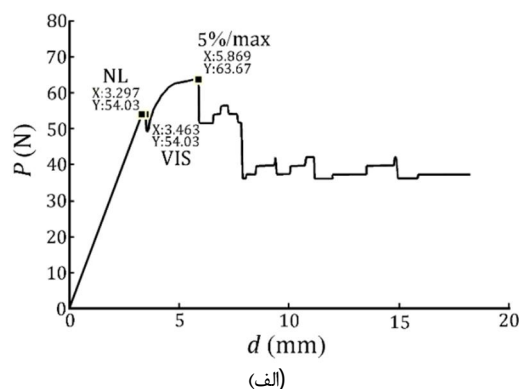
نمونه‌ها بدست می‌آید [19]. جدول 2 مقادیر چقرمگی شکست بدست آمده برای نمونه‌ها با سه روش فوق، را نشان می‌دهد.

$$G_I = \frac{3Pd}{2B(a + |d|)} \quad (1)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش NL حد پایین مقادیر چقرمگی شکست را ارائه می‌دهد. برای محاسبه پارامترهای بارگذاری خستگی از مقادیر بدست آمده از روش NL استفاده می‌شود.

2-2- بارگذاری خستگی

به منظور بررسی رفتار جدایش بین لایه‌ای تحت بارگذاری خستگی، نمونه‌های DCB تحت بارگذاری نوسانی با فرکانس 3 Hz قرار گرفتند. با توجه به

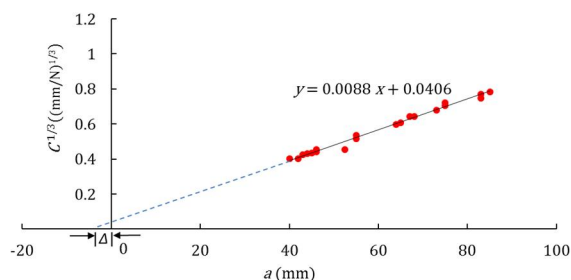


شکل 6 مقادیر بار بحرانی و جابجایی بحرانی بدست آمده توسط روش‌های ارائه شده در استاندارد ASTM D5528 برای نمونه‌های الف) U_S و ب) W_S

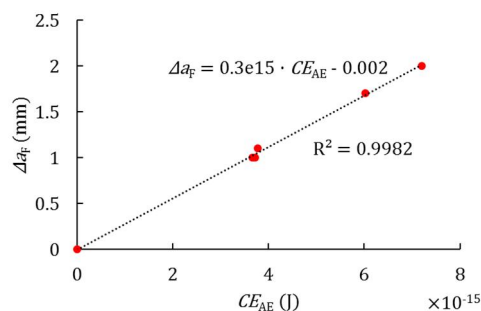
جدول 2 مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها، براساس روش‌های ارائه شده

در استاندارد ASTM D5528.

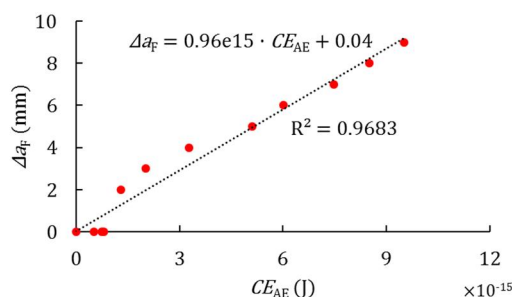
نمونه	G_{IC} (kJ/m ²)		
	5%/max	VIS	NL
U_S	0/50	0/25	0/24
W_S	0/61	0/36	0/29



شکل 7 تعیین مقدار پارامتر اصلاح طول ترک (d) برای نمونه U_S



(الف)

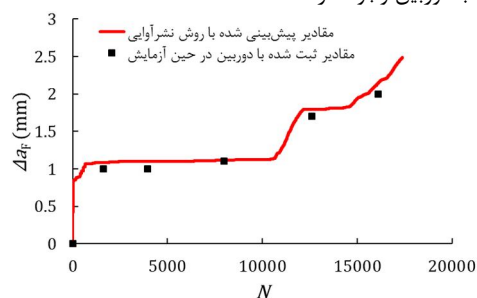


(ب)

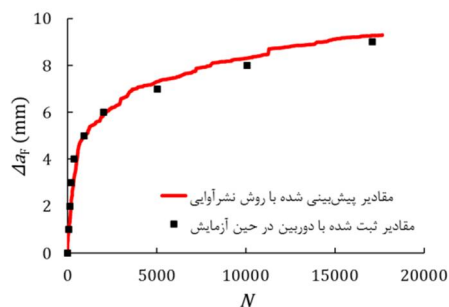
شکل 11 رابطه خطی انرژی تجمعی نشرآوایی و رشد ترک خستگی برای نمونه الف (U_F و W_F)

مقادیر پیش‌بینی‌شده با روش نشرآوایی، برای نمونه‌های U_F و W_F در شکل 12 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد.

به منظور صحت‌سنجی روش پیشنهادی، نمونه‌ای مشابه نمونه W_F تحت بارگذاری خستگی با شدت کمتر قرار گرفت و منحنی رشد ترک خستگی آن با روش نشرآوایی پیش‌بینی شد و با مقادیر ثبت شده با دوربین مقایسه گردید (شکل 13). تطابق مطلوبی بین مقادیر پیش‌بینی نشرآوایی و مقادیر ثبت شده با دوربین وجود دارد.

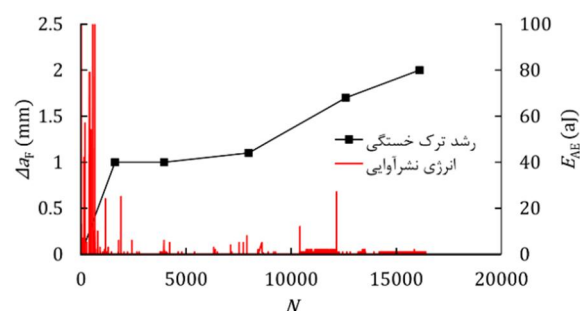


(الف)

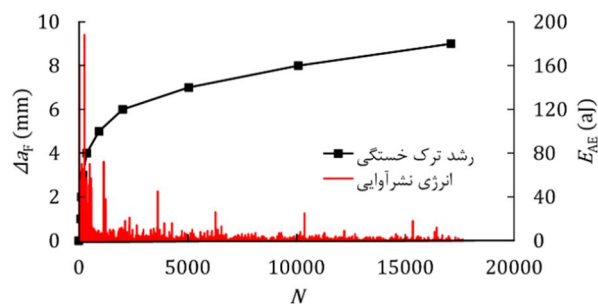


(ب)

شکل 12 منحنی رشد ترک بدست آمده از روش بازرسی چشمی و روش نشرآوایی برای نمونه الف (U_F و W_F)



(الف)

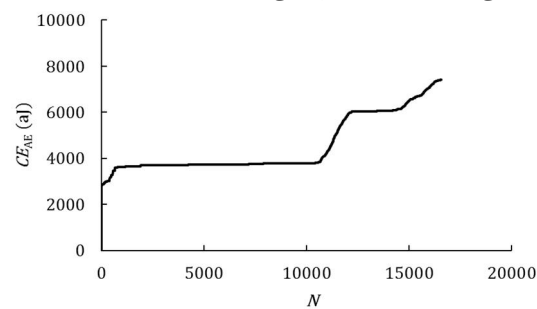


(ب)

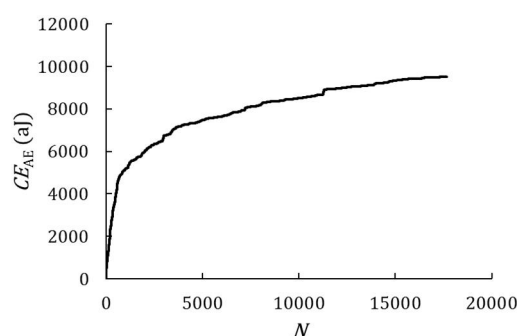
شکل 9 نمودار رشد ترک - انرژی نشرآوایی برای نمونه الف (U_F و W_F)

نمودار انرژی تجمعی نشرآوایی برای نمونه‌های U_F و W_F در شکل 10 نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های 10 و 8 مشخص است که رشد ترک خستگی و انرژی تجمعی نشرآوایی رفتاری مشابه دارند. مطابق شکل 11، بین رشد ترک خستگی هر نمونه و انرژی تجمعی نشرآوایی آن، رابطه‌ای خطی وجود دارد. بنابراین، با داشتن انرژی تجمعی نشرآوایی می‌توان تاریخچه رشد ترک خستگی را بدست آورد.

با استفاده از روابط خطی ارائه شده در شکل 11، منحنی رشد ترک خستگی در نمونه‌ها به طور کامل و پیوسته پیش‌بینی می‌شود. منحنی رشد ترک خستگی ثبت شده با روش چشمی (استفاده از دوربین دیجیتال) و

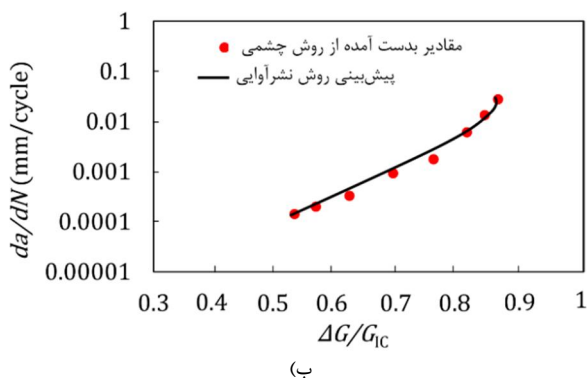
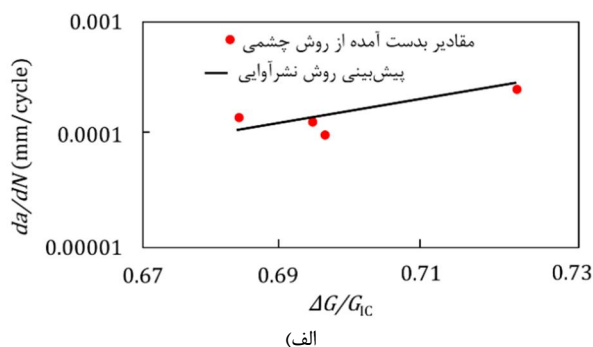


(الف)



(ب)

شکل 10 نمودار انرژی تجمعی نشرآوایی برای نمونه الف (U_F و W_F)

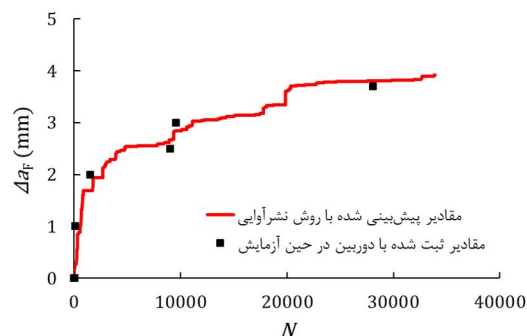


شکل 15 منحنی نرخ رشد ترک خستگی بدست آمده از روش بازرسی چشمی و روش نشرآوایی برای نمونه الف (U_F و ب) W_F .

نشرآوایی، رفتار رشد جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و خستگی مود I بررسی شد. ابتدا، نمونه‌های استاندارد مود I از جنس شیشه/اپوکسی با دو نوع لایه‌چینی تک‌جهته و بافته شده، ساخته شدند. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفته و رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای در آن‌ها بررسی شد. مشخص شد که رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه با الیاف تک‌جهته پله پله بوده و حالت رشد-توقف دارد که این امر ناشی از پدیده پل‌زنی الیاف در این نمونه است. جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه با الیاف بافته شده حالتی پیوسته و یکنواخت داشت. سپس با استفاده از استاندارد مقادیر جابجایی و نیروی بحرانی و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای نمونه‌ها تعیین شد. با استفاده از پارامترهای بدست آمده از آزمون شبه‌استاتیکی، نمونه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی قرار گرفتند. رشد جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌ها، رفتاری مشابه حالت شبه-استاتیکی داشت. سپس رفتار نشرآوایی نمونه‌های تحت بارگذاری خستگی بررسی شد و رابطه‌ای خطی بین انرژی تجمعی نشرآوایی و رشد ترک خستگی ارائه گردید. با استفاده از این رابطه، منحنی نرخ رشد ترک خستگی در نمونه‌ها با روش نشرآوایی پیش‌بینی گردید. نتایج پیش‌بینی‌شده مطابق بسیار مطلوبی با نتایج ثبت شده با روش بازرسی چشمی در حین آزمایش داشت. در ادامه، با استفاده از روش نشرآوایی منحنی تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و منحنی نرخ رشد ترک خستگی نمونه‌ها پیش‌بینی شد، که نتایج حاصله مطابق مطلوبی با نتایج روش بازرسی چشمی داشتند. در انتها، به نظر می‌رسد روش نشرآوایی قابلیت مناسبی جهت بررسی سلامت سازه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های شبه‌استاتیکی و خستگی داشته باشد.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولین آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار

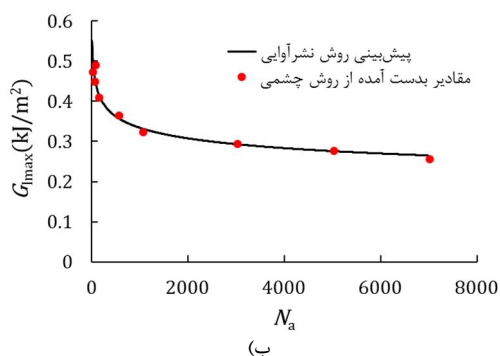
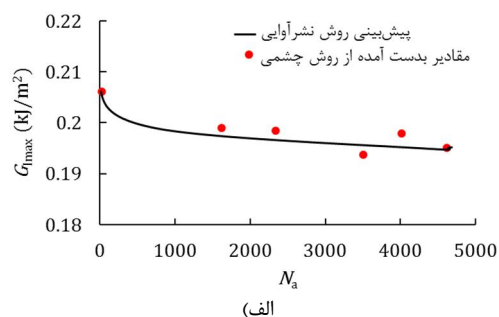


شکل 13 صحت‌سنجی کارایی روش نشرآوایی برای پیش‌بینی منحنی رشد ترک در نمونه‌ای مشابه با نمونه W_F .

در حین رشد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها، به ازای طول ترک‌های مختلف و بارهای متناظر با آن‌ها، نمودارهای تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و نرخ رشد ترک خستگی برای نمونه‌ها تعیین شد. شکل‌های 14 و 15 نمودارهای تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی و نرخ رشد ترک خستگی بدست آمده از داده‌های ثبت شده با روش چشمی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با روش نشرآوایی را برای نمونه‌های U_F و W_F نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، نتایج پیش‌بینی نشرآوایی مطابقت مطلوبی با نتایج حاصل از بازرسی چشمی دارد. همچنین، نشرآوایی بر خلاف روش چشمی که داده‌هایی کم و گسسته دارد، به دلیل پیش‌بینی پیوسته و لحظه‌ای طول ترک خستگی در حین آزمایش، منحنی‌هایی پیوسته برای کل زمان آزمایش بدست می‌دهد.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جدایش بین لایه‌ای شایع‌ترین مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی است. از آن‌جا که اغلب سازه‌های مکانیکی تحت بارگذاری خستگی قرار دارند، بنابراین بررسی رفتار خستگی رشد جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های مکانیکی و



شکل 14 منحنی تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی بدست آمده از روش بازرسی چشمی و روش نشرآوایی برای نمونه الف (U_F و ب) W_F .

- [3] M. saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi najafabadi, Hossein 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).
- [4] S. Sridharan, *Delamination behaviour of composites*. CRC Press, New York, 2008.
- [5] J. Andersons, M. Hojo, S. Ochiai, Empirical model for stress ratio effect on fatigue delamination growth rate in composite laminates. *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, No.6, pp. 597-604, 2004.
- [6] 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. 439-49, 1996.
- [7] M. Fotouhi, M. Ahmadi Najafabadi, Investigation of the mixed-mode delamination in polymer-matrix composites using acoustic emission technique. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 19, pp. 1767-82, 2014.
- [8] J. Aghazadeh Mohandesi, B. Majidi, Fatigue damage accumulation in carbon/epoxy laminated composites. *Materials and Design* 2009; Vol. 30, No. 6, 1950-1956, 2009.
- [9] M. R. Bhat, C. R. L. Murthy, Fatigue damage stages in unidirectional glass-fibre-epoxy composites: identification through acoustic emission technique. *International Journal of Fatigue*, Vol. 15, No. 5, pp. 401-405, 1993.
- [10] I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Ariza, 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, 2011.
- [11] R. K. Miller. *Nondestructive testing Handbook: Acoustic emission testing*. 5 ed, American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [12] J. Yousefi, M. Ahmadi, M. N. Shahri, M. Hajikhani, Investigation of damage mechanisms in Glass/Epoxy composites by use of acoustic emission, *1st National Congress Aging Aircraft*, Tehran, Iran, 2011. (In Persian)
- [13] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi najafabadi, M. Hajikhani, Classification of damage mechanisms during delamination growth in sandwich composites by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 144-152, 2014 (In Persian)
- [14] C. A. Paget, Delamination Location and Size by Modified Acoustic Emission on Cross-ply CFRP Laminates during Compression-Compression Fatigue Loading, *ICCM17 proceedings*, UK, 2009.
- [15] G. Romhany, G. Szebényi, Interlaminar fatigue crack growth behavior of MWCNT/carbon fiber reinforced hybrid composites monitored via newly developed acoustic emission method, *Express Polymer Letters*, Vol. 6, No. 7, pp. 572-580, 2012.
- [16] I. Silversides, A. Maslouhi, G. LaPlante, Acoustic emission monitoring of interlaminar delamination onset in carbon fibre composites, *Structural Health Monitoring*, Vol. 12, No. 2, pp. 126-140, 2013.
- [17] C. Leone, G. Caprino, I. de Iorio, Interpreting acoustic emission signals by artificial neural networks to predict the residual strength of pre-fatigued GFRP laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 233-239, 2006.
- [18] M. Bourchak, I. R. Farrow, I. P. Bond, C. W. Rowland, Acoustic Emission study of damage accumulation in CFRP composites under block loading, *11th European Conference on Composite Materials*, Greece, 2004.
- [19] ASTM D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [20] ASTM D6115-97, Standard Test Method for Mode I Fatigue Delamination Growth Onset of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

6- فهرست علائم

a	طول ترک (mm)
B	عرض نمونه DCB
C	نرمی نمونه (mmN^{-1})
CE_{AE}	انرژی تجمعی نشر آوایی (aJ)
d	جابجایی (mm)
d_C	جابجایی بحرانی (mm)
$d_{\min}$	کمینه جابجایی در بارگذاری خستگی (mm)
$d_{\max}$	بیشینه جابجایی در بارگذاری خستگی (mm)
$\frac{da}{dN}$	نرخ رشد ترک خستگی (mm/cycle)
E_{AE}	انرژی سیگنال‌های نشر آوایی (aJ)
G_I	نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی (kJm^{-2})
G_{IC}	چقرمگی شکست بین لایه‌ای (kJm^{-2})
$G_{I\max}$	بیشینه نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری خستگی (kJm^{-2})
N	تعداد سیکل‌ها در بارگذاری خستگی
N_a	تعداد سیکل تا شروع رشد ترک
NL	روش نقطه غیر خطی شدن نمودار نیرو-جابجایی
P	نیرو (N)
P_C	نیروی بحرانی (N)
R	نسبت جابجایی کمینه به بیشینه در بارگذاری خستگی
VIS	روش چشمی
5%/max	روش بیشینه بار یا افزایش 5% نرمی نمونه

علائم یونانی

Δ	پارامتر اصلاح طول ترک (mm)
Δa	رشد ترک (mm)
Δa_F	رشد ترک خستگی (mm)
ΔG	اختلاف بین بیشینه و کمینه نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی در بارگذاری خستگی (kJm^{-2})

7- مراجع

- [1] 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*, Vol. 46, No. 15, pp. 1795-1808, 2012.
- [2] P. H. Ziehl, *Development of a damage based design criterion for fiber reinforced vessels*, Phd Thesis, The University of Texas at Austin, 2000.