

## Investigating the Effect of Adding Natural Fibers on Interlaminar Fracture Toughness of Glass/Epoxy Composites Under Mode I Loading Using Acoustic Emission Test

Ali Daemi<sup>1</sup>  | Seyyed Reza Hamzeloo<sup>2</sup>  | Amir Refahi Oskouei<sup>3</sup> 

1. Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: [daemiali99university@gmail.com](mailto:daemiali99university@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: [rehamzeloo@sru.ac.ir](mailto:rehamzeloo@sru.ac.ir)
3. Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: [amir.refahi@gmail.com](mailto:amir.refahi@gmail.com)

### ABSTRACT

#### Article Information:

#### Research Article

Received 06 Dec. 2023

Revised 30 January 2024

Accepted 15 Feb. 2024

#### Keywords:

Acoustic Emission Test,  
Initiation of Delamination,  
Natural Fiber,  
Mode I,  
Interlaminar Fracture  
Toughness.

In recent years, with the increase in the price of non-renewable petroleum products and strict environmental laws, the application of natural fibers as reinforcement in composite materials has increased. In the current study, the effect of adding natural fibers on the resilience to delamination, which is the most common type of failure in laminated composites, is investigated in mode I loading using features extracted and evaluated from the acoustic emission non-destructive method. The samples were made using the hand lay-up method. The double-edge cantilever beam test was used to test the samples. Using the methods provided in the ASTM D5528 standard, the occurrence of initiation of delamination is determined in the samples. The results show that only the use of the mechanical methods provided in the mentioned standard is not enough to determine the initiation of delamination and for an easier and more accurate determination of the initiation of delamination. Thus, the assessment of delamination defect initiation and fracture toughness employing features measured by acoustic emission test should be applied. Then, using the energy method, cumulative energy, count, and cumulative count are used to determine the initiation of delamination in the samples. Then, using the critical load and critical displacement determined by different mechanical and acoustic emission methods, the interlaminar fracture toughness values of the samples are calculated. In the end, the results of the present study are compared with previous studies. According to the obtained results, the usage of kenaf fibers does not show a significant increase in the interlaminar fracture toughness of glass/epoxy composites, but the application of cotton fibers causes a significant increase in the interlaminar fracture toughness. Among the different acoustic emission methods, the count method shows the lowest error of 1.8 percent regarding the method proposed in the standard, nonlinear method, among the other acoustic emission methods.

**Cite this article:** Daemi, A., Hamzeloo, S. R., & Refahi Oskouei, A. (2023). Investigating the Effect of Adding Natural Fibers on Initiation of Interlaminar Fracture Toughness of Glass/Epoxy Composites Under Mode I Loading Using Acoustic Emission Test. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 96-107. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.429136.1137>

## بررسی تاثیر افزودن الیاف طبیعی بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری حالت یک با استفاده از آزمون نشر آوایی

علی دائمی<sup>۱</sup> | سید رضا حمزه لو<sup>۲</sup> | امیر رفاهی اسکویی<sup>۳</sup>

۱. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. رایانامه: [daemiali99university@gmail.com](mailto:daemiali99university@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، سید رضا حمزه لو، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه:

[rehamzeloo@sru.ac.ir](mailto:rehamzeloo@sru.ac.ir)

۳. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: [amir.refahi@gmail.com](mailto:amir.refahi@gmail.com)

### چکیده:

در سال‌های اخیر، با افزایش قیمت فرآورده‌های نفتی تجدیدنپذیر و قوانین سختگیرانه محیط زیستی، استفاده از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده در مواد کامپوزیتی افزایش یافته است. در پژوهش حاضر تاثیر افزودن الیاف طبیعی بر مقاومت در برابر جدایش بین لایه‌ای که رایج ترین نوع خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی می‌باشد، در بارگذاری حالت یک بررسی می‌شود. نمونه‌ها با استفاده از روش لایه چینی دستی ساخته شدند. از آزمون تیر یکسرگردار دولبه برای آزمایش نمونه‌ها استفاده شد. با استفاده از روش‌های ارائه شده در استاندارد ASTM D5528 لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تنها استفاده از روش‌های مکانیکی ارائه شده در استاندارد مذکور برای تعیین شروع جدایش بین لایه‌ای کافی نمی‌باشد و برای تعیین آسان تر و دقیق تر لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای باید از آزمون غیرمخرب نشر آوایی استفاده شود. سپس با استفاده از روش انرژی، انرژی تجمعی، شمارش ضرب آهنگ و شمارش ضرب آهنگ تجمعی برای تعیین لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ها استفاده می‌شود. سپس با استفاده از بار بحرانی و جابجایی بحرانی تشخیص داده شده توسط روش‌های مختلف مکانیکی و نشر آوایی مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای نمونه‌ها محاسبه می‌شود. در انتها نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین مقایسه می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از الیاف کنف افزایش قابل توجهی را در چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی نشان نمی‌دهد، اما استفاده از الیاف پنبه باعث افزایش قابل توجه در چقرمگی شکست بین لایه‌ای می‌شود. در میان روش‌های نشر آوایی مختلف، روش شمارش ضرب آهنگ کمترین درصد خطا معادل ۱۸ درصد را نسبت به روش پیشنهاد شده در استاندارد، در میان سایر روش‌های نشر آوایی نشان می‌دهد.

### اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۲۶

کلیدواژگان:

آزمون نشر آوایی،

شروع جدایش بین لایه‌ای،

الیاف طبیعی،

مود اول،

چقرمگی شکست بین لایه

ای.

استناد: دائمی، علی؛ حمزه لو، سید رضا؛ و رفاهی اسکویی، امیر. (۱۴۰۲). بررسی تاثیر افزودن الیاف طبیعی بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای شروع کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری حالت یک با استفاده از آزمون نشر آوایی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۳)، ۱۰۷-۹۶

<http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.429136.1137>

## ۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های پلیمری به‌طور گسترده‌ای استفاده شده‌است. مزایای زیست‌محیطی، در دسترس بودن، منابع تجدیدپذیر، خواص حرارتی خوب و عملکرد صوتی عالی باعث شده‌است که الیاف طبیعی در صنایع خودروسازی، ساختمان‌سازی، صنایع هوافضا و دریایی کاربرد پیدا کنند [۲،۱].

نیسینی و همکاران در سال ۲۰۱۷ رفتار کششی و ضربه‌ای کامپوزیت هیبریدی بازالت/کتان را مطالعه کردند. تقویت الیاف کتان باعث افزایش کشش کامپوزیت‌های الیاف بازالت و استحکام ضربه کامپوزیت‌ها شد [۳]. ساریکایا و همکاران در سال ۲۰۱۹ کامپوزیت‌های مختلف اپوکسی تقویت شده با الیاف طبیعی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که جذب انرژی ضربه‌ای کامپوزیت‌ها تا حد زیادی به پیوند هیدروژنی الیاف بستگی دارد. نوع الیاف و رفتار اتصال آن برای استحکام ضربه بالاتر بسیار مهم بود [۴].

در چند لایه‌های کامپوزیتی امکان وقوع انواع خرابی‌ها از جمله ترک خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس، شکست الیاف و جدایش بین‌لایه‌ای وجود دارد [۵]. رایج‌ترین نوع مکانیزم خرابی در چندلایه‌های کامپوزیتی جدایش بین‌لایه‌ای می‌باشد، که منجر به کاهش استحکام آن می‌شود [۶].

المنصور و همکاران در سال ۲۰۱۷ دریافتند که استفاده از الیاف بازالت به عنوان لایه‌های خارجی بر روی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با کتان می‌تواند چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای را بهبود بخشد. این نشان می‌دهد که هیبریداسیون الیاف بازالت می‌تواند به عنوان یک روش موثر برای افزایش خواص مکانیکی، دوام و مقاومت در برابر رطوبت کامپوزیت‌های الیاف طبیعی استفاده شود [۷]. کاناکاناور و همکاران در سال ۲۰۱۸ اثر هیبریداسون حجم‌های مختلف الیاف پنبه و شیشه را بررسی کردند. نتایج آزمایش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای حالت اول نشان می‌دهد که با ترکیب الیاف پنبه در محدوده ۱۰٪ تا ۲۵٪ تقویت شده با شیشه حداکثر ۴۳٪ بهبود را در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف شیشه تنها نشان می‌دهد [۸].

با توجه به اینکه جدایش بین‌لایه‌ای در بین لایه‌های

کامپوزیت اتفاق می‌افتد تشخیص آن با بازرسی چشمی بسیار مشکل می‌باشد [۹]. برای تشخیص شروع جدایش بین‌لایه‌ای از آزمون غیرمخرب نشرآوایی که پایش بلادرنگ سیستم را امکان پذیر می‌سازد بصورت گسترده استفاده می‌شود. اگر جسمی تحت تاثیر یک نیروی محرکه خارجی قرار بگیرد، تخلیه سریع انرژی از منابع درون جسم باعث ایجاد امواج الاستیک گذرا به صورت صوت و انتشار آن‌ها در ماده می‌شود، این پدیده نشرآوایی نامیده می‌شود [۱۰].

فتوحی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روند تابع سنتری شروع جدایش بین‌لایه‌ای را به دو مرحله شروع جزئی و شروع اصلی تقسیم کردند. آن‌ها با استفاده از روش تبدیل فوریه امواج نشرآوایی به تعیین محدوده فرکانسی مکانیزم‌های مختلف خرابی و رفتار رشد جدایش بین‌لایه‌ای تحت بارگذاری حالت اول پرداختند [۱۱]. الهادی سیدان و همکاران در سال ۲۰۱۹ چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای حالت اول کتان، شیشه و کامپوزیت‌های بافته‌شده با الیاف کتان-شیشه هیبریدی با استفاده از آزمون تیر یکسرگردار دولبه مورد بررسی قرار دادند. مکانیسم‌های شکست با استفاده از اندازه‌گیری‌های نشرآوایی شناسایی شده و با تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی مشاهده شدند. در نتیجه، هیبریداسیون الیاف شیشه با الیاف کتان در یک ترکیب مناسب راه حل جالبی را برای افزایش چقرمگی حلتت یک ارائه می‌دهد [۱۲]. غلامیان نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۲ به تخمین جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های شیشه/پلی‌استر تقویت شده با پین‌های فلزی تحت بارگذاری حالت یک با ارزیابی آزمون نشرآوایی پرداختند. رشد ترک حاصل از جدایش بین‌لایه‌ای برای نمونه‌های پین‌گذاری‌شده از جنس فولاد و مس با نمونه‌های بدون پین مقایسه شد. بار بحرانی برای بدست آوردن چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای با استانداردهای مکانیکی و روش نشرآوایی بدست آورده شد. نتایج نشان داد چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در نمونه‌های پین‌گذاری‌شده از جنس فولاد نسبت به نمونه‌های پین‌گذاری‌شده از جنس مس و بدون پین گذاری‌شده بیشتر بود [۱۳].

با توجه به پیشینه پژوهش‌های صورت‌گرفته بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی، بیشتر مطالعات بر روی الیاف طبیعی خواص مکانیکی مثل استحکام برشی، استحکام

لایه بالایی شیشه یک لایه کنف، یک لایه نوار نایلونی نجسب به عنوان پیش‌ترک اولیه، یک لایه پنبه و سه لایه پایینی شیشه می‌باشد و برای سایر نمونه‌ها هم به همین شکل است.

نمونه کنف-کنف <sup>۱</sup>	نمونه کنف-پنبه <sup>۹</sup>	نمونه کنف-شیشه <sup>۸</sup>
شیشه	شیشه	شیشه
شیشه	شیشه	شیشه
شیشه	شیشه	شیشه
کنف	کنف	کنف
نوار نایلونی نجسب به عنوان پیش‌ترک اولیه		
کنف	پنبه	شیشه
شیشه	شیشه	شیشه
شیشه	شیشه	شیشه
شیشه	شیشه	شیشه

شکل ۱ طرح لایه چینی‌های مختلف برای نمونه‌ها

نمونه‌ها بصورت لایه‌گذاری دستی<sup>۱۱</sup> ساخته شده‌اند. ۶۰ دقیقه به عنوان زمان ژل‌تایم<sup>۱۲</sup> و ۹۰ دقیقه زمان پخت اولیه<sup>۱۳</sup> در دمای محیط و پس از آن برای خشک شدن نهایی و اطمینان از فرآیند پخت کامل و رسیدن به بالاترین مقاومت و استحکام ۷ روز نمونه‌ها در دمای محیط قرار داده شدند. نمونه‌ها با لایه‌چینی‌های مختلف بصورت مستطیلی با ابعاد ۲۳۰×۲۱۰ mm و ضخامت حداقل ۴ mm ساخته شدند که در شکل (۲) نمونه‌های ساخته‌شده مشخص است. سپس نمونه‌های مستطیلی ساخته‌شده توسط اهر برش کامپوزیت برای نمونه‌های حالت یک به اندازه‌ی ۱۷۰×۲۵ mm بریده شدند. شکل (۳) نمونه‌ها پس از بریده شدن توسط اهر برش کامپوزیت را نشان می‌دهد. به منظور سهولت شروع

خمشی، استحکام در برابر ضربه، استحکام سفتی و دیگر خواص مکانیکی را مورد بررسی قرار می‌دهد و در رابطه با جدایش بین لایه‌های الیاف طبیعی کمتر مطالعه صورت گرفته‌است. همچنین در مطالعات صورت‌گرفته بر روی الیاف طبیعی از روش‌های ارائه‌شده در استاندارد ASTM D5528 برای تشخیص شروع جدایش بین لایه‌های استفاده شده‌است. اما روش‌های ارائه‌شده در استاندارد مذکور در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی که نمونه‌های نرمی می‌باشند به خوبی عمل نمی‌کند و برای تشخیص دقیق و آسان لحظه شروع جدایش بین لایه‌های از آزمون نشرآوایی استفاده می‌شود و در پایان نتایج آن با نتایج حاصل از استاندارد مذکور مقایسه می‌گردد.

## ۲- روش تحقیق

### ۱-۲ مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، کامپوزیت‌های ترکیبی شیشه-کنف-پنبه/اپوکسی است. رزین به کار رفته در نمونه‌ها، اپوکسی با چگالی  $\frac{g}{cm^3}$  ۱/۱۱ که به عنوان فاز زمینه استفاده شده‌است. رزین و سفت‌کننده<sup>۱</sup> استفاده شده برای نمونه‌ها، به ترتیب ام-ال-۵۰۶<sup>۲</sup> و اچ-آی-۱۱<sup>۳</sup> با نسبت ترکیب وزنی رزین به سفت‌کننده ۱۰۰ به ۱۵ است. از الیاف مصنوعی شیشه نوع ای<sup>۴</sup> و الیاف‌های طبیعی پنبه<sup>۵</sup> و کنف<sup>۶</sup> به عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شده‌است. الیاف شیشه به کار رفته به صورت پارچه دوجهته با بافت ساده<sup>۷</sup> با چگالی  $\frac{g}{m^2}$  ۴۰۰ و ضخامت ۰/۴ mm است. الیاف پنبه و کنف استفاده شده هم بصورت پارچه بافته‌شده با بافت ساده هستند. چگالی الیاف پنبه  $\frac{g}{m^3}$  ۴۴۵/۸ و چگالی الیاف کنف  $\frac{g}{m^3}$  ۳۵۲/۹۲ می‌باشد. الیاف شیشه از شرکت پلی کامپوزیت و رزین و سفت‌کننده اپوکسی از شرکت مواد مهندسی مکر تهیه شدند. در شکل (۱) طرح لایه‌چینی نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده‌است. برای کدگذاری نمونه‌ها با توجه به آن که تنها دو لایه میانی متفاوت است نام دو لایه میانی ذکر شده‌است. به عنوان مثال منظور از نمونه کنف-پنبه، سه

<sup>8</sup> -Kenaf-Glass=KG

<sup>9</sup> -Kenaf-Cotton=KC

<sup>10</sup> -Kenaf-Kenaf=KK

<sup>11</sup>-Hand Lay-Up

<sup>12</sup>-Gel Time

<sup>13</sup>-Curing Time

<sup>1</sup>-Hardner

<sup>2</sup>-ML-506

<sup>3</sup>-HA-11

<sup>4</sup>-E-Glass

<sup>5</sup>-Cotton

<sup>6</sup>-Kenaf

<sup>7</sup>-Plain Weave

در دستگاه، در صفحات بالایی و زیری نمونه‌ها، بست‌های لولایی چسبانده شدند. برای چسباندن بست‌های لولایی به نمونه‌ها از چسب فولاد هل<sup>۲</sup> استفاده شد. برای مشاهده بهتر و دقیق‌تر شروع و انتشار ترک، لبه‌های نمونه‌ها با لاک آغشته شده و شاخص‌هایی به فاصله ۱ mm از هم بر روی لبه نمونه درج شدند.

### ۳-۲ تجهیزات آزمایش

برای بارگذاری نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش کشش مدل هیوا<sup>۳</sup>، با ظرفیت ۵ ton، با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری  $0.1-50 \frac{mm}{min}$  استفاده شد. برای ثبت داده‌های نشرآوایی از نرم‌افزار آی ای وین و سیستم پی سی آی-۴۲ با سرعت داده‌برداری  $1 \frac{MS}{sec}$  استفاده گردید. از دو سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو<sup>۴</sup>، محصول کمپانی پک<sup>۵</sup>، مدل آر-۵۰-دی<sup>۷</sup> استفاده گردید. فرکانس تشدید سنسور ۵۱۳/۲۸ kHz و محدوده بهینه کاری آن ۷۵۰-۱۰۰ kHz است. فعالیت‌های شناسایی شده توسط سنسور، به وسیله پیش‌تقویت‌کننده با ضریب ۴۰ dB تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلاصه، استفاده شد. سپس به کمک نوار چسب در جای خود ثابت نگه داشته‌شد. برای حذف نویزهای زمینه در حین نمونه‌برداری، حد آستانه ۳۰ dB در نظر گرفته‌شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه تست غیرمخرب دانشکده مکانیک دانشگاه امیرکبیر انجام شدند.

### ۳- چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای

به مقاومت ماده در برابر رشد ترک‌های بین‌لایه‌ای را چقرمگی شکست می‌گویند. که با نرخ آزادسازی انرژی کرنش بحرانی اندازه‌گیری می‌شود [۱۳].  
بر اساس استاندارد مذکور از تئوری تیر اصلاح‌شده<sup>۸</sup> برای محاسبه و تعیین چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای حالت یک<sup>۹</sup> استفاده می‌شود. نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی بحرانی و مدول موثر برای هر یک از نمونه‌ها به ترتیب از معادله (۱)

جدایش، نمونه‌های حالت یک دارای یک پیش‌ترک اولیه به طول ۵۰ mm از لبه نمونه می‌باشند. پیش‌ترک اولیه با جایگذاری نوار نایلونی نجسب در حین پروسه تولید در لایه میانی ایجاد شده‌است.



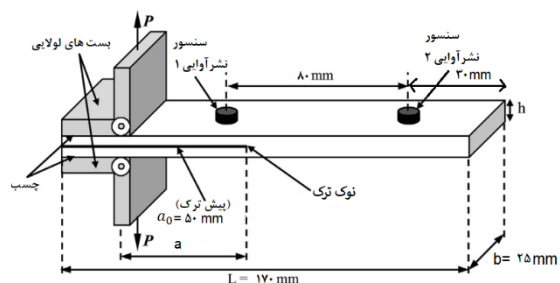
شکل ۲ نمونه‌های ساخته شده بصورت مستطیلی با لایه چینی‌های مختلف



شکل ۳ نمونه‌ها پس از بریده شدن در ابعاد استاندارد

### ۲-۲ روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D5528 [۱۴] انجام شدند. شماتیک نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده‌است.



شکل ۴ شماتیک نمونه DCB با مشخص نمودن ابعاد و محل قرارگیری سنسورها

در آزمون تیر یکسرگردار دولبه<sup>۱</sup>، با اعمال دو نیروی عمود بر نیمه‌ی بالایی و پایینی نمونه، بارگذاری حالت یک اتفاق می‌افتد. آزمایش‌های بارگذاری حالت یک در دمای محیط و با سرعت پیشروی ثابت  $3 \frac{mm}{min}$  انجام شدند. جهت آماده سازی نمونه‌ها برای تست کشش و قرار گرفتن

<sup>6</sup>-PAC

<sup>7</sup>-R50D

<sup>8</sup>-Modified Beam Theory (MBT)

<sup>9</sup>-Mode I

1-DCB Test

2-HL GLUE

3-HIWA

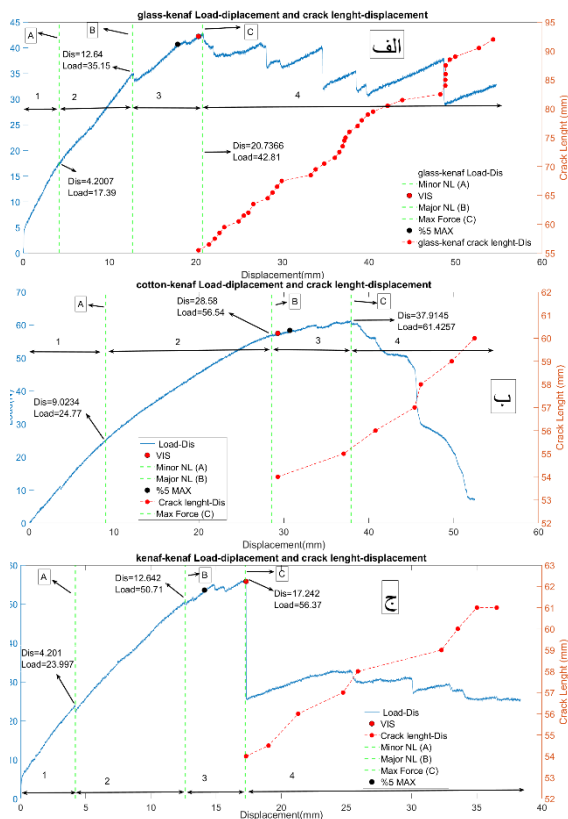
4-PCI-2

5-PICO

شدن جزئی نمودار تا غیر خطی شدن نمودار، ناحیه ۳) بعد از غیرخطی شدن نمودار تا حداکثر نیرو، ناحیه ۴) بعد از حداکثر نیرو تا انتهای نمودار. به منظور تعیین نیروی بحرانی برای تشخیص شروع رشد ترک در استاندارد مذکور سه روش پیشنهاد شده است. روش‌های پیشنهادی عبارتند از:

- نیروی متناظر با نقطه غیرخطی شدن نمودار نیرو-جابجایی<sup>۱</sup>
- نیروی متناظر با ۵٪ کمتر از حداکثر نیرو<sup>۲</sup>
- نیروی متناظر با تشخیص چشمی رشد جدایش بین لایه‌های<sup>۳</sup>

در شکل (۶) نمودارهای نیرو-جابجایی-طول ترک نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودارهای نیرو-جابجایی-طول ترک برای نمونه های (الف) کنف-شیشه، (ب) کنف-پنبه، (ج) کنف-کنف.

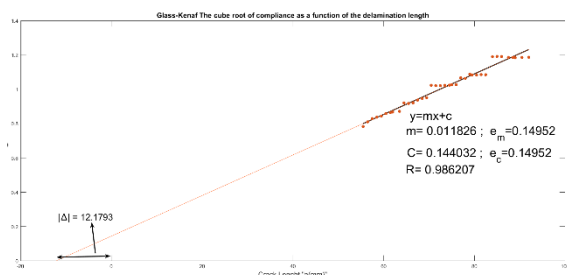
در نمودارهای شکل (۶) به ترتیب جابجایی بحرانی و نیروی بحرانی نقاط متناظر با غیرخطی شدن جزئی نمودار، غیرخطی شدن نمودار و حداکثر نیرو مشخص شده است. با توجه به شکل (۶) برای تمامی نمونه‌ها در ناحیه ۱ نیرو و

و (۲) بدست می‌آید [۱۴]:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad \text{معادله ۱}$$

$$E_{eff-model} = \frac{3a^3P}{bh^3\delta} \quad \text{معادله ۲}$$

نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی حالت یک  $(\frac{J}{m^2})$ ،  $P$ ، نیروی اعمال شده بر روی نمونه (N)،  $\delta$ ، مقدار جابجایی متناظر با نقطه اعمال بار (mm)،  $a$ ، طول جدایش بین لایه‌های (mm)،  $h$ ، نصف ضخامت نمونه (mm)،  $|\Delta|$ ، مقدار اصلاحی طول ترک،  $b$ ، عرض نمونه (mm) در معادله (۱) و (۲) تعریف می‌شوند. مقدار اصلاحی  $|\Delta|$  با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات نمودار ریشه سوم نرمی ( $G_I$ ) در برابر طول ترک ( $a$ ) بدست می‌آید. نرمی،  $C$  نسبت جابجایی نقطه بار به بار اعمال شده  $(\frac{\delta}{P})$  می‌باشد. نحوه بدست آوردن مقدار اصلاحی  $|\Delta|$  در شکل (۵) برای نمونه کنف-شیشه نشان داده شده است. برای نمونه‌های دیگر نیز به این ترتیب بدست می‌آید.



شکل ۵ نحوه بدست آوردن مقدار اصلاحی  $\Delta$  برای نمونه کنف-شیشه در روش تئوری تیر اصلاح شده

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۱-۴ نتایج مکانیکی

در این بخش نمودارهای نیرو-جابجایی-طول ترک نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین مقادیر نیروی بحرانی و جابجایی متناظر با نیروی بحرانی بر اساس استاندارد مذکور تعیین می‌گردد.

##### ۱-۱-۴ نمودار نیرو-جابجایی-طول ترک نمونه‌ها

نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها را بر اساس استاندارد مذکور می‌توان به چهار ناحیه تقسیم کرد: ناحیه ۱) قبل از غیرخطی شدن جزئی نمودار، ناحیه ۲) بعد از غیرخطی

3 -VIS

1 -NL

2 -%5 max

فاز الیاف پنبه شده و در نهایت نمونه می‌شکند و در نمودار نیرو هم افت شدیدی مشاهده می‌شود. نمونه کنف-کنف (شکل ۶-ج) بعد از حداکثر نیرو نمونه پرش بین لایه‌های بزرگی را تجربه می‌کند و ترک از فاز الیاف کنف خارج شده و وارد فاز الیاف شیشه می‌شود و در فاز الیاف شیشه ترک بصورت پدیده رشد-توقف رشد می‌کند.

جدول ۱ مقادیر مدول موثر برای نواحی ۱ و ۲ و ۳ نمودار نیرو-جابجایی بر حسب (Gpa)

کد نمونه	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	افت از ناحیه ۱ به ۲	افت از ناحیه ۲ به ۳
KG	۶/۲۸	۶/۱۰	۵/۶۱	۲/۱۸۷	۸/۱۰۳
KC	۳/۶۰	۳/۳۷	۳/۲۱	۶/۳۹	۴/۱۷۴
KK	۵/۴۲	۵/۲۶	۴/۷۴	۲/۹۵	۹/۱۸۹

با توجه به جدول (۱) برای نمونه‌های کنف-شیشه و کنف-کنف از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ کمترین افت مدول موثر را شاهد هستیم. با توجه به اینکه در این دو نمونه در این ناحیه پدیده پل زدن لایه رخ می‌دهد می‌توان این افت کم مدول موثر را ناشی از پل زدن لایه که از رویدادهای تقویتی کامپوزیت‌ها است، نسبت داد [۱۵]. شکل (۷) پدیده پل زدن لایه برای دو نمونه کنف-شیشه و کنف-کنف را نشان می‌دهد. از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ با توجه به غیرخطی شدن نمودار نیرو-جابجایی مقدار مدول موثر کاهش پیدا می‌کند. برای نمونه کنف-کنف بیشترین کاهش در مدول موثر مشاهده می‌شود و این نمونه مقاومت کم تری در برابر رشد جدایش از خود نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱) و جدول (۲) که مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌های نمونه‌ها را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت هرچه میزان افت مدول موثر از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ که نمودار غیرخطی می‌شود کمتر باشد مقاومت نمونه در برابر رشد جدایش بین لایه‌های نیز بیشتر می‌شود. نمونه کنف-پنبه کم‌ترین افت مدول موثر و بعد از آن به ترتیب نمونه‌های کنف-شیشه، کنف-کنف قرار دارند. با توجه به جدول (۲) مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌های نمونه‌ها (از روش غیرخطی شدن نمودار و میانگین تمامی روش‌ها نیز به همان ترتیب بالا می‌باشد).

جابجایی رابطه خطی دارند. رفتار تمامی نمونه‌ها در ناحیه ۱ مشابه است و رشد ترک مشاهده نمی‌شود. در این ناحیه نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی نمونه‌ها از نرخ بحرانی پایین‌تر است و جدایش بین لایه‌های رشدی نداشته است. ناحیه ۱ قسمت الاستیک نمونه است که در انتهای این ناحیه (خط A) انحراف جزئی از خطی بودن در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود. در این نقطه سطح آسیبی که به نمونه‌ها می‌رسد ناچیز نیست اما نمونه‌ها قادر به تحمل نیروی اضافی هستند. در ناحیه ۲ نمونه‌ها لندگی رفتار غیرخطی را از خود نشان می‌دهند اما رفتار نمونه‌ها در این ناحیه را تقریباً می‌توان خطی در نظر گرفت در این ناحیه هنوز جدایش بین لایه‌های رشدی نداشته‌است. در انتهای این ناحیه (خط B) نمودار کاملاً از حالت خطی خارج شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. مقدار جابجایی و نیروی بحرانی متناظر با غیرخطی شدن در این ناحیه برای نمونه‌های مختلف با توجه به لایه‌چینی‌های متفاوت الیاف‌های میانی، متفاوت می‌باشد. این تفاوت به خاطر مدول الاستیسیته موثر نمونه‌ها با یکدیگر می‌باشد. مقادیر مدول موثر نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده‌است. در این نقطه سطح آسیبی که به نمونه‌ها وارد می‌شود جدی است و نمونه دیگر توانایی نیروی اضافی را از خود نشان نمی‌دهد. از این رو مقدار نیرو در لحظه ورود نمونه از ناحیه الاستیک به پلاستیک را با توجه به استاندارد مذکور می‌توان به عنوان نیروی بحرانی و لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفت. جابجایی ناحیه الاستیک (خط B) که مقاومت نمونه در برابر رشد جدایش بین لایه‌ای را نشان می‌دهد [۱۳]، برای نمونه کنف-پنبه از سایر نمونه‌ها بیشتر است. و بعد از آن نمونه‌های کنف-کنف، کنف-شیشه قرار دارد. در ناحیه ۳ نیرو رشد کرده تا به حداکثر مقدار خود برسد. در این ناحیه نمودار نیرو رفتار کاملاً غیرخطی را از خود نشان می‌دهد. در این ناحیه برای بیشتر نمونه‌ها رشد ترک بصورت چشمی هم قابل مشاهده است. در ناحیه ۴ نمونه‌ها رفتار متفاوتی با یکدیگر دارند. نمونه کنف-شیشه (شکل ۶-الف) بعد از حداکثر نیرو پرش بین لایه‌ای کوچکی را تجربه کرده و ترک وارد فاز الیاف شیشه شده و ترک در فاز الیاف شیشه بصورت پدیده رشد-توقف<sup>۱</sup> منتشر می‌شود. نمونه کنف-پنبه (شکل ۶-ب) بعد از حداکثر نیرو ترک وارد

<sup>1</sup> Stop-Go

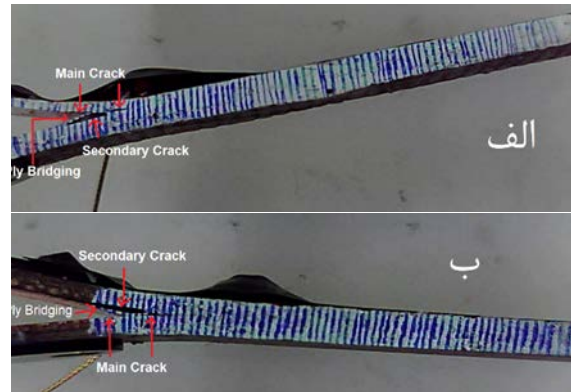
## ۲-۴ نتایج آزمایش غیرمخرب نشرآوایی

## ۱-۲-۴ نمودار نیرو-جابجایی-انرژی نشرآوایی و نمودار

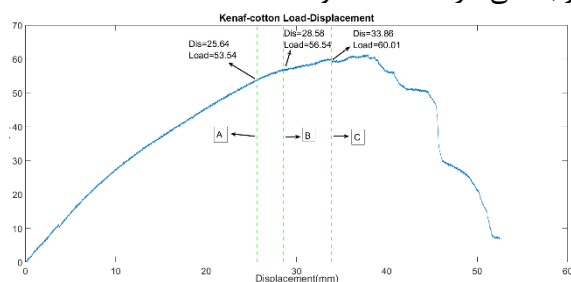
## نیرو-جابجایی-شمارش ضرب آهنک

با توجه به نمودار نیرو-جابجایی-انرژی نشرآوایی می‌توان نمودار نیرو-جابجایی را براساس پارامتر انرژی مطلق سیگنال به چهار ناحیه تقسیم کرد. در ناحیه ۱ خرابی قابل توجهی اتفاق نیافتاده است و سیگنال‌های نشرآوایی نیز مشاهده نمی‌شود. در انتهای ناحیه ۱ (خط A) اولین افزایش قابل توجه در انرژی سیگنال مشاهده می‌شود. در این نقطه سطح آسیبی که به نمونه وارد می‌شود قابل چشم‌پوشی نیست اما نمونه همچنان توانایی تحمل بار اضافی را از خود نشان می‌دهد. در نمودار نیرو-جابجایی نیز در این نقطه انحراف اندکی از حالت خطی مشاهده می‌شود. این نقطه به عنوان شروع جزئی جدایش بین لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. بعد از اولین افزایش قابل توجه در انرژی سیگنال در ناحیه ۲ سیگنال‌های نشرآوایی ضعیفی مشاهده می‌شود. این سیگنال‌های ضعیف اولیه ناشی از جدا شدن تفلون از نمونه و اصطکاک بین لایه‌ها می‌باشد. در انتهای ناحیه ۲ (خط B) دومین افزایش قابل توجه در انرژی سیگنال مشاهده می‌شود. این نقطه به عنوان شروع جدایش بین لایه‌ای اصلی تشخیص یافته توسط روش انرژی سیگنال در نظر گرفته می‌شود. در نمودار نیرو-جابجایی نیز در این نقطه انحراف کامل از خطی شدن نمودار مشاهده می‌شود [۱۶]. در ناحیه ۳ سیگنال‌های نشرآوایی نسبتاً قوی ظاهر می‌شود. با ورود نمودار از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک مکانیزم‌های خرابی از جمله ترک خوردگی و شکست ماتریس، انرژی نشرآوایی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. ناحیه ۴ به گسترش جدایی بین لایه‌ای که منجر به شکست نهایی قطعه کار می‌شود، مربوط است. به دلیل رشد سریع و ناپایدار ترک در این ناحیه، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این ناحیه با فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی مانند شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، تعداد سیگنال‌های نشرآوایی افزایش می‌یابد. مکانیزم‌های مختلف خرابی، سیگنال‌های نشرآوایی را با سطح انرژی مختلف ایجاد می‌کند [۱۷].

در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی-انرژی نشرآوایی نمونه‌ها و نمودار نیرو-جابجایی-

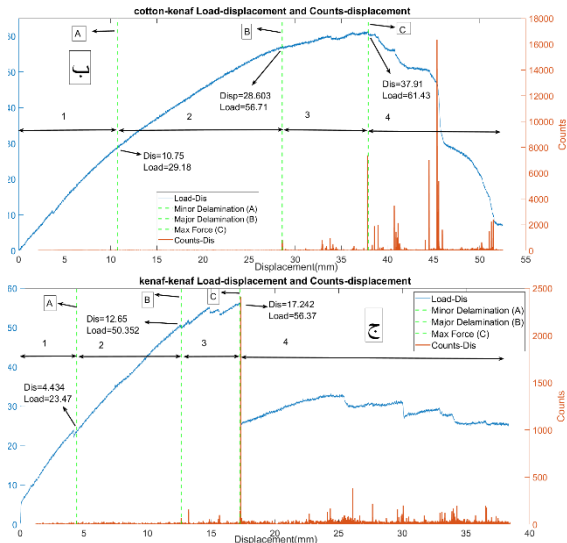


شکل ۷ پدیده پل زدن لایه الف) کنف-شیشه، ب) کنف-کنف با توجه به شکل (۸) در نمونه‌هایی مانند نمونه کنف-پنبه که نمونه نرمی می‌باشد و شیب نمودار به آرامی تغییر می‌کند تعیین لحظه دقیق غیرخطی شدن نمودار دشوار می‌باشد و به تجربه و نظر شخص تحلیلگر بستگی دارد. ممکن است جابجایی متناظر با (خط A) به عنوان نقطه غیرخطی شدن نمودار در نظر گرفته شود. ممکن است جابجایی متناظر با (خط B) یا (خط C) توسط فرد دیگری به عنوان نقطه غیرخطی شدن نمودار در نظر گرفته شود. بنابراین روش غیرخطی شدن نمودار که توسط استاندارد مذکور برای تشخیص شروع جدایش بین لایه‌ای پیشنهاد شده است برای تمامی نمونه‌ها نمی‌تواند لحظه شروع جدایش را تشخیص دهد و باید از روش‌های دیگری مثل روش غیرمخرب نشرآوایی که لحظه شروع جدایش توسط آن آسان‌تر تشخیص داده می‌شود و به نظر شخص تحلیلگر کمتر بستگی دارد، استفاده شود.



شکل ۸ تعیین نقطه غیرخطی شدن نمودار نمونه کنف-پنبه در مطالعه حاضر (خط B) با توجه به مطابقت با سایر روش‌های ارائه شده نشرآوایی به عنوان نقطه غیرخطی شدن نمودار برای نمونه کنف-پنبه در نظر گرفته شده است.



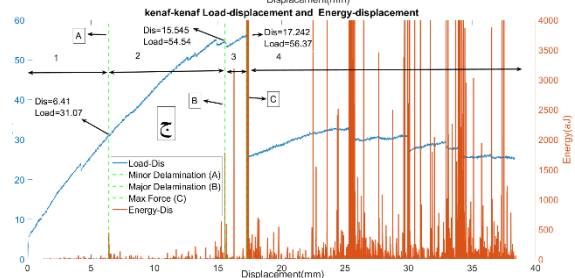
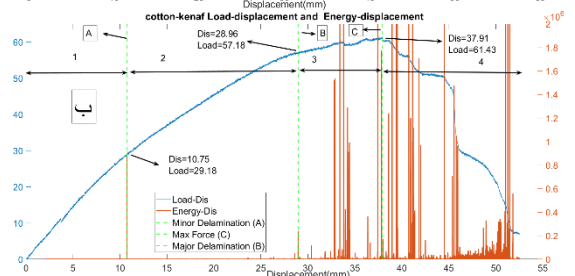
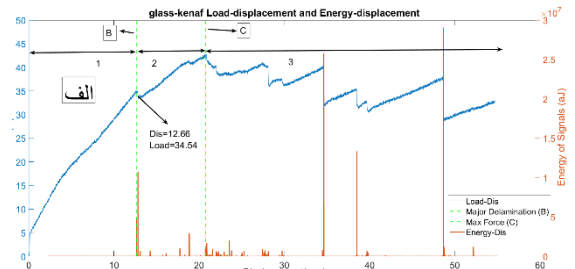


شکل ۱۰ نمودارهای نیرو-جابجایی-شمارش ضرب آهنگ نشرآوایی برای نمونه‌های الف (کنف-شیشه، ب) کف-پنبه، ج) کف-کنف.

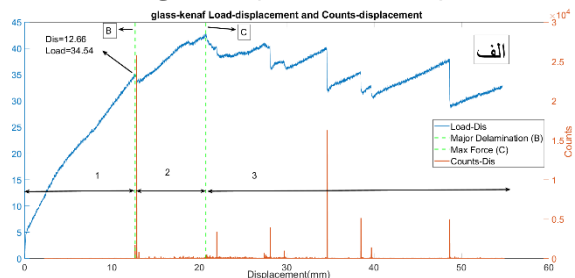
۲-۲-۴ نمودار نیرو-جابجایی-انرژی تجمعی<sup>۱</sup> و نمودار نیرو-جابجایی-شمارش ضرب آهنگ تجمعی<sup>۲</sup> نمودار انرژی نشرآوایی تجمعی برخلاف نمودار انرژی نشرآوایی لحظه‌ای که گسسته بوده، پیوسته است. در این نمودار، قبل از وقوع خرابی در نمونه‌ها، شیب نمودار صفر بوده و با شروع جدایش بین‌لایه‌ای، شیب نمودار انرژی نشرآوایی تجمعی افزایش می‌یابد. در ادامه بسته به نرخ رشد جدایش بین‌لایه‌ای و پیشرفت آسیب در نمونه‌ها، شیب این نمودار تغییر می‌کند. برای تعیین بار بحرانی متناظر با شروع جدایش بین‌لایه‌ای در نمونه‌ها، اولین لحظه‌ای که شیب نمودار انرژی تجمعی از صفر به مقداری مثبت افزایش می‌یابد، متناظر با شروع جزئی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه لحظه‌ای که شیب نمودار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد به عنوان شروع اصلی جدایش بین‌لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. چون نمودار انرژی تجمعی پیوسته است، برای تعیین لحظه شروع جدایش بین‌لایه‌ای امکان خطای کمتری نسبت به نمودار انرژی نشرآوایی که گسسته است دارد [۱۸].

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی-انرژی نشرآوایی تجمعی و نمودارهای نیرو-جابجایی-شمارش ضرب آهنگ‌های تجمعی نمونه‌ها نشان

شمارش ضرب آهنگ نمونه‌ها نشان داده شده است. شروع جزئی نمونه‌ها با خط A، شروع اصلی نمونه‌ها با خط B، حداکثر نیرو با خط C، و مقادیر نیرو و جابجایی متناظر با شروع جزئی، شروع اصلی و حداکثر نیرو نشان داده شده است. روش شمارش ضرب آهنگ نیز برای تشخیص شروع جزئی و شروع اصلی مانند روش انرژی عمل می‌کند و نمودار نیرو-جابجایی را می‌توان به ۴ ناحیه تقسیم کرد.

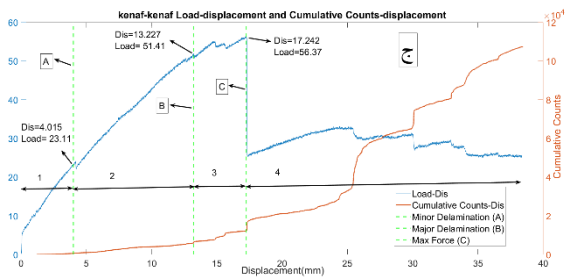


شکل ۹ نمودارهای نیرو-جابجایی-انرژی نشرآوایی برای نمونه‌های الف (کنف-شیشه، ب) کف-پنبه (مقیاس بزرگنمایی شده)، ج) کف-کنف (مقیاس بزرگنمایی شده).



<sup>2</sup> -Cumulative Counts=CUM Counts

<sup>1</sup> -Cumulative Energy=CUM Energy



شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جابجایی-شمارش ضرب آهنگ  
تجمعی برای نمونه‌های الف (کنف-شیشه، ب) کنف-پنبه، ج) کنف-کنف.

### ۴-۳ محاسبه چقرمگی شکست بین لایه‌های با روش‌های مکانیکی و نشر آوایی

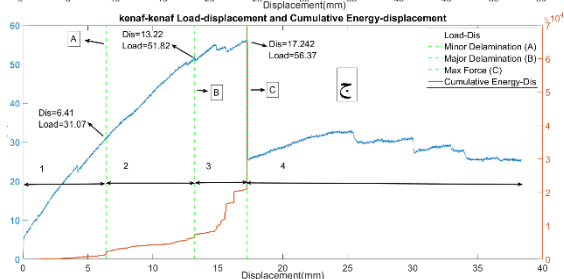
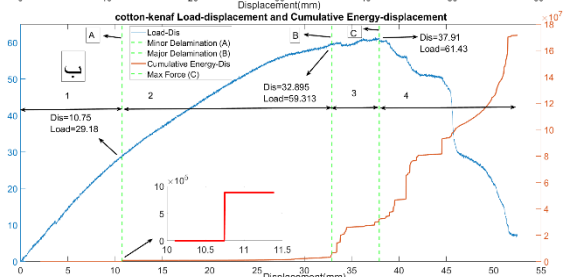
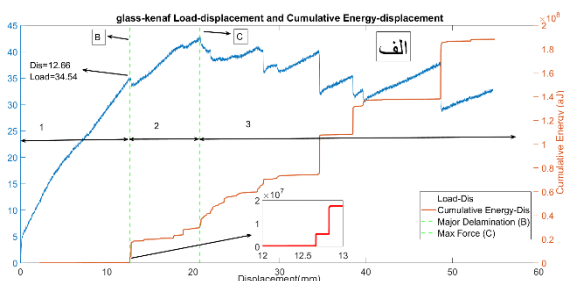
در جدول (۲) به ترتیب مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌های متناظر با شروع اصلی روش‌های مکانیکی و نشر آوایی آورده شده‌است. با توجه به جدول (۲) مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌های محاسبه شده از روش غیرخطی شدن نمودار و همچنین میانگین تمامی روش‌های مکانیکی و نشر آوایی نمونه کنف-پنبه بالاترین چقرمگی را دارد و پس از آن نمونه‌های کنف-شیشه و کنف-کنف قرار دارد. با توجه به جدول (۲) روش شمارش ضرب آهنگ کم‌ترین خطا را نسبت به روش غیرخطی شدن نمودار که مورد پیشنهاد استاندارد است، را دارد. در جدول (۳) مقادیر جابجایی بحرانی متناظر با شروع اصلی تشخیص داده شده با روش‌های مکانیکی و نشر آوایی آورده شده‌است. با توجه به جدول‌های (۲) و (۳) می‌توان نتیجه گرفت در لحظه ورود از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک هرچقدر نمونه جابجایی بحرانی بزرگ‌تری داشته باشد میزان مقاومت نمونه در برابر جدایش بین لایه‌های نیز بیشتر است.

جدول ۲ مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌های اصلی

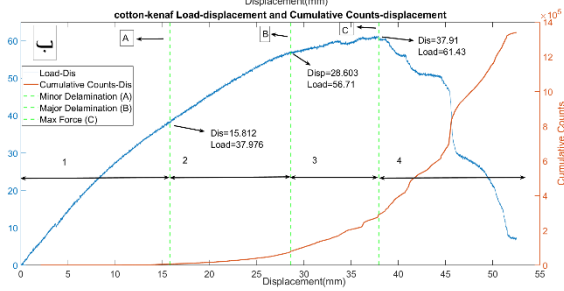
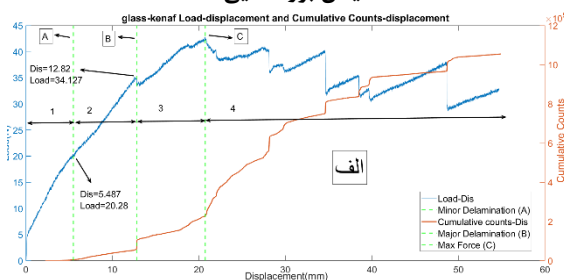
محاسبه شده با روش‌های مکانیکی و نشر آوایی ( $\frac{J}{m^2}$ )

روش	KG	KC	KK
NL	۴۰۸/۱۰	۹۳۲/۲۷	۴۰۴/۷۴
%5max	۶۵۱/۶۸	۱۰۳۴/۹۵	۴۷۸/۹۱
VIS	۷۵۸/۹۵	۹۷۱/۶۴	۶۱۷/۵۵
Energy	۴۰۰/۸۵	۹۵۵/۴۵	۵۳۹/۳۶
CUM Energy	۴۰۰/۸۵	۱۱۲۷/۲۴	۴۳۳/۱۳
Counts	۴۰۰/۸۵	۹۳۵/۸۵	۴۰۲/۲۷
CUM Counts	۳۹۹/۸۰	۹۳۵/۸۵	۴۳۰/۰۳
Average	۴۸۸/۷۳	۹۸۴/۷۵	۴۷۲/۲۸

داده شده‌است. شروع جزئی نمونه‌ها با خط A، شروع اصلی نمونه‌ها با خط B، حداکثر نیرو با خط C، و مقادیر نیرو و جابجایی متناظر با شروع جزئی، شروع اصلی و حداکثر نیرو نشان داده شده‌است.



شکل ۱۱ نمودارهای نیرو-جابجایی-انرژی تجمعی برای نمونه‌های الف (کنف-شیشه، ب) کنف-پنبه، ج) کنف-کنف (مقیاس بزرگنمایی شده).



ترک از فاز یاف کنف میانی عبور کرده و وارد فاز یاف شیشه نزدیک سطح نمونه می‌شود. اما در نمونه کنف-پنبه یاف پنبه باعث افزایش قابل توجهی (۱۳۰٪) در چقرمگی شکست بین لایه‌ای می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر افزودن یاف طبیعی بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، تنها روش‌های ارائه شده در استاندارد ASTM D5528 برای تعیین لحظه شروع جدایش بین لایه‌ای کامپوزیت‌های یاف طبیعی کافی نمی‌باشد و برای نمونه‌هایی که نمودار نیرو-جابجایی به آرامی تغییر شیب می‌دهد باید از روش‌های نشرآوایی برای تعیین لحظه شروع جدایش استفاده شود. از میان روش‌های نشرآوایی از روش‌های انرژی، انرژی تجمعی، شمارش ضرب‌آهنگ و شمارش ضرب‌آهنگ تجمعی استفاده شد. روش شمارش ضرب‌آهنگ کم‌ترین درصد خطا معادل ۱.۸ درصد نسبت به روش غیرخطی شدن نمودار را در مقایسه با سایر روش‌ها برای تعیین شروع چقرمگی شکست بین لایه‌ای که در استاندارد پیشنهاد شده است، نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از بار بحرانی و جابجایی بحرانی بدست آمده از روش‌های مکانیکی و نشرآوایی مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای برای نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که یاف کنف ترک را از خود عبور نمی‌دهد و نوک ترک با رسیدن به یاف کنف پرش بین لایه‌ای را تجربه می‌کند و وظیفه مقاومت در برابر رشد جدایش بین لایه‌ای بر عهده یاف‌های دیگر استفاده شده در نمونه‌ها می‌باشد. در نمونه‌هایی که در آن از یاف کنف استفاده شده است افزایش زیادی در چقرمگی شکست بین لایه‌ای مشاهده نمی‌شود. اما افزودن یاف پنبه چقرمگی شکست بین لایه‌ای شروع نمونه را ۱۳۰٪ افزایش می‌دهد.

#### ۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

جدول ۳ مقادیر جابجایی بحرانی متناظر با شروع اصلی تشخیص داده شده با روش‌های مکانیکی و نشرآوایی (mm)

روش	KG	KC	KK
NL	۱۲/۶۴۲	۲۸/۵۸	۱۲/۶۴
%5max	۱۷/۸۷	۳۰/۷۱	۱۴/۱۱
VIS	۲۰/۲۸	۲۹/۲۹	۱۷/۳۰
Energy	۱۲/۶۶	۲۸/۹۶	۱۵/۵۴
CUM Energy	۱۲/۶۶	۳۲/۸۹	۱۳/۲۲
Counts	۱۲/۶۶	۲۸/۶۰	۱۲/۶۵
CUM Counts	۱۲/۸۲	۲۸/۶۰	۱۳/۲۳
Average	۱۴/۵۱	۲۹/۶۶	۱۴/۱۰

در جدول (۴) مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای شروع اصلی محاسبه شده با روش‌های مکانیکی و نشرآوایی در مطالعه سعیدفر و همکاران و حسینی و همکاران آورده شده است [۱۹، ۲۰].

جدول ۴ مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای شروع اصلی

روش	شیشه تک جهته <sup>۱</sup>	شیشه بافته شده <sup>۲</sup>	منابع
NL	۲۲۰	۳۰۰	[۱۹]
NL	-	۴۰۴/۸۸	[۲۰]
%5max	۲۶۰	۵۰۰	[۱۹]
VIS	۳۰۰	۵۳۰	[۱۹]
CUM Energy	۲۵۰	۲۸۰	[۱۹]

با مقایسه مقادیر جدول‌های (۲) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت استفاده از یاف کنف با شیشه تاثیر زیادی در افزایش چقرمگی شکست بین لایه‌ای ندارد و با توجه به مشاهدات چشمی نیز ترک در داخل فاز یاف کنف رشدی ندارد و زمانی که نوک ترک به یاف کنف می‌رسد پرش بین لایه‌ای را تجربه می‌کند و ترک وارد فاز یاف شیشه می‌شود و رفتار نمونه بسیار شبیه به شیشه خالص می‌باشد. در نمونه کنف-شیشه زمانی که نوک ترک به فاز یاف کنف می‌رسد پرش لایه‌ای کوچکی را تجربه می‌کند و ترک وارد فاز یاف شیشه می‌شود. در نمونه کنف-کنف نیز وقتی نوک ترک به یاف کنف می‌رسد نمونه پرش لایه‌ای بزرگی را تجربه می‌کند و

<sup>2</sup> Woven Glass

<sup>1</sup> -Unidirectional Glass

- Materials*, 29(4), 519-537.
- [12] Saidane, E. H., Scida, D., Pac, M. J., & Ayad, R. (2019). Mode-I Interlaminar Fracture Toughness of Flax, Glass and Hybrid Flax-Glass Fibre Woven Composites: Failure Mechanism Evaluation Using Acoustic Emission Analysis. *Polymer Testing*, 75, 246-253.
- [13] Gholamiyan Nezhad. G., Refahi Oskouei, A. (2023). Estimation of Delamination in Polymer Composites Reinforced with Metal Pins Under Mode I Loading Using Acoustic Emission Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (11), 32-51. (In Persian)
- [14] 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.
- [15] Carraro, P. A., Maragoni, L., & Quaresimin, M. (2015). Influence of manufacturing induced defects on damage initiation and propagation in carbon/epoxy NCF laminates. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(1), 44-53.
- [16] Fotouhi, M., Pashmforoush, F., Ahmadi, M., & Refahi Oskouei, A. (2011). Monitoring the initiation and growth of delamination in composite materials using acoustic emission under quasi-static three-point bending test. *Journal of reinforced plastics and composites*, 30(17), 1481-1493.
- [17] Fotouhi, M., Fotouhi, S., & Ahmadi, M. (2014). Acoustic Emission Based Study to Monitor the Initiation and Growth of Delamination in Composite Materials. *Modares Mechanical Engineering*, 14(3), 78-84. (In Persian)
- [18] Mohammadi, R., Saeedifar, M., Ahmadi Najafabadi, M., & Hosseini Toudeshky, H. (2017). Acoustic Emission Based Methodology to Evaluate the Fracture Toughness in Carbon/Epoxy Composites. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(2), 379-386. (In Persian)
- [19] Saeedifar, M., Fotouhi, M., Mohammadi, R., Najafabadi, M. A., & Toudeshky, H. H. (2014). Investigation of Delamination and Interlaminar Fracture Toughness Assessment of Glass/Epoxy Composite by Acoustic Emission. *Modares Mechanical Engineering*, 14(4), 1-11. (In Persian)
- [20] Hosseini, M. R., Taheri-Behrooz, F., & Salamatlab, M. (2019). Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Woven Glass/Epoxy Composites with Mat Layers at Delamination Interface. *Polymer Testing*, 78, 105943.
- ۷ منابع
- [1] Dittenber, D.B., & Gangarao, H.V.S. (2012). Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf*, 43(8), 1419-1429.
- [2] Davoodi, M.M., Sapuan, S.M., Ahmad, D., Aidy, A., Khalina, A., & Jonooobi, M. (2010). Mechanical Properties of Hybrid Kenaf/Glass Reinforced Epoxy Composite for Passenger Car Bumper Beam. *Mater Des*, 31(10), 4927-4932.
- [3] Nisini, E., Santulli, C., & Liverani, A. (2017). Mechanical and Impact Characterization of Hybrid Composite Laminates with Carbon, Basalt and Flax Fibres. *Compos B Eng*, vol. 127, 92-99.
- [4] Sarikaya, E., Çallioğlu, H., & Demirel, H. (2019). Production of Epoxy Composites Reinforced by Different Natural Fibers and their Mechanical Properties. *Compos B Eng*, vol. 167, 461-466.
- [5] Sause, M.G., Müller T., & Horoschenkoff A. (2012). Quantification of Failure Mechanisms in Mode-I Loading of Fiber Reinforced Plastics Utilizing Acoustic Emission Analysis. *Composites Science and Technology*, 72(2), 167-174.
- [6] Mohamad, F., Hossein, H., Farzad, P., & Ahmadi Najaf Abadi, M. (2011). Composite Materials Damage Characterization under Quasi-Static 3-Point Bending Test Using Fuzzy C-Means Clustering. *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, 1221-1228.
- [7] Almansour, F. A., Dhakal, H. N., & Zhang, Z. Y. (2017). Effect of Water Absorption on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Flax/Basalt Reinforced Vinyl Eter Hybrid Composites. *Composite structures*, 168, 813-825.
- [8] Kanakannavar, S., Savanur, S., Sridhar, I., Gouda, P. S., & Veereshkumar, G. B. (2018). Improved Delamination Behaviour in Glass-Cotton Reinforced Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24984-24996.
- [9] Amenabar, I., Mendikute, A., López-Arraiza, A., Lizaranzu, M., & Aurrekoetxea, J. (2011). Comparison and Analysis of Non-Destructive Testing Techniques Suitable for Delamination Inspection in Wind Turbine Blades. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1298-1305.
- [10] Weng, M. S., Dunn, S. E., Hartt, W. H., & Brown, R. P. (1982). Application of Acoustic Emission to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete. *Corrosion*, 38(1), 9-14.
- [11] Fotouhi, M., & Najafabadi, M. A. (2016). Acoustic Emission-Based Study to Characterize the Initiation of Delamination in Composite Materials. *Journal of Thermoplastic Composite*