

## An Empirical study on fracture mode I Of Epoxy/Glass composite beam with different angles using Electromechanical Impedance (EMI) method

Alireza Khaleghi | Reza Hamzeloo  | Amir Refahi Oskuei 

Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: [rehamzeloo@sru.ac.ir](mailto:rehamzeloo@sru.ac.ir)

### Article Information:

#### Research Article

Received 10 January 2023

Revised 14 February 2023

Accepted 17 Feb. 2023

#### Keywords:

Composite beam,  
fracture mechanism,  
crack growth,  
nondestructive  
measurement,  
electromechanical  
impedance.

### ABSTRACT

Glass-fiber-polymer-composites are common composite types that can achieve optimum strength or desired mechanical properties for different applications by altering various parameters such as angular alignment of fibers. Fracture in these types of composites involves a combination of different mechanisms such as matrix crack, fiber breakage, delamination, and fiber debonding from the matrix. This paper presents an empirical investigation of the first mode failure mechanisms in glass/epoxy composite beams with different fiber angles by means of nondestructive electromechanical impedance measurements, force-displacement diagrams and observations. For this purpose, after fabricating beam specimens and attaching the piezoelectric sensor on them, the impedance spectra of the beams are compared with the reference beam spectrum during the elongation and crack opening process. Continuous and rapid crack growth was recognized by spatial and temporal synchronization of impedance data, visual observations of calibration indices on the beam specimen during the crack opening, and recorded movies of the tests and force-displacement diagrams. Studying the beam data with different angles arrangement revealed that the sample 0-90 was more stable during crack growth with fewer force variations. Also, the dominant mode of failure in this sample was the matrix fracture. This study showed that the electromechanical impedance measurement can be used as an effective tool for detecting the initiation and propagation of cracks in this type of composite beams due to high sensitivity at different stages of crack growth.

**Cite this article:** Khaleghi, A., Hamzeloo, R., & Refahi Oskuei, A. (2023). An Empirical study on fracture mode I Of Epoxy/Glass composite beam With different angles using Electromechanical Impedance (EMI) method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 49-61. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.393601.1115>

## بررسی رشد ترک تیر کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با زوایای مختلف در شکست مد اول به کمک روش امیدانس الکترومکانیکی

علیرضا خالقی | سیدرضا حمزه لو<sup>✉</sup> | امیر رفاهی اسکوئی

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: [rehamzeloo@sru.ac.ir](mailto:rehamzeloo@sru.ac.ir)

### چکیده:

کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف شیشه نوع متداولی از کامپوزیت‌ها هستند که با تغییر پارامترهای مختلفی مانند چینش زاویه‌ای آنها می‌توان به مقدار بهینه‌ای از استحکام یا خواص مکانیکی مطلوب بنا به کاربردهای مختلف رسید. تخریب در این نوع کامپوزیت‌ها، شامل ترکیب مکانیزمهای مختلف از قبیل شکست ماتریس، شکست الیاف، جدایش لایه‌ای و جدایش الیاف از ماتریس می‌باشد. در این مقاله به بررسی تجربی مکانیزمهای شکست مد اول در تیر کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با چیدمان زوایای مختلف به کمک اندازه‌گیری غیرمخرب امیدانس الکترومکانیکی، نمودارهای نیرو و جابجایی و مشاهدات چشمی وسازه پرداخته می‌شود. بدین منظور پس از ساخت نمونه‌های تیر و نصب سنسور پیزوالکتریک بر روی آنها، درحین فرآیند کشش و بازشدگی ترک در مد اول شکست تیر، طیف‌های امیدانس اندازه‌گیری شده و با طیف مرجع تیر سالم مقایسه می‌شود. پس از انطباق زمانی و مکانی رشد لحظه‌ای ترک در آزمون امیدانس با کمک فیلم برداری و شاخص‌های مدرج بر روی نمونه تیر صورت گرفته، رشدهای مداوم و سریع ترک با شدت‌های مختلف تشخیص داده شد. با مطالعه داده‌های تیرهای با چیدمان زوایای مختلف مشخص شد که نمونه ۹۰/۰ پلیدارتر و دارای تغییرات نیرویی کمتری بوده، همچنین مد غالب شکست در این نمونه شکست ماتریس بوده است. این تحقیق نشان داد که می‌توان از اندازه‌گیری امیدانس الکترومکانیکی به عنوان ابزاری جهت تشخیص شروع و اشاعه ترک این نوع از تیرهای کامپوزیتی با توجه به حساسیت بالا در مراحل مختلف رشد ترک استفاده نمود.

### اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۲۸

### کلیدواژگان:

تیر کامپوزیتی،

مکانیزم شکست،

رشد ترک،

روش اندازه‌گیری

غیرمخرب،

امیدانس الکترومکانیکی.

استناد: خالقی، علیرضا؛ حمزه لو، سیدرضا؛ و رفاهی اسکوئی، امیر. (۱۴۰۱). بررسی رشد ترک تیر کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با زوایای مختلف در شکست مد اول به کمک روش امیدانس الکترومکانیکی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۲)، ۴۹-۶۱.

<http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.393601.1115>

## ۱- مقدمه

از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه<sup>۱</sup> به دلیل خواص ویژه آنها نظیر استحکام به وزن بالا، مقاومت به ضربه و ویژگی‌های کاربردی - انتخابی دیگر بسیار استفاده می‌شود. از موارد مصرف این نوع از کامپوزیت‌ها در صنایع کشتی سازی و صنایع هوایی می‌باشد. این نوع مواد مرکب، تفاوت ماهیتی فراوانی با فلزات دارند، به همین دلیل روش‌های بازرسی غیر مخرب آنها به مانند بازرسی فلزات شناخته شده نیستند. روش‌های بازرسی غیرمخرب کامپوزیت‌ها شامل بازرسی چشمی، التراسونیک، ترموگرافی، آزمون رابط<sup>۲</sup>، شیروگرافی<sup>۳</sup>، آزمون الکترومغناطیسی، رادیوگرافی و آکوستیک امیشن می‌باشد که پیچیدگی‌های خاصی در حین آزمون دارند [۱]. این روش‌ها هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند که انتخاب روش مناسب از اهمیت برخوردار است. بعلاوه بررسی و توسعه دیگر روش‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. روش متداول بازرسی کامپوزیت‌ها استفاده از آزمون نشرآوایی (آکوستیک امیشن) می‌باشد. مسعود نیکبخت و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی تشخیص انواع مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت الیاف شیشه، با چینش زاویه‌ای مختلف الیاف به کمک آکوستیک امیشن پرداختند [۲]. رفاهی و همکاران در سال ۲۰۱۰ رشد ترک و خواص بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه/پلی استر در شکست مد اول را به روش آکوستیک امیشن مورد بررسی قرار دادند [۳]. برونر در سال ۲۰۱۸ با ترکیب روش آکوستیک امیشن و المان محدود، بر روی تشخیص منبع ترک و نوع آن در کامپوزیت مطالعه‌ای انجام داده‌است [۴]. تشخیص نوع ترک در کامپوزیت‌ها، از جهت شناخت و تقویت آنها بسیار حائز اهمیت است؛ دیوید کریولی و همکاران در سال ۲۰۱۵ موفق به تفکیک نوع ترک جدایش بین لایه‌ای و شکست ماتریس در بارگذاری خستگی به کمک روش آکوستیک امیشن و تکنیک الگوریتم شبکه عصبی در کامپوزیت الیاف کربن شدند [۵]. شکست بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها نوع متداول شکست می‌باشد. طبق مطالعه‌ای که میلاد سعیدی فر و همکاران در سال ۲۰۱۵ بر روی کامپوزیت الیاف شیشه انجام دادند مشخص شد که

روش‌های مبتنی بر AE بیشتر از روش‌های مرسوم دیگر نظیر اولتراسونیک و ترموگرافی برای شناسایی پدیده جدایش بین لایه‌ای کاربرد دارند [۶]. مارتینز و همکاران در سال ۲۰۱۴ زمان واقعی ترک و نوع آن را با اعمال فیلتر فرکانسی مناسب بررسی کردند [۷].

توسعه روش‌های نظارت بر سلامت سازه در حین کار و بصورت آنلاین، به منظور کاهش هزینه و بهبود ایمنی، بر اساس یک برنامه بازرسی پیش‌گیرانه در زمان کوتاه از اهداف مهندسی بازرسی غیرمخرب می‌باشد.

یکی از روش‌های نظارت بر سلامت سازه، استفاده از تغییرات امپدانس مکانیکی سازه است که مرتبط با سختی سازه، یکپارچگی سازه و شرایط مرزی قرارگیری سازه می‌باشد و یا به واسطه حضور آسیب ایجاد می‌شود می‌باشد. تشخیص تغییرات امپدانس مکانیکی سازه با استفاده از معادل الکتریکی آن بصورت کوپل الکترومکانیکی سازه/سنسور امکان‌پذیر است که روش امپدانس الکترومکانیکی نامیده می‌شود. در واقع روش امپدانس الکترومکانیکی یکی از آزمون‌های غیر مخرب است که امکان بازرسی تجهیزات به صورت پیوسته و درحین خدمت رسانی را امکان پذیر می‌سازد. یکی از ابزارهای مورد استفاده برای شناسایی امپدانس الکترومکانیکی استفاده از مبدل‌های پیزوالکتریک است که توانایی تحریک و حسگری را بصورت همزمان دارا می‌باشند. ثبت طیف امپدانس الکترومکانیکی سازه سالم برای پایش سلامت سازه بعنوان طیف مبنا لازم است. با مقایسه هر لحظه طیف امپدانس سازه با طیف سازه سالم به عنوان طیف مرجع می‌توان تغییرات ایجاد شده در امپدانس سیستم را مشاهده کرد و میزان سلامت سازه را بصورت بلادرنگ تشخیص داد.

در ابتدا در سال ۱۹۹۴ تحقیقات لیانگ<sup>۴</sup> و همکارانش در زمینه خواص کوپلینگ وصله پیزوالکتریک متصل به یک تیر و استخراج امپدانس الکترومکانیکی سیستم منتشر شد [۸]. چودری<sup>۵</sup> و همکارانش تحقیقات را ادامه داده و با استفاده از محرکه‌های پیزوالکتریک که در دوطرف سازه متصل کرده بودند، توانایی تحریک و حس کردن پیزوالکتریک‌ها را با جزئیات آن بررسی و وابستگی ادیتمانس الکتریکی به امپدانس سازه را برای اولین بار مشاهده کردند. این آزمایش امکان

4. Liang  
5. Chaudhry

1 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)  
2 Bond testers  
3 Shearography

بررسی شدت عیب پرداخته می‌شود.

### ۲-۱ مواد اولیه

نمونه‌های تیر کامپوزیتی با توجه به استاندارد ASTM D5528 که مربوط به تیرهای یکسرگردار دولبه و آزمون جدایش بین لایه‌ای آنها است ساخته شدند. در این پژوهش از الیاف شیشه بافته شده تک جهته که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است استفاده شد. رزین به کار گرفته شده اپوکسی گرما سخت است که با نسبت ۸۰٪ به ۲۰٪ با سفت کننده مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مواد بکار رفته در جدول ذکر شده است.

جدول (۱) مشخصات مواد اولیه

مواد	نام تجاری	مشخصات
رزین	NPEF-164	اپوکسی گرما سخت
الیاف	Epoxy resin	تک جهته با تراکم $680 \text{ g/cm}^2$ و ضخامت $0.26 \text{ mm}$
سنسور/ محرکه	YC- G680	وصله پیزو الکتریک با ابعاد $15 \times 15 \times 0.27 \text{ mm}$

### ۲-۲ فرآیند ساخت

برای ساختن کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، در ابتدا پارچه تک جهته با توجه به استاندارد ASTM D5528 در ابعاد در سطح  $20 \times 20$  میلی متر و زوایای مورد نظر برش داده شده و سپس ۸ لایه مطابق با شکل ۱ روی هم چیده شدند و روی صفحه ای قرار گرفتند. برای ایجاد پیش ترک، در یک سر نمونه‌ها بین لایه ۴ و ۵ نوار تفلونی به طول ۶۵ میلی‌متر مطابق شکل ۲ قرار داده شد. برای آماده سازی محلول رزین، رزین و سفت کننده به نسبت وزنی مشخص به آرامی هم زده شد. به روش تزریق در خلأ صفحه ای که الیاف روی آن قرار گرفتند، آب بندی و آماده مکش شد، سپس به کمک پمپ خلاء، محلول به داخل کشیده شد و الیاف به مرور به محلول آغشته شدند؛ پمپ به مدت ۶ ساعت در آن حالت باقی ماند تا رزین به حالت ژله ای درآید

مانیتور کردن رفتار سازه را با اندازه‌گیری ادمیتانس پیزوالکتریک ایجاد کرد [۹]. جورجیوتو<sup>۱</sup> و زاگری<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۰ آنالیز تک بعدی سنسور فعال پیزوالکتریک را انجام داده و مدل تحلیلی بر پایه تئوری ارتعاش سازه‌ای و تئوری پیزوالکتریک توسعه یافته را استخراج کرده و از آن برای پیش‌بینی پاسخ امپدانس الکترومکانیکی قابل اندازه‌گیری استفاده کردند [۱۰]. اینمن<sup>۳</sup> و پارک<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۱ امکان استفاده از روش امپدانس برای مانیتورینگ خطوط لوله را بررسی کرده و عیوب مربوط به شل شدن پیچ‌ها و اتصالات را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. آخوندی و حمزه لو در سال ۲۰۱۱ به بررسی عیوب ناشی از خوردگی در تیر یکسرگردار و تاثیر عوامل ناشی از آن در امپدانس الکترومکانیکی تیر پرداختند [۱۲]. در ادامه حمزه لو و همکاران در سال ۲۰۱۲ تشخیص عیب داخلی در استوانه‌های توخالی فلزی آلومینیومی و فولادی در ضخامت‌های مختلف را با روش اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی، مورد بررسی قرار دادند [۱۳].

با توجه به بررسی‌های انجام شده، مطالعات زیادی روی اندازه‌گیری امپدانس سازه‌های مختلف فلزی نظیر تیر، لوله و سازه پل صورت گرفته است، لیکن نیازمند به تشخیص عیب در مواد جدیدتر مانند انواع کامپوزیت‌ها می‌باشیم. بعلاوه تشخیص عیوب و نحوه رشد ترک در سازه‌های کامپوزیتی به دلیل پیچیدگی این نوع مواد همواره مورد تحقیق می‌باشد. در این مقاله تشخیص عیب و بررسی نحوه رشد ترک و مکانیزم‌های شکست در بارگذاری مد اول تیر کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با زوایای مختلف به کمک روش امپدانس الکترومکانیکی و بصورت همزمان با بازرسی چشمی و نمودارهای بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- مواد و روش تحقیق

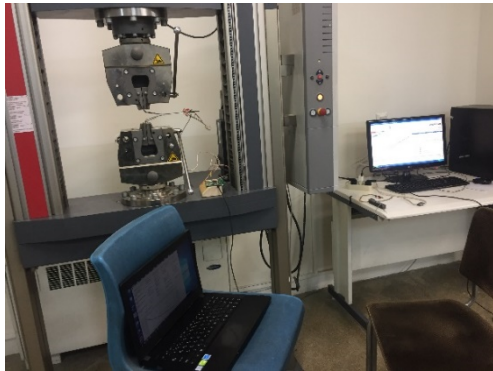
در این بخش در ابتدا به نحوه ساخت نمونه‌های کامپوزیتی و مواد و لایه‌چینی آنها پرداخته و پس از بیان نحوه انجام آزمون بازشدگی ترک و اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی، به نحوه استخراج لندیس‌های خرابی جهت

3 Inman  
4 Park

1 Giurgiutiu  
2 Zagrai

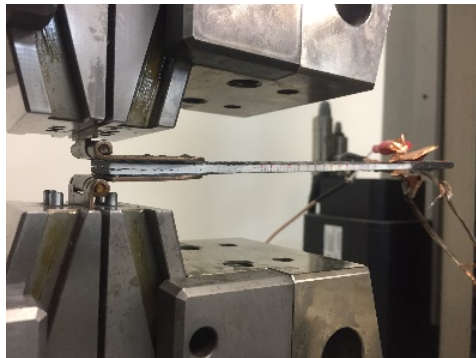
### ۲-۳ تجهیزات آزمون باز شدگی ترک

برای بارگذاری شبه استاتیکی نمونه‌ها از دستگاه Zwick با ظرفیت ۱۵ تن با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری از ۰/۱ تا ۵۰ میلی متر بر دقیقه استفاده شد. در این پژوهش بارگذاری با سرعت کششی ثابت 3 mm/min در شرایط محیطی استاندارد در دمای 24° C انجام شد (تغییرات دمایی بر سنسور و اندازه گیری امیدانس تاثیرگذار است). در حین آزمون از ابتدا داده‌های نیرو-جابجایی توسط کامپیوتر متصل به دستگاه کشش و نرم افزار مربوطه ترسیم گردید. به علاوه اندازه‌گیری طیف‌های امیدانس سنسور پیزوالکتریک توسط بورد داده‌برداری با چیپ مخصوص AD5933 با اتصال به پل تاپ صورت گرفت (شکل ۴).



شکل ۴- تجهیزات آزمون بازشدگی ترک و اندازه‌گیری امیدانس

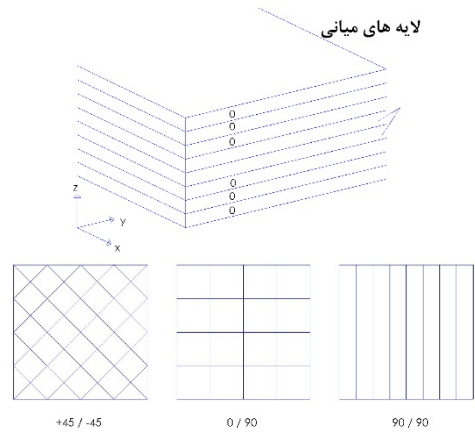
بر روی نمونه تیر شاخص‌های عرضی با فواصل ۵ میلی‌متر نصب شد تا مکان انتهای پیش‌ترک و همچنین مراحل رشد ترک مشخص باشد (شکل ۵). به‌علاوه اندازه‌گیری‌های امیدانس با عبور ترک از این فواصل و با ۳ بار اندازه‌گیری و میانگین‌گیری به منظور حذف خطا صورت گرفت.



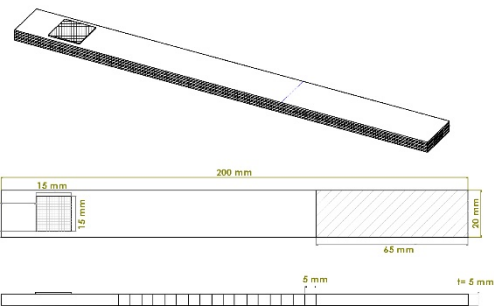
شکل ۵- نمونه تیر با پیش‌ترک اولیه در حین آزمایش شکست مد اول

تا از ورود هوا به آن جلوگیری شود.

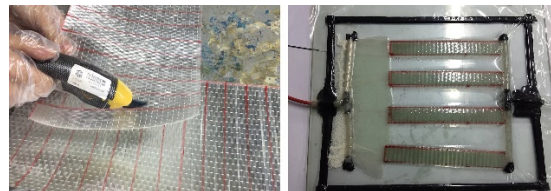
جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون کشش و قرار گرفتن در دستگاه، در صفحات بالایی و زیری تیر، بست‌های لولایی چسب‌بند شده در انتهای تیر نیز سنسورهای پیزوالکتریک با ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۰/۲۶۷ میلی‌متر به وسیله چسب چسب‌بند شده (شکل ۲). مراحل ساخت تیرهای کامپوزیتی به روش تزریق در خلا با کمک پمپ نیز در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱- زوایا در لایه چینی کامپوزیت



شکل ۲- نقشه نمونه تیر کامپوزیتی، محل سنسور و پیش‌ترک بر روی تیر



شکل ۳- مراحل ساخت تیرهای کامپوزیتی لایه-چینی و مکش در کیف خلا

#### ۲-۴ آزمون امپدانس الکترومکانیکی

برای اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی سنسورهای پیزوالکتریک روی تیر نصب شد و از بورد متعلق به شرکت آنالوگ دیوایس<sup>۱</sup> که در شکل ۶ نشان داده شده، استفاده شده است. پهنای باند موثر این بورد از ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز است. بازه ۳۵ تا ۱۰ کیلوهرتز به دلیل دارا بودن پیک‌های بیشتر برای تمامی نمونه‌ها انتخاب شده است. مشخصات سنسور پیزوالکتریک مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات ماده پیزو الکتریک PSI-5H4E

نماد	مقدار	مواد
$K_{T3}$	3800	ثابت دی-الکتریک نسبی
$\rho$	7800 kg/m <sup>3</sup>	چگالی
$Y_{E3}$	5e10 N/m <sup>2</sup>	مدول الاستیک 3
$Y_{E1}$	6.2e10 N/m <sup>2</sup>	مدول الاستیک 1

قبل از ایجاد عیب اندازه‌گیری شده بود توسط روش RMSD که در رابطه ۱ ارائه شده است، مقایسه می‌گردد و مقدار حاصل به عنوان اندیس خرابی استخراج و در بخش نتایج به صورت نمودارهای ستونی نمایش داده می‌شود.

$$RMSD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Re(Z(\omega_i)) - Re(Z_0(\omega_i)))^2}{\sum_{i=1}^N Re(Z_0(\omega_i))^2}} \quad (1)$$

در این رابطه  $Re(Z(\omega_i))$  بخش حقیقی سیگنال امپدانس استخراجی در هر مرحله پس از ایجاد عیب و  $Re(Z_0(\omega_i))$  بخش حقیقی سیگنال امپدانس برای سازه سالم، قبل از ایجاد عیب می‌باشد. همچنین  $\omega_i$  ها تک فرکانس‌های موجود در بازه فرکانسی می‌باشند که تعداد آنها برای  $i$  از 1 تا N وابسته به رزولوشن سیگنال می‌باشد.

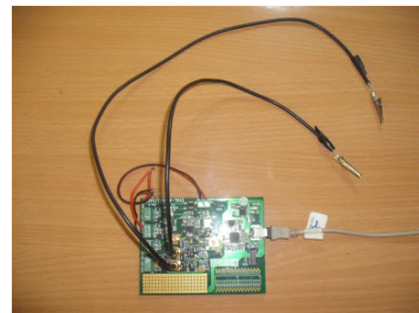
پس از مقایسه و استخراج تفاضل سیگنال‌های امپدانس در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۳۵ کیلوهرتز، اندیس‌های خرابی محاسبه شده مورد مطالعه قرار می‌گیرند، تا بتوان از این طریق به تشخیص شروع، حضور و پیشروی عیب پرداخت.

#### ۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج چشمی رشد ترک، نمودارهای نیرو-جابجایی، طیف‌های امپدانس و اندیس‌های خرابی حاصل از آنها برای هر سه نوع نمونه ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرند. در حین آزمون، علاوه بر مشاهدات چشمی و تهیه عکس، با یک دوربین دیگر فیلم آزمونها نیز ضبط شده و در تهیه و تحلیل نتایج از آن استفاده شده است. لازم به ذکر است که بمنظور بررسی تکرار پذیری و حذف خطاها، این آزمون‌ها برای هر نوع لایه چینی با کد مشخص، برای ۲ نمونه ساخته شده از هر نوع انجام گرفته و با توجه به تکرار نتایج و تشابه، فقط نتایج مربوط به یک نمونه از هر نوع لایه چینی ارائه شده است.

#### ۳-۱ مشاهدات چشمی و تصاویر شکست در حین آزمایش

در طول انجام آزمایش شکست مد اول بر روی تیر کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه، ترکیب چند مکانیزم شکست در مراحل مختلف رشد ترک مشاهده شد. این



شکل ۶- بورد امپدانس شرکت آنالوگ دیوایس

هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی توانایی تشخیص عیوب بر روی نمونه‌های تیر توسط روش امپدانس الکترومکانیکی می‌باشد. اساس روش اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی تغییر در سختی سازه به دلیل وجود عیب می‌باشد.

این آزمایش‌ها براساس اندازه‌گیری طیف امپدانس الکتریکی سنسور پیزوالکتریک متصل به نمونه‌های سالم و معیوب می‌باشد و با مقایسه تغییرات و محاسبه تفاضل طیف‌ها با روش آماری تفاضل مجذور مربعات ( $RMSD^2$ ) کمیتی عددی به عنوان اندیس خرابی استخراج می‌گردد. پس از هر بار اندازه‌گیری طیف امپدانس مربوط به سازه‌های معیوب، این طیف با طیف مرجع<sup>۳</sup> مربوط به طیف امپدانس سازه سالم که

3 Baseline

1 Analogue Device

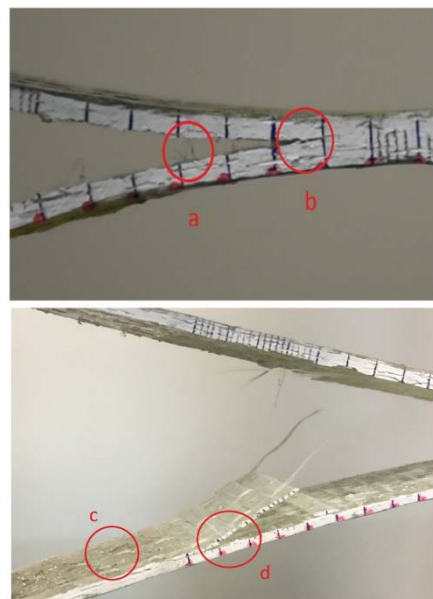
2 Root Mean Square Deviation

نمودار نیرو-جابجایی ثبت شده توسط دستگاه در حین آزمون برای تمام نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به مشاهدات در حین آزمون در نمونه ۹۰/۹۰ که شامل ۹ مرحله مکث، سپس رشد ترک پس از افزایش های متوالی نیرو و فاصله دو فک بود و این ۹ مرحله به وضوح در نمودار نیرو-جابجایی قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که اعوجاج اولیه قبل از بزرگترین افزایش نیرو، به دلیل باز شدن پیش ترک مصنوعی ایجاد شده بوده و با توجه به شاخصهای عرضی روی تیر، قابل تشخیص بود. همینطور برای نمونه ۹۰/۰ در مشاهدات تجربی شاهد ۸ مرحله مکث بودیم که در نمودار نیرو - جابجایی قابل مشاهده است. در نمونه ۴۵/۴۵ نیز شاهد این تطابق هستیم و ۴ مرحله مکث و پس از آن رشد سریع مشاهده می‌گردد.

همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است مابین نمونه‌ها حداکثر نیروی شکست مربوط به نمونه ۴۵/۴۵ می‌باشد. در نمونه ۹۰/۰ انرژی شکست به طور میانگین در کل طول بازه شکست کاهش کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد و این نشان دهنده یکپارچگی بیشتر این نمونه نسبت به بقیه است. در نمونه‌های ۹۰/۹۰ و ۹۰/۰ با توجه به افت‌های نیرویی پیاپی، بیشتر شکست‌های سریع مشاهده گشته‌است، ولی در نمونه ۴۵/۴۵ در کل ۴ شکست سریع داشته و سرعت پیشروی ترک کند است. در رشد سریع ترک انرژی در حال افزایش در فک‌های دستگاه کشش انباشته شده و به طور ناگهانی آزاد شده که باعث رد شدن چندین پله‌ای شاخص‌ها می‌شود. این نوع شکست معمولاً پس از یک مکث طولانی در حین رشد رخ می‌دهد. ولی در رشد کند ترک، افزایش طول ترک با نرخ ثابتی رخ داده که در حالت پرش چند شاخصی نداریم. کوتاهترین زمان از موقع شروع کشش تا زمان باز شدن کامل ترک، معادل ۸ دقیقه، در نمونه ۹۰/۰ رخ داده است، که به معنی سریعترین رشد ترک در بین نمونه‌ها می‌باشد و این با تعداد بیشتر رشد سریع ترک در این نمونه همخوانی دارد. نمونه ۴۵/۴۵ با زمان تقریبی ۱۶ دقیقه آهسته‌ترین افزایش طول ترک را داشته و این امر بدان معنی است که نمونه ۴۵/۴۵ دارای استحکام بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها در شکست یا بازشدگی مد اول است و این امری منطقی می‌باشد.

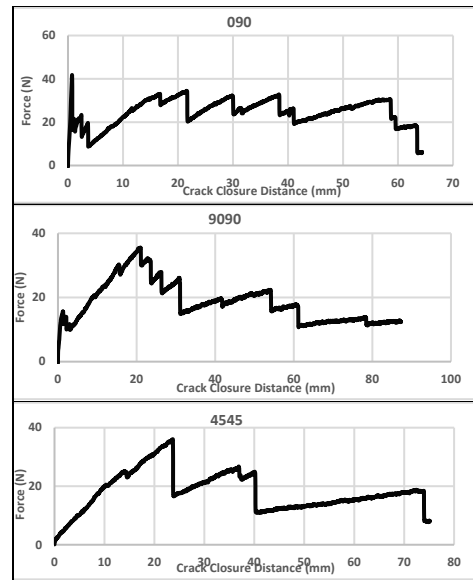
مکانیزم‌ها شامل شکست ماتریس، جدایش لایه‌ای، گسست فیبر از ماتریس و شکست الیاف در شکست مد اول می‌باشد. در نمونه ۹۰/۹۰ ابتدا ترک به علت شکست ماتریس دچار بازشدگی شده که به صورت شکست‌های پیاپی خود را نشان داده‌است. سپس نوع مکانیزم شکست به جدایش بین لایه‌ای تغییر یافته تا اینکه تیر به طور کامل باز شده‌است. در نمونه ۹۰/۰ بعد از عبور از ترک اولیه، ترک به خاطر شکست ماتریس و جدایش بین لایه‌ای به مسیر خود ادامه داد، در مراحل میانی با جدایش الیاف از ماتریس و همینطور شکست الیاف همراه شد که همین عامل منجر به انتقال ترک به صفحه پایینی شده‌است و تا انتهای تیر به صورت پایدار و سرعت ثابتی به رشد خود ادامه داده که در شکل ۷ قابل مشاهده است. چینش زاویه به صورت  $-45/+45$  در نمونه آخر موجب اعمال بیشترین نیرو جهت اولین ترک نسبت به سایر نمونه‌ها شد. در این لایه چینی شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس دیده نشده و کل فرآیند شکست در اثر مکانیزم‌های جدایش بین لایه‌ای و شکست ماتریس به وقوع پیوسته‌است. مکانیزم‌های مختلف شکست رخ داده برای تیرها در حین آزمون در شکل ۷ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که مشاهدات چشمی صورت گرفته شامل ترکیبی از بررسی چشمی مکانیزم های شکست، اندازه‌گیری طول ترک با شاخص های رسم شده بر روی نمونه و بررسی صدای شکست می‌باشد.



شکل ۷- اتفاق افتادن (a) شکست الیاف، (b) جدایش بین لایه ای (c) شکست ماتریس (d) جدایش الیاف از ماتریس

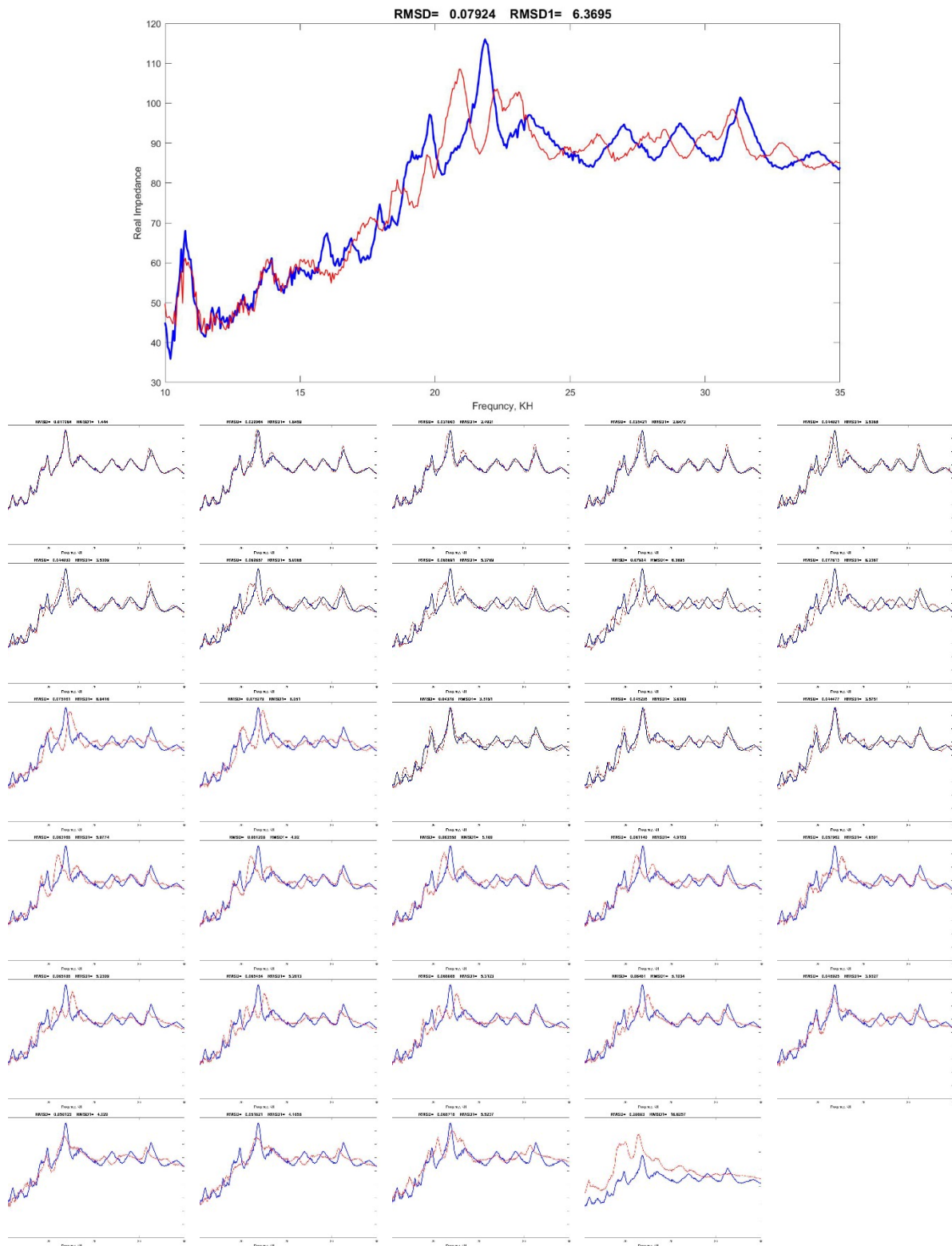
توجهی گرفته‌اند. لازم به ذکر است که معمولاً در این مراحل انتهایی مکانیزم شکست به شکست الیاف تغییر می‌یابد. اختلاف خیلی زیاد نمودارها در تصویر آخر به دلیل رسیدن ترک به زیر سنسور و رشد ناگهانی با افزایش طول خیلی زیاد ترک می‌باشد و از آنجا که ترک به زیر سنسور رسیده نتایج آن به طور کامل قابل اعتماد نیست.



شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی در حین باز شدن دهانه ترک

در شکل ۹ طیف حقیقی امپدانس برای تیر ۹۰/۹۰ در حالت بارگذاری بدون ترک رشد یافته به عنوان طیف مرجع به رنگ آبی مشخص شده است و مراحل رشد ترک طی ۲۹ مرحله با فواصل ۵ میلی‌متر از شروع ترک اولیه ثبت شده‌اند و نمودار امپدانس آنها در هر لحظه به رنگ قرمز است. همانطور که در نمودارهای طیفی شکل ۹ مشخص است در طول رشد ترک با توجه به مکانیزم های مختلف شکست اتفاقات منحصر به فردی در نمودار خرابی رخ می‌دهد که تغییرات در دامنه پیکها و جابجایی موقعیت فرکانسی پیکهای نمودار طیف امپدانس در طول بازه‌ی فرکانسی اندازه‌گیری شده شامل این اتفاقات هستند. در مراحل نهایی که رشد ترک بحرانی‌تر و سریعتر انجام یافته است همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودارها از هم فاصله قابل

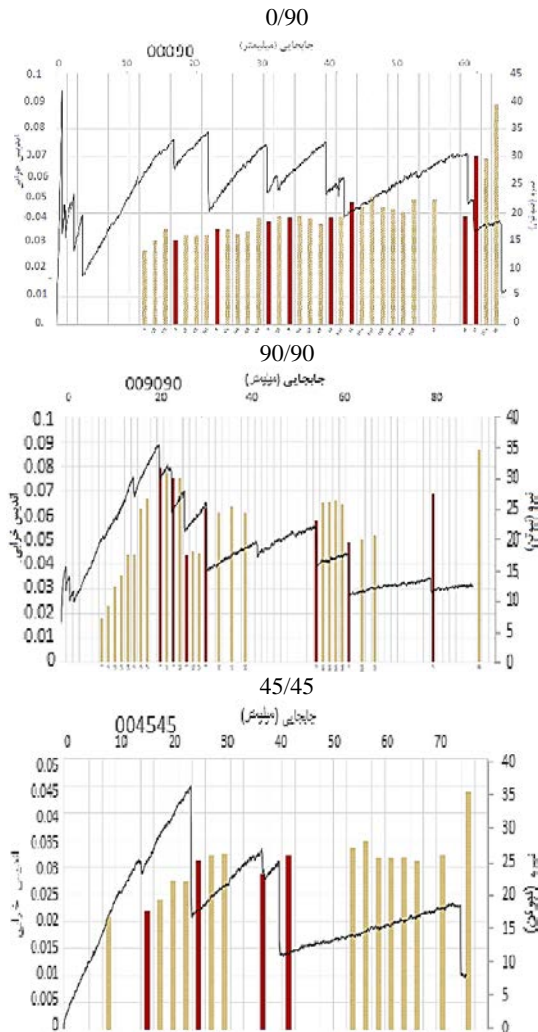




شکل ۹- نمودار طیف حقیقی امپدانس بر حسب فرکانس نمونه ۹۰۹۰ در بازه ۳۵-۱۰ کیلوهرتز

افزایش میزان خرابی نسبت به حالت مرجع با اندازه‌گیری تفاضل نقطه به نقطه در نمودارهای بخش حقیقی امپدانس که در شکل ۹ مشاهده می‌شود بوده و با قرار دادن در رابطه

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که اندیس‌های خرابی برای سه نمونه استخراج شده است که با نمودار نیرو-جابجایی از نظر مکانی و زمانی بر هم نهی شده‌اند این اندیس‌ها بیانگر



شکل ۱۰- نمودار اندیس خرابی برای سه نمونه لایه چینی

۱ استخراج می‌شود. در این نمودارها ستون های قرمز، نشانگر اندیس‌های خرابی اندازه‌گیری شده بلافاصله بعد از رشد سریع ترک می‌باشند. دلیل اختلاف مقدار آنها با نقاط قبلی نیز به دلیل ایجاد خرابی زیاد در نمونه بعد از ترک سریع می‌باشد. انطباق نمودار نیرو-جابجایی با روند اندیس‌های خرابی از روی نمودارهای شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد و این خود تاییدی به صحت روش امیدانس الکترومکانیکی دارد. نقاط آخر در این نمودارها مربوط به زمانی هستند که ترک به زیر سنسور رسیده است.

همانطور که قبلا در مورد یکپارچی بیشتر نمونه ۹۰/۰ نسبت به سایر نمونه‌ها با توجه به نمودار نیرو-جابجایی توضیح داده شد، این یکپارچگی به کمک نمودار های اندیس خرابی نیز قابل مشاهده است اختلاف‌های کم در بین مقادیر اندیس‌های خرابی و عدم جهش‌های ناگهانی در ارقام آنها در حین رشد ترک حاکی از این مطلب است. لازم به ذکر است که فضاهای خالی مشاهده شده مابین اندیس‌ها بدلیل سنکرون نمودن این اندیس‌ها با نمودار نیرو از طریق مشاهدات زمانی از روی فیلم آزمون می‌باشد و در برخی موارد نیز به دلیل رشد سریع ترک در برخی مراحل، عدم فرصت مناسب برای اندازه‌گیری‌های بیشتر امیدانس اتفاق می‌افتد. در ادامه این فرآیند تشخیص به صورت جزئی تشریح می‌گردد. رنگهای قرمز پرنگ در اندیس‌های خرابی بیانگر رشد سریع تشخیص داده شده با روش امیدانس می‌باشد و مابقی اندیس‌ها روند معمولی یا کند رشد ترک را نشان می‌دهند.

### ۳-۲ مشاهدات توضیحات رشد سریع و رشد کند و نحوه تشخیص آنها با امیدانس

در تشخیص رشد سریع ترک با اندیس خرابی در روش امیدانس، اندیس‌هایی که در یک بازه چند تایی شدت اندیس افزایش یا کاهش پیدا کرده با انطباق زمانی و مکانی در فرآیند رشد ترک قابل مشاهده است. بدین منظور با مشاهده فیلم رشد ترک و برداشت لحظه‌ای امیدانس مشاهده گردید که در بعضی موارد رشد ترک به صورت مداوم و در طول شاخص‌های درج شده بر روی نمونه رخ می‌دهد که به آن رشد مداوم ترک می‌گوییم. در برخی موارد نیز رشد سریع ترک با جهش ناگهانی و عبور از چندین شاخص مدرج بر روی نمونه در یک لحظه رخ داده است که به آن رشد سریع ترک می‌گوییم.

جدول ۳- مقایسه تعداد مراحل رشد ترک استخراج شده از روش امپدانس و نمودار نیرو-جابجایی

آزمون و نمونه	تعداد مراحل رشد سریع ترک	تعداد مراحل رشد مداوم ترک
امپدانس ۴۵/۴۵	۴	۳
نیروجابجایی ۴۵/۴۵	۴	۳
امپدانس ۹۰/۰	۸	۶
نیروجابجایی ۹۰/۰	۸	۶
امپدانس ۹۰/۹۰	۷	۵
نیروجابجایی ۹۰/۹۰	۸	۸

در شکل ۱۱ نمودار امپدانس بر حسب فرکانس هر سه نمونه در یکی از نقاط حین آزمون نشان داده شده است تا مقدار و شکل طیف امپدانس برای هر کدام از لایه چینی‌ها را بتوان با یکدیگر مقایسه نمود. علاوه بر تغییرات در طیف امپدانس هر نمونه، شکل طیف هر نمونه نیز بیانگر برخی ویژگی‌هاست. برای مثال هرچه مقدار امپدانس بزرگتر باشد معمولاً بیانگر سفتی و یکپارچگی بیشتر نمونه می‌باشد. با مقایسه این طیف‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که پیک‌های اصلی و بزرگتر نمودار در هر سه نمونه تقریباً در بازه ی  $18 \text{ KHz}$  قرار دارند و پیک‌های قبل از این بازه فرکانسی ریزتر و متراکم و پیک‌های بعد از این بازه از لحاظ مقدار متوسط بوده و پراکنده‌تر هستند و در تمام نمودارها از ابتدا تا بازه پیک‌های اصلی روند افزایشی و پس از آن روند تقریباً ثابت مشاهده می‌گردد. بیشترین مقدار امپدانس مربوط به نمونه ۰۹۰ با مقدار تقریبی ۱۴۰ اهم است. طیف امپدانس نیز در این نمونه دارای پایداری بیشتر بوده و همانند نمودار نیرو که تغییرات نیرویی کمتر برای این نمونه مشاهده شده بود می‌تواند بیانگر سفتی و یکپارچگی بیشتر این نمونه باشد.

در رشد مداوم ترک انرژی توسط نیروی اعمالی فک‌ها در جسم انباشته شده و تغییر شکل نوک ترک با نرخ تقریباً ثابتی رخ می‌دهد. در رشد سریع ترک، انرژی انباشته شده به یکباره تخلیه شده و رشد نوک ترک در حالت بحرانی و ناپایدار قرار دارد. پس معمولاً هر بار رشد سریع ترک بلافاصله پس از یک رشد کند ترک که در آن انرژی آزمون در نمونه ذخیره شده و جسم از خود مقاومت نشان می‌دهد رخ می‌دهد. به دلیل اینکه این اتفاق در کامپوزیت رخ می‌دهد، این فرآیند شامل ترکیب مکانیزم‌های شکست نیز می‌باشد. بدین معنی که برای مثال در حین رشد مداوم ترک شکست‌های ریزی که به انرژی کمی نیاز دارند رخ داده می‌شود مانند شکست ترد ماتریس و در رشد سریع ترک مکانیزم‌هایی که به انرژی بیشتری برای تخریب نیاز دارند مانند جدایش الیاف و جدایش لایه‌ای و شکست الیاف، که نیاز به بیشترین انرژی را دارد و معمولاً در آخرین مراحل رشد ترک رخ می‌دهد، اتفاق می‌افتد.

تعداد مراحل رشد سریع و رشد مداوم برای هر سه نمونه به کمک نمودار نیرو-جابجایی از روی افت نیروهای سریع و همچنین روش امپدانس الکترومکانیکی از روی اختلافات محسوس ایجاد شده در امپدانس نمونه حین آزمون، در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که شاهد هستیم تطابق نزدیکی بین تشخیص هر دو روش، از روی نمودار نیرو و از روش امپدانس، وجود دارد. تنها در مورد ۹۰/۹۰، با توجه به حساسیت بالای روش امپدانس، تشخیص تعداد رشد ترک‌های سریع با این روش کمی بیشتر از روی نمودار نیرو-جابجایی بوده است و این مورد کارآمدی و حساسیت اندازه‌گیری و پایش با این روش را نشان می‌دهد. این تعداد موارد حرکت سریع ترک، با بررسی مجدد فیلم‌های آزمون و تصاویر ضبط شده و گزارش مشاهدات چشمی در حین اجرای آزمون مورد تایید قرار گرفت که نشان از انطباق بیشتر داده‌های امپدانس و واقعیت رشد ترک نسبت به نمودار نیرو جابجایی است.

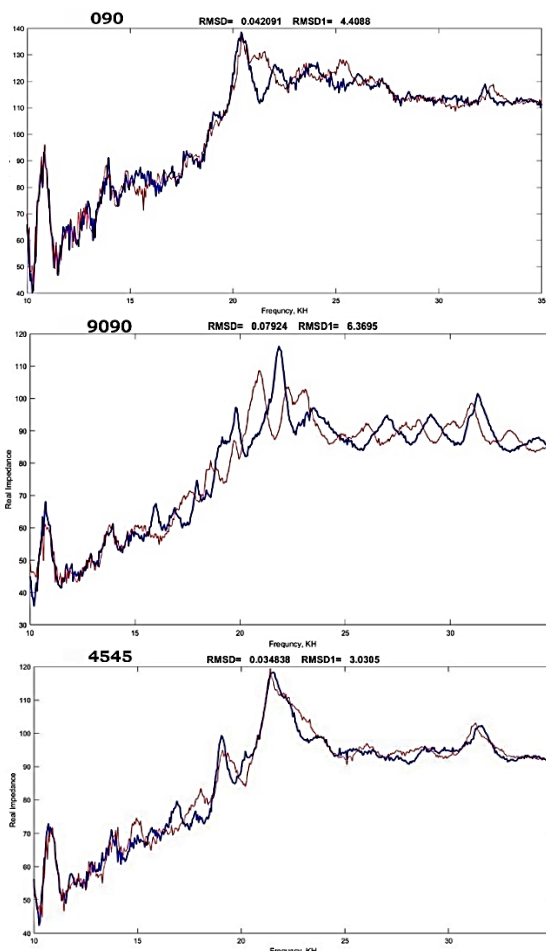
چندین مرحله‌ی رشد و توقف طول ترک مشاهده شد. از انطباق نتایج چشمی، نیرو و امپدانس این مراحل رندهای آرام و سریع در هر نمونه تشخیص داده شد. در مرحله آخر رشد سریعتر ترک توسط اندیس‌های خرابی استخراج شده از روش امپدانس قابل مشاهده است. با مطالعه داده‌های تیرهای با چیدمان زوایای مختلف مشخص شد که نمونه ۰۹۰ دارای پایداری بیشتر و تغییرات نیرویی کمتر بوده و همچنین مد غالب شکست در این نمونه شکست ماتریس بوده است. بیشترین نیروی ثبت شده در بین نمونه‌ها مربوط به اولین شکست در نمونه ۴۵۴۵ بوده که حاکی از چسبندگی بالا در آن است و همچنین این نمونه دارای کمترین تعداد شکست سریع می‌باشد که نشان دهنده یکپارچگی بیشتر این نمونه است و مد غالب شکست آن نیز جدایش بین لایه ای می‌باشد. بررسی همزمان تصاویر چشمی و فیلمبرداری از نمونه در حین رشد ترک، نمودار نیرو - جابجایی آزمون بازشدگی ترک و اندیس‌های خرابی مستخرج از آزمون امپدانس، تطابق اتفاق افتادن مکانیزم‌های شکست را در هر سه روش نمایان شد. بررسی نتایج نشان از حساسیت بالای روش امپدانس در مراحل مختلف رشد ترک می‌باشد. از این رو می‌توان از آزمون امپدانس الکترومکانیکی به عنوان ابزاری جهت تشخیص شروع و اشاعه ترک این نوع از تیرهای کامپوزیتی استفاده نمود. توانایی تشخیص روش امپدانس با مشاهدات چشمی دارای تطابق بیشتری نسبت به نمودار نیرو-جابجایی بوده و حتی در مراحل رشد سریع ترک بحرانی این مرحله را به خوبی شناسایی کرد.

#### ۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۶- منابع

- [1] R.H. Bossi, V. Giurgiutiu, Nondestructive testing of damage in aerospace composites, Polymer Composites in the Aerospace Industry, pp. 413-448, 2015.
- [2] Masood Nikbakht, Jalal Yousefi, Hossein Hosseini-Toudeshky, Giangiacomo Minak, Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization pipes, Composites Part B 113 (2017) 185e196.



شکل ۱۱- نمودار طیف حقیقی امپدانس - فرکانس نمونه‌های با چیدمان مختلف ۰/۹۰، ۹۰/۹۰ و ۴۵/۴۵ در بازه ۳۵-۱۰ کیلوهرتز

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مطالعه‌ی رفتار و مکانیزم‌های شکست در حین شکست مد اول در تیر کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با روش‌های مشاهدات چشمی، نمودار نیرو-جابجایی آزمون امپدانس الکترومکانیکی پرداخته شده است. پس از ساخت نمونه تیر کامپوزیتی با زاویه بندی مختلف و قرار دادن پیش ترک اولیه در حین ساخت، آزمون شکست مد اول با دستگاه کشش تک محور انجام گرفت. در حین آزمون مشاهدات چشمی ثبت شده، نمودار نیرو-جابجایی توسط دستگاه ترسیم گشته و طیف‌های امپدانس الکترومکانیکی از روی سنسور نصب شده بر روی تیر اندازه‌گیری شد و اندیس‌های خرابی از آنها استخراج شد. با توجه به مشاهدات و بررسی تصاویر ثبت شده در عکس‌ها و فیلم‌ها در آزمون بازشدگی ترک در مد اول شکست،

- [13] S. R. Hamzeloo, M. Shamsheersaz, S. M. Rezaei, Damage detection on hollow cylinders by Electro-Mechanical impedance method: experiments and finite element modeling, *Journal of Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 340, pp. 668-677, 2012. Prepare an Electronic Version of Your Article, *Introduction to the Electronic Age*, E-Publishing Inc., 281–304.
- [3] A. Refahi Oskouei, M. Ahmadi, Acoustic Emission Characteristics of Mode I Delamination in GlassPolyester Composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 7, pp. 793-807, 2010.
- [4] Andreas J. Brunner, Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with Acoustic Emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life, *Construction and Building Materials* 173 (2018) 629–637.
- [5] Davide Crivelli, Mario Guagliano, Mark Eaton, Matthew Pearson, Safaa Al-Jumaili, Karen Holford, Rhys Pullin, Localisation and identification of fatigue matrix cracking and delamination in a carbon fibre panel by acoustic emission, *Composites Part B* 74 (2015) 1e12.
- [6] Saeedifar M, Fotouhi M, Ahmadi najafabadi M, Toudeshky HH, Minak G, Prediction of quasi-static delamination onset and growth in laminated composites by Acoustic Emission, *Composites Part B* (2015), doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.037.
- [7] José Martínez-Jequier, Antolino Gallego, Elisabet Suñez, Francisco Javier Juanes, Angel Valea, Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis, *Composites: Part B* 68 (2015) 317–326.
- [8] C. Liang, F. P. Sun, and C. A. Rogers, Coupled electromechanical analysis of adaptive material system-determination of actuator power consumption and system energy transfer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 12-20, 1994.
- [9] V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Bao, Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, pp. 959-976, 2000.
- [10] G. Park, H. Cudney, and D. J. Inman, Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics Journal*, Vol. 30, No.10, pp. 204-213, 2001.
- [11] F. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, and C. A. Rogers, Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, Vol. 6, pp. 134-139, 1995.
- [12] B. Akhundi, M. Shamsheersaz, R. Hamzeloo, Real-time detection of defects caused by corrosion in the cantilever beam with electro-mechanical impedance method, *Iranian Conference on Manufacturing Engineering, ICME12\_336*, 27-29 December, 2011. (In Persian)