نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیت** http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی بهبود خواص مکانیکی اتصالات تکلبه کامپوزیتی پیچی

علىرضا شماعى كاشانى¹، محمودمهرداد شكريه^{*2}

1- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 *صندوق پستی 1114-13466

چکیده	اطلاعات مقاله
	دريافت: 1399/12/23
استفاده از نانوذرات بهمنظور بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی بهصورت روزافزون در صنعت افزایش مییابد. تحقیق حاضر با استفاده	ىذىرش: 1400/08/15
از انجام آزمایشهای گسترده تاثیر افزودن نانوالیاف کربن به اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی از جنس شیشه/اپوکسی بر روی خواص مکانیکی	
اتصال را بررسی میکند. مود خرابی تمامی نمونه ها براساس استاندارد ASTM D5961 از نوع لهیدگی است. در این تحقیق، از طراحی	کلیدواژگان:
آزمایش فاکتوریل عمومی استفاده شد. لایهچینی و نانوالیاف کربن بهعنوان فاکتورهای کنترلی درنظر گرفته شد و تاثیر آنها روی پارامترهای	آزمایش
مکانیکی سفتی اتصال، استحکام و جذب انرژی آن بررسی شد. همچنین با استفاده از مدل المان محدود سهبعدی تاثیر افزودن نانوالیاف	اتصال تكلبه كامپوزيتى
کربن روی سفتی اتصال مکانیکی تکالبه کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور چهار لایهچینی مختلف با تعداد لایه 45 درجه	نانوالیاف دربن مشالمان محدود
متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است مدل فوق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل تئوری موجود راستیآزمایی شده است.	
تطابق مناسبي بين نتايج أزمايشگاهي و نتايج مدل ملاحظه گرديد.	

Investigation of the Effect of Adding Carbon Nanofibers on the Improvement of the Mechanical Properties of Single-Lap Composite Bolted Joints

Ali Reza Shamaei-Kashani, Mahmood Mehrdad Shokrieh*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran *PO.B. 16846-13114, Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir

Keywords	Abstract
Experiment Single-lap composite joint Carbon nanofibers Finite element method	The use of carbon nanofibers in industries is increased due to the improvement of the mechanical properties of composites. In the present research, by an extensive experimental program, the effect of adding carbon nanofibers to the single-lap composite bolted joint made of glass/epoxy on the mechanical properties of the joint was investigated. The failure mode of all joints was the bearing failure mode based on the ASTM D5961 standard. In this research, the factorial design was employed for the design of experiments. The stacking sequence and the volume fraction of carbon nanofibers were considered as the control factors and their effect on the stiffness, strength, and energy absorption of the joint were investigated. Also, a 3D finite element method was presented to investigate the effect of adding carbon nanofibers on the stiffness of single-lap composite bolted joints. To achieve this aim, four layups with different 45-degree layers were investigated. The present FEM model was validated by the experimental results and available theoretical model.

1- مقدمه

و بسته کردن و تعمیر، مقاومت در برابر شرایط محیطی، ظرفیت بالای باربری و وابستهنبودن به آمادهسازی سطح بهطور روزافزون افزوده می شود. در زمینه بررسی آزمایشگاهی اتصالات مکانیکی کامپوزیتی، اسمیت و همکاران [1] استحکام اتصال مکانیکی تکلبه و دولبه را برای لایه چینی شبه ایزوتروپیک و لایه چینی با الیاف متعامد از جنس الیاف کربن بررسی کرده و مشاهده کردند

از اتصالات بهدلیل امکان اتصال اجزای مختلف اعم از فلزی و کامپوزیتی بهطور گسترده استفاده میشود. در میان اتصالات شامل اتصالات مکانیکی، اتصالات چسبی و اتصالات چسبی-پیچی، استفاده از اتصالات مکانیکی بهدلیل امکان باز

Please cite this article using

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Shamaei-Kashani. A, and Shokrieh. M. M., "Investigation of the Effect of Adding Carbon Nanofibers on the Improvement of the Mechanical Properties of Single-Lap Composite Bolted Joints", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1876-1884, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.526726.1711

که استحکام اتصال تکلبه بهدلیل تاثیرات خمش ثانویه، کمتر از اتصال دولبه است. کامانیو و همکاران [2] بهصورت آزمایشگاهی مکانیزم آسیب اتصالات پیچی کامپوزیتی را بررسی کردند. مشاهدات آنها نشان میدهد که خرابی، روندی تجمعی است که مکانیزمهای آسیب شکست الیاف، جدایش لایهها در اطراف سوراخها، ترک در فاز زمینه و مایکروکمانش الیاف، و جدایش لایههای داخلی طی آن مشاهده می شود.

مککارتی و همکاران [3] اتصال تکلبه تکپیچه با لقیهای مختلف از 0 تا 240 میکرومتر را بهصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده تا اثر لقی سوراخ را روی سفتی و استحکام اتصال مطالعه کنند. نتایج آنان نشان میدهد که استحکام لهیدگی نهایی وابستگی چندانی به لقی ندارد. در این زمینه تاثیر لقی روی رفتار مکانیکی اتصال تکلبه با چندپیچ کامپوزیتی [4] و اتصال دولبه با چندپیچ کامپوزیتی [5] نیز بررسی شده است. شماعی کاشانی و شکریه [6] و طاهری-بهروز و همکاران [7] با ارائه مدلهای تئوری، رفتار مکانیکی اتصال مکانیکی تکلبه کامپوزیتی را پیشبینی کردند.

ایرمان [8] برای تعیین توزیع تنش غیریکنواخت در ضخامت چندلایههای کامپوزیتی در مجاورت سوراخ پیچ، مدل المان محدود سهبعدی ارائه کرد. مککارتی و همکاران [9] برای بررسی اثر لقی روی خواص مکانیکی اتصال پیچی تکلبه با یک پیچ کامپوزیتی (از جنس کربن/پوکسی) مدل المان محدود سهبعدی ارائه کردند. عبادی رجلی و مختاری [10] نیز سفتی، استحکام و منحنی بار-جابجایی اتصالهای مکانیکی کامپوزیتی را با استفاده از دیدگاه آسیب پیشرونده و مدل المان محدود پیشبینی کردند.

رفتار کامپوزیتهای الیافی متاثر از رفتار الیاف و فاز زمینه یعنی فاز ماتریس است. در بارگذاری برشی یا عمودی نقش فاز زمینه است که تعیینکننده خواهد بود. بنابراین بهبود خواص ماده زمینه میتواند در نهایت منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت الیافی شود.

در نتیجه خواص مکانیکی اتصال تکلبه بهبود پیدا می کند. در زمینه تاثیر افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمینه، شکریه و همکاران [11] با افزودن 0.25 درصد کسر وزنی نانوالیاف کربن به فاز زمینه، رزین اپوکسی، بهبود 12.40 و 11.03 درصدی مدول و استحکام کششی را نسبت به رزین خالص مشاهده کردند. طی بارگذاری برشی نیز با افزودن همین مقدار نانوالیاف کربن به فاز زمینه 13.27 و 23.97 درصد بهبود مدول و استحکام برشی را مشاهده کردند. ژنگ و همکاران [12] با افزودن 50.10 درصد حجمی نانوالیاف کربن به رزین اپوکسی، بیشترین بهبود در خواص الاستیک و استحکام کششی نانوکامپوزیت را بهدست آوردند.

یواهوری و همکاران [13] با افزودن 5 درصد وزنی نانوالیاف کربن به رزین اپوکسی مدول الاستیک و استحکام کششی نانوکامپوزیت نانوالیاف کربن/اپوکسی را بهترتیب 6.4٪ و 3٪ بهبود دادند.

تا به حال تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی رفتار مکانیکی اتصالات مکانیکی تکلبه کامپوزیتی پیچی بررسی نشده است؛ بنابراین در تحقیق حاضر با یک برنامه آزمایشی گسترده، رفتار مکانیکی اتصال شامل تنش تسلیم، استحکام آفست، استحکام نهایی، سفتی، کرنش نهایی و جذب انرژی اتصال با افزودن نانوالیاف کربن بررسی میشود.

بهمنظور محاسبه رفتار مکانیکی اتصال مکانیکی تکلبه با لایهچینیهای مختلف، مدلی بر پایه المان محدود سهبعدی ارائه می شود که توانایی پیش بینی سفتی اتصالات تکلبه کامپوزیتی با لایه چینی های مختلف و با نانوذره دار است.

مدل المان محدود ارائهشده با داشتن خواص مکانیکی لایهتکجهته کامپوزیتی با و بدون نانوالیاف کربن، سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی را با درنظر گرفتن تمامی پارامترهای اثرگذار بر رفتار مکانیکی اتصال مانند اصطکاک، خمش ثانویه پیشبینی میکند.

2- مواد، ساخت و انجام آزمایش

رزین مورد استفاده در این تحقیق رزین اپوکسی شرکت مواد مهندسی مکرر ایران است. این رزین با سختکننده اچ–آ 11 ^۱ ساخت همان شرکت ترکیب میشود. چگالی رزین نیز 1.11 گرم بر سانتیمتر مکعب است.

نانورشته کربن مورد استفاده در این تحقیق تولید شرکت گروپو آنتولین^۲ اسپانیا است که بهصورت میانگین نسبت منظری این رشتهها بین 350 تا 1500 میباشد. الیاف مورد استفاده نیز الیاف تکجهته شیشه آلمانی با وزن اسمی 220 گرم بر متر مربع است.

دو لایهچینی ³[90/45/90] و ³[45/45/90] بهروش دستی ساخته شد. همانطور که در مراجع [15,14] نشان داده شده است، بیشترین بهبود در خواص مکانیکی رزین اپوکسی بهعنوان فاز زمینه چندلایههای کامپوزیتی با افزودن 0.25 درصد وزنی نانوالیاف کربن حاصل میشود، بنابراین در این تحقیق، درصد وزنی نانوالیاف کربن 20.5 درنظر گرفته شده است. کسرحجمی الیاف شیشه نیز 42/ درنظر گرفته شده است.

برای ساخت چندلایه کامپوزیتی ابتدا نانوالیاف کربن به رزین اضافه شده، ترکیب فوق با دور 2000 دور بر دقیقه مخلوط شده است. سپس بهمنظور پراکندگی مناسب نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی، از دستگاه اولتراسونیک با توان 200 وات به مدت 60 دقیقه استفاده شده است.

پس از استفاده از امواج فراصوت، هاردنر با نسبت 20:10 با ترکیب رزین اپوکسی و نانوالیاف کربن ترکیب شده است. در انتها با استفاده از همزن مکانیکی با دور 100 دور بر دقیقه، ترکیب فوق مخلوط میشود. با استفاده از روش ساخت دستی، چندلایههای کامپوزیتی ساخته میشود. پس از تکمیل فرآیند ساخت چندلایههای کامپوزیتی، نمونهها مطابق با استاندارد ASTM میتگاه فرز در دور 2000 دور بر دقیقه با مته به قطر 3.5 میلیمتر سوراخکاری میشوند.

هندسه اتصال مورد استفاده در شكل 1 نشان شده است. روند آزمایش و هندسه اتصال مطابق استاندارد 10-ASTM D [16] انجام گرفته است. با درنظر گرفتن استاندارد فوق و برای اطمینان از وقوع مد خرابی لهیدگی، نسبت قطر سوراخ پیچ به ضخامت چندلایهها در بازه 3-1.5، نسبت عرض نمونه به قطر پیچ برابر 6 و نسبت فاصله مركز سوراخ تا لبه نمونه به قطر پیچ برابر 4 است. اتصالات با لایهچینیهای ه[90/45/90] و ه[45/0/45] (كه به ترتیب لایهچینی I و II نامیده می شوند) ساخته شده و ضخامت هر لایه معادل 0.2 میلی متر است.

قطر پیچ 3.5 میلیمتر، عرض نمونه، 21 میلیمتر و فاصله مرکز سوراخ از لبه نمونه 14 میلیمتر درنظر گرفته میشود.لازم بهذکر است که پیچ فولادی با سر تخت بههمراه مهره فولادی و واشرهای فولادی استفاده شده است. برای جلوگیری از وقوع آسیب در چندلایههای کامپوزیتی در اثر رزوه، از پیچ نیمرزوه استفاده شده است. ارتفاع ناحیه نیمرزوه پیچ برابر مجموع ضخامت دو چندلایه کامپوزیتی بوده است.

نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

² Grupo Antolin SL



Fig. 1 An illustration of single-lap composite bolted joint (all dimensions in mm)

شکل 1 تصویری از اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی (تمامی ابعاد برحسب میلیمتر)

برای انجام آزمایش از دستگاه سنتام STM-150 استفاده شده است. سرعت حرکت فک دستگاه آزمایش کشش برابر با 2 میلیمتر بر دقیقه انتخاب شد. سرعت حرکت فک بهعنوان تغییر در موقعیت مکانی فک دستگاه نسبت به زمان تعریف میشود. بهمنظور استخراج کرنش نمونههای آزمایش کشش از اکستنسومتر از کلاس دقت 0.5 استفاده شده است. اکستنسومتر به وسط نمونه با طول سنجه 50 میلیمتر متصل شد. لازم به ذکر است که سرعت حرکت فک دستگاه برابر با 2 میلیمتر بر دقیقه معادل با نرخ کرنش لهیدگی 0.0048 بر ثانیه است. لازم به ذکر است که در این تحقیق نرخ کرنش بهعنوان تغییرات کرنش لهیدگی اتصال نسبت به زمان تعریف میشود. برای محاسبه سفتی وتری لهیدگی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی، مطابق با رابطه زیر، شیب ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش لهیدگی اتصال محاسبه میشود [16]:

$$E^{br} = \frac{\Delta \sigma^{br}}{\Delta \varepsilon^{br}} \tag{1}$$

تنش لهیدگی شروع آسیب اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی نیز بهعنوان نقطهای که رفتار غیرخطی تنش-کرنش لهیدگی شروع میشود، محاسبه میشود. بهمنظور محاسبه استحکام لهیدگی آفست اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی، خطی به موازات سفتی وتری لهیدگی اتصال از نقطه کرنش 0.02 رسم کرده، تقاطع آن با منحنی تنش-کرنش لهیدگی بهعنوان استحکام لهیدگی آفست 2/ تعریف میشود. کرنش لهیدگی در استحکام لهیدگی اتصال نیز بهعنوان کرنش نهایی اتصال تکلبه پیچی تعریف میشود [16].

به منظور بررسی تاثیر برخی از متغیرهای اثر گذار بر رفتار مکانیکی اتصال تک لبه کامپوزیتی، طراحی فاکتوریل عمومی استفاده می شود. در تحقیق حاضر، فاکتورهای لایه چینی و نانوالیاف کربن به عنوان فاکتورهای اثر گذار بر رفتار مکانیکی اتصال انتخاب شدند. برای بررسی تاثیر نانوذره، دو سطح بدون نانوذره و با درصد وزنی نانوذره 2.25 درنظر گرفته می شود. کسروزنی %2.20 با توجه به تحقیق شکریه و همکاران [15,14] انتخاب شده است. در این تحقیق کسر وزنی بهینه افزودن نانوذرات %2.20 گزارش شده است. برای بررسی تاثیر لایه چینی نیز دو لایه چینی او %2.50 گزارش شده است. برای بررسی تاثیر شده است. تفاوت این دو لایه چینی در تعداد لایه های 45–درجه است تا تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی رفتار مکانیکی اتصال بهتر مشاهده شود.

3- مدل المان محدود سەبعدى

در این قسمت با استفاده از المان محدود سهبعدی سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیشبینی میشود. برای این منظور و برای محاسبه سفتی اتصال تکلبه، اتصال تکلبه با یک پیچ تحت بار کششی قرار میگیرد. ورودیهای مدل المان محدود سهبعدی خواص مکانیکی تکلایه کامپوزیتی شامل مدول الاستیک در جهات 1، 2، 3، 12، 13 و 23، ضرایب پواسون در جهات 12، 33 و 23 و استحکام کششی و فشاری تکلایه کامپوزیتی در جهات 1، 2، 3 و استحکامهای برشی تکلایه است.

اتصال تکلبه با دو لایهچینی ا(45/0/45/90 و ا(45/2/45 و (90/-45/90 برای مقایسه نتایج مدل المان محدود سهبعدی با نتایج آزمایشی و با دو لایهچینی -/45) را29/(45 و 23[45/-45] برای بررسی تاثیر نانوالیاف کربن روی چندلایههای کامپوزیتی مختلف با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس شبیهسازی شد. لایهچینیهای شماره 1، 2 و 4 بهدلیل متقارن بودن تنها تحت خمش ثانویه ناشی از عدم تقارن هندسی اتصال تکلبه هستند؛ درحالی که لایهچینی شماره 3 بهدلیل عدم تقارن لایهچینی با اعمال بار کششی تحت خمش (علاوه بر خمش ثانویه) نیز میباشد. بنابراین میتوان انتظار کاهش بیشتر سفتی این لایهچینی نسبت به دیگر لایهچینیها تحت بارگذاری را داشت.

در نواحی نزدیک ناحیه تمرکز تنش، اطراف سوراخ، مشبندی بسیار ریزی اعمال میشود؛ درحالیکه در نواحی دور از ناحیه تمرکز تنش، بهمنظور صرفهجویی در زمان و هزینه محاسباتی، مشبندی نسبتا درشت انتخاب میشود. لازم بهذکر است که از نقطهنظر زمان محاسباتی، استفاده از مشبندی بسیار ریز در تمام نواحی اتصال بهصرفه نیست. ماده از جنس کامپوزیت شیشه/پوکسی با خواص مادی مطابق جدول 1، تعریف میشود. پیچ فولادی نیز دارای مدول الاستیسیته 210 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.3 است. لازم به ذکر است که برای محاسبه خواص مکانیکی تکلایه از روابط مایکرومکانیکی چمیس که در تحقیق شماعی-کاشانی و شکریه [6] آورده شده است، استفاده شده است.

جدول 1 خواص مكانيكى تكلايه كامپوزيتى شيشه∦پوكسى Table 1 Mechanical properties of unidirectional glass/epoxy composite

ϑ_{23}	ϑ_{13}	ϑ_{12}	G ₂₃	G ₁₃	G ₁₂	E ₃₃	E ₂₂	E ₁₁	پارامتر
0.29	0.29	0.29	1.9	1.9	1.9	6.2	6.2	30.5	بدون نانو
0.29	0.29	0.29	2.5	2.5	2.5	6.9	6.9	30.5	با نانو

در ادامه ضریب اصطکاک 0.4 [17] بین تمامی اجزای در تماس شامل دو چندلایه کامپوزیتی و هریک از چندلایههای کامپوزیتی با پیچ تعریف میشود. همچنین برای رفتار نرمال بین اجرای مختلف، از ویژگی تماس سخت نرمافزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. با تعریف این قید نفوذ صفحات تماسی در ناحیه تماس به حداقل می سد. تعریف این قید در اتصال تکلبه کامپوزیتی الزامی است؛ چون با اعمال بار، به دلیل عدم تقارن هندسی اتصال، سازه تحت خمش ثانویه قرار می گیرد. در این حالت و با افزایش مقدار بار، المانهای چندلایه پایینی و بالایی اتصال ممکن است در هم نفوذ کند. در ماژول بار، همان گونه که در شکل 2 نشان داده شده است، تمامی درجات آزادی انتقالی یک طرف اتصال بسته می شود. همچنین درجات آزادی انتقالی عمود بر محور در اتصال در سمت دیگر اتصال نیز بسته می شود و جابجایی در راستای محور x

بدان اعمال میگردد. در مدل المان محدود سهبعدی، سعی شده است شرایط مرزی نزدیک به حالت انجام آزمایش مکانیکی تعریف گردد.



Fig. 2 Mesh pattern and definition of the boundary condition of the joint in ABAQUS finite element software شکل 2 مشبندی، نحوه اعمال بار و شرایط مرزی اتصال در نرمافزار المان محدود آباکوس

برای حل مسئله، اتصال تکلبه به 19293 المان تقسیم می شود که 18120 المان آن از نوع C3D8R است. این تعداد المان آن از نوع C3D8R است. این تعداد المان حداقل مقدار المانی است که با آن پاسخ بار-جابجایی مسئله نزدیک به مقدار واقعی است.

4- نتايج

در این قسمت نتایج بررسی آزمایشی تاثیر افزودن نانوالیاف کربن به رفتار مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی ارائه میشود. همچنین نتایج مدل المان محدود سهبعدی ارائهشده برای پیش بینی سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی ارائه می شود.

1-4- نتایج آزمایشی

مطابق انتظار، مود خرابی تمامی نمونهها از نوع لهیدگی بود. با این تفاوت که در اتصال III، بهدلیل خمش ثانویه شدیدتر، آسیب لهیدگی شدیدتری اتفاق افتاده است. مودهای خرابی لایهلایهشدن، برش و شکست الیاف در نهایت منجر به خرابی فاجعهآمیز اتصال میشود. نکته قابل توجه درمورد تمامی اتصالها، خمش ثانویه قابل توجه در آنها است. خمش ثانویه منجر به وقوع آسیب لهیدگی شدید در اتصال میشود.

شکلهای 3 و 4 تصویری از نمونههای آزمایش شده اتصال تکلبه بدون نانوالیاف کربن و با آن را نشان میدهد.



Fig. 3 Tested single-lap bolted composite joint a) JI, b) JIN JIN (ب JI (نمایش شده اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی الف) JI، ب



Fig. 4 Tested single-lap bolted composite joint a) JII, b) JIIN

شکل 4 نمونههای آزمایششده اتصال تکالبه کامپوزیتی پیچی الف) JII، ب) JIIN

شكل 5 منحنى تنش-كرنش لهيدگى اتصال تكالبه با يك پيچ با لايهچينى -] ه[45/0/45/90 بدون نانوالياف كربن، IJ با لايهچينى ه[90/45/96] با نانوالياف كربن، JIN، با لايهچينى ه[45/45/95-/90] بدون نانوالياف كربن، IJI و با لايهچينى ه[45/452-/90] با نانوالياف كربن، JIIN، تا كرنش لهيدگى نهايى اتصال نشان مىدهد.



نشريه علوم و فناورى كامپوزيت





Fig. 5 Bearing stress-strain curve of Joints a) JI, b) JIN, c) JII, and d) JIIN شکل 5 منحنی تنش-کرنش لهیدگی اتصالهای الف) JI، ب) JIN، ج) JII و د)

JIIN

مطابق شكل 5 قسمتهاى الف تا د، منحنى تنش-كرنش لهيدگى يك ناحيه خطى دارد كه شيب آن بهطور معمول با افزودن نانوالياف كربن افزايش مىيابد. همچنین مشاهده میشود که تمامی منحنیهای تنش-کرنش لهیدگی رفتار غیرخطی قابل توجهی از خود نشان میدهند. تنش لهیدگی شروع آسیب، استحكام لهيدگي آفست، استحكام لهيدگي نهايي، سفتي وتري لهيدگي و كرنش لهيدگي نهايي اتصال تكلبه نسبت به افزودن نانوالياف كربن حساس بوده و با تغییر آن، تغییر میکند.

روند آسیب در اتصالات کامپوزیتی به صورت انباشت آسیب است. پیش از شروع آسیب در اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی، آسیب در فاز زمینه چندلایه كاميوزيتي تحت بار فشاري در مقادير بهنسبت كم اتفاق مي افتد [18,19]. سپس، دراثر وقوع خمش ثانویه در اتصال تکلبه، آسیب لهیدگی در چندلایه كامپوزيتى (در رزين و الياف) و در اطراف سوراخ ايجاده شده كه اين باعث اولين افت بار در منحني بار -جابجايي اتصال مي شود [20,21]. نشان داده شده است [18] که رشد آسیب در اتصال تکلبه ناشی از وقوع جدایش بین لایه ای، لغزش بين الياف-رزين و شكست الياف است. بعد از بارنهايي اتصال، تخريب نهایی در اتصال بهوقوع می پیوندد. تخریب نهایی اتصال تکلبه از نوع فاجعه آمیز

⊠IJ 🗆 JII 20 15.6 13.4 15 12.7 12.4 % 10 5 0.8 0.0 0.0 N 0 DIBS S' S Е δ e Fig. 6 Improvement in mechanical properties of single-lap composite bolted joint due to adding carbon nanofiber (%) نانوالياف كربن (./)

با دقت در شکل 5 و جدول 2 مشاهده می شود که با افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمينه اتصال JII، خواص مكانيكي اتصال تكلبه كامپوزيتي افزايش مييابد؛ درحالى كه افزودن نانوالياف كربن به اتصال JI تنها منجر به افزايش قابل ملاحظه سفتی لهیدگی و جذب انرژی می شود. افزودن نانوالیاف کربن استحکام آفست 2٪، و استحکام نهایی اتصال JII، و سفتی لهیدگی و جذب انرژی اتصالهای II و III را افزایش میدهد؛ درحالی که افزودن نانوالیاف کربن تنش شروع آسیب اتصالهای JI و JII، استحکام آفست 2٪ و استحکام نهایی اتصال JI، و کرنش نهایی اتصالهای JI و JII را تغییر نمی دهد. شکل 6 افزایش خواص مكانيكي اتصالهاي JI و JII را با افزودن نانوالياف كربن نشان مي دهد. لازم به ذکر است که در این شکل نمادهای DIBL، 'S، S، S، و e به ترتیب معرف تنش شروع آسيب، استحكام آفست 2٪، استحكام نهايي، سفتي و كرنش شكست اتصال است.

جدول 2 افزایش خواص مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی با افزودن نانوالیاف كربن

Table 2 The increase in the mechanical properties of the single-lap	
composite bolted joint with addition of carbon nanofiber	

JIIN	JII	JIN	Л	خواص مكانيكي
182.6	183.5	206.4	206.8	تنش شروع آسيب (MPa)
240.0	213	241.9	239.9	استحکام آفست (MPa)
427.4	377.1	478.2	469.5	استحکام نهایی (MPa)
3.1	2.7	3.6	3.3	سفتی لھیدگی (GPa)
1.03	1.02	1.09	1.08	کرنش نهایی (٪)
25.4	22.6	29.5	26.6	جذب انرژی (J)



همان گونه که از شکل 6 مشاهده می شود، نانوالیاف کربن تاثیر بسیار قابل ملاحظهای روی رفتار مکانیکی اتصال III نسبت به لایه چینی II دارد. استحکام آفست و استحکام نهایی اتصال III با افزودن نانوالیاف کربن حدود 13% بهبود می یابد. در حالی که استحکام اتصال II کمتر از 2% بهبود دارد. افزودن نانوالیاف کربن به اتصالهای III و II بهتر تیب 15.6% و 10.7% منجر به بهبود سفتی می شود. تاثیر پذیری بیشتر اتصال III نسبت به اتصال II با افزودن نانوالیاف کربن را می توان به تعداد لایه های ³45 بیشتر اتصال III نسبت به اتصال II نسبت داد. خواص تکلایه کامپوزیتی ³45 بیشتر اتصال III نسبت به اتصال II به خواص مکانیکی فاز زمینه است. واضح است که با افزودن نانوالیاف کربن به تکلایه کامپوزیتی خواص فاز زمینه بهبود می یابد.

شکریه و همکاران [14] نشان دادند که با افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمینه تکلایه کامپوزیتی، مدول و استحکام فاز زمینه افزایش مییابد. با استفاده از روابط مایکرومکانیک [22] میتوان نشان داد که با افزودن نانوالیاف کربن مدول کشش عرضی و مدول برشی لایه تکجهته کامپوزیتی افزایش مییابد. با استفاده از روابط تئوری کلاسیک لایهای [23] نشان داده میشود مدول چندلایه کامپوزیتی در جهات کشش طولی و کشش عرضی نیز با افزودن نانوالیاف کربن افزایش مییابد. با استفاده از رابطه سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی (شماعی-کاشانی و شکریه [6]) میتوان نشان داد که سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی با افزودن نانوالیاف کربن افزایش مییابد.

محققین مختلف نشان دادهاند که نانوالیاف کربن میتواند مقاومت چندلایه کامپوزیتی را به لایهلایهشدن به دلیل تقویت فاز واسط الیاف-رزین و تقویت فاز رزین افزایش دهد [24–26]. با افزایش مقاومت چندلایه کامپوزیتی به لایهلایهشدن، استحکام لهیدگی اتصال تکلبه کامپوزیتی افزایش مییابد. در این تحقیق تحلیل واریانس بهمنظور بررسی تاثیر لایهچینی، و افزودن نانوالیاف کربن روی خواص مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی ارائه شده است. برای این منظور از طراحی فاکتوریل آزمایش استفاده شده است. جدب انرژی اتصال را در بازه اطمینان %59 نشان میدهد. تحلیل واریانس با جذب انرژی اتصال را در بازه اطمینان %59 نشان میدهد. تحلیل واریانس با محاسبه مجموع مربعات تمامی دادههای آزمایشی شروع میشود. سپس محاسبه میشود. سپس مقدار آ0 و P-value متناظر محاسبه میشود. در انتها تاثیر هر فاکتور محاسبه میشود.

جدول 3 تحلیل واریانس برای اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی برای استحکام نهایی Table 3 Analysis of variance for the single-lap composite bolted joint for the strength

درصد تاثير	مقدار P	F_0	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
71.5	0.000	109.3	25676.3	1	25676.3	لايەچىنى
12.1	0.001	18.4	4328.9	1	4328.9	نانوالياف كربن
5.9	0.008	9.1	2134.6	1	2134.6	برهمكنش
10.5			234.8	16	3757.3	خطا
83.6				19	35897.1	مجموع

بیشترین تاثیر روی استحکام نهایی اتصال تکلبه کامپوزیتی را فاکتور لایهچینی با درصد تاثیر %71.5 میگذارد. پس از آن فاکتور نانوالیاف کربن با درصد تاثیر %12.1 تاثیر قابل ملاحظهای روی استحکام نهایی اتصال دارد. همچنین مشاهده میشود که برهمکنش بین فاکتورهای لایهچینی و نانوالیاف کربن مقداری معنادار دارد.

جدول 4 تحلیل واریانس برای اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی برای سفتی Table 4 Analysis of variance for the single-lap composite bolted joint for the stiffness

درصد	مقدار P	Fa	ميانگين	درجه	مجموع	
تاثير	r juu	10	مربعات	آزادی	مربعات	
57.7	0.000	88.6	1.4	1	1.4	لايەچىنى
31.5	0.000	48.3	0.8	1	0.8	نانوالياف كربن
0.5	0.417	0.7	0.01	1	0.01	برهمكنش
10.4			0.02	16	0.3	خطا
89.1				19	2.5	مجموع

فاکتورهای لایهچینی و نانوالیاف کربن با درصد تاثیر %57.7 و %31.5 تاثیری قابل ملاحظه روی سفتی لهیدگی وتری اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی دارد. برهمکنش بین فاکتورهای لایهچینی و نانوالیاف کربن نیز %0.5 است که با توجه به مقدار P، قابل صرفنظر کردن است.

جدول 5 تحلیل واریانس برای اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی برای جذب انرژی Table 5 Analysis of variance for the single-lap composite bolted joint for the energy absorption

درصد	مقدار	Fo	ميانگين	درجه	مجموع	
تاثير	Р	10	مربعات	آزادی	مربعات	
58.3	0.000	98.3	80.8	1	80.8	لايەچىنى
32.0	0.001	54.0	44.4	1	44.4	نانوالياف كربن
0.2	0.217	0.3	0.24	1	0.24	برهمكنش
9.5			0.82	16	13.2	خطا
90.3				19	138.6	مجموع

بیشترین تاثیر روی جذب انرژی اتصال تکلبه کامپوزیتی را فاکتور لایهچینی با درصد تاثیر %8.3 می گذارد. پس از آن فاکتور نانوالیاف کربن با درصد تاثیر 32.0% تاثیر قابل ملاحظهای روی جذب انرژی اتصال دارد. همچنین مشاهده میشود که برهم کنش بین فاکتورهای لایهچینی و نانوالیاف کربن مقداری معنادار ندارد.

بهمنظور تفسیر بهتر نتایج، در شکل 5 برهم کنش بین فاکتورهای اصلی در تحلیل واریانس اتصال تکالبه برای استحکام، سفتی و جذب انرژی اتصال نشان داده شده است.







شکل 8 حل المان محدود اتصال تکـلبه کامپوزیتی پیچی (مقایسه اتصال بدون نانوالیاف کربن و با آن) الف) II ب) III ج) IIII و د) III



Fig. 7 Layup-CNF interaction plot of single-lap composite bolted joints for, a) ultimate strength, b) stiffness, c) energy absorption شکل 7 منحنی برهم کنش لایه چینی-نانوالیاف کربن اتصالات تک لبه کامپوزیتی پیچی برای الف) استحکام نهایی، ب) سفتی و ج) جذب انرژی

تداخل بین منحنیهای لایهچینی – نانوالیاف کربن در شکل 7 قسمت الف، نشاندهنده برهمکنش بین این دو فاکتور است. درحالیکه در شکل 7 قسمت ب و ج، برهمکنش قابل ملاحظهای بین فاکتورها مشاهده نمیشود.

2-4- نتايج مدل المان محدود سهبعدي

در این قسمت نتایج حل المان محدود ارائه می شود. به منظور بررسی تاثیر افزودن نانوالیاف روی سفتی اتصال تکلبه با لایه چینی های مختلف، اتصال تکلبه با لایه چینی های الا (45/0/45/90، الا45/20)، -/45) Troby (45، و 23[45/45] که به ترتیب با لایه چینی II، III، اIII، و JIV نشان داده می شوند، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی و تحلیل شد. لازم به ذکر است در منحنی هایی که در ادامه ارائه می شود، تمامی اتصال ها تا تنش 100 مگاپاسکال (باری فرضی در ناحیه الاستیک تمامی اتصال های تحت بررسی در این تحقیق) تحت بار قرار گرفته اند.



از نتایج شکل 6 میتوان مشاهده کرد که افزودن نانوالیاف کربن منجر به بهبود سفتی تمامی اتصالها با لایه چینی های مختلف با افزون نانوالیاف کربن به اتصال می شود؛ تفاوت در مقدار افزایش سفتی است. همانند نتایج آزمایشی، با استفاده از نتایج مدل المان محدود سه بعدی مشاهده می شود که با افزایش لایه های ⁰54 درصد افزایش سفتی اتصال، افزایش می یابد. به طوری که بیشترین اختلاف سفتی اتصال با افزودن نانوالیاف کربن مربوط می شود به اتصال JIL با سفتی اتصال با افزودن نانوالیاف کربن مربوط می شود به اتصال JIL با ایه چینی 25[(45-45)]. اختلاف سفتی اتصال های JIL JIIL و JIL با افزودن نانوالیاف کربن به اتصال به ترتیب برابر است با %1.11، %16، افزودن نانوالیاف کربن به اتصال انتظار داشت با افزودن نانوالیاف کربن به حواص مکانیکی اتصال را شاهد با شیم.

همان گونه که مشاهده میشود مدل المان محدود سهبعدی ارائهشده توانایی پیش بینی سفتی اتصال مکانیکی تکلبه را داراست. در قسمت بعد، نتایج فوق با نتایج آزمایشگاهی و مدل تئوری مقایسه می شود.

3-4- ارزيابي نتايج مدل المان محدود سهبعدي

در این قسمت نتایج مدل المان محدود سه بعدی ارائه شده با نتایج آزمایشی تحقیق حاضر و مدل تئوری پیش بینی رفتار مکانیکی اتصالات مکانیکی تک لبه کامپوزیتی ارائه شده توسط شماعی-کاشانی و شکریه [6] مقایسه می شود. نتایج در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 6 خلاصهای از نتایج مدل المان محدود سهبعدی حاضر و نتایج آزمایشی و مدل تئوری [6]

Table 6 A summary of the results of the present finite element model,

experiment, and the analytical approach [6]

اختلاف مدل المان محدود با تئوری (./)	اختلاف مدل المان محدود با آزمایش (٪)	تئورى [6]	آزمايش	مدل المان محدود	اتصال
0.6	0.3	3.28	3.29	3.30	Л
1.7	0.8	3.61	3.64	3.67	JIN
1.9	0.4	2.68	2.72	2.73	JII
2.6	1.0	3.10	3.15	3.18	JIIN
0.0	-	2.20	-	2.20	JIII
0.8	-	2.55	-	2.57	JIIIN
0.0	-	2.25	-	2.25	JIV
0.7	-	2.68	-	2.70	JIVN

از نتایج جدول 6 مشاهده میشود با وجود یکی بودن تنوع لایههای مختلف و تعداد آنها در اتصالهای III و IIII، سفتی اتصال III بهطور قابل ملاحظهای بیشتر از سفتی اتصال IIII است. این موضوع به عدم تقارن لایهچینی، ماتریس B مقدار داشته و کوپلینگ بین بار کششی و خمش برقرار بوده و با اعمال بار کششی به لایهچینی، در لایهچینی نیز خمش اتفاق میافتد. این خمش جدای از خمش ثانویهای است که ناشی از هندسه اتصال تکلبه اتفاق میافتد. این مقدار خمش بیشتری که در اتصال IIII اتفاق میافتد باعث افت بیشتر این اتصال میشود.

همان گونه که از جدول 6 مشاهده می شود، مدل المان محدود سه بعدی با دقت بسیار مطلوبی سفتی لهیدگی اتصال تک لبه کامپوزیتی پیچی را پیش بینی می کند. به طوری که حداکثر خطای مدل المان محدود سه بعدی، کمتر از %1 است. با مقایسه نتایج مدل المان محدود سه بعدی با مدل تئوری ارائه شده [6] مشاهده می شود دو مدل نتایجی نزدیک به یکدیگر با حداکثر اختلاف %3 نشان می دهند. بنابراین مشاهده می شود استفاده از مدل المان محدود سه بعدی اتصال تک لبه کامپوزیتی با توجه به دقت بسیار بالایی که دارد، در موارد خاص جایگزین مناسبی برای روش آزمایشی با توجه به هزینه بالایی که دارد، می باشد.

5- نتيجەگىرى

در تحقیق حاضر با انجام آزمایشهای گسترده، تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی خواص مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی از جنس شیشه//پوکسی بررسی شد. نتایج نشان می دهد افزودن نانوالیاف کربن باعث افزایش خواص مکانیکی اتصالهای با لایهچینی ه[45/0/45/90]و از22/45-109]شامل: استحکام آفست 2./ (12.7%, 12.4%)، استحکام نهایی (13.4%, 12.4%)، سفتی (,10.7% (15.6%)، کرنش نهایی (%0.7 ,0.8%) و انرژی جذب شده (%1.4 ,0.7%) اتصال می شود. همچنین به منظور محاسبه سفتی اتصال تکلبه کامپوزیتی با لایهچینی مختلف، مدل المان محدود سه بعدی ارائه شد که توانایی محاسبه مدول اتصال را با دقتی مطلوب داراست. با مقایسه نتایج مدل المان محدود ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر، دقت بالای نتایج مدل مشاهده شد.

تقدیر و تشکر:

بدینوسیله از حمایت مالی صنوق حمایت از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور با شمارههای 96000574 و 97024007 تقدیر میگردد.

6- مراجع

- Smith, P. A., Pascoe K. J., Polak C., Stroud D. O., "The Behaviour of Single-Lap Bolted Joints in CFRP Laminates," Composite Structures, Vol. 6, pp.41–55, 1986.
- [2] Camanho, P. P., Bowron, S., Matthews, F. L., "Failure Mechanisms in Bolted CFRP". Journal of Reinforced Plastics and Composites," Vol. 17, pp. 205–33, 1998.
- [3] McCarthy, M.A., Lawlor, V. P., Stanley, W. F., McCarthy, C.T., "Bolt-Hole Clearance Effects and Strength Criteria in Single-Bolt, Single-Lap, Composite Bolted Joints," Composite Science and Technology, Vol. 62, pp.1415–31, 2002.
- [4] McCarthy, M. A., Lawlor V. P., Stanley, W. F., "An Experimental Study of Bolt–Hole Clearance Effects in Single-lap, Multibolt Composite Joints," Journal of Composite Materials, Vol. 39, pp. 799– 825, 2005.
- [5] Lawlor, V. P., McCarthy, M. A., Stanley, W. F., "An Experimental Study of Bolt-Hole Clearance Effects in Double-Lap, Multi-Bolt Composite Joints," Composite Structures, Vol. 71, pp. 176–90, 2005.
- [6] Shamaei-Kashani, A., Shokrieh, M. M., "A Novel Model to Predict the Mechanical Behavior of Single-Lap Composite Joints," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, pp. 89–98, 2019.
- [7] Taheri-Behrooz, F., Hefzabad, R. N., Shamaei Kashani, A. R., "Determining Nonlinear Behavior Effects of Material on Load Distribution in Single-Column Multi-Bolt Composite Joints" In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 25, pp. 67–74, 2015.
- [8] Iremanatb, T., "Three-Dimensional Stress Analysis of Bolted Single-Lap Composite Joints," Composite Structures, Vol. 43, pp. 195–216, 1998.

- [9] McCarthy, M. A., McCarthy, C. T., Lawlor, V. P., Stanley, W. F., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Bolt, Single-Lap Composite Bolted Joints: Part I—Model Development and Validation," Composite Structures, Vol. 71, pp. 140–58, 2005.
- [10] Ebadi, J., Mokhtari, M., "Comparison of Numerical Analysis Methods for Progressive Damage Analysis in Composite Bolted Joints and Suggestion of New Method for Bolted Joints Analysis," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, pp.63–70, 2015.
- [11]Shokrieh, M. M., Shamaei-Kashani, A. R., Mosalmani, R., "A Dynamic Constitutive-Micromechanical Model to Predict the Strain Rate-Dependent Mechanical Behavior of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites," Iranian Polym Journal, Vol. 25, pp. 487–501, 2016.
- [12]Zhang, G., Karger-Kocsis, J., Zou, J., "Synergetic Effect of Carbon Nanofibers and Short Carbon Fibers on the Mechanical and Fracture Properties of Epoxy Resin," Carbon, Vol. 48, pp. 4289–300, 2010.
- [13] Iwahori, Y., Ishiwata, S., Sumizawa, T., Ishikawa, T., "Mechanical Properties Improvements in Two-Phase and Three-Phase Composites Using Carbon Nano-Fiber Dispersed Resin," Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 36, pp. 1430–9, 2005.
- [14] Shokrieh, M., Mosalmani, R., Shamaei, A., "A Combined Micromechanical–Numerical Model to Simulate Shear Behavior of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites," Materials and Design, Vol. 67, pp. 531–7, 2015.
- [15] Shokrieh, M. M., Shamaei-Kashani, A., Mosalmani, R., "A Dynamic-Micromechanical Constitutive Model to Predict the Strain Rate Dependent Shear Behavior of Neat and Reinforced Polymers with Carbon Nanofibers," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol.15, pp. 13–21, 2015.
- [16] D5961/D5961M-05e1 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer–Matrix Composite Laminates. Compos Mater ASTM Int West Conshohocken, PA 15.03, 2005.
- [17] Gray, P. J., McCarthy, C. T., "A Highly Efficient User-Defined Finite Element for Load Distribution Analysis of Large-Scale Bolted Composite Structures," Composite Science and Technology, Vol. 71, pp. 1517–27, 2011.
- [18] Heimbs, S., Schmeer, S., Blaurock, J., Steeger, S., "Static and Dynamic Failure Behaviour of Bolted Joints in Carbon Fibre Composites," Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 47, pp. 91–101, 2013.
- [19] Cao, Y., Cao, Z., Zhao, Y., Zuo, D., Tay, T. E., "Damage Progression and Failure of Single-Lap Thin-Ply Laminated Composite Bolted Joints under Quasi-Static Loading," International Journal of Mechanical Science, Vol. 170, 2020.
- [20] Egan, B., McCarthy, M. A., and McCarthy, C.T., "Design, Testing and Analysis of Bolted Joints and Connections," Elsevier, pp. 178–205, 2018.
- [21] Ireman, T., Ranvik, T., Eriksson, I., "On Damage Development in Mechanically Fastened Composite Laminates," Composite Structures, Vol. 49, pp. 151–71, 2000.
- [22] Chamis, C. C., Abdi, F., Garg, M., Minnetyan, L., Baid, H., Huang, D., et al. "Micromechanics-Based Progressive Failure Analysis Prediction for WWFE-III Composite Coupon Test Cases." Journal of Composite Materials. Vol. 47, pp. 2695–712, 2013.
- [23] Hahn, H., Tsai, S., "Introduction to Composite Materials," CRC Press, 1980.
- [24] Ekhtiyari, A., Shokrieh, M. M., Alderliesten, R., "Loading Rate Effects on Mode-I Delamination in Glass/Epoxy and Glass/CNF/Epoxy Laminated Composites," Engineering Fracture Mechanics. Vol. 228, 2020.
- [25] Hsaio, K. T., Scruggs, A. M., Brewer, Jr. JS., Hickman, G. J. S., McDonald, E. E., Henderson, K., "Effect of Carbon Nanofiber z-Threads on Mode-I Delamination Toughness of Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates," Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 91, pp. 24–35, 2016.
- [26] Koisson, V., Warnet, L. L., Akkerman, R., "Delamination in Carbon-Fibre Composites Improved with in Situ Grown Nanofibers," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 101, pp. 140–8, 2013.

نشریه علمی پژوهشی



المُ كَامَبُوزيت



علوم و فناوری **کامپوزیست** http://jstc.iust.ac.ir

استفاده از روش تاگوچی برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن پلیمری مقاوم در برابر رشد ترک مود I

 3 دین محمد ایمانی 1* ، محمدرضا محمد علیها 2 ، عاطفه رجبی کفشگر 8 ، محسن شجاعی

1- استادیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران
2- دانشیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوي دكترا، مهندسي صنايع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق يستى imanim@iust.ac.ir ،16846-13114

* تهران، فساوق پستی ۲۵۱۱۱ ۱۹	initial initia
اطلاعات مقاله:	چکیدہ
دريافت: 1401/02/10	ساخت بتن پلیمری با عملکرد مناسب در برابر ترکخوردگی موضوع مهمی برای استفاده از این مواد کامپوزیتی در کاربردهای عملی
پذيرش: 1401/06/19	است. چقرمگی شکست و انرژی شکست چنین سنگدانههای توزیع شده تصادفی در داخل زمینه رزین پلیمری تحت تأثیر طراحی
كليدواژگان	مخلوط و درصد مواد تشکیل دهنده بتن پلیمری قرار میگیرد. در این تحقیق، ترکیب بهینه مخلوط بتن پلیمری پایه اپوکسی ساخته
بتن پلیمری، طرح اختلاط بهینه، روش	شده از سه ماده (رزین اپوکسی، سنگدانه ریز و سنگدانه درشت سیلیسی) که بیشترین مقاومت در برابر رشد ترک را داشته باشد، با
تاگوچی، چقرمگی شکست و انرژی	استفاده از روش طراحی آزمایشی تاگوچی L8 بدست میآید. بدین منظور، تعدادی آزمایش چقرمگی شکست مود I (مود کششی
شکست مود I خالص، قطعه تیر	بارگذاری) با استفاده از نمونه تیر ترکدار خمشی بر اساس طرح آزمایشی پیشنهاد شده به روش تاگوچی، انجام می شود. محدوده اولیه
ترکدار خمشی	برای هر یک از اجزای بتن پلیمری به صورت، 25-31٪ سنگدانه ریز، 21-23٪ رزین اپوکسی، و 46-54٪ سنگدانه درشت، انتخاب شد. با
	توجه به نتایج حاصله مشخص شد که مخلوط حاوی حداکثر رزین، حداکثر مقدار سنگدانه ریز، و حداقل سنگدانه درشت میتواند بالاترین
	انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست را در شرایط مود کششی بارگذاری فراهم آورد.

The use of Taguchi method for mix-design optimization of polymer concrete with high resistance against mode I crack growth

Din Mohammad Imani^{*1}, Mohammad Reza Mohammad Aliha¹, Atefeh Rajabi Kafshgar¹, Mohsen shojaee¹

1- School of Industrial Engineering, Iran university of science and technology, Tehran, Iran

خورنده و همچنین حساسیت بالای آن به شرایط محیطی است [1,2]. بتن

Please cite this article using:

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, imanim@iust.ac.ir

Keywords	Abstract			
Epoxy polymer concrete, Optimum mix- design, Taguchi method, Mode I fracture toughness and Fracture energy, Single Edge Notched Bending (SENB)	Manufacturing polymer concrete (PC) with suitable performance against cracking is an important issue for using these composite materials in practical applications. Fracture toughness and fracture energy of such randomly distributed aggregates inside the matrix of polymeric resin is affected by the mix design and percentages of PC ingredients. In this research, the optimum composition of epoxy base PC mixture made of four ingredients (epoxy resin, fine and coarse silica aggregate) was obtained using a L8 Taguchi design of experiment method. Some fracture toughness tests under mode I were conducted on Single edge notched bending specimen according to design of experiment suggested by Taguchi method. The initial range for each PC ingredient was selected as: 25-31% fine aggregate, 21-23% epoxy resin, and 46-54% coarse aggregate, and it was found that the mixture containing maximum resin (23%), maximum fine filler, minimum percentages of fiber and coarse aggregate can provide the highest fracture energy and fracture toughness values.			
، بتن سیمانی برمصرفترین نوع این مصالح	اصلی کاربرد گستردہ بتنھا است	1- مقدمه		
ب قابلتوجهی از جمله استحکام کششی	ساختمانی است. اما دارای معا	نواع مختلفی از بتن (که عموماً متشکل از مخلوط سنگدانهها، چسبانندهها و		
چرخههای انجماد و ذوب و مواد شیمیایی	پایین، تخلخل بالا، حساسیت به	در برخی موارد مواد تقویت کننده هستند) به طور گسترده در ساخت سازهها		

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

استفاده می شوند. هزینه کم، سهولت استفاده و مقاومت فشاری بالا از دلایل

Imani, D. M., Aliha, M. R. M., Rajabi Kafshgar, A., Shojaee, M., "The use of Taguchi method for mix-design optimization of polymer concrete with high resistance against mode I crack growth", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1885-1892, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.552826.1781

پلیمری که در دهه 1950 در صنعت بتن اختراع شد، از اختلاط رزینهای پلیمری (چسب یا رزین) با سنگدانههای معدنی تولید میشود و در مقایسه با سایر مواد بتن سیمانی معمولی، بتن پلیمری نسل نسبتاً جدیدی از مخلوطهای بتنی به حساب میآید [3]. در مقایسه با مواد بتن سیمانی معمولی، بتن پلیمری دارای مزایایی مانند خواص مکانیکی و مقاومتی بالاتر، مقاومت بالاتر در برابر سایش و عوامل شیمیایی، مقاومت برشی بالاتر بین بتن پلیمری و فولاد یا بتن است [1,2]. دستیابی به چنین ویژگیهای عالی عمدتاً به دلیل جایگزینی سیمان و آب با رزین به عنوان اتصال دهنده مخلوط ناهمگن سنگدانهها در داخل زمینه رزینهای پلیمری است؛ بنابراین یک بتن پلیمری از سنگدانههای درشت و ریز (با معمولاً 70–80 درصد وزن مخلوط) و رزین پلیمری (مانند پلیاستر یا اپوکسی با معمولاً 20–30 درصد وزن مخلوط) پلیمری (مانند پلیاستر یا اپوکسی با معمولاً 20–30 درصد وزن مخلوط) میکرو، الیاف تقویت کننده نظیر الیاف شیشه یا حتی مواد زائد کشاورزی و میکرو، الیاف تقویت کننده نظیر الیاف شیشه یا حتی مواد زائد کشاورزی و منعتی برای پرکردن فضاهای خالی هوا و افزایش عملکرد و خواص مکانیکی

با درنظر گرفتن برخی عوامل مانند هزینه، دردسترسبودن مواد و خواص فیزیکی و مکانیکی ذاتی موردنیاز نظیر (استحکام، تغییر شکل و مقاومت شیمیایی)، معمولاً از تعدادی رزین پلیمری برای ساخت مواد بتن پلیمری استفاده می شود [4,5]. بتن پلیمری تقویت شده با الیاف، یک ماده کامپوزیتی است که از یک زمینه پلیمری تشکیل شده و با الیاف کوتاه که بهصورت تصادفی توزیع شده، تقویت می شود. در واقع، بتن پلیمری تقویت شده با الياف بهطوركلى شامل الياف مقاوم و پر استحكام است كه در زمينه رزين تعبيه شده است. الياف توزيع شده تصادفي عموماً باعث افزايش استحكام و سفتی کامپوزیت می گردند. بتن پلیمری مادهای مستحکم و بادوام است که دارای مقاومت کششی، خمشی و فشاری بسیار بالاتری نسبت به مصالح بتن سیمانی و آسفالتی رایج است [6]. این امر منجر به مصرف مواد کمتری برای ساخت سازههای ساخته شده از بتن پلیمری و در نتیجه سبکتر بودن آنها نسبت به سازههای سیمانی مشابه می شود. همچنین بر خلاف بتن سیمانی، بتن پلیمری چسبندگی بسیار خوبی به اکثر سطوح دارد و ازاینرو این ماده مناسبی برای تعمیر بسیاری از سازههای مهندسی مانند سازههای هیدرولیکی یا حتی روسازی و روکشهای جاده است [7,8]. رزین نقش ماده چسبنده را در بتن پلیمری ایفا میکند بهطوریکه پس از سخت شدن، رزین زمینه سختی ایجاد میکند و سبب پیوند عالی بین سنگدانهها می شود. پایداری ساختاری، انقباض ناچیز و چسبندگی با سطوح صاف برخی از مزایای مهم رزين است [9,10]. بەطوركلى، رزين اپوكسى، رزين پلىاستر، رزين متاکریلات و رزین پلی اورتان از جمله پلیمرهای متداول مورداستفاده برای توليد مواد بتن پليمري هستند [11].

پدیده رشد ترک و شکست یکی از مودهای عمده واماندگی در بتنهای پلیمری است که به دلیل ماهیت ترد و شبه ترد عمومی چنین موادی در شرایط بارگذاری واقعی و عمر سرویسدهی رخ می دهد. تعدادی از محققین رفتار شکست مواد بتن پلیمری را با استفاده از آزمایشها تجربی بررسی کردهاند. بهعنوانمثال، ریس و فریرا به طور تجربی رفتار شکست مواد مختلف بتن پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را موردمطالعه قرار دادند [3]. آنها دریافتند که خواص شکست را می توان با افزودن الیاف کوتاه شیشه یا کربن بهبود بخشید. بر خلاف ملاتهای سیمان معمولی و حتی مواد بتن پلیمری معمولی (که کاهش مقاومت سریع بلافاصله پس از اوج بار رخ می دهد)، تقویت مواد بتن پلیمری با الیاف شیشهای می تواند گاهی اوقات استحکام

کلی، خواص شکست و رفتار شکست پس از اوج را افزایش دهد. برای مثال، طبق یافتههای آنها، الیاف تقویت کننده شیشهای میتواند چقرمگی شکست و مدول الاستیسیته را به ترتیب تا 13 و 39 درصد بهبود بخشد. ریس [12] همچنین اثر الیاف طبیعی را بر تقویت بتن پلیمری مطالعه کرد. نتایج وی نشان داد که الیاف نارگیل خرد شده و الیاف باگاس نیشکر میتوانند هم چقرمگی شکست و هم انرژی شکست بتن پلیمری را افزایش دهند، اما الیاف گرفته شده از ساقه موز تأثیر مثبتی بر افزایش چقرمگی شکست بتن پلیمری ندارد و تنها میتواند انرژی شکست را افزایش دهد.

ریس و فریرا [13] اثر قرارگرفتن در معرض اتمسفر، چرخه ذوب و یخ و تخریب حرارتی را بر خواص شکست مواد بتن پلیمری ارزیابی کردند. بر اساس یافتههای آنها، قرارگرفتن بتن پلیمری در محیطهای گرمتر به مدت یک سال منجر به تخریب بیشتر (به دلیل شدت نور خورشید و اشعه ماوراء بنفش) میشود. نتایج آنها نشان داد که الیاف تقویت کننده شیشهای مقاومت بهتری در برابر شرایط در نظر گرفته شده ایجاد میکند، بهطوریکه تقریباً هیچ تخریبی به جز فرسایش سطحی در مواد بتن پلیمری تقویتشده با الیاف شیشه مشاهده نشد. بااین حال، تقویت با فیبر کربن تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت بتن پلیمری در برابر شرایط محیطی (مانند قرارگرفتن در معرض مستقيم نور خورشيد و تابش فرابنفش) به دليل ازبينرفتن خواص الیاف کربن در چنین شرایطی، نداشت. با افزایش دمای چرخههای آزمایش، مقاومت کششی و خمشی کاهش می یابد و نوع شکست انعطاف پذیر تر می شود که منجر به افزایش مقدار چقرمگی شکست می شود. همچنین طبق نتایج ریس و فریرا، پس از 100 چرخه خستگی حرارتی در محدوده دمایی بین 28+ تا 100+ درجه سلسيوس، چقرمگی شکست بتن پليمری اپوکسی تا 33 درصد افزايش مييابد.

حیدری رارانی و همکاران [5] دوام یک بتن پلیمری بهینه شده را تحت بارگذاری چرخهای حرارتی با استفاده از دیسک برزیلی بدون ترک و قطعه تیر تركدار خمشی بررسی كردند. نتایج آنها تأثیر قابل توجه چرخههای حرارتی را بر چقرمگی شکست مود I (مود کششی یا باز شونده لبههای ترک) و همچنین مقادیر مقاومت کششی بتن پلیمری با ترکیب ثابت را نشان داد. همچنین مقادیر چقرمگی شکست مود I و مقاومت کششی بتن پلیمری آزمایش شده در آزمایشهای آنها با افزایش میانگین دمای سیکلهای حرارتی کاهش یافت. با استفاده از نمونه دیسک برزیلی با ترک مرکزی، اسدالله تبار و همکاران [22] تأثیر افزودن خردههای درشت و ریز حاصل از بازیافت بطری های PET را بر روی چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست بتن پلیمری بررسی کردند. آنها گزارش کردند که افزودن بطریهای PET بازیافتی درشت می تواند انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست مود I را افزایش دهد. شکریه و حیدری رارانی [19] رفتار گریتینگهای کامپوزیتی ساخته شده از مقاطع پالترود شده را به روش تئوری و المان محدود بررسی کرده و سپس این مواد را بهعنوان تقویت کننده بتن و جایگزینی برای آرماتورهای فلزی، به دلیل مقاومت خوردگی بالا، پیشنهاد کردند. علیها و همکاران [20] استحکام کششی و چقرمگی شکست بتن پلیمری را مطالعه کرند. آنها استفاده از نمونه خمشی نیمه دایرهای ساخته شده از بتن پلیمری تقویت شده با الیاف شیشهای رشتهای خرد شده را برای انجام آزمایشها پیشنهاد کردند. آنها نشان دادند که هر دو نمونه خمشی نیمه دایرهای با ترک لبهای و بدون ترک، نمونههای مناسبی برای اندازهگیری چقرمگی شکست و مقاومت کششی مواد بتن پلیمری هستند. علاوه بر این، آنها اشاره کردند که نمونههای خمشی نیمه دایرهای در مقایسه با نمونه تیر

خمشی مستطیلی به مواد کمتری نیاز دارند. شکریه و محبی [21] به تخمین مدول ارتجاعی مؤثر بتن پلیمری با استفاده از یک مدل میکرومکانیکی (موری-تاناکا) جدید پرداختند. بر اساس نتایج آنها، این مدل در حالتی که ناخالصیهای درون ماده مرکب دوفازی هم راستا بوده و درصد حجمی آنها کم تا متوسط باشد، قادر به تخمین تانسور سفتی بادقت مناسبی است.

در کار تحقیقاتی دیگر، آوچی و همکاران [22] چقرمگی شکست مود ترکیبی I/III بتن پلیمری الیاف شیشه را بررسی کردند. آنها از نمونه تیر خمشی سهنقطهای برای تغییر مود بارگذاری با تغییر زاویه پیش ترک نسبت موهجویی در هزینههای ساخت بتن پلیمری از رزین پلیاستر بهعنوان یکی صوفهجویی در هزینههای ساخت بتن پلیمری از رزین پلیاستر بهعنوان یکی از ترکیبات بتن استفاده کردند. نتایج بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری پشنهادی نشان میدهد که افزودن این ماده سبب بهبود استحکام کششی و فشاری بتن میشود. مطالعه دیگر بر روی بتن پلیمری که اخیراً توسط علیها فشاری بتن میشود. مطالعه دیگر بر روی بتن پلیمری که اخیراً توسط علیها مختلف بتن پلیمری انجام آزمایشهای آزمایشگاهی فراوان بر روی مخلوطهای مختلف بتن پلیمری انجام شده است، به بررسی اثر طرح اختلاط بتن پلیمری با ترکیبهای متنوع مخلوط بر رفتار شکست و ترکخوردگی در شرایط مود I بارگذاری و با استفاده از قطعه نیمه دیسک ترکدار خمشی پرداخته شده است.

ازآنجایی که یک بتن پلیمری از حداقل 3 یا 4 جزء (مانند رزین، سنگدانههای ریز، سنگدانههای درشت و گاهی اوقات الیاف یا مواد افزودنی) ساخته شده است، درصد حجمی هر یک از مواد ممکن است بر مقاومت و خواص مکانیکی چنین مواد کامپوزیتی که به طور تصادفی در داخل مخلوط توزیع شدهاند، تأثیر بگذارد. در واقع، افزایش یا کاهش درصد ترکیب هر یک از اجزاء می تواند شکل پذیری یا شاخص تردی مخلوط بتن پلیمری را تغییر دهد و به طور قابل توجهی بر مقاومت ترکخوردگی یا چقرمگی شکست آن تأثیر بگذارد. بااین حال، در اکثر مقالات چاپ شده قبلی، یک ترکیب ثابت یا طرحهای ترکیبی محدود از مواد بتن پلیمری برای توصیف خواص مکانیکی و انجام آزمایشهای تجربی بر روی بتن پلیمری انتخاب شده است. بهعنوان یک ماده شبه شکننده، شکست ناگهانی یکی از حالتهای شکست اصلی در مخلوطهای بتن پلیمری مبتنی بر اپوکسی است. اگرچه چنین مواد کامپوزیتی چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترکخوردگی را در مقایسه با سایر انواع مصالح بتن (مانند بتن سیمانی، بتن آسفالتی و کامپوزیتهای با الياف طبيعي [18-5]) به طور قابل توجهي بهبود بخشيدهاند، اما همچنان مطالعات بیشتر برای افزایش چقرمگی شکست بتن پلیمری مبتنی بر اپوکسی ضروری است. مقدار چقرمگی شکست در این مواد به ترکیب مخلوط بتن پلیمری و مواد مورداستفاده برای ساخت آن بستگی دارد. بااین حال، در مقایسه با خواص مکانیکی رایج از جمله مقاومت خمشی فشاری و خمشی، در مطالعات بسیار کمی به بررسی رفتار شکست بتن پلیمری و ارتباط آن با تركيب مخلوط يرداخته شده است [25-28].

از سوی دیگر، با توجه به طیف گستردهای از متغیرها و طرحهای اختلاط متنوع ممکن برای ساخت بتن، استفاده از روشهای بهینهسازی برای دستیابی به طرحهای ترکیبی مناسب، ضروری به نظر میرسد [40,46]. عوامل مؤثر در ساخت مخلوطهای بتن پلیمری بهینه را میتوان با روشهای بهینهسازی و طراحی آزمایشها شناسایی کرد. در میان روشهای شناخته شده در طراحی آزمایش، روش تاگوچی بر اصل انجام حداقل تعداد آزمایش تکیه دارد و قادر به تعیین عوامل کنترل برجسته است [41,42]. آزمایشهای طراحیشده توسط تاگوچی میتوانند شرایط کاری بهینه را ارائه دهند، زیرا از

طراحی خاصی از آرایههای متعامد برای شناسایی شرایط آزمایشی بهینه و ارزیابی تغییرات در پاسخ استفاده می کنند [43,44]. محبی و همکاران [31] مقاومت سایشی بتن حاوی سرباره فعال قلیایی را با استفاده از روش تاگوچی بررسی کردند و کاربرد این روش را برای طراحی مناسب آزمایش و بهینهسازی پارامترهای این ترکیب برای به حداکثر رساندن مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش تأیید کردند. روش تاگوچی توسط یلدیزل و کالیس [33] نیز برای بهینهسازی نتایج تجربی مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و خواص مقاومت سولفات استفاده شد. جعفری و همکاران [33] از روشهای تاگوچی و آنالیز واریانس برای بهینهسازی مخلوط مواد بتن پلیمری استفاده کردند. همچنین تانیلدیزی [34] خواص مکانیکی طولانیمدت و ریزساختار بتن پلیمری-فسفازنی را که در معرض چرخههای انجماد و ذوب قرار می گیرد، بررسی کرد.

استفاده از رویکردهای تاگوچی و آنالیز واریانس برای بهینهسازی خواص مواد کامپوزیتی با توزیع تصادفی اخیراً توسط محققان مختلف نیز گسترش یافته است [34,62-35]. بااینحال، بررسی و مرور منابع فوق الذکر نشان میدهد که تحقیق جامعی در مورد بهینهسازی طرح اختلاط، مخلوطهای بتن پلیمری برای بهدستآوردن بهترین مقادیر مقاومت در برابر رشد ترک وجود ندارد؛ بنابراین، هدف اصلی این مقاله بررسی اثر ترکیب مخلوط و تأثیر مواد بر چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مخلوطهای بتن پلیمری مختلف است. در واقع درصد بهینه اجزای بتن پلیمری برای دستیابی به چقرمگی شکست بالا و مقادیر انرژی شکست بالا در مود I بهصورت تجربی با استفاده از روش تاگوچی تعیین میگردد.

2- نمونه آزمایش چقرمگی شکست مود I

قطعه تیر ترکدار خمشی برای انجام آزمایشهای چقرمگی شکست مود I خالص بر روی مخلوطهای بتن پلیمری انتخاب شد. این نمونه یک تیر با ابعاد L (طول)، W (عرض) و t (ضخامت) است که با بارگذاری خمشی سهنقطهای و با فاصله تکیهگاهی S که در شکل 1 نشان داده شده، بارگذاری میشود. یک ترک لبه به طول a در وسط تیر ایجاد شده است. مقدار بحرانی ضریب شدت تنش مود I که به عنوان چقرمگی شکست شناخته میشود با استفاده از معادله زیر تعیین میشود:

$$K_{\rm lc} = \frac{3P_f S}{BW^2} \sqrt{\pi a} Y_{\rm l} \left(\frac{a}{w}, \frac{S}{L}\right)$$
(1)

که در آن $P_{\rm f}$ بار شکست و $Y_{\rm I}$ ضریب هندسی است که تابعی از S/L و A میباشد، و با استفاده از حل تحلیلی این قطعه که در منابع مکانیک a/W شکست موجود است از رابطه 2 [45] و یا شبیه سازی های عددی مانند روش اجزای محدود قابل تعیین است.

$$Y_{l} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1.99 - a_{W}^{2} (1 - a_{W}^{2})(2.15 - 3.93 a_{W}^{2} + 2.7(a_{W}^{2})^{2})}{(1 + 2 a_{W}^{2})(1 - a_{W}^{2})^{\frac{3}{2}}}$$
(2)

جهت تعیین ضریب هندسی قطعه با طول ترک و تکیهگاه ذکر شده، مدل اجزاء محدود تیر متشکل از 26880 المان مکعبی بیست گرهی در نرمافزار آباکوس 14.6 ایجاد شد. الگوی مش استفاده شده در مدل اجزاء محدود، مطابق شکل 2 قابل مشاهده است. با توجه سینگولاریتی میدان تنش در ناحیه اطراف نوک ترک، جهت پایش دقیق تنش در این ناحیه از المانهای فروریخته ^۱ استفاده شده و فاصله نقاط میانی در المانهای محاط

نشريه علوم و فناوري كاميوزيدت

¹ Collapsed elements

نوک ترک، به ¹⁄₄ طول المان منتقل شد. همچنین شرایط تکیهگاهی بین تکیهگاه و قطعه به صورت تکیهگاه جسم صلب تعریف شده است و جابجایی قطعه در جهت بارگذاری مقید شده ولی در جهات دیگر آزاد میباشد. S/L= و a/W=0.3 حالت S/L= و s/C=0 و -0.8 با استفاده از مدلسازی قطعه تیر ترکدار با ترک لبهای در نرمافزار آباکوس معادل 1.06 محاسبه گردید.



Fig. 1 Single edge notched bending (SENB) sample used to test mode I fracture on polymer concrete mixtures.

شکل 1 نمونه تیر ترکدار خمشی استفاده شده برای آزمایش شکست مود I بر روی مخلوطهای بتن پلیمری.



Fig. 2 Finite element model of SENB specimen created in ABAQUS software. شکل 2 مدل المان محدود قطعه تیر ترکدار خمشی ساخته شده در نرمافزار اجزا

محدود آباکوس.

3- طراحی ترکیبی بتن پلیمری بهینه شده با استفاده از روش تاگوچی

سه ماده شامل، رزین اپوکسی بر پایه بیسفنول اف^۱ با هاردنر پلی آمین² با کد تجاری ام ال-506، سنگ دانه سیلیس درشت با اندازه ذرات متوسط 3 میلیمتر تهیه شده از شرکت صنعت و سنگ کاویان (ایران) و پرکننده سیلیس ماسه ریز با اندازه متوسط ذرات 5.0 میلیمتر برای ساخت مخلوط بتن پلیمری استفاده شد. خواص مکانیکی رزین و نیز مواد تشکیل دهنده مصالح سنگی به ترتیب در جداول 1 و 2 آورده شده است. درصد وزنی این اجزا در محدوده های زیر متفاوت است: رزین اپوکسی (15 تا 25 درصد)، سنگ دانه های درشت (45 تا 55 درصد) و دانه های پرکننده ریز (25 تا 35 درصد).

جدول 1 خواص مکانیکی رزین [48]

 Table 1. Mechanical properties of resin

استاندارد	واحد	مقدار	خصوصيات مكانيكي
M695 ASTM D	Kgf/cm ²	974	مقاومت فشارى
M695 ASTM D	Kgf/cm ²	9371	مدول فشارى
M790 ASTM D	Kgf/cm ²	960	مقاومت خمشى
M790 ASTM D	Kgf/cm ²	36454	مدول خمشی
M638 ASTM D	Kgf/cm ²	761	استحكام كششى
M638 ASTM D	Kgf/cm ²	27890	مدول کششی
2240 ASTM D	Shore D	82	سختى
256 ASTM D	Kj/m ²	7850	مقاومت ضربهای
1002 ASTM D	Kgf/cm ²	548	مقاومت چسبندگی (در مقابل نیروی برشی)

جدول 2 مواد تشكيل دهنده مصالح سنگى [48]

Table 2 Ingredients of aggregate.

مواد تشكيلدهنده	درصد
SiO ₂	96-98.11
Fe_2O_3	0.2-0.7
Al_2O_3	0.51-1.65
CaO	0.4-0.7
Na ₂ O	0.03-0.08
K ₂ O	0.09-0.15

با توجه به درصد حجمی و تنوع مواد ذکر شده در بالا، میتوان طرحهای اختلاط زیادی را برای ساخت مخلوط به دست آورد. در این تحقیق، جهت تعیین درصد بهینه مواد تشکیلدهنده و دستیابی به بالاترین ویژگیهای مقاومت در برابر شکست تحت بارگذاری مود I از روش تاگوچی استفاده شد. همچنان که ذکر گردید، این روش از آرایههای عمود بر هم برای طراحی تعداد آزمایشها و بهینهسازی نتایج استفاده میکند. در این راستا، تعداد فاکتورهای کنترلی و سطوح آنها نقش مهمی در انتخاب آرایه مناسب دارند. با توجه به اینکه جمع عدد بیان شده در سطوح عاملها برای هر آزمایش باید برابر 100 درصد باشد (درصد وزنی رزین+ درصد وزنی ریزدانه+ درصد وزنی سنگدانه درشت = 100٪) ، از آرایه L8 جهت تعیین سطوح عامل های رزین و پرکننده ریزدانه استفاده شد و درصد سنگدانه درشت با توجه به سطوح رزین و پرکننده ریز تعیین شد. طراحی تاگوچی و تجزیهوتحلیل دادهها توسط نرمافزار مینی تب انجام شد. جدول 3 محدوده و سطح هر عامل را نشان میدهد. ترکیبهای پیشنهادی برای انجام آزمایش L8 تاگوچی نیز در جدول 4 ارائه شده است که از میان آزمایش این ترکیبها و تحلیل نتایج آزمایش چقرمگی شکست این 8 مخلوط ترکیب بهینه مخلوط بتن پلیمری مقاوم در برابر رشد ترک تعیین می گردد.

4- ساخت نمونه و انجام آزمایش چقرمگی شکست

بهمنظور انجام آزمایشهای چقرمگی شکست، چندین نمونه تیر خمشی ترکدار با ترکیبهای متنوع مخلوط بتن پلیمری پیشنهاد شده با روش تاگوچی (جدول 4) ساخته شد.

جدول 3 آرایه ها سطوح انتخاب شده برای انجام بهینه سازی تاگوچی **Table 3** Arrays and selected levels for performing the Taguchi optimization of PC mixture.

سطح 4	سطح 3	سطح 2	سطح 1	پارامترهای مؤثر
		23	21	رزين (./)
31	29	28	25	ريزدانه (./)
	پارامتر دیگر	بر حسب دو		سنگدانه درشت (٪)

¹ Bisphenol F ² HA-11 hardener









(ج-c)

Figure 3 (a) An example of a load-displacement curve, (b) SENB testing setup for conducting fracture test on PC mixture, and (c) the failure path and crack growth

شکل 3 (الف) نمونهای از منحنی بار- جابهجایی، (ب) نحوه بارگذاری قطعه تیر ترکدار با ترک لبهای ساخته شده از بتن پلیمری و (ج) مسیر شکست و رشد ترک

جدول 5 طراحی آزمایشها تاگوچی L8 و چقرمگی شکست و مقادیر انرژی شکست مود I.

 Table 5 Design of Taguchi L8 experiments and fracture toughness and fracture energy values of mode I.

نتايج تجربى		سنگدانه	سنگدانه	ن بن ایوکسی	
انرژی شکست (J)	چقرمگی شکست (MPa.m ^{0.5})	درشت (./)	ريز (./)	(/.)	اجرا
2.81	3.02	54	25	21	1
5.12	4.19	52	27	21	2
2.47	2.28	50	29	21	3
3.26	3.48	48	31	21	4
1.91	2.25	52	25	23	5
3.38	2.06	50	27	23	6
5.63	4.43	48	29	23	7
7.09	4.55	46	31	23	8

جدول 4 جدول پیشنهادی روش تاگوچی L8 برای طرح اختلاط بتن پلیمری Table 4 Design of Taguchi L8 experiments and fracture toughness and fracture energy values of mode I.

سنگدانه درشت (./)	سنگدانه ریز (٪)	رزين اپوكسى (٪)	اجرا
54	25	21	1
52	27	21	2
50	29	21	3
48	31	21	4
52	25	23	5
50	27	23	6
48	29	23	7
46	31	23	8

مخلوطهای مختلف بتن پلیمری در داخل قالبهای مکعب مستطیلی شکل ریخته شده و پس از زمان لازم برای خشکشدن و تکمیل فرایند ساخت نمونه (حدود 12 ساعت) از داخل قالب خارج گردیدند. ابعاد کلی $t = \ , \, L \, = \, 200 \, \ \mathrm{mm}$ نمونههای آزمایشی تیر ترکدار به شرح زیر است. S = 160 mm ، W=75 mm ، 35mm و a = 22 mm ، 35mm نمونهها، از یک دستگاه برش با تیغه دورانی از جنس الماس استفاده شد. نمونههای آزمایشی تولید شده از جنس بتن پلیمری با استفاده از دستگاه آزمون فشار سروو هیدرولیک با نرخ بارگذاری ثابت 1 میلیمتر در دقیقه آزمایش شدند. منحنیهای بار-جابجایی در طول آزمایشها تا شکست نهایی مخلوطها ثبت شد. بار اوج هر منحنی برای تعیین مقدار چقرمگی شکست مود I در معادله (1) قرار داده شد. همچنین سطح زیر منحنی بار-جابجایی تا شکست نهایی نمونهها بهعنوان شاخص انرژی شکست در نظر گرفته شد. شکل 3 نحوه انجام آزمایش، نمونهای از منحنیهای بار-جابهجایی و مسیر رشد ترک نمونههای شکسته شده را نشان میدهد. همان طور که از شکل 3 (ب) مشخص است، ماده بتن پلیمری آزمایش شده رفتار ترد از خود نشان میدهد و در نتیجه چقرمگی شکست ماده با استفاده از روش مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) و قراردادن مقدار نیروی بیشینه در معادله 1 قابل محاسبه است. همچنین مسیر شکست نمونهها در حالت کلی یک مسیر مستقیم و در راستای ترک اولیه را دنبال میکند اما انحرافات جزئی در مسیر شکست به سبب دورزدن دانههای درشت واقع در مسیر رشد ترک نیز مشاهده می شود.

5- نتايج و بحث

مقادیر مربوط به چقرمگی شکست و انرژی شکست بهدستآمده از آزمایشهای مود I در ترکیبهای مختلف بتن پلیمری پیشنهاد شده، در جدول 5 نشان داده شده است. در اینجا، تابع هدف "بزرگتر بهتر است" استفاده شد زیرا سطوح بالای انرژی شکست و چقرمگی شکست ترجیح داده میشود. تأثیر پارامترهای اصلی و نتایج رتبهبندی عوامل به ترتیب در شکل-های 4 و 5 و نیز جدول 6 ارائه شده است.

با توجه به مدل انتخاب شده، درصد عوامل مختلف با درنظر گرفتن نسبت بزرگتر بهعنوان کمیت بهینه انتخاب شد. بر اساس شکلهای 4 و 5 افزودن رزین انرژی شکست و چقرمگی شکست را افزایش میدهد. همچنین استفاده از سنگدانه ریز با درصد وزنی ٪31 سهم بیشتری در افزایش انرژی شکست و مقادیر چقرمگی شکست دارد. این نشان میدهد که این سطح مواد پرکننده ریز انتخاب مناسبی برای به حداکثر رساندن مقاومت ترکخوردگی در بتن-های پلیمری مورد بررسی است.

مخلوطهای بتن پلیمری حاوی حداکثر مقدار رزین و حداقل درصد سنگدانههای درشت، بالاترین انرژی شکست و چقرمگی شکست را نشان دادند. علت این موضوع می تواند به ترشوندگی و اتصال کامل بین رزین و عوامل چسبنده نظیر سنگدانههای درشت باشد. بهعبارتدیگر وقتی که میزان رزین زیاد و میزان سنگدانهها کم باشد، رزین موجود در مخلوط توانایی آغشته کردن و احاطه کردن پیرامون سنگدانهها را بهخوبی پیدا می کند و از شکل گیری فضای خالی و یا محل های عدم اتصال و پیوستگی در مرز دانهها ممانعت به عمل می آورد. عدم وجود عوامل مذکور که بهنوعی عامل تمرکز تنش و یا ضعف مادی محسوب می شوند باعث افزایش مقاومت مخلوط حاصل در برابر رشد ترک میگردد. بهعنوان نتیجه، بهمنظور بهدست آوردن یک مخلوط با مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی مود I، ترکیب بهینه برای مخلوط ساخته شده از مقدار 31 ٪ پرکننده های ریز، 23٪ رزین، و 46٪ سنگدانههای درشت حاصل می گردد. همچنین با توجه به تغییرات ارائه شده در شکلهای 4 و 5 تغییرات سنگدانه درشت بیشترین تأثیر را بر انرژی شکست و چقرمگی شکست دارد. پس از سنگدانه درشت، به ترتیب تغییرات سنگدانه ریز و رزین بر روی چقرمگی شکست مؤثر هستند. بهعبارتدیگر بر اساس نتایج حاصله شرایط بهینه و بالاترین میزان پارامتر چقرمگی شکست و انرژی شکست همزمان در یک طرح اختلاط به دست می آید و اثر پارامترهای ورودی مخلوط (درصد عناصر تشکیلدهنده) بر هر دو خروجی تحقیق حاضر (چقرمگی شکست مود I و انرژی شکست مود I) یکسان است.



Fig 4 Effects of the main parameters obtained from the Taguchi method on mode I fracture toughness.

شکل 4 اثرات پارامترهای اصلی به دست آمده از روش تاگوچی بر مقدار چقرمگی شکست مود I بتن پلیمری حاصل از آزمایش تیرترکدار خمشی



Fig 5 Effects of the main parameters obtained from the Taguchi method on mode I fracture energy.

شکل 5 اثرات پارامترهای اصلی بهدستآمده از روش تاگوچی بر مقدار انرژی شکست مود I بتن پلیمری حاصل از آزمایش تیر ترکدار خمشی

البته باید توجه نمود که جمع سطوح اعلام شده جهت ماکزیمم کردن متغیر خروجی در این پژوهش به صورت اتفاقی 100 شده است و این امکان وجود دارد که با انتخاب سطوح پیشنهادی نتوان به یک مخلوط واقعی دست یافت. در صورت مواجهه با این حالت میتوان از رتبهبندی استفاده کرد. به این معنی که ابتدا سطح متغیرها با رتبه بالاتر تعیین و سپس سطح متغیر با کمترین اهمیت طبق سطوح انتخابی دیگر عاملهای با رتبه بالاتر تعیین شود.

جدول 6 رتبهبندی عوامل اصلی با توجه به میانگین مقادیر ارائه شده در جدول 4 را نشان میدهد. میانگین متغیر پاسخ برای هرکدام از سطوح عامل اصلی بهصورت زیر محاسبه میشود.

$$\overline{y}_k = \frac{1}{n_k} \sum_i y_{ijk}, \qquad j = 1, 2, \dots, m_k$$
(3)

که در آن y_{ijk} مقدار متغیر پاسخ i در سطح j و عامل k و n_k شان دهنده تعداد متغیر پاسخ در سطح j و عامل اصلی k و m_k تعداد سطوح عامل اصلی 4 ست. برای مثال رزین اپوکسی دارای 2 سطح است. هر سطح دارای 4 است. برای متغیر پاسخ است. میانگین سطح اول برای این عامل (سطح 21 درصد) حاصل میانگین 4 عدد اول متغیرهای پاسخ ارائه شده در جدول 4 میباشد.

رتبهبندی بر اساس مقدار دلتا صورت میگیرد. دلتا نشاندهنده دامنه تغییرات میانگین متغیر پاسخ در صورت تغیر سطوح عامل موردنظر است.

$$\Delta = Max\bar{y}_k - Min\,\bar{y}_k \tag{4}$$

بنابراین مقدار دلتای بیشتر نشان میدهد، در صورت تغییر سطح عامل موردنظر متغیر پاسخ تغییرات زیادی خواهد داشت و آن عامل تأثیرگذاری بیشتری بر متغیر پاسخ دارد. بر اساس این نتایج، مؤثرترین عاملها بر انرژی شکست در مود I، به ترتیب بهصورت درصد سنگدانه درشت، درصد دانههای ریز و رزین قرار میباشد. در مورد چقرمگی شکست نیز، نتایج به همین صورت میباشد. بهطورکلی بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، درصد دانههای درشت مؤثرترین پارامترها بر روی انرژی شکست و چقرمگی شکست بتن پلیمری با رزین اپوکسی هستند.

جدول 6 نتایج رتبهبندی بر اساس میانگین برای (الف) انرژی شکست و (ب) چقرمگی شکست مخلوطهای بتن پلیمری آزمایش شده در مد I

Table 6 Ranking with the mean of means for (a) fracture energy and (b)

 Fracture toughness of tested PC mixtures under mode I.

ىد I	کست در ه	ـ) انرژی ش	ب	ِ مد I	شکست در) چقرمگی	الف
سنگدانه	سنگدانه	رزين		سنگدانه	سنگدانه	رزين	~la .
درشت	ريز	اپوكسى	سطح	درشت	ريز	اپوكسى	سطح
7.087	2.362	3.416	1	4.549	2.638	3.242	1
4.444	4.247	4.5	2	3.954	3.626	3.573	2
2.922	4.047	-	3	2.67	3.352	-	3
3.516	5.175	-	4	3.219	4.014	-	4
2.813	-	-	5	3.024	-	-	5
4.275	2.813	1.084	دلتا	1.879	1.376	0.332	دلتا
1	2	3	رتبه	1	2	3	رتبه

6- نتیجهگیری

مخلوط بهینه مواد بتن پلیمری ساخته شده از سه جزء (رزین اپوکسی، سنگدانههای ریز و دانه درشت) با استفاده از طراحی آزمایشی جهت [14] Rooholamini, H., Hassani, A., Aliha, M.R.M., "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of rollercompacted concrete pavement using response surface methodology," Construction and Building Materials, Vol. 159, pp. 517-529, 2018.

[15] Fakhri, M., Amoosoltani, E., Aliha, M.R.M., "Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 180, pp. 43-59, 2017.

[16] Chen, G., Luo, H., "Asymmetric flexural process and fracture behaviors of natural bamboo node with gradient discontinuous fibers," Composites Communications, Vol. 24, pp. 100647, 2021.

[17] Mansourian, A., Hashemi, S., Aliha, M.R.M., "Evaluation of pure and mixed modes (I/III) fracture toughness of Portland cement concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement," Construction and Building Materials, Vol. 178, pp. 10-18, 2018.

[18] Li, S., Zheng, T., Li, Q., Hu, Y., Wang, B., "Flexural and energy absorption properties of natural-fiber reinforced composites with a novel fabrication technique," Composites Communications, Vol. 16, pp. 124-131, 2019.

[19] Shokrieh M. M., Heidari-Rarani M., "Investigation of the behavior of reinforced concrete slabs with steel rebar and Pultruded composite grating,", In Persian, Journal of Structure & Steel, pp. 18-27, 2009.

[20] Aliha, M.R.M., Heidari-Rarani, M., Shokrieh, M.M., Ayatollahi, M.R., "Experimental determination of tensile strength and K (IC) of polymer concretes using semi-circular bend (SCB) specimens," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 43, No. 6, pp. 823, 2012.

[21] Shokrieh M. M., Elahi M., "A New Model for Estimating the Yang Modulus of Polymer Concrete Using Micromechanical Relationships," In Persian, Modares Mechanical Engineering, pp. 153-162, 2012.

[22] Avci, A., Akdemir, A., & Arikan, H., "Mixed-mode fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 243-247, 2005.

[23] Shokrieh M. M., Rezvani S., Muslimani R., "Mechanical behavior of polyester resin and polymer concrete in static and dynamic loads" In Persian, Sharif Mechanical Engineering. pp. 97-105, 2016.

[24] Aliha, M.R.M., "On predicting mode II fracture toughness (KIIc) of hot mix asphalt mixtures using the strain energy density criterion," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 99, pp. 36-43, 2019.

[25] Afroughsabet, V., Biolzi, L., Ozbakkaloglu, T., "Highperformance fiber-reinforced concrete: a review," Journal of materials science, Vol. 51, No. 14, pp. 6517-6551, 2016.

[26] Krause, R.F., Fuller, E.R., "Fracture Toughness of Polymer Concrete Materials Using Various Chevron-Notched Configurations, Chevron-Notched Specimens: Testing and Stress Analysis," ASTM International, 1984.

[27] Asdollah-Tabar, M., Heidari-Rarani, M., Aliha, M.R.M., "The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete,", Composites Communications, pp. 100684, 2021.

[28] Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Nunes, L.C.S., Reis, J.M.L., da Costa Mattos, H.S., "Mixed mode fracture analysis in a polymer mortar using the Brazilian disk test,", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 154, pp. 140–151, 2016.

[29] Roy, R.K., "Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement,", John Wiley & Sons, 2001.

[30] Kafshgar, A. R., Rostami, S., Aliha, M. R. M., & Berto, F., "Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies," Procedia Structural Integrity, Vol. 34, pp. 71-77, 2021.

[31] Mohebi, R., Behfarnia, K., Shojaei, M., "Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method,", Construction and Building Materials, Vol. 98, pp. 792-798, 2015.

دستیابی به بالاترین مقادیر چقرمگی شکست و انرژی شکست تحت بارگذاری مود I بررسی شد. از طرح ترکیبی L8 برای تعیین سطوح رزین و سنگدانه ریز استفاده شد. مقدار سنگدانه درشت با توجه به مقادیر دیگر عوامل تعیین شد. نتایج آزمایشها بر اساس مدل «بزرگتر بهتر» بر روی انرژی شکست و چقرمگی شکست در مود I با درنظرگرفتن عوامل مؤثر ارائه شد. بر اساس نتایج بهدستآمده، مخلوط پلیمر بتنی حاوی حداکثر رزین (23/)، پرکننده ریز (31/)، سنگدانه درشت (46/) میتواند همزمان بالاترین ویژگیهای مقاومت به شکست (هم بیشترین چقرمگی شکست و هم بیشترین انرژی شکست) را ارائه دهد. همچنین بر اساس میانگین مقادیر متغیرهای پاسخ، عوامل اصلی رتبهبندی شد.

7- منابع

[1] Ferreira, A. J., Tavares, C., & Ribeiro, C., "Flexural properties of polyester resin concretes," Journal of Polymer Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 459-468, 2000.

[2] Naser, M.Z., Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., "Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review," Engineering Structures, Vo. 198, pp. 109542, 2019.

[3] Fowler, D.W., "Polymers in concrete: a vision for the 21st century," Cement and concrete composites, Vol. 21, No. 5-6, pp. 449-452, 1999.

[4] San Jose, J.T., Ramirez Ortiz, J.L., "A study of the mechanical properties of polyester concrete," In Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction: a vision for the next millennium, pp. 477-486, 1999.

[5] Heidari-Rarani, M., Aliha, M.R.M., Shokrieh, M.M., Ayatollahi, M.R., "Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings–An experimental study," Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 308-315, 2014.

[6] Rooholamini, H., Hassani, A., Aliha, M.R.M., "Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack," Construction and Building Materials, Vol. 187, pp. 248-256, 2018.

[7] Najjar, S., Moghaddam, A.M., Sahaf, A., Aliha, M.R.M., "Low temperature fracture resistance of cement emulsified asphalt mortar under mixed mode I/III loading," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 110, pp. 102800, 2020.

[8] Aliha, M.R.M., Razmi, A., Mousavi, A., "Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen," Construction and Building Materials, Vol. 190, pp. 612-622, 2018.

[9] Fakhri, M., Siyadati, S.A., Aliha, M.R.M., "Impact of freezethaw cycles on low temperature mixed mode I/II cracking properties of water saturated hot mix asphalt: An experimental study," Construction and Building Materials, Vol. 261, pp. 119939, 2020.

[10] Azadmanesh, H., Hashemi, S.A.H., Ghasemi, S.H., "The effect of styrene-butadiene rubber and ethylene vinyl acetate polymers on the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites," Composites Communications, Vol. 24, pp. 100656, 2021.

[11] Eghbali, M.R., Tafti, M.F., Aliha, M.R.M., Motamedi, H., "The effect of ENDB specimen geometry on mode I fracture toughness and fracture energy of HMA and SMA mixtures at low temperatures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 216, pp. 106496, 2019.

[12] Reis, J. M. L., "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete," Construction and building materials, Vol. 20, pp. 673-678, 2006.

[13] Reis, J.M.L., Ferreira, A.J.M., "The effects of atmospheric exposure on the fracture properties of polymer concrete," Building and Environment, Vol. 41, No. 3, pp. 262-267, 2006.

نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

[32] Yildizel, S.A., Calis, G., "Design and optimization of basalt fiber added lightweight pumice concrete using Taguchi Method,", Revista Romana de Materiale, Vol. 49, pp. 544-553, 2019.

[33] Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A., Ozbakkaloglu, T., "Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation,", Construction and Building Materials, Vol. 167, pp. 185-196, 2018.

[34] Tanyildizi, H., "Long-term microstructure and mechanical properties of polymer-phosphazene concrete exposed to freeze-thaw,", Construction and Building Materials, Vol. 187, pp. 1121-1129, 2018.

[35] Tanyildizi, H., Şahin, M., "Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature,", Construction and Building materials, Vol. 79, pp. 97-103, 2015.

[36] Tanyildizi, H., "Investigation of carbonation performance of polymer-phosphazene concrete using Taguchi optimization method,", Construction and Building Materials, pp. 121673, 2020.

[37] Sharifi, E., Sadjadi, S.J., Aliha, M.R.M., Moniri, A., "Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method,", Construction and Building Materials, Vol. 236, pp. 117547, 2020.

[38] Najafzadehkhoee, A., Habibolahzadeh, A., Qods, F., Hvizdos, P., "A Taguchi approach to the influence of infiltration parameters on microstructure and properties of W–ZrC composites prepared by the displacive compensation of porosity (DCP) method,", Composites Communications, Vol. 20, pp. 100356, 2020.

[39] Dave, S.V., Bhogayata, A., "The strength oriented mix design for geopolymer concrete using Taguchi method and Indian concrete mix design code,", Construction and Building Materials, Vol. 262, pp. 120853, 2020.

[40] Kafshgar, A. R., Aliha, M. R. M, "The study of fracture energy of hot asphalt mixtures using machine learning algorithms,", In Persian, 18th International Conference on Industrial Engineering, 2021.

[41] Rahmani, H, Yazdani, M, Yazdani, M. & Nikodel, M., "The application of Taguchi method in optimizing the mixing design of semi-structural lightweight concrete made with pumice aggregates,", In Persian, Sharif Journal of Civil Engineering, Vol. 32, 2016.

[42] Fattahi N. H., Heidari A., Hatefi S. M., Hashempour, M., "The application of Taguchi, RSM serial method in predicting and optimizing multi-objective test design and response level of mechanical properties of colored concrete,", In Persian, 11th International Conference on Sustainable Development and Urban Development, 2021

[43] Mousavi, S. Y., Pourrafi, M., Ganjaei, B., Majreh, A. S., "Investigation of properties of concrete containing silica and zeolite using Taguchi method", In Persian, 3rd International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Sustainable Development and Urban Development, 1400.

[44] Mousavi, S. Y., Mojreh, A. S., Khosravi, G. B., Pourrafi, M., "Investigation of properties of lightweight structural concrete containing EPS designed using Taguchi method,", In Persian, 2nd International Conference on New Research in Civil Engineering, Architecture and Management, 2016.

[45] Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G.R., "The stress analysis of cracks," Handbook, Del Research Corporation, Vol. 34, pp. 635, 1973.

[46] Shokrieh MM, Heidari-Rarani M, Shakouri M, Kashizadeh E., "Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete," Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 8, pp. 3540-3549, 2011.

[47] Heidari-Rarani M, Ezati N, Sadeghi P, Badrossamay MR., "Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method," Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020

[48] Heidari-Rarani M, Bashandeh-Khodaei-Naeini K., "Micromechanics based damage model for predicting compression behavior of polymer concretes," Mechanics of Materials, Vol. 117, pp. 126-36, 2018. نشریه علوم و فناو*ر*ی

كاميوزيــت



http://jstc.iust.ac.ir

پیش بینی رشد آسیب در کامیوزیتهای لایهای متعامد تحت بارگذاری کششی تکمحوره

3 بىژى محمدى 1* ، آرزو فلاح²، اىمان بىات

1- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- كارشناسي ارشد مهندسي مكانيك، دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران

3- كارشناسي ارشد مهندسي مكانيك، گروه مهندسي مكانيك، دانشگاه فردوسي مشهد، مشهد

* ايران، تهران، صندوق پستى: bijan_mohammadi@iust.ac.ir ،19689-36916

اطلاعات مقاله:	چکیدہ
دريافت: 1401/04/27	در این پژوهش، به مطالعه وضعیت آسیب چندلایههای کامپوزیتی متعامد تحت بارگذاری استاتیکی تکمحوره کششی پرداخته شده است
پذيرش: 1401/07/30	آسیب ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای ناشی از ترکهای ماتریسی دو نوع از متداول ترین انواع آسیب در چندلایههای کامپوزیتی میباشد
کلیدواژگان:	با استفاده از رویکرد میکرومکانیکی و بر پایه روش حساب تغییرات هشین، به تحلیل میدان تنش و افت خواص مکانیکی با دو الگوی محتمل
ترک ماتریسی، جدایش بینلایهای،	متقارن و پادمتقارن پرداخته میشود. در راستای بهبود نتایج حاصل از روش حساب تغییرات روش تقسیم لایهها استفاده میشود. با استفاد
کامپوزیتهای لایهای متعامد، سلول	از شیوه حساب تغییرات توسعه داده شده، نتایج افت خواص مکانیکی به دو شیوه همگنسازی نوبتی لایههای 90 درجه ترک خورده و روش
واحد، روش حساب تغييرات	مدلسازی همزمان لایههای 90 درجه ترک خورده، مقایسه شده است. سپس از معیار نرخ رهاسازی انرژی جهت پیش،بینی شروع و رش
	ترکهای ماتریسی و جدایی بین لایهای القایی، و همچنین وضعیت اشباع ترکهای ماتریسی استفاده شده است. با مقایسه نتایج تحلیلی
	بتابح عددي جامل النابيش اجناء محدود مشاهده شداستفاده انابيش تقسيميندي لايفها تأثير بسنايا ادر افنابشا دقت نتابح دارد

Prediction of damage propagation in cross-ply laminated composites subjected to uniaxial tensile loading

Bijan Mohammadi^{1*}, Arezoo Fallah¹, Iman Bayat²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 19689-36916, Iran, Tehran, bijan_mohammadi@iust.ac.ir

Keywords

الميوزيت

Abstract

Matrix Cracking, Induced Delamination, Cross-ply Laminated Composites, Unit Cell, Variational Approach

The damage state of cross-ply composite laminates subjected to uniaxial tensile loading was examined in this study. Matrix cracking and induced delamination have been considered as the most common modes of damage in composite laminates. Using a micromechanical approach and based on Hashin variational principles, analysis of the stress field and reduced mechanical properties of a material with two symmetric and antisymmetric patterns have been examined. In order to improve the results obtained from the variational approach, the ply-refinement technique is used. Using the variational approach developed, the results of reduced mechanical properties have been compared to two methods: the homogenization method of 90° layers cracked and the simultaneous analysis method of 90° layers cracked. After, it has been used from an energy-based criterion to predict the initiation and propagation of Matrix cracking and induced delamination and also the saturation state of Matrix cracking. By comparing the analytical results and the numerical results obtained from the finite element software, it was observed that using the ply-refinement technique has a great impact on the increase in the accuracy of the results.

1- مقدمه

در طراحی کامپوزیتها میباشد. از مکانیزمهای آسیبی که در چندلایههای كاميوزيتي ممكن است شكل بگيرد، مي توان به از بين رفتن اتصال الياف و ماتریس، ترک ماتریسی، تورق یا جدایش بینلایهای، پیچخوردگی الیاف، کشیدگی الیاف، کمانش و شکست الیاف دستهبندی اشاره نمود. به طور کلی آسیبهایی که در یک چندلایه ممکن است شکل بگیرند به دو دسته آسیبهای درون لایهای و آسیبهای بیرون لایهای تقسیم می شوند. آسیبهای درون لایهای انواع گوناگونی دارند که میتوان به کشیدگی الیاف، شکست الیاف و ترک

امروزه کاربرد مواد کامپوزیتی بسیار گسترده شده است و در صنایع مختلف مىتوان حضور أنها را مشاهده نمود. مهمترين مزيت كامپوزيتهاى لايهاى نسبت سفتی به وزن و مقاومت به وزن قابل توجه در مقایسه با فلزات میباشد. این نوع سازهها کاربردهای متنوعی در صنایع هوایی، حملونقل، سازههای عمرانی و دریایی که در آنها کاهش وزن بسیار مهم است، دارند [1, 2]. شناخت دقیق رفتار کامپوزیتها در آسیبها و انواع بارگذاریها یک اصل مهم

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mohammadi, B., Fallah, A., Bayat, I., "Prediction of damage propagation in cross-ply laminated composites subjected to uniaxial tensile loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1893-1911, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.558009.1795

ماتریسی اشاره کرد. مهمترین آسیب بیرون لایه ای نیز جدایی بین لایه ای ناشی از ترکهای ماتریسی می باشد [5-3]. مشاهدات تجربی بیانگر این واقعیت است که مرحله و زمان شروع هر مود آسیب تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت لایه ها، ساختار الیاف و ماتریس، هندسه چندلایه و نوع بارگذاری است. از میان انواع مکانیزمهای آسیب مرسوم و پراهمیت، ترک ماتریسی و جدایی بین لایه ای ناشی از آن می باشند که باعث افت خواص مکانیکی سازه، تحریک دیگر مودهای آسیب و تسلیم نهایی می گردند [6]. به همین دلیل تحقیقات بسیاری در زمینه این دو فرایند آسیب در کامپوزیتهای لایه ای صورت گرفته است. یکی از دقیق ترین روشهای تحلیلی ارائه شده جهت پیش بینی وضعیت آسیب، روش حساب تغییرات می باشد. که در آن میدان تنش محاسبه شده و میزان افت سفتی در قالب رواط تحلیلی ارائه می گردد [7].

در مقیاس مزو، ترک ماتریسی اولین مود خرابی است که در کامپوزیتها رخ می دهد [8]. مشاهدات بسیاری مبنی بر این واقعیت است که شروع آسیب در کامپوزیتهای لایهای به دلیل رشد ترکهای ریز در لایههای 90 درجه رخ می دهند و سپس در عرض صفحه گسترده می شوند، افزایش بارگذاری موجب پیشروی ترک در لایههای مجاور می شود [9]. ترکهای ماتریسی که به آن ترکهای عرضی نیز گفته می شود نوعی آسیب درون لایهای است که در راستای ضخامت و موازی الیاف در ماتریس رشد می کند. تحقیقات بسیار زیادی بر روی محلیل مکانیزم آسیب ترک ماتریسی انجام شده که طیف وسیعی از آسیبها در لایه چینی های متعامد تحت اعمال بارگذاری های کششی، خستگی و یا حرارتی به وجود می آیند. همچنین عامل اصلی در رفتار غیرخطی کامپوزیتهای لایهای می باشند. معیار اندازه گیری این نوع از آسیبها، چگالی ترک در لایههای چندلایه بوده و افزایش آن منجر به تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیتهای لایهای از قبیل مدول الاستیک در جهت بارگذاری، نسبت پوآسون و مواردی از این دست می گردد [10]. شکل 1



Fig. 1 Matrix cracking mechanism in laminated composites [11] [11] شکل 1 مکانیزم ترکخوردگی ماتریسی در چندلایههای کامپوزیتی متعامد

نوع دیگری از آسیبهای رایج در کامپوزیتها، جدایی بینلایهای ناشی از ترکهای ماتریسی است که بین لایهها با جهت الیاف متفاوت مشاهده میشود. ترکهای ماتریسی ایجاد شده در لایهها به دلیل وجود تمرکز تنش در نوک ترکها باعث تحریک و جدایی لایهها میشود. در این لایهچینیها اولین مود آسیب، ترک ماتریسی در لایه 90 درجه است. پس از رشد تدریجی این ترکها عمود بر راستای اعمال بار، ترکهای بینلایهای در طرفین ترکهای ماتریسی ایجاد و رشد میکنند. جدایی بینلایهای به صورت از بین رفتن اثر ماده متصل

کننده دو لایه و جدا شدن دو لایه بههمچسبیده تعریف میشود و در نتیجه انتقال تنش از لایهای به لایه دیگر در ناحیه جداشده امکان پذیر نمی باشد. در صورت ادامه روند جدایی لایه ای، بلافاصله سفتی کاهش یافته و منجر به شکست نهایی چندلایه میشود [12]. مشاهده های آزمایشگاهی نشان می دهند که جدایی های بین لایه ای ناشی از ترکه ای ماتریسی تنها پس از شکل گیری چندین ترک ماتریسی در چندلایه رخ می دهند [13]. شکل 2 شماتیکی از این نوع ترک خوردگی را نشان می دهد.



Fig. 2 Induced delamination mechanism in laminated composites [11] شکل 2 مکانیزم جدایی بینلایهای القایی در چندلایههای کامپوزیتی [11]

2- مروری بر روشهای مختلف آسیب

مهمترین موضوع در بررسی و تحلیل مکانیزمهای آسیب در کامپوزیتها، انتخاب مقیاسی است که چندلایه کامپوزیتی در آن مورد مطالعه قرار می گیرد. مقیاسهای مهمی که در آن به بررسی روشهای مختلف جهت بررسی افت خواص مکانیکی پرداخته می شود، به شرح زیر است:

1-2- ماكرومكانيك

در حوزه مواد کامپوزیتی، در دیدگاه ماکرومکانیک کامپوزیت لایهای به صورت یک ماده ارتوتروپیک^۲ با خواص معادل در نظر گرفته میشود. در دیدگاه ماکرومکانیک شروع آسیب بر اساس تئوریهای نظیر معیار شکست تنش مواردی از این دست بررسی میگردد. این تئوریها تنها شکست کلی چندلایه را پیش بینی میکنند. برای مدلسازی رشد آسیب پیشرونده مناسب نیستند. به طور کلی ذکر این نکته حائز اهمیت است که جزئیات میکرو ترکها در این دیدگاه مدل نمیشود و عموماً اثرات کلی افت سفتی در اثر حضور ترکها و شرایط شروع ترک خوردگی را بررسی میکنند. استفاده از این روش در مدلسازیهای پیچیده تحت بارگذاریهای متفاوت راحت است [14].

تئوری آسیب که در این مقیاس توسعه داده شده است برای اولین بار توسط لادوز^۵ در سال 1983 به کمک تئوری مکانیک آسیب پیوسته ارائه شده است. در دیدگاه مزومکانیک میتوان آسیب درون یک لایه و همچنین ماکروتر کهایی که بین لایهها اتفاق میافتد را مدل کرد. این نوع مدلها قابلیت بکارگیری برای ساختارهای پیچیده را دارند. مقیاس مزو، مقیاس بین تحلیل میکرومکانیک و تحلیل ماکرومکانیک میباشد. مکانیزمهای آسیب سطح میکرو در مدلهای مقیاس مزو شناسایی نمیشوند و تکامل آسیب بر اساس مشاهدات تجربی لایه آسیبدیده میباشد [14].

¹ Variational approach analysis

² Orthotropic ³ Tsai-Hill

⁴ Chang-Chang

⁵ Ladeveze

3-2- میکرومکانیک

دیدگاه میکرومکانیک، تحلیل آسیب را در مقیاس سلول واحد مورد بررسی قرار مىدهد. سلول واحد نمايندهاى از حجم ماده است كه مىتوان مشخصات مکانیکی آن را به کل ماده تعمیم داد. در چندلایههای کامپوزیتی حاوی ترک ماتریسی بر اساس یک قانون از پیش تعیین شده فرض بر این است که ترکهای ماتریسی در فواصل یکسان از یکدیگر ایجاد می شوند [15]. به تبع آن می توان میان دو ترک ماتریسی مجاور، یک سلول واحد استخراج کرد و خواص مکانیکی یک چندلایه کامپوزیتی را معادل با خواص مکانیکی سلول واحد دانست. روشهای میکرومکانیکی متنوعی بر اساس سلول واحد جهت استخراج میدان تنش در چندلایه کامپوزیتی حاوی آسیب توسعه داده شده است که در ادامه به پرکاربردترین روشها پرداخته شده است.

یکی از قدیمی ترین و متداول ترین مدل ها در تحلیل میکرومکانیکی آسیب در بررسی ترکهای ماتریسی، روش تأخیر برش میباشد. مفهوم تأخیر برش برای اولین بار توسط کاکس [16] برای بیان انتقال تنش در کامپوزیتهای تقويت شده با الياف كوتاه ارائه شده است. مدلهاى توسعهيافته روش تأخير برش فرض میکنند تنش برشی در جهت طولی و عرضی ثابت در نظر گرفته شده و در نتیجه امکان محاسبه تنشهای نرمال در جهت ضخامت وجود ندارد. فرض ثابت بودن تنشها در جهتهای داخل صفحهای منجر به صفر شدن تنش نرمال در جهت ضخامت چندلایه می شود. صفر شدن تنش های نرمال در جهت ضخامت به این علت است که این مدل قابلیت ایجاد تمایز بین چندلایههای _s[0/90] و [0/90] با چگالی ترک ماتریسی یکسان در لایههای 90 درجه. را ندارد. علاوه بر بررسی ترکهای ماتریسی، مطالعات بسیار اندکی بر روی جدایی بینلایه ی ناشی از ترکهای ماتریسی با استفاده از روش تأخیر برش صورت گرفته است [17]. تالرجا^۲ بر این باور است که مدلهای تأخیر برش پیچیدهتر، اثری در افزایش دقت روش تأخیر برش ندارند و تنها پارامترهای آن را افزایش داده و از سهولت در بکارگیری این روش می کاهد [18].

مککارتنی^۳ مدل انتقال تنش خود را با توسعه مدل تأخیر برش و کاستن از محدودیتهای آن، ارائه داد. مک کارتنی یک میدان تنش قابل قبول[†] بر مبنای کرنش صفحهای عمومی ارائه داد که تمامی معادلات تعادل و شرایط مرزی را برخلاف روشهای تأخیر برش به طور دقیق ارضا میکند [19]. مدل انتقال تنش مککارتنی به گفته بسیاری از محققین از جمله نایرن [20] یکی از قدیمی ترین و کارامدترین مدل های تأخیر برش به شمار می آید که قابلیت محاسبه افت خواص مکانیکی را در لایه چینی های با الگوی متقارن و پاد متقارن داراست. با این وجود، پیچیدگیهای پیادهسازی و ارضای معادلات سازگاری و شرایط مرزی به صورت میانگین، از ضعفهای این روش محسوب می شود.

هشین^۵ برای اولین بار روشهای محاسبه میدان تنش و افت سفتی در چندلایههای کامپوزیتی را ارائه داده است [7]. این روش اصولاً بر مبنای مینیمم کردن انرژی مکمل بنا شده است. این روش بر مبنای میدان تنش یا میدان جابهجایی میباشد. در روش حساب تغییرات بر پایه میدان جابهجایی تغییر شکل سلول واحد به صورت توابع شکل ً به گونهای فرض میشود که شرایط مرزی جابهجایی را در همه نقاط ارضا نماید. پس ضرایب مجهول در این توابع با استفاده از روش مینیممسازی انرژی پتانسیل کل محاسبه میشوند و لذا در این روش یک حد بالایی برای افت سفتی چندلایههای کامپوزیتی تركخورده استخراج مى شود [17].

در روش حساب تغییرات بر پایه میدان تنش، ابتدا یک میدان تنش قابل قبول ارائه میشود که تمامی معادلات تعادل و شرایط مرزی را ارضا میکند و با استفاده از مینیممکردن انرژی مکمل و تبدیل آن به معادله اویلر-لاگرانژ توابع مجهول موجود در میدان تنش محاسبه می شوند. ضرایب مجهول ناشی از حل معادله اویلر-لاگرانژ نیز با استفاده از شرایط مرزی ذاتی و طبیعی معین می شوند. در این روش یک حد پایین برای افت سفتی چندلایه حاوی ترک ماتریسی محاسبه می شود. از آنجا که در روش حساب تغییرات بر پایه میدان تنش كليه معادلات تعادل و شرايط مرزى به صورت دقيق ارضا مى شوند، مى توان اين مدل را دقيق ترين روش موجود براى تعيين ميدان تنش و افت خواص مکانیکی در چندلایه حاوی آسیب دانست. از روش حساب تغییرات در بررسی جدایی بین لایه ای ناشی از ترکهای ماتریسی نیز مطالعات بسیاری صورت گرفته است.

نایرن^{γ} و هو^{Λ} [21] جدایی بینVیهای ایجاد شده در نوک ترکهای ماتریسی در چندلایههای متعامد با استفاده از روش حساب تغییرات تحلیل کردند. نتایج به دست آمده را با نرخ رهاسازی انرژی ناشی از رشد ترک ماتریسی مقایسه نمودند و نشان دادند در رقابت مکانیزمهای آسیب، ابتدا ترکهای ماتریسی غالب هستند. اما با رشد تر کهای ماتریسی، نرخ رهاسازی انرژی ناشی از جدایی بینلایهای بیشتر میشود و بدین ترتیب رشد ترکهای ماتریسی متوقف می شود و جدایی بین لایه ای به عنوان مکانیزم غالب شروع به رشد مى كند. حاجى كاظمى و صدر [22] با استفاده از شيوه وينو گرادوف موفق به محاسبه میدان تنش و افت سفتی در چندلایههای متعامد با لایه چینی دلخواه به شرط وقوع ترک ماتریسی در یکی از لایهها شدند. اخیراً محمدی و پاکدل [23] مدل توسعه یافته تری را بر اساس حساب تغییرات پیشنهاد داده است که مىتوان ميدان تنش سلول واحد حاوى انواع الكوهاى محتمل توزيع تركهاى ماتریسی را استخراج کرد و همچنین به بررسی افت خواص مکانیکی در چندلایههایی که آسیب در بیش از یک لایه قرار دارد نیز پرداخته است.

در این مقاله، به مطالعه وضعیت آسیب چندلایههای کامپوزیتی متعامد تحت بارگذاری استاتیکی تکمحوره کششی پرداخته خواهد شد. با استفاده از رویکرد میکرومکانیکی و بر پایه روش حساب تغییرات [23]، به تحلیل میدان تنش و افت خواص مکانیکی با دو الگوی محتمل متقارن و پادمتقارن پرداخته می شود. با استفاده از شیوه حساب تغییرات توسعه داده شده، نتایج افت خواص مکانیکی به دو شیوه همگنسازی نوبتی لایههای 90 درجه ترک خورده و روش مدلسازی همزمان لایههای 90 درجه ترک خورده، مورد محاسبه قرار می گیرد. از معیار نرخ رهاسازی انرژی جهت پیشبینی شروع و رشد ترکهای ماتریسی و جدایی بین لایه ای القایی، و همچنین وضعیت اشباع ترکهای ماتریسی استفاده خواهد شد. همچنین در راستای بهبود نتایج حاصل از روش حساب تغييرات روش تقسيم لايهها استفاده مي شود.

3- معادلات حاکم بر مسئله

برای بررسی محاسبه میدان تنش و افت خواص مکانیکی در چندلایههای کامپوزیتی روشهای مختلفی ارائه شده است. هشین برای اولین بار به کمک روش حساب تغییرات این روش را معرفی کرد که بعدها محققین بسیاری به آن پرداختند. اخیراً محمدی و پاکدل [23] توانستهاند مدل توسعه یافتهتری را پیشنهاد دهند که به وسیله آن میتوان افت خواص مکانیکی را در چندلایههایی که آسیب در بیش از یک لایه قرار دارد و اثر متقابل آنها بر یکدیگر بررسی

¹ Cox ² Talreja

McCartney ⁴ Admissible stress

⁵ Hashin ⁶ Shape function

⁷ Nairn 8 Hu

نمود. جهت محاسبه میدان تنش میبایست سلول واحدی استخراج شود. کامپوزیت لایهای را میتوان مجموعهای از سلولهای واحد که توسط دو ترک ماتریسی احاطه شدهاند، در نظر گرفت. با توجه به فرض توزیع یکنواخت ترکها در لایههای 90 درجه، فاصله هر دو ترک مجاور 2a در نظر گرفته میشود و میتوان میدان تنش حاصل از سلول واحد را به کل چندلایه کامپوزیتی تعمیم داد. زاویه قرارگیری الیاف به صورت متعامد است و تقارن نسبت به صفحه میانی وجود دارد. چندلایه در محور مختصاتی که ترکها در لایههای 90 درجه قرار دارند، تحت بارگذاری تکمحوره کششی داخل صفحه x_x که به صورت یکنواخت وارد شده، قرار گرفته است. به همین ترتیب ترتیب الگوی توزیع ترک در سلول واحد را میتوان در دو حالت متقارن و پاد متقارن در نظر گرفت.

در شیوه حساب تغییرات با استفاده از روش هشین، میدان تنش موجود در لایهها برای کامپوزیت لایهای حاوی آسیب از جمع تنشها در حالت فاقد آسیب و ناشی از وجود آسیب ایجاد شده است. میدان تنش به صورت رابطه (1) تعریف می شود.

$$\widetilde{\sigma}_{mn}^{(i)} = \sigma_{mn}^{0(i)} + \sigma_{mn}^{(i)} \tag{1}$$

ترم $\sigma_{mn}^{0(i)}$ در معادله (1) تنش کامپوزیت لایهای فاقد آسیب است که با استفاده از تئوری کلاسیک صفحات لایهای ⁽ قابل محاسبه است. ترم $\sigma_{mn}^{(i)}$ بیانگر تنش اغتشاشی در لایه *آ*ام میباشد که بر خلاف تنشهای فاقد آسیب میتواند تابعی از مکان باشد. جهت پیدا کردن میدان تنش اغتشاشی باید فرضیات زیر اعمال شوند:

- صفر بودن تنشها در سطوح خارجی کامپوزیتهای لایهای
 - · صفر بودن تنشها در سطوح ترکها
 - پیوستگی تنشها در محل اتصال لایهها

ذکر این نکته حائز اهمیت است که فرض می شود تنش های اغتشاشی داخل صفحه هر لایه، تنها در جهت x تغییر می کند و تنش های اغتشاشی در جهت ضخامت در هر لایه ثابت است. میدان تنش مستقل از راستای محور عرضی (محور y) است زیرا ترک در سیستم مختصات در راستای y گسترده شدهاند و همچنین از اثر لبهها نیز صرفنظر شده است. فرض ثابت بودن ضخامت لایه، نتایج را دچار مشکل می کند زیرا در راستای ضخامت با تغییرات تنش های داخلی و تمرکز تنش در رئوس ترک ها مواجه می شویم و این فرض شیه سازی تمرکز تنش را غیر ممکن می کند. از این رو از روش تقسیم بندی لایه ها^۲ استفاده می کنیم. در این روش یک لایه را به چندین لایه با خواص مشابه با لایه اولیه تقسیم نموده و بنابراین تغییرات تنش در راستای ضخامت برای هر لایه به سادگی قابل مدل سازی است. لازم به ذکر است تنش های داخل صفحه در هر زیر لایه مجاور می توانند متفاوت باشند.

تنش اغتشاشی داخل صفحه در هر لایه به صورت رابطه (2) بیان میشود.

$$\sigma_{xx}^{(i)} = -\varphi_i(x) \tag{2}$$

در این رابطه $(\varphi_i(x)$ تابعی نامعلوم از x است. با این وجود ترمهای دیگر تانسور تنش میتوانند تابعیتی از هر دو مختصات x و z را داشته باشند. با استفاده از تابع تنش اغتشاشی داخل صفحه میتوان توابع تنش اغتشاشی خارج صفحه را از معادلات تعادل به صورت رابطه (3) استخراج کرد.

در رابطه (3)، $f_i(x)$ و $g_i(x)$ توابعی نامعلوم از متغیر x هستند. با استفاده از معادلات پیوستگی تنش بین لایهها و تقارن نسبت به صفحه میانی و شرایط مرزی محاسبه خواهند شد. علاوه بر شرایط مرزی خارجی باید بارهای خارجی اعمالی به چندلایه با تنشهای داخلی در تعادل باشند. با فرض اینکه فرایند ترک خوردن در شرایط بار – ثابت⁷ رخ دهد، بار پیش و پس از وقوع آسیب برابر خواهد بود. تعادل بارهای وارده با تنشها برای چندلایه فاقد آسیب:

$$N_{xx} = \int_{-h}^{h} \tilde{\sigma}_{xx} \, dz = \sum_{i=1}^{4N} \sigma_{xx}^{0(i)} t^{(i)} \tag{4}$$

برای چندلایه حاوی آسیب رابطه تعادل با نیروهای خارجی:

$$N_{xx} = \int_{-h}^{h} \tilde{\sigma}_{xx} \, dz = \sum_{i=1}^{4N} \left(\sigma_{xx}^{0(i)} - \varphi_i(x) \right) t^{(i)}$$
(5)

با مقايسه روابط (4) و (5) رابطه (6) استخراج مى شود:

$$\sum_{i=1}^{4N} \varphi_i(x) t^{(i)} = 0$$
(6)

به منظور یافتن میدان تنش قابلقبول $(p_i(x))$ از اصل مینیمم انرژی مکمل میتوان آن را استخراج کرد. انرژی مکمل سلول واحد کامپوزیت لایهای حاوی آسیب طبق رابطه (7) قابل تعریف است.

$$\begin{split} \widetilde{U}_{c} &= \frac{1}{2} \int_{V} \widetilde{\sigma} S \widetilde{\sigma} dV = U_{0}^{c} + U_{c}^{'} \\ U_{c}^{0} &= \frac{1}{2} \int_{V} \sigma^{0} S \sigma^{0} dV \\ U_{c}^{'} &= \frac{1}{2} \int_{V} \sigma S \sigma dV \end{split}$$
(7)

که در روابط بالا *S* ماتریس نرمی محلی، *V* حجم سلول واحد چندلایه کامپوزیتی، 0 میدان تنش در چندلایه کامپوزیتی ترک نخورده و σ میدان تنش اغتشاشی میباشد. انرژی مکمل در حالت فاقد آسیب در محاسبات وارد نمی شود، زیرا انرژی مکمل پیش از وقوع ترک مستقل از تنش های اغتشاشی و در نتیجه مستقل از تابع نامعلوم 0 است. بنابراین برای استخراج تابع نامعلوم $^{0}_{i}$ ، کافیست تنها انرژی مکمل ناشی از تنش اغتشاشی در سلول واحدی به طول 22 که توسط دو ترک مجاور محصورشده است، مینیمم شود. برای سلول واحد موردنظر انرژی مکمل ناشی از تنش اغتشاشی را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$U_{c}^{'} = \frac{1}{2} \int_{-a}^{a} \left\{ \sum_{i=1}^{4N} \int_{V_{i}} W^{i} dz \right\} dx$$
(8)

که در رابطه بالا^{، (i)} چگالی انرژی تنش اغتشاشی لایه *i*ام است که به صورت زیر تعریف میشود:

¹ Classical laminated plate theory (CLPT) ² Ply refinement

³ Load control

همچنین $[S^{(i)}]$ ماتریس نرمی لایه *i*ام در محور مختصاتی است که ترکها در راستای محور γ گسترده شدهاند. بهمنظور محاسبه $[S^{(i)}]$ ، کافی است تا ماتریس نرمی محلی لایه *i*ام بر اساس زاویه قرار گیری الیاف آن (به عنوان مثال 90 درجه برای لایههای ترکخورده) نسبت به محور مختصات دوران داده شود. با توجه به اینکه میدان تنش اغتشاشی خود تابعی است از تابع نامعلوم $_{i}\phi$ با قرار دادن تنش اغتشاشی هر زیرلایه در رابطه (8)، و انتگرال گیری در راستای z_{i} انرژی مکمل به صورت یک تابعی از تابع ناشناخته $_{i}\phi$ و مشتقات آن نسبت به x به صورت زیر بازنویسی میشود:

$$U_{c}^{'} = \frac{1}{2} \int_{-a}^{a} F(\varphi_{i}^{''}, \varphi_{i}^{'}, \varphi_{i}) dx, \qquad i = 1, \dots, 4N$$
(10)

که در آن F تابعی اسکالر از تابع نامعلوم φ_i است. مینیمم کردن انرژی مکمل و استخراج تابع ناشناخته میدان تنش، از طریق اعمال اپراتور حساب تغییرات⁽ به تابع رابطه (10) و برابر قرار دادن با صفر $(\delta U'_c = 0)$ به شکل زیر صورت میگیرد:

$$\int_{-a}^{a} \delta F(\varphi_{i}^{''}, \varphi_{i}^{'}, \varphi_{i}) dx = 0, \qquad i = 1, \dots, 4N$$
(11)

بر اساس اصول روش حساب تغییرات، رابطه (11) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\int_{-a}^{a} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_{i}^{''}} \left(\delta \varphi_{i}^{''} \right) + \frac{\partial F}{\partial \varphi_{i}^{'}} \left(\delta \varphi_{i}^{'} \right) + \frac{\partial F}{\partial \varphi_{i}} \left(\delta \varphi_{i} \right) \right) dx = 0,$$

$$i = 1, \dots, 4N$$
(12)

معادله حساب تغییرات رابطه (12) با انتگرالگیری زنجیرهای به یک دستگاه معادلات اویلر-لاگرانژ با استفاده از مجموعه شرایط مرزی موردنیاز قابل ساده سازی است که در ادامه به مطالعه هر یک از موارد ترک ماتریسی میانی، متقارن و پادمتقارن بیرونی پرداخته خواهد شد. برای حل دستگاه معادلات اویلر-لاگرانژ و استخراج تابع ناشناخته، به شرایط مرزی ذاتی و طبیعی نیاز است. مجموع شرایط مرزی ذاتی موردنیاز برای حل دستگاه معادلات اویلر-لاگرانژ به چهار دسته تقسیم میشوند:

- سطوح آزاد: تنشها بر روی سطوح آزاد صفر در نظر گرفته میشوند و همچنین بر روی سطوح ترک نیز تنشها صفر فرض میشوند. به همین خاطر، تنشهای می و ترع بر روی سطوح ترکهای ماتریسی برابر صفر هستند.
- پیوستگی تنشها در محل اتصال لایهها: شرط پیوستگی تنشها در راستای محور x اقتضا میکند تا تنشهای x_{xx} و x_x در سلول واحد در راستای محور x (بهجز روی سطوح ترکها) در مرز دو زیر لایه مجاور برابر در نظر گرفته شود.
- تقارن چرخشی: سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی آسیب، دارای تقارن چرخشی حول محور z است. تقارن چرخشی یعنی هندسه و بارگذاری سلول واحد با چرخش 180 درجه حول محور z بر روی خود منطبق میشود. در واقع با توجه به تقارن چرخشی سلول واحد حول

محور z، شرایط $\left.\widetilde{\sigma}_{xz}\right|_{x=x_0}=-\widetilde{\sigma}_{xz}|_{x=-x_0}$ در سرتاسر سلول واحد برقرار است [21].

تقارن انتقالی: به دلیل اینکه سلول واحد، نماینده چندلایه کامپوزیتی در طول است و میدان تنش آن به کل کامپوزیت قابل تعمیم است، به همین خاطر پیوستگی تنشهای $x_x \tilde{\sigma}$ و $x_x \tilde{\sigma}$ در طرفین سلول واحد در $x = \pm a$ باید برقرار باشد. با استفاده از دیاگرام آزاد ارائهشده در شکل 3 که مربوط واقع وجه سمت چپ سلول واحد دوم در x = -x است. با توجه به اینکه واقع وجه سمت چپ سلول واحد دوم در x = -x است. با توجه به اینکه تمامی سلولهای واحد از نظر هندسی، بارگذاری و میدان تنش به طور کامل یکسان هستند، بنابراین میدان تنش بر روی سطح x = -x در سلول واحد دوم عیناً مشابه میدان تنش بر روی سطح x = -x در سلول واحد اول است. به اینتر تیب پیوستگی تنش ها بر روی فصل مشترک دو سلول واحد مجاور در x = x اقتضا می کند که تنشهای $x_x \tilde{\sigma}$ و $x_x \tilde{\sigma}$ بر روی این دو سطح برابر باشد، به طوری که $x = \tilde{\sigma}_{xn}|_{x=a} = \tilde{\sigma}_{xn}$ که در آن



Fig. 3 Axial stress, in-plane shear stress, and transverse shear stress at the boundary of an un-cracked lamina [22]

شکل 3 ارتباط تنشهای محوری، برشی عرضی و برشی داخل صفحه در سلولهای شاخص کنار هم در یک لایهی ترک نخورده [22]

علاوه بر شرایط مرزی ذکرشده، شرایط مرزی طبیعی نیز از طریق اعمال شرایط مرزی ذاتی در معادلات شرایط مرزی که از سادهسازی انتگرال رابطه (13) به دست میآید، محاسبه میشود. در نهایت از طریق حل دستگاه معادلات اویلر-لاگرانژ با استفاده از شرایط مرزی ذاتی و طبیعی، تابع ناشناخته φ_i و در نتیجه میدان تنش سلول واحد استخراج میشود.

اصل مینیمم انرژی مکمل یادآور این است که انرژی مکمل حقیقی سلول U_c واحد U_c همواره کمتر از انرژی مکملی است که با استفاده از یک میدان تنش قابلقبول \overline{U}_c محاسبه میشود. بنابراین اصل مینیمم انرژی مکمل را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{2}\overline{\sigma}S^{*}\overline{\sigma}.V = U_{c} \le \tilde{U}_{c} = \frac{1}{2}\overline{\sigma}S^{0}\overline{\sigma}.V + U_{c}^{'}$$
(13)

که در رابطه بالا * ماتریس نرمی مؤثر 7 برای یک چندلایه حاوی آسیب، S^{0} ماتریس نرمی مؤثر برای چندلایه فاقد آسیب، V حجم چندلایه، $\overline{\sigma}$ تنش متوسط معادل بارهای وارده میباشند. طرف چپ عبارت بالا بیانگر انرژی مکمل واقعی 7 و طرف راست آن بیانگر انرژی مکملی است که توسط یک میدان تنش قابل قبول محاسبه شده است و مؤلفهها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\overline{\sigma}_{xx} = \frac{N_{xx}}{2h} \tag{14}$$

انرژی مکمل ناشی از تنش اغتشاشی U'_c با استفاده از میدان تنش اغتشاشی استخراجشده قابلمحاسبه است. ماتریس نرمی مؤثر چندلایه کامپوزیتی حاوی ترک به صورت زیر قابلمحاسبه است:

¹ Variational operator

² Effective compliance matrix

³ True complementary energy

پیشبینی رشد آسیب در کامپوزیتهای لایهای متعامد تحت بارگذاری کششی تکمحوره

$$S_{11}^{*} \leq S_{11}^{0} + \frac{1}{V} \left(U_{c}^{'} \right)$$
(15)

نهایتاً ثابت مهندسی یک چندلایه حاوی آسیب به شکل زیر تعریف میشود:

$$E_x = \frac{1}{S_{11}^*}$$
(16)

که در عبارت بالا E_x مدول سفتی محوری میباشد.

در ادامه به ارائه روند استخراج میدان تنش و سفتی باقیمانده برای چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی متقارن و پادمتقارن پرداخته شده است.

ترک ماتریسی میانی و جدایی بین لایه ای

در این بخش سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بینلایه ین ناشی از ترک ماتریسی میانی تحت بارگذاری تکمحوره کششی یکنواخت داخل صفحه ای می باشد، که لایه های 90 درجه دچار ترکخوردگی ماتریسی و جدایی بینلایه ای ناشی از آن شده اند و دارای تقارن هندسی و بارگذاری نسبت به صفحه xy می باشد. می توان میدان تنش سلول واحد را تنها در نیمه ($0 \le z$) در نظر گرفت و به تمام حجم سلول واحد تعمیم داد.

معادله حاصل از تعادل تنش داخلی با نیروی اعمالی خارجی رابطه (6) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\sum_{i=1}^{2N} \varphi_i(x) t^{(i)} = 0 \tag{17}$$

جهت یافتن میدان تنش قابلقبول همانطور که قبلاً بیان شد، توابع نامعلوم f و g از طریق اعمال شرایط مرزی و پیوستگی تنشهای خارج صفحه در راستای ضخامت محاسبه میشوند. باید به این نکته توجه کرد که شرایط پیوستگی تنشها در فصل مشترک زیرلایهها در ناحیه حاوی جدایی بینلایهای (|x| - a - d|) با دیگر قسمتهای سلول واحد متفاوت است. بنابراین، شرایط مرزی و پیوستگی تنشها در دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بینلایهای متفاوت خواهد بود. به همین علت سلول واحد، مطابق شکل 4 به دو ناحیه حاوی جدایی بینلایهای (|x| - a - d|) و فاقد جدایی بینلایهای (|x| - a - d|) تقسیم میشود. لذا مؤلفههای میدان تنش برای دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بینلایهای به ترتیب با اندیسهای b و r از یکدیگر متمایز میشوند.



Fig. 4 Unit cell of laminate containing mid matrix crack with induced delamination

شرایط مرزی و پیوستگی تنشها در راستای محور z با در نظر گرفتن جدایی بینلایهای به صورت زیر میباشد:

صفر بودن تنشها در سطوح خارجی چندلایه کامپوزیتی

$$\begin{aligned}
\sigma_{xz_c}^{(2N)} &= \sigma_{xz_d}^{(2N)} = 0 \\
\sigma_{zz_c}^{(2N)} &= \sigma_{zz_d}^{(2N)} = 0
\end{aligned}$$
(18)

• پیوستگی تنشها در محل اتصال لایهها

$$\begin{aligned}
\sigma_{xz_c}^{(i)} &= \sigma_{xz_c}^{(i+1)}, & \sigma_{xz_d}^{(i)} &= \sigma_{xz_d}^{(i+1)} \\
\sigma_{zz_c}^{(i)} &= \sigma_{zz_c}^{(i+1)}, & \sigma_{zz_d}^{(i)} &= \sigma_{zz_d}^{(i+1)}
\end{aligned}$$
(19)

صفر بودن تنشها در سطح جدایی بین لایه ای

$$\sigma_{zz_d}^{(N)} = \sigma_{zz_d}^{(N+1)} = 0$$

$$\sigma_{zz_d}^{(N)} = \sigma_{zz_d}^{(N+1)} = 0$$
(20)

تقارن کامپوزیت لایه ای نسبت به صفحه میانی

$$\sigma_{xz_c}^{(1)} = \sigma_{xz_d}^{(1)} = 0 \tag{21}$$

با اعمال شرایط مرزی و پیوستگی و شرط معادلات حاصل از تعادل تنشهای داخلی با نیروهای اعمالی خارجی، میدان تنش قابل قبول برای ناحیه فاقد جدایی بینلایهای استخراج میشود.

همانطور که پیش از این بیان شد تابع نامعلوم φ_i از طریق مینیمم سازی انرژی مکمل به دست می آید. به علت تقارن سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بینلایهای نسبت به صفحه xx، میتوان انرژی مکمل نیمه بالایی سلول واحد را مینیمم کرد. همچنین تقارن سلول واحد نسبت به صفحه zy نیز منجر به انرژی مکمل یکسان در هر دو ناحیه حاوی جدایی بینلایهای در d - d = x = x می شود. درنتیجه انرژی مکمل سلول واحد بر اساس رابطه (8) و اعمال تقارنهای ذکرشده به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$U_{c}^{'} = \int_{d-a}^{a-d} \left\{ \sum_{i=1}^{2N} \int_{Z_{i-1}}^{Z_{i}} \left\{ \sigma_{c}^{(i)} \right\}^{T} \left[S^{(i)} \right] \left\{ \sigma_{c}^{(i)} \right\} dz \right\} dx + 2 \int_{a-d}^{a} \left\{ \sum_{i=1}^{2N} \int_{Z_{i-1}}^{Z_{i}} \left\{ \sigma_{d}^{(i)} \right\}^{T} \left[S^{(i)} \right] \left\{ \sigma_{d}^{(i)} \right\} dz \right\} dx$$
(22)

که در آن

$$\{\sigma_{c}^{(i)}\}^{T} = \left\{\sigma_{xx_{c}}^{(i)}\sigma_{zz_{c}}^{(i)},\sigma_{xz_{c}}^{(i)}\right\} \left\{\sigma_{d}^{(i)}\right\}^{T} = \left\{\sigma_{xx_{d}}^{(i)},\sigma_{zz_{d}}^{(i)},\sigma_{xz_{d}}^{(i)}\right\}$$
(23)

با در نظر گرفتن میدان تنش نواحی فاقد و حاوی جدایی بینلایهای در رابطه (23) میتوان نوشت:

$$U'_{c} = \int_{d-a}^{a-d} F_{c}\left(x, \{\varphi_{c}^{"}\}, \{\varphi_{c}^{'}\}, \{\varphi_{c}\}\right) dx$$

+ $2\int_{a-d}^{a} F_{d}\left(x, \{\varphi_{d}^{"}\}, \{\varphi_{d}^{'}\}, \{\varphi_{d}\}\right) dx$ (24)

$$\begin{cases} \varphi_c \end{cases} = \left\{ \varphi_{1_c}, \varphi_{2_c}, \dots, \varphi_{2N-1_c} \right\} \\ \left\{ \varphi_d \right\}^T = \left\{ \varphi_{2_d}, \varphi_{3_d}, \dots, \varphi_{2N-2_d} \right\}$$

$$(25)$$

$$\begin{split} \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} &= \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} = \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}(d-a) = \varphi_{i_{c}}(a-d) , \\ \delta\varphi_{i_{c}}(d-a) &= \delta\varphi_{i_{c}}(a-d) , \quad i = 1..2N-1 \\ \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} &= -\tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} = -\sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}^{'}(d-a) = -\varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) , \quad i = 1..2N-1 \\ \delta\varphi_{i_{c}}^{'}(d-a) &= -\delta\varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) , \quad i = 1..2N-1 \end{split}$$

$$\tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} = -\tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=-a}, \qquad i = N+1..2N-2$$
(33)

تقارن انتقالى

$$\tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} = \tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=-a}, \qquad i = N+1..2N-2$$
(34)

شرایط مرزی طبیعی از جایگذاری شرایط مرزی ذاتی در رابطه (29) به دست میآیند. در شرایط مرزی طبیعی باید توجه کرد که توابع نامعلوم φ_{i_c} و دست میآیند. در شرایط مرزی طبیعی باید توجه کرد که توابع نامعلوم φ_{i_d} و ϕ_{i_d} در مرز نواحی حاوی و فاقد جدایی بینلایهای در x = a - d وابسته به یکدیگر هستند. با در اختیار داشتن کلیه شرایط مرزی و حل معادلات اویلر-لاگرانژ، توابع نامعلوم φ_{i_d} , φ_{i_d} و در پی آن میدان تنش اغتشاشی به دست میآید.

ترک ماتریسی پادمتقارن بیرونی و جدایی بینلایهای

همان طور که قبلاً جهت یافتن میدان تنش قابل قبول ذکر شد، توابع نامعلوم fو g از طریق اعمال شرایط مرزی و پیوستگی تنشهای خارج صفحه در راستای ضخامت محاسبه می شوند. باید به این نکته توجه کرد که شرایط پیوستگی تنشها در فصل مشترک زیرلایه ها در ناحیه حاوی جدایی بین لایه ای با دیگر قسمتهای سلول واحد متفاوت است. بنابراین، شرایط مرزی و پیوستگی تنش ها برای دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بین لایه ای متفاوت خواهد بود. به همین علت سلول واحد، مطابق شکل 5 به دو ناحیه حاوی جدایی بین لایه ای در (b = |x| < a - d) و فاقد جدایی بین لایه ای در (b = |x| > b)تقسیم می شود. لذا مؤلفه های میدان تنش برای دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بین لایه ای به ترتیب با اندیس های b و 3 از یکدیگر متمایز می شوند.



Fig. 5 Unit cell of staggered outer-ply cracked laminate with induced delamination شکل 5 سلول واحد حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی پادمتقارن بیرونی

جهت مینیممسازی انرژی مکمل اغتشاشی، میتوان از اعمال اپراتور حساب تغییرات استفاده کرد و رابطه (24) به شکل زیر بازنویسی میشود:

$$\delta U_{c}^{'} = \int_{d-a}^{a-d} \delta F_{c} dx + 2 \int_{a-d}^{a} \delta F_{d} dx = 0$$

$$\int_{d-a}^{a-d} \sum_{i=1}^{2N-1} \left[\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}} \left(\delta \varphi_{i_{c}} \right) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{c}}^{'} \right) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{c}}^{'} \right) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{c}}^{'} \right) \right] dx$$

$$+ 2 \int_{a-d}^{a} \left\{ \sum_{i=2}^{2N-2} \left[\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}} \left(\delta \varphi_{i_{d}} \right) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{d}}^{'} \right) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{d}}^{'} \right) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{d}}^{'} \right) \right] \right\} dx$$

$$= 0 \qquad (26)$$

با در نظر گرفتن انتگرال گیری زنجیرهای و با توجه به اینکه توابع نامعلوم φ_{i_c} و مار نظر x = a از یکدیگر میتقل هستند، معادلات اویلر-لاگرانژ به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}''} \right) = 0, \qquad i = 2 \dots 2N - 2$$

$$\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}''} \right) = 0, \qquad i = 1 \dots 2N - 1$$
(27)

$$\frac{\partial \varphi_{i_c}}{\partial \varphi_{i_c}} - \frac{\partial \varphi_{i_c}}{\partial x} \left(\frac{\partial \varphi_{i_c}}{\partial \varphi_{i_c}} \right)^{+} \frac{\partial \varphi_{i_c}}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \varphi_{i_c}}{\partial \varphi_{i_c}} \right)^{-} = 0, \qquad l = 1 \dots 2N - 1$$
(28)

به همراه شرایط مرزی

$$\sum_{i=1}^{2N-1} \left[\left\{ \frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_c} \right) \right]_{x=d-a}^{x=a-d} + \sum_{i=1}^{2N-1} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_c}^{'} \right) \right]_{x=d-a}^{x=a-d} + \sum_{i=2}^{2N-2} \left[\left\{ \frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_d} \right) \right]_{x=a-d}^{x=a-d} + \sum_{i=2}^{2N-1} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_d}^{'} \right) \right\}_{x=a-d}^{x=a-d} = 0$$
(29)

برای حل معادلات دیفرانسیل و استخراج تمامی توابع نامعلوم به شرایط مرزی طبیعی یا ذاتی نیاز است.

مجموع شرایط مرزی ذاتی برای یک سلول واحد حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی میانی را میتوان به صورت زیر در نظر گرفت:

سطوح آزاد ترک

$$\begin{split} \tilde{\sigma}_{xxd}^{(i)}|_{x=a} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xxd}^{(i)}|_{x=a} = -\sigma_{xx}^{0(i)} \\ \Rightarrow &\phi_{i_d}(a) = \sigma_{xx}^{0(i)}, \qquad \delta \phi_{i_d}(a) = 0, \qquad i = 2..N \\ \tilde{\sigma}_{xzd}^{(i)}|_{x=a} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xzd}^{(i)}|_{x=a} = 0 \\ \Rightarrow &\phi_{i_d}^{'}(a) = 0, \qquad \delta \phi_{i_d}^{'}(a) = 0, \qquad i = 2..N \end{split}$$

$$(30)$$

$$\begin{split} \widetilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \widetilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ \Rightarrow \varphi_{i_{c}}(a-d) &= \varphi_{i_{d}}(a-d) , \\ \delta\varphi_{i_{c}}(a-d) &= \delta\varphi_{i_{d}}(a-d) , \quad i = N+1..2N-1 \\ \widetilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \widetilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ \Rightarrow \varphi_{i_{c}}^{(}(a-d)) &= \varphi_{i_{d}}^{'}(a-d) , \quad i = N+1..2N-1 \end{split}$$
(31)

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

 $U_{c}^{'} = 2 \int_{d}^{\frac{a}{2}} \left\{ \sum_{i=1}^{4N} \int_{z_{i-1}}^{z_{i}} \{\sigma_{c}^{(i)}\}^{T} [S^{(i)}] \{\sigma_{c}^{(i)}\} \cdot dz \right\} \cdot dz + 2 \int_{0}^{d} \left\{ \sum_{i=1}^{4N} \int_{z_{i-1}}^{z_{i}} \{\sigma_{d}^{(i)}\}^{T} [S^{(i)}] \{\sigma_{d}^{(i)}\} \right\} \cdot dz$ (38)

$$\{ \sigma_{c}^{(i)} \}^{T} = \left\{ \sigma_{xx_{c}}^{(i)} \sigma_{xz_{c}}^{(i)} \sigma_{xz_{c}}^{(i)} \right\}$$

$$\{ \sigma_{d}^{(i)} \}^{T} = \left\{ \sigma_{xx_{d}}^{(i)}, \sigma_{zz_{d}}^{(i)}, \sigma_{xz_{d}}^{(i)} \right\}$$
(39)

با در نظر گرفتن میدان تنش نواحی فاقد و حاوی جدایی بینلایهای در رابطه (38) میتوان نوشت:

$$U_{c}^{'} = 2 \int_{d}^{\frac{a}{2}} F_{c}(x, \{\varphi_{c}^{''}\}, \{, \varphi_{c}^{'}\}, \{\varphi_{c}\}) dx + 2 \int_{0}^{d} F_{d}(x, \{\varphi_{d}^{''}\}, \{, \varphi_{d}^{''}\}, \{\varphi_{d}\}) dx$$

$$\{\varphi_{c}\}^{T} = \{\varphi_{2}, \varphi_{2}, \dots, \varphi_{4N-1}\}$$
(40)

$$\{\varphi_d\}^T = \{\varphi_{3_d}, \varphi_{4_d}, \dots, \varphi_{4N-2_d}\}$$
(41)

جهت مینیمم سازی انرژی مکمل اغتشاشی، میتوان از اعمال حساب تغییرات استفاده کرد و رابطه (40) را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\delta U_{c}^{\prime} = 2 \int_{d}^{\frac{a}{2}} \delta F_{c} \cdot dx + 2 \int_{0}^{d} \delta F_{d} \cdot dx = 0$$

$$2 \int_{d}^{\frac{a}{2}} \left\{ \sum_{i=2}^{4N-1} \left[\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}} (\delta \varphi_{i_{c}}) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{\prime}} (\delta \varphi_{i_{c}}^{\prime}) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{\prime}} (\delta \varphi_{i_{c}}^{\prime}) \right] \right\} \cdot dx$$

$$+ 2 \int_{0}^{d} \left\{ \sum_{i=3}^{4N-2} \left[\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}} (\delta \varphi_{i_{d}}) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{\prime}} (\delta \varphi_{i_{d}}^{\prime}) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{\prime}} (\delta \varphi_{i_{d}}^{\prime}) \right] \right\} \cdot dx = 0$$

$$(42)$$

با در نظر گرفتن انتگرال گیری زنجیرهای، و با توجه به این که توابع نامعلوم φ_{i_c} و φ_{i_d} و φ_{i_c} از x = a از x = a از یکدیگر مستقل هستند، معادلات اویلر لاگرانژ به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi'_{i_d}} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi''_{i_d}} \right) = 0, \qquad i = 3 \dots 4N - 2$$

$$\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}} - \frac{d}{\partial \varphi_{i_d}} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}} \right) + \frac{d^2}{\partial \varphi_{i_d}} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_d}} \right) = 0, \qquad i = 2 \dots 4N - 1$$
(43)

$$\overline{\partial \varphi_{i_c}} - \frac{1}{dx} \left(\overline{\partial \varphi'_{i_c}} \right) + \frac{1}{dx^2} \left(\overline{\partial \varphi''_{i_c}} \right) = 0, \qquad i = 2 \dots 4N - 1$$
(44)

به همراه شرایط مرزی

$$\sum_{i=2}^{4N-1} \left[\left\{ \frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} (\delta \varphi_{i_c}) \right]_{x=d}^{x=\frac{a}{2}} + \sum_{l=2}^{4N-1} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} (\delta \varphi_{i_c}) \right]_{x=d}^{x=\frac{a}{2}} + \sum_{l=3}^{4N-2} \left[\left\{ \frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} (\delta \varphi_{i_d}) \right]_{x=0}^{x=d} + \sum_{l=3}^{4N-2} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} (\delta \varphi_{i_d}^{'}) \right\}_{x=0}^{x=d} = 0$$

$$(45)$$

شرایط مرزی و پیوستگی تنشها در راستای محور z با در نظر گرفتن جدایی بینلایهای به صورت زیر میباشد:

صفر بودن تنشها در سطوح خارجی چندلایه کامپوزیتی

پیوستگی تنشها در محل اتصال لایهها

صفر بودن تنشها در سطح جدایی بین لایه ای

$$\sigma_{xz_d}^{(N)} = \sigma_{xz_d}^{(N+1)} = 0$$

$$\sigma_{zz_d}^{(N)} = \sigma_{zz_d}^{(N+1)} = 0$$
(37)

با اعمال این شرایط و شرط معادلات حاصل از تعادل تنشرهای داخلی با نیروهای اعمالی خارجی، میدان تنش قابلقبول برای ناحیه فاقد جدایی بینلایهای استخراج میشود.

همانطور که پیش از این ذکر شد، تابع نامعلوم $_i^{\varphi}$ از طریق مینیم مسازی انرژی مکمل سلول واحد به دست می آید. با توجه به تقارن چرخشی سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بین لایه ای ناشی از ترک ماتریسی زیگزاگی بیرونی حول محور z، انرژی مکمل هر دو نیمه چپ و راست سلول واحد برابر بوده و کافیست تنها انرژی مکمل یک نیمه سلول واحد (x < 0) مینیمم شود. ناحیه x < x > 0 از سلول واحد مطابق آنچه در شکل 6 نشان داده شده است دارای تقارن انعکاس نقطه ای حول نقطه R است.



Fig. 6 Point reflection symmetry of the unit cell of staggered outer-ply cracked laminate [23]

شکل 6 تقارن انعکاس نقطهای حول نقطه R در سلول واحد کامپوزیت حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی پادمتقارن بیرونی [23]

به دلیل اینکه مینیممسازی انرژی مکمل در ناحیه x > x > 0 دارای پیچیدگیهای محاسباتی زیادی است، میتوان از تقارن انعکاس نقطهای استفاده کرد و تنها انرژی مکمل ناحیه x < a/2 را محاسبه و در نهایت مینیممسازی کرد. در نتیجه با در نظر گرفتن تقارن چرخشی حول محور z و همچنین تقارن انعکاس نقطهای نسبت به نقطه R میتوان انرژی مکمل سلول واحد رابطه (8) کامپوزیت حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی زیگزاگی بیرونی به صورت زیر بازنویسی نمود:

برای حل معادلات دیفرانسیل و استخراج تمامی توابع نامعلوم به شرایط مرزی طبیعی یا ذاتی نیاز است.

مجموع شرایط مرزی ذاتی برای یک سلول واحد حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی زیگزاگی بیرونی را میتوان به صورت زیر در نظر گرفت: • سطوح آزاد ترک

$$\begin{split} \tilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=0} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=0} = -\sigma_{xx}^{0(i)} \\ \Rightarrow &\varphi_{i_{d}}(0) = \sigma_{x_{d}}^{0(i)}, \qquad \delta \varphi_{i_{d}}(0) = 0, \qquad i = 3..N \\ \tilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=0} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xz_{d}}^{(i)}|_{x=0} = 0 \\ \Rightarrow &\varphi_{i_{d}}^{'}(0) = 0, \qquad \delta \varphi_{i_{d}}^{'}(0) = 0, \qquad i = 3..N \end{split}$$
(46)

$$\begin{split} \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \tilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}(a-d) = \varphi_{i_{d}}(a-d) , \\ \delta\varphi_{i_{c}}(a-d) &= \delta\varphi_{i_{d}}(a-d) , \quad i = 2..4N-1 \\ \tilde{\sigma}_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \tilde{\sigma}_{xz_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xz_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) = \varphi_{i_{d}}^{'}(a-d) , \quad i = 2..4N-1 \end{split}$$

$$(47)$$

$$\widetilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=0} = 0 \Rightarrow \sigma_{xz_d}^{(i)}|_{x=0} = 0 \Rightarrow \varphi_{i_d}^{'}(0) = 0 \Rightarrow \delta \varphi_{i_d}^{'}(0) = 0, \qquad i = N+1..4N-2$$
(48)

$$\begin{split} \widetilde{\sigma}_{xx_c}^{(i)}|_{x=a/2} &= \widetilde{\sigma}_{xx_c}^{(4N+1-i)}|_{x=a/2} \\ \Rightarrow & \sigma_{xx_c}^{(i)}|_{x=a/2} = \sigma_{xx_c}^{(4N+1-i)}|_{x=a/2} \\ \Rightarrow & \varphi_{i_c}(a/2) = \varphi_{4N+1-i_c}(a/2) , \qquad i = 2 \dots 2N \\ \delta\varphi_{i_c}(a/2) &= \delta\varphi_{4N+1-i_c}(a/2) , \qquad i = 2 \dots 2N \\ \widetilde{\sigma}_{xz_c}^{(i)}|_{x=a/2, Z=z} &= \widetilde{\sigma}_{xz_c}^{(4N+1-i)}|_{x=a/2, Z=z} \\ \Rightarrow & \sigma_{xx_c}^{(i)}|_{x=a/2, Z=z} = \sigma_{xz_c}^{(4N+1-i)}|_{x=a/2, Z=z} \\ \Rightarrow & \varphi_{i_c}^{(i)}(a/2) = -\varphi_{4N+1-i_c}^{(i)}(a/2) , \qquad i = 2 \dots 2N \end{split}$$

$$(49)$$

شرایط مرزی طبیعی از جای گذاری شرایط مرزی ذاتی در رابطه (45) به دست میآیند. در شرایط مرزی طبیعی باید به این نکته توجه کرد که توابع نامعلوم $_{i_{c}} = \phi_{i_{c}} = 0$ در مرز نواحی حاوی و فاقد جدایی بینلایهای در x = dوابسته به یکدیگر هستند. با در اختیار داشتن کلیه شرایط مرزی و حل معادلات اویلر-لاگرانژ، کلیه توابع نامعلوم $_{i_{c}} = \phi_{i_{d}} = 0$ و در پی آن میدان تنش اغتشاشی به دست میآید.

ترک ماتریسی متقارن بیرونی و جدایی بینلایهای

سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بینلایه یا ناشی از ترک ماتریسی متقارن بیرونی تحت بارگذاری تکمحوره کششی یکنواخت داخل صفحه ای می باشد، که لایه های 90 درجه دچار ترکخوردگی ماتریسی و جدایی بینلایه ای ناشی از آن شده اند. به دلیل وجود تقارن نسبت به صفحه xyمی توان میدان تنش سلول واحد را تنها در نیمه ($z \le z$) در نظر گرفت و آن را به تمام حجم سلول واحد تعمیم داد.

معادله حاصل از تعادل تنشهای داخلی با نیروهای اعمالی خارجی رابطه (6) را میتوان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\sum_{i=1}^{2N} \varphi_i(x) t^{(i)} = 0$$
(50)

جهت یافتن میدان تنش قابلقبول همانطور که قبلاً بیان شد، توابع نامعلوم f, g از طریق اعمال شرایط مرزی و پیوستگی تنشهای خارج صفحه در راستای ضخامت محاسبه میشوند. باید به این نکته توجه کرد که شرایط پیوستگی تنشها در فصل مشترک زیرلایهها در ناحیه حاوی جدایی بینلایهای با دیگر قسمتهای سلول واحد متفاوت است. بنابراین، شرایط مرزی و پیوستگی تنشها برای دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بینلایهای متفاوت خواهد بود. به همین علت سلول واحد مطابق شکل 7، به دو ناحیه حاوی جدایی بینلایهای در (d > |x| < a - a) و فاقد جدایی بینلایهای در (d - a > |x| > b)تقسیم میشود. لذا مؤلفههای میدان تنش برای دو ناحیه حاوی و فاقد جدایی بینلایهای به ترتیب با اندیسهای b = c از یکدیگر متمایز میشوند.



Fig. 7 Unit cell of symmetric outer-ply cracked laminate with induced delamination

شکل 7 سلول واحد حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی متقارن بیرونی

$$\sigma_{xz_c}^{(2N)} = \sigma_{xz_d}^{(2N)} = 0$$

$$\sigma_{zz_c}^{(2N)} = \sigma_{zz_d}^{(2N)} = 0$$
(51)

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xz_d}^{(N)} &= \sigma_{xz_d}^{(N+1)} = 0 \\
 \sigma_{zz_d}^{(N)} &= \sigma_{zz_d}^{(N+1)} = 0
 \end{aligned}$$
(53)

$$\sigma_{xz_c}^{(1)} = \sigma_{xz_d}^{(1)} = 0 \tag{54}$$

با اعمال شرایط مرزی و پیوستگی و شرط معادلات حاصل از تعادل تنشهای داخلی با نیروهای اعمالی خارجی، میدان تنش قابل قبول برای ناحیه فاقد جدایی بین لایه ی استخراج میشود.

تابع نامعلوم φ_i همان طور که ذکر شد از طریق مینیمم سازی انرژی مکمل به دست میآید. به علت تقارن سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی میانی نسبت به صفحه xx، میتوان انرژی مکمل نیمه بالایی سلول واحد را مینیمم کرد. همچنین تقارن سلول واحد نسبت به صفحه xz، نیز منجر به انرژی مکمل یکسان در هر دو ناحیه حاوی جدایی بینلایهای در d - a = x میشود. در نتیجه انرژی مکمل سلول واحد بر اساس رابطه (8) و اعمال تقارنهای ذکرشده به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$U_{c}^{'} = \int_{d-a}^{a-d} \left\{ \sum_{i=1}^{2N} \int_{Z_{i-1}}^{Z_{i}} \{\sigma_{c}^{(i)}\}^{T} [S^{(i)}] \{\sigma_{c}^{(i)}\} dz \right\} dx + 2 \int_{a-d}^{a} \left\{ \sum_{i=1}^{2N} \int_{Z_{i-1}}^{Z_{i}} \{\sigma_{d}^{(i)}\}^{T} [S^{(i)}] \{\sigma_{d}^{(i)}\} dz \right\} dx$$
(55)

$$\{ \sigma_{c}^{(i)} \}^{T} = \left\{ \sigma_{xx_{c}}^{(i)} \sigma_{zz_{c}}^{(i)}, \sigma_{xz_{c}}^{(i)} \right\}$$

$$\{ \sigma_{d}^{(i)} \}^{T} = \left\{ \sigma_{xx_{d}}^{(i)}, \sigma_{zz_{d}}^{(i)}, \sigma_{xz_{d}}^{(i)} \right\}$$
(56)

با در نظر گرفتن میدان تنش نواحی فاقد و حاوی جدایی بینلایهای در رابطه (55) میتوان نوشت:

$$U_{c}^{'} = \int_{d-a}^{a-d} F_{c}\left(x, \left\{\varphi_{c}^{'}\right\}, \left\{\varphi_{c}^{'}\right\}, \left\{\varphi_{c}^{'}\right\}\right) dx$$

$$+ 2 \int_{a-d}^{a} F_{d}\left(x, \left\{\varphi_{d}^{''}\right\}, \left\{\varphi_{d}^{'}\right\}\right) dx$$

$$\left\{\varphi_{d}^{*}\right\}^{T} = \left\{\varphi_{d}, \varphi_{d}^{*}, \varphi_{d}^{*}, \left\{\varphi_{d}^{''}\right\}\right\} dx$$
(57)

$$\{ \varphi_{d} \}^{T} = \{ \varphi_{2_{d}}, \varphi_{3_{d}}, \dots, \varphi_{2N-2_{d}} \}$$

$$\{ \varphi_{d} \}^{T} = \{ \varphi_{2_{d}}, \varphi_{3_{d}}, \dots, \varphi_{2N-2_{d}} \}$$

$$(58)$$

جهت مینیممسازی انرژی مکمل اغتشاشی، میتوان از اعمال اپراتور حساب تغییرات استفاده کرد و رابطه (57) به شکل زیر بازنویسی میشود:

$$\begin{split} \delta U_{c}^{'} &= \int_{d-a}^{a-d} \delta F_{c} \cdot dx + 2 \int_{a-d}^{a} \delta F_{d} \cdot dx = 0 \\ \int_{d-a}^{a-d} \sum_{i=2}^{2N} \left[\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}} \left(\delta \varphi_{i_{c}} \right) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{c}}^{'} \right) + \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{c}}^{'} \right) \right] \cdot dx \\ &+ 2 \int_{a-d}^{a} \left\{ \sum_{i=2}^{2N-2} \left[\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}} \left(\delta \varphi_{i_{d}} \right) + \frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{'}} \left(\delta \varphi_{i_{d}}^{'} \right) \right. \\ &+ \frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{''}} \left(\delta \varphi_{i_{d}}^{''} \right) \right] \right\} \cdot dx = 0 \end{split}$$

$$(59)$$

با در نظر گرفتن انتگرال گیری زنجیرهای، و با توجه به اینکه تابع نامعلوم φ_{i_c} و φ_{i_d} و φ_{i_c} جز در مرز نواحی حاوی و فاقد جدایی بینلایهای در x = a از یکدیگر مستقل هستند، معادلات اویلر-لاگرانژ به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}} \right) + \frac{d^{2}}{dx^{2}} \left(\frac{\partial F_{d}}{\partial \varphi_{i_{d}}^{''}} \right) = 0, \qquad i = 2 \dots 2N - 2$$

$$\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{'}} \right) + \frac{d^{2}}{dx^{2}} \left(\frac{\partial F_{c}}{\partial \varphi_{i_{c}}^{''}} \right) = 0, \qquad i = 2 \dots 2N$$
(60)
$$(61)$$

به همراه شرایط مرزی

$$\sum_{i=2}^{2N} \left[\left\{ \frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_c} \right) \right]_{x=d-a}^{x=a-d} + \sum_{i=2}^{2N} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_c}{\partial \varphi_{i_c}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_c}^{'} \right) \right]_{x=d-a}^{x=a-d} + \sum_{i=2}^{2N-2} \left[\left\{ \frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_d} \right) \right]_{x=a-d}^{x=a-d} + \sum_{i=2}^{2N-2} \left[\left\{ \left(\frac{\partial F_d}{\partial \varphi_{i_d}^{'}} \right) \right\} \left(\delta \varphi_{i_d}^{'} \right) \right\}_{x=a-d}^{x=a-d} = 0$$
(62)

برای حل معادلات دیفرانسیل و استخراج تمامی توابع نامعلوم به شرایط مرزی طبیعی یا ذاتی نیاز است.

مجموع شرایط مرزی ذاتی برای یک سلول واحد حاوی جدایی بینلایهای ناشی از ترک ماتریسی متقارن بیرونی را میتوان به صورت زیر در نظر گرفت: • سطوح آزاد ترک

$$\begin{split} \widetilde{\sigma}_{xx_d}^{(i)}|_{x=a} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xx_d}^{(i)}|_{x=a} = -\sigma_{xx}^{0(i)} \\ \Rightarrow \varphi_{i_d}(a) &= \sigma_{xx}^{0(i)}, \qquad \delta \varphi_{i_d}(a) = 0, \\ &i = N + 1 \dots 2N - 2 \\ \widetilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} &= 0 \Rightarrow \sigma_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} = 0 \\ \Rightarrow \varphi_{i_d}^{'}(a) &= 0, \qquad \delta \varphi_{i_d}^{'}(a) = 0, \qquad i = N + 1 \dots 2N - 2 \quad (63) \end{split}$$

$$\begin{split} \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \tilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}(a-d) = \varphi_{i_{d}}(a-d) , \\ \delta\varphi_{i_{c}}(a-d) &= \delta\varphi_{i_{d}}(a-d) , \quad i=2..2N \\ \tilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} &= \tilde{\sigma}_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} = \sigma_{xx_{d}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) = \varphi_{i_{d}}^{'}(a-d) , \quad i=2..2N \end{split}$$

$$(64)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} &= \widetilde{\sigma}_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} = \sigma_{xx_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}(d-a) = \varphi_{i_{c}}(a-d) , \\ \delta\varphi_{i_{c}}(d-a) &= \delta\varphi_{i_{c}}(a-d) , \quad i = 2..2N \\ \widetilde{\sigma}_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} &= -\widetilde{\sigma}_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \Rightarrow \sigma_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=d-a} = -\sigma_{xz_{c}}^{(i)}|_{x=a-d} \\ &\Rightarrow \varphi_{i_{c}}^{'}(d-a) = -\varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) , \quad i = 2..2N \\ \delta\varphi_{i_{c}}^{'}(d-a) &= -\delta\varphi_{i_{c}}^{'}(a-d) , \quad i = 2..2N \end{aligned}$$
(65)

$$\widetilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} = -\widetilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=-a}, \qquad i=2..N$$
(66)

تقارن انتقالى

$$\tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=a} = \tilde{\sigma}_{xz_d}^{(i)}|_{x=-a}, \qquad i = 2..N$$
(67)

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

شرایط مرزی طبیعی از جایگذاری شرایط مرزی ذاتی در رابطه (62) به دست میآیند. در شرایط مرزی طبیعی باید توجه کرد که توابع نامعلوم φ_{i_c} و φ_{i_c} در مرز نواحی حاوی و فاقد جدایی بینلایهای در x = a - d وابسته به یکدیگر هستند. با در اختیار داشتن کلیه شرایط مرزی و حل معادلات اویلر-لاگرانژ، توابع نامعلوم φ_{i_c} و φ_{i_d} و در پی آن میدان تنش اغتشاشی به دست میآید.

روابطی که پیش از این ارائه گردید، برای محاسبه میدان تنش در سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی ترک ماتریسی متقارن بیرونی بدون جدایی بینلایهای نیز کاربرد دارد. در این حالت طول جدایی بینلایهای (d = 0) در نظر گرفته میشود و تمامی سلول واحد تنها یک ناحیه فاقد جدایی بینلایهای را شامل میشود. تنها تنشهای اغتشاشی و توابع نامعلوم مربوط به ناحیه فاقد جدایی بینلایهای (با اندیس c) باقی میمانند.

1-3- هموژنسازی لایه ترکخورده جهت مدلسازی ترکها در بیش از یک جهت مدلسازی ترکها در بیش از یک جهت

در بخش قبل مشخص شد که میتوان ماتریس سفتی یک کامپوزیت لایهای متقارن متعامد حاوی ترکهای ماتریسی را به دست آورد. در این بخش قرار است که ماتریس سفتی لایه ترکخورده، در حالتی که فقط در یک لایه ترک وجود داشته باشد به دست آید. هدف این بخش آن است که با استفاده از روش هموژنسازی بتوان ترک در دو لایه را بررسی و آن را با نتایج بهدستآمده برای حالتهای ترکخوردگی متقارن و پادمتقارن مقایسه کرد تا دقت روش مهوژنسازی مورد ارزیابی قرار گیرد. منظور از هموژنسازی در این بخش این است که ضرایب ماتریسی سفتی لایه ترکخورده به نحوی تغییر داده شود که ماتریس سفتی کل چندلایه از ترکیب لایههای سالم بدون ترک و ماتریس مشخصات تغییریافته در چندلایه جایگزین شده است. برای به دست آوردن ماتریس سفتی لایه ترکخورده در کامپوزیت لایهای هموژن شده، رابطه ماتریس سفتی داخل صفحه کل چندلایه به دست آمده از تحلیل بخشهای گذشته با ماتریسهای سفتی هر لایه، به صورت زیر بیان میشود:

$$[A_c] = 2 \sum_{i=1}^{N} t_i [\overline{Q}_i]$$
(68)

در رابطه بالا N بیانگر نصف تعداد لایه ها، t_i ضخامت لایه iام، $[\overline{Q}_i]$ بیانگر ماتریس سفتی لایه iام در محورهای مختصات اصلی است. از آنجا که برای اعمال روش هموژنسازی بایستی فرض شود فقط در یک لایه ترک وجود دارد، شماره این لایه k فرض می شود. در این صورت ماتریس سفتی این لایه از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$\left[\overline{Q}_{k}\right] = \frac{1}{t_{k}} \left(\frac{1}{t_{k}} - 2\sum_{\substack{i=1\\i\neq k}}^{N} t_{i}\left[\overline{Q}_{i}\right]\right)$$
(69)

در این صورت برای تحلیلهای ترکخوردگی در دیگر لایهها کافی است مشخصات لایه ترکخورده قدیمی را از رابطه بالا جایگزین و روند نوشتن معادلات و به دست آوردن میدان تنش را برای حالت جدید ترک تکرار کرد. 2-3- نرخ رهایی انرژی کرنشی

یکی از معیارهای اصلی در طراحی چندلایههای کامپوزیتی، مطالعه و بررسی پیشبینی شروع و رشد ترکخوردگی است. معیار مبتنی بر روش مکانیک

شکست محدود بیان می *ک*ند زمانی شکست اتفاق می افتد که میزان نرخ انرژی آزادشده از مقدار بحرانی بیشتر باشد.

1-2-3- شروع ترک ماتریسی

شکل 8 نمودار نیرو-جابهجایی

رابطه (70) بیانگر بقای انرژی کل، حین فرایند ترمودینامیکی است.

$$\frac{\Delta W}{\Delta A} - \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\Delta K}{\Delta A} - \frac{\Delta q}{\Delta A} + \gamma \tag{70}$$

سمت چپ معادله بیانگر مجموع انرژیهای مورد نیاز برای سطح واحد ترک است که تحت عنوان نرخ رهاسازی انرژی *G* بیان میشود. سمت راست معادله، مجموع انرژیهایی است که در طول فرایند ایجاد ترک به شکلهای مختلف رهاسازی میشود. مجموع این انرژیها تحت عنوان نرخ بحرانی رهاسازی انرژی ₂ مشناخته میشود. محاسبه نرخ رهاسازی انرژی در فرایندهای غیرتدریجی نظیر شروع و رشد ترکهای ماتریسی، متأثر از شرایط بارگذاری حین فرایند شکل گیری آسیب است. ایجاد سطوح ترک ممکن است در شرایط بار-ثابت و جابهجایی-ثابت صورت گیرد. شکل 8 شرایط بارگذاری را نشان میدهد.



Fig. 8 Load-displacement curve

 $(E_{eff}^{damaged})$ خواص مکانیکی باقیمانده کامپوزیت حاوی آسیب همانند ($E_{eff}^{damaged})$ مستقل از شرایط بارگذاری بوده و تنها تابعی از وضعیت (نوع، چگالی و توزیع) آسیب است. به همین دلیل کامپوزیت آسیبدیده، فارغ از نوع بار-ثابت یا جابهجایی-ثابت بودن فرایند، دارای خواص مکانیکی یکسان خواهد بود. درصورتی که فرایند ایجاد آسیب در شرایط جابهجایی ثابت انجام شود، کار نیروهای خارجی ΔW برابر صفر خواهد بود و نرخ رهاسازی انرژی، تنها تغییرات انرژی کرنشی کامپوزیت، قبل و بعد از بروز آسیب را شامل می شود.

اگر کامپوزیت لایهای را تحت بارگذاری داخل صفحهای قرار دهیم، افزایش بار ممکن است منجر به ایجاد سطوح جدیدی از آسیب در چندلایه شود. محاسبه نرخ رهاسازی انرژی حین فرایند رشد ترکهای ماتریسی نیازمند شناخت وضعیت آسیب در دو حالت قبل و بعد از ایجاد سطح آسیب جدید است. چندلایه کامپوزیتی حاوی ترکهای ماتریسی میانی با چگالی ترک = ρ میددان تنش حاصل از تحلیل میکرومکانیکی سلول واحدی را نشان میدهد، که بیشینه تنش محوری σ_{xx} در لایه میانی در وسط سلول واحد در 0 x = 0 واقع میشود. به همین دلیل پیش بینی میشود درصورتی که بیشینه ترک محوری به حد مشخصی برسد ترک جدید در وسط سلول واحد ایجاد شود و چگالی ترک ماتریسی دو برابر گردد.

3-2-3- اشباع ترک ماتریسی و شروع جدایی بینلایهای

نرخ رهاسازی انرژی میتواند معیاری برای پیش بینی نوع آسیب غالب در چندلایه کامپوزیتی باشد. بر اساس معیار رشد آسیب هرگاه نرخ رهاسازی انرژی حین فرایند رشد آسیب با نرخ بحرانی رهاسازی انرژی برابر شود، آسیب رشد خواهد نمود. هرگاه نرخ رهاسازی انرژی حاصل از ایجاد جدایی بینلایه ای بیش از نرخ رهاسازی ترکهای ماتریسی باشد، رشد ترکهای ماتریسی آغاز میگردد.

نمودار نرخ رهاسازی انرژی برای رشد ترکهای ماتریسی و شروع جدایی بینلایهای در چگالی ترکهای مختلف در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود در بسیاری از لایهچینیها، ترک ماتریسی در چگالی کم، مود آسیب غالب در چندلایه کامپوزیتی است. افزایش بارگذاری، منجر به رشد ترکهای ماتریسی و افزایش چگالی ترک ماتریسی میشود و بهتدریج از نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک میکاهد و بر نرخ رهاسازی انرژی ناشی از شروع جدایی بینلایهای میافزاید. در یک چگالی ترک ماتریسی خاص، که بسته به نوع لایهچینی یا مشخصات مواد ممکن است متفاوت باشد، نرخ رهاسازی شروع جدایی بینلایهای از نرخ رهاسازی رشد ترک ماتریسی فراتر میرود. این نقطه بهعنوان چگالی اشباع ترکهای ماتریسی و نقطه شروع جدایی بینلایهای شناخته میشود.



Fig. 9 The energy release rate of matrix crack growth and initiation of delamination [21]

شکل 9 نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی و شروع جدایی بین لایهای [21]

بنابراین ذکر این نکته حائز اهمیت است آنچه تحت عنوان چگالی ترک ماتریسی اشباع با استفاده از این روش محاسبه می شود، مستقل از نوع بارگذاری بوده و تنها تابعی از هندسه لایه چینی و مشخصات مکانیکی مواد اولیه خواهد بود. به همین دلیل نقطه شروع جدایی بینلایهای و توقف رشد ترکهای ماتریسی تحت عنوان وضعیت آسیب ویژه (CDS) شناخته می شود. کافیست در هر چگالی ترک ماتریسی، نرخ رهاسازی انرژی رشد ترک ماتریسی و نرخ رهاسازی شروع جدایی بینلایهای استخراج شود.

4- نتايج و بحث

چندلایه کامپوزیتی مورد بررسی در این پژوهش به صورت متعامد 0 و 90 درجه است. چندلایه کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی تک محوره به میزان 100 MPa قرارگرفته است. خواص استفاده شده در جدول 1 آمده است. در ابتدا به آنالیز میدان تنش چندلایه، سپس به بررسی افت سفتی ناشی از ترک

ماتریسی و جدایی بینلایهای ناشی از آن و در ادامه به تحلیل دو مود آسیب بر مبنای انرژی و رقابت میان این دو مود آسیب پرداخته شده است.

جدول 1 خواص مكانيكى تكلايه كامپوزيتى

 Table 1 Mechanical properties of single layer composite

v_T	ν_A	G _T (MPa)	G _A (MPa)	Е _T (MPa)	Е _А (MPa)	ضخامت (mm)	مواد
0.42	0.3	4580	3400	13000	41700	0.203	شيشه-اپوكسي
0.5	0.3	2500	3500	6700	90000	0.3	كربن-اپوكسى
0.5	0.3	2400	4000	7200	128000	0.14	فايبريت ^۲
0.5	0.3	3600	5000	9700	130000	0.154	کربن هرکولس ^۳

1-4- اعتبارسنجی نتایج مدلسازی حاضر 1-14- مقایسه نتایج روش حاضر با مدل تغییرات هشین

در این بخش نتایج میدان تنش حاصل از روند تحلیلی حاضر با نتایج حاصل از روش حساب تغییرات هشین برای چندلایه کامپوزیتی متعامد از جنس شیشه-اپوکسی اعتبارسنجی شده است. برای این لایهچینی به دلیل وجود تقارن و همچنین عدم استفاده از روش تقسیم،بندی لایهها (1 = n)، فقط دو تابع نامعلوم داریم که یکی از این توابع نامعلوم از دیگری به دست میآید، لذا نیازی به شرایط مرزی طبیعی برای یافتن ثوابت نیست و شرایط مرزی برای حل کافی میاشد. میدان تنش چندلایه کامپوزیتی [0/9] در شرایطی که دو ترک مجاور در فاصله (2030 × 4 = 22) تحت بارگذاری محوری قرار دارد، برای محل حاضر و مدل هشین در شکلهای 10 تا 12 رسم شده است. شایان ذکر است که ترمهای تنش نسبت به تنش محوری لایه 90 درجه که در چندلایههای کامپوزیتی سالم (بدون ترک) که تحت همین بارگذاری قرار دارد، بیبعد شدهاند.

همانطور که مشاهده میشود، بین نمودارهای حاصل از این دو مدل انطباق بسیار مناسبی وجود دارد و این بیانکننده این است که مدل هشین، حالت ساده شده مدل حاضر است و به عبارتی میتوان گفت مدل هشین فقط یک حالت خاص از مدل حاضر میباشد.



Fig. 10 [0/90]_s glass-epoxy laminate under axial stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing ($2a = 4 \times 0.203$) در **10** تنش محوری σ_{xx} بین دو ترک در فاصله ($2a = 4 \times 0.203$) در لایهچینی $a_{xx} = (0/90]$ از جنس شیشه–اپوکسی

³ Hercules 3501-6/AS4

¹ Characteristic damage state (CDS)



Fig. 11 [0/90]_s glass-epoxy laminate under shear stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing ($2a = 4 \times 0.203$) شکل 11 تنش برشی σ_{xz} بین دو ترک در فاصله ($2a = 4 \times 0.203$) در لایهچینی σ_{xz} از جنس شیشه-اپوکسی



Fig. 12 $[0/90]_s$ glass-epoxy laminate under transverse stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing $(2a = 4 \times 0.203)$

شکل 12 تنش عرضی _{zz} بین دو ترک در فاصله (0.203 × 4 = 2α) در لایهچینی ه[0/90] از جنس شیشه⊣پوکسی

1--1- بررسی همگرایی میدان تنش با استفاده از روش تقسیمبندی لایهها فرض اساسی در این بخش استفاده از روش تقسیمبندی لایهها میباشد. در این روش میتوان هر لایه را به چند زیرلایه با خواص یکسان تقسیم کرده که در مجموع ضخامت همه زیرلایهها برابر لایه اولیه میباشند و برای هر زیرلایه توابع اغتشاشی متفاوتی در نظر گرفته میشود. با تعریف توابع اغتشاشی برای هر زیرلایه میتوان تغییرات ترمهای تنش را در راستای ضخامت مدلسازی کرد. میدان تنش چندلایه کامپوزیتی ه[0/9] مدل هشین که در غیاب روش تقسیمبندی لایهها در بخش قلب به دست آمد با نتایج روش تقسیمبندی لایهها بررسی و مقایسه میگردد. در روش تقسیمبندی لایهها، برای یافتن ثوابت در توابع اغتشاشی، به دلیل اینکه شرایط مرزی برای تعیین ثوابت کافی نیست، از شرایط مرزی طبیعی نیز استفاده میشود.

همانطور که در نمودار شکلهای 13 تا 15 ملاحظه میشود، تأثیر روش تقسیم بندی لایه ها بسیار بالاست و با تقسیم هر لایه به زیرلایه های بیشتر، افزایش در دقت نتایج حل بیشتر می شود که این موضوع در نمودار تنش عرضی هم مشهود است؛ زیرا نتایج تحلیلی حاصل از روش تقسیم بندی لایه ها نتیجه متناقضی نسبت به حالتی که از این روش استفاده نشده است، نشان می دهد که بیانگر این است که در بعضی مواقع در صورت عدم استفاده از این روش جهت

تنشهای غلطی به دست میآید. این امر اهمیت بسزای روش تقسیم بندی لایهها را نشان می دهد.



Fig. 13 $[0/90]_s$ glass-epoxy laminate under axial stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing ($2a = 4 \times 0.203$) considering the ply-refinement technique

شکل 13 تنش محوری σ_{xx} بین دو ترک در فاصله (0.203 × $a = 4 \times 0.203$) در لایهچینی [0/90] از جنس شیشه-اپوکسی با در نظر گرفتن روش تقسیم,بندی لایهها



Fig. 14 $[0/90]_s$ glass-epoxy laminate under shear stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing ($2a = 4 \times 0.203$) considering the ply-refinement technique

شکل 14 تنش برشی *σ_{xz}* بین دو ترک در فاصله (0.203 × 4 = 2α) در لایهچینی ₅[0/90] از جنس شیشه⊣یوکسی با در نظر گرفتن روش تقسیمبندی لایهها



Fig. 15 $[0/90]_s$ glass/epoxy laminate under transverse stress: distribution of stresses between two cracks with crack spacing $(2a = 4 \times 0.203)$ considering the ply-refinement technique $(2a = 4 \times 0.203)$ considering the ply-refinement technique ($a = 4 \times 0.203$) considering the ply-refinement technique σ_{zz} σ_{zz}

2-4- مقایسه میدان تنش حاصل از فرمولاسیون حاضر در کامپوزیتهای لایهای متعامد متقارن ترک خورده با نتایج حل عددی

با توجه به اینکه روش تغییرات حاضر تمامی معادلات تعادل، شرایط مرزی و پیوستگی و همچنین اصل مینیمم انرژی مکمل را ارضا می کند، نتایج به دست آمده از آن با نتایج المان محدود قابل مقایسه است. اگر در تحلیل روش تغییرات از روش اصلاح لایهها استفاده شود این نتایج بیشتر به یکدیگر نزدیک می شوند. در بخشهای زیر میدان تنش حاصل از مدل حاضر برای لایه چینی $_{2}[0/0/0/0]$ در لایههای مختلف با دو مقدار 1 = n و 3 = n در الگوهای متقارن و پادمتقارن تر کخورد گی و همین طور هنگامی فقط در یکی از لایههای 90 درجه تر کخورده باشد، با نتایج حاصل از مدل سازی FEM

4-2-1- مقایسه میدان تنش برای لایهچینی _ع[0/90/0/90] با الگوی ترکخوردگی متقارن

مقایسه میدان تنش محوری داخل صفحه x_x در لایه 90 درجه بیرونی از لایه چینی σ_{xx} افرم ترکخوردگی متقارن بین نتایج مدل حاضر با نتایج حاصل از مدلسازی عددی در شکل 16 نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که با افزایش مقدار تقسیم بندی لایه ها نتایج تحلیل به نتایج عددی همگرا می شود.



Fig. 16 $[0/90/0/90]_s$ glass-epoxy laminate under σ_{xx} axial stress in outer-ply 90: distribution of stresses between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique (2a = 2) constant technique

همینطور مقایسه نتایج میدان تنش محوری داخل صفحه σ_{xx} حاصل از مدل تغییرات و مدلسازی عددی در لایه صفر درجه درونی از لایه چینی $_{s}$ مدل انفران و مدلسازی عددی در ایه منور درجه درونی از ای داده شده $_{s}$ [0/90/0/90] با فرم ترکخوردگی متقارن در شکل 17 نشان داده شده است. این نمودار نیز نشان می دهد نتایج مدل سازی حاضر تطابق خوبی با نتایج عددی دارد و زمانی که مقدار تقسیم بندی لایه ها افزایش یابد این نتایج بیشتر به یکدیگر نزدیک می شوند.

2-2-4- مقایسه میدان تنش برای لایهچینی _ع[0/90/0/90] با الگوی ترکخوردگی پاد متقارن

مقایسه میدان تنش محوری داخل صفحه σ_{xx} در لایه 90 درجه درونی از لایه چینی $_{s}[0/90/0/90]$ با فرم ترکخوردگی پادمتقارن بین نتایج مدل حاضر با نتایج حاصل از مدلسازی عددی در شکل 18 نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که با افزایش مقدار تقسیم بندی لایه ها نتایج تحلیل به نتایج عددی همگرا می شود.

مقایسه میدان تنش محوری داخل صفحه σ_{xx} در لایه 90 درجه بیرونی از لایهچینی ₂[0/0/090] با فرم ترکخوردگی پادمتقارن بین نتایج مدل حاضر با نتایج حاصل از مدلسازی عددی در شکل 19 نشان داده شده است. این شکل نیز نشان میدهد نتایج مدلسازی حاضر تطابق خوبی با نتایج عددی دارد و زمانی که مقدار تقسیم بندی لایه ها افزایش یابد این نتایج بیشتر به یکدیگر نزدیک می شوند.



Fig. 17 [0/90/0/90]_s glass-epoxy laminate under σ_{xx} axial stress in outer-ply 0: distribution of stresses between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2 considering fEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering fEM and the ply-refinement technique 2a = 2 considering fEM and the ply-refinement technique fEM and the ply-re



Fig. 18 [0/90/0/90]_s glass-epoxy laminate under σ_{xx} axial stress in inner-ply 90: distribution of stresses between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique $\hat{\sigma}_{xx}$ or α_{xx} axial stress in $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in $\hat{\sigma}_{xx}$ between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in inner-ply 90: distribution of stresses between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique $\hat{\sigma}_{xx}$ axial stress in $\hat{$



Fig. 19 [0/90/0/90]_s glass-epoxy laminate under σ_{xx} axial stress in outer-ply 90: distribution of stresses between two cracks with crack spacing (2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2 considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2) considering FEM and the ply-refinement technique 2a = 2 considering FEM and

3-4- بررسی افت سفتی

1-3-4 بررسی همگرایی مدل حاضر با استفاده از روش تقسیم بندی لایه ها برای بررسی افت سفتی چندلایه های کامپوزیتی ناشی از ترک ماتریسی از فرمولاسیون روش حساب تغییرات استفاده می شود. نتایج محاسبات با نتایج حاصل از اجزا محدود مقایسه می گردد. همچنین از روش تقسیم بندی لایه ها جهت بهبود نتایج حل استفاده می شود.

شکل 20 نشاندهنده مقایسه میان نتایج حل تحلیلی و اجزا محدود در بارگذاری تک محوره کششی در چندلایه های کامپوزیتی متعامد شیشه-اپوکسی با لایه چینی ا[0/90] می باشد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، پیش بینی تحلیلی با روش حساب تغییرات هنگامی که از روش تقسیم بندی لایه ها استفاده شده است نتایج بهتری در مقایسه با تحلیل اجزا محدود می دهد.

شکل 21 نشاندهنده مقایسه میان نتایج تحلیلی با در نظر گرفتن روش تقسیم بندی لایه ها و نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود می باشد. همان طور که ملاحظه می شود، پیش بینی تحلیلی با روش حساب تغییرات هنگامی که از روش تقسیم بندی لایه ها استفاده شده حد پایین خواص مکانیکی کمتری را نشان می دهد و این بیان کننده این است که از همگرایی حل می توان اطمینان حاصل نمود. شایان ذکر است که با افزایش تعداد زیر لایه ها، میزان افت سفتی کمتر کاهش می یابد. این موضوع بیانگر این است که با افزایش زیر لایه ها مقدار افت سفتی به یک مقدار ثابتی همگرا می شود.



Fig. 20 Axial stiffness reduction versus crack density for glass-epoxy $[0/90_3]_s$ laminate considering FEM and the ply-refinement technique شكل 20 افت سفتى محورى بر حسب چگالى ترک در لايهچينى $[0/90_3]_s$ از جنس شيشه-ايوکسى با در نظر گرفتن نتايج حاصل از EM و روش تقسيم،ندى لايهها



Fig. 21 Axial stiffness reduction versus crack density for Hercules $[0/90_2]_s$ laminate considering FEM and the ply-refinement technique شکل 21 افت سفتی محوری بر حسب چگالی ترک در لایهچینی $[0/90_2]_s$ از جنس \hat{m} کل 12 افت سفتی محوری بر حسب چگالی ترک و روش تقسیم بندی لایهها

شکل 22 نشان دهنده کاهش افت سفتی محوری در لایهچینی [0/90m] از جنس کربن⊣پوکسی به ازای 1,2,3 = m است. همانطور که در شکل مشاهده میشود میزان کاهش افت سفتی در لایهچینی ₅[0/903] از

دیگر لایهچینیها بیشتر است و علت این است که با افزایش تعداد لایههای 90 درجه چندلایه کامپوزیتی، ضخامت ترکهای ماتریسی ایجادشده افزایش یافته و افت سفتی بیشتری را تجربه میکند.

شکل 23 نشاندهنده مقایسه میان نتایج حل تحلیلی و اجزا محدود در بارگذاری تکمحوره کششی در چندلایههای کامپوزیتی متعامد شیشه-اپوکسی با لایهچینی [00_90] میباشد. همانطور که در شکل نشان دادهشده است، پیشبینی تحلیلی با روش حساب تغییرات هنگامیکه از روش تقسیم بندی لایهها استفادهشده است نتایج بهتری در مقایسه با تحلیل اجزا محدود می دهد.



Fig. 22 Effect of the number of 90^o plies on stiffness reduction versus crack density for carbon-epoxy

شکل 22 نمایش تأثیر تعداد لایههای 90 درجه بر افت سفتی به صورت تابعی از چگالی ترک ماتریسی در لایهچینی از جنس کربن-اپوکسی



Fig. 23 Axial stiffness reduction versus crack density for Hercules $[90_2/0]_s$ laminate considering FEM and the ply-refinement technique ($90_2/0]_s$ laminate considering FEM and the ply-refinement technique mc 23 لخ الفت سفتی محوری برحسب چگالی ترک در لایه چینی $[90_2/0]_s$ از جنس 23 کربن-هر کولس با در نظر گرفتن نتایج حاصل از FEM و روش تقسیم, بندی لایه ها



Fig. 24 Axial stiffness reduction versus crack density for carbon/epoxy $[90_2/0_2]_s$ laminate with considering FEM and ply-refinement technique $\mathbf{m} \ge 1$ ($90_2/0_2]_s$ افت سفتی محوری برحسب چگالی ترک در لایهچینی $[90_2/0_2]_s$ از جنس کربن-اپوکسی با در نظر گرفتن نتایج حاصل از EM و روش تقسیم,بندی لایهها

1907

در شکل 24 میتوان مشاهده نمود که نتایج همگرا شده با استفاده از روش تقسیم،بندی لایهها همخوانی قابل قبولی با نتایج حاصل از اجزا محدود دارد. لازم است به این نکته اشاره کرد که نتایج حاصل از تحلیل میکرومکانیکی آسیب بر اساس روش حساب تغییرات در سرعت همگرایی 3 = n نتایج خوبی را نشان میدهد.

3-3-4- مقایسه افت سفتی حاصل از روش هموژن سازی با افت سفتی حاصل از تحلیل همزمان ترکها

حال به بررسی روش هموژن سازی در کامپوزیتهای لایهای که دو لایه 90 درجه دارند و تحت بارگذاری تکمحوره قرار دارند، پرداخته میشود. مراحل کار بدین صورت است که در حالت اول فرض میشود لایه 90 درجه درونی تر با یک چگالی ترک مشخص دچار خرابی شده و لایه دیگر سالم تر کنخورده است، در این حالت افت خواص کامپوزیت لایه ای محاسبه میشود و سپس این افت خواص به دست آمده برای کل کامپوزیت لایه ای ناشی از افت خواص ناشی از لایه ترک خورده فرض میشود. پس از آن لایه را با لایه سالمی که دچار افت خواص شده جایگزین می کنیم و سپس لایه 90 درجه بیرونی تر با همان چگالی ترک فرض شده در مرحله قبل، در نظر گرفته میشود و نتایج افت سفتی پس میشود. در حالت دوم ابتدا لایه 90 درجه بیرونی تر بهعنوان لایه ترک خورده از این مرحله بهعنوان نتایج نهایی افت سفتی کامپوزیت لایه ای محسوب میشود. در حالت دوم ابتدا لایه 90 درجه بیرونی تر بهعنوان لایه ترک خورده اول در نظر گرفته میشود و سپس همین مراحل تکرار میشود. نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر و نسبت به حالتی که ترکخوردگی در هر دو لایه بصورت همزمان و با الگوی ترکخوردگی متقارن تحلیل شده است، مقایسه خواهد شد.

نتایج مربوط به افت سفتی محوری در لایهچینی 3[202/0/90] به دست آمده از روش هموژنسازی در شکل 25 نشان داده شده است. در این شکل این نتایج با نتایج حاصل از تحلیل همزمان ترکها در حالتی که الگوی ترکخوردگی متقارن است، مقایسه شده است.



Fig. 25 Axial stiffness reduction versus crack density for glass-epoxy $[90_2/0/90_2]_S$ laminate considering the homogenization method and the simultaneous analysis method

شکل 25 افت سفتی محوری بر حسب چگالی ترک در لایهچینی ₃[90₂/0/90₂] از جنس شیشه⊣پوکسی با در نظر گرفتن روش هموژن سازی و تحلیل همزمان ترکها

نتایج مربوط به افت سفتی محوری در لایهچینی ₂[290₄/0₂] به دست آمده از روش هموژنسازی در شکل 26 نشان داده شده است. در این شکل این نتایج با نتایج حاصل از تحلیل همزمان ترکها در حالتی که الگوی ترکخوردگی متقارن باشد، مقایسه شده است.

در لايهچينی $_{s}[90_{2}/0_{4}/90_{2}]$ ضخامت لايه بين دو لايه ترکخورده نسبت به لايهچينی $_{s}[90_{2}/0_{4}/90_{2}]$ افزايش يافته است و اختلاف سفتی به

دست آمده با استفاده از روش هموژنسازی نسبت تحلیل همزمان ترکها با الگوی متقارن کاهش یافته، این مسئله از قبل قابل پیشبینی بود زیرا لایههای ترکخورده نزدیک به هم، اثرات متقابل ترکها را افزایش میدهد.



Fig. 26 Axial stiffness reduction versus crack density for glass/epoxy $[90_2/0_4/90_2]_S$ laminate considering the homogenization method and the simultaneous analysis method

شکل 26 افت سفتی محوری بر حسب چگالی ترک در لایهچینی _S[290₄/90_90] از جنس شیشه⊣پوکسی با در نظر گرفتن روش هموژن سازی و تحلیل همزمان ترکها

4-4- بررسی الگوی توزیع ترک ماتریسی

الگوی توزیع ترک ماتریسی از طریق نرخ رهاسازی انرژی برای شروع ترک ماتریسی صورت میگیرد. با وجود اینکه چگالی ترک در هر مرحله نسبت به مرحله قبلی بهاندازه یک ترک ماتریسی افزایش مییابد. بنابراین با افزایش چگالی ترک در هر مرحله میزان آزاد شدن انرژی آن مرحله نسبت به مرحله قبل کمتر است. این روال تا جایی ادامه پیدا میکند که دیگر با افزایش چگالی ترک انرژی آزاد نمی شود به عبارتی چگالی ترک اشباع شده است.

شکل 27 نشاندهنده تغییرات نرخ رهایی انرژی برحسب چگالی ترک ماتریسی چندلایههای $[0/90_n]_s$ میباشد. همانطور که ملاحظه میشود با افزایش تعداد لایههای 90 درجه و ثابت ماندن لایههای صفر درجه نرخ رهایی انرژی بیشتری داشته و به عبارتی میتوان گفت شیب آن بیشتر بوده و زودتر به صفر نزدیک می شود.



Fig. 27 Energy release rate due to matrix cracking versus crack density for Fibrite in different layups with symmetric cracked pattern شکل 27 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی بر حسب چگالی ترک در لایهچینیهای متفاوت با الگوی ترک متقارن از جنس فایبریت

شکل 28 نمایش چگونگی افزایش چگالی ترک ماتریسی بهاندازه یک ترک ماتریسی را نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود با افزایش تعداد لایههای 90 درجه و ثابت ماندن لایههای صفر درجه میزان نرخ رهایی انرژی افزایش یافته است. این روال تا جایی ادامه پیدا میکند که ترک اشباع میشود. و به عبارتی با افزایش چگالی ترک، نرخ رهایی انرژی آزاد نمیشود.



Fig. 28 Energy release rate due to matrix cracking versus crack density for Fibrite in different layups with staggered cracked pattern شکل 28 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی برحسب چگالی ترک در لایهچینیهای متفاوت با الگوی ترک پادمتقارن از جنس فایبریت



Fig. 29 Energy release rate due to matrix cracking and induced delamination versus crack density for Fibrite $[0/90]_s$ and $[0/90_3]_s$ composite laminates

شکل 29 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای بر حسب چگالی ترک در لایهچینیهای ₂[0/00] و ₃[0/90] از جنس فایبریت

شکل 29 بیانگر این است که در مقادیر کمچگالی ترک ماتریسی، مود آسیب غالب در چندلایههای کامپوزیتی، ترک ماتریسی می باشد و در یک مقدار بحرانی از چگالی ترک ماتریسی تحت عنوان وضعیت آسیب ویژه، نرخ رهایی انرژی ناشی از جدایی بینلایهای بیشتر شده و جدایی بینلایهای از لبههای ترک ماتریسی شروع می شود. با گسترش جدایی بینلایهای، ترکهای ماتریسی متوقف شده و فرایند آسیب با جدایی بینلایهای ادامه می یابد. این شکل

نشاندهنده بررسی اثر ضخامت لایههای حاوی ترک ماتریسی در لایه 90 درجه بر وضعیت آسیب ویژه در لایهچینیهای [9/00] و [8/00] میباشد. همانطور که در شکل ملاحظه میشود با افزایش تعداد لایههای 90 درجه با فرض ثابت ماندن لایه صفر درجه، نرخ رهایی انرژی ناشی از ترک ماتریسی کاهش بیشتری داشته و با شیب بیشتری انجام گرفته است. به عبارت دیگر، افزایش ضخامت لایه حاوی ترک ماتریسی، چگالی اشباع ترکهای ماتریسی را کاهش میدهد و همچنین گویای این است که میزان نرخ رهایی انرژی ناشی از جدایی بینلایهای در این حالت با سرعت بیشتری رخ میدهد. به همین دلیل لایهچینی 2[09/0] چگالی ترک ماتریسی کمتری را نسبت به 2[09/0]

شکل 30 نشاندهنده بررسی اثر ضخامت لایه فاقد آسیب (لایه سالم) بر وضعیت آسیب ویژه در لایهچینیهای _ء[0/90] و _ء[02/90] میباشد. همان طور که ملاحظه میشود با تغییر ضخامت لایههای صفر درجه در چگالی اشباع ترک ماتریسی تغییر زیادی مشاهده نمیشود. نمودار نرخ رهایی انرژی شکل 31 رشد ترک ماتریسی و جدایی بین لایه ای در لایه چینیهای _ء[0/₂/9] و _ء[0/09] را نشان داده است.



Fig. 30 Energy release rate due to matrix cracking and induced delamination for versus crack density Fibrite $[0/90]_s$ and $[0_2/90]_s$ composite laminates

شکل 30 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای بر حسب چگالی ترک در لایهچینیهای ₂[0/00] و ₂[09/0] از جنس فایبریت

شکل 31 بیانگر این است که در مقادیر کمچگالی ترک ماتریسی، مود آسیب غالب در چندلایههای کامپوزیتی، ترک ماتریسی میباشد و در یک مقدار بحرانی از چگالی ترک ماتریسی تحت عنوان وضعیت آسیب ویژه، نرخ رهایی انرژی ناشی از جدایی بینلایهای بیشتر شده و جدایی بینلایهای از لبههای ترک ماتریسی شروع میشود. با گسترش جدایی بینلایهای، ترکهای ماتریسی متوقف شده و فرایند آسیب با جدایی بینلایهای ادامه مییابد. این شکل نشاندهنده بررسی اثر ضخامت لایههای حاوی ترک ماتریسی در لایه 90 درجه بر وضعیت آسیب ویژه در لایهچینیهای $_{s}[0/_{2}0]$ و $_{s}[0/90]$ میباشد. فرض ثابت ماندن لایه صفر درجه، نرخ رهایی انرژی ناشی از ترک ماتریسی افزایش ضخامت لایه حور درجه، نرخ رهایی انرژی ناشی از ترک ماتریسی افزایش ضخامت لایه حاوی ترک ماتریسی، چگالی اشباع ترکهای ماتریسی را کاهش میدهد و همچنین گویای این است که میزان نرخ رهایی انرژی ناشی از جدایی بینلایهای در این حالت با سرعت بیشتری رخ می دهد.

شکل 32 نشاندهنده بررسی اثر ضخامت لایه فاقد آسیب (لایه سالم) بر وضعیت آسیب ویژه در لایهچینیهای [90/02] و [90/0] میباشد. همان طور که ملاحظه میشود با تغییر ضخامت لایههای صفر درجه در چگالی اشباع ترک ماتریسی تغییر زیادی مشاهده نمیشود. ترک خوردگی ماتریسی و اشباع آن تأثیرگذار باشد. همچنین نتایج حاصله نشان داد استفاده از روش مدلسازی همزمان ترکهای ماتریسی در چند لایه ترکخورده میتواند دقت نتایج را افزایش داده و منجر به پیشبینی افت خواص مکانیکی و شروع ترکخوردگی ماتریسی متفاوتی گردد. 6- مراجع

- Farrokhabadi, A., Naghdinasab, M., "Micromechanical Study of Fibre/Matrix Debonding and Matrix Cracking Using Cohesive Zone Model and Extended Finite Element Method" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 21-30, 2016.
- [2] Delbariani-Nejad, A., Farrokhabadi, A., Fotouhi, M., "Reliability Analysis of the Delamination Onset and Growth Due To the Matrix Cracking in General Composite Laminates" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1397-1410, 2021.
- [3] Nairn, J. A., "The Strain Energy Release Rate of Composite Microcracking: A Variational Approach" Journal of Composite Materials, Vol. 23, No. 11, pp. 1106-1129, 1989.
- [4] Mohammadi, B., Asl Kamkar, S., Farrokhabadi, A., "Matrix Cracking and Induced Delamination in Symmetrically Laminated Composites Subjected to Static Loading by Using Multi Scale Damage Mechanics" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 9-24, 2017.
- [5] Azadi, M., Raeisi, N., Moosavian, S. A., Shakouri, M., "Detection of Different Defects in Carbon Fiber Reinforced Polymer Matrix Laminated Composite Under Tension by Variation Analysis" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 373-384, 2019.
- [6] Isometsa, J., Lahtinen, H., "Criteria for Matrix Failure in Continuous FRP-Composites A Literature Study. Part I: Matrix Cracking" Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 29, No. 1, pp. 3-28, 1996.
- [7] Hashin, Z., "Analysis of Cracked Laminates: A Variational Approach" Mechanics of Materials, Vol. 4, No. 2, pp. 121-136, 1985.
- [8] Lacaze, S., Anquez, L., "Modelling of Transverse Crack Growth and Saturation in Cross-Ply Laminates" Journal of Materials Science, Vol. 27, No. 22, pp. 5982-5988, 1992.
- [9] Hahn, H., Tsai, S., "On the Behavior of Composite Laminates After Initial Failures" Journal of Composite Materials, Vol. 8, No. 3, pp. 288-305, 1974.
- [10] Rahmani, M., Farrokhabadi, A., "Evaluation the Energy Release Rate of Induced Delamination Due to Matrix Cracking in Symmetric Composite Laminates" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 53-68, 2019.
- [11] Wang, L., Yang, Q., "3D Geometrically Nonlinear Augmented Finite Element Method for Arbitrary Cracking in Composite Laminates" Computers & Structures, Vol. 239, p. 106327, 2020.
- [12] Jalalvand, M., "Modeling the Effects of Delamination Induced by Matrix Cracking using Multiscale Damage Mechanics" PhD thesis, Amirkabir University of Technology, Iran, 2013.
- [13] Crossman, F., Wang, A., "The Dependence of Transverse Cracking and Delamination on Ply Thickness in Graphite/Epoxy Laminates" In Damage in Composite Materials: Basic Mechanisms, Accumulation, Tolerance, and Characterization: ASTM International, 1982.
- [14] Abdussalam, S. R., "Damage and Fracture Mechanics of Composite Materials" PhD thesis, University of Manitoba, Canada, 1999.
- [15] Hashin, Z., "Finite Thermoelastic Fracture Criterion with Application to Laminate Cracking Analysis" Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 44, No. 7, pp. 1129-1145, 1996.
- [16] Cox, H., "The Elasticity and Strength of Paper and Other Fibrous Materials" British Journal of Applied Physics, Vol. 3, No. 3, p. 72, 1952.
- [17] Nairn, J. A., "Some New Variational Mechanics Results on Composite Microcracking," In Proceeding 10th International Conference on Composite Materials (ICCM-10), 1995, Vol. I, pp. 423-430.



Fig. 31 Energy release rate due to matrix cracking and induced delamination versus crack density for Fibrite $[90_2/0]_s$ and $[90/0]_s$ composite laminates

شکل 31 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای برحسب چگالی ترک در لایهچینیهای ₈[00/09] و 8[0/09] از جنس فایبریت



Fig. 32 Energy release rate due to matrix cracking and induced delamination versus crack density for Fibrite $[90/0_2]_s$ and $[90/0]_s$ composite laminates

شکل 32 نرخ رهایی انرژی برای ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای برحسب چگالی ترک در لایهچینیهای ₂[9/00] و ₂[0/09] از جنس فایبریت

5- نتيجەگىرى

در این مقاله به بررسی و تحلیل وضعیت آسیب چندلایههای کامپوزیتی متعامد متقارن با لایهچینی تحت بارگذاری استاتیکی پرداخته شد. دو نوع از متداول ترین مودهای آسیب در چندلایههای کامپوزیتی ترک ماتریسی و جدایی بینلایهای ناشی از ترکهای ماتریسی مدنظر قرار گرفت. با استفاده از روش حساب تغییرات در مقیاس سلول واحد به محاسبه میدان تنش، افت سفتی، نرخ رهایی انرژی در چندلایههای کامپوزیتی متعامد متقارن با الگوهای ترک متقارن و پادمتقارن پرداخته شد. همچنین در فرمولاسیون ارائه شده از روش تقسیم بندی لایه ها استفاده شد. با استفاده از روش میکرومکانیکی بر اساس حساب تغییرات، میدان تنش برای یک سلول واحد چندلایه کامپوزیتی حاوی آسیب به دست آمد. همچنین استفاده از روش تقسیم بندی لایه ها، نتایج را تا حد زیادی بهبود داد و استفاده از این روش در میدان تنش و افت سفتی، در برخی موارد نتایج را تغییر میداد. مشاهده شد که با تقسیم نمودن لایهها به زیرلایه بیشتر، همواره به یک مقدار مشخص همگرا خواهد شد. تحلیلها نشان میدهد که در تقسیمبندی لایهها به زیرلایه در n = 3 نتایج از دقت خوبی برخوردارند. با افزایش تعداد زیرلایهها در n>3 تفاوت چشمگیری در نتایج حاصل نمی گردد. نتایج حاصله حاکی از آن است که با افزایش تعداد لایههای 90 درجه شروع ترک خوردگی ماتریسی در بارهای کمتری خواهد بود. همچنین افزایش تعداد لایههای 90 درجه باعث افزایش افت سفتی چندلایه خواهد شد. در نظر گرفتن الگوی متقارن و پادمتقارن می تواند در نتایج شروع

- [18] Talreja, R., Singh, C. V., "Damage and Failure of Composite Materials". Cambridge University Press, 2012.
- [19] McCartney, L., "Model to Predict Effects of Triaxial Loading on Ply Cracking in General Symmetric Laminates" Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 12-13, pp. 2255-2279, 2000.
- [20] Nairn, J. A., "Matrix Microcracking in Composites" Polymer Matrix Composites, Vol. 2, pp. 403-432, 2000.
- [21] Nairn, J., Hu, S., "The Initiation and Growth of Delaminations Induced by Matrix Microcracks in Laminated Composites" International Journal of Fracture, Vol. 57, No. 1, pp. 1-24, 1992.
- [22] Hajikazemi, M., Sadr, M. H., "A Variational Model for Stress Analysis in Cracked Laminates With Arbitrary Symmetric Lay-Up Under General In-Plane Loading" International Journal of Solids and Structures, Vol. 51, No. 2, pp. 516-529, 2014.
- [23] Mohammadi, B., Pakdel, H., "Experimental and Variational-Based Analytical Investigation of Multiple Cracked Angle-Ply Laminates" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 190, pp. 198-212, 2018.

نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تجربی ضربه شارپی در جذب انرژی سازههای ساندویچی هیبریدی و غیرهیبریدی تقویت شده با نانوالیاف کربن

رضوان حسینی¹، مهدی یارمحمد توسکی^{*2}، احمدرضا خورشیدوند³، سیدمهدی خرسندیجو²

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

ت يوان، صندوق بستي m varmohammad@azad.ac.ir،11365-4435

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
× در این مقاله هدف شناسایی مکانیزمهای آسیب و میزان جذب انرژی کامپوزیتهای ساندویچی تحت آزمون ضربه شارپی است. نمونهها از	دريافت: 1401/05/09
هستهی فوم PVC و مجموعهای از دو پوستهغیرهیبریدی متشکل از اینگرا و کربن و یک پوسته هیبریدی اینگرا/کربن ساخته شدهاند.	۔ پذیرش: 1401/08/02
تمامی پوستههای کامپوزیتی متشکل از 4 لایه هستند که با رزین اپوکسی اصلاح شده توسط نانوالیافکربن تقویت شدهاند و در بالا و پایین	كليدواژگان
فوم PVC قرار گرفته اند. نانوالیافکربن با نسبتهای وزنی از 0 تا 0.5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شدند. نمونهها بر اساس استاندارد	آزمون ضربه شارپی،
ASTM D256 تهیه شدند و تحت بارگذاری قرار گرفتند. پس از آزمون ضربه شارپی، از نمونهها برای ارزیابی سطح مکانیزمهای آسیب به	كامپوزيت ساندويچى،
وجود آمده عکسبرداری شد. نتایج نشان داد که نمونههای تقویت شده با نانوالیافکربن جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونههای بدون	الياف مصنوعي اينگرا،
نانوالیافکربن دارند. در این میان، افزایش جذب انرژی در کامپوزیتهای ساندویچی اینگرا با افزودن درصد نانوالیافکربن نسبت به دیگر	نانوالياف كربن
نمونهها قابل ملاحظه است. به طوریکه نمونهی اینگرا با 0.5 درصد نانوالیافکربن بالاترین جذب انرژی را دارد. این قضیه لزوما برای نمونههای	
دیگر صادق نبود و تغییر درصد نانو الیاف کربن نتیجه قابل توجهی بر نمونههای کربنی و هیبریدی نداشت. در مقایسهی آسیبهای خرابی	
مشاهده شده، جدایش بینلایهای، برای نمونه هیبریدی شدیدتر بود و این نشان از این دارد که الیاف اینگرا و کربن ترکیب مناسبی برای	
بارگذاری ضربه نمیباشد.	

Experimental investigation of Charpy impact in energy absorption of hybrid and non-hybrid sandwich structures reinforced with carbon nanofiber

Rezvan Hosseini¹, Mahdi Yarmohammad Tooski^{1*}, Ahmad Reza khorshidvand¹, Seyed Mahdi khorsandijou¹

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University South Tehran, Tehran, Iran. * P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords	Abstract	
Charpy impact test, Sandwich composite, Innegra synthetic fiber, Carbon nanofiber	This paper aims to identify damage mech the Charpy impact test. Each of the samp consisting of Innegra, carbon, and hybrid modified epoxy resin by carbon nanofibe added to the epoxy resin with a weight in ASTM D256 standards and then loaded. the induced damage severity. The results than the virgin ones. The increase in ene in comparison to the other samples where energy absorption. This was not same considerably. Comparing the induced da samples, showing that Innegra and carbo	anism and the amount of energy absorption of sandwich composites under obles are made of a core with PVC foam and faces with different materials d Innegra/carbon. All the faces are comprised of 4 layers reinforced with r (CNF) which are located on the top and the bottom of the core. CNFs are atio varying from 0 to 0.5 percent. The samples were prepared based on After the Charpy impact test, the samples were photographed to evaluate showed all samples reinforced with CNF have higher energy absorption rgy absorption of CNF added Innegra sandwich composites is significant the Innegra sandwich composite with 0.5 percent CNF shows the highest for the other samples and CNF adding didn't affect energy absorption mage mechanism showed that delamination was intensive for the hybrid n are not an appropriate combination to stand impact loading
، کشتیرانی و تجهیزات ورزشی	طيف وسيعي از صنايع مانند صنايع خودروسازي	 1- مقدمه
با الیاف همراه با سایر اشکال	دارند. اکثر کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده	امروزه کامپوزیتهای ساندویچی تقویت شده با الیاف به دلیل نسبت استحکام

به وزن بالا که در مقایسه با مواد رایج مانند فلزات دارند، کاربرد گستردهای در 🦳 مکانیسمهای جذب انرژی مانند شکستن الیاف، ترکخوردگی ماتریس، جدا

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید: بیدسوسی منابع مستند بیدسیمان کو موننده بیدانده میشوسی

Hosseini, R., Yarmohammad Tooski, M., Khorshidvand, A. R., Khorsandjou, S. M., "Experimental investigation of Charpy impact in energy absorption of hybrid and non-hybrid sandwich structures reinforced with carbon nanofiber," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1912-1920, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.555294.1790

شدن لایه ها نقش مهمی در پیشروی شکست و قابلیت جذب انرژی سازههای کامپوزیت ایفا میکنند. ضربه یکی از شایعترین بارگذاریها برای سازههای کامپوزیت است. بنابراین بررسی رفتار سازههای کامپوزیت در اثر ضربه لازم مى باشد. عملكرد ضعيف مقاومت به ضربه مواد كامپوزيتى در مقايسه با فلزات، یکی از مشکلات بزرگ در کاربرد آنها است. به منظور بهبود عملکرد ضربهای مواد كامپوزیتهای تقویت شده با الیاف یکسری پیشنهادهای اساسی وجود دارد. تحقیقات نشان دادهاند یکی از عوامل بهبود عملکرد ضربه و افزایش استحکام، بهبود چقرمگی در مواد کامپوزیتی میباشد. افزایش چقرمگی در مواد کامپوزیتها به عوامل مختلفی بستگی دارند. یکی از عوامل بهبوددهنده چقرمگی کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف ترموپلاستیکها با مدول بالا گزارش شدهاند [1]. پلی پروپیلن مدول بالا به نام تجاری اینگرا یک ترموپلاستیک میباشد که به دلیل تعادل استحکام، انعطاف پذیری و مقاومت شیمیایی شناخته شده است. الیاف اینگرا دارای کشیدگی بالاتری قبل از شکست دارند، بنابراین شکل پذیری و دوام بیشتری را فراهم می کند. اگرچه به اندازه الیاف کربن سفت نیست با این حال، استحکام بالای آن، آن را به گزینهای جذاب برای بهبود عملکرد ضربه تبدیل میکند. پلی پروپیلن ها هنگامی که با رزین اپوکسی پیوند میزنند، زنجیرههای مولکولی بلندی را تشکیل میدهند، که منجر به افزایش چقرمگی با ممانعت از انتشار آسیب می شود [2, 3]. یکی از محدودیتهای ترموپلاستیکها ، نیاز به یک سازگاری شیمیایی و فیزیکی خوب بین این مواد و رزین است. پرکنندههای معدنی که سازگاری خوبی با مواد ترموپلاستیکها دارند، خواص مکانیکی به ویژه چقرمگی شکست پلی پروپیلن را بهبود می بخشد، اما منجر به افزایش وزن آن ها می شود و تجزیه و تحلیل مواد پلیمری را دشوار می کند [4]. یک روش کارآمد برای کاهش این محدودیتها استفاده از پرکنندههایی مانند ذرات میکرو و نانو است که خواص مكانيكي به ويژه چقرمگي را بهبود ميبخشد [5-10]. چندين مطالعه نشان دادهاند که افزودن مواد نانو کربن (MWCNT · SWCNT ، گرافن و غیره...) به مواد کامپوزیت منجر به بهبود خواص مکانیکی می شود. علاوه بر این استفاده از این روش مقرون به صرفه نیز میباشد [14-11]. نانوالیاف کربن تولید شده در بخار، به دلیل استحکام کششی و مدول بالا، توجه زیادی را در جهت افزایش رفتار ضربه به دلیل کاربردهای بالقوه خود در تقویت پلیمر را به خود جلب کردهاند. آنها در حضور یک کاتالیزور از تجزیه در اثر حرارت هیدروکربنها یا مونوکسیدکربن در حالت گازی سنتز می شوند [15, 16]. شکریه و همکاران خواص مكانيكى نانوكامپوزيتهاى تقويت شده با الياف شيشه تحت تأثير نانولولههای کربنی مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که با افزودن 5 درصد وزنى نانولوله كربن خواص مكانيكي افزايش مىيابد. علاوه بر اين مقاومت برشي و کششی نانو کامپوزیتها به ترتیب 34 و 26 درصد در مقایسه با کامپوزیتهای بدون نانو افزایش یافته است [17]. کامار و همکاران تأثیر افزودن نانوگرافن بر کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. آنها گزارش کردند كه استحكام كششى با افزودن 25.0 درصد وزنى نانو گرافن به ميزان 29 درصد و چقرمگی به میزان 25 درصد افزایش مییابد [18]. آشنا قاسمی و همکاران کامپوزیتهای تقویت شده با لاستیک XNBR را تحت اثر نانو صفحات گرافن پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با افزودن 75 درصد وزنی نانوصفحات گرافن استحكام ضربه ميزان 23 درصد افزايش يافته است. علاوه بر اين مدول كششى به میزان 20 درصد در حضور 1.5 درصد وزنی نانوصفحات گرافن افزایش داشته است [19]. ترموپلاستيكھا، مانند پلىپروپيلن، پلىكربنات، نايلون و

الاستومرهای ترموپلاستیک با نانوکربن تقویت شدهاند [12, 20, 21]. بسیاری از گزارشها نشان میدهد که کامپوزیتهای تقویت شده با نانوالیاف کربن ممکن است آنها را ضعیفتر یا اندکی قویتر در مقایسه با کامپوزیتهای بدون نانو کند، اما همچنان منجر به بهبود قابل توجهی در چقرمگی شکست میشود [22]. رایجترین توضیح میتواند این باشد که نانوالیافها به طور تصادفی در مواد کامپوزیت توزیع شدهاند. تحقیقات کمی در زمینه موثر واقع شدن نانوذرات در کامپوزیتهای ساندویچی انجام شده است. مطالعات قابل توجهی در زمینه جاذب های انرژی انجام شده است [23-23]. تقی پور و همکاران جذب انرژی و جذب انرژی ویژه تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پر شده از فوم را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند جاذبهای ساندویچی با هسته مشبک می توانند تا 74.6 درصد انرژی را جذب کنند و افزایش 5.66 درصدی ظرفیت جذب انرژی ویژه برای تیرهای ساندویچی مشبک با انتخاب جهت مناسب مشاهده شد [27]. آويال و همكاران به طور تجربى پاسخ به آزمون ضربه سرعت پایین کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف شیشه مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش نانورس تا 5 درصد وزنی موجب افزایش جذب انرژی می شود و در مواردی که نیاز به جذب انرژی کارآمد داریم استفاده مىشوند [28]. بيدى و همكاران قابليت جذب انرژى بر ساندويچ پانلها با رویههای پلیپروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه و فوم پلییورتان تقویت شده با نانورس پرداختند. آنها گزارش کردند که افزودن نانورس در هسته فوم پلی یورتان باعث بهبود جذب انرژی میباشد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که ساندویچ پانلها با رویه پلیپروپیلن 66 تا 96 درصد بهبود در جذب انرژی داشتهاند [29].

در کلیه پژوهشهای پیشین، محققان به بررسی و مطالعه کامپوزیتهای تقويت شده با الياف كربن، شيشه و كولار تحت تأثير نانومواد از جمله نانولولههای کربنی پرداختهاند. لذا تحقیقات کمی بر تأثیر نانوالیاف کربن بر كامپوزيتهاى تقويت شده با الياف مصنوعى انجام شده است. با توجه به نياز صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی و اهمیت نانوکامپوزیتهای ساندویچی تقویت شده با الیاف مصنوعی، استفاده از الیاف مصنوعی اینگرا در راستای جذب انرژی، در این مقاله به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به دنبال بهبود چقرمگی و بررسی قابلیتهای جذب انرژی کامپوزیتهای ساندویچی، نانو الیاف کربن با نسبتهای مختلف از 0 تا 0.5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اعمال می شود. علاوه بر این، رفتار جذب انرژی کامپوزیت های ساندویچی غیرهیبریدی کربن و هیبریدی که از ترکیب الیاف اینگرا با الیاف كربن از طريق روش هيبريداسيون ساخته شدهاند به صورت تجربي مورد مطالعه قرار گرفتند. در ادامه به منظور مقایسه نمونهها به محاسبه جذب انرژی ویژه کامپوزیتهای ساندویچی پرداخته و نتایج با یکدیگر مقایسه میشوند. در پایان مکانیسم شکست نمونهها بر اساس تصاویر گرفته شده با بررسی چشمی توصیف شدەاند.

2- مواد و روش ساخت 1-2- مواد

مواد مورد استفاده جهت ساخت كامپوزیتهای ساندویچی شامل الیاف كربن،

ر از اینگرا و فوم PVC ^۲ است که مشخصات مکانیکی آنها در جدول 1 آورده شده است.

¹ Innegra, www.innegratech.com ² Polyvinyl chloride(PVC)

جدول1 خواص مکانیکی مواد

Table 1 Mechanical properties of materials					
فوم PVC	الياف كربن	الياف اينگرا	انواع مواد		
95	230000	667	مدول کششی (MPa)		
2.5	3800-4000	13716	استحكام كششى(MPa)		
0.08	1.78 ± 0.01	0.84	چگالی(g/cm ³)		

نانوالیاف کربن که به روش رسوب بخار شیمیایی سنتز شد با قطر خارجی 60-160 نانومتر، طول 500-50 میکرومتر و چگالی 0.031 (g/cm³)، به عنوان تقویت کننده ی رزین اپوکسی استفاده شده است و با چهار درصد وزنی مختلف (0.0, 0.1, 0.3, 0.5) در رزین اپوکسی گنجانده شد. رزین اپوکسی با نام تجاری EPL1012 (ویسکوزیته بین 1000-000 میلی پاسکال در دمای 25 درجه سانتی گراد) توسط هاردنر EPH112 (ویسکوزیته 30 میلی پاسکال در دمای 25 درجه پارچه کربن با طرح بافته شده 200 گرم بر مترمربع و پارچه اینگرا با طرح بافته شده 400 گرم بر مترمربع برای ساخت پوسته ها استفاده شده است. فوم یک ماده ایزوتروپ^۱ ، با نام تجاری Divinycell H80 که دارای ضخامت 5 میلی متر است به عنوان لایه میانی در کامپوزیتهای ساندویچی استفاده شد. 2-2- فرایند ساخت

ساخت کامپوزیتهای ساندویچی طی دو مرحله اصلی، ساخت پوستههای كامپوزيتي و تهيه مخلوط رزين اپوكسي با نانوالياف كربن انجام شده است. پوستههای غیرهیبریدی از کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف کربن و کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف اینگرا؛ و پوستههای هیبریدی از كامپوزیتهای تقویت شده با تركیبی از الیاف اینگرا/كربن ساخته شدهاند. به منظور تهیه مخلوط رزین با نانوالیاف کربن ابتدا، نانو الیاف کربن با نسبتهای وزنی 0، 1.0، 0.3، 5.0 درصد به رزین اپوکسی در یک بشر اضافه شدهاند. سپس نانوالیاف کربن توسط یک همزن مکانیکی دوربالا به مدت 20 دقیقه با سرعت (RPM) 3000 توزيع مى شود. در ادامه مخلوط مورد نظر با استفاده از پراب آهموژنایزر آلتراسونیک با فرکانس 20 کیلوهرتز و توان 200 وات به مدت نیم ساعت در فواصل زمانی ثابت تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفتهاند. به منظور جلوگیری از افزایش دمای رزین اپوکسی، بشر در حمام یخ قرار داده می شود. پس از رسیدن به پراکندگی خوب نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی، مقدار هاردنر (سخت کننده) با نادیده گرفتن نسبتهای وزنی نانوالیاف کربن به مخلوط اضافه می شود. مخلوط حاصل به عنوان ماتریس برای ساخت نمونه ها استفاده می شود. فرایند تهیه رزین اپوکسی تقویت شده با نانوالیاف کربن به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.

به منظور ساخت پوستههای کامپوزیتی با لایهچینی دستی سه نوع کامپوزیت تهیه شده است (شکل 2). جزئیات و هندسه لایهچینی کامپوزیت-های ساندویچی در جدول 2 آورده شده است.

همان طور که در جدول 2 دیده می شود، تمامی پوسته های کامپوزیتی متشکل از 4 لایه، از طریق غلتک با رزین اپوکسی اصلاح شده توسط نانوالیاف کربن خیس شده و در بالا و پایین فوم PVC قرار داده می شوند.

3-آزمون ضربه شار پی

دستگاه ضربه شارپی از سه بخش اصلی تشکیل شده است. فک، که در آن نمونه آزادانه قرار داده میشود و یک آونگ با جرم مشخص متصل به بازوی چرخان

1 Isotropic

که در آن بدنه ماشین قرار دارد [30]. صفحه نمایش، انرژی جذب شده توسط ماده را در طول آزمایش ضربه نشان می دهد که بر حسب ژول اندازه گیری می شود. در آزمون ضربه شارپی نمونه به صورت یک تیر با تکیه گاه ساده تعبیه می شود. ضربه در میانه دهانه تیر (پشت محل شیار) وارد می گردد. انرژی اعمال شده برای آزمون ضربه 200 ژول تنظیم شده است. به دلیل نزدیکی داده ها سه بار تکرارپذیری از هر نوع آزمایش شده است. ابعاد پیشنهاد شده نمونه ها برای آزمون ضربه شارپی طبق استاندارد ASTM D256 حداقل 80 میلی متر طول و 15 میلی متر عرض است. یک شیار V شکل با زاویه 45 درجه و عمق 2 میلی متر با شعاع ریشه 20.5 طبق استاندارد ذکر شده بر نمونه ها ایجاد شده است [31]. انرژی جذب شده نمونه ها برحسب درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن در جدول 3 ارائه شده است.



Fig. 1 Schematic of making CNF polymer شکل 1 شماتیک ساخت پلیمر تقویت شده با نانو الیاف کربن

	جدول 2 جزئيات هندسه نمونهها
Table 2 The details of the geom	etry of the specimens

	• •	1
جرم (g)	چيدمان لايەھا	نمونه
5	I ₄ /PVC/I ₄	نمونههای غیرهیبریدی اینگرا
4	$C_2I_2/PVC/C_2I_2$	نمونههای غیرهیبریدی کربن
3	C ₄ /PVC/C ₄	نمونەھاي ھيبريدي



Fig. 2 Schematic of fabrication of sandwich composites (a) nonhybrid Innegra (b) non-hybrid carbon (c) hybrid ((ب) شکل 2 شماتیک ساخت کامپوزیتهای ساندویچی (الف) غیرهیبریدی اینگرا غیرهیبریدی کربن (ج) هیبریدی نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

دول 3 نتایج ازمایش ضربه شارپی

Table 3 The result of Charpy impact test				
 جذب انرژی نمونههای غیرهیبریدی و هیبریدی بر حسب ژول (J)				
0.5%	0.3%	0.1%	0.0%	درصد وزنى نانوالياف كربن
44.8	40.1	38.6	32.1	نمونه غيرهيبريدي اينگرا
22.03	22.07	22	21.03	نمونه غيرهيبريدي كربن
19.4	22.7	17.5	18.6	نمونه هيبريدى

4- نتايج و بحث

1-4-تأثير نانوالياف كربن بر نمونههاي هيبريدي و غيرهيبريدي

انرژی جذب شده برای نمونههای غیرهیبریدی و هیبریدی پس از ضربه بر حسب درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن در شکل 3 نشان داده شده است.



Fig. 3 Absorbed energy for non-hybrid and hybrid samples after impact with different weight percentages of CNF (a) Non-hybrid Innegra (b) Hybrid (c) Non-hybrid carbon

شکل 3 انرژی جذب شده برای نمونههای غیرهیبریدی و هیبریدی پس از ضربه با درصدهای مختلف وزنی نانوالیافکربن (الف) غیرهیبریدی اینگرا (ب) هیبریدی (ج) غیرهیبریدی کربن

شکل 3-الف تأثیر افزودن نانوالیاف کربن بر جذب انرژی کامپوزیتهای ساندویچی با پوستههای غیرهیبریدی اینگرا تحت آزمون ضربه شارپی را نشان مىدهد. نمونههاى تقويت شده با نانوالياف كربن به ترتيب 38.6، 40.1 و 44.8 ژول انرژی حاصل از جذب انرژی ضربه شارپی نسبت به نمونه بدون نانوالیاف كربن با جذب 32.1 ژول، عملكرد بهترى را نشان دادهاند (جدول3). جذب انرژی در نمونههای تقویت شده با 0.1 و 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن به ترتيب 20.2 و 24.9 درصد نسبت به نمونه بدون نانوالياف كربن افزايش داشت. همچنین جذب انرژی مربوط به نمونه تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف كربن نسبت به نمونه بدون نانوالياف كربن 39.5 درصد افزايش يافت. با توجه به نتایج حاصل از آزمون ضربه شارپی نمونهها، مقدار درصد وزنی و توزیع نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی در میزان تغییرات جذب انرژی نقش مهم و قابل ملاحظهی دارد. توزیع یکنواخت و تجمع ناچیز نانوالیاف کربن در زمینه اپوكسى كه باعث پيوند كووالانسى قوى بين نانوالياف كربن و رزين اپوكسى شده بر انرژی جذب شده در ضربه شارپی تأثیر مثبت گذاشته است. تصویر SEM در شکل 4 نحوه توزیع یکنواخت و همگن نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن را نشان میدهد که نتایج تجربی را تائيد مي كند.



Fig.4 SEM image of uniform distribution and low accumulation of CNF in Innegra non-hybrid sandwich composite reinforced with 0.5wt%-CNF

شکل 4 تصویر SEM نحوه توزیع یکنواخت و تجمع کم نانوالیاف کربن در کامپوزیت ساندویچ غیرهیبریدی اینگرا تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن

همچنین نسبت طول به عرض بلند نانوالیاف کربن، باعث افزایش چسبندگی بین الیاف میشود. این موضوع قبلاً توسط برخی نویسندگان تائید شده است [32]. براساس نتایج تجربی بدست آمده، انرژی ضربه جذب شده توسط کامپوزیتهای ساندویچی با پوستههای غیرهیبریدی اینگرا به صورت تابعی از نانوالیاف کربن افزایش مییابد. شکل3-ب انرژی جذب شده کامپوزیتهای ساندویچی با پوستههای هیبریدی با درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن را نشان میدهد. همانطور که در جدول 3 دیده می شود با اضافه كردن نانوالياف كربن تا 0.1 درصد وزنى انرژى جذب شده به 17.5 ژول رسيد و نسبت به نمونه بدون نانو 6.3 درصد كاهش داشته است. سپس با افزودن 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن، جذب انرژی به 22.7 ژول رسید و به میزان 22 درصد نسبت به نمونه بدون نانواليافكربن افزايش يافت. نتايج تجربي نشان میدهد این میزان از نانوالیاف کربن تمایل به تقویت الیاف دارد و باعث بهبود چسبندگی الیافها می شود. همچنین با افزودن 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن به رزین اپوکسی، انرژی به میزان 17 درصد در مقایسه با نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی کاهش یافته است. علت تغییرات جذب انرژی در نمونههای نانودار به نحوهی پراکندگی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی برمی گردد که باعث تغییر در سفتی پوستهها می شود. به عبارت دیگر به دلیل هم افزایشی

تقویت رزین اپوکسی توسط نانوالیاف کربن، افزایش جذب انرژی را به همراه دارد از طرفی به دلیل کلوخه شدن احتمالی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی موجب کاهش در جذب انرژی میشود. تأثیر افزودن نانوالیاف کربن بر جذب انرژی کامپوزیتهای ساندویچی با پوستههای غیرهیبریدی کربن تحت آزمون ضربه شارپی در شکل3-ج نشان داده شده است. قابلیت جذب انرژی برای نمونههای نانودار در نسبتهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن تقریباً یکسان است. همانطور که در جدول 3 دیده می شود، نمونه ها با محتوای نانوالیاف کربن جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه بدون نانوالیاف کربن دارند. میزان جذب انرژی در نمونه بدون نانوالياف كربن، 21.03 ژول است كه با افزودن 0.1 درصد وزنى نانوالیاف کربن، جذب انرژی 4.61 درصد افزایش یافت و به 22 ژول رسید. با افزایش نانوالیاف کربن به 0.3 درصد وزنی میزان جذب انرژی به 22.07 ژول رسيد و 4.94 درصد در مقايسه با نمونه بدون نانوالياف كربن افزايش يافته است. با این حال، اثرگذاری کم در جذب انرژی نمونهها را نشان میدهد. براساس مشاهدات مىتوان نتيجه گرفت كه افزودن 0.3 درصد وزنى نانوالياف كربن، جذب انرژی مواد کامپوزیتی را تا حدی کم افزایش میدهد. علاوه بر این، این میزان از جذب انرژی بیشترین مقدار در نمونهها با پوستههای غیرهیبریدی كربن است. با افزايش درصد نانوالياف كربن به 0.5 درصد وزني، انرژي جذب شده به 22.03 ژول رسیده است که 0.18 درصد نسبت به نمونه تقویت شده با 3.0 درصد وزنی کاهش یافته است. علت اصلی کاهش عملکرد ضربهای در این مقدار از نانوالیاف کربن می تواند توزیع نامطلوب نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی باشد که باعث ایجاد پدیده کلوخه شدن در رزین می شود. محققان گزارش كردند وقتى تقويت كننده نانوالياف كربن با رزين اپوكسى تركيب مىشود خواص مکانیکی آنها افزایش مییابد. با این حال افزایش بیشتر در محتوای نانوالیافکربن منجر به کاهش نسبی خواص مکانیکی می شود که دلیل آن افزایش کلوخه شدن نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی است [33].

یکی از مهم ترین پارامترها در بررسی جاذبهای انرژی کامپوزیتهای ساندویچی، انرژی جذب شده ویژه (SEA¹) میباشد. این پارامتر بصورت مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم میباشد. واحد این پارامتر در این مطالعه بصورت ژول بر گرم در نظر گرفته شده است.

$$SEA = \frac{E}{m} \tag{1}$$

معادله (1) انرژی جذب شده ویژه را نشان میدهد که در آن m و E به ترتیب نشان دهنده انرژی جذب شده بر حسب ژول و جرم نمونه بر حسب گرم است.

نمودار میلهای جذب انرژی ویژه برای کامپوزیتهای ساندویچی هیبریدی و غیرهیبریدی با درصدهای مختلف نانوالیاف کربن در شکل 5 آورده شده است. همان طور که در شکل 5 مشاهده میشود، نمونههای بدون نانوالیاف کربن در سه حالت چینش لایهها کمترین جذب انرژی ویژه را نشان دادند. از سوی دیگر، نمونههای تقویت شده با نانوالیاف کربن جذب انرژی ویژه بالاتری را از خود نشان دادند، که علت را میتوان بهبود مشخصات ماتریس اپوکسی مخصوصاً چقرمگی ماتریس دانست. زیرا یک پیوند سطحی خوب بین رزین اپوکسی و نانوالیاف کربن ایجاد میکند. نمونههای هیبریدی کمترین میزان جذب انرژی ویژه را در میان سایر نمونهها دارند. علاوه بر این، کمترین جذب انرژی ویژه نانوالیاف هیبریدی مربوط به نمونه تقویت شده با 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن به

مقدار 4.35 ژول بر گرم بود. از طرفی نمونههای غیرهیبریدی اینگرا بالاترین میزان جذب انرژی ویژه را با افزایش نانوالیاف کربن به خود اختصاص دادند. جذب انرژی ویژه در نمونههای غیرهیبریدی اینگرا 1.05، 1.09، 1.22 و ترتیب در نسبتهای وزنی 0.1، 0.3 و 0.5 نانوالیاف کربن ظاهر شد. علاوه بر این، تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونههای غیرهیبریدی اینگرا بین 20.24 تا 39.56 درصد بیشتر از حالت بدون نانوالیاف کربن بود. در حالی که تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونههای غیرهیبریدی کربن نسبت به نمونه بدون نانو الیاف کربن در محدوده مای غیرهیبریدی کربن بنابراین، تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه نمونههای غیرهیبریدی کربن بود. بود. بود. ویژه نمونههای غیرهیبریدی اینگرا



Fig. 5 The effect of CNF on SEA of sandwich composites شکل5 تأثیر نانوالیاف کربن بر جذب انرژی ویژه کامپوزیتهای ساندویچی

2-4-بررسی شکست نمونههای هیبریدی و غیرهیبریدی

سازههای ساندویچی یکی از انواع جاذبهای انرژی میباشند که بخشی از انرژی را به صورت انرژی کرنشی الاستیک (بازگشت پذیر) و یا تغییر شکل پلاستیک (برگشت ناپذیر) تبدیل میکنند [34]. هدف از این مطالعه جذب حداکثر انرژی ناشی از ضربه شارپی توسط کامپوزیتهای ساندویچی به منظور جلوگیری از انتقال ضربه و شکست ناگهانی سازه است. در نمونههای ساندویچی تغییر شکل ناشی از انرژی کرنشی میتواند در اثر ایجاد چند مکانیزم شکست مانند جدایش لایهای، لهیدگی هسته، کمانش محلی و بیرون زدگی الیاف اینگرا صورت گیرد. هریک از این مکانیزمها ویژگیها و ظرفیت جذب انرژی خاص صورت گیرد. و غیرهیبریدی بر جذب انرژی، در این بخش به بررسی روند و چگونگی شکست نمونهها با بازرسی چشمی در مقیاس ماکروسکوپی تحت فرایند ضربه شارپی پرداخته میشود. شکل 6 شکست کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی کربن بر حسب درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن را نشان میدهد.

همانطور که در شکل 6 دیده می شود، شکست کامل اتفاق افتاده یعنی نمونهها به دو تکه از وسط تقسیم شدهاند. ماهیت شکنندگی کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی تقویت شده با الیاف کربن باعث رفتار ترد در آنها شده است. شکست کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا در شکل 7 با نسبتهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه نشان داده شده است. انرژی جذب شده توسط پوستههای بالا و پایین نمونههای ساندویچی در غالب جدایش لایهای، بیرونزدگی الیاف اینگرا و کمانش محلی صورت می گیرد و هسته فوم PVC انرژی را از طریق تغییر شکل جذب می کند.

¹ Specific energy absorption



Fig. 6 Failure of non-hybrid carbon sandwich composites after impact in different weight percentages of carbon nanofiber شکل 6 شکست کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی کربن پس از برخورد ضربه در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن

همانطور که در شکل 6 دیده میشود، شکست کامل اتفاق افتاده یعنی نمونهها به دو تکه از وسط تقسیم شدهاند. ماهیت شکنندگی کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی تقویت شده با الیاف کربن باعث رفتار ترد در آنها شده است. شکست کامپوزیتهای ساندویچی غیرهیبریدی اینگرا در شکل 7 با نسبتهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه نشان داده شده است. انرژی جذب شده توسط پوستههای بالا و پایین نمونههای ساندویچی در غالب جدایش لایهای، بیرونزدگی الیاف اینگرا و کمانش محلی صورت می گیرد و هسته فوم PVC انرژی را از طریق تغییر شکل جذب می کند.

0.1 همانطور که در شکل
های 7-الف و 7-ب دیده می
شود با افزودن درصد وزنی نانوالیاف کربن در مقایسه با نمونه بدون نانوالیاف کربن، کمانش محلي و جدايش لايهاي در ابعاد كمتري در ناحيه پشتي كه محل اصابت ضربه چکش است اتفاق افتاده است. شکل 7-ج نحوه تغییر شکل نمونه با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن پس از ضربه را نشان میدهد. جایی که کمانش محلی رخ داده است جدایش لایهای در پوستهی بالا و پایین فوم PVC دیده می شود. علاوه بر این نازک شدن فوم PVC که در بخش میانی نمونه قرار دارد از جمله موارد جذب انرژی در مقادیر بالاتر است. هنگامی که نانوالیاف کربن به 0.5 درصد وزنی می سد، میزان جذب انرژی 39.5 درصد افزایش یافته است که در مقایسه با دیگر نمونهها، در گیری مکانیزمهای خرابی بیشتر بوده است. به عبارت دیگر حضور مکانیزمهای جذب انرژی باعث شده است که این نمونه بالاترین مقاومت به ضربه را در مقایسه با دیگر نمونهها از خود نشان دهد. با بررسی یوستهی بالا و پایین نمونه، جدایش لایهای در ناحیه پشتی قابل مشاهده است که به این شکل بخشی از انرژی را جذب نمودهاند. جدایش بین لایهای در مقايسه با نمونه 0.3 درصد وزنى نانوالياف كربن كمتر ديده مى شود. علت اين امر را تنها مي توان چسبندگي لايهها به واسطهي توزيع همگن نانوالياف كربن دانست. در محل جدایش لایهای، کمانش محلی در ابعاد کوچکتری نسبت به نمونه تقويت شده با 0.3 درصد وزنى نانوالياف كربن اتفاق افتاده است. علاوه بر این بیرونزدگی الیاف اینگرا در لایههای بالا و پایین نمونه خیلی جزئی دیده شده است. همچنین تغیرشکل فوم PVC اتفاق افتاده است. همان طور که در شکل 7 مشاهده می شود، آسیب توسط پوسته های کامپوزیتی غیر هیبریدی اينگرا نسبتاً بيشتر از هسته فوم PVC است. بنابراين خرابي انتقال يافته به هسته فوم PVC بسیار کمتر است. شکل 8 شکست کامپوزیتهای ساندویچی هیبریدی پس از ضربه در نسبتهای وزنی مختلف را نشان میدهد.



Fig. 7 Failure of sandwich composite non-hybrid Innegra after impact with different weight percentages of CNF (a) 0.0wt% CNF (b) 0.1 wt% CNF (c) 0.3wt% CNF (d) 0.5wt% CNF (d) 0.5wt% CNF شكل 7 شكل 7 شكل 7 شكل 7

در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن (الف) بدون نانو (ب) 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن (ج) 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن (د) 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن



Fig. 8 Failure of sandwich composites hybrid after impact with different weight percentages of CNF (a) 0.0wt% CNF (b) 0.1 wt% CNF (c) 0.3wt% CNF (d) 0.5wt% CN

شکل 8 شکست کامپوزیتهای ساندویچی هیبریدی پس از برخورد ضربه در درصدهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن (الف) بدون نانو (ب) 0.1 درصد وزنی نانوالیاف کربن (ج) 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن (د) 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن

پوستههای بالا و پایین نمونههای ذکر شده انرژی را در غالب کمانش محلی، جدایش لایههای کربن از لایههای اینگرا، بیرونزدگی الیاف اینگرا و گسیختگی الیاف کربن جذب میکنند و انرژی جذب شده توسط هسته فوم PVC از طریق شکستگی میباشد. همانطور که در جدول 3 دیده شد نمونههای ذکر شده قابلیت جذب انرژی کم دارند. با مقایسه شکست نمونههای هیبریدی به این نتیجه میرسیم که همه نمونهها تقریباً رفتار مشابهای دارند. این میزان از خرابیها با تغییر در میزان نانوالیاف کربن متغیر است. مکانیسم شكست نمونه بدون نانوالياف كربن و نمونه تقويت شده با 0.1 درصد وزنى نانوالیاف کربن در شکلهای 8-الف و 8-ب آورده شده است که به وضوح جدایش لایههای اینگرا از لایههای کربن را نشان میدهد. علت این امر نشان از عدم چسبندگی خوب بین دو الیاف میباشد. میزان جدایش لایههای اینگرا از لایههای کربن در نمونه بدون نانو بیشتر است. همچنین بیرونزدگی الیاف اینگرا و کمانش محلی دیده می شود. همانطور که در شکل 8-ج مشاهده می شود، بخشی از انرژی ضربه، با افزایش نانو الیاف کربن از 0.1 درصد وزنی تا 0.3 درصد وزنی، به صورت جدایش لایهای (جایی که نمونه دچار کمانش محلی شدهاند واقع در ناحیه پشتی) و لهیدگی فوم PVC جذب کردهاند. شکل 8-د شكست نمونه تقويت شده با 0.5 درصد وزني نانوالياف كربن را نشان ميدهد که در مقایسه با نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن جذب انرژی کمتری دارد. همانطور که گفته شد، علت تغییر در مکانیسمهای شکست به این دلیل است که میزان پخششدگی نانوالیاف کربن در رزین اپوکسی باعث تغییر در اتصال الیاف و در نتیجه تغییر در خواص مکانیکی آنها می شود. براساس مشاهدات مي توان نتيجه گرفت، تركيب الياف اينگرا با الياف كربن، تأثیر قابل ملاحظهای در عملکرد ضربه و در نتیجه جذب انرژی نداشتهاند و عدم چسبندگی مناسب بین لایههای الیاف اینگرا و الیاف کربن را میتوان در جدایش لایه ای در ناحیه پشتی نمونه ها ملاحظه نمود. لازم به ذکر است که جدایش لایهای و کمانش محلی در نمونه تقویت شده با 0.3 درصد وزنی نانوالیاف کربن در مقایسه با نمونههای تقویت شده با 0.1 و 0.5 درصد وزنی نانو کمتر دیده شده که نشان از بهبود در چسبندگی بین الیاف (سفتی لایهها) است. به طور خلاصه، پوستههای کامپوزیتهای ساندویچی هیبریدی انرژی را هم از طریق شکست ناشی از افزودن الیاف کربن در لایهبندی هیبریدی و همچنین با خرابی الیاف اینگرا جذب میکنند. بااین حال، انتخاب این نوع ترکیب برای کامپوزیتهای ساندویچی مناسب نیست و با کمترین مقاومتی دچار آسیب میشوند.

زاویه انحراف نمونههای هیبریدی و غیرهیبریدی پس از اعمال ضربه شارپی، یکی از موارد قابلیت جذب انرژی نمونههای آزمایش شده میباشد. صدیقی و همکاران به بررسی رفتار جذب انرژی با در نظر گرفتن زاویه انحراف از 180 کامپوزیتها پرداختند [35]. شکل 9 زاویه انحراف از 180 درجه با نسبتهای مختلف وزنی نانوالیاف کربن نمونههای غیرهیبریدی اینگرا و هیبریدی را نشان میدهد. زاویه انحراف از 180 درجه در نمونههای غیرهیبریدی اینگرا در حالت مقایسهای، نشاندهندهی این موضوع است که با افزایش درصد وزنی نانوالیاف کربن زاویه انحراف کاهش یافته است (شکل 9-غیرهیبریدی اینگرا در حالت مقایسهای، نشاندهندهی این موضوع است که با افزایش درصد وزنی نانوالیاف کربن زاویه انحراف کاهش یافته است (شکل 9-که در شکل9-ب دیده میشود زاویه انحراف در نمونه هیبریدی تقویت شده با الف). کاهش زاویه انحراف حاکی از سفتی مناسب بین لایهها میباشد. همانطور می در مدور وزنی نانوالیاف کربن زاویه انحراف در نمونه هیبریدی تقویت شده با در مونه هیبریدی تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن کمی افزایش در نمونه هیبریدی تقویت شده با 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربن کمی افزایش می یابد. افزایش زاویه انحراف از 180 درجه در نمونهی فوق بخاطر عدم

چسبندگی مناسب بین لایههای کربن و لایههای اینگرا میباشد. با این حال افزایش زاویه انحراف از 180 درجه که با تغییر شکل پلاستیک نمونهها همراه است به جذب انرژی کمک میکند. اگرچه این میزان از تغییر شکل پلاستیک نمونهها مقدار کمی در جذب انرژی سهیماند.



ب−b Fig. 9 Angle of samples (a) non-hybrid Innegra (b) hybrid شکل 9 زاویه نمونههای (الف) غیرهیبریدی اینگرا (ب) هیبریدی

5- نتيجەگىرى

پاسخ ضربه شارپی روی کامپوزیتهای ساندویچی با دو نوع پوستهی غیرهیبریدی اینگرا و کربن؛ و یک پوسته هیبریدی اینگرا/کربن بررسی شد. نمونههای غیرهیبریدی با الیاف اینگرا سفتی و انرژی جذب شده بسیار بالاتری را در مقابل ضربه نشان دادند. انرژی جذب شده توسط نمونه غیرهیبریدی اینگرا، با اختلاف قابل توجهی از دو نمونهی دیگر تا حدود دو برابر بیشتر بود. علاوه بر تأثیر جنس پوسته، تأثیر افزودن نانوالیاف کربن در جذب انرژی برای هر كدام از نمونهها با چهار درصد وزنی از 0 تا 0.5 مطالعه شد. نتایج بیانگر این است که افزودن نانوالیاف کربن تأثیر بسزایی روی جذب انرژی کامپوزیتهای ساندویچی با پوستههای اینگرا داشت ولی روی نمونههای دیگر تأثیر بسزایی نداشت یا گاهی سبب کاهش انرژی جذب انرژی نیز گردید. برای مثال در نمونه اینگرا، با افزایش نانوالیاف کربن تا 0.5 درصد وزنی میزان جذب انرژی به مراتب بالاتر از نمونه بدون نانو میباشد و از 32 ژول به 44.8 ژول افزایش یافت ولی برای نمونه هیبریدی در 0.1 درصد وزنی کاهش جزئی دارد. بنابراین، استفاده ترکیب الیاف اینگرا و کربن باعث افزایش انرژی جذب شده نبود و تأثیر مطلوبی در استحکام ضربهای نداشت. جذب انرژی در نمونههای غیرهیبریدی کربن نیز زمانی افزایش می یابد که نانو الیاف کربن به 0.3 درصد وزنی میرسد و با افزودن نانو به 0.5 درصد وزنی، جذب انرژی کاهش مییابد. علاوه بر این، یکی از مهم ترین پارامترهای جذب انرژی که در این مقاله بررسی شد جذب انرژی ویژه بود. نتایج حاصل از بررسی میزان جذب انرژی ویژه نشان داد، بیشترین جذب انرژی ویژه مربوط به نمونه غیرهیبریدی اینگرا تقویت شده با 0.5 درصد وزنى نانوالياف كربن با مقدار 8.96 ژول بر گرم است. شايان ذكر است تقویت رزین اپوکسی با نانوالیاف کربن باعث شده که زاویه انحراف از 180 درجه در برای تمامی نمونهها و به ویژه برای نمونه با پوستهی اینگرا کاهش

- [14] Taghipoor, H., Fereidoon, A., Ghasemi-Ghalebahman, A. and Mirzaei, J., "Experimental Assessment of Mechanical Behavior of Basalt/Graphene/Pp-G-Ma-Reinforced Polymer Nanocomposites by Response Surface Methodology" Polymer Bulletin, pp. 1-23, 2022.
- [15] Wang ,D. H., Sihn, S., Roy, A. K., Baek, J.-B. and Tan, L.-S., "Nanocomposites Based on Vapor-Grown Carbon Nanofibers and an Epoxy: Functionalization, Preparation and Characterization" European polymer journal, Vol. 46, No. 7, pp. 1404-1416, 2010.
- [16] Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S. and Mallick, P., "Improvement in Mechanical Properties of Carbon Fabric–Epoxy Composite Using Carbon Nanofibers" Journal of materials processing technology, Vol. 198, No. 1-3, pp. 445-453, 2008.
- [17] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A. and Ghoreishi, S. M., "Effects of Adding Multiwall Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Epoxy Resin and Glass/Epoxy Laminated Composites" Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 125-133, 2015.
- [18] Kamar, N. T., Hossain, M. M., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T. and Loos, A., "Interlaminar Reinforcement of Glass Fiber/Epoxy Composites with Graphene Nanoplatelets Part a Applied Science and Manufacturing", 2015.
- [19] Ashenai Ghasemi, F., Saberian, M. H., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Nano-Composite Based on Epoxy/Graphene Nano-Platelets/Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Rubber" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 395-402, 2018.
- [20] Hasan, M. M., Zhou, Y. and Jeelani, S., "Thermal and Tensile Properties of Aligned Carbon Nanofiber Reinforced Polypropylene" Materials letters, Vol. 61, No. 4-5, pp. 1134-1136, 2007.
- [21] Odagiri, N., Kishi, H. and Yamashita, M., "Development of Torayca Prepreg P2302 Carbon Fiber Reinforced Plastic for Aircraft Primary Structural Materials" Advanced Composite Materials, Vol. 5, No. 3, pp. 249-254, 1996.
- [22] Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L. and Jeelani, S., "Experimental Study on the Thermal and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy" Materials Science and Engineering: A, Vol. 452, pp. 657-664, 2007.
- [23] Taghipoor, H. and Sefidi, M., "Energy Absorption of Foam-Filled Corrugated Core Sandwich Panels under Quasi-Static Loading" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, pp. 14644207221110483, 2022.
- [24] Taghipoor, H. and Sadeghian, A., "Experimental Investigation of Single and Hybrid-Fiber Reinforced Concrete under Drop Weight Test" in Proceeding of Elsevier, pp. 1073-1083.
- [25] Mirzaei, J. and Taghipoor, H., "Experimental Investigation of Glass/Hemp Hybrid Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading" Journal of Aeronautical Engineering, 2022.
- [26] Taghipoor, H. and Eyvazian, A., "Quasi-Static Axial Crush Response and Energy Absorption of Composite Wrapped Metallic Thin-Walled Tube" Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 44, No. 4, pp. 1-19, 2022.
- [27] Taghipoor, H. and Noori, M. D., "Experimental Investigation of Energy Absorption in Foam Filled Sandwich Beams with Expanded Metal Sheet as Core under Quasi-Static Bending" Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 126-134, 2018.
- [28] Ávila ,A. F., Carvalho, M. G. R., Dias, E. C. and da Cruz, D. T., "Nano-Structured Sandwich Composites Response to Low-Velocity Impact" Composite Structures, Vol. 92, No. 3, pp. 745-751, 2010.
- [29] Bidi, A., Liaghat, G. and Rahimi, G., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-Polyurea Bi-Layer" Journal

یابد که نشانگر افزایش سفتی نمونههاست. همچنین مکانیسمهای آسیب به صورت کمانش محلی، جدایش لایهای و بیرونزدگی الیاف در تمامی نمونهها اتفاق میافتد به استثناء کامپوزیتهای ساندویچی کربن که رفتار ترد و شکننده دارند. در نمونه اینگرا با افزایش نانو الیاف کربن چسبندگی لایهها بهبود یافته است. این در حالیست که در نمونههای هیبریدی با 0.5 درصد نانوالیاف کربن بر اثر پدیده کلوخه شدن جدایش بینلایهای شدیدتری اتفاق میافتند.

6-منابع

- [1] Fotouhi, M., Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G., Fragassa, C., Zucchelli, A. and Ahmadi, M., "Effect of Pvdf Nanofibers on the Fracture Behavior of Composite Laminates for High-Speed Woodworking Machines" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 231, No. 1, pp. 31-43, 2017.
- [2] Lee, S.-E., Jeong, E., Lee, M. Y., Lee, M.-K. and Lee, Y.-S., "Improvement of the Mechanical and Thermal Properties of Polyethersulfone-Modified Epoxy Composites" Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 33, pp. 73-79, 2016.
- [3] Rajasekaran, R., Alagar, M. and Chozhan, C. K., "Effect of Polyethersulfone and N, N'-Bismaleimido-4, 4'-Diphenyl Methane on the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Systems" Express Polym. Lett, Vol. 2, pp. 339-348, 2008.
- [4] Ingram, J., Zhou, Y., Jeelani, S., Lacy, T. and Horstemeyer, M. F., "Effect of Strain Rate on Tensile Behavior of Polypropylene and Carbon Nanofiber Filled Polypropylene" Materials Science and Engineering: A, Vol. 489, No. 1-2, pp. 99-106, 2008.
- [5] Akangah, P., Lingaiah, S. and Shivakumar, K., "Effect of Nylon-66 Nano-Fiber Interleaving on Impact Damage Resistance of Epoxy/Carbon Fiber Composite Laminates" Composite Structures, Vol. 92, No. 6, pp. 1432-1439, 2010.
- [6] Li, G., Li, P., Yu, Y., Jia, X., Zhang, S., Yang, X. and Ryu, S., "Novel Carbon Fiber/Epoxy Composite Toughened by Electrospun Polysulfone Nanofibers" Materials Letters, Vol. 62, No. 3, pp. 511-514, 2008.
- [7] Li, G., Li, P., Zhang, C., Yu, Y., Liu, H., Zhang, S., Jia, X., Yang, X., Xue, Z. and Ryu, S., "Inhomogeneous Toughening of Carbon Fiber/Epoxy Composite Using Electrospun Polysulfone Nanofibrous Membranes by in Situ Phase Separation" Composites Science and Technology ,Vol. 68, No. 3-4, pp. 987-994, 2008.
- [8] Robinette, E. J., "Toughening Vinyl Ester Matrix Composites by Tailoring Nanoscale and Mesoscale Interfaces", Drexel University, 2006.
- [9] Zhang, J., Lin, T. and Wang, X., "Electrospun Nanofibre Toughened Carbon/Epoxy Composites: Effects of Polyetherketone Cardo (Pek-C) Nanofibre Diameter and Interlayer Thickness" Composites science and technology, Vol. 70, No. 11, pp. 1660-1666, 2010.
- [10] Emamieh, H. R., Yarmohammad Tooski, M., Jjabbari, M. and Khorshidvand ,A. R., "An Experimental Investigation of Impact Resistance of Sandwich Panels Reinforced by Nano-Silica and Nano-Clay" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1573-1582, 2021.
- [11] Sun, L., Warren, G., O'reilly, J., Everett, W., Lee, S., Davis, D., Lagoudas, D. and Sue, H.-J., "Mechanical Properties of Surface-Functionalized Swent/Epoxy Composites" Carbon, Vol. 46, No. 2, pp. 320-328, 2008.
- [12] Wei, J., Vo, T. and Inam, F., "Epoxy/Graphene Nanocomposites– Processing and Properties: A Review" Rsc Advances, Vol. 5, No. 90, pp. 73510-73524, 2015.
- [13] Yu, N., Zhang, Z. and He, S., "Fracture Toughness and Fatigue Life of Mwcnt/Epoxy Composites" Materials Science and Engineering: A, Vol. 494, No. 1-2, pp. 380-384, 2008.

نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.

- [30]Hufenbach, W., Ibraim, F. M., Langkamp, A., Böhm, R. and Hornig, A., "Charpy Impact Tests on Composite Structures–an Experimental and Numerical Investigation" Composites Science and Technology, Vol. 68, No. 12, pp. 2391-2400, 2008.
- [31] Standard, A., "D265," Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics" West Conshohocken (PA): ASTM International, 2010.
- [32] Shokrieh, M., Ghoreishi, S. and Esmkhani, M., "Toughening Mechanisms of Nanoparticle-Reinforced Polymers" in: Toughening Mechanisms in Composite Materials, Eds., pp. 295-320: Elsevier, 2015.
- [33] Zhou, Y., Jeelani, S. and Lacy, T., "Experimental Study on the Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Composites with a Carbon Nanofiber-Modified Matrix" Journal of Composite Materials, Vol. 48, No. 29, pp. 3659-3672, 2014.
- [34] Alghamdi, A., "Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview" Thin-walled structures, Vol. 39, No. 2, pp. 189-213, 2001.
- [35] Sadighi, M. and Dariushi, S., "An Experimental Study of the Fibre Orientation and Laminate Sequencing Effects on Mechanical Properties of Glare" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Vol. 222, No. 7, pp. 1015-1024, 2008.

نشریه علمی پژوهشی







بررسی تجربی خواص مکانیکی، خوردگی و زیستسازگاری کامیوزیت Ti/RGO ساخته شده با روش ترکیبی سینترینگ پلاسمای جرقهای و اکستروژن برشی ساده

 3 سيدمحمدرضا سدهئے 1 ، محمد خسروی 2* ، بدالله يعقوبىنژاد

1- دانشآموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

3- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

* بيرجند، صندوق پستى hkhosravi@birjandut.ac.ir ،16846-13114 *

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
 با توجه به اهمیت بالای تیتانیوم خالص در صنعت پزشکی و ضعف خواص مکانیکی و فیزیکی این فلز، در این تحقیق به جهت رشد خواص	دريافت: 1401/05/22
مکانیکی و در عین حال بهبود خواص زیستی، کامپوزیت تیتانیوم خالص تقویت شده با نانوذرات اکسید گرافن احیا شده با استفاده از روش	پذيرش: 1401/08/08
سینترینگ پلاسمای جرقهای ساخته و در دمای اتاق با روش اکستروژن برشی ساده تحت فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید قرار گرفت.	كليدواژگان
تأثیر سینترینگ پلاسما ، فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید و قرارگیری در محلول شبیهساز بدن بر تغییرات خواص مکانیکی، خوردگی و	تیتانیوم، سینترینگ پلاسمای جرقهای،
زيستي اين گريد تيتانيوم بررسي شد. در اثر افزودن مقدار 0.1 درصد وزني اكسيدگرافن احياء شده به تيتانيوم خالص و سپس ريزدانه	خوردگی، اکستروژن برشی ساده،
کردن ساختار کامپوزیت تولیدی، با یک مرحله اکستروژن برشی ساده، میزان ایجاد کلسیم (استخوانسازی) در بدنه و بعد از قرارگیری 28	زیستسازگاری
روزه در محلول شبیهساز بدن، بیشتر و دارای کیفیت بالاتری نسبت به نمونه خالص سینتر شده است. همچنین میزان استحکام کششی	
این نمونه نیز بعد از قرارگیری 28 روزه در محلول شبیهساز بدن بیشتر از نمونه خالص سینتر شده بوده به طوری که استحکام کششی	
نمونه خالص و نمونه داراي اكسيدگرافن احياء شده ريزدانه شده به ترتيب 750 و 1089.4 مگاپاسكال ثبت شده است.	

Experimental investigation of mechanical properties, corrosion and biocompatibility of Ti/RGO composite made by the combined method of spark plasma sintering and simple shear extrusion

Sayyed Mohammad Reza Sedehi¹, Mohammad Khosravi^{1*}, Yadollah Yaghoubinezhad²

1- Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2- Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Birjand, Iran, mkhosravi@birjandut.ac.ir

Titanium, Spark plasma sintering, Corrosion, Simple shear extrusion, Biocompatibility	Considering the high importance of pure titanium in the medical industry and the weak mechanical and physical properties of this metal, in this research, in order to develop mechanical properties and at the same time improve biological properties, pure titanium composite reinforced with regenerated graphene oxide nanoparticles using the method SPS was fabricated and subjected to severe plastic deformation at room temperature by a simple shear extrusion method. The effect of plasma sintering, severe plastic deformation process and placement in a body simulating solution on changes in the mechanical, corrosion and biological properties of this titanium grade was investigated. As a result of adding 0.1% by weight of RGO to pure titanium and then fine-granulating the produced composite structure, with a simple shear extrusion step, the amount of calcium (bone formation) in the body and after 28 days in the body simulating solution was higher than the pure sintered sample. Also, the tensile strength of this sample after 28 days in the body simulating solution was higher than the pure sintered as 750 and 1089.4 MPa, respectively.

آرتریت پس از سانحه، آرتریت روماتوئید منشاء می گیرند. این نقایص به یک مشکل پزشکی مهم در سراسر جهان تبدیل شده و تبعات خطرناکی مانند

در دنیای کنونی بیماریهای استخوانی مرتبط با اسکلت انسان و آسیبهای

ناشی از آن در زمانهای کنونی شیوع بیشتری داشته است [1]. تعداد زیادی

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using: Sedehi, S. M. R., Khosravi, M., Yaghoubinezhad, Y., "Experimental investigation of mechanical properties, corrosion and biocompatibility of Ti/RGO composite made by the combined method of spark plasma sintering and simple shear extrusion," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1921-1926, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.559027.1797

عوارض پاتولوژیک در انسان ایجاد میکنند. ارزیابی صورت گرفته نشان دهنده آنست که بیش از 50٪ از زنان و 20٪ از مردان بالای 50 سال در طول عمر باقيمانده خود تحت تأثير شكستكي استخوان قرار مي گيرند [2]. چنين نقايص استخوانی ممکن است به جراحی برای تعویض کامل زانو و لگن به کاشت اجزاء دائمى يا موقت نياز داشته باشد [3]. اين امر باعث شد كه افراد متعدد تحقيقات را به تولید یک ماده زیستی سوق دهند، در صورتی که این ماده زیستی بتواند برای تکرار یک ویژگی واقعی استخوان مانند چقرمگی و استحکام استفاده شود [4,5]. جیانگ وان و همکاران مشاهده کردند که بیومواد قادر به تحمل بار در فرآيندهاي زيستي نيستند [6]. ونجوان و همكاران نيز بررسي كردند كه انتخاب مواد زیستی جایگزین برای تعیین مواد جدید برای رشد مولکولها و جابجایی سلول در نقطه آسیب حیاتی است [7]. ویکتور بلتران و همکاران مشاهده کردند که مواد زیستی نقش مهمی برای جایگزینی بیولوژیکی استخوان آلوئولی بازسازی شده ایفا میکنند. در حال حاضر، امروزه فلزات به شدت به عنوان جایگزینی برای استخوانهای طبیعی استفاده می شود. با گذشت زمان، مواد فلزی خواص خود را از دست میدهند و نمی توانند بارهای فشاری را تحمل کنند و ممکن است در معرض شکست قرار گیرند. همچنین، فلزات با گذشت زمان تمایل به سست شدن ساختار دارند که به نوبه خود ممکن است باعث ایجاد اثرات ناخواسته مانند مسمومیت و واکنشهای نامطلوب شود [8].

ایمپلنتها برای کاربردهای زیستپزشکی در دو دهه گذشته دچار تحولات سریع و چشمگیری شدهاند. از نظر زیستسازگاری، تیتانیوم به دلیل تشکیل یک لایه غیرفعال پایدار تیتانیا^۱ بر روی سطح آن نسبت به سایر مواد فلزی برتری دارد [9]. یکی دیگر از خواص مطلوب این فلز، مدول الاستیک پایین، سبکی وزن، تولید آثار کمتر در توموگرافی کامپیوتری و تصویربرداری تشدید مغناطیسی^۲ نسبت به سایر فلزات حوزه ارتوپدی است [9]. Ti-6Al-4V پرمصرفترین آلیاژ تیتانیوم برای جراحی بوده که علیرغم عملکرد عالی و مقاومت در برابر خوردگی، غلظت بالایی از یونهای فلزی در بافتهای اطراف ایمپلنتها شناسایی شده است که ایمنی طولانیمدت ایمپلنتهای این نوع آلیاژ را زیر سؤال میبرد [9]. یک رویکرد جایگزین برای غلبه بر مشکل انتشار یون مضر، استفاده از تیتانیوم خالص است. با این حال، خواص مکانیکی تیتانیم خالص تجاری به خوبی آلیاژ ۲۱⁵4 نیست. تغییرشکل پلاستیک شدید^۳ فرصتی برای ریز کردن دانههای جامدات حجیم معمولی برای تولید اندازه دانه در زیر میکرومتر یا حتی محدوده نانومتر با استحکام، زیست فعالی و خواص ضد برای ریز کردن دانههای جامدات حبیم معمولی برای تولید اندازه دانه در زیر

به منظور بهبود خواص مکانیکی کامپوزیتهای پایه تیتانیوم، برخی از ذرات سخت از جمله Till[10]، 2rO2[21] ، [2][20] و غالباً با استفاده از فنآوریهای مختلف ساخت وارد کامپوزیت تیتانیوم میشوند. گرافن که برای اولین بار در سال 2004 توسط آندره گایم و کنستانتین نووسلف ساخته شد [14]، به دلیل ویژگیهای منحصر به فردی مانند استحکام کششی130 گیگاپاسکالی [15] میتواند به عنوان تقویت کننده مناسب برای مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد. این ماده در سالهای اخیر، به عنوان یک تقویت کننده موثر در خواص مکانیکی کامپوزیتهای تیتانیوم [16]، دستاوردهای قابل توجهی را نشان داده است. از سویی دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید به عنوان یک رویکرد موثر برای دستیابی به مواد نانوساختار در نظر گرفته میشود [17,18]. به طور کلی، ریزدانه کردن ساختار روشی برای

1 TiO₂ 2 Magnetic resonance imaging 3 Severe plastic deformation

بهبود خواص مکانیکی مواد است. در این راستا، تکنیکهای تغییر شکل شدید پلاستیک با ایجاد مقدار قابل توجهی از کرنش پلاستیکی قادر به تولید مواد با ساختار زير ميكرون يا حتى ساختار نانو هستند [21–19]. اكستروژن برشي ساده ، که در سال 2009 توسط پردیس و ابراهیمی معرفی گردید [22]، یکی از جدیدترین تکنیکهای تغییرشکل پلاستیک شدید است که بر اساس فشار دادن مواد از طريق يك كانال اكستروژن مستقيم طراحي شده است. با اين حال، اطلاعات نسبتاً محدودی در مورد تأثیر همزمان فرایندهای سینترینگ یلاسمای جرقهای⁶ و تغییرشکل پلاستیک شدید بر خواص مکانیکی و زیست-سازگاری کامپوزیتهای تیتانیوم تقویت شده با گرافن یا مواد مرتبط با آن موجود است، اما ثابت شده است که حضور گرافن و ریزدانه کردن فلزات تأثیر بسزایی بر افزایش خواص کامیوزیت دارد. هدف از این پژوهش بررسی همزمان خواص مكانيكى و قابليت زيستسازگارى كامپوزيتهاى پايه تيتانيوم تقويت شده با درصدهای مختلف اکسیدگرافن احیاء شده در سه مرحله سینترینگ پلاسمای جرقهای، اکستروژن برشی ساده و قرار گیری در محلول شبیهساز بدن است، که در ادامه پژوهش قبلی نویسندگان این مقاله صورت پذیرفته است .[23]

2- آزمایشهای تجربی

در ادامه متن، به جهت سهولت خواندن مخاطب، نمونههای آزمایش به ترتیب نمونه خالص سينتر شده – 7 روز (نمونه 1) نمونه خالص سينتر شده – 28 روز (نمونه 2) ، نمونه دارای 0.05 درصد گرافن مرحله آنیل – 7 روز (نمونه 3)، نمونه دارای 0.05 درصد گرافن مرحله آنیل - 28 روز (نمونه 4)، نمونه دارای 0.1 درصد گرافن یک پاس ریزدانه شده – 7 روز (نمونه 5) ، نمونه دارای 0.1 درصد گرافن یک پاس ریزدانه شده - 28 روز (نمونه 6) ، نمونه دارای 0.1 درصد گرافن دو پاس ریزدانه شده – 7 روز (نمونه 7) ، نمونه دارای 0.1 درصد گرافن دو پاس ریزدانه شده - 28 روز (نمونه 8) نامگذاری می شوند که در این مدل نام گذاری، عدد روز معرف مدتزمان قرار گیری نمونه در محلول شبیهساز بدن است. مراحل آزمایش های تجربی در شکل های 1 و 2 نشان داده شده است. در تحقيق قبلي پژوهشگران اين مقاله [23]، ابتدا تركيبي يكنواخت از پودرهاي تيتانيوم خالص و اكسيد گرافن احياء شده آماده و سپس از طريق روش تف-جوشی پلاسمای جرقهای نمونههای کامیوزیت ساخته شده است. در مراحل بعد به جهت افزایش قابلیت شکل دهی، نمونه ها به مدت 16 ساعت در دمای 800 درجه سانتی گراد تحت فرایند آنیل قرار گرفتند و در نهایت ساختار کامپوزیت با روش اکستروژن برشی ساده (یک و دو پاس)، ریزدانه شد.



Fig. 1 a) Tube furnace device for annealing b) Simple shear extrusion mold mold (الله) دستگاه کوره تيويي جهت آنيل ب) قالب اکستروژن برشي ساده

⁴ Simple shear extrusion

⁵ Spark plasma sintering

2-1- قرارگیری 7 و 28 روزه نمونههای منتخب در محلول شبیهساز بدن

جهت بررسی میزان زیست پذیری نمونه و میزان تمایل آن ها به حمایت از رشد عوامل استخوانی از آزمون غوطه وری در محلول شبیه ساز بدن استفاده شد. مقادیر ترکیبات موجود در این محلول در جدول 1 با مقادیر پلاسمای خون انسان مقایسه شده است. به همین جهت ابتدا نمونه ها درون ظروف تهیه شده به حجم 15 میلی لیتر قرار داده شده و سپس مقدار co 10 محلول درون هر ظرف ریخته و به درون یک انکوباتور با دمای 37 درجه سانتی گراد منتقل گردید. 5٪ گاز CO2 درون انکوباتور دمیده شد و نمونه ها در مدت زمان های 7 و 28 روز درون محلول قرار گرفتند. محتوی محلول هر ظرف هر دو روز یک بار جهت جلوگیری از ته نشین شدن محلول و تنظیم غلظت محلول تعویض شد. پس از اتمام زمان های مذکور نمونه ها از درون محلول خارج و پس از چندین بار شستشو با آب مقطر با استفاده از یک خشک کن، خشک گردید و جهت بررسی خواص مکانیکی و بایو آماده شد.



Fig. 2 Schematic of the stages of experimental tests شکل 2 شماتیک مراحل آزمایشهای تجربی

جدول 1 مقایسه ترکیبات محلول شبیهساز بدن و پلاسمای خون انسان **Table 1** Comparison of soluble compounds of SBF and human blood plasma

پلاسمای بدن	محلول شبيهساز	متغير
142.00	142.00	+Na
5.00	5.00	+K
1.50	1.50	+Mg2
2.50	2.50	+Ca2
103.8	147.96	-Cl
1.00	1.00	-HPO42
0.50	0.50	-SO42
27.0	4.20	-HCO3

2-2 - آزمون کشش و مورفولوژی بدنه و سطح مقطع شکست کامپوزیت

مقاومت کششی نمونه ها پس از قرارگیری 7 و 28 روزه در محلول شبیه ساز بدن با استفاده از دستگاه تک محوره با نیروی 200 نیوتن و با سرعت 0.01 میلی متر در دقیقه بررسی شد. نمونه ها به صورت مکعب مستطیل با ابعاد: ارتفاع 10 و سطح مقطع 1.5 × 1.5 میلی متر (برش نمونه های تولید شده توسط دستگاه وایر کات) می باشد. هر نمونه سه بار تکرار و میانگین نتایج محاسبه شد. استاندارد مورد استفاده ASTM E8/E8M-16a می باشد. همچنین برای بررسی تغییرات مورفولوژی بدنه و سطح مقطع شکست نمونه ها بعد از قرارگیری در محلول شبیه ساز بدن، از میکرو سکوپ الکترونی نشر میدانی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک دارای قدرت تفکیک در حد 1.5 نانومتر در ولتاژ 15 کیلوولت استفاده شد.

2-3- آزمون خوردگی

برای بررسی مقاومت به خوردگی نمونههای دارای بدترین و بهترین نتایج آزمون کشش با استفاده از دستگاه Ivium Stat- A و نرمافزار Corrview و آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و بخش پلاریزاسیون خطی در محدوده ی V I آندی و کاتدی نسبت به پتانسیل مدار باز الکترود با سرعت روبش 45 I mV/s انجام شد. جهت پایداری الکترود در محلول 3.5 NaCl ٪، برای هر نمونه 45 دقیقه زمان لحاظ گردید. جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی در محدوده ی T v 20 mV نسبت به پتانسیل مدار باز با اعمال شیبهای متقارن بر روی شاخههای آندی و کاتدی محاسبه گردیدند.

3- نتايج و بحث

1-1- آزمون شبیه ساز بدن قرار گرفتن نمونه ها در مدت 7 و 28 روز در محلول شبیه ساز بدن به منظور توانایی آن ها در رشد عناصر استخوانی مورد بررسی قرار گرفته است. نمود حضور عناصر استخوانی در سطح به صورت آشکار، قابل مشاهده است. بعلاوه، آنالیز EDS نمونه ها حضور عناصر Ca و P را به عنوان عناصری جدید در ساختار تائید می کند. به طور کلی زمانی می توان ادعا نمود که نمونه ها نسبت به شرایط شبیه سازی شده بدن واکنش مثبت نشان داده اند که مقدار Ca/P به شرایط شبیه سازی شده بدن واکنش مثبت نشان داده اند که مقدار Ca/P آن نزدیک بافت استخوانی انسان و چیزی در حدود 67.1 باشد [24]. که این متغیر به ترتیب برای نمونه های 1 ، 5 و 6 که دارای حداقل و حداکثر خواص نتایج آزمون کشش هستند، مقدار 12.2 ، 14.2 و 0.20 را ثبت کرده است. مقایسه این نتایج با استفاده از شکل 3 و 4 نمایش داده شده است. بنابراین با توجه به آنالیزها می توان گفت هر سه نمونه نسبت به شرایط شبیه سازی بدن پاسخ مثبت داشته اند. مقایسه ای از نتایج این پژوهش با تحقیقات اخیر در شکل 2 درج شده است.



Fig. 3 Results of The presence of bone elements

3-2- آزمون کشش و مورفولوژی بدنه و سطح مقطع شکست کامپوزیت همانطور که قبلاً نشان داده شده است نمونه 1 قبل از قرارگیری در محلول شبیه ساز بدن قادر به تحمل تنش کششی 711.8 مگاپاسکال بوده در حالی که نمونه 5 و 6 در همین شرایط تنش به ترتیب 6.966 و 669 مگاپاسکال را تحمل نموده اند. 28 روز قرارگیری در محلول شبیه ساز بدن در افزایش استحکام کششی نمونه های اول و دوم تأثیر مثبتی ولی در نمونه سوم افت استحکام را سبب شده به طوری که استحکام کششی نمونه های 1، 2 و 3 به ترتیب به 750، 1089 و 1089 مگاپاسکال رسیده است. مطابق شکل 4 می توان متوجه شد

شکل 3 نتایج حضور عناصر استخوانی

ریزدانه کردن کامپوزیت به مقداری بهینه تأثیرات بسیار زیادی در بهبود خواص مکانیکی نسبت به قبل از آن دارد. با توجه به تفاوتهای موجود در ساختار نمونهها و کیفیت پودر نانوکامپوزیتی میتوان نتیجه گرفت ریزدانه کردن ساختار، حضور درصدی اکسید گرافن احیا شده میتواند در این رشد استحکام کششی موثر واقع شود. با بررسی تغییرات استحکام کششی نمونهها میتوان متوجه شد غوطهوری در محلول شبیهساز بدن استحکام کششی را تا پایان روز هفتم به صورت پیوسته کاهش خواهد داد. اما پس از آن مجدداً رشد آن آغاز شده و بعد از 28 روز غوطهوری به افزایش خواهد داشت. پس از روز هفتم با توجه به واکنش مثبت نمونه به شرایط شبیهسازی شده بدن و رشد عناصر کلسیم و فسفر نمونه تقویت شده و مقاومت آن افزایش یافته است. بنابراین



شکل 4 نتایج آزمون کشش

3-3- مورفولوژی بدنه و سطح مقطع شکست کامپوزیتهای Ti/rGO بعد از قرارگیری 28 روزه در محلول شبیهساز بدن

مورفولوژی بدنه و سطح شکست SEM نمونهها در مراحل مختلف در شکل 5 نشان داده شده است. تشکیل کلسیم بر سطوح بیرونی و شکست نمونهها به وضوح مشاهده میشوند. همانگونه که قبلاً اشاره شد، میزان ایجاد کلسیم بر روی بدنه نمونه اول بیشتر از دو نمونه دیگر بوده اما در سطح مقطع شکست نمونه دوم، نسبت Ca/P ، درصد وزنی مقدار بالاتری را نشان میدهد.

3-4- خوردگی

نتایج آزمون خوردگی نشاندهنده آن است که نمونه پنجم که دارای بهترین نتایج استحکام کششی بعد از قرارگیری در محلول شبیهساز بدن است، بهترین عملکرد را نیز از نظر خوردگی داشته و میزان مقاومت به خوردگی این نمونه در حد گرید 40–614 تیتانیوم میباشد [25]. تحقیقات نشان داده است که اگر پتانسیل خوردگی افزایش و چگالی جریان خوردگی سیر نزولی داشته باشد، خوردگی نمونه کاهش مییابد [27،26]. با تجمیع نتایج به دست آمده از شکل 6 و جدول 2 مشخص است که نرخ خوردگی برای نمونه پنجم کمترین آن است که ریزدانه کردن ساختار و اضافه کردن گرافن به ساختار تیتانیوم خالص تا حد بهینهای باعث افزایش مقاومت به خوردگی میشود اما پس از آن باعث کاهش این متغیر میشود. همچنین مقاومت به خوردگی برای نمونه پنجم باعث کاهش این متغیر میشود. همچنین مقاومت به خوردگی میشود اما پس از آن

جدول 2 نتایج آزمون خوردگی

Fable	2	Corrosion	test	results	
Lanc.	-	Conosion	wor	resuits	

متغير	نمونه 1	نمونه 5	نمونه 6
پتانسیل خوردگی (V vs. Ag/AgCl)	-1.4039	-0.8971	-1.4556
شدت جریان خوردگی (µA/cm²)	243	1.419	5.841
شیب آندی (V/decade)	673.1	1.190	2.021
شیب کاتدی (V/decade)	575.0	0.639	0.721
مقاومت پلاريزاسيون (ohm.cm ²)	5.382	430.9	274.3
سرعت خوردگی (µm/year)	883.5	879.1	1765

4- نتايج

ارتقاء خواص مکانیکی و زیستی کاشتنیها همواره از مهمترین چالشهای آنها بوده است. لذا هر چه فرایند تولید آنها عاری از مواد مضر و هزینههای بالا باشد، ساختاری ایدهآل برای صنعتی شدن خواهد داشت. دو روش کامپوزیتسازی و ایجاد ساختار ریزدانه در فلزات، راههایی متداول و موثر برای بالا بردن خواص مختلف هستند که ترکیب این دو روش میتواند باعث عمیق شدن این تأثیرات شود. در این پژوهش نمونه تیتانیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید گرافن احیاء شده و با استفاده از روش سینترینگ پلاسمای جرقهای ساخته و سپس در دمای اتاق با روش اکستروژن برشی ساده در طی یک و دو پاس تحت فرآیند تغییرشکل پلاستیک شدید قرار گرفتند. اثرات سه مرحله سینترینگ پلاسمای جرقهای، اکستروژن برشی ساده و محلول شبیهساز بدن بر خواص مکانیکی، خوردگی و زیستساز گاری نمونهها مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گیری زیر حاصل شد :

1- در اثر افزودن مقدار 0/1 درصد وزنی اکسیدگرافن احیاء شده به تیتانیوم خالص و سپس ریزدانه کردن ساختار کامپوزیت تولیدی، با یک مرحله اکستروژن برشی ساده، میزان ایجاد کلسیم و حمایت از رشد عوامل استخوانی در نمونه بعد از قرارگیری 28 روزه در محلول شبیهساز بدن، بیشتر و دارای کیفیت بالاتری نسبت به نمونه خالص سینتر شده است. به طوری که این متغیر به ترتیب برای نمونههای 1 ، 5 و 6 مقدار 2.21 ، 2.12 و 0.62 را ثبت کرده است. بنابراین با توجه به آنالیزها میتوان گفت هر سه نمونه نسبت به شرایط شبیهسازی بدن پاسخ مثبت داشتهاند.

2- همچنین میزان استحکام کششی این نمونه نیز بعد از قرارگیری 28 روزه در محلول شبیه ساز بدن بیشتر از نمونه خالص سینتر شده بوده به طوری که استحکام کششی نمونه خالص و نمونه دارای اکسیدگرافن احیاء شده ریزدانه شده به ترتیب 750 و 4/189 مگاپاسکال ثبت شده است.

3- نتایج آزمون خوردگی حاکی از آن است که ریزدانه کردن ساختار و اضافه کردن گرافن به ساختار تیتانیوم خالص تا حد بهینهای باعث افزایش مقاومت به خوردگی میشود اما پس از آن باعث کاهش این متغیر می شود.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم میدانند از شرکت نانو سطوح شرق ایران برای تأمین اکسید گرافن احیاء شده و همچنین خانم مهندس حداد (شهرستان گناباد) که با نظرات سازنده خود نویسندگان را بهرهمند ساختهاند، تقدیر نمایند.





 Fig. 5 SEM images of the composite body: a) sample 1 b) sample 5 c) sample 6 and fracture surface d) sample 1 e) sample 5 f) sample 6

 شكل 5 تصاوير SEM از بدنه كامپوزيت : الف) نمونه اول ب) نمونه پنجم ج) نمونه ششم و از سطح مقطع شكست د) نمونه اول هـ) نمونه پنجم م) نمونه ششم

Journal of Alloys and Compounds, Vol. 812, No. 1, pp. 152057, 2020.

- [11] Dong, L., Chen, W., Deng, N., Song, J., & Wang, J., "Investigation on arc erosion behaviors and mechanism of W70Cu30 electrical contact materials adding graphene," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 696, No. 1, pp. 923-930, 2017.
- [12] Pérez-Bustamante, R., Bolaños-Morales, D., Bonilla-Martínez, J., Estrada-Guel, I., & Martínez-Sánchez, R., "Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying," Journal of alloys and compounds, Vol. 615, No. 1, pp. S578-S582, 2014.
- [13] Khodabakhshi, F., Arab, S. M., Švec, P., & Gerlich, A. P., "Fabrication of a new Al-Mg/graphene nanocomposite by multipass friction-stir processing: Dispersion, microstructure, stability, and strengthening." Materials Characterization, Vol. 132, No. 1, pp. 92-107, 2017.
- [14] Lütjering, G., Williams, J.C., Gysler, A., "Titanium engineering materials and progresses," 2nd ed. Berlin: Springle; Vol. 379, 2007.
- [15] Luo, S. D., Li, Q., Tian, J., Wang, C., Yan, M., Schaffer, G. B., & Qian, M., "Self-assembled, aligned TiC nanoplatelet-reinforced titanium composites with outstanding compressive properties," Scripta Materialia, Vol. 69, No. 1, pp. 29-32, 2013.
- [16] Shufeng, L. I., Kondoh, K., Imai, H., Chen, B., Jia, L., & Umeda, J., "Microstructure and mechanical properties of P/M titanium matrix composites reinforced by in-situ synthesized TiC–TiB." Materials Science and Engineering: A,Vol. 628, No. 1, pp. 75-83, 2015.
- [17] Valiev, R. Z., & Langdon, T. G., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," Progress in materials science, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
- [18] Zhilyaev, A. P., & Langdon, T. G., "Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications," Progress in Materials science, Vol. 53, No. 6, pp. 893-979, 2008.
- [19] Azushima, A., R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida, "CIRP Ann," Manuf & Technol, Vol. 57, No. 6, pp. 716–735, 2008.
- [20] Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., & Alexandrov, I. V., "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation," Progress in materials science, Vol. 45, No. 2, pp. 103-189, 2000.
- [21] A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon, Prog. Mater Sci, Vol. 53, No. 2, pp. 881–981, 2008.
- [22] Pardis, N., & Ebrahimi, R., "Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique," Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, No. 2, pp. 355-360, 2009.
- [23] Sedehi, S. M. R., Khosravi, M., & Yaghoubinezhad, Y., "Mechanical properties and microstructures of reduced graphene oxide reinforced titanium matrix composites produced by spark plasma sintering and simple shear extrusion," Ceramics International, Vol. 47, No. 23, pp. 33180-33190, 2021.
- [24] Cengiz, B. "avuz Gokce." Y., Yildiz, N., Aktas, Z. and Calimli, A., "Characterization of hydroxyapatite nanoparticles," Colloids and Surfaces A: Physicochem". Eng. Aspects, Vol. 156, pp. 29-33, 2008.
- [25] Taheridoustabad, I., Khosravi, M., & Yaghoubinezhad, Y., "Fabrication of GO/RGO/TiC/TiB2 nanocomposite coating on Ti– 6Al–4V alloy using electrical discharge coating and exploring its tribological properties," Tribology International, Vol. 156, No. 23, pp. 106860, 2021.
- [26] Zhang, Y., Chen, F., Zhang, Y., & Du, C., "1Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO coating prepared on AZ31 magnesium alloy," Tribology International, Vol. 146, No. 23, pp. 106135, 2020.
- [27] Yaghoubinezhad, Y., & Afshar, A., "Experimental design for optimizing the corrosion resistance of pulse reverse electrodeposited graphene oxide thin film," Journal of Solid State Electrochemistry, Vol. 19, No. 5, pp. 1367-1380, 2015



Fig. 6 Corrosion test results

شکل 6 نتایج آزمون خوردگی

6- مراجع

- Gao, C., Peng, S., Feng, P., and Shuai, C., "Bone biomaterials and interactions with stem cells," Bone research, Vol. 5, No. 1, pp. 1-33, 2017.
- [2] Hasany, M., Thakur, A., Taebnia, N., Kadumudi, F. B., Shahbazi, M. A., Pierchala, M. K., "Combinatorial screening of nanoclay-reinforced hydrogels: a glimpse of the -holy grail- in orthopedic stem cell therapy," ACS applied materials & interfaces, Vol. 10, No. 41, pp. 34924-34941, 2018.
- [3] Gill, S. P. S., Raj, M., Singh, P., Kumar, D., Singh, J., & Rastogi, P., "Infected nonunion with implant in situ in long bone fractures, managed by retention of implant-our experience," Journal of Orthopedics, Traumatology and Rehabilitation, Vol. 9, No.1, pp. 29, 2018.
- [4] Saghiri, M. A., Orangi, J., Asatourian, A., Gutmann, J. L., Garcia-Godoy, F., Lotfi, M., & Sheibani, N., "Calcium silicate-based cements and functional impacts of various constituents," Dental materials journal, Vol. 36, No.1, pp. 8-18, 2017.
- [5] Jin, W., & Chu, P. K. "Orthopedic implants," Vol. 17, No.20, pp. 1-15, 2017.
- [6] Wan, X., Hu, A., Li, M., Chang, C., & Mao, D., "Performances of CaSiO3 ceramic sintered by Spark plasma sintering," Materials Characterization, Vol. 59, No.3, pp. 256-260, 2008.
- [7] Liu, W., Huan, Z., Xing, M., Tian, T., Xia, W., Wu, C., "Strontiumsubstituted dicalcium silicate bone cements with enhanced osteogenesis potential for orthopaedic applications," Materials, Vol. 12, No. 14, pp. 2276, 2019.
- [8] Beltrán, V., Lazzarini, M., Figueroa, R., Sousa, V., & Engelke, W., "In Situ Endoscopic Analysis of Vascular Supply and Regenerated Alveolar Bone in β-TCP Grafted and Ungrafted Postextraction Sites before Implant Placement: A Prospective Case Control Study." BioMed Research International, 2019.
- [9] Balasubramanian, R., Nagumothu, R., Parfenov, E., & Valiev, R., "Development of nanostructured titanium implants for biomedical implants–A short review," Materials Today: Proceedings, Vol. 46, No. 1, pp. 1195-1200, 2021.
- [10] Cao, H. C., & Liang, Y. L., "The microstructures and mechanical properties of graphene-reinforced titanium matrix composites,"

نشريه



نشریه علمی پژوهشی



اثر مخرب آب دریا، آب اسیدی و آب بازی بر رفتار مکانیکی چسبهای نانوکامپوزیتی

زهره شمسایی¹، هادی خرمی شاد²*

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- این از می از می از می این کار از می ا

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۸۵۰۹-۲۵۱۱۹ ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۲۵۱۹۹-۱۵۹۹۱ ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۲۵۱۹۹-۱۹۹۱ دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۲۵۹۹-۱۹۹۱ دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۲۵۹۹-۱۹۹۱ دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه سنت ۲۹۹۹ دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه میندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران ۲۰۰۰ تمایی مدینه مدی

Knoramisnad@lust.ac.ir {1	* تهران، صندوق پستی 114-6840
چکیدہ	اطلاعات مقاله:
هدف از این تحقیق مقایسه تخریب چسبهای نانوکامپوزیتی تحت شرایط محیطی مختلف میباشد. برای این منظور نمونههای حجمی	دريافت: 1401/05/30
چسب نانوکامپوزیتی با افزودن درصدهای وزنی مختلف 0، 0.1، 0.3 و 0.5 از نانولولههای کربنی چند جداره به یک چسب از نوع اپوکسی	پذيرش: 1401/07/30
ساخته شدند. سپس نمونهها در سه نوع آب، شامل آب دریا (خلیج فارس)، آب دو بار یون زدایی شده و سپس اسیدی شده با اسید صنعتی	كليدواژگان
هیدروکلریک (HCl) و آب دو بار یون زدایی شده و سپس بازی شده با باز صنعتی سدیم هیدروکسید (NaOH) به مدت 360 ساعت	چسب نانوكامپوزيتى،
غوطهور شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، افزودن نانولولههای کربنی باعث کاهش میزان جذب آب در چسب و به تبع آن بهبود خواص	تخريب محيطي،
مکانیکی گردید اگرچه این اثر تقویتکنندگی وابسته به شرایط محیطی نیز بود. نانوکامپوزیتهای حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی کمترین	جذب آب،
میزان جذب آب و بیشترین میزان خواص مکانیکی را در شرایط مخرب محیطی مختلف از خود نشان دادند. از میان انواع مختلف شرایط	استحكام باقيمانده
مخرب، آب اسیدی بیشترین میزان نفوذ و بیشترین اثر مخرب را بر روی خواص مکانیکی رزین داشت. در آب دریا به علت وجود اکسید	
فلزات قلیایی نفوذ رطوبت نسبت به حالت اسیدی کمتر گردید و در نهایت کمترین میزان مربوط به جذب آب و اثر مخرب آن بر روی رزین	
مربوط به آب بازی بود.	

Deleterious Effects of Seawater, Acidic water and Alkali water on Mechanical Properties of Nanocomposite adhesives

Zohreh Shamsaei¹, Hadi Khoramishad^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. * P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Khoramishad@iust.ac.ir

r.O.B. 10840-13114, Tentan, Itan, Khoranishad@iu

اً كَامَيوزيت

Keywords Abstract This paper aims to compare the detrimental effects of different environmental conditions including seawater, Nanocomposite adhesive, Environmental acidic water and alkali water on the mechanical properties of nanocomposites. Nanocomposite adhesive degradation, Water uptake, Residual specimens were fabricated by the inclusion of different weight percentages (0, 0.1, 0.3 and 0.5) of multistrength walled carbon nanotubes (MWCNTs) into an epoxy adhesive. Then, the specimens were immersed in three types of water including seawater (from Persian Gulf), de-ionized water acidified with industrial hydrochloric acid (HCl) and de-ionized water alkalized with industrial sodium hydroxide (NaOH) for 360 hours. The experimental results showed that adding MWCNTs reduced the water uptake and consequently improved the mechanical properties of the adhesive. However, this improving effect depended on the environmental conditions. The nanocomposite adhesive specimen containing 0.1 wt% MWCNTs presented the lowest water uptake and the highest mechanical properties for different environmental conditions. Amongst different environmental conditions, the acidic water imposed the most deleterious effect with the highest water uptake. In seawater, the water ingress was lower than acidic water due to the existence of alkali metal oxides. Finally, the lowest water ingress and destructive effect was found to be for alkali water.

خورنده منجر به محدودیت در گسترش بیش از پیش چسب در صنایع دریایی	1- مقدمه
شده است. یکی از روشهای مهم و پرکاربرد در بررسی ماندگاری و بقای	امروزه استفاده از چسب برای اتصال قطعات مختلف به دلیل مزایای آن نسبت
اتصالات چسبی در محیطهای مرطوب انجام آزمایش میباشد.	به سایر روشهای اتصال مانند اتصال جوش، پیچ و مهره و پرچ در صنایع
در ساخت کامپوزیتهای پلیمری، استفاده از رزینهای بر پایه اپوکسی	مختلف گسترش خوبی پیدا کرده است. لیکن به دلیل برخی نقاط ضعف
در صنایع مختلف به دلیل خواص مناسب مکانیکی و حرارتی و مقاومت	اتصالات چسبی مانند حساسیت چسبهای پلیمری به محیط مرطوب یا

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Shamsaei, Z., Khoramishad, H., "Deleterious Effects of Seawater, Acidic water and Alkali water on Mechanical Properties of Nanocomposite adhesives," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1927-1936, 2022. https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.560628.1799

شیمیایی کاربرد فراوانی پیدا کرده است. رطوبت جذب شده اثر مخربی روی خواص فیزیکی و مکانیکی اپوکسی ها دارد و به شدت عملکرد آنها را تحت تأثیر قرار میدهد. این رطوبت جذب شده نقش مؤثری در نرم شدن ماده و افزایش حرکت زنجیرههای مولکولی دارد [1]. بطور ویژه اگر محیط مخرب ماهیت اسیدی داشته باشد می تواند حساسیت موضوع را بیشتر کند. محققین مختلفی به بررسی اثر تخریبی محیطهای مخرب بر قطعات پلیمری پرداختهاند. فرهیفر و همکاران [2] به بررسی تجربی رشد تورق در مود I کامپوزیت الیاف شیشه تکجهته/وینیل استر تحت پیرشدگی اسیدی پرداختند. آنها نمونههای تير يکسر گيردار دو لبه را پس از ساخت در بازههاي زماني 0، 1، 2، 5 و 10 هفته در محلول 20٪ وزنی تهیه شده از اسید سولفوریک 98٪ قرار دادند. آنها کاهش چقرمگی شکست پایا در نمونهها با اعمال شرایط محیطی را گزارش کردند. علاوه بر آن آنها دریافتند، روند تغییر چقرمگی شکست شروع رشد ترک در 5 هفته اول به صورت افزایشی بوده و پس از آن در هفته دهم با کاهش قابل توجهی همراه بوده است. خرمی شاد و عباسی [3] به بررسی و مدل سازی اثر مخرب نفوذ آب بر رفتار آسیب در اتصالات چسبی ساخته شده از چسب پلیمری پرداختند. در این تحقیق، آنها ابتدا توزیع رطوبت داخل لایه چسب را در زمان های در معرض گذاری مختلف 30، 60 و 90 روز در محیط با رطوبت نسبى 100٪ به دست آوردند. سپس با استفاده از مدل ناحیه چسبنده، آزمون کشش اتصال تک لبهای در زمانهای مختلف را شبیهسازی کردند و استحکام باقیماندهی آن را تخمین زدند. امینی و خاوندی [4] تأثیر میزان جذب آب را بر خواص دىالكتريك و استحكام كششى كامپوزيتهاى پليمرى تقويتشده با الياف شيشه تكجهته مورد بررسي قرار دادند. آنها دريافتند تغييرات در ميزان رطوبت اثر ویژهای بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی مواد کامپوزیتی دارد.

یکی از روشهای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیتها بدون تغییر محسوس در وزن آنها استفاده از ذرات نانو است. محققان انواع و اقسام ذرات نانو با جنسها و هندسههای مختلفی را مورد استفاده و بررسی قرار دادند. از این میان نانولولههای کربنی با توجه به مشخصات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی توجه ویژهای را به خود جلب نموده است. یوانگینگ لی و همکارانش ⁽⁵] از نانولولههای کربنی چندجداره برای بهبود رفتار مکانیکی رزین اپوکسی استفاده نمودند. آنها توانستند با افزودن 0.04% وزنی نانولولههای کربنی، استحکام کششی رزین را تا 12% و با افزودن 0.66% وزنی نانولولههای کربنی، مدول یانگ را تا 11% افزایش دهند. پین نینگ و همکاران^۲ [6] اثر نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت برای درصدهای مختلف نانولوله کربنی بررسی نمودند و با افزودن 1.0% وزنی نانولوله کربنی برا فزایش استحکام خمشی، یانگ را تا 11% افزایش دهند. پین نینگ و همکاران ^۲ [6] اثر نانولوله کربنی را یانگ را تا 11% افزایش دهند. پین نینگ و همکاران کار از نانولوله کربنی براسی نمودند و با افزودن 1.0% وزنی نانولوله کربنی را به دست آوردند. ویکانگ لی و همکاران^۳ [7]، اثر نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی نمودند و برای افزودن 4.20% وزنی نانولوله کربنی را به دست نانوکامپوزیت براسی نمودند و برای افزودن 4.20% وزنی نانولوله کربنی. 20%

تأثیرگذاری نانولولههای کربنی به عوامل مختلفی مانند نوع نانولوله کربنی، میزان خلوص، میزان پخش آنها درون زمینه پلیمری و همچنین ماهیت زمینه پلیمری بستگی دارد [8]. برای مثال، ژو و همکاران^۴ [9] به بررسی تأثیر نانولولههای کربنی بر روی خواص مکانیکی رزین اپوکسی 862

پرداختند. آنها گزارش دادند که افزودن نانولولههای کربنی تأثیر مثبتی بر خواص کششی و خمشی رزین اپوکسی دارد، به طوری که در اثر افزودن 0.3/ وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی آنها 28.3/ بهبود پیدا می کند. در یک مطالعه دیگر، کیم و همکاران^۵ [10] تأثیر دو نوع مختلف نانولوله کربنی اصلاح شده با اسید و اصلاح شده با عامل سیلانی^۶ بر خواص خمشی و سایشی کامپوزیت الیاف کربن/ اپوکسی را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که خواص خمشی و سایشی کامپوزیتها در اثر افزودن هر دو نوع نانولولههای کربنی بهبود جدی پیدا می کند.

برخلاف این تصور که افزودن نانولولههای کربنی همیشه موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیتها میشود، اما مطالعاتی مبنی بر تأثیر منفی این ماده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیتها نیز وجود دارد. در یک مطالعه شکریه و همکاران [11] به بررسی تأثیر افزودن نانولولههای کربنی بر روی خواص مکانیکی یک کامپوزیت با زمینه پلیاستر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که اگرچه در اثر افزودن نانولولههای کربنی استحکام خمشی و مدول خمشی نمونهها به طور قابل توجهی افزایش مییابد، اما تغییری در خواص کششی نمونهها مشاهده نمیشود.

در یک تحقیق، فریدون و همکاران [12] تأثیر درصدهای وزنی مختلف نانولولههای کربنی چند جداره و نانولولههای کربنی عامل دار با عامل کربوکسیل^۷ را بر روی استحکام برشی اتصال بین چسبنده آلومینیومی و چسبنده کامپوزیتی الیاف شیشه/پوکسی بررسی کردند. آنها نشان دادند که مؤثر بودن نانولوله کربنی بستگی به طول آنها دارد. همچنین آنها گزارش کردند، استحکام برشی اتصالات لبهای با افزودن 1.5٪ وزنی نانولوله کربنی، حدود 40٪ افزایش مییابد. در حالی که وقتی 1.5٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره کربوکسیل دار استفاده شود، استحکام برشی نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی حدود 22٪ کاهش مییابد. آنها نتیجه گرفتند که نانولولههای کربنی بدون عامل به دلیل روش تولید خود دارای طول بلندتری نسبت به نانولولههای عامل دار شده هستند و در نتیجه عملکرد بهتری در مکانیزم پلزنی از خود نشان میدهند.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش آزمایشگاهی، میزان جذب رطوبت نمونههای حجمی نانوکامپوزیت که در سه نوع آب دریا (خلیج فارس)، آب دوبار یون زدایی شده ترکیب شده با اسید صنعتی پر مصرف به اسم هیدروکلریک اسید (HCL) و آب دوبار یون زدایی شده ترکیب شده با باز پرمصرف در صنعت به اسم سدیم هیدروکسید (NaOH) بررسی شده و آثار مخرب حاصل از حل شوندههای موجود در آب بر رفتار مکانیکی رزین اپوکسی در حالتی که نمونهها با درصدهای وزنی مختلف نانولولههای کربنی تقویت شدهاند، تحلیل می گردد.

2- مكانيزم نفوذ رطوبت

ماهیت ساختار پلیمرها به گونهای است که تمایل به جذب آب دارند. آنها به دلیل داشتن گروههای هیدروکسیل^۸ (OH) در ساختار مولکولیشان با جذب مولکولهای آب، پیوندهای هیدروژنی^۹ برقرار میکنند [13, 14]. ورود رطوبت در پلیمر به وسیله فرایند نفوذ^{۱۰} صورت می گیرد.

¹ Y. Li, R et al

² P.-N. Wang et al

³ W. Li et al

⁴ Zhou et al

⁵ Kim et al

⁶ Silane

⁷ Carboxyl

⁸ Hydroxyl

⁹ Hydrogen bonds

¹⁰ Diffusion

پلیمر از دو بخش فضای اشغال شده توسط زنجیرههای مولکولی و فضای آزاد تشکیل شده است [14]. وجود فضای آزاد به دلیل حفرههای بین زنجیرههای پلیمری میباشد. میزان نفوذ آب به داخل یک ماده پلیمری وابسته به داشتن میزان فضای آزاد در آن میباشد به طوری که هرچه میزان این فضا بیشتر باشد جذب رطوبت بیشتراست. پلیمرهایی که جذب رطوبتشان بالاست حجم آزاد برای عبور مولکولهای آب بیشتری دارند [16, 16]. کارتر و کیبلر⁴ [17] بیان کردند که آب نفوذ کرده به داخل پلیمر میتواند به صورت آزاد یا متصل به مولکولهای پلیمری باشند. اگر پیوندهای شیمیایی بین آب و پلیمر رخ دهد در این صورت مولکولهای آب به پلیمر متصل میشوند و دیگر آزاد به حرکت نمیباشند این در حالی است که مولکولهای آب موجود در فضای آزاد پیوسته قادر به جابجایی هستند.

کارتر و کیبلر به ارائه مدل لنگ مویر^۲ برای پیشبینی مکانهایی از مولکولهای آب که احتمال جدا شدن از اتصال با پلیمر را دارند و مکانهایی که احتمال ایجاد پیوند شیمیایی با پلیمر را دارند، پرداختند. این مکانیزم نفوذ رطوبت توسط بسیاری از محققان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است ,18] [19. نفوذ رطوبت در پلیمرها بر اساس قانون فیک^۳ بیان می شود که در رابطه (1) بیان شده است.

$$F = -D\frac{\partial c}{\partial x} \tag{1}$$

که در این رابطه F شار رطوبتی، D ضریب نفوذ رطوبت، C غلظت رطوبت و x راستای حرکت رطوبت میباشد. مقادیر ضریب نفوذ[†] پلیمرها از مرتبه حدود x راستای حرکت رطوبت میباشد [20]. بیشینه مقدار رطوبتی که میتواند جذب M_{∞} ماده پلیمری شود با عنوان رطوبت اشباع شده بیان شده و با نماد M_{∞} شناخته میشود. ضریب نفوذ و مقدار رطوبت جذب شده معمولاً به عنوان مشخصههای اصلی نفوذ رطوبت در پلیمرها در نظر گرفته میشوند.

1-2- عوامل مؤثر بر نفوذ رطوبت

نفوذ رطوبت در پلیمرها متأثر از عوامل متعددی همچون دما و میزان رطوبت محیط میباشد. تأثیر این عوامل بر جرم رطوبت جذب شده در شرایط اشباع و ضریب نفوذ توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته شده است. [12] مورد بررسی قرار گرفت. آنها با بررسی ضخامت لایههای چسب بین 0.7 وابستگی دمایی جذب آب پلیمر در دماهای مختلف توسط گلدهیل و همکاران ^۵ [21] مورد بررسی قرار گرفت. آنها با بررسی ضخامت لایههای چسب بین 1.7 تا 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت تا 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت تا 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت با 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت تا 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت تا 1.3 میلیمتر در دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت در به مقدار $2^{\circ}00$ و اندازه گیری رطوبت در به مشاهده کردند ضریب نفوذ از مقدار $2^{\circ}00$ افزایش مییابد. دانکن و همکاران² مشاهده کردند هنگامی که نمونههای حجمی با ضخامت 1 میلیمتر در آب دوبار یون زدایی شده با دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ افزایش مییابد. دانکن و بع قریرند، ضریب نفوذ از مقدار $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ افزایش مییابد. دانکن و به میارد. خوبار یون زدایی شده با دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ قرار در آب دوبار یون زدایی شده با دماهای $2^{\circ}00$ ، $2^{\circ}00$ افزایش میار $2^{\circ}00$ و $2^{\circ}00$ و 2

- ¹ Carter and Kibler
- ² Langmuir
- ³ Fick's law
- ⁴ Diffusion Coefficient
- ⁵ Gledhill et al
- ⁶ Duncan et al
- ⁷ Arrhenius relationship
- ⁸ Hydrophobic

وابستگی ضریب نفوذ به دما، پیرو رابطه آرنیوز^۷میباشد. رابطه (2) بیانگر این موضوع میباشد.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

که در آن Q انرژی فعال سازی نفوذ، R ثابت گازها و T دما می باشد. مقدار رطوبت جذب شده با افزایش میزان دما، افزایش می یابد. حرکت زنجیرههای مولکولی با افزایش دما زیاد می شود از این رو موجب کاهش چگالی به دلیل انبساط حرارتی می شود. این افزایش فضای آزاد پلیمر موجب افزایش مقدار رطوبت حالت اشباع می شود [22]. رطوبت نسبی محیط از دیگر عوامل مؤثر بر نفوذ رطوبت می باشد [23].

ماهیت و ذات پلیمر در جذب رطوبت بسیار مهم است. پلیمرهای آب گریز^۸ نسبتاً مقدار کمتری رطوبت جذب می کنند و این در مقدار ضریب نفوذ تاثیرگذار است. در مقابل، پلیمرهای آب دوست^۹ میزان جذب آب بیشتر و در نتیجه ضریب نفوذ بیشتری دارند.

بریس و همکاران ^{۱۰} [24] بررسی کردند با قرار دادن فیلم نازک چسب در دمای 50° C با افزایش رطوبت نسبی، ضریب نفوذ از مقدار m^2/s $m^{2/s}$. در 23٪ رطوبت نسبی محیط به مقدار m^2/s m^2/s در 100٪ رطوبت نسبی محیط افزایش مییابد. همچنین مقدار رطوبت حالت اشباع از مقدار .54. وزنی به مقدار 2.1. وزنی افزایش مییابد.

مقدار هاردنر ^{۱۱} افزوده شده به رزین اپوکسی بر رطوبت جذبی اشباع اثرگذار است. بریس و همکاران[23]به بررسی تأثیر هاردنر ریچ و فیلم چسب DGEBA پرداختند و مشاهده کردند با افزایش میزان هاردنر، مقدار رطوبت اشباع در چسبها افزایش میابد.

آب سبب ایجاد تغییرات بسیاری در ساختار پلیمر میشود. این تغییرات شامل نرم شدن^{۱۲}، افزایش حجم آزاد، ایجاد تورم [25]، ریزترکها^{۱۳} [26]، برش زنجیرههای مولکولی [27] و عکسالعملهای شیمیایی در پلیمر میباشد. این تغییرات میتوانند برگشتپذیر یا برگشتناپذیر باشند [28].

تأثیر نفوذ رطوبت به صورت تغییر در خواص مکانیکی پلیمر مشاهده می-شود. هنگامی که مقدار رطوبت جذب شده افزایش یابد مدول الاستیک^۱ و استحکام تسلیم^{۱۵} پلیمر کاهش مییابد [24, 29]. همچنین با افزایش مقدار نفوذ رطوبت تنش واماندگی رو به کاهش میرود.

3- روش ساخت و آزمایش

ابتدا با استفاده از مدل 1BA در استاندارد 1996 2-237 BS EN ISO، قالب مورد نظر توسط دستگاه سی ان سی^{۱۶} ساخته میشود. شکل 1 نقشه نمونه حجمی مورد استفاده را نشان میدهد. قالب مورد استفاده از جنس تفلون پلی تترا فلئور اتیلن^{۱۷} (PTFE) میباشد که در شکل 2 نشان داده شده است.

نشريه علوم و فناوري كامپوزيدت

⁹ Hydrophilic

¹⁰ Brewis et al

¹¹ Hardner

¹² Plasticization

¹³ Micro Cracks

¹⁴ Elastic Modulus

¹⁵ Yield Stress

¹⁶ CNC

¹⁷ Poly Tetra Fluoro Ethylene



Fig. 1 Model 1BA for manufacturing bulk samples

شکل 1 مدل 1BA برای ساخت نمونه حجمی



Fig. 2 Teflon mold

شكل 2 قالب تفلونى

1-3- مراحل ساخت نمونه خالص و تقويتشده

در این مرحله برای ساخت نمونههای خالص، مقدار متناسبی از رزین اپوکسی کر 828 و هاردنر تتا^۱ ترکیب میشوند و در مکانهای مشخص شده روی قالب تفلونی ریخته میشوند. سپس قالب به مدت 270 دقیقه در دمای 10°C داخل کوره^۲ گذاشته میشود تا نمونهها به طور کامل به مرحله پخت برسند. برای ساخت نمونه حجمی تقویتشده از نانولوله کربنی چند جداره^۳ که مشخصات آن در جدول 1 آورده شده است، استفاده میشود. علت استفاده از این نانوذره، افزایش استحکام ماده در شرایط خشک و غوطهوری در آب می باشد.

جدول 1 مشخصات نانولوله چند جداره کربن

Table 1 Specifications of multi-walled carbon nanotubes

قطر متوسط	طول تقريبي	چگالی
20-30 nm	30µm	2.1 g.cm ³

در این تحقیق درصدهای وزنی مختلف نانولولههای کربنی (0٪، 0.1٪، 0.3 و 0.5٪ و 0.5٪) مورد استفاده قرار گرفته و به رزین اضافه شده است. سپس به مدت ده دقیقه ظرف حاوی پلیمر و نانولولههای کربنی توسط گرمکن برقی در دمای 2°50 گرم و با استفاده از هم زن مغناطیسی ترکیب می شود.

در مرحله بعد بشر حاوی پلیمر و نانولولههای کربنی آماده قرار گرفتن در محفظه سونیکیشن[†]میشود. با توجه به شکل3 دستگاه شامل یک محفظه

⁵ Probe

مربوط به پراب^۵ به همراه دماسنج و یک صفحه اسکن میباشد. پراب با انتشار امواج مافوق صوت و انرژی صوتی به داخل ظرف، موجب جدا شدن نانولولههای کربنی و اختلاط مناسب با پلیمر و عدم کلوخه شدن آنها میشود.



Eig. 3 Mixing of epoxy resin and MWCNTs using a sonication process شكل 3 اختلاط رزین اپوكسی و نانوذره با استفاده از فرایند سونیكیشن

پس از ترکیب مخلوط رزین و نانولولهها با هاردنر، مخلوط حاصل به قالب منتقل میشوند تا در کوره با دمای 2°110 و به مدت 270 دقیقه به مرحله پخت کامل برسد.

2-3- تهیه آب اسیدی و بازی

برای بررسی میزان اثر مخرب آب دریا و آبهای اسیدی و بازی، به ترتیب آب خلیج فارس و آبهای دوبار یون زدایی شده^{² ترکیب شده با اسید و باز} صنعتی تهیه گردید. برای ساخت این دو نوع آب از پی اچ سنج^۷ استفاده گردید. در این مرحله با ریختن آب دوبار یون زدایی شده در بشر، پی اچ اولیه با دستگاه پی اچ سنج اندازه گیری شد. سپس سدیم هیدروکسید ۸ به آب اضافه شد و همزمان پی اچ آن اندازه گیری گردید و تا رسیدن به پی اچ مورد نظر یعنی 10.5، افزودن سديم هيدروكسيد ادامه بافت. همين روند براي تركيب آب دوبار يون زدايي شده با هيدروكلريك اسيد براي ايجاد پي اچ 3.5 تكرار گرديد. مشاهده شد آب دریا دارای پی اچ 8.4 میباشد. در مرحله بعد تمامی نمونههای حجمی ساخته شده با ضخامت 2 میلیمتر در کوره با دمای 60° به مدت 360 ساعت قرار داده شد. برای محاسبه میزان جذب رطوبت در نمونهها، آنها را در بازههای زمانی 1، 5، 8، 24 ، 30، 48، 76، 96، 168، 220 ، 220 ، 240 290، 336 و 360 ساعت از درون ظرفها خارج كرده و ميزان افزايش جرم با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم گرم، اندازه گیری شد. درصد رطوبت جذبی در نمونههای حجمی که با نماد M_t نشان داده می شود با استفاده از رابطه (4) محاسبه گردید.

$$M_t = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100$$
 (4)

t که در آن Wo جرم نمونه در حالت خشک و Wr جرم نمونه در زمان غوطهوری در محیط مرطوب میباشد. سپس خواص مکانیکی نمونههای قرار

¹ Teta(Triethylenetetramine)

² Oven

³ Multiwalled Carbon Nanotube

⁴ Sonication

⁶ Deionized water

⁷ PH meter

⁸ Sodium hydroxide

⁹ Hydrochloric Acid

گرفته شده در آب با استفاده از آزمون کشش با نرخ جابهجایی 1mm/min اندازهگیری گردید.

4- نتایج آزمایشگاهی

1-4- جذب آب

ورود رطوبت در پلیمر توسط فرایند نفوذ صورت می گیرد. همان طور که در نمودارهای 4 تا 6 مشخص است جذب رطوبت با افزایش زمان بیش تر می شود. البته در ابتدای فرایند نفوذ، نرخ نفوذ بالا بوده و به تدریج از آن کاسته شده تا به شرایط اشباع می رسد. دلیل این موضوع این است که در ناحیه اول فضاهای خالی موجود در پلیمر شروع به پر شدن توسط مولکولهای آب می کند، اما با گذشت زمان اکثر فضاهای خالی پر شده و نرخ نفوذ کمتر می شود. مکانیزمهای مختلفی از قبیل واکنش شیمیایی پلیمر با آب، تورم و ایجاد ریزتر کها در هنگام ورود آب رخ می دهد.

در شکلهای 4 تا 6 مشاهده می شود که در گذر زمان، کاهش نرخ نفوذ رطوبت در همه نمونه های خالص و تقویت شده با نانولوله چند جداره کربنی وجود دارد. در جدول های 2 تا 4 نیز میزان رطوبت جذب شده در حالت اشباع برای هر سه نوع آب ارائه شده است.







Fig. 5 Water uptake of samples immersed in acidic water under $60^\circ C$ شکل 5 درصد جذب رطوبت در نمونههای غوطهور در آب با خاصیت اسیدی تحت دمای $60^\circ C$



Fig. 6 Water uptake of samples immersed in alkali water under $60^\circ C$ شکل 6 درصد جذب رطوبت در نمونههای غوطهور در آب با خاصیت بازی تحت دمای $60^\circ C$

جدول 2 مقدار رطوبت جذب شده در نمونههای غوطهور در آب دریا با دمای ^Co^oC در حالت اشباع

Table 2 Water uptake of samples immersed in seawater under 60°C at saturated condition.

جذب رطوبت (٪)	نمونه
2.86	خالص
2.03	0.1- MWCNT
2.375	0.3- MWCNT
2.545	0.5- MWCNT

جدول 3 مقدار رطوبت جذب شده در نمونههای غوطهور در آب با خاصیت اسیدی با دمای 50°C در حالت اشباع

Table 3 Water uptake of samples immersed in acidic water under 60°C at saturated condition.

جذب رطوبت (٪)	نمونه
3.045	خالص
2.187	0.1- MWCNT
2.299	0.3- MWCNT
2.362	0.5- MWCNT

جدول 4 مقدار رطوبت جذب شده در نمونههای غوطهور در آب با خاصیت بازی با دمای ۵°۵۵ در حالت اشباع

 Table 4 Water uptake of samples immersed in alkali water under 60°C at saturated condition.

جذب رطوبت (٪)	نمونه
2.692	خالص
1.924	0.1- MWCNT
2.141	0.3- MWCNT
2.226	0.5- MWCNT

با مقایسه نمودار نمونههای خالص هرسه نوع آب مشاهده می شود که شیب اولیه این نمودارها که نشان دهنده نرخ نفوذ آب در آنها می باشد نسبت به حالت تقویت شده بیش تر است علت امر این است که فضای خالی پلیمر برای حضور آب بیشتر است. از بین آنها نمودار مربوط به نمونه های غوطه ور در آب با خاصیت اسیدی شیب بیش تری را به علت بالا بودن بار الکتریکی مثبت و افزایش میزان جاذبه الکترواستاتیک در سطوح زنجیره های مولکولی دارد. این شیب اولیه در نمودار نمونه های خالص موجود در آب با خاصیت بازی کم تر

است که بیانگر وجود جاذبه الکترواستاتیک کمتر نسبت به آب دریا و آب اسیدی میباشد. هنگامی که نمونهها داخل آب قرار می گیرند، سطوح زنجیرههای مولکولی و وجوه مشترک پلیمر و نانوذرات، اکسید می شوند. سطوح اکسید شده دارای بار الکتریکی هستند. با توجه به حل شونده موجود در آب، مقدار بار مثبت و منفى سطوح متفاوت است. با افزودن اسيد هيدروكلريك و ايجاد محيط اسیدی میزان بار مثبت سطوح زیاد و میزان بار منفی کم میشود با افزایش بار مثبت جاذبه الكترواستاتيك در سطوح زنجيرههاى مولكولى و وجوه مشترك نانوذره و پلیمر افزایش می یابد و در اثر افزایش این جاذبه، نفوذ آب بیشتر می شود و با ایجاد نرم شدگی، گسیختگی در وجه مشترک نانوذره و پلیمر به وجود میآید. در آب دریا با افزایش پی اچ به علت اکسید فلزات قلیایی میزان بار منفى سطوح نسبت به بار مثبت بيش تر است و جاذبه الكترواستاتيك نسبت به حالت اسیدی کمتر می شود. اما هم چنان در سطح و وجوه مشترک نانوذره و پلیمر جاذبه الکترواستاتیک موجب نفوذ رطوبت می شود و با افزایش نفوذ رطوبت، گسیختگی به وجود می آید. با افزودن سدیم هیدرو کسید و ایجاد محیط بازی، اکسید فلزات قلیایی سطوح نسبت به آب دریا بیشتر میشود و میزان بار منفی موجود در وجوه مشترک نسبت به بار مثبت بسیار بیشتر میشود و به مراتب جاذبه الكترواستاتيك كمترى به وجود مى آيد و نفوذ آب كمترى در وجوه مشترک رخ میدهد و گسیختگی کمتر میشود.

جدول 5 میزان درصد کاهش جذب رطوبت در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی را نشان میدهد.

جدول 5 درصد کاهش جذب رطوبت نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص در حالت اشباع برای آبهای مختلف

 Table 5 Percentage decrease in the water uptake of reinforced samples compared to the neat samples at the saturated condition for different types of water

نى	د وزنی نانولولههای کرب	درص	نہع آب
0.5	0.3	0.1	÷.0
11.18	20.97	29.02	آب دریا
22.49	27.09	28.17	آب اسیدی
17.47	20.44	27.50	آب بازی

2-4- ضريب نفوذ

برای محاسبه ضریب نفوذ رطوبت ابتدا درصد رطوبت جذبی با استفاده از روش ثقلسنجی محاسبه میشود. در مرحله اول جرم نمونهها پیش از قرارگیری در شرایط محیطی مرطوب با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازهگیری میشود. سپس با قرار دادن در محیط مرطوب، در بازههای زمانی مشخص، میزان افزایش جرم نمونهها اندازهگیری میشود. بعد از تعیین میزان رطوبت جذبی در زمان اشباع (*Msa*) و با داشتن عرض نمونه (*d*)، میزان ضریب نفوذ رطوبت با استفاده از رابطه (5) محاسبه میشود [3].

$$D = \left(\frac{M_t}{M_{Sat}}\right)^2 \left(\frac{b}{8}\right)^2 \left(\frac{\pi}{t}\right)$$
(5)

جداول 6 تا 8 ضریب نفوذ رطوبت در نمونههای قرار گرفته شده در سه شرایط محیطی را نشان میدهند. همانطور که مشاهده میشود در حالت خالص میزان نفوذ رطوبت و در نتیجه ضریب نفوذ در نمونههای غوطهور در آب با خاصیت اسیدی از سایر نمونهها بیشتر میباشد.

جدول 6 ضریب نفوذ نمونههای غوطهور در آب دریا Table 6 Diffusion coefficient of samples immersed in seawater

D (mm ² /h)	%M _{Sat}	% M _{t=5}	نمونه
0.007418	2.8619	0.4977	خالص
0.006279	2.032	0.3252	0.1- MWCNT
0.007240	2.2695	0.3901	0.3- MWCNT
0.007375	2.5460	0.4358	0.5- MWCNT

جدول 7 ضریب نفوذ نمونههای غوطهور در آب با خاصیت اسیدی Table 7 Diffusion coefficient of samples immersed in acidic water

D (mm ² /h)	%M _{Sat}	% M _{t=5}	نمونه
0.01094	3.0459	0.6435	خالص
0.001451	2.1878	0.1683	0.1- MWCNT
0.002622	2.2299	0.2307	0.3- MWCNT
0.009052	2.3622	0.4540	0.5- MWCNT

جدول 8 ضریب نفوذ نمونههای غوطهور در آب با خاصیت بازی Table 8 Diffusion coefficient of samples immersed in alkali water

D (mm ² /h)	%MSat	% M _{t=5}	نمونه
0.005570	2.6927	0.4058	خالص
0.002181	1.9244	0.1815	0.1- MWCNT
0.002461	2.1410	0.2145	0.3- MWCNT
0.002659	2.2261	0.2318	0.5- MWCNT

از بین نمونههای تقویتشده با نانوذره، نمونههای تقویتشده با 0.1% وزنی نانولوله کربنی چند جداره کم ترین میزان نفوذ و نمونههای تقویتشده با 0.5% وزنی نانوذره بیش ترین مقدار نفوذ رطوبت را از خود داشتهاند. اما برای نمونههای موجود در آب دریا که با 0.3% و 0.5% وزنی نانوذره تقویت شدهاند، نفوذ از سایر آبها بیش تر است.

شکلهای 7 تا 10 نشان دهنده استحکام نمونهها در شرایط محیطی خشک و اشباع میباشد. با توجه به شکلهای 7 تا 10، مشاهده میشود که نمونههای موجود در شرایط محیطی خشک بیش ترین استحکام را در تمامی موارد خالص و تقویت شده از خود داشته اند. نمونههای غوطه ور در هر سه نوع آب کاهش استحکام را داشته اند که در بین آن ها آب با خاصیت اسیدی کمترین میزان استحکام را در تمامی موارد داشته است، زیرا میزان نفوذ رطوبت در آب با خاصیت اسیدی نسبت به سایر موارد بیش تر میباشد. نمونههای موجود در آب دریا و آب با خاصیت بازی به ترتیب در مرتبه بعدی در از دست دادن استحکام قرار دارند. مشاهده میشود که افزودن نانوذره موجب تقویت استحکام مواد غوطه ور در هر سه نوع آب گشته است. نمونه های خالص چه در حالت خشک و چه در حالت غوطه ور در هر سه نوع آب دارای کمترین میزان استحکام میباشند، زیرا در نبود تقویت کننده آب بیش تری وارد حجم آزاد پلیمر می شود که منجر به کاهش استحکام نمونه می شود.

جدولهای 9 تا 12، درصد افزایش استحکام نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص را در حالت خشک و اشباع در هر سه آب نشان میدهد.

مشاهده می شود نمونه های غوطه ور در آب با خاصیت اسیدی که با 0.1 درصد وزنی نانولوله تقویت شده اند به میزان 35.54٪ بیش ترین درصد افزایش استحکام را داشته اند. در مرتبه بعدی نمونه های غوطه ور در آب دریا با 33.39٪ و سپس نمونه های موجود در آب با خاصیت بازی با مقدار 30.42٪ بیش ترین درصد افزایش استحکام را داشته اند.





Fig. 7 Strength of samples in dry environmental condition شکل 7 استحکام نمونههای موجود در شرایط محیطی خشک











Fig. 10 Strength of samples immersed in alkali water at saturated condition $% \left({{\left[{{{\left[{{{\left[{{\left[{{\left[{{{\left[{{{}}} \right]}}} \right]_{i}}} \right]_{i}}} \right]_{i}}} \right]_{i}} \right]_{i}}} \right)$

شکل 10 استحکام نمونههای غوطهور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع

جدول 9 درصد افزایش استحکام نمونههای تقویتشده تحت شرایط محیطی خشک

نسبت به نمونه خالص

Table 9 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples at dry environmental condition compared to the neat sample.

درصد افزايش استحكام	نمونه
29.90	0.1-MWCNT
23.25	0.3- MWCNT
15.85	0.5- MWCNT

جدول 10 درصد افزایش استحکام نمونههای تقویتشده غوطهور در آب دریا در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

 Table 10 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples

 saturated in seawater compared to the neat sample.

درصد افزایش استحکام	نمونه
33.39	0.1-MWCNT
25.08	0.3- MWCNT
18.08	0.5- MWCNT

جدول 11 درصد افزایش استحکام نمونههای تقویتشده غوطهور در آب با خاصیت اسیدی در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

 Table 11 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples

 saturated in acidic water compared to the neat sample.

درصد افزايش استحكام	نمونه
35.54	0.1-MWCNT
28.08	0.3- MWCNT
20.11	0.5- MWCNT

جدول 12 در صد افزایش استحکام نمونههای تقویتشده غوطهور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

 Table 12 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples

 saturated in alkali water compared to the neat sample.

درصد افزايش استحكام	نمونه
30.42	0.1-MWCNT
24.06	0.3- MWCNT
17.78	0.5- MWCNT

شکلهای 11 تا 14 بیانگر میزان مدول الاستیک نمونهها در شرایط محیطی خشک و اشباع می باشند.

همان طور که انتظار می فت نمونه های موجود در شرایط محیطی خشک بیش ترین مقدار مدول الاستیک را در تمامی موارد تقویت شده و خالص از خود داشتهاند. نمونه های غوطه ور در هر سه نوع آب کاهش در مدول الاستیک داشتهاند که از بین آن ها آب با خاصیت اسیدی به خاطر تخریب ساختار پلیمر به علت واکنش های شیمیایی مولکول های آب با زنجیره های مولکولی پلیمر، کمترین میزان مدول الاستیک را در تمامی موارد داشته است.



Fig. 11 Elastic modulus of the samples at dry environmental condition. شکل 11 مدول الاستیک نمونههای موجود در شرایط محیطی خشک **جدول 13** درصد افزایش مدول الاستیک نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص در حالت خشک

 Table 13 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to pure samples at dry condition.

درصد افزايش مدول الاستيك	نمونه
18.39	0.1-MWCNT
16.50	0.3- MWCNT
15.09	0.5- MWCNT

جدول 14 درصد افزایش مدول الاستیک نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص در آب دریا

 Table 14 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in seawater.

درصد افزايش مدول الاستيك	نمونه
29.31	0.1-MWCNT
25.86	0.3- MWCNT
22.98	0.5- MWCNT

جدول 15 درصد افزایش مدول الاستیک نمونههای تقویتشده نسبت به خالص در آب با خاصیت اسیدی

 Table 15 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in acidic water.

درصد افزايش مدول الاستيك	نمونه
31.51	0.1-MWCNT
28.48	0.3- MWCNT
26.66	0.5- MWCNT

جدول 16 درصد افزایش مدول الاستیک نمونههای تقویتشده نسبت به خالص در آب با خاصیت بازی

 Table 16
 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in alkali water.

درصد افزايش مدول الاستيک	نمونه
26.59	0.1-MWCNT
23.93	0.3- MWCNT
21.80	0.5- MWCNT

شکلهای 15 تا 18 میزان جابجایی نمونهها در حالت خشک و اشباع در سه نوع آب را نشان میدهند. مشاهده میشود که با افزودن نانوذره میزان جابجایی کاهش مییابد. این کاهش در نمونههای تقویتشده با 0.1٪ وزنی نانولوله دارای کمترین مقدار میباشد. با افزایش مقدار نانولوله جابجایی افزایش مییابد. از آن جا که نمونههای خشک شکست تردی از خود نشان میدهند، میزان جابجایی آنها نسبت به نمونههای موجود در سه نوع آب کمتر است.



Fig. 15 The elongation of samples at dry condition شکل 15 میزان جابهجایی نمونهها در شرایط خشک



Fig. 12 Elastic modulus of the samples immersed in seawater at saturated condition.

شکل 12 مدول الاستیک نمونههای غوطهور در آب دریا در حالت اشباع



Fig. 13 Elastic modulus of the samples immersed in acidic at saturated condition.

شکل 13 مدول الاستیک نمونههای غوطهور در آب با خاصیت اسیدی در حالت اشباع



Fig. 14 Elastic modulus of the samples immersed in alkali at saturated condition. شکل 14 مدول الاستیک نمونههای غوطهور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع

جدولهای 13 تا 16 نشان دهنده افزایش میزان درصد مدول الاستیک نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص می باشد. **جدول 17** درصد تغییر جابجایی نمونههای تقویتشده نسبت به نمونه خالص در شرایط محیطی خشک

 Table 17 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples at dry environmental condition.

0.1-MWCNT
0.3- MWCNT
0.5- MWCNT

جدول 18 درصد تغییر جابهجایی نمونههای تقویتشده نسبت به حالت خالص در آب دریا

 Table 18 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in seawater.

درصد تغيير جابجايي	نمونه
-4.58	0.1-MWCNT
-3.66	0.3- MWCNT
-2.75	0.5- MWCNT

جدول 19 درصد کاهش جابهجایی نمونههای تقویتشده نسبت به خالص در آب با خاصت اسیدی

 Table 18 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in acidic water.

درصد تغيير جابجايي	نمونه
-4.84	0.1-MWCNT
-3.93	0.3- MWCNT
-3.03	0.5- MWCNT

جدول 20 درصد کاهش جابهجایی نمونههای تقویتشده نسبت به خالص در آب با خاصیت بازی

 Table 20 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in alkali water.

درصد تغيير جابجايي	نمونه
-4.32	0.1-MWCNT
-3.39	0.3- MWCNT
-2.46	0.5- MWCNT

هر چه میزان نفوذ رطوبت به داخل پلیمر بیشتر باشد، میزان افت خواص مکانیکی ناشی از رطوبت هم بیشتر خواهد بود. همانطور که نتایج نشان دادند، میزان نفوذ رطوبت در پلیمر به ترتیب در آب اسیدی از همه بیشتر، پس از آن در آب دریا و در انتها در آب بازی بوده است. این ترتیب دقیقاً برای افت خواص مکانیکی هم برقرار بوده است. بدینصورت که میزان افت استحکام پلیمر بدلیل غوطهوری در آب به ترتیب در آب اسیدی، سپس در آب دریا و در انتها در آب بازی بوده است.

4- نتیجهگیری

در این تحقیق با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی اثر مخرب آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی بر رفتار مکانیکی نانوکامپوزیتها پرداخته شد. نمونههای حجمی خالص و تقویتشده با نانولولههای کربنی چند جداره در سه مقدار 0.1٪، 0.3٪ و 0.5٪ وزنی ساخته شدند و استحکام نهایی و مدول الاستیک نمونهها در حالت خشک اندازه گیری شد. سپس نمونههای حجمی خالص و تقویتشده با نانولوله در سه نوع آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به مدت 360 ساعت غوطهور و در بازههای زمانی مشخص افزایش جرم آنها محاسبه شد. بیشترین اثر مخرب بر اثر غوطهوری در آب با خاصیت اسیدی در نمونهها ظاهر گردید. پس از آن،



.Fig. 16 The elongation of samples saturated in seawater

شکل 16 میزان جابهجایی نمونهها در حالت اشباع در آب دریا



.Fig. 17 The elongation of samples saturated in acidic water

شکل 17 میزان جابهجایی نمونهها در حالت اشباع در آب با خاصیت اسیدی





مشاهده میشود برای نمونههای قرار گرفته شده در آب اسیدی به علت افزایش در میزان آب جذب شده، جابجایی افزایش مییابد.

جدولهای 17 تا 20 در صد کاهش جابجایی نمونههای تقویتشده نسبت به خالص را نشان میدهد. همانطور که انتظار میرفت با افزودن نانوذرات، ساختار پلیمر استحکام بیشتری پیدا میکند و در وجوه مشترک این نانولوله ها با پلیمر جابجایی کمتری در زنجیرههای مولکولی پلیمر نسبت به نمونه خالص ایجاد میشود. Glass/Epoxy Composites and Alloy Aluminium Surface "World Appl Sci J, Vol. 9, No. 2, pp. 204-210, 2010.

- [13] Packham, D., "In Handbook of Adhesion Second Edition", Wiley Online Library, 2005.
- [14] Adamson, M. J., "Thermal Expansion and Swelling of Cured Epoxy Resin Used in Graphite/Epoxy Composite Materials" Journal of materials science, Vol. 15, No. 7, pp. 1736-1745, 1980.
- [15] Masaro, L., Zhu, X., "Physical Models of Diffusion for Polymer Solutions, Gels and Solids" Progress in polymer science, Vol. 24, No. 5, pp. 731-775, 1999.
- [16] Drozdov, A. D, Christiansen, J. d., Gupta, R., Shah, A., "Model for Anomalous Moisture Diffusion through a Polymer–Clay Nanocomposite" Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, Vol. 41, No. 5, pp. 476-492, 2003.
- [17] Carter, H. G., Kibler, K. G., "Langmuir-Type Model for Anomalous Moisture Diffusion in Composite Resins" Journal of composite materials, Vol. 12, No. 2, pp. 118-131, 1978.
- [18] Doyle, G., Pethrick, R. A., "Environmental Effects on the Ageing of Epoxy Adhesive Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, No. 1, pp. 77-90, 2009.
- [19] Popineau, S., Shanahan, M. E., "Simple Model to Estimate Adhesion of Structural Bonding During Humid Ageing" International journal of adhesion and adhesives, Vol. 26, No. 5, pp. 363-370, 2006.
- [20] Baker, A. A., Rose, L. F., Jones, R., "Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure", Elsevier, 2003.
- [21] Gledhill, R., Kinloch, A., Shaw, S., "A Model for Predicting Joint Durability" The journal of Adhesion, Vol. 11, No. 1, pp. 3-15, 1980.
- [22] Duncan, B., Urquhart, J., Roberts, S., "Review of Measurement and Modelling of Permeation and Diffusion in Polymers", 2005.
- [23] Brewis, D., Comyn, J., Tegg, J., "The Uptake of Water Vapour by an Epoxide Adhesive Formed from the Diglycidyl Ether of Bisphenol-a and Di-(1-Aminopropyl-3-Ethoxy) Ether" Polymer, Vol. 21, No. 2, pp. 134-138, 1980.
- [24] Brewis, D., Comyn, J., Raval, A., Kinloch, A., "The Effect of Humidity on the Durability of Aluminium-Epoxide Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 10, No. 4, pp. 247-253, 1990.
- [25] Lin, Y., Chen, X., "Moisture Sorption–Desorption–Resorption Characteristics and Its Effect on the Mechanical Behavior of the Epoxy System" Polymer, Vol. 46, No. 25, pp. 11994-12003, 2005.
- [26] Apicella, A., Nicolais, L., Astarita, G., Drioli, E., "Effect of Thermal History on Water Sorption, Elastic Properties and the Glass Transition of Epoxy Resins" Polymer, Vol. 20, No. 9, pp. 1143-1148, 1979.
- [27] De'Nève, B., Shanahan, M., "Water Absorption by an Epoxy Resin and Its Effect on the Mechanical Properties and Infra-Red Spectra" Polymer, Vol. 34, No. 24, pp. 5099-5105, 1993.
- [28] Xu, S., Dillard, D. A., Dillard, J. G., "Environmental Aging Effects on the Durability of Electrically Conductive Adhesive Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 23, No. 3, pp. 235-250, 2003.
- [29] De Nève, B., Shanahan, M., "Effects of Humidity on an Epoxy Adhesive" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 12, No. 3, pp. 191-196, 1992.

آب دریا و سپس آب با خاصیت بازی تأثیر مخرب بر رفتار مکانیکی اپوکسی گذاشت. افزودن نانولولههای کربنی باعث کاهش میزان نفوذ آب در نمونهها شد. بیشترین میزان کاهش نفوذ رطوبت در اثر افزودن 0.1 درصد وزنی نانولولههای کربنی در نمونهها بدست آمد. با افزودن 0.1 درصد وزنی نانولولههای کربنی به رزین، میزان نفوذ آب در حالت اشباع برای نمونههای غوطهور در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به ترتیب به میزان 29٪، 28.2٪ و 27.5٪ نسبت به نمونه های خالص کاهش پیدا کرد. پس از رسیدن به حالت اشباع، نمونه های مختلف تحت آزمون کشش قرار گرفته و استحکام، مدول الاستیسیته و میزان جابجایی آنها بدست آمد. نمونههای نانوکامپوزیت حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله که برای مدت 360 ساعت در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی غوطهور بودهاند، به ترتیب به میزان 33.4٪، 35.5٪ و 30.4٪ استحکام بیشتری در مقایسه با نمونههای خالص داشتند. همچنین، نمونههای نانوکامپوزیت حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله که با غوطهوری در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به حالت اشباع رسيدند به ترتيب به ميزان 29.3٪، 31.5٪ و 26.6٪ مدول الاستيسيته بیشتری در مقایسه با نمونههای خالص داشتند.

7- مراجع

- Springer, G., "Environmental Effects on Composite Materials. Volume 3", 1988.
- [2] Farahifar, S., Shokrieh, M. M., Salamat-Talab, M., "Experimental Investigation of Mode I Delamination Growth in Unidirectional E-Glass/Vinyl Ester Composites on Acid Aging" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 731-739, 2020.
- [3] Khoramishad, H., Abbasi, Z., "Numerical Study of the Effect of Moisture–Induced Swelling Stresses on Damage Behavior of Adhesive Joints under Static Loading "Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 189-198, 2015.
- [4] Amini, M., Khavandi, A., "Evaluation of the Water Absorption Content Effect on the Dielectric Properties and Tensile Strength of Polymer Composites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 300-309, 2019.
- [5] Li, Y., Umer, R., Isakovic, A., Samad, Y. A., Zheng, L., Liao, K., "Synergistic Toughening of Epoxy with Carbon Nanotubes and Graphene Oxide for Improved Long-Term Performance" RSC advances, Vol. 3, No. 23, pp. 8849-8856, 2013.
- [6] Wang, P.-N., Hsieh, T.-H., Chiang, C.-L., Shen, M.-Y., "Synergetic Effects of Mechanical Properties on Graphene Nanoplatelet and Multiwalled Carbon Nanotube Hybrids Reinforced Epoxy/Carbon Fiber Composites" Journal of Nanomaterials, Vol. 2015, 2015.
- [7] Li, W., Dichiara, A., Bai, J., "Carbon Nanotube–Graphene Nanoplatelet Hybrids as High-Performance Multifunctional Reinforcements in Epoxy Composites" Composites Science and Technology, Vol. 74, pp. 221-227, 2013.
- [8] Jahan, N., Hosur, M. V., Jeelani, S., "Low-Velocity Impact Response of Woven Carbon Epoxy Composites with Mwents" in Proceeding of 1586.
- [9] Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., "Experimental Study on the Thermal and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy" Materials Science and Engineering: A, Vol. 452, pp. 657-664, 2007.
- [10] Kim, M., Rhee, K., Lee, J., Hui, D., Lau, A. K., "Property Enhancement of a Carbon Fiber/Epoxy Composite by Using Carbon Nanotubes" Composites Part B: Engineering, Vol. 42, No. 5, pp. 1257-1261, 2011.
- [11] Shokrieh, M., Saeedi, A., Chitsazzadeh, M., "Evaluating the Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Chopped Strand Mat/Polyester Composites" Materials & Design (1980-2015), Vol. 56, pp. 274-279, 2014.
- [12] Fereidoon, A., Kordani, N., Rostamiyan, Y., Ganji, D., Ahangari, M., "Effect of Carbon Nanotubes on Adhesion Strength of E-

نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیک** http://jstc.iust.ac.ir

قالب پیشنویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرمافزار وُرد (استایل عنوان)

نام و نامخانوادگی نگارنده اول¹، نام و نامخانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و … نگارنده سوم³، …. (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمي نگارنده، رشته تخصصي، نام سازمان، نام شهر (استايل مشخصات نويسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوي دكترا، مهندسي مكانيك، دانشگاه تربيت مدرس، تهران

* شهر، صندوق پستى 13114-16846، پست الكترونيكى نويسنده عهدهدار مكاتبات (استايل مشخصات نويسندگان)

طلاعات مقاله:	چکیده (سبک عنوان چکیده)
دريافت:	در این قالب (تمپلیت)، شیوهی تهیهی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرمافزار وُرد برای مجله علمی پژوهشی
بذيرش:	علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالببندی مقاله، بخشهای مختلف آن، انواع قلمها و اندازه آنها، بهطور کامل در
کلیدواژگان (استایل عنوان کلید	استایلها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پِیست) آن در بخشهای مختلف و انتخاب استایل
واژگان)	مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه
حداقل3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده	شده باشند، معذور است. برای آمادهسازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایلها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود
كاما (استايل كليدواژگان)	که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگیهای لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار
خش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند خش فارسی است. قلم انگلیسی به کار ف نه در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو م	برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه میباشد. چکیده باید بهطور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روشهای انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکلها، جدولها، فرمولها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
رومن است.	

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)	Abstract (Style: Abstract Title)		
Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As: Composites, Foam, Shear, Deflection	The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)		
قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با	محترم، یک کپی از این فایل را در	1-مقدمه (سبک عنوان سطح 1)	
متن خود در این فایل، سبک ^۳ مربوط را	کپی و سپس چسباندن(پِیست ^۲)	1-مقدمه (استایل عنوان سطح 1)	
سمت از مقاله پس از پِیست کردن متن	انتخاب نمایید. همچنین در هر ق	برای آمادهسازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت') استفاده نمایید. نوع	
قيم سبک مربوط را اعمال فرماييد:	میتوانید از مسیر زیر، به طور مست	صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان	
³ Style		¹ Template ² Paste	
Please cite this article using:		بدای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:	

Surname, N., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word (Style: English Title)", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1937-1940, 2022. https://doi.org/...

Paste option → match with Destination format پاراگرافهای دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازهی ۵ میلیمتر

از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علایمی نظیر ، : . ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیهی این علایم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته میشوند.

حداکثر صفحات پیشنویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می ابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره گذاری شوند و نمی توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک تک آنها می توان یک جا اشاره کرد [5-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیر متوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می شود [7،5،3].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نمودهاند [2–15]" خودداری شود. در مقالههای پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخشهای اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شدهاند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آنها باید اندک باشد.

-۱-داعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)
در مقاله ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی مجاز نیست و حتماً باید معادل

فارسی آنها را در متن مقاله بهکار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات بهصورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاههای معتبر استنادی بینالمللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال ۱.۲ صحیح و ۱/۲ غلط می اشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع میشود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده میشود که اولینبار آن کلمه در متن مقاله استفاده میشود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2-شکلها، نمودارها و جدولها (استایل عنوان سطح 1)

شکلها، جدولها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج میشوند. در صورتیکه نتوان آنها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج میشوند. (استایل متن اصلی)

> 2-1- شکلها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3) -

نکات کلی که باید در ترسیم شکلها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاههای معتبر استنادی بینالمللی، شکلها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکلها در زیر شکل قرار می گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راستچین و عنوان انگلیسی شکل
 بایستی به صورت چپچین باشد.
- به همهی شکلها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکلها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره میشود.

- شکلها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکانهای ذکر شده، مشخص نمایید: Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position
 - محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف میشوند.
- عناوین افقی و عمودی شکلها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک میآیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک میآیند(توجه شود واحدها همواره در کل شکلها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک میآیند).
- و نوع و اندازه قلم محور شکلها تایمز نیو رومن ^۲ با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکلها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.
- شکلها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب
 اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین^۲) رسم می شود.
- مجله بهصورت سیاه و سفید چاپ میشود. بنابراین اجزای شکلها و نمودارها باید بهگونهای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. بهخصوص در شکلهایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.
- استفاده از کلمات فارسی در شکلها قابل قبول نمیباشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاعها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکلهای هر مقاله ارائه گردند.
 - در کلیهی محورهای شکلها باید درجهبندی آنها روبه داخل باشد.
- از نویسندگان محترم درخواست میگردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به همریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان میدهد.

برای توضیحات تکمیلیتر در مورد تهیه شکلها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکلها و نمودارها مراجعه کنید.



شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی –2-2جدولها (استایل عنوان سطح 2 و 3) نکات کلی که باید در ترسیم جدولها به آن دقت شود، عبارت است از:

¹English (Style: Sub Title) ² Times New Roman

³ Gridlines

- جدولها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
- عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راستچین و عنوان انگلیسی
 جدول بایستی به صورت چپچین باشد.
- جدول ها حتى الامكان فقط با سه خط افقى اصلى و بدون خطوط عمودى تنظيم مى شوند.
- به همه ی جدول ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می شود.
- جدول ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدولها قابل قبول نمیباشد.
- در صورتی که از جدول های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع
 در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می باشد.
- متون داخل جدولها باید به زبان فارسی و با قلم بینازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستونها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین،7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می باشد.
- جدولها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینههای رنگی و خاکستری در تهیه جدولها پرهیز نمایید.

جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان میدهد.

برای توضیحات تکمیلیتر در مورد تهیه جدولها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکلها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونتها (استایل: عنوان جدول)

 Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

لاتين	فارسى		زبان متن
تايمز نيو رومن	بىنازنين		نوع قلم
9	10	عناوین بخشهای سطح 1	اندازه قلم
8	9	عناوین بخشهای سطح 2	
9	10	متن اصلی مقاله	
8	9	عنوان شکلها و جدولها	
8		متن داخل شکلها	
7	8	پاورقی و پینوشت	
8	9	متن در جدولها	
9	9	فرمولها (*)	
9		شماره روابط	
8		مراجع	

^(*)فونت فرمول لاتين مىتواند كامبريا مث نيز باشد.

3-روابط و فرمولهای ریاضی (استایل عنوان سطح ۱)

روابط و فرمولهای ریاضی با استفاده از ابزار معادله ^۱ موجود در نرمافزار آفیس با قلم کامبریا مث^۲ 9pt و از سمت چپ تایپ میشوند و با شماره گذاری از یک مشخص شده و برای اشاره به آنها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده میشود. یادآور میشود در نسخههای 2007 به بعد نرمافزار آفیس، فونت

در نوشتن فرمولها رعایت نکات زیر الزامی است:

-1 در فرمولنویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک میآیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک میآیند.

-2در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.

-3وقتی ادامه فرمول در سطرهای بعدی آورده میشود، باید از سطر دوم به بعداز سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.

-4شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج میشود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته میشود.

-5 دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله (a.b) به جای نقطه ضرب (a·b) استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^{\kappa}} = Q_{11}^{\kappa} \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^{\kappa} + Q_{66}^{\kappa}) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k \\
+ Q_{22}^{\kappa} \sin^4 \theta^k$$
(1)

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt$$
(2)

$$\varepsilon_{xy}^{0} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \tag{a-3}$$

4-قواعد نوشتاری(استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایهی املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصلهی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصلهی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید –» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را بهصورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «میشود» است.

در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمهی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصلهی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل ها» را بهصورت «شکلها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادات» و «اساتید» اشتباه و درست آنها «پیشنهادها» و «استادان» است.

-1-4 علايم، نشانهها و ارقام (استايل عنوان سطح 2 و 3)

از علایم و نشانههای متداول در زبان فارسی و همچنین از علایم و نشانههای به کار رفته در متون مهندسی مکانیک می توان استفاده نمود. استفاده از ممیز فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقا یکسان باشد.

مقالات نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

نشريه علوم و فناوري كاميوزيت

کامبریا مث بهطور پیشفرض برای نوشتن روابط و فرمولها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتیالمقدرو برای تایپ فرمولها از نرمافزار مثتایپ^۳ استفاده نشود.

³ Math Type

نام و نامخانوادگی نگا*ر*نده

در صورت نیاز، لیست علایم و نشانهها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج میشود. این لیست بهصورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5-فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

مدول یانگ (Nm⁻²) مدول یانگ (Nm⁻²) نیرو (Nm⁻²) دما *P* دما (K) علایم یونانی

(Nm⁻²) تنش σ ε کرنش

بالانويسها

تعداد لايه k

زيرنويسها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6-تقدیر و تشکر و پیوستها(استایل عنوان سطح ۱)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانهها آورده میشود. باید به پیوستها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7-مراجع(استایل عنوان سطح ۱)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون زدگی 5 میلی متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می شود. نکات زیر را در مرجع نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله
 باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونتها در مرجعنویسی باید با همان
 دقتی که در نمونهها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- مجددا تاکید میشود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نمودهاند [2-10]" خودداری شود.
- مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی
 که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است،
 خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است
 [5]." این نوع ارجاع <u>نادرست</u> است و کمکی به خواننده در درک مطلب
 نخواهد داشت.
 - 🗸 از ارجاع به پایاننامههای کارشناسی خودداری نمایید.
 - ✓ نام مجلهها و نظایر آن بهطور کامل و بدون اختصار آورده شود.

تذکر: برای نوشتن مراجع می توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت ^۱ در نرمافزار اِندنُت ^۲ استفاده کنید. این فایل از طریق وب – سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرمافزار انتقال یابد. این پوشه معمولا در مسیر زیر در دسترس

Program Files \rightarrow EndNote X# \rightarrow Styles

برای مراجع فارسی در این نرم^افزار کافی است در قسمت زبان^۲ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

 Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

[2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتابها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ،

مثال:

[3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه ها؛

[4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع؛

[5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه های الکترونیکی؛

 [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm, available in 13, February 2005.

استانداردها؛

[7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

³ Language

قالب پیش نویس مقالات نشریه علوم و فناوری کامپوزیت

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote

۲ نیسریه علوم و فناوری کامپوزیت در مع نیسریه علوم و فناوری کامپوزیت نیسریه علوم و فناوری کامپوزیت