



## بررسی تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی بهبود خواص مکانیکی اتصالات تک لبه کامپوزیتی پیچی

علی رضا شماعی کاشانی<sup>1</sup>، محمودمهرداد شکریه<sup>2\*</sup>

1- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
 \*صندوق پستی 16846-13114، shokrieh@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان:

آزمایش

اتصال تک لبه کامپوزیتی

نانوالیاف کربن

روش المان محدود

### چکیده

استفاده از نانوذرات به منظور بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی به صورت روزافزون در صنعت افزایش می یابد. تحقیق حاضر با استفاده از انجام آزمایش های گسترده تاثیر افزودن نانوالیاف کربن به اتصال تک لبه کامپوزیتی پیچی از جنس شیشه اپوکسی بر روی خواص مکانیکی اتصال را بررسی می کند. مود خرابی تمامی نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM D5961 از نوع لهیدگی است. در این تحقیق، از طراحی آزمایش فاکتوریل عمومی استفاده شد. لایه چینی و نانوالیاف کربن به عنوان فاکتورهای کنترلی در نظر گرفته شد و تاثیر آنها روی پارامترهای مکانیکی سفتی اتصال، استحکام و جذب انرژی آن بررسی شد. همچنین با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی سفتی اتصال مکانیکی تک لبه کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور چهار لایه چینی مختلف با تعداد لایه 45 درجه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است مدل فوق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل تئوری موجود راستی آزمایی شده است. تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل ملاحظه گردید.

## 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

Experiment  
 Single-lap composite joint  
 Carbon nanofibers  
 Finite element method

### Abstract

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 layouts with different 45-degree layers were investigated. The present FEM model was validated by the experimental results and available theoretical model.

### 1- مقدمه

در زمینه بررسی آزمایشگاهی اتصالات مکانیکی کامپوزیتی، اسمیت و همکاران [1] استحکام اتصال مکانیکی تک لبه و دولبه را برای لایه چینی شبه ایزوتروپیک و لایه چینی با الیاف متعامد از جنس الیاف کربن بررسی کرده و مشاهده کردند که استحکام اتصال تک لبه به دلیل تاثیرات خمش ثانویه، کم تر از اتصال دولبه است. کامانیو و همکاران [2] به صورت آزمایشگاهی مکانیزم آسیب اتصالات پیچی کامپوزیتی را بررسی کردند. مشاهدات آن ها نشان می دهد که خرابی،

از اتصالات به دلیل امکان اتصال اجزای مختلف اعم از فلزی و کامپوزیتی به طور گسترده استفاده می شود. در میان اتصالات شامل اتصالات مکانیکی، اتصالات چسبی و اتصالات چسبی-پیچی، استفاده از اتصالات مکانیکی به دلیل امکان باز و بسته کردن و تعمیر، مقاومت در برابر شرایط محیطی، ظرفیت بالای باربری و وابسته نبودن به آماده سازی سطح به طور روزافزون افزوده می شود.

Please cite this article using:

Shamaei-Kashani, A. and Shokrieh, 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. 8, No. 1, pp. \*-\*, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

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-11<sup>1</sup> 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<sup>2</sup> 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 S<sub>90/45/90</sub> و S<sub>45/90/45</sub> به‌روش دستی ساخته شد. همانطور که در مراجع [14, 15] 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 0.25 در نظر گرفته شده است. همچنین کسر حجمی الیاف شیشه نیز 42٪ در نظر 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 15:100 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 D 5961-10 [16] برش می‌خورند. سپس نمونه‌های برش‌خورده با استفاده از دستگاه فرز در دور 2000 دور بر دقیقه با مته به قطر 3.5 میلی‌متر سوراخکاری می‌شوند.

هندسه اتصال مورد استفاده در شکل 1 نشان شده است. روند آزمایش و هندسه اتصال مطابق استاندارد ASTM D 5961-10 [16] انجام گرفته است. با در نظر 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 مرکز سوراخ تا لبه نمونه به قطر پیچ برابر 4 است. اتصالات با لایه‌چینی‌های S<sub>90/45/45</sub> و S<sub>45/90/45</sub> (که به ترتیب لایه‌چینی I و II نامیده می‌شوند) ساخته شده و ضخامت هر لایه معادل 0.2 میلی‌متر است.

قطر پیچ 3.5 میلی‌متر، عرض نمونه، 21 میلی‌متر و فاصله مرکز سوراخ از لبه نمونه 14 میلی‌متر در نظر 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.

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 می‌شود.

مک‌کارتی و همکاران [3] اتصال تک‌لبه تک‌پیچ 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. شمعی کاشانی و شکرپه [6] و طاهری-بهرز 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/اپوکسی) 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 می‌کند. در زمینه تاثیر افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمینه، شکرپه 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 0.125 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 آفت، 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 می‌شود که توانایی پیش‌بینی سفتی اتصالات تک‌لبه کامپوزیتی با لایه‌چینی‌های مختلف و با نانوذره داراست. مدل المان محدود ارائه‌شده با داشتن خواص مکانیکی لایه‌تک‌جهته کامپوزیتی با و بدون نانوالیاف کربن، سفتی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی پیچی را با در نظر

<sup>2</sup> Grupo Antolin SL

<sup>1</sup> HA-11

### 3- مدل المان محدود سه‌بعدی

در این قسمت با استفاده از المان محدود سه‌بعدی سفتی اتصال تک‌لایه کامپوزیتی پیش‌بینی می‌شود. برای این منظور و برای محاسبه سفتی اتصال تک‌لایه، اتصال تک‌لایه 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، 13 و 23 و استحکام کششی و فشاری تک‌لایه کامپوزیتی در جهات 1، 2، 3 و استحکام‌های برشی تک‌لایه است.

اتصال تک‌لایه با دو لایه چینی  $s_{[-45/0/45/90]}$  و  $s_{[90/-45/45]}$  برای مقایسه نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی با نتایج آزمایشی و با دو لایه چینی  $t_{[45/-45]}$  و  $t_{[45/90]}$  برای بررسی تاثیر نانوالیاف کربن روی چندلایه‌های کامپوزیتی مختلف با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. لایه‌چینی‌های شماره 1، 2 و 4 به دلیل متقارن بودن تنها تحت خمش ثانویه ناشی از عدم تقارن هندسی اتصال تک‌لایه هستند؛ درحالی‌که لایه‌چینی شماره 3 به دلیل 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 نسبتاً 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/اپوکسی با خواص مادی مطابق جدول 1، تعریف می‌شود. پیچ فولادی نیز دارای مدول الاستیسیته 210 گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.3 است. لازم به‌ذکر است که برای محاسبه خواص مکانیکی تک‌لایه از روابط میکرومکانیکی چمیس که در تحقیق شمعی-کاشانی و شکریه [6] آورده شده است، استفاده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تک‌لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی

Table 1 Mechanical properties of unidirectional glass/epoxy composite

پارامتر	$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\theta_{12}$	$\theta_{13}$	$\theta_{23}$
بدون نانو	30.5	6.2	6.2	1.9	1.9	1.9	0.29	0.29	0.29
با نانو	30.5	6.9	6.9	2.5	2.5	2.5	0.29	0.29	0.29

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

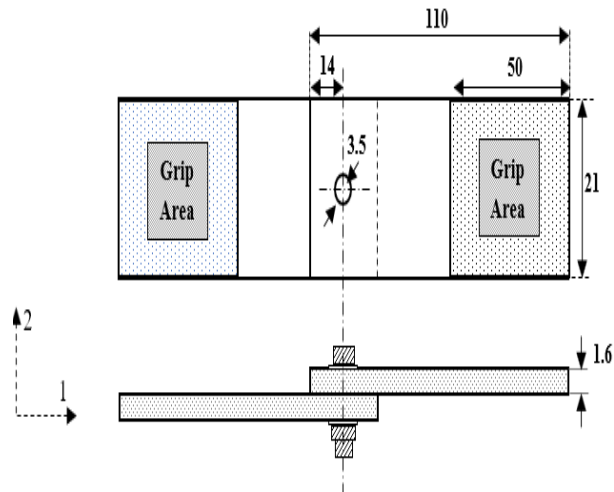


Fig. 1 An illustration of single-lap composite bolted joint (all dimensions in mm)

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

برای انجام آزمایش از دستگاه سننم 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 به‌ذکر است که سرعت حرکت فک دستگاه برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه معادل با نرخ کرنش  $0.0048$  بر ثانیه است. لازم به‌ذکر است که در این تحقیق نرخ کرنش به‌عنوان تغییرات کرنش لهدیگی اتصال نسبت به زمان تعریف می‌شود. برای محاسبه سفتی وتری لهدیگی اتصال تک‌لایه کامپوزیتی پیچی، مطابق با رابطه زیر، شیب ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش لهدیگی اتصال محاسبه می‌شود [16]:

$$E^{br} = \frac{\Delta \sigma^{br}}{\Delta \epsilon^{br}} \quad (1)$$

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

به‌منظور بررسی تاثیر برخی از متغیرهای اثرگذار بر رفتار مکانیکی اتصال تک‌لایه کامپوزیتی، طراحی فاکتوریل عمومی استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، فاکتورهای لایه‌چینی و نانوالیاف کربن به‌عنوان فاکتورهای اثرگذار بر رفتار مکانیکی اتصال انتخاب شدند. برای بررسی تاثیر نانوذره، دو سطح بدون نانوذره و با درصد وزنی نانوذره 0.25 در نظر گرفته می‌شود. کسر وزنی 0.25٪ با توجه به تحقیق شکریه و همکاران [14, 15] انتخاب شده است. در این تحقیق کسر وزنی بهینه افزودن نانوذرات 0.25٪ گزارش شده است. برای بررسی تاثیر لایه‌چینی نیز دو لایه‌چینی  $s_{[-45/0/45/90]}$  و  $s_{[90/-45/45]}$  در نظر گرفته شده است. تفاوت این دو لایه‌چینی در تعداد لایه‌های 45-درجه است تا تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی رفتار مکانیکی اتصال بهتر مشاهده شود.

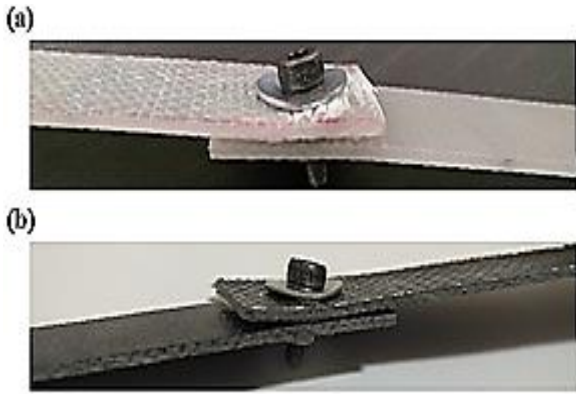
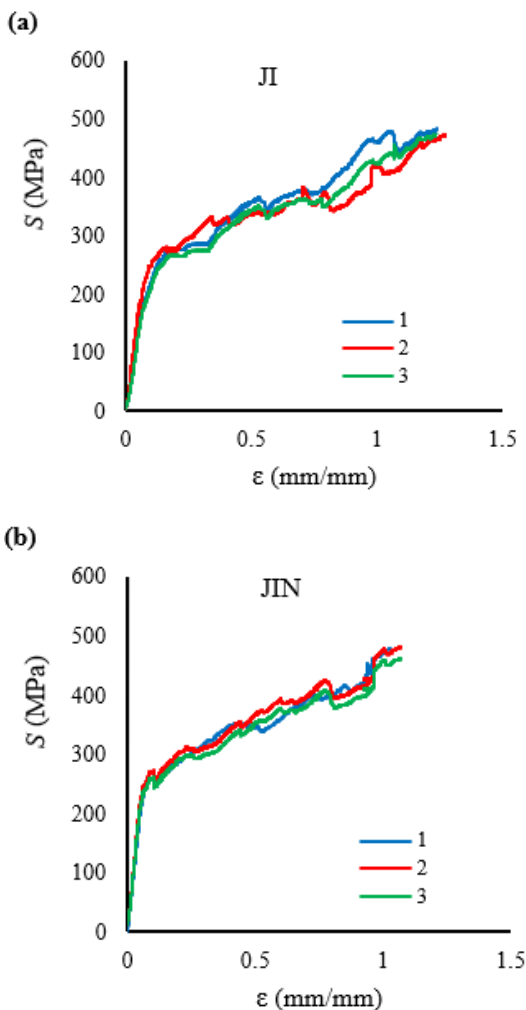


Fig. 4 Tested single-lap bolted composite joint a) JII, b) JIIN

شکل 4 نمونه‌های آزمایش شده اتصال تک‌لبه کامپوزیتی پیچی الف (JII، ب) JIIN

شکل 5 منحنی تنش-کرنش لهیدگی اتصال تک‌لبه با یک پیچ با لایه‌چینی [-45/0/45/90] با نانوالیاف کربن، JI، با لایه‌چینی [90/45/45] بدون نانوالیاف کربن، JII، و با لایه‌چینی [90/-45/45] با نانوالیاف کربن، JIIN، تا کرنش لهیدگی نهایی اتصال نشان می‌دهد.



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

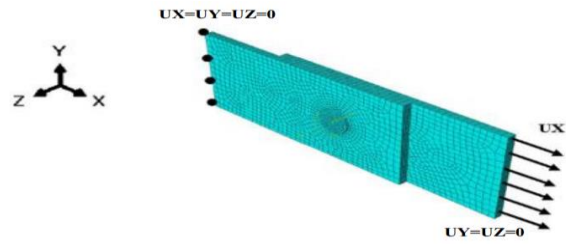


Fig. 2 Mesh pattern and definition of the boundary condition of the joint in ABAQUS finite element software

شکل 2 مش‌بندی، نحوه اعمال بار و شرایط مرزی اتصال در نرم‌افزار المان محدود آباکوس

برای حل مسئله، اتصال تک‌لبه به 19293 المان تقسیم می‌شود که 18120 المان آن از نوع C3D8 بوده و 1173 المان از نوع C3D8R است. این تعداد المان حداقل مقدار المانی است که با آن پاسخ بار-جابجایی مسئله نزدیک به مقدار واقعی است.

#### 4- نتایج

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 ارائه شده برای پیش‌بینی سفتی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی ارائه می‌شود.

#### 4-1- نتایج آزمایشی

مطابق انتظار، مود خرابی تمامی نمونه‌ها از نوع لهیدگی بود. با این تفاوت که در اتصال JII، به دلیل خمش ثانویه شدیدتر، آسیب لهیدگی شدیدتری اتفاق افتاده است. مودهای خرابی لایه‌لایه شدن، برش و شکست الیاف در نهایت منجر به خرابی فاجعه‌آمیز اتصال می‌شود. نکته قابل توجه در مورد تمامی اتصالات، 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.

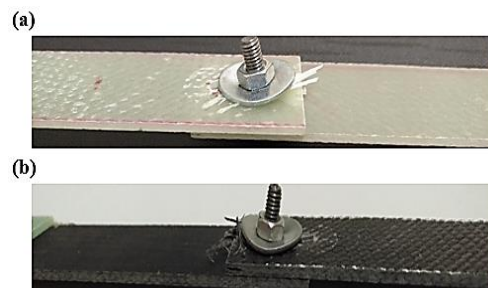


Fig. 3 Tested single-lap bolted composite joint a) JI, b) JIIN

شکل 3 نمونه‌های آزمایش شده اتصال تک‌لبه کامپوزیتی پیچی الف (JI، ب) JIIN

است. در ادامه تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی رفتار مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با دقت در شکل 5 و جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمینه اتصال JII، خواص مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که افزودن نانوالیاف کربن به اتصال JI تنها منجر به افزایش قابل ملاحظه سفتی لهیدگی و جذب انرژی می‌شود. افزودن نانوالیاف کربن استحکام آفت 2٪، و استحکام نهایی اتصال JII، و سفتی لهیدگی و جذب انرژی اتصال‌های JI و JII را افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که افزودن نانوالیاف کربن تنش شروع آسیب اتصال‌های JI و JII، استحکام آفت 2٪، و استحکام نهایی اتصال JI، و کرنش نهایی اتصال‌های JI و JII را تغییر نمی‌دهد. شکل 6 افزایش خواص مکانیکی اتصال‌های JI و JII را با افزودن نانوالیاف کربن نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این شکل نمادهای DIBL، S، S'، E، و e به ترتیب معرف تنش شروع آسیب، استحکام آفت 2٪، استحکام نهایی، سفتی و کرنش شکست اتصال است.

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

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

JIIIN	JII	JIN	JI	خواص مکانیکی
182.6	183.5	206.4	206.8	تنش شروع آسیب (MPa)
240.0	213	241.9	239.9	استحکام آفت (MPa)
427.4	377.1	478.2	469.5	استحکام نهایی (MPa)
3.1	2.7	3.6	3.3	سفتی لهیدگی (GPa)
1.03	1.02	1.09	1.08	کرنش نهایی (٪)
25.4	22.6	29.5	26.6	جذب انرژی (J)

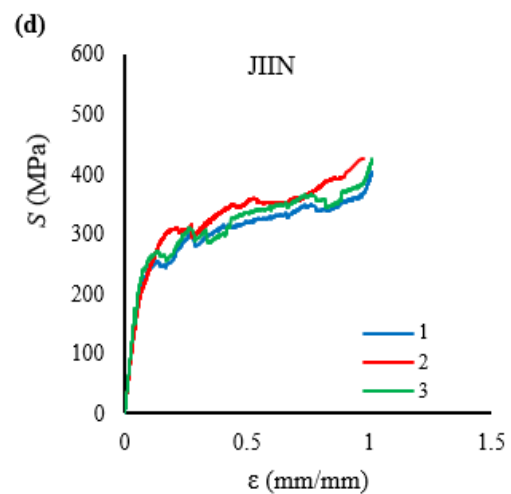
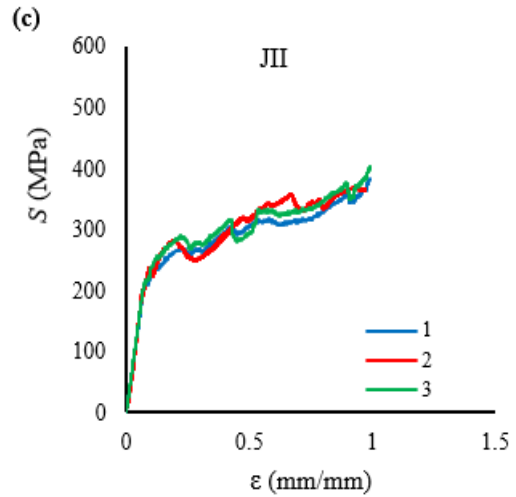


Fig. 5 Bearing stress-strain curve of Joints a) JI, b) JIN, c) JII, and d) JIIIN

شکل 5 منحنی تنش-کرنش لهیدگی اتصال‌های الف (JI ب) JIN ج) JII و د) JIIIN

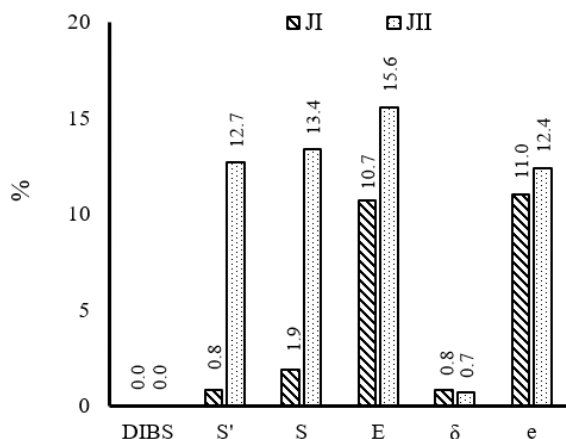


Fig. 6 Improvement in mechanical properties of single-lap composite bolted joint due to adding carbon nanofiber (%)

شکل 6 مقدار افزایش خواص مکانیکی اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی با افزودن نانوالیاف کربن (٪)

مطابق شکل 5 قسمت‌های الف تا د، منحنی تنش-کرنش لهیدگی یک ناحیه خطی دارد که شیب آن به‌طور معمول با افزودن نانوالیاف کربن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تمامی منحنی‌های تنش-کرنش لهیدگی رفتار غیرخطی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. تنش لهیدگی شروع آسیب، استحکام لهیدگی آفت، استحکام نهایی، سفتی و تری لهیدگی و کرنش لهیدگی نهایی اتصال تکلبه نسبت به افزودن نانوالیاف کربن حساس بوده و با تغییر آن، تغییر می‌کند.

روند آسیب در اتصالات کامپوزیتی به‌صورت انباشت آسیب است. پیش از شروع آسیب در اتصال تکلبه کامپوزیتی پیچی، آسیب در فاز زمینه چندلایه کامپوزیتی تحت بار فشاری در مقادیر به‌نسبت کم اتفاق می‌افتد [18,19]. سپس، در اثر وقوع خمش ثانویه در اتصال تکلبه، آسیب لهیدگی در چندلایه کامپوزیتی (در رزین و الیاف) و در اطراف سوراخ ایجاد شده که این باعث اولین افت بار در منحنی بار-جابجایی اتصال می‌شود [20,21]. نشان داده شده است [18] که رشد آسیب در اتصال تکلبه ناشی از وقوع جدایش بین‌لایه‌ای، لغزش بین الیاف-رزین و شکست الیاف است. بعد از بارنهایی اتصال، تخریب نهایی در اتصال به‌وقوع می‌پیوندد. تخریب نهایی اتصال تکلبه از نوع فاجعه‌آمیز

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 تاثیر	مقدار P	F <sub>0</sub>	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
57.7	0.000	88.6	1.4	1	1.4	لایه‌چینی
31.5	0.000	48.3	0.8	1	0.8	نانوالیاف کربن
0.5	0.417	0.7	0.01	1	0.01	برهم‌کنش
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 و تری 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 تاثیر	مقدار P	F <sub>0</sub>	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
58.3	0.000	98.3	80.8	1	80.8	لایه‌چینی
32.0	0.001	54.0	44.4	1	44.4	نانوالیاف کربن
0.2	0.217	0.3	0.24	1	0.24	برهم‌کنش
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 58.3% می‌گذارد. پس از آن فاکتور نانوالیاف کربن با درصد تاثیر 32.0% تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی جذب انرژی اتصال دارد. همچنین مشاهده می‌شود که برهم‌کنش بین فاکتورهای لایه‌چینی و نانوالیاف کربن مقداری معنادار ندارد.

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

همان‌گونه که از شکل 6 مشاهده می‌شود، نانوالیاف کربن تاثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای روی رفتار مکانیکی اتصال JII نسبت به لایه‌چینی JI دارد. استحکام آفت و استحکام نهایی اتصال JIII با افزودن نانوالیاف کربن حدود 13% بهبود می‌یابد. درحالی‌که استحکام اتصال JI کمتر از 2% بهبود دارد. افزودن نانوالیاف کربن به اتصال‌های JII و JI به ترتیب 15.6% و 10.7% منجر به بهبود سفتی می‌شود. تاثیرپذیری بیشتر اتصال JIII نسبت به اتصال JI با افزودن نانوالیاف کربن را می‌توان به تعداد لایه‌های 45° بیشتر اتصال JIII نسبت به اتصال JI نسبت داد. خواص تک‌لایه کامپوزیتی 45° نسبت به تک‌لایه 0° بیشتر وابسته به خواص مکانیکی فاز زمینه است. واضح است که با افزودن نانوالیاف کربن به تک‌لایه کامپوزیتی خواص فاز زمینه بهبود می‌یابد.

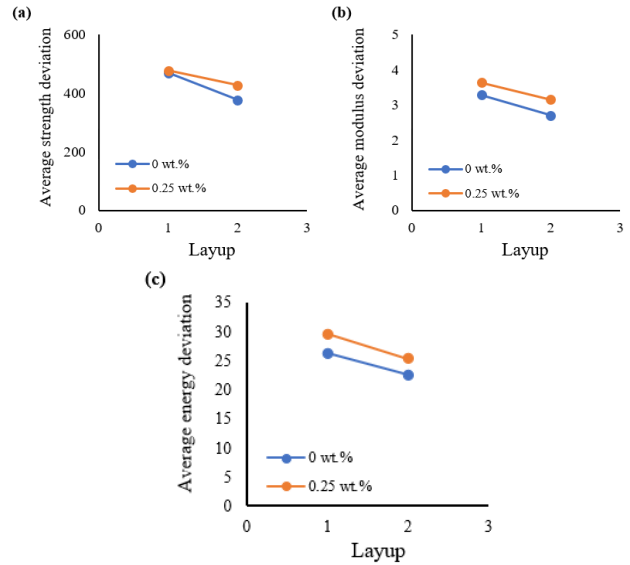
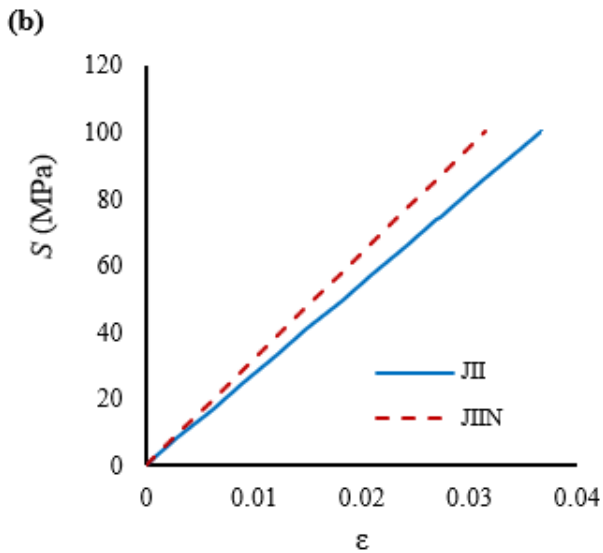
شکریره و همکاران [14] نشان دادند که با افزودن نانوالیاف کربن به فاز زمینه تک‌لایه کامپوزیتی، مدول و استحکام فاز زمینه افزایش می‌یابد. با استفاده از روابط مایکرومکانیک [22] می‌توان نشان داد که با افزودن نانوالیاف کربن مدول کشش عرضی و مدول برشی لایه تک‌جهته کامپوزیتی افزایش می‌یابد. با استفاده از روابط 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 (شمعی-کاشانی و شکریره [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 لایه‌لایه شدن به دلیل تقویت فاز واسط الیاف-رزین و تقویت فاز رزین افزایش دهد [24-26]. با افزایش مقاومت چندلایه کامپوزیتی به لایه‌لایه شدن، 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. جدول‌های 3 تا 5 نتایج تحلیل واریانس برای استحکام نهایی، سفتی لهیدگی و جذب انرژی اتصال را در بازه اطمینان 95% نشان می‌دهد. تحلیل واریانس با محاسبه مجموع مربعات تمامی داده‌های آزمایشی شروع می‌شود. سپس میانگین مربعات با تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی یک فاکتور مشخص محاسبه می‌شود. سپس مقدار F<sub>0</sub> 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 تاثیر	مقدار P	F <sub>0</sub>	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
71.5	0.000	109.3	25676.3	1	25676.3	لایه‌چینی
12.1	0.001	18.4	4328.9	1	4328.9	نانوالیاف کربن
5.9	0.008	9.1	2134.6	1	2134.6	برهم‌کنش
10.5			234.8	16	3757.3	خطا
83.6				19	35897.1	مجموع



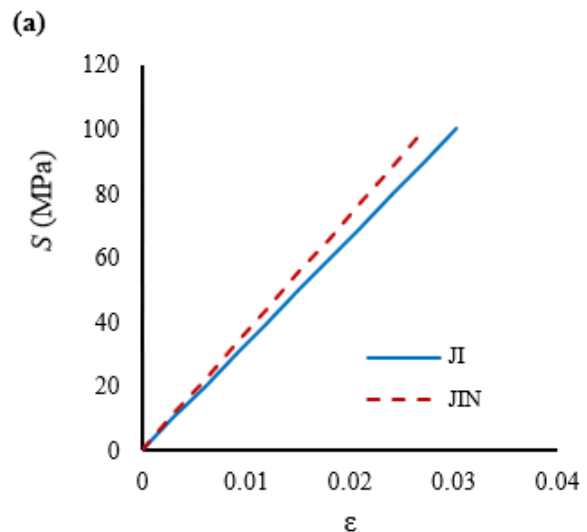
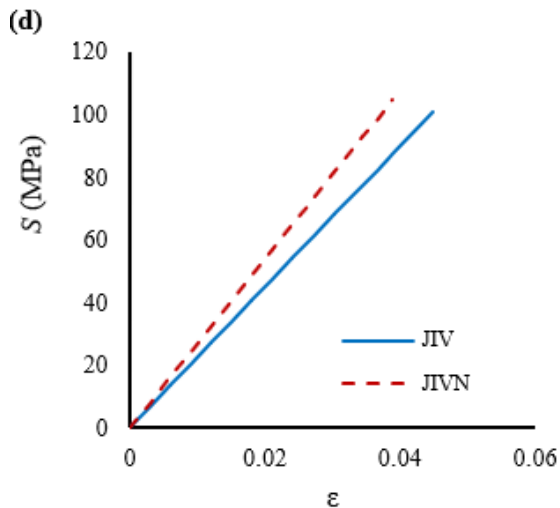
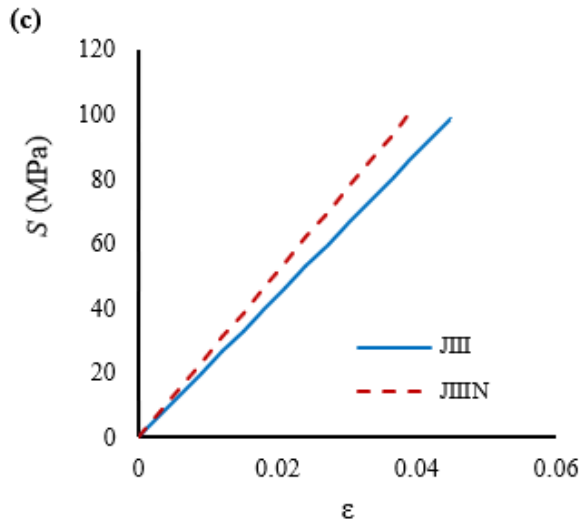
**Fig. 7** Layup-CNF interaction plot of single-lap composite bolted joints for, a) ultimate strength, b) stiffness, c) energy absorption

شکل 7 منحنی برهم‌کنش لایه‌چینی-نانوالیاف کربن اتصالات تک‌لبه 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- نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی

در این قسمت نتایج حل المان محدود ارائه می‌شود. به‌منظور بررسی تاثیر افزودن نانوالیاف روی سفتی اتصال تک‌لبه با لایه‌چینی‌های مختلف، اتصال تک‌لبه با لایه‌چینی‌های  $[(45/-, [90/-45/2/45]_s, [-45/0/45/90]_s, [45/2/90]_T$  و  $[45/-45]_{2s}$  که به‌ترتیب با لایه‌چینی JI، JII، JIII، JIV و JIV نشان داده می‌شوند، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی و تحلیل شد. لازم به ذکر است در منحنی‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود، تمامی اتصالات تا تنش 100 مگاپاسکال (باری فرضی در ناحیه الاستیک تمامی اتصالات تحت بررسی در این تحقیق) تحت بار قرار گرفته‌اند.



**Fig. 8** Results of finite element model for single-lap composite bolted joint (comparison of joint with and without Carbon nanofiber), a) JI, b) JII, c) JIII, and d) JIV

شکل 8 حل المان محدود اتصال تک‌لبه کامپوزیتی پیچی (مقایسه اتصال بدون نانوالیاف کربن و با آن) الف) JI، ب) JII، ج) JIII و د) JIV



همان‌گونه که از جدول 6 مشاهده می‌شود، مدل المان محدود سه‌بعدی با دقت بسیار مطلوبی سفتی‌لهیدگی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی پیچی را پیش‌بینی می‌کند. به‌طوری‌که حداکثر خطای مدل المان محدود سه‌بعدی، کمتر از 1% است. با مقایسه نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی با مدل تئوری ارائه‌شده [6] مشاهده می‌شود دو مدل نتایجی نزدیک به یکدیگر با حداکثر اختلاف 3% نشان می‌دهند. بنابراین مشاهده می‌شود استفاده از مدل المان محدود سه‌بعدی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی با توجه به دقت بسیار بالایی که دارد، در موارد خاص جایگزین مناسبی برای روش آزمایشی با توجه به هزینه بالایی که دارد، می‌باشد.

### 5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با انجام آزمایش‌های گسترده، تاثیر افزودن نانوالیاف کربن روی خواص مکانیکی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد افزودن نانوالیاف کربن باعث افزایش خواص مکانیکی اتصال‌های با لایه‌چینی  $[90/45/45]_2$  و  $[-45/0/45/90]$  شامل: استحکام آفست 2/ (12.7%, 0.8%), استحکام نهایی (13.4%, 1.9%), سفتی (10.7%, 15.6%), کرنش نهایی (0.7%, 0.8%) و انرژی جذب‌شده (12.4%, 11.0%) اتصال می‌شود. همچنین به‌منظور محاسبه سفتی اتصال تک‌لبه کامپوزیتی با لایه‌چینی مختلف، مدل المان محدود سه‌بعدی ارائه شد که توانایی محاسبه مدول اتصال را با دقتی مطلوب داراست. با مقایسه نتایج مدل المان محدود ارائه‌شده 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

- [1] 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, Multi-bolt 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.

از نتایج شکل 6 می‌توان مشاهده کرد که افزودن نانوالیاف کربن منجر به بهبود سفتی تمامی اتصال‌ها با لایه‌چینی‌های مختلف با افزودن نانوالیاف کربن به اتصال می‌شود؛ تفاوت در مقدار افزایش سفتی است. همانند نتایج آزمایشی، با استفاده از نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی مشاهده می‌شود که با افزایش لایه‌های  $45^\circ$  درصد افزایش سفتی اتصال، افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشترین اختلاف سفتی اتصال با افزودن نانوالیاف کربن مربوط می‌شود به اتصال JIV با لایه‌چینی  $2s_{[45/-45]}$ . اختلاف سفتی اتصال‌های JI, JII, JIII, و JIV با افزودن نانوالیاف کربن به اتصال به‌ترتیب برابر است با 11.2%, 16.4%, 17.2% و 20.1%. بنابراین می‌توان انتظار داشت با افزودن نانوالیاف کربن به اتصال تک‌لبه کامپوزیتی با چندلایه از جنس لایه‌های  $45^\circ$  بیش‌ترین بهبود خواص مکانیکی اتصال را شاهد باشیم.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل المان محدود سه‌بعدی ارائه‌شده توانایی پیش‌بینی سفتی اتصال مکانیکی تک‌لبه را داراست. در قسمت بعد، نتایج فوق با نتایج آزمایشگاهی و مدل تئوری مقایسه می‌شود.

### 3-4- ارزیابی نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی

در این قسمت نتایج مدل المان محدود سه‌بعدی ارائه‌شده با نتایج آزمایشی تحقیق حاضر و مدل تئوری پیش‌بینی رفتار مکانیکی اتصالات مکانیکی تک‌لبه کامپوزیتی ارائه‌شده توسط شماعی-کاشانی و شکرپه [6] مقایسه می‌شود. 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]

انواع مدل المان محدود	انواع مدل المان محدود	تئوری [6]	آزمایش	مدل المان محدود	انواع اتصال
اختلاف مدل المان محدود با تئوری (%)	اختلاف مدل المان محدود با آزمایش (%)				
0.6	0.3	3.28	3.29	3.30	J I
1.7	0.8	3.61	3.64	3.67	J I N
1.9	0.4	2.68	2.72	2.73	J II
2.6	1.0	3.10	3.15	3.18	J II N
0.0	-	2.20	-	2.20	J III
0.8	-	2.55	-	2.57	J III N
0.0	-	2.25	-	2.25	J IV
0.7	-	2.68	-	2.70	J IV N

از نتایج جدول 6 مشاهده می‌شود با وجود یکی بودن تنوع لایه‌های مختلف و تعداد آنها در اتصال‌های JII و JIII، سفتی اتصال JII به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از سفتی اتصال JIII است. این موضوع به عدم تقارن لایه‌چینی اتصال JIII بر می‌گردد و در این اتصال به‌دلیل 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 JIII اتفاق می‌افتد باعث افت بیشتر این اتصال می‌شود.



- [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.