



ارزیابی بهبود در خصوصیات مکانیکی چندلایه های کامپوزیتی از جنس شیشه/وینیل استر تحت بار خمشی با کمک آنالیز خرابی پیشرونده

علیرضا نظری¹، محمدزمان کبیر^{2*}، حسین حسینی تودشکی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران

2- استاد، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران

3- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-4413، mzkabir@aut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله تغییرات مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی چندلایه ها با استفاده از مدل های المان محدود شبیه سازی شده از نمونه های آزمایشگاهی از جنس شیشه/وینیل استر مورد آزمایش و بررسی واقع شد. با استفاده از مدل های المان محدود دارای المان های سه بعدی با قابلیت خرابی پیشرونده و همچنین با تعریف دقیق رابطه تماس بین تیر و تکیه گاه، تاثیر رفتار غیرخطی مواد و هندسه در رفتار خمشی تیرها شبیه سازی شد. در ابتدا آزمایشات کشش به منظور ملاحظه رفتار خرابی پیشرونده در چندلایه ها و تصدیق مدلسازی خرابی انجام شده و شبیه سازی گردید. در ادامه با اجرای تست های خمشی سه نقطه ای و سپس شبیه سازی تیرها، تغییر مدول الاستیسیته خمشی با مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایشات و مدل های المان محدود اندازه گیری شد. برای پیشگویی خرابی از معیارهای بر پایه کرنش به جای معیارهای بر پایه تنش استفاده شد. با داشتن کرنش های خرابی ثابت برای نمونه های کششی و خمشی و از طرفی تغییر مدول الاستیسیته برای لایه چینی های مختلف چندلایه ها، تغییر مقاومت نهایی تجربه شده برای نمونه ها تحت بار خمشی تعیین شد. با توجه به وابسته بودن تغییر مدول الاستیسیته چندلایه های کامپوزیتی به عملکرد فاز پلیمری ماده، این تغییر به عملکرد لایه های 90° در چندلایه های با لایه چینی های مختلف نسبت داده شد و در انتها نموداری برای تغییر مدول الاستیسیته لایه های 90° مربوط به لایه چینی های مختلف ارائه شد.</p>	<p>دریافت: 95/5/24 پذیرش: 96/3/2</p> <p>کلیدواژگان: تیر کامپوزیتی مقاومت خمشی مدول الاستیسیته خمشی خرابی پیشرونده</p>

Evaluation of enhancement in the mechanical properties of the glass/vinylester composite laminates under flexural load using progressive failure analysis

Alireza Nazari¹, Mohammad Zaman Kabir^{1*}, Hossein Hosseini Toudeshky²

1-Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2-Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, mzkabir@aut.ac.ir

Keywords

Composite beam
Flexural strength
Flexural modulus
Progressive failure

Abstract

There are numerous researches which indicate that the mechanical properties of the composite laminates vary under bending load in comparison to these parameters measured under the tensile load. In this paper, the performance of some glass/vinylester composite laminates was examined. Using 3D FE models for the specimens and progressive failure analysis of the models, an accurate simulation of the contact between the composite beam and the supports was implemented. Also the influence of material and geometric non-linearity on the flexural load carrying behavior of the beams was investigated. At the first, the tension experiments were conducted for observation of the progressive failure behavior in the composite laminates and verification of the failure model. In the following, by implementing the three-point-bending tests and then simulation of the composite beam specimens, variation of the flexural modulus was investigated by the aid of comparing the load-deflection curves obtained by the experiments and the FE models. For prediction of the failure, the strain-based failure criteria were used rather than the stress-based failure criteria. Since the failure strains were identical for tensile and bending specimens, variation of the flexural modulus led in variation of the flexural strength. As variation of the flexural modulus was considered dependent on the performance of the polymeric phase of the composite laminates, this variation was attributed to the performance of the 90° layers. The outcome of the results was a graph which showed variation of the flexural modulus of 90° layers for various layups of the laminates.

گرفته است. تحقیقات متعددی نشان می دهند که خصوصیات مکانیکی چندلایه های کامپوزیتی مانند مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی زیر بار خمشی نسبت به مقادیر این پارامترها که زیر بارهای غشایی اندازه گیری شده اند متفاوت می باشند. برای مواد پلیمری عموماً دو نوع مدول الاستیسیته یکی بصورت خمشی و دیگری بصورت کششی تعریف می شود و

1- مقدمه

امروزه در صنایع مختلف نظیر هوافضا، پزشکی و اکثر مطالعاتی که در مورد عملکرد چندلایه های کامپوزیتی انجام شده است رفتار مکانیکی و تحمل بار این اعضا را تحت بارهای محوری ملاحظه کرده اند و بعنوان مثال رفتار مکانیکی این اعضا تحت بارهای خمشی به نسبت، کمتر مورد بررسی قرار

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Nazari, A. Zaman Kabir, M. and Hosseini Toudeshky, H., "Evaluation of enhancement in the mechanical properties of the glass/vinylester composite laminates under flexural load using progressive failure analysis", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 51-60, 2018.

مدل های شبیه سازی شده در تحقیقات قبلی برای ارزیابی عملکرد خمشی تیرها معمولاً بعلاوه در نظر نگرفتن تاثیرات رفتار غیرخطی مواد از جمله امکان آسیب در چندلایه ها قبل از رسیدن به مقاومت نهایی و همچنین عدم مدلسازی دقیق ارتباط بین تیر کامپوزیتی و تکیه گاه دارای نتایج دقیق نمی باشد [11,10]. در مقاله حاضر مدل هایی که برای تعیین مدول خمشی چندلایه ها شبیه سازی شد دارای دقت قابل قبول برای مدلسازی تماس بین نمونه و تکیه گاه می باشد و از طرفی دلیل در نظر گرفتن قابلیت خرابی پیشرونده ماده توسط المان های سه بعدی می توانند هرگونه تغییری در سختی چندلایه ها را با دقت کافی شبیه سازی کنند. رفتار خرابی مواد کامپوزیتی تحت بار خمشی کمتر در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است و بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد خرابی پیشرونده در مواد کامپوزیتی، رفتار چندلایه ها را تحت بارهای غشایی ملاحظه کرده اند. البته مدلسازی خرابی پیشرونده در مورد چندلایه های تحت بار خمشی قبلاً در تحقیقات انجام شده است حال آنکه شبیه سازی های دقیق تر انجام شده در این مقاله می تواند نتایج آزمایشگاهی را با دقت بیشتری پیش بینی کند. هانگ [12] خرابی پیش رونده در چندلایه های کامپوزیتی تشکیل شده از الیاف بافته شده کربن-اپوکسی را در تیرهای سه نقطه خمشی مورد بررسی قرار داد. او در این تحقیق علاوه بر انجام آزمایشات، مدل خرابی تحلیلی بر اساس ماکزیمم تنش اصلی را برای سلول واحد از چندلایه ها تشکیل داد و نتایج تحلیلی و تجربی خود را مورد مقایسه قرار داد. سانتوس و همکاران [13] تیرهای کامپوزیتی را تحت شرایط سه نقطه خمشی با بارگذاری دینامیکی مدلسازی کرده و سعی کردند مقدار ماکزیمم بار قابل تحمل را در چندلایه های کربن/اپوکسی با تئوری های مختلف آسیب پیش بینی کنند. نکته مورد انتقاد در کار ایشان، عدم قائل شدن تمایز بین مدول الاستیسیته اعلام شده برای چندلایه های کامپوزیتی تحت بار کششی و خمشی می باشد چرا که معمولاً مقدار مدول الاستیسیته و تنش ماکزیمم تجربه شده توسط چندلایه های کامپوزیتی با مقدار این پارامترها زیر بار کششی تفاوت دارد و معیارهای آسیب در مدل های ایشان بر مبنای تنش مورد بررسی قرار گرفته است که دارای دقت کمتری است. شکریه و همکاران [14] تاثیر همزمان آسیب پیشرونده درون لایه ای و بین لایه ای را در ورق های چندلایه ای کامپوزیتی از جنس AS4/PEEK با وجود سوراخ مرکزی مورد بررسی قرار دادند و نتایج دقیقی از مدل های المان محدود خود در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی ارائه دادند.

در این مقاله تغییر خصوصیات مکانیکی در مورد چندلایه های ساخته شده از جنس شیشه/وینیل استر بررسی می شود. در ابتدا آزمایش کشش بر روی چندلایه ها با لایه چینی های مختلف انجام می شود که مدل های المان محدود از طریق مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تصدیق می شوند. در ادامه چندلایه ها زیر شرایط سه نقطه خمشی آزمایش می شوند که مدول الاستیسیته خمشی نمونه ها با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل های المان محدود و آزمایشات در مورد تیرها تعیین می شوند. با توجه به امکان تفاوت ماکزیمم تنش تجربه شده در چندلایه ها زیر بار خمشی و کششی، معیارهای آسیب بر پایه کرنش برای پیشگویی آسیب در چندلایه ها مورد استناد قرار می گیرند. نتایج ارائه شده تغییر مدول الاستیسیته خمشی چندلایه ها را در نتیجه عملکرد فاز پلیمری مواد کامپوزیتی نشان می دهند که بر این اساس، تغییر مدول الاستیسیته لایه های 90° برای لایه چینی های مختلف در نموداری ارائه می شوند. مدلسازی آسیب در چندلایه های کامپوزیتی مورد آزمایش در این مقاله در دو مرحله صورت گرفته است که شامل مرحله شروع

از آنجا که ماده زمینه در مواد کامپوزیتی معمولاً از جنس پلیمری می باشد تفاوت مدول الاستیسیته ماده تحت بار خمشی و بار کششی دور از انتظار نیست حال آنکه میزان این تفاوت برای مواد مختلف می تواند متفاوت باشد. بالا [1] نسبت مقاومت خمشی به مقاومت کششی را برای دو نوع چندلایه از جنس گرافیت-اپوکسی برابر 1.35 و 1.49 نشان داده است. ویتنی و نایت [2] این نسبت را برای چندلایه های از جنس گرافیت-اپوکسی برابر 1.04 و 1.33 بدست آوردند. یولا و همکاران [3] افزایش مقاومت خمشی به مقاومت کششی را برای چندلایه های ساخته شده از کربن-اپوکسی برابر 10 درصد اندازه گیری کردند. کتل و کیبل [4] برای تیرهای چندلایه ساخته شده از جنس کربن-اپوکسی با نسبت دهانه به عمق برابر 20 زیر خمش سه نقطه ای، نسبت مقاومت خمشی به مقاومت کششی را برابر 1.4 تعیین کردند. ایشان سعی کردند این افزایش مقاومت را توسط تئوری ویبول توجیه کنند که در این تئوری شکست چندلایه به وجود نقص در ماده مرتبط می شود بدین ترتیب که زمانی که ماده زیر بار خارجی قرار می گیرد میزان نقص گسترش یافته و با پیوستن نقاط معیوب، آسیب در قطعه پیشروی می کند. تئوری احتمالاتی ویبول فرض می کند که تعداد نقاط معیوب قرار گرفته زیر تنش ماکزیمم ناشی از بارگذاری کششی، بیشتر از تعداد این نقاط زیر تنش ماکزیمم ناشی از بارگذاری خمشی است و به همین دلیل ماکزیمم تنش تجربه شده توسط چندلایه تحت بارهای خمشی نسبت به مقاومت ماده تحت بار کششی مقدار بزرگتری ملاحظه می شود. در تئوری ویبول برای تعیین مقاومت چندلایه معمولاً تقریبی از پراکندگی میزان نقص ها در ماده در نظر گرفته و با یک پارامتر احتمالاتی به نام مدول ویبول معرفی می شود که بر اساس این پراکندگی فرض شده برای نقاط دارای نقص، مقدار ماکزیمم بار قابل تحمل چندلایه تعیین می شود. در میان مطالعات عددی بیشتر تحقیقاتی که برای بررسی علت افزایش مقاومت خمشی نسبت به مقاومت کششی انجام شده است بر اساس تئوری ویبول به ارزیابی مشاهدات آزمایشگاهی پرداخته اند حال آنکه تعیین اختلاف میان مقاومت ماده زیر بارگذاری های مختلف در این روش بسیار وابسته به پارامترهایی مانند مدول ویبول می باشد که تعیین این مدول بر مبنای مشاهدات فیزیکی معمولاً دارای قابلیت اعتماد بالا نیست و گاهی نتایجی غیر دقیق به دست می دهد. تفاوت خصوصیات مکانیکی چندلایه ها زیر بارهای خمشی و کششی تنها به پارامتر مقاومت محدود نمی شود بلکه مقدار مدول الاستیسیته نیز تحت بارگذاری خمشی و کششی متفاوت گزارش شده است. بر خلاف مشاهدات انجام شده راجع به تغییر مقدار مقاومت چندلایه ها زیر بارگذاری خمشی و کششی که مقدار بزرگتر مقاومت خمشی را نشان می دهد، نسبت مدول الاستیسیته چندلایه ها زیر دو نوع بارگذاری، برای مواد مختلف بصورت متفاوت اندازه گیری شده است بطوریکه گاهی مدول الاستیسیته خمشی بیشتر از مدول الاستیسیته کششی و گاهی این نسبت بصورت معکوس می باشد. زیوبن و همکاران [6,5] مقدار مدول الاستیسیته خمشی را در چندلایه های کولار 49/پلی استر کوچکتر از مدول الاستیسیته کششی گزارش کردند. تالف و کلارین [7] مقدار مدول خمشی را در چندلایه های شیشه/پلی استر 11 درصد کوچکتر از مقدار مدول کششی ملاحظه کردند. روپا و همکاران [8] نسبت مدول خمشی به مدول کششی را در چندلایه های شیشه/پلی استر و شیشه/وینیل استر به ترتیب برابر 4 و 2.67 ملاحظه کردند. حال آنکه باید توجه کرد که معمولاً مقدار مدول الاستیسیته خمشی اندازه گیری شده با تغییر نسبت دهانه به ضخامت برای تیرهای کامپوزیتی تغییر می کند [9].

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (1)$$

که در این رابطه، E_B مدول الاستیسیته خمشی، L دهانه تکیه گاه و b عرض تیر می باشد. d ضخامت تیر و m شیب منحنی بار- تغییرمکان حاصله می باشد. مقدار تنش نهایی در خارجی ترین لایه کششی نمونه از رابطه (1) قابل تقریب می باشد:

$$\sigma_f = (3PL/2bd^2)[1+6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (2)$$

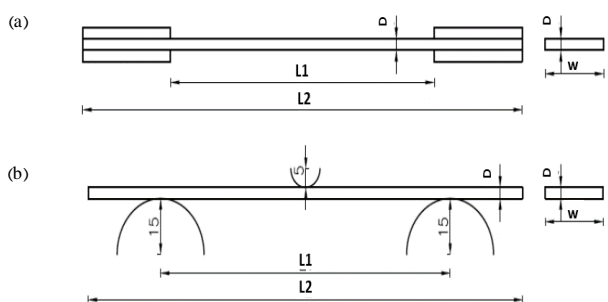


Fig. 1 Geometrical parameters of the specimens for (a) tensile tests, (b) 3PB tests

شکل 1 پارامترهای هندسی نمونه های آزمایشگاهی برای (a) تست های کششی، (b) تست های خمشی

جدول 1 مقادیر پارامترهای نشان داده شده در شکل 1 برای تعیین خصوصیات هندسی نمونه های آزمایشگاهی

Table 1 The parameters shown in Figure 1 to determine the geometrical properties of the specimens

نمونه	$L_1 (\pm 0.1 \text{ mm})$	$L_2 (\pm 0.1 \text{ mm})$	$W (\pm 0.1 \text{ mm})$	$D (\pm 0.02 \text{ mm})$	لایه گذاری
ST-1	100	151	20	4×0.75	(0) ₄
ST-2	100	153	19.5	4×0.75	(90) ₄
ST-3	100	153	19.6	4×0.75	(90,0) ₃
ST-4	100	152	20.3	4×0.75	(0,90) ₃
ST-5	100	149.5	19.5	4×0.75	(0,90,0,90)
ST-6	100	148	20.3	4×0.75	(90,0,90,0)
SF-1	100	150.5	19.5	4×0.75	(0) ₄
SF-2	100	151	19.5	4×0.75	(90) ₄
SF-3	100	151	20.7	4×0.75	(90,0) ₃
SF-4	100	152	19.6	4×0.75	(0,90) ₃
SF-5	100	150.5	20.3	4×0.75	(0,90,0,90)
SF-6	100	150.3	20.3	4×0.75	(90,0,90,0)



Fig. 2 SF-1 beam specimen under 3PB test

شکل 2 نمونه SF-1 در حال تست خمش سه نقطه ای

و سپس مرحله تکامل آسیب می باشد. این دو مرحله در مورد لایه های کامپوزیتی در جهت الیاف بر هم منطبق می باشد یا به عبارتی تکامل آسیب همزمان با شروع آسیب در نظر گرفته می شود اما در مورد بارگذاری چندلایه ها در جهات خارج از جهت عمود بر الیاف، پس از شروع آسیب و آغاز دوره کاهش خصوصیات مکانیکی ماده، یک قانون رشد آسیب برای المان ها تعریف می شود که خصوصیات مکانیکی چندلایه ها را توسط سابروتینی که به برنامه لینک شده است کاهش می دهد تا ماده به حالت گسیختگی نهایی برسد. روش های مورد استفاده برای مدلسازی آسیب در چندلایه های کامپوزیتی، در ادامه توضیح داده خواهد شد. مدل های المان محدود توسعه داده شده، مقادیر مدول الاستیسیته را تخمین زده و مقاومت نهایی ملاحظه شده را با دقت بالایی پیشگویی می کنند.

2- آزمایشات

برای ساخت نمونه های کامپوزیتی از الیاف تک جهته با دانسیته 400 گرم بر مترمربع و مقاومت کششی 1200 مگاپاسکال استفاده شد. رزین مورد استفاده وینیل استر بود. روش تولید چندلایه ها با استفاده از تکنولوژی ساخت چندلایه ها در قالب های تحت فشار و حرارت بود. برای لایه چینی های مختلف از لایه های 0° و 90° استفاده شده است. نمونه ها پس از تولید در دمای 50 درجه به مدت 48 ساعت نگهداری شدند و آزمایشات انجام شده بر روی نمونه ها حداقل چند هفته پس از تولید انجام گرفته است. در جدول 1 مشخصات مکانیکی تک لایه های کامپوزیتی که توسط تست های شناسایی تعیین شده اند [15] ارائه شده است.

تست های کششی بعلت ساده بودن بارگذاری و شرایط مرزی، اطلاعات دقیق تری از خواص مکانیکی چندلایه ها بدست می دهند. از این رو برای هر لایه گذاری در ابتدا آزمایش کشش انجام شد تا نتایج رفتار مکانیکی کششی با رفتار خمشی مقایسه گردد. برای تعیین مقاومت کششی و همچنین مدول الاستیسیته کامپوزیت، از استاندارد ای-اس-تی-ام 3039 [16] استفاده شد. تعداد تکرار نمونه ها برای هر آزمایش جهت رسیدن به رفتار قابل اعتماد، 3 عدد بود. این ابعاد برای هر دو نوع کامپوزیت تک جهته و بافته شده مناسب می باشد. ابعاد انتخاب شده برای نمونه های مختلف مطابق با شکل 1 و جدول 2 می باشد. برای همه تیرهای مورد بررسی در این مقاله با لایه گذاری های مختلف، نسبت طول دهانه به ضخامت برابر 33 مورد آزمایش قرار گرفت. در این تیرها ضخامت برابر 3 میلی متر و دهانه به ترتیب برابر 100 میلی متر بود. سرعت بارگذاری در تست کشش حدود 2 میلی متر بر دقیقه بود که توسط دستگاه زوئیک وارد شد. آزمایش های خمشی نیز با همین دستگاه و با سرعت 5 میلی متر بر دقیقه انجام شد. برای تعیین مدول الاستیسیته خمشی از استاندارد ای اس تی ام دی 790 [9] استفاده شد. گزارشات نشان می دهند تعیین نسبت دهانه به ضخامت در تیرها تاثیر بزرگی در تعیین مقدار اندازه گیری شده بعنوان مدول الاستیسیته خمشی دارد و مقدار این مدول می تواند وابسته به اندازه ضخامت تیر آزمایش شده تغییر کند [9]. در استاندارد ای اس تی ام، عدد یک به 33 در مورد نسبت اندازه ضخامت به دهانه برای نمونه های دارای مشخصات مکانیکی ارتوتروپیک توصیه شده است. زیون و همکاران [6,5] نسبت 16 را برای ملاحظه مقاومت خمشی و نسبت 60 را برای تعیین مدول الاستیسیته چندلایه های از جنس کولار- اپوکسی پیشنهاد کردند. در استاندارد ای اس تی ام دی 790 برای تعیین مقدار مدول خمشی در آزمایش های سه نقطه خمشی فرمول (1) پیشنهاد شده است.

جدول 2 خصوصیات مکانیکی تک لایه شیشه/وینیل استر مورد بررسی در این تحقیق

Table 2 Mechanical properties of the glass/vinylester lamina examined in this study

G ₂₃ (MPa)	G ₁₃ (MPa)	G ₁₂ (MPa)	v ₂₃	v ₁₃	v ₁₂	E ₃ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₁ (MPa)	خصوصیات
770	770	1070	0.35	0.2	0.2	1420	1420	12100	شیشه/وینیل استر

با جهت الیاف، جهت ماتریس و جهت خارج از صفحه می باشند. مدل خرابی پیشنهادی توسط نرم افزار در مورد المان های دوبعدی کاربرد دارد حال آنکه برای المان های سه بعدی این مدل باید توسعه داده شده و توسط سابروتینی به برنامه لینک شود. در این روش چهار مود آسیب بصورت زیر می توانند در مورد المان ها در نظر گرفته شوند:

- پاره شدن الیاف تحت کشش
- گسیختگی و پیچ خوردگی الیاف تحت فشار
- ترک خوردگی ماتریس بعلت کشش عرضی و برش
- شکست ماتریس تحت فشار عرضی و برش

با شروع آسیب در هر یک از این مدهای خرابی، روند کاهش سختی در المان ها آغاز می شود و مسیر تکامل را طی می کند. بنابراین این مدل در دو مرحله اجرا می شود که در ادامه توضیح داده می شوند.

3-1 شروع آسیب

بررسی آغاز آسیب بر اساس معیاری که توسط هشین [19] و هشین و روتم [20] تعریف شده است انجام می شود و سپس سطح خرابی در فضای تنش های موثر تعریف می شود. تحقیقات متعددی نشان می دهند که معیارهای آسیب بر پایه کرنش و انرژی نتایج دقیق تری نسبت به معیارهای بر پایه تنش بدست می دهند [21]. از این رو گرچه تئوری هشین بر اساس مقادیر تنش در المان شروع آسیب را بررسی می کند، در این تحقیق این روابط را بر اساس مقادیر کرنش در المان بازنویسی می کنیم. چهار معیار هشین بر مبنای مولفه های تنش برای بررسی آسیب در چهار مود ذکر شده در بالا بصورت زیر تعریف می شوند که نقض شدن آن ها شروع آسیب در مود مربوطه را نشان می دهد:

- الیاف تحت کشش: $(\sigma_{11} \geq 0)$

$$f_1 = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_f'}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(\tau_f^s)^2} \leq 1 \quad (3)$$

- الیاف تحت فشار: $(\sigma_{11} < 0)$

$$f_2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_f^c}\right)^2 \leq 1 \quad (4)$$

- ماتریس تحت کشش: $(\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0)$

$$f_3 = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{\sigma_m'}\right)^2 + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(\tau_f^s)^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(\tau_f^s)^2} \leq 1 \quad (5)$$

- ماتریس تحت فشار: $(\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0)$

$$f_4 = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2\tau_f^s}\right)^2 + \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{\sigma_m^c} \left[\left(\frac{\sigma_m^c}{2\tau_f^s}\right)^2 - 1 \right] + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(\tau_f^s)^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(\tau_f^s)^2} \leq 1 \quad (6)$$

در روابط بالا σ_{ij} مولفه های تنش نرمال، τ_{ij} مولفه های تنش برشی، σ_{it} و σ_{ic} به ترتیب مقاومت کششی و فشاری در جهت الیاف، σ_{mt} و σ_{mc} ترتیب مقاومت کششی و فشاری در جهت ماتریس، τ_{ts} و τ_{ts} مقاومت برشی

در رابطه (2) مقدار تنش نهایی، P مقدار ماکزیمم بار ملاحظه شده همزمان با ایجاد تنش σ_f ، D مقدار خیز در مرکز تیر و سایر پارامتر ها مطابق با رابطه (1) می باشد. استاندارد ای-اس-تی-ام استفاده از این روابط را در مورد موادی پیشنهاد می کند که از قانون هوک تبعیت می کنند. همچنین نتایج این روابط را در مورد تیرهایی که دارای خیز و لغزش زیاد بر روی تکیه گاه می باشند با مقداری خطا همراه می داند. حداکثر خیزی که در این استاندارد برای معتبر بودن روابط بالا ذکر شده است برابر 10 درصد اندازه دهانه نمونه می باشد حال آنکه نمونه های آزمایش شده در این تحقیق خیز بیشتری را تجربه کردند که این مطلب، علت کم بودن دقت نتایج بدست آمده از این روابط را برای تعیین مشخصات مکانیکی نمونه های چندلایه ای ملاحظه شده در این مقاله نشان می دهد. در شکل 2 تیر کامپوزیتی SF-1 زیر دستگاه بارگذاری سه نقطه خمشی ملاحظه می شود.

3-2 مدلسازی المان محدود

مدلسازی المان محدود نمونه های آزمایشگاهی توسط نرم افزار آباکوس [17] انجام گرفته است. بارگذاری مدل های ساخته شده برای نمونه های کششی با ورق های صلب انجام گرفت بصورتی که ورق صلب پایینی ثابت و بار تغییرمکان با تعیین مقدار سرعت برای ورق صلب بالایی به نمونه وارد شده است. ورق های صلب توسط قید تای 2 که توسط نرم افزار قابل تعریف می باشد به نمونه متصل شد. در این نوع قید یک ارتباط صلب بین جسم پایه 3 و جسم وابسته 4 تعریف می شود. برای ورق های صلب از المان های S4R استفاده شده و حرکت همه نقاط به یک نقطه میانی وابسته شد که بارگذاری مدل نیز از همین نقطه صورت گرفته است. برای شبیه سازی نمونه ها از المان های آجری استفاده شده است. برای مدلسازی نمونه های خمشی، ارتباط بین تکیه گاه و تیر توسط یک رابطه تماسی در هر دو جهت افقی و قائم تعریف شد که در جهت افقی، این تماس با ضریب اصطکاک $\mu=0.3$ در نظر گرفته شد. انتخاب چنین ضریب اصطکاک برای مدلسازی تماس افقی بین تیر و تکیه گاه قبلاً انجام شده است [18]. مطالعه همگرایی مش بندی برای انتخاب اندازه بهینه ابعاد مش صورت گرفت که با توجه به تفاوت تاثیر اندازه مش در ضخامت و سطح نمونه بر روی دقت نتایج، مطالعه تاثیر نحوه مش بندی در چند مرحله انجام شده و بهینه ترین الگوی مش بندی برای مدل های المان محدود انتخاب شد. برای ملاحظه تاثیر خرابی بر رفتار تحمل بار در چندلایه های کامپوزیتی، قابلیت آسیب پیشرونده برای المان های کامپوزیتی تعریف شد که طی مراحل گام به گام توسط آنالیز دینامیکی بر روی مدل ها اجرا گردید. در مدل آسیب ارائه شده توسط نرم افزار آباکوس، آسیب در ماده بوسیله کاهش سختی المان ها شبیه سازی می شود. در این مدل هر لایه با مشخصات مکانیکی ارتوتروپ، توسط یک سیستم مختصات محلی بصورت 1 و 2 و 3 معرفی می شود که به ترتیب این جهت ها مطابق

¹ Abaqus

² Tie

³ Master

⁴ Slave

$$d_s^l = 1 - (1 - d_f^l)(1 - d_f^c)(1 - d_m^l)(1 - d_m^c) \quad (15)$$

$$d_s^l = 1 - (1 - d_m^l)^2(1 - d_m^c)^2 \quad (16)$$

جدول 3 مقادیر کرنش های حدی مربوط به تک لایه GFRP مورد تحقیق

Table 3 Ultimate strains for examined glass/vinylester laminas (± 0.001 tolerance)

مقدار	خصوصیات	مقدار	خصوصیات
0.029	$(\epsilon_{ft})_0$	0.002	$(\epsilon_{mc})_0$
0.029	$(\epsilon_{ft})_u$	0.065	$(\epsilon_{mc})_u$
0.0013	$(\epsilon_{mt})_0$	0.0019	$(\epsilon_{fs})_0$
0.0255	$(\epsilon_{mt})_u$	0.037	$(\epsilon_{fs})_u$
0.032	$(\epsilon_{fc})_0$	0.0022	$(\epsilon_{fs})_0$
0.032	$(\epsilon_{fc})_u$	0.043	$(\epsilon_{fs})_u$

2-3 تکامل آسیب

هنگامی که ماده به سمت از دست دادن مقاومت حرکت می کند (حالت نرم شوندگی) برای جلوگیری از وابستگی نتایج به مش بندی، قانون متشکله ای بصورت رابطه تنش-تغییرمکان با توجه به یک طول مشخصه بر مبنای ابعاد المان معرفی می شود. در این حالت پارامتر آسیب در المان بصورتی رشد می کند که رابطه تنش- تغییرمکان بصورت شماتیک شکل 3 ملاحظه می شود. در این نمودار پارامتر δ_{eq} تغییرمکان معادل و تنش معادل را نشان می دهند. در این نمودار شیب مثبت منحنی زمانی ملاحظه می شود که ماده بصورت الاستیک خطی در زمان قبل از شروع آسیب عمل می کند و پس از شروع آسیب، ماده مطابق با قسمت نزولی منحنی عمل می کند. مقدار انرژی ممتد ذخیره شده در هر المان بعلت بارهای وارده بصورت زیر تعیین می شود [24]:

$$G = \frac{1}{2E_1} \left(\frac{\langle \sigma_{11} \rangle^2}{1-d_f^l} + \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle^2}{1-d_f^c} \right) + \frac{1}{2E_2} \left(\frac{\langle \sigma_{22} \rangle^2}{1-d_m^l} + \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle^2}{1-d_m^c} \right) + \frac{1}{2E_3} \left(\frac{\langle \sigma_{33} \rangle^2}{1-d_m^l} + \frac{\langle -\sigma_{33} \rangle^2}{1-d_m^c} \right) - \frac{\nu_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}}{E_1} - \frac{\nu_{13}\sigma_{11}\sigma_{33}}{E_1} - \frac{\nu_{23}\sigma_{22}\sigma_{33}}{E_2} + \frac{\sigma_{12}^2}{G_{12}(1-d_s^l)} + \frac{\sigma_{13}^2}{G_{13}(1-d_s^l)} + \frac{\sigma_{23}^2}{G_{23}(1-d_s^l)} \quad (17)$$

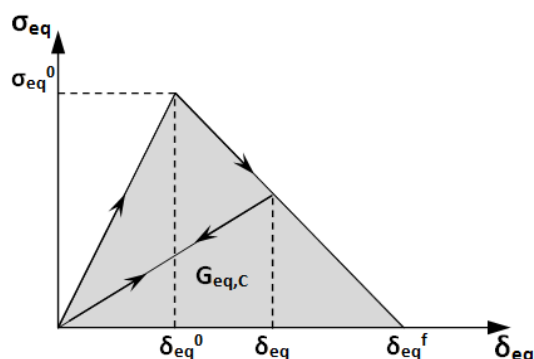


Fig. 3 Schematic of equivalent stress versus equivalent displacement diagram (23, 24)

شکل 3 نمودار شماتیک از رابطه تنش - جابجایی معادل برای پیشرفت آسیب در المان های کامپوزیتی [24, 23]

در جهت طولی و عرضی هستند. اگر معیارهای فوق بر اساس کرنش بازنویسی شوند به روابط زیر خواهیم رسید:

- الیاف تحت کشش: $(\epsilon_{11} > 0)$

$$f_1 = \left(\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_f^l} \right)^2 + \frac{\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2}{(\epsilon_f^s)^2} \leq 1 \quad (7)$$

- الیاف تحت فشار: $(\epsilon_{11} < 0)$

$$f_2 = \left(\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_f^c} \right)^2 \leq 1 \quad (8)$$

- ماتریس تحت کشش: $(\epsilon_{22} + \epsilon_{33} > 0)$

$$f_3 = \left(\frac{\epsilon_{22} + \epsilon_{33}}{\epsilon_m^l} \right)^2 + \frac{\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{13}^2}{(\epsilon_f^s)^2} + \left(\frac{1}{2\tau_f^s} \right) (\epsilon_{23}^2 - \epsilon_{22}\epsilon_{33}) \leq 1 \quad (9)$$

- ماتریس تحت فشار: $(\epsilon_{22} + \epsilon_{33} < 0)$

$$f_4 = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2\tau_f^s} \right)^2 + \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{\sigma_m^c} \left[\left(\frac{\sigma_m^c}{2\tau_f^s} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{(\tau_f^s)^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(\tau_f^s)^2} \leq 1 \quad (10)$$

در روابط بالا ϵ_{ij} مولفه های کرنش، ϵ_{ft} و ϵ_{fc} به ترتیب کرنش حدی فشاری و کششی در جهت الیاف، ϵ_{mt} و ϵ_{mc} به ترتیب کرنش حدی فشاری و کششی در جهت ماتریس، ϵ_f^s و ϵ_m^s کرنش حدی برشی در جهت طولی و عرضی هستند. در جدول 3 مقادیر تنش ها و کرنش های نهایی بدست آمده برای تک لایه شیشه/وینیل استر مورد آزمایش ارائه شده است. در این جدول پارامترهای دارای زیرنویس 0 مربوط به شروع آسیب و پارامترهای دارای زیرنویس u مربوط به حالت تکامل آسیب در تک لایه های کامپوزیتی می باشد که توسط تست های شناسایی بدست آمده اند [15]. پس از شروع آسیب مقادیر تنش های موثر از رابطه زیر بدست می آیند [22]:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{M}\sigma \quad (11)$$

که در آن σ تنش بر روی ماده بدون آسیب، $\bar{\sigma}$ تنش موثر بر روی المان آسیب دیده و M ماتریس عملگر آسیب می باشد و بصورت زیر تعریف می شود [20]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1/(1-d_f) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1-d_m) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(1-d_m) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(1-d_f^l) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(1-d_f^c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(1-d_f^s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

در این ماتریس d_f , d_m , d_f^l , d_f^c و d_f^s متغیرهای آسیب هستند که به ترتیب دو پارامتر اول پیشروی آسیب لایه را در جهت الیاف و ماتریس و دو پارامتر دوم خرابی لایه را تحت برش طولی و عرضی مشخص می کنند. برای عملکرد چندلایه ها تحت بار کششی و فشاری متغیرهای آسیب جداگانه ای تعریف می شود. توجه شود که متغیرهای آسیب برشی متغیرهای مستقلی نیستند و بر پایه سایر متغیرها بصورت زیر تعریف می شوند [24,23]:

$$d_f = \begin{cases} d_f^l & \text{if } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{if } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^l & \text{if } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{if } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

جدول 4 مقایسه نتایج ارائه شده از خصوصیات مکانیکی تعیین شده برای نمونه های کامپوزیتی با الیاف تک جهت بدست آمده توسط روابط کلاسیک و مدل های المان محدود
Table 6 Comparison of the mechanical properties for UD specimens obtained by analytical formulas and FE models

نمونه ها	مدول الاستیسته کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسته خمشی از رابطه تحلیلی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسته خمشی از مدل المان محدود (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی از مدل المان محدود بر مبنای تئوری ماکزیمم تنش (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی از رابطه تحلیلی (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی از مدل المان محدود بر مبنای تئوری ماکزیمم کرنش (مگاپاسکال)
SF-1	12100	13400	13000	320	668	400
SF-2	1270	4440	4000	38	155	80

کرنش مربوط به شروع و تکامل آسیب، منحنی های تنش معادل-جابجایی معادل تعیین شده و معیار آسیب (d) در هر مود گسیختگی با توجه به رشد تنش و جابجایی معادل تعیین می شوند. در سابروتین VUSDFLD مقدار مشخصات مکانیکی ماده وابسته به تعدادی متغیر می تواند تغییر کنند. این متغیرها بعنوان شاخص آسیب معرفی می شوند که با افزایش این متغیرها، مدول الاستیسته در جهات مختلف کاهش می یابد.

4- بحث بر روی نتایج

به منظور ملاحظه رفتار آسیب پیشرونده در چندلایه های مختلف مورد بررسی و از طرفی صحت گذاری بر روش استفاده شده در مدل های المان محدود، نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده برای نمونه های کششی از آزمایشات و مدل های المان محدود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. شکل 4 نمودارهای تنش-کرنش را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. منحنی تنش-کرنش بدست آمده برای نمونه ST-1 نشان می دهد طول دوره کاهش سختی در لایه با الیاف در جهت صفر درجه تقریباً قابل صرف نظر می باشد و به عبارتی گسیختگی بصورت یکباره و شکننده ملاحظه می شود. کاهش سختی در چندلایه های کامپوزیتی وابسته به درصد الیاف در لایه ها و البته جهت گیری الیاف می باشد. در نمودارهای تنش-کرنش همگرایی نتایج مدل های المان محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دقت قابل قبول روش آنالیز خرابی پیشرونده را نشان می دهد. در بعضی نمونه ها انحراف جزئی نمودار عددی از نمودار آزمایشگاهی به چند عامل از جمله غیر ایده آل بودن هندسه و مشخصات مکانیکی نمونه ها و همچنین همگن نبودن ماده کامپوزیتی بستگی داشته است. بعنوان مثال ضخامت لایه ها در بعضی قسمت های نمونه ها نسبت به مقدار میانگین ضخامت اندازه گیری شده در یک نمونه مقدار جزئی انحراف داشته یا بعلا یکنواخت نبودن دانسیته الیاف، نواحی غنی از رزین ایجاد شده است که این مسئله از عوامل افزایش یا کاهش مقاومت یا مدول الاستیسته پیش بینی شده توسط مدل المان محدود می تواند باشد. شکل 5 نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل المان محدود شبیه سازی شده را در مورد نمونه تیرهای سه نقطه خمشی SF-1 و SF-2 نشان می دهد. بر اساس رابطه (1) مقدار مدول الاستیسته نمونه SF-1 با استفاده از منحنی بار-تغییرمکان برابر 13400 مگاپاسکال تعیین می شود. مقدار ماکزیمم تنش تجربه شده در تیر نیز طبق رابطه 2 در جدول 4 نشان داده شده است حال آنکه این عدد، عدم دقت روابط تحلیلی ساده را برای تخمین ماکزیمم تنش تجربه شده در تیر نشان می دهد در این حالت مشخصات مکانیکی تخمین زده شده توسط مدل های المان محدود دقیق تر به نظر می رسد. مقایسه منحنی های بار-تغییرمکان بدست آمده از مدل المان محدود و آزمایشگاه نشان می دهد مدول الاستیسته نمونه SF-1 باید برابر 13000 مگاپاسکال باشد. شکل 6-a مدل المان محدود نمونه SF-1 را یک لحظه قبل از شکست

انرژی متمم ذخیره شده مربوط به هر مود برابر مساحت زیر منحنی تنش-تغییرمکان مربوطه خواهد بود. برای جلوگیری از وابستگی رفتار خرابی در المان ها به مش بندی، مقادیر تنش و تغییرمکان معادل توسط یک پارامتر که بعنوان طول مشخصه برای المان معرفی می شود نرمال می شوند که این طول بر اساس هندسه المان تعیین می شود که در مورد المان های آجری، این طول برابر است با:

$$L^c = \sqrt[3]{V_{el}} \quad (18)$$

که در این رابطه V_{el} برابر است با حجم المان. جابجایی و تنش معادل برای چهار مود بصورت زیر تعریف می شوند [23,22]:

- الیاف تحت کشش: ($\sigma_{11} > 0$)

$$\delta_{f,eq}^t = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2} \quad (19)$$

$$\sigma_{f,eq}^t = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle \langle \varepsilon_{11} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12} + \tau_{13} \varepsilon_{13}}{\delta_{f,eq}^t / L^c}$$

- الیاف تحت فشار: ($\sigma_{11} < 0$)

$$\delta_{f,eq}^c = L^c \langle -\varepsilon_{11} \rangle \quad (20)$$

$$\sigma_{f,eq}^c = \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle}{\delta_{f,eq}^c / L^c}$$

- ماتریس تحت کشش: ($\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$)

$$\delta_{m,eq}^t = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \rangle^2 + (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \quad (21)$$

$$\sigma_{m,eq}^t = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle \langle \varepsilon_{22} \rangle + \langle \sigma_{33} \rangle \langle \varepsilon_{33} \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12} + \tau_{13} \varepsilon_{13}}{\delta_{m,eq}^t / L^c}$$

- ماتریس تحت فشار: ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)

$$\delta_{m,eq}^c = L^c \sqrt{\langle -(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \rangle^2 + (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2)} \quad (22)$$

$$\sigma_{m,eq}^c = \frac{\langle -(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \rangle \langle -(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \rangle + \tau_{12} \varepsilon_{12} + \tau_{13} \varepsilon_{13}}{\delta_{m,eq}^c / L^c}$$

در روابط بالا برای هر $\langle \alpha \rangle$ داریم:

$$\langle \alpha \rangle = (\alpha + |\alpha|) / 2. \quad (23)$$

پس از شروع آسیب یعنی زمانی که $\delta > \delta_{eq}^0$ ، متغیر آسیب مربوط به هر مود بصورت زیر تعریف می شود:

$$d_j^i = \frac{(\delta_{j,eq}^i)^n (\delta_{j,eq}^i - (\delta_{j,eq}^i)^0)}{\delta_{j,eq}^i ((\delta_{j,eq}^i)^n - (\delta_{j,eq}^i)^0)} \quad i = t, c \quad \text{and} \quad j = f, m \quad (24)$$

که در این رابطه δ_{eq}^0 برابر جابجایی معادل اولیه ای است که در آن شروع آسیب ملاحظه می شود و δ_{eq}^n برابر مقدار جابجایی است که در یک مود مشخص، آسیب ماده کامل می شود. نحوه اعمال روابط بالا برای کاهش سختی المان های سه بعدی توسط سابروتین VUSDFLD [17] در نرم افزار آباکوس انجام شد. برای کاهش سختی المان ها پس از تعیین مقادیر

نمونه‌های بار-تغییرمکان مربوط به نمونه های SF-1 و SF-2 در شکل 5 نشان می دهند در صورتی که بار شکست با توجه به معیارهای خرابی بر مبنای مولفه های تنش محاسبه شده باشد یا به عبارت دیگر زمانی که ماکزیمم تنش مشاهده شده در آزمایش کشش، ملاک بررسی شکست در مورد نمونه های خمشی نیز باشد نمودار بار- تغییرمکان بدست آمده از مدل المان محدود ظرفیت بار قابل تحمل کمتری را تخمین می زند. جدول 4 نشان می دهد بر اساس نتایج مدل المان محدود، مقدار ماکزیمم تنش تجربه شده در تیر SF-1 نسبت به این مقدار در نمونه کششی حدود 18 درصد افزایش یافته است.

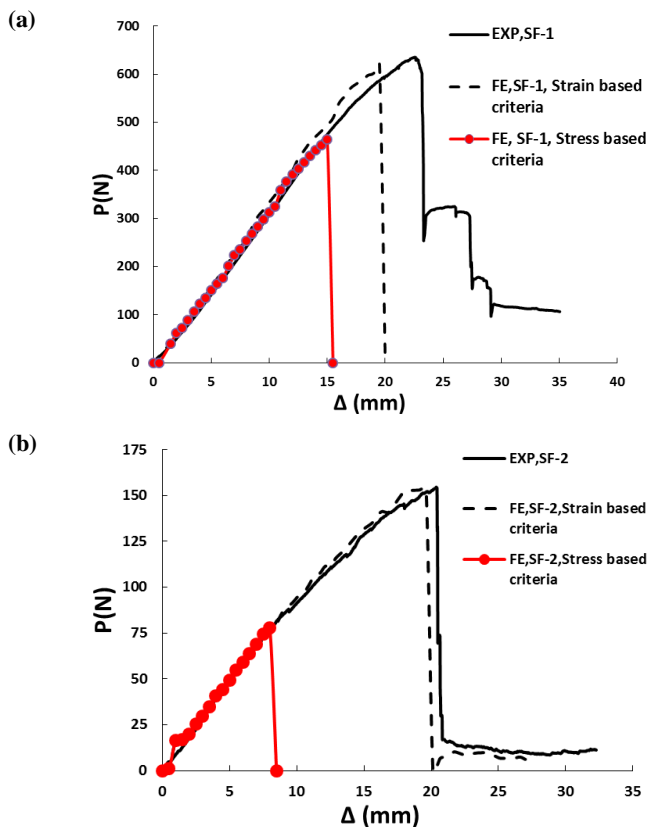


Fig. 5 Comparison of the load-deflection curves obtained by experiment and FE models for (a) SF-1, (b) SF-2

شکل 5 مقایسه منحنی های بار-تغییرمکان بدست آمده از مدل های المان محدود و آزمایشات برای نمونه های (a) SF-1، (b) SF-2

نمونه SF-2 رفتار تیر کامپوزیتی را در جهت عرضی لایه کامپوزیتی (عمود بر جهت الیاف) نشان می دهد. مدل المان محدود نشان داد مدول الاستیسیته خمشی اولیه در جهت عرضی برابر 4 گیگاپاسکال می باشد و این بدین معنی است که مدول الاستیسیته خمشی این نمونه در مقایسه با مدول الاستیسیته کششی حدود 180 درصد افزایش دارد حال آنکه درصد افزایش نسبت مدول الاستیسیته خمشی به مدول کششی در نمونه های ساخته شده از چندلایه های در جهت الیاف برابر 7 درصد بود که نشان می دهد افزایش مدول الاستیسیته خمشی به مدول کششی در جهت عرضی (عمود بر الیاف) بسیار بیشتر است. این مطلب نشان می دهد ضریب افزایش مدول الاستیسیته خمشی به مدول کششی با کاهش تراکم الیاف و عملکرد غالب تر فاز پلیمری ماده کامپوزیتی افزایش می یابد بدین معنی که مسئله افزایش مدول

نشان می دهد. در این شکل مقدار ماکزیمم تنش در وجه کششی تیر حدود 400 مگاپاسکال ملاحظه می شود.

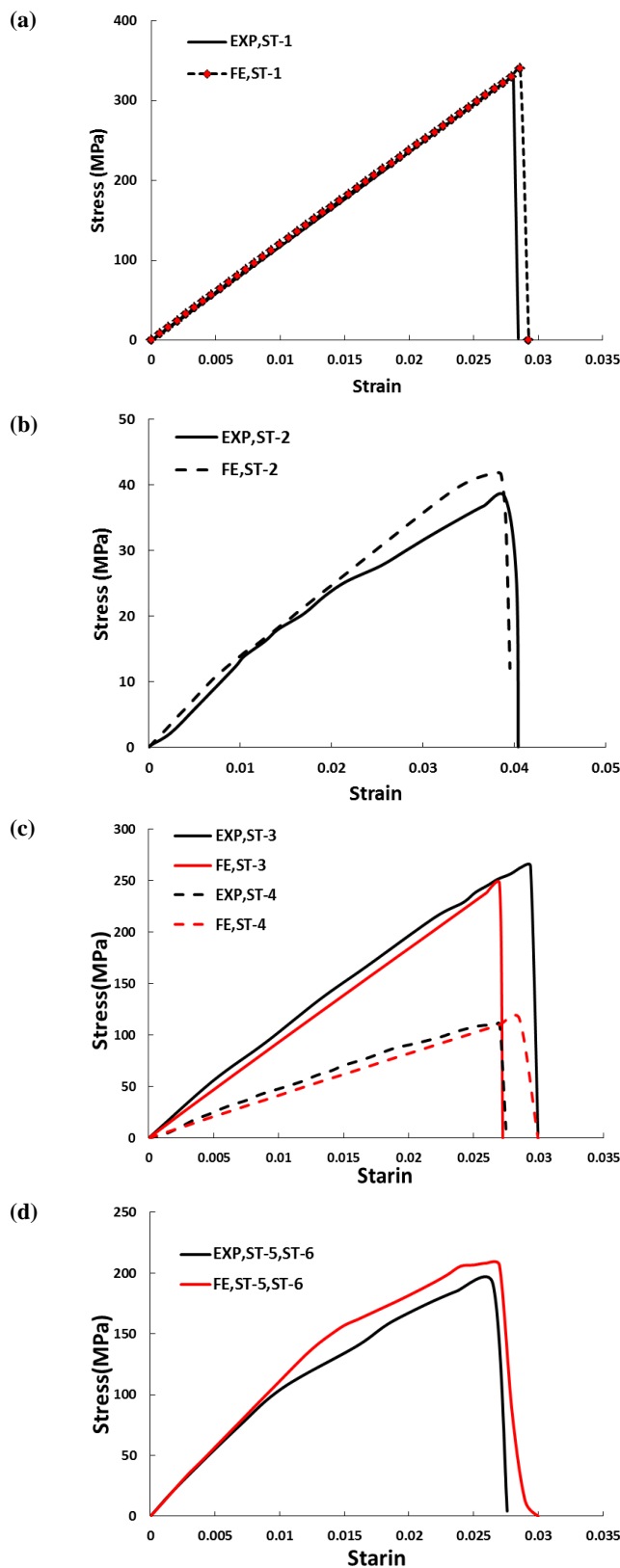


Fig. 4 (a) Tensile stress-strain response obtained from experiments and FE models for (a) ST-1, (b) ST-2, (c) ST-3 and ST-4, (d) ST-5 and ST-6.

شکل 4 منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایشات و مدل های المان محدود برای نمونه های (a) ST-1، (b) ST-2، (c) ST-3 و ST-4، (d) ST-5 و ST-6

الاستیسیته خمشی به مدول کششی وابسته به میزان تاثیرگذاری فاز پلیمری ماده کامپوزیتی در رفتار باربری می باشد.

الاستیسیته در مورد لایه های 90° باشد و این در حالی است که فرض می شود مدول الاستیسیته لایه های 0° ثابت در نظر گرفته شود. در مورد تیرهای SF-3 و SF-4، جهت گیری الیاف لایه بالایی عمود بر جهت گیری الیاف در سه لایه پایین تر بود. مطالعه همگرایی مش بندی نشان داد زمانی که جهت لایه گذاری در دو لایه مجاور تغییر می کند ضخامت تیر باید حداقل توسط دو المان مش بندی شود. بر این اساس زمانی که مدول الاستیسیته در لایه های 0° برابر 13 گیگاپاسکال در نظر گرفته شد با مقایسه منحنی بار-تغییرمکان بدست آمده از مدل المان محدود با منحنی آزمایشگاهی، مدول الاستیسیته لایه های 90° در نمونه SF-3 برابر 1.5 گیگاپاسکال و در نمونه SF-4 برابر 2.2 گیگاپاسکال بدست آمد. نمودارهای بار-تغییرمکان نشان می دهد ماکزیمم بار تجربه شده توسط نمونه SF-4 حدود 45 درصد کمتر از این پارامتر در مورد نمونه SF-2 می باشد. همچنین بعلت کاهش ضخامت لایه های 90° مجاور هم در نمونه SF-4، مدول الاستیسیته در این نمونه نسبت به نمونه SF-2 به مقدار 35 درصد کاهش داشته است. معیارهای خرابی بر پایه کرنش مقدار ماکزیمم تنش تجربه شده در لایه های 90° را برابر 45 مگاپاسکال نشان دادند. (18 درصد بزرگتر از مقاومت کششی)

نمونه های SF-5 و SF-6 از چندلایه های ساخته شده از الیاف عمود بر هم ساخته شدند. رفتار باربری این نمونه ها زیر بار کششی مشابه بود حال آنکه ظرفیت نمونه ای که دارای لایه های 90° نزدیک تر به وجه کششی تیر (SF-6) بود بزرگتر از این پارامتر بود که در مورد نمونه دیگر مشاهده شده است. مدول الاستیسیته خمشی مربوط به لایه های 90° در این دو نمونه برابر 1.5 گیگاپاسکال مشاهده شد. ملاحظه این نمونه ها نشان داد افزایش مدول الاستیسیته لایه های 90° با افزایش تعداد این لایه ها در مورد تیرهای با لایه های 90° جدا از هم تشدید نمی شود. شکل 8 نتیجه ای از تغییر مدول الاستیسیته اولیه لایه های 90° را که در نمونه های مختلف مشاهده شده است با تغییر تعداد لایه های 90° نشان می دهد. در حقیقت این نمودار مدول الاستیسیته لایه های 90° را در مقابل تعداد لایه های 90° مجاور هم نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد افزایش مقدار مدول الاستیسیته بصورت خطی نیست. نتایج نشان دادند که بر مبنای آنالیزهای خرابی پیشرونده و با استناد به معیارهای خرابی بر مبنای کرنش، تخمین مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی چندلایه ها با دقت کافی امکان پذیر می باشد. با توجه به اینکه روی مقطع قرار گرفته تحت خمش، تنش های کششی و فشاری عمل می کنند و از طرفی رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی معمولاً زیر تنش فشاری و کششی متفاوت است تعدادی از محققین تغییر مدول الاستیسیته در تیر خمشی را نسبت به مدول الاستیسیته کششی به تفاوت مدول الاستیسیته این مواد تحت بار کششی و فشاری نسبت می دهند. جونز [27] در تحقیقات گسترده ای علت تفاوت مدول خمشی را با مدول کششی، در چندلایه هایی از جنس های مختلف بررسی کرد که در گزارشی با عنوان "مکانیک مواد کامپوزیتی با مدول های مختلف کششی و فشاری" منتشر شده است. او با دسته بندی چندلایه های مختلف، برای هر دسته نسبت مدول کششی به فشاری را بصورت بازه ای تعیین کرد و بعنوان مثال برای تعدادی از چندلایه ها بعلت کم بودن مدول فشاری نسبت به مدول کششی، مدول خمشی را کوچکتر از مدول کششی معرفی می کند. موجیکا و همکاران [28] نیز تفاوت مدول الاستیسیته خمشی را به تفاوت مدول الاستیسیته ماده تحت کشش و فشار نسبت می دهند و به همین دلیل اندازه گیری مدول الاستیسیته خمشی کوچکتری را نسبت به مدول الاستیسیته کششی نتیجه

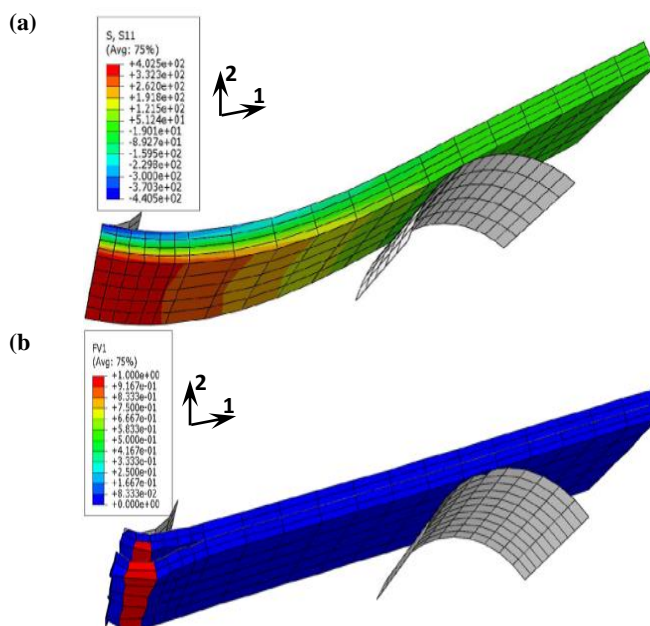


Fig. 6 FE model of SF-1 specimen, (a) Longitudinal stress in the beam prior to cracking, (b) Fibers failure index after collapse of the load-deflection curve

شکل 6 مدل المان محدود نمونه SF-1 (a) تنش طولی در تیر قبل از شکست، (b) معیار آسیب الیاف پس از شکست و افت منحنی بار-تغییر مکان

آزمایشات نشان دادند شکست تیرهای کامپوزیتی با افت یکباره منحنی بار-تغییرمکان و از دست رفتن مقاومت بصورت ناگهانی همراه می باشد. نمودار شکل 5 (b) نشان می دهد استفاده از معیارهای بر پایه تنش برای پیش بینی شکست در نمونه SF-2 مقدار بار قابل تحمل را بسیار کمتر برآورد می کند حال آنکه معیارهای بر پایه کرنش نتایج قابل قبولی دارد و افزایش ماکزیمم تنش در تیر را نسبت به ماکزیمم تنش تجربه شده در نمونه کششی برابر 110٪ نشان می دهد. قبلاً نیز در تعدادی مراجع [26,25] برتری و دقت بیشتر معیارهای آسیب بر پایه کرنش نسبت به معیارهای بر پایه تنش نشان داده شده است تحقیقات نشان می دهند مقدار مقاومت نهایی برای تخمین زدن گسیختگی در ماده برای شرایط مختلف بارگذاری و لایه گذاری های چندلایه های کامپوزیتی می تواند تغییر کند حال آنکه مقدار کرنش نهایی در ماده تحت شرایط بارگذاری مختلف ثابت به نظر می رسد. نتیجه روابط تحلیلی ارائه شده در جدول 4 برای نمونه SF-2 نشان داد نتیجه بدست آمده از روابط تحلیلی برای تعیین ماکزیمم تنش تجربه شده غیر قابل قبول است اما مقدار مدول الاستیسیته تخمین زده شده دارای دقت نسبتاً قابل قبولی است.

نمودار بار-تغییرمکان مربوط به نمونه های دارای هر دو لایه 0° و 90° در شکل 7 ملاحظه می شود. مشاهدات آزمایشگاهی در مورد تیرهای با الیاف تک جهته نشان دادند که اختلاف کمی بین مدول الاستیسیته کششی و خمشی در مورد تیرهای با لایه گذاری در جهت الیاف وجود دارد حال آنکه این اختلاف در مورد تیرهای لایه گذاری شده در جهت عرضی بسیار بزرگتر است. از این رو پیش بینی می شود که در مورد تیرهای دارای لایه های 0° و 90° تغییر مدول الاستیسیته زیر بار خمشی مربوط به تغییر مدول

اینک باید توجه کرد رفتار ملاحظه شده از یک چندلایه ساخته شده از دو ماده، بیشتر تحت تاثیر عملکرد کدام ماده است. در مورد چندلایه های تک جهت با لایه های صفر درجه، رفتار چندلایه کمتر تحت تاثیر رفتار ماتریس قرار دارد لذا میزان افزایش مدول خمشی نسبت به مدول کششی کمتر بود. اما در چندلایه های با الیاف 90 درجه که در آن ها رفتار مکانیکی تحت تاثیر بیشتر عملکرد فاز پلیمری کامپوزیت قرار داشت افزایش چند برابری مدول خمشی نسبت به مدول کششی مشاهده می شد. در مورد رزین مصرفی برای ساخت چندلایه ها در این مقاله، مدول الاستیسیته خمشی نسبت به مدول الاستیسیته کششی بزرگتر بود که همین مسئله باعث افزایش قابل توجه مدول الاستیسیته خمشی نمونه ای شد که دارای لایه های تک جهت 90° بود. با توجه به اینکه افزایش مدول الاستیسیته خمشی با افزایش نسبت ضخامت به دهانه قابل پیش بینی بود، برای نمونه هایی که دارای تعداد لایه های 90° بیشتری بصورت مجاور یکدیگر بودند، افزایش بزرگتری در نسبت مدول الاستیسیته خمشی به مدول الاستیسیته کششی ملاحظه شد.

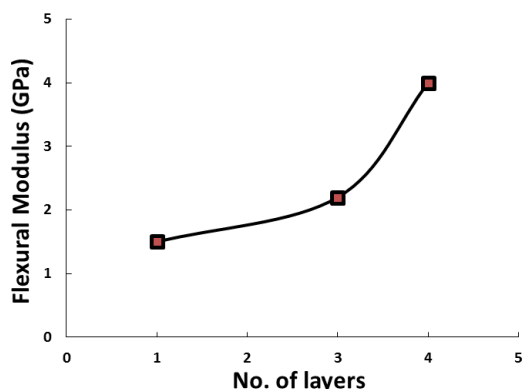


Fig. 8 Variation of the initial flexural modulus of 90° layers by variation of the thickness of adjacent 90° layers observed in the various layups

شکل 8 تغییر مدول الاستیسیته اولیه مربوط به لایه های 90° با تغییر ضخامت لایه های 90° مجاور هم که در لایه گذاری های مختلف مشاهده شده است

5- نتیجه گیری

محققین روش های تقریبی مختلفی را برای پیش بینی مدول الاستیسیته خمشی چندلایه های کامپوزیتی پیشنهاد کرده اند که استدلال آن ها بر مبنای تئوری ویبول و یا تفاوت مدول الاستیسیته کششی و فشاری در مواد کامپوزیتی استوار بوده است. در این مقاله آزمایشات متعددی بر روی چندلایه های با لایه چینی های مختلف انجام شد و نمونه های آزمایشگاهی توسط مدل های المان محدود شبیه سازی شد. برای مدلسازی دقیق نمونه ها، قابلیت های غیرخطی بودن مواد و هندسه سازی برای مدل های المان محدود در نظر گرفته شد. آزمایش کشش برای تصدیق روش آنالیز آسیب پیشرونده در مدل های المان محدود مورد استناد قرار گرفت. سپس نمونه های خمشی شبیه سازی شدند.

تفاوت مدول الاستیسیته خمشی با کششی برای نمونه های دارای راستای موازی با راستای الیاف مینیمم بود لذا با ثابت فرض کردن مدول الاستیسیته خمشی برای لایه های 0°، مدول الاستیسیته لایه های 90° برای لایه چینی های مختلف در چندلایه ها تخمین زده شد. نتایج، مدول الاستیسیته لایه های 90° را وابسته به ضخامت لایه های 90° مجاور هم

گیری می کنند. برای چندلایه هایی که در آن ها مدول خمشی کوچکتر از مدول کششی اندازه گیری شده است استدلال فوق می تواند مناسب باشد حال آنکه تحقیقات زیادی شبیه به تحقیقات ارائه شده در این مقاله وجود دارد [29] که مقدار مدول خمشی را بزرگتر از مدول کششی نشان می دهند. باید توجه کرد چندلایه های کامپوزیتی از دو فاز تشکیل شده اند که شامل الیاف و ماتریس می باشد. رفتار مکانیکی الیاف و ماتریس در مقابل بارهای مختلف بسیار متفاوت است. الیاف موادی هستند که معمولاً دارای تفاوت در مدول الاستیسیته زیر بار کششی و فشاری نمی باشند حال آنکه مواد پلیمری رفتار پیچیده ای زیر بار کشش و فشار دارند و بعنوان مثال رفتار مکانیکی این مواد تحت کشش و فشار متفاوت است.

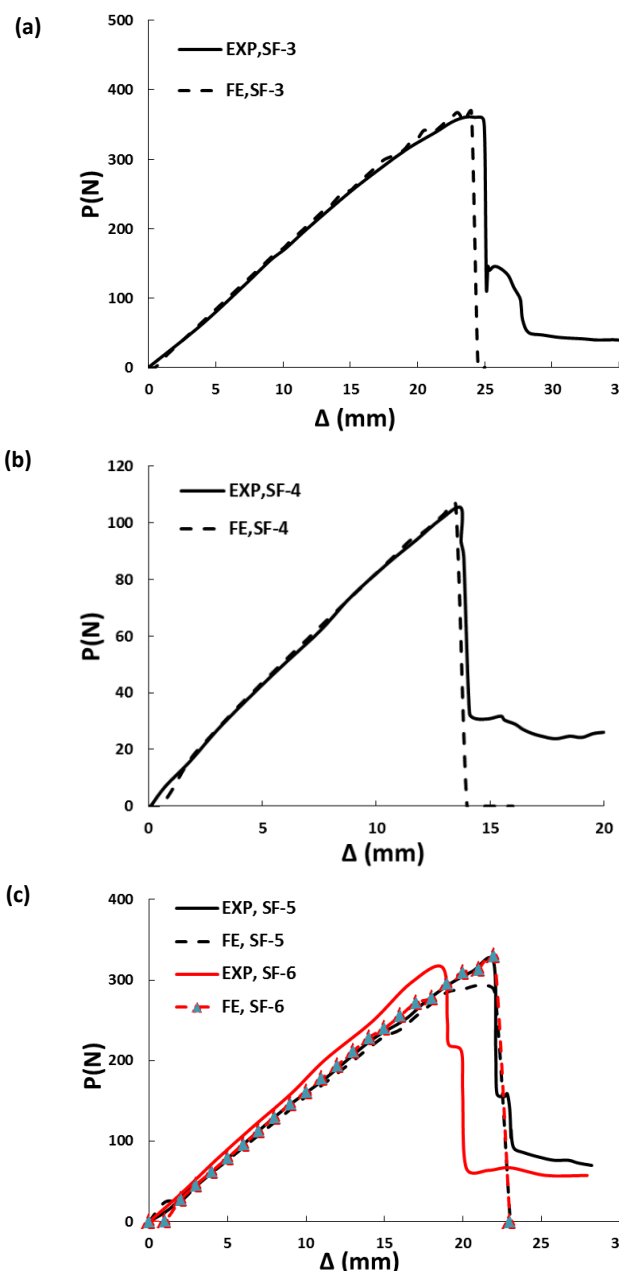


Fig. 7 Load-deflection curves obtained by experiments and FE models for (a) SF-3, (b) SF-4, (c) SF-5 and SF-6

شکل 7 نمودار بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایشات و مدل های المان محدود برای نمونه های (a) SF-3, (b) SF-4, (c) SF-5 و SF-6

- نشان دادند. با افزایش مدول الاستیسته خمشی نسبت به مدول الاستیسته کششی، مقدار ماکزیمم تنش تجربه شده در نمونه خمشی در جهت الیاف نسبت به این پارامتر در نمونه کششی حدود 18٪ افزایش پیدا کرد. این نسبت در مورد نمونه با الیاف در جهت عمود بر راستای تیر در حدود 110٪ مشاهده شد. نتایج مدل های المان محدود نشان دادند خرابی چندلایه های کامپوزیتی توسط معیارهای آسیب بر پایه کرنش با دقت قابل قبولی تخمین زده می شود و این در حالی است که پیشگویی خرابی توسط معیارهای بر پایه تنش قابل قبول نبود. همچنین نتایج ارائه شده نشان دادند استفاده از مدل های المان محدود با قابلیت بررسی تاثیرات غیرخطی در مواد و هندسه، تغییر در خصوصیات مکانیکی چندلایه های کامپوزیتی را با دقت خوبی ارزیابی می کنند.

6- مراجع

- [1] Bullock, R. E., "Strength Ratios of Composite Materials in Flexure and in Tension" *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, pp. 200-206, 1974.
- [2] Whitney, J. M. and Knight, M., "The Relationship between Tensile Strength and Flexure Strength in Fiber-Reinforced Composites" *Experimental Mechanics*, Vol. 20(6), pp. 211-216, 1980.
- [3] Ullah, H. Harland, A. R. Lucas, T. et al., "Finite Element Modelling of Bending of CFRP Laminates: Multiple Delaminations" *Compsite Materials Science*, Vol. 52, pp. 147-156, 2012.
- [4] Cattell, M. K. and Kibble, K. A., "Determination of the Relationship Between Strength and Test Method for Glass Fibre Epoxy Composite Coupons Using Weibull Analysis" *Materials and Design*, Vol. 22, pp. 245-250, 2001.
- [5] Zweben, C., "Is There a Size Effect in Composite Materials and Structures?" *Composites*, Vol. 25, pp. 451-454, 1994.
- [6] Smith, D. L. Wardle M. W. Zweben, C., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus and Properties of Fabric-Reinforced Laminates" In: SW Tsai (ed) *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, pp. 228-262, 1979.
- [7] Tolf, G. and Clarin, P., "Comparison between Flexural and Tensile Modulus of Fibre Composites" *Fibre Science Technolgy*, Vol. 21, pp. 319-326, 1984.
- [8] Roopa, T. S. Murthy, H. N. Sudarshan, K., et al. "Mechanical Properties of Vinylester/Glass and Polyester/Glass Composites Fabricated by Resin Transfer Molding and Hand Lay-up" *Journal of Vinyl Additive Technology*, Doi: 11.1002/vnl.21393, 2014.
- [9] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM, Designation: D790-07, 2007.
- [10] Echaabi, J. Trochu, F. Pham, X. T., et al. "Theoretical and Experimental Investigation of Failure and Damage Progression of Graphite-Epoxy Composites in Flexural Bending Test" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 15, pp. 740-755, 1996.
- [11] Tehrani-Dehkordi, M., "Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 59-66, 2016. (In Persian)
- [12] Huang, Z. M., "Progressive flexural failure analysis of laminated composites with knitted fabric reinforcement," *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 239-260, 2004.
- [13] Santiuste, C. Sánchez-Sáez, S. Barbero, E., "A comparison of progressive-failure criteria in the prediction of the dynamic failure of composite laminated beams," *Composite Structures* Vol. 92, pp. 2406-2414, 2010.
- [14] Shokrieh, M. M. Ghajar, M. Salamattalab, M. and Madoliat, R., "Progressive damage modeling of laminated composites by considering simultaneous effects of interlaminar and intralaminar damage mechanisms" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015. (In Persian)
- [15] Nazari, A. R., "Investigation of load carrying and progressive failure in the composite sandwich panels with elastomeric foam core under biaxial bending," Ph.D. Thesis, Amirkabir University of Technology, Iran, 2016.