



نشریه علمی پژوهشی  
**کامپوزیت**  
علوم و فناوری  
<http://jstc.iust.ac.ir>



# مدل سازی عددی رفتار خمشی کامپوزیت های هیبرید درون لایه ای با استفاده از روش المان محدود

مجید طهرانی دهکردی

استادیار، مهندسی نساجی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
شهرکرد، صندوق پستی ۵۶۸۱۱-۸۸۶۱۷، [mtehrani@lit.sku.ac.ir](mailto:mtehrani@lit.sku.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این پژوهش، رفتار خمشی کامپوزیت های خالص و هیبرید درون لایه ای تقویت شده با الیاف ترد و انعطاف پذیر بر مبنای روش المان محدود مدل سازی شده است. بدین منظور با استفاده از خواص ابعادی، فیزیکی و مکانیکی، کامپوزیت هایی به صورت چهار لایه با آرایش تک جهت در نرم افزار آباکوس مدل سازی و سپس آزمایش خمش سه نقطه ای روی آن ها شبیه سازی شد. در شبیه سازی های انجام شده، خواص مکانیکی لایه های کامپوزیت به صورت رفتار غیر خطی (الاستیک-پلاستیک) تعریف شد. برای ارزیابی شبیه سازی های انجام شده، نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار با نتایج آزمایش خمش در حالت تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند شبیه سازی انجام شده با دقت بالایی قادر به تعیین نیروی خمشی در خیزهای مختلف هستند. به گونه ای که حداکثر درصد اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در بیشینه نیروی خمش، ۹/۷ درصد بوده است. همچنین نتایج تحلیل نحوه توزیع تنش در هر لایه از کامپوزیت نشان می دهند زمانی که نمونه هیبرید در برابر فرایند خمش به نقطه تسلیم می رسد لایه های بیرونی از مقدار بیشینه تنش طولی خود برای مقاومت در برابر خمش استفاده می کنند اما در همین زمان لایه های میانی حداکثر از ۳۰ درصد ظرفیت خود استفاده می نمایند.</p>	<p>دریافت: ۹۴/۷/۶ پذیرش: ۹۴/۹/۶  کلیدواژگان: مدل سازی کامپوزیت هیبرید درون لایه ای رفتار خمشی</p>

## Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method

Majid Tehrani-Dehkordi

Department of Carpet, Shahrekord University, Shahrekord, Iran  
P.O.B. 56811-88617, Shahrekord, Iran, [mtehrani@lit.sku.ac.ir](mailto:mtehrani@lit.sku.ac.ir)

**Keywords**

Modeling  
Composite  
Intra-ply hybrid  
Bending behavior

**Abstract**

In this study, the bending behavior of pure and intra-ply hybrid composites reinforced with brittle and ductile fibers were simulated based on a finite element method. For this purpose, a four-ply composite with the unidirectional stacking sequence was designed by using the dimensional, physical and mechanical properties. In this way, the three point bending test was simulated on the model composites by using Abaqus software. In these models, the mechanical properties of composite layers were defined base on non-linear (elastic-plastic) behaviors. In order to validate the simulated model; the theoretical results were compared with the experimental ones. The results reveal that the model can predict the bending force at different deflection, accurately. As can be seen, the maximum difference between numerical and experimental results for fracture bending load is about 9.7%. In addition, the results distribution analysis at each layer of hybrid composites show that at the yield stress point, the outer layers of composites bear the longitudinal stress up to maximum strength but at this point the inner layers just used 30 percent of their maximum longitudinal stress.

**۱- مقدمه**

کامپوزیت نیاز به شناسایی و تقویت بخش های حساس در آنها است. از آنجایی که ساخت و آزمایش تجربی ابزار کامپوزیتی نیاز به زمان و هزینه بالایی دارد، تعدادی از پژوهشگران، از جمله جونز [۲]، نایک [۳] و شکریه [۴] مدل های تحلیلی و لیونگ [۵]، شربتدار [۶]، شکریه [۷، ۴]، ماکرل [۸] و تان [۹] مدل های عددی را برای طراحی این قطعه ها قبل از ساخت پیشنهاد داده اند.

هنگامی که یک قطعه کامپوزیتی تحت کشش، خمش، ضربه و یا فرآیندهایی از این قبیل قرار می گیرد نیروها و تنش هایی بر بخش های مختلف آن وارد می شود. این نیروها با توجه به شکل قطعه، باعث ایجاد تمرکز تنش در بخش هایی از قطعه کامپوزیت شده و در نهایت باعث ایجاد ترک و یا شکست در آن بخش ها می شوند [۱]. برای بهبود عملکرد ابزارهای ساخته شده از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:  
Tehrani-Dehkordi, M., "Numerical modeling of bending behavior of intra-ply hybrid composites using finite element method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 59-66, 2016.

هیبرید درون‌لایه‌ای تقویت‌شده با درصد‌های مختلف الیاف ترد (بازالت) و انعطاف‌پذیر (نایلون) که دارای رفتاری غیرخطی می‌باشند با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی گردیده است. برای ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در حالت تجربی مقایسه شده است.

## ۲- شبیه‌سازی فرآیند خمش

برای فرآیند خمش بر روی کامپوزیت‌های پلیمری باید به ترتیب مراحل تعریف هندسه هر بخش از مدل<sup>۴</sup>، مونتاژ کردن قسمت‌های مختلف<sup>۵</sup>، تعیین خواص مواد<sup>۶</sup>، نحوه اجرای فرآیند خمش<sup>۷</sup>، نحوه تماس بخش‌های مختلف<sup>۸</sup>، شرایط مرزی<sup>۹</sup>، المان‌بندی<sup>۱۰</sup> و در نهایت حل مساله<sup>۱۱</sup> را در نرم‌افزار آباکوس اعمال نمود.

کامپوزیت به صورت پوسته<sup>۱۲</sup> مستطیل تغییر شکل‌پذیر<sup>۱۳</sup> به طول ۱۰۰ و عرض ۲۵ میلیمتر تعریف شده است. سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چهار لایه با آرایش<sup>۴</sup> [(۰،۹۰)] تعریف شد؛ سپس برای هر لایه، پارامترهای ابعادی و فیزیکی شامل چگالی، ضخامت، زاویه و مشخصه‌های مکانیکی مورد نیاز تعریف گردید. مشخصه (۰،۹۰) نشان‌دهنده یک لایه پارچه است که نخ‌های تار در راستای صفر درجه و نخ‌های پود در راستای ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نحوه تعریف سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چند لایه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود ضخامت و زاویه قرارگیری هر لایه در بخش تعریف خواص مواد تعیین گردیده است. به منظور تعیین پارامترهای مکانیکی در هر لایه کامپوزیت، در بخش تعریف خواص مواد، هر لایه از نوع لمینا<sup>۱۴</sup> تعریف شده است.

الیاف انعطاف‌پذیر و کامپوزیت‌های تقویت شده با آنها جزو دسته مواد غیرخطی می‌باشند [۲۰]. مواد غیرخطی به موادی گفته می‌شوند که در آنها رابطه بین بارهای اعمالی و جابجایی‌ها خطی نیست. اصولاً تمام مواد غیر خطی دارای دو فاز عمده الاستیک و پلاستیک هستند. ویژگی‌های الاستیک و پلاستیک یک ماده مشخص معمولاً در آزمون کشش به دست می‌آیند [۲۲]. در اغلب مواد، فاز الاستیک ماده دارای رفتار خطی است. رفتار بخش خطی کامپوزیت با تعریف مدول الاستیسیته (E)، مدول برشی (G) و ضریب پواسن (Nu) در راستاهای طولی و عرضی، در نرم‌افزار آباکوس مشخص شد. رفتار مواد در فاز پلاستیک، کاملاً غیر خطی است. برای مدل‌سازی رفتار بخش پلاستیک کامپوزیت، عیناً نمودار تنش-کرنش این بخش، با استفاده از تعدادی نقطه به نرم‌افزار معرفی شد. این نقاط از نقطه تنش تسلیم<sup>۱۵</sup> شروع و به نقطه تنش نهایی ختم شده‌اند.

در فرآیند خمش سه نقطه‌ای<sup>۱۶</sup>، فک متحرک بالایی به شکل استوانه با سطح مقطع بیضی شکل به شعاع ۴ در ۵ میلیمتر و طول ۳۰ میلیمتر، به صورت پوسته سه بعدی و به فرم جسم صلب<sup>۱۷</sup> تعریف گردیده است. آنگاه در بخش مونتاژ، دقیقاً در قسمت میانی صفحه کامپوزیت قرار گرفته است. برای

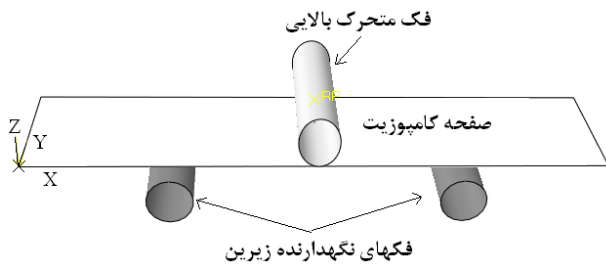
روش المان محدود<sup>۱</sup>، یک ابزار عددی چند بعدی و قدرتمند است که امکان مدل‌سازی دقیق قطعه‌هایی با هندسه پیچیده و خواص گوناگون ماده را فراهم می‌کند. با استفاده از این روش می‌توان داده‌های مورد نیاز از جمله تنش و کرنش در بخش‌ها و لایه‌های مختلف قطعه کامپوزیت را تعیین نمود. با کمک این داده‌ها می‌توان قبل از ساخت هر قطعه کامپوزیتی، بخش‌های حساس را در آن مشخص کرد؛ سپس مواد و ساختار مناسب را برای آن بخش در طراحی اولیه در نظر گرفت. برای مدل‌کردن رفتارهای مکانیکی کامپوزیت‌های پارچه‌ای از روش المان محدود به طور وسیعی استفاده شده است. تان و ماکرل مروری بر مدل‌سازی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پارچه‌ای با استفاده از روش المان محدود ارائه کرده‌اند [۸، ۹]. ویتکام و همکارانش، کامپوزیت‌های پارچه‌ای ساده بافت را با استفاده از تحلیل المان محدود سه بعدی بررسی نموده‌اند و اثر موجی دسته الیاف را بر مدول، نسبت پواسن و توزیع کشش داخلی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۰]. گلاسکن و همکارانش با استفاده از مدل هندسی منسوج و روش المان محدود، روشی برای مطالعه جزئیات داخلی پارامترهای تنش، کرنش و گسیختگی پیشنهاد کرده‌اند [۱۱]. تامپسون و کریفتن، روش تجزیه و تحلیل المان محدود موضعی/کلی<sup>۲</sup> دو بعدی به سه بعدی را برای تعیین میدان‌های تنش بین‌لایه‌ای در چند لایه‌های کامپوزیتی تحت فشار تک محوری مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۲]. طهرانی و همکارانش، رفتار در برابر ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های خالص و هیبرید درون‌لایه‌ای<sup>۳</sup> تقویت شده با الیاف انعطاف‌پذیر و ترد را بر مبنای روش المان محدود شبیه‌سازی نموده‌اند [۱۳]. نیزگودا و دروونکو، خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را به روش المان محدود موضعی/کلی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. هوساین و همکاران حل خطی پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب را با به کارگیری روش اجزای محدود انجام دادند. پوسته‌هایی که در نظر گرفتند از نوع دو انحنایی و جدار ضخیم بود. برای فرمول‌بندی اجزای محدود از تئوری مرتبه اول برشی استفاده کردند. برای جلوگیری از پدیده قفل شدگی برشی از روش فرمول‌بندی آمیخته بهره گرفتند [۱۵]. کاکانی و پراسانتی تحلیل غیر خطی صفحه مورب جدار نازک از جنس مواد مرکب که سوراخی با مقطع دایره‌ای در روی آن وجود دارد را بررسی کردند. صفحه در نظر گرفته شده صفحه‌ای جدار نازک با ۴ لایه بود. بارگذاری وارد بر صفحه از نوع جانبی و به شکل گسترده است. همچنین آن‌ها برای تحلیل رفتار صفحه از تئوری کلاسیک به کمک نرم‌افزار اجزای محدود انسیس استفاده کردند [۱۶].

در بین خواص مکانیکی، خواص خمشی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. هنگامی که داده‌های به دست آمده از فرآیند خمش، در انتخاب ساختار و مواد اولیه کامپوزیت مورد توجه قرار گیرد می‌توان کامپوزیتی با عملکرد بهتر طراحی نمود [۱۷، ۱۸]. با توجه به اهمیت رفتار خمشی کامپوزیت‌ها، این ویژگی توسط پژوهشگران زیادی به صورت تئوری و تجربی بررسی گردیده است [۱۹-۲۱]. نتایج پژوهش‌های تجربی نشان می‌دهند نسبت حجمی و نحوه ترکیب الیاف مختلف در کامپوزیت‌های هیبرید، پارامترهای تعیین‌کننده‌ای بر رفتار خمشی آنها هستند [۲۰، ۲۱]. در پژوهش‌های تئوری پیشین با در نظر گرفتن فرض‌ها و ساده‌سازی‌های مختلف، تاثیر خمش بر کامپوزیت‌هایی که تنها یک نوع تقویت‌کننده دارند و رفتار آنها خطی است بررسی شده است. در این پژوهش رفتار خمشی کامپوزیت‌های خالص و

4. Part  
5. Assembly  
6. Property  
7. Step  
8. Interaction  
9. Boundary condition  
10. Mesh  
11. Job  
12. Shell  
13. Deformable  
14. Lamina  
15. Yielding stress point  
16. Three point bending  
17. Rigid

1. Finite Element Method (FEM)  
2. Global/local analysis method  
3. Intra-ply hybrid

بخش جداگانه تقسیم گردیده است و می‌توان نتایج را برای هر المان، در هر لایه به صورت جداگانه مشاهده نمود. با توجه به منحنی بودن سطح فک‌های بالایی و زیرین، اندازه المان‌های این قسمت‌ها باید به گونه‌ای تعیین می‌شد که پوشش مناسبی بر روی سطح آنها ایجاد نماید. با توجه به این مساله، اندازه المان‌های این قسمت‌ها برابر ۱ میلی‌متر انتخاب شد. پس از المان‌بندی، تحلیل مساله با استفاده از روش استاندارد انجام شده است.



شکل ۲ قسمت‌های مختلف تعریف شده برای شبیه‌سازی فرآیند خمش بر روی صفحه کامپوزیت

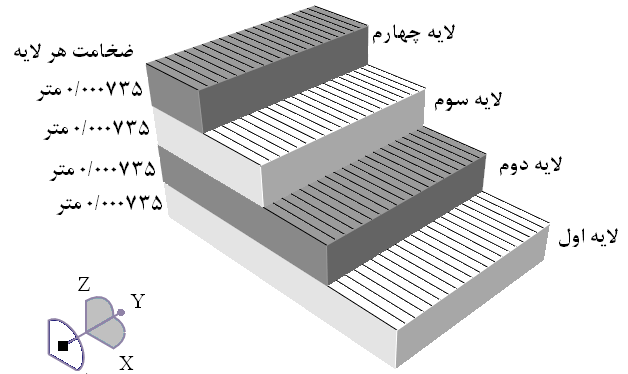
### ۳- آزمایش‌های تجربی

در این تحقیق الیاف بازالت و نایلون به ترتیب به عنوان الیاف ترد و انعطاف‌پذیر انتخاب شده‌اند. در نمونه‌های مورد بررسی، نسبت حجمی الیاف بازالت به کل حجم الیاف در هر لایه برابر ۱۰۰، ۷۵، ۶۶، ۵۰ و ۰ درصد در نظر گرفته شد. این کامپوزیت‌ها به ترتیب به صورت ۱۰۰ب، ۷۵ب، ۶۶ب، ۵۰ب و ۱۰۰کدبندی گردیده‌اند. شکل ۳ آرایش لایه‌های پارچه تقویت‌کننده را در کامپوزیت‌های خالص (نمونه‌های ۱۰۰ب و ۱۰۰ن) و هیبرید درون‌لایه‌ای (نمونه‌های ۷۵ب، ۶۶ب و ۵۰ب) بررسی شده نشان می‌دهد.

همانطور که اشاره شد برای شبیه‌سازی خمش بر روی نمونه‌های کامپوزیت مختلف، نیاز به مشخص کردن ویژگی‌های فیزیکی، ابعادی و مکانیکی آنها می‌باشد. این ویژگی‌ها در جدول ۱ و شکل ۴ آورده شده است. مشخصه‌های مکانیکی آورده شده در جدول ۱، با انجام آزمایش‌های کشش و برش تعیین شده‌اند. در این جدول مدول کششی و مدول برشی در راستاهای طولی و عرضی برابر هستند. شکل ۴، نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مورد بررسی را در طی آزمایش کشش نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های شکل ۴ می‌توان نقاط مورد نیاز برای بخش پلاستیک کامپوزیت‌های بررسی شده را تعیین نمود.

برای ارزیابی شبیه‌سازی انجام شده، نمونه‌های کامپوزیت کاملاً مشابه با حالت عددی، تحت آزمایش تجربی خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. آزمایش‌های خمش با استفاده از دستگاه ژونیک<sup>۸</sup> مدل ۱۴۹۴ مطابق شکل ۵ در دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر بر اساس استاندارد "آس‌تی‌ام دی ۷۹۰-۰۳" [۲۳] انجام شدند. دستگاه مورد استفاده مجهز به نیروسنجی<sup>۹</sup> با ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن می‌باشد. برای آزمایش‌های خمش فاصله فک‌های زیرین ۵۰ میلی‌متر و سرعت فک بالایی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. در بازه زمانی خمش، نیروی خمش و خیز ایجاد شده بر روی نمونه به ترتیب با استفاده از نیروسنج و فاصله فک‌های بالا و پایین اندازه‌گیری و در حافظه کامپیوتر ذخیره شد.

اعمال شرایط مرزی، فک‌های نگهدارنده زیرین به صورت استوانه با شعاع ۵ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر به صورت پوسته سه بعدی به فرم جسم صلب تعریف شده است. این فک‌ها با فاصله ۵۰ میلی‌متر دقیقاً در زیر نمونه کامپوزیت قرار داده شده‌اند. در شکل ۲، قسمت‌های مختلف تعریف شده برای شبیه‌سازی خمش بر روی صفحه کامپوزیت، پس از مونتاژ کردن نشان داده شده است. در همه مراحل شبیه‌سازی، تمام واحدها بر اساس سیستم بین‌المللی یکاها<sup>۱</sup> در نرم‌افزار وارد شده است.



شکل ۱ نحوه تعریف سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چند لایه

فرآیند خمش در یک مرحله به صورت الاستیک و از نوع عمومی<sup>۲</sup> انجام شده است. این نوع فرآیند برای تحلیل مسایل استاتیکی خطی و غیرخطی استفاده می‌شود. در این قسمت گزینه Nlgeom باید به صورت فعال انتخاب گردد. با انجام این کار نرم‌افزار تغییر شکل‌های بزرگ را مجاز می‌دارد.

در فرآیند خمش، فک متحرک بالایی با سرعت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در جهت ارتفاع و به سمت پایین حرکت می‌کند. در طی زمان خمش، تماس بین نمونه کامپوزیت و فک‌های زیرین نمونه، به صورت تماس اصطکاک‌دار از نوع پنالتی<sup>۳</sup> با ضریب اصطکاک ۰/۲ و تماس بین صفحه کامپوزیت و فک متحرک بالایی به صورت بدون اصطکاک<sup>۴</sup> در قسمت نحوه تماس بخش‌های مختلف تعریف شده است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود شرایط مرزی صفحه کامپوزیت با استفاده از فک‌های زیر آن تامین شده است. فک‌های زیر نمونه کامپوزیت، مانع حرکت آن در راستای ارتفاع می‌شوند. در این حالت نمونه به راحتی می‌تواند در راستاهای دیگر لغزش و یا چرخش داشته باشد. لازم به ذکر است کلیه قیدهای جابجایی و گشتاور نقطه مرجع فک‌های زیرین، ثابت شده است. شرایط مرزی بر روی فک متحرک بالایی به گونه‌ای تعریف شده است که این قطعه تنها بتواند در طی فرآیند خمش با سرعت ثابت به صورت عمود بر قسمت میانی صفحه کامپوزیت حرکت کند.

صفحه کامپوزیت با استفاده از ۲۵۰۰ المان مربع شکل<sup>۵</sup> یکنواخت<sup>۶</sup> و منظم<sup>۷</sup> با اندازه ۱ میلی‌متر از نوع S4R بر روی سطح، المان‌بندی شده است. با توجه به اینکه صفحه کامپوزیت از نوع پوسته و به صورت چهار لایه تعریف شده است ضخامت هر المان به صورت ظاهری برابر با ضخامت کامپوزیت می‌باشد اما در فضای درونی نرم‌افزار در راستای ضخامت، هر المان به چهار

1. SI
2. Static, General
3. Penalty
4. Frictionless
5. Quadrilaterals
6. Uniform
7. Structured

8. Zwick  
9. ASTM D.790-03  
10. Load cell

## ۴- بحث و نتیجه‌گیری

## ۴-۱- ارزیابی نتایج مدل

پس از تحلیل مدل، نتایج عددی از جمله تنش‌های طولی، عرضی، برشی و مقدار خیز در هر لحظه از زمان فرآیند خمش، تعیین شد. در طی فرآیند خمش بر روی نمونه‌های دارای آرایش تک جهته بیشینه مدول و تنش اصلی<sup>۱</sup> اصلی<sup>۱</sup> برابر با بیشینه مدول و تنش در راستای طول نمونه است. با استفاده از تنش طولی به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و با کمک رابطه‌های (۱) و (۲) می‌توان نیروی خمش در هر لحظه از زمان خمش و مدول خمشی را محاسبه نمود.

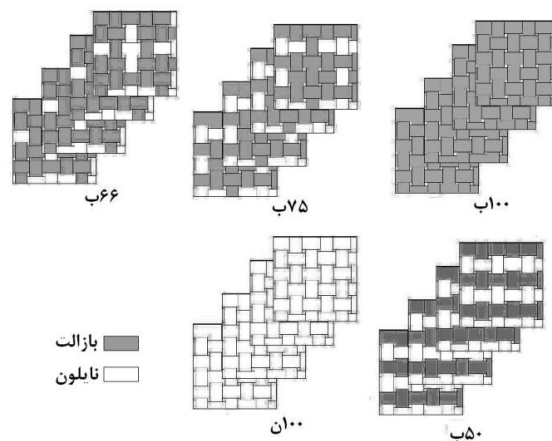
$$P = \frac{2bd^2S_{11}}{3L} \quad (1)$$

$$E_B = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (2)$$

در این رابطه‌ها  $b$  و  $d$  به ترتیب عرض و ضخامت نمونه کامپوزیت،  $L$  فاصله فک‌های زیرین،  $P$  نیروی خمش،  $S_{11}$  تنش طولی در هر لحظه از زمان خمش و  $m$  شیب نمودار نیرو-خیز در قسمت الاستیک می‌باشند [۲۳].

در شکل ۶، نمودار نیروی خمش نسبت به خیز نقطه میانی برای نمونه‌های مختلف کامپوزیت در حالت‌های عددی و تجربی با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند نیروی خمش عددی با نیروی خمش تجربی در خیزهای مختلف تا حد قابل قبول همخوانی دارند. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در هر دو حالت شبیه‌سازی و تجربی با افزایش خیز، ابتدا نیروی خمش با نرخ زیاد به صورت خطی افزایش یافته، سپس رفتار بخش پلاستیک کامپوزیت‌ها تاثیر خود را نشان می‌دهند؛ بنابراین منحنی نمودارهای خمش در خیز بالا از حالت خطی خارج شده و به تدریج و با نرخی پایین تا نقطه نیروی شکست ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است اهمیت و تاثیر تعریف بخشی از خواص کامپوزیت به صورت پلاستیک در مدل عددی، در نمودارهای شکل ۶ و سایر نتایج شبیه‌سازی قابل مشاهده می‌باشد. صورتی که خواص کامپوزیت فقط به صورت الاستیک تعریف شوند نمودار نیرو-خیز عددی تنها به صورت خطی و با نرخ زیاد مشابه بخش اول نمودارهای شکل ۶ افزایش می‌یابد. در این حالت با افزایش خیز، نیروی خمش عددی از مقدار تجربی به مقدار قابل توجهی (۲۶۵-۱۰۰ درصد در نقطه شکست تجربی) بیشتر خواهد شد. تعریف خواص کامپوزیت به صورت پلاستیک، باعث غیر خطی شدن نمودار نیروی خمش در خیزهای بالا می‌شود؛ در نتیجه مقدار نتایج نیروی خمش به مقدار واقعی تا حد قابل قبول نزدیکتر شده است.

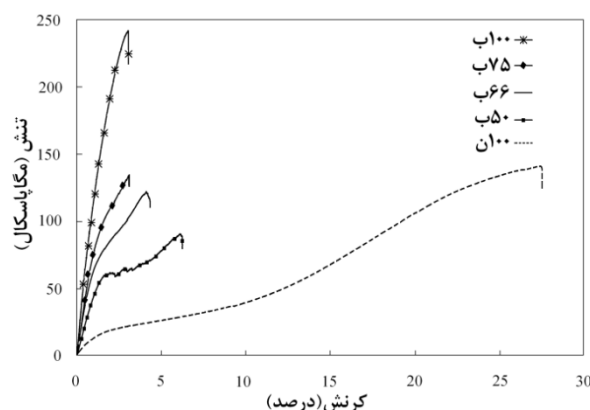
نمودارهای آورده شده در شکل ۶ نشان می‌دهند نیروی خمش عددی بدون هیچ گونه نوسانی همواره روندی افزایشی دارد اما نیروی خمش تجربی به خصوص در نمونه‌های ۱۰۰ب و ۷۵ب دارای نوسان‌های بزرگی می‌باشد. این نوسان‌ها در نمودارهای تجربی ناشی از جدا شدن لایه‌ها در نمونه‌های کامپوزیت است [۲۰]. با توجه به اینکه در مدل عددی اتصال بین لایه‌های کامپوزیت کامل تعریف شده، بنابراین در این مدل جدا شدن لایه‌ها به وجود نیامده و نوسانی در نیروی خمش ایجاد نشده است. نتایج بیشینه نیروی خمش حاصل از تحلیل مدل برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و نایلون در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود بیشینه نیروی خمش عددی ۱/۲ تا ۹/۷ درصد بیشتر از نتایج تجربی است.



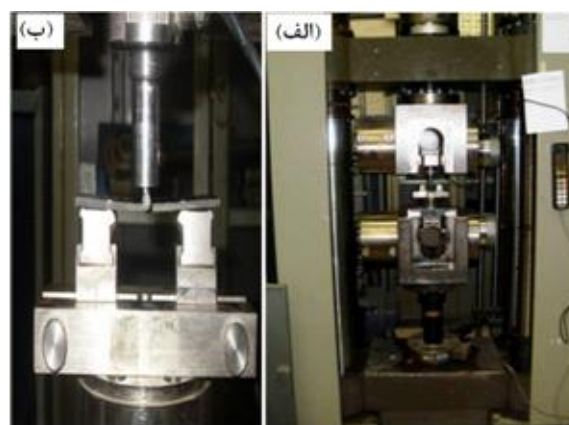
شکل ۳ آرایش لایه‌های پارچه تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های خالص (۱۰۰ب و ۱۰۰ا) و هیبرید درون لایه‌ای (۷۵ب، ۶۶ب و ۵۰ب)

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی، ابعادی و مکانیکی برای شبیه‌سازی فرآیند خمش

کد کامپوزیت	۱۰۰ب	۵۰ب	۶۶ب	۷۵ب	۱۰۰ا
ضخامت (mm)	۳/۲۳	۳/۶۰	۲/۹۶	۲/۹۴	۲/۹۲
چگالی تجربی (kgm <sup>-۳</sup> )	۱۱۷۰	۱۳۸۰	۱۶۱۰	۱۶۷۰	۱۷۳۰
مدول کششی (GPa)	۱/۰۵	۸/۳۲	۹/۵۲	۱۰/۴۳	۱۵/۴۲
ضریب پواسن	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶
مدول برشی (GPa)	۴/۲۱	۵/۱۳	۵/۲۹	۵/۳۰	۹/۴۵



شکل ۴ نمودار تنش-گرنش حاصل از آزمایش کشش برای نمونه‌های کامپوزیت بررسی شده

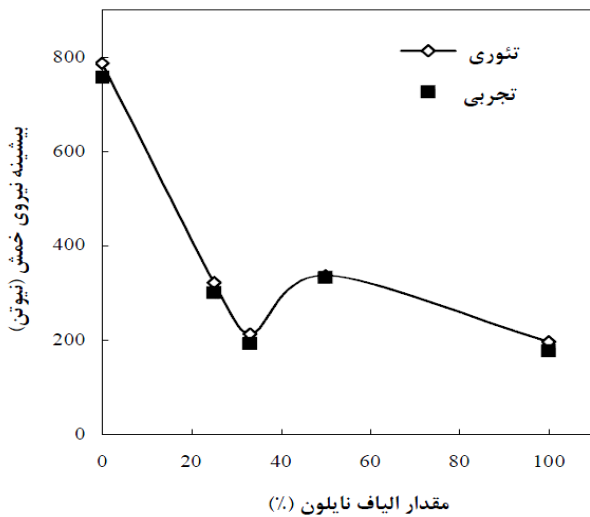


شکل ۵ الف) نمایی کلی از دستگاه خمش، ب) نمونه کامپوزیت تحت خمش

1. Max. Principal Stress

جدول ۲ نتایج بیشینه نیروی خمشی عددی و تجربی برای کامپوزیت‌های مختلف

کد نمونه	بیشینه نیروی خمشی (N)		درصد اختلاف نتایج عددی و تجربی
	تجربی	عددی	
۱۰۰ب	۷۸۷	۷۵۷	۳/۸
۷۵ب	۳۲۱	۳۰۰	۶/۵
۶۶ب	۲۱۳	۱۹۳	۹/۴
۵۰ب	۳۳۶	۳۳۲	۱/۲
۱۰۰ان	۱۹۶	۱۷۷	۹/۷



شکل ۷ بیشینه نیروی خمشی عددی و تجربی بر حسب مقدار الیاف نایلون

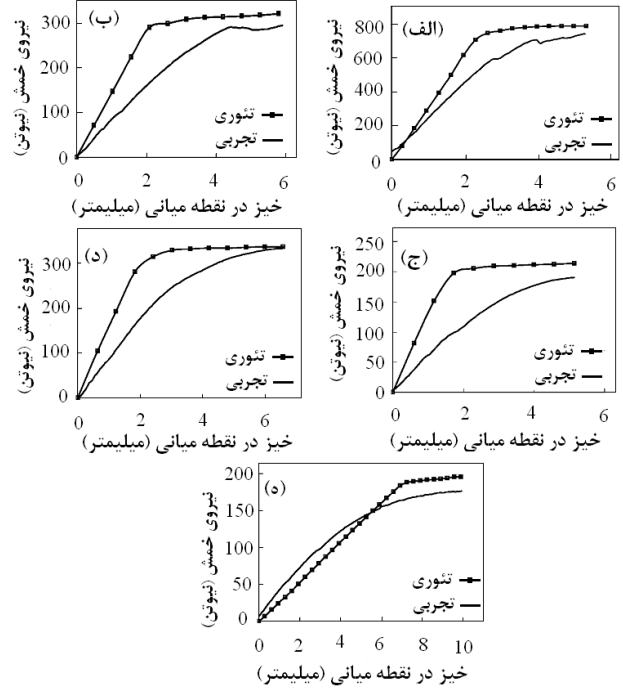
جدول ۳ نتایج مدول خمشی عددی و تجربی برای کامپوزیت‌های مختلف

کد نمونه	مدول خمشی (GPa)		درصد اختلاف نتایج عددی و تجربی
	تجربی	عددی	
۱۰۰ب	۱۵/۸۱	۱۰/۵۹	۴۹
۷۵ب	۷/۰۳	۴/۲۸	۶۴
۶۶ب	۵/۵۴	۲/۸۹	۹۱
۵۰ب	۴/۰۷	۲/۳۸	۷۰
۱۰۰ان	۱/۰۰	۱/۱۱	-۱۰

#### ۴-۲- نحوه توزیع و نوع تنش در لایه‌های مختلف

با استفاده از نتایج مدل عددی می‌توان نحوه توزیع و نوع تنش و کرنش در هر لحظه از زمان خمش در هر لایه از کامپوزیت را مورد بررسی قرار داد. با دستیابی به داده‌هایی همچون ماکزیمم تنش و نحوه انتشار آن در هر قسمت از سازه کامپوزیت، می‌توان فرآیند خمش را بر روی این سازه‌ها تحلیل و اقدام‌های لازم برای تقویت قسمت‌های حساس را انجام داد. لازم به ذکر است این داده‌ها را می‌توان از آزمایش‌های تجربی به دست آورد و یا برای دستیابی به آنها نیاز به صرف هزینه بالایی می‌باشد.

شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب توزیع بیشینه تنش طولی، عرضی و برشی را در لایه‌های مختلف نمونه هیبرید ۵۰ب نشان می‌دهند. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به دلیل تقارن، نصف نمونه آورده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود بیشینه تنش طولی بسیار بزرگتر از بیشینه تنش‌های عرضی و برشی می‌باشد. بیشینه تنش طولی تقریباً ۲ تا ۵ برابر تنش عرضی و برشی است. این نتایج نشان می‌دهند در کامپوزیت‌های طراحی شده، تنش اصلی که می‌تواند باعث شکست‌های احتمالی شود تنش طولی می‌باشد.



شکل ۶ نمودار نیروی خمشی نسبت به خیز در حالت‌های عددی و تجربی. (الف) ۱۰۰ب، (ب) ۷۵ب، (ج) ۶۶ب، (د) ۵۰ب و (ه) ۱۰۰ان

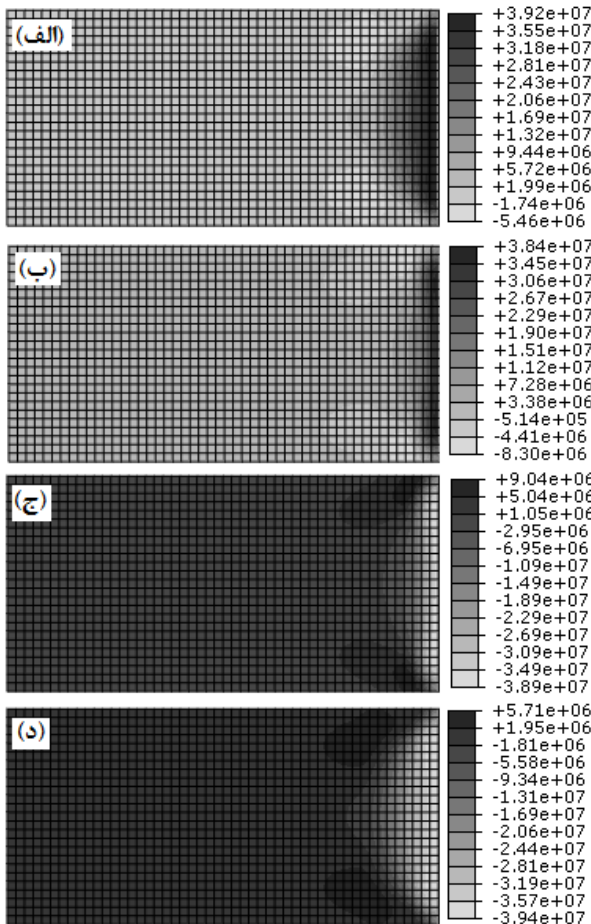
از آنجایی که حداکثر درصد اختلاف بین نتایج عددی و تجربی ۹/۷ درصد بوده است می‌توان دریافت شبیه‌سازی انجام شده با دقت بسیار بالایی قادر به پیش‌بینی مقاومت خمشی کامپوزیت‌های خالص و هیبرید می‌باشد. اختلاف بین نتایج عددی و تجربی به دلیل خطاهای آزمایش تجربی و ایده‌آل در نظر گرفتن ساختار کامپوزیت در مدل عددی می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد در مدل عددی جدا شدن لایه‌ها در نظر گرفته نشده است بنابراین در طی فرآیند خمش، هیچ‌گونه افتی در نیروی خمشی عددی به وجود نیامده و این نیرو همواره روندی افزایشی دارد؛ از این رو در همه نمونه‌ها بیشینه نیروی خمشی عددی از مقدار تجربی بیشتر شده است. شکل ۷ روند تغییر بیشینه نیروی خمشی عددی و تجربی کامپوزیت‌های خالص و هیبرید را بر حسب مقدار الیاف نایلون به کار رفته در آنها، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود نمودار روند تغییر نیروی خمشی عددی و تجربی تقریباً بر هم منطبق هستند. این نتایج نشان می‌دهد با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده می‌توان بیشینه نیروی خمشی را برای کامپوزیت‌هایی با درصد‌های مختلف از الیاف بازالت و نایلون (غیر از نمونه‌های بررسی شده) تعیین نمود. همچنین مدل عددی ارائه شده می‌تواند روند تغییر بیشینه نیروی خمشی را با تغییر درصد الیاف در کامپوزیت‌های هیبرید پیش‌بینی نماید. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش درصد الیاف نایلون، بیشینه نیروی خمشی، تقریباً کاهش یافته است. در این نمودار، نمونه ۵۰ب رفتاری متفاوت با سایر نمونه‌ها دارد. این اختلاف می‌تواند به دلیل ضخامت بیشتر این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها باشد (جدول ۱).

نتایج مدول خمشی حاصل از تحلیل مدل برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و نایلون در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در اکثر نمونه‌ها، مدول خمشی عددی تقریباً ۱/۵ تا ۱/۹ برابر، بیشتر از نتایج تجربی است. این اختلاف می‌تواند به این دلیل عدم دخالت بخش پلاستیک در خیزهای کم و در نظر نگرفتن تاثیر جابجایی هوای موجود در ساختار کامپوزیت در مدل عددی باشد.

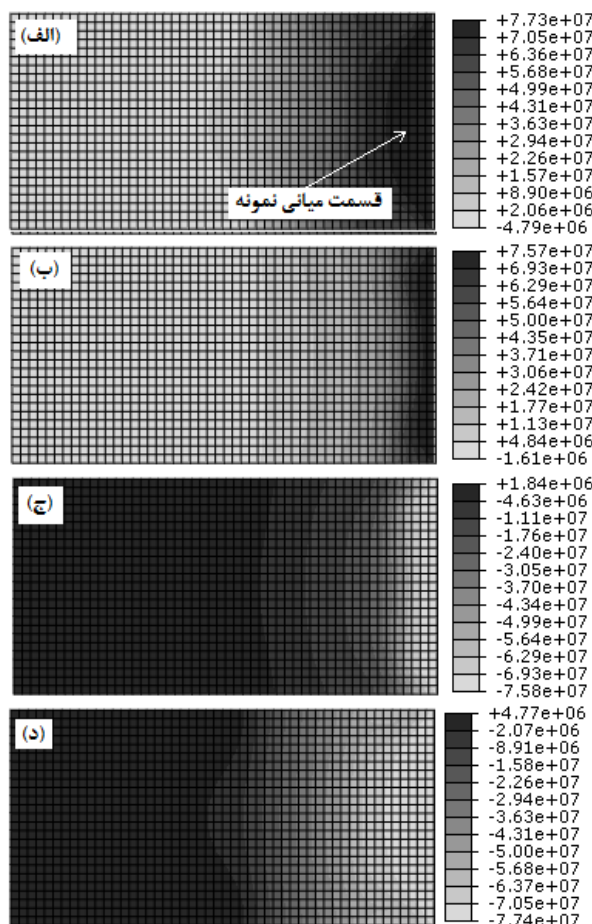


است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در زمان تسلیم نمونه (زمان ۲ ثانیه) تنش عرضی در لایه‌های درونی تقریباً به ۵۰ درصد مقدار بیشینه خود رسیده است. در این زمان مطابق شکل ۱۱، تنش طولی در لایه‌های بیرونی به مقدار بیشینه خود رسیده است.

بررسی شکل‌های ۸ و ۹ و نمودار ۱۱ برای نمونه ۵۰ و شکل‌های مشابه آن برای نمونه‌های دیگر نشان می‌دهند نوع تنش در قسمت میانی نمونه (ناحیه خمش) در لایه‌های مختلف، متفاوت بوده است. در نمودارهای شکل ۱۱ تغییر تنش طولی نسبت به زمان فرآیند خمش در قسمت میانی لایه‌های مختلف نمونه کامپوزیت ۵۰ آورده شده است.



شکل ۹ توزیع بیشینه تنش عرضی در لایه‌های مختلف نمونه ۵۰ (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم



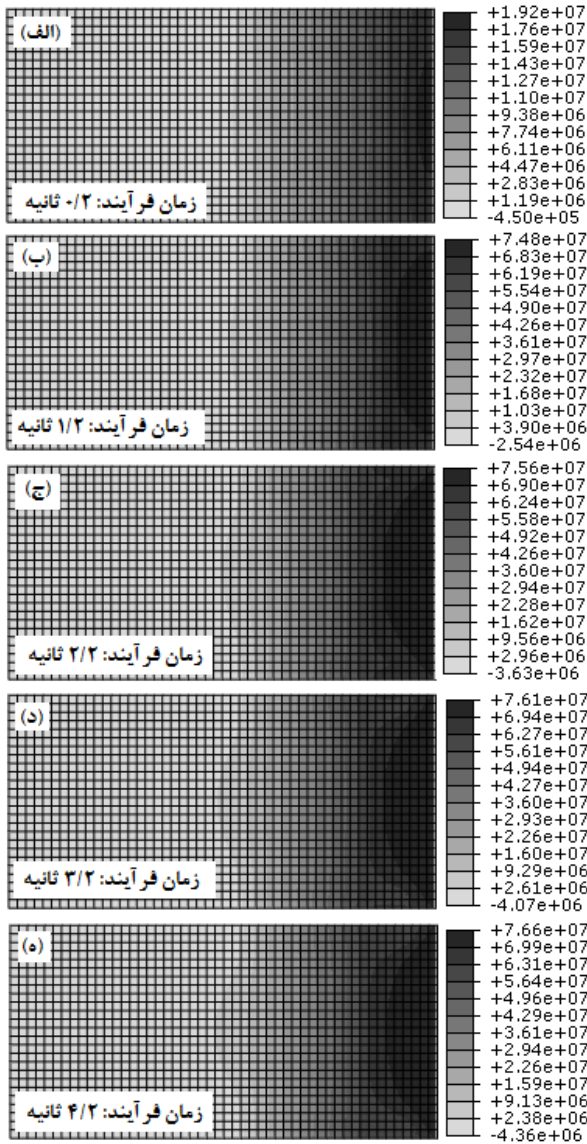
شکل ۸ توزیع بیشینه تنش طولی در لایه‌های مختلف نمونه ۵۰ (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم

شکل ۱۳ نحوه افزایش مقدار تنش طولی را در لایه اول نمونه ۵۰ هنگامی که تحت خمش قرار گرفته نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این لایه ابتدا تنش در اطراف قسمت میانی نمونه گسترش یافته است (شکل‌های الف تا ج) اما با گذشت زمان و ایجاد خیز در نمونه، تنش به سمت قسمت میانی متمرکز شده و باعث شکست‌های احتمالی در این ناحیه گردیده است (شکل‌های د و ه). با تحلیل شکل‌هایی مشابه شکل ۱۳ می‌توان قسمت‌های حساس در برابر خمش را بر روی سطح نمونه در مقدار خیزهای مختلف مشخص نمود و اقدام‌های لازم را برای تقویت آن قسمت در زمان ساخت در نظر گرفت.

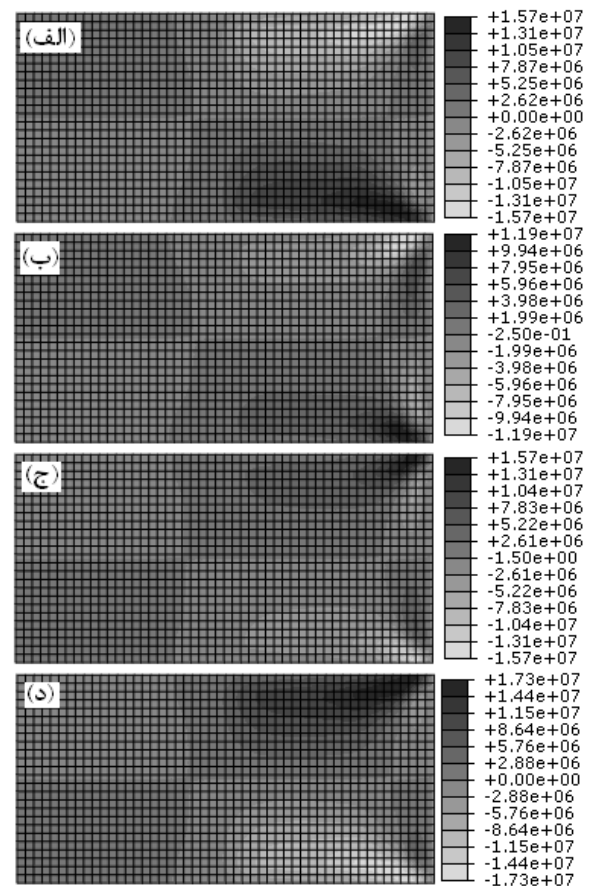
### ۵- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بر مبنای روش المان محدود، فرآیند خمش سه نقطه‌ای در کامپوزیت‌های خالص و هیبرید درون‌لایه‌ای تقویت شده با درصد‌های مختلف بازالت و نایلون بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند:

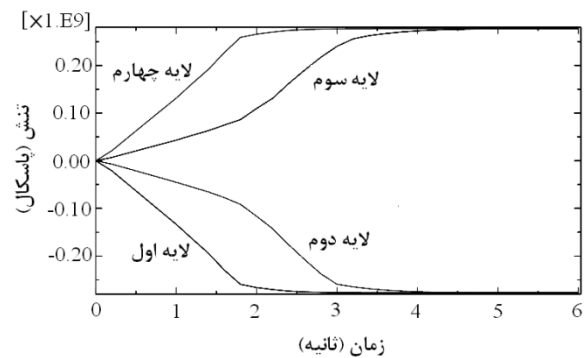
تحلیل نتایج این نمودارها و شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند مقدار و گستردگی تنش در لایه‌های بیرونی نمونه (لایه‌های اول و چهارم) بیشترین مقدار را داشته است. همانطور که در نمودار ۱۲ مشاهده می‌شود تنش طولی (تنش اصلی) در لایه‌های اول و چهارم تقریباً ۲ ثانیه پس از شروع فرآیند خمش به مقدار بیشینه خود رسیده است. در این زمان، تنش در لایه‌های دوم و سوم تنها به ۳۰ درصد مقدار تنش نهایی خود رسیده است. در زمان ۲ ثانیه، خیز ایجاد شده در نمونه کامپوزیت برابر ۳/۳۳ میلی‌متر بوده است. نتایج شکل ۶-د نشان می‌دهد در این خیز نمونه به نقطه تسلیم رسیده و پس از این نقطه با افزایش خیز، نمونه مقاومتی در برابر خمش از خود نشان نمی‌دهد. از تحلیل‌های اشاره شده در بالا می‌توان دریافت زمانی که نمونه در برابر فرآیند خمش به نقطه تسلیم می‌رسد لایه‌های اول و چهارم از مقدار بیشینه تنش طولی خود برای مقاومت در برابر خمش استفاده می‌کنند اما در همین زمان لایه‌های دوم و سوم حداکثر از ۳۰ درصد ظرفیت خود استفاده می‌نمایند. در نمودارهای شکل ۱۲ تغییر تنش عرضی نسبت به زمان فرآیند خمش در قسمت میانی لایه‌های مختلف نمونه کامپوزیت ۵۰ آورده شده



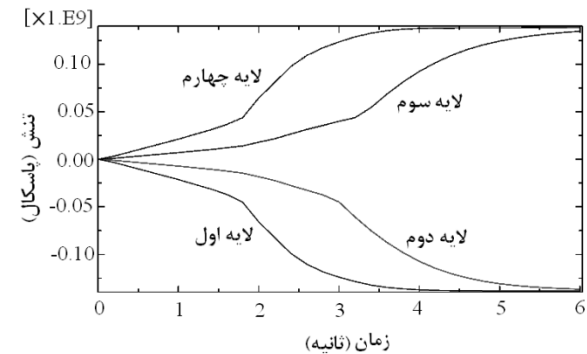
شکل ۱۳ نحوه تغییر مقدار تنش طولی در طی فرآیند خمش در لایه اول نمونه ۵۰



شکل ۱۴ توزیع بیشینه تنش برشی در لایه‌های مختلف نمونه ۵۰ (الف) لایه اول، (ب) لایه دوم، (ج) لایه سوم و (د) لایه چهارم



شکل ۱۱ تغییر تنش طولی نسبت به زمان فرآیند خمش در قسمت میانی لایه‌های مختلف نمونه ۵۰



شکل ۱۲ تغییر تنش طولی نسبت به زمان فرآیند خمش در قسمت میانی لایه‌های مختلف نمونه ۵۰

- مدل ارائه شده در حد قابل قبول، تغییر نیروی خمش نسبت به خیز را در نمونه‌های مختلف تعیین می‌نماید.
- شبیه‌سازی انجام شده با دقت بسیار بالایی قادر به پیش‌بینی استحکام خمشی کامپوزیت‌های خالص و هیبرید می‌باشد. حداکثر درصد اختلاف بین نتایج عددی و تجربی برای بیشینه نیروی خمش ۹/۷ درصد بوده است.
- مدل ارائه شده تغییر استحکام خمشی با تغییر درصد الیاف بازالت و نایلون را با دقت بالایی مشخص می‌کند. در هر دو حالت عددی و تجربی با افزایش درصد الیاف نایلون، بیشینه نیروی خمش تقریباً کاهش یافته است.
- نتایج تحلیل نوع و نحوه توزیع تنش و کرنش در هر لایه از کامپوزیت نشان می‌دهند:
- زمانی که نمونه در برابر فرآیند خمش به نقطه تسلیم می‌رسد لایه‌های بیرونی از مقدار بیشینه تنش طولی خود برای مقاومت در برابر خمش استفاده می‌کنند اما در همین زمان لایه‌های درونی حداکثر از ۳۰ درصد ظرفیت خود استفاده می‌نمایند.

[23] Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation, Annual Book of ASTM Standard, D 790-03, 2003.

#### ۶- فهرست علائم

E	مدول کششی (Mpa)
Nu	ضریب پواسن
G	مدول برشی (Mpa)
S	تنش (Mpa)
P	نیروی خمشی (N)

#### ۷- مراجع

- [1] Toubal, L. Karama, M. and Lorrain, B., "Stress Concentration in a Circular Hole in Composite Plate," Composites Structure, Vol. 68, pp. 31-36, 2005.
- [2] Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials," Second ed., Taylor & Francis, Inc. London, UK, 1999.
- [3] Naik, N.K. and Ganesh, V.K., "Prediction of N-axes Elastic Properties of Plain Weave Fabrics Composites," Composite Science and Technology, Vol. 45, pp. 135-152, 1992.
- [4] Shokrieh, M.M. and Fakhar, N., "Experimental, Analytical and Numerical Studies of Composite Sandwich Panels under Low Velocity Impact Loadings," Mechanics of Composite Materials, Vol. 47, No. 6, pp. 643-658, 2011.
- [5] Liyong, T. Mouritz, A.P. and Bannister, M.K., "3D Fiber Reinforced Polymer Composites," Elsevier Science Ltd, UK, 1991.
- [6] Sharbatdar, A. and Fazilati, J., "Geometrically Nonlinear Analysis of Moderately Thick Curved Composite Panels Under Lateral Load," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 53-64, 2015.
- [7] Shokrieh, M.M. and Karamnejad, A., "Dynamic Response of Strain Rate Dependent Glass/Epoxy Composite Beams Using Finite Difference Method," International Journal of Aerospace and Mechanics Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 63-69, 2011.
- [8] Mackerle, J., "Finite Element Analyses and Simulations of Manufacturing Processes of Composites and Their Mechanical Properties: A Bibliography (1985-2003)," Computational Material Science, Vol. 31, No. 3, pp. 187-219, 2004.
- [9] Tan, P., Tong, L. and Steven, G.P., "Modeling for Predicting the Mechanical Properties of Textile Composites- A Review," Composites, Vol. 28, No. ??, pp. 903-922, 1997.
- [10] Whitcom, J.D., "Three-Dimensional Stress Analysis of Plain Weave Composites," Proceeding of the Third Symposium on Composite Material: Fatigue and Fracture, Orlando, Florida, 1989.
- [11] Glaessgen, E.H. Pastore, C.M. Griffin, O.H. and Birger, A., "Geometrical and Finite Element Modeling of Textiles Composites," Composites, Vol. 27, No. 1, pp. 43-50, 1996.
- [12] Thompson, D.M. and Griffin, O.H., "Verification of a 2-D to 3-D Global Local Finite Element Method for Symmetric Laminates," Journal of Reinforced Plastics & Composites, Vol. 11, No. 8, pp. 910-931, 1992.
- [13] Tehrani-dehkordi, M. Nosraty, H. and Shokrieh, M.M., "Low Velocity Impact Simulation of Intraply Hybrid Composites Reinforced with Brittle and Ductile Fibers," In Persian, Journal of Advanced Materials in Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 115-124, 2013.
- [14] Niezgodna, T. and Derewonko, A., "Multiscale Composite FEM Modeling," Procedia Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 209-212, 2009.
- [15] Hossain, S.J. Sinha, P.K. and Sheikh, A.H., "A Finite Element Formulation for the Analysis of Laminated Composite Shells," Computers & Structures, Vol. 82, No. 20, pp. 1623-1638, 2004.
- [16] Kakani, G.S. and Prasanthi, P.P., "Prediction of Nonlinear Behavior of Thin Skew Plates with Cut-out Using Finite Element Analysis," Engineering Research & Technology, Vol. 1, 2012.
- [17] Park, R. and Jang, J., "Stacking Sequence Effect of Aramid-UHMPE Hybrid Composites by Flexural Test Method," Polymer Testing, Vol. 16, pp. 549-562, 1997.
- [18] Ullah, H. Harland, A.R. and Silberschmidt, V.V., "Damage Modeling in Woven-Fabric CFRP Laminates under Large-Deflection Bending," Computational Material Science, Vol. 64, pp. 130-135, 2012.
- [19] Malekzadeh Fard, K. and Rezaei Hassanabadi, M., "Free Vibration and Static Bending Analysis of Curved Sandwich Panel with Magneto-Rheological Fluid Layer in Sheets using Improved High Order Sandwich Panel Theory," Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 49-62, 2015.
- [20] Dong, C. and Davies, I.J., "Optimal Design for the Flexural Behaviour of Glass and Carbon Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites," Material and Design, Vol. 37, pp. 450-457, 2012.
- [21] Tehrani-Dehkordi, M. Nosraty, H. and Rajabzadeh, M.H., "Effects of Plies Stacking Sequence and Fiber Volume Ratio on Flexural Properties of Basalt/Nylon-Epoxy Hybrid Composites," Fibers and polymers, Vol. 16, No. 4, pp. 918-925, 2011.
- [22] Ghaei, A., "Modeling of Nonlinear Elastic Modulus Variation During Cyclic Loading," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 7, pp. 10-17, 2013.