

## شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین بر روی کامپوزیت‌های مرکب درون لایه‌ای تقویت شده با الیاف ترد و انعطاف پذیر

مجید طهرانی دهکردی<sup>۱\*</sup>، هوشنگ نصرتی<sup>۲</sup> و محمود مهرداد شکریه<sup>۳</sup>

۱. دانشکده فرش، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶)

چکیده -

واژگان کلیدی:

---

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [mtehrani@aut.ac.ir](mailto:mtehrani@aut.ac.ir)

## Low Velocity Impact Simulation of Intraply Hybrid Composites Reinforced with Brittle and Ductile Fibers

M.Tehrani Dehkordi<sup>1</sup>, H. Nosraty<sup>2</sup> and M.M. Shokrieh<sup>3</sup>

1.Department of Carpet, Shahrekord University

2.Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology,

3.Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

**Abstract:** *In this study, the impact strength of homogenous and intra-ply hybrid composites reinforced with ductile and brittle fibers was predicted based on a finite element method. For this purpose, a four-ply composite with the quasi-isotropic stacking sequence was designed considering the dimensional, physical and mechanical properties. Next, using Abaqus software, the parameters such as contact force and deflection, at 30 J impact energy were determined. In order to validate the simulated model, the theoretical results were compared with the experimental ones. The results revealed that the model can predict the variation of maximum contact force and maximum deflection with changing the content of brittle fiber. In addition, the results can be used to analyze the stress and strain distributions during the impact.*

**Keywords:** *Simulation, Hybrid Composite, Impact, Brittle Fiber, Ductile Fiber*

S11	تنش در راستای اعمال نیرو	S22	تنش عمود بر راستای اعمال نیرو
-----	--------------------------	-----	-------------------------------

### ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری در برابر محرک‌های خارجی عکس‌العمل‌های پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. این امر به دلیل تعدد فاکتورهای موثر بر خواص مکانیکی و دینامیکی کامپوزیت‌ها از جمله اجزای تشکیل‌دهنده و ساختار آنهاست. در عین حال با توجه به کاربرد وسیع این دسته از مواد در صنایع مختلف، ضروری به نظر می‌رسد که روش‌هایی برای قاعده‌مند کردن رفتار آنها یافته شود. محققان به منظور پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌ها در برابر محرک‌های خارجی، از روش‌های مختلف عددی و تحلیلی استفاده می‌کنند. روش‌های عددی مانند اجزای محدود و تفاضل محدود قادر به حل دامنه گسترده‌ای از مسائل در فیزیک و مهندسی‌اند. پس از تحلیل‌های استاتیکی، کاربرد روش اجزای محدود در حل مسائل دینامیکی با مقیاس بزرگ گسترش یافته است. شبیه‌سازی رایانه‌ای آزمایش‌های مکانیکی و دینامیکی یکی از قسمت‌های مهم فرایند طراحی در صنایع خودروسازی، هوافضا و صنایع نظامی است [۱].

برای انجام آزمایش ضربه بر روی کامپوزیت، نیاز به دستگاه‌های پیشرفته آزمایش و صرف هزینه‌های زیاد است. از طرف دیگر برخی موارد جزئی مانند توزیع تنش<sup>۱</sup> و کرنش<sup>۲</sup>، نحوه انتشار موج، مکانیزم‌های پارگی<sup>۳</sup> و ... در آزمایش‌های تجربی قابل بررسی نیستند. لذا محققان برای رفع این مشکلات تلاش خود را بر روی روش‌های تحلیلی و عددی آزمایش متمرکز کرده‌اند. در تعدادی از کتاب‌های مرجع [۲-۴] به صورت تحلیلی با استفاده از روش‌های جرم و فنر و تعادل انرژی فرایند ضربه مورد بررسی قرار گرفته است. تعدادی از محققان فرایند ضربه را با استفاده از روش‌های عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. مو<sup>۳</sup> با استفاده از روش اجزای محدود دریافت قرار دادن سیم‌های فلزی در بین لایه‌های کامپوزیت کربن/اپوکسی می‌تواند باعث بهبود عملکرد این کامپوزیت‌ها در برابر ضربه‌های با سرعت کم شود [۵]. جانسون<sup>۵</sup> و همکارانش با شبیه‌سازی ضربه بر روی کامپوزیت‌های پوسته‌ای به این نتیجه رسیدند که سفتی ضربه-زن یکی از فاکتورهای موثر بر میزان آسیب ایجاد شده در

مختلف<sup>۲۱</sup>، تعیین خواص مواد<sup>۲۲</sup>، نحوه‌ی اجرای فرایند ضربه<sup>۲۳</sup>، نحوه‌ی تماس بخش‌های مختلف<sup>۲۴</sup>، شرایط مرزی<sup>۲۵</sup>، مش‌بندی<sup>۲۶</sup> و در نهایت حل مسئله<sup>۲۷</sup> را در نرم‌افزار آباکوس اعمال کرد.

کامپوزیت به صورت پوسته<sup>۲۸</sup> مستطیل تغییر شکل‌پذیر<sup>۲۹</sup> به طول ۱۵۰ و عرض ۱۰۰ میلی‌متر تعریف شده است. سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چهار لایه با آرایش شبه-ایزوتروپیک<sup>۳۰</sup> تعریف، سپس برای هر لایه، پارامترهای ابعادی و فیزیکی شامل چگالی<sup>۳۱</sup>، ضخامت، زاویه و مشخصه‌های مکانیکی مورد نیاز از جمله مدول کششی، مدول برشی و ضریب پواسن در راستاهای طولی و عرضی تعریف شد. شکل (۱) نحوه تعریف سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چند لایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ضخامت و زاویه قرارگیری هر لایه در بخش تعریف خواص مواد تعیین شده است. به منظور تعیین پارامترهای مکانیکی در هر لایه کامپوزیت، در بخش تعریف خواص مواد، هر لایه از نوع لیمینا<sup>۳۲</sup> تعریف شده است. همچنین در این قسمت، معیار شکست<sup>۳۳</sup> هاشین<sup>۳۴</sup> با استفاده از مقادیر بیشینه استحکام کششی، فشاری و برشی تعریف شد [۱۴].

ضربه‌زن<sup>۳۵</sup> به شکل نیمکره به شعاع ۱۲/۷ میلی‌متر، به صورت پوسته سه بعدی و به شکل جسم صلب<sup>۳۶</sup> تعریف شده است. برای اعمال شرایط مرزی، یک صفحه در زیر نمونه کامپوزیت و چهار گیره در گوشه‌های آن به صورت پوسته سه بعدی به شکل جسم صلب تعریف شده است. در شکل (۲)، قسمت‌های مختلف تعریف شده برای شبیه‌سازی آزمایش ضربه پس از مونتاژ کردن نشان داده شده است. در همه مراحل شبیه‌سازی فرایند ضربه، همه واحدها بر اساس استاندارد سیستم بین‌المللی<sup>۳۷</sup> در نرم‌افزار وارد شده است.

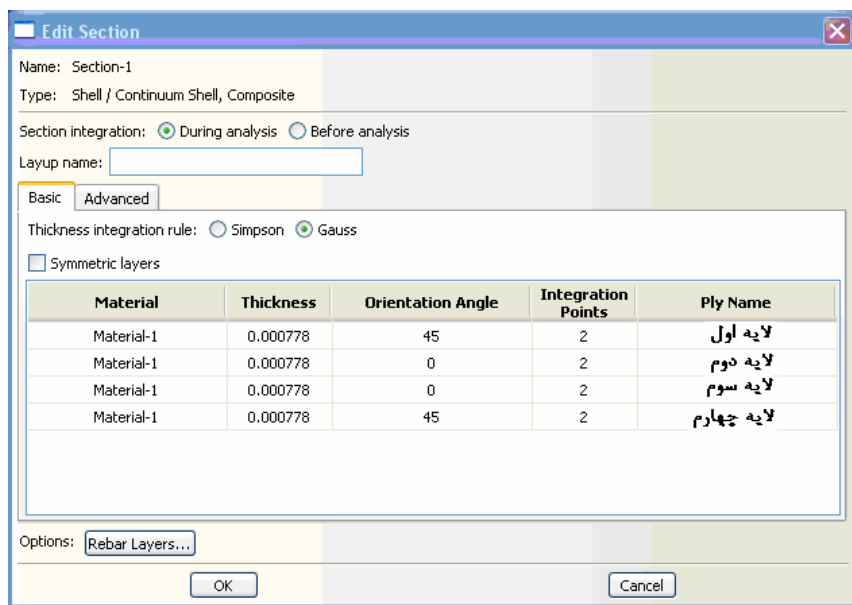
فرایند ضربه در دو مرحله انجام شده است. در گام اول، ضربه‌زن از فاصله بسیار کمی تا سطح نمونه با سرعتی ثابت حرکت می‌کند. در گام دوم، ضربه‌زن با سطح نمونه برخورد

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف است [۶]. سوزا<sup>۶</sup>، دکا<sup>۷</sup> و ایپانکی<sup>۸</sup> و من‌نا<sup>۹</sup> با کدنویسی بر مبنای روش اجزای محدود، تاثیر ضربه بر میزان و نوع آسیب‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌های پلیمری را مورد بررسی قرار دادند [۷-۱۰]. لو<sup>۱۰</sup> آسیب‌های ایجاد شده بر روی کامپوزیت کربن/اپوکسی که سوراخی در روی سطح آن است را بررسی کرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد آسیب‌های ایجاد شده از نوع ترک ماتریس بوده و در محدوده سوراخ و محل ضربه متمرکز شده‌اند [۱۱]. هر<sup>۱۱</sup> و همکارانش تاثیر شرایط مرزی و شکل کامپوزیت را بر پارامترهای ضربه کامپوزیت‌های استوانه‌ای و کروی شکل بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد کاهش انحنا در کامپوزیت و شرایط مرزی محکم‌تر باعث افزایش نیروی ضربه و کاهش خیز در نمونه‌های کامپوزیت می‌شود [۱۲]. نایک<sup>۱۲</sup> و همکارانش تاثیر ساختار پارچه تقویت‌کننده را بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های پلیمری بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های بافته شده‌ی دو طرفه<sup>۱۳</sup> عملکرد بهتری در برابر ضربه نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های تک جهته<sup>۱۴</sup> دارند [۱۳].

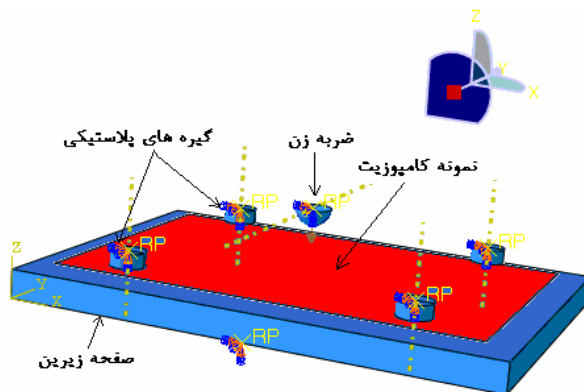
در همه تحقیقات انجام شده قبلی با در نظر گرفتن فرض‌ها و ساده‌سازی‌های مختلف تاثیر ضربه بر کامپوزیت‌هایی که تنها یک نوع تقویت‌کننده دارند بررسی شده‌اند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود<sup>۱۵</sup>، مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های خالص<sup>۱۶</sup> و مرکب درون لایه‌ای<sup>۱۷</sup> تقویت شده با درصد‌های مختلف الیاف ترد<sup>۱۸</sup> (بازالت) و انعطاف-پذیر<sup>۱۹</sup> (نایلون)، شبیه‌سازی شده است. برای ارزیابی شبیه-سازی‌های انجام شده، نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار با نتایج آزمایش ضربه در حالت تجربی مقایسه شده است.

## ۲- شبیه‌سازی فرایند ضربه

برای شبیه‌سازی ضربه باید به ترتیب مراحل تعریف هندسه هر بخش از مدل<sup>۲۰</sup>، مونتاژ کردن قسمت‌های



شکل ۱- نحوه‌ی تعریف سطح مقطع پوسته به صورت کامپوزیت چند لایه

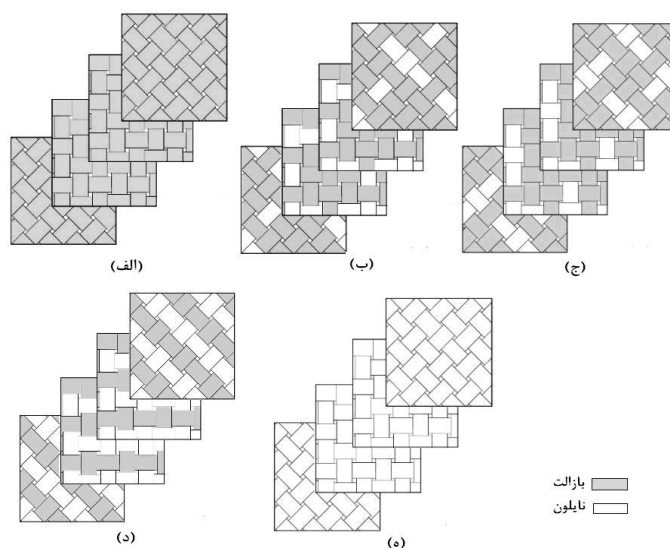


شکل ۲- قسمت‌های مختلف تعریف شده برای شبیه‌سازی آزمایش ضربه

شده است.

شکل (۲)، نحوه اعمال شرایط مرزی بر روی بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شرایط مرزی صفحه کامپوزیت با استفاده از قسمت‌های زیرین و گیره‌های نگهدارنده اطراف آن تامین شده است. صفحه زیر نمونه کامپوزیت مانع حرکت آن در راستای حرکت ضربه‌زن (راستای ارتفاع) می‌شود. تماس گیره‌های نگهدارنده باعث محدود شدن حرکت نمونه در راستای طولی و عرضی

خواهد کرد. سرعت ضربه‌زن در بخش نحوه اجرای فرایند ضربه، به گونه‌ای تعیین شد که شدت ضربه، در لحظه برخورد ۳۰ ژول باشد. در این بخش جرم ضربه‌زن برابر ۱/۲۵ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در طی زمان برخورد تماس بین نمونه کامپوزیت و سطح زیرین نمونه و گیره‌های نگهدارنده آن، به صورت تماس اصطکاک‌دار از نوع پهنالی<sup>۳۸</sup> و تماس بین صفحه کامپوزیت و ضربه‌زن به صورت بدون اصطکاک<sup>۳۹</sup> در بخش نحوه تماس بخش‌های مختلف تعریف



شکل ۳- آرایش لایه‌های پارچه تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های خالص (الف) و (ه) و هیبرید (ب)، (ج) و (د)

به منظور پوشش مناسب سطح آن، اندازه المان‌های قسمت ضربه‌زن برابر ۲ میلی‌متر انتخاب شد. پس از مش‌بندی، تحلیل مسئله با استفاده از روش اکسپلیسیت<sup>۳۳</sup> به صورت خطی<sup>۴۴</sup> و در حالت اجزا با کرنش کم<sup>۴۵</sup> انجام شده است.

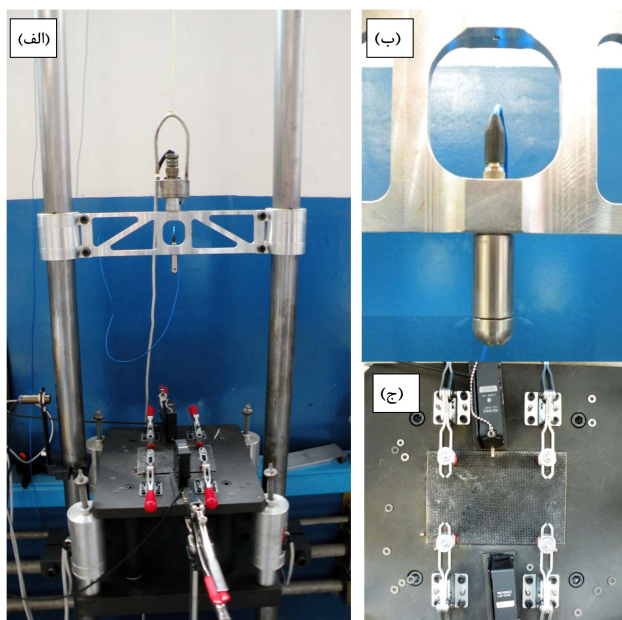
### ۳- تجربیات

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 در هر لایه برابر ۱۰۰، ۷۵، ۶۶، ۵۰ و ۰ درصد در نظر گرفته شد. این کامپوزیت‌ها به ترتیب به صورت B۱۰۰۰، ۷۵B۲۵N، ۶۶B۳۳N، ۵۰B۵۰N و ۱۰۰N کدبندی شده‌اند. شکل (۳) آرایش لایه‌های پارچه تقویت‌کننده را در کامپوزیت‌های خالص، نمونه‌های (الف) و (ه) و هیبرید، نمونه‌های (ب)، (ج) و (د) بررسی شده نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره شد برای شبیه‌سازی ضربه بر روی نمونه‌های مختلف کامپوزیت، نیاز به مشخص کردن خواص

می‌شوند. همچنین این گیره‌ها در محل تماسشان مانع حرکت نمونه در راستای ارتفاع و به سمت بالا می‌شوند. لازم به ذکر است کلیه قیده‌های جابه‌جایی و گشتاور نقطه مرجع صفحه زیرین و گیره‌های نگهدارنده در همه مراحل مسئله، ثابت شده است. شرایط مرزی بر روی ضربه‌زن به گونه‌ای تعریف شده که این قطعه در گام اول با سرعت ثابت به صورت عمود بر صفحه کامپوزیت و در گام دوم با سرعت متغیر در همان راستا حرکت می‌کند.

صفحه کامپوزیت با استفاده از ۹۵۰ المان مربع شکل<sup>۴۰</sup> یکنواخت<sup>۴۱</sup> و منظم<sup>۴۲</sup> با اندازه ۴ 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 است اما در فضای درونی نرم‌افزار در راستای ضخامت، هر المان به چهار بخش جداگانه تقسیم شده است و می‌توان نتایج را برای هر المان در هر لایه به صورت جداگانه مشاهده کرد. با توجه به منحنی بودن سطح ضربه‌زن،



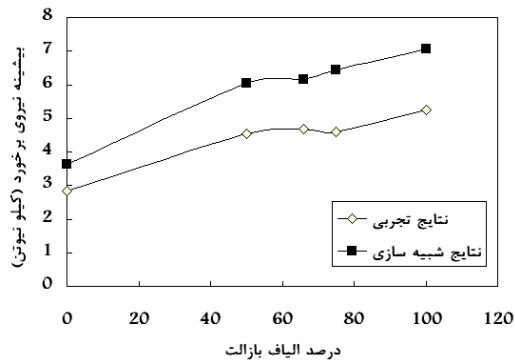
شکل ۴- نمایی از (الف) دستگاه ضربه، (ب) شکل ضربه زن و (ج) نحوه بستن نمونه در دستگاه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی، ابعادی و مکانیکی مورد نیاز برای شبیه سازی فرآیند ضربه

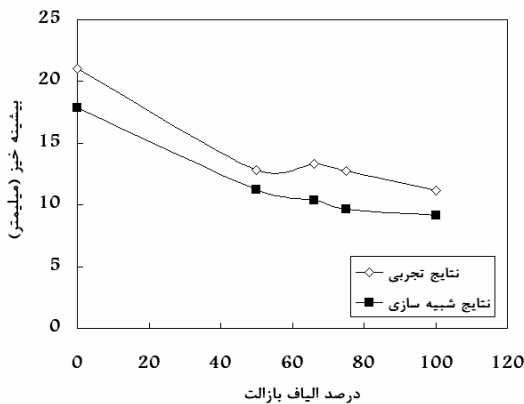
کد کامپوزیت	100B	75B25N	66B33N	50B50N	100N
ضخامت (mm)	۳/۰۳	۳/۱۴	۳/۰۳	۳/۹۸	۳/۱۶
چگالی تجربی (kg.m <sup>-3</sup> )	۱۷۳۰	۱۶۷۰	۱۶۲۰	۱۳۷۰	۱۱۷۰
مدول کششی (GPa)	۱۵/۴۲	۱۰/۴۳	۹/۵۲	۸/۳۲	۱/۰۵
ضریب پواسن	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۲۷
مدول برشی (GPa)	۹/۴۵	۵/۳۰	۵/۲۹	۵/۱۳	۴/۲۱
بیشینه استحکام کششی (MPa)	۲۴۴	۱۲۸	۱۲۲	۸۵	۱۳۵
بیشینه استحکام فشاری (MPa)	۶۵	۳۸	۳۷	۴۳	۱۹
بیشینه استحکام برشی (MPa)	۵۳	۴۴	۳۶	۳۵	۳۶

جدول ۲- نتایج نظری و تجربی برای کامپوزیت های مختلف

کد نمونه	بیشینه نیروی برخورد (کیلو نیوتن)		درصد اختلاف نتایج تئوری و تجربی	بیشینه خیز (میلیمتر)		درصد اختلاف نتایج تئوری و تجربی
	تئوری	تجربی		تئوری	تجربی	
100B	۷/۰۵	۵/۲۴	۳۴	۹/۱۵	۱۱/۱۶	۱۸
75B25N	۶/۴۳	۴/۶۰	۳۹	۹/۶۷	۱۲/۷۶	۲۴
66B33N	۶/۱۶	۴/۶۷	۳۱	۱۰/۳۵	۱۳/۳۳	۲۲
50B50N	۶/۰۳	۴/۵۵	۳۲	۱۱/۲۴	۱۲/۸۱	۱۲
100N	۳/۶۲	۲/۸۳	۲۷	۱۷/۸۹	۲۱/۰۳	۱۴



شکل ۶- بیشینه نیروی برخورد نظری و تجربی بر حسب درصد الیاف بازالت



شکل ۷- بیشینه خیز نظری و تجربی بر حسب درصد الیاف بازالت

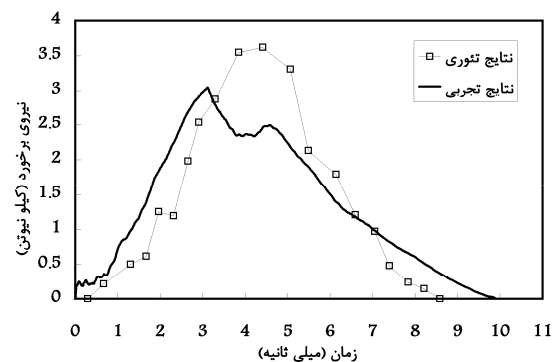
#### ۴- بحث و نتیجه گیری

##### ۴-۱- ارزیابی نتایج مدل

پس از تحلیل مدل، نتایج نظری از جمله نیروی برخورد در هر لحظه از زمان تعیین شد. در شکل (۵) به عنوان نمونه، نمودار نیروی برخورد-زمان کامپوزیت نایلون خالص در حالت‌های نظری و تجربی با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار نیروی نظری با نوسان‌های کوچک همواره روندی افزایشی دارد اما نمودار نیروی تجربی به خصوص در اطراف ناحیه بیشینه نیرو دارای نوسان‌های بزرگی است. این نوسان‌ها در نمودار تجربی ناشی

فیزیکی، ابعادی و مکانیکی آن‌هاست. این خصوصیات در جدول (۱) آورده شده است. مشخصه‌های مکانیکی آورده شده در این جدول، با انجام آزمایش‌های کشش، فشار و برش تعیین شدند.

برای ارزیابی شبیه‌سازی انجام شده، نمونه‌های کامپوزیت کاملاً مشابه با حالت نظریه، تحت آزمایش تجربی ضربه قرار گرفتند. آزمایش‌های ضربه با شدت ۳۰ ژول مطابق شکل (۴) در دانشکده مکانیک دانشگاه بولونیا مطابق استاندارد ASTM D. 7136 صورت گرفتند [۱۵]. در این آزمایش‌ها ابتدا گوشه‌های نمونه، مطابق شکل (۴-ج) با استفاده از چهار گیره پلاستیکی با قطر ۱۲ میلیمتر کاملاً بر روی دستگاه محکم بسته می‌شوند آن‌گاه ضربه‌زن مطابق شکل (۴-الف) از ارتفاع ۲/۴ متری به صورت آزاد بر روی نمونه‌های کامپوزیت رها می‌شود. در بازه زمانی برخورد نیروی وارد شده به ضربه‌زن و موقعیت ضربه‌زن در فاصله نزدیک به سطح نمونه به ترتیب با استفاده از نیروسنج<sup>۴۶</sup> و سنسور لیزری<sup>۴۷</sup> نصب شده روی دستگاه، اندازه‌گیری و در حافظه رایانه ذخیره شد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان خیز ایجاد شده در نمونه را در بازه زمانی برخورد محاسبه کرد [۱۶]. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

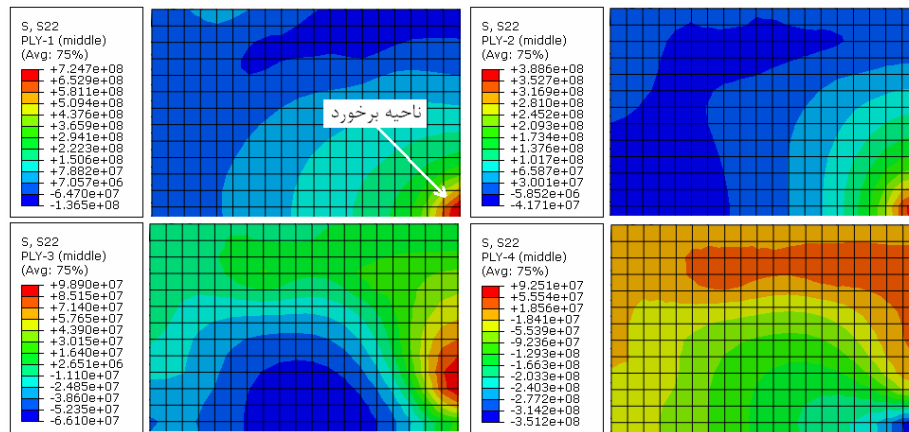


شکل ۵- نیروی برخورد نظری و تجربی برای نمونه نایلون خالص

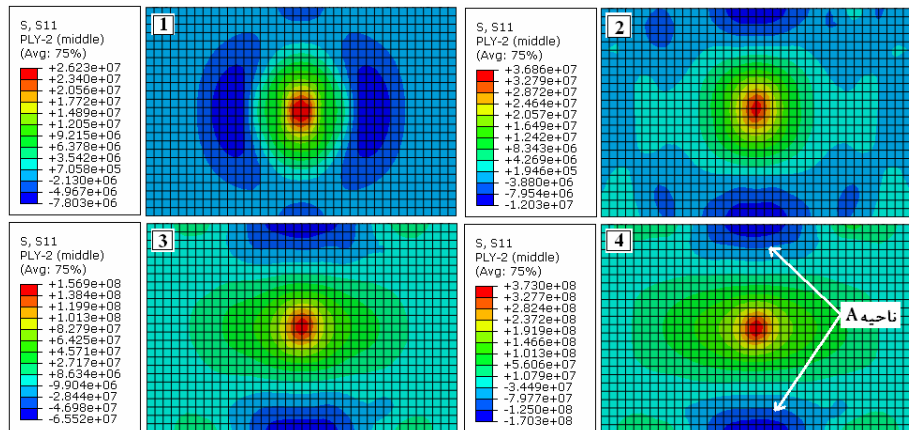
تجربی، ایدئال در نظر گرفتن ساختار کامپوزیت در مدل نظری و عدم تعریف دقیق خواص مکانیکی کامپوزیت است. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب روند تغییر بیشینه نیروی برخورد و بیشینه خیز نظری و تجربی کامپوزیت‌های خالص و هیبرید را بر حسب درصد الیاف بازالت نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود هر چند نتایج نظری و تجربی با هم اختلاف دارند اما روند تغییر آن‌ها تقریباً مشابه‌اند. در این نمودارها با افزایش درصد الیاف بازالت، بیشینه نیروی برخورد افزایش و بیشینه خیز کاهش یافته است. بنابراین از مدل نظری ارایه شده می‌توان روند تغییر بیشینه نیروی برخورد و بیشینه خیز را با تغییر درصد

از جدا شدن لایه‌ها در نمونه نایلون خالص است [۱۶]. با توجه به اینکه در مدل نظری اتصال بین لایه‌های کامپوزیت کامل تعریف شده، بنابراین در این مدل جدا شدن لایه‌ها به وجود نیامده و نوسان‌های بزرگ ایجاد نمی‌شود.

نتایج بیشینه نیروی برخورد و بیشینه خیز در نقطه میانی صفحه کامپوزیت حاصل از تحلیل مدل برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و نایلون در شدت ضربه ۳۰ ژول در جدول (۲) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود حداکثر درصد اختلاف بین نتایج نظری و تجربی برای بیشینه نیروی برخورد و بیشینه خیز به ترتیب ۳۹ و ۲۴ درصد بوده است. این اختلاف به دلیل خطاهای آزمایش



شکل ۸- توزیع تنش عرضی در لایه‌های مختلف نمونه بازالت خالص (یک چهارم هر لایه) در زمان بیشینه خیز



شکل ۹- نحوه تغییر مقدار تنش طولی در طی زمان برخورد در لایه دوم نمونه بازالت خالص



الیاف بازالت و نایلون در کامپوزیت‌های مختلف پیش‌بینی کرد.

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

با استفاده از نتایج مدل می‌توان نحوه‌ی توزیع و نوع تنش و کرنش در هر لحظه از زمان برخورد در هر لایه از کامپوزیت را مورد بررسی قرار داد. شکل (۸) توزیع تنش عرضی را در لایه‌های مختلف نمونه بازالت خالص در زمان بیشینه خیز نشان می‌دهد. بررسی شکل (۸) و شکل‌های مشابه آن نشان می‌دهد از لایه‌های بالایی به سمت لایه‌های پایینی، گستردگی تنش در اطراف ناحیه برخورد و کناره‌های نمونه افزایش یافته است. همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند نوع تنش در ناحیه برخورد در لایه‌های بالایی (تنش فشاری) با نوع آن در لایه‌های زیرین (تنش کششی) متفاوت است.

شکل (۹) نحوه افزایش مقدار تنش طولی را در طی زمان برخورد در لایه دوم نمونه بازالت خالص هنگامی که تحت ضربه با شدت ۳۰ ژول قرار گرفته است را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در لایه دوم ابتدا تنش در ناحیه برخورد افزایش می‌یابد اما با گذشت زمان و ایجاد خیز در نمونه، تنش در کناره‌های طولی نمونه (ناحیه A) افزایش قابل توجهی یافته است.

با تحلیل شکل‌هایی مشابه شکل‌های (۸) و (۹) و دستیابی به اطلاعاتی همچون ماکزیمم تنش و نحوه انتشار آن در هر

قسمت از سازه کامپوزیت، می‌توان فرایند ضربه را بر روی این سازه‌ها تحلیل و اقدامات لازم برای تقویت قسمت‌های حساس را انجام داد.

#### ۵- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بر مبنای روش اجزای محدود، مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های خالص و مرکب درون لایه‌ای تقویت شده با درصد‌های مختلف بازالت و نایلون بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد حداکثر درصد اختلاف بین نتایج نظری و تجربی برای بیشینه نیروی برخورد و بیشینه خیز به ترتیب ۳۹ و ۲۴ درصد بوده است. همچنین هر چند نتایج نظری و تجربی اختلاف دارند اما مدل ارائه شده روند تغییر نیروی برخورد و ماکزیمم خیز با تغییر درصد الیاف بازالت و نایلون را پیش‌بینی می‌کند. در هر دو حالت نظری و تجربی با افزایش درصد الیاف بازالت، بیشینه نیروی برخورد افزایش و بیشینه خیز کاهش یافته است. نتایج تحلیل نوع و نحوه‌ی توزیع تنش و کرنش در هر لایه از کامپوزیت نشان می‌دهد از لایه‌های بالایی به سمت لایه‌های پایینی، گستردگی تنش در اطراف ناحیه برخورد و کناره‌های نمونه افزایش یافته است. همچنین نوع تنش در ناحیه برخورد در لایه‌های بالایی (تنش فشاری) با نوع آن در لایه‌های زیرین (تنش کششی) متفاوت است.

#### واژه‌نامه

- |                     |                        |                        |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| 1. stress diffusion | 13. woven              | 25. boundary condition |
| 2. strain diffusion | 14. unidirectional     | 26. mesh               |
| 3. Fracture mode    | 15. finite element     | 27. Job                |
| 4. Meo              | 16. homogeneous        | 28. shell              |
| 5. Johnson          | 17. intraply hybrid    | 29. deformable         |
| 6. Souza            | 18. brittle            | 30. quasi-isotropic    |
| 7. Deka             | 19. ductile            | 31. density            |
| 8. Iannucci         | 20. part               | 32. lamina             |
| 9. Menna            | 21. Assembly           | 33. fracture criterion |
| 10. Luo             | 22. Property           | 34. hashin             |
| 11. Her             | 23. step               | 35. impactor           |
| 12. Naik            | 24. contact properties | 36. rigid              |

37. ISI  
38. penalty  
39. frictionless  
40. quadrilaterals

41. uniform  
42. structured  
43. explicit  
44. linear

45. small Strain  
46. load cell  
47. laser device

## مراجع

1. Ivanov, I.V. "Method Development for Finite Element Impact Simulation of Composite Materials," Ph.D. Thesis, University of Cincinnati, 2002.
2. Lu, H., *Material and Manufacturing Processes*, Wiley, New York, 1989
3. Sierakowski, R. L., and Chaturvedi, S. K., *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*, Wiley-Interscience, New York, 1997
4. Abrate, S., *Impact on Composite Structure*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
5. Meo, M., Antonucci, E., Duclaux, P., and Giordano, M., "Finite Element Simulation of Low Velocity Impact on Shape Memory Alloy Composite Plates," *J. Comp. Struct.*, Vol. 71, PP. 337–342, 2005.
6. Johnson, A. F., and Holzappel, M., "Modeling Soft Body Impact on Composite Structures," *J. Comp. Struct.*, Vol. 61, PP. 103–113, 2003.
7. Souza, F. V., Allen, D. H., and Kim, Y. R., "Multiscale Model for Predicting Damage Evolution in Composites due to Impact Loading," *J. Comp. Sci. and Tech.*, Vol. 68, PP. 2624–2634, 2008.
8. Deka, L. J., Bartus, S. D., and Vaidya, U. K., "Multi-site Impact Response of S2-glass/epoxy Composite Laminates," *J. Comp. Sci. And Tech.*, Vol. 69, PP. 725–735, 2009.
9. Iannucci, L., "Progressive Failure Modeling of Woven Carbon Composite under Impact," *J. of Impact Eng.*, Vol. 32, PP. 1013–1043, 2006.
10. Menna, C., Asprone, D., Caprino, G., Lopresto, V., and Prota, A., "Numerical Simulation of Impact Tests on GFRP Composite Laminates," *Inter. J. of Impact Eng.*, Vol. 38, PP. 677–685, 2011.
11. Luo, R. K., "The Evaluation of Impact Damage in a Composite Plate with a Hole," *J. Comp. Sci. and Tech.*, Vol. 60, PP. 49–58, 2000.
12. Her, S. C., Liang, Y. C., "The Finite Element Analysis of Composite Laminates and Shell Structures Subjected to Low Velocity Impact," *Compo. Struct.*, Vol. 66, PP. 277– 285, 2004.
13. Naik, N. K., Sekher, Y. C. and Meduri, S., "Damage in Woven-Fabric Composites Subjected to Low-velocity Impact," *Compo. Sci. and Tech.*, Vol. 60, PP. 731–744, 2000.
14. Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," *J. Appl. Mech.*, Vol. 47, PP. 329–334, 1980.
15. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM D. 7136, 2005.
16. Tehrani Dehkordi, M., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G., and Ghelli, D., "Low Velocity Impact Properties of Intraply Hybrid Composites based on Basalt and Nylon Woven Fabrics," *Materials and Design*, Vol. 31, PP. 3835–3844, 2010.