

تحلیل عددی خواص فشاری درون صفحه‌ای کامپوزیت‌های غیر خطی با استفاده از روش اجزای محدود

Numerical Analysis of In-plane Compressive Properties of Nonlinear Composites Using Finite Element Method

مجید طهرانی دهکردی*

شهر کرد، دانشگاه شهر کرد، دانشکده فرش، صندوق پستی ۸۸۶۱۷ - ۵۶۸۱۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۰۷

چکیده

در کامپوزیت‌های هیبریدی زیر فشار درون صفحه‌ای، رفتار غیر خطی مشاهده می‌شود، از این رو در پژوهش حاضر، کامپوزیت دارای رفتار غیر خطی زیر بارگذاری فشاری براساس روش عددی اجزای محدود مدل سازی شده است تا رفتار فشاری درون صفحه‌ای آن بررسی شود. در شبیه سازی ارائه شده، کامپوزیت‌هایی به شکل چهار لایه با آرایش تک جهتی طراحی شدند، سپس فشار روی آنها اعمال شد. خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیت به شکل رفتار کشسان - پلاستیک تعریف شده است. در بخش کشسان مواد از نوع لایه‌ای و در بخش پلاستیک از نوع همسانگرد تعریف شدند. برای ارزیابی شبیه سازی انجام شده، نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار با نتایج تجربی کامپوزیت‌هایی با رفتار غیر خطی مقایسه شد. از نتایج این پژوهش می‌توان دریافت، مدل ارائه شده در حد قابل قبول، خواص فشاری درون صفحه‌ای همچون نمودار تنش فشاری نسبت به کرنش را در نمونه‌های دارای رفتار غیر خطی معین می‌کند. به گونه‌ای که درصد اختلاف بیشینه تنش فشاری نظری و تجربی در نمونه‌های بررسی شده ۸٪ تا ۱۷٪ بوده است. برای بهبود مدل ارائه شده و دستیابی به مدل کامپوزیتی نزدیک تر به حالت واقعی، باید فرضیه‌های مدل نظری را تصحیح کرد یا کاهش داد.

مقدمه

هیبریدی، هر لایه تقویت کننده ترکیبی از نخ‌ها با طرح مشخص است که به آنها هیبرید درون لایه‌ای (intraply) می‌گویند [۳]. پژوهش‌های محدودی برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی درون لایه‌ای انجام شده است. در این زمینه طهرانی [۴،۵]، اخباری [۲]، Pegoretti [۶] و Wang [۷] خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با ترکیب الیاف ترد و انعطاف پذیر را به روش تجربی بررسی کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد، هنگامی که الیاف ترد همچون شیشه و بازالت با الیاف انعطاف پذیر مانند نایلون و پلی استر به شکل درون لایه‌ای هیبرید می‌شوند، در لایه تقویت کننده رفتار غیر خطی ایجاد

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون سبکی و استحکام کششی زیاد به عنوان جایگزین مناسب فلزات، در صنایع گوناگون همچون صنایع دریایی، فضایی و نظامی مطرح است [۱]. مواد کامپوزیتی با وجود داشتن مزایا مشکل‌هایی نیز در مقایسه با فلزات دارند. یکی از این موارد شکست ناگهانی ساختار آنها در اثر نیروهای کششی، فشاری یا ضربه‌ای است [۲،۳]. پژوهشگران برای کم کردن این مشکل، روش هیبرید کردن بخش تقویت کننده کامپوزیت را به شکل ترکیب الیاف ترد و انعطاف پذیر (ductile) پیشنهاد کردند. در دسته‌ای از کامپوزیت‌های

کلمات کلیدی

خواص فشاری درون صفحه‌ای، اجزای محدود، کامپوزیت، رفتار غیر خطی

جدول ۱- خواص فیزیکی، ابعادی و مکانیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرایند فشار.

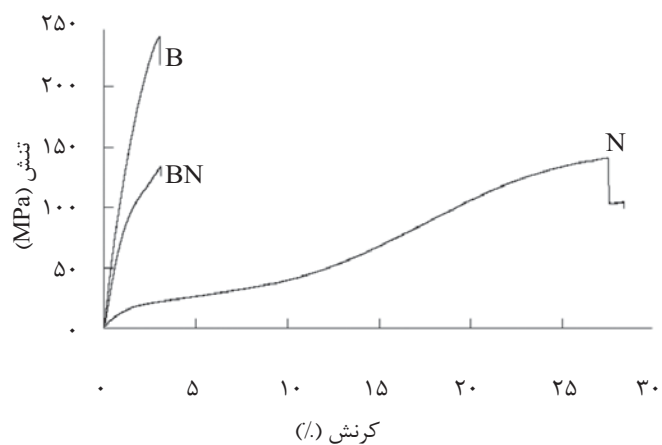
N	BN	B	کد کامپوزیت
۳/۲۳	۲/۹۴	۲/۹۲	ضخامت (mm)
۱۱۷۰	۱۶۷۰	۱۷۳۰	چگالی تجربی (kg/m^3)
۱/۰۵	۱۰/۴۳	۱۵/۴۲	مدول کششی (GPa)
۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۱۶	ضریب پواسون
۴/۲۱	۵/۳۰	۹/۴۵	مدول برشی (GPa)

شده است. برای ارزیابی شبیه‌سازی انجام شده، نتایج حاصل از تحلیل نظری با نتایج آزمون فشار در حالت تجربی مقایسه شده است.

تجربی

برای ارزیابی شبیه‌سازی ارائه شده، نتایج تجربی سه نمونه کامپوزیت شامل دو نمونه کامپوزیت خالص و یک نمونه کامپوزیت هیبریدی درون لایه‌ای بررسی شد. در این کامپوزیت‌ها، الیاف بازالت و نایلون به‌عنوان تقویت‌کننده و رزین اپوکسی به‌عنوان زمینه استفاده شده است. نمونه‌های بررسی شده شامل نمونه بازالت خالص و نمونه هیبریدی درون لایه‌ای بازالت-نایلون و نمونه نایلون خالص بودند. این کامپوزیت‌ها به ترتیب با B، BN و N کدبندی شدند. گفتنی است، در نمونه هیبریدی سه‌چهارم هر لایه تقویت‌کننده الیاف بازالت و یک‌چهارم باقی‌مانده از الیاف نایلون تشکیل شده است [۳].

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی فشار روی نمونه‌های کامپوزیتی مختلف، به مشخص کردن ویژگی‌های فیزیکی، ابعادی و مکانیکی آنها نیاز است. این ویژگی‌ها برای کامپوزیت‌های بررسی شده، در جدول ۱ آمده است. مشخصه‌های مکانیکی آمده در این جدول، با انجام آزمون‌های تجربی کشش و برش به ترتیب براساس استانداردهای ASTM D 3039 [۲۱] و ASTM D 4255 [۲۲] معین



شکل ۱- نمودار تنش - کرنش حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های کامپوزیتی بررسی شده.

می‌شود که این مسئله از شکست ناگهانی جلوگیری می‌کند.

مطالب اشاره شده نشان می‌دهد، مطالعه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های دارای رفتار غیرخطی می‌تواند در بهبود عملکرد آنها در برابر نیروهای مختلف اثر قابل توجهی داشته باشد. منظور از مواد دارای رفتار غیرخطی موادی هستند که طی فرایند کشش، رفتار آنها به‌طور مشخص شبیه فاز پلاستیک باشد. رفتار غیرخطی مواد کامپوزیتی را پژوهشگران زیادی به دو روش میکرومکانیک و ماکرومکانیک بررسی کرده‌اند. تعدادی از آنها از جمله Parietti [۸]، Kyriakidse [۹]، Dvorak [۱۰، ۱۱] و Sun [۱۲] رفتار غیرخطی کامپوزیت‌ها را به روش میکرومکانیک بررسی کردند. Daniel [۱۳]، Wilson [۱۴]، Nahas [۱۵] و Hashin [۱۶] نیز رفتار کامپوزیت‌های غیرخطی را در حالت ماکرومکانیک بررسی کردند.

در اکثر این پژوهش‌ها بخش زمینه دارای رفتار غیرخطی بوده یا تقویت‌کننده از نوع تک‌جهتی است. در بین پژوهش‌های انجام شده، بررسی کامپوزیت هیبریدی درون لایه‌ای که رفتار غیرخطی تقویت‌کننده به دلیل ترکیب نخ‌های ترد و انعطاف‌پذیر در هر لایه داشته باشد، مشاهده نشد. در بین خواص مکانیکی، خواص فشاری درون صفحه‌ای اهمیت زیادی دارد [۱۴، ۱۷]. هنگامی که اطلاعات به‌دست آمده از فرایند بارگذاری فشاری، در انتخاب ساختار و مواد اولیه کامپوزیت مورد توجه قرار گیرد، می‌توان قطعه‌های کامپوزیتی با عملکرد بهتر طراحی کرد [۱۴، ۱۷]. از آنجا که ساخت و انجام آزمون فشار به‌طور تجربی روی کامپوزیت‌ها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد، تعدادی از پژوهشگران، مدل‌سازی به روش اجزای محدود را برای بررسی خواص فشاری پیش از ساخت پیشنهاد داده‌اند.

روش اجزای محدود رویه‌ای عددی است که راه‌حلی را برای دامنه گسترده‌ای از مسائل پایدار و ناپایدار، خطی یا غیرخطی در مهندسی شامل تحلیل تنش، انتقال گرما و سیالات ارائه می‌کند [۱۸]. تعدادی از پژوهشگران خواص فشاری درون صفحه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری را به روش اجزای محدود بررسی کردند. Thompson [۱۹] خواص فشاری کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی را در نمونه‌هایی با شکل‌های فضایی مختلف بررسی کرد.

Papapostolou [۱۷] اثر پارامترهای مختلف از جمله مقدار مواد تقویت‌کننده، چیدمان لایه‌ها و ضخامت را بر خواص فشاری کامپوزیت لوله‌ای شکل کربن-اپوکسی به روش‌های ایستا و پویا بررسی کرد. کبیری و همکاران [۲۰] خواص فشاری کامپوزیت‌های شبیه‌سازی شده در فضای سه‌بعدی را براساس یک مدل شکست فیزیکی بررسی کردند. Wilson [۱۴] اثر عواملی همچون روش حل و اندازه اجزا را بر رفتار فشاری کامپوزیت‌های گرمانرم‌های شیشه-پلی‌پروپیلن بررسی کرد.

مطالعه این پژوهش‌ها نشان می‌دهد، در اغلب آنها خواص فشاری درون صفحه‌ای کامپوزیت‌هایی با رفتار خطی شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش، خواص فشاری درون صفحه‌ای کامپوزیت‌های دارای رفتار غیرخطی همچون کامپوزیت‌های هیبریدی درون لایه‌ای بر مبنای روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی

شده‌اند.

شکل ۱، نمودار تنش - کرنش نمونه‌های بررسی شده را طی آزمون کشش نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف انعطاف‌پذیر همچون نایلون باعث غیرخطی شدن رفتار کامپوزیت هیبریدی شده است. با استفاده از داده‌های این شکل می‌توان تنش شکست و نقاط مورد نیاز برای بخش پلاستیک کامپوزیت‌های بررسی شده را معین کرد.

برای ارزیابی شبیه‌سازی انجام شده، نمونه‌های کامپوزیت کاملاً مشابه با حالت نظری و براساس استاندارد ASTM 3410 [۲۳]، تحت آزمون تجربی فشار قرار گرفتند [۳]. برای انجام آزمون، نمونه‌هایی با ابعاد $15 \times 2/5$ cm آماده‌سازی شدند. (شکل ۲-الف). آزمون‌های فشار مطابق شکل ۲-ب با دستگاه Instron 8033 و به کمک بست ویژه مطابق شکل ۲-ج انجام شد. برای انجام آزمون فشار فاصله فک‌ها 20 mm و سرعت فک متحرک 2 mm/min تنظیم شد. در بازه زمانی فشار، نیروی فشاری و کاهش طول روی نمونه به ترتیب با استفاده از نیروسنج و فاصله فک‌های بالا و پایین اندازه‌گیری شد. استحکام و کرنش هر نمونه در بازه زمانی آزمون به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه شدند:

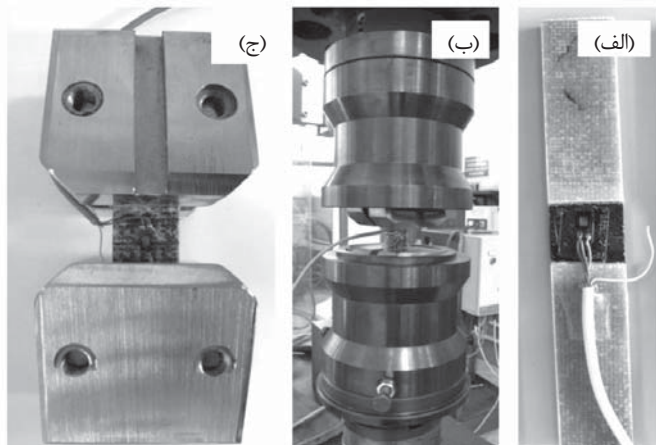
$$S(t) = \frac{F(t)}{WT} \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_0} \quad (2)$$

در این معادله‌ها، $F(t)$ نیروی اندازه‌گیری شده به وسیله نیروسنج در زمان t ، W و T به ترتیب متوسط عرض و ضخامت هر نمونه آزمایش شده و $L(t)$ و L_0 فاصله بین فک‌ها در زمان t و $t=0$ است.

محاسبات (شبیه‌سازی فرایند فشار)

شبیه‌سازی فرایند فشار به روش عددی اجزای محدود با نرم‌افزار Abaqus انجام شد. برای مدل‌سازی فرایند فشار روی کامپوزیت‌های پلیمری باید به ترتیب مراحل تعریف هندسه مدل، تعیین خواص مواد، نحوه اجرای فرایند فشار، شرایط مرزی، المان‌بندی و حل مسئله (Job)

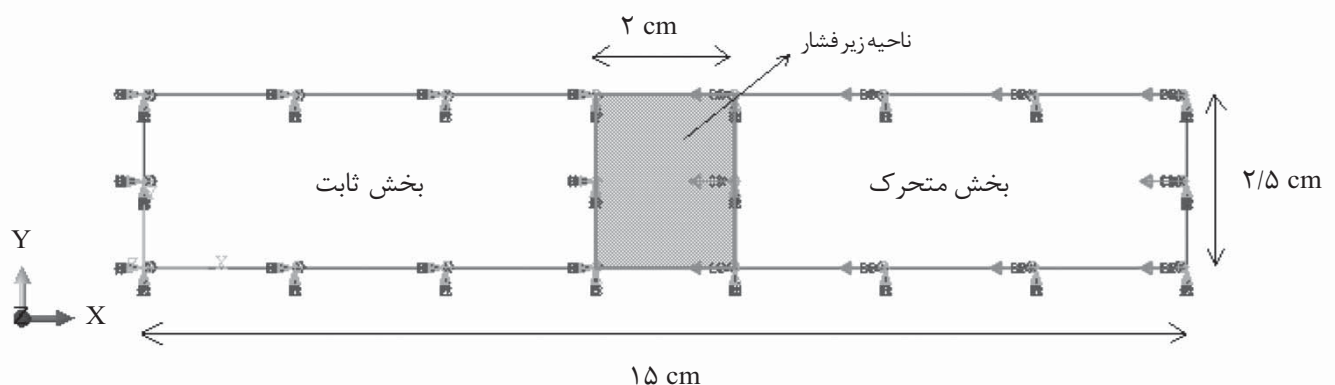


شکل ۲- (الف) نمونه آماده شده، (ب) نمونه حین آزمون و (ج) بست ویژه آزمون فشار.

در نرم‌افزار Abaqus تعریف شود. هندسه مدل به شکل پوسته (shell) مستطیل تغییرشکل‌پذیر به طول 15 cm و عرض $2/5$ cm تعریف شده است (شکل ۳).

سطح مقطع پوسته از نوع کامپوزیت معین شد. با استفاده از این نوع سطح مقطع، پوسته به شکل کامپوزیت چهارلایه با آرایش تک‌جهتی تعریف شد. آنگاه برای هر لایه، پارامترهای ابعادی و فیزیکی شامل چگالی، ضخامت، زاویه و مشخصه‌های مکانیکی مورد نیاز تعریف شد. با توجه به اینکه رفتار مواد در هر لایه کامپوزیت غیرخطی است، مدل مواد برای هر لایه شامل دو بخش کشسان و پلاستیک تعریف شده است. در بخش کشسان مواد از نوع لایه‌ای و در بخش پلاستیک از نوع همسانگرد بوند.

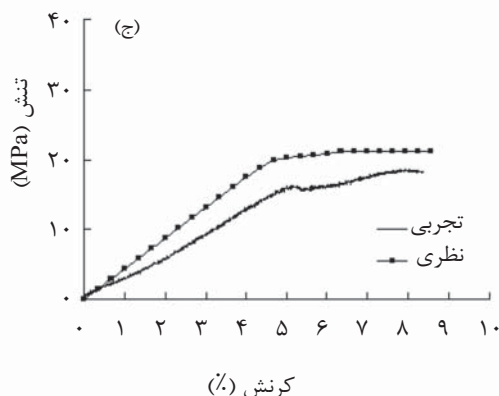
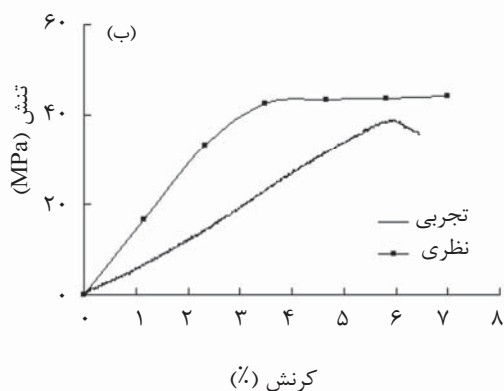
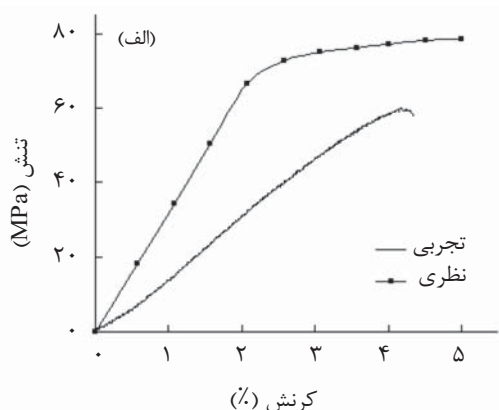
برای تعریف مدل کشسان لایه‌ای، به اطلاعاتی همچون مدول کشسانی در راستای طول و عرض، مدول برشی حول راستای طول، عرض و ضخامت و ضریب پواسون نیاز است. مدل پلاستیک همسانگرد نیز به کمک تعدادی از نقاط نمودار تنش کششی-کرنش (شکل ۱) تعریف شده است. این نقاط از نقطه تنش تسلیم شروع و به نقطه تنش نهایی ختم شده‌اند. همه داده‌های مورد نیاز برای تعریف خواص مکانیکی هر لایه، از آزمون‌های تجربی به دست آمده است.



شکل ۳- هندسه مدل تعریف شده برای شبیه‌سازی فرایند فشار.

نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی مراحل مختلف شبیه‌سازی، در این بخش نتایج به‌دست آمده از مدل نظری با نتایج تجربی برای کامپوزیت‌های مختلف، مقایسه شده است. پس از تحلیل مدل، نتایج نظری از جمله تنش حاصل از نیروی فشاری نسبت به کرنش معین شد. در شکل ۴، نمودار تنش فشاری-کرنش برای کامپوزیت‌های بررسی شده در حالت‌های نظری و تجربی با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴-الف و ب مشاهده می‌شود، در کرنش‌های کم، نتایج نظری نمونه‌های بازالت خالص و هیبرید همخوانی مناسبی با نتایج تجربی ندارند. در کرنش‌های کم استحکام فشاری نظری با



شکل ۴- نمودار تنش فشاری نسبت به کرنش در حالت‌های نظری و تجربی برای نمونه‌های مختلف: (الف) B، (ب) BN، (ج) N.

با توجه به استاندارد ASTM D 3410 [۲۳] مطابق شکل ۱، فقط بخش میانی کامپوزیت به طول ۲ cm زیر فشار قرار می‌گیرد. بنابراین با استفاده از ابزار Partition، بخش میانی از بخش‌های کناری (بخش‌های متحرک و ثابت) کامپوزیت تفکیک شد. شرایط مرزی روی هر یک از این بخش‌ها متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۳ نیز دیده می‌شود، شرایط مرزی روی بخشی که درون فک متحرک قرار دارد (بخش متحرک) مطابق معادله (۳) به گونه‌ای تعریف شده است که قطعه کامپوزیت فقط بتواند طی فرایند فشار با سرعت ثابت 2 mm/min ($3/33 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) در راستای X حرکت کند:

$$V_x = -3.33E - 005 \text{ m/s} \quad (3)$$

$$U_y = U_z = 0$$

$$UR_x = UR_y = UR_z = 0$$

حین فرایند فشار، بخش کناری سمت چپ درون فک ثابت قرار دارد. بنابراین، حین شبیه‌سازی مطابق معادله (۴) همه قیدهای جابه‌جایی و گشتاور این بخش برابر صفرند:

$$U_x = U_y = U_z = 0$$

$$UR_x = UR_y = UR_z = 0 \quad (4)$$

در معادله‌های (۳) و (۴)، U و V به ترتیب نمایانگر جابه‌جایی، گشتاور و سرعت هستند. فرایند فشار در یک مرحله به شکل پویا و از نوع Explicit انجام شده است. این روش برای تحلیل مسائلی استفاده می‌شود که بخشی از ماده خاصیت غیرخطی داشته یا ازدیاد طول زیاد دارند [۱۴، ۲۴]. در بخش تعیین نوع فرایند، گزینه فعال برای عبارت Nlgeom (nonlinear geometry) انتخاب شده است. با انجام این کار، نرم‌افزار اثر تغییرشکل‌های بزرگ را در جابه‌جایی‌های بعدی لحاظ می‌کند.

کامپوزیت با استفاده از اجزای پوسته از دسته اجزای Kirchhoff المان‌بندی شده است. این دسته از اجزا برای سازه‌هایی مناسب هستند که ضخامت آنها نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچک‌تر باشد [۲۴]. در فرایند فشار طول قطعه ۱۵۰ mm و ضخامت آن در حدود ۳ mm است.

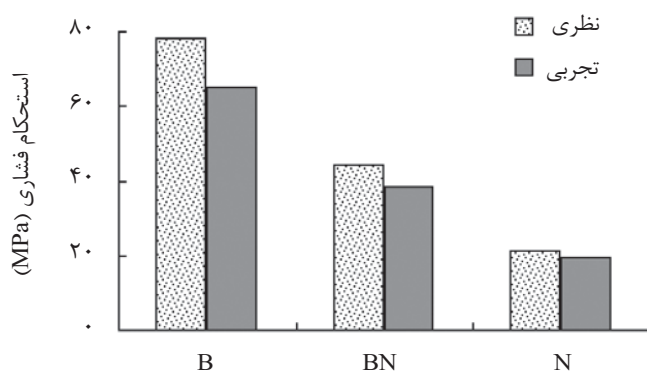
بنابراین، قطعه کامپوزیت به شکل پوسته در نظر گرفته شده و نوع جزء (element) نیز برای ساختار پوسته تعریف شده است. اجزا به شکل چهارگوش یکنواخت (uniform quadrilaterals) و منظم (structured) با اندازه ۳/۲۵ mm از نوع S4R (stress/displacement element, 4 nodes, reduced integration) روی سطح تعریف شدند.

با توجه به اینکه صفحه کامپوزیت از نوع پوسته و به شکل چهارلایه تعریف شده است، ضخامت هر جزء به‌طور ظاهری برابر با ضخامت کامپوزیت است. اما، در فضای درونی نرم‌افزار در راستای ضخامت، هر جزء به چهار بخش جداگانه تقسیم شده است و می‌توان نتایج را برای هر جزء، در هر لایه به‌طور جداگانه مشاهده کرد. پس از المان‌بندی، تحلیل مسئله به روش استاندارد انجام شده است.

در شکل ۵ استحکام فشاری (تنش در نقطه شکست) نمونه‌های بررسی شده در حالت نظری و تجربی مقایسه شده است. تعریف خواص لایه‌های کامپوزیت به شکل پلاستیک در مدل نظری، باعث غیرخطی شدن نمودار تنش فشاری در کرنش‌های زیاد شده است. در نتیجه در نقطه شکست، استحکام فشاری نظری به مقدار تجربی تا حد قابل قبول نزدیک شده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد، استحکام فشاری نظری در نمونه‌های بازالت خالص، هیبرید و نایلون خالص به ترتیب ۱۷، ۱۳ و ۸٪ بیشتر از مقدار تجربی است. مقایسه مقدار اختلاف نتایج نظری و تجربی در این پژوهش با پژوهش‌های پیشین [۱۴] انجام شده در زمینه رفتار فشاری، بیانگر عملکرد مطلوب مدل نظری ارائه شده است. در پژوهش‌های پیشین مقدار این اختلاف بین ۱۰٪ تا ۳۵٪ گزارش شده است.

اختلاف نتایج نظری و تجربی می‌تواند به دلیل در نظر نگرفتن آسیب‌های ایجاد شده در اثر جدا شدن لایه‌ها در مدل نظری یا در نظر نگرفتن حباب‌های هوای موجود در کامپوزیت باشد. در مدل نظری اتصال بین لایه‌های کامپوزیت کامل تعریف شده است. بنابراین، در این مدل جدا شدن لایه‌ها به وجود نیامده و کاهشی در تنش فشاری ایجاد نشده است. از دلایل دیگر اختلاف نتایج، خطاهای ساخت و آزمون تجربی نمونه‌های کامپوزیت است. در نمونه‌های تجربی آزمون شده وجود حباب‌های هوا درون ساختار آنها باعث تمرکز تنش و شکست پیش از موعد نمونه می‌شود، در مدل نظری این خطاها قابل اعمال نیستند.

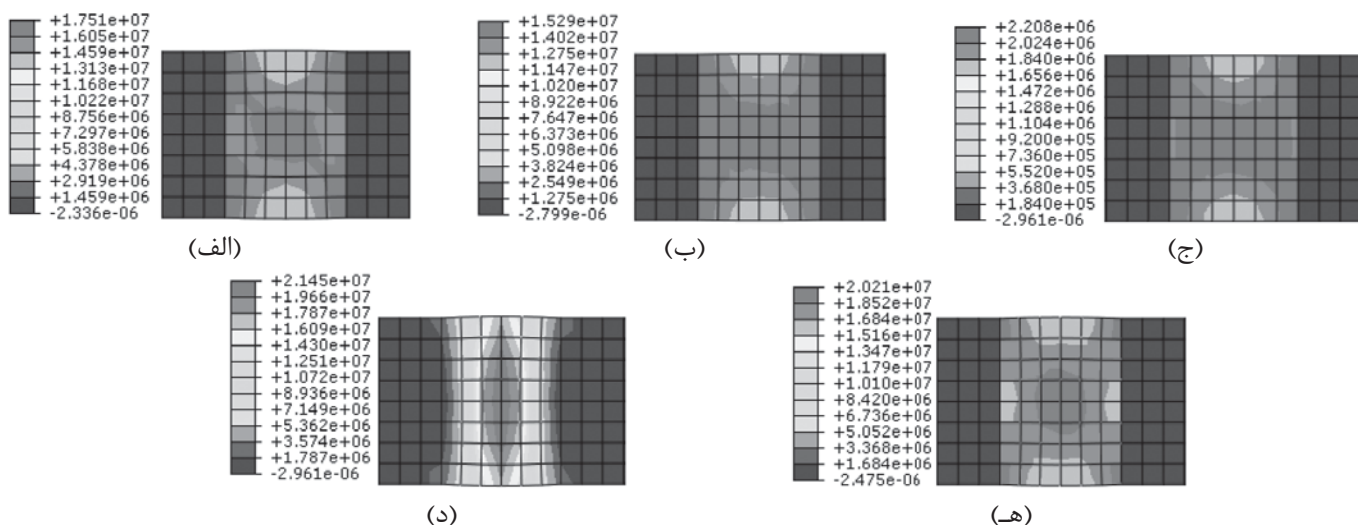
شکل ۶ نحوه افزایش مقدار تنش در ناحیه میانی (ناحیه فشار) طی زمان را در نمونه نایلون خالص هنگامی که زیر فشار قرار گرفته است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا تنش در همه ناحیه فشار تقریباً یکسان است (شکل ۶-الف و ب). اما، با گذشت زمان، تنش به سمت مرکز ناحیه فشار متمرکز شده (شکل ۶-ج و د) و در ادامه در بخش میانی ناحیه فشار و در راستای عرض گسترش



شکل ۵- استحکام فشاری نمونه‌های بررسی شده در حالت‌های نظری و تجربی.

شیب زیاد روندی افزایشی داشته است. در این حالت، نتایج تجربی نیز روندی افزایشی دارد. اما، روند افزایش در این حالت با شیب کمتر نسبت به حالت نظری اتفاق افتاده است.

شکل‌های ۴-الف و ب نشان می‌دهد، با افزایش کرنش (در محدوده ۲ تا ۳ درصد کرنش) رفتار پلاستیک تعریف شده در مدل نظری، اثر خود را نشان می‌دهد، منحنی‌های فشار از حالت خطی خارج شده و به تدریج و با سرعتی کم تا نقطه تنش شکست ادامه می‌یابد. این مسئله باعث می‌شود، در کرنش‌های زیاد نتایج نظری به نتایج تجربی نزدیک شوند. شکل ۴-ج روند تغییر تنش فشاری نسبت به کرنش را برای نمونه نایلون خالص نشان می‌دهد. در این نمونه، تقویت‌کننده فقط الیاف نایلون است. الیاف نایلون خواص پلاستیک‌گونه دارند. بنابراین، کامپوزیت تقویت شده با این الیاف در کرنش‌های کم نیز رفتار غیرخطی دارد. در این نمونه در کرنش‌های کم خواص پلاستیک‌مانند اثر خود را نشان داده‌اند، بنابراین نمودار مدل نظری از همان ابتدای فرایند فشار، همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی داشته است.

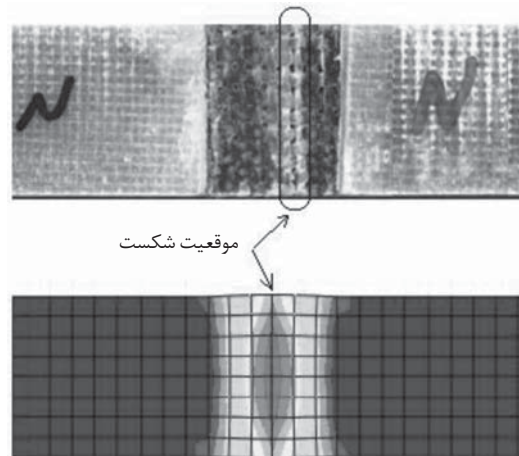


شکل ۶- نحوه تغییر مقدار تنش طی فرایند فشار در نمونه N.

کامپوزیت، می‌توان فرایند فشار را روی این سازه‌ها تحلیل و اقدامات لازم برای تقویت بخش‌های حساس را انجام داد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار فشاری درون صفحه‌ای کامپوزیت‌های دارای رفتار غیرخطی به روش عددی اجزای محدود بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، مدل ارائه شده در حد قابل قبول، رفتار تنش-کرنش را در نمونه‌های دارای رفتار غیرخطی معین می‌کند. تعریف خواص لایه‌های کامپوزیت به شکل پلاستیک در مدل نظری، باعث غیرخطی شدن نمودار تنش فشاری در کرنش‌های زیاد شده است. در نتیجه در نقطه شکست، استحکام فشاری نظری تا حد قابل قبول به مقدار تجربی نزدیک شده است، به طوری که در نمونه‌های بررسی شده اختلاف استحکام فشاری نظری و تجربی ۸٪ تا ۱۷٪ است. همچنین، نتایج تحلیل تنش در بخش‌های مختلف نمونه‌های کامپوزیت نشان می‌دهد، ابتدا تنش در همه ناحیه فشار تقریباً یکسان است. اما با گذشت زمان، تنش به سمت مرکز ناحیه فشار متمرکز شده و در ادامه در بخش میانی ناحیه فشار و در راستای عرض گسترش می‌یابد.



شکل ۷- موقعیت شکست در نمونه N برای حالت تجربی و نظری.

یافته است (شکل ۶-ه).

در شکل ۷ موقعیت شکست در نمونه نایلون خالص برای حالت نظری و تجربی مقایسه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود، موقعیت شکست در حالت نظری مشابه حالت تجربی در بخش میانی ناحیه فشار است. با تحلیل شکل‌هایی مشابه شکل ۶ و دستیابی به اطلاعاتی همچون بیشینه تنش و نحوه انتشار آن در هر بخش از سازه

مراجع

- Colombo C., Vergani L., and Burman M., Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Compos. Struct.*, 94, 1165-1174, 2012.
- Akhbari M., Shokrieh M.M., and Nosraty H., A study on buckling behavior of composite sheet reinforced by hybrid woven fabrics, *Transaction of the CSME*, 32, 81-89, 2008.
- Nosraty H., Tehrani-Dehkordi M., Shokrieh M.M., and Minak G., The effects of hybridization on the tensile and compressive properties of basalt/nylon intraply woven fabric composites, ATC-11, Daegu, South Korea, 2011.
- Tehrani-Dehkordi M., Nosraty H., and Rajabzadeh M.H., The effects of hybridization on the flexural property of basalt/nylon intraply woven fabric composites, ATC-11, Daegu, South Korea, 2011.
- 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, *Mater. Design*, 31, 3835-3844, 2010.
- Pegoretti A., Fabbri E., Migliaresi C., and Pilati F., Intra-ply and interply hybrid composites based on E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: Tensile and impact properties, *Polym. Int.*, 53, 1290-1297, 2004.
- Park R. and Jang J., The effect of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites, *Compos. Sci. Technol.*, 58, 1621-1628, 1998.
- Parietti L., Micromechanical finite element model for constitutive elastoplastic analysis of unidirectional fiber-reinforced composites, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1994.
- Kyriakides S., Arseculeratne R., and Perry E.J., On the compressive failure of fiber reinforced composites, *Int. J. Solid. Struct.*, 32, 689-738, 1995.
- Dvorak G.J. and Bahei-El-Din Y.A., Elastic-plastic behavior of fibrous composites, *J. Mech. Phys. Solid.*, 27, 51-72, 1979.
- Dvorak G.J. and Bahei-El-Din Y.A., Plasticity analysis of fibrous composites, *J. Appl. Mech.*, 49, 327-335, 1982.
- Sun C.T. and Chen J.L., A micromechanical model for plastic behavior of fibrous composites, *J. Compos. Sci. Tech.*, 40, 115-129, 1991.
- Daniel A.M. and Anthony N.P., Nonlinear finite element

- analysis of composite beams and arches using a large rotation theory, *Finite Element in Analysis and Design*, 19, 131-152, 1995.
14. Wilson M.J., Finite element analysis of glass fibre reinforced thermoplastic composites for structural automotive components, PhD Thesis, School of Mechanical, Materials, Manufacturing Engineering and Management, University of Nottingham, 2003.
 15. Nahas M.N., Analysis of nonlinear stress-strain response of laminated fiber-reinforced composites, *Fiber Sci. Tech.*, 20, 297-313, 1984.
 16. Hashin Z.D., Bagehi D., and Rosen B.W., Nonlinear behavior of fiber composite laminates, NASA CR-213, 1974.
 17. Papapostolou D., Finite element modeling of static axial compression and impact testing of square CFRP tubes in LS-DYNA3D, 5th European LS-DYNA Users Conference, 2005.
 18. Moaveni S., Finite element analysis theory and application with Ansys, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
 19. Thompson L.F., Through-thickness compression testing and theory of carbon fibre composite materials, PhD Thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2011.
 20. Kabiri-Ataabadi A., Ziaei-Rad S., and Hosseini-Toudeshky H., Compression failure and fiber-kinking modeling of laminated composites, *Steel Compos. Struct.*, 12, 53-72, 2011.
 21. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM Standard D 3039, 1995.
 22. Standard guide for testing inplane shear properties of composite laminates, ASTM Standard D 4255, 1994.
 23. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading, ASTM Standard D 3410, 1995.
 24. Anon ABAQUS/Standard User's Manual, Vol. I, Hibbitt, Karlsson and Sorenson Inc, USA, 1998.

Numerical Analysis of In-plane Compressive Properties of Nonlinear Composites Using Finite Element Method

Majid Tehrani Dehkordi*

Faculty of Carpet, University of Shahrkoord, P.O. Box: 56811-88617, Shahrkoord, Iran

Received 08 June 2014; Accepted 29 September 2014

Abstract

The nonlinear behaviour was observed in hybrid composites subjected to in-plane compressive force. For analyzing the compressive behavior of nonlinear composites, the compression process was simulated on these types of composites using finite element method. In the proposed simulation, a four-ply composite with the unidirectional stacking sequence was designed and compression test was executed on the composite model. In these models, the mechanical properties of composite layers were defined based on the elastic and plastic behaviors. The lamina and isotropic properties were selected for the elastic and plastic zones, respectively. In order to validate the simulated model, the theoretical results of some nonlinear composites were compared with the experimental results. It was concluded that the model could predict the compressive stress at different strain for nonlinear composites. The discrepancy between the results of numerical and experimental values at maximum compressive stress of investigated specimens were between 8% and 17%. The model needs to be improved in order to predict the experimental results more accurately.

Keywords

in-plane compressive
properties,
finite element,
composite,
nonlinear behavior

(*) Address Correspondence to M.Tehrani Dehkordi, Email: mtehrani@lit.sku.ac.ir