



بررسی عددی استحکام خمشی ساندویچ پانل کامپوزیت مشبک جهت استفاده در صفحات انتهایی پیل سوختی پلیمری

صادق حسینی^۱، محمدمهدی برزگری^{۲*}، پویا پیرعلی^۱، جعفر اسکندری جم^۱

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، فریدونکنار، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری
ساندویچ پانل کامپوزیت مشبک
صفحه انتهایی
استحکام خمشی
روش اجزای محدود

خلاصه: در این پژوهش، به بررسی عددی رفتار خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک جهت دستیابی به ساختار کامپوزیت با صلبیت خمشی بالا جهت استفاده در صفحات انتهایی پیل سوختی پلیمری پرداخته شده است. بدین منظور، استحکام خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک بر اساس نوع مواد و استانداردهای مربوطه از طریق شبیه‌سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده و صحت شبیه‌سازی با مقایسه میان نتایج عددی و نتایج تجربی پژوهش‌های پیشین مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا، تأثیر زوایای مختلف الیاف در رویه‌ها برای سه زاویه الیاف (۰-۴۵-۹۰)، (۰-۹۰-۴۵) و (۰-۴۵-۹۰) و نیز سه هندسه مختلف مربعی، مثلثی و لوزی هسته مشبک برای مواد کربن-سیلیکون و الیاف شیشه بر رفتار خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی تحلیل گردید. نتایج عددی حاکی از آن است که در شرایط یکسان مواد کربن-سیلیکون در آزمون تنش سه نقطه‌ای عملکرد بهتری را دارا می‌باشد. همچنین، تنش بیشینه در لحظه شکست برای مقاطع مستطیلی و لوزی و زاویه الیاف (۰-۴۵-۹۰) تقریباً ۲۵ درصد از زاویه الیاف (۰-۹۰-۴۵) و (۰-۴۵-۹۰) بیشتر می‌باشد، در حالی که تأثیر زاویه الیاف برای هندسه مثلثی بسیار ناچیز بوده است. علاوه بر این، هسته مثلثی شکل در تمامی نمونه‌ها دارای ظرفیت بار بحرانی، مقاومت خمشی و جذب انرژی بالاتری (حداقل ۱/۴ تا ۶ برابر) نسبت به دو نمونه دیگر می‌باشد.

۱- مقدمه

و فشار تماسی بیشتر از حد بهینه باعث کاهش تخلخل لایه نفوذ گاز و در نتیجه افزایش افت غلظتی می‌گردد که هر دوی این موارد باعث افت عملکرد پیل سوختی خواهد شد [۲، ۳]. لذا، با توجه به نوع بارگذاری در پیل‌های سوختی پلیمری رایج که با استفاده از میله‌های مهار در گوشه‌ها صورت می‌گیرد، نیاز به استفاده از صفحات انتهایی با صلبیت خمشی بالا می‌باشد که بطور معمول صفحات فلزی همچون استیل و آلومینیوم بکار گرفته می‌شود. ژائو و همکاران [۴] توزیع فشار و عملکرد صفحه انتهایی را با پارامترهای مختلف خواص مکانیکی برای سلول‌های سوختی پلیمری مورد مطالعه قرار دادند و یک صفحه انتهایی با ساختار بهینه با عملکرد مناسب طراحی نمودند. برزگری و همکاران [۵] بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی متفاوت سیستم کلمپینگ نیوماتیک پیل سوختی پلیمری مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع فشار تماسی و وزن سیستم پنوماتیکی بهینه شده منتج به نتایج مناسب‌تری نسبت به صفحه انتهایی معمولی می‌شود.

برای برخی از کاربردهای پیل سوختی پلیمری همچون پهپادها، استفاده از صفحات انتهایی با مدول خمشی بالا و وزن پایین مورد نیاز می‌باشد. امروزه

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت استفاده شده در آنها طبقه‌بندی می‌شوند که یکی از آن‌ها پیل سوختی پلیمری می‌باشد که به دلیل نوع الکترولیت پلیمری آن به این نام شناخته می‌شود. ساختار پیل سوختی پلیمری شامل صفحات دوقطبی، لایه نفوذ گاز، مجموعه غشا-الکتروود، آب‌بندها و صفحات انتهایی می‌باشد [۱].

وظیفه صفحات انتهایی کنار هم قرار دادن سلول‌های مجزای پیل سوختی و سری‌سازی آن‌ها، اعمال فشار به سیستم برای کاهش مقاومت تماسی بین صفحات مختلف، تأمین نیروی مورد نیاز جهت آب‌بندی و بالا بردن راندمان سیستم با یکنواخت سازی فشار در سراسر سطح فعال پیل سوختی می‌باشد. اعمال توزیع فشار تماسی یکنواخت روی مجموعه غشا-الکتروود یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت عملکرد مناسب پیل‌های سوختی پلیمری می‌باشد. فشار تماسی کمتر از حد بهینه باعث افزایش افت اهمی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir



کامپوزیت با الیاف شیشه اپوکسی به میزان ۱۳ درصد نسبت به نمونه بدون نانو لوله کربنی افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [۱۶] اثر پارامترهای هندسی ضخامت صفحه ضخامت هسته و زاویه انحراف هسته در صفحات کامپوزیتی هسته موج دار مورد بررسی قرار دادند که نشان داد بیشترین خمش زمانی رخ می‌دهد که نسبت ضخامت صفحات رویی کمتر از ضخامت هسته باشد و همچنین بیشترین استحکام خمشی زمانی رخ می‌دهد که ضخامت هسته و رویه با هم برابر باشند. وانگ و همکاران [۱۷] استحکام و مقاومت صفحات ساندویچی تقویت شده با رویه از جنس الیاف کربن و هسته از جنس الیاف آلومینیوم و با آرایش لانه زنبوری به جهت استفاده در بدنه خودرو را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد با افزایش تراکم یا ضخامت هسته، مقاومت مواد نیز بهبود می‌یابد. وانگ و همکاران [۱۸] رفتار خمشی صفحات کامپوزیتی با سه مدل هسته با هندسه متفاوت خریابی، لانه زنبوری معمولی و لانه زنبوری خاص بصورت سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد صلبیت خمشی و نیروی بیشینه با افزایش چگالی افزایش می‌یابد و انحنا کم می‌شود. همچنین، الیاف کربن بافته شده نسبت به الیاف تک جهت نیروی بیشتری را تحمل می‌نماید و هسته با هندسه لانه زنبوری خاص دارای بیشترین انحنا می‌باشد.

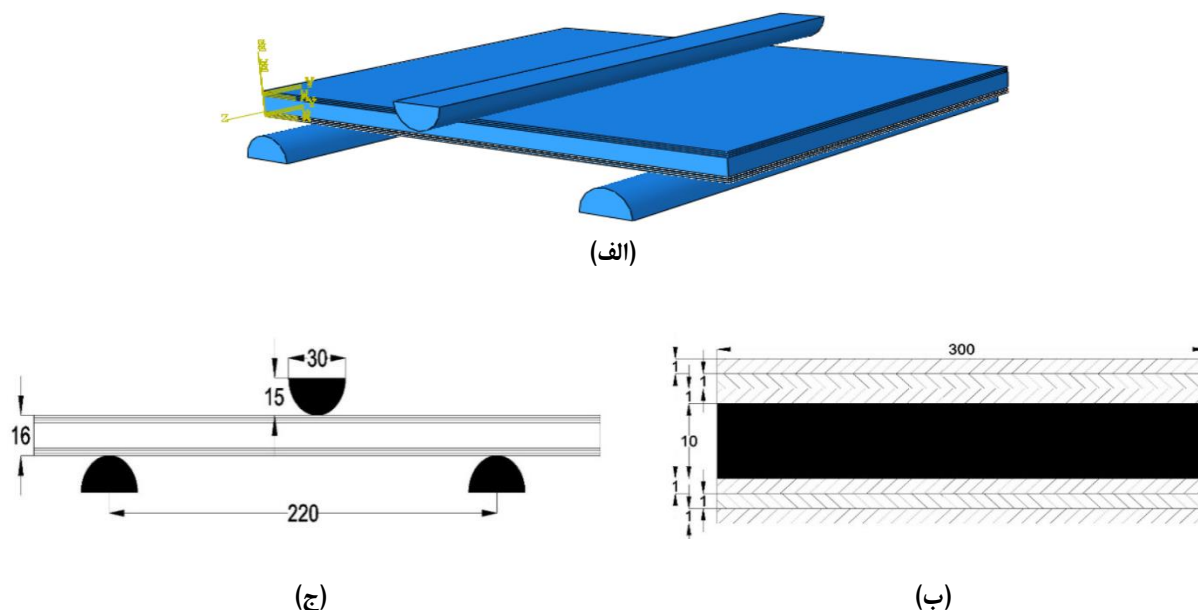
هدف از این پژوهش، دستیابی به صفحه ساندویچی کامپوزیتی مشبک با صلبیت خمشی بالا جهت بکارگیری در صفحات انتهایی پیل سوختی پلیمری می‌باشد. در این راستا، تاثیر پارامترهای هندسه هسته مشبک، زوایای الیاف و جنس مواد به صورت شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی هندسه‌های هسته مشبک شامل هندسه مثلثی، هندسه مستطیلی و هندسه لوزی برای دو ماده کربن-سیلیکون و الیاف شیشه انجام گردید. همچنین، تاثیر زوایای الیاف (۰-۴۵-۹۰)، (۰-۴۵-۹۰) و (۰-۴۵-۹۰) بر روی صلبیت خمشی نمونه‌ها نیز صورت پذیرفت. اعتبارسنجی پژوهش حاضر نیز از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در پژوهش‌های پیشین انجام گرفت.

۲- شبیه سازی عددی

به منظور شبیه سازی صفحات انتهایی پیل سوختی به کامپوزیت مشبک با سه لایه بالایی و پایینی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ شماتیک هندسه مورد مطالعه به همراه ابعاد آن تحت تست خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

با پیشرفت صنایع مختلف و نیاز آن‌ها به مواد سبک با خواص مکانیکی متنوع و روش‌های ساخت آسان، مواد کامپوزیتی یکی از بهترین گزینه‌ها به شمار می‌آیند [۶، ۷]. عارفی و آمابیلی [۸] تحلیل سه‌بعدی رفتار خمشی و کمانشی نانو پوسته سه‌لایه دارای انحنا را بر پایه تئودی تغییر شکل معمولی و مرتبه بالا انجام دادند. بیدگلی و عارفی [۹] نظریه گرادیان کرنش اصلاح شده را برای فرمولاسیون وابسته به اندازه ریز صفحه تقویت شده با نانوپلاکت‌های گرافن توسعه داده‌اند. در سال‌های اخیر، جایگزین نمودن صفحات انتهایی فلزی سنگین پیل سوختی پلیمری با صفحات انتهایی کامپوزیتی نیز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است.

یو و همکاران [۱۰] با استفاده از تئوری طراحی بهینه، صفحه انتهایی کامپوزیتی از جنس الیاف کربن اپوکسی برای پیل سوختی پلیمری طراحی نمودند. آن‌ها خواص حرارتی و مکانیکی صفحه انتهایی را اندازه‌گیری و با نتایج بدست آمده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود مقایسه نمودند. یو و همکاران [۱۱] به بررسی طراحی جدیدی از صفحات انتهایی کامپوزیتی کربن اپوکسی و شیشه با پیش‌انحنای ایجاد شده تحت تنش حرارتی جهت کاهش وزن پیل سوختی پلیمری پرداختند که بررسی‌ها نشان داد که سختی خمشی صفحه کربن اپوکسی افزایش می‌یابد. کی پالکا و همکاران [۱۲] خصوصیات مقاومتی صفحات ساندویچی با هسته لانه زنبوری از جنس آلیاژ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از به تاخیر افتادن شروع تغییر شکل پلاستیک و افزایش استحکام نهایی و استحکام خمشی در اثر تغییر شکل هندسه هسته و افزایش ضخامت سلول‌های هسته لانه زنبوری می‌باشد. سوی و همکاران [۱۳] صفحات انتهایی پیل سوختی پلیمری ساخته شده از دو ماده آلومینیوم و فولاد برای دستیابی به توزیع فشار یکنواخت‌تر مدل‌سازی نمودند که نتایج نشان می‌دهد صفحه آلومینیومی استحکام خمشی بیشتری دارد. خواتانه و همکاران [۳] خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی را مقایسه کردند. در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد با افزایش مقدار الیاف، استحکام خمشی و کششی و مدول الاستیک افزایش یافته از نظر خواص حرارتی نیز بهبود می‌یابد. رامش و همکاران [۱۴] خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف ترکیبی شیشه سیسال و شیشه جوت را بررسی نمودند که نتایج نشان دهنده برتری نمونه حاوی شیشه سیسال از نظر مقاومت کششی و بهینه بودن نمونه حاوی الیاف شیشه جوت از نظر مقاومت خمشی بود. شکریه و همکاران [۱۵] به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های مشبک به ازای افزودن ۵ درصد وزنی نانو لوله کربنی پرداختند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استحکام خمشی



شکل ۱. هندسه مورد بررسی به همراه ابعاد الف) نمای کلی هندسه ب) نحوه قرارگیری رویه ها ج) ابعاد تکیه گاهها و نحوه قرارگیری آنها. (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر است)

Fig. 1. Geometry of the present study with dimension a) 3D view with boundary conditions b) cross-section of different core configurations and their geometrical characteristics c) The dimensions of the supports and their placement. (all of dimension mm)

نرم افزار آباکوس موجود نبوده و باید به این نرم افزار اضافه گردد. در جدول ۱ و ۲ به ترتیب خواص مکانیکی برای مواد کربن-سیلیکون و الیاف شیشه ارائه شده است.

۲-۲- معادلات حاکم

بر اساس قانون هوک به طور کلی رابطه تنش- کرنش به صورت زیر بیان می شود [۲۱]:

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad i, j = 1 \dots 6 \quad (1)$$

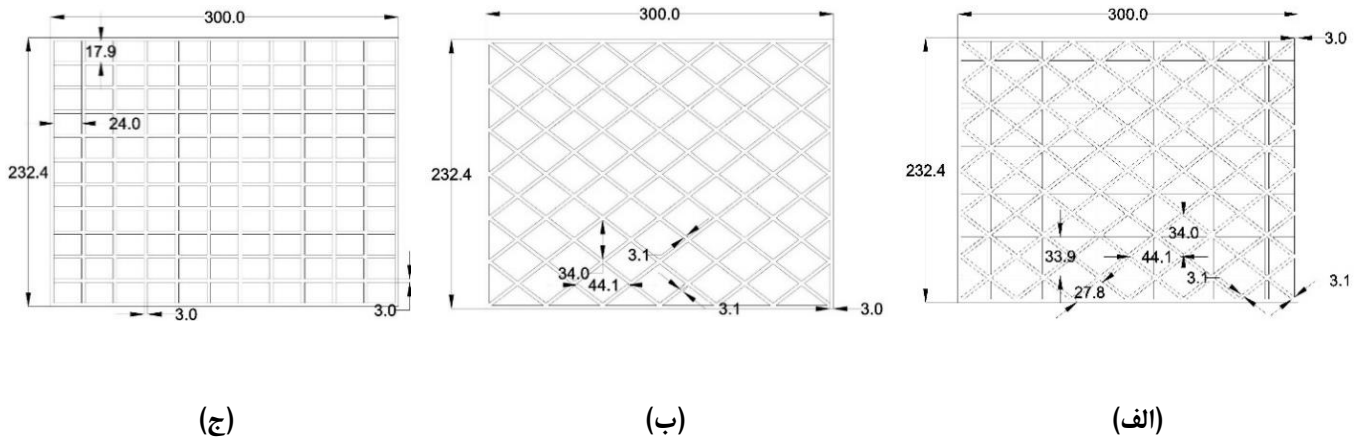
به طوری که σ_i مولفه های تنش، C_{ij} مولفه های ماتریس سفتی و ε_j مولفه های کرنش می باشند. ماتریس سفتی C_{ij} دارای ۳۶ ضریب ثابت می باشد و با توجه به انرژی کرنشی، ماتریس سفتی ماتریسی متقارن است. برای مواد ارتوتروپیک، ماتریس سفتی دارای سه صفحه تقارن عمود

همچنین، به منظور بررسی تاثیر هندسه هسته مشبک سه هندسه مستطیلی، مثلثی و لوزی در نظر گرفته شده است که شماتیک آن به همراه ابعاد آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور شبیه سازی آزمون خمش سه نقطه ای در پژوهش حاضر ابعاد صفحات مشبک کامپوزیتی مطابق با ملزومات استاندارد ASTM D7264-07 انتخاب شده است (شکل ۱). برای جلوگیری از لغزش نمونه ها در حین انجام آزمون، نمونه از هر طرف تکیه گاه باید به میزان حداقل ۱۰ درصد از فاصله بین دو تکیه گاه بلندتر باشد. در مدلسازی حاضر، نسبت فاصله بین دو تکیه گاه به ضخامت نمونه طبق استاندارد برابر با ۱۴ به ۱ در نظر گرفته شده است.

۲-۱- روش المان محدود

به منظور شبیه سازی از روش المان محدود و نرم افزار تجاری آباکوس استفاده شده است. برای مدل سازی رفتار مواد مورد بررسی، رابطه جانسن-هلمکویست [۱۹] بکار گرفته شد. مواد مورد نظر به صورت پیش فرض در



شکل ۲. هندسه هسته مشبک به همراه ابعاد الف) هسته مثلثی شکل ب) هسته لوزی شکل ج) هسته مربعی شکل. (کلیه ابعاد بر حسب میلیمتر است)

Fig. 1. Geometry of grid core with dimension a) triangular geometry b) diamond geometry c) square geometry (all of dimension mm)

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مواد کربن-سلینک [۲۰].

Table 1. Mechanical properties of C/Sic

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
۲۲۰	سفتی فشاری طولی، $(GPa)K_1$	۲۰۰۰	چگالی، $\rho (kg/m^3)$
۳۶۱	سفتی فشاری عرضی، $(GPa)K_2$	۰/۱۶	نسبت پواسون، ν
۰	سفتی کششی، $(GPa)K_3$	۴۴۹	مدول الاستیک، $(GPa)E$
		۱۹۳	مدول برشی، $(GPa)G$

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مواد کامپوزیتی الیاف شیشه .

Table 2. Mechanical properties of E-glass/epoxy

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
۱۵۴	سفتی فشاری طولی، $(GPa)K_1$	۱۶۵۰	چگالی، $\rho (kg/m^3)$
۲۶۴/۴	سفتی فشاری عرضی، $(GPa)K_2$	۰/۳	نسبت پواسون، ν
۱۵۴	سفتی کششی، $(GPa)K_3$	۷۳/۵	مدول الاستیک، $(GPa)E$
		۲/۳۶	مدول برشی، $(GPa)G$

خود تعریف شده‌اند. لذا، برای انتقال تنش‌ها و کرنش‌ها به سامانه اصلی باید از ماتریس دوران با $n = \sin \theta$ و $m = \cos \theta$ استفاده شود [۲۱]:

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\varepsilon_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ 2\varepsilon_{12} \end{cases} \quad m = \cos$$

با توجه به روابط بدست آمده برای تنش و کرنش در سامانه مختصات کلی، رابطه بین تنش و کرنش برای سامانه مختصات کلی با توجه به رابطه‌های فوق به صورت زیر تعیین می‌گردد [۲۱]:

$$\{\sigma_x\} = [\theta_1][Q][\theta_2]^{-1}\{\varepsilon_x\} \Rightarrow \{\sigma_x\} = [\bar{Q}]\{\varepsilon_x\}$$

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{cases} = [\bar{Q}] \begin{cases} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\varepsilon_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases} \quad (6)$$

مقادیر مرتبط با درایه‌های ماتریس \bar{Q} با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۱]:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + Q_{16}) \\ &\quad \times \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} + 4Q_{66}) \sin^2 \theta \\ &\quad \times \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + Q_{26}) \\ &\quad \times \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ &\quad + (Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ &\quad + (Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{21} - 2Q_{66}) \\ &\quad \times \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

برهم و ۹ ضریب مستقل است و برای مواد ایزوتروپیک، ماتریس سفتی دارای بینهایت صفحه تقارن و ۲ ضریب مستقل است. کامپوزیت‌های لایه‌ای معمولاً با توجه خواص الیاف و ماتریس از نوع ارتوتروپیک می‌باشند. ارتباط تنش-کرنش برای یک لایه در جهات اصلی در ترم‌های ثابت مهندسی به صورت زیر می‌باشد [۲۱]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{cases} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{21}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{21}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & \frac{1}{G_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{cases} \quad (2)$$

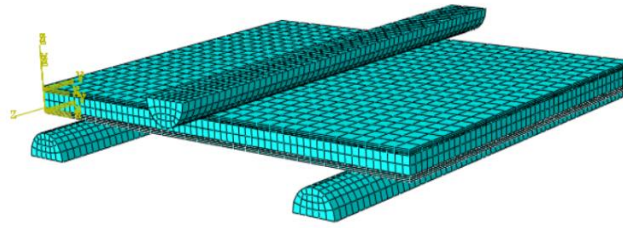
با فرض نازک بودن لایه و تنش صفحه‌ای، σ_3 ، τ_{23} و τ_{31} برابر با صفر می‌شود و معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود [۲۱]:

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{cases} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{cases} \quad (3)$$

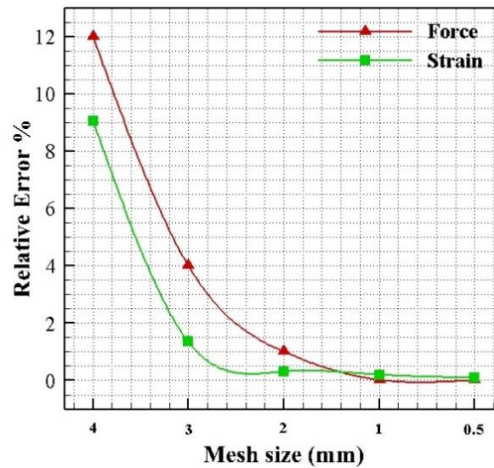
که درایه‌های ماتریس سفتی در معادله (۳) از روابط زیر تعیین می‌گردد [۲۱]:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

با توجه به اینکه ساختار مورد نظر از چندین لایه تشکیل شده است که هر کدام دارای جهات الیاف متفاوت و در نتیجه سامانه‌های مختصات ماده (جهت اصلی) متفاوت می‌باشند، ماتریس سفتی، تنش و کرنش آن‌ها در دستگاه‌های



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) شماتیک هندسه شبکه‌بندی شده (ب) نمودار استقلال از شبکه

Fig. 3. a) Schematic of gridded geometry b) Grid independency

۳-۲- شرایط مرزی

شرایط تکیه‌گاهی (طبق شکل ۱) بصورت دو تکیه‌گاه پایین به صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. به همین منظور، ابتدا یک نقطه مرجع در نظر گرفته شده و سطوح زیرین هر یک از تکیه‌گاه‌ها به صورت کاملاً گیردار در ۶ درجه آزادی به نقطه مرجع متصل شده‌اند. همچنین، با توجه به اینکه هسته در محل‌های برخورد با ورق پایینی و بالایی بصورت کاملاً مقید می‌باشد، از دستور Constraint/Tie استفاده شده است. در این حالت، به منظور شبیه‌سازی خمش سه نقطه، دو تکیه‌گاه ثابت و یک میله متحرک که به مرکز مقطع نیرو وارد می‌کند در نظر گرفته شده است.

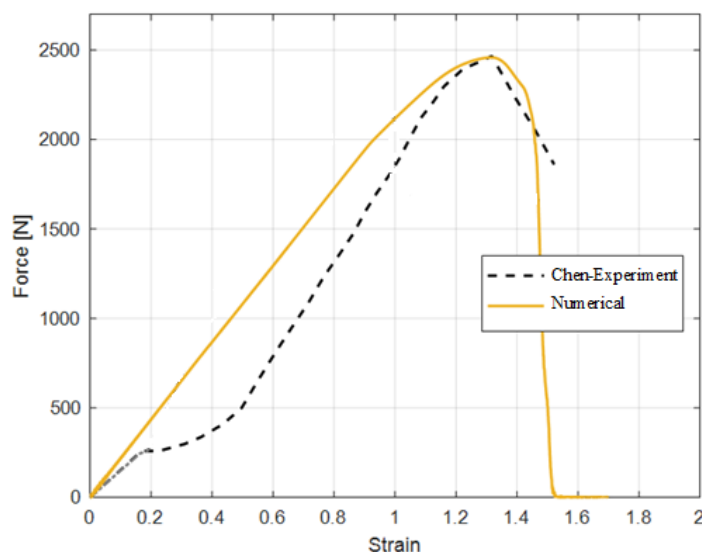
۳- نتایج و تفسیر

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده است. در ابتدا استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، تاثیر هندسه هسته مشبک و زوایای الیاف برای مواد کرین-سیلیکون و الیاف شیشه بررسی شده و در انتها نیز حالت بهینه ارائه شده است.

۳-۱- استقلال از شبکه

در این بخش، اندازه شبکه‌بندی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از شبکه‌بندی نوع C3D8R استفاده شده است (شکل ۳الف)). به منظور بررسی بیشتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اطمینان از شبکه‌بندی انجام شده، شبیه‌سازی برای ابعاد مختلف شبکه ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر انجام شده است که تعداد تقریبی شبکه برای آن‌ها به ترتیب برابر با ۲۵ میلیون، ۱۰ میلیون، ۵/۸ میلیون، ۳/۵ میلیون، ۲ میلیون و ۱/۲ میلیون می‌باشد. در شکل ۳ب) درصد خطای حاصل از شبیه‌سازی نیروی بیشینه و کرنش در ناحیه شکست برای شبکه‌بندی‌های مورد نظر ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۳ب)، مشاهده می‌شود که با کاهش ابعاد شبکه‌بندی درصد خطای حاصل از شبیه‌سازی کاهش می‌یابد، اما این امر سبب افزایش زمان محاسبات می‌گردد. بنابراین، با توجه به معیار خطای نسبی قابل قبول، شبکه‌بندی با ابعاد ۱ میلی‌متر به عنوان شبکه بهینه انتخاب



شکل ۴. مقایسه نتایج عددی کار حاضر با نتایج تجربی پژوهش چن و همکاران [۲۲].

Fig. 4. Comparison between the numerical results in the present study and experimental results of chen et al [22]

است. با توجه به اهمیت میزان نیروی بحرانی برای بررسی استحکام خمشی در صفحات انتهایی پیل سوختی، نتایج عددی بدست آمده در این نقطه با نتایج تجربی مقایسه گردید. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد که نتایج عددی محاسبه شده با نتایج تجربی ارائه شده در پژوهش چن و همکاران در نقطه شکست تطابق مناسبی دارد و درصد خطای نسبی نیرو در نقطه بیشینه نسبت به داده‌های تجربی ارائه شده توسط چن و همکاران برابر با ۰/۰۲ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که اختلاف نتایج عددی و تجربی در میزان کرنش‌های پایین می‌تواند به دلیل استفاده از فرضیات در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی اجزای محدود باشد. فرضیات مورد نظر عبارت است از:

- **فرضیات مربوط به لایه:** الاستیک خطی، ارتوتروپ، نبود تنش‌های اولیه، توزیع الیاف به صورت منظم و یکنواخت.
- **فرضیات مربوط به الیاف:** همگن، الاستیک خطی، ایزوتروپ، فواصل منظم، صاف و مستقیم.
- **فرضیات مربوط به ماتریس:** همگن، الاستیک خطی، ایزوتروپ.
- **فرضیات مربوط به لایه‌ها:** یکنواختی چسبندگی بین لایه‌ها.

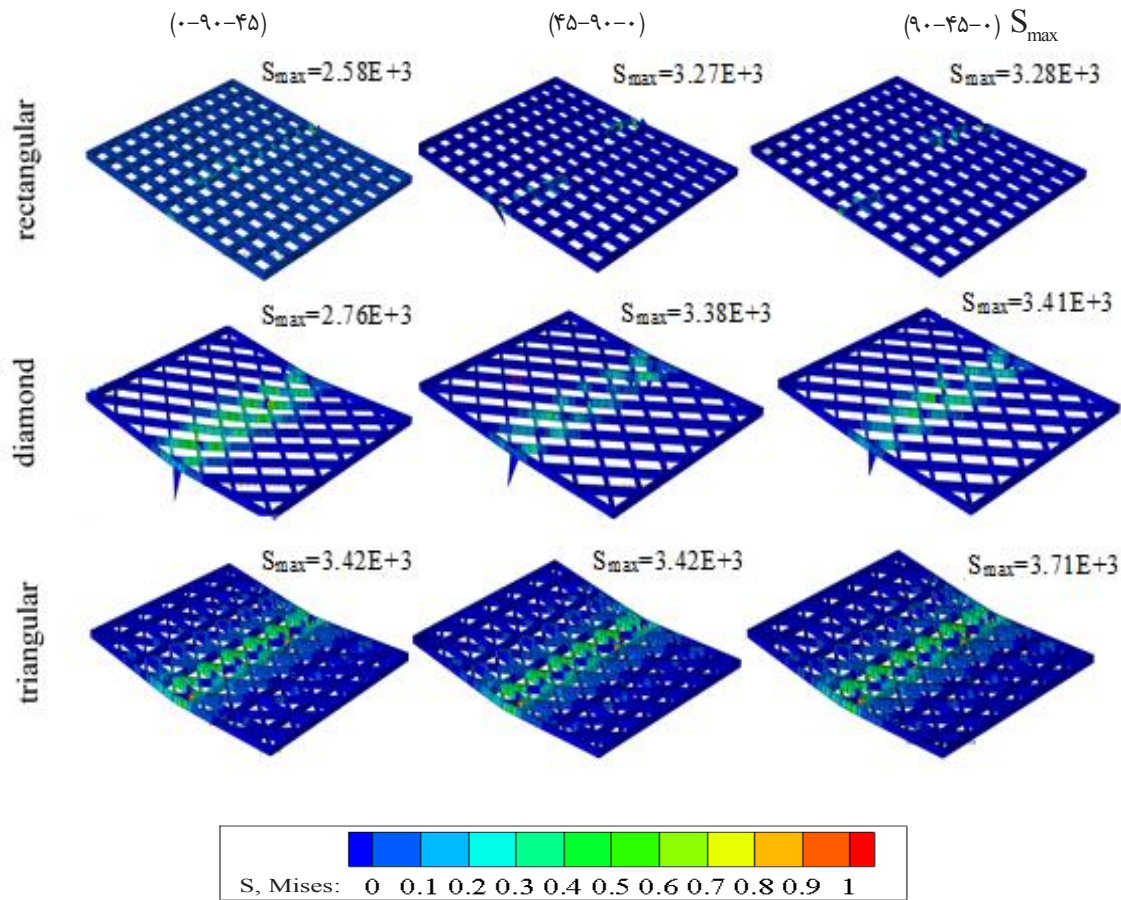
شده و در ادامه، کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از این ابعاد شبکه‌بندی صورت می‌پذیرد. تعداد المان‌ها برای هندسه نشان داده شده در حالت بهینه در شکل ۳(الف) تقریباً برابر با ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ المان می‌باشد. شایان ذکر است خطای محاسبه شده در شکل ۳(ب)، خطای نسبی بوده و براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RE_i = \frac{M_i - M_{i-1}}{M_i} \times 100 \quad i = 1, \dots, 5 \quad (8)$$

که در رابطه فوق، RE_i و M_i به ترتیب خطای نسبی و میزان نیروی بیشینه و یا کرنش در ناحیه شکست برای ابعاد شبکه ام می‌باشد که $i = 1, \dots, 5$ به ترتیب برای ابعاد شبکه ۴ میلی‌متر تا ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

۳-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی کار حاضر از پژوهش چن و همکاران [۲۲] استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده



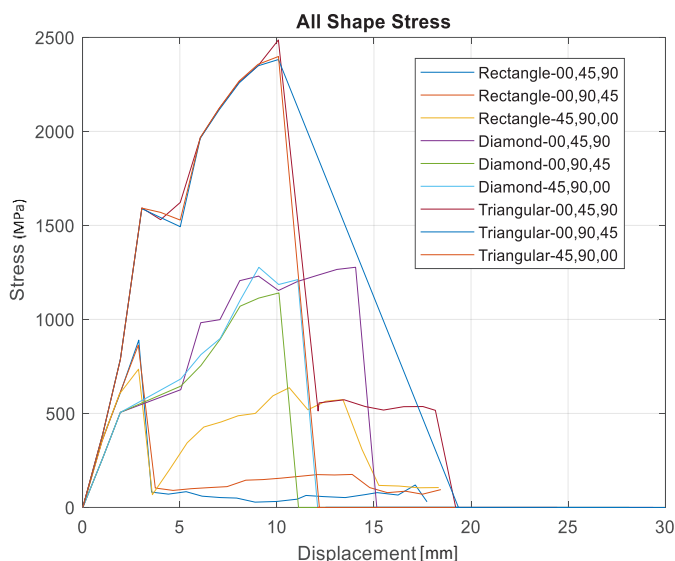
شکل ۵. توزیع تنش در صفحات انتهایی با مواد کربن-سیلیکون با هندسه‌های مختلف در لحظه شکست (کلیه تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال می‌باشند).

Fig. 5. Stress distribution in end plates for C/Sic and different geometries at the moment of failure (all stresses MPa)

زاویه الیاف (۹۰-۴۵-۰) تقریباً ۲۵ درصد بیشتر از زاویه الیاف (۴۵-۹۰-۰) و (۰-۹۰-۴۵) می‌باشد، در حالی که تاثیر زاویه الیاف برای هندسه مثلثی بسیار ناچیز بوده است.

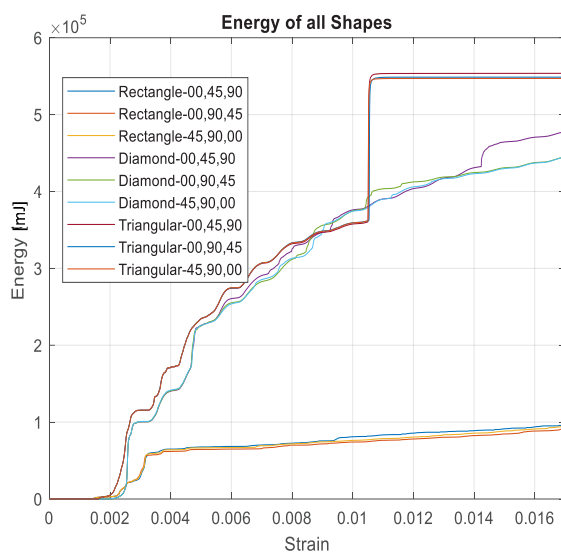
در ادامه، جهت بررسی دقیق‌تر نتایج شبیه سازی مقادیر تنش در ناحیه مرکزی هر یک از قطعات هسته مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته تا علاوه بر بررسی نتایج اثر زوایای الیاف بر تنش شکست مقطع، هندسه بهینه جهت تحمل تنش‌های بیشتر استخراج گردد. در شکل ۶ تنش ایجاد شده در تمامی هندسه‌ها با سه جهت مختلف لایه‌ها نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود هندسه‌های مثلثی، لوزی و مستطیلی به ترتیب دارای بیشترین میزان استحکام خمشی می‌باشند، بگونه‌ای که بیشترین تنش تحمل شده مربوط به نمونه با هسته مثلثی به میزان تقریباً ۲/۷۷ برابر بیشتر از هندسه مستطیلی می‌باشد. علت این امر زاویه قرارگیری

۳-۳- نتایج اعمال خمش سه نقطه بر روی مقاطع مواد کربن-سیلیکون جهت بررسی استحکام خمشی هر یک از مقاطع، از آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده می‌شود. در این حالت، هر یک از مقاطع با استفاده از یک میله که در مرکز قرار گرفته است تا ناحیه بحرانی تحت خمش قرار گرفته و نتایج آن ارائه می‌شود. در شکل ۵ توزیع تنش ایجاد شده در هسته کامپوزیت مشبک در لحظه شکست برای سه مقطع مستطیلی، لوزی و مثلثی و سه زاویه الیاف (۹۰-۴۵-۰)، (۴۵-۹۰-۰) و (۰-۹۰-۴۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که مقطع مستطیلی توزیع تنش یکنواخت‌تری را نسبت به سایر مقاطع دارا می‌باشد. با توجه به نوع بارگذاری و قیود هندسی، در تمامی مقاطع بیشترین میزان تنش ایجاد شده که با S_{max} نشان داده شده است، در قسمت میانی مقاطع مشاهده می‌شود. همچنین، تنش بیشینه در لحظه شکست برای مقاطع مستطیلی و لوزی و



شکل ۶. بررسی تنش ایجاد شده در تمامی هندسه‌ها با سه جهت مختلف لایه‌ها برای مواد کربن-سیلیکون.

Fig. 6. Variation of stress as a function of the displacement for C/Sic, three geometry and three different fiber angles

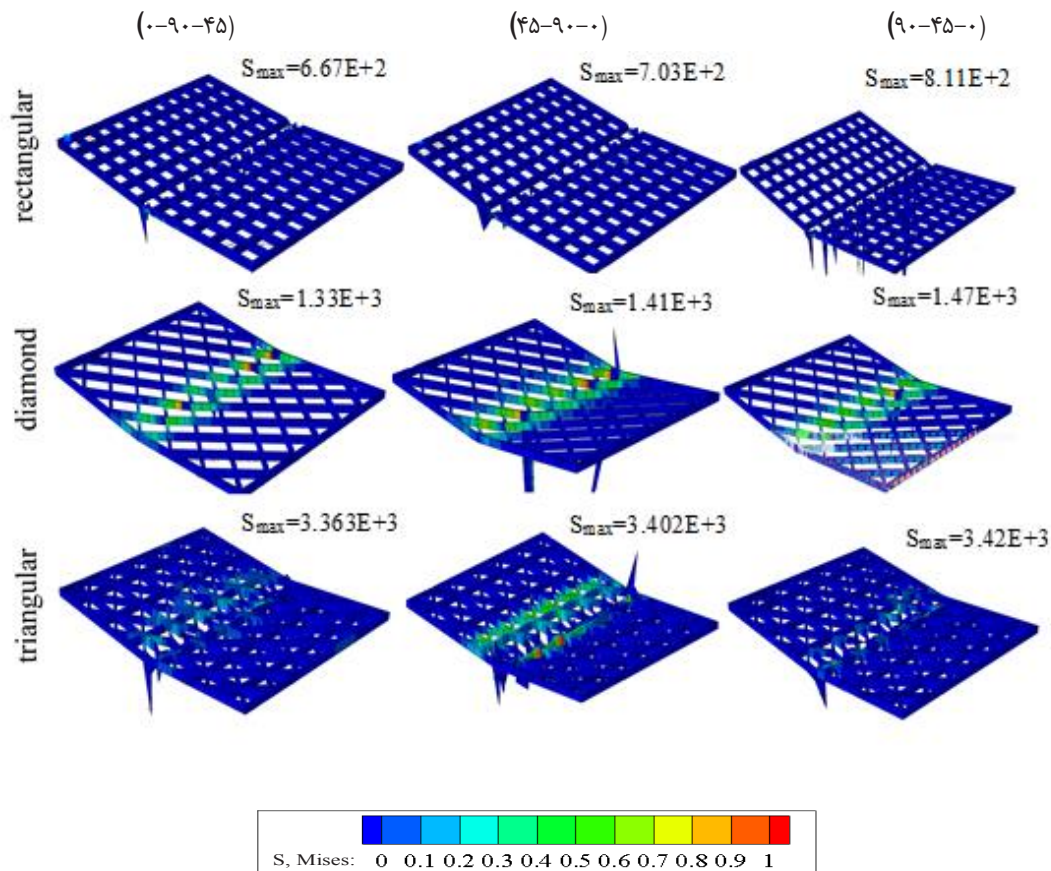


شکل ۷. انرژی جذب شده توسط مقاطع با جهت‌گیری‌های مختلف برای مواد کربن-سیلیکون.

Fig. 7. Variation of Energy as a function of the displacement for C/Sic, three geometry and three different fiber angles

در شکل ۷ میزان انرژی پلاستیک جذب شده توسط مقطع مستطیلی، لوزی و مثلثی با جهت‌گیری‌های مختلف لایه‌های محصورکننده آن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای تمامی مقاطع، کامپوزیت با زوایای الیاف (۰-۴۵-۹۰) بیشترین میزان جذب انرژی پلاستیک را دارا می‌باشد و پس از آن به ترتیب الیاف با زوایای (۰-۹۰-۴۵) و (۰-۹۰-۰)

ریب‌ها نسبت به راستای خمش نمونه می‌باشد. هرچه زاویه ریب‌ها از راستای خمش بیشتر باشد، هسته مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. این بدان معناست که ریب با زاویه صفر درجه که در راستای صفحه خمش در نظر گرفته شده است، کمترین مقاومت خمشی و ریب با زاویه ۹۰ درجه، مقاومت خمشی حداکثری را در هسته ایجاد می‌نماید.



شکل ۸. توزیع تنش در صفحات انتهایی با مواد الیاف شیشه با هندسه‌های مختلف در لحظه شکست (کلیه تنش‌ها بر حسب مگاپاسکال می‌باشند).

Fig. 8. Stress distribution in end plates for E-Glass Epoxy and different geometries at the moment of failure (all stresses MPa)

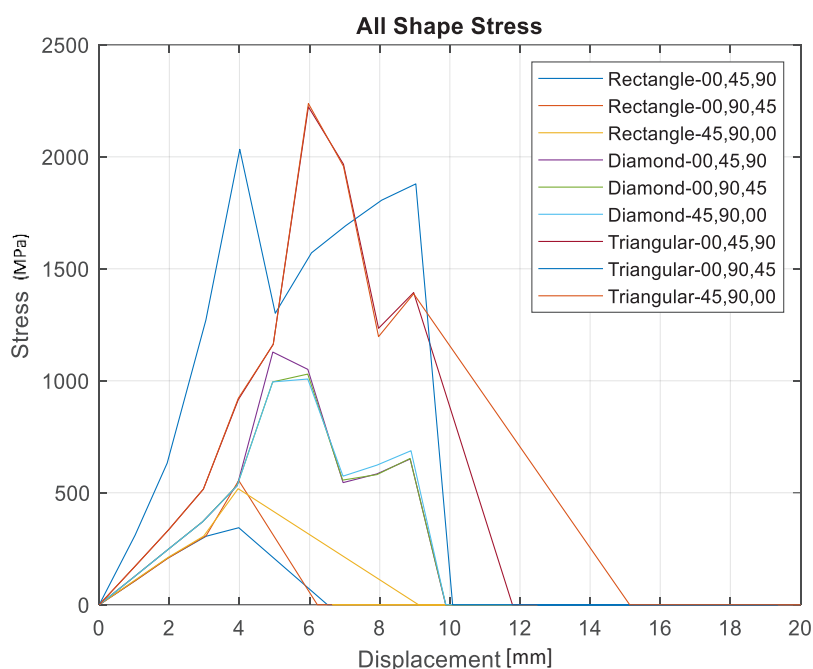
عددی خمش سه نقطه ای برای حالتی که از مواد گلس اپکسی استفاده شده ارائه شده است. در شکل ۸ توزیع تنش در لحظه شکست برای سه مقطع مستطیلی، لوزی و مثلثی و سه زاویه الیاف (۹۰-۴۵-۰)، (۴۵-۹۰-۰) و (۰-۹۰-۴۵) نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق حالت قبل، مقطع مستطیلی و لوزی توزیع تنش یکنواخت‌تری را نسبت به سایر مقاطع دارا می‌باشد. همچنین، در تمامی مقاطع بیشترین میزان تنش ایجاد شده در قسمت میانی مقاطع مشاهده می‌شود.

در شکل ۹ تنش ایجاد شده در تمامی هندسه‌ها با سه جهت مختلف لایه‌ها نشان داده شده است. نتایج ارائه شده برای تنش‌های متناظر در شکل ۹ نشان می‌دهد که در ناحیه شکست مقاطع الیاف با زوایای (۹۰-۴۵-۰) برای تمامی هندسه‌ها در ناحیه الاستیک بیشترین میزان تنش را تحمل کرده

(۴۵) جذب انرژی بیشتری را دارا می‌باشند. همچنین، با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان مشاهده نمود که مقاطع مثلثی شکل میزان انرژی بیشتری را به خود جذب نموده‌اند و مقاطع مستطیلی شکل کمترین میزان جذب انرژی را داشته‌اند. در حالیکه مشاهده می‌گردد مقطع مثلثی شکل دارای یک شکست ناگهانی می‌باشد. علاوه بر این، اختلاف میان اثر زاویه لایه‌ها در مقطع لوزی شکل از سایر مقاطع بیشتر بوده است. این در حالیست که اثر این جهت‌گیری‌ها در هندسه مثلثی بسیار ناچیز بوده است. میزان جذب انرژی در هندسه مثلثی به ترتیب ۵/۵ و ۱/۴ برابر بیشتر از هندسه مستطیلی و هندسه لوزی می‌باشد.

۳-۴ مواد الیاف شیشه

در این بخش، تمامی هندسه‌های معرفی شده با استفاده از مواد گلس اپکسی شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، نتایج



شکل ۹. بررسی تنش ایجاد شده در تمامی هندسه‌ها با سه جهت مختلف لایه‌ها برای مواد الیاف شیشه.

Fig. 9. Variation of stress as a function of the displacement for E-Glass Epoxy, three geometry and three different fiber angles

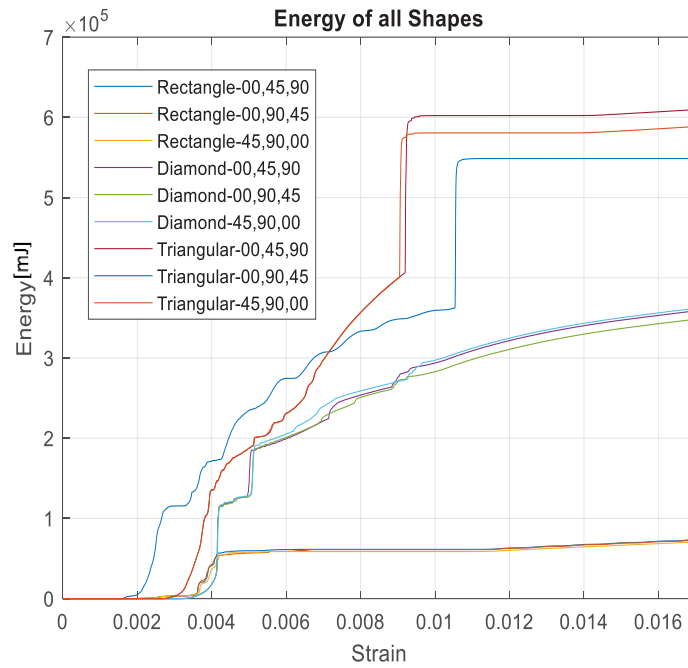
مشبک با هندسه مثلثی عملکرد بهتری را نسبت به سایر نمونه‌ها دارا می‌باشد. به منظور مقایسه بهتر، نتایج تنش-جابجایی برای زوایای الیاف و مواد مختلف در هندسه مثلثی در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مواد کربن-سیلیکون عملکرد قابل قبول‌تری را نسبت به مواد الیاف شیشه از خود نشان داده‌اند. در این حالت می‌توان مشاهده نمود که هم میزان تنش تحمل شده و هم مقادیر جابجایی لحظه شکست این مواد به مراتب بیشتر از مواد الیاف شیشه می‌باشد.

در توجیه این رفتار متفاوت مواد به این نکته اشاره کرد که باتوجه به مشخصات مکانیکی مواد کربن-سیلیکون و الیاف شیشه یکی از دلایل فیزیکی افزایش مقاومت نمونه کربن-سیلیکون نسبت به الیاف شیشه را می‌توان مدول الاستیسیته این مواد بیان نمود که بصورت کمی حدود ۶ برابر نمونه الیاف شیشه می‌باشد. از دلایل دیگر افزایش مقاومت خمشی نمونه کربن-سیلیکون نسبت به الیاف شیشه سفتی فشاری می‌باشد که تقریباً ۱/۵ تا ۱/۸ برابر بیشتر است. همچنین در توجیه تغییر هندسه می‌توان به زاویه قرارگیری ریب‌ها نسبت به راستای خمش نمونه اشاره نمود. به میزانی که

و دیرتر به ناحیه پلاستیک وارد می‌شوند. همچنین، مقطع مثلثی بیشترین مقدار تنش را متحمل شده که تقریباً ۲ برابر بیشتر از هندسه لوزی شکل و ۳/۵ برابر بیشتر از هندسه مستطیلی بوده که با توجه به دلایل ذکر شده در بخش قبل حاکی از قرارگیری نوع ریب‌ها در هسته مشبک می‌باشد.

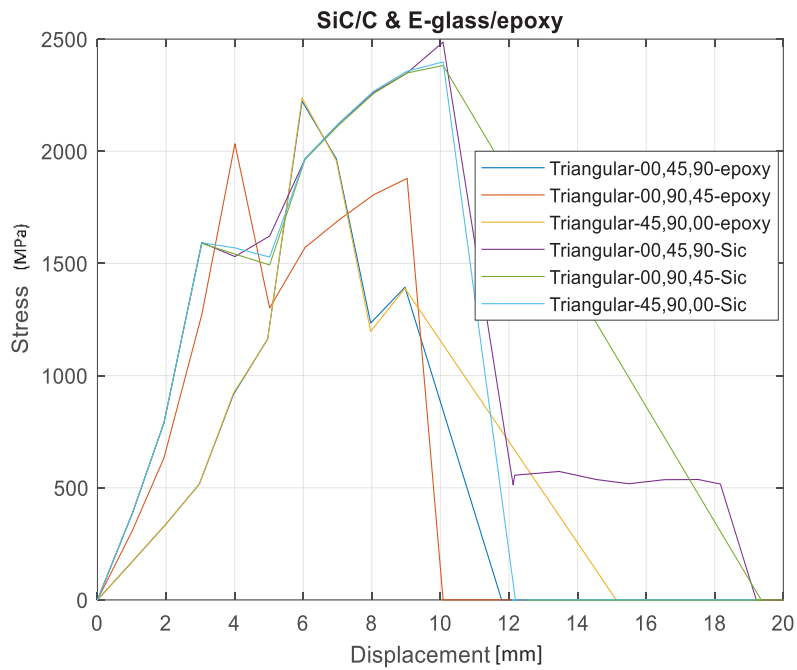
نتایج انرژی پلاستیک جذب شده توسط مقطع مستطیلی، لوزی و مثلثی با جهت‌گیری‌های مختلف لایه‌های محصور کننده آن نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که همانند حالت قبل مقطع‌های مثلثی شکل به دلیل هندسه ترکیبی از دو نمونه دیگر نسبت به سایر مقاطع نتایج بهتری را در جهت جذب انرژی نیروهای وارده نشان داده‌اند که بطور مقایسه‌ای، تقریباً ۶ برابر هندسه مستطیلی و ۱/۷ برابر هندسه لوزی شکل می‌باشد. این در حالی است که مقادیر انرژی جذب شده توسط مقاطع مستطیلی شکل کمترین مقدار را داشته است. همچنین در این مواد جهت‌گیری‌های (۰-۴۵-۹۰) از نتایج بهتری نسبت به سایر جهت‌گیری‌ها برای جذب انرژی برخوردار هستند.

نتایج بدست آمده تا این بخش از پژوهش حاکی از آن است که هسته



شکل ۱۰. انرژی جذب شده توسط مقاطع با جهت‌گیری‌های مختلف برای مواد الیاف شیشه.

Fig. 10. Variation of Energy as a function of the displacement for E-Glass Epoxy, three geometry and three different fiber angles



شکل ۱۱. بررسی تنش مقطع مثلثی با هسته مشبک، الیاف شیشه و کربن-سیلیکون برای زوایای الیاف مختلف.

Fig. 11. Variation of stress as a function of the displacement for triangular grid core, E-Glass Epoxy, C/Sic and three different fiber angles

journal of hydrogen energy, 41(4) (2016) 3062-3071.

- [3] P. Lin, P. Zhou, C. Wu, Multi-objective topology optimization of end plates of proton exchange membrane fuel cell stacks, *Journal of Power Sources*, 196(3) (2011) 1222-1228.
- [4] C. Zhao, S. Xing, W. Liu, M. Chen, Y. Wang, H. Wang, An experimental study on pressure distribution and performance of end-plate with different optimization parameters for air-cooled open-cathode LT-PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(35) (2020) 17902-17915.
- [5] M. Barzegari, M. Ghadimi, M. Momenifar, Investigation of contact pressure distribution on gas diffusion layer of fuel cell with pneumatic endplate, *Applied Energy*, 263 (2020) 114663.
- [6] M. Arefi, F. Najafitabar, Buckling and free vibration analyses of a sandwich beam made of a soft core with FG-GNPs reinforced composite face-sheets using Ritz Method, *Thin-Walled Structures*, 158 (2021) 107200.
- [7] M. Arefi, S. Taghavian, Dynamic characteristics of composite micro lattice plates comprises of graphene nanoplatelets based on MCST theory, *Thin-Walled Structures*, 175 (2022) 109200.
- [8] M. Arefi, M. Amabili, A comprehensive electro-magneto-elastic buckling and bending analyses of three-layered doubly curved nanoshell, based on nonlocal three-dimensional theory, *Composite Structures*, 257 (2021) 113100.
- [9] E. Mohammad-Rezaei Bidgoli, M. Arefi, Free vibration analysis of micro plate reinforced with functionally graded graphene nanoplatelets based on modified strain-gradient formulation, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(2) (2021) 436-472.
- [10] H.N. Yu, S.S. Kim, J. Do Suh, Axiomatic design of the sandwich composite endplate for PEMFC in fuel cell vehicles, *Composite Structures*, 92(6) (2010) 1504-1511.
- [11] H.N. Yu, S.S. Kim, J. Do Suh, Composite endplates with pre-curvature for PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell), *Composite Structures*, 92(6) (2010) 1498-1503.

فاصله زاویه‌ای ریب‌ها از راستای خمش بیشتر باشد، هسته مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. بدین معنا که ریب با زاویه صفر درجه که در راستای صفحه خمش در نظر گرفته شده است کمترین مقاومت خمشی و ریب با زاویه ۹۰ درجه که بیشترین فاصله زاویه‌ای از راستای صفحه خمش را دارد مقاومت حداکثری را در هسته ایجاد می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر هندسه و خواص مکانیکی روی رفتار خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک با هدف دستیابی به یک ساختار کامپوزیت با صلبیت خمشی بالا جهت استفاده در صفحات انتهایی پیل‌های سوختی پلیمری مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه انجام شده به صورت شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم افزار آباکوس بوده و تاثیر زوایای مختلف الیاف در رویه‌ها و صفحات مشبک، در سه هندسه مختلف مربعی، لوزی و مثلثی هسته مشبک برای مواد کربن-سیلیکون و الیاف شیشه بر رفتار خمشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی بررسی گردید. نتایج نشان داد که هسته مثلثی شکل در تمامی نمونه‌ها دارای ظرفیت بار بحرانی، مقاومت خمشی و جذب انرژی بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر می‌باشد. برای مواد کربن-سیلیکون تنش بیشینه در لحظه شکست برای مقاطع مستطیلی و لوزی و زاویه الیاف (۰-۴۵-۹۰) تقریباً ۲۵ درصد از زاویه الیاف (۰-۹۰-۴۵) و (۰-۴۵-۹۰) بیشتر می‌باشد، در حالی که تاثیر زاویه الیاف برای هندسه مثلثی بسیار ناچیز بوده است. برخلاف حالت قبل، برای مواد الیاف شیشه مقطع مستطیلی و لوزی توزیع تنش یکنواخت‌تری را نسبت به سایر مقاطع دارا می‌باشد. به عبارتی تاثیر زوایای الیاف برای مقطع مستطیلی و لوزی شکل ناچیز می‌باشد. همچنین، زاویه الیاف (۰-۴۵-۹۰) در تمامی نمونه‌ها بالاترین میزان تنش و کرنش را متحمل شده است. علاوه بر این، نتایج عددی نشان دهنده آن است مواد کربن-سیلیکون عملکرد قابل قبول‌تری را نسبت به مواد الیاف شیشه از خود نشان داده‌اند.

منابع

- [1] Y. Wang, D.F.R. Diaz, K.S. Chen, Z. Wang, X.C. Adroher, Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review, *Materials today*, 32 (2020) 178-203.
- [2] E. Alizadeh, M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S. Saadat, Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack, *International*

- aluminum honeycomb cores for vehicle body, *Composite Structures*, 184 (2018) 1189-1196.
- [18] X. Yan, C. Lin, Z. Zheng, J. Chen, G. Wei, J. Zhang, Effect of clamping pressure on liquid-cooled PEMFC stack performance considering inhomogeneous gas diffusion layer compression, *Applied Energy*, 258 (2020) 114073.
- [19] Z. Zhou, D. Qiu, S. Zhai, L. Peng, X. Lai, Investigation of the assembly for high-power proton exchange membrane fuel cell stacks through an efficient equivalent model, *Applied Energy*, 277 (2020) 115532.
- [20] R. Montanini, G. Squadrito, G. Giacoppo, Measurement of the clamping pressure distribution in polymer electrolyte fuel cells using piezoresistive sensor arrays and digital image correlation techniques, *Journal of Power Sources*, 196(20) (2011) 8484-8493.
- [21] R.M. Christensen, *Mechanics of composite materials*, Courier Corporation, 2012.
- [22] X.Q. Xing, K.W. Lum, H.J. Poh, Y.L. Wu, Optimization of assembly clamping pressure on performance of proton-exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 195(1) (2010) 62-68.
- [12] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, G.S. Kim, The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels, *Thin-walled structures*, 35(3) (1999) 205-231.
- [13] E. Alizadeh, M. Ghadimi, M. Barzegari, M. Momenifar, S. Saadat, Development of contact pressure distribution of PEM fuel cell's MEA using novel clamping mechanism, *Energy*, 131 (2017) 92-97.
- [14] M. Ramesh, K. Palanikumar, K.H. Reddy, Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber-sisal/jute reinforced epoxy composites, *Procedia Engineering*, 51 (2013) 745-750.
- [15] C. Carral, P. Mele, A numerical analysis of PEMFC stack assembly through a 3D finite element model, *International journal of hydrogen energy*, 39(9) (2014) 4516-4530.
- [16] C.-Y. Wen, Y.-S. Lin, C.-H. Lu, Experimental study of clamping effects on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack, *Journal of Power Sources*, 192(2) (2009) 475-485.
- [17] J. Wang, C. Shi, N. Yang, H. Sun, Y. Liu, B. Song, Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Hoseini, M. M. Barzegari, P. Pirali, J. Eskandarijam, *Numerical Investigation of Bending Strength of Composite Sandwich Panel with Grid Core for Use in PEM Fuel Cell Endplates*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(6) (2023) 723-736.

DOI: [10.22060/mej.2023.21839.7520](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21839.7520)

