

بررسی تأثیر خواص اتصال زمینه به الیاف بر رفتار شکست مواد مرکب

محمد پالیزوان^۱، محمد علی اسکندرزاده ارشاد^۲، محمد طاهای ابدی^۳ و محمد همایون صدر^{۴*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۳/۲۴	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۶	
واژگان کلیدی: جدایش الیاف از زمینه، ترک زمینه، المان چسبناک، تحلیل میکرومکانیک، مواد مرکب.	رفتار شکست مواد مرکب حساسیت زیادی به خواص مکانیکی ماده‌ی زمینه، ویژگی سطح الیاف و خواص اتصال بین زمینه و الیاف دارد و این خواص با توجه به نوع ماده و فرآیند تولید مواد مرکب مطابق با تحقیقات پیشین آزمایشگاهی در محدوده وسیعی تغییر می کنند. مقاله حاضر با ارائه مدل میکرومکانیکی از میکروساختار مواد مرکب، میزان اثرگذاری خواص زمینه و اتصال آن با الیاف را بر رفتار شکست مواد مرکب بررسی می نماید. توزیع الیاف در این مدل مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی به صورت تصادفی و شعاع الیاف به صورت یک توزیع نرمال و با چیدمان تصادفی توصیف می شود. الیاف با مدل الاستیک خطی، زمینه با مدل الاستوپلاستیک همراه با معیار داکر-پراگر و اتصال بین آنها با استفاده از المان چسبناک مدل سازی می شود. رفتار شکست با تحلیل اجزای محدود سلول واحد متناوبی از میکروساختار و در کسر حجمی متفاوتی از الیاف و گستره وسیعی از خواص مواد تحلیل می شود. تحلیل میکرومکانیک در اندازه المان های مختلف، برای اطمینان از دقت محاسبات انجام خواهد شد و اندازه مناسب المان با توجه به درصد حجمی الیاف تعیین می گردد. میزان اثرگذاری خواص اتصال بین زمینه با الیاف شامل استحکام اتصال و انرژی شکست در دو جهت محوری و برشی و متغیر توانی انرژی شکست ترکیبی بر روی رفتار شکست سلول واحد بررسی می شود و با انجام تحلیل با خواص مختلف، متغیرهای دارای بیشترین تأثیر بر رفتار شکست مواد مرکب شناسایی می شوند.

۱-مقدمه

مواد مرکب با الیاف بلند به دلیل استحکام بالا در مقایسه با جرم آن به صورت گسترده در سازه های مختلف استفاده می شود [۱ و ۲]. مواد مرکب را می توان با انتخاب مناسب اجزای تشکیل دهنده، درصد حجمی الیاف و چیدمان های مختلف الیاف با توجه به شرایط بارگذاری طراحی کرد. شناخت رفتار دقیق مواد مرکب پیش از استفاده آنها در سازه ها با توجه به خواص اجزای آنها ضروری است. رفتار

شکست مواد مرکب حساسیت زیادی به خواص مکانیکی ماده‌ی زمینه، نحوه آماده سازی سطح الیاف و خواص اتصال بین زمینه و الیاف دارد و این خواص با توجه به نوع ماده و فرآیند تولید مواد مرکب در محدوده وسیعی تغییر می کنند. رفتار شکست مواد مرکب به خواص مواد متشکله، استحکام اتصال الیاف و زمینه، نحوه توزیع الیاف درون میکروساختار و شعاع الیاف وابسته است. با توجه به پیچیدگی های مکانیزم های شکست مواد مرکب، تحقیقات بسیاری بر روی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Sadr@aut.ac.ir

۱. دانشجو، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

۲. دانشجو، مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، سمنان، ایران

۳. دانشیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

۴. دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

ابعاد سلول واحد را می‌توان به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در بدست آوردن خصوصیات مواد مرکب با استفاده از تحلیل مقیاس میکرو دانست. تحقیقات بسیاری بر روی اندازه ابعاد سلول واحد مورد قبول برای مدلسازی میکرومکانیک مواد مرکب انجام پذیرفته است [۱۲-۱۴]. تریاس [۱۲] نشان داد که مینیمم اندازه سلول واحد که می‌تواند رفتار ماده مرکب را با دقت قابل قبول بررسی نماید برای درصد حجمی الیاف ۵۰، برابر پنجاه برابر اندازه شعاع الیاف می‌باشد. ابعاد سلول واحد در نظر گرفته شده در این پژوهش نیز همانند تحقیق تریاس به اندازه پنجاه برابر شعاع الیاف مدل‌سازی شده است.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تاکنون مکانیزم‌های ایجاد خرابی و گسترش آن در مقیاس میکرومکانیک با در نظر گرفتن توزیع نرمال برای شعاع الیاف و توزیع تصادفی الیاف درون المان حجمی منتخب از میکروساختار انجام نشده است. این پژوهش رفتار شکست تحت اثر بارگذاری عرضی ماده مرکب کربن-اپوکسی با توزیع تصادفی الیاف و شعاع متغیر به صورت تصادفی و توزیع نرمال را بررسی نموده و رفتار شکست با در نظر گرفتن دو حالت خرابی غالب شامل جدایش الیاف از زمینه و ترک زمینه تحلیل می‌نماید. الیاف به صورت الاستیک خطی و زمینه به صورت الاستوپلاستیک همراه با معیار دراگر-پراگر به همراه مدل خرابی پیشرونده مدل‌سازی می‌شود. در بخش بعد نحوه مدل‌سازی میکرومکانیک با معرفی هندسه سلول واحد در این تحلیل و خواص اجزای سلول واحد پرداخته شده است. بخش سوم روش تحلیل مدل میکرومکانیک و نحوه همگن‌سازی و تعریف شرایط مرزی سلول واحدی از میکروساختار مواد مرکب را بیان می‌کند. در بخش پنجم، پس از صحنه‌گذاری مدل میکرومکانیک، نتایج حاصل از تحلیل‌های مختلف ارائه می‌شود و اثر پارامترهای مختلف اتصال زمینه به الیاف بر رفتار شکست مواد مرکب ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی میکرومکانیک

۲-۱- هندسه سلول

توزیع تصادفی الیاف در میکروساختار مواد مرکب و انتخاب شعاع الیاف متغیر موجب می‌شود، نتایج تحلیل میکرومکانیک با واقعیت تطابق بیشتری داشته باشد. توزیع تصادفی الیاف موجب می‌شود در نواحی با فاصله کمتر

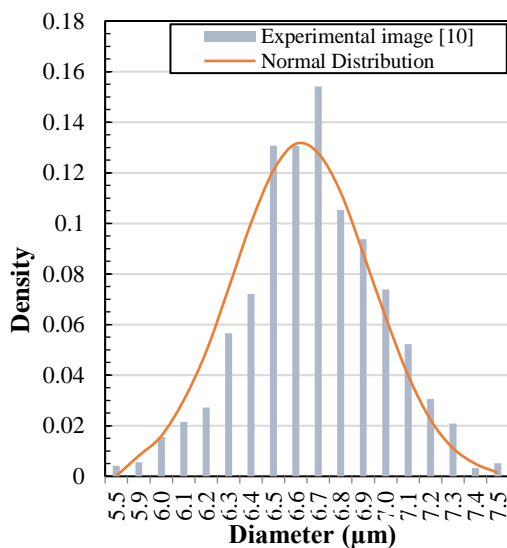
نحوه شروع خرابی در مواد مرکب تحت بارگذاری مختلف انجام شده است [۳]. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است دو حالت جدایش الیاف از زمینه و ترک‌های داخل زمینه دو مود خرابی غالب در مواد مرکب تحت بارگذاری عرضی می‌باشند [۴]. پس این دو حالت خرابی باید در مدلسازی رفتار شکست مواد مرکب در نظر گرفته شوند. لورکا و همکاران [۵ و ۶] مدلی از رفتار شکست مواد مرکب در مقیاس میکرومکانیک ارائه دادند که شروع و رشد خرابی برای توزیع تصادفی الیاف با شعاع ثابت را تا شکست نهایی مواد مرکب مدل‌سازی می‌نمود. این مهم با توجه به قابلیت‌های المان چسبناک برای مدل‌سازی رفتار اتصال الیاف و زمینه و مدل غیرخطی برای تحلیل رفتار خرابی زمینه بدست آمده است. جدایش الیاف از زمینه براساس مطالعات آزمایشگاهی به عنوان اولین حالت خرابی در بارگذاری داخل صفحه‌ای عمود بر الیاف مشاهده شده است [۷-۹]. هوبیرونکن و همکاران [۹] نحوه شروع خرابی در یک لایه مواد مرکب با زمینه اپوکسی و الیاف کربن را به صورت آزمایشگاهی بررسی نموده و مشاهده کردند خرابی مواد مرکب با جدایش زمینه از اطراف تعداد زیادی از الیاف شروع می‌شود. سپس توزیع تنش در زمینه و در ناحیه بین الیاف‌ها افزایش یافته و پس از تغییر شکل پلاستیک، ترک در زمینه ظاهر می‌شود. در نهایت رشد ترک‌های داخل زمینه منجر به شکست نهایی لایه‌ای از مواد مرکب می‌شود. چیدمان الیاف تأثیر به‌سزایی در توزیع تنش در محل اتصال الیاف و زمینه دارد و می‌تواند نیروی لازم برای شروع و رشد خرابی را تعیین نماید [۹]. در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی سلول واحد مواد مرکب در مقیاس میکرومکانیک، شعاع الیاف به صورت ثابت برای کلیه الیاف در نظر گرفته شده است در صورتی که وقان و مکاری [۱۰] با استفاده از تصویربرداری‌های آزمایشگاهی نشان دادند شعاع الیاف ثابت نیست. در ادامه اسماعیل و همکارانش [۱۱] بدون در نظر گرفتن حالت‌های خرابی به بررسی رفتار الاستیک مواد مرکب با فرض توزیع نرمال برای شعاع الیاف پرداختند و خصوصیات مؤثر الاستیک و بازه تغییرات آن را با استفاده از المان‌های حجمی نمونه با توزیع تصادفی الیاف مورد بررسی قرار دادند. از سوی دیگر، استفاده از الیاف با شعاع متغیر این امکان را فراهم می‌آورد تا المان‌های حجمی نمونه با درصد الیاف بالاتری را مدل‌سازی نمود زیرا می‌توان الیاف با شعاع کمتر را در فضای خالی بین الیاف دیگر قرار داد.

هزار قسمت تقسیم می‌گردد. به تجربه مشخص شده است که این مقدار کناسب بوده و میزان بیشتر آن صرفاً هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد.

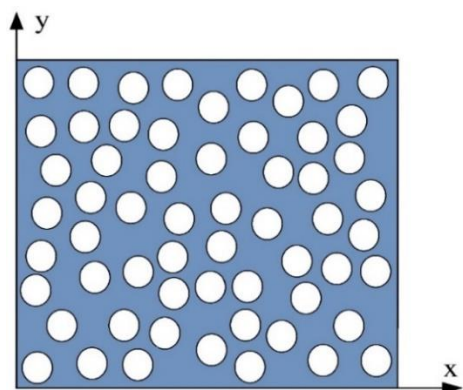
۴- تعداد الیاف مورد نیاز برای ایجاد درصد حجمی الیاف درون المان حجمی نمونه محاسبه شده و بر اساس آن توزیع نرمال شعاع الیاف بدست خواهد آمد.

۵- حال نقاطی که پتانسیل قرار گیری مرکز الیاف را دارند انتخاب شده و الیاف یک به یک در المان حجمی نمونه قرار می‌گیرند.

۶- یک شرط ایجاد می‌گردد تا الیاف جدید بر روی الیاف پیشین قرار نگرفته و همینطور شرط حداقل فاصله با الیاف کناری را رعایت کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف) توزیع نرمال بدست آمده برای شعاع الیاف

درون سلول واحد توسط وقان و مکاری [۱۰]، ب) نمایی از توزیع تصادفی الیاف درون یک سلول واحد با شعاع متغیر

۷- اگر الیافی یکی از مرزهای المان حجمی نمونه را قطع کرد، به منظور حفظ شرط تناوب، می‌بایست یک الیاف نیز

الیاف، تمرکز تنش بیشتری ایجاد شود که بر رفتار پلاستیک و خرابی آنها بسیار تأثیرگذار است. پس الگوریتم تصادفی برای تعیین موقعیت مرکز دایره الیاف در داخل سلول واحد استفاده می‌شود که شعاع الیاف هم نیز با توزیع نرمال و به صورت تصادفی تغییر داده می‌شود. برنامه‌ای کامپیوتری برای ایجاد سلول واحد تهیه شده است که توانایی ایجاد همزمان توزیع تصادفی الیاف درون سلول واحد و توزیع نرمال شعاع الیاف با در نظر گرفتن کسر حجمی مختلف الیاف را امکان‌پذیر می‌سازد.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشین [۱۰]، قطر میانگین الیاف در توزیع نرمال برابر با $6/60$ میکرومتر و انحراف معیار $0/31$ میکرومتر مطابق با شکل (۱-الف) در نظر گرفته می‌شود. در الگوریتم تصادفی موقعیت یک الیاف جدید در سلول واحد در صورتی پذیرفته می‌شود که الیاف جدید با الیاف‌های قبلی تلاقی نداشته باشد و فاصله آن از الیاف قبلی کمتر از $0/6$ میکرومتر نباشد تا المان بندی سلول واحد امکان‌پذیر باشد. سلول واحد متناوب برای توصیف میکروساختار مواد مرکب در نظر گرفته می‌شود، به صورتی که الیافی که یکی از مرز سلول واحد را قطع می‌کند الیاف متناظر آن باید در مرز مقابل نیز لحاظ شوند. در حالتی موقعیت مد نظر مورد قبول است که هر دوی الیاف امکان اضافه شدن به مجموعه را با توجه به شرط عدم تلاقی و حداقل فاصله را داشته باشند. شرط توزیع متناوب برای الیاف واقع در یکی از گوشه‌های سلول واحد نیز باید در نظر گرفته شود با این تفاوت که الیاف متناظر در سه گوشه دیگر قابل افزوده شدن به مجموعه را داشته باشند. شکل (۱-ب) توزیع الیاف در مقطعی از میکروساختار یک لایه ماده مرکب را نمایش می‌دهد.

الگوریتمی که در این پژوهش جهت ایجاد توزیع تصادفی الیاف درون المان حجمی نمونه بکار رفته است به شرح ذیل می‌باشد.

۱- در ابتدا می‌بایست پارامترهای ورودی همچون شعاع میانگین الیاف و انحراف استاندارد آن، حداقل فاصله مجاز الیاف، ابعاد المان حجمی نمونه و درصد حجمی الیاف مورد نظر معرفی گردد.

۲- در این مرحله المان حجمی نمونه با اندازه‌ی مورد نظر ایجاد می‌شود.

۳- حال می‌بایست نقاطی که پتانسیل آن را دارند که مرکز الیاف قرار گیرند ایجاد شود. بدین منظور بعد X و Y ، به ده

زاویه مستوی^۲ و k ضریب تنش تسلیم کشش به فشار سه محوری^۳ بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (2)$$

$$k = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (3)$$

که در آن مقدار زاویه φ (زاویه اصطکاکی داخلی^۴) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_{mc} - \sigma_{mt}}{\sigma_{mc} + \sigma_{mt}} \quad (4)$$

که در آن σ_{mc} و σ_{mt} به ترتیب ماکزیمم مقدار تنش در حالت کششی و فشاری است. با جایگذاری مقادیر ارائه شده در جدول ۱ در روابط بالا ثابت‌های معیار دراگر-پراگر برابر است با: $k = 0.875$ ، $\beta = 23/2^\circ$ و $\varphi = 11/5^\circ$.

جدول ۲: مقادیر اندازه‌گیری شده سفت‌شوندگی رزین اپوکسی توسط فیدلر و همکاران [۱۷]

$\varepsilon_p^e(\%)$	$\sigma_T(MPa)$	$\varepsilon_p^e(\%)$	$\sigma_C(MPa)$
۰/۰۰	۲۹	۰/۰۰	۶۷
۰/۰۳	۳۷	۰/۱۷	۸۰
۰/۰۶	۴۵	۰/۵۹	۱۰۵
۰/۱۳	۵۲	۱/۴۷	۱۲۰
۰/۱۹	۵۸/۵	۲/۵۰	۱۲۵
۰/۲۳	۶۵	۳/۷۵	۱۲۵
۰/۳۹	۷۰	۵/۰۰	۱۲۵
۰/۵۳	۷۴	۶/۲۵	۱۲۵
۰/۶۹	۷۸	۷/۵۰	۱۲۵
۰/۸۵	۸۱/۵	۸/۷۵	۱۲۵
۱/۰۲	۸۴/۵	۱۰/۰۰	۱۲۵
۱/۲	۸۷		
۱/۴۱	۸۹		
۱/۶۲	۹۱		
۱/۸۲	۹۲/۵		
۲/۰۴	۹۳/۵		
۲/۲۷	۹۴/۵		
۲/۵	۹۵		

مقاومت کششی و فشاری ماده اپوکسی برحسب کرنش پلاستیک معادل تغییر می‌کند که در جدول ۲ ارتباط بین آنها بیان شده است. علاوه بر معیار پلاستیسیته برای زمینه، به معیاری برای بررسی پیدایش و رشد ترک زمینه نیاز است. بررسی آزمایشگاهی نشان داده است [۱۷]، ماده اپوکسی در بارگذاری‌های تک جهته و با نرخ کرنش کم رفتار شکست ترد نشان می‌دهد. این درحالی است که در بارگذاری‌های فشاری و برشی پاسخ به صورت پلاستیک می‌باشد. بنابراین، معیار خرابی باید توانایی مدلسازی

دقیقا در مقابل آن در مرز روبه‌روی آن قرار گیرد.

۸- با اضافه شدن هر یک از الیاف، درصد حجمی الیاف مورد نظر محاسبه شده و اگر کمتر از مقدار تعیین شده باشد روند ادامه پیدا خواهد کرد.

۹- در زمان اضافه کردن آخرین الیاف، ممکن است درصد حجمی کمی بیشتر از حد گردد که کافی است شعاع آخرین الیاف تصحیح گردد.

۲-۲- خواص مکانیکی اجزای سلول واحد

از آنجایی که خرابی در الیاف مواد مرکب در اثر بارگذاری عرضی به ندرت اتفاق می‌افتد، لذا الیاف در این پژوهش به صورت الاستیک خطی و بدون مدل خرابی در نظر گرفته شده است. خصوصیات مواد الیاف و ماتریس در نظر گرفته شده از مرجع [۱۵] استخراج و در جدول ۱ ارائه شده است. این خصوصیات مواد در تحلیل‌های انجام گرفته در این مقاله که منتج به نتایج بخش چهارم شده، استفاده گردیده است.

جدول ۱: خصوصیات مواد الیاف کربن و رزین اپوکسی

الیاف کربن [۱۵]	رزین اپوکسی [۳۶]	
۱۳	۳/۸	مدول الاستیک (GPa)
۰/۴۷	۰/۳۵	ضریب پواسون
-	۹۵	مقاومت کششی (MPa)
-	۱۲۵	مقاومت فشاری (MPa)

با توجه به آنکه رفتار مکانیکی ماده اپوکسی مورد استفاده در زمینه به تنش هیدرواستاتیک وابسته است [۱۶]، زمینه به صورت ماده الاستوپلاستیک با معیار تسلیم دراگر-پراگر در نظر گرفته شده است. این معیار توانایی مدلسازی موادی که در دو حالت کشش و فشار رفتار پلاستیک متفاوتی را از خود نشان می‌دهند را دارا می‌باشد. معیار تسلیم دراگر-پراگر به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$F = t - p \tan \beta - d = 0, \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{2}q \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right]$$

که در آن p تنش هیدرواستاتیک، d چسبندگی ماده^۱، q تنش معادل فون مایز و r سومین نامتغیر از تنش انحرافی می‌باشد. ثابت‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی β یا همان

¹ Cohesion of the material

² Meridional plane

³ The ratio of the yield stress in triaxial tension to the yield stress in triaxial compression

⁴ Internal friction angle

مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل خطی اتصال بین الیاف و زمینه توسط یک نمودار دوخطی تنش-جابجایی برای بارگذاری محوری کششی و برشی تعریف می‌شود [۲۲]. این روش توسط آزمایشهای صورت گرفته در [۲۳، ۲۴] بر روی مواد مرکب صحت‌سنجی شده است.

نیروی محوری در جهت عمود بر سطح اتصال با T_n و نیروی برشی در دو راستای مماس بر سطح با T_t و T_s نشان داده می‌شود که در حالت کلی نیروی معادل به صورت $T = \sqrt{T_n^2 + T_t^2 + T_s^2}$ بیان می‌شود.

به طور مشابه جابه‌جایی محوری در جهت عمود بر سطح الیاف با δ_n و جابه‌جایی برشی در دو راستای مماس بر سطح با δ_t و δ_s نشان داده می‌شود که جابه‌جایی برشی معادل $\delta_{\text{Shear}} = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_s^2}$ و جابه‌جایی معادل $\sqrt{\delta_n^2 + \beta^2 \delta_{\text{Shear}}^2}$ است که β سهم اثر برش در میزان جدایش موثر است. نمودار نیرو به جابه‌جایی معادل در مدل دوخطی بدین صورت بیان می‌شود (شکل ۳):

$$T = \begin{cases} \frac{t^0}{\delta^0} \delta & \text{if } \delta \leq \delta^0 \\ \frac{t^0}{\delta^0 - \delta^f} (\delta - \delta^f) & \text{if } \delta^0 < \delta \leq \delta^f \\ 0 & \text{if } \delta > \delta^f \end{cases} \quad (5)$$

که δ^0 و δ^f است. متعاقباً، نیروها در جهت محوری و برشی با استفاده از روابط (۶) و (۷) بدست خواهند آمد

$$T_n = \frac{\partial \phi}{\partial \delta_n} \begin{cases} \frac{t_n^0}{\delta^0} \delta_n & \text{if } \delta \leq \delta^0 \\ \frac{t_n^0}{\delta^0 - \delta^f} (\delta - \delta^f) & \text{if } \delta^0 < \delta \leq \delta^f \\ 0 & \text{if } \delta > \delta^f \end{cases} \quad (6)$$

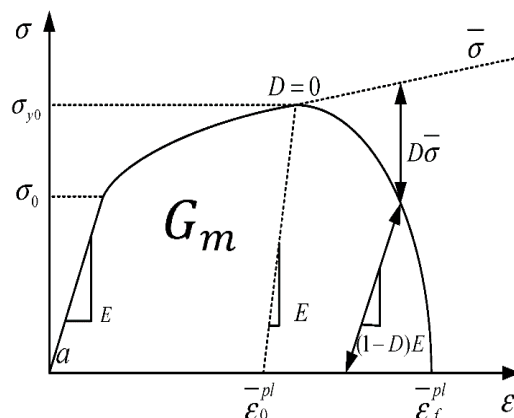
و

$$T_{t,s} = \frac{\partial \phi}{\partial \delta_{t,s}} \begin{cases} \frac{t_{t,s}^0}{\delta^0} \beta^2 \delta_{t,s} & \text{if } \delta \leq \delta^0 \\ \frac{t_{t,s}^0}{\delta^0 - \delta^f} \beta^2 \delta_{t,s} & \text{if } \delta^0 < \delta \leq \delta^f \\ 0 & \text{if } \delta > \delta^f \end{cases} \quad (7)$$

اگر المان چسبناک فقط تحت اثر نیروی محوری کششی قرار داشته باشد انرژی لازم برای شکست به صورت G_{IC} بیان می‌شود. به طور مشابه انرژی شکست در حالت بارگذاری برشی با G_{IIC} بیان می‌شود. در صورتی که المان چسبناک تحت اثر ترکیب نیروی محوری و برشی باشد طبق معیار شکست (Benzeggagh-Kenane)، انرژی شکست برابر است با:

رفتار خرابی را در ترکیب‌های مختلف تنش داشته باشد. در این پژوهش، با توجه به تحقیق یانگ و همکارانش [۱۳]، کرنش‌های پلاستیک معادل در شروع خرابی برای کشش و فشار تک جهته به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۲۵- در نظر گرفته شده است. بعد از شروع خرابی، رشد خرابی بر اساس قانونی مبتنی بر انرژی همانند شکل (۲)، با انرژی شکست زمینه برابر ۰/۰۰۵ نیوتن بر میلیمتر [۱۷] کنترل خواهد شد.

شکل (۲) رفتار خرابی ماده زمینه را نشان می‌دهد که منحنی نقطه‌چین رفتار تنش-کرنش بدون خرابی است در حالی که خط اصلی رفتار ماده با خرابی است. متغیر خرابی که با D نشان داده می‌شود قبل از ایجاد خرابی صفر است و با افزایش بارگذاری تا مقدار یک افزایش داده می‌شود که تغییر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته براساس این متغیر تعیین می‌شود.



شکل ۲: رفتار خرابی در نظر گرفته شده برای رزین اپوکسی [۱۸]

اتصال بین الیاف و زمینه با تئوری ناحیه چسبناک توصیف می‌شود که رایج‌ترین روش برای تحلیل مود خرابی جدایش اتصال در تحلیل اجزای محدود است. شروع خرابی در اتصال بین الیاف و زمینه زمانی ایجاد می‌شود که تنش کششی یا تنش برشی از حد بحرانی استحکام کششی و برشی اتصال بیشتر شود و وقتی این خرابی منجر به ایجاد ترک در اتصال می‌شود که مقدار جابه‌جایی بین دو ماده پس از شروع خرابی از حد بحرانی بیشتر شود. نمودار تغییر تنش در ناحیه اتصال نسبت به جابه‌جایی به صورت مدل دو خطی [۱۹] فرض می‌شود که سطح زیر نمودار به عنوان انرژی شکست برای پیدایش ترک در اتصال است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین همچون تورون و همکاران [۲۰] و داویلا و همکاران [۲۱]، مدل خرابی خطی که با دو متغیر ماکزیمم نیرو و نرخ آزادسازی انرژی بحرانی تعریف می‌شود

در این نوع از شرایط مرزی برای جلوگیری از نفوذ مرزهای سلول‌های واحد به یکدیگر و پیوستگی تنش نیاز است جابه‌جایی گره‌ها در یک لبه از سلول واحد با جابه‌جایی گره متناظر در لبه مقابل مرتبط شود. دو شرط پیوستگی در مرزهای کناری المانهای حجمی نمونه می‌بایست برقرار باشد تا پیوستگی فیزیکی مسئله با برجا بماند. شرط اول آنکه جابجایی‌ها می‌بایست به صورت پیوسته باشد. به عبارت دیگر، المان‌های حجمی مجاور پس از تغییر شکل نمی‌توانند از یکدیگر جدا و یا روی هم قرار گیرند. شرط دوم بیان می‌کند که نیروها در لبه‌های مقابل هم می‌بایست با یکدیگر برابر باشند.

باربرو [۲۸] روابطی جهت برقراری شرایط مرزی متناوب در المانهای حجمی نمونه در مقیاس میکرو ارائه نموده است. تمامی این روابط می‌بایست به لبه‌های مقابل هم و چهار نود کناری سلول واحد اعمال شوند. برقراری شرایط مرزی متناوب این اطمینان را فراهم می‌آورد همانند مراجع [۱۹-۲۲] تطابق بین تنش و کرنش باقی بماند. از همین روی، جابجایی‌ها در دو لبه مقابل هم به صورت زیر خواهد بود

$$u_i^{k+} - u_i^{k-} = \varepsilon_{ik}^0 (x_j^{k+} - x_j^{k-}) \quad (9)$$

که آن u_i^{k+} و u_i^{k-} جابجایی در دو گره متناظر در دو لبه مقابل هم می‌باشد بدین ترتیب مشخص خواهد بود که در زمانی که در اجزای محدود از روشهای کرنش محور برای بارگذاری استفاده می‌گردد رابطه (۹) می‌تواند وجود تغییر شکل متناوب سلول واحد را تضمین نماید.

شکل (۴) نحوه اعمال شرایط مرزی متناوب و جابه‌جایی در جهت عرضی برای سلول واحد را نشان می‌دهد به طوری که بارگذاری به صورت کرنش در جهت افقی اعمال می‌شود و شرایط مرزی تناوبی ارتباط بین جابه‌جایی دو لبه عمودی را برقرار می‌نماید و برای لبه‌های بالایی و پایینی هیچ محدودیت جابجایی وجود ندارد. برای برقراری شرایط مرزی متناوب نیاز است المان‌بندی دو لبه عمودی مقابل هم یکسان باشند.

غیرخطی بودن مسئله و پیچیدگی‌های حل در مسائل شکست با تعداد الیاف بالا باعث خواهد شد تا تعداد نمونه‌های حل زیاد گردد. از این روی، تنظیمات تحلیل در انتخاب اندازه نمونه‌های حل باید به صورت دقیق مشخص گردد. مقدار اولیه نمو حل برابر یک هزارم و مقدار کوچکترین نمو حل برابر یک میلیونیم کل بازه تحلیل قرار داده شد. با توجه

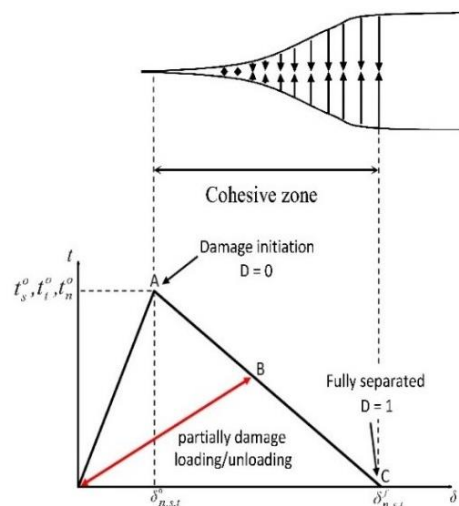
$$G = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{shear}}{G_T} \right)^\eta \quad (8)$$

خواهد بود. در رابطه ۸، $G_{shear} = G_{II} - G_{III}$ میزان نرخ آزادسازی انرژی برای حالت مود ترکیبی بارگذاری برشی می‌باشد. توان η در رابطه ۸ به عنوان متغیر توانی B-K معرفی می‌گردد. تست‌های متعدد خمشی در حالت مود ترکیبی جهت به دست آوردن آن می‌بایست صورت پذیرد. مدل خرابی B-K با سفتی الاستیک $K_{nn} = K_{ss}$ و معیار شروع خرابی تنشی $10^8 \frac{N}{mm^3}$ (شیب ناحیه خطی) و معیار شروع خرابی تنشی برابر با $t_n^0 = 50 \text{ MPa}$, $t_s^0 = 75 \text{ MPa}$ در محل اتصال در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

انرژی شکست G برای نمودارهای نیرو-جابجایی محوری و برشی به صورت $G_{IC} = 0.002 \frac{N}{mm}$, $G_{IIC} = 0.006 \frac{N}{mm}$ و متغیر قانون B-K برابر $\eta = 1.45$ در نظر گرفته شده است.

۳- روش تحلیل مدل میکرو مکانیک

در این پژوهش برای تحلیل پاسخ سلول واحد تحت اثر بارگذاری عرضی از روش اجزای محدود و از نرم‌افزار آباکوس [۲۵] استفاده می‌شود. در مدل‌های ایجاد شده، زمینه و الیاف توسط المان‌های مثلثی یا مربعی کرنش صفحه‌ای و میان‌یابی خطی المان‌بندی می‌شوند. با توجه به کوچک بودن سلول واحد در مقایسه با ابعاد ماده مرکب از فرض شرایط مرزی متناوب [۲۶-۲۸] استفاده می‌شود.



شکل ۳: قانون نیرو-جداپیش دو خطی در نظر گرفته شده برای المان چسبناک

به تحلیل‌های انجام گرفته مشخص شد که برای بزرگترین مقدار نمو حل نیز باید قیدی مشخص گردد. زیرا در برخی مواقع که میزان نمو حل بزرگ انتخاب می‌شود، نتایج سریعاً واگرا شده و نرم‌افزار از ادامه تحلیل باز می‌ماند. در تحلیل‌های انجام گرفته مقدار بزرگ‌ترین نمو حل پنج هزارم کل بازه تحلیل در نظر گرفته شده است. هدف از انجام تحلیل‌های مقیاس میکرو بدست آوردن خصوصیات معادل برای به کار بردن در مقیاس ماکرو می‌باشد.

به تحلیل‌های انجام گرفته مشخص شد که برای بزرگترین مقدار نمو حل نیز باید قیدی مشخص گردد. زیرا در برخی مواقع که میزان نمو حل بزرگ انتخاب می‌شود، نتایج سریعاً واگرا شده و نرم‌افزار از ادامه تحلیل باز می‌ماند. در تحلیل‌های انجام گرفته مقدار بزرگ‌ترین نمو حل پنج هزارم کل بازه تحلیل در نظر گرفته شده است. هدف از انجام تحلیل‌های مقیاس میکرو بدست آوردن خصوصیات معادل برای به کار بردن در مقیاس ماکرو می‌باشد.

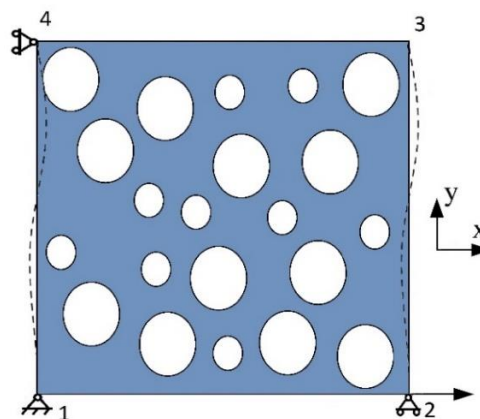
۴- نتایج، تفسیر و بررسی آنها

در این بخش به بررسی رفتار خرابی المانهای حجمی نمونه با درصدهای حجمی الیاف ۲۰، ۴۰ پرداخته شده و اثر پارامترهایی همچون اندازه شبکه المان‌بندی و همینطور پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۱- صحت‌سنجی مدلسازی و تحلیل‌ها

به منظور صحت‌سنجی تحلیل‌های انجام شده از چندین مقاله که شبیه‌سازی‌های مشابه انجام داده‌اند [۱۲ و ۱۳] و همینطور تحقیقی که در آن مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بود [۴] استفاده شده است. مدلسازی‌ها برای هر دو حالت سلول واحد دارای الیاف با شعاع ثابت و متغیر انجام شده در جدول ۳ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر بدست آمده برای حالت سلول واحد با شعاع متغیر کمتر از حالت شعاع ثابت است. به بیان دیگر استفاده از الیاف با شعاع متغیر میدان تنش کمتری را پیش‌بینی خواهد نمود. از سوی دیگر در بررسی متغیر ضریب پواسون مشخص می‌شود که در مدل‌ها با شعاع متغیر مقادیر بدست آمده هم‌خوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

برقراری شرایط ایزوتروپیک عرضی مورد دیگری است که باید جهت اطمینان از نحوه صحیح چیدمان تصادفی الیاف درون سلول واحد بررسی گردد. علاوه بر آن، می‌توان از اعمال شرایط مرزی متناوب و مراحل همگن‌سازی نیز اطمینان حاصل نمود. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده در دو حالت سلول واحد با شعاع ثابت و متغیر دارای خواص مکانیکی همسانگرد در مقیاس ماکرو مکانیک بوده و تمامی مقادیر نسبت مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در دو جهت افقی و عمودی نزدیک به یک بدست آمده است که کاملاً مطابق با حالت رفتار همسانگرد عرضی می‌باشد. به منظور بررسی رفتار خرابی المان حجمی نمونه و صحت‌سنجی مدلسازی و تحلیل‌های انجام گرفته با نتایج آزمایشگاهی، بخشی در مقاله‌ی پیشین نویسندگان به تفصیل ارائه شده است که به منظور جلوگیری از تکرار به آن مقاله ارجاع می‌گردد [۲۹].



شکل ۴: شرایط مرزی متناوب در جهت عرضی برای سلول واحد

همگن‌سازی و استخراج ارتباط بین تنش در محیط میکرو و ماکرو با استفاده از میانگین‌گیری بر روی تمامی المان‌های سلول واحد انجام می‌شود. بنابراین می‌توان کرنش و تنش میانگین را درون سلول واحد به صورت زیر محاسبه نمود

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad (11)$$

و در آخر با استفاده از تنش و کرنش میانگین می‌توان خصوصیات مواد همگن‌سازی شده را بدست آورد.

برای انجام مدلسازی، ابتدا کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای ایجاد توزیع تصادفی الیاف اجرا شده و خروجی آن برای تولید فایل ورودی نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. برای ساخت این فایل از زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شده و توسط آن تمامی مراحل مدلسازی نظیر تعریف هندسه، خصوصیات مواد، بارگذاری‌ها، شرایط مرزی پریمیوم، شبکه بندی به صورت خودکار انجام می‌گیرد. از دو المان سه و چهار نودی دوخطی کرنش صفحه‌ای

اندازه شبکه المان‌بندی یکی از پارامترهایی است که بر نتایج حاصل از مدلسازی خرابی تأثیر به‌سزایی دارد. به‌طور معمول، اندازه شبکه المان‌بندی را به قدری کوچک در نظر می‌گیرند تا جواب‌ها همگرا گردد. این در حالی است که کوچک کردن بیش از حد اندازه شبکه المان‌بندی می‌تواند به مقدار زیادی در زمان حل تحلیل‌ها بیافزاید و یا منجر به همگرا نشدن حل بیانجامد.

شکل (۵) نمودار تنش- کرنش را برای درصدهای حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ درصد برای اندازه شبکه المان‌بندی‌های مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود تحلیل‌هایی با اندازه شبکه المان‌بندی‌های ۱، ۰/۷ و ۰/۴ میکرومتر در دو حالت المان‌های مربعی و مثلثی برای سلول واحد با ۲۰ درصد حجمی الیاف انجام پذیرفت. نتایج شبکه المان‌بندی با اندازه یک میکرومتر هم در ناحیه الاستیک و هم در ناحیه خرابی دارای خطای چشم‌گیری می‌باشد. در این تحلیل مدول الاستیسیته ۴/۶۰۲ گیگاپاسکال و ماکزیمم مقاومت سلول واحد ۶۵/۷۵ مگاپاسکال برای هردو المان مثلثی و مربعی بدست آمد. این در حالی است که نتایج با کوچکتر شدن اندازه شبکه المان‌بندی همگرایی پیدا نموده و در شبکه‌های المان‌بندی ۰/۷، ۰/۵ و ۰/۴ میکرومتر مدول الاستیسیته به ترتیب ۵/۳۰۷، ۵/۳۰۵ و ۵/۳۰۵ گیگاپاسکال و ماکزیمم مقاومت ۶۲/۳۷، ۶۳/۰۶ و ۶۳/۲۳ را نشان می‌دهد که خطایی کمتر از ۰/۰۱ درصد برای مدول الاستیسیته و ۰/۲ درصد برای ماکزیمم مقاومت حاصل شده است. بنابراین در مدلسازی‌ها برای المان‌های حجمی نمونه با درصد حجمی الیاف ۲۰ درصد اندازه شبکه المان‌بندی ۰/۷ ماکزیمم اندازه شبکه المان‌بندی خواهد بود که در آن نتایج هم در ناحیه الاستیک و هم در ناحیه خرابی دارای همگرایی بوده و میزان زمان حل بهینه را دارا می‌باشد.

نتایج بدست آمده برای المان‌های حجمی نمونه با درصد حجمی الیاف ۴۰ درصد نیز در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است. مدول الاستیسیته برای اندازه شبکه المان‌بندی ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۲ میکرومتر به ترتیب برابر ۵/۴۰۲، ۶/۶۴۲ و ۶/۶۳۸ بدست آمده است. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که زمانی که اندازه شبکه المان‌بندی ۰/۸ میکرومتر است مدول الاستیسیته به میزان ۱۸ درصد کمتر و ماکزیمم مقاومت سلول واحد به اندازه ۷ درصد بیشتر از نتایج همگرا شده خواهد بود. با توجه به نتایج بدست آمده از شکل

جدول ۳: محاسبه خصوصیات موثر مواد مرکب و صحت‌سنجی

آن با نتایج دیگر مقالات

	G_{23} (GPa)	V_{32}	V_{23}	E_3 (GPa)	E_2 (GPa)		
شمع ثابت	مقدار میانگین	۵۵۵۵ ۷۵۵۵	۰/۲۷۴	۰/۲۷۲	۱۴۵۲/۴	۱۴۸۲/۴	
	انحراف استاندارد	۰/۱۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۵۶	۷۶۸/۰	۴۴۳/۰	
	ضریب متغیر	۰/۰۲۰	۰/۰۱۵	۰/۰۳۰	۷۷۱/۰	۰/۰۱۷۱	
شمع توزیع نرمال برای شمع	مقدار میانگین	۵۱۷۸	۰/۲۶۱	۰/۲۶۲	۱۳۳/۰	۱۳۶/۰	
	انحراف استاندارد	۰/۱۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۵۶۸/۰	۵۶۶/۰	
	ضریب متغیر	۰/۰۲۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۸۶/۰	۰/۰۱۹۸	
مرجع [۱۲]	مرجع	۴۶۷۳	۰/۴۰۵	۰/۴۰۵	۱۳۰/۰	۱۳۱/۰	
	مرجع	۵۷۵۱	۰/۳۷۱	۰/۳۷۰	۱۳۳/۰	۱۳۳/۰	
	مطالعه آزمایشگاه ی [۴]	۵۷۷۵	۰/۴	۰/۴	۱۶/۰	۱۶/۰	
شمع توزیع نرمال	درصد خطا نسبت به نتایج آزمایشگاه ی	۴۶/۴	۱۳/۱	۱۳	۱۱/۷	۱۱/۸۵	
		۱۰/۴۰	۳۷/۱۲	۳۷	۱۷/۳۱	۱۷/۳۲	

جدول ۴: بررسی وضعیت همسانگرد عرضی برای سلول واحد

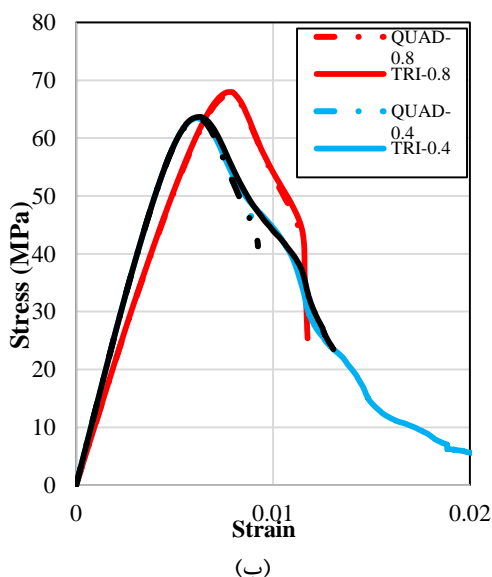
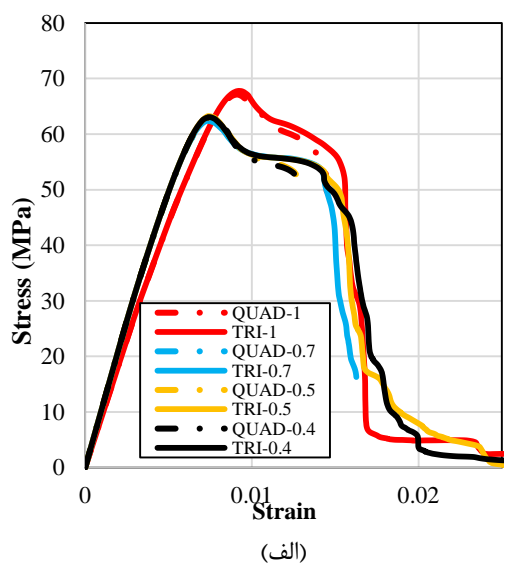
	$\frac{\bar{G}_{23}}{\bar{G}_{32}}$	$\frac{\theta_{23}}{\theta_{32}}$	$\frac{E_2}{E_3}$	$\frac{E_2 \theta_{32}}{E_3 \theta_{23}}$		
مقادیر	شمع ثابت	۰/۹۹۳	۰/۹۹۰	۱/۰۰۱	۱/۰۱۱	
	توزیع نرمال برای شمع	۰/۹۹۸	۱/۰۰۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	

۴-۲- بررسی پارامترهای موثر بر رفتار خرابی مدل

مواد مرکب

۴-۲-۱- اثر اندازه شبکه المان‌بندی

علاوه بر آن باید توجه داشت که نحوه قرار گیری الیاف درون ماتریس بسیار می‌تواند بر روی رفتار خرابی المان حجمی نمونه تأثیرگذار باشد. در مود خرابی ترک ماتریسی این اثرگذاری بسیار بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. زیرا محل قرار گیری الیاف می‌تواند محل ایجاد و نحوه رشد ترک را تعیین نماید. در المانهای حجمی نمونه با درصد حجمی الیاف کمتر نحوه رشد ترک می‌تواند بسیار متنوع‌تر باشد. زیرا الیاف بر خلاف المانهای حجمی با درصد حجمی بالا که ناچاراً می‌بایست در کنار هم قرار گیرند تا درصد حجمی مورد نظر را ایجاد نمایند، فضای بیشتری را برای قرار گیری داشته و طرح‌های متنوع تری را ایجاد می‌نمایند.



شکل ۵: تأثیر اندازه شبکه المان‌بندی بر روی رفتار خرابی سلول واحد با درصد الیاف مختلف (الف) ۲۰ درصد، (ب) ۴۰ درصد

(۵-ب) اندازه شبکه المان‌بندی ۰/۴ میکرومتر برای تحلیل‌های المان‌های حجمی نمونه با ۴۰ درصد حجمی الیاف انتخاب گردید.

با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش، توجه به دو نکته مهم خواهد بود. اول آنکه هرچه میزان درصد حجمی الیاف درون سلول واحد بیشتر می‌شود، برای همگرایی در نتایج و بدست آوردن نتایج دقیق‌تر نیاز به اندازه شبکه المان‌بندی کوچکتری می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل نزدیک‌تر شدن الیاف به یکدیگر در المانهای با درصد حجمی الیاف بالاتر باشد که منجر به تشکیل ناحیه‌هایی با تمرکز بالاتر تنش خواهد شد. دوما در تمامی تحلیل‌های گرفته شده تطابق بالایی بین نتایج بدست آمده از المانهای مثلثی و مربعی وجود دارد. این در حالی است که مدل‌های دارای المان مثلثی همگرایی بهتری در بخش خرابی از خود نشان داده و تا کرنش بالاتری را مدلسازی می‌نمایند.

همگرایی جواب‌ها و ادامه پیدا نمودن نتایج تا شکست نهایی ارتباط بالایی با شبکه المان‌بندی دارد. در عین حال استفاده نمودن از المانهای حجمی نمونه‌ای با ابعاد بزرگ (با ابعاد ۵۰ برابر شعاع الیاف) می‌تواند به دقت بالای نتایج بیانجامد. حال زمانی که از این المانهای حجمی نمونه بزرگ که حاوی صدها الیاف هستند برای تحلیل استفاده می‌گردد طریقه شبکه بندی المانها به صورت کاملاً منظم بسیار ناممکن خواهد شد. علاوه بر آن، در این تحلیل‌ها المانها برای آنکه منتج به جواب‌های دقیقی شوند، می‌بایست با المانهای بسیار ریز شبکه‌بندی شوند. همین‌طور برای آنکه المانهای حجمی نمونه دارای درصد حجمی الیاف ۴۰ و ۶۰ باشند می‌بایست الیاف را بسیار نزدیک به هم قرار داد تا در صد حجمی الیاف مورد نظر ایجاد گردد. تمامی موارد بالا باعث خواهد شد تا تحلیلگر توان کمتری در نحوه قرار گیری شبکه المان‌ها داشته باشد و این امر در بعضی موارد می‌تواند منجر به واگرایی تحلیل قبل از شکست نهایی شود.

از سوی دیگر شروع و رشد ترک ماتریسی و نحوه گسترش ترک‌ها بسیار به نحوه قرار گیری الیاف درون المان حجمی نمونه دارد. از آنجایی که الیاف درون المان حجمی نمونه به صورت تصادفی قرار دارند، در برخی چیدمان‌ها ترک‌ها به نحوی قرار می‌گیرند که باعث واگرایی تحلیل می‌شوند. برای مثال، ترکی که با تغییر بسیار کم کرنش دچار رشد ناگهانی زیادی شده است.

الیاف ۲۰ نمایش داده شده است. نکته حائز اهمیت آنکه ایجاد تغییرات در مقاومت نهایی در جهت محوری (S_n) در رفتار المانهای حجمی نمونه صرفاً در منطقه خاصی از کرنش مربوط به افت کلی مقاومت سلول واحد مربوط به جدایش الیاف از زمینه تأثیرگذار خواهد بود.

نکته دیگر که می‌توان از شکل (۶-ب) دریافت کرد آنکه مقاومت نهایی در جهت محوری (S_n) المانهای چسبناک به تنهایی می‌توانند مقاومت کلی سلول واحد را مشخص نماید. از آنجایی که در هنگام بارگذاری اولین مود خرابی به دلیل جدایش الیاف از زمینه ایجاد می‌گردد و این جدایش در این نوع بارگذاری صرفاً به مقاومت نهایی المان چسبناک در جهت محوری (S_n) وابستگی دارد، افزایش (S_n) به صورت خطی مقاومت کلی سلول واحد را بیشتر خواهد نمود.

مقاومت نهایی سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰ برای مقاومت نهایی المان چسبناک در جهت محوری ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۵۶/۵۷، ۶۰/۲۳، ۶۳/۲۳، ۶۶/۶۳ و ۶۹/۷۹ مگاپاسکال می‌باشد. هر اندازه ماکزیمم مقاومت المانهای حجمی نمونه بیشتر باشد افت مقاومت کلی آنها بعد از جدایش الیاف از زمینه نیز بیشتر خواهد بود و تمامی المانهای حجمی نمونه در شروع مود خرابی ترکهای زمینهای تقریباً در یک سطح از مقاومت قرار خواهند داشت.

همانگونه که بیان شد تغییرات بیست درصدی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خرابی کلی سلول واحد به همراه ندارد. این در حالی است که می‌توان میزان تأثیرگذاری این پارامترها را در دامنه بزرگتری از تغییرات مورد بررسی قرار داد. انرژی شکست در جهت محوری و برشی (G_{IC}, G_{IIC}) در مدلسازی‌های مرجع برابر $G_{nc} = 2 \times 10^{-3} \frac{N}{mm}$ ، $G_{tc} = 6 \times 10^{-3} \frac{N}{mm}$ در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین اثر این دو پارامتر، مقادیر G_{nc} را از 1×10^{-3} تا 12×10^{-3} و G_{tc} را از 8×10^{-3} تا 1×10^{-3} متغیر در نظر گرفته شد.

در شکل (۷) نمودارهای تنش-کرنش برای یک سلول واحد مشخص در ازای تغییرات انرژی شکست در جهت محوری و برشی ارائه شده است. همانگونه که مشخص است میزان حساسیت نتایج به ازای انرژی شکست در جهت محوری

در المانهای حجمی بالا، پس از ایجاد ترک ماتریسی، با افزایش کم کرنش میزان خرابی به دلیل تمرکز تنش بالا بسیار سریع رشد کرده و ترک ماتریسی به تندی سرتاسر المان حجمی نمونه را طی خواهد نمود. این در حالی است که در المانهای حجمی نمونه با درصد الیاف کم، به دلیل فاصله بیشتر الیاف از هم ترکهای ماتریسی می‌تواند در محل‌های مختلفی ایجاد شده و بسیار دیرتر و با الگوهای متنوع‌تری گسترش یابند. این امر باعث خواهد شد تا نمودارها ناحیه رشد خرابی همگرایی کمتری را داشته باشند.

۲-۲-۴- تأثیر پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک بر رفتار کلی سلول واحد

در این بخش به بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر رفتار ناحیه چسبناک که جدایش الیاف از زمینه را مدلسازی می‌نمایند پرداخته می‌شود. برای دو درصد حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ درصد تغییرات تمامی پارامترها مورد بررسی قرار داده شده است. دو سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ به صورت پیش فرض انتخاب شده و برای هر نمودار صرفاً پارامتر اصلی نوشته شده آن نسبت به مدل اولیه تغییر نموده است. در تمامی حالتها نمودار مشکی حالت اولیه و مینا را بیان می‌دارد. در این بخش فرض بر آن است فرآیند ساخت مواد مرکب به صورت کامل صحیح انجام پذیرفته و تمامی الیاف به صورت کامل با ماتریس در تماس هستند. برقرار نبودن این شرط باعث خواهد شد تا خرابی اط ابتدا در مدل وجود داشته و از استحکام سلول واحد کاسته شود.

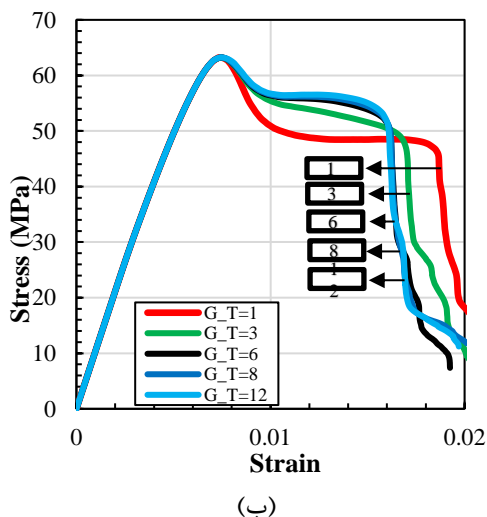
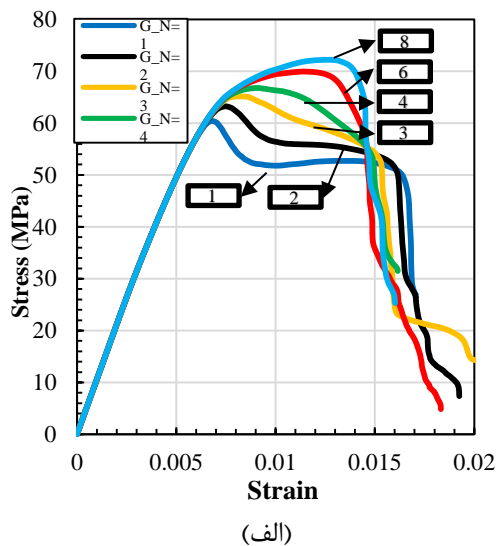
۱-۲-۲-۴- سلول واحد با ۲۰ درصد حجمی الیاف

همانگونه که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، تغییرات بیست درصدی پارامترهای مختلف همچون مقاومت نهایی در جهت محوری و برشی، انرژی شکست در جهت محوری و برشی (G_{IC}, G_{IIC}) و همینطور پارامتر قانون B-K (η) تأثیر چندانی در رفتار خرابی سلول واحد با ۲۰ درصد حجمی الیاف ایجاد نموده است.

از آنجایی که بارگذاری‌ها به صورت کرنشی در جهت افقی به المانهای حجمی نمونه وارد شده است، در رفتار جدایش الیاف از زمینه صرفاً مقاومت نهایی در جهت محوری (S_n) بسیار تعیین کننده می‌باشد. نمودارهای حاصل از تغییرات این پارامتر در شکل (۶-ب) برای المانهای حجمی با درصد

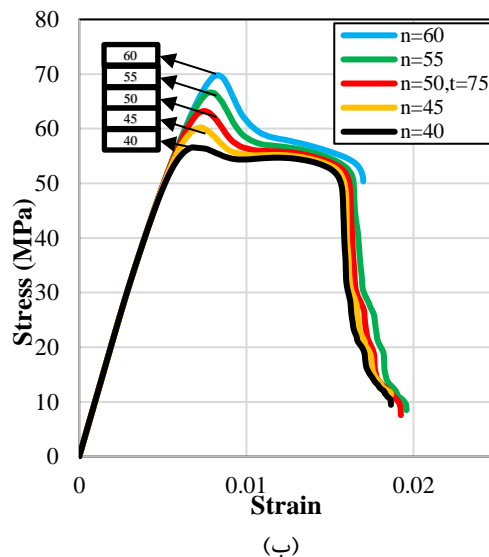
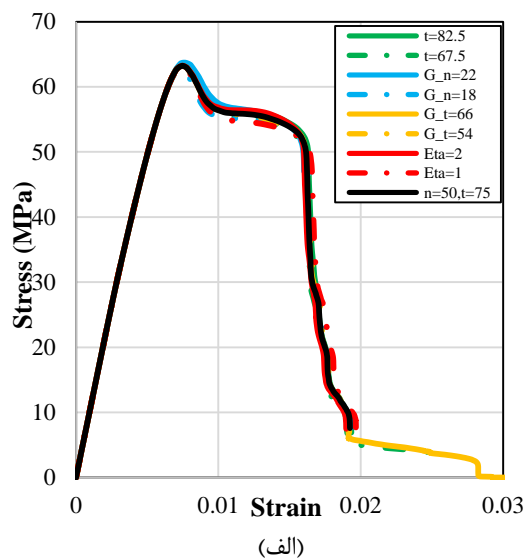
گسترش نهایی آن ترک‌های زمین‌پهی ایجاد گردند. به عبارت دیگر در انرژی شکست‌های در جهت محوری کوچکتر مودهای خرابی به صورت مجزا و در انرژی شکست‌های در جهت محوری بزرگتر جدایش الیاف از زمینه و مود خرابی ترک زمین‌پهی به صورت کوپل و همزمان ایجاد گردند.

با افزایش مقادیر G_{nc} از 1×10^{-3} تا 8×10^{-3} بیشترین مقاومت در دامنه کرنش‌های 15×10^{-3} تا 28×10^{-3} رخ خواهد داد. از سوی دیگر، با افزایش مقادیر G_{tc} از 1×10^{-3} تا 12×10^{-3} بیشترین مقاومت سلول واحد ثابت مانده و شروع ترک زمین‌پهی در کرنش پایین‌تری رخ خواهد داد.



شکل ۷: تأثیر تغییرات انرژی شکست در جهت محوری و برشی بر روی رفتار خرابی سلول واحد با ۲۰ درصد حجمی الیاف

بیشتر از جهت برشی می‌باشد. با افزایش انرژی شکست در جهت محوری جدایش الیاف از زمینه در تنش و کرنش بالاتری ایجاد می‌گردند. این در حالی است که انرژی شکست در جهت برشی تأثیری بر محل شروع خرابی در بارگذاری نداشته ولی در ادامه نحوه رشد آن را تغییر خواهد داد.



شکل ۶: تأثیر پارامترهای ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰

زمانی که به انرژی شکست در جهت محوری مقدار کمی اختصاص یابد، جدایش الیاف از زمینه به صورت کامل ایجاد شده و پس از گسترش کامل آن ترک‌های زمین‌پهی در کرنش بالاتری ایجاد و گسترش می‌یابند. این در حالی است که هرچه مقدار انرژی شکست در جهت محوری را افزایش دهیم ایجاد و گسترش جدایش الیاف از زمینه نیز در کرنش بالا تر ایجاد می‌گردد و این سبب خواهد شد تا قبل از

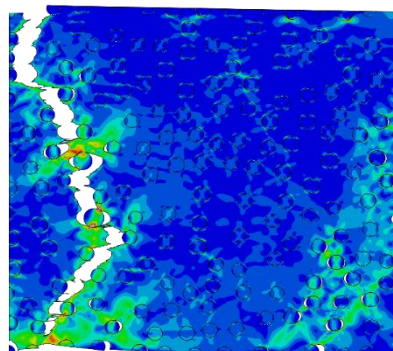
همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود با تغییر انرژی شکست در جهت محوری و برشی رفتار خرابی در مود ترک زمینه که در ادامه مود خرابی جدایش الیاف از زمینه ایجاد می‌گردد نیز دستخوش تغییر خواهد شد. این امر به دلیل تغییر نحوه رشد ترک‌های زمینه‌ی درون سلول واحد است. با تغییر پارامترهای المان چسبناک نحوه گسترش مود خرابی جدایش الیاف از زمینه تغییر کرده و این امر منجر به توزیع تنش متفاوت‌تر و خواهد شد. ایجاد ناحیه‌ها با تمرکز تنش متفاوت منجر به ایجاد ترک‌های زمینه‌ی در مناطق مختلف خواهد شد. بدیهی است که نحوه و نواحی رشد ترک می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار خرابی سلول واحد بگذارد.

نحوه رشد و گسترش خرابی‌ها در مود جدایش الیاف از زمینه و ترک‌های زمینه‌ی برای چندین سلول واحد در شکل (۸) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در به ازای مقادیر مختلف انرژی شکست در جهت محوری و برشی ممکن است یک یا چند ترک زمینه‌ی در نواحی مختلف ایجاد گردد. که این تعداد، محل و راستای رشد ترک می‌تواند به صورت بسیار زیادی بر رفتار کلی سلول واحد تأثیر گذارد. المانهای حجمی نمونه که در آنها یک ترک قالب ایجاد میگردد در کرنش پایین‌تری دچار شکست نهایی شده و ترک سرتا سر سلول واحد طی خواهد نمود. در مواردی که چندین ترک زمینه‌ی در نواحی مختلف ایجاد شده باشد، معمولاً رشد ترک‌ها با سرعت کمتری همراه بوده و شکست نهایی در کرنش بالاتری نسبت به شکست نهایی سلول واحد با یک ترک غالب خواهد داشت.

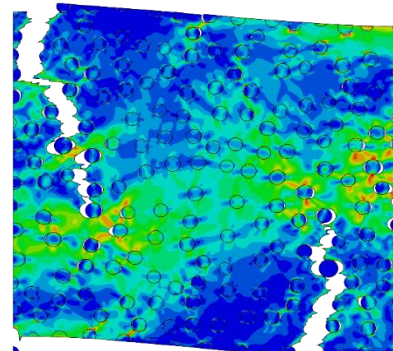
۲-۲-۲-۴ سلول واحد با ۴۰ درصد حجمی الیاف

تغییرات بیست درصدی پارامترهای مختلف همچون مقاومت نهایی در جهت محوری و برشی، انرژی شکست در جهت محوری و برشی (G_{IC} , G_{IIC}) و همینطور پارامتر قانون B-K (η) بر رفتار خرابی سلول واحد با ۴۰ درصد حجمی الیاف در شکل (۹) نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود این مقدار از تغییرات تأثیر چندانی بر رفتار کلی المان حجمی نداشته است.

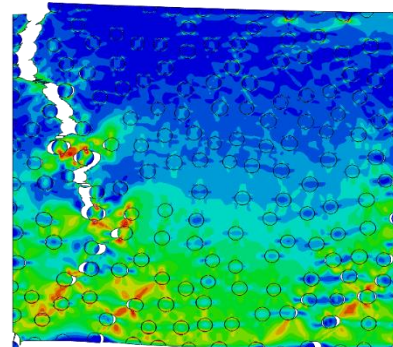
همانند سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰، در رفتار جدایش الیاف از زمینه تنها مقاومت نهایی در جهت محوری (S_n) نقش اساسی را ایفا می‌نماید. نمودارهای حاصل از تغییرات این پارامتر در شکل (۹) برای المانهای حجمی با درصد الیاف ۴۰ نمایش داده شده است. باید توجه داشت



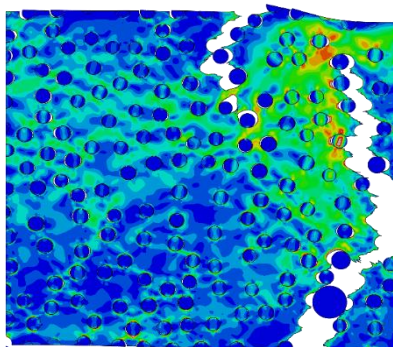
$$G_{nc} = 6 \times 10^{-3} \text{ N/mm}$$



$$G_{nc} = 3 \times 10^{-3} \text{ N/mm}$$



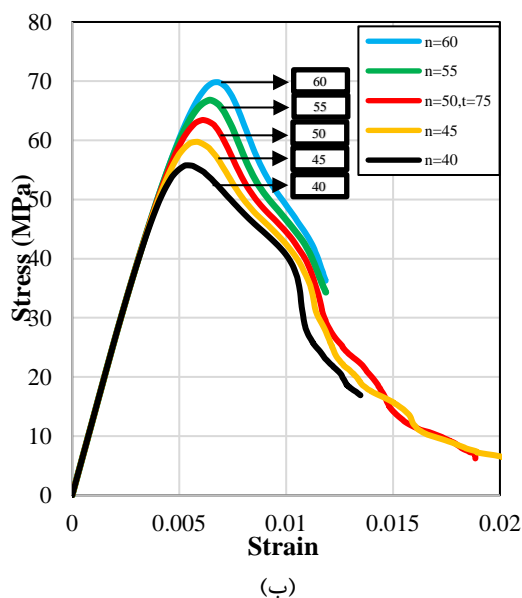
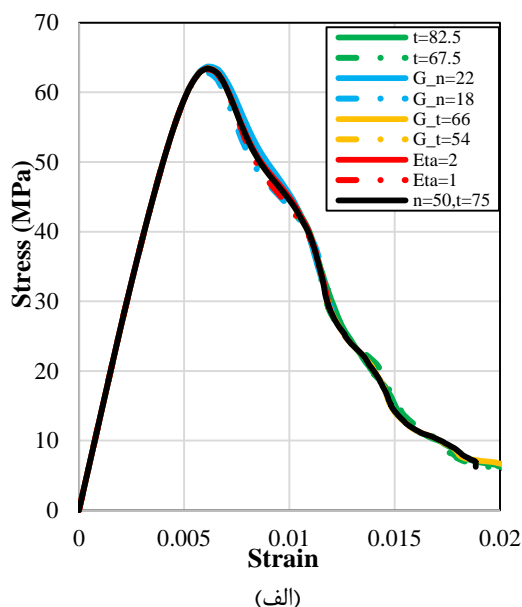
$$G_{nc} = 8 \times 10^{-3} \text{ N/mm}$$



$$G_{tc} = 1 \times 10^{-3} \text{ N/mm}$$

شکل ۸: نحوه رشد ترک‌های زمینه‌ی درون سلول واحد به ازای مقادیر مختلف انرژی شکست در جهت محوری و برشی

بسیار زیاد انرژی شکست در جهت برشی نمی‌تواند بر روی رفتار خرابی سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۴۰ تأثیرگذار باشد و المانهای مختلف در مراحل مختلف بارگذاری و ایجاد خرابی جدایش الیاف از زمینه و ترک‌های زمینه‌ی مطابقت بالایی را در نمودار تنش- کرنش با یکدیگر از خود نشان می‌دهند.



شکل ۹: تأثیر پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۴۰

از سوی دیگر، رفتار خرابی می‌تواند بسیار متأثر از میزان تغییر در انرژی شکست در جهت محوری باشد. این پارامتر عمده تأثیر خود را در مود خرابی جدایش الیاف از زمینه گذاشته و باعث خواهد شد که شروع خرابی جدایش الیاف از زمینه در کرنش بالاتری شروع شود. با افزایش مقادیر

که ایجاد تغییرات در مقاومت نهایی در جهت محوری تنها ناحیه مربوط به خرابی جدایش الیاف از زمینه را در نمودار تنش- کرنش دستخوش تغییر می‌نماید و در بقیه نواحی رفتارها بسیار با یکدیگر همگرا می‌باشند.

روند تغییرات برای ماکزیمم مقاومت سلول واحد با درصد حجمی نمونه ۴۰ نیز همانند ۲۰ درصد ارتباط مستقیم با مقاومت نهایی در جهت محوری خواهد داشت به طوری که برای مقاومت نهایی المان چسبناک در جهت محوری ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ مگاپاسکال ماکزیمم مقاومت سلول واحد به ترتیب برابر ۵۵/۷۶، ۵۹/۷۴، ۶۳/۴۲، ۶۶/۷۸ و ۶۹/۸۲ مگاپاسکال خواهد رسید (شکل ۹-ب). در این دسته نتایج بعد از افت مقاومت کلی سلول واحد بر اثر جدایش الیاف از زمینه، گرافها بسیار نزدیک به هم خواهند شد. این امر به سبب آن است که جدایش‌های الیاف از زمینه به صورت کامل شکل گرفته و اثر پارامتر ناحیه چسبناک در مدلسازی‌ها از بین رفته است.

تغییرات در پارامترهای مختلف المانهای چسبناک، مخصوصاً برای مقاومت نهایی در جهت محوری (S_n)، می‌تواند بر روی همگرایی نتایج تأثیرگذار باشد. این امر در شکل (۹-ب) برای سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۴۰ کاملاً مشهود است. برای همگرایی نتایج تا کرنش‌های بیشتر می‌بایست خصوصیات مواد به صورت کاملاً دقیق و منطبق با یکدیگر لحاظ گردند و عدم تطابق در بین آنها باعث واگرایی نتایج در کرنش‌های پایین‌تر خواهد گردید.

در این بخش نیز برای سلول واحد با درصد الیاف ۴۰ میزان تأثیر تغییرات انرژی شکست در جهت محوری و برشی بر رفتار خرابی در بازه بیشتری به صورت مجزا مورد توجه قرار گرفته است. این امر به دلیل تغییر نحوه رشد ترک‌های زمینه‌ی درون سلول واحد است. با تغییر پارامترهای المان چسبناک نحوه گسترش مود خرابی جدایش الیاف از زمینه تغییر کرده و این امر منجر به توزیع تنش متفاوت‌تری خواهد شد. ایجاد ناحیه‌ها با تمرکز تنش متفاوت منجر به ایجاد ترک‌های زمینه‌ی در مناطق مختلف خواهد شد. بدیهی است که نحوه و نواحی رشد ترک می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار خرابی سلول واحد بگذارد.

در گراف‌های شکل (۱۰) به بررسی تأثیر تغییرات انرژی شکست در جهت محوری و برشی بر رفتار خرابی در بازه‌های بزرگتر پرداخته شده است. همانند قسمت سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰، مشاهده می‌گردد که حتی تغییرات

۳-۲-۴- مقایسه نتایج ضریب حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰

درصد با یکدیگر

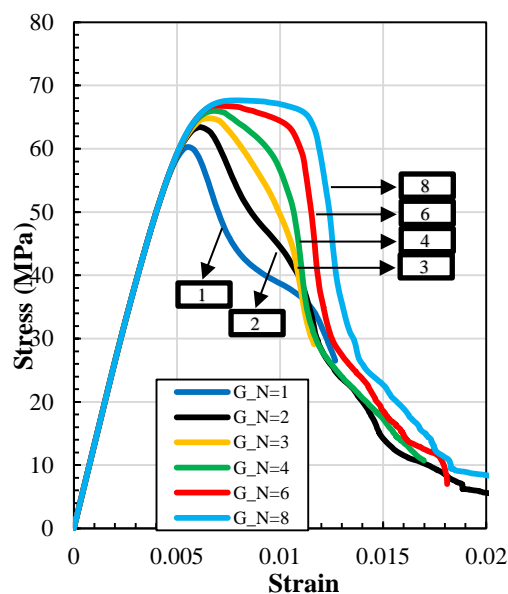
همانگونه که در بخشهای قبلی مشاهده گردید، تغییر در انرژی شکست در جهت محوری و برشی بر رفتار خرابی المان حجمی مواد مرکب تأثیر گذار می‌باشد. در این بخش به مقایسه میزان این تأثیر گذاری در دو سلول واحد با ضریب حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ درصد پرداخته شده است.

میزان تغییرات ماکزیمم مقاومت سلول واحد سلول واحد برای تمامی مقادیر انرژی شکستها در جهت محوری و برشی در شکل (۱۱-الف) ملاحظه می‌گردد، برای مقادیر کمتر انرژی شکستها در جهت محوری (G_{nc})، میزان ماکزیمم مقاومت سلول واحد برابر با ماکزیمم مقاومت المان چسبناک برای شروع خرابی (S_n) در جهت محوری می‌باشد. این در حالی است که در هر دو سلول واحد با ضریب حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ درصد ماکزیمم مقاومت سلول واحد با افزایش مقدار انرژی شکست افزایش می‌یابد. در ابتدا این افزایشها برای هر دو نوع المانهای حجمی نمونه تقریباً منطبق بر هم می‌باشد. در حالی که در برای مقادیر بالاتر انرژی شکستها در جهت محوری (G_{nc})، مقدار ماکزیمم مقاومت سلول واحد برای ضریب حجمی الیاف ۲۰ درصد بسیار بیشتر از ضریب حجمی الیاف ۴۰ درصد خواهد بود. این تفاوت رفتاری به این دلیل است که در سلول واحد با ضریب حجمی الیاف ۲۰ درصد دو مود خرابی جدایش الیاف از زمینه و ترک زمینه به صورت مجزا ایجاد می‌شوند (ترک زمینه در کرنش بالاتری شروع خواهد شد) و سلول واحد تا رشد و کامل شدن جدایش الیاف از زمینه درون سلول واحد هیچ ترک زمینه را به خود نخواهد دید. این امر در حالی است که در سلول واحد با ضریب حجمی الیاف ۴۰ درصد، دو مود خرابی جدایش الیاف از زمینه و ترک زمینه به صورت کوپل در سلول واحد ایجاد می‌شوند. همین وجود ترکهای زمینه‌ای باعث افت ماکزیمم مقاومت سلول واحد در مقادیر بالاتر انرژی شکست در جهت محوری (G_{nc}) خواهد شد.

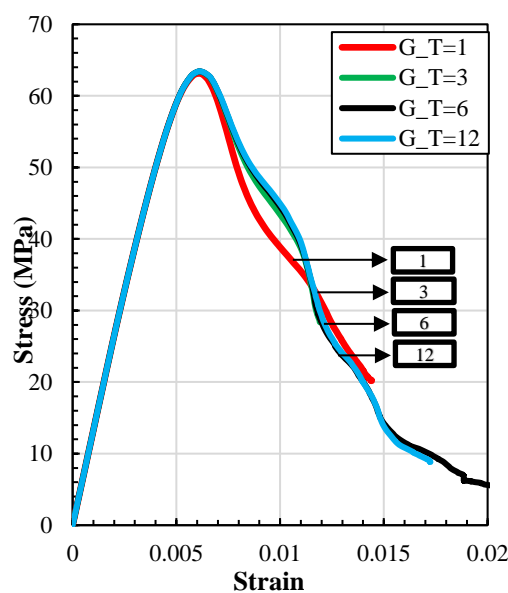
رفتار المانهای حجمی نمونه با تغییر در انرژی شکست در جهت برشی (G_{tc}) متفاوت از حالت محوری (G_{nc}) خواهد بود (شکل ۱۱-ب). در این حالت مشاهده می‌گردد که با مقادیر پایین برای انرژی شکست در جهت برشی (G_{tc}) میزان ماکزیمم مقاومت شکست سلول واحد با ضریب

از G_{nc} 1×10^{-3} تا 8×10^{-3} شروع خرابی در دامنه کرنشهای 10×10^{-3} تا 14×10^{-3} رخ خواهد داد. این امر در حالی است که با افزایش مقادیر G_{tc} از 10^{-3} تا 12×10^{-3} بیشترین مقاومت سلول واحد ثابت مانده است.

همچنین افزایش مقادیر G_{nc} می‌تواند کرنش شروع خرابی ترک زمینه را کمی به تاخیر انداخته و سلول واحد در کرنش بالاتری دچار ترک زمینه‌ای شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: تأثیر پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۴۰

المانهای حجمی نمونه با درصد حجمی الیاف بالاتر خصوصیات ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد تأثیر بیشتری داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد مواد مرکب با ضریب حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ درصد پرداخته شده است. نتایج بدست آمده را میتوان به اختصار به صورت زیر بیان نمود:

۱- اندازه مناسب شبکه المان بندی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که نتایج تحلیل های المانهای حجمی نمونه با درصد حجمی الیاف بالاتر نسبت به اندازه المانها حساسیت بیشتری داشته و لذا می بایست اندازه شبکه المان در این المانهای حجمی نمونه کوچکتر باشد.

۲- بنابر نتایج به دست آمده اندازه شبکه المان بندی برای سلول واحد با درصد حجمی الیاف ۲۰ و ۴۰ می بایست به ترتیب کوچکتر از ۰/۱ و ۰/۰۶ قطر الیاف باشد.

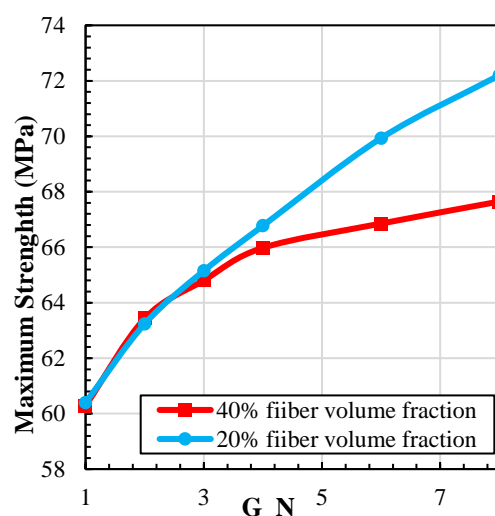
۳- در بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف ناحیه چسبناک بر روی رفتار خرابی سلول واحد، نشان داده شد که پارامترهای محوری تأثیر بیشتری بر رفتار خرابی نسبت به برشی در بارگذاری مفروض داشته و بیشترین تأثیرگذاری را متغیر ماکزیمم مقاومت خرابی در جهت محوری از خود نشان داد.

۴- نتایج بدست آمده بیان می دارد که تغییر در متغیرهایی همچون مقاومت نهایی و انرژی شکست در جهت برشی و همینطور متغیر توانی مود ترکیبی B-K (η) تأثیر چندانی در رفتار خرابی سلول واحد در بارگذاری مد نظر نخواهد داشت.

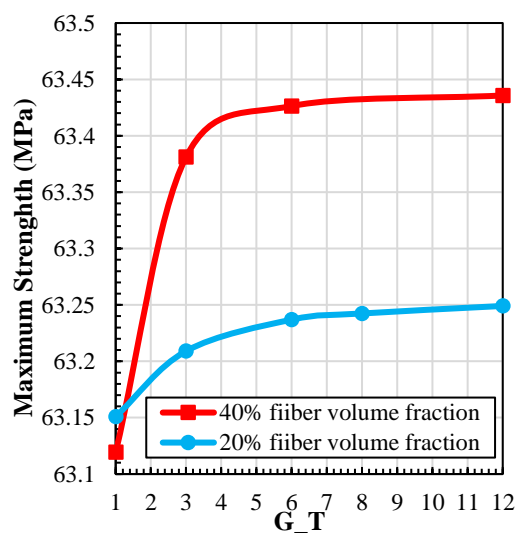
۵- تأثیر مقدار انرژی شکست بر روی رفتار خرابی سلول واحد مورد بحث و بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که مقدار انرژی شکست در جهت محوری می تواند بیشترین تأثیر را بر روی ماکزیمم مقاومت سلول واحد که قبل از شروع ترک زمینه ایجاد می گردد اعمال نماید. در حالی که میزان تغییر ماکزیمم مقاومت در المان حجمی با ۴۰ درصد حجمی الیاف نسبت به میزان انرژی شکست در جهت برشی (G_{TC}) بسیار حساس تر می باشد.

نتایج بدست آمده می تواند شناخت و برآورد مناسبی از رفتار خرابی مواد مرکب ارائه داده و در طراحی سازه ها به خصوص سازه های هوافضایی بکار برده شود.

حجمی الیاف ۴۰ درصد کمتر از ۲۰ درصد می باشد. بر خلاف (G_{nc})، با افزایش میزان انرژی شکست در جهت برشی (G_{TC}) ماکزیمم مقدار مقاومت در المان حجمی با ضریب حجمی الیاف ۴۰ درصد بسیار بیشتر از ۲۰ درصد خواهد شد. این پدیده را می توان چنین توجیه نمود که با توجه به نوع بارگذاری روی سلول واحد و همانگونه که در بخش های قبلی نیز مورد بحث قرار گرفت، خصوصیات ناحیه چسبناک در جهت محوری بسیار تأثیر بیشتری نسبت به خصوصیات برشی دارد (شکل ۱۱).



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: بررسی تأثیر تغییرات انرژی شکست در جهت محوری و برشی بر ماکزیمم مقاومت سلول واحد

از سوی دیگر، هرچه میزان ضریب حجمی الیاف درون سلول واحد بالاتر باشد الیاف تأثیر بیشتری بر رفتار یکدیگر داشته و جریان تنش بیشتر از حالت محوری به حالت ترکیبی در خواهد آمد. این امر باعث خواهد شد که در

۶- مراجع

- [۱] محمود مهرداد شکریه، زهرا شکریه و مهرداد داورپناه، "بررسی تحلیلی، عددی و تجربی سازه‌ای با صفحات تاشده کامپوزیتی" نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۱-۱۵.
- [۲] محمدرضا روح پرور و حسن حاجی کاظمی، "کاربرد مصالح FRP در بادبندهای کمانش ناپذیر"، نشریه مدل سازی در مهندسی دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۲۵-۲۳۵.
- [۳] محمود مهرداد شکریه و افشین زین الدینی، "مدل سازی چقرمگی شکست تورق مود ترکیبی I و II در نمونه یکسرگردار دو لبه نامتقارن کامپوزیت‌های لایه‌ای" نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱-۱۱.
- [4] T. Vaughan and C. McCarthy, "Micromechanical modelling of the transverse damage behaviour in fibre reinforced composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 71, No. 3, pp. 388-396, 2011.
- [5] C. González and J. LLorca, "Mechanical behavior of unidirectional fiber-reinforced polymers under transverse compression: microscopic mechanisms and modeling", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 13, pp. 2795-2806, 2007.
- [6] E. Totry, C. González, and J. LLorca, "Failure locus of fiber-reinforced composites under transverse compression and out-of-plane shear", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 829-839, 2008.
- [7] T. Guillén-Hernández, I. G. Garcia, J. Reinoso, and M. Paggi, "A micromechanical analysis of inter-fiber failure in long reinforced composites based on the phase field approach of fracture combined with the cohesive zone model", *International Journal of Fracture*, pp. 1-23, 2019.
- [8] E. Carrera, I. Kaleel, and M. Petrolo, "Numerical Simulation Of Failure in Fiber Reinforced Composites ", (2019).
- [9] T. Hobbiebrunken, M. Hojo, T. Adachi, C. De Jong, and B. Fiedler, "Evaluation of interfacial strength in CF/epoxies using FEM and in-situ experiments", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 12, pp. 2248-2256, 2006.
- [10] T. Vaughan and C. McCarthy, "A combined experimental–numerical approach for generating statistically equivalent fibre distributions for high strength laminated composite materials", *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 2, pp. 291-297, 2010.
- [11] Y. Ismail, D. Yang, and J. Ye, "Discrete element method for generating random fibre distributions in micromechanical models of fibre reinforced composite laminates", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 90, pp. 485-492, 2016.
- [12] D. Trias, J. Costa, A. Turon, and J. Hurtado, "Determination of the critical size of a statistical representative volume element (SRVE) for carbon reinforced polymers", *Acta materialia*, Vol. 54, No. 13, pp. 3471-3484, 2006.
- [13] L. Yang, Y. Yan, Z. Ran, and Y. Liu, "A new method for generating random fibre distributions for fibre reinforced composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 76, pp. 14-20, 2013.
- [14] A. Melro, P. Camanho, and S. Pinho, "Generation of random distribution of fibres in long-fibre reinforced composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2092-2102, 2008.
- [15] A. R. d. O. S. Melro, "Analytical and numerical modelling of damage and fracture of advanced composites", 2011.
- [16] L. Yang, Zh. W, Y. Cao, and Y. Yan, "Micromechanical modelling and simulation of unidirectional fibre-reinforced composite under shear loading", *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34.1 (2015): 72-83.
- [17] B. Fiedler, M. Hojo, S. Ochiai, K. Schulte, and M. Ando, "Failure behavior of an epoxy matrix under different kinds of static loading", *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 11, pp. 1615-1624, 2001.
- [18] G. Han, Zh. Guan, X. Li, W. Zhang, and Sh. D, "Microscopic progressive damage simulation of unidirectional composite based on the elastic–plastic theory", *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34.3 (2015): 232-247.
- [19] E. Reedy Jr, F. Mello, and T. Guess, "Modeling the initiation and growth of delaminations in composite structures", *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 812-831, 1997.

- [20] A. Turon, P. P. Camanho, J. Costa, and C. Dávila, "A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading", *Mechanics of materials*, Vol. 38, No. 11, pp. 1072-1089, 2006.
- [21] C. G. Dávila, C. A. Rose, and P. P. Camanho, "A procedure for superposing linear cohesive laws to represent multiple damage mechanisms in the fracture of composites", *International Journal of Fracture*, Vol. 158, No. 2, pp. 211-223, 2009.
- [22] S. Swaminathan, N. Pagano, and S. Ghosh, "Analysis of interfacial debonding in three-dimensional composite microstructures", 2006.
- [23] S. Li and S. Ghosh, "Debonding in composite microstructures with morphological variations," *International Journal of computational methods*, Vol. 1, No. 01, pp. 121-149, 2004.
- [24] N. Chandra, H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, "Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 10, pp. 2827-2855, 2002.
- [25] A. Abaqus, "Standard user's manual", ABAQUS Inc, 2003.
- [26] Z. Xia, Y. Zhang, and F. Ellyin, "A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 8, pp. 1907-1921, 2003.
- [27] V.-D. Nguyen, E. Béchet, C. Geuzaine, and L. Noels, "Imposing periodic boundary condition on arbitrary meshes by polynomial interpolation", *Computational Materials Science*, Vol. 55, pp. 390-406, 2012.
- [28] E. J. Barbero, "Finite element analysis of composite materials using ANSYS. CRC press", 2013.
- [29] M. Palizvan, M. H. Sadr, and M. Tahaye Abadi. "Effect of interface properties on micromechanical damage behavior of fiber reinforced composites", *Materials Today Communications*, Vol. 23, pp. 100856, 2020.