

## مدل سازی تخریب پیش رونده صفحات کامپوزیتی شیشه – اپوکسی تحت بار کششی استاتیکی در دمای پایین

محمد امین ترابی زاده<sup>۱</sup>، محمود مهرداد شکریه<sup>۲\*</sup>، عبدالحسین فریدون<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۸ پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۹	
<b>واژگان کلیدی:</b> تخریب پیشرونده، کامپوزیت پلیمری، دمای پایین، بارگذاری کششی، تحلیل المان محدود.	<p>به دلیل کاربرد وسیع کامپوزیت‌ها در دماهای پایین، رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف شیشه در این دما می‌بایستی به خوبی شناخته شود. بررسی آزمایشگاهی و یا عددی صفحات شبه همسان‌گرد که می‌تواند دارای اثر تمرکز تنش نیز باشد تاکنون کمتر مورد توجه واقع گردیده است. در این تحقیق مدلی جهت پیش بینی تخریب پیش رونده صفحات شبه همسان‌گرد در دمای اتاق و <math>60^{\circ}\text{C}</math> ارائه شده است. در این مدل از معیار تخریب Hashin که دقت روش‌های درجه دوم و قابلیت تشخیص شکل مود شکست روش تنش حداکثر را بصورت همزمان داراست استفاده شده است. نوع لایه چینی صفحه شبه همسان‌گرد <math>[0/\pm 45/90]</math> با اثر تمرکز تنش انتخاب شده است. با کمک مجموعه آزمایشات انجام شده توسط نویسندگان این تحقیق، خواص اولیه لایه تک جهته در دمای <math>60^{\circ}\text{C}</math> اندازه‌گیری و به عنوان ورودی به مدل داده شده است. بارگذاری استاتیکی به تدریج اعمال شده و در هر مرحله میدان تنش (شامل تنش‌های مکانیکی و حرارتی) در نقاط انتگرالی المان‌ها محاسبه و معیارهای تخریب جهت تشخیص احتمالی تخریب لایه در المان‌ها اعمال می‌گردد. خواص مکانیکی لایه‌های تخریب شده با توجه به شکل مد تخریب و با استفاده از قوانین کاهش خواص مکانیکی تغییر داده می‌شود. در صورت وجود تخریب، از روش بهبود یافته نیوتن رافسون جهت دستیابی به همگرایی استفاده می‌گردد. افزایش بار تا رسیدن به تخریب کامل صفحه ادامه پیدا می‌نماید. نتایج مدل ارائه شده ضمن نشان دادن اثر دمای پایین روی استحکام صفحات کامپوزیتی شبه همسان‌گرد، با مقادیر آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی دارد.</p>

### ۱- مقدمه

می‌گیرند. هواپیماها، موشک‌ها، مخازن دریایی، لوله‌ها و مخازن تحت فشار از جمله مهمترین کاربردهای این گونه مواد می‌باشند. خصوصیات چگون نسبت استحکام به وزن و سفتی به وزن بالا، مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی سطوح قطعات، هدایت حرارتی پایین، داشتن طول عمر بالا سازه، صرف هزینه کمتر در تولید و نیز سرعت تولید

کامپوزیت‌های پایه پلیمری (PMC) اغلب به عنوان ماده اولیه در ساخت سازه‌های فضایی مورد استفاده قرار

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shokrieh@iust.ac.ir

۱. استادیار، دانشگاه جامع علمی-کاربردی

۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

بالتر از ویژگی‌های منحصر بفرد این مواد است که آن‌ها را از سایر مواد معمول و رایج متمایز می‌سازد. امروزه کاربرد مواد کامپوزیتی پلیمری در سازه‌هایی که در شرایط کاری تحت دماهای پایین واقع می‌شوند گسترش یافته است. به عنوان مثال بدنه هواپیما حین پرواز در ارتفاعات بالا در معرض دمایی در حدود  $60^{\circ}\text{C}$  - قرار دارد؛ ماهواره‌ها و یا مخازن سوخت فضا پیماها نیز در شرایط کاری در معرض دمایی در حدود  $150^{\circ}\text{C}$  - واقع می‌گردند. قرار گرفتن ماده در چنین شرایطی می‌تواند منجر به ایجاد ترک و نهایتاً تورق کامپوزیت گردد. وقتی تنش‌های حرارتی با تنش‌های مکانیکی ناشی از بارهای مکانیکی ترکیب می‌گردد، ممکن است ترک‌های ریز، در بارهای کمتر از مقاومت نهایی تسلیم ماده کامپوزیتی ایجاد شود. لذا بررسی و شناخت رفتار مواد کامپوزیت در شرایط محیطی سرد به منظور انجام طراحی و ساخت با قابلیت اطمینان بالا بسیار حائز اهمیت و الزامی به نظر می‌رسد.

مطالعاتی در حوزه شناخت رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها در دماهای پایین توسط برخی محققان صورت پذیرفته است. Kim و همکارانش [۱] رفتار کششی کامپوزیت‌های کربن/ اپوکسی در دماهای  $50^{\circ}\text{C}$  -،  $100^{\circ}\text{C}$  - تحت بارهای مکانیکی - حرارتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. Saez و همکارانش [۲] با انجام آزمایشات کشش و خمش روی صفحات چند لایه کامپوزیتی تحت بارهای مکانیکی در دماهای پایین توانستند خصوصیات مکانیکی صفحات، نظیر مقاومت مکانیکی و کرنش شکست نمونه را بدست آورند. آن‌ها دریافتند که با کاهش دما مقاومت ماده کاهش و سفتی آن افزایش می‌یابد مطالعات متعددی توسط Shindo و همکارانش [۳-۹] صورت گرفته است. در ذیل به مهمترین نتایج آن‌ها اشاره می‌شود. در مقالات [۴ و ۸] پاسخ ترموالاستیک صفحات کامپوزیتی مختلف در دماهای پایین بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج با حل المان محدود مطابقت خوبی داشت. کاهش مقاومت مکانیکی ماده به ازای کاهش دمای محیط دیده شد. در تحقیق [۹] اثر تغییر شرایط مرزی قطعه

روی پاسخ کامپوزیت شیشه / اپوکسی در دماهای پایین تحت بارهای فشاری بررسی شد. نویسندگان فوق همچنین در مطالعاتی دیگر [۳ و ۵] رفتار کششی صفحات کامپوزیتی مختلف را تحت بار خستگی مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با توجه به نمودار S-N بدست آمده مشاهده کردند که طول عمر ماده و مدول الاستیک آن در دماهای پایین در مقایسه با دمای معمولی کاهش یافته است. Kim و Kang [۱۰] به بررسی خصوصیات اتصالات آلومینیوم-کامپوزیت در دماهای پایین پرداخت. او نتایج خود را با نتایج حاصل از حل المان محدود نیز مقایسه نمود. Ibekwe و دستیارانش [۱۱] به بررسی رفتار تیرهای کامپوزیتی چند لایه در برابر بارهای ضربه در محیط سرد پرداختند. آن‌ها آزمایشات خود را روی دو نمونه کامپوزیت صلیبی و تک لایه در دماهای  $10^{\circ}\text{C}$  -،  $20^{\circ}\text{C}$  - انجام دادند. نتایج آن‌ها حاکی از نقش بسیار مهم دما در پاسخ تیر به بار ضربه بود. مطالعاتی نیز در زمینه تحلیل تخریب پیش رونده صفحات کامپوزیتی در دماهای پایین تحت بارهای مختلف موجود می‌باشد. Shindo و همکارانش [۱۲] به بررسی تخریب پیش رونده صفحات کامپوزیت تحت بار کششی در دمای پایین پرداخته است. آن‌ها بار نهایی شکست را توسط روش تخریب پیش رونده پیش بینی نموده و با نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها مقایسه نمودند. در این تحقیق از معیار حداکثر کرنش برای تحقیق بار شکست استفاده شده است. هم چنین Zhao [۱۳] به بررسی تخریب پیش رونده کامپوزیت‌ها با استفاده از تسلیم Tsai-Wu [۱۴] و Hoffman [۲۰] و تنش حداکثر پرداخته اند. با این روش، اولین بار برای شروع تخریب ماده، بار نهایی تخریب، محل و شکل مد شکست قابل پیش بینی می‌باشد. مطالعه Liu و Wang [۱۵] پیرامون تخریب پیش رونده قطعات اصلاح شده کامپوزیتی با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار ANSYS و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی است. آن‌ها مطابقت خوبی بین نتایج خود ملاحظه نمودند. Akhras و Li [۱۶] نیز

شده و در هر مرحله میدان تنش (شامل تنش‌های مکانیکی و حرارتی) در نقاط انتگرالی المان‌ها محاسبه و معیارهای تخریب جهت تشخیص احتمالی تخریب لایه در المان‌ها اعمال می‌گردد. خواص مکانیکی لایه‌های تخریب شده با توجه به شکل مود آن و با استفاده از قوانین کاهش خواص مکانیکی تغییر داده می‌شود. از روش بهبود یافته نیوتن رافسون جهت دستیابی به همگرایی حل غیر خطی معادلات تعادل (در صورت وجود تخریب) استفاده می‌گردد. افزایش بار تا رسیدن به تخریب کامل صفحه ادامه پیدا می‌نماید. جهت بررسی صحت مدل‌سازی، نتایج بدست آمده از این روش با آنچه از آزمایش‌های صورت پذیرفته روی صفحات شبه همسان‌گرد حاصل گردیده مقایسه می‌شوند.

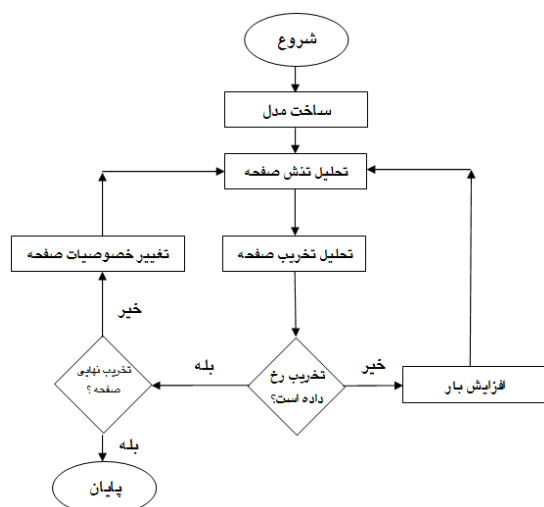
## ۲- روش تخریب پیش رونده

ایده اصلی مدل تخریب پیش رونده صفحات کامپوزیتی تحت بار استاتیکی نخست توسط Chou و همکارانش [۲۱] و Agarwal و Broutman [۲۲] ارائه گردید. اما در مدل ارائه شده توسط آن‌ها پس از تشخیص تخریب در لایه‌ای از ماده، ملزم به حذف کامل کلیه خصوصیات لایه در ماده بودند که روشی بسیار محافظه کارانه و سنتی است که بار نهایی تخریب بسیار کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش بینی می‌نماید. ایده جدید در تکمیل این مدل به منظور تشخیص شکل مدهای مختلف شکست در جهت ماتریس و الیاف بوسیله معیارهای تخریب مجزا توسط Hashin ارائه گردید. این مدل توسط مولفان مختلف در روش تخریب پیش رونده در تحلیل دو بعدی [۲۴-۲۶] و سه بعدی [۱۹ و ۲۷] در بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این مدل در بارگذاری‌های خستگی کششی، دینامیکی با نرخ بارگذاری متفاوت و شرایط محیطی مختلفی از قبیل رطوبت و ... مورد بررسی قرار گرفته است. راهکار کلی

صفحات ضخیم کامپوزیتی را با استفاده از روش تخریب پیش رونده تحلیل نمودند که بار اولیه و بار نهایی تسلیم در این صفحات را بدست آوردند. Karakuzu و Icten [۱۷] نیز در تحقیقی به بررسی تخریب تدریجی صفحات کامپوزیتی بافته شده با تقویت کننده کربن که دارای تمرکز تنش بود پرداختند. آن‌ها از معیارهای تسلیم Hashin و Hoffman [۲۳] در این باره استفاده کردند و نشان دادند که مقاومت لهیدگی صفحات با تغییر پارامترهای هندسی افزایش می‌یابد. شکرپه و سایر همکارانش [۱۸] به بررسی تخریب صفحات کامپوزیتی بدون تمرکز تنش با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌ای و نیز روش تخریب پیش رونده پرداختند. آن‌ها میان نتایج عددی و آزمایشگاهی خود مطابقت خوبی ملاحظه کردند. شکرپه [۱۹] نیز تخریب صفحه کامپوزیتی کربنی را با استفاده از روش تخریب پیش رونده تحت بارگذاری خستگی تحلیل و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمود. همانطور که پیشتر نیز بدان اشاره شد، با توجه به تغییر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها در دماهای پایین و نیز گسترش دامنه کاربرد آن‌ها در چنین شرایط محیطی در صنایع نظامی و هوافضا، داشتن آگاهی از عملکرد مواد کامپوزیت در شرایط دمایی پایین بسیار ضروری و مهم جلوه می‌کند که این امر توسط گروهی از محققان صورت پذیرفته است. اما استفاده از روش تخریب پیش رونده در تحلیل مواد کامپوزیت در دماهای پایین کمتر مورد توجه واقع شده است. لذا در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار کششی صفحات شبه همسان‌گرد در دمای پایین با استفاده از روش تخریب پیش رونده که دارای اثر تمرکز تنش نیز می‌باشند پرداخته شده است. در این مقاله به ارائه الگوریتمی جهت پیش بینی استحکام صفحات کامپوزیتی در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  با استفاده از روش تخریب پیش رونده پرداخته شده است. خواص اولیه لایه تک جهته در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  که به عنوان ورودی مدل استفاده می‌شود، توسط مجموعه آزمایش‌هایی اندازه‌گیری شده است. بارگذاری استاتیکی به تدریج به صفحه اعمال

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ماتریس  $[T]$  ماتریس انتقال برای یک صفحه زاویه دار است [۳۱]. با توجه به ضخامت کم صفحه در راستای z، کرنش‌های ایجاد شده در این جهت ناچیز و قابل صرف‌نظر بوده و لذا مدل بدون در نظر گرفتن تنش‌های بین لایه‌ای و به صورت تنش صفحه‌ای (دو بعدی) تحلیل شده است.



شکل ۱- الگوریتم مدل تخریب پیش رونده جهت تحلیل استاتیکی

بنابراین المان انتخابی از نوع پوسته لایه‌ای است (Shell99) که قابلیت تحلیل پوسته‌های چند لایه کامپوزیتی تا حداکثر ۲۵۰ لایه را داراست و دارای شش درجه آزادی روی هر نقطه بوده و می‌توان در آن براحتی زاویه، جنس و ضخامت هر لایه را به منظور تحلیل هر نوع صفحه کامپوزیتی تغییر داد. این نوع المان قابلیت محاسبه میدان تنش، کرنش، سطح انرژی و بسیاری از پارامترهای دیگر را در کلیه لایه‌های تعریف شده خود داراست. در تحقیق پیشرو، صفحه با تمرکز تنش مدل‌سازی شده است. خواص مکانیکی لایه تک جهته در دمای  $23^\circ\text{C}$  و  $60^\circ\text{C}$  که از نتایج آزمایش نویسندگان بدست آمده است، به عنوان ورودی مدل در جدول ۱ آورده شده است.

مدل‌سازی شامل تحلیل تنش صفحه، بررسی معیارهای مختلف تخریب و نهایتاً تغییر خصوصیات لایه‌های تخریب شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### ۳- تحلیل تنش صفحه

اولین گام اساسی مدل، تحلیل تنش صفحه تحت بار استاتیکی می‌باشد. این امر با در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی ناشی از کاهش دما و استفاده از روش المان محدود صورت می‌گیرد. جهت تحقق این امر از بسته نرم‌افزار المان محدود ANSYS [۲۸] و ایجاد یک کد ماکرو بهره برده شده است.

تنش‌های اعمالی بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\sigma_{Total} = \sigma_M + \sigma_T \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $\sigma_M$  و  $\sigma_T$  بترتیب تنش‌های مکانیکی و حرارتی می‌باشند. تنش‌های حرارتی ناشی از کاهش دمای کامپوزیت از دمای اتاق به دمای  $60^\circ\text{C}$  ایجاد می‌شود و بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_T = \begin{Bmatrix} \sigma_x^T \\ \sigma_y^T \\ \sigma_{xy}^T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{Bmatrix} \quad (2)$$

در رابطه فوق ماتریس ضرایب  $[\bar{Q}_{ij}]$  ماتریس سفتی کاهش یافته جهت یک صفحه کامپوزیتی و  $\{\varepsilon_{ij}^T\}$  بردار کرنش حرارتی است که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

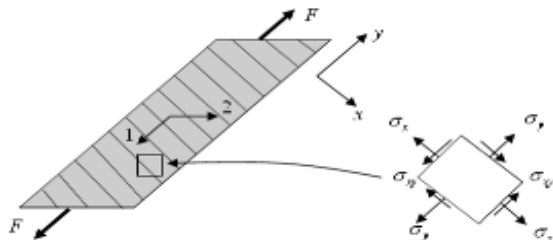
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{Bmatrix} = \Delta T \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

که در آن  $\Delta T$  و  $\{\alpha_{ij}\}$  به ترتیب تغییر دمای صفحه از دمای اتاق و ضرایب انبساط حرارتی جهت صفحه زاویه دار است که بر حسب ضرایب انبساط حرارتی صفحه تک جهته بصورت زیر بیان می‌شود:

نتایج بدست آمده در تک تک المان‌های هر لایه از صفحه کامپوزیتی جهت استفاده در مراحل بعدی ذخیره سازی می‌شود.

#### ۴- تحلیل تخریب صفحه

در این بخش دومین گام اساسی مدل، یعنی بررسی تخریب احتمالی با استفاده از معیار تخریب Hashin [۲۳] بیان خواهد شد. این معیار تخریب ضمن داشتن دقت محاسباتی بالا قابلیت تشخیص شکل مد تخریب در بارگذاری استاتیکی را نیز داراست. پنج شکل مختلف تخریب برای لایه تک جهته در بارگذاری استاتیکی در حالت تنش صفحه‌ای مطرح می‌گردد. تخریب الیاف در کشش و فشار، تخریب ماتریس در کشش و فشار و نهایتاً تخریب برشی صفحه‌ای الیاف و ماتریس شکل مدهای تخریب مفروض در این پژوهش می‌باشند. شکل ۳ میدان تنش بوجود آمده در کامپوزیت صفحه‌ای را تحت بار یکنواخت استاتیکی نمایش می‌دهد.

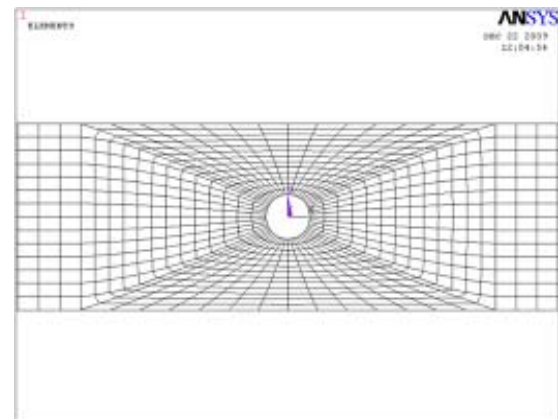


شکل ۳- میدان تنش بوجود آمده در کامپوزیت صفحه‌ای تحت شرایط بار یکنواخت کششی

در هر مرحله از بارگذاری، با استفاده از میدان تنش محاسبه شده از بخش قبل و بکارگیری معیار تخریب Hashin که روابط آن در جدول ۲ نشان داده شده است، تخریب در تک تک لایه‌های کلیه المان‌ها بررسی و نتایج آن جهت استفاده در مراحل بعدی ذخیره سازی می‌شود. در جدول ۲ در صورتی که ضریب تخریب در هر شکل مد بزرگتر یا مساوی یک باشد، تخریب اتفاق خواهد افتاد.

جدول ۱- نتایج آزمایشگاهی خواص مکانیکی لایه تک جهته در دمای  $23^{\circ}C$  و  $-60^{\circ}C$

دما		خواص مکانیکی
$-60^{\circ}C$	$23^{\circ}C$	
۲۸/۶۵	۲۳/۰۵	سفتی طولی کششی $E_x (GPa)$
۱۱/۰۳	۵/۸۳	سفتی عرضی کششی $E_y (GPa)$
۴/۲۱	۲/۱۱	سفتی برشی صفحه‌ای $E_{xy} (GPa)$
۷۸۴/۹۸	۷۰۰/۱۱	استحکام طولی کششی $X_t (MPa)$
۷۵/۲	۶۸/۸۵	استحکام عرضی کششی $Y_t (MPa)$
۷۳۱/۹۴	۵۷۰/۳۷	استحکام طولی فشاری $X_c (MPa)$
۱۸۶/۲۲	۱۲۲/۱۲	استحکام عرضی فشاری $Y_c (MPa)$
۹۱/۲۲	۶۸/۸۹	استحکام برشی صفحه‌ای $S (MPa)$
۰/۲	۰/۲	ضخامت تک لایه $t (mm)$



شکل ۲- مدل مش بندی شده صفحه شبه همسان گرد در محل تمرکز تنش

مدل بوجود آمده جهت تحلیل رفتار مکانیکی با استفاده از روش تخریب پیش رونده که دارای اثر تمرکز تنش می باشد در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل سازی، علاوه بر بار مکانیکی که مستقیماً به صفحه اعمال می شود، بار حرارتی ناشی از کاهش دمای محیط به  $-60^{\circ}C$  نیز به مدل اعمال می‌شود. به این منظور مدل دمای محیط کاری و دمای اولیه نمونه را جهت محاسبات میدان تنش حرارتی از کاربر به عنوان ورودی دریافت می‌کند. توجه به آنکه پیش بینی رفتار بر اساس مدل تخریب پیش رونده صورت می‌پذیرد، بار مکانیکی اعمالی از صفر به تدریج افزایش می‌یابد. در هر مرحله از بارگذاری، کلیه

به منظور تغییر خواص مکانیکی لایه تخریب شده از یک سری قوانین بخصوصی استفاده می‌شود که در هر شکل مد تخریب متفاوت است. قوانین تغییر خواص مکانیکی (سفتی، استحکام‌ها و ضریب پواسون) برای لایه تک جهته تخریب شده تحت بار استاتیکی در هر شکل مد تخریب در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود، تخریب لایه در اثر شکست الیاف در کشش و فشار شکل مد نهایی لایه محسوب می‌شود. بدین معنی که از آن پس لایه دیگر قادر به تحمل بار نخواهد بود. اما در خصوص سایر شکل مدها، لایه با وجود تخریب در یک راستا هنوز می‌تواند در سایر جهات بار اعمالی را تحمل نماید.

جدول ۳- قوانین کاهش خواص مکانیکی در شکل مدهای

مختلف تخریب لایه [۱۹]

خواص مکانیکی تغییر یافته	شکل مد تخریب لایه
$E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, \nu_{xy}, \nu_{yx} \rightarrow 0$	تخریب الیاف در کشش
$E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, \nu_{xy}, \nu_{yx} \rightarrow 0$	تخریب الیاف در فشار
$E_{yy}, \nu_{yx} \rightarrow 0$	تخریب ماتریس در کشش
$E_{yy}, \nu_{yx} \rightarrow 0$	تخریب ماتریس در فشار
$E_{xy}, \nu_{xy}, \nu_{yx} \rightarrow 0$	تخریب الیاف و ماتریس در برش صفحه ای

پس از تغییر خواص مکانیکی با روش فوق و تکرار آن برای تک تک لایه‌های المان‌های مدل، صفحه مجدداً بازسازی شده و تحلیل تنش با افزایش میزان بار اعمالی تکرار می‌گردد. این روند تا رسیدن به تخریب کامل صفحه ادامه پیدا می‌کند. جهت اجتناب از خطای عددی در حل مساله، خواص مکانیکی بجای صفر به مقادیر بسیار کوچکی کاهش می‌یابد. معیار توقف حل ایجاد ناپایداری ناگهانی (کاهش ناگهانی سطح تنش یا افزایش کرنش) در تحلیل مساله می‌باشد. لازم به ذکر است در صورت وجود تخریب در لایه‌ای از صفحه کامپوزیتی و بدلیل رفتار غیر خطی صفحه در این حالت، از روش حل عددی غیر خطی نیوتن رافسون جهت دستیابی به همگرایی در حل استفاده می‌شود.

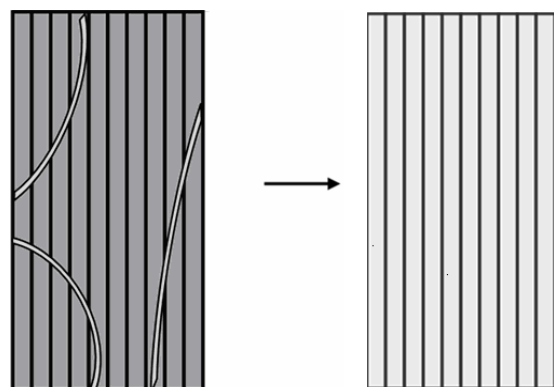
جدول ۲- روابط معیار تخریب Hashin در شکل مدهای

مختلف [۱۹]

شکل مد تخریب	شرط میدان تنش	رابطه تخریب
تخریب الیاف در کشش	$(\sigma_{xx} > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 = e_{F^+}^2$
تخریب الیاف در فشار	$(\sigma_{xx} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_c}\right)^2 = e_{F^-}^2$
تخریب ماتریس در کشش	$(\sigma_{yy} > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{yy}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 = e_{M^+}^2$
تخریب ماتریس در فشار	$(\sigma_{yy} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{yy}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 = e_{M^-}^2$
تخریب الیاف و ماتریس در برش صفحه ای	$(\sigma_{xx} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 = e_{FM}^2$

## ۵- کاهش خواص مکانیکی

در این بخش سومین گام اساسی جهت مدل‌سازی تخریب پیش رونده مورد بررسی واقع می‌شود. در روش تخریب پیش رونده پس از تشخیص وقوع تخریب در هر لایه از المان صفحه کامپوزیتی، به جای حذف کامل لایه از محاسبات آن المان از صفحه، لایه تخریب شده با لایه سالم اما با خصوصیات مکانیکی ضعیف‌تر جایگزین می‌گردد. شماتیک این مساله در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- جایگزینی لایه معیوب با لایه سالم با خصوصیات مکانیکی ضعیف‌تر

## ۷- نتایج

در این بخش، ضمن ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود صورت گرفته از صفحه شبه همسان‌گرد با اثر تمرکز تنش که درباره آن توضیح داده شد، نتایج آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه‌های کامپوزیتی نیز بیان می‌شوند. در ادامه جهت بررسی صحت روند مدل‌سازی المان محدود، میان نتایج حاصله مقایسه‌ای صورت خواهد پذیرفت. در هر مجموعه آزمایش‌های انجام شده در دمای اتاق و  $60^{\circ}\text{C}$  به ترتیب چهار و پنج نمونه مورد بررسی واقع گردیده است. همچنین صحت آزمایش‌های صورت گرفته توسط پارامترهای آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های ابعادی نمونه‌ها شامل طول موثر، عرض و ضخامت قطعه در سه مقطع متفاوت صورت پذیرفته تا نتایج بادقت و صحت بیشتری حاصل گردد.

اشکال ۶ و ۷ به ترتیب به مقایسه استحکام کششی صفحه شبه همسان‌گرد با اثر تمرکز تنش، در دمای اتاق و  $60^{\circ}\text{C}$  می‌پردازد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد بر اثر کاهش دما، استحکام نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این مساله مربوط به تغییر ساختار میکرومکانیک مواد کامپوزیت و ترد شدن آن‌ها تحت این شرایط می‌باشد. در هر شکل مقادیر میانگین و انحراف از معیار نیز جهت بررسی صحت نتایج آورده شده است. رفتار تنش- کرنش نمونه‌ها تا مادامی که تخریبی رخ نداده کاملاً خطی است، اما از زمانی که اولین تخریب اتفاق می‌افتد رفتار صفحه غیر خطی می‌باشد. لذا از این نقطه به بعد در هر مرحله از بارگذاری الگوریتم حل غیر خطی نیوتن رافسون جهت ایجاد همگرایی در حل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روال تا تخریب نهایی صفحه ادامه می‌یابد.

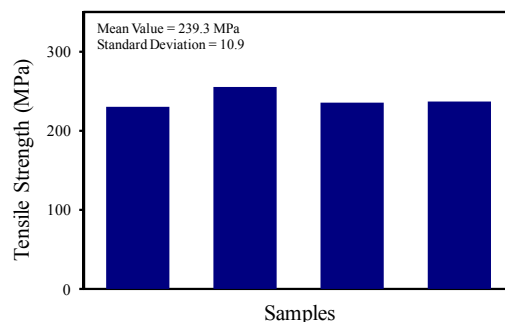


شکل ۵- شمای کلی تجهیزات مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها در دمای اتاق و  $60^{\circ}\text{C}$

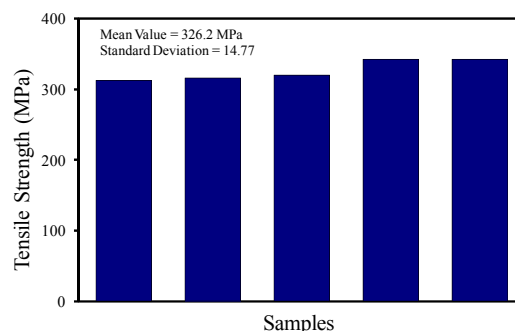
## ۶- روش ساخت نمونه ها و انجام آزمایش

نمونه‌ها از الیاف تک جهته شیشه، و رزین ML 506 ترکیب شده با سخت کننده HA11 در موسسه کامپوزیت ایران تهیه شده‌اند. روش لایه چینی دستی جهت تولید به کار برده شده است. به این ترتیب، صفحات بر اساس ترکیب مشخص، حدود ۸ ساعت در کوره با دمای  $80^{\circ}\text{C}$  تحت فشار  $100-150\text{ kPa}$  قرار می‌گیرند. نمونه‌ها مطابق ابعاد استاندارد از صفحات تولیدی برش و ماشینکاری می‌شود. آزمایش‌ها در دمای محیط و  $60^{\circ}\text{C}$  با استفاده از دستگاه INSTRON 5582 با محفظه برودتی مخصوص صورت پذیرفت. کامپیوتر متصل به ماشین، نیرو، جابجایی و کرنش را در هر لحظه ذخیره می‌نماید. کلیه آزمایش‌ها تحت کنترل جابجایی با نرخ ثابت  $2\text{ mm/min}$  صورت پذیرفت. برای انجام آزمایشات در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  لازم است محفظه‌ای به صورت همزمان حین انجام آزمایش دمای مورد نیاز را روی نمونه ایجاد نماید. بدین منظور از نیتروزن مایع بعنوان مبرد استفاده شده است. جهت هدایت نیتروزن مایع به داخل محفظه، از فشار گاز نیتروزن استفاده می‌شود. شمای کلی این سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است.

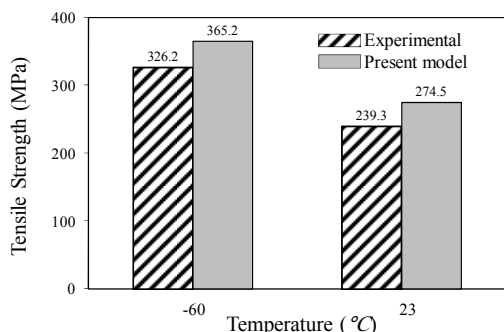
ناشی از کاهش دما در حل عددی، مقادیر خطای بوجود آمده در بازه ۶٪ تا ۱۵٪ محدود شده که این امر نشان‌دهنده بهبود مدل‌سازی در این تحقیق می‌باشد. شکل ۹ نیز به مقایسه نمونه های تخریب شده آزمایشگاهی در دمای اتاق و ۶۰°C- با آنچه در مدل المان محدود پیش‌بینی گردید می‌پردازد. همانگونه که در شکل نیز پیداست، نمونه‌های شبه همسان‌گرد در اثر کاهش دما دچار تخریب گسترده‌تری نسبت به دمای اتاق می‌گردند. در این شکل المان‌های تخریب شده بر اثر شکست ماتریس در کشش، شکست الیاف در کشش و برش میان الیاف و ماتریس به ترتیب با رنگ‌های صورتی، قرمز و آبی نشان داده شده است. نحوه توزیع المان‌های تخریب شده در مدل المان محدود تا حدود بسیار زیادی با نمونه‌های آزمایش شده مشابهت دارند. تفاوت‌های قابل مشاهده (که در محدوده قابل قبولی می‌باشند) می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد که به مهمترین آن‌ها قبلاً اشاره شده است.



شکل ۶- استحکام کششی صفحات شبه همسان‌گرد با تمرکز تنش در دمای اتاق



شکل ۷- استحکام کششی صفحات شبه همسان‌گرد با تمرکز تنش در دمای ۶۰°C-



شکل ۸- مقایسه استحکام صفحه شبه همسان‌گرد با اثر تمرکز تنش در دمای اتاق و ۶۰°C- حاصل از مدل‌سازی المان محدود و نتایج آزمایشگاهی

### ۸- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، مدلی جهت پیش‌بینی استحکام صفحات کامپوزیتی در دمای اتاق و ۶۰°C- بر اساس معیار Hashin و با استفاده از روش تخریب پیش رونده ارائه گردید. معیار تخریب به کار گرفته شده، دارای دقت بالا و

شکل ۸ نتایج مدل‌سازی المان محدود به روش تخریب پیش رونده را با آنچه که از آزمایشگاه بدست آمده مقایسه می‌نماید. نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی صفحه مقادیر کمتری نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نماید. وجود این اختلاف همانگونه تا حدودی قابل پیش‌بینی بود. به دلیل عدم امکان مدل‌سازی دقیق رفتار کامپوزیت در تخریب به روش المان محدود و با توجه به پیچیدگی پروسه تخریب صفحه خصوصاً در دمای پایین، پیش‌بینی بار تخریب کمتر از میزان واقعی آن که در آزمایش بدست آمده قابل قبول می‌باشد. در مرجع [۲۹] اختلاف بین نتایج المان محدود و آزمایشگاهی در دمای اتاق و دمای پایین به ترتیب ۲۳٪ و ۱۶٪ گزارش شده است. در مراجع [۳۰] و [۱۵] نیز مقادیر خطای قابل قبول بین نتایج آزمایشگاهی و عددی بین ۱۵٪ تا ۲۸٪ ذکر شده است. در مدل‌سازی صورت گرفته در این مقاله، با بکارگیری روش تخریب پیش رونده و در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی



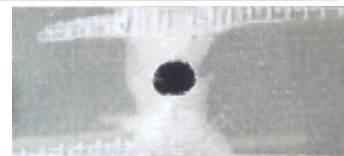
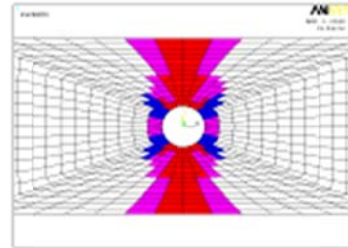
روش بهبود یافته نیوتن رافسون جهت دستیابی به همگرایی استفاده می‌گردد. افزایش بار تا رسیدن به تخریب کامل صفحه ادامه پیدا می‌نماید. معیار تخریب نهایی صفحه کاهش ناگهانی سطح تنش و یا ایجاد کرنش بزرگ در صفحه می‌باشد. آزمون استحکام صفحه شبه همسان‌گرد در دمای اتاق و  $-60^{\circ}\text{C}$  در آزمایشگاه جهت مقایسه نتایج و ارزیابی داده‌های مدل‌سازی صورت پذیرفت.

- نتایج بدست آمده از دو روش المان محدود و آزمایشگاهی بیانگر افزایش استحکام کششی و کاهش کرنش شکست صفحات شبه همسان‌گرد کامپوزیتی در دمای  $-60^{\circ}\text{C}$  نسبت به دمای اتاق می‌باشد. این واقعیت می‌تواند بر اثر تغییر خواص میکرومکانیک کامپوزیت در این شرایط محیطی باشد. در دمای پایین تنش‌های حرارتی ایجاد شده در الیاف ورزین عامل اصلی تغییر خواص مکانیکی آن‌ها در دمای پایین می‌باشد. تغییر خواص میکرومکانیک کامپوزیت‌ها، رفتار مکانیکی صفحات تک جهته را تحت تاثیر خود قرار داده (جدول ۱) و از آنجایی که صفحه تک جهته اساس ساختار سازه‌های کامپوزیتی است، منجر به تغییر خواص مکانیکی صفحات شبه همسان‌گرد در دمای پایین می‌شوند.

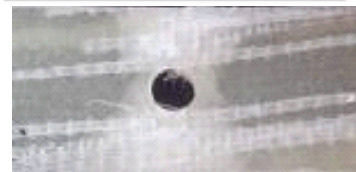
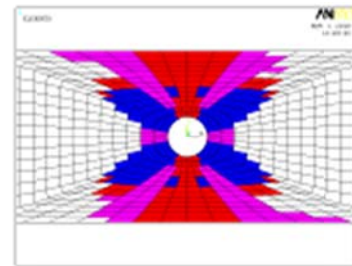
- مطابقت نسبتاً خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به روش تخریب پیش رونده جهت صفحه شبه همسان‌گرد دارای اثر تمرکز تنش در دمای اتاق و  $-60^{\circ}\text{C}$  مشاهده شد. در مدل‌سازی تخریب پیش رونده به روش المان محدود، میزان استحکام کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی گردیده است. این امر می‌تواند بدلیل پیچیدگی رفتار واقعی مکانیکی کامپوزیت‌ها خصوصاً در دماهای پایین و نیز عدم در نظر گرفتن تنش‌های بین لایه‌ای (فرض تنش صفحه‌ای) باشد.
- درصد خطای قابل قبول در مدل المان محدود نسبت به نتایج آزمایشگاهی در مراجع مختلف [۲۹-۳۰] بین ۱۵٪ تا ۲۸٪ ذکر شده است. با توجه به روش تخریب پیش رونده که جهت مدل‌سازی صفحه شبه همسان‌گرد

در عین حال قابلیت تشخیص شکل مود شکست می‌باشد. نوع لایه چینی صفحه شبه همسان‌گرد  $[0/\pm 45/90]$  با اثر تمرکز تنش انتخاب گردید.

(الف)



(ب)



شکل ۹- مقایسه شکل تخریب نمونه های شبه همسان‌گرد دارای اثر تمرکز تنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی در الف: دمای اتاق ب: دمای  $-60^{\circ}\text{C}$

با کمک مجموعه آزمایشات انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، خواص اولیه لایه تک جهته در دمای  $-60^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری و به عنوان ورودی به مدل داده شده است. بارگذاری استاتیکی (بارهای مکانیکی و حرارتی) به تدریج اعمال شده و در هر مرحله میدان تنش در نقاط انتگرالی المان‌ها محاسبه و معیارهای تخریب جهت تشخیص احتمالی تخریب لایه در المان‌های صفحه اعمال گردید. خواص مکانیکی لایه‌های تخریب شده با توجه به شکل مد تخریب و با استفاده از قوانین کاهش خواص مکانیکی تغییر داده می‌شود. در صورت وجود تخریب در صفحه از

در این تحقیق استفاده شده است، میزان اختلاف نتایج که نشان از بهبود مدل‌سازی به این روش می‌باشد. آزمایشگاهی و عددی به حدود ۶٪ تا ۱۵٪ کاهش یافته

## مراجع

- [1] Kim, M., Kang, S., Kim, C., Kong, C. (2007). "Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures", *Composite Structures*, 79(1), p. 84-89.
- [2] Sanchez-saez, S., Rio, G., Barbero, E., Zaera, R., Navarro, C. (2002). "Static behavior of CFRPs at low temperatures", *Composites*, 33, pp. 383-390.
- [3] Shindo, Y., Takano, S., Horiguchi, K., Sato, T. (2006). "Cryogenic fatigue behavior of plain weave glass/epoxy composite laminates under tension-tension cycling", *Cryogenics*, 46, pp. 749-798.
- [4] Takeda, T., Shindo, Y., Narita, F., Kumagai, S. (2002). "Thermoelastic analysis of cracked woven GFRP laminates at cryogenic temperatures", *Cryogenics*, 42, pp. 451-462.
- [5] Kumagai, S., Shindo, Y., Inamoto, A. (2005). "Tension-tension fatigue behavior of GFRP woven laminates at low temperatures", *Cryogenics*, 45, pp. 123-128.
- [6] Shindo, Y., Wang, R., Horiguchi, K. (2001). "Analytical and experimental studies of short-beam interlaminar shear strength of G-10CR glass-cloth/epoxy laminates at cryogenic temperatures", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123, pp. 112-118.
- [7] Shindo, Y., Takano, S., Narita, F., Horiguchi, K. (2006). "Tensile and damage behavior of plain weave glass/epoxy composites at cryogenic temperatures", *Fusion Engineering and Design*, 81, pp. 2479-2483.
- [8] Takeda, T., Shindo, Y., Narita, F. (2004). "Three-dimensional thermoelastic analysis of cracked plain weave glass/epoxy composites at cryogenic temperatures", *Composites Science and Technology*, 64, pp. 2353-2362.
- [9] Shindo, Y., Tokairin, H., Sanada, K., Horiguchi, K., Kudo, H. (1999). "Compression behavior of glass-cloth/epoxy laminates at cryogenic temperatures", *Cryogenics*, 39, pp. 821-827.
- [10] Kang, S. G., Kim, M., Kim, C. (2007). "Evaluation of cryogenic performance of adhesives using composite-aluminum double-lap joints", *Composite structures*, 78, pp. 440-446.
- [11] Ibekwe, S. I., Mensah, P. F., Li, G., Pang, S., Stubblefield, M. A. (2007). "Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures", *Composite Structures*, 79, pp. 12-17.
- [12] Takeda, T., Takano, S., Shindo, Y., Narita, F. (2005). "Deformation and progressive failure behavior of woven-fabric-reinforced glass/epoxy composite laminates under tensile loading at cryogenic temperatures", *Composite Science and Technology*, 65, pp. 1691-1702.
- [13] Zhao, Q., Hoa, S. V., Ouellette, P. (2004). "Progressive failure of triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes", *Composite Structures*, 65, pp. 419-431.
- [14] Tsai S. W., and Wu, E. M. (1971). "A general theory of strength for anisotropic materials", *Journal of composite materials*, 5, pp. 58-80.
- [15] Liu, X., and Wang, G. (2007). "Progressive failure analysis of bonded composite repairs", *Composite Structures*, 81, pp. 331-340.
- [16] Akhras, G., and Li, W. C. (2007). "Progressive failure analysis of thick composite plates using the spline finite strip method", *Composite Structures*, 79, pp. 34-43.
- [17] Icten, B. M., and Krarakuzu, R. (2002). "Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates", *Composite Science and Technology*, 62, pp. 1259-1271.
- [18] Shokrieh, M. M., Torabizadeh, M. A., Fereidoon, A. (2009). "Progressive failure analysis of composite plates", In *Proceeding, 8th Iranian aerospace society conference*, Esfahan, Iran.
- [19] Shokrieh, M. M. (1996). "Progressive fatigue damage modeling of composite materials", PhD Thesis, McGill University.

- [20] Hoffman, O. (1967). "The brittle strength of orthotropic materials", Journal of composite materials, 1(2), pp. 200-206.
- [21] Chou, S. C., Orringer O., Rainey, J. H. (1976). "Post failure behavior of laminates II- Stress concentration", Journal of composite materials, 11, pp. 71-78.
- [22] Agarwal, B. D., and Broutman, L. J. (1990). "Analysis and performance of fiber composites", second edition, John Wiley and sons, Inc.
- [23] Hashin, Z. (1980). "Failure criteria for unidirectional fiber composites", Journal of applied mechanics, 47, pp. 329-334.
- [24] Shokrieh, M. M. (1991). "Failure of laminated composites pinned connections", Master thesis, Department of mechanical engineering, McGill University, Montreal, Canada.
- [25] Lessard L. B., and Shokrieh, M. M. (1991). "Pinned joint failure mechanisms, Part I – Two dimensional modeling", CANCOM 91, Montreal, Canada.
- [26] Chang F. K., and Chang, K. Y. (1987). "Post failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out failure", Journal of composite materials, 21(9), pp. 809-833.
- [27] Shokrieh M. M., and Lessard, L. B. (1995). "Effects of material nonlinearity on the three-dimensional stress state of pin-loaded composite laminates", Journal of composite materials, 30(7), pp. 839-861.
- [28] ANSYS, Ver. 10. (2005). Canonsburg (PA): SAS IP.
- [29] Kim, R. Y., and Donaldson, S. L. (2006). "Experimental and analytical studies on the damage initiation in composite laminates at cryogenic temperatures", Composite Structures, 76, pp. 62-66.
- [30] Shindo, Y., Horiguchi, K., Wang, R., Kudo, H. (2001). "Double cantilever beam measurement and finite element analysis of cryogenic mode I interlaminar fracture toughness of glass-cloth/epoxy laminates", Journal of Engineering Materials and Technology, 123, pp. 191-197.
- [31] Kaw, A. K. (2006). Mechanics of composite materials, Taylor and Francis Group, LLC, ISBN: 978-0-8493-1343-1.

### فهرست علائم و اختصارات

مدول الاستیک در جهت الیاف در یک لایه	$E_x$
مدول الاستیک در جهت رزین در یک لایه	$E_y$
مدول الاستیک برشی در یک لایه	$E_{xy}$
استحکام کششی طولی در صفحه تک جهته	$X_t$
استحکام فشاری طولی در صفحه تک جهته	$X_c$
استحکام کششی عرضی در صفحه تک جهته	$Y_t$
استحکام فشاری عرضی در صفحه تک جهته	$Y_c$
استحکام برشی در صفحه تک جهته	$S$
مولفه تنش در راستای الیاف در هر لایه	$\sigma_x$
مولفه تنش در راستای رزین در هر لایه	$\sigma_y$
مولفه تنش برشی در هر لایه	$\sigma_{xy}$
ضریب پواسون در هر لایه	$\nu_{xy}$
ماتریس ضرایب	$[Q]$
بردار ضرایب انبساط حرارتی	$\{\alpha\}$
ماتریس انتقال	$[T]$
ضریب تخریب هر شکل مد	$e$

## PROGRESSIVE DAMAGE ANALYSIS OF GLASS-EPOXY LAMINATED COMPOSITES UNDER STATIC TENSILE LOADING AT LOW TEMPERATURE

M. A. Torabizadeh<sup>1</sup>, M. M. Shokrieh<sup>2,\*</sup>, A. Fereidoon<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, University of Applied Science and Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Solid Mechanics and Dynamics, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Mechanical Engineering Department, University of Semnan, Semnan, Iran

\*Corresponding Author: shokrieh@iust.ac.ir

---

### ARTICLE INFO

---

#### Keywords:

Progressive Damage,  
Polymeric Composite,  
Low Temperature,  
Tensile Loading,  
Finite Element  
Analysis.

---

### ABSTRACT

---

Because of wide applications of composites at low temperatures, mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy have to be assessed at low temperatures. Experimental or analytical investigation on the tensile failure behavior of glass/epoxy laminated composite with/or without stress concentration subjected to thermo-mechanical static loadings at low temperatures has not been done yet. In the present work, a finite element model was developed to perform the progressive failure analysis of quasi isotropic composite plates at room temperature and -60°C. In this model Hashin failure criteria was used to detect possible failures. Quasi-isotropic laminates with stress concentration was selected. Full characterization of UD composite at -60°C was performed by a set of experimental tests. These results were used as input data for finite element model. The load is increased step by step. For each given load, the stresses (mechanical and thermal) are evaluated and the appropriate failure criterion is applied to inspect for possible failure. For the failed element, material properties are modified according to the failure mode using a non-zero stiffness degradation factor. Then, the modified Newton-Raphson iteration is carried out until convergence is reached. This analysis is repeated for each load increment until the final failure occurs and the ultimate strength is determined. The present method yields results in a reasonable agreement with the experimental data at room temperature and -60 °C. The effect of low temperature on the failure mechanism of the plates was also determined.

---