

تحلیل چندمقیاسی آسیب پیش‌رونده در کامپوزیت‌های پایه پلیمری

احسان نعمان^۱، مسعود طهانی^۲

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

چکیده

فراگیری کامپوزیت‌ها در صنایع و کاربردهای گوناگون و به تبع آن ضرورت کاهش هزینه‌های طراحی محصول و همچنین افزایش توان محاسباتی کامپیوترها در دو دهه اخیر، منجر به شکل‌گیری روش‌های تحلیل چندمقیاسی با به‌کارگیری تئوری‌های میکرومکانیک و بررسی ریزساختار گردید. در این مقاله با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش تک‌لایه کامپوزیت در جهات اصلی، بارگذاری چندلایه‌های کامپوزیتی سالم و سوراخ‌دار مدل‌سازی شده و منحنی‌های تنش-کرنش آن‌ها پیش‌بینی شده‌اند. برای این کار روشی چندمقیاسی در زیرروال یومت نرم‌افزار آباکوس کدنویسی شده و از تئوری میکرومکانیک روش سلولی در آن استفاده گردیده‌است. منحنی‌های تنش-کرنش تک‌لایه دو ماده کامپوزیتی کربن/اپوکسی با نام‌های IM7/977-3 و HTA/6376 از مقالات استخراج شده و خواص الاستیک الیاف و ماتریس طی فرآیند محلی‌سازی، با استفاده از بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک در محیط جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب از آن‌ها استخراج گردید. همچنین روند رشد آسیب و استحکام شکست نهایی اجزا نیز از این منحنی‌ها به‌دست آمدند. سپس بارگذاری کششی و فشاری تعدادی نمونه چندلایه مدل‌سازی شد و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه گردید. در این مرحله استحکام نمونه‌ها مطابقتی نسبتاً خوب و مدول الاستیک آن‌ها تحت بارگذاری کششی مطابقت خیلی خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشت اما مدول فشاری بیش‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی شد. منشأ این عدم تطابق، در نظر نگرفتن وقوع ریزکمانش در لایه‌چینی‌های چندجهته پیش‌بینی شد که پس از اصلاح مدول، شبیه‌سازی با نمونه‌های قبلی و نمونه‌های جدید سوراخ‌دار تکرار گردید. نتایج به‌دست‌آمده از تکرار شبیه‌سازی، مطلوب ارزیابی شد و مدول‌های الاستیسیته و استحکام نمونه‌ها مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشتند.

واژه‌های کلیدی: آسیب پیش‌رونده - تحلیل چندمقیاسی - میکرومکانیک - روش سلولی - کامپوزیت.

مقدمه

گسترده‌ی کاربرد کامپوزیت‌ها و پیشرفت روزافزون در زمینه مواد اولیه و روش‌های ساخت، پیدایش تئوری‌ها و روش‌های تحلیل متنوع را در پی داشته‌است. محققان در پی دست‌یابی به دقت بیش‌تر در تحلیل مواد مرکب، با مشاهده تخریب تدریجی آن‌ها، رویکرد آسیب پیش‌رونده را به‌کار گرفتند. با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها، به‌منظور کاهش پیچیدگی تحلیل‌های پدیدارشناختی ماکرومکانیکی و کاهش هزینه آزمایش‌های اولیه، روش‌های مدل‌سازی چندمقیاسی رواج یافتند. روش‌های چندمقیاسی با بررسی ماده در سطوح مختلف ابعادی توانستند جزئیات بیش‌تری از آن‌چه در واقعیت رخ می‌دهد را به فضای شبیه‌سازی‌ها وارد کنند و همچنین از هزینه فرآیند مشخصه‌سازی مواد به‌میزان چشم‌گیری بکاهند.

روش‌های تحلیل چندمقیاسی از تئوری‌های میکرومکانیک برای برقراری ارتباط بین مقیاس‌های مختلف استفاده می‌کنند. سال ۱۹۸۹ عبودی (۱) تئوری میکرومکانیکی جدیدی به‌نام روش سلولی ارائه داد که حجمک نمونه آن دارای چهار جزء، شامل یک زیرسلول الیاف و سه زیرسلول ماتریس بود. پس از آن پالی و عبودی (۲) در پژوهشی دیگر تئوری میکرومکانیک روش سلولی تعمیم‌یافته را ارائه دادند و بدین طریق محدودیت تعداد زیرسلول‌ها را از بین برده و قابلیت افزایش دقت مدل‌سازی هندسه حجمک نمونه را ایجاد کردند. در ادامه محققان زیادی در کاربردهای مختلف از روش سلولی استفاده کردند

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد

۲- استاد، mtahani@um.ac.ir، ۰۹۱۵۳۱۷۶۲۹۴

و تلاش‌های زیادی برای بهبود آن صورت گرفت. بدنارچیک و همکاران (۳) مدلی تحلیلی بر مبنای روش سلولی و تئوری چندلایه کلاسیک ارائه کرد و به کمک تئوری پلاستیسیته کلاسیک و تئوری ویسکوپلاستیسیته فرید-واکر به بررسی رفتار غیرالاستیک کامپوزیت زمینه فلزی گرافیت/مس پرداخت. پژوهش‌گران دیگری نیز سعی کردند با اضافه کردن زیرسلول‌هایی بین زیرسلول‌های ماتریس و الیاف و یا شبیه‌سازی اتصال زیرسلول‌ها به صورت غیرایده‌آل، خواص فاز میانی را در تحلیل‌ها دخالت دهند (۴ و ۵). ویلیامز (۶) در پژوهشی با استفاده از تئوری میکرومکانیکی روش سلولی به بررسی استحکام کششی نمونه‌های سوراخ‌دار کامپوزیت تک‌جهته AS4/H3502 پرداخت و با ارائه مدلی آماری برای استحکام الیاف، تأثیر آسیب پیش‌رونده الیاف در نواحی تمرکز تنش را بر استحکام نهایی قطعه مطالعه کرد.

در مطالعه حاضر، آزمایش‌های کشش و فشار استاتیکی نمونه‌های سالم و سوراخ‌دار مواد کامپوزیتی IM7/977-3 و HTA/6376 با استفاده از روشی چندمقیاسی شبیه‌سازی گردیده‌است. با به‌کارگیری تئوری میکرومکانیکی روش سلولی در این تحلیل، آسیب پیش‌رونده ریزساختار در سطح الیاف و ماتریس با استفاده از معیارهای پیدایش و رشد تدریجی و ناگهانی آسیب پیاده‌سازی شده‌است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی و در نظر گرفتن تأثیرات متقابل اجزا، خواص الاستیک اولیه الیاف و ماتریس طی فرآیند محلی‌سازی با بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک از خواص الاستیک تک‌لایه‌های کامپوزیتی استخراج شده‌است. در این مطالعه همچنین به دلیل تغییر رفتار ناشی از آسیب اجزا از همسانگرد و همسانگرد عرضی به ارتوتروپیک، روابط روش سلولی موجود در مرجع (۷) ارتقا یافتند.

مدل‌سازی

منحنی‌های تنش-کرنش کششی و فشاری تک‌لایه کامپوزیتی در جهات الیاف و عمود بر آن و منحنی تنش-کرنش برشی آن، ورودی‌های تحلیل‌های انجام‌شده در این مقاله هستند و به‌عنوان منابعی برای استخراج رفتار اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت استفاده می‌شوند. فرآیند به‌دست‌آوردن خواص الاستیک اجزا از خواص الاستیک تک‌لایه کامپوزیتی، محلی‌سازی نام دارد که برعکس فرآیند همگن‌سازی است. در این مقاله محلی‌سازی با استفاده از بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک انجام شده‌است، به طوری که نرم‌افزار متلب مقادیر اولیه‌ای برای خواص الاستیک اجزا حدس زده، در روابط همگن‌سازی جایگذاری کرده و خواص الاستیک تک‌لایه کامپوزیتی را به‌دست می‌آورد، خواص به‌دست‌آمده با مقادیر واقعی آن مقایسه شده و خطاها محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، خواص الاستیک اجزا در مراحل بعد به صورتی حدس زده می‌شود که مقدار خطا کاهش یابد. بدین صورت پس از طی چندین مرحله خواص الاستیک اجزا با دقت بالایی به‌دست می‌آیند.

روش تحلیل چندمقیاسی به‌کاررفته در این پژوهش از نوع هم‌افزا است به این ترتیب که تحلیل با دریافت خواص اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت آغاز می‌شود. این خواص شامل درصد حجمی الیاف، ثوابت مهندسی، تنش‌های متناظر با نقطه پایان رفتار الاستیک، منحنی رفتار غیرالاستیک و استحکام نهایی می‌باشد. با استفاده از داده‌های نام‌برده شده، خواص کامپوزیت توسط روابط تئوری میکرومکانیک روش سلولی محاسبه می‌شوند، آن‌گاه با اعمال نمو بارگذاری، تحلیل تنش در مقیاس ماکرو انجام شده و میدان تنش و کرنش جسم محاسبه می‌گردد. سپس روابط میکرومکانیک، تنش‌های ماکرو را به تنش‌های الیاف و ماتریس تبدیل می‌کنند تا توسط معیارهای آسیب و شکست بررسی شوند. در صورت پیدایش آسیب، معیارهای رشد آسیب، خواص جزء مربوطه را متناسب با آسیب وارده کاهش می‌دهند و به کاهش خواص کامپوزیت منجر می‌شوند. این حلقه تکرار می‌شود تا نهایتاً افزایش بارگذاری و افت خواص کامپوزیت، به شکست نهایی نمونه ختم شود.

برای دستیابی به تنش‌های شروع آسیب، روند رشد آسیب و استحکام‌های نهایی ماتریس و الیاف، فرآیندی گام‌به‌گام به این شکل صورت گرفت که پس از استخراج خواص الاستیک اجزا، ابتدا شبیه‌سازی نمونه‌های تک‌لایه کامپوزیتی بدون مدل‌سازی آسیب انجام شد و تنش‌های اجزا در نقطه متناظر با انتهای رفتار الاستیک تک‌لایه کامپوزیتی به‌عنوان استحکام شروع آسیب ثبت گردید، پس از آن چهار منحنی برای مدل‌سازی رشد آسیب‌های کششی و فشاری در راستای الیاف و عمود

بر آن برآزش شد و با تکرار شبیه‌سازی آزمایش‌های تک‌لایه‌های کامپوزیتی همراه با اعمال رشد آسیب، این بار تنش اجزا در نقاط متناظر با شکست نهایی نمونه‌ها به‌عنوان استحکام‌های نهایی آن‌ها ثبت گردید. فرآیند توضیح‌داده‌شده، در دو نرم‌افزار متلب و آباکوس کدنویسی شدند. توضیح آن‌که تحلیل ماکرومکانیک در نرم‌افزار متلب با استفاده از روابط تحلیلی تئوری چندلایه کلاسیک انجام شد و در نرم‌افزار آباکوس، تحلیل در مقیاس ماکرو به‌روش المان محدود صورت پذیرفت. به‌دلیل سرعت بالای روش تحلیلی، شبیه‌سازی نمونه‌های سالم با نرم افزار متلب انجام گرفت و شبیه‌سازی نمونه‌های سوراخ‌دار با نرم افزار آباکوس انجام شد.

نتایج

خواص اولیه ماده 3-IM7/977 از مراجع (۸ و ۹) استخراج شد و با استفاده از آن‌ها خواص اجزا، طبق روش‌های ذکرشده در بخش قبل به‌دست آمد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های سالم با نتایج آزمایشات تجربی در شکل ۱ آورده شده‌است. این مقایسه نشان می‌دهد که در بارگذاری کششی رفتار نمونه‌ها با دقت بسیار مطلوبی شبیه‌سازی شده‌است. استحکام‌های فشاری نیز جز در لایه‌چینی دوم، تطابقی بسیار خوب با نتایج تجربی دارند. در شبیه‌سازی اولیه بارگذاری فشاری، افت خواص کامپوزیت کمتر از واقعیت بود. منشأ این خطا بروز ریزگمانش الیاف پیش‌بینی شد و در شبیه‌سازی نهایی با تشدید کاهش خواص فشاری، این خطا جبران گردید.

نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های سوراخ‌دار نیز در شکل ۲ آورده شده‌است. این نتایج نشان می‌دهد استحکام تمام نمونه‌ها جز استحکام فشاری چندلایه اول، با دقت خوبی پیش‌بینی شده‌است. همچنین شبیه‌سازی مدول‌های فشاری، تطابق خوبی با آزمایش‌ها دارند. اما مدول‌های کششی با اندکی خطا همراه هستند که بنظر می‌رسد با توجه به حساسیت سنجش کرنش در نمونه‌های سوراخ‌دار و تأثیرپذیری شدید جابجایی نقاط از سوراخ نمونه به‌خصوص در بارگذاری‌های کششی، منجر به بروز این خطا شده‌است.

بررسی نحوه رشد پارامترهای آسیب و مقایسه آن با مشاهدات تجربی شکست، به درک بهتر از نحوه رشد آسیب در نمونه‌های سوراخ‌دار کمک می‌کند. ازین‌رو تصویر گرفته‌شده به‌کمک اشعه ایکس، نحوه رشد آسیب در لایه‌چینی $[60/0/-60]_{3s}$ را در شکل ۳ نشان می‌دهد. رشد پارامترهای آسیب الیاف در نمونه با همین لایه‌چینی نیز در شکل ۴ که جهت اعمال نیرو در آن عمودی می‌باشد، نشان داده شده‌است. از نحوه گسترش آسیب نشان‌داده‌شده در این شکل مشخص است که در شروع شکست، مسیر رشد آسیب عمود بر الیاف و مماس بر سوراخ نمونه است و در مرحله نهایی این شکست در راستای الیاف نیز به‌صورت ناگهانی رشد می‌کند. این نحوه رشد آسیب پیش‌بینی شده، با آنچه در شکل ۳ مشاهده شد مطابقت دارد.

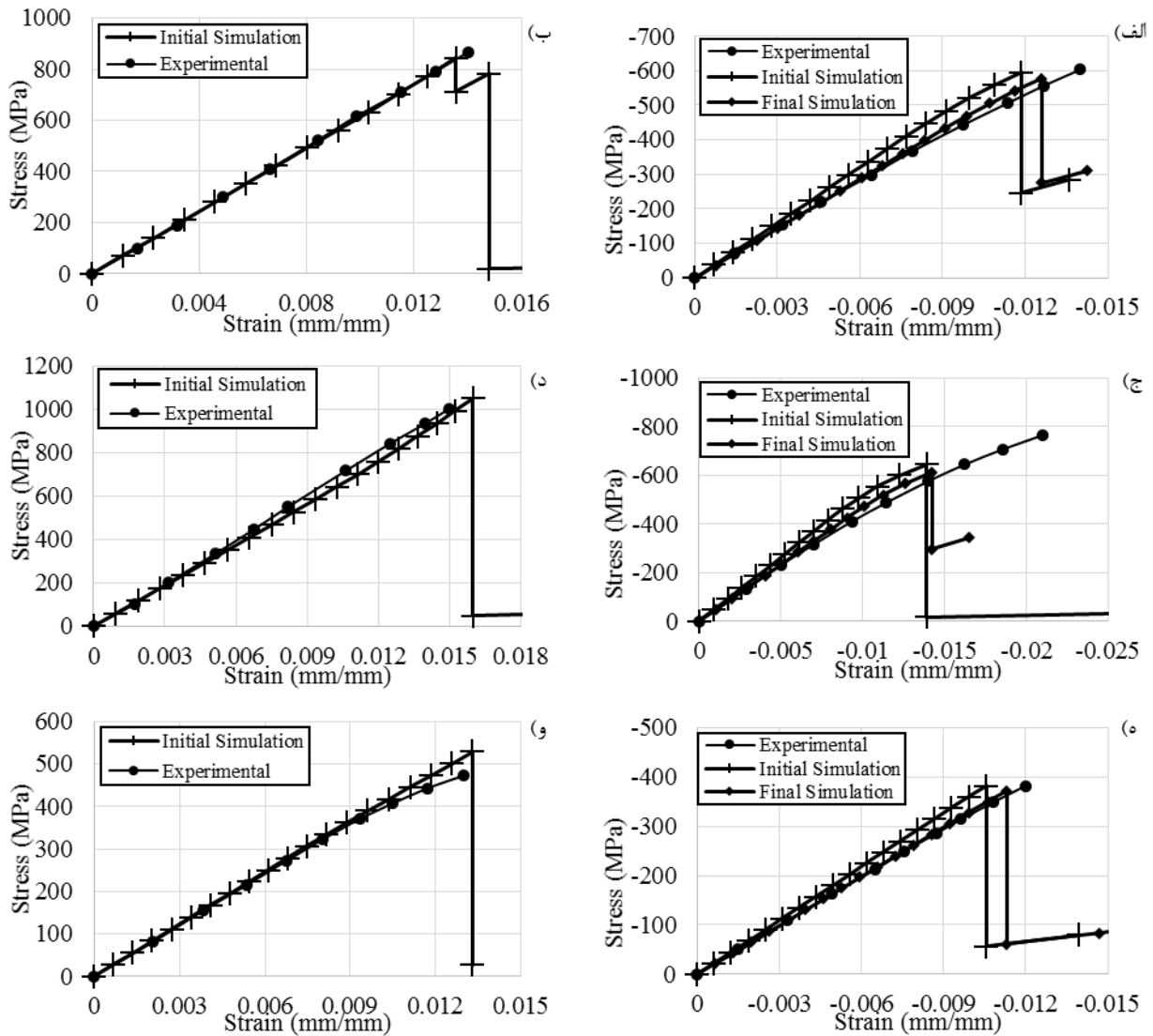
شبیه‌سازی آزمایش‌های کششی برای نمونه‌های سالم و سوراخ‌دار چندلایه‌های $[45/0/-45/90]_{2s}$ و $[90/0]_{4s}$ کامپوزیت HTA/6376 نیز صورت گرفت. خواص اولیه این ماده از مرجع (۱۰ و ۱۱) استخراج گردید. نتایج این شبیه‌سازی، در شکل ۵ با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است که مطابقتی بسیار خوب را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

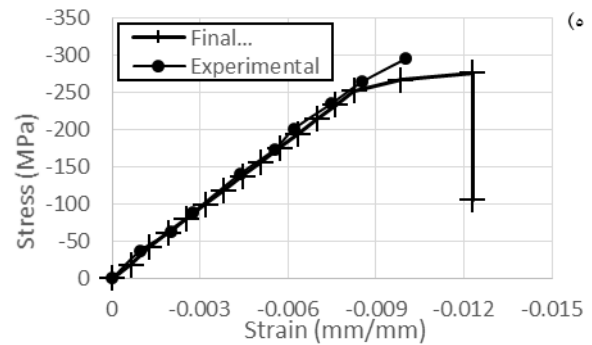
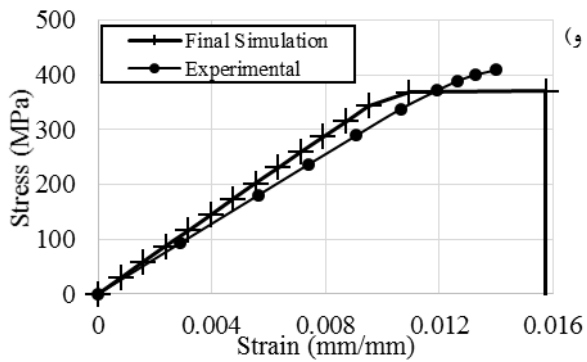
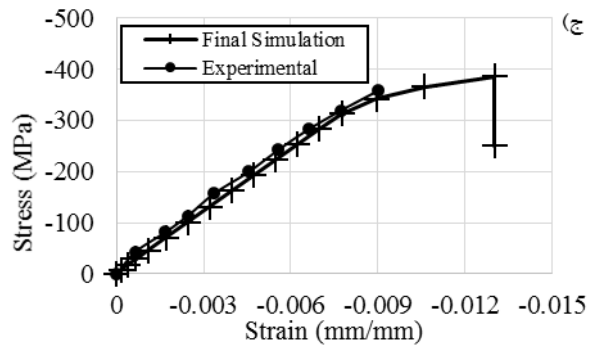
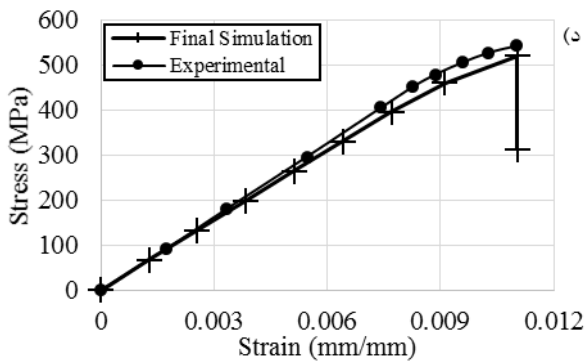
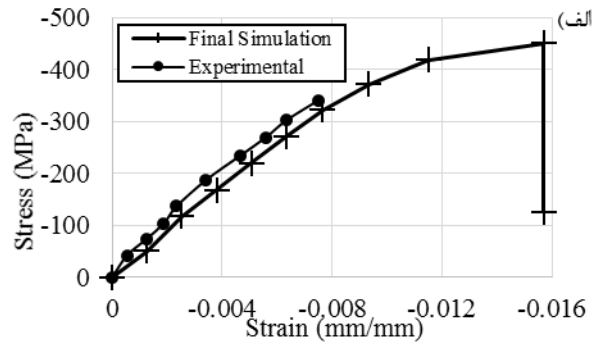
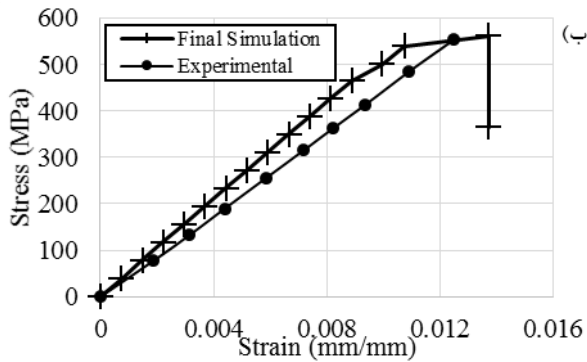
در این مقاله با استفاده از روش تحلیل چندمقیاسی هم‌افزا، آسیب پیش‌رونده در نمونه‌های سالم و سوراخ‌دار دو کامپوزیت از خانواده کربن/اپوکسی شبیه‌سازی شد. برای تحلیل در مقیاس ماکرو از دو روش تحلیلی تئوری چندلایه کلاسیک و عددی المان محدود استفاده گردید و از روش سلولی به‌عنوان تئوری میکرومکانیک بهره گرفته شد. همچنین استخراج خواص ماتریس و الیاف از منحنی‌های تنش-کرنش تک‌لایه، با بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک انجام شد. به‌طورکلی نتایج مطابقت خوبی با آزمایش‌های تجربی نشان دادند. با نگاه به نتایج این‌طور ارزیابی می‌شود که نتایج شبیه‌سازی‌های کششی، دقیق‌تر از نتایج

شبیه‌سازی‌های فشاری است. همچنین می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی‌های نمونه‌های سالم از نمونه‌های سوراخ‌دار دقیق‌تر بوده‌است.

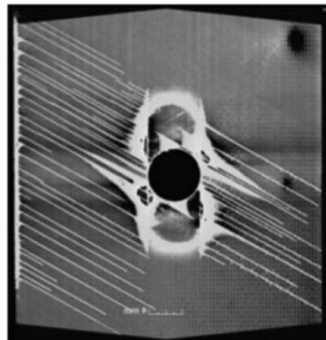
شکل‌ها و نمودارها



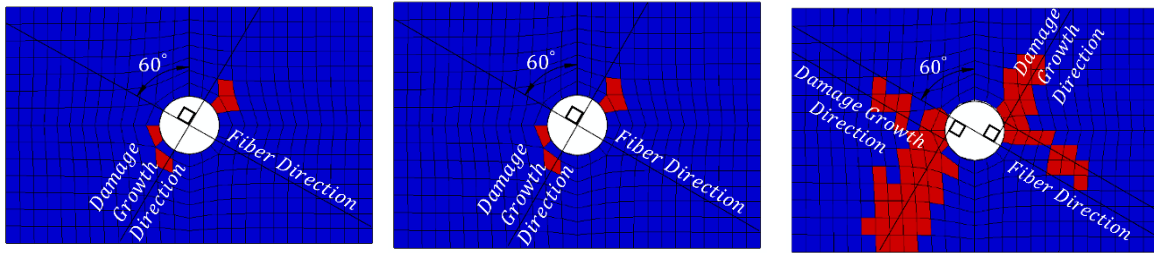
شکل ۱- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی نمونه‌های سالم IM7/977-3، الف و ب) به ترتیب فشار و کشش $[30/60/90/-60/-30]_{2s}$ (ا) ، ج و د) به ترتیب فشار و کشش $[0/45/90/-45]_{2s}$ ، ه و و) به ترتیب فشار و کشش $[60/0/-60]_{3s}$ (ب) ، الف و ب) به ترتیب فشار و کشش $[30/60/90/-60/-30]_{2s}$ (ا) ، ج و د) به ترتیب فشار و کشش $[0/45/90/-45]_{2s}$ ، ه و و) به ترتیب فشار و کشش $[60/0/-60]_{3s}$ (ب)



شکل ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی نمونه‌های سوراخ‌دار IM7/977-3، الف و ب) به ترتیب فشار و کشش [30/60/90/-60/-30]_{2s} (ا) ، ج و د) به ترتیب فشار و کشش [0/45/90/-45]_{2s} ، ه و و) به ترتیب فشار و کشش [60/0/-60]_{3s} (ب) به ترتیب فشار و کشش [30/60/90/-60/-30]_{2s} (ا)



شکل ۴- تصویر گرفته شده به کمک اشعه ایکس از رشد آسیب در لایه چینی [60/0/-60]_{3s} (۱۲)

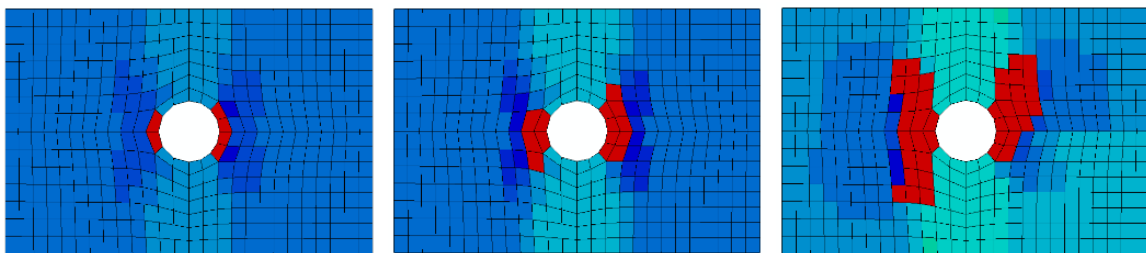


۹۰ درصد حداکثر نیرو

حداکثر نیرو

شکست نهایی

پارامتر آسیب کششی الیاف در زیرلایه ۶۰ درجه



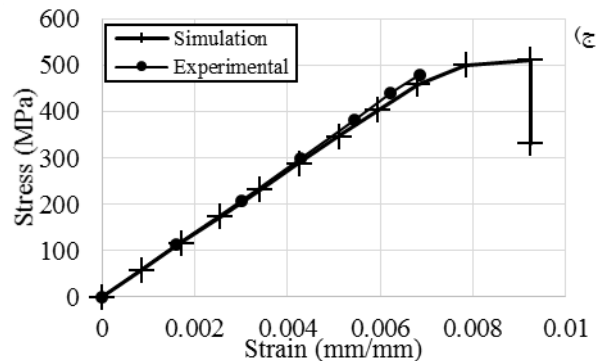
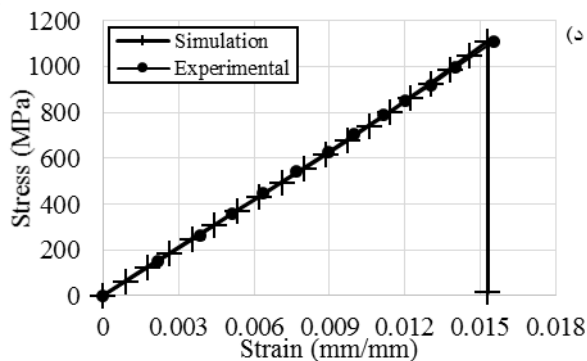
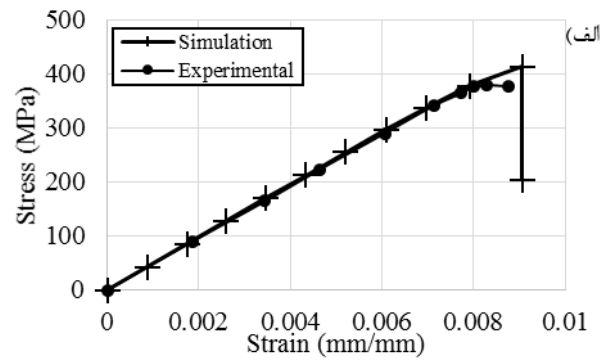
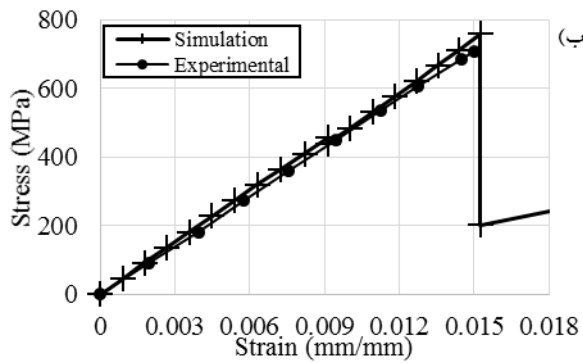
۹۰ درصد حداکثر نیرو

حداکثر نیرو

شکست نهایی

پارامتر آسیب کششی الیاف در زیرلایه ۰ درجه

شکل ۳- توزیع پارامترهای آسیب کششی لایه چینی $[60/0/-60]_{3s}$ کامپوزیت IM7/977-3



شکل ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشات تجربی نمونه های کامپوزیت HTA/6376، الف و ب) به ترتیب کشش نمونه های سوراخ دار و

سالم $[45/0/-45/90]_{2s}$ ، ج و د) به ترتیب کشش نمونه های سوراخ دار و سالم $[90/0]_{4s}$ (۱۱)

مراجع

- 1- Aboudi J., "Micromechanical analysis of composites by the method of cells," Applied Mechanics Reviews, Vol. 42, No. 7, 1989, pp. 193-221.
- 2- Paley M., and Aboudi J., "Micromechanical analysis of composites by the generalized cells model" Mechanics of Materials, Vol. 14, No. 2, 1992, pp. 127-139.
- 3- Bednarcyk B.A., and Pindera M.J., "Journal of Aerospace Engineering, Vol. 9, No. 4, 1996, pp. 93-105.
- 4- Mahiou H., and Beakou A., "Modelling of interfacial effects on the mechanical properties of fibre-reinforced composites" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 29, No. 9-10, 1998, pp. 1035-1048.
- 5- Lissenden C.J., "Fiber-matrix interfacial constitutive relations for metal matrix composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 30, No. 3, 1999, pp. 267-278.
- 6- McWilliams J.K., "Efficient Coupling of Micro/Macroscale Analyses with Stochastic Variations of Constituent Properties" Thesis, Dept, Mississippi State University, 2020.
- 7- Aboudi J., Arnold S.M., and Bednarcyk B.A., Micromechanics of composite materials: a generalized multiscale analysis approach: Butterworth-Heinemann, 2013.
- 8- Clay S.B., and Knoth P.M., "Experimental results of quasi-static testing for calibration and validation of composite progressive damage analysis methods" Journal of Composite Materials, Vol. 51, No. 10, 2017, pp. 1333-1353.
- 9- Bogdanor M.J., and Oskay C., "Prediction of progressive damage and strength of IM7/977-3 composites using the Eigendeformation-based homogenization approach: Static loading" Journal of Composite Materials, Vol. 51, No. 10, 2017, pp. 1455-1472.
- 10- McCarthy C.T., McCarthy M.A., and Lawlor V., "Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances" Composites Part B: Engineering, Vol. 36, No. 4, 2005, pp. 290-305.
- 11- Zhou Y., Yazdani-Nezhad H., McCarthy M., Wan X., and McCarthy C., "A study of intra-laminar damage in double-lap, multi-bolt, composite joints with variable clearance using continuum damage mechanics" Composite Structures, Vol. 116, 2014, pp. 441-452.
- 12- Bogdanor M.J., Clay S.B., and Oskay C., "Interacting Damage Mechanisms in Laminated Composites Subjected to High Amplitude Fatigue" Journal of Engineering Mechanics, Vol. 145, No. 10, 2019, pp. 04019083.