



بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت تقویت شده با الیاف بافته شده تار و پودی تحت بارگذاری کششی

مهران شه روز¹، عباسعلی سبکتکین^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* زاهدان، صندوق پستی 987-98155، saboktakin@eng.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/05/09

پذیرش: 98/12/14

کلیدواژگان:

کامپوزیت تار و پودی

تحلیل اجزاء محدود

آسیب پیشرونده

آزمون کشش

چکیده

در این پژوهش به توسعه یک مدل سلول واحد جهت تعیین خواص مکانیکی و بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت‌های تار و پودی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. همچنین بمنظور تعریف هندسه مدل از اندازه‌گیری‌های واقعی و دقیق الیاف پارچه و سطح مقطع آن به کمک عکسبرداری میکروسکوپی استفاده گردیده است. در مرحله اول سلول واحد با نرم افزار کنیا در مقیاس مزو ایجاد شده و به نرم افزار آباکوس فراخوانی می‌گردد. در این مدل خواص مکانیکی الیاف از نوع رفتار همسانگرد عرضی و برای رزین رفتار همسانگرد در نظر گرفته شده و جهت محاسبه ضرایب مکانیکی کلی کامپوزیت، از روش همگن‌سازی بر اساس کرنش یکنواخت استفاده شده است. در ادامه برای اعمال رفتار آسیب و پیش بینی استحکام کششی کامپوزیت تار و پودی، از یک زیربرنامه (USDFLD) برای کدنویسی استفاده گردید. در این مدل برای پیش‌بینی شروع آسیب معیار تخریب هاشین سه بعدی و برای پیشروی آسیب، تئوری کاهش آنی خواص ماده به کار برده شد. تطابق مناسب نتایج تئوری مورد استفاده در این تحقیق با داده‌های آزمایشگاهی، توانمندی مدل و سابروتین ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

Progressive damage analysis of plain woven composites under tensile loading

Mehran shahrooz, Abbasali saboktakin*

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, zاهدان, iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Plain woven composite
Finite element analysis
Progressive damage
Tensile test
RVE

Abstract

In this study, develop accurate finite element models of plain woven fabrics to determine their mechanical properties and progressive damage analysis. In addition, in order to describe the internal geometry from actual measurements of tow geometry made on photomicrographs of sectioned laminates. In the first step, a unit-cell of composite was created in CATIA software in meso scale. After that, unit-cell was imported in ABAQUS software to finite element (FE) analysis. For each architecture, the yarns are assumed to be transversely isotropic and the resin assumed isotropic. After that a stress averaging technique based on an iso-strain assumption is used to determine the effective moduli of the unit cells. Afterwards, The damage model is implemented in the FE code by a user-defined (USDFLD). In this damage model, in order to predict damage initiation of composite plates, 3D Hashin's failure criterion is chosen. And in order to evolution damage instantaneous Material Property Degradation Method is applied. The good agreement between the theoretical results and experimental data, introduces the ability of the applied model and provided subroutine.

1-مقدمه

[2]، از مزایای استفاده از این نوع الیاف سه بعدی در ساخت کامپوزیت است. با وجود این مزایا، هندسه پیچیده الیاف سه بعدی، چالش‌های زیادی را در تحلیل کامپوزیت‌های ساخته شده با این نوع الیاف بوجود آورده است. مدل سازی خواص الاستیک کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است. کروکستون و همکاران [3] و انگویتی و همکاران [4] در مقالاتی مروری به بررسی انواع مختلف مدل‌های موجود برای پیش بینی خواص کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده پرداختند. این مدل‌ها را میتوان در دو

استفاده از کامپوزیت‌های با الیاف بافته شده تار و پودی، سال‌هاست که مورد توجه متخصصین حوزه مواد مرکب قرار گرفته است. هزینه پایین ساخت این نوع الیاف، امکان استفاده از طیف وسیعی از مواد در تولید این الیاف، به کارگیری ساده، ایجاد امکان ساخت قطعات با هندسه و سطوح پیچیده، خواص مکانیکی متوازن، تقویت کنندگی خوب در همه جهات [1]، خواص خارج از صفحه ای بهتر و مقاومت به ضربه بیشتر نسبت به کامپوزیت های تک جهته

Please cite this article using:

Shahrooz, M. and Saboktakin, A., "Progressive damage analysis of plain woven composites under tensile loading", in persian, journal of science and technology of composites, Vol. 6, No. 4, pp. 609-614, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

اجزاء محدود سه بعدی استفاده نمودند. باید بیشتر به این نکته تاکید کرد که به علت رفتار مکانیکی خاص الیاف در مقیاس مزو روش های کلاسیک اجزاء محدود مناسب نیستند. لوموف و همکاران [16] استفاده از مدل و ابزار طراحی کاملتری را پیشنهاد می دهند که برای مدل سازی تکستایل ها² در مقیاس مزو بسیار مناسب تر است. همچنین در محاسبه خواص مکانیکی در فرآیند همگن سازی، مطالعه رفتار محلی و تحلیل نفوذپذیری کارآمد نشان می دهد. این روش پیشنهادی می تواند به عنوان اساس شروع تحلیل تکستایل ها باشد. این روش همچنین نشان داد که برای ایجاد مدل های تکستایل با اشکال پیچیده مناسب است. مولفان با ترکیب این تکنیک ها با هدف ساده سازی مراحل مدل سازی نرم افزار *wise Tex* که دارای ابزار قدرتمند در طراحی و نمایش تکستایل ها است را طراحی نمودند. ترابی زاده و همکاران [17] از معیار تخریب هشین برای مدل سازی تخریب پیشرونده صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بار کششی استاتیکی در دمای پایین استفاده کردند. حسنی فرد و فیضی [18] معیار هشین را برای تشخیص شکل مود شکست علاوه بر تعیین عمر خستگی صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی به کار بردند. شکرپه و همکاران [19] با بکارگیری مدل های تخریب دو بعدی موجود در نرم افزار آباکوس، از معیار هشین برای تعیین مکانیزم های گوناگون تخریب درون صفحه ای در چند لایه های کامپوزیتی استفاده کردند.

در این پژوهش به توسعه یک مدل سلول واحد جهت تعیین خواص مکانیکی و بررسی آسیب پیشرونده در کامپوزیت های تار و پودی به روش اجزاء محدود پرداخته شده است. همچنین بمنظور تعریف هندسه مدل از اندازه گیری های دقیق الیاف پارچه و سطح مقطع آن به کمک عکسبرداری میکروسکوپی استفاده گردیده است. در ادامه برای اعمال رفتار آسیب و پیش بینی استحکام کششی کامپوزیت تار و پودی، از یک زیربرنامه (USFLD) برای کدنویسی استفاده شد. در این مدل برای پیش بینی شروع آسیب معیار تخریب هاشین سه بعدی و برای پیشروی آسیب، تئوری کاهش آنی خواص ماده به کار برده شده است.

2- شبیه سازی اجزاء محدود

هندسه و ابعاد مدل المان نماینده حجم براساس عکس برداری های میکروسکوپی تعیین، اندازه گیری و در محیط نرم افزار کتیا به صورت مدل سه بعدی طراحی شد.

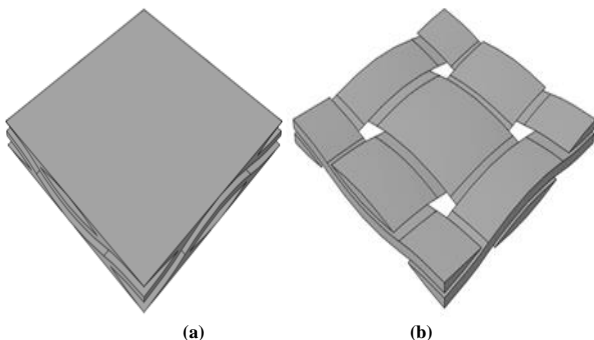


Fig.1 Mesoscale finite element model: (a) fiber yarns (b) resin pocket
 شکل 1- مدل سلول واحد کامپوزیت بافته شده تار و پودی در مقیاس مزو: (a) نخ (b) رزین

شاخه ی عمده مدل های تحلیلی و مدل های عددی (مبتنی بر تحلیل اجزاء محدود) دسته بندی کرد [5]. یکی از قدیمی ترین مدل های تحلیلی ارائه شده برای پیش بینی خواص کامپوزیت های با پارچه بافته شده، مدل ارائه شده توسط ایشیکاوا و چو [6] است. آنها در مدل خود به نام اعوجاج الیاف، با تقسیم المان حجمی معرف به چند ناحیه که به صورت یک چند لایه قابل در نظر گرفتن باشد، خواص معادل هر ناحیه را با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه ها محاسبه کردند. سپس با انتگرال گیری در کل المان حجمی معرف خواص معادل المان حجمی معرف را استخراج کردند. پانومله و همکاران [7] و وایت کمب [8] روش اجزاء محدود را به عنوان یک ابزار برای پیش بینی سفتی و استحکام کامپوزیت های با الیاف بافته شده مورد بررسی قرار دادند. وو و وایت کمب [9] با مطالعه بر روی توزیع تنش های داخلی، به تجزیه و تحلیل مواد مرکب بافته شده ساده توسط المان های دو بعدی پرداختند. آن ها جهت کاهش محاسبات یک روش معتبر با المان های مخصوص در ابعاد ماکرو به جای روش تحلیلی متعارف معرفی کردند. در این روش از مش بندی کلی با ویژگی تک میدانی و ماکروسکوپی برای تعیین واکنش کلی از ساختار و از مش بندی محلی طبق قوانین اجزاء محدود برای به دست آوردن اطلاعات دقیق از مناطق دلخواه مورد استفاده قرار می گیرد. وو و وایت کمب [10] این روش را برای مدل های سه بعدی اجزاء محدود نیز به کار بردند و با مطالعه بر روی حالت های تنش و رفتار شکست در کامپوزیت های با الیاف بافته شده تار و پودی به روش (کلی/محلی با المان های در مقیاس ماکرو) پرداختند. آن ها در یافتند که تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از این روش و اصول تحلیل به روش اجزاء محدود وجود دارد. آن ها توانستند رفتار شکست در سلول واحد کامپوزیت های با الیاف بافته شده که به علت انحنای تارها تحت تنش های متغییر قرار می گیرند را نشان دهند. بلاکتر و همکاران [11] روشی مبتنی بر روش اجزاء محدود ارائه دادند که شروع و گسترش آسیب در کامپوزیت های با الیاف بافته شده تحت بار کششی و برشی را پیش بینی می کرد. روش بلاکتر توسط وایت کمب و سریرنگان [12] توسعه داده شد. این محققین نشان دادند که پاسخ های عددی که از کامپوزیت های با الیاف بافته شده می گیرند به برخی از پارامترها همچون تعداد المان ها، مدل آسیب، شکل و انحنای تارها بسیار حساس است. گاسر و همکاران [13] به مطالعه رفتار مکانیکی پارچه های خشک جهت درک بهتر تاثیر رفتار محلی (مقیاس مزو) بر روی رفتار کلی (مقیاس ماکرو) پرداختند. آن ها مدل اجزاء محدود غیرخطی خاصی را طراحی کردند که به مطالعه رفتار مکانیکی الیاف خشک بر اساس اجزاء سازنده آن می پرداخت. نتایج بدست آمده آن ها با آزمون های مکانیکی در دو جهت مقایسه شد و دقت مطلوب این روش را برای پیش بینی رفتار کلی مواد در مقیاس ماکرو نشان داد. علاوه بر این، آنها قادر شدند اساس کلی شبیه سازی و طراحی پارچه های بافته شده در فرایندهای تولید را دست یابند. اوایل آزمایش های مکانیکی در دو جهت برای بررسی اثر غیر خطی بودن در مقیاس مزو به روی رفتار ماکرو استفاده می شد. سپس بویس و همکاران [14] و هیوت و همکاران [15] یک روش اجزاء محدود سه بعدی در مقیاس مزو ارائه دادند که تاثیرات محلی در مقیاس مزو را بهتر نشان دهد از جمله لهیدگی الیاف که به عنوان یکی از دلایل اصلی غیر خطی بودن است. هم چنین نشان داده شد که رفتار غیرخطی عمدتاً به دلیل تغییرات هندسی الیاف است نه به دلیل تماس بین الیاف. این مولفان از تست های مجازی بر روی مدل المان نماینده حجم (RVE)¹ تحت بارهای دو جهته و برشی در مقیاس مزو، جهت توسعه مدل

² textile

¹ representative volume element

استفاده گردید که نمایی از آن در شکل 3، نشان داده شده است. مشریری از نوع (C3D10) انتخاب و به صورت بی‌سازمان روی مدل ریخته شده است.

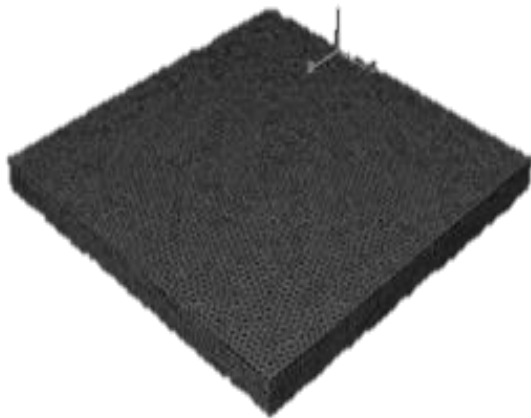


Fig.3 Mesoscale finite element mode (Whole RVE)

شکل 3 مشریری مدل کلی سلول واحد

3- بررسی نتایج

کامپوزیت‌های تار و پودی را عمدتاً میتوان جز مواد اورتوتروپیک در نظر گرفت. در این مواد ارتباط بین تنش و کرنش به صورت رابطه‌ی (1) برقرار است.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{14} \\ \sigma_{15} \\ \sigma_{16} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{14} \\ \varepsilon_{15} \\ \varepsilon_{16} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$C_{11} = (1 - \nu_{23}\nu_{32})\Delta E_1 \quad (2)$$

$$C_{22} = (1 - \nu_{31}\nu_{13})\Delta E_1 \quad (3)$$

$$C_{33} = (1 - \nu_{21}\nu_{12})\Delta E_1 \quad (4)$$

$$C_{12} = (\nu_{12} - \nu_{13}\nu_{32})\Delta E_1 = (\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31})\Delta E_1 \quad (5)$$

$$C_{13} = (\nu_{13} - \nu_{12}\nu_{23})\Delta E_1 = (\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31})\Delta E_1 \quad (6)$$

$$C_{23} = (\nu_{31} - \nu_{23}\nu_{13})\Delta E_1 = (\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{12})\Delta E_1 \quad (7)$$

$$C_{44} = G_{23} \cdot C_{55} = G_{31} \cdot C_{66} = G_{12} \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{32}\nu_{23} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32}} \quad (9)$$

همچنین هر یک از ضرایب ماتریس سختی نیز از رابطه‌ی (10) محاسبه می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی در هر مرحله از حل، تمام درجات آزادی در راستای صفحات عمود بسته شده و تنها در یک راستا بار به صورت جابه‌جایی به سلول واحد طراحی شده وارد گردید.

$$C_{\alpha\beta} = \overline{\sigma_{\alpha}} = \frac{1}{V} \int \sigma_{\alpha}(x_1, x_2, x_3) dV \quad (10)$$

حال که درایه‌های ماتریس سختی به دست آمدند با استفاده از روابط (2-9) ضرایب مهندسی معادل خواص همگن شده کامپوزیت به دست می‌آیند [21]. ضرایب مکانیک کلی کامپوزیت از حل دستگاه شش معادله و شش مجهول در نرم افزار متلب محاسبه شدند.

این مدل نخ‌های¹ در جهت طول و عرض یا تار و پود قرار گرفتند و فضای بین آن‌ها توسط رزین احاطه شده است. مدل المان نماینده حجم ایجاد شده در کتیا به نرم افزار آباکوس فراخوانی می‌شود. در مدل‌سازی در ابعاد مزو نخ‌ها درون ماتریس کاملاً چسبیده‌اند و سرشی بین آنها وجود ندارد. شکل 1، ابعاد هندسی مدل را نشان می‌دهد. خواص الاستیک الیاف فایبر همسانگرد عرضی و از نوع کامپوزیت شیشه-اپوکسی لایه ای تک جهته و خواص الاستیکی ماتریس نیز همسانگرد از نوع اپوکسی انتخاب شده است. از آنجا که به دست آوردن تمامی خواص از آزمایش [25] مقدور نبود، لذا با بررسی نتایج موجود در مقالات متعدد، از خواص موجود در مرجع [20] که شباهت بیشتری به کامپوزیت مورد بررسی ما دارد، استفاده شده است. این خواص در جدول 1، آمده است. جهت گیری خواص ناهمسانگرد نخ در شکل 2، نشان داده شده است. راستای محور 1 در جهت طولی نخ‌های تار و راستای محورهای 2 و 3، جهت‌های عرضی هستند.

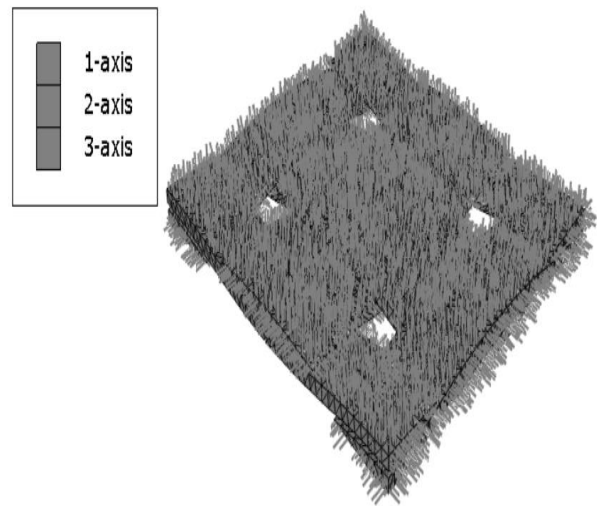


Fig.2 Local orientations prescribed in fiber yarns

شکل 2 جهت گیری خواص نخ‌های شیشه-اپوکسی

جدول 1 خواص مکانیکی نخ شیشه-اپوکسی [20]

Table1 Material Parameters used in simulation (Moduli in GPa)[20]					
اپوکسی			خواص مکانیکی شیشه/اپوکسی		
3.2	E (GPa)	1551	Xt (MPa)	55.7	E_{11} (GPa)
0.38	ν	721	Xc (MPa)	18.5	E_{22} (GPa)
70	Sut (MPa)	46	Yt (MPa)	6.8	G_{12} (GPa)
		141	Yc (MPa)	6.04	G_{23} (GPa)
		85	S12(MPa)	0.22	ν_{12} (GPa)
		57.5	S23(MPa)	0.34	ν_{23} (GPa)

مش ریزی نیز درون نرم افزار آباکوس انجام گرفت. در مجموع تعداد 54653 المان با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی و دقت نتایج، به منظور مش‌ریزی

¹ yarn

جدول ۲ ضرایب مکانیکی کامپوزیت بافته شده تار و پودی

Table2 Predicted values of elastic properties of plain weave composite

ضرایب مکانیکی	نتایج مدل سازی (GPa)
E_{11}	16.49
E_{22}	16.94
E_{33}	7.63
ν_{12}	0.136
ν_{13}	0.406
ν_{23}	0.406
G_{12}	3.14
G_{13}	2.01
G_{23}	2.01

جدول 4 کاهش کامل خواص برای نخ [23]

Table 4 Complete Degradation of properties for all damage modes

کاهش خواص	مود واماندگی
$E_{11} = E_{22} = E_{33} = G_{12} = G_{13} = G_{23} = \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0$	واماندگی در جهت الیاف
$E_{22} = E_{33} = \nu_{12} = 0$	واماندگی در جهت رزین
$G_{12} = \nu_{12} = 0$	برش بین الیاف و زمینه

آسیب ماتریس موجب افت مدول سفتی در جهت عرضی E2 و E3 و برش بین ماتریس و الیاف موجب افت مدول برشی G12, G13, G23 در لایه آسیب دیده می شود. (در اینجا منظور از اندیس 1 جهت طولی و اندیس 2 و 3 جهت عرضی می باشد.) و نتیجه آسیب الیاف از دست دادن قابلیت تحمل بار در تمام جهات (کاهش سفتی ماده در تمام جهات) است. بعد از کاهش سفتی لایه آسیب دیده تنش های جدید برای لایه آسیب دیده محاسبه می شود. سپس روند کاهش سفتی به صورت تکراری روی تنش های جدید اعمال می شود و تا پیش بینی آسیب در لایه بعدی ادامه پیدا می کند. این تئوری به طور خلاصه در جدول 4 بیان شده است. مدول الاستیسیته رزین نیز پس از شروع واماندگی به سمت صفر میل می کند. در ادامه بررسی نتایج بدست آمده، شکل 4 توزیع کانتورهای تنش فون-میسز روی مدل سلول واحد تحت بارگذاری کششی در راستای نخ های تار را نشان میدهد.

در این تحقیق برای تعیین رفتار کششی، توزیع تنش و کرنش روی سلول واحد توسط نرم افزار المان محدود آباکوس بدست آمد (شکل 4). در ادامه با استفاده از زیروال نویسی در نرم افزار آباکوس جهت توسعه مدل ساختاری مادی (USDFLD) معادلات ساختاری با هدف شبیه سازی رفتار واماندگی بر اساس معیارهای واماندگی و قوانین کاهش خواص مربوطه برای دستیابی به دقیق ترین روش تعریف شده است. با توجه به ویژگی غیرهمسانگردی خواص الیاف پارچه، برای تعیین مناطق بحرانی تنش از معیار مناسب برای این مواد استفاده می شود که معمولاً برای کامپوزیت های لایه ای تک جهته نیز به کار می رود و به دلیل خواص همسانگردی ماتریس زمینه از معیار مناسب برای این مواد استفاده می شود. در این مطالعه برای تعیین شروع آسیب روی نخ ها معیار هاشین سه بعدی [22] (جدول 3) و برای بررسی آسیب رزین معیار فون میسز (رابطه 11) به کار برده شده است. در تجزیه و تحلیل کامپوزیت های پارچه ای تنها پیش بینی شروع شکست کافی نیست. شروع آسیب معمولاً در بار پایین تر از بار شکست نهایی رخ می دهد بنابراین روش خرابی پیشرونده جهت مطالعه تاثیر تجمع آسیب بر عملکرد مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد. تئوری کاهش آبی خواص در این بخش بر اساس کار شکریره [23] انجام شده است. در روش کاهش خواص ماده، ماده آسیب دیده به عنوان یک ماده همگن بدون آسیب اما با خواص مکانیکی کاهش داده شده در نظر گرفته می شود [24]. در این روش معمولاً چند لایه های کامپوزیتی به سه نوع آسیب الیاف و ترک در ماتریس و برش بین الیاف و ماتریس طبقه بندی می شوند. تحلیل تنش در چند لایه های کامپوزیتی نیز معمولاً برای تشخیص اولین لایه آسیب دیده انجام می شود.

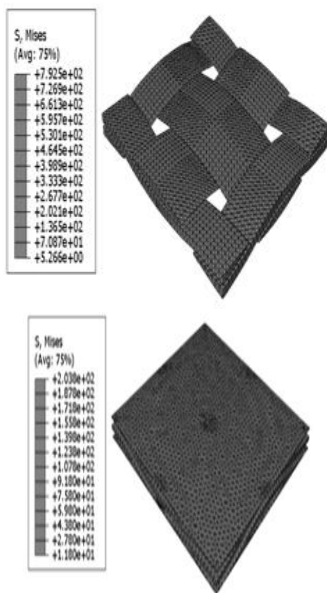
جدول 3 معیار واماندگی هشین [22]

Table 3 Hashin failure criterion

معیار تخریب	حالت تنش واماندگی
$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1$	$\sigma_1 > 0$
$-\frac{\sigma_{11}}{X_C} = 1$	$\sigma_1 < 0$
$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{12}^2} = 1$	$\sigma_2 + \sigma_3 > 0$
$\frac{1}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{1}{S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_{12}^2} (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) = 1$	$\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

Fig.4 tensile stress contours in meso model

شکل 4 توزیع تنش کششی روی مدل سلول واحد در اثر بارگذاری کششی



همچنین الگوهای آسیب پیشرونده به صورت کانتورهای رنگی در شکل های 5 و 6، نشان داده شده است. شکل 5.a، آسیب ماتریس در نخ های پود و مناطق اعوجاج تارها را در کرنش 0.5٪ نشان میدهد. شکل 5.b

Fig.7 Comparison of the stress-strain relations between simulation and experiment

شکل 7 مقایسه منحنی تنش-کرنش بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

جدول 5 نتایج به دست آمده از آزمایش و مدل‌سازی در ابعاد مش مختلف.

Table 5 Experimental and simulation results for plain woven composite in different mesh size.

نمونه	اندازه مش	مدول کشش (Gpa)	استحکام کششی (Mpa)
آزمایشگاهی [25]		15.5	271
مدلسازی درشت		16.8	298
مدلسازی متوسط		16.90	292
مدلسازی ریز		16.9	291
خطا (%)	8		7

خواص کششی کامپوزیت بدست آمده از آزمون [25] به همراه نتایج مدل سازی مستقل از مش در جدول 5، آمده است. بر طبق جدول 5، خطای بوجود آمده از مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی کم بوده که نشان از صحت مدل‌سازی در این تحقیق می‌باشد. علت اختلاف بوجود آمده در جدول 5، را می‌توان چسبندگی کامل بین الیاف و ماتریس در مدل‌سازی دانست. در صورتی که در قسمت آزمایشگاهی چسبندگی به صورت کامل نبوده و همین امر سبب شده خواص مکانیکی کامپوزیت در قسمت آزمایشگاهی نسبت به بخش مدل‌سازی پایین تر باشد. از طرفی مش‌ریزی و محاسبات اجزاء محدود خود نیز سبب ایجاد خطایی جزئی در محاسبات شده است.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه به تحلیل کامپوزیت بافته شده تار و پودی تحت بارگذاری کششی تک جهته به روش اجزاء محدود پرداخته و توزیع تنش و کرنش بر روی یک مدل نماینده حجم را بررسی نمودیم. همچنین ضرایب مکانیکی، شروع آسیب و استحکام کششی کامپوزیت به روش آسیب پیشرونده با استفاده از زیروال نویسی در نرم افزار آباکوس (USDFLD) پیش‌بینی شد. از طرفی استفاده از یک مدل سلول واحد در ابعاد مزو با طراحی تمامی اجزاء که شامل ماتریس و قسمت تقویت کننده می‌شود سبب شده پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت به خوبی صورت گیرد و حجم محاسبات برای مدل ماکرو کاهش یابد و بتوان آزمون‌های مختلف را برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت روی آن انجام داد.

5- منابع و مراجع

- [1] Tanov, R., Tabiei A., "Computationally efficient micromechanical models for woven fabric composite elastic moduli," Journal of Applied Mechanics, Vol. 68, No. 4, pp. 553-560, 2001.
- [2] Naik, N., Shembekar P., "Elastic behavior of woven fabric composites: I—Lamina analysis", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 15, pp. 2196-2225, 1992.
- [3] Crookston, J., Long, A., Jones, I., "A summary review of mechanical properties prediction methods for textile reinforced polymer composites," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, Vol. 219, No. 2, pp. 91-109, 2005.

آسیب رزین در کرنش 0.5٪ را نشان می‌دهد. گسترش آسیب ماتریس در جهت تارها بسیار کم تر از گسترش آسیب در جهت پود و رزین اتفاق می‌افتد.

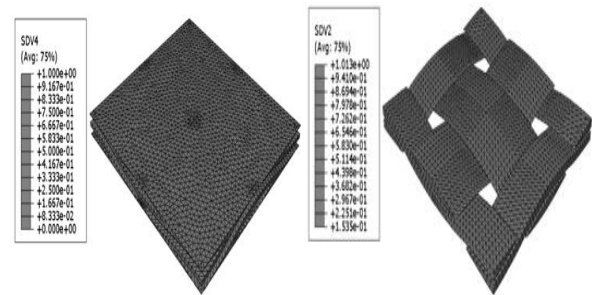


Fig.5 Damage patterns at: (a) fiber failure initiation in warp yarns (b) first significant load drop in resin pocket

شکل 5 الگوی شروع آسیب در نخ و رزین (در کرنش 0.5٪)

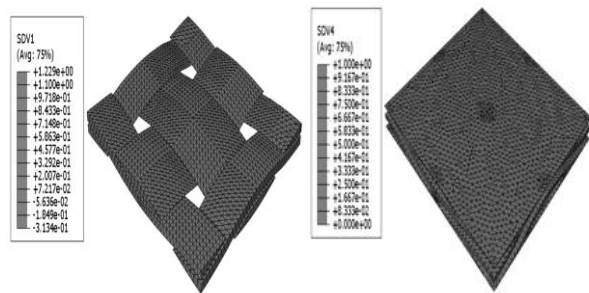
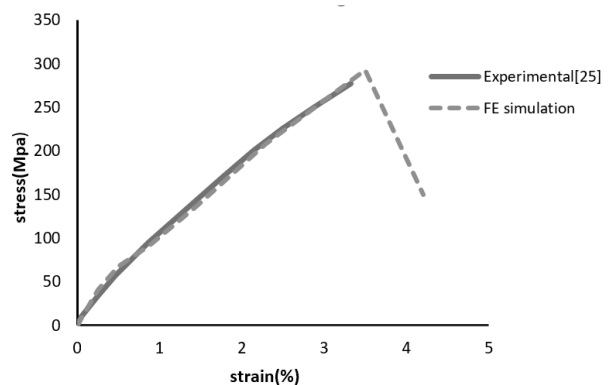


Fig.6 Damage patterns at: (a) fiber failure initiation in warp yarns (b) first significant load drop in resin pocket.

شکل 6 الگوی شروع آسیب در نخ و رزین (در کرنش 2.75٪)

شکل 6.a، الگوی آسیب الیاف را در زمان شروع وقوع آسیب نخ‌های تار در کرنش 2.75٪ را نشان می‌دهد. شروع شکست از مناطق اعوجاج تار شروع و به دیگر مناطق تار و پود گسترش می‌یابد. همچنین در کرنش 2.75٪ افت محسوس خواص مکانیکی رزین اتفاق افتاده است (شکل 6.b). همانطور که در شکل 7، مشخص است نمودار منحنی تنش-کرنش با نمودار بدست آمده از آزمون تجربی [25] انطباق مناسبی دارد که خود نشان دهنده نزدیک بودن خواص مکانیکی بدست آمده از مقیاس مزو با خواص مکانیکی کل کامپوزیت می‌باشد.



- [4] Angioni, S., Meo, M., Foreman, A., "A comparison of homogenization methods for 2-D woven composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 2, pp. 181-189, 2011.
- [5] Adumitroaie, A., Barbero, E. J., "Stiffness and strength prediction for plain weave textile reinforced composites," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 19, No. 1-3, pp. 169-183, 2012.
- [6] Ishikawa, T., Chou, T.-W., "Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 17, No. 11, pp. 3211-3220, 1982.
- [7] Paumelle, P., Hassim A., & Lone, F., "Microstress analysis in woven composite structures", *La Recherche Aérospatiale*, Vol. 6, pp. 47-62, 1991.
- [8] Whitcomb, J., "Three-dimensional stress analysis of plain weave composites," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP1110, pp. 417-438, 1991.
- [9] Whitcomb, J., Woo, K. & Gundapaneni, S., "Macro finite element for analysis of textile composites," *Journal of Composite Materials*, Vol.28, pp. 607-618, 1994.
- [10] Woo, K., & Whitcomb, J., "Three-dimensional failure analysis of plain weave textile composites using a global/local finite element method," *Journal of Composite Materials*, Vol.30, pp. 984- 1003, 1996.
- [11] Blacketter, D., Walrath, D., & Hansen, A., "Modeling damage in a plain weave fabric reinforced composite material" *Journal of Composites Technology and Research*, Vol.15, pp. 136-142, 1993.
- [12] Whitcomb, J., & Srengan, K. "Effect of various approximations on predicted progressive failure in plan weave composites" *Composite Structures*, Vol.34, pp. 13-20, 1996.
- [13] Gasser, A, Boisse, P, & Hanklar, S "Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements 3D simulations versus biaxial tests", *Computational Materials Science*, Vol.17, pp.7-20, 2000.
- [14] Boisse, P, Buet, K, Gasser, A., & Launay, J Meso/macro-mechanical behaviour of textile reinforcements for thin composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 395-401, 2001.
- [15] Hivet, G., Launay, J., Gasser, A., Daniel, J.L., & Boisse, P., "Mechanical Behavior of Woven Composite Reinforcements While Forming", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.15, pp. 545-555, 2002.
- [16] Lomov, S., Huysmans, G., Luo, Y., Parnas, R., Prodromou, A., Verpoest, I, & Phelan, F., "Textile composites: modelling strategies", *Composites part A*, Vol. 32, pp.1379-1394, 2001.
- [17] Torabizadeh, M. A. Shokrieh, M. M. and Fereidoon A., "Progressive Damage Modeling of Glass/Epoxy Laminated Composites under Static Load at Low Temperature," In Persian, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 8, No. 21, pp. 33-43, 2010.
- [18] Hassanifard, S. and Feyzi, M., "Progressive Damage Investigation of Glass-Epoxy Composite Laminates under Fatigue Loading " In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 339-347, 2015.
- [19] Shokrieh, M. M. Ghajar, M. Salamattalab, M. and Madoliat, R., "Progressive Damage Modeling of Laminated Composites by Considering Simultaneous Effects of Interlaminar and Intralaminar Damage Mechanisms," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015.
- [20] Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M. L., and Bocherens, E., "A Micromechanics Model for 3D Elasticity and Failure of Woven-fibre Composite Materials", *Composites Science and Technology*, Vol. 59, No. 4, pp. 505-517, 1999.
- [21] Ansar, M., Xinwei, W. and Chouwei, Z., "Modeling Strategies of 3d Woven Composites: A Review" *Composite structures*, Vol. 93, No. 8, pp. 1947-1963, 2011.
- [22] Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.47, No. 2, pp. 329-334, 1980.
- [23] Shokrieh, M. M., "Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials", Ph.D Thesis, McGill University, 1996.
- [24] Gorbatikh, L. Ivanov, D. Lomov, S.V and Verpoest, I. "On Modelling of damage evolution in textile composites on meso-level via property degradation approach." *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 38, pp 2433-2442, 2007.
- [25] Saboktakin, A., "Integrity assessment of preforms and thick textile reinforced composites for aerospace applications" PhD Thesis École de technologie supérieure Université du Québec, 2013.