



## بررسی عددی رفتار کششی کامپوزیت تقویت شده با پارچه تار و پودی کربن و کولار با استفاده از روش چند مقیاسی

سید بهزاد عبدالهی<sup>1</sup>، مجید کاظمی اسفه<sup>2</sup>، سید مهدی حجازی<sup>3\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

3- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، cc.iut.ac.ir، hejazi110@

### چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات امروزه در صنایع مختلفی نظیر صنایع اتومبیل‌سازی، عمرانی، هوافضا و نظامی استفاده می‌شود. از جمله این کامپوزیت‌ها می‌توان به کامپوزیت‌های تار و پودی اشاره کرد. در تحقیق حاضر رفتار کششی کامپوزیت تقویت شده با پارچه‌ی تار و پودی کربن و کولار به روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است. طرح بافت پارچه مورد بررسی سرزه 2x2 می‌باشد. در ابتدا یک سلول واحد کامپوزیت در ابعاد مزو در نرم‌افزار TexGen طراحی شد. سپس مدل طراحی شده به نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل اجزا محدود فراخوانی شد. پس از تحلیل مدل در ابعاد مزو، با استفاده از کد پایتون نوشته شده و ضرایب مکانیکی کامپوزیت استخراج شد. خواص مکانیکی استخراج شده به مدل طراحی شده در ابعاد ماکرو نسبت داده شد. سپس آزمون کشش بر روی مدل ماکرو انجام گرفته و خواص کششی حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان می‌داد خواص کششی کامپوزیت انطباق مناسبی با نتایج مدل‌سازی دارد. از این رو می‌توان با استفاده از مدل مزو خواص مکانیکی کامپوزیت را استخراج کرده و سپس آزمون مورد نظر بر روی مدل ماکرو صورت گیرد. استفاده از روش چند مقیاسی سبب می‌شود علاوه بر افزایش دقت در پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت، حجم محاسبات نیز کاهش یابد.

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/09/27

پذیرش: 96/10/30

### کلیدواژگان:

کامپوزیت تار و پودی کربن

کامپوزیت تار و پودی کولار

روش چند مقیاسی

آزمون کشش

تحلیل اجزا محدود.

## Numerical investigation of tensile behavior of composite reinforced with woven carbon and Kevlar fabrics by multi scale method

Sayyed Behzad Abdellahi<sup>1</sup>, Majid Kazemi Asfeh<sup>2</sup>, Sayyed Mahdi Hejazi<sup>1\*</sup>

1- Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan Iran.

2- Department of Aerospace Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, hejazi110@cc.iut.ac.ir

### Keywords

Woven carbon composite

Woven Kevlar composite

Multiscale method

Tensile test

Finite element analysis

### Abstract

Nowadays, composites are being widely used in automotive, aerospace and military industrials. Woven composites are considered as a one of textile composites. In present study, tensile behavior of carbon and Kevlar woven composites were investigated by finite element method. Weave pattern of woven fabric was twill 2x2. In the first step, a unit-cell of composite was created in TexGen software in meso scale. After that, unit-cell was imported in ABAQUS software to finite element (FE) analysis. After FE analysis, a python code was applied in meso model to calculate mechanical coefficient of composite. The mechanical coefficients of composite were assigned in macro model. Then tensile test was done on macro model and results of FE analysis were compared with experiment results. The results showed that, tensile properties of model propose good agreement with experimental results. Therefore, meso model can be used to calculate mechanical properties of composite. Using multiscale method also leads to increase precision and solving reduction.

### Please cite this article using:

Abdellahi, S.B. Kazemi Asfeh, M. Hejazi, S.M., "Numerical investigation of tensile behavior of composite reinforced with woven carbon and Kevlar fabrics by multi scale method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 265-270, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

نخ در راستای مسیر حرکت خود در ساختار پارچه ترسیم می‌شود. به علت سرعت و دقت بالای این نرم افزار در طراحی ساختار پارچه تار و پودی، سلول واحد مورد نظر در این نرم افزار طراحی شد. در این نرم افزار طرح بافت و پارامترهای ساختاری پارچه نظیر فاصله‌ی تار و پودی وارد شده و سپس یک سلول واحد از پارچه به همراه ماتریس آن طراحی می‌شود. شکل 1 سلول واحد طراحی شده در نرم افزار TexGen را نشان می‌دهد.

سپس مدل طراحی شده جهت تحلیل اجزا محدود به نرم‌افزار آباکوس فراخوانی شد. در کامپوزیت ساخته شده نخ‌های کربن و کولار و رزین اپوکسی به ترتیب قسمت تقویت کننده و ماتریس را تشکیل می‌دهند. خواص نخ‌ها و رزین اپوکسی مطابق جدول 1 به نخ‌ها و ماتریس در نرم افزار آباکوس نسبت داده شد.

همان‌طور که در جدول 1 مشخص است خواص نخ به صورت یک ماده ایزوتروپیک عرضی انتخاب شده است و لازم است که جهت‌گیری خواص نخ‌ها در راستاهای مختلف مشخص شود. از این رو جهت یک هم راستا با حرکت نخ انتخاب شده و راستاهای دیگر به صورت عرضی می‌باشند. جهت‌گیری خواص نخ‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

کامپوزیت‌های تار و پودی را عمدتاً می‌توان جز مواد اورتوتروپیک<sup>3</sup> در نظر گرفت. در این مواد ارتباط بین تنش و کرنش به صورت رابطه‌ی زیر برقرار است [18].

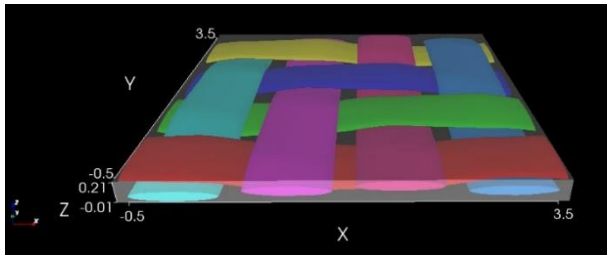


Fig. 1- Unit cell created in TexGen software

شکل 1 سلول واحد تشکیل شده در نرم افزار TexGen

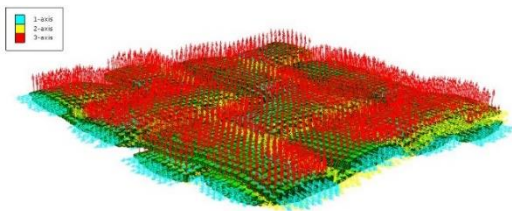


Fig. 2- Yarn properties orientation

شکل 2 جهت‌گیری خواص نخ‌ها

جدول 1 خواص نخ‌های کربن و کولار و رزین اپوکسی [12, 17]

Table 1 Properties of carbon and Kevlar yarns and epoxy resin [12, 17]

رزین اپوکسی	نخ کولار	نخ کربن	ضرایب مکانیکی
3.1	84.62	220	$E_{11}$ (GPa)
-	1.34	13.79	$E_{22}$ (GPa)
-	1.34	13.79	$E_{33}$ (GPa)
0.39	0.24	0.2	$\nu_{12}$
-	0.24	0.2	$\nu_{13}$
-	0.6	0.25	$\nu_{23}$
-	24.4	8.97	$G_{12}$ (GPa)
-	24.4	8.97	$G_{13}$ (GPa)
-	10.3	4.86	$G_{23}$ (GPa)

<sup>3</sup> Orthotropic

امروزه استفاده از ساختارهای منسوج کامپوزیتی به علت خواص مکانیکی مطلوب نسبت به فلزات و سرامیک، در صنایع مختلف نظیر صنایع عمرانی، اتومبیل سازی، هوافضا و دفاعی بسیار رایج شده است [1-3]. کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های تار و پودی از جمله تقویت کننده‌های نساجی بوده که توسط روش بانفدگی تار و پودی به طرح‌های مختلفی نظیر تافته، سرژه، ساتن و غیره تولید می‌شوند [4]. خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌های به نوع الیاف مورد استفاده، قطر نخ‌ها، فاصله‌ی بین نخ‌ها، جهت‌گیری الیاف و کسر حجمی الیاف بستگی دارد [5]. تحقیقات مختلفی به منظور بررسی خواص الیاف، تراکم بافت و طرح بافت بر روی کامپوزیت‌های تار و پودی صورت گرفته است [6-9]. در کامپوزیت‌های تار و پودی به علت قرارگیری نخ‌های در دو جهت، استحکام کامپوزیت نیز در آن دو جهت نسبت به یک تک لایه بیشتر می‌باشد [10].

از طرفی با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی نرم‌افزاری، تحقیقات مختلفی در زمینه مدل‌سازی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های تار و پودی صورت گرفته است. در تحقیقی نیلاکانتان<sup>1</sup> و همکارانش به بررسی اثر تخریب پارچه‌ی تار و پودی کولار در اثر شلیک پرتابه‌های مختلف پرداختند. آن‌ها همچنین جهت شبیه‌سازی رفتار مکانیکی پارچه تحت ضربه از روش اجزا محدود و نرم افزار آباکوس استفاده کردند [11].

در تحقیق دیگری که توسط دیکسیت<sup>2</sup> و همکارانش صورت گرفت، رفتار ضربه‌ای کامپوزیت تقویت شده با پارچه‌ی تار و پودی کربن با فرورونده‌های مختلف در ابعاد مزو به روش اجزا محدود مدل‌سازی شد. در این تحقیق طرح بافت پارچه از نوع سرژه 2x2 در نظر گرفته شد [12].

استفاده از یک سلول واحد در کامپوزیت‌ها جهت بدست آوردن خواص آن‌ها یکی از روش‌هایی بوده که می‌توان خواص مکانیکی کامپوزیت را پیش از ساخت پیش‌بینی کرد. از این رو می‌توان در ابعاد ماکرو یک مدل ساده‌تر مورد بررسی قرار گیرد. در این روش یک سلول واحد از کامپوزیت با توجه به طرح بافت آن طراحی شده و سپس باتوجه به خواص کامپوزیت شرایط مرزی مورد نیاز اعمال می‌گردد. سپس با استفاده از روابط موجود جهت محاسبه‌ی خواص کامپوزیت، ضرایب سختی کامپوزیت بدست می‌آید [13-15].

در تحقیق حاضر رفتار کششی کامپوزیت تقویت شده با پارچه‌ی تار و پودی کربن و کولار به روش اجزا محدود مدل‌سازی شده است. سپس نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی از تحقیق ابراهیم‌نژاد خالجیری و همکارانش [7] مقایسه گردید

2- شبیه‌سازی اجزا محدود

جهت مدل‌سازی کامپوزیت تار و پودی کربن ابتدا لازم است یک واحد تکرار آن در ابعاد مزو طراحی شود. طرح بافت مورد نظر سرژه 2x2 می‌باشد. از این رو واحد تکراری پارچه با استفاده از نرم افزار TexGen طراحی شد. این نرم افزار به منظور طراحی هندسه پارچه‌های تار و پودی و حلقوی برای اولین بار در دانشگاه ناتینگهام کد نویسی شد [16]. در نرم افزار TexGen نخ‌ها در ابعاد مزو به صورت یک جسم توپُر طراحی می‌شود. روش طراحی نخ‌ها در این نرم افزار به صورتی است که باتوجه به ورودی‌های مشخص شده توسط کاربر مسیر نخ طراحی شده و سپس باتوجه به مشخصات سطح مقطع،

<sup>1</sup> Nilakantan

<sup>2</sup> Dixit

در فایل استخراج شده از نرم افزار TexGen خواص تماسی بین الیاف به همراه هندسه مدل به نرم افزار آباکوس فراخوانی می‌شود. این ویژگی‌های تماسی از نوع معادله‌ای و به صورت خطی می‌باشد. در مدل‌سازی در ابعاد مزو نخ‌ها درون ماتریس کاملاً چسبیده‌اند و سرشی بین آن‌ها وجود ندارد. جهت مش‌ریزی از المان‌های سه‌بعدی C3D8R با تعداد 8 گره و انتگرال کاهش یافته استفاده شد. مش‌ریزی درون نرم افزار TexGen صورت گرفت که در این نرم افزار مش‌ریزی بر روی تمامی اجزا به صورت منظم و بهینه صورت می‌پذیرد. در مجموع تعداد 125000 المان به منظور مش‌ریزی استفاده گردید. در تحقیقات مختلفی از نرم افزار TexGen جهت مدل‌سازی کامپوزیت‌های مختلف استفاده شده است که مش خروجی از نرم افزار دارای جواب‌های قابل قبولی می‌باشد [19-21]. به منظور استخراج ضرایب مکانیکی کامپوزیت از مدل طراحی شده در ابعاد مزو از کد نوشته شده به زبان پایتون استفاده شد. الگوریتم کد نوشته شده در شکل 4 نشان داده شده است.

سپس ضرایب استخراج شده از مدل مزو به مدل طراحی شده در ابعاد ماکرو نسبت داده شد. مدل طراحی شده در ابعاد ماکرو به صورت مستطیلی با ابعاد  $2.5 \times 30 \text{ cm}^2$  ترسیم گردید لایه چینی در 4 لایه بر روی آن انجام شد. جهت لایه‌گذاری از ابزار لایه‌گذاری در نرم افزار آباکوس استفاده شد که در این ابزار تعداد لایه‌ها، خواص هر لایه و ضخامت آن وارد می‌شود. جهت اعمال شرایط مرزی تمام درجات آزادی یک سمت کامپوزیت بسته شده و به سمت دیگر جابه‌جایی اعمال شد. به منظور مش‌ریزی بر روی کامپوزیت از المان‌های S4R با 4 گره و انتگرال کاهش یافته استفاده گردید. به منظور بررسی همگرایی مش و استقلال جواب‌ها از مش‌ریزی سه نوع مش درشت، متوسط و ریز برای مش‌ریزی بر روی مدل ماکرو استفاده شد. شکل 5 مش‌ریزی بر روی کامپوزیت در ابعاد ماکرو را نشان می‌دهد.

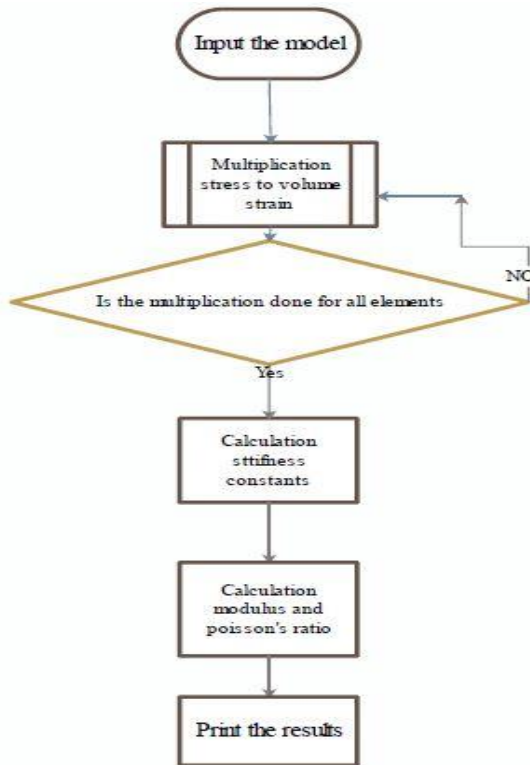


Fig. 4 Algorithm of python cod

شکل 4 الگوریتم کد نوشته شده

$$\begin{pmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_3 \\ \bar{\sigma}_4 \\ \bar{\sigma}_5 \\ \bar{\sigma}_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_1 \\ \bar{\epsilon}_2 \\ \bar{\epsilon}_3 \\ \bar{\gamma}_4 \\ \bar{\gamma}_5 \\ \bar{\gamma}_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

که مدول‌ها و ضرایب پواسون بوسیله روابط زیر بدست می‌آید [18].

$$E_1 = C_{11} - 2C_{12}^2 / (C_{22} + C_{23}) \quad (2)$$

$$v_{12} = C_{12} / (C_{22} - C_{23}) \quad (3)$$

$$E_2 = [C_{11}(C_{22} + C_{23}) - 2C_{12}^2] / (C_{11}C_{22} - C_{12}^2 - C_{23}) \quad (4)$$

$$v_{23} = (C_{11}C_{23} - C_{12}^2) / (C_{11}C_{22} - C_{12}^2) \quad (5)$$

$$G_{12} = C_{66} \quad (6)$$

$$G_{23} = C_{44} = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) = \frac{E_2}{2(1 + v_{23})} \quad (7)$$

همچنین هر یک از ضرایب ماتریس سختی نیز از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [18]:

$$C_{\alpha\beta} = \bar{\sigma}_\alpha = \frac{1}{V} \int \sigma_\alpha(x_1, x_2, x_3) dV, \quad \text{with } \epsilon_\beta^0 \quad (8)$$

در رابطه فوق  $\sigma$  تنش،  $\epsilon$  کرنش و  $V$  حجم کل است. از این رو به منظور 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. شرایط مرزی اعمالی در شکل 3 نشان داده شده است.

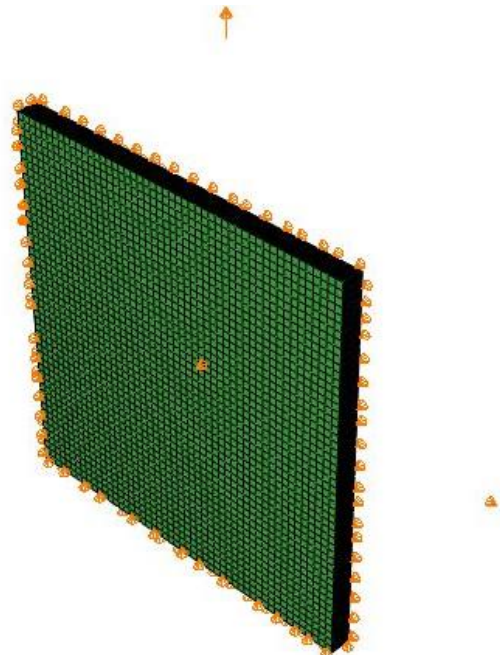


Fig. 3 Boundary conditions for unit cell

شکل 3 اعمال شرایط مرزی

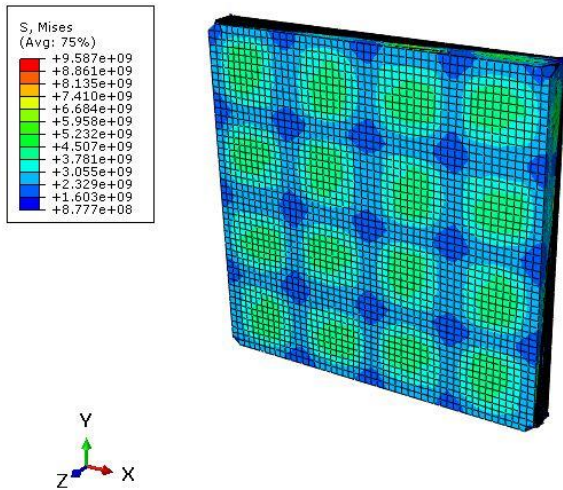


Fig. 7 Von Mises stress contours in meso model

شکل 7 کانتورهای تنش فون میسز مدل مزو

ضرایب مکانیکی استخراج شده از مدل مزو در جدول 2 مشخص شده است.

خواص استخراج شده برای مدل ماکرو استفاده شده و تحلیل آزمون کششی بر روی آن صورت گرفت. کانتورهای تنش فون میسز برای مدل ماکرو در شکل 8 نشان داده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی کامپوزیت کربن و کولار

Table 2 Mechanical properties of carbon and Kevlar composites

کولار	کربن	ضرایب مکانیکی
20.3	46.2	E11 (GPa)
20.3	46.2	E22 (GPa)
5.7	9.9	E33 (GPa)
0.12	0.055	12v
0.33	0.38	13v
0.33	0.38	23v
8.8	4.3	G12 (GPa)
4.1	2.6	G13 (GPa)
4.1	2.6	G23 (GPa)

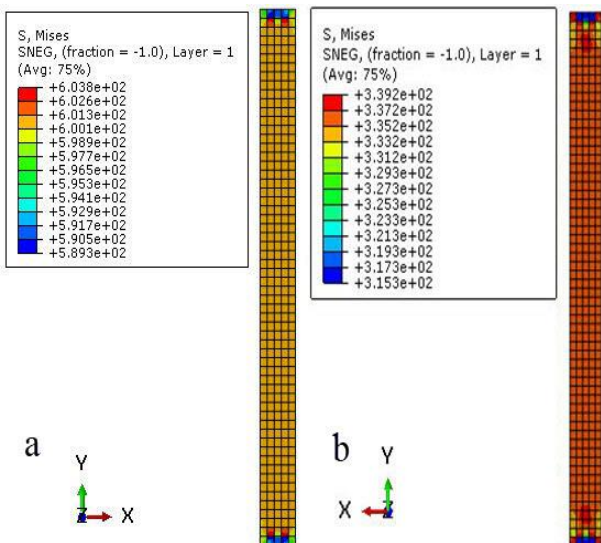


Fig. 8 Von Mises stress contours on macro model (a) carbon composite, (b) Kevlar composite

شکل 8 کانتورهای تنش فون میسز مدل ماکرو (a) کامپوزیت کربن، (b) کامپوزیت کولار

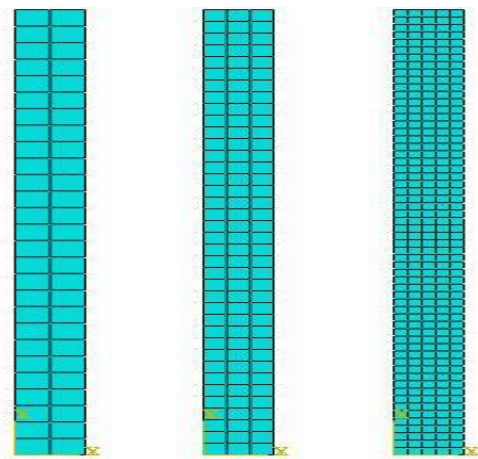


Fig. 5 Difference Meshing on macro model

شکل 5 مش‌ریزی‌های مختلف بر روی مدل ماکرو

پس از آن آزمون کشش بر روی مدل ماکرو صورت گرفت. به منظور فهم بهتر روند مدل‌سازی، فلوچارتی از روند تحقیق در شکل 6 مشخص شده است.

### 3- نتایج و بررسی

همان طور که ذکر شد به منظور بدست آوردن ضرایب مکانیکی کامپوزیت از مدل مزو، از کد پایتون استفاده شد به گونه‌ای که ضرایب از ضرب میانگین تنش در تغییرات حجمی المان‌ها بدست می‌آید. کانتورهای تنش فون میسز برای مدل مزو در شکل 7 نشان داده شده است. تنش فون میسز از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_f = \left[ \frac{(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) + (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) + (\sigma_3^2 - \sigma_2^2)}{2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

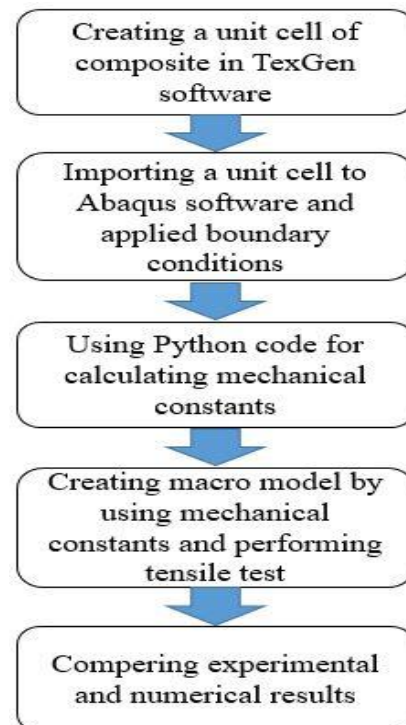


Fig. 6 Modelling flowchart

شکل 6 فلوچارت مدل‌سازی

جدول 4 نتایج بدست آمده از ابعاد مش مختلف

Table 4 Obtained results in different mesh sizes

اندازه مش	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
درشت	601.4	44.8
متوسط	603.5	45.7
ریز	603.8	46.2

همانطور که در جدول 4 مشخص است تغییرات نتایج بدست آمده از تغییر ابعاد مش کمتر از 1 درصد بوده که نشان از مستقل بودن نتایج بدست آمده نسبت به ابعاد مش و انتخاب مش بهینه جهت مدل سازی می باشد. استفاده از روش چند مقیاسی سبب می شود که خواص مکانیکی کامپوزیت با حجم محاسبات کمتری در ابعاد مزو صورت گرفته و در ابعاد ماکرو آزمایش اصلی بر روی نمونه صورت بگیرد. از این رو می توان از این روش به عنوان جایگزین کردن طراحی کل مدل در ابعاد مزو استفاده کرده و تنها یک سلول واحد از کامپوزیت طراحی شود.

#### 4- نتیجه گیری

باتوجه به نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر می توان دریافت که استفاده از روش چند مقیاسی سبب می شود که خواص مکانیکی کامپوزیت تار و پودی کربن و کولار به خوبی پیش بینی شده و بتوان رفتار کششی آن را مدل کرد. از طرفی استفاده از یک مدل در ابعاد مزو با طراحی تمامی اجزا که شامل ماتریس و قسمت تقویت کننده می شود سبب شده پیش بینی خواص مکانیکی کامپوزیت به خوبی صورت گیرد و حجم محاسبات برای مدل ماکرو کاهش یابد و بتوان آزمون های مختلف را برای پیش بینی رفتار مکانیکی کامپوزیت روی آن انجام داد.

#### 5- مراجع

- [1] Bilisik, K., "Multiaxis 3d Weaving: Comparison of Developed Two Weaving Methods (Tube-Rapier Weaving Versus Tube-Carrier Weaving) and Effects of Bias Yarn Path to the Preform Properties" *Fibers and Polymers*, Vol. 11, No. 1, pp. 104-114, 2010.
- [2] Hufenbach, W., Böhm, R., Kroll, L. and Langkamp, A., "Theoretical and Experimental Investigation of Anisotropic Damage in Textile-Reinforced Composite Structures" *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 40, No. 6, pp. 519-532, 2004.
- [3] Mouritz, A., Bannister, M., Falzon, P. and Leong, K., "Review of Applications for Advanced Three-Dimensional Fibre Textile Composites" *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 30, No. 12, pp. 1445-1461, 1999.
- [4] Dixit, A. and Mali, H. S., "Modeling Techniques for Predicting the Mechanical Properties of Woven-Fabric Textile Composites: A Review" *Mechanics of composite Materials*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-20, 2013.
- [5] Crookston, J., Long, A. and 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.
- [6] Anzelotti, G., Nicoletto, G. and Riva, E., "Mesomechanic Strain Analysis of Twill-Weave Composite Lamina under Unidirectional in-Plane Tension" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 8, pp. 1294-1301, 2008.
- [7] EBRAHIMNEZHAD, K. H., ESLAMI, F. R., KHORSAND, H. and ABBAS, B. K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites" *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-28, 2015.

به منظور مقایسه رفتار کششی مدل و نمونه ی آزمایشگاهی، نمودار تنش- کرنش مستخرج از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که در نمودار شکل 9 نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل 9 مشخص است نمودارهای مدل سازی با نمودارهای آزمایش انطباق مناسبی دارد که خود نشان دهنده ی نزدیک بودن خواص مکانیکی بدست آمده از مقیاس مزو با خواص مکانیکی کل کامپوزیت می باشد. خواص کششی کامپوزیت بدست آمده از آزمایش به همراه نتایج مدل سازی در جدول 3 مشخص شده است.

بر طبق جدول 3 خطای بدست آمده از نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی کم بوده که نشان از صحت مدل سازی به روش چند مقیاسی در این تحقیق می باشد. علت اختلاف بوجود آمده در جدول 3 را می توان چسبندگی کامل بین الیاف و ماتریس در مدل سازی 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 مدل سازی پایین تر باشد. از طرفی مش ریزی و محاسبات اجزا محدود خود نیز سبب ایجاد خطایی جزئی در محاسبات می کند که همین امر نیز این اختلاف بین نتایج ایجاد کرده است. همان طور که در بخش قبل ذکر شد به منظور بررسی اثر مش بر روی همگرایی حل سه نوع مش برای مدل ماکرو استفاده شد که نتایج بدست آمده در جدول 4 نشان داده شده است.

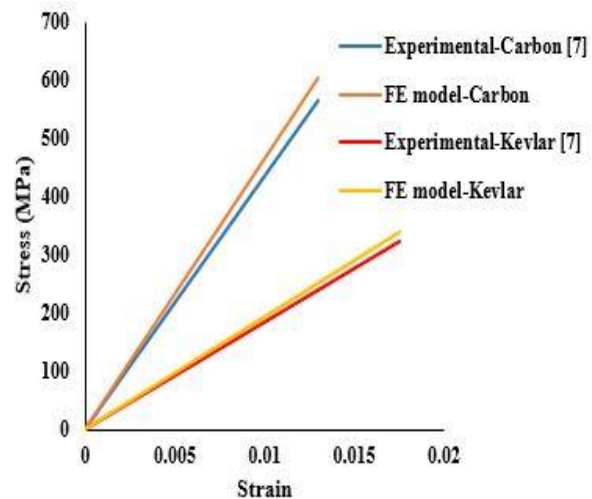


Fig. 9 Stress-strain curve for experimental and finite element model

شکل 9 نمودار تنش - کرنش آزمایش و مدل اجزا محدود

جدول 3 خواص کششی بدست آمده از آزمایش و مدل سازی

Table 3 Obtained tensile properties of experiment and modeling

مدول کششی کامپوزیت کولار (GPa)	استحکام کششی کامپوزیت کولار (MPa)	مدول کششی کامپوزیت کربن (GPa)	استحکام کششی کامپوزیت کربن (MPa)	نمونه
19.6	322.44	42.45	566.4	آزمایشگاهی [7]
20.3	339.2	46.2	603.8	مدل سازی
3.5	5.1	8.8	6.6	خطا (%)

- [8] Naik, N. and Ganesh, V., "Prediction of on-Axes Elastic Properties of Plain Weave Fabric Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 135-152, 1992.
- [9] Ng, S.-P., Tse, P.-C. and Lau, K.-J., "Numerical and Experimental Determination of in-Plane Elastic Properties of 2/2 Twill Weave Fabric Composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 735-744, 1998.
- [10] Sherburn, M., "Geometric and Mechanical Modelling of Textiles" Thesis, University of Nottingham, 2007.
- [11] Nilakantan, G., Wetzel, E. D., Bogetti, T. A. and Gillespie, J. W., "A Deterministic Finite Element Analysis of the Effects of Projectile Characteristics on the Impact Response of Fully Clamped Flexible Woven Fabrics" *Composite Structures*, Vol. 95, pp. 191-201, 2013.
- [12] Dixit, A., Misra, R. and Mali, H., "Finite Element Analysis of Quasi-Static Indentation of Woven Fabric Textile Composites Using Different Nose Shape Indenters" *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 46, No. 10, pp. 1014-1028, 2015.
- [13] Dixit, A., Mali, H. S. and Misra, R., "Unit Cell Model of Woven Fabric Textile Composite for Multiscale Analysis" *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 352-358, 2013.
- [14] Li, S. and Wongsto, A., "Unit Cells for Micromechanical Analyses of Particle-Reinforced Composites" *Mechanics of materials*, Vol. 36, No. 7, pp. 543-572, 2004.
- [15] Sharma, R., Mahajan, P. and Mittal, R. K., "Elastic Modulus of 3d Carbon/Carbon Composite Using Image-Based Finite Element Simulations and Experiments" *Composite Structures*, Vol. 98, pp. 69-78, 2013.
- [16] Lin, H., Brown, L. P. and Long, A. C., "Modelling and Simulating Textile Structures Using Texgen" in *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 44-47.
- [17] Sockalingam, S., Gillespie, J. W. and Keefe, M., "On the Transverse Compression Response of Kevlar Km2 Using Fiber-Level Finite Element Model" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 13, pp. 2504-2517, 2014/06/15/, 2014.
- [18] 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.
- [19] Green, S. D., Matveev, M. Y., Long, A. C., Ivanov, D. and Hallett, S. R., "Mechanical Modelling of 3d Woven Composites Considering Realistic Unit Cell Geometry" *Composite Structures*, Vol. 118, pp. 284-293, 2014/12/01/, 2014.
- [20] Tsukrov, I., Bayraktar, H., Giovinazzo, M., Goering, J., Gross, T., Fruscello, M. and Martinsson, L., "Finite Element Modeling to Predict Cure-Induced Microcracking in Three-Dimensional Woven Composites" *International journal of fracture*, Vol. 172, No. 2, pp. 209-216, 2011.
- [21] Zeng, X., Brown, L. P., Endruweit, A., Matveev, M. and Long, A. C., "Geometrical Modelling of 3d Woven Reinforcements for Polymer Composites: Prediction of Fabric Permeability and Composite Mechanical Properties" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 56, pp. 150-160, 2014/01/01/, 2014.