



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iut.ac.ir



مطالعه عددی اثر تقویت آهار الیاف شیشه توسط نانولوله‌های کربنی با توزیع تصادفی بر روی خواص مکانیکی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

احسان حیاتی¹، مجید صفرآبادی^{2*}، مهدی مقیمی زند³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، msafarabadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 98/03/01

پذیرش: 98/08/06

کلید واژگان:

تحلیل المان محدود

آهار

فاز مشترک

مدول الاستیسیته عرضی

استحکام کششی عرضی

چکیده

در این مطالعه، اثر تقویت مکانیکی آهار الیاف شیشه بر روی خواص مکانیکی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، به جهت تأثیر زیاد این ناحیه بر روی خواص مکانیکی کلی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، بررسی شده است. برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، به ترتیب یک المان حجمی نماینده و یک مدل سه‌بعدی پوسته در نرم‌افزار تجاری آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. خواص مکانیکی آهار به صورت ناهمگن و غیریکنواخت در طول ضخامت آن در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تقویت آهار با استفاده از یک روش توزیع تصادفی و استفاده از نانولوله‌های کربنی انجام گرفته است. در این شبیه‌سازی، طول، قطر و کسر حجمی‌های مختلف برای نانولوله‌های کربنی در تقویت آهار در نظر گرفته شده است و سپس نتایج مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی موجود، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی آهار با خواص مکانیکی غیریکنواخت نسبت به آهار با خواص مکانیکی ثابت، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین، نشان داده شده است که افزایش طول نانولوله‌های کربنی و یا کاهش قطر آن‌ها، که در آهار توزیع شده‌اند، باعث بهبود مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌شود.

Numerical study of the effect of glass fiber sizing reinforcement by randomly distributed CNTs on the glass/epoxy composite transverse mechanical properties

Ehsan Hayati, Majid Safarabadi*, Mahdi Moghimi-Zand

1- School of mechanical engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Keywords

Finite Element Analysis
Sizing
Interphase
Transverse elastic modulus
Transverse tensile strength

Abstract

In this study, the effect of mechanical reinforcement of glass fiber sizing on the transverse mechanical properties of the glass/epoxy composite, due to the significant impact of this region on the overall mechanical properties of reinforced composites with fibers, has been investigated. To predict the transverse elastic modulus and tensile strength of the glass/epoxy composite, a representative volume element (RVE) and a three-dimensional shell model are simulated respectively, in ABAQUS commercial software. Sizing mechanical properties are held non-homogeneous and non-uniform along its thickness in the simulation. Furthermore, sizing reinforcement is done by a Random-Distribution method using carbon nanotubes (CNTs). Different lengths, diameters and, volume fractions are considered for the CNTs in sizing reinforcement in this simulation, and then the results are compared. The comparison between the results obtained from simulation and available experimental data illustrates that the sizing simulated by non-uniform mechanical properties provides more precise results than the sizing assumed by constant mechanical properties. Also, it is shown that increasing in CNTs length or decreasing in their diameter, which are distributed in sizing, would lead to improving the transverse elastic modulus and tensile strength of the glass/epoxy composite.

please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Hayati, E. Safarabadi, M. and Moghimi-Zand, M. , "Numerical study of the effect of glass fiber sizing reinforcement by randomly distributed CNTs on the glass/epoxy composite transverse mechanical properties", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 511-524, 2020.

1- مقدمه

لوله‌های کربنی که این نانو لوله‌های کربنی به آهار الیاف افزوده شده است ضروری می‌باشد.

در این مطالعه، اولاً، با شبیه‌سازی عددی یک المان حجمی نماینده سه-بعدی در محیط نرم‌افزار تجاری آباکوس، متشکل از دو استوانه هم‌مرکز و یک مکعب، به نحوی که دو استوانه درون مکعب قرار گرفته و هر سه هم‌مرکز می‌باشند؛ در گام نخست، تأثیر خواص مکانیکی ناهمگن نسبت به حالت همگن برای آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته و در گام بعد، اثرات کسر حجمی، طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی بررسی شده است. دوماً، برای بررسی اثرات کسر حجمی، طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی استحکام عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی از یک مدل سه‌بعدی پوسته⁵ استفاده شده است. لازم به ذکر است که منظور از آهار در شبیه‌سازی، همان فاز مشترک است.

2- المان حجمی نماینده سه‌بعدی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته عرضی

برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، دو استوانه و یک مکعب، به نحوی که دو استوانه درون مکعب قرار گرفته و هر سه هم‌مرکز می‌باشند، به عنوان المان حجمی نماینده در نظر گرفته شده است (شکل 1).

المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده از سه جزء اصلی تشکیل شده است. این اجزاء از داخلی‌ترین به بیرونی‌ترین جزء نمایانگر الیاف، آهار و ماتریس می‌باشند. جداول 1 و 2 به ترتیب ابعاد و خواص مکانیکی در نظر گرفته شده برای این اجزاء در تحلیل عددی انجام گرفته را ارائه می‌دهند.

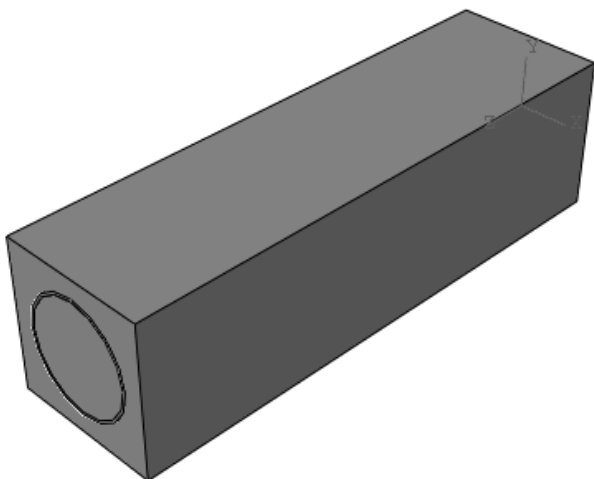


Fig. 1 Simulated RVE to determine the transverse elastic modulus

شکل 1 المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای تعیین مدول الاستیسیته عرضی

سه نوع رایج از ماده خام نانولوله کربنی¹ شامل نانولوله‌های کربنی تک‌جداره²، نانولوله‌های کربنی چندجداره³ و نانو الیاف‌های کربنی⁴ می‌باشند [1]. خواص مکانیکی این نانوذرات شامل مدول الاستیسیته، استحکام کششی و نسبت منظر (نسبت طول به قطر) بالا در کنار رسانایی الکتریکی و گرمایی [2]، علاقه به این مواد را در افزودن آن‌ها به دو جزء اصلی تشکیل‌دهنده کامپوزیت‌ها شامل ماتریس و آهار، به جهت بهبود عملکرد مکانیکی کلی کامپوزیت‌ها افزایش داده است [3-5] (منظور از آهار پوشش الیاف در حین ساخت است).

با توجه به خواص متفاوت آهار نسبت به ماتریس و الیاف تقویت‌کننده و نقش آن در انتقال تنش از ماتریس به الیاف [6-7]، مطالعات آزمایشگاهی بسیاری بر روی افزودن این نانوذرات در آهار انجام گرفته است [7-9]. نتایج تجربی نشان داده است که افزودن این نانوذرات به آهار می‌تواند باعث افزایش اصطکاک و درگیری مکانیکی بین الیاف و ماتریس شده و لذا جدایش بین این دو را بعد از ایجاد ترک در فاز مشترک سخت‌تر کند و در واقع انرژی شکست در این ناحیه را افزایش دهد (منظور از فاز مشترک ناحیه فازی بین الیاف و ماتریس پس از ساخت کامپوزیت است). علاوه بر این، افزایش استحکام برشی درون لایه‌ای، افزایش مقاومت نسبت به سایش و غیره از دیگر مزیت‌های افزودن این نانوذرات به آهار است. بنابراین، به جای استفاده از این نانوذرات در تقویت ماتریس پلیمری، می‌توان از مقادیر بسیار کمتر از آن در آهار استفاده کرد و حتی نتایج بهتری را مشاهده کرد چراکه اساساً اولین آسیب‌ها در فاز مشترک به وجود می‌آیند و رفته‌رفته به نقاط مختلف کامپوزیت انتشار می‌یابند. بنابراین، با تقویت این ناحیه می‌توان قبل از انتشار آسیب به زمینه در برابر آن مقاومت کرد.

با توجه به اهمیت افزودن نانو لوله‌های کربنی در آهار، می‌توان از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از روش المان محدود برای پیش‌بینی خواص و رفتار کلی کامپوزیت‌هایی که آهار الیاف آنها با استفاده از نانو لوله‌های کربنی تقویت شده است کمک گرفت. زیرا هر تغییری در پارامترهای نانو لوله‌های کربنی (شامل طول، قطر و کسر حجمی) که به آهار افزوده می‌شوند، بصورت آزمایشگاهی نیازمند اندازه‌گیری‌های اضافی برای تعیین رفتار کلی سازه و یا نمونه ماکروسکوپی است، که این عمل همراه با صرف هزینه و زمان می‌باشد. در همین راستا با مروری بر مطالعات عددی پیشین [10-12]، که به بررسی اثرات جهت‌گیری، قطر، طول و کسر حجمی نانوذرات بر روی خواص مکانیکی و همچنین خواص حرارتی نانو کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند، مشاهده می‌شود که در این مطالعات با استفاده از چندین نوع المان حجمی نماینده⁵ و با استفاده از روش المان محدود، تنها خواص مکانیکی و حرارتی نانو کامپوزیت‌های دو فاز، متشکل از یک فاز تقویت‌شونده و یک فاز تقویت‌کننده که نانوذرات می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. هر چند، در برخی مطالعات عددی دیگر [13-14]، از این نانو ذرات در نانو کامپوزیت‌های سه‌فاز، متشکل از الیاف، ماتریس و نانو لوله‌های کربنی استفاده شده است اما در این مطالعات نیز تنها اثر افزودن نانو لوله‌های کربنی در ماتریس، بر روی رفتار کلی کامپوزیت بررسی شده است و اثر افزودن این نانو ذرات در آهار بر روی رفتار کلی کامپوزیت مشاهده نمی‌شود. بنابراین، تجزیه و تحلیل عددی و به‌ویژه تکنیک‌های میکرومکانیکی برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های چهار فاز، متشکل از الیاف، آهار، ماتریس و نانو

⁴ CNFs
⁵ RVE
⁶ Shell

¹ CNT
² SWCNTs
³ MWCNTs

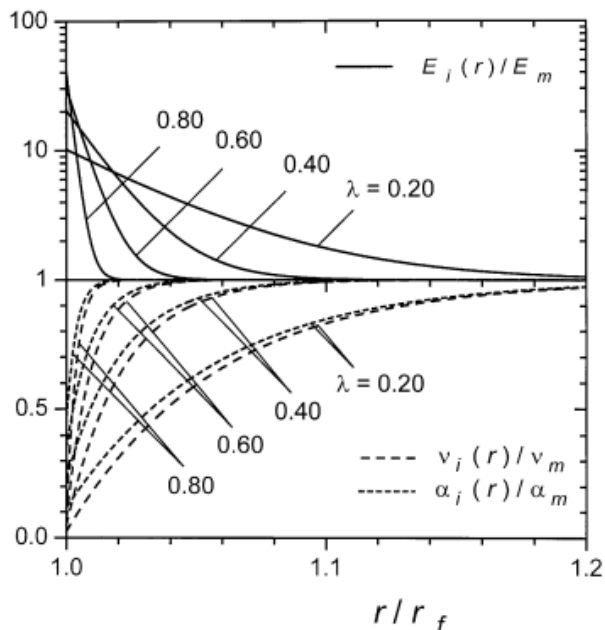


Fig. 2 Material properties variations in the sizing region [17]

شکل 2 تغییرات خواص ماده در ناحیه آهار [17]

همچنین، برای اختصاص دادن مدول الاستیسیته به آهار (به‌عنوان یک خاصیت غیر خطی در طول ضخامت آهار) در آباکوس، در ابتدا، هندسه آهار در طول ضخامت آن پارتیشن زده شده و به ترتیب به صورت 5، 10 و 15 قسمت با ضخامت ثابت در نظر گرفته شده است. سپس، با توجه به تعداد قسمت‌ها در هر حالت، یک مقدار متوسط مدول الاستیسیته برای هر قسمت با استفاده از نمودار $\lambda=0.6$ در نظر گرفته شده است.

روش کار به این صورت بوده است که محور افقی نمودار $\lambda=0.6$ برابر با تعداد قسمت‌های آهار در هر حالت تقسیم شده و سپس مقدار میانگین مدول الاستیسیته برای هر قسمت یا توجه به مقادیر محور عمودی این نمودار محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقدار مدول الاستیسیته آهار در جدول 2، برای حالتی گزارش شده است که آهار در طول ضخامت خود تنها به صورت یک قسمت در نظر گرفته شده است.

ریانو و همکاران [18] در مطالعه خود نشان دادند که تغییرات ضریب پواسون بین 0.2 تا 0.5 برای آهار تأثیر بسیار ناچیزی بر مدول الاستیسیته عرضی به دست آمده از شبیه‌سازی دارد. به همین دلیل در شبیه‌سازی حاضر مقدار ضریب پواسون برای کل ناحیه آهار برابر با 0.3 لحاظ شده است. در این شبیه‌سازی اتصال بین الیاف و آهار و همچنین اتصال بین آهار و ماتریس در المان حجمی نماینده به صورت کامل در نظر گرفته شده است، به این معنی که از شرط قید گره³ استفاده شده است. شرایط مرزی و بارگذاری برای این المان حجمی نماینده در شکل 3 نمایش داده شده است. شرایط مرزی در این المان حجمی نماینده به گونه‌ای است که شرط تقارن³ برای تمامی سطوح به جز سطح اعمال نیرو لحاظ گردیده است. با توجه به اهمیت چگونگی مش‌ریزی بر روی المان حجمی نماینده و تأثیر مستقیم آن بر روی نتایج عددی، در این شبیه سازی ابتدا اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده (شامل الیاف، آهار و ماتریس) به گونه‌ای مناسب پارتیشن زده شدند و سپس اعمال مش و همچنین حساسیت مش انجام گرفت.

جدول 1 ابعاد اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده

Table 1 The RVE components dimensions

الیاف	آهار		ماتریس	
شعاع	طول	ضخامت	اضلاع وجه مربعی	طول
60 μm	60 μm	0.3 μm	determined	60 μm

جدول 2 خواص مکانیکی اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده

Table 2 The RVE components mechanical properties [15,16]

جزء	نوع	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
الیاف	E glass 92145	73	0.25
آهار	556/917 A1128	52.7	0.3
ماتریس	Epon 828 (TETA hardner)	3.4	0.3

طول سه جزء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده پنج برابر قطر الیاف در نظر گرفته شده است (جدول 1). این انتخاب به این دلیل انجام گرفته است که طول بیشتر این اجزاء تنها حجم محاسبات را افزایش داده و تأثیر ناچیزی بر روی نتایج عددی خواهد داشت.

ضمناً با توجه به کسر حجمی الیاف و همچنین ضخامت آهار، اندازه اضلاع وجه مربعی هندسه ماتریس در المان حجمی نماینده برابر با مقدار مشخصی به دست می‌آید.

در این مطالعه، برای تعیین ضخامت و خواص مکانیکی آهار از شکل 2 که توسط پاپانیکولا و همکاران [17] ارائه گردیده است استفاده شده است.

در شکل 2، محور افقی نمایانگر نسبت شعاع خارجی آهار به شعاع الیاف و محور عمودی نمایانگر نسبت مدول الاستیسیته آهار به مدول الاستیسیته ماتریس می‌باشد. با توجه به مقدار راندمان اتصال¹ چهار نمودار ارائه گردیده است.

راندمان اتصال نشان دهنده میزان کیفیت چسبندگی آهار به الیاف است. نمودار $\lambda=0.80$ برای قوی‌ترین حالت و نمودار $\lambda=0.20$ برای ضعیف‌ترین حالت چسبندگی آهار و الیاف، با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی به دست آمده‌اند.

در این مرحله برای شبیه‌سازی هندسه آهار از نمودار $\lambda=0.60$ به جهت تطابق خوب نتایج، استفاده شده است. بنابراین مقدار شعاع خارجی هندسه آهار برابر با 6.3 μm (رابطه 1)) به دست می‌آید. در نتیجه ضخامت آهار برابر با 0.3 μm محاسبه می‌گردد.

$$\frac{r_s}{r_f} = 1.05 (\text{diagram} : \lambda = 0.6) \rightarrow r_s = 6.3 \mu\text{m} \quad (1)$$

¹ Bonding efficiency (λ)

² Tie constraint

³ Symmetry constraint

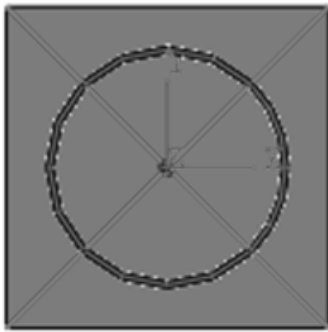


Fig. 4 Representation of the two fiber and matrix radial directions on the RVE

شکل 4 نمایش راستای شعاعی الیاف و ماتریس بر روی المان حجمی نماینده

در این شبیه‌سازی، المان‌ها از نوع المان هشت گره‌ای مکعبی شکل سه-بعدی با فرمول بندی کاهش یافته و با فرمولاسیون⁵ سی 3 دی 8 آر² می-باشند. همچنین، از بین دو نوع دسته هندسی³ یعنی درجه اول⁴ و درجه دوم⁵، درجه اول به دلیل زمان حل کوتاه‌تر و همگرایی مناسب نتایج مورد استفاده قرار گرفته است.

3- مدل سه‌بعدی پوسته برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی

برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت عددی، نیاز است که از معیار تخریب هاشین در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردد. با توجه به اینکه المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای تعیین مدول الاستیسیته عرضی از نوع توپر⁶ می‌باشد، نمی‌توان از معیار هاشین برای آن و در نتیجه تعیین استحکام کششی عرضی استفاده کرد. بنابراین، برای محاسبه استحکام کششی عرضی، تحلیلی بر پایه ماکرومکانیک در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت. بدین صورت که یک مدل سه‌بعدی پوسته با لایه‌چینی 10 لایه 90 درجه (ضخامت کل 2mm) و ابعاد 90mm*25mm تحت بارگذاری کششی عرضی قرار گرفته است. شکل 6 مدل سه‌بعدی پوسته و همچنین شرایط مرزی آن را که به صورت⁷ متقارن در راستای طول پوسته⁷ شبیه‌سازی شده است نشان می‌دهد.



Fig. 6 Shell model along with its boundary and loading conditions

شکل 6 مدل پوسته به همراه شرایط مرزی و بارگذاری آن

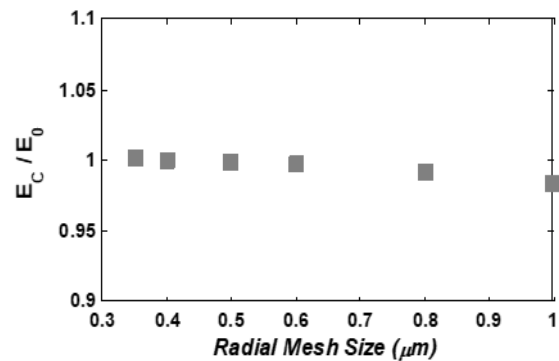


Fig. 5 Effect of mesh size in fiber and matrix radial directions on the numerical results

شکل 5 تأثیر اندازه مش در راستای شعاعی الیاف و ماتریس بر روی نتایج عددی

تغییر اندازه مش در راستای شعاعی (شکل 4) نسبت به راستای طولی و محیطی اجزاء تشکیل دهنده المان حجمی نماینده، دارای حساسیت بیشتری بر روی نتایج عددی می‌باشد. از این رو، در شکل 5، تأثیر اندازه مش در راستای شعاعی دو جزء الیاف و ماتریس بر روی نتایج عددی نشان داده شده است. در ضمن، تعداد مش برای آهار در راستای شعاعی، متناسب با تعداد قسمت‌های آن در نظر گرفته شده است.

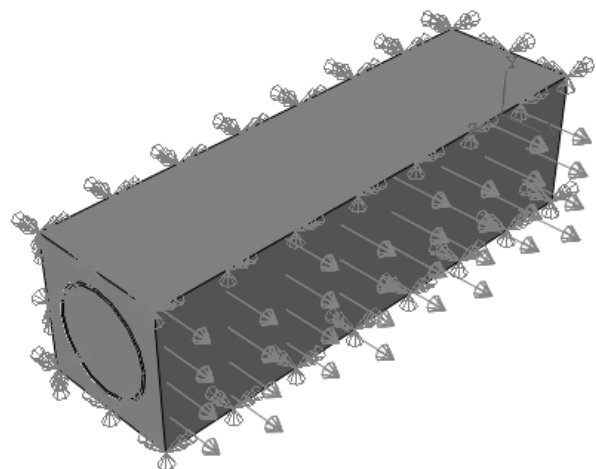


Fig. 3 Representation of the boundary and loading conditions on the RVE

شکل 3 نمایش شرایط مرزی و بارگذاری بر روی المان حجمی نماینده

شکل 5 نشان می‌دهد که حداقل اندازه مش 0.5 μm در راستای شعاعی المان حجمی نماینده برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر لازم است. در این شکل مدول الاستیسیته مرجع¹ نمایانگر مقدار همگرایی می‌باشد. تعداد مش کلی ریخته شده بر روی المان حجمی نماینده، در حالتی که آهار در راستای شعاعی به 15 قسمت تقسیم شده است، حدود 70000 المان می‌باشد.

⁵ Quadratic
⁶ Solid
⁷ XSymmetry

¹ E_0
² C3D8R
³ Geometric Order
⁴ Linear

جدول 5 مقادیر انرژی شکست در شبیه‌سازی [21]

Table 5 The fracture energy values in simulation [21]

$G_{m,c}$ (N/m)	$G_{m,c}$ (N/m)	$G_{f,c}$ (N/m)	$G_{f,c}$ (N/m)
1000	1000	12500	12500

نوع حلگر برای حل این مسئله از نوع دینامیک¹ می‌باشد. در نهایت پس از انجام حساسیت مش برای مدل سه‌بعدی پوسته نتایج گزارش شده‌اند. شکل 7، ضمن نمایش حساسیت مش انجام‌شده بر روی مدل سه‌بعدی پوسته نشان می‌دهد که حداقل اندازه مش کلی $0.6 \mu\text{m}$ برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر لازم است. در این شکل نیرو در لحظه شکست مرجع² نمایانگر مقدار همگرایی می‌باشد. تعداد مش کلی ریخته شده بر روی مدل سه‌بعدی پوسته حدود 10000 المان می‌باشد. همچنین، در این شبیه‌سازی المان‌ها از نوع المان چهار گره‌ای با فرمول‌بندی کاهش یافته و با فرمولاسیون³ اس 4 آر³ می‌باشند.

4- تقویت مکانیکی آهار

در این مطالعه برای تقویت مکانیکی آهار، خواص معادل آهار تقویت‌شده، با استفاده از روش توزیع تصادفی به دست آمده است و سپس این مقادیر برای ناحیه آهار، چه در المان حجمی نماینده شبیه‌سازی شده برای محاسبه مدول الاستیسیته عرضی و چه در روش ماکرومکانیک به کار گرفته شده برای محاسبه استحکام کششی عرضی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش توزیع تصادفی انجام‌گرفته، نانولوله‌های کربنی به صورت توپیر شبیه‌سازی شده‌اند. بنابراین، پیش از توضیح مراحل انجام‌گرفته در روش توزیع تصادفی، بیان نحوه شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی لازم به نظر می‌رسد.

4-1- معادل‌سازی نانولوله‌های کربنی توخالی به توپیر

ساختار یک نانولوله کربنی را می‌توان به صورت یک ورقه گرافین که به شکل یک استوانه درآمده است در نظر گرفت [10]. نانولوله‌های کربنی با توجه به تعداد دیواره‌هایشان به دو گروه نانولوله‌های کربنی تک جداره و نانولوله‌های کربنی چند جداره تقسیم می‌شوند. بنابراین، از آنجایی که این نانو ذرات به شکل استوانه‌های توخالی می‌باشند برای شبیه‌سازی آن‌ها به شکل استوانه توپیر نیاز به یک معادل‌سازی می‌باشد.

با فرض وجود نانولوله‌های کربنی چندجداره که انتقال بار از دیواره بیرونی به دیواره داخلی آن‌ها ناچیز است، تحمل بار تنها به وسیله دیواره بیرونی آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین برای معادل‌سازی این نانو ذرات توخالی به نانو ذرات توپیر (شکل 8)، می‌توان از رابطه 2 استفاده نمود [10].

$$E_{eqv} = \frac{4t}{D} E_{NT} \quad (2)$$

در این رابطه t و D به ترتیب ضخامت لایه بیرونی و قطر خارجی نانولوله کربنی هستند. همچنین eqv و NT به ترتیب به نانولوله و معادل آن اشاره دارند.

جدول 3 خواص مکانیکی معادل را برای هر یک از تک لایه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد. در این جدول به جز E_{22} سایر خواص مکانیکی از میکرومکانیک به دست آمده‌اند. با توجه به اینکه داده‌های جدول 3 تقریباً با داده‌های موجود در مرجع [20] یکسان می‌باشند، لذا سایر خواص مکانیکی معادل برای تک‌لایه‌های کامپوزیتی که به جهت استفاده از معیار هاشین مورد نیاز می‌باشند از این مرجع مورد استفاده قرار گرفته است. جدول 4 این مقادیر را ارائه می‌دهد.

همچنین مقادیر انرژی شکست برای هر یک از تک لایه‌های کامپوزیتی در شبیه‌سازی به صورت جدول 5 در نظر گرفته شده است [21].

جدول 3 خواص مکانیکی برای هر تک لایه با استفاده از رویکرد میکرومکانیک
Table 3 Mechanical properties for a single layer using micromechanical approach

مقدار	تعریف	خاصیت
31.81 GPa	مدول الاستیسیته در جهت طولی	E_{11}
9.05 GPa [24]	مدول الاستیسیته در جهت عرضی	E_{22}
0.0797	ضریب پواسون 21	ν_{21}
2.27 GPa	مدول برشی درون صفحه	G_{12}

جدول 4 دیگر خواص مکانیکی برای هر تک لایه در شبیه‌سازی عددی [20]
Table 4 Other mechanical properties for a single layer in numerical simulation [20]

مقدار	تعریف	خاصیت
1800 kg/m ³	چگالی	ρ
3 GPa	مدول برشی برون صفحه	G_{23}
798 MPa	استحکام کششی طولی	X_t
480 MPa	استحکام فشاری طولی	X_c
40 MPa	استحکام کششی عرضی	Y_t
140 MPa	استحکام فشاری عرضی	Y_c
70 MPa	استحکام برشی درون صفحه	S_c

¹ Dynamic/Explicit
² F_0

³ S4R

بنابراین با توجه به طول نانولوله‌های کربنی در هر حالت، طول اضلاع مکعب مربع پنج برابر طول نانولوله‌های کربنی در نظر گرفته شده است. شکل 9، شبیه‌سازی انجام‌گرفته برای یکی از حالت‌ها را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی اتصال بین نانولوله‌های کربنی و محیط آهار به صورت کامل در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی در شکل 10 نمایش داده شده است.

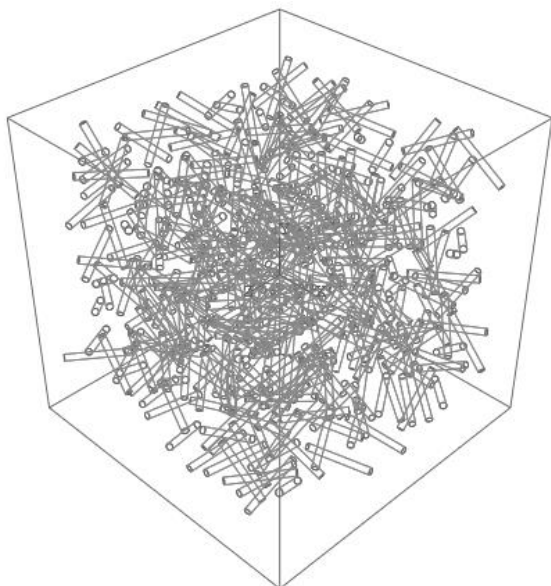


Fig. 9 Simulation of the CNTs random distribution in a region possessing the sizing mechanical properties

شکل 9 شبیه‌سازی توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در ناحیه‌ای با خواص مکانیکی آهار

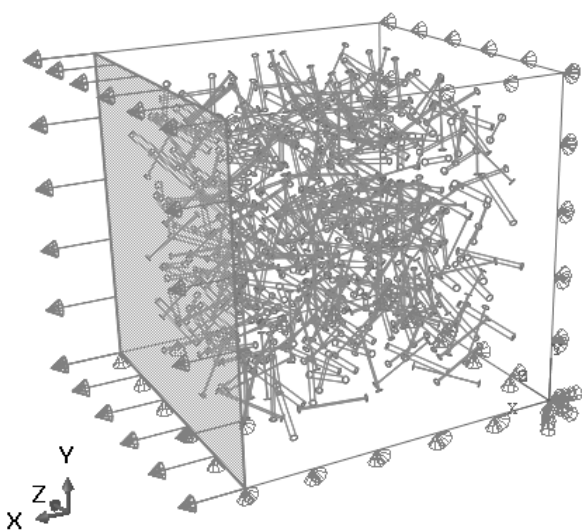


Fig. 10 Representation of the boundary and loading conditions for square-cube model

شکل 10 نمایش شرایط مرزی و بارگذاری برای مدل مکعب مربعی

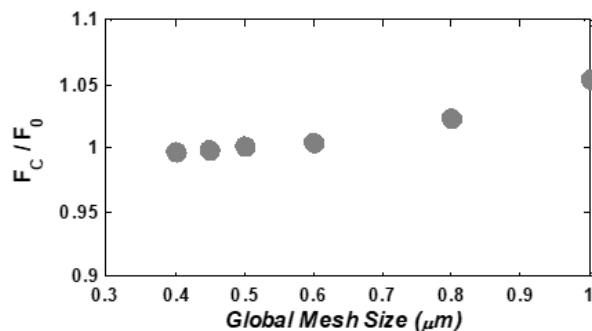


Fig. 7 Effect of overall mesh size on the numerical results

شکل 7 اثر اندازه مش کلی بر روی نتایج عددی

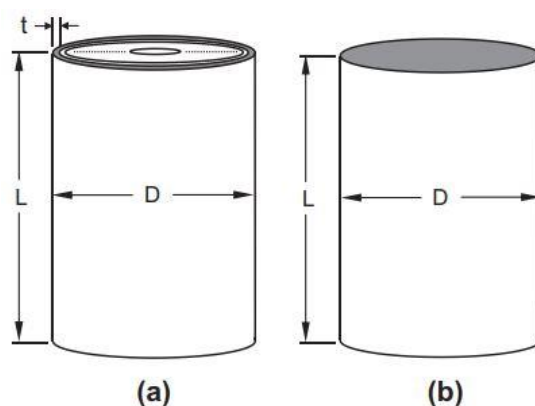


Fig. 8 Schematic of (a) MWNT and (b) equivalent solid fiber [10]

شکل 8 شماتیک (a) نانولوله کربنی چندجداره (b) الیاف توپر معادل [10]

بنابراین، در روش توزیع تصادفی انجام‌گرفته، تنها مدول الاستیسیته برای نانولوله‌های کربنی توپر با همان طول و قطر خارجی نانولوله‌های کربنی توخالی معادل‌سازی شده است.

4-2- روش توزیع تصادفی

در این روش، توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در محیطی با خواص مکانیکی آهار در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. محیط در نظر گرفته‌شده به صورت یک مکعب مربع می‌باشد.

هر چه طول اضلاع مکعب مربع بیشتر باشد، توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی در این محیط به شکل مناسب‌تری اتفاق افتاده و نتایج عددی دقت بیشتری خواهند داشت. با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در این مطالعه و همچنین مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که اگر طول اضلاع مکعب مربع، پنج برابر بزرگ‌ترین بعد نانولوله‌های کربنی (یعنی طول آن‌ها) در نظر گرفته شوند نتایج عددی از دقت خوبی برخوردار خواهند بود. مقادیر بیشتر از این برای اضلاع مکعب مربع، حجم محاسبات را بسیار افزایش داده و تأثیر ناچیزی بر روی نتایج خواهد داشت.

همچنین برای محاسبه استحکام کششی عرضی، با استفاده از خواص معادل تقویت‌شده و روش میکرومکانیک می‌توان داده‌های موجود در جدول 3 را برای مدل سه‌بعدی پوسته در حالی که تقویت آهار صورت گرفته است به دست آورد (تنها مقدار E22 از نتایج به‌دست‌آمده در همین شبیه‌سازی استفاده شده است). همان‌گونه که قبلاً بیان شد برای محاسبه استحکام کششی عرضی نیاز به داده‌هایی همانند جدول 4 برای حالتی که تقویت آهار صورت گرفته است می‌باشد.

با توجه به نوع آزمایش شبیه‌سازی‌شده در این مطالعه یعنی آزمایش کشش عرضی، نتایج عددی نشان می‌دهند که تنها اصلاح مقدار استحکام کششی عرضی² (از میان خواص مکانیکی در جدول 4) تک لایه با آهار تقویت نشده برای تک لایه با آهار تقویت‌شده، برای محاسبه استحکام نهایی کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار تقویت‌شده کافی می‌باشد. بنابراین مقدار استحکام کششی عرضی برای تک لایه کامپوزیتی با آهار تقویت‌شده از رابطه 3 محاسبه می‌گردد و سایر خواص مکانیکی معادل، یکسان با مقادیر موجود در جدول 4 در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{Y_t}{E_{22t}} (Non - Reinf orced) = \frac{Y_t}{E_{22t}} (Reinf orced) \quad (3)$$

رابطه 3 به این دلیل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که مقادیر جابه‌جایی در لحظه شکست برای هر دو کامپوزیت شیشه/اپوکسی با و بدون تقویت آهار، همان‌گونه که نتایج عددی نشان می‌دهند یکسان است. لازم به ذکر است که مقادیر انرژی شکست برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت تقویت آهار یکسان با مقادیر جدول 5 در نظر گرفته شده است.

6- مطالعه پارامتریک

در این مطالعه، هدف بررسی تأثیر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به‌صورت تصادفی در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌باشد. از این‌رو، ابعاد نانو ذرات کربنی در شبیه‌سازی مطابق با جداول 6 و 7 در نظر گرفته شده است. همچنین در بررسی انجام‌گرفته توزیع تصادفی نانو ذرات در کسرهای حجمی 1%، 2% و 3% انجام شده است.

باید در نظر داشت که ابعاد و همچنین کسرهای حجمی به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بررسی و شبیه‌سازی عملی آن در نرم‌افزار آباکوس مقدور بوده است. شکل 12، تعدادی از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته برای نانولوله‌های کربنی با طول‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول 6 طول‌های مختلف نانولوله‌های کربنی با قطر ثابت

Table 6 Different lengths of CNTs with constant diameter.

طول	قطر		
	حالت دوم	حالت اول	ثابت
100 nm	50 nm	25 nm	10 nm

شرایط مرزی به‌گونه‌ای است که سه وجه از وجوه مدل مکعب مربعی به‌صورت صفحات متقارن شبیه‌سازی شده‌اند و نقطه اشتراک این سه وجه به‌طور کامل پین شده است. همچنین، بارگذاری به‌گونه ایست که بر روی یک وجه کرنش یکنواخت اعمال شده است. در ضمن، سایر وجوه از هرگونه قید تنش و جابه‌جایی آزاد هستند [22].

درنهایت، مش اعمال‌شده بر روی مدل پس از انجام حساسیت مش به‌صورت شکل 11 می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهند که با کاهش اندازه مش ریخته شده بر روی دو انتهای دایروی نانولوله‌های کربنی توزیع شده در مکعب مربع، همگرایی نتایج اتفاق می‌افتد. بنابراین، حساسیت مش با توجه به حجم بالای محاسبات تا مرحله‌ای انجام شده است که اختلاف نتایج به کمتر از 3% کاهش یافته است.

در این شبیه‌سازی المان‌ها از نوع المان چهار وجهی هرمی شکل و با فرمولاسیون 'سی 3 دی 14' می‌باشند. همچنین، از بین دو نوع دسته هندسی یعنی درجه اول و درجه دوم، درجه اول مورد استفاده قرار گرفته است.

5- نحوه محاسبه مدول و استحکام کششی عرضی در حالت تقویت آهار

برای محاسبه مدول الاستیسیته عرضی در حالتی که تقویت آهار با استفاده از نانولوله‌های کربنی صورت گرفته است، کافی است خواص معادل آهار تقویت‌شده که با استفاده از روش توزیع تصادفی حاصل می‌شود برای ناحیه آهار در المان حجمی نماینده شبیه‌سازی‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

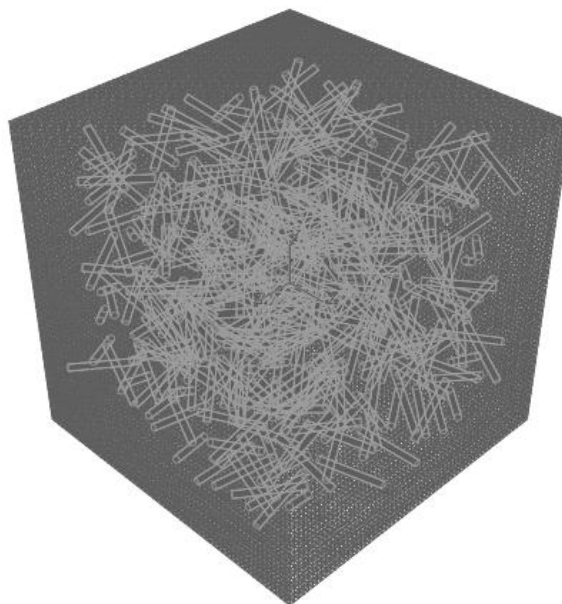


Fig. 11 Applied mesh on the square-cube model

شکل 11 مش اعمال‌شده بر روی مدل مکعب مربعی

¹ C3D4

² Y_t

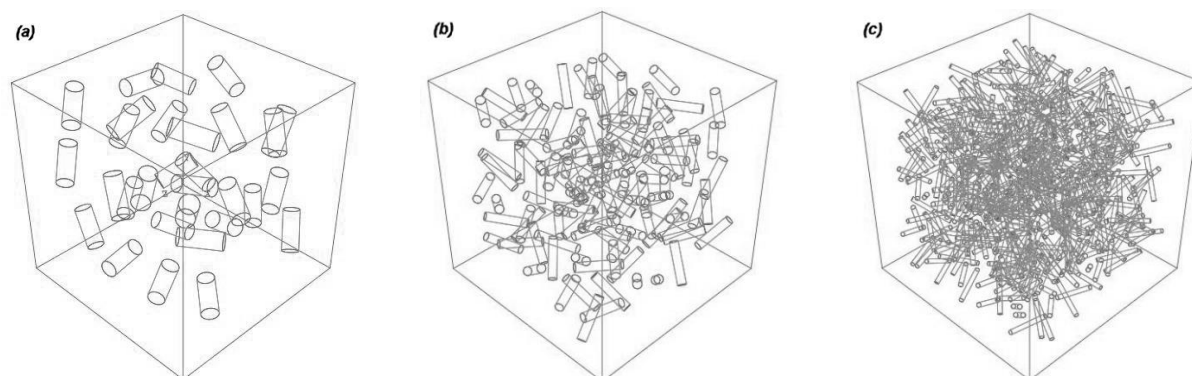


Fig. 12 Representation of the CNTs randomly distributed with 3% volume fraction and in different lengths including: (a) 25nm, (b) 50 nm and (c) 100 nm

شکل 12 نمایش توزیع تصادفی نانوذرات کربنی با کسر حجمی 3% و در طول‌های مختلف شامل: (a) 25 nm، (b) 50 nm و (c) 100 nm

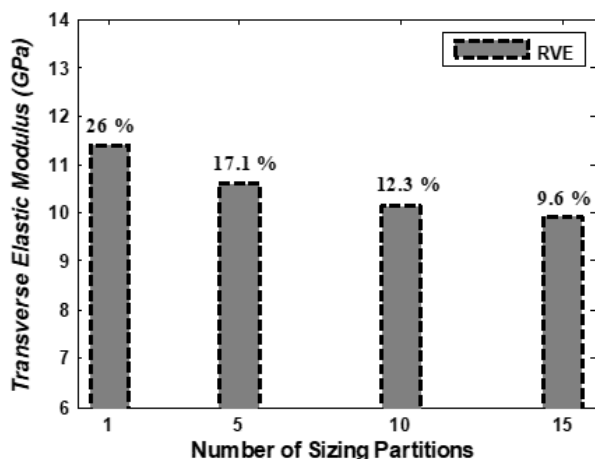


Fig. 13 Effect of sizing partitions increasing on the transverse elastic modulus

شکل 13 اثر افزایش قسمت‌های آهار بر مدول الاستیسیته عرضی

مدول الاستیسیته عرضی در حالتی که برای آهار خواص مکانیکی ثابت فرض شده است (1 قسمت)، 11.4 GPa به دست آمده است. این مقدار برای حالتی که آهار به 15 قسمت با ضخامت ثابت تقسیم شده است 9.92 GPa حاصل می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن خواص آهار به صورت ناهمگن و غیریکنواخت در طول ضخامت آن، نتایج به دست آمده برای مدول الاستیسیته عرضی تقریباً 15% تغییر یافته است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و کار آزمایشگاهی [19] نشان می‌دهند که با فرض خواص مکانیکی همگن و ثابت برای آهار، مدول الاستیسیته عرضی به دست آمده از شبیه‌سازی برای المان حجمی نماینده 26% با نتیجه آزمایشگاهی (9.05 GPa) اختلاف دارد. اما با غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار این مقدار خطا به 9.6% کاهش می‌یابد. بنابراین، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، همواره نیاز است که در شبیه‌سازی عددی خواص مکانیکی آهار در ارزیابی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت ناهمگن و غیریکنواخت لحاظ گردد.

با استناد بر نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، در ادامه به منظور بررسی تأثیر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی که به صورت تصادفی در آهار

جدول 7 قطرهای مختلف نانولوله‌های کربنی با طول ثابت.

Table 7 Different diameters of CNTs with constant length.

طول ثابت	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
100 nm	10 nm	20 nm	40 nm

7- نتایج عددی

در این بخش، در ابتدا، تأثیر خواص مکانیکی ناهمگن نسبت به حالت همگن برای آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی بررسی شده است. سپس، مقایسه نتایج مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی که در آن تقویت آهار با طول‌ها و قطرهای مختلف نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی‌های 1%، 2% و 3% صورت گرفته است انجام شده است.

7-1- اثر افزایش تعداد قسمت‌های آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی

هر چند در برخی مراجع [18] برای ارزیابی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی به صورت عددی، خواص مکانیکی آهار به صورت همگن و برابر با مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است اما همواره خواص مکانیکی آهار ناهمگن بوده و در طول ضخامت آن برابر با مقدار ثابتی نیست [23].

بنابراین در اینجا، برای مطالعه اثر غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار در طول ضخامت آن بر روی مدول الاستیسیته عرضی، از نمودار $\lambda=0.60$ در شکل 2 برای تعیین خواص مکانیکی آهار استفاده شد. در این مطالعه سعی شد با تقسیم ناحیه فاز مشترک به 5، 10 و 15 قسمت با ضخامت ثابت و همچنین استفاده از این نمودار در تعیین خواص هر یک از قسمت‌ها، اثر غیر همگن در نظر گرفتن خواص مکانیکی آهار مشاهده شود. شکل 13 نتایج این بررسی را نمایش می‌دهد.

منظر نانولوله‌های کربنی بیشتر می‌شود (با توجه به شیب نمودارهای ترسیم‌شده).

3-7- اثر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی در تقویت مکانیکی آهار بر روی استحکام کششی عرضی

همان‌گونه که بیان شد برای پیش‌بینی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار الیاف تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، از روش ماکرومکانیک استفاده شده است. شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی در جهت عرضی را برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالتی که تقویت مکانیکی آهار با نانولوله‌های کربنی صورت نگرفته است نشان می‌دهد.

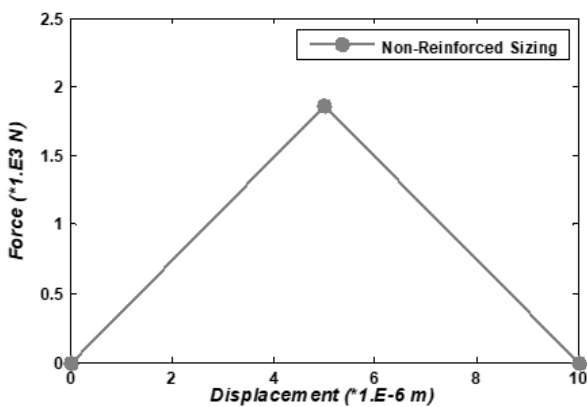


Fig. 15 The force-displacement diagram for glass/epoxy composite without sizing reinforcement

شکل 15 نمودار نیرو-جابجایی برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی با آهار تقویت نشده

مقدار نیرو در لحظه شروع تخریب برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت بدون تقویت مکانیکی آهار 1865 N به دست آمده است. با فرض این مقدار نیرو برای لحظه شکست کامپوزیت شیشه/اپوکسی و با استفاده از رابطه 4، استحکام نهایی کامپوزیت شیشه/اپوکسی برای این حالت به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{F}{A}, A = 0.025 \times 0.002m^2 \quad (4)$$

مقادیر استحکام کششی عرضی به‌دست‌آمده برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی در حالت بدون تقویت آهار، در دو حالت آزمایشگاهی [19] و شبیه‌سازی عددی به ترتیب 36 MPa و 37.3 MPa محاسبه شده است. بنابراین، برای بررسی اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در تقویت آهار الیاف شیشه بر روی مدول استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، برای هر حالت نموداری همانند شکل 15 به دست آمد و سپس مقدار نیرو در لحظه شکست استخراج شده و با استفاده از رابطه 4، مقدار استحکام کششی عرضی محاسبه شده است. شکل 16 نتایج این بررسی را نمایش می‌دهد.

با توجه به اینکه مقدار مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت رابطه مستقیم با استحکام کششی عرضی آن دارد، بنابراین انتظار می‌رود که مقدار استحکام

الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، خواص مکانیکی آهار به‌صورت ناهمگن و متشکل از 15 قسمت با مدول‌های الاستیسیته معادل در حالت تقویت‌شده با استفاده از نانولوله‌های کربنی در نظر گرفته می‌شود.

2-7- اثر اندازه طول و قطر نانولوله‌های کربنی در تقویت مکانیکی آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی

نتایج به‌دست‌آمده برای بررسی اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی که در تقویت آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی در شکل 14 نمایش داده شده است.

شکل 14 نشان می‌دهد که افزایش طول نانولوله‌های کربنی در کسر حجمی ثابت، باعث افزایش مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می‌شود. در واقع، مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه مستقیم با طول نانولوله‌های کربنی که در آهار توزیع شده‌اند دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه عکس با قطر نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار دارد. در واقع، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که مقدار مدول الاستیسیته عرضی رابطه مستقیم با نسبت منظر (نسبت طول به قطر)

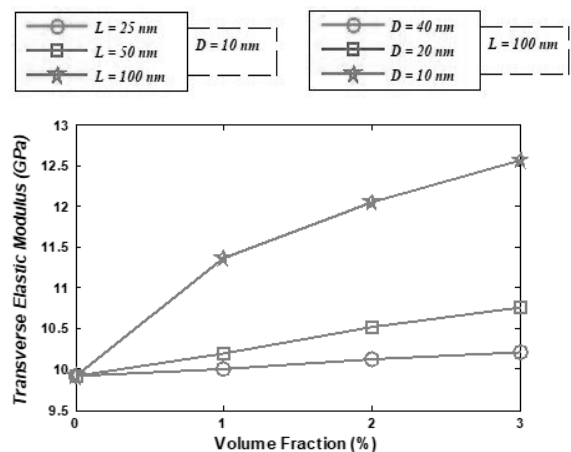


Fig. 14 Effect of CNTs dimensions and volumes variations, in sizing reinforcement, on the glass/epoxy composite transverse elastic modulus

شکل 14 اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی، در تقویت آهار، بر روی مدول الاستیسیته عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار دارد و در نسبت منظر یکسان برای نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار، مدول الاستیسیته عرضی مقدار ثابتی خواهد داشت. برای نمونه، در کسر حجمی 3%، با افزایش نسبت منظر از 2.5 به 5 و 10، مقدار مدول الاستیسیته عرضی به ترتیب از 10.22 GPa به 10.76 و 12.57 GPa افزایش می‌یابد که نشانگر افزایش به ترتیب 5.3% و 23% در مقدار مدول الاستیسیته عرضی است.

علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع‌شده در آهار بر روی مدول الاستیسیته عرضی، با افزایش نسبت

- Materials“ Composites Part B: Engineering, Vol. 37, No. 6, pp. 382-394, 2006.
- [2] Yu, M. F., Files, B. S., Arepalli, S. and Ruoff, R. S., “Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and Their Mechanical Properties“ Physical Review Letters, Vol. 84, No. 24, pp. 5552-5555, 2000.
- [3] Setoodeh, A. R., Sokhandani, N. and Zebarjad, S. M., “Theoretical and experimental study on the effect of multi-walled carbon nanotubes on improving the tensile properties and toughness of Vinyl ester resin“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 539-550, 2019.
- [4] Tabatabaee-Ghomi, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, M. and Liaghat, G. H., “Electrical conductivity enhancement of Carbon/Epoxy composites using nanoparticles“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 605-614, 2019.
- [5] Hosseini Abbandanak, S. N., Siadati, M. H. and eslami-farsani, R., “Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites“ In Persion, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 315-324, 2018.
- [6] Khanna, S. K., Winter, R. M., Ranganathan, P., Yedla, S. B., Kalukanimuttam, M. and Paruchuri, K., “Sample Preparation Techniques for Nano-Mechanical Characterization of Glass Fiber Reinforced Polyester Matrix Composites“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 34, No. 1, pp. 53-65, 2003.
- [7] Tanoglu, M., McKnight, S. H., Palmese, G. R. and Gillespie, J. W., “A New Technique to Characterize the Fiber/Matrix Interphase Properties under High Strain Rates“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 31, No. 10, pp. 1127-1338, 2000.
- [8] Godara, A., Gorbatiikh, L., Kalinka, G., Warriar, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luizi, F., van Vuure, A. W., Lomov, S. V. and Verpoest, I., “Interfacial Shear Strength of a Glass Fiber/Epoxy Bonding in Composites Modified with Carbon Nanotubes“ Composites Science and Technology, Vol. 70, No. 9, pp. 1346-1352, 2010.
- [9] Barber, A. H., Zhao, Q., Wagner, H. D. and Baillie, C. A., “Characterization of E-Glass-Polypropylene Interfaces Using Carbon Nanotubes as Strain Sensors“ Composites Science and Technology, Vol. 64, No. 13-14, pp. 1915-1919, 2004.
- [10] Chowdhury, S. C., Haque, B. Z. G., Okabe, T. and Gillespie Jr, J. W., “Modeling the Effect of Statistical Variations in Length and Diameter of Randomly Oriented Cnts on the Properties of Cnt Reinforced Nanocomposites“ Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 1756-1762, 2012.
- [11] Joshi, U. A., Sharma, S. C. and Harsha, S. P., “Effect of Carbon Nanotube Orientation on the Mechanical Properties of Nanocomposites“ Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 2063-2071, 2012.
- [12] Mahdavi, M., Yousefi, E., Baniassadi, M., Karimpour, M. and Baghani, M., “Effective Thermal and Mechanical Properties of Short Carbon Fiber/Natural Rubber Composites as a Function of Mechanical Loading“ Applied Thermal Engineering, Vol. 117, pp. 8-16, 2017.
- [13] El Moumen, A., Tarfaoui, M. and Lafdi, K., “Computational Homogenization of Mechanical Properties for Laminate Composites Reinforced with Thin Film Made of Carbon Nanotubes“ Applied Composite Materials, Vol. 20, No. 3, pp. 1-20, 2018.
- [14] Ghasemi, A. R. and Hosseinpour, K., “Thermo-Magneto-Mechanical Long-Term Creep Behavior of Three-Phase Nano-Composite Cylinder“ Composites Science and Technology, Vol. 167, No.83 pp. 71-78, 2018.
- [15] Zabihoor, M. and Adibnazari, S., “A Micromechanics Approach for Fatigue of Unidirectional Fibrous Composites“ Iranian Polymer Journal (English Edition), Vol. 16, No. 4, pp. 219-232, 2007.
- [16] Rahimi, G.H., Zamani, R. and Pol, M.H., “Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with

کششی عرضی رابطه مستقیم با طول و رابطه عکس با قطر نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار داشته باشد. در واقع، انتظار می‌رود که مقدار استحکام کششی عرضی رابطه مستقیم با نسبت منظر نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار داشته باشد.

شکل 16 صحت این موضوع را نشان می‌دهد. برای نمونه مشاهده می‌شود که در کسر حجمی 3%، با افزایش نسبت منظر از 2.5 به 5 و 10، مقدار استحکام کششی عرضی به ترتیب از 41.76 MPa به 43.82 MPa و 50.48 MPa افزایش می‌یابد که نشانگر افزایش به ترتیب 4.9% و 20.9% در مقدار استحکام کششی عرضی است.

در اینجا نیز تأثیر افزایش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی توزیع شده در آهار بر روی استحکام کششی عرضی، با افزایش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی بیشتر می‌شود.

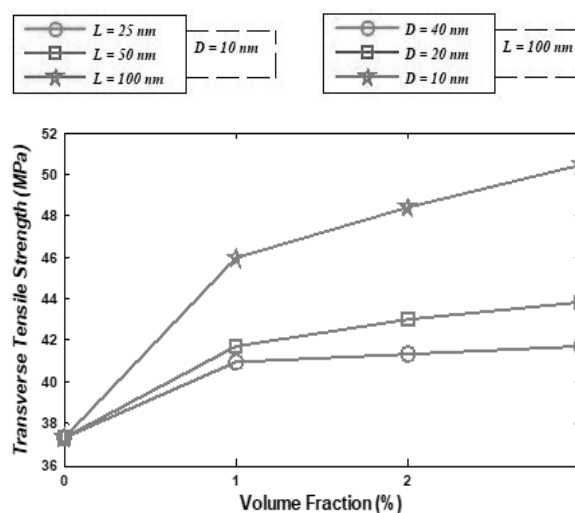


Fig. 16 Effect of CNTs dimensions and volumes variations, in sizing reinforcement, on the glass/epoxy composite transverse tensile strength

شکل 16 اثر تغییرات ابعادی و حجمی نانولوله‌های کربنی، در تقویت آهار، بر روی استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

8- نتیجه‌گیری

نتایج عددی نشان داد که شبیه‌سازی ناحیه آهار با خواص مکانیکی غیریکنواخت در طول ضخامت آن، کمک شایانی در بهبود نتایج عددی در مقایسه با مقادیر حاصل از کار آزمایشگاهی دارد. همچنین، ملاحظه شد که افزایش نسبت منظر نانولوله‌های کربنی، در کسر حجمی ثابت، که در آهار الیاف شیشه توزیع شده‌اند، می‌تواند باعث افزایش مدول و استحکام کششی عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی شود. بنابراین، آشکار است که افزودن این نانو ذرات به آهار برای افزایش خواص عرضی کامپوزیت شیشه/اپوکسی، با نسبت منظر بالاتر در کسر حجمی ثابت، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشد.

9- مراجع

- [1] Kang, I., Heung, Y. Y., Kim, J. H., Lee, J. W., Gollapudi, R., Subramaniam, S., Narasimhadevara, S., Hurd, D., Kirikerka, G. R., Shanov, V., Schulz, M. J., Shi, D., Boerio, J., Mall, S. and Ruggles-Wren, M., “Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart

- clay“ In Persion, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014.
- [17] Papanicolaou, G. C., Michalopoulou, M. V. and Anifantis, N. K., “Thermal Stresses in Fibrous Composites Incorporating Hybrid Interphase Regions“ Composites Science and Technology, Vol. 62, No. 14, pp. 1881-1894, 2002.
- [18] Riaño, L., Belec, L., Chailan, J. F. and Joliff, Y., “Effect of Interphase Region on the Elastic Behavior of Unidirectional Glass-Fiber/Epoxy Composites“ Composite Structures, Vol. 198, pp. 109-116, 2018.
- [19] Azad, E., “Mechanical reinforcement on glass/fiber sizing “ MSc Thesis, Iran University of Science & Technology, Iran, 2016.
- [20] El-Hage, H., Mallick, P. K. and Zamani, N., “A Numerical Study on the Quasi-Static Axial Crush Characteristics of Square Aluminum-Composite Hybrid Tubes“ Composite Structures, Vol. 73, No. 4, pp. 505-514, 2006.
- [21] Lapczyk, I. and Hurtado, J. A., “Progressive Damage Modeling in Fiber-Reinforced Materials“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 11, pp. 2333-2341, 2007.
- [22] Hbaieb, K., Wang, Q. X., Chia, Y. H. J. and Cotterell, B., “Modelling Stiffness of Polymer/Clay Nanocomposites“ Polymer, Vol. 48, No. 3, pp. 901-909, 2007.
- [23] Wang, J., Crouch, S. L. and Mogilevskaya, S. G., “Numerical Modeling of the Elastic Behavior of Fiber-Reinforced Composites with Inhomogeneous Interphases“ Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 1, pp. 1-18, 2006.

