نشريه علمى پژوهشى



علوم و فناوری **کامیوزیب**

http://jstc.iust.ac.ir

تحلیل ار تعاشات آزاد پوستههای استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی مستطیلی

1 رضا آذرافزا $^{1\,*}$ ، شاهین اصلانزاده قلی بیگلو 2 ، علی داور

1-دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران 2- دانشجو، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران * تهران، صندوق پستی 6835-6825. azarmut@mut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
در این مقاله ارتعاشات آزاد پوستههای استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی مستطیلی به روش تحلیلی بررسی شده است. معادلات	دريافت: 1402/02/30
تعادل پوسته استوانهای بر اساس تئوری کلاسیک پوسته و با استفاده از روش نیوتن استخراج شدهاند. شرایط مرزی پوسته دو سر ساده در	پذيرش: 1402/05/09
نظر گرفته شده است. مؤلفههای جابهجایی با توجه به شرایط مرزی به صورت بسط سری فوریه دوگانه نوشته شدهاند. روابط کرنش-جابجایی و انحنا-جابجایی بر اساس نظریه تقریب لاو در نظر گرفته شده است. مدلسازی گشودگی توسط تابع توزیع (هویساید) بر معادلات تعادل پوسته استوانهای کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی، معادلات حرکت با استفاده از روش گالرکین حل شدهاند. برای صحهگذاری، نتایج پوسته استوانهای کامپوزیتی با فرمافزار المان محدود	کلیدواژگان پوسته استوانهای ارت ع اشات آزاد
آباکوس و مقالات پیشین در این زمینه مقایسه شدهاند که مطابقت خوبی بین آنها وجود دارد. در نهایت اثر پارامترهای هندسی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی مانند طول، شعاع، ضخامت و لایهچینی پوسته استوانهای و همچنین ابعاد، جهت و محل گشودگی بر فرکانس طبیعی سازه بررسی شد که نتایج نشان میدهد که با افزایش ابعاد گشودگی میزان کاهش فرکانس طبیعی سازه، افزایش میابد.	پوسته استوانهای دارای کشودکی تابع هویساید

Analysis of free vibration of laminated composite cylindrical shells with rectangular cutout

Reza Azarafza^{1*}, Shahin Aslanzadeh Gholibeiglo¹, Ali Davar¹

1- Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. * P.O.B. 19395- 6835, Tehran, Iran, azarmut@mut.ac.ir

Keywords	Abstract
Cylindrical shell Free vibrations Cutout in the wall of cylindrical shells Heaviside function	In this paper, the free vibrations of multi-layered composite cylindrical shells with rectangular cutout are analyzed analytically. Cylindrical shell equilibrium equations are derived based on classical shell theory (CST) and using Newton's method. Boundary conditions of the two-headed shell are considered simply supported. According to the boundary conditions, the displacement components are written as double Fourier series expansions. Relationships of the strain-displacement and curvature displacement are considered based on Love's approximation theory. Modeling of the cutout by distribution function (Heaviside) is considered based on the equilibrium equations of the composite cylindrical shell. In order to obtain the natural frequency of the rectangular cutout composite cylindrical shell, the equations of motion have been solved using the Galerkin method. For validation, firstly, the results of the composite cylindrical shell have been compared with the Abaqus finite element software and the Previous literature in this field, that there is a good match between them. Finally, the effect of the geometrical parameters of the composite cylindrical shell with cutout, such as the length, radius, thickness and layering of the cylindrical shell, as well as the dimensions, direction and location of the cutout, on the natural frequency of the structure was investigated, that the results show that with increasing The dimensions of the cutout increase the reduction of the natural frequency of the structure.

مشکلات اساسی در طراحی این سازههای کامپوزیتی، نیاز به ایجاد گشودگی-
های متعدد با اندازهها و اشکال مختلف در دیواره، بهعنوان دریچه دسترسی به
داخل سازه میباشد. این گشودگیها در پوستههای استوانهای تأثیر مستقیم بر
مقاومت کمانشی دارد و باعث تغییر ویژگیهای ارتعاشی پوسته استوانهای

امروزه پوستههای استوانهای کامپوزیتی، به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مناسب در صنایع مختلفی مانند اتومبیلسازی، دریایی، مخازن نگهداری، خطوط لوله و خصوصاً هوافضا بسیار مورد استفاده قرار میگیرند. یکی از

Please cite this article using:

د کامپوزیت

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

Azarafza, R., Aslanzadeh GoliBeiglo, S., Davar, A., "Analysis of free vibration of laminated composite cylindrical shells with rectangular cutout," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2196-2209, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2002545.1837

كامپوزيت مانند فركانس هاي طبيعي و شكل مودهاي آن مي شود [1]. بنابراين تأثیرات ناشی از ایجاد گشودگی بر روی سازههای کامپوزیتی باید به خوبی شناخته شود و ملاحظات مناسبی نیز در حین فرآیند طراحی این گونه سازهها مورد توجه قرار گیرد. تحقیقات زیادی در زمینه بررسی استاتیکی و دینامیکی سازههای کامپوزیتی، با در نظر گرفتن اثر گشودگی ، انجام شده است. لی و همكاران [2] ارتعاشات آزاد پوسته استوانهاي مدور را با استفاده از روش ريلي-ريتز بررسى نمودند. آنها با ايجاد يك روش مدون، موفق به استخراج عبارات صریح برای ماتریسهای جرم و سفتی شدهاند تا یک تحلیل آسان بر اساس تئورى هاى پوسته و شرايط مرزى متفاوت داشته باشند. قربانى و همكاران [3]، ارتعاشات آزاد یک پوسته استوانهای را بر اساس نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول و نظریه گرادیان کرنش غیرمحلی بررسی کردند. در پژوهش آنها معادلات حاکم و شرایط مرزی متناظر با روش مربعات دیفرانسیل تعمیمیافته گسسته شده است. تاکاباتاک [4]، تحلیل استاتیکی ورق های ایزوتروپیک دارای گشودگی را بررسی نموده است. در این پژوهش موقعیت گشودگی توسط تابع توزيع پله مدلسازي شده است. همچنين معادله خيز با استفاده از روش بسته گالرکین حل شده است. تحقیقات او نشان میدهد که دقت مدلسازی با تابع پله در برابر مدلسازی با تئوری ورق معادل بیشتر است. ازهری و همکاران [5]، به تحلیل کمانش صفحات پلهدار و مشبک پرداختهاند. آنها مدلسازی را بر پایه تعریف زیرناحیههای با ضخامت مختلف توسط توابع میانیاب انجام دادهاند (به عبارت دیگر آنها حفره را یک ناحیه با ضخامت صفر در نظر گرفتهاند). لی و همکاران [6]، خیز ساندویچ پانلهای مشبک کامپوزیتی تحت شرایط مرزی ساده و بارگذاری فشاری یکنواخت را مطالعه نمودند. آنها برای ورق تقویتشده با تقویت کننده های متعامد، به مدل سازی مواد توسط تابع هویساید بر اساس دو ناحیه مجزا با عنوان سلول و تقویت کننده پرداختهاند. ژانگ و همکاران [7]، یک مدل المان محدود شامل المان های مثلثی پوسته ای برای پوسته ها و ورق-های مشبک متعامد کامپوزیتی ارائه کردهاند. آنها سفتی سازه را با استفاده از انرژی کرنشی و اعمال قیود سازگاری بین پوسته و ریب به دست آوردهاند. ویلسون و راجاسکاران [8]، پایداری الاستیک ورق های با تقویت کننده پله تحت بار محوری توسط تئوری کلاسیک ورق را بررسی نمودند. آنها تقویت-کننده پله را توسط توابع چندضابطهای توزیع ضخامت مدلسازی کردهاند که موجب تعریف محلی ضخامت در سازه شده است. هانگ و همکاران [9]، یک مدل المان محدود برای تحلیل کمانش صفحات مشبک کامپوزیتی با چیدمان ریب موازی و عمود بر پوسته ارائه کردهاند. امیدواران [10]، یک روش تحلیلی بسته برای ارتعاشات آزاد ورقهای مشبک ارائه داده است. در پژوهش آنها توسط سری فوریه، توزیع گشودگی در سفتی سازه تعریف شده است و پس از حل معادله ارتعاش آزاد، فرکانس طبیعی ورق مشبک ایزوتروپیک در قالب یک فرمول ارائه شده است. كاليتا و هالدار [11]، ارتعاشات آزاد ورقهاي ايزوتروپيک دارای تک گشودگی مرکزی را با در نظر گرفتن تغییر شکل برشی، مورد مطالعه قرار دادهاند. سليمانيان و همكاران [12]، ارتعاشات آزاد صفحات پليمري تقویتشده با الیاف شیشه دارای گشودگی مرکزی با شرایط مرزی آزاد را به وسیله روشهای تحلیلی، تجربی و عددی بررسی کردهاند. در این مقاله، گشودگی مستطیلی با ضرب توابع توزیع به صورت ریاضی در ماتریس سفتی صفحه مدلسازی شده است. لی و چنگ [13]، یک مدل تحلیلی تعمیمیافته برای تحلیل رفتار سازههای کامپوزیتی چندلایه (معمولی و ساندویچی) ارائه کرد. این مدل بر اساس تئوری کلاسیک صفحه و با در نظر گرفتن سلول به عنوان یک ناحیه از سازه توسعه داده شده است و در آن ناپیوستگی فیزیکی بین ریب و سلول توسط یک تابع توزیع سفتی در نظر گرفته شده است. آذرافزا

و همکاران [14]، تحلیل دینامیکی پوسته های استوانه ای کامپوزیتی تحت ضربه مایل سرعت پایین توسط یک ضربهزننده کروی مطالعه نمودند. چاودوری و همكاران [15]، به تحليل ارتعاشات پوسته هايپركامپوزيت چندلايه تقويتشده همراه گشودگی ، با استفاده از روش المان محدود پرداختهاند. یوان و همکاران [16]، ارتعاشات آزاد پوستههای استوانهای FGM دارای بریدگی را با استفاده از اصل همیلتون مورد مطالعه و بررسی قرار دادهاند. آذرافزا و همکاران [17]، ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی کامپوزیت چندلایه همراه با جرم متصله را بررسی کردهاند. در این پژوهش، برای اولین بار اثر جرم متصله با استفاده از عملگر دیفرانسیل مخروطی و تابع هویساید بر معادلات تعادل در نظر گرفته شده است و تأثیر آن بر ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی بررسی شده است. طالعزاده [18]، ارتعاشات آزاد پوستههای کامپوزیتی کامل و دارای گشودگی مستطیلی بر پایه تئوری برشی مرتبه اول بررسی نموده است. در این پژوهش، معادلات حاکم به کمک روش مربعات تفاضلی تعمیمیافته در راستای طولی و محيطي گسسته شده است. انصاريان و همكاران [19]، به بررسي رفتار ارتعاشي پوسته استوانهای کامپوزیتی با مایع داخلی و با شرایط مرزی دو سر ساده به روش تحلیلی پرداختهاند. طالعزاده و رحیمی [20]، به بررسی کمانش محوری یک پوسته استوانهای کامپوزیتی با و بدون گشودگی مستطیلی بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول پرداختهاند. خلیلی و همکاران [21]، به بررسی تجربی و عددی کمانش نیم استوانه مشبک کامپوزیتی پرداختهاند. خلیلی و همکاران [22]، به بررسی تجربی و عددی نیم استوانه مشبک کامپوزیتی تقویتشده با الگوی مثلثی تحت بارگذاری ضربه سرعت بالا پرداختهاند. فریدون و همکاران [23]، به بررسی رفتار کمانشی پوستههای استوانهای فولادی نازک با گشودگی بیضوی تحت بارهای مایل به دو روش تجربی و شبیهسازی با نرم-افزار المان محدود پرداختهاند. پور و همکاران [24]، یک روش نیمه تحلیلی برای تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانهای چندلایه همراه با گشودگی را توسعه دادند. در این پژوهش از ضرایب لاگرانژ در معادلات جابهجایی برای استخراج معادلات حاکم استفاده شده است.

نتایج بررسیها نشان میدهد که تاکنون مدلسازی گشودگی مستطیلی در پوسته استوانهای کامپوزیتی توسط تابع هویساید انجام نشده است. در تحقیق حاضر ارتعاشات آزاد پوستههای استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با شرایط مرزی دو سر ساده به روش تحلیلی بررسی شده است. معادلات حرکت بر اساس تئوری کلاسیک پوسته و با استفاده از روش نیوتن استخراج شدهاند. مؤلفههای جابهجایی با توجه به شرایط مرزی بهصورت بسط مری فوریه دوگانه نوشته شدهاند. روابط کرنش-جابجایی و انحنا-جابجایی بر اساس نظریه تقریب لاو در نظر گرفته شده است. مدلسازی گشودگی توسط اساس نظریه تقریب لاو در نظر گرفته شده است. مدلسازی گشودگی توسط گرفته شده است که نسبت به روشهای دیگر ایجاد گشودگی به مراتب سادهتر میباشد. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای اثر پارامترهای هندسی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای اثر پارامترهای هندسی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای میند طول، شعاع، ضخامت و لایهچینی پوسته استوانهای و همچنین ابعاد، جهت و

2- معادلات حاكم

1-2- معادلات حركت پوسته استوانهای كامپوزیتی

شکل 1 یک پوسته استوانهای دایرهای همراه با مختصات مرجع (جهتهای مثبت قراردادی) نشان داده شده است که در آن شعاع پوسته استوانهای دایره-

ای، ضخامت، طول، زاویه نسبت به محور عمودی و محور طولی به ترتیب با نمادهای R ، h ، R و x نشان داده شدهاند. سطح میانی پوسته به عنوان سطح مرجع در نظر گرفته شده است و دستگاه مختصات x ، φ و z روی آن قرار داده شده است. در این شکل جابهجایی در جهتهای محوری x، محیطی φ و شعاعی z نیز به ترتیب با نمادهای u، v و w نشان داده شده است که z فاصله سطح میانی پوسته تا نقطه دلخواه روی پوسته است. در شکل 2، یک المان از پوسته نشان داده شده است. بر اساس تئوری کلاسیک پوسته معادلات تعادل صورت زیر می باشند [14].



Fig. 1 Cylindrical shell and reference coordinates

شکل 1 پوسته استوانهای و مختصات مرجع

$$R\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial \varphi} + Rp_x = 0$$
(a-1)

$$\frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \varphi} + R \frac{\partial N_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{\partial M_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\varphi}}{\partial \varphi} + Rp_y = 0$$
(b-1)

$$R\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{x\phi}}{\partial \phi \partial x} + \frac{1}{R}\frac{\partial^2 M_{\phi}}{\partial \phi^2} + N_{\phi} + Rp_z = 0$$
(c-1)

که در این روابط، p_x ، p_{φ} و p_z مجموع نیروهای اینرسی و تحریک خارجی متغیر با زمان به ترتیب در راستای محوری، محیطی و شعاعی هستند و مقادیر آنها عبارتاند از [14]:

$$p_x = -I_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + q_x \tag{a-2}$$

$$p_{\varphi} = -I_0 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + q_{\varphi} \tag{b-2}$$

$$p_z = -I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + q_z \tag{c-2}$$



Fig. 2 An element of the shell with applied forces and moments. شکل 2 یک المان از پوسته با نیروها و گشتاورهای اعمال شده

در روابط فوق عبارات $q_x q_x e_x q_z = q_x$ به ترتیب تحریکهای خارجی وارد به سیستم در راستای محوری، محیطی و شعاعی هستند که مقادیر آنها برای تحلیل ارتعاشات آزاد برابر صفر در نظر گرفته می شود. همچنین I_0 ممان اینرسی بوده و با رابطه (3) تعریف شده است [14,17]:

$$I_{0} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho_{k} \, dz \tag{3}$$

که در این رابطه اندیس k شماره لایه میباشد.

2-2- ر<mark>وابط کرنش-جابجایی برای پوسته استوانهای کامپوزیتی</mark> روابط کرنش-جابهجایی بر اساس نظریه کلاسیک پوستههای نازک لاو برای هر

نقطه دلخواه یک پوسته استوانهای به صورت روابط (4) بیان می شوند [14]:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^\circ + zk_x^\circ \tag{a-4}$$

$$\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_{\varphi}^{\circ} + zk_{\varphi}^{\circ} \tag{b-4}$$

$$\gamma_{x\varphi} = \gamma_{x\varphi}^{\circ} + 2zk_{x\varphi}^{\circ} \tag{c-4}$$

 k_{φ}° , k_{x}° و $\gamma_{x\varphi}^{\circ}$ و $\epsilon_{\varphi}^{\circ}$, ϵ_{x}^{0} و برشی سطح میانی و $\gamma_{x\varphi}^{\circ}$ و $\epsilon_{\varphi}^{\circ}$ انحناهای سطح میانی می، باشند. این مقادیر بر حسب مؤلفه های جابجایی پوسته ($k_{x\varphi}^{\circ}$ و w) عبارتاند از [14]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{x}^{\circ} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\varphi}^{\circ} \\ \boldsymbol{\gamma}_{x\varphi}^{\circ} \end{pmatrix} = \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{1}{\partial \varphi} - \frac{w}{R} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{w}{R} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases}$$
(a-5)
$$\begin{cases} \boldsymbol{k}_{x}^{\circ} \\ \boldsymbol{k}_{x\varphi}^{\circ} \\ \boldsymbol{k}_{x\varphi}^{\circ} \end{pmatrix} = \begin{cases} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} \\ \frac{1}{R^{2}} \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial \varphi^{2}} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) \\ \frac{1}{R} \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial x \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{cases}$$
(b-5)

2-3- روابط تنش-کرنش برای پوسته استوانهای کامپوزیتی

در شکل 3، ساختار لایههای یک المان از پوسته استوانهای کامپوزیتی با ضخامت h و دارای k لایه نشان داده شده است [14].



Fig. 3 Structure of layers of one element of laminated composite cylindrical shell [24]

شکل 3 ساختار لایههای یک المان از پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه [24]



Fig. 4 laminated composite cylindrical shell with rectangular cutout along with coordinate system.

شکل 4 پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی مستطیلی همراه با دستگاه مختصات.

$$HD^* = (1 - HD)$$
 (12)

در رابطه فوق، تابع توزيع (HD) به صورت رابطه (13) تعريف شده است [6,17].

$$HD = HD(x)HD(\varphi)$$
(13)

تأثیر تابع توزیع (HD) در رابطه (13) بر بازه انتگرالی یک تابع به صورت رابطه (14) می باشد [6,17].

$$\int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} HD * f(x,\varphi) dx d\varphi$$
$$= \int_{X_{i}}^{X_{i}+C} \int_{\phi_{j}}^{\phi_{j}+D} f(x,\varphi) dx d\varphi$$
(14)

2-5- معادلات حرکت پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی با توجه به مطالب ارائه شده، معادلات حرکت برای یک پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به صورت روابط (15) اصلاح میگردد:

$$R\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial \varphi} + Rp_x$$
$$-HD(R\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial \varphi} + Rp_x) = 0$$
(a-15)

$$\frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \varphi} + R \frac{\partial N_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{\partial M_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\varphi}}{\partial \varphi} + Rp_{y}$$
$$-HD(\frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \varphi} + R \frac{\partial N_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{\partial M_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\varphi}}{\partial \varphi}$$
$$+ Rp_{y}) = 0$$
(b-15)

$$R\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{x\varphi}}{\partial \varphi \partial x} + \frac{1}{R}\frac{\partial^2 M_{\varphi}}{\partial \varphi^2} + N_{\varphi} + Rp_z$$
$$-HD(R\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 M_{x\varphi}}{\partial x^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial^2 M_{\varphi}}{\partial x^2} + N_{\varphi}$$

$$\partial x^{2} \qquad \partial \phi \partial x \qquad R \qquad \partial \phi^{2} \qquad + Rp_{z}) = 0 \qquad (c-15)$$

$$\begin{cases} \sigma_x \\ \sigma_\varphi \\ \tau_{x\varphi} \end{pmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11}^k & Q_{12}^k & Q_{13}^k \\ \bar{Q}_{21}^k & \bar{Q}_{22}^k & \bar{Q}_{23}^k \\ \bar{Q}_{31}^k & \bar{Q}_{32}^k & \bar{Q}_{33}^k \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\varphi \\ \gamma_{x\varphi} \end{pmatrix}_k$$
(6)

که ثوابت \bar{Q}_{ij}^k (i,j = 1,2,3) ضرایب سفتی الاستیک کاهشیافته تبدیلیافته لایه k أم هستند [14]. منتجههای نیرو و ممان برای پوستههای نازک چندلایه، با انتگرال گیری از تنشها بر روی سطح مقطع، از یک لایه به لایه دیگر، به صورت زیر بدست میآیند:

$$\begin{bmatrix} N_{x} \\ N_{\phi} \\ N_{x\phi} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{\phi} \\ \tau_{x\phi} \end{bmatrix} dz \quad , \quad \begin{bmatrix} M_{x} \\ M_{\phi} \\ M_{x\phi} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{\phi} \\ \tau_{x\phi} \end{bmatrix} z dz \tag{7}$$

با انجام انتگرالگیری ماتریسی در معادله (7)، منتجههای نیرو و ممان برحسب تغییرات انحنا و کرنشهای سطح میانی بیان شدهاند [14,17]:

$$\begin{bmatrix} N_{x} \\ N_{\phi} \\ N_{x\phi} \\ M_{x} \\ M_{\phi} \\ M_{x\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_{3\times3} & [B]_{3\times3} \\ [B]_{3\times3} & [D]_{3\times3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{x}^{0} \\ \varepsilon_{\varphi}^{\circ} \\ \gamma_{x\phi}^{\circ} \\ k_{x}^{\circ} \\ k_{\varphi}^{\circ} \\ k_{x\phi}^{\circ} \end{bmatrix}$$
(8)

 $M_{x\phi} = M_{\phi} \, N_{x\phi} \, e^{-1} \, N_{x\phi} \, e$

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} \bar{Q}_{ij}^{k} (1, z, z^{2}) dz$$
(9)

2-4- مدلسازی ریاضی پوسته استوانهای دارای گشودگی

برای ایجاد بریدگی در پوسته استوانهای، ابتدا توابع توزیع HD(x) و HD(φ)، HD(φ)، رای ایجاد برید (β,17). در بازه [6,17]:

$$(0,0,0) < (x,\varphi,z) < (L,2\pi,h)$$
(10)

به صورت روابط (11) تعریف می شوند. HD(x) و HD(φ) توابعی هستند که به وسیله ایجاد تقسیمات مشخص در راستای محور x و φ، یک الگوی متعامد را می سازند [6,17].

$$HD(x) = Heaviside(x-X_i) - Heaviside(x-X_i-C)$$
(a-11)

$$HD(\varphi) = Heaviside(\varphi - \varphi_j) - Heaviside(\varphi - \varphi_j - D)$$
 (b-11)

در شکل 4، یک پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی مستطیلی همراه با دستگاه مختصات آورده شده است.

با توجه به مطالب ارائه شده، برای مدلسازی پوسته استوانهای دارای گشودگی، تابع توزیع (HD*) به صورت رابطه (12) بیان می شود [6,17].

در عبارات فوق، جملاتی که به صورت پررنگ مشخص شدهاند، به دلیل وجود گشودگی در یک پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه ایجاد شدهاند.

6-2- استخراج عملگرهای دیفرانسیلی

به منظور حل معادلات تعادل، ابتدا باید از روابط کرنش-جابجایی، یعنی روابط (4)، مقادیر کرنش را در رابطه منتجههای تنش، یعنی رابطه (6)، جایگذاری کرد. سپس روابط حاصل را در معادلات (15) که معادلات حرکت پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی هستند، قرار داد. پس از جداسازی مشتقات مربوط به هر یک از مؤلفههای جابهجایی و مرتبسازی، معادلات تعادل به فرم نهایی به صورت رابطه (16) حاصل شدهاند:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} - HD * \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{cases} -Rp_x \\ -Rp_\theta \\ -Rp_z \end{pmatrix} - HD * \begin{pmatrix} -Rp_x \\ -Rp_\theta \\ -Rp_z \end{pmatrix}$$
(16)

با توجه به رابطه فوق میتوان معادلات تعادل پوستههای استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی را به صورت رابطه (17) بازنویسی کرد.

$$\begin{bmatrix} L'_{11} & L'_{12} & L'_{13} \\ L'_{21} & L'_{22} & L'_{23} \\ L'_{31} & L'_{32} & L'_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -p'_x \\ -p'_y \\ -p'_x \end{bmatrix}$$
(17)

درایههای L'_{ij} عملگرهای دیفرانسیلی هستند که مقادیر آنها در پیوست الف آورده شدهاند.

3- شرايط مرزي

در این تحقیق، شرایط مرزی به صورت ساده در نظر گرفته شده است. برای شرایط مرزی ساده در لبههای پوسته استوانهای داریم [14,17]:

$$N_x = M_x = v = w = 0$$
 at $x = 0, L$ (18)

به منظور ارضای شرایط مرزی مورد نظر، میدان جابهجایی پوسته استوانه-ای بهصورت بسط سری فوریه دوگانه در نظر گرفته شدهاند[14,17]؛

$$u = A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{L} \cos n\theta T_{mn}(t)$$
(a-19)

$$v = B_{mn} \sin \frac{mnx}{L} \sin n\theta T_{mn}(t)$$
 (b-19)

$$w = C_{mn} \sin \frac{mnx}{L} \cos n\theta T_{mn}(t)$$
(c-19)

که ضرایب A_{mn} و B_{mn} ثوابت شکل مود هستند. m تعداد نیم B_{mn} موجهای طولی، n تعداد موجهای محیطی و $T_{mn}(t)$ بخش زمانی تغییر مکانها میباشد.

4- تحليل ار تعاشات آزاد

در تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی مستطیلی، تحریکهای خارجی در معادلات تعادلی (15) برابر صفر در نظر گرفته میشوند. همچنین در روابط (19)، برای تحلیل ارتعاشات آزاد تابع زمانی

به صورت تابع نمایی یعنی $T_{mn}(t) = e^{i\omega_{mn}t}$ در نظر گرفته شده که در آن ω_{mn} فرکانس طبیعی پوسته است. با استفاده از روابط مربوط به مؤلفههای ω_{mn} فرکانس طبیعی پوسته است. با معادلات تعادل (15)، یک دستگاه سه معادلهای به دست آمدهاند. به منظور حل این دستگاه معادلات، از روش گالرکین مطابق روابط زیر استفاده شده است [14,17]:

$$\int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \left(L_{11}'u + L_{12}'v + L_{13}'w + p_{x}' \right) \phi_{u} dx d\varphi = 0$$

$$\int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \left(L_{21}'u + L_{22}'v + L_{23}'w + p_{y}' \right) \phi_{v} dx d\varphi = 0$$

$$\int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \left(L_{31}'u + L_{32}'v + L_{33}'w + p_{z}' \right) \phi_{w} dx d\varphi = 0$$
 (20)

پس از سادهسازی دستگاه معادلات رابطه (20)، یک معادله مقدار ویژه جبری به صورت عبارت (21) به دست میآید [14,17]:

$$[[K']_{mn} - \omega_{mn}^2 [M']_{mn}] \{\Delta\}_{mn} = 0$$
(21)

که در آن $[M']_{mn}$ ماتریس جرم و $\{\Delta\}_{mn}$ ماتریس جرم و $[K']_{mn}$ ماتریس جرم و $[K']_{mn}$

$$\{\Delta\}_{mn} = \begin{cases} A_{mn} \\ B_{mn} \\ C_{mn} \end{cases}$$
(22)

$$[M']_{mn} = \begin{bmatrix} M'_{11} & 0 & 0 \\ & M'_{22} & 0 \\ sym. & & M'_{33} \end{bmatrix}_{mn}$$
(23)

$$[K']_{mn} = \begin{bmatrix} K'_{11} & K'_{12} & K'_{13} \\ K'_{21} & K'_{22} & K'_{23} \\ K'_{31} & K'_{32} & K'_{33} \end{bmatrix}_{mn}$$
(24)

ضرایب A_{mn} ، M_{mn} و C_{mn} در رابطه (22) همان ثوابت شکل مود در روابط (12) هستند. در ایههای ماتریس $[K']_{mn}$ و $[M']_{mn}$ در رابطه (23) و (24)، در پیوست ب و ج آورده شدهاند.

با قرار دادن دترمینان ضرایب دستگاه معادلات (21) مساوی صفر (حل یک مسأله مقدار ویژه)، معادله فرکانسی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی به شکل زیر حاصل شده است [14,17]:

$$det([K']_{mn} - \omega_{mn}^2[M']_{mn}) = 0$$

$$\Rightarrow \beta_1 \omega_{mn}^6 + \beta_2 \omega_{mn}^4 + \beta_3 \omega_{mn}^2 + \beta_4 = 0$$
(25)

با حل معادله (25) فرکانس های طبیعی پوسته بر حسب رادیان بر ثانیه به دست آمده و با قرار دادن این فرکانس ها در معادله (21)، ضرایب ثابت شکل مودهای ارتعاشی به دست آمدهاند. همانطور که در معادله (25) مشخص است، معادله فرکانسی پوسته از مرتبه 6 بوده و دارای شش ریشه است که سه ریشه مثبت و سه ریشه منفی دارد. سه ریشه مثبت این معادلات به عنوان جواب قابل قبول هستند. این سه ریشه از کوچک به بزرگ، فرکانس متناظر با مودهای ارتعاشات خمشی، پیچشی و طولی هستند.

Fig. 5 Comparison of natural frequencies of laminated composite cylindrical shell, m = 1, geometry No. 1, material properties No. M1, [90/0/90].

m =شکل 5 مقایسه فرکانس های طبیعی پوسته استوانه ای کامپوزیت چندلایه، m = 1، مشخصات هندسی شماره 1، خواص مواد شماره M1 [90/0/90].



Fig. 6 Comparison of natural frequencies of laminated composite cylindrical shell, m=1, geometry No. 2, material properties No. M2, [45/-45/45/-45].

شکل 6 مقایسه فرکانس.های طبیعی پوسته استوانهای کامپوزیت چندلایه، = m 1. مشخصات هندسی شماره 2، خواص مواد شماره M2، [45/-45/45/-45].

5-2- بررسی پوسته استوانهای کامپوزیتی با گشودگی

در جدول 3 نیز نتایج ارتعاشات آزاد پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی توسط روش تحلیلی با نتایج حاصل از شبیهسازی با نرمافزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است همانطوری که مشاهده میشود نتایج پژوهش حاضر از تطابق خوبی برخوردار میباشند.

همانطور که در جدول 3 مشاهده میشود، درصد تفاوت فرکانس، بین روش تحلیل حاضر با جواب حاصل از آباکوس، با افزایش ابعاد بریدگی و مقادیر پایین عدد موج محیطی، به خصوص 4 > n. افزایش مییابد. علت اصلی این تفاوتها، عدم اعمال تابع هویساید، در تابع شکل ارضاء کننده شرایط مرزی یا همان شکل مود است. درست است که لبههای داخلی بریدگی، دارای شرایط مرزی آزاد هستند، لیکن با استفاده از تابع هویساید، این لبهها نمیتوانند به صورت شرط مرزی آزاد، در نظر گرفته شوند. استفاده از تابع هویساید سبب میشود که جرم و سفتی موضعی، در بخش بریده شده از پوسته، به درستی نادیده گرفته شوند، طوری که دقت قابل قبول، برای فرکانس طبیعی حاصل شود. لیکن تابع شکل مود، به خصوص در مواردی که درصد تفاوت نتایچ در آباکوس دارد.

5- صحەگذارى نتايج

برای بررسی درستی نتایج حاصل از این پژوهش، صحتسنجی نتایج به دو صورت انجام شده است. ابتدا نتایج مطالعه حاضر برای پوسته استوانهای کامپوزیتی سالم، یعنی در حالت بدون گشودگی، با تکیهگاه دو سر ساده با تتایج پژوهشهای قبلی و نرمافزار المان محدود (آباکوس) مورد بررسی قرار گرفتهاند که نتایج مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. سپس نتایج روش تحلیلی برای پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی با نتایج نرمافزار آباکوس برای مشبندی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی در روش المان محدود (شبیهسازی با نرمافزار آباکوس) از نوع S4R (چهاروجهی) میباشد. همچنین اندازه المان برابر با 0.05 متر در نظر گرفته شده است و تعداد مش مورد نیاز برای رسیدن به همگرایی بین 14000 الی 16000 میباشد که در اینجا 15000 مش در نظر گرفته شده است.

جنس و هندسه پوسته استوانهای کامپوزیتی مورد بررسی در این مقاله به ترتیب در جداول 1 و 2 آورده شدهاند. (همه لایهها همجنس و با ضخامت یکسان در نظر گرفته شدهاند).

جدول 1 جنس پوسته استوانهای کامپوزیتی [18] Table 1 Material of composite cylindrical shell [18]

شماره ماده	E ₁₁ (GPa)	E ₂₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	G ₁₃ (GPa)	G ₂₃ (GPa)	υ_{12}	$\rho(\frac{kg}{m^3})$
M1	19	7.6	4.1	4.1	4	0.26	1643
M2	172.36	6.89	3.44	3.44	1.37	0.25	1603.3
M3	181	10.3	7.17	7.17	7	0.28	1600
M4	38.6	8.27	4.14	4.14	4	0.23	1800
M5	204	18.5	5.59	5.59	5	0.26	2000
M6	200	200	76.92	76.92	76	0.3	7800
M7	70	70	28	28	26	0.25	2600

در جدول 1 جنس مواد استفاده شده عبارتاند از: M1: شیشه/ اپوکسی، M2: کربن/ اپوکسی، M3: کربن/ اپوکسی، M4: شیشه/ اپوکسی، M5: بورون/ اپوکسی، M6: فولاد، M7: آلومینیوم

جدول 2 مشخصات هندسی پوسته استوانهای کامپوزیتی

Table 2 geometr	v of composite	cylindrical shell	
able a geometr.	y of composite	cymuncui snen	

شماره	L (m)	R (m)	h (m)
1	6	1	0.002
2	4	0.5	0.003
3	6	1	0.008

5-1- بررسی پوسته استوانهای کامپوزیتی بدون گشودگی

برای صحت سنجی، نتایج ارتعاشات آزاد پوسته استوانهای کامپوزیتی بدون گشودگی با نتایج عددی (شبیهسازی با نرمافزار آباکوس) و نتایج تحلیلی مرجع [25] در شکل 5 و با نتایج عددی (شبیهسازی با نرمافزار آباکوس) و تحلیلی مرجع [26] در شکل 6 نشان داده شده است. مشاهده می شود که نتایج حاصل از روش جدید از تطابق خوبی نسبت به نتایج مراجع برخوردار هستند.

$[90/0]_{2s}$.	1	1		1 5				1 1	
C/R	n	2	3	4	5	6	7	8	9
	Abaqus	54.9	38.0	48.6	73.9	107.5	148.1	195.3	249.2
0.2	Present	53.6	37.3	48.1	73.1	105.9	145.3	190.9	242.7
	Error%	2.4	1.6	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.6
	Abaqus	54.2	37.4	48.4	73.4	106.4	146.9	191.9	248.6
0.4	Present	49.6	35.9	47.6	72.6	105.5	145.0	190.8	242.7
	Error%	8.5	3.9	1.7	1.2	0.9	1.3	0.6	2.4
	Abaqus	53.0	36.2	48.0	72.9	106.0	146.2	186.9	248.1
0.6	Present	44.8	34.1	46.5	72.3	105.7	145.2	190.4	241.9
	Error%	15.4	6.0	3.0	0.9	0.3	0.7	-1.9	2.5
	Abaqus	51.6	34.3	47.1	70.7	106.0	149.4	183.8	248.0
0.8	Present	40.1	31.3	46.1	72.5	105.0	144.0	190.1	242.0
	Error%	22.3	8.8	2.2	-2.6	1.0	3.6	-3.4	2.4
	Abaqus	49.9	31.5	45.8	68.7	106.1	150.6	196.2	251.0
1	Present	33.7	28.2	45.8	70.8	104.0	144.5	188.8	239.8
	Error%	32.5	10.6	0.0	-3.1	2.0	4.1	3.7	4.5

جدول 3 مقایسه فرکانس های طبیعی پوسته استوانه ای کامپوزیت چندلایه دارای گشودگی، مشخصات هندسی شماره (3)، خواص مواد شماره [90/0]. Table 3 Comparison of natural frequencies of laminated composite cylindrical shell with cutout, geometry No. (3), material properties No. M3, [90/0].

6- نتایج مطالعه پارامتری و بحث

پس از اعتبار سنجی روش حاضر و اطمینان از صحت آن، به منظور بررسی رفتار ارتعاشی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی مستطیلی، به بررسی اثر برخی از پارامترهای هندسی مانند طول، شعاع، ضخامت و لایهچینی پوسته استوانهای و همچنین ابعاد، جهت و محل گشودگی ، بر فرکانس طبیعی بی عد سازه پرداخته شده است. پارامتر فرکانس طبیعی بی بعد به صورت رابطه $\Omega = w R \sqrt{\rho/E_{22}}$.

6-1- پارامترهای هندسی پوسته استوانهای

در این بخش اثر خواص مواد، نوع لایه چینی، تعداد لایه او پارامترهای هندسی مهم پوسته یعنی h/R، L/R بررسی شده است. پوسته استوانه ای کامپوزیتی چندلایه مورد بررسی، دارای گشودگی مستطیلی، (با طول و عرض برابر بریدگی (C = D) با تکیه گاه ساده برای هندسه شماره 3 و ماده M و لایه چینی c = 0.00 مرد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

6-1-1- اثر خواص مواد

یکی از عوامل مؤثر بر فرکانسهای طبیعی بیبعد، خواص مواد در هر لایه میباشد. در جدول 4، برای مواد مختلف (جدول 1)، مقادیر فرکانسهای پایه بیبعد آورده شده است. مشاهده میشود که مواد M2 ، M6 و M7، به ترتیب بیشترین و کمترین فرکانس پایه بیبعد میباشند. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی ، مقادیر فرکانس پایه کاهش مییابد که با توجه به خاصیت تابع توزیع که در معادلات برای اعمال گشودگی استفاده شده است، قابل پیشبینی میباشد. در حل معادلات حاکم به همراه گشودگی ، تابع هویساید بر بازههای انتگرالی تأثیر میگذارد. این انتگرالها در راستای طولی و محیطی بیانگر ابعاد کلی سازه و گشودگی هستند. در ادامه میتوان نتیجه گرفت که با افزایش ابعاد گشودگی در مواد M2 و M3، به ترتیب بیشترین (46.15%) و کمترین

(38.11%) تأثیر بر میزان کاهش فرکانس پایه را داشتهاند. این موضوع بیانگر آن است که ماتریس سفتی ماده M4 در برابر افزایش ابعاد گشودگی، عملکرد بهتری دارد. در ادامه با توجه به خواص دینامیکی مواد در جدول 1 مانند مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون و ... میتوان مشاهده کرد که مواد کامپوزیت نسبت به مواد فلزی از نتایج مطلوبتر برخوردار میباشند.

جدول 4 مقایسه فرکانسهای پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای تغییر خواص ماده.

 Table 4
 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout for changing the material properties.

C/R	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
M1	0.043	0.041	0.038	0.034	0.029	0.026
M2	0.102	0.099	0.094	0.087	0.080	0.055
M3	0.092	0.089	0.084	0.078	0.070	0.055
M4	0.054	0.052	0.048	0.044	0.039	0.033
M5	0.071	0.069	0.066	0.061	0.055	0.040
M6	0.033	0.031	0.029	0.025	0.022	0.019
M7	0.033	0.031	0.029	0.025	0.021	0.018

6–1–2– اثر نوع لايهچيني

در جدول 5، برای سه نوع لایه چینی متفاوت همراه با تعداد لایههای یکسان و ضخامت ثابت، تأثیر زاویه الیاف بر فرکانس پایه بی بعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی بررسی شده است.

با توجه به جدول 5، مشاهده میشود که با افزایش نسبت CR فرکانس -های پایه بیبعد کاهش مییابند و درصد این تغییرات برای لایهچینی 25[09/0] نسبت به سایر لایهچینیها کمتر است. این موضوع بیانگر آن است که سفتی سازه در این لایهچینی در برابر افزایش ابعاد گشودگی مقاومتر است. همچنین

مشاهده می شود که پوسته استوانهای کامپوزیتی با لایهچینی 2s[90/0] نسبت به سایر لایهچینیها، در همه نسبتهای C/R، فرکانس پایه بی بعد بالاتری دارد که می توان نتیجه گرفت، سفتی سازه در این لایهچینی نسبت به سایر حالات عملکرد بهتری دارد.

جدول 5 مقایسه فرکانسهای پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای تغییر لایهچینی.

Table 5 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout for different layers.

C/R	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
[0/90] ₂₈	0.087	0.083	0.079	0.072	0.063	0.055
[90/0] ₂₈	0.092	0.089	0.084	0.078	0.070	0.055
[0/90/0/90/0/90/0/90]	0.089	0.085	0.081	0.074	0.065	0.054

6-1-6- اثر تعداد لايهها

در شکل 7 اثر افزایش تعداد لایهها بر فرکانس پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با ضخامت ثابت بر حسب نسبت ²م نشان داده شده است.



Fig. 7 Comparing the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout for changing the number of layers.

شکل 7 مقایسه فرکانسهای پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای تغییر تعداد لایهها.

همانطوری که مشاهده می شود فرکانس پایه بی بعد برای کامپوزیت دولایه کمتر از کامپوزیت با تعداد 4 لایه و بیشتر می باشد. با افزایش تعداد لایه ها برای بیشتر از 4 لایه، میزان افزایش فرکانس پایه بی بعد کمتر می گردد. این موضوع بیانگر آن است که سفتی سازه با افزایش تعداد لایه ها عملکرد بهتری دارد. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی ، افزایش تعداد لایه ها (بیشتر از 4 لایه) بر فرکانس پایه بی بعد سازه بی تأثیر است. در شکل 8 اثر افزایش تعداد لایه ها با ضخامت ثابت بر روی فرکانس طبیعی بی بعد پوسته استوانه ای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی بر حسب نیم موج محیطی، بررسی گردیده است.

تأثیر این پارامتر تا موج محیطی 2 بر روی فرکانس طبیعی بیبعد کم بوده و بعد از آن تأثیر افزایش تعداد لایهها بر سفتی سازه بیشتر شده است، به همین دلیل در موجهای محیطی بالاتر از n = 2، با افزایش تعداد لایهها فرکانس طبیعی بیبعد نیز بیشتر میشود. علاوه بر این، با توجه به شکل میتوان دریافت که فرکانس پایه بیبعد سازه در موج محیطی n = 3 اتفاق میافتد.



Fig. 8 Comparison of the non-dimensional natural frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout for changing the number of layers, C/R = 0.4, m = 1. شکل 8 مقایسه فرکانسهای طبیعی بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه . $m = 1 \cdot C/R = 0.4$ یه ازای تغییر تعداد لایهها، $m = 1 \cdot C/R = 0.4$

6-1-4- نسبت طول به شعاع

در شکل 9 اثر نسبت طول به شعاع بر فرکانس پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی همراه با تعداد لایههای برابر و ضخامت ثابت نشان داده شده است.



Fig. 9 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout according to the ratio of length to radius.

شکل 9 مقایسه فرکانس،های پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای نسبت طول به شعاع.

با توجه به شکل 9، اثر افزایش طول (نسبت طول به شعاع) بر کاهش فرکانس پایه بیبعد، کمتر میشود. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی اثر افزایش طول بر میزان کاهش فرکانس پایه بیبعد، کمتر میگردد.

در شکل 10، اثر افزایش نسبت طول به شعاع بر روی فرکانس طبیعی بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی بر حسب نیم موج محیطی بررسی گردیده است.

با توجه به شکل 10، در موجهای محیطی پایین تر از 8 = n با افزایش طول (نسبت طول به شعاع) فرکانس طبیعی بیبعد کاهش مییابد که با توجه به این موضوع که پارامتر طول اغلب مواقع در مخرج عبارتهای معادلات تعادلی قرار می گرفت، قابل پیش بینی است، ولی برای موج محیطی بالاتر از 8 = nمی توان از اثر نسبت طول به شعاع صرف نظر کرد. علاوه بر این، با افزایش طول پوسته استوانهای فرکانس پایه بی بعد سازه در موجهای محیطی پایین تر اتفاق می افتد.



Fig. 10 Comparison of the non-dimensional natural frequencies of laminated composite cylindrical shell with cutout according to length to radius ratio, C/R = 0.4, m = 1. شکل 10 مقایسه فرکانسهای طبیعی بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه. $m = 1 \cdot C/R = 0.4$, m = 1.2

6-1-5- نسبت ضخامت به شعاع

در شکل 11، اثر نسبت ضخامت به شعاع بر فرکانس پایه بیبعد پوسته استوانه-ای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی همراه با تعداد لایههای یکسان بررسی گردیده است.



Fig. 11 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of laminated composite cylindrical shell with cutout for thickness change.

شکل 11 مقایسه فرکانسهای پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای تغییر ضخامت.

با توجه به شکل 11 مشاهده می شود که اثر افزایش ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) در مقادیر بیشتر از 0.016 بر افزایش فرکانس پایه بی بعد، کاهش می یابد. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی اثر افزایش نسبت ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) پوسته استوانهای دارای گشودگی بر میزان کاهش فرکانس پایه بی بعد، مقدار بیشتری است.

در شکل 12، اثر افزایش نسبت ضخامت به شعاع بر روی فرکانس طبیعی پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی نشان داده شده است.

تأثیر این پارامتر تا موج محیطی 2 بر روی فرکانس طبیعی بی بعد کم بوده و بعد از آن تأثیر افزایش ضخامت بر سفتی سازه بیشتر شده است، در نتیجه باعث افزایش فرکانس طبیعی بی بعد شده است. در حقیقت با افزایش پنج برابری نسبت ضخامت به شعاع، هر کدام از ماتریس های [**A**]، [**B**] و [**D**] به ترتیب 5، 25 و 125 برابر گردیده که با توجه به رابطه 9 نتیجه دور از انتظاری

نیست. همچنین در موجهای محیطی بالاتر از $\mathbf{r} = \mathbf{n}$ با افزایش ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) میزان افزایش فرکانس طبیعی بی بعد نیز بیشتر می-شود. علاوه بر این، با افزایش ضخامت پوسته استوانهای فرکانس پایه بی بعد سازه در موجهای محیطی پایین تر اتفاق می افتد.



Fig. 12 Comparison of the non-dimensional natural frequencies of laminated composite cylindrical shell with cutout for thickness change, C/R = 0.4, m = 1. شکل 12 مقایسه فرکانسهای طبیعی بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه

دارای گشودگی به ازای تغییر ضخامت، C/R = 0.4. m = 1.

6-2- پارامترهای هندسی گشودگی

مهم ترین پارامترهای مربوط به گشودگی که نقش تعیین کننده در تحلیل ارتعاشی پوسته استوانهای کامپوزیت دارای گشودگی دارند و در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفتهاند، ابعاد، جهت و محل گشودگی میباشند. در ادامه اثر هر یک از این پارامترها بر فرکانس پایه بیبعد بررسی شده است. در این بخش، بررسیهای صورت گرفته برای پوسته استوانهای کامپوزیت دارای مشخصات هندسی شماره 3 و ماده M3 و لایه چینی 25[90/9] است.

6-2-1- ابعاد و جهت گشودگی

در شکل 13، اثر جهت گشودگی بر فرکانس پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با تعداد لایههای برابر و ضخامت ثابت نشان داده شده است.

با توجه به شکل 13، مشاهده میشود که تأثیر افزایش ابعاد گشودگی در راستای طولی نسبت به راستای محیطی بیشتر است.



Fig. 13 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with cutout for increasing the dimensions of the cutout in the longitudinal and circumferential directions.

شکل 13 مقایسه فرکانس های پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی به ازای افزایش ابعاد گشودگی در راستای طولی و محیطی.

6-2-2- محل قرارگیری گشودگی

در شکل 14، اثر محل قرار گیری گشودگی بر فرکانس پایه بیبعد پوسته استوانه-ای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با تکیه گاه ساده و تعداد لایههای برابر و ضخامت ثابت نشان داده شده است.

با توجه به شکل 14 برای گشودگی با اندازه ثابت، جابجایی محل گشودگی در راستای طولی به سمت مرکز پوسته استوانهای کامپوزیتی با تکیهگاه ساده باعث کاهش فرکانس پایه بیبعد میشود. همچنین میزان کاهش فرکانس پایه بیبعد با جابجایی محل گشودگی به سمت مرکز سازه با افزایش ابعاد گشودگی، افزایش می یابد.



Fig. 14 Comparison of the non-dimensional fundamental frequencies of the laminated composite cylindrical shell with a cutout with a simple support for changing the location of the cutout for its different dimensions (C/R).

شکل 14 مقایسه فرکانس،های پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با تکیهگاه ساده به ازای تغییر محل قرارگیری گشودگی برای ابعاد متفاوت آن (C/R).

7- نتیجهگیری

در این مقاله به تحلیل ارتعاشات آزاد پوستههای استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای بریدگی به روش تحلیلی پرداخته شده است. معادلات تعادل پوسته استوانه ای بر اساس تئوری کلاسیک پوسته و با استفاده از روش نیوتن استخراج شدهاند. شرایط مرزی پوسته دو سر ساده در نظر گرفته شده است. مؤلفههای جابهجایی با توجه به شرایط مرزی به صورت بسط سری فوریه دوگانه نوشته شدهاند. روابط کرنش-جابجایی و انحنا-جابجایی بر اساس نظریه تقریب لاو در نظر گرفته شده است. مدلسازی گشودگی توسط تابع توزیع (هویساید) بر معادلات تعادل پوسته استوانهای کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن فرکانس طبیعی پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی، معادلات حرکت با استفاده از روش گالرکین حل شدهاند. برای صحه گذاری، ابتدا نتايج پوسته استوانهای کامپوزيتی با نرمافزار المان محدود آباکوس و مقالات پیشین در این زمینه مقایسه شدهاند و سپس نتایج پوسته استوانهای کامپوزیتی دارای گشودگی با نتایج نرمافزار آباکوس بررسی شده است که مطابقت خوبی بین آنها وجود دارد. در پژوهش حاضر اثر پارامترهای مختلفی بر ارتعاشات آزاد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی مورد بررسی قرار گرفته است که مهم ترین نتایج و دستاوردهای خروجی پژوهش حاضر عبارتاند از:

 بررسی نتایج حاصل از تغییر خواص مواد بر فرکانس پایه بیبعد بر روی پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای بریدگی به همراه تعداد لایه-های یکسان و ضخامت ثابت نشان میدهد که با توجه به آن، مواد M2،

M6 و M7، به ترتیب بیشترین و کمترین فرکانس پایه بی بعد می باشند، همچنین با افزایش ابعاد گشودگی (C = D)، مقادیر فرکانس پایه بی بعد کاهش می یابد. با افزایش ابعاد گشودگی در مواد $M2 \ e 4 M$ ، به ترتیب بیشترین (46.15) و کمترین (111.8) تأثیر بر میزان کاهش فرکانس پایه بی بعد اتفاق می افتد. این موضوع بیانگر آن است که ماتریس سفتی ماده M4 در برابر افزایش ابعاد از عملکرد بهتری برخوردار است. در ادامه با توجه به خواص دینامیکی مواد در جدول 1 مانند مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون و ... می توان مشاهده کرد که مواد کامپوزیت نسبت به مواد فلزی از نتایج مطلوب تر برخوردار می باشند

- بررسی نتایج حاصل برای چهار نوع لایهچینی متفاوت همراه با تعداد لایه-های یکسان و ضخامت ثابت، تأثیر زاویه الیاف بر فرکانسهای پایه بی بعد سازه نشان میدهد که در پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی لایهچینی 25[90/0] نسبت به سایر عملکرد بهتری (سفتی سازه بیشتر) دارد. همچنین در لایهچینی 25[90/0] کمترین (%3.31) تأثیر بر میزان کاهش فرکانس پایه بی بعد در برابر افزایش ابعاد گشودگی اتفاق می افتد.
- بررسی نتایج حاصل از افزایش تعداد لایهها بر فرکانسهای طبیعی بی بعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با ضخامت ثابت بر حسب نسبت $\frac{2}{n}$ نشان می دهد که فرکانس پایه بی بعد برای کامپوزیت دولایه کمتر از کامپوزیت با تعداد 4 لایه و بیشتر می باشد. با افزایش تعداد لایه ارای بیشتر از 4 لایه، میزان افزایش فرکانس پایه بی بعد کمتر می-گردد. این موضوع بیانگر آن است که سفتی سازه با افزایش تعداد لایه ها عملکرد بهتری دارد. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی ، افزایش تعداد لایه ها (بیشتر از 4 لایه) بر فرکانس پایه بی بعد سازه بی افزایش تعداد لایه ها بی پارامتر تا موج محیطی 2 بر روی فرکانس طبیعی بی بعد کم بوده و این پارامتر تا موج محیطی 2 بر روی فرکانس طبیعی بی بعد کم بوده و ممین دلیل در موجهای محیطی بالاتر از $\mathbf{2} = \mathbf{n}$. با افزایش تعداد لایه ها می توان دریافت که فرکانس پایه بی بعد سازه در موج محیطی $\mathbf{n} = \mathbf{3}$
- بررسی نتایج حاصل از تغییر نسبت طول به شعاع بر فرکانس طبیعی بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی همراه با تعداد لایههای برابر و ضخامت ثابت نشان میدهد که اثر افزایش طول (نسبت طول به شعاع) بر کاهش فرکانس پایه بیبعد، کمتر میشود. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی اثر افزایش طول بر میزان کاهش فرکانس پایه بیبعد، کمتر می گردد. همچنین در موجهای محیطی پایین تر از 8 = n با افزایش طول (نسبت طول به شعاع) فرکانس طبیعی بیبعد کاهش می ابد که با توجه به این موضوع که پارامتر طول اغلب مواقع در مخرج عبارتهای معادلات تعادلی قرار می گرفت، قابل پیش بینی است، ولی برای موج محیطی بالاتر از 8 = n می توان از اثر نسبت طول به شعاع صرفنظر کرد. علاوه بر این، با افزایش طول پوسته استوانهای فرکانس پایه بیبعد سازه در موجهای محیطی پایین تر اتفاق می افتد.
- بررسی نتایج حاصل از تغییر نسبت ضخامت به شعاع بر فرکانسهای طبیعی بیبعد پوسته استوانه یک کمپوزیتی چندلایه دارای گشودگی همراه با تعداد لایههای یکسان نشان میدهد که اثر افزایش ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) در مقادیر بیشتر از 0.016 بر افزایش فرکانس پایه بی-

بعد، کاهش مییابد. همچنین با افزایش ابعاد گشودگی اثر افزایش نسبت ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) پوسته استوانهای دارای گشودگی بر میزان کاهش فرکانس پایه بیبعد، مقدار بیشتری است. همچنین تأثیر این پارامتر تا موج محیطی 2 بر روی فرکانس طبیعی بیبعد کم بوده و بعد از آن تأثیر افزایش ضخامت بر سفتی سازه بیشتر شده است، در نتیجه باعث افزایش فرکانس طبیعی بیبعد شده است. همچنین در موجهای محیطی بالاتر از 2 = n. با افزایش ضخامت (نسبت ضخامت به شعاع) میزان افزایش فرکانس طبیعی بیبعد نیز بیشتر میشود. علاوه بر این، با افزایش ضخامت پوسته استوانهای فرکانس پایه بیبعد سازه در موجهای محیطی پایینتر اتفاق میافتد.

- بررسی نتایج حاصل از تغییر جهت گشودگی بر فرکانس های پایه پوسته استوانه ای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با تعداد لایه های برابر و ضخامت ثابت نشان میدهد که تأثیر افزایش ابعاد گشودگی در راستای طولی نسبت به راستای محیطی بر فرکانس پایه، بیشتر است.
- بررسی نتایج حاصل از تغییر محل قرارگیری گشودگی بر فرکانسهای پایه بیبعد پوسته استوانهای کامپوزیتی چندلایه دارای گشودگی با تکیهگاه ساده و تعداد لایههای برابر و ضخامت ثابت برای گشودگی با اندازه ثابت نشان میدهد که جابجایی محل گشودگی در راستای طولی به سمت مرکز پوسته استوانهای کامپوزیتی با تکیهگاه ساده باعث کاهش فرکانس پایه بی-بعد میشود. همچنین میزان کاهش فرکانس پایه بیبعد با جابجایی محل گشودگی به سمت مرکز با افزایش ابعاد گشودگی، افزایش مییابد

8- فهرست علائم

کہر شک ک	رط
L	طول پوسته استوانهای
R	شعاع پوسته استوانهای
h	ضخامت پوسته استوانهای
С	طول گشودگی پوسته استوانهای
D	كمان گشودگی پوسته استوانهای
x	مؤلفه مکانی در جهت طولی
z	مؤلفه مکانی در جهت شعاعی
${u \\ v \\ w}$	مؤلفه جابجایی در جهتهای محوری، محیطی و برشی
$\begin{cases} p_x \\ P_y \\ P_z \end{cases}$	نیرو وارد بر المان پوسته در جهتهای طولی، محیطی و شعا
$\begin{cases} q_x \\ q_\theta \\ q_z \end{cases}$	نیروی تحریک خارجی در جهتهای محوری، محیطی و شعا
$\begin{cases} N_x \\ N_\varphi \\ N_{x\varphi} \end{cases}$	مؤلفههای نیرو در جهتهای محوری، محیطی و برشی
$\begin{cases} M_x \\ M_\varphi \\ M_{x\varphi} \end{cases}$	مؤلفههای گشتاور در جهتهای محوری، محیطی و برشی
${ Q_x \\ Q_\varphi}$	مؤلفه نیرو برشی در جهتهای محوری و محیطی
HD^*	تابع توزیع (هویساید)
HD	تابع توزیع (هویساید)
$ \begin{cases} HD(x) \\ HD(\varphi) \end{cases} $	تابع توزیع در جهتهای محوری و محیطی

موقعیت بریدگی در جهت طولی

سطح میانی در جهتهای محوری و محیطی	انحنای	$\begin{cases} k_x^\circ \\ k_\varphi^\circ \end{cases}$
سطح میانی	پيچش	$k_{x\varphi}^{\circ}$
، تبديل	ماتريس	Т
، سفتی تبدیل یافته کاهشیافته نظیر لایه k ام	ماتريس	\bar{Q}^k_{ij}
، سفتی کاهشیافته نظیر لایه k ام	ماتريس	Q_{ij}^k
لاستیک در جهتهای اصلی تک لایه کامپوزیت	مدول ا/	$\begin{cases} E_{11} \\ E_{22} \end{cases}$
دیفرانسیلی (پوسته استوانهای سالم)	اپراتور د	L_{ij}
دیفرانسیلی (پوسته استوانهای دارای گشودگی)	اپراتور د	L'_{ij}
بم موجهای طولی	تعداد نب	m
وجهاي محيطي	تعداد م	n
	زمان	t
کل مود پوسته در جهت محوری (پوسته استوانهای دارای	ثابت ش	Ā
(گشودگی	1 mn
کل مود پوسته در جهت محیطی (پوسته استوانهای دارای	ثابت ش	<u>R</u>
(گشودگی	D_{mn}
یکل مود پوسته در جهت شعاعی (پوسته استوانهای دارای	ثابت ش	Ē
(گشودگی	c_{mn}
بانی در مختصات تعمیمیافته	توابع زه	$T_{mn}(t)$
حد سطح پوسته	جرم وا-	I_1
، سفتی پوسته استوانهای دارای گشودگی	ماتريس	$[K']_{mn}$
، جرم پوسته استوانهای دارای گشودگی	ماتريس	$[M']_{mn}$
		علائم يونانى
کانی در جهت محیطی	مؤلفه م	Ø
، گشودگی در جهت محیطی		T
	موقعيت	φ_j
باف نسبت به محور استوانه	موقعيت زاويه الب	$arphi_j \ heta$
باف نسبت به محور استوانه هر لایه	موقعیت زاویه الب چگالی	φ_j $ heta$ $ heta^k$
باف نسبت به محور استوانه هر لایه ش	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن	$arphi_j \ heta \ $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن بردار کر	φ _j θ ρ ^k σ ε
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ی تنش محوری، محیطی و برشی	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن بردار کر مؤلفهها	$ \begin{array}{c} \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \varepsilon \\ \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \sigma_{\varphi} \end{array} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی	موقعیت زاویه الر چگالی بردار تن بردار کر مؤلفهها	$ \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \varphi_{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \varepsilon \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \varepsilon_{x} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی	موقعیت زاویه الر چگالی بردار تن بردار کر مؤلفهها	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \end{aligned} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن بردار کر مؤلفهها	$ \varphi_{j} \qquad \varphi_{$
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی سطح میانی	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن بردار کم مؤلفهها مؤلفهها	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \varphi_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_$
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی سطح میانی	موقعیت زاویه الر چگالی بردار تن مرالفهها مؤلفهها	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\phi} \\ \gamma_{x\phi} \end{aligned} \right\} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی سطح میانی یوآسون	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \end{aligned} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه زنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی یو نسون پوآسون	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \delta_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x}^{\circ} \\ \varepsilon_{x}^{\circ} \\ \varepsilon_{y}^{\circ} \\ \gamma_{x\varphi}^{\circ} \\ \begin{cases} v_{12} \\ v_{21} \\ v_{21} \end{cases} \end{cases} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه ش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی پوآسون پوآسون عادلات غیرخطی	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها	$ \begin{array}{c} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \varphi_{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \left\{\begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{\begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{\begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{\begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{\begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \varepsilon_{y} \\ $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه ش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی یو آسون بو آسون عادلات غیرخطی نلثاتی در جهت محوری	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها توابع مذ	$ \begin{aligned} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \begin{cases} \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \\ \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \end{cases} \\ \end{cases} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی یوآسون پوآسون نلثاتی در جهت محوری نلثاتی در جهت محیطی	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها توابع من توابع من	$ \begin{array}{c} \varphi_{j} \\ \varphi_{j} \\ \theta \\ \rho^{k} \\ \sigma \\ \varepsilon \\ \left\{ \begin{array}{c} \sigma_{x} \\ \sigma_{\varphi} \\ \tau_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{\varphi} \\ \gamma_{x\varphi} \\ \left\{ \begin{array}{c} \psi_{12} \\ \psi_{21} \\ \lambda \\ \eta_{i}(x) \\ \varphi_{i}(\varphi) \end{array} \right\} \right\} $
باف نسبت به محور استوانه هر لایه رنش ای تنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی ای کرنش محوری، محیطی و برشی سطح میانی پوآسون بواسون بلناتی در جهت محوری نلناتی در جهت محوری برایب ثابت شکل مود (پوسته استوانهای دارای گشودگی)	موقعیت زاویه الب چگالی بردار تن مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها مؤلفهها توابع من توابع من بردار ض	φ_{j} φ_{j} φ_{k}

زيرنويسها

عى

عى

- i متغير طولى
- j متغیر محیطی

 x_i

9- پيوستھا

پيوست الف

$$\begin{split} \mathcal{L}_{11} &= \left[A_{11} u_{xx} + \frac{2A_{16}}{R} u_{x\phi} + \frac{A_{66}}{R^2} u_{\phi\phi} \right] \\ &- HD \left[A_{11} u_{xx} + \frac{2A_{16}}{R} u_{x\phi} + \frac{A_{66}}{R^2} u_{\phi\phi} \right] \\ \mathcal{L}_{12} &= \left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} + \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) v_{x\phi} + \left(A_{16} + \frac{B_{16}}{R^2} \right) v_{x\phi} + \left(A_{16} + \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) v_{x\phi\phi} + \frac{B_{16}}{R} v_{xxx} + \left(\frac{A_{25}}{R^2} + \frac{B_{26}}{R^3} \right) v_{x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R} w_{xx\phi} + \frac{B_{26}}{R^2} w_{x\phi\phi} + B_{11} w_{xxx} + \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) w_{x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R} w_{xx\phi} + \frac{B_{26}}{R^2} w_{x\phi\phi} + \frac{B_{16}}{R^2} w_{x\phi\phi} + \frac{B_{16}}{R^2} w_{x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R^2} w_{x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R^2} w_{x\phi\phi} + \frac{B_{26}}{R^3} w_{x\phi\phi\phi} \right] \\ \mathcal{L}_{21} &= \left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} - \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) u_{x\phi} + \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{x\phi\phi} + \left(\frac{A_{16} - B_{16}}{R^2} \right) u_{x\phi} + \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{x\phi\phi} + \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) v_{x\phi\phi} + \left(\frac{B_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) v_{x\phi\phi} + \left(\frac{B_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) w_{x\phi\phi} + \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) w_{x\phi\phi} + \left(\frac{B_{26}}{R^2} - \frac{$$

$$\begin{split} L_{32}' = \left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^3} \right) v_{,\phi} + \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) v_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{A_{26}}{R} + \frac{B_{26}}{R^2} \right) v_{,x} + \left(\frac{3B_{26}}{R^2} + \frac{3D_{26}}{R^3} \right) v_{,x\phi\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{22}}{R^3} + \frac{D_{22}}{R^4} \right) v_{,\phi\phi\phi} + \left(B_{16} + \frac{D_{16}}{R} \right) v_{,xxx} \right] \\ &- HD \left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^3} \right) v_{,\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) v_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{A_{26}}{R} + \frac{B_{26}}{R^2} \right) v_{,x} + \left(\frac{3B_{26}}{R^2} + \frac{3D_{26}}{R^3} \right) v_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{22}}{R^3} + \frac{D_{22}}{R^4} \right) v_{,\phi\phi\phi} + \left(B_{16} + \frac{D_{16}}{R} \right) v_{,xxx} \right] \\ L_{33}' = \left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w + D_{11} w_{,xxxx} + \left(\frac{2D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) w_{,xx\phi\phi} \\ &+ \left(-\frac{B_{26}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi\phi} + \frac{3D_{26}}{R^3} w_{,x\phi\phi\phi\phi} \\ &+ \left(-\frac{B_{26}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \\ &- HD \left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w + D_{11} w_{,xxxx} \\ &+ \left(\frac{2D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) w_{,xx\phi\phi\phi} + \left(-\frac{B_{26}}{R^3} \right) w_{,x\phi\phi\phi\phi\phi} \\ &+ \frac{3D_{16}}{R} w_{,xxx\phi} + \frac{3D_{26}}{R^3} w_{,x\phi\phi\phi\phi} + \frac{D_{22}}{R^4} w_{,\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \end{aligned}$$

$$K_{11}' = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[A_{11}u_{,xx} + \frac{2A_{16}}{R}u_{,x\phi} + \frac{A_{66}}{R^2}u_{,\phi\phi} \right] \right. \\ \left. - HD \left[A_{11}u_{,xx} + \frac{2A_{16}}{R}u_{,x\phi} + \frac{A_{66}}{R}u_{,x\phi} + \frac{A_{66}}{R^2}u_{,\phi\phi} \right] \right] \Phi_{u} \, dxd\phi dz \\ K_{12}' = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} + \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) v_{,x\phi} + \left(A_{16} + \frac{B_{16}}{R} \right) v_{,xx} + \left(\frac{A_{26}}{R^2} + \frac{B_{26}}{R^3} \right) v_{,\phi\phi} \right] \right. \\ \left. - HD \left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} + \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) v_{,x\phi} + \left(A_{16} + \frac{B_{16}}{R} \right) v_{,xx} + \left(\frac{A_{26}}{R^2} + \frac{B_{26}}{R^3} \right) v_{,\phi\phi} \right] \right] \Phi_{u} \, dxd\phi dz$$

$$\begin{split} K_{13}' &= \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[-\frac{A_{12}}{R} w_{,x} - \frac{A_{26}}{R^2} w_{,\phi} + B_{11} w_{,xxx} \right. \\ &+ \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R} w_{,xx\phi} + \frac{B_{26}}{R^3} w_{,\phi\phi\phi} \right] \right] \\ &- HD \left[-\frac{A_{12}}{R} w_{,x} - \frac{A_{26}}{R^2} w_{,\phi} + B_{11} w_{,xxx} \right. \\ &+ \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi} + \frac{2B_{16}}{R} w_{,xx\phi} \\ &+ \frac{B_{26}}{R^3} w_{,\phi\phi\phi} \right] \right] \Phi_u \, dx d\varphi dz \\ K_{21}' &= \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} - \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) u_{,x\phi} \\ &+ \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{,\phi\phi} + \left(A_{16} - \frac{B_{16}}{R} \right) u_{,xx} \right] \\ &- HD \left[\left(\frac{A_{12} + A_{66}}{R} - \frac{B_{12} + B_{66}}{R^2} \right) u_{,x\phi} \\ &+ \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{,\phi\phi} \\ &+ \left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{,\phi\phi} \\ &+ \left(\left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{26}}{R^3} \right) u_{,\phi\phi} \\ &+ \left(\left(\frac{A_{26}}{R^2} - \frac{B_{16}}{R^3} \right) u_{,xx} \right] \right] \Phi_v \, dx d\varphi dz \end{split}$$

2207

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

$$M'_{11} = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\rho_{k} - HD * \rho_{k}] \Phi_{u} dxd\varphi dz$$

$$M'_{12} = 0$$

$$M'_{13} = 0$$

$$M'_{21} = 0$$

$$M'_{22} = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\rho_{k} - HD * \rho_{k}] \Phi_{v} dxd\varphi dz$$

$$M'_{31} = 0$$

$$M'_{32} = 0$$

$$M'_{33} = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\rho_{k} - HD * \rho_{k}] \Phi_{w} dxd\varphi dz$$

10- مراجع

- Shahani, A. and Kiarasi, F., "Numerical and Experimental Investigation on Post-Buckling Behavior of Stiffened Cylindrical Shells with Cutout subject to Uniform Axial Compression", Journal of Applied and Computational Mechanics, pp. 1–20, 2020.
- [2] Lee, H. and Kwak, M. K., "Free vibration analysis of a circular cylindrical shell using the Rayleigh-Ritz method and comparison of different shell theories", J. Sound Vib., Vol. 353, pp. 344–377, 2015.
- [3] Ghorbani, K., Mohammadi, K., Rajabpour, A. and Ghadiri, M., "Surface and size-dependent effects on the free vibration analysis of cylindrical shell based on Gurtin-Murdoch and nonlocal strain gradient theories", J. Phys. Chem. Solids., Vol. 129, pp. 140–150, 2019.
- [4] Takabatake, H., "Static analayses of elastic plates with voids", Int. J. Solids. Struct., Vol. 28, pp. 179–196, 1991.
- [5] Azhari, M., Shahidi, A. R. and Saadatpour, M. M., "Local and post local buckling of stepped and perforated thin plates", Appl. Math. Modelling., Vol. 29, pp. 633–652, 2005.
- [6] Li, G. and Cheng, J., "A Generalized Analytical Modeling of Grid Stiffened Composite Structures", Compos. Struct., Vol. 94, pp. 1117–1127, 2007.
- [7] Zhang, Z., Chen, H. and Ye, L., "A stiffened plate element model for advanced grid stiffened composite plates/shells", J. Compos. Mater., Vol. 45, 2011.
- [8] Wilson, A. J. and Rajasekaran, S., "Elastic stability of all edges simply supported, stepped and stiffened rectangular plate under Biaxial loading", Appl. Math. Modelling., Vol. 38, pp. 479–495, 2014.
- [9] Huang, L., Sheikh, A. H., Ng, C. T. and Griffith, M. C., "An efficient finite element model for buckling analysis of grid stiffened laminated composite plates", Compos. Struct., Vol. 122, pp. 41–50, 2015.
- [10] Omidvaran, C., "Free vibration of grid-stiffened plates", J. Sound. Vib., Vol. 19, pp. 463-472, 1971.
- [11] Kalita, K. and Haldar, S., "Free vibration analysis of rectangular plates with Central cutout", Cogent. Eng., 2016.
- [12] Soleimanian, S., Davar, A., Azarafza, R., Jam, J. E. and Zamani, M. R., "Theoretical, numerical, and experimental analyses of free vibrations of glass fiber reinforced polymer plates with central cutouts and free boundaries", Mechanics of Advanced Composite Structures., Vol. 5, pp. 67-74, 2018.
- [13] Li, G. and Cheng, J., "A Generalized Analytical Modeling of Grid Stiffened Composite Structures", Journal of Composite Materials., Vol. 41, 2007.
- [14] Azarafza, R., Golkar, A. H. and Davar, A., "Analytical investigation of Low-Velocity Oblique Impact on Composite Cylindrical Shells", Journal of Science and Technology of Composites., Vol. 3, pp. 1106-1119, 2020.
- [15] Chaudhuri, P. B., Mitra, A. and Sahoo, S., "Free vibration analysis of antisymmetric angle ply laminated composite stiffened hyper

$$K_{22}' = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} - \frac{D_{22}}{R^4} \right) v_{,\phi\phi} + \left(\frac{2A_{26}}{R} - \frac{2D_{26}}{R^3} \right) v_{,x\phi} + (A_{66} - \frac{D_{66}}{R^2}) v_{,xx} \right] \right] \\ - HD \left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} - \frac{D_{22}}{R^4} \right) v_{,\phi\phi} + \left(\frac{2A_{26}}{R} - \frac{2D_{26}}{R^3} \right) v_{,x\phi} + (A_{66} - \frac{D_{66}}{R^2}) v_{,xx} \right] \right] \phi_v \, dx d\phi dz$$

$$\begin{split} K_{23}' &= \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{B_{22}}{R^{3}} - \frac{A_{22}}{R^{2}} \right) w_{,\phi} + \left(\frac{B_{26}}{R^{2}} - \frac{A_{26}}{R} \right) w_{,xx\phi} \right. \\ &+ \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R} - \frac{D_{12} + D_{66}}{R^{2}} \right) w_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{22}}{R^{3}} - \frac{D_{22}}{R^{4}} \right) w_{,\phi\phi\phi} + \left(\frac{2B_{26}}{R^{2}} - \frac{2D_{26}}{R^{3}} \right) w_{,x\phi\phi} \\ &+ \left(B_{16} - \frac{D_{16}}{R} \right) w_{,xxx} \right] \\ &- HD \left[\left(\frac{B_{22}}{R^{3}} - \frac{A_{22}}{R^{2}} \right) w_{,\phi} + \left(\frac{B_{26}}{R^{2}} - \frac{A_{26}}{R} \right) w_{,x} \\ &+ \left(\frac{B_{12} + B_{66}}{R} - \frac{D_{12} + D_{66}}{R^{2}} \right) w_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{22}}{R^{3}} - \frac{D_{22}}{R^{4}} \right) w_{,\phi\phi\phi} + \left(\frac{2B_{26}}{R^{2}} - \frac{2D_{26}}{R^{3}} \right) w_{,x\phi\phi} \\ &+ \left(B_{16} - \frac{D_{16}}{R} \right) w_{,xxx} \right] \right] \\ K_{31}' &= \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{A_{12}}{R} \right) u_{,x} + B_{11} u_{,xxx} + \left(\frac{A_{26}}{R^{2}} \right) u_{,\phi} + \frac{3B_{16}}{R} u_{,xx\phi} \\ &+ \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R^{2}} \right) u_{,x\phi\phi} + \frac{B_{26}}{R^{3}} u_{,\phi\phi\phi} \right] \\ &- HD \left[\left(\frac{A_{12}}{R} \right) u_{,x} + B_{11} u_{,xxx} + \left(\frac{A_{26}}{R^{2}} \right) u_{,\phi\phi} \\ &+ \frac{3B_{16}}{R} u_{,xx\phi} + \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R^{2}} \right) u_{,x\phi\phi} \\ &+ \frac{B_{26}}{R^{3}} u_{,\phi\phi\phi} \right] \right] \phi_{w} \, dxd\phi dz \end{split}$$

$$K_{32} = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^3} \right) v_{,\phi} + \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) v_{,xx\phi} + \left(\frac{A_{26}}{R} + \frac{B_{26}}{R^2} \right) v_{,x} + \left(\frac{3B_{26}}{R^2} + \frac{3D_{26}}{R^3} \right) v_{,x\phi\phi} + \left(\frac{B_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^2} \right) v_{,x} + \left(\frac{B_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^3} \right) v_{,\phi\phi\phi} + \left(B_{16} + \frac{D_{16}}{R} \right) v_{,xxx} \right] \\ - HD \left[\left(\frac{A_{22}}{R^2} + \frac{B_{26}}{R^2} \right) v_{,x} + \left(\frac{3B_{26}}{R^2} + \frac{3D_{26}}{R^3} \right) v_{,x\phi\phi} + \left(\frac{B_{12} + 2B_{66}}{R} + \frac{D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) v_{,xx\phi} + \left(\frac{B_{22}}{R^2} + \frac{B_{22}}{R^3} \right) v_{,\phi\phi\phi} + \left(B_{16} + \frac{D_{16}}{R} \right) v_{,xxx} \right] \right] \\ K_{33}' = \int_{0}^{L} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w + D_{11} w_{,xxxx} + \left(\frac{2D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) w_{,xx\phi\phi\phi} + \left(-\frac{B_{26}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi\phi\phi} + \frac{D_{22}}{R^4} w_{,\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \\ - HD \left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w + D_{11} w_{,xxxx} + \left(\frac{2D_{12} + 2D_{66}}{R^2} \right) w_{,xx\phi\phi\phi\phi} + \frac{D_{22}}{R^4} w_{,\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \\ - HD \left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi\phi\phi} + \frac{3D_{16}}{R} w_{,xxx\phi} + \frac{3D_{26}}{R^3} w_{,x\phi\phi\phi\phi\phi} + \frac{D_{22}}{R^4} w_{,\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \\ - HD \left[\left(-\frac{A_{22}}{R^2} \right) w_{,xx\phi\phi\phi\phi} + \left(-\frac{B_{26}}{R^2} \right) w_{,x\phi\phi\phi\phi\phi\phi} \right] \right]$$

shell with cut out", in Materials Today: Proceedings., Vol. 5, pp. 5563–5572, 2018.

- [16] Zhi-yuan, C. and Hua-ning, W., "Free vibration of FGM cylindrical shells with holes under various boundary conditions", J. Sound Vib., Vol. 306, pp. 227–237, 2007.
- [17] Azarafza, R., Davar, A. and Baghani, H., "Investigation of Free Vibration of Laminated Composite Conical Shell with Local Attached Mass", Mechanics of Advanced Composite Structures., Vol. 9, pp. 173-184, 2022.
- [18] Talezadehlari, A., "Free vibration analysis of perforated composite cylindrical shell using Generalized Differential Quadrature Method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1120-1132, 2020.
- [19] Y. Ansaryan, Y. Jafari, A. A., "Investigation of Free and Forced Vibration of a Composite Circular Cylindrical Shell with Internal Fluid", In Persian, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 7, No. 2, pp. 93-109, 2017.
- [20] Talezadehlari, A. and Rahimi, G. H., "Buckling Analysis of Perforated Composite Cylindrical Shell Using Generalized Differential Quadrature Method (Gdqm)", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 385-396, 2018.
- [21] Khalili, S.M.R. Sedigh, Y. and Hossein Ahari, S.M. M. M., "Experimental and numerical study of the buckling of semicylindrical composite lattice", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 269-276, 2016.
- [22] Khalili, S. M. R. Ahari, S. M. M. M. Sedigh, Y., "Experimental and numerical investigation on semi-cylindrical compositelatticereinforced with triangular cellssubjected to high velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 208-217, 2018
- [23] Fereidoon, A., Kolasangiani, K. et al., "Study on buckling of steel cylindrical shells with an elliptical cutout under combined loading", JCARME., Vol. 3, pp. 13-25, 2013.
- [24] Poore, A. L., Barut, A. and Madenci, E., "Free vibration of laminated cylindrical shells with a circular cutout", J. Sound Vib., Vol. 312, pp. 55–73, 2008.
- [25] Khalili, S. M. R., Azarafza, R. and Davar, A., "Transient dynamic response of initially stressed composite circular cylindrical shells under radial impulse load", Compos. Struct., vol. 89, pp. 275–284, 2009.
- [26] Azarafza, R., Khalili, S. M. R., Jafari, A. A. and Davar, A., "Analysis and optimization of laminated composite circular cylindrical shell subjected to compressive axial and transverse transient dynamic loads", Thin-Walled Struct., vol. 47, pp. 970–983, 2009.
- [27] Tong, B., Li, Y., Zhu, X. and Zhang, Y., "Three-dimensional vibration analysis of arbitrary angle-ply laminated cylindrical shells using differential quadrature method", Applied Acoustics., vol. 146, pp. 390–397, 2019.
- [28] Ghasemi, A. R. and Mohandes, M., "Comparison between the frequencies of FML and composite cylindrical shells using beam modal function model", JCAMECH., vol. 50, pp. 239-245, 2019.

نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپیوزیت** http://jstc.iust.ac.ir



مقایسه مقاومت خمشی قطعات مستطیل شکل ساختهشده بوسیله چاپ سهبعدی از جنس PLA با شیارهای مختلف

على سلوكى¹، محمدرضا محمدعليها^{2*}، احمد ماكوئى³

۱- دانشجوی کارشناسیارشد، مهندسی صنایع گرایش بهینهسازی سیستمها، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- دانشیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران
 3- استاد، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق يستى mrm_aliha@iust.ac.ir ،16846-13114

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
	دريافت: 1402/04/03
لایهلایهی ماده پلیمری ذوب شونده قادر به تولید هندسههای پیچیده است. پلیلاکتیک اسید(PLA) به دلیل خواص خوبی مانند	پذيرش: 1402/05/17
زیست تخریب پذیر بودن و زیست سازگاری از جمله مواد پرکاربرد در این فناوری است که قطعات ساخته شده از آن در کاربردهای مختلف مهندسی در حال استفاده می باشد. استحکام این قطعات لایه لایه ای تابع پارامترهای چاپ مانند میزان چگالی پر شوندگی، جهت گیری چاپ، سرعت و دمای چاپ، فاصله الیاف و غیره می باشد. همچنین وجود شیار در قطعات مهندسی و به ویژه قطعات لایه لایه ای چاپ شده پلیمری می تواند تأثیر بسزایی در رفتار مکانیکی این مواد داشته باشد. در این تحقیق استحکام قطعات تیر کوتاه شیاردار با سه هندسه مختلف (U,V, keyhole) چاپ شده با ماده PLA تحت بارگذاری شبه استاتیکی خمشی به روش تجربی و آماری مورد بررسی قرار می گیرد. میزان بار و انرژی شکست نمونه ها محاسبه شده و همچنین حساسیت به هندسه شیار در قطعات آزموده شده ارزیابی می گردد. از آزمون فیشر برای مقایسه زوجی شیارها استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که شیار در قطعات آزموده شده از این همه ضعیف تر است در حالی	کلیدواژگان چاپ سەبعدی، مقاومت خمشی، اثر شیار، مقایسهی زوجی
که شیار دایرهای شکل مقاومت بیشتری دارد و این مقاومت با افزایش شعاع دایره افزایش مییابد.	

Comparison of flexural strength in rectangular shape 3D-printed PLA samples with different grooves

Ali Solouki¹, Mohammad Reza Mohammad Aliha^{1*}, Ahmad Makui¹

1- School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. * P.O.B. 16846-13114, mrm_aliha@iust.ac.ir

Keywords	Abstract
3D printing, Flexural strength, Influence of groove geometry, Pairwise comparison	The production of parts using 3D printing, which is a type of additive manufacturing, is expanding at a faster rate. This technology can produce complex geometries by depositing melting polymer material layer by layer. Polylactic acid (PLA) is one of the most widely used materials in this technology due to its good properties such as biodegradability and bio-compatibility, and parts manufactured with PLA are being used in various engineering applications. The strength of these layer-by-layer parts depends on the printing parameters such as the infill density, the orientation of the printed fibers, the speed and temperature of the print, the distance between the fibers, etc. Also, the presence of grooves in engineering parts, especially printed polymer layer-by-layer parts, can significantly affect the mechanical behavior of these materials. In this research, the strength of short grooved beam parts with three different geometries (U, V, key hole) printed with PLA material under quasi-static bending loading is investigated experimentally and statistically. The amount of load and fracture energy of the samples are measured and also the sensitivity to the geometry of the groove in the tested parts is evaluated. Fisher's test is used for pairwise comparison of the grooves' strength. The results of this research show that the groove with an angled corner is the weakest, while the circular groove has a higher resistance, and this resistance increases when the radius of the circle is increased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Solouki, A., Aliha, M. R. M., Makui, A., "Comparison of flexural strength in rectangular shape 3D-printed PLA samples with different grooves," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2210-2217, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2005499.1841

1- مقدمه

امروزه مهم ترین مقوله های اساسی تولید محصولات در صنایع عبارت اند از تولید تکوینی'، تولید کاهشی ٔ و تولید افزایشی ؓ. در میان همه اینها تولید افزایشی جدیدترین فناوری بشمار میآید. این فناوری از رسوب لایهبه لایه مواد برای ساخت قطعاتی با کمک فناوری طراحی به کمک رایانه^۴ استفاده می کند. ابتدا یک مدل مجازی از محصول توسط کامپیوتر تولیدشده و سپس مدل به مقاطع دوبعدی تقسیم می شود. برای تولید محصول ، داده های دوبعدی باید به ماشین تولید افزایشی منتقل شوند. دستگاه تولید افزایشی سطوح مقطع دوبعدی را لايهبه لايه رسوب مي دهد و اين كار ادامه مي يابد تا محصول به طور كامل چاپ شود [1].

امروزه چاپ سهبعدی ^۵ در بخش های مختلفی مانند خودروسازی، مراقبت-های بهداشتی و کاربردهای زیست پزشکی، حمل و نقل، هوافضا و دفاع، نیرو و انرژی کاربرد دارد [2-3]. چاپ سهبعدی شامل فناوریهای مختلفی مانند مدلسازى رسوب ذوب شده ، تفجوشي ليزرى انتخابي ٧، استريوليتو گرافي ٥ و سایر فناوریها میباشد. یک بررسی جهانی نشانمیدهد که مدلسازی رسوب ذوب شده رايج ترين تكنيك است [2].

مدلسازی رسوب ذوب شده به عنوان بخشی از اکستروژن مواد، سریعترین پیشرفت را در بین تمام روشهای تولید افزایشی داشته و در طول سالهای اخیر مورد توجه مصرف کنندگان قرار گرفته است. در این فرآیند، یک نازل با حرکت در یک پلان^۹ دوبعدی یک فیلامنت ذوبشده را بر روی یک پلتفرم^{۱۰} تزریق می کند و در نتیجه یک لایه از یک مقطع را ایجاد می کند. پلتفرم قادر است برای هر لایه به بالا یا پایین حرکت کند و این روند تا زمانی که کل قطعه چاپ شود ادامه می یابد. به دلیل سادگی، هزینه کم و توانایی تولید هندسه های مختلف، این فناوری با کاربردهای متعدد توجه بیشتری را به خود جلب کرده-است [1]. قابلیت چاپ هندسههای پیچیده و عملکردی انعطاف پذیر، منجر به کاهش هزینههای مونتاژ میشود که خود یکی از علل کاربرد روزافزون این فناوری است. با این حال، استفاده از این فناوری در تولید قطعات مختلف دارای معایبی است که از جمله آنها می توان به سطح نامنظم، خواص مکانیکی ضعیف و دقت پایین ابعادی اشاره کرد.

اگرچه در برخی موارد مانند نمونههای اولیه سریع"، مقاومت مکانیکی زیادی لازم نیست، برای اینکه این فناوری در صنعت قابل قبول تر باشد و برای اينكه توليد انبوه قطعات چاپى توجيەپذير شود، مقاومت مكانيكى مىتواند يک نیاز اصلی بشمار آید. برای تولیدکنندگان مهم است که قطعاتی با کیفیت پایدار بسازند تا بتوانند انتظارات مصرف كنند گان را برآورده سازند. انتخاب بهترین پلیمر گرمانرم^{۱۲} با توجه به کاربرد پیشنهادی قطعه یک امر ضروری است که باید پیش از شروع فرآیند تولید انجام شود. محققان در تلاش اند تا مواد جدید قابل استفاده در رسوبسازی مدل ذوب شده را بیابند و همچنین بر روی بهبود ویژگیهای مواد شناخته شده کار کنند [4].

- Additive manufacturing
- Computer aided design Three-dimensional printing
- Fused deposition modeling
- Selective laser sintering Stereolithography
- Plan
- Platform
- 11 Rapid prototyping
- 12 Thermoplastic
- ¹³ Rheological
 ¹⁴ Acrylonitrile Butadiene Styrene

موادی که می توان در این فرآیند استفاده کرد باید دارای خواص حرارتی و رئولوژیکی^{۱۳} مناسب باشد. دو نمونه مناسب از این مواد عبارتاند از اكريلونيتريل-بوتادين استايرن ١^۴ و اسيدپلي لاكتيك¹⁰. نقطه ذوب مناسب، دمای انتقال شیشهای، شاخص جریان ذوب و غیره ویژگیهایی هستند که تنها تعداد کمی از مواد دارا میباشند و این خواص به پردازش آسان آنها در چاپگر کمک میکند. پلیکربنات^{۱۶} و پلیآمید^{۱۷} نیز در رسوبسازی مدل ذوبشده مورد استفاده قرارمی گیرند، اما استفاده ی کمتری دارند [5]. یلی لاکتیک اسید به دلیل ویژگیهای خاص خود مانند نقطه ذوب پایین، غیرسمیبودن، غیر تحریک پذیری و همچنین تجزیه پذیری به طور گسترده در فناوری رسوبسازی مدل ذوب شده استفاده می شود. به دلیل این ویژگی ها، کاربرد آن در چاپ سه بعدی به یک کانون تحقیقاتی تبدیل شده و هر ساله مقالات زیادی در مورد آن منتشر می شود [6–7].

حیدری رارانی و همکاران تأثیر سه پارامتر فرآیند چگالی چاپ، سرعت چاپ و ضخامت لایه را بر مقاومت کششی نمونه های ساخته شده از پلی لاکتیک-اسید بررسی کردند. آنها دریافتند که بیشترین مقاومت در چگالی چاپ 80 درصد رخ میدهد [8]. ترییونو و همکاران^{۱۸} [9] تأثیر عامل پهنای نازل را بر مقاومت کششی قطعهی تولیدی بررسی کردند. نتیجه این بود که با افزایش پهنای نازل چگالی افزایش یافته و استحکام کششی نیز در مادهی پلیلاکتیک اسید افزایش مییابد. فانگ و همکاران ۱۹ [10] میزان اثر گذاری دما و رطوبت را بر خواص مکانیکی و شکل هندسی قطعات تولیدشده با مادهی اولیهی پلی-کربنات بررسی کردهاند. در این آزمایش مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هوین و همکاران ^{۲۰} [11] با استفاده از نرمافزار مینی تب در ابتدا از روش تاگوچی اثرگذاری سه پارامتر دمای نازل ، سرعت چاپ و قطر لایه را بر مقاومت کششی قطعات چاپشده با پلیلاکتیکاسید بررسی کردند، سپس با استفاده از رگرسیون رفتار آن را در نقاط دیگر پیشبینی کردند. عبدالرحمان و همکاران (۲ [12] علاوه بر مقاومت کششی به دنبال بهینه کردن دقت ابعاد، کیفیت سطح و هزینهی تولید قطعه با مادهی پلی لاکتیک اسید بودند. جهت-گیری ساخت در این آزمایش به طور گسترده مورد ارزیابی قرارگرفته است.

چاکون و همکاران^{۲۲} [13] عوامل جهت گیری ساخت، ضخامت لایه و سرعت چاپ را بر اساس آزمونهای کشش و خمش سهنقطهای بررسی کردند. قطاوی و همکاران^{۳۲} [14] علاوه بر بررسی عوامل مؤثر بر استحکام کششی مادهی پلیلاکتیک اسید دقت ابعاد و زمان ساخت را نیز مورد ارزیابی قراردادند. ليو و همكاران ^{۲۴} [15] با در نظر گرفتن سه ويژگي مقاومت كششي، استحكام خمشی و مقاومت در برابر ضربه پنج عامل را موردبررسی قراردادند و با استفاده از تحلیل واریانس و ترکیب این سه ویژگی حالت بهینهای را ارائه دادند.

فرناندس و همکاران ^{۲۵} [16] چهار پارامتر چگالی، دمای نازل، ضخامت لایه و زاویه لایه چینی را در چند خاصیت مکانیکی از جمله استحکام کششی و

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

- ¹⁸ Triyono et al
- 19 Fang et al
- 20 Huynh et al 21 Abdelrhman et al
- 22 Chacón et al
- 23 Qattawi et al 24 Liu et al
- 25 Fernandes et al

Formative manufacturing

Subtractive manufacturing

¹⁵ Polylactic acid

¹⁶ Polycarbonate

¹⁷ Polvamide

استحکام تسلیم مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از مادهی پلی لاکتیک-اسید استفاده شده است. برخی از محققان به بررسی مقاومت ترکخوردگی، چقرمگی شکست و یا انرژی شکست قطعات چاپشده با فیلامنتهای پلیمری پرداختهاند [17–21]. برخی دیگر نیز تأثیر پارامترهای چاپ در قطعات ساخته-شده بوسیله این روش را در تحقیقات خود مورد بررسی قرار دادهاند [22–24]. انصاریپور و همکاران قابلیتها، ویژگیها و کاربردهای چاپ چهاربعدی را مرور کردند[25].

سان و همکاران¹ [26] با هدف ارزیابی شرایط روند تولید بر کیفیت رابطه-ی بین دو رشتهی مجاور در مدل رسوب ذوب شده، سه عامل از جمله دما را مورد بررسی قراردادند. مادهی اولیهی مورد ارزیابی اکریلونیتریل-بوتادین-استایرن است و مقاومت خمشی به عنوان خاصیت مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. سود و همکاران² [27] از تحلیل واریانس برای بدست آوردن متغیرهای مؤثر بر محصولات بدست آمده از روش رسوب سازی مدل ذوب شده که خود زیرمجموعه ای از فناوری های نمونه سازی سریع است استفاده کرده و برای کاهش تعداد آزمایش ها، طراحی مرکب مرکزی را به کاربرده اند و درنهایت نقاط بهینه را تعیین کردند. در این آزمایش نیز مادهی اولیهی مورد استفاده اکریلونیتریل-بوتادین استایرن است و مقاومت خمشی به عنوان خاصیت مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در یک نگاه کلی به مقالات مرورشده می توان گفت که بیشترین این مقالات به دنبال بهبود خواص مكانيكي محصولات توليدشده از روش رسوبسازی مدل ذوبشده هستند اما به طور غالب تنها مقاومت کششی ارزیابی شده و جای کار برای سایر خواص مکانیکی مانند مقاومت خمشی وجود دارد. از طرف دیگر تعدادی از مقالاتی که مقاومت خمشی را بررسی کردهاند از مادهی اولیهی اکریلونیتریل-بوتادیناستایرن استفاده کردهاند و مادهی پلی-لاكتيكاسيد، با توجه به دارابودن خواصي مانند سازگاري با بدن انسان، بايد بیشتر مورد ارزیابی قرار بگیرد. تمامی این مقالات سعی بر شناسایی پارامترهای مؤثر در طول فرآیند چاپ سهبعدی و همچنین تعیین سطوح مناسب برای این پارامترها را دارند. به جای بررسی پارامترهای فرآیند می توان به تحلیل هندسه-های مقاوم در برابر بارگذاری توجه کرد و سعی بر این باشد که مقاومترین هندسه برای تولید یک قطعه شناسایی شود، بهخصوص در مورد شیارهایی که ناگزیر در بعضی موارد باید در قطعات وجود داشته باشند. برای اینکه دو قطعه در کنار یکدیگر قرار بگیرد و بهراحتی از هم جدا نشود، یک راه حل مناسب و پرکاربرد در طراحی قطعات استفاده از شیارهایی مابین آنهاست. هندسهی شیار می تواند نقش تعیین کننده ای در مقاومت مکانیکی قطعات داشته باشد، لذا شناسایی شیارهای مقاوم ضرورت زیادی دارد.

2- طرحها و آزمایشها

در این تحقیق سه هندسهی شیار مورد ارزیابی قرارمی گیرد و سعی بر آن است تا مقاوم ترین شیار شناسایی شود. ماده ی اولیه ی مورد استفاده پلی لاکتیک اسید است و نمونه ها با روش مدل سازی رسوب ذوب شده تولید می شوند. خاصیت مکانیکی مورد بررسی در این تحقیق مقاومت خمش سه نقطه است. مقاومت خمشی هر کدام از این شیارها با سه تکرار سنجیده می شود. پارامترهای فر آیند در سرتاسر این تحقیق یکسان است که جزئیات بیشتر آن در جدول 1 آورده شده است. در شکل 1 نحوه ی بارگذاری به نمونه ها توسط دستگاه برای هر سه شیار نشان داده شده است.

¹ Sun et al

مقدار	پارامتر فرآيند
0.25 ميلىمتر	ضخامت لايه
7.70	درصد پرکردن
45 میلیمتر بر ثانیه	سرعت چاپ
+45\-45	زاویه ی لایه چینی
مستطيلى	الگوی چاپ
200 درجه ی سانتی گراد	دمای نازل
2	تعداد لایه های بالایی و پایینی



Fig. 1 Geometry and loading configuration applied to the 3D-printed PLA samples.

شکل 1 هندسه و بارگذاری خمشی اعمالی به نمونههای چاپشده از جنس PLA

نکتهی قابل توجه در همهی این هندسهها وجود تقارن بین قسمت راست و چپ آنها است. بهجز شیار، بقیهی ابعاد هندسی میان نمونههای آزمایش یکسان است. تمام نمونهها مکعب مستطیلهایی با طول 60 میلیمتر، عرض 30 میلیمتر و ارتفاع 6 میلیمتر هستند. در این تحقیق تلاش شده است که مساحت سه شیار با یکدیگر برابر باشد. علاوه بر این ارتفاع شیارها همگی یکسان و برابر 15 میلیمتر است. لذا میتوان انتظار داشت که مادهی اولیه مصرفی برای تولید هر سه شیار یکسان باشد. البته جلوتر صحت این حدس بررسی میشود. در این ادامه به توضیح ابعاد و شکل هندسی شیارها پرداخته میشود.

1-2- شيار V شكل

این شیار در حقیقت یک مثلث متساویالساقین با ارتفاع 15 میلیمتر و زاویهی بین دو ساق 45 درجه است. در شکل 2 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.



Fig. 2 Geometry and dimensions of V-grooved sample.

شکل 2 هندسه و ابعاد قطعه آزمایشگاهی با شیار V شکل

2-2- شيارٍ U شكل

هندسه ی این شیار تشکیل شده از یک نیم دایره مماس شده به یک مستطیل است. قطر نیم دایره برابر با عرض مستطیل است و مجموع طول مستطیل با شعاع دایره برابر با ارتفاع شیار (15 میلی متر) می باشد. در شکل 3 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.



Fig. 3 Geometry and dimensions of U-grooved sample شکل 3 هندسه و ابعاد قطعه آزمایشگاهی با شیار U شکل

3-2- شيارِ کليدي شکل

این شیار درحقیقت ترکیب یک دایره و یک مستطیل است البته این دو مقدار اندکی با هم همپوشانی دارند که در هنگام محاسبهی مساحت، این همپوشانی از مجموع مساحت دایره و مستطیل کم میشود. شعاع دایره دو برابر عرض مستطیل است. در شکل 4 جزئیات ابعاد این شیار نشان داده شده است.

3- بحث روی نتایج و تحلیل دادهها

وزن هرکدام از نمونههای آزمایشی بیان گر مقدار مادهی اولیهی مصرف شده در فرآیند آزمایش است. برابری وزنها نشان دهنده درستی محاسبات انجام شده در بدست آوردن ابعاد و مساحت ها است. در شکل 5 قطعات چاپ شده قبل از آزمون خمش سهنقطه قابل مشاهده است.



Fig. 4 Geometry and dimensions of Keyhole-grooved sample شکل 4 ابعاد و هندسه شیار کلیدی شکل

در جدول 2 دادههای متناظر مربوط به وزن، بار شکست و انرژی خمشی نمونهها آورده شده است. به طور کلی با یک نگاه به دادهها می توان نتیجه گرفت که وزن برای هر سه شیار با تقریب بسیار خوبی یکسان است اما مقاومت خمشی قطعات با تغییر شیار تغییر می کند. در ادامه به بررسی این تحلیلها به صورت عددی و با استفاده از تحلیل واریانس پرداخته می شود. این آزمون فرض برابر بودن مقاومت خمشی همه ی انواع شیارها را با اینکه حداقل دو شیار با هم مقاومت متفاوتی داشته باشند بررسی می کند، البته لازم به ذکر است که این آزمون دارای فرض اولیه ی پیروی از توزیع نرمال و برابری واریانس ها است که صحت این فرضها نیز بررسی شده است. سپس با کمک آزمونفیشر استحکام تمام شیارها دوبه دو با هم مقایسه خواهند شد تا شیار با مقاومت بیشتر شناسایی شود.

جدول 2 دادههای آزمون خمش سهنقطهای انجامشده بر روی قطعات چاپ سهبعدی و با هندسههای شیار مختلف

 Table 2 Experimental results obtained for fracture load and flexural fracture energy of tested 3D-printed samples with different U, V and K grooves.

انرژی	بار	وزن	15:	1 à cui
خمشی(ژول)	شكست(نيوتون)	(گرم)	فكرار	نوع سيار
2.216	736.25	6.9	1	V شکل
2.840	717.34	6.9	2	V شکل
2.980	867.47	7.0	3	V شکل
5.820	793.75	7.0	1	U شکل
5.060	913.28	6.9	2	U شکل
4.470	763.16	7.0	3	U شکل
10.870	1201.54	6.9	1	كليدى
9.550	1152.87	7.0	2	كليدى
9.950	1190.52	7.0	3	کلیدی

1-3- آناليز واريانس

ابتدا باید مجموع مربعات حساب شود تا بتوان بر اساس آن یکسان بودن یا نبودن تأثیر عامل نوع شیار را بررسی کرد. سه نوع مجموع مربعات باید محاسبه

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_{Error}}$$

Table 3 Details of analysis of variance

اگر $F_{\alpha.\ a-1.\ N-a} > F_{\alpha.\ a-1.\ N-a}$ باشد، فرض صفر را رد کرده و نتیجه گرفته می شود که ف اکتور بر نتایج آزم ایش مؤثر است. در اینجا خطای نوع اول برابر پنجصدم در نظر گرفته شده است (α =0.05)، به این ترتیب 5.16 = 6.2. جزئیات محاسبات در جدول 3 قابل مشاهده است. از آنجا که 5.16<51 لذا فرض صفر رد می شود و این نتیجه گرفته می شود که عامل هندسه ی شیار بر بار شکست نمونه ها موثر است.

جدول 3 جزئيات أناليز واريانس

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
type	2	297240	148620	32.71	0.001
Error	6	27261	4543		
Total	8	324501			

حال باید صحت مدل بررسی شود. P-value برای برابری واریانسها برابر 0.306 و همچنین P-value برای پیروی از توزیع نرمال برابر 0.117 است که هر دو آنها بزرگتر از 0.05 میباشند، به این ترتیب میتوان فرض کرد که دادهها از توزیع نرمال پیروی میکنند و دارای واریانس یکسان هستند، که این امر صحت فرضیات مدل را نشان میدهد. علاوه بر این نمودار باقیماندههای این مدل هیچ روند خاصی را نشان نمیدهد همان طور که در شکل 6 هم قابل مشاهده است. تمام این موارد قابلیت اطمینان به نتایج آنالیز واریانس را نشان میدهد. در شکل 7 یک نمونه از هر شیار بعد از آزمون نشان داده شده است.



شکل 6 بررسی باقیماندەھا

همان طور که قابل مشاهده است ترکها از وسط شیارها به صورت زیگزاگی رشد کردهاند که این امر به خاطر لایه چینی شطرنجی با زوایای عمود برهم است. قبل تر گفته شد که با اندازه گیری وزن نمونه ها، درستی محاسبات انجام-شده مربوط به مساحت ها بررسی می شود. F-value آزمون برابری وزن ها برابر 0.33 است که به طور واضح کمتر از 5.16 می باشد، پس فرض برابری وزن ها رد نمی شود. لذا می توان وزن ها را برابر فرض کرد در نتیجه ماده اولیه ی مصرف-شده در تولید سه شیار یکسان است. اگرچه تأثیر گذاری عامل شیار مشخص شد اما باید بین انواع مختلف شیارها مقایسه شود و شیار با مقاومت بیشتر شناسایی شود. شود که شامل SSTotal (مجموع مربعات کلی)، SSTreatment (مجموع مربعات عوامل) و SSErrot (مجموع مربعات خطا) میباشد [28].

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{n} y_{ij}^{2} - \frac{y_{..}^{2}}{N}$$

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{a} y_{i..}^{2} - \frac{y_{..}^{2}}{N}$$
(1)

$$SS_{Error} = SS_{Total} - SS_{Treatment}$$

(2)



Fig. 5 View of grooved samples made by 3D-printing method. شکل 5 نمایی از همهی نمونههای شیاردار ساختهشده بوسیله چاپ سهبعدی

در معادلات 1 و 2، a نمایانگر حالتهای مورد بررسی فاکتور آزمایشی است، n نشاندهندهی تعداد تکرارها در هر حالت فاکتور و N بیانگر تعداد کل نمونههای آزمایشی (a×n) می باشد. giy تکرار j ام از حالت i ام فاکتور است. yi. هم میانگین تکرارهای حالت i ام فاکتور موردنظر و ..y میانگین همهی نمونه-های آزمایشی است.

در معادلهی 3 ، μ میانگین کلی نمونهها، au_i میانگین i امین حالت فاکتور و ϵ_{ij} نشاندهنده خطا است. فرض میشود که این خطا از یک توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 پیروی میکند.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \tag{3}$$

برای بررسی تأثیر گذاری فاکتور باید برابری میانگین حالتها (τ_i) بررسی شود. اگر این میانگینها برابر باشند، آنگاه می توان نتیجه گرفت که این فاکتور بر نتایج آزمایش تأثیری ندارد. لذا فرض صفر برابری همهی میانگین حالتها (τ_i) با صفر است و فرض یک عدم برابری حداقل یکی از آنها با صفر می باشد.

$$egin{array}{lll} H_0: \ au_1 = au_2 = \cdots au_a = 0 \ H_1: \ au_i
eq 0 \quad i \ au_i
eq 0 \quad i \ au_i \ au_i = 0 \end{array}$$
حداقل برای یک

برای بررسی برابری میانگین حالتها باید میانگین مربعات را که به صورت MS نشان داده شده است حساب شود.

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1}$$
$$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{N-1}$$

2-3- روش فیشر برای مقایسات زوجی

در معادله 4 نحوهی محاسبهی LSD بیان شده است. برای هر زوج i و j اگر LSD در معادله 4 نحوهی محاسبهی LSD بیان شده است. برای هر زوج i و j فاکتور به $\left|\overline{y}_i - \overline{y}_j\right| > LSD$ به طور معناداری باهم تفاوت دارند [19]. در اینجا:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2} \cdot N-\alpha} \sqrt{\frac{2MS_{Error}}{n}}$$
(4)

$$\begin{split} LSD =& 2.447 \times 55.033 = 134.66 \\ & |\bar{y}_v - \bar{y}_u| = 49.7 < 134.66 \\ & |\bar{y}_v - \bar{y}_k| = 334.9 > 134.66 \\ & |\bar{y}_k - \bar{y}_u| = 295.2 > 134.66 \end{split}$$



Fig. 7 Deformation and failure patterns observed in the tested samples subjected to three-point bend loading. شكل 7 نحوه تغيير شكل و واماندگي نمونهها پس از اعمال بار خمش سهنقطهاي

طبق نتایج بدستآمده بار شکست شیار V شکل و شیار U شکل تقریباً یکسان است اما این دو شیار با شیار کلیدی شکل متفاوت هستند.

این امر به خوبی در شکل 8 قابل مشاهده است. در شکل 9 نسبت میانگین بار شکست شیارها به میانگین بار شکست شیار V شکل با هم مقایسه شده است.

همانطور که در شکل 10 و شکل 11 قابل مشاهده است،دادههای انرژی خمشی نتایجی مشابه مقاومت خمشی را نشان میدهد با این تفاوت که در اینجا شیار ۷شکل و شیار U شکل باهم متفاوت شناخته میشوند.



Fig. 8 Fisher's test for comparison of flexural fracture loads in the investigated 3D-printed PLA parts with different U,V and K grooves. شکل 8 آزمون فیشر برای مقایسه بار شکست خمشی در نمونههای آزمودهشده از جنس PLA و با شیارهای مختلف U,V, K



Fig. 9 Comparison of normalized fracture loads in different grooved samples.

شکل 9 مقایسه ی میانگین بار شکست بدون بعد شده در شیارهای مختلف



Fig. 10 Comparison of Fisher's test for fracture energy of 3D-printed parts with different U,V and K grooves. شکل 10 مقایسه آزمون فیشر انرژی شکست خمشی در نمونههای آزمونشده از

جنس PLA و با شیارهای مختلفU,V, K

در شکل های 9 و 11 دادههای بار شکست و انرژی خمشی نرمال شدهاند به این ترتیب که هرکدام به ترتیب بر میانگین بار شکست و انرژی خمشی شیار V شکل تقسیم شدهاند، بدیهی است که این نسبت برای خود شیار V شکل برابر 1 است. مطابق شکلهای 9 و 11 شیار U شکل دارای بار شکست و انرژی شکستی به ترتیب 6 درصد و 91 درصد بیشتر از شیار V شکل است. ناچ

5- مراجع

- Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A. and Talamona, D., "Optimisation of Strength Properties of Fdm Printed Parts—a Critical Review" Polymers, Vol. 13, No. 10, pp. 1587, 2021.
- [2] Gordelier, T. J., Thies, P. R., Turner, L. and Johanning, L., "Optimising the Fdm Additive Manufacturing Process to Achieve Maximum Tensile Strength: A State-of-the-Art Review" Rapid Prototyping Journal, Vol. 25, No. 6, pp. 953-971, 2019.
- [3] Gharehbaghi, H. and Farrokhabadi, A., "Experimental and Numerical Investigation of the Energy Absorption Capability of the Bi-Material Lattice Structure" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1976-1982, 2022.
- [4] Dey, A. and Yodo, N., "A Systematic Survey of Fdm Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics" Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 3, No. 3, pp. 64, 2019.
- [5] Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S. and Jayanth, N., "A Review on Composite Materials and Process Parameters Optimisation for the Fused Deposition Modelling Process" Virtual and Physical Prototyping, Vol. 12, No. 1, pp. 47-59, 2017.
- [6] Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. and Yan, C., "A Critical Review of Fused Deposition Modeling 3d Printing Technology in Manufacturing Polylactic Acid Parts" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102, pp. 2877-2889, 2019.
- [7] Kashfi, M., Pourrabia, P. and Kahhal, P., "A Correction Factor to Improve Poisson's Ratio Prediction of 2d Auxetic Structure Using Finite Element Analysis and Experiment" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1556-1562, 2021.
- [8] Heidari-Rarani, M., Sadeghi, P. and Ezati, N., "Effect of Processing Parameters on Tensile Properties of Fdm 3d Printed of Pla Specimens" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 2, pp. 855-862, 2020.
- [9] Triyono, J., Sukanto, H., Saputra, R. M. and Smaradhana, D. F., "The Effect of Nozzle Hole Diameter of 3d Printing on Porosity and Tensile Strength Parts Using Polylactic Acid Material" Open Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 762-768, 2020.
- [10] Fang, L., Yan, Y., Agarwal, O., Yao, S., Seppala, J. E. and Kang, S. H., "Effects of Environmental Temperature and Humidity on the Geometry and Strength of Polycarbonate Specimens Prepared by Fused Filament Fabrication" Materials, Vol. 13, No. 19, pp. 4414, 2020.
- [11] Huynh, L. P., Nguyen, H. A., Nguyen, H. Q., Phan, L. K. and Thanh, T. T., "Effect of Process Parameters on Mechanical Strength of Ffabricated Parts Using the Fused Deposition Modelling Method", 2019.
- [12] Abdelrhman, A. M., Gan, W. W. and Kurniawan, D., "Effect of Part Orientation on Dimensional Accuracy, Part Strength, and Surface Quality of Three Dimensional Printed Part" in Proceeding of IOP Publishing, pp. 012048.
- [13] Chacón, J., Caminero, M. A., García-Plaza, E. and Núnez, P. J., "Additive Manufacturing of Pla Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection" Materials & Design, Vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [14] Qattawi, A., Alrawi, B. and Guzman, A., "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach" Procedia Manufacturing, Vol. 10, pp. 791-803, 2017.
- [15] Liu, X., Zhang, M., Li, S., Si, L., Peng, J. and Hu, Y., "Mechanical Property Parametric Appraisal of Fused Deposition Modeling Parts Based on the Gray Taguchi Method" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 89, pp. 2387-2397, 2017.

کلیدی شکل هم دارای بار شکست و انرژی شکستی به ترتیب 53 درصد و 2.78 درصد بشتر از شیار V شکل است. سطحمقطع شیارهای U شکل و 2.78 درصد بشتر از شیار V شکل است. سطحمقطع شیار N شکل یک گوشهیزاویهدار است. شکل بزرگتر است. میتوان گفت که سطح مقطع گوشهیزاویهدار ضعیفتر از سطح مقطع دایرهای میتوان گفت که سطح مقطع گوشهیزاویهدار ضعیفتر از سطح مقطع دایرهای شکل است و با افزایش شعاع دایره استحکام این سطحمقطع افزایش مییاید. البته لازم به ذکر است که این نتایج امکان دارد با تغییر مادهی اولیه و یا روش تولید تغییرکند که جای کار بیشتر در مقالات آینده وجود دارد.



Fig. 11 Comparison of normalized flexural fracture energy in the tested U, V and K grooves

شکل 11 مقایسه یمیانگین انرژی خمشی بدون بعد شده در سه شیار مختلف U,V, K

4- نتيجەگىرى

در این تحقیق سعی شده است که مقاومت خمشی سطحمقطعهای مختلف با هم مقایسه شوند و مقاومترین آنها شناسایی شود. برای این منظور سه نوع شیار مختلف مورد ارزیابی قرارگرفتهاند. تمام نمونهها روش تولید یکسان و حجم و ابعاد یکسان دارند و تنها تفاوت میان آنها مربوط به هندسهی شیار است. نمونههای آزمایشی با کمک فناوری مدل سازی رسوب ذوب شده که یکی از پرکاربردترین فناوریهای چاپ سه بعدی است تولید شده اند. برای اطمینان از یکسان بودن تمام عوامل به جز هندسه ی شیار سعی شده تا همه ی شیارها دارای مساحت و ارتفاع یکسان باشند. علاوه براین، تمام پارامترهای فرآیند در طی تولید قطعات یکسان است و ارزیابی وزن قطعات چاپ شده نشان می دهد که محاسبات انجام شده و تنظیمات اعمال شده به دستگاه چاپ سه بعدی در ست بوده و نمونهها دارای وزن یکسانی هستند. ماده ی اولیه ی مورد استفاده در این بعده ی بی پرکاربردترین مواد در چاپ بعده ی بی پرکاربردترین مواد در چاپ سه بعدی بشمار می آید. خواص این ماده منجر به کاربردهای گسترده ی آن در سه بعدی بشمار می آید. خواص این ماده منجر به کاربردهای گسترده ی آن در

مطابق دادههای آزمایشی شیار کلیدی شکل بیشترین میزان مقاومت و انرژی خمش را داراست. شیار V شکل و شیار U شکل تقریباً مقاومت یکسانی از خود نشان دادهاند اما میانگین مقاومت شیار U شکل اندکی بیشتر است، با این حال انرژی خمشی شیار U شکل به طور معناداری بیشتر از شیار V شکل است. به طور کلی میتوان گفت که شیار کلیدی از همه مقاومتر، شیار V شکل از همه ضعیفتر و شیار U شکل چیزی مابین این دو است. نتایج این آزمایش نشان می دهد که سطح مقطع دایره ای شکل قویتر از سطح گوشهی زاویه دار است. علاوه بر این شعاع دایره ی بزرگ تر مقاومت خمشی بیشتری خواهد داشت.

- [16] Fernandes, J., Deus, A. M., Reis, L., Vaz, M. F. and Leite, M., "Study of the Influence of 3d Printing Parameters on the Mechanical Properties of Pla" in Proceeding of 14-17.
- [17] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Fracture Loads Prediction of the Modified 3d-Printed Abs Specimens under Mixed-Mode I/Ii Loading" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 235, pp. 107181, 2020.
- [18] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Evaluation of the Geometrical Discontinuity Effect on Mixed-Mode I/Ii Fracture Load of Fdm 3d-Printed Parts" Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 113, pp. 102953, 2021.
- [19] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F. and Aliha, M., "Mixed-Mode Tensile/Shear Fracture of the Additively Manufactured Components under Dynamic and Static Loads" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 260, pp. 108185, 2022.
- [20] Ameri, B., Taheri-Behrooz, F., Majidi, H. R. and Mohammad Aliha, M. R., "Mixed-Mode Load Bearing Estimation of the Cracked Additively Manufactured Materials Using Stress/Strain-Based Models" Rapid Prototyping Journal, Vol. 29, No. 2, pp. 218-231, 2023.
- [21] Shahbazian, B. and Mirsayar, M., "Fracture Mechanics of Cellular Structures: Past, Present, and Future Directions" Engineering Solid Mechanics, Vol. 11, No. 2, pp. 231-242, 2023.
- [22] Kafshgar, A. R., Rostami, S., Aliha, M. and Berto, F., "Optimization of Properties for 3d Printed Pla Material Using Taguchi, Anova and Multi-Objective Methodologies" Procedia Structural Integrity, Vol. 34, pp. 71-77, 2021.
- [23] Rajpurohit, S., Dave, H. and Rajurkar, K., "Prediction of Tensile Strength of Fused Deposition Modeling (Fdm) Printed Pla Using Classic Laminate Theory" Engineering Solid Mechanics, Vol. 10, No. 1, pp. 13-24, 2022.
- [24] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P. and Badrossamay, M., "Optimization of Fdm Process Parameters for Tensile Properties of Polylactic Acid Specimens Using Taguchi Design of Experiment Method" Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 35, No. 12, pp. 2435-2452, 2022.
- [25] Ansaripour, A., Heidari-Rarani, M. and Mahshid, R., "A Review on 4d Printing of Polymers and Polymer Composites" Journal of Science and Technology of Composites, No. Articles in Press, 2023.
- [26] Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, C. and Gu, P., "Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of Fdm Polymer Filaments" Rapid prototyping journal, 2008.
- [27] Sood, A. K., Ohdar, R. K. and Mahapatra, S. S., "Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts" Materials & Design, Vol. 31, No. 1, pp. 287-295, 2010.
- [28] Montgomery, D. C., "Design and Analysis of Experiments", John wiley & sons, 2017.

نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی اثر ذرات سیلیکا فیوم اصلاحشده بر رفتار مکانیکی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت تحت بارگذاریهای کششی و خمشی

 $^{\dagger 2}$ حسنا عزیزی 1 ، رضا اسلامی فارسانی 2* ، محمدرضا واعظی 8 ، علی شکوهفر

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران 2- استاد تمام، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد تمام، مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

تهران، كد پستى 43344-19919، 19919-43344

اطلاعات مقاله:	چکیدہ
دريافت: 1402/04/16	کامپوزیتهای زمینه پلیمری به دلیل سبکی، و استحکام و سفتی ویژه بالا از پرکاربردترین انواع کامپوزیتها هستند. کامپوزیتهای
پذيرش: 1402/06/19	تقویتشده با الیاف از مهمترین کامپوزیتها هستند و الیاف بازالت یکی از انواع الیاف معدنی مهمی است که در زمینه پلیمری استفاده
	میشود. در این پژوهش، اثر افزودن ذرات سیلیکا فیوم (که تاکنون در کامپوزیتهای پایه پلیمری تقویتشده با الیاف استفاده نشده است)
كليدواژگان	بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت تحت بارگذاریهای خمش و کشش مورد مطالعه قرار گرفت. ذرات سیلیکا فیوم با
كامپوزيت زمينه پليمرى،	سیلان اصلاح سطحی شده و سپس با درصدهای مختلف (2، 4 و 6 درصد وزنی) با استفاده از همزن مکانیکی و امواج التراسونیک داخل
الياف بازالت،	زمینه اپوکسی توزیع شدند. برای ساخت نمونههای کامپوزیتی از روش لایهگذاری دستی استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد
سيليكا فيوم،	که با افزودن ذرات سیلیکا فیوم، بیشترین میزان بهبود در خواص استحکام و مدول کششی، و همچنین استحکام و مدول خمشی مربوط
اصلاح سطحی،	به نمونه حاوي %.wt سیلیکا فیوم به ترتیب برابر با 22، 34، 27 و 40 درصد بهبود نسبت به نمونه فاقد سیلیکا فیوم بوده است. از طرفی
خواص مكانيكي	نتایج آزمونهای مکانیکی و بررسی ریزساختاری پس از شکست نشان داد که بهبود فصل مشترک بین الیاف و زمینه در نتیجه توزیع
	مناسب این ذرات داخل زمینه تأثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی دارد. همچنین توزیع نامطلوب این ذرات منجر به افت خواص مکانیکی
	در بارگذاریهای مختلف می شود.

Investigating the effect of modified silica fume on the mechanical behavior of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loading

Hosna Azizi¹, Reza Eslami-Farsani^{1*}, Mohammad Reza Vaezi², Ali Shokuhfar^{1†}

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

* 19919-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords	Abstract
Polymer matrix Composites, Basalt fibers, Silica fume, Surface modification, Mechanical properties	Polymer matrix composites are one of the most widely used types of composites due to their lightness, and special strength and stiffness. Fibers-reinforced composites are the most important composites, and basalt fibers are one of the important types of mineral fibers that are used in the matrix of polymers. In this research, the effect of addition of silica fume particles (which has not been used in fibers reinforced polymer composites) on the mechanical properties of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loadings was studied. The silica fume particles are surface modified with silane and then with different percentages (2, 4 and 6 wt.%) were distributed inside the epoxy matrix using a mechanical stirrer and ultrasonic waves. Hand lay-up method was used to make composite samples. The results of this research showed that with the addition of silica fume particles, the greatest improvement in the properties of the tensile strength and modulus, as well as the bending strength and modulus of the sample containing 4 wt.% silica fume is 22, 34, 27 and 40% respectively in compared to the sample without silica fume. On the other hand, the results of mechanical tests and microstructural examination after failure showed that the improvement of the interface between the fibers and the matrix as a result of the proper distribution of these particles leads to the loss of mechanical properties. Also, the unfavorable distribution of these particles leads to the loss of mechanical properties under different loadings.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Azizi, H., Eslami-Farsani, R., Vaezi, M. R., Shokuhfar, A., "Investigating the effect of modified silica fume on the mechanical behavior of basalt fibers-epoxy composites under bending and tensile loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2218-2224, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2006000.1842

1– مقدمه

امروزه کاربرد کامپوزیتها به مصارف پیشرفته محدود نمی شود و این مواد کاربردهای فراوانی در صنایع خودرو، لوازم خانگی و نظایر آن یافتهاند. به طوری-که طبق آخرین تحقیقات، کامپوزیتها در بیش از 30 درصد از محصولات مصرفی تجاری در بازار به کار برده می شوند [4-1]. الیاف بازالت به دلیل استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه و مقاومت بالاتر در محیطهای قلیایی، هم چنین به دلیل قیمت مناسب نسبت به الیاف کربن، در موارد زیادی جایگزین این دو نوع الیاف می شوند. الیاف بازالت دارای مقاومت ویژه بالاتر و ضریب رسانایی حرارتی کمتر و در نتیجه خواص دی الکتریک بر جسته نسبت به الیاف شیشه هستند. به علاوه الیاف بازالت به دلیل دارا بودن 5023 و TiC، از خاصیت انتقال امواج مغناطیسی بالایی بر خوردارند [7-5].

سیلیکا فیوم مادهای بدون بو و غیرقابل احتراق است که در دما و فشار محیط پایدار می باشد. دمای ذوب این ماده 2200 درجه سانتی گراد است. این ماده شامل رنگهای سفید و خاکستری بوده که عموماً رنگ آن از خاکستری کمرنگ تا خاکستری پررنگ متغیر است. سیلیکا فیوم پودری با وزن مخصوص 200-300 کیلوگرم بر مترمکعب با رنگ خاکستری متمایل به سفید است که محصول جانبی فرآیند تولید فروسیلیسیم می باشد. سیلیکا فیوم یک پودر فوق ریز کروی شکل است که بهعنوان محصول جانبی جمع آوری می شود و اندازه ذرات آن در حد 1 میکرون با قطر متوسط 0.1 میکرون است [21-8].

در ارتباط با کاربرد سیلیکا فیوم در مواد پلیمری و کامپوزیتهای پایه سیمانی و بتنی تحقیقات متعددی انجام شده است. ماجد [13]، رفتار مکانیکی كامپوزيتهاى اپوكسى/ الياف كربن تقويتشده با سيليكا فيوم را مورد بررسى قرار داد. ذرات سیلیکا فیوم در درصدهای وزنی مختلف (3-0.5) به زمینه کامپوزیت افزوده شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که حداکثر بهبود در استحكام فشارى كامپوزيت به ازاى توزيع 2 درصد وزنى سيليكافيوم داخل زمينه حاصل شد. ويتك و تانيموتو [14]، به بررسى اثر درصد حجمى الياف بازالت بر رفتار کششی و خمشی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویتشده با الیاف بازالت پرداختند. با افزودن 32 درصد حجمي الياف بازالت مقدار استحكام کششی و مدول کششی کامپوزیت برابر با 281 مگاپاسکال و 11.8 گیگاپاسکال و با افزودن 50 درصد حجمی الیاف، استحکام کششی و مدول کششی به مقدار 336 مگاپاسكال و 17.3 گيگاپاسكال افزايش يافت. استحكام خمشي كامپوزيت حاوى 24 درصد حجمى الياف بازالت 73 مگاپاسكال و به ازاى افزودن 51 درصد حجمي الياف بازالت اين مقدار به 122 مگاپاسكال افزايش يافت. سنگامش و همکارانش [15]، سنتز و مقایسه رفتار مکانیکی کامپوزیت اپوکسی- سیلیکا فیوم را بررسی کردند در این پژوهش این محققین دریافتند که در آزمون فشار نمونه حاوی 10 درصد حجمی رفتار فشاری بهتری دارد که بهدلیل توزیع مناسب سیلیکا فیوم در این درصد حجمی است درحالی که در 15 درصد حجمي كلوخهشدن ذرات وجود دارد.

با بررسی تحقیقات انجام شده مشخص شد که بیش ترین کاربرد ذرات سیلیکا فیوم در صنایع بتن و کامپوزیت های پایه سیمان است. تحقیقات انجام شده پیرامون افزودن سیلیکا فیوم در مواد پلیمری نشان داد که بیشتر تحقیقات روی افزودن این ماده در پلیمرهای خالص نظیر پلیاستایرن، وینیل استر و ... متمرکز شده است. تاکنون تحقیقات برای استفاده از آنها در کامپوزیت های پلیمری و بررسی میزان سازگاری آنها با زمینه پلیمری و الیاف تقویت کننده

انجام نشده است. لذا استفاده از ذرات سیلیکا فیوم در کامپوزیتهای پایه پلیمری تقویتشده با الیاف جز نوآوریهای این تحقیق محسوب میشود. بر این اساس، رویکرد اصلی این تحقیق، بررسی اثر افزودن سیلیکا فیوم اصلاح سطحی شده با عامل سیلان بر رفتار مکانیکی کامپوزیتهای زمینه اپوکسی حاوی الیاف بازالت تحت بارگذاریهای خمشی و کششی است.

2- روش تحقيق 1-2- مواد اوليه

در این پژوهش از رزین اپوکسی ML-506 به همراه هاردنر پلی آمینی (با نسبت وزنی 2 به 1 نسبت به پایه اپوکسی) ساخت شرکت هلدینگ فجر استفاده شد. پارچه الیاف بازالت با بافت ساتن و وزن واحد سطح 2m² 300 (شرکت بازالتکس¹ بلژیک) نیز به عنوان تقویت کننده الیافی مورد استفاده قرار گرفت. ذرات سیلیکا فیوم سنتز شده به روش سل ژل با خلوص بیش از 98 درصد، سطح ویژه 2/g 202 و اندازه ذرات 25 نانومتر عنوان ذرات تقویت کننده استفاده شدند که در شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^{*}) از سطح ذرات سنتز شده نمایش داده شده است. از عامل سیلان (تری مرکاپتوپروپیل تری متوکسی سیلان³ از شرکت سیگما آلدریچ با وزن مولکولی مرکاپتوپروپیل تری متوکسی سیلان⁸ از شرکت سیگما آلدریچ با وزن مولکولی استفاده شد.



Fig. 1 SEM image of synthesized silica fume at 75 kx magnification شکل 1 تصویر SEM از سیلیکا فیوم سنتزشده در بزرگنمایی SEM.

2-2- اصلاح سطحي ذرات سيليكا فيوم

در ابتدا 5 گرم از عامل سیلان به 100 میلی لیتر محلول شامل 95 میلی لیتر متانول اضافه شد و به مدت 15 دقیقه اختلاط عامل سیلان با محلول توسط همزن مکانیکی صورت پذیرفت. در مرحله بعد 5 گرم از ذرات سیلیکا فیوم به محلول اضافه شد و مجدد به مدت 30 دقیقه اختلاط ذرات با محلول توسط همزن مکانیکی صورت پذیرفت. در نهایت مخلوط در دمای 100 درجه سانتی گراد به مدت 24 ساعت در آون خلاء قرار داده شد. لازم به ذکر است که سیلیکا فیوم اصلاح شده با این روش برای ساخت نمونه های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت [18-16].

¹ Basaltex

² Scanning Electron Microscope

³ 3- Mercaptopropyltrimethoxysilane

3-2- توزيع ذرات سيليكا فيوم درون زمينه پليمري

ذرات سیلیکا فیوم با مقادیر مشخص وزنی (0، 2، 4 و 6 درصد وزنی) به رزین اپوکسی افزوده شدند. فیوم سیلیکا دارای سطح ویژهی بالایی است، لذا درصدهای وزنی کمتر از 10 درصد جهت کار و ترکیب با رزین مناسبتر است. برای توزیع و اختلاط مناسب ذرات سیلیکا فیوم در اپوکسی از دستگاه همزن مکانیکی (شرکت فاینتک¹ کره جنوبی) با قدرت 1500 دور بر دقیقه به مدت 30 دقیقه استفاده شد. پس از اتمام فرآیند همزدن، به منظور شکست کلوخه-های باقی مانده مخلوط رزین و ذرات سیلیکا فیوم از امواج فراصوت با استفاده از دستگاه فراصوت پروبی (شرکت فاپن ایران) تحت توان 120 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز استفاده شد [19].

2-4- ساخت نمونههای کامپوزیتی

برای ساخت نمونههای کامپوزیتی، روش لایه گذاری دستی^۲ با 6 لایه پارچه الیاف بازالت و رزین اپوکسی (با نسبت حجمی 50–50) مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نمونههای ساخته شده به مدت 4–3 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا عملیات پخت رزین صورت پذیرد. لازم به ذکر است که مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین اپوکسی انجام آزمون مکانیکی روی نمونهها 7 روز پس از پخت اولیه نمونهها انجام شد.

5-2- آزمون کشش

آزمون کشش روی نمونههای کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D3039 (با استفاده از دستگاه کوپا پژوهش) در دمای محیط صورت پذیرفت. نمونهها بر اساس این استاندارد (با ابعاد 250×25×25×25 میلیمتر) بریده شدند. سرعت اعمال بار برابر با 5 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد و در ادامه منحنیهای تنش-کرنش بدست آمده از آزمون کشش برای بررسی رفتار کششی نمونههای تقویتشده با ذرات سیلیکا فیوم اصلاح شده مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور اطمینان از نتایج بدست آمده، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد [20].

6-2- آزمون خمش سه نقطهای

آزمون خمش روی نمونههای کامپوزیتی با استفاده از دستگاه کوپا (معرفی شده در بخش 2-5) مطابق با استانداردASTMD790 (با ابعاد 2.5×251×25 میلیمتر) صورت پذیرفت. برای جلوگیری از سرخوردن نمونهها حین آزمایش در هر طرف تکیهگاه باید حداقل 10 درصد از فاصله بین دو تکیهگاه بلندتر باشد. مطابق با استاندارد نسبت فاصله بین دو تکیهگاه به ضخامت نمونه برابر با 32 به 1 و نرخ بارگذاری نمونهها برابر با 4.2 میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج بدست آمده از آزمونهای مکانیکی، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد [21].

7-2- بررسی ریزساختاری

بهمنظور بررسی سطح شکست نمونههای کامپوزیتی حاوی ذرات سیلیکا فیوم از SEM (مدل VEGA - LMU) با ولتاژ کاری kv 25 استفاده شد. جهت بررسی روند اصلاح سطحی ذرات سیلیکا فیوم و تشکیل گروههای عاملی روی سطح این ذرات از دستگاه طیفسنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR^{*} مدل Bruker) در محدوده موج ¹⁻¹⁰

3- نتايج و بحث

1-3- نتايج FT-IR

در شكل 2 طيفسنجى FT-IR ذرات سيليكا فيوم اصلاح نشده و اصلاحشده با سيلان نشان داده شده است. در ارتباط با ذرات اصلاح نشده، پيکهاى حاصل در ¹⁻ 1634.56 و ¹⁻ علام عند علام الله به ترتيب ناشى از ارتعاش خمشى و كششى پيوند H-O-H بودند. پيکهاى ايجاد شده در ¹⁻ 809.34 و ¹⁻ 1517.49 cm بودند. پيکهاى ايجاد شده در ¹⁻ 109 و ¹⁻ 109 cm محمي كننده ارتعاش كششى و خمشى H-O-H بودند. يكهاى جذبى ايجاد شده در ¹⁻ 109 cm و ¹⁻ 109 cm در ¹⁻ علام محمي كننده ارتعاش كششى و خمشى نامتقارن هستند كه مربوط به سيليكا است. پيکهاى جذبى ايجاد شده در ¹⁻ 200 cm و ¹⁻ Si-OH محمي مربوط به ارتعاش كششى و خمشى نامتقارن سيلوكسان⁺ (Si-O-Si) هستند [22, 23]. حضور باندهاى ارتعاشى المتقارن سيلوكسان⁺ (Si-O-Si) هستند [22, 22]. حضور باندهاى ارتعاشى المتقارن مهاى جذبى جديد در Si-O-Si هستند [22, 23]. حضور باندهاى ارتعاشى المتقارن مهاى جذبى جديد در Si-O-Si هستند [25 cm محمي باندهاى ارتعاشى الم در ارتباط با ذرات سيليكا فيوم اصلاح شده علاوه بر حضور پيكهاى قبلى، پيك هاى جذبى جديد در ¹⁻ 2015 و ¹⁻ 203.02 cm وجود آمدند. پيك-ارتباش كششى 24D بودند. اين مطلب به وضوح نشان داد كه سطح ذرات ارتعاش كششى 2H2 بودند. اين مطلب به وضوح نشان داد كه سطح ذرات سيليكا فيوم به طور موفقيت آميز توسط عامل سيلان اصلاح شده است [25].



Fig. 2 Results of FT-IR analysis of silica fume particles, a) non treated, b) modified with silane agent.

شكل 2 نتايج طيفسنجى FT-IR سيليكا فيوم، الف) اصلاح نشده، ب) اصلاحشده با سيلان.

⁴ Siloxane

¹ Finetech

² Hand lay up

³ Fourire-Transform Infrared Spectroscopy

3-3- نتایج آزمونهای مکانیکی 3-1-1 استحکام و مدول کششی و خمشی در جدول 1 نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه نقطهای و کشش محوری آور ده شده است.

جدول 1 نتایج آزمون کشش و خمش نمونههای کامپوزیتی حاوی سیلیکا فیوم Table 1 Results of the tensile tests and bending test of composites containing silica fume

مدول خمشی (گیگاپاسکال)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)	مدول کششی (گیگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	سیلیکا فیوم (٪وزنی)
15.72±0.65	440.41±13.07	13.38±0.67	415.32±16.6	0
18.54±0.86	481.78±16.78	15.25±0.76	452.35±2.08	2
22.16±1.02	563.04±22.30	18.05±0.89	506.70±25.33	4
24.26±1.18	527.94±25.09	19.28±0.96	472.80±23.16	6

شكل3 تأثیر افزودن سیلیكا فیوم بر استحكام كششی و خمشی كامپوزیتهای اپوكسی- الیاف بازالت را نشان می دهد. مطابق با شكل 3 روند تغییرات استحكام نشان می دهد كه با افزودن ذرات سیلیكا فیوم از صفر تا 4 درصد وزنی ابتدا استحكام كششی تا 506.7 و استحكام خمشی تا 563.04 مگاپاسكال افزایش یافته و با افزودن مقادیر بیشتر (6 درصد وزنی)، استحكام كششی و خمشی به ترتیب تا 472.8 و 527.94 مگاپاسكال كاهش یافتهاند. برای كامپوزیتهای فاقد ذرات سیلیكا فیوم استحكام كششی و خمشی برابر برای كامپوزیتهای فاقد ذرات سیلیكا فیوم استحكام كششی و خمشی برابر با25.34 و 440.41 مگاپاسكال بدست آمدند. بیشترین بهبود در استحكام کششی و خمشی با اختلاط 4 درصد وزنی ذرات سیلیكا فیوم درون زمینه اپوكسی بدست آمد. در این حالت استحكام كششی و خمشی به ترتیب به 506.7 و 563.04 مگاپاسكال افزایش یافت كه نشاندهنده افزایش 22 و 27 درصدی در استحكام است. اما افزودن 6 درصد وزنی ذرات سیلیكا فیوم به ترتیب منجر به كاهش 6.69 و 6 درصدی در استحكام كششی و خمشی در مقایسه با كامپوزیتهای شامل 4 درصد وزنی ذرات سیلیكا فیوم شد.

همان طور که مشخص است تأثیر توزیع ذرات سیلیکا فیوم در یک مقدار مشخص بر خواص خمشی نمونههای کامپوزیتی بیشتر از تأثیر آن بر خواص کششی بود. این بدان علت است که تحت آزمون خمش سه نقطهای، به نمونه در بالای تار خنثی، تنش فشاری و پایین آن تنش کششی وارد می شود. در این حالت زمینه کامپوزیت نقش بارزتری را در مقایسه با زمانی که نمونههای کامپوزیتی تحت کشش محوری قرار می گیرند، ایفا می نماید. بنابراین با تقویت کردن زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم بهبود بیشتری در خواص خمشی در مقایسه با خواص کششی حاصل می شود.

افزایش استحکام کامپوزیتهای اپوکسی تقویتشده با الیاف بازالت در نتیجه افزودن ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه ناشی از دو عامل بود. عامل اول، مربوط به بهبود فصل مشترک بین زمینه اپوکسی و الیاف تقویتکننده بازالت بود. هنگامی که مواد کامپوزیتی تحت تنش قرار می گیرند، تنش اعمالی از طریق فصل مشترک به تقویتکننده الیافی منتقل می شود. بنابراین کیفیت فصل مشترک الیاف و زمینه تأثیر بسزایی در خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی دارد. با توزیع ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه، چسبندگی بین الیاف و زمینه بهتر شده و باعث می شود که انتقال بار از زمینه پلیمری به الیاف تقویتکننده به طور

¹ Frictional

مطلوب صورت پذیرد و استحکام کششی کامپوزیت بهبود یابد. همچنین با تقویت زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم، لغزش اصطکاکی^۱ بین زمینه و الیاف محدود شده که در نتیجه انتقال تنش از زمینه به الیاف تقویتکننده بهطور مطلوب انجام می شود و خواص مکانیکی افزایش می یابد [26].



Fig. 3 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending strength of basalt fibers-epoxy composites.

 شكل 3 تأثير افزودن سيليكا فيوم بر استحكام كششى و خمشى كامپوزيتهاى

 اپوكسى- الياف بازالت.

عامل دوم، به مشخصات تقویت کنندگی ذرات سیلیکا فیوم مربوط می شود. در کامپوزیت های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف، الیاف تقویت کننده به عنوان عنصر اصلی تحمل کننده بار اعمالی به شمار می رود. تقویت زمینه توسط ذرات سیلیکا فیوم باعث کاهش تمرکز تنش روی الیاف و فصل مشتر ک بین زمینه و الیاف بازالت می شود. از آنجا که مهم ترین مکانیزمهای شکست در مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی، پارگی الیاف و جدایش فصل مشتر ک الیاف و زمینه هستند، با کاهش تمرکز تنش روی الیاف تنش مورد نیاز برای وقوع مکانیزمهای ذکر شده شکست افزایش می یابد [15]. افزودن مقادیر بالاتر ذرات سیلیکا فیوم (6 درصد وزنی)، باعث کاهش استحکام کامپوزیت نسبت به کامپوزیت های حاوی 4 درصد وزنی ذرات شد. دلیل این امر ناشی از توزیع نامناسب ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه اپوکسی کامپوزیت و تشکیل نامناسب ذرات در مقادیر بالا بود که منجر به کاهش کیفیت فصل مشترک شده و به عنوان مناطق تمرکز تنش برای جوانهزنی ترک به حساب می آیند [27].

تأثیر افزودن ذرات سیلیکا فیوم در داخل زمینه بر مدول کششی و خمشی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت در شکل 4 نشان داده شده است. با افزودن ذرات سیلیکا فیوم، مدول کششی و خمشی بهطور پیوسته افزایش یافت. برای نمونههای فاقد سیلیکا فیوم، مدول کششی و خمشی به ترتیب برابر با13.31 و 15.72 گیگاپاسکال بود و با افزودن 4 درصد وزنی این ذرات، مدول کششی و خمشی به میزان 34 و 40 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد سیلیکا فیوم افزایش یافت. افزایش مدول کامپوزیتها در اثر توزیع ذرات سیلیکا فیوم بدان علت است که توزیع این ذرات به عنوان مانع برای حرکت زنجیرههای پلیمری در اثر اعمال تنش عمل مینمایند که منجر به افزایش مدول کششی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت میشود. از طرفی در مقایسه با اپوکسی خالص، ذرات سیلیکا فیوم دارای خواص مکانیکی بالاتری هستند، لذا افزایش مدول کششی در نتیجه افزودن آنها داخل زمینه کامپوزیت قابل انتظار است.

یکی از دلایل مؤثر در افزایش مدول کششی نمونههای کامپوزیتی به ازای افزودن ذرات سیلیکا فیوم، اصلاح سطحی این ذرات است که باعث افزایش چسبندگی بین سیلیکا فیوم و اپوکسی شده و در نتیجه عملکرد آنها برای جلوگیری از حرکت زنجیرههای پلیمری و افزایش سفتی، بهبود مییابد -28] 30.

با مقایسه مدول کششی و خمشی کامپوزیتهای حاوی 4 و 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم میتوان دریافت که کاهش مدول کششی و خمشی در نمونههای حاوی 6 درصد وزنی سیلیکا فیوم به ترتیب به میزان 6.8 و 9.4 درصد در مقایسه با کامپوزیت حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم مربوط به توزیع نامناسب ذرات درون زمینه اپوکسی است. در نتیجه، چسبندگی بین زمینه و ذرات سیلیکا فیوم کاهش یافته و کارایی این ذرات برای افزایش مدول کامپوزیتها افت میکند [31].



Fig. 4 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending modulus of basalt fibers-epoxy composites. - محل 4 تأثير افزودن سيليكا فيوم بر مدول كششى و خمشى كامپوزيتهاى اپوكسى الياف بازالت.

2-2-3- انرژی جذبشده

در جدول 2 تغییرات انرژی جذبشده تحت بار کشش تک محوره و خمش کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت با افزودن ذرات سیلیکا فیوم نمایش داده شده است. برای نمونههای کامپوزیتی بدون ذرات سیلیکا فیوم میزان انرژی جذبشده در بارگذاری کششی و خمشی به ترتیب 25.2 و 13.17 ژول بر میلیمتر مکعب بدست آمد. با توزیع 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم داخل زمینه بیشترین بهبود در میزان انرژی جذبشده حاصل شد که در طی آن انرژی جذبشده کششی و خمشی به ترتیب به مقادیر 15.26 و 19.81 ژول بر میلیمتر مکعب افزایش یافت. اما با افزودن 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم کاهش در میزان انرژی جذبشده کششی و خمشی تا مقدار 12.068 و 19.21 رژول بر میلیمتر مکعب مشاهده شد.

جدول 2 تأثیر افزودن سیلیکافیوم بر مقادیر انرژی جذبشده در بارگذاری کششی و خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف بازالت

 Table 2
 The effect of addition of silica fume on the tensile and bending absorbed energy of epoxy-basalt fiber composite

انرژی شکست خمشی	انرژی شکست کششی	سيليكا فيوم
(ژول بر میلیمتر مکعب)	(ژول بر میلیمتر مکعب)	(/وزنی)
13.17±0.52	9.52±0.45	0
15/18±08	11.68±0.58	2
19.81±0.89	15.26±0.78	4
19.21±0.95	12.68±0.65	6

افزایش در جذب انرژی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت در نتیجه افزودن ذرات سیلیکا فیوم ناشی از مکانیزم انحراف ترک بهوسیله این ذرات بود. وقتی ترک در حال اشاعه به ذرات تقویت کننده سیلیکا فیوم میرسد، توانایی عبور از این موانع را نداشته و آنها را دور میزند. لذا به دلیل طولانی تر شدن مسیر حرکت ترک، انرژی جذب شده توسط ماده افزایش می یابد. همچنین از طرف دیگر در این مکانیزم با تغییر مسیر حرکت ترک، مد آن تغییریافته و بخش زیادی از تنش وارده، از هیدرواستاتیک به برشی تبدیل می شود که صرف تغییر شکل ماده می شود و به طبع آن انرژی لازم برای شکست ماده را افزایش مىدهد، بنابراين چقرمگى افزايش مىيابد [32]. نكته لازم به ذكر آن است كه با اصلاح سطحي ذرات سيليكا فيوم به دليل بهبود توزيع ذرات درون زمينه و فصل مشترک بین پلیمر و ذرات سیلیکا فیوم اثر بازدارندگی آنها در برابر جوانهزنی و اشاعه ترک ارتقا یافته که نتیجه آن بالارفتن جذب انرژی کامپوزیت است. کاهش در انرژی جذب شده به ازای توزیع 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم در مقایسه با نمونههای کامپوزیتی تقویتشده با 4 درصد وزنی از این ذرات، به علت تشکیل کلوخههای ذرات سیلیکا فیوم در مقادیر بالا درون زمینه است که منجر به کاهش قابلیت جذب انرژی می شود [33].

3-3- بررسی ریزساختاری

در شکل 5، تصاویر SEM از نمونههای شاهد (نمونههای فاقد ذرات سیلیکا فیوم) و نمونههای حاوی ذرات سیلیکا فیوم توزیع شده درون زمینه آمده است. برای نمونههای شاهد که فاقد سیلیکا فیوم هستند (شکل 5-الف-a)، صاف الیاف تقویت کننده است. این در حالی است که برای نمونههای حاوی ذرات سیلیکا فیوم (شکل 5-ب-d)، پس از شکست کامپوزیت، مقداری از فاز زمینه پلیمری به سطح الیاف بازالت چسبیده است که این موضوع نشاندهنده چسبندگی مطلوب بین زمینه اپوکسی و الیاف در نتیجه توزیع ذرات سیلیکا فیوم درون رزین اپوکسی است. نتیجهای که از مقایسه این دو تصویر میتوان برداشت نمود این است که در نمونههای شاهد، جدایش فصل مشتر ک مکانیزم غالب شکست است و این در حالی است که در نمونههای با زمینه تقویت شده با ذرات سیلیکا فیوم مکانیزم غالب شکست، ترک خوردن زمینه است [34].



 Fig. 5 SEM images of the fracture surface of epoxy-basalt fibers composite, a) without silica fume at 1.50 kx magnification, b) reinforced with 4 wt% silica fumes at 1.20 kx magnification.

 شكل 5 تصوير SEM از سطح شكست كامپوزيت اپوكسى- الياف بازالت، الف) فاقد

سیلیکا فیوم در بزرگنمایی kx 1.50، ب) حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم در بزرگنمایی 1.20 kx.

در شکل 6 تصاویر میکروسکوپی از زمینه اپوکسی خالص و تقویتشده با سیلیکا فیوم نشان داده شده است. در ارتباط با نمونههای تقویتشده با سیلیکا

فیوم باندهای برشی زیادی در زمینه است که در نتیجه مقاومت بالای ذرات تقویت کننده سیلیکا فیوم در برابر رشد ترک بود و این در حالی است که برای زمینه اپوکسی خالص سطح شکست صاف بوده که مؤید شکست ترد است. در رابطه با زمینه حاوی سیلیکا فیوم ناهمواریهایی در سطح شکست ملاحظه میشود و انحراف ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری قابل مشاهده است که از میشود و انحراف ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری قابل مشاهده است که از میرود. شکل 7 سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت حاوی 6 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم را در بزرگنمایی بالا نشان می دهد که مؤید وجود کلوخههای این ذرات در زمینه کامپوزیت است که عامل اصلی افت خواص مکانیکی کامپوزیتهای اپوکسی – الیاف بازالت هستند. کلوخهها در فصل مشتر ک الیاف و زمینه به جدایش آنها در حین بارگذاری کمک می کنند و در نتیجه خواص مکانیکی کامپوزیت افت پیدا می کند. نمونهای از ذرات کلوخه شده با کادر قرمز رنگ در شکل 7 مشخص شدهاند.



Fig 6 SEM images of the matrix of epoxy-basalt fibers composite, a) without silica fume, b) reinforced with 4 wt.% silica fumes at 3 kx magnification.

شکل 6 تصاویر SEM از زمینه کامپوزیت اپوکسی- الیاف بازالت، الف) فاقد سیلیکا فیوم، ب) حاوی 4 درصد وزنی سیلیکا فیوم در بزرگنمایی kx 3.



Fig 7 Agglomeration of silica fume particles (6 wt.%) in epoxy at 3 kx magnification.

شکل 7 آگلومراسیون ذرات سیلیکا فیوم (6 درصد وزنی) در زمینه اپوکسی در بزرگنمایی kx 3.

4- نتیجهگیری

در این پژوهش ذرات سیلیکا فیوم با عامل سیلان اصلاح سطحی شده و سپس تأثیر افزودن این ذرات (در درصدهای وزنی 0، 2، 4 و 6)، بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای زمینه اپوکسی- الیاف بازالت تحت بارگذاریهای خمش سه نقطهای و کشش محوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی بدست آمده به شرح زیر است:

1- نتایج طیفسنجی FT-IR مشخص نمود که ذرات سیلیکا فیوم بهطور موفقیتآمیزی با عامل سیلان اصلاح سطحی شدهاند.

2- نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطهای و کشش نشان داد که بیشترین بهبود در خواص مکانیکی کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت به ازای افزودن 4 درصد وزنی ذرات سیلیکا فیوم حاصل میشود. تحت این شرایط استحکام خمشی، مدول خمشی، و انرژی جذبشده به ترتیب 29، 41 و 47 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد ذرات سیلیکا فیوم افزایش یافتند. همچنین در ارتباط با خواص کششی، استحکام کششی، مدول کششی و انرژی جذبشده به ترتیب 22، 35 و 60 درصد افزایش یافتند.

3- کاهش استحکام (کششی و خمشی) کامپوزیتهای اپوکسی- الیاف بازالت به ازای توزیع 6 درصد وزنی سیلیکا فیوم حاصل شد که این موضوع ناشی از کلوخهای شدن این ذرات درون زمینه کامپوزیت بود.

4- نتایج بدست آمده از بررسیهای SEM نشان داد که فصل مشترک بین الیاف تقویتکننده و زمینه و توزیع مطلوب ذرات سیلیکا فیوم درون زمینه اپوکسی تأثیر زیادی در بهبود خواص مکانیکی تحت بار گذاریهای مختلف دارد.

5- مراجع

- [1] Campbell, F. C., "Structural Composite Materials," ASM international, 2010.
- [2] Kumar, K. P., Sekaran, A. S., "Some Natural Fibers Used in Polymer Composites and Their Extraction Processes: A Review," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 33, No. 20, pp. 1879-1892, 2014.
- [3] Alderliesten, R., "On the Development of Hybrid Material Concepts for Aircraft Structures," Journal of Recent Patents on Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 25-38, 2009.
- [4] Nunna, S., Chandra, P. R., Shrivastava, S., Jalan, A.k." A Review on Mechanical Behavior of Natural Fiber Based Hybrid Composites," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 31, No. 11, pp. 759-769, 2012.
- [5] Pareek, K. and Saha, P., "Basalt Fiber and Its Composites: An Overview," in Proceeding of the National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019), 2019.
- [6] Khandelwal, S. and Rhee, K. Y., "Recent Advances in Basalt-Fiber-Reinforced Composites: Tailoring the Fiber-Matrix Interface," Composites Part B: Engineering, Vol. 192, pp. 108011, 2020.
- [7] Yan, L., Chu, F., Tuo, W., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, P., Gao, Y., "Review of Research on Basalt Fibers and Basalt Fiber-Reinforced Composites in China (I): Physicochemical and Mechanical Properties," Journal of Polymers and Polymer Composites, Vol. 29, No. 9, pp. 1612-1624, 2021.
- [8] Diamond, S., Sahu, S., "Densified Silica Fume: Particle Sizes and Dispersion in Concrete," Journal of *Materials and structures*, Vol. 39, pp. 849-859, 2006.
- [9] Trewyn, B. G., Giri, S., Slowing, I. I. and Lin, V. S.-Y., "Mesoporous Silica Nanoparticle Based Controlled Release, Drug Delivery, and Biosensor Systems," Journal of Chemical communications, No. 31, pp. 3236-3245, 2007.
- [10] Imam, A., Kumar, V and Srivastava, V., "Review Study Towards Effect of Silica Fume on the Fresh and Hardened Properties of Concrete," Journal of Advances in concrete construction, Vol. 6, No. 2, pp. 145, 2018.

Organo-Montmorillonite Clay," Malaysian Polymer Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 8-15, 2012.

- [29] Zulfli, N. H. M. and Shyang, C. W., "Flexural and Morphological Properties of Epoxy/Glass Fibre/Silane-Treated Organomontmorillonite Composites," J Phys Sci, Vol. 21, pp. 41-50, 2010.
- [30] Chen, C., Wang, H., Xue, Y., Xue, Z., Liu, H., Xie, X., Mai, Y.-W., "Structure, Rheological, Thermal Conductive and Electrical Insulating Properties of High-Performance Hybrid Epoxy/Nanosilica/Agnws Nanocomposites," Composites Science and Technology, Vol. 128, pp. 207-214, 2016.
- [31] Wang, Y., Wang, Y., Wan, B., Han, B., Cai, G., Chang, R., "Strain and Damage Self-Sensing of Basalt Fiber Reinforced Polymer Laminates Fabricated with Carbon Nanofibers/Epoxy Composites under Tension," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 113, pp. 40-52, 2018.
- [32] Rostamiyan, Y., Rezaei, M., "The Effect of Nano Zirconium Dioxide and Drilling on the Buckling Strength of Epoxy Based Nanocomposites," Journal of Materials Chemistry and Physics, Vol. 212, pp. 523-532, 2018.
- [33] Yadhav, B. L., Govindaraju, H., Kiran, M. and Suresha, B., "Three-Point Bending and Impact Behaviour of Carbon/Epoxy Composites Modified with Titanium Dioxide Nanoparticles," Journal of Materials Today: Proceedings, Vol. 43, pp. 1755-1761, 2021.
- [34] Alsaadi, M., Bulut, M., Erkliğ, A. and Jabbar, A., "Nano-Silica Inclusion Effects on Mechanical and Dynamic Behavior of Fiber Reinforced Carbon/Kevlar with Epoxy Resin Hybrid Composites," Journal of Composites Part B: Engineering, Vol. 152, pp. 169-179, 2018.

- [11] Kyzas, G. Z. and Mitropoulos, A. C., "Introductory Chapter: Nanomaterials in the 2020s "In Novel Nanomaterials-Synthesis and Applications, IntechOpen, 2018.
- [12] Malhotra, V. M., "Condensed Silica Fume in Concrete," CRC Press, 2018.
- [13] Majeed, A. H., "Enforcement of Epoxy with Silica Fume and Carbon Fiber," Tikrit Journal of Engineering Sciences, Vol. 25, No. 1, pp. 74-77, 2018.
- [14] Wittek, T., and T, Tanimoto., "Mechanical properties and fire retardancy of bidirectional reinforced composite based on biodegradable starch resin and basalt fibres," Journal of Express Polym Lett, Vol. 2, No. 11, pp. 810-822, 2008.
- [15] Ravishankar, K. and Kulkarni, S. M, "Synthesis and Comparison of Mechanical Behavior of Fly Ash-Epoxy and Silica Fumes-Epoxy Composite," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 225, No. 1, p. 012299, 2017.
- [16] Azizi, H. and Eslami-Farsani, R., "Study of Mechanical Properties of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Silane-Modified Nanozirconia," Journal of Industrial Textiles, Vol. 51, No. 4, pp. 649-663, 2021.
- [17] Kazemi-Khasragh, E., Bahari-Sambran, F., Siadati, S. M. H., Eslami-Farsani, R. and Arbab Chirani, S., "The Effects of Surface-Modified Graphene Nanoplatelets on the Sliding Wear Properties of Basalt Fibers-Reinforced Epoxy Composites," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 136, No. 39, pp. 47986, 2019.
- [18] Abdi, A., Eslami-Farsani, R., Khosravi, H., "Evaluating the Mechanical Behavior of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Surface-Modified Caco 3 Nanoparticles," Journal of Fibers and Polymers, Vol. 19, pp. 635-640, 2018.
- [19] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na+-Montmorillonite Nanoclay," Journal of Polymer testing, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [20] Eslami Farsani, R., Ebrahim Nejad Khaljiri, H., Khorsand, H., Abbas Banaee, K., "Hybridization Effect of Fibers Reinforcement on Tensile Properties of Epoxy Composites," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.
- [21] Abdollahi Azghan, M., Fallahnejad, M., Zamani, A., Eslami-Farsani, R., "Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 981-988, 2020.
- [22] Bakar, R. A., Yahya, R. and Gan, S. N., "Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk," Journal of Procedia chemistry, Vol. 19, pp. 189-195, 2016.
- [23] Mokhothu, T. H., Luyt, A. S. and Messori, M., "Preparation and Characterization of Epdm/Silica Composites Prepared through Non-Hydrolytic Sol-Gel Method in the Absence and Presence of a Coupling Agent," Journal of Express Polymer Letters, Vol. 8, pp. 809-822, 2014.
- [24] Lee, S. Y., Kim, J. S., Lim, S. H., Jang, S. H., Kim, D. H., Park, N.-H., Jung, J. W. and Choi, J., "The Investigation of the Silica-Reinforced Rubber Polymers with the Methoxy Type Silane Coupling Agents," Journal of Polymers, Vol. 12, No. 12, pp. 3058, 2020.
- [25] Ismail, H ,.Nordin, R., "Effect of Epoxidized Natural Rubber (Enr) and Ethylene-Co-Acrylic Acid Copolymer on Properties of Silica-Filled Natural Rubber/Recycle Rubber Powder Blends," *Journal of* Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 285-300, 2004.
- [26] Öztürk, B., Gedikli, H. and Kılıçarslan, Y. S., "Erosive Wear Characteristics of E-Glass Fiber Reinforced Silica Fume and Zinc Oxide-Filled Epoxy Resin Composites," Journal of Polymer Composites, Vol. 41, No. 1, pp. 326-337, 2020.
- [27] Azizi, H., Eslami-Farsani, R., "The Effect of Modified Zirconia Nanoparticles on the Mechanical Response of Basalt Fibers-Epoxy Composite under Tensile Loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 2, pp. 891-896, 2020.
- [28] Zulfli, M. and Chow, W., "Mechanical and Thermal Behaviours of Glass Fiber Rinforced Epoxy Hybrid Composites Containing

نشریه علمی پژوهشی



.. 10

علوم و فناوری **کامپوزیست** http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تجربی خواص ضربهای ساختارهای سلولی الگوبرداری شده از پوسته جانوران

1 رضا محمودی 1 ، محمدحسین پل 2* ، یوسف گلین امیری

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

m_n_pot@tairesnu.ac.ir (14113-145	ەتفرش، صندوق پستى
چکیدہ	طلاعات مقاله:

اطلاعات مقاله:	چکیده
دريافت: 1402/05/02	 بشر همواره میکوشد تا از طبیعت الهام گرفته و سازههای جدید خلق کند. یکی از این سازههای نوین، سازههای سلولی و مشبک هستند
پذيرش: 1402/06/29	که به دلیل وزن پایین و استحکام فشاری مناسب مورد توجه محققان قرار گرفتهاند. در این مقاله با الهام از طبیعت و ساختارهای موجود
	در آن به بررسی این سازهها و با الگوبرداری از موجوداتی مانند لاکپشت، حلزون و صدف دریایی پرداخته شده است. به این منظور از هر
كليدواژگان	الگو دو مدل جدید که مشابه آن قبلاً طراحی و ساخته نشده است، طراحی و با استفاده از روش افزایشی از جنس Petg ساخته شد. نمونهها
ضربه،	تحت آزمایش دو ضربه (سرعت پایین) متوالی با وزن ضربهزننده 2.2 kg و در دو ارتفاع cm 5 و cm قرار گرفتند. نتایج نشان داد
سازەھاى سلولى،	بیشترین نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع cm 5 به ترتیب مربوط به یکی از نمونههای الگوبرداری شده از لاکپشت و یکی از نمونههای
لاک پشت،	الگوبرداری شده از حلزون و با نسبت 325% و کمترین نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع 10 cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونههای
حلزون،	لاکپشت و یکی از نمونههای حلزون و با نسبت 200% میباشد. بیشترین و کمترین جابجایی در حداکثر نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع
صدف دریایی	5cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونههای الگوبرداری شده از حلزون و یکی از نمونههای الگوبرداری شده از لاکپشت و با نسبت 252%
	و در ارتفاع 10cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونههای حلزون و یکی از نمونههای لاکپشت و با نسبت 238% میباشد.

Experimental investigation of impact properties of cell structures patterned from animal shells

Reza Mahmoudi¹, Mohammad Hossein Pol^{1*}, Yusef Galian Amiri¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh. Iran * P.O.B. 14115-143 Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

Keywords	Abstract
Impact, cellular structures, turtle, snail, sea shell	Man always tries to get inspiration from nature and create new structures. One of these new structures is cellular and lattice structures, which have attracted the attention of researchers due to their low weight and appropriate compressive strength. In this article, inspired by nature and the structures in it, these structures have been investigated and modeled on creatures such as turtles, snails and sea shells. For this purpose, two models of each pattern were designed and made of Petg material using the additive method. The samples were subjected to the test of two consecutive impacts with the impact weight of 2.2 kg and at two heights of 5 cm and 10 cm. The results showed that the highest and the lowest impact force at a height of 5cm respectively correspond to one of the samples taken from a turtle and one of the samples taken from a snail with a ratio of 325% and at a height of 10 cm, respectively, it corresponds to one of the snail samples, with a ratio of 252%, and at a height of 10 cm, respectively, it corresponds to one of the snail samples and turtle samples, with a ratio of 238%.

مه	مقد	-1	

جدید با خواص مطلوب است. در همین راستا نیز محققان موادی از قبیل
کامپوزیتها، سرامیکها و غیره را ساخته و بهکار بردهاند. این مواد علیرغم
مزایا و ویژگیهای جالبی که دارند معایبی نیز داشتهاند که عمده مشکل آنها
هزینه تولید و طراحی بالا و دشوار بودن ساخت برخی از این مواد بوده است
[1]. سازههای سلولی و مشبک با چگالی پایین و سفتی بالا کاربردهای زیادی

علم تقلیدات زیستی علم جدیدی است که با استفاده از ظرفیتهای موجود و تقلید از سیستمهای حیاتی به حل مشکلات و ارتقای طراز تکنولوژیهای موجود پرداخته و امیدبخش حل این معضلات است. علم تقلیدات زیستی با تقلید از طبیعت، سیستمها و سازههای موجود به دنبال رسیدن به نمونههای

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mahmoudi, R., Pol, M. H., Galian Amiri, Y., "Experimental investigation of impact properties of cell structures patterned from animal shells," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2225-2232, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2007104.1844

در زمینههای حملونقل، مهندسی مکانیک، مهندسی پزشکی و دیگر زمینهها دارند [2]. امروزه برخی از ساختارهایی که توسط انسان تولید شده است با الهام از طبیعت و اجزای تشکیل دهنده آن بوده است از همین رو میتوان به چسبهایی که با الگوبرداری از پای حشرات تولید شده است اشاره داشت [3]. صنعت دارو و بخشی از علم نانو نیز تحت تأثیر این علم قرار گرفته است [4]. به همین جهت این علم بسیار مورد توجه محققان در علوم مختلف قرار گرفته است و از آنجایی که ساختارهای موجود در طبیعت دارای پیچیدگیهایی هستند، ایدههای بسیار خلاقانه و جدیدی در این زمینه وجود دارد که به مرحله تجاریسازی نرسیدهاند به عنوان مثال تار عنکبوت مقاومتی به اندازه جلیقه ضدگلوله دارد اما با بافتی سبک تشکیل شده است [5] و یا در علم رباتیک نعوه حرکت رباتها با الهام از راه رفتن موجودات با پاها به آنها آزادی عمل و قدرت بیشتری نسبت به چرخها داده است [6].

محققان با مطالعات بسیار به این موضوع دست یافتهاند که سازههای مشبک هنگامی که در راستای خارج از صفحه خود بارگذاری شوند، استحکام و سفتی بسیار بالایی دارند. زیرا، در این حالت برای تغییر شکل نیاز به کشیده شدن یا فشرده شدن دیوارههای سازه دارد. با توجه به این امر این سازهها نسبت به وزن خود از مقاومت به ضربه بسیار بالایی برخوردار هستند و به همین علت مورد توجه بیشتر قرار گرفتهاند [8,7].

درویزه و همکارانش [9] با الهام گرفتن از پوسته خارجی خرخاکی ساختار میکروسکوپی این حشره را بررسی و آزمون ضربه را در دو حالت صاف و کروی بر روی پوسته این حشره شبیهسازی کردند آنها در زوایای مختلف و در دو سرعت مختلف پوسته را مورد بررسی قرار دادند و در انتهای تحقیق به این نتیجه رسیدند که مکانیزم دفاعی این جانور در زمانی که تنش بر بدن این حشره وارد میشود در مواقعی بیش از 600 درصد تنش را کاهش میدهد. در مطالعه دیگری که بر روی سازههای مشبک توسط میلاد نجفی و همکارانش آگزتیک تحت آزمون فشار قرار دادند. نتایج نشان داد که سازههای آگزتیک سرنیزهای، آنتی تتراکایرال و ری اینترنت به ترتیب 161، 166 و 57 درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری داشتهاند.

چانگ و همکاران [11] با الهام از واکنشهای مکانیکی پوسته لاکپشت در برابر بار استاتیکی و دینامیکی، یک مدل از پوسته لاکپشت ساخته و این مدل را تحت بارگذاری فشاری بهصورت عددی و تجربی بررسی کرده و توزیع تنش و جابهجایی را در قسمتهای مختلف پوسته لاکپشت به دست آوردهاند. نتایج نشان داد پوسته لاکپشت تحت بار فشاری بیشترین جابهجایی عمودی را در انتهای پشتی خود دارد درحالیکه جابهجایی عمودی در قسمت جلویی نصف آن مقدار است. همچنین بیشترین جابهجایی افقی پوسته در قسمت انتهایی آن صورت گرفته است. با توجه به این موضوع این باور به وجود آمد که این الگوی تغییر شکل بهمنظور حفاظت بیشتر از اندامهای داخلی لاکپشت و سر آن میباشد.

فقیه شجاعی و همکاران [12] با استفاده از روش جدیدی ویژگیهای هندسی و مکانیکی پوسته نرمتنان را برای مدل سازی دقیق بررسی کردند. آنها در این مقاله به تجزیه وتحلیل تجربی و مدل سازی عددی چهار گونه مختلف پوسته گاستروپود (موجوداتی با جثه نرم که عمدتاً توسط پوسته سنگ آهک مارپیچی حفاظت می شوند) پرداختند. آنها ابتدا با کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی به مطالعه ویژگیهای فیزیکی و ریز ساختاری نمونههای پوسته

¹ Ansys ² Solid Works

گاستروپود پرداختند و سپس با کمک نرمافزار انسیس^۱ مدلها شبیهسازی کردند. نتایج تجربی و عددی نشان داد شباهت خوبی بین ساختار بیرونی مدلهای طراحی شده و پوسته گاستروپود وجود دارد.

عملکرد مکانیکی بهینه صدفها و صدفهای حلزون در سالهای اخیر توجه زیستشناسان، مهندسان و دانشمندان علم مواد را به خود جلب کرده است. مطالعات قبلی نشان داد که کربنات کلسیم (کلسیت یا آراگونیت) با مواد آلی بسیار کمی (کمتر از 5 درصد وزنی) ساختار ترکیبی منحصر به فردی را با سطح سخت تشکیل میدهد [13].

صدف مروارید یک بیوکامپوزیت بسیار پیچیده است که اگرچه از یک ماده معدنی شکننده ساخته شده است، اما به طرز قابل توجهی سخت است. بنابراین، آزمایشها و مدلهای مکانیکی متعددی برای مشخص کردن ویژگیهای ریزساختاری این عملکرد، به منظور تکرار آنها در مواد مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. در حال حاضر به طور گستردهای شناخته شده است که لغزش صفحه یک مکانیسم کلیدی در استحکام صدف مروارید است [14].

همچنانکه گفته شد سازههای سلولی به دلیل سبکی دارای کاربردهای فراوانی بهویژه در صنعت هوافضا میباشد. الگوبرداری از طبیعت جهت طراحی اولیه این سازهها مورد توجه تعدادی از محققین میباشد. در این تحقیق با الگوبرداری از لاکپشت، پوسته حلزون و صدف دریایی، شش سازه سلولی نوین طراحی و با استفاده از تکنولوژی چاپ سهبعدی ساخته شد. سپس این سازهها تحت آزمایش ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و درنهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شدند.

2- ساخت

شش مدل در سه گروه (دو مدل از هر یک از لاک لاک پشت، پوسته حلزون و صدف دریایی) طراحی شد (جدول1). شش مدل طراحی شده با ابعاد 30 mm³ مان 30 x00 در جدول 1 با استفاده از روش ساخت افزایشی ساخته شدند. برای ایجاد مدل ها از نرمافزار سالیدورکز ^۲ استفاده شد. برای ایجاد فایل های چاپ سهبعدی از نرمافزار سیمپلیفای^۲ استفاده شد و با استفاده از فرآیند لایه نشانی مذابی^۲ نمونه ها ساخته شدند. نمونه ها با استفاده از فیلامنت شرکت آیسان و از جنس PETG که یکی از مواد پلیمری رایج در ساخت قطعات بوده و دارای خواص مکانیکی و ضربه ای خوبی می باشد ساخته شدهاند. مشخصات فیلامنت مورد استفاده در جدول 2 داده شده است.

3- آزمایش

آزمون ضربه روی نمونههای ساخته شده توسط دستگاه سقوط وزنه واقع در دانشگاه تفرش انجام شد. ارتفاع مفید این دستگاه در حدود m 2.3 و سیستم بالابر آن توانایی جابهجا کردن وزنه تا 160 kg را دارد. اجزا اصلی این دستگاه شامل شاسی، الکتروموتور و گیربکس، سیستم مگنت، میل راهنما و سکوی قرارگیری نمونه می باشد (شکل 1).

در این پژوهش دادههای حاصل از آزمایش توسط حسگر شتاب سنج پیزوالکتریک با ظرفیت g 2000 دریافت می شود (شکل 2) این حسگر در قسمت فوقانی پیچ مخصوص سنبه متصل می شود. پس از انجام آزمایش ضربه، دادهها توسط کابل حسگر به شارژ آمپلی فایر و سپس به دیتالاگر ارسال می-گردد (شکل 3). به منظور ثبت دادهها از فیلتر اسیون Hz 1000 استفاده گردید.

³ Simplify3D ⁴ FDM

Filament type

PETG

جدول 1 مشخصات نمونهها

جدول 2 مشخصات فیلامنت PETG استفاده شده برای ساخت نمونهها [15] Table 2 Specifications of the PETG filament used to make the samples [15]

Bed temp

(C⁰)

Density

(g/cm³)

Tensile strength

(MPa)

49

Print temp

(C⁰)

Table 1 Characteristics of samples

شماره وزن(gr) مدل عنوان نمونه لاکپشت 1 15 T-1 15 لاكپشت 2 T-2 10 S-1 حلزون 1 S-2 10 حلزون 2 صدف 1 15 O-1 صدف 2 15 O-2



Fig.1 Drop weight machine



Fig. 2 Acceleration sensor

شکل 2 حسگر شتاب

شكل 1 دستگاه سقوط وزنه



Fig. 3 Charging amplifier and data logger شکل 3 شارژ آمپلیفایر و دیتالاگر

آزمایش بر روی نمونهها ابتدا با ارتفاع سقوط 5 cm 5 که آسیب مشهودی بر روی نمونهها ایجاد نمیکند صورت گرفت و سپس بر روی همین نمونهها آزمایش دیگری با ارتفاع سقوط وزنه 10 cm که سبب آسیب مشهودی در تمامی نمونهها میشود، صورت گرفت. وزن جسم ضربهزننده برای تمام نمونه یکسان و برابر با 2.2 kg استفاده شد.

شکل 4 نمونهای از نمودار خروجی آزمایشهای انجامشده میباشد که توسط سیستم اندازه گیری ارائه میشود (آزمایش بر روی نمونه T1). همچنانکه

Fig. 3

نشريه
علوم
فناو
Ś
كامپو

دیده میشود این نمودار شتاب برحسب زمان در طی فرآیند ضربه میباشد که جهت بررسی به نمودار نیرو-جابجایی تبدیل میشود (شکل 5).







Fig. 5 Force-displacement diagram of sample T1 شکل 5 نمودار نیرو-جابهجایی نمونه T1

4- نتایج و بحث 1-4- نمونهها با الگوی لاکپشت 1-1-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 6 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونههای T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک لاکپشت در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان میدهد.



Fig. 6 Diagram of the maximum compressive force applied at the height of 5cm and 10cm $\,$

شکل 6 نمودار حداکثر نیروی فشاری اعمال شده در ارتفاع 5cm و 10cm

همچنانکه در شکل 6 دیده میشود نیروی ضربه نمونه T2 بیشتر از نمونه T1 در دو ارتفاع سقوط ضربهزننده میباشد. میزان نیرو اعمال شده در نمونه T2 نسبت به نمونه T1 در ارتفاع 5cm و 10cm به ترتیب برابر 11٪ و 53٪ بیشتر است. علت اینکه نمونه T2 نیروی ضربه بیشتری نسبت به نمونه T1 دریافت کرده را میتوان به نوع طراحی و هندسه داخلی نمونه T2 و داشتن الگوی منظمتر نسبت به نمونه T1 مربوط دانست.

2-1-4- جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 7 مقدار جابهجایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک پشت را نشان می دهد.



Fig. 7 Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

شکل 7 نمودار جابه جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع cm 5 و cm 10 cm

همانطور که دیده می شود هرچه ارتفاع جسم ضربهزننده افزایش پیدا کرده است میزان جابه جایی نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می شود در تمامی ارتفاع های سقوط، جابجایی در حداکثر نیرو نمونه T1 بیش از نمونه T2 است. اختلاف بین دو نمونه در ارتفاع cm 5 و m 10 با توجه به هندسه داخلی و مقاومتی که نسبت به ضربه وارده نشان داده به ترتیب %21 و .44 می باشد. 1-4-5- جابه جایی کل

شکل 8 مقدار جابهجایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاکپشت را نشان میدهد.



Fig. 8 Total displacement diagram at 5cm and 10cm height شکل 8 نمودار جابهجایی کل در ارتفاع cm و 5 cm شکل 8

همانطور که دیده می شود هرچه ارتفاع جسم ضربه زننده افزایش پیدا کرده است، میزان جابه جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می شود در تمامی ارتفاعهای سقوط، جابجایی نمونه T1 بیش از نمونه T2 است. اختلاف بین دو نمونه در ارتفاع 5cm و 10cm به ترتیب 20% و 71% می باشد.

با توجه به نمودار حداکثر نیروی فشاری این اختلاف را میتوان به این شکل بیان کرد که هرچه نمونه نیروی کمتری در خود جذب کرده باشد جابهجایی بیشتری داشته است. به این مفهوم که نمونه سفتی کمتر و جابهجایی بیشتری از خود نشان داده است.

2-4- نمونهها با الگوی حلزون 1-2-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 9 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونههایSI و S2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان میدهد.



Fig. 9 Diagram of the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

شکل 9 نمودار حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع cm 5 و 10 cm

همانطور که مشاهده می شود نیروی ضربه نمونه S2 در ارتفاع 5 cm 5 بیشتر از نمونه S1 و در ارتفاع 10 cm کمتر از نمونه S1 می باشد. لذا نمونه S2 در ارتفاع 5 cm 5 نسبت به نمونه S1 تحمل نیروی بیشتری از خود نشان داده است اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه S2 نیروی کمتری از نمونه S1 جذب کرده است. علت نیروی کمتر نمونه S1 در ارتفاع 5 cl میتوان به این موضوع نسبت داد که چون این نمونه با قاب مربعی و هسته دایروی طراحی شده است، در ضربه اول قاب دچار شکست شده و حالت ارتجاعی هسته دایروی باعث شده است نیروی کمتری را به واسطه این شکست جذب کند و در ضربات بعدی نیروی حاصل از ضربه مستقیماً به هسته دایروی وارد شده و نیروی بیشتری تحمل کند.

میزان نیرو اعمال شده در نمونه S2 نسبت به نمونه S1 در ارتفاع 5cm میزان نیرو اعمال شده در ارتفاع 10 % کمتر است.

2-2-4- جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 10 مقدار جابهجایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه S1 و S2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون را نشان میدهد.

همچنانکه دیده میشود جابجایی حداکثر نمونه S1 در ارتفاع 5 cm بیشتر از نمونه S2 و در ارتفاع 10 cm کمتر از نمونه S2 میباشد. لذا نمونه S1 در ارتفاع 5 cm نسبت به نمونه S2 حالت ارتجاعی بیشتری داشته و عملکرد بهتری از خود نشان داده است، اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه S2 به مراتب از نمونه S1 جابجایی بیشتری داشته باشد. هرچه ارتفاع جسم ضربهزننده افزایش یافته نمونه S1 نیز تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه S2 پیدا کرده است. علت این امر را همانطور که قبلاً گفته شد میتوان به این موضوع نسبت داد که چون این نمونه با قاب مربعی و هسته دایروی طراحی شده است در ضربه اول قاب دچار شکست شده است و در ضربات بعدی نیروی

حاصل از ضربه به هسته دایروی وارد شده و لذا حالت گنبدی شکل هسته مانع تغییر شکل زیاد سازه شود. میزان تغییر شکل در حداکثر نیروی فشاری در نمونه S1 نسبت به نمونه S2 در ارتفاع S ، 131% درصد بیشتر و در ارتفاع 10 cm، 49% کمتر است.



Fig. 10 Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5cm and 10cm

شکل 10 نمودار جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع cm 5 و 10 cm

3-2-4- جابەجايى كل

شکل 11 مقدار جابهجایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون را نشان میدهد.



Fig. 11 Total displacement diagram at 5cm and 10cm height شکل 11 نمودار جابهجایی کل در ارتفاع 5cm و 10cm

در شکل 11 مشابه شکل 10 دیده می شود هرچه ارتفاع جسم ضربهزننده در ضربات بعدی افزایش پیدا کرده است میزان جابه جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می شود کمترین مقدار جابه جایی کل مربوط به نمونه S2 در ارتفاع 5 cm 5 و برابر با m 0.0068 است. مربوط به نمونه S1 در ارتفاع 5 cm 5 و برابر با m

3-4- بررسی نمونه با الگوی صدف 4-3-1- حداکثر نیروی فشاری

شکل 12 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونههایOI و O2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان میدهد.

همچنانکه دیده می شود نیروی ضربه نمونه O1 بیشتر از نمونه O2 در دو ارتفاع سقوط ضربهزننده می باشد. میزان نیرو اعمال شده در نمونه O1 نسبت به نمونه O2 در ارتفاع cm 5 و cm 10 به ترتیب برابر 10% و 4% بیشتر بوده است.



Fig. 14 Total displacement diagram at 5 cm and 10 cm height شکل 14 نمودار جابهجایی کل در ارتفاع 5 cm $_{\rm 0}$ و 10 m

در شکل 14 مشابه شکل 13 دیده می شود هرچه ارتفاع جسم ضربهزننده در ضربات بعدی افزایش پیدا کرده است میزان جابه جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می شود کمترین مقدار جابه جایی کل مربوط به نمونه O2 در ارتفاع 5 cm و برابر با m 0.003 و بیشترین مقدار جابه جایی نیز مربوط به نمونه O2 در ارتفاع cm 10 و برابر با m 0.007 است.

4-4- مقايسه نمونهها

1-4-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 15 مقایسه حداکثر نیروی فشاری بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط cm 5 نشان داده است. همچنانکه دیده می شود در ارتفاع سقوط 5 cm، کمترین نیروی به وجود آمده در اثر ضربه مربوط به نمونه S1 به مقدار 282 N و سپس مربوط به نمونه S2 به مقدار N 059 می باشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از حلزون بر اثر ضربه اول یکسان، کمترین نیروی ضربه را نسبت به نمونههای دیگر که با الگوبرداری از لاک لاک پشت و لاک صدف ساخته شدهاند، دارا میباشند. در مقابل، نمونههای الگوبرداری شده از لاک لاك پشت طى ضربه اول يكسان با ارتفاع سقوط 5 cm بيشترين نيرو ضربه وارده را متحمل میشوند. نیروی برآیند حاصل از ضربه برای دو نمونه الگوبرداری شده از لاک لاکپشت N 1070 و N 1200 به ترتیب برای نمونههای T1 و T2 می باشد. همچنانکه دیده می شود نیروی بر آیند حداکثر (در نمونه T2) بیش از چهار برابر نیروی منتجه حداقل (در نمونه S1) میباشد. نتيجه مشابه اى را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه 10 cm) مى توان با توجه به شکل 16 مشاهده کرد. در این حالت ضربه، نیروی برآیند حداکثر (در نمونه T2) به مقدار N 2050 و نیروی منتجه حداقل (در نمونه S2) به مقدار 685 N مىباشد.

4-4-2- جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 17 مقایسه جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط 5cm نشان داده ست. همچنانکه دیده میشود در ارتفاع سقوط 5cm، کمترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری در اثر ضربه مربوط به نمونه T2 به اندازه m 0.002 و سپس مربوط به نمونه T1 به اندازه m 20.0023 میباشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از لاک لاکپشت بر اثر ضربه اول یکسان کمترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری را نسبت به نمونههای دیگر که با الگوبرداری از لاک حلزون و لاک صدف ساخته شدهاند را دارا میباشند. در مقابل، نمونه S1 الگوبرداری شده از لاک حلزون طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط 5cm



Fig. 12 Diagram of the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm $\,$

شکل 12 نمودار حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع cm 5 و 10 cm

2-3-4- جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 13 مقدار جابهجایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونههایO1 و O2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان میدهد.



Fig. 13 Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm $\,$

شکل 13 نمودار جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع cm 5 و 10 cm 10 cm

همچنانکه دیده میشود جابجایی حداکثر نمونه O1 در ارتفاع 5 بیشتر از نمونه O2 و در ارتفاع cm 00 کمتر از نمونه O2 میباشد. لذا نمونه O1 در ارتفاع cm 5 نسبت به نمونه O2 حالت ارتجاعی بیشتری داشته و عملکرد بهتری از خود نشان داده است اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه O2 به مراتب از نمونه O1 جابجایی بیشتری داشته باشد. هرچه ارتفاع جسم ضربهزننده افزایش یافته نمونه O1 نیز تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه O2 پیدا کرده است. به عبارتی نمونه O1 در ارتفاع cm 5 در حالی که نیروی بیشتری را تحمل کرده است میزان جابه جایی بیشتری هم داشته که این امر به علت ضعف هسته داخلی نمونه در نقطه اتصال آن بوده است.

میزان تغییر شکل در حداکثر نیروی فشاری در نمونه O1 نسبت به نمونه O2 در ارتفاع 5c m 10 5c% درصد بیشتر و در ارتفاع cm 10 cm 22 % کمتر است.

3-3-4- جابەجايى كل

شکل 14 مقدار جابهجایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف را نشان میدهد.

را به مقدار m 0.0067 تجربه میکند. نمونه O2، S2 و O1 به ترتیب در جایگاه بعدی بیشترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط را دارند.



Fig. 15 Comparison of the maximum compressive force at a height of 5 cm

شکل 15 مقایسه حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5cm



Fig. 16 Comparison of the maximum compressive force at a height of 10 cm

شکل 16 مقایسه حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع10 m

نتیجه مشابه ای را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه m 10) میتوان با توجه به شکل 18 برای کمترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری مشاهده کرد. در این حالت ضربه، کمترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری (در نمونه T2) به مقدار m 0.0018 و بیشترین جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری (در نمونه S1) به مقدار m 0.0061 میباشد.



Fig. 17 Comparison of displacement in the maximum compressive force at a height of 5 cm $\,$

شکل 17 مقایسه جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm



Fig. 18 Comparison of displacement in the maximum compressive force at a height of 10 cm $\,$

شکل 18 مقایسه جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 10cm

3-4-4- جابەجايى كل

شکل 19 مقایسه جابهجایی کل بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط 5 cm 5 نشان داده است. همچنانکه دیده می شود در ارتفاع سقوط 5 کمترین جابهجایی کل در اثر ضربه مربوط به نمونه T2 به اندازه m 20.00 و سپس مربوط به نمونه T1 به اندازه m 0.0024 می باشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از لاک لاک پشت بر اثر ضربه اول یکسان کمترین جابهجایی کل را نسبت به نمونههای دیگر که با الگوبرداری از لاک حلزون و لاک صدف ساخته شدهاند را دارا می باشند. در مقابل، نمونه S1 الگوبرداری شده از لاک حلزون طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط m 5 بیشترین جابهجایی کل را به مقدار m 0.0067 تجربه می کند. نمونه O1، O2 و S2 به ترتیب در جایگاه بعدی بیشترین جابهجایی کل طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط را دارند.

نتیجه مشابهی را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه m 10) میتوان با توجه به شکل 20 برای کمترین جابهجایی کل مشاهده کرد. در این حالت ضربه، کمترین جابهجایی کل (در نمونه T2) به مقدار m 0.002 و بیشترین جابهجایی کل (در نمونه O2) به اندازه 0.007 میباشد.

5- نتيجەگىرى

در مطالعه حاضر خواص ضربهای ساختارهای سلولی با الگوی جانوری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این مطالعه خواصی نظیر حداکثر نیروی فشاری، جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل بررسی شد. ساخت نمونه-ها و مدلها در ابتدا با انتخاب الگوی مناسب آغاز گردید و سپس با استفاده از یک فرآیند ساخت افزایشی (چاپ سهبعدی) به روش لایه نشانی مذابی صورت گرفت. سازههای ساخته شده تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین با وزنه 2.2kg و در ارتفاع 5 m 5 و m 10 تحت بررسی قرار گرفتند.

بررسی نتایج آزمون ضربه که در نمونههای لاک پشت انجام شد نشان داد، در ضربه اول با ارتفاع cm 5 نمونه T2، 11 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه T1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به نمونه T1،11 و 20 درصد به ترتیب در جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه T2، 53 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه T1 متحمل شده است. همچنین میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل نمونه T2 نسبت به نمونه T1 متحمل شده است. نمونه S1 به ترتیب 71 و 70 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه T2، 200 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S2 متحمل شده است. همچنین، میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به نمونه S2، 70 درصد و در میزان جابهجایی در جابهجایی کل نمونهT2 نسبت به نمونه O2، 70 درصد جابهجایی کمتری داشته است.

6- مراجع

- Grossmann, J. N., Schmitz, H., "Mechanical properties of terrestrial isopods," pp. 35-44, 2012.
- [2] Vinson, J., "The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials," New York: Routledge, pp.378, 2018.
- [3] Saracoglu, B. O., "Identification of Technology Performance Criteria for CAD/CAM/CAE/CIM/CAL in Shipbuilding Industry," pp. 1635-1646, 2006.
- [4] Kamm, B., and Kamm, M., "Principles of biorefineries Applied microbiology and biotechnology," Vol. 64, No. 2, pp.137-145. 2004.
- [5] Benyus, J., "Innovation Inspired by Nature. New York, USA: William Morrow & Company," pp. 308, 1997.
- [6] Zang, M.Q., "Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review". Polymer Letters, Vol. 2, No. 4, pp238-250, 2008.
- [7] Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K., "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance," Composite Structures. pp. 886-909. 2018.
- [8] Summers, J. D., Ju, J., "Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain," Materials & Design. pp. 512-524. 2011.
- [9] Darvizah, A., "Investigation of the microscopic structure and mechanical behavior of the shell using experimental observations and numerical modeling," In Persian, Modares Mechanical Engineering Journal, pp. 183-190, 2013.
- [10] Najafi, M., Ahmadi, H., Liaghat, G. H. "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasistatic Loading," In Persian, Modares Mechanical Engineering. pp. 415- 424. 2020.
- [11] Zhang, W., Zhang, C., and Chen, Z., "Numerical Study of the Mechanical Response of Turtle Shell," Journal of Bionic Engineering, pp 330–335, 2012.
- [12] Faghih Shojaei, M., Mohammadi, V., Rajabi, H., Darvizeh, A., "Experimental analysis and numerical modeling of mollusk shells as a three-dimensional integrated volume", journal of the mechanical behavior of biomedical materials pp. 38–54. 2012.
- [13] Luz, G. M., Mano, J. F., "Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by the structure of nacr," Mathematical Physical and Engineering Sciences pp. 1587–1605. 2009.
- [14] Currey, J. D., Taylor, J. D., "The mechanical behavior of some molluscan hard tissues," Journal of Zoology pp. 395–406. 1974.
- [15] www.esun3d.net



Fig. 19 Comparison of total displacement at a height of 5cm شکل 19 مقایسه جابهجایی کل در ارتفاع 5 cm



Fig. 20 Comparison of total displacement at a height of 10 cm شکل 20 مقایسه جابهجایی کل در ارتفاع 10 cm

بررسی انجامشده از نتایج آزمون ضربه بر روی نمونههای حلزون نشان داد، در ضربه اول با ارتفاع 5cm نمونه 22، 106 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل مشخص گردید که نمونه 22 نسبت به نمونه S1 به ترتیب 131 و 52 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10 cm نمونه 22، 38 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل نمونه S2 نسبت به نمونه S1 به ترتیب 49 و 42 درصد مقدار بیشتری داشته است.

بررسی انجامشده از نتایج آزمون ضربه بر روی نمونههای صدف نشان داد که، در ضربه اول با ارتفاع 5 cm 5 نمونه O2، 10 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه O1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل مشخص گردید که نمونه O2 نسبت به نمونه O1 به ترتیب 19 و 15 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه O2، 4 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه O1 متحمل شده است. همچنین میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل نمونه O2 نسبت به نمونه O1 به ترتیب 22 و 48 درصد مقدار بیشتری داشته است.

بررسی نتایج آزمون ضربه که در بین شش نمونه انجام شد نشان داد که در ضربه اول با ارتفاع cm 5 نمونه T2، 325 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابهجایی در حداکثر نیروی فشاری و جابهجایی کل مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به نشریه علمی پژوهشی





علوم و فناوری **کامپوزیست** http://jstc.iust.ac.ir

اثر جدایش نانوذرات گرافن بر چقرمگی شکست مود I نانوکامپوزیتهای پلیمری

الهام مرادى¹، محمدحسين ياس*²، افشين زينالدينى³

[- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه		
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه		
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد	گاه آزاد اسلامی، کرمانشاه	
* كرمانشاه، صندوق پستى yas@razi.ac.ir ،67144-14971 * كرمانشاه، صندوق پستى		
طلاعات مقاله:	چکیدہ	
دريافت: 1402/05/11	۔ یکی از مهم ترین کاربردهای نانومواد در رزینهای پلیمری، دستیابی به چقرمگی شکست بالا حتی در کسرهای حجمی کم از نانوذرات	
ېذيرش: 1402/07/08	پرکننده است. چنین عملکردی مربوط به انرژی آزاد شده از طریق مکانیزمهای آسیب است که در مقیاس نانو رخ میدهد. در بین این	
	مکانیزمها جدایش سطحی نانوذره اهمیت بیشتری دارد. در کار حاضر باتوجه به ساختار سلسله مراتبی نانوکامپوزیتها، سعی شده است	
کلیدواژگان	که بااستفاده از روش چندمقیاسی اثر جدایش نانوذرات گرافن از رزین اطراف آن بر چقرمگی شکست مود اول نانوکامپوزیت	
انوذرات گرافن،	اپوکسی/گرافن مورد بررسی قرار گیرد. از این رو یک المان حجمی نماینده انتخاب شده است و با استفاده از دادههای موجود در کارهای	
چقرمگی شکست،	تجربی سایر محققین، اثر چندین پارامتر مانند مدول یانگ، کسر وزنی و ابعاد نانوگرافن مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت مشاهده شد که	
انوکامپوزیت،	چقرمگی شکست با مدول یانگ نانوکامپوزیت نسبت مستقیم دارد همچنین هر چقدر ابعاد نانوذرات بکار رفته کوچکتر باشد، بهبود در	
مدل چند مقیاسی.	چقرمگی شکست بیشتر خواهد بود.	

Effect of GNPs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites

Elham Moradi¹, Mohammad Hossein Yas^{1*}, Afshin Zeinedini²

1- Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

* P.O.B. 67144-14971, Kermanshah, Iran, yas@razi.ac.ir

Abstract		
Graphene nanoparticles, Fracture toughness, Nano composite, Multiscale model.	One of the most important applications of nanomaterials in polymer resins is to achieve high fracture toughness even in small volume fractions of filler nanoparticles. Such performance is related to energy released through damage mechanisms that occur at the nano scale. Among these mechanisms, nanoparticle surface separation is more important. In the present work, considering the hierarchical structure of nanocomposites, it has been tried to investigate the effect of debonding of graphene nanoparticles from the surrounding resin on the fracture toughness of the first mode of the presented epoxy/graphene nanocomposite using a multi-scale method. Therefore, a representative volume element has been selected and using the data available in the experimental works of other researchers, the effect of several parameters such as Young's modulus, weight fracture toughness has a direct relationship with the Young's modulus of the nanocomposite. Also, the smaller the dimensions of the nanoparticles used, the greater the improvement in the fracture toughness.	

به همین دلیل از انواع مختلفی از پرکنندهها با ابعاد و خواص گوناگون جهت افزایش چقرمگی شکست پلیمرها استفاده میشود [3,2]. در بین این ذرات ساختارهای گرافنی به عنوان نازکترین و یکی از مستحکمترین مواد موجود در طبیعت، با داشتن خواص مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی منحصر به فرد، توجه بسیاری از محققین را بهخود جلب کردهاند [5,4]. استحکام و سفتی بسیار بالای گرافن این ایده را ایجاد کرده است که میتوان از این نانوذرات به عنوان تقویتکننده در مواد پلیمری استفاده کرد. در این راستا مطالعات

Please cite this article using:

افزایش نیاز به مواد بادوام و سبک، باعث استفاده روزافزون از مواد کامپوزیتی در صنعت گردیده است. در این میان کامپوزیتهای پلیمری با خواص جالب توجه خود، نقش مهمی را در پیشرفت تکنولوژی دارند. این مواد علیرغم داشتن ویژگیهای منحصر بفرد، دارای ضعفهایی نیز هستند. [1]. از آنجایی که اکثر رزینهای گرماسخت شکننده هستند، مقاومت کمی در برابر رشد ترک دارند.

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1– مقدمه

Moradi, E., Yas, M. H., Zeinedini, A., "Effect of GNPs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2233-2241, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2008325.1848

تجربی زیادی صورت گرفته است که همگی با صرف هزینه و زمان زیاد انجام شده است. از این رو بسیاری از محققین به منظور بررسی رفتار این نوع مواد، روشهای محاسباتی و تحلیلی را انتخاب کردهاند. روشهای محاسباتی میتوانند عوامل مؤثر بر خواص نانوکامپوزیتها را با کمترین هزینه و کوتاهترین زمان شناسایی کرده و راهحلهایی برای بهبود عملکرد آنها پیشنهاد کنند.

یکی از روشهای مرسوم برای بررسی خواص نانوکامپوزیتها روش چند مقیاسی سلسله مراتبی نام دارد. در این روش خواص نانوکامپوزیت در هر مقیاس با مدل مناسب همان مقیاس محاسبه میشود. به این ترتیب میتوان از خواص نانوذرات و ماتریس به خواص نانوکامپوزیت در مقیاس کلان دست یافت [6]. بر این اساس، چقرمگی شکست نانوکامپوزیت را میتوان بصورت جمع چقرمگی شکست ماتریس بدون بار (GIm) و بهبود چقرمگی شکست بر اثر هر مکانیزم آسیب (ΔGi) نوشت [7].

شکریه و زینالدینی [8] اثر جدا شدن نانولولههای کربنی از ماتریس اطراف را بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیتهای اپوکسی/ نانولولههای کربنی بررسى كردند. بهمنظور ارائه يك مدل چند مقياسه، يك المان حجمى نماینده شامل نانولوله کربنی، رزین اطراف آن و فاز میانی انتخاب کردند. آن-ها با استفاده از دادههای تجربی موجود در ادبیات، تأثیر چندین پارامتر مانند کسر وزنی نانولوله کربنی، ضخامت فاز میانی و مدول یانگ را بررسی کردند. درنهایت به این نتیجه رسیدند که ویژگیهای فاز میانی و همچنین کسر وزنی نانولوله کربنی به شدت بر افزایش چقرمگی شکست ناشی از مکانیزم جداسازی و تنش جداسازی در اطراف نانولوله تأثیر می گذارد. کوارسیمین و همکاران [9] یک استراتژی مدلسازی مکانیزم چند مقیاسی برای پیشبینی افزایش چقرمگی به دلیل ظهور پدیدههای جداشدگی، تسلیم پلاستیک و نوارهای برشی پلاستیکی موضعی در رزینهای پر شده با نانوذرات ارائه کردند. این مدل با حجم زیادی از دادههای تجربی جمع آوری شده از ادبیات مقایسه شده است که توافق خوبی را نشان میدهد. شین [10] یک مدل چند مقیاسی برای پیشبینی چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی، پیشنهاد داد. در این مدل اثر مکانیزمهای تخریب مختلف (جداسازی سطحی، تسلیم پلاستیک نانوحفرهها و بیرون کشیدگی نانولولههای کربنی) بررسی شده است. همچنین میزان اثربخشی مکانیزمهای مختلف بایکدیگر مقایسه شد و مشاهده شد که مکانیزمهای تسلیم پلاستیک نانوحفرهها و بیرون کشیدگی نانولوله اثر بیشتری را در این تحقیق داشته است. نتایج پیشبینی شده با دادههای تجربی مطابقت مطلوبی را نشان داده است.

در مقاله حاضر مدلی برای شبیه سازی بهبود چقرمگی شکست به دلیل مکانیزم جدا شدن نانوذرات گرافن^۲ از رزین اطرافش که مهم ترین مکانیزم تخریب در اطراف ترک است، تحت بارگذاری شکست مود اول^۲ پیشنهاد شده است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل چند مقیاسی بر اساس روابط بین میدانهای تنش و جابجایی در مقیاسهای کلان، خرد و نانو ارائه شد. یک المان حجمی نماینده^۴ شامل یک نانوذره گرافنی و یک فاز پلیمری خالص در نظر گرفته شد. چقرمگی شکست نرمالایز شده به عنوان تابعی از برخی پارامترها از جمله کسر وزنی و ابعاد نانوگرافن بیان شد. در نهایت، مقادیر چقرمگی شکست در کار حاضر با کار تجربی سایر محققین مقایسه شد و نتایج قابل قبولی مشاهده شد.

از آنجایی که در این تحقیق، با مقیاس های طولی نانو و ماکرو سروکار داریم لذا لازم است که ارتباطی منطقی بین این فضاها برقرار گردد. بدین منظور از روابط میکرومکانیک بهره گرفته شده است که در سال های اخیر برای نانوذرات نیز بکار گرفته شدهاند [8-11].

مدلهای میکرومکانیکی زیادی برای پیشبینی رفتار کامپوزیتهای دارای الیاف کوتاه ارائه شده است. هرکدام از این روشها دارای مزایا و معایبی هستند. هر مدل باتوجه به محدوده بکارگیری و شرایط حاکم بر مسئله و تحت تأثیر مواد سازنده ترکیب مورد نظر، پاسخهای متفاوتی را ایجاد میکند که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، میتوان صحت یک مدل و برتری آن را مشخص کرد. این مدلها عبارتند از مدل رقیق مبتنی بر ناهمگنی معادل اشبلی، مدل خودسازگار، مدلهای موری-تاناکا، مدلهای کراندار، معادله هالپین- تسای و معادلت توسعه یافته آن [12-14].

3- مشخصات مكانيكي متوسط و تنسور سفتي

در میکرومکانیک، معادلات ساختاری برای الیاف و زمینه بصورت زیر ارائه میشوند [15].

$$\begin{cases} \sigma^{f} = \zeta^{f} \varepsilon^{f} \\ \sigma^{m} = \zeta^{m} \varepsilon^{m} \end{cases}$$
(1)

که \mathcal{C}^f ، \mathcal{C}^f که که که الیاف و زمینه، تنشهای به وجود آمده در الیاف و زمینه و کرنش در الیاف و زمینه است.

هنگامی که یک ماده مرکب تحت بار باشد، میدان تنش نقطهای $\sigma(x)$ و میدان تنش نقطهای $\sigma(x)$ و میدان کرنش متناظر آن $\varepsilon(x)$ در مقیاس میکرو غیریکنواخت خواهند بود. تنش متوسط $\overline{\sigma}$ بعنوان میانگین تنش نقطهای در حجم مفروض V بصورت زیر تعریف میشود:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_{S} \sigma(x) dV \tag{2}$$

از تنسور سفتی، میتوان کرنش متوسط را به تنش متوسط مرتبط کرد، بنابراین خواهیم داشت:

$$\bar{\sigma} = C\bar{\varepsilon} \tag{3}$$

بنابر مفهوم ارائه شده توسط هیل [16] یک نسبت مشخص میان تنش متوسط الیاف و مقدار متناظر متوسط کامپوزیت وجود دارد:

$$\bar{\sigma}^f = H\bar{\sigma} \tag{4}$$

که H تنسور تمرکز تنش مرتبه چهار میباشد و باید آن را باتوجه به حل میدانهای ماکروسکوپیک تنش تعیین کرد [8].

4- مدل اشلبی رقیق

طبق مدل اشلبی رقیق [17] برای کامپوزیتهای رقیق (کسرحجمی خیلی کم برای تقویت کننده) تنش متوسط در مقیاس میکرو برابر است با تنش اعمالی در مقیاس ماکرو:

$$\bar{\sigma} = \sigma^A \tag{5}$$

Carbon nanotube (CNT)1

Graphene nanoparticle (GNP)² First mode (I)³

Representative volume element (RVE)⁴

بطوریکه σ^A تنش اعمالی در بینهایت است.

در پایان، با ترکیب روابط (4) و (5) می توان تنش در اطراف تقویت کننده را بصورت زیر استخراج نمود:

$$\bar{\sigma}_n = H \sigma^A \tag{6}$$

شکل (1) ارتباط بین مقیاسهای طولی مختلف در فضای اطراف پیرامون ترک در نانوکامپوزیتهای تقویتشده با نانوذرات گرافن را نشان میدهد.



Fig. 1 Description of different scales

شکل 1 توصیف مقیاسهای مختلف

5- مکانیزمهای تخریب در نانوکامپوزیتها

یکی از ویژگیهای مهم در ساختارهای نانویی بر پایه پلیمر، بدست آوردن چقرمگی زیاد حتی در بخش کم حجم یعنی نانوذرات پرکننده است. چنین عملکردی با انرژی تلف شده از طریق مکانیزمهای تخریب در مقیاس نانو مرتبط هستند.

مکانیزمهای تخریب به شرح زیر است [19,18]:

جدایش سطح تماس: مهمترین مکانیزم تخریب است که در محدوده بار که اصطلاحاً بار بحرانی گفته میشود نانوذره از ماتریس جدا میشود.

نانوحفرههای پلاستیکی : جدایش در سطح تماس باعث به وجود آمدن نانو حفرههایی با قطر اولیه نانوذرات میشود. که هرچقدر تنش موضعی در سطح نانو حفره زیاد شود، احتمال تسلیم نیز بالا میرود.

اتصال برشی موضعی: در منطقه آسیب دیده نزدیک به نوک ترک میزان تنش اطراف نانوذرات ممکن است با تشکیل باندهای برشی پلاستیکی کمتر یا بیشتر، عملکرد برشی موضعی را افزایش دهد.

در این میان جدایش سطحی نانوذرات میتواند نقش مهمی را بهعنوان یک مکانیزم یا بهعنوان راهانداز برای پدیدههایی مانند رشد خلاء پلاستیک یا تسلیم برشی ماتریس ایفا کند [20]. در کار حاضر مدلی برای تنش هیدرواستاتیک مرتبط به جدایش سطحی ارائه شده است.

6- المان حجمي نماينده

نانوصفحات گرافن هنگامی که در زمینه، جهت تهیه نانو کامپوزیتها پخش می شوند، می توانند در شکلها و اندازههای مختلفی باشند. آنها می توانند تک لایه و یا چند لایه، با طول چند نانومتر تا چندین میکرون باشند. جهت گیری آنها در زمینه می تواند چندین جهته یا تصادفی باشد. تمامی این فاکتورها، شبیه سازی پاسخهای مکانیکی نانو کامپوزیت ها را پیچیده می کند. بنابراین، محققین به دنبال این بوده اند که یک بخش از نانو کامپوزیت را به عنوان سلول های واحد یا المان های حجمی نماینده، برای مطالعه نانو کامپوزیت ها در نظر بگیرند. در روش سلول واحد یک نانو زه با ماتریس اطراف آن مدل می-

شود) البته با اعمال شرایط مرزی، جهت در نظر گرفتن اثرات مواد اطراف آن(این مدل میتواند برای مطالعه اثرات متقابل نانوذره با زمینه، بررسی تنشهای فاز واسطه، یا ارزیابی و برآورد خواص نانوکامپوزیت به کار گرفته شود. به هر حال تا زمانی که نانوذره از نظر طولی کوتاه باشد، بهتر است از المان حجمی سه بعدی برای شبیهسازی نانوکامپوزیتها استفاده شود [22,21].

در تحقیق حاضر، یک المان حجمی مکعب مستطیلی شکل، شامل یک نانو گرافن احاطه شده توسط رزین خالص بهمنظور بررسی افزایش چقرمگی شکست ناشی از مکانیزم جدایش نانوذرات از ماتریس اطرافش درنظر گرفته شده است.

7- افزایش چقرمگی شکست

در این بخش مدلی برای بررسی اثر جدایش نانوذرات گرافن در منطقه فرآیند جداسازی^۱ بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن پیشنهاد شده است.

چقرمگی شکست نانوکامپوزیتها G_{Ic,nc} را میتوان به عنوان مجموع چقرمگی شکست اپوکسی خالص G_{Ic,m} و افزایش چقرمگی شکست ناشی از مکانیزمهای مختلف G_iΔ بیان کرد [23,14,8].

$$G_{Ic,nc} = G_{Ic,m} + \Delta G_i \tag{7}$$

در این تحقیق بهبود چقرمگی شکست از طریق جداسازی نانوذره گرافن از رزین اطراف با درنظر گرفتن توزیع یکنواخت نانوگرافنها در ماتریس و صرفنظر کردن از اثر فاز میانی، تعیین میشود.

به منظور تعیین افزایش چقرمگی شکست ΔG_i ناشی از جدا شدن نانوذرات گرافن از رزین اطراف، طبق [23,22]، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\Delta G_{db} = 2 \int_0^{\rho^{*(\emptyset = \pi/2)}} w_{db} d\rho$$
 (8)

شعاع در $\pi/2 = \emptyset$ است و $w_{
m db}$ چگالی انرژی کرنشی در المان ho^* حجمی ناشی از مکانیزمهای تخریب میباشد که بصورت زیر بدست میآید:

$$w_{db} = \Delta U_{db} \frac{V_f}{\pi t_n^2 l_n} \tag{9}$$

که ΔU_{db} انرژی کرنشی ناشی از پدیده جدایش و tn V_f و l_n به ترتیب کسر حجمی، میانگین ضخامت و میانگین طول نانوذرات هستند.

با توجه به پدیده جداشدگی، تنشهای عرضی باعث جدا شدن نانوذرات از فازهای اطراف میشود. برطبق [8] رابطه بین تنش عرضی و میدان تنش ماکروسکوپی نانوکامپوزیتها را میتوان با استفاده از رابطه (10) بیان کرد:

$$\sigma_{yy} = \frac{\alpha \sigma_{11} + \beta \sigma_{22} + \gamma \sigma_{33}}{3} \tag{10}$$

و σ_{33} و σ_{33} تنشهای اصلی در مقیاس ماکرو هستند و میتوان σ_{11} آنها را در فاصله ho از نوک ترک با زاویه \emptyset محاسبه کرد:

Debonding process zone (DPZ)1

اثر جدایش نانوذ*ر*ات گرافن بر چقرمگی شکست مود I نانو کامپوزیتهای پلیمری

$$\Delta G_{db} = \lambda V_f \Delta U_{db} G_{Ic,nc} \tag{20}$$

بطوريكه

$$\lambda = \frac{8H^2 E_{nc}}{9\pi^2 \sigma_{cr}^2 t_n^2 l_n} \frac{f}{1 - v_{nc}^2}$$
(21)

8- انرژی کرنشی ناشی از جدایش

در این بخش، انرژی کرنش ناشی از جدا شدن یک نانوذره از فاز میانی اطراف (u) تخمین زده می شود. با توجه به [24,8]، این مقدار از رابطه (22) مشخص می شود:

$$\Delta U_{db} = \frac{1}{2} P(u_2 - u_1) \tag{22}$$

 u_1 و u_2 به ترتیب به عنوان جابجایی سطح بیرونی فاز ماتریس خالص در امتداد جهت عرضی y بعد و قبل از جداسازی نانوذره تعریف میشوند. علاوه بر این، P نیروی اعمال شده بر روی سطح خارجی فاز ماتریس خالص است و از طریق رابطه (23) بدست میآید:

$$P = L_g w_{nc} \bar{\sigma}_{yy} \tag{23}$$

بنابراین، میدان جابجایی المان حجمی در دو شرایط مختلف، قبل از جداسازی و پس از جداسازی باید تجزیه و تحلیل شوند.

9- تحلیل میدان جابجایی قبل از جداسازی نانوذره گرافن

در این بخش، مدل جدیدی برای بررسی اثر جداسازی نانوذرات گرافن از رزین اطراف پیشنهاد شده است. جابجایی در یک سیستم مختصات دکارتی (قبل از فرآیند جداسازی برای (n) نانوگرافن و (m)ماتریس) را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$u_n^b = \frac{1}{E_n} \left[\sigma_{y,n}^b - v_n (\sigma_{x,n}^b + \sigma_{z,n}^b) \right] y_n^b + A^b$$
(24)

$$u_{m}^{b} = \frac{1}{E_{m}} \left[\sigma_{y,m}^{b} - \nu_{m} (\sigma_{x,m}^{b} + \sigma_{z,m}^{b}) \right] y_{m}^{b} + B^{b}$$
(25)

که $^{b}A^{b}e^{b}B^{b}e^{c}$ و $^{b}B^{b}e^{c}$ میافتد که تنش در اطراف نانو گرافن به یک مقدار بحرانی σ_{cr} برسد که در شکل (2) مشاهده میشود. این شکل به طور شماتیک فشار اعمال شده بر نانو گرافن و اجزای اطراف آن را قبل و بعد از جداسازی نشان میدهد. بنابراین شرایط مرزی و پیوستگی جابجاییها را در شروع جداسازی نانو گرافن میتوان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_{y,n}^{b}\big|_{y_{1}} = \sigma_{cr}, \sigma_{y,m}^{b}\big|_{y_{1}} = \sigma_{cr}, \sigma_{y,m}^{b}\big|_{y_{2}} = \sigma_{h}$$

$$(26)$$

$$u_{n}^{b}\big|_{y_{0}} = 0, u_{n}^{b}\big|_{y_{1}} = u_{m}^{b}\big|_{y_{1}}$$
(27)

بطوريكه

$$y_1 = \frac{t_g}{2}, \ y_2 = \frac{t_g}{2} + t_m$$
 (28)

درحالی که tg و tm به ترتیب ضخامت نانوگرافن و ضخامت ماتریس در راستای جداسازی هستند.

$$\begin{cases} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{cases} = \begin{cases} \binom{K_{l,nc}}{\sqrt{2\pi\rho}} \cos\left(\frac{\emptyset}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right] \\ \binom{K_{l,nc}}{\sqrt{2\pi\rho}} \cos\left(\frac{\emptyset}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right] \\ \nu_{nc}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \end{cases}$$
(11)

که v_{nc} و ρ به ترتیب نسبت پوآسون نانوکامپوزیت و فاصله شعاعی از نوک ترک می باشند. با جایگذاری معادله (11) در معادله (10) رابطه بین تنش عرضی در مقیاس ماکرو برحسب فاکتور شدت تنش و پارامترهای دیگر بدست می آید.

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{I,nc}}{3\sqrt{2\pi\rho}} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \left\{ \alpha \left[1 + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\right] + \beta \left[1 - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\right] + 2\gamma \nu_{nc} \right\}$$
(12)

بنابراین تنش عرضی در اطراف نانوذره را میتوان بصورت زیر تعیین کرد: $\sigma_{yy} = H \bar{\sigma}_{yy}$ (13)

تنش عرضی متوسط در منطقه $\overline{\sigma}_{yy}$ تنش عرضی متوسط در منطقه H تنسور تمرکز تنش است و $\overline{\sigma}_{yy}$ درانتیجه بااستفاده از معادله (12) خواهیم داشت:

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{\rho^*} \int_0^{\rho^*} \sigma_{yy} \, d\rho = 2\sigma_{yy}(\rho^*) \tag{14}$$

با جایگذاری معادله (12) و (14) در معادله (13)، مؤلفه تنش عرضی را در همسایگی نانوذره از طریق زیر بدست آورد:

$$\sigma_{yy,n} = \frac{2HK_{I,nc}}{3\sqrt{2\pi\rho}} \cos\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \left\{ \alpha \left[1 + \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right] + \beta \left[1 - \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\right] + 2\gamma \nu_{nc} \right\}$$
(15)

$$\rho = \frac{4HK^2_{l,nc}}{9\pi\sigma_{yy}^2}\cos^2\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\left\{\alpha\left[1+\sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right]+\beta\left[1-\sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right]+2\gamma\nu_{nc}\right\}^2$$
(16)

در شروع ترک، شعاع المان نوک ترک را میتوان بصورت زیر بیان کرد [9]:

$$\rho^* = \frac{4H\kappa^2_{l,nc}}{9\pi\sigma_{cr}^2}\cos^2\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\left\{\alpha\left[1+\sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right]+\beta\left[1-\sin\left(\frac{\emptyset}{2}\right)\right]+2\gamma\nu_{nc}\right\}^2$$
(17)

تنش بحرانی در مقیاس نانو است که عامل جداشدن نانوذرات از رزین اطراف است. سپس خواهیم داشت:

$$G_{Ic,nc} = \frac{K_{Ic,nc}^2 (1 - \nu_{nc}^2)}{E_{nc}}$$
(18)

با معادلات (16) و (18)، افزایش چقرمگی شکست ناشی از مکانیزمهای تخریب برابر است با:

$$\Delta G_i = \frac{8H^2 E_{nc}}{9\pi^2 \sigma_{cr}^2 t_n^2 l_n} \frac{f}{1 - v_{nc}^2} V_f \Delta U_i G_{lc,nc}$$
(19)

که در این رابطه f فاکتور محاسبه شده بر طبق [14,8] است. E_{nc} مدول یانگ نانوکامپوزیت است.

همانطور که از معادلات بالا مشخص است، بهبود چقرمگی شکست ناشی از جداسازی نانوذرات گرافن را میتوان به صورت زیر بازنویسی کرد:

با اعمال شرایط مرزی و نیز جابجاییها، میتوان تمام ضرایب مجهول را تعیین کرد. همچنین ^BB را میتوان به عنوان تابعی از تنش بحرانی و نیز خواص نانوگرافن و رزین خالص نوشت.

$$A^{b}=0$$
 (29)

$$B^{b} = f_{b}(E_{n}, E_{m}, \nu_{n}, \nu_{m}, y_{n}). \sigma_{cr}$$
(30)

درنتیجه جابجایی سطح بیرونی RVE بااستفاده از رابطه زیر مشخص می شود:

$$u_m^b|_{y_2} = \frac{\sigma_h}{E_m} (1 - 2v_m) \left(\frac{t_g}{2} + \frac{t_m}{2}\right) + \frac{\sigma_{cr} t_g}{2} \left[\frac{1}{E_n} (1 - 2v_n) - \frac{1}{E_m} (1 - 2v_m)\right]$$
(31)

10- تحلیل میدان جابجایی پس از جداسازی نانوذره گرافن

پس از جداسازی نانوگرافن، معادله حاکم برای جابجایی در سیستم مختصات دکارتی بصورت زیر بیان میشود:

$$u_n^a = \frac{1}{E_n} \left[\sigma_{y,n}^a - v_n (\sigma_{x,n}^a + \sigma_{z,n}^a) \right] y_n^a + A^a$$
(32)

$$u_{m}^{a} = \frac{1}{E_{m}} \left[\sigma_{y,m}^{a} - v_{m} (\sigma_{x,m}^{a} + \sigma_{z,m}^{a}) \right] y_{m}^{a} + B^{a}$$
(33)

که ${}^{d}A$ و ${}^{d}B$ ضرایب ثابت قبل از جدایش هستند. در این حالت تنش اعمال شده بین ماتریس و نانوگرافن برابر با صفر خواهد شد. در حالی که تنش در سطح خارجی ماتریس برابر σ_h میباشد. بنابراین شرایط تعادل و سازگاری را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\sigma_{y,n}^{a}\big|_{y_{1}} = 0, \sigma_{y,m}^{a}\big|_{y_{1}} = 0, \sigma_{y,m}^{a}\big|_{y_{2}} = \bar{\sigma}_{yy}$$
(34)

$$u_n^a|_{y_0} = 0, u_m^a|_{y_1} = \alpha \, u_m^b|_{y_1}$$
(35)

ضرایب مجهول را میتوان با بکارگیری شرایط مرزی و جابجایی در معادلات (32)و (33) بدست آورد.

$$4 = 0 \tag{36}$$

$$B^{a} = f_{a}(E_{n}, E_{m}, \nu_{n}, \nu_{m}, y_{n}). \sigma_{cr}$$

$$(37)$$

بنابراین جابجایی سطح بیرونی المان حجمی پس از جدایش با استفاده از رابطه زیر تعیین میگردد:

$$u_{m}^{a}|_{y_{2}} = \frac{1}{E_{m}} [\sigma_{h}(1-2v_{m})] \left(\frac{L_{g}}{2} + \frac{L_{m}}{2}\right) + \frac{\sigma_{cr}L_{g}}{2} \left[\frac{\alpha}{E_{m}}(1-2v_{m}) + \frac{1}{E_{n}}(1-2v_{n}) - \frac{1}{E_{m}}(1-2v_{m})\right]$$
(38)



شکل 2 تنش اعمالی بر ماتریس و نانوذره الف) قبل از جدایش ب) بعد از جدایش

11- تانسور تمركز تنش H

تنسور تمركز تنش برطبق [8] برابر است با:

$$H = \frac{\sigma_{cr}}{\overline{\sigma}_{yy}} \tag{39}$$

از طرفی تنش متوسط راستای جدایش را میتوان بصورت زیر بدست آورد:

$$\bar{\sigma}_{yy} = E_{nc} \frac{u^a - u^b}{y_2} = E_{nc} \frac{B^a - B^b}{y_2}$$
(40)

با در نظر گرفتن معادلات (39) و (40)، تانسور تمرکز تنش را میتوان به عنوان تابعی از خواص مکانیکی و ضخامتهای نانوذره و ماتریس بازنویسی کرد:

$$H = \frac{\sigma_{cr}}{E_{nc} \frac{B^{a} - B^{b}}{y_{2}}} = \frac{1}{E_{nc} (\frac{fa^{-}f_{b}}{y_{2}})}$$
(41)

که با توجه به روابط (30) و (37) میتوان مقدار H را تعیین نمود.

σ_{cr} تنش بحرانی در مقیاس نانو –12

در این بخش، تنش بحرانی در مقیاس نانو تعیین می گردد. انرژی کرنشی ناشی از پدیده جدایش ΔU_{ab} منجر به ایجاد یک سطح جدید به مساحت $2L_g(t_g + L_g)$ می گردد. بنابراین انرژی شکست بر واحد سطح با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\gamma_i = \frac{\Delta U_{bd}}{2L_g(t_g + L_g)} \tag{42}$$

با جایگذاری معادلات (29)، (30) ، (36) و (37) در معادله (42) بدست میآید:

$$\gamma_i = \frac{\overline{\sigma_{yy}\sigma_{cr}}}{2} (f_a - f_b) \tag{43}$$

با جایگذاری ثوابت در معادله فوق و باتوجه به رابطه (40)، تنش بحرانی در مقیاس نانو بصورت زیر بدست میآید:

$$\sigma_{cr} = 2 \sqrt{\frac{\gamma_i H(\frac{t_g}{2} + \frac{t_m}{2})}{(f_a - f_b)(t_g + 2t_m)}}$$
(44)

در رابطه فوق مقدار انرژی شکست مجهول است. مقدار این پارامتر مطابق با رابطه ارائه شده توسط جیانگ و همکاران [26] قابل محاسبه است.

$$\gamma_i = \frac{4\pi}{9} \sqrt{\frac{5}{2}} \rho_p \rho_g \varepsilon \sigma^3 \tag{45}$$

که ρ_p چگالی جرمی پلیمر و ρ_g چگالی سطحی نانوذره است. همچنین، σ_p و σ پارامترهای لنارد جونز هستند که برای نانوکامپوزیتهای اپوکسی σ و 0.33997 nm تقویتشده با نانوذرات گرافن برابر 0.06831 kcal/mol و 2.3997 nm هستند [27].

13- كسرحجمي نانوذرات گرافن در نانوكامپوزيت

کسر حجمی نانوذرات در نانوکامپوزیتها با استفاده از رابطه زیر محاسبه میشود [28]:

$$V_{fn} = \frac{W_{fn}}{W_{fn} + \left(\frac{\rho_n}{\rho_m}\right) - \left(\frac{\rho_n}{\rho_m}\right) W_{fn}}$$
(46)

که \mathcal{P}_{fn} کسر وزنی نانوذرات در نانوکامپوزیت است، همچنین ho_n و چگالی نانوذره و رزین هستند. ho_m

14- مطالعات موردی، نتایج و بحث

در این بخش، بااستفاده از اطلاعات و دادههای موجود در ادبیات [30,29] اثرات پارامترهای متغیر از جمله مدول یانگ نانوکامپوزیت، کسرهای وزنی و ضخامتهای نانوذره گرافن، بر بهبود چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن بررسی شده است. در پایان نتایج بدست آمده با نتایج تجربی محققین مقایسه گردید. لازم بذکر است که جهت انجام محاسبات از نرمافزار میپل استفاده شده است. مراجع و دادههای مربوطه مورد استفاده در کار حاضر بطور خلاصه در جدول (1) جمع آوری شده است. همچنین مدول یانگ نانوگرافن 1TPa و چگالی آن 1.9 g/cm³ درنظر گرفته شده است.

15- تأثیر پارامترهای مختلف بر بهبود چقرمگی شکست

در این قسمت اثر ابعاد نانوذرات بر بهبود چقرمگی شکست نرمالایز شده، ناشی از مکانیزم جدایش نانوذرات از رزین اطراف به عنوان تابعی از درصد وزنی بررسی شده است.

در نمودار شکل (3) و (4) اثر طول نانوذرات بر چقرمگی شکست نرمالایز شده، نشان داده شده است.



Fig. 3 Normalized fracture toughness of epoxy/graphene nanocomposite according to different weight percentages of nanographene, considering different lengths of graphene nanoparticles based on reference data [29]

شکل 3 چقرمگی شکست نرمالایز شده نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن برحسب درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن، با درنظر گرفتن طول های مختلف نانوذرات گرافن بر اساس دادههای مرجع [29]

جدول 1 خلاصه ایی از خواص تجربی استفاده شده در کار حاضر



Fig. 4 Normalized fracture toughness of epoxy/graphene nanocomposite according to different weight percentages of nanographene, considering different lengths of graphene nanoparticles based on reference data [30]

شکل 4 چقرمگی شکست نرمالایز شده نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن برحسب درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن، با درنظر گرفتن طولهای مختلف نانوذرات گرافن بر اساس دادههای مرجع [30]

همانطور که در شکل (3) مشاهده می شود، افزایش طول نانوذرات با فرض ثابت بودن ضخامت و عرض آن، باعث کاهش در بهبود چقرمگی $L_g=2\mu m$ شکست نرمال شده نانوکامپوزیت شده است. بطوریکه به ازای بیشترین میزان اثربخشی و به ازای $L_g{=}10\mu m$ کمترین اثربخشی در چقرمگی شکست ایجاد شده است.

در ضمن نتایج شکل (3) بر اساس دادههای ورودی مرجع [29] می باشد. همچنین در شکل (4) نیز مشخص است که هرچه اندازه طول نانوذرات گرافن کوچکتر باشد، بهبود در چقرمگی شکست نرمالایز شده بیشتر است. این نمودار بر اساس دادههای مرجع [30] رسم شده است.

با مقایسه دو نمودار بالا مشاهده می شود که نمودار (3) که بر اساس دادههای مرجع [29] بوده است (Enc بیشتری داشته) نسبت به نمودار (4) که بر اساس دادههای مرجع [30] است E_{nc} کمتری داشته)، دارای بهبود در چقرمگی شکست بیشتری است. درنتیجه هرچه مقدار Enc بیشتر باشد، چقرمگی شکست افزایش مییابد.

در نمودار شکل (5) و (6) اثر عرض نانوذرات گرافن بر چقرمگی شکست نرمالایز شده نشان داده شده است.

محع	استحكام تسليم	استحكام نهايى	چگالی ماتریس	سفتى نانوكامپوزيت	طول نانوگرافن	ضخامت نانوگرافن	لسر وزنى
<i>C</i> . <i>J</i> .	(MPa)	(MPa)	(g/cm ³)	(GPa)	(µm)	(nm)	%wt
[29]	31.56	40	1.1	1.99	0.5-20	1-10	0
[29]	35.82	44	1.1	2.33	0.5-20	1-10	0.3
[29]	37.04	48	1.1	2.49	0.5-20	1-10	0.5
[29]	38.86	49	1.1	2.69	0.5-20	1-10	0.8
[29]	40.13	51	1.1	3.83	0.5-20	1-10	1
[30]	21.50	71	1.2	2.49	5-10	6-8	0
[30]	22.00	72	1.2	2.55	5-10	6-8	0.1
[30]	24.00	72	1.2	2.63	5-10	6-8	0.25
[30]	23.50	73	1.2	2.59	5-10	6-8	0.5
[30]	23.70	74	1.2	2.58	5-10	6-8	0.75
[30]	22.50	72	1.2	2.59	5-10	6-8	1



Fig. 5 Normalized fracture toughness of epoxy/graphene nanocomposite according to different weight percentages of nanographene, considering different widths of graphene nanoparticles based on reference data [29].

شکل 5 چقرمگی شکست نرمالایز شده نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن برحسب درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن، بادرنظر گرفتن عرضهای مختلف نانوذرات گرافن بر اساس دادههای مرجع [29].



Fig. 6 Normalized fracture toughness of epoxy/graphene nanocomposite according to different weight percentages of nanographene, considering different widths of graphene nanoparticles based on reference data [30].

شکل 6 چقرمگی شکست نرمالایز شده نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن برحسب درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن، بادرنظر گرفتن عرضهای مختلف نانوذرات گرافن بر اساس دادههای مرجع [30].

در هر دو نمودار (5) و (6) که به ترتیب بر اساس دادههای مرجع [29] و [30] میباشند، مشاهده میشود که با افزایش عرض نانوذرات میزان بهبود در چقرمگی شکست کاهش یافته است.

16- مقایسه نتایج مدل حاضر با دادههای تجربی

اثر مکانیزم جداسازی نانوذرات گرافن بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت، با استفاده از یکسری دادههای تجربی موجود در ادبیات ارزیابی شد.

در نمودار (7) به ازای α های مختلف مقادیر چقرمگی شکست بر اساس دادههای مرجع [30] بیان شده است. همانطور که مشاهده میشود مقدار α تأثیر بسیار ناچیزی بر نتایج محاسبات دارد. در نتیجه در روند حل معادلات، α در معادله (38) برابر 1 در نظرگرفته شده است.

خواص مورد استفاده در کار حاضر در جدول (1) خلاصه شده است. چقرمگی شکست بدست آمده توسط مطالعات تجربی سایرین [30,29] و مدل حاضر در جدول (2) ذکر و با یکدیگر مقایسه گردید. همانطور که مشخص است در کار حاضر و مرجع [29] با افزایش درصد وزنی نانوگرافن مقادیر چقرمگی شکست نیز افزایش یافته است، ولی در چقرمگی شکست-هایی که بر اساس دادههای مرجع [30] بدست آمده است، در ابتدا با افزایش درصد وزنی چقرمگی افزایش یافته و در ادامه روند کاهشی داشته است. علت

این امر، وابستگی معادلات ارائه شده در کار حاضر به مدول یانگ نانوکامپوزیت است، که در کارهای تجربی نیز این وابستگی به مدول یانگ وجود دارد. به همین دلیل، در کار تجربی مرجع [30] روند کاهشی از درصد وزنی 0.5 به بعد که مدول یانگ کاهش یافته است، مشاهده میشود.

همچنین بین نتایج تئوری کار حاضر و نتایج تجربی مراجع [30,29] خطاها و اختلافاتی وجود دارد که میتوان یکی از علتهای آن را اثر کلوخه شدن نانوذرات در حالت تجربی بیان کرد.



شکل 7 چقرمگی شکست به ازای αهای مختلف

17- مقايسه نتايج مدل حاضر با دادههاي تئوري

در این قسمت به مقایسه مطالعه تئوری شکریه و زینالدینی [8] با کار حاضر پرداخته شده است. شکریه و زینالدینی [8] به کمک معادلات حاکم بر تنش شعاعی و جابجایی در سیستم مختصات استوانهای، مدلی چند مقیاسه، ارائه کردند که اثر افزودن نانولوله کربنی را بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/نانولوله کربنی پیشبینی میکند.

نتایج این مقایسه در جدول (3) برای پرکنندههای نانولوله کربنی دوجداره ^۱و چند جداره ^۲ بر اساس مرجع [8] و نانوگرافن در کار حاضر، مشاهده میشود. در ضمن چقرمگیهای شکست کار حاضر بر اساس اطلاعات و دادههای مرجع [30] بدست آمدهاند.

همانطور که در جدول (3) مشاهده می شود چقرمگی شکت نانولوله های چند جداره نسبت به نانوذرات گرافن چندین برابر بیشتر بوده و چقرمگی شکست نانوذرات گرافن در مقایسه با نانولوله های دوجداره مقادیر بزرگتری داشته است. از دلایل وجود اختلافات بین نتایج تئوری کار حاضر و مرجع [8] می توان به نوع ذرات پرکننده و نوع المان حجمی متفاوت اشاره کرد. بنابراین چقرمگی شکست به نوع ذرات پرکننده بسیار وابسته است.

می توان نشان داد که نوع نانوذره تأثیر بسزایی بر افزایش چقرمگی شکست نانوکامپوزیت دارد. از طرفی همانطور که مشاهده می شود در مرجع [8] مانند کار حاضر افزودن یک مقدار مشخصی پرکننده باعث بهبود در خواص شکست گردیده است.

Double-walled carbon nanotube (DWCNT)¹ Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)²

الهام مرادی و همکاران

جدول 2 مقایسه چقرمگی شکست بهدستآمده توسط آزمایشها [29،30] و مدل چند مقیاسی حاضر Table 2 Comparison between the fracture toughness obtained by experiments [29, 30] and the present multi-scale model

مرجع	خطا (%)	چقرمگی شکست نانوکامپوزیت (مدل حاضر) (J/m ²)	چقرمگی شکست نانوکامپوزیت (تجربی) (J/m ²)	کسر وزنی wt%
[29]	0.0	217.0	217	0
[29]	3.5	225.4	233	0.3
[29]	11.3	226.0	251	0.5
[29]	14.7	226.9	266	0.8
[29]	20.4	227.5	285	1
[30]	0.0	162.0	162	0
[30]	21.7	167.5	214	0.1
[30]	31.5	167.7	245	0.25
[30]	26.4	167.6	228	0.5
[30]	18.0	167.6	205	0.75
[30]	8.0	167.7	184	1

جدول 3 مقایسه چقرمگی شکست بهدست آمده توسط آزمایش ها [29،30] و مدل چند مقیاسی حاضر

Table 3 Comparison between the fracture toughness obtained by experiments [29, 30] and the present multi-scale mode

چقرمگی شکست نانوکامپوزیت (مدل حاضر) (J/m²)	چقرمگی شکست نانوکامپوزیت [8] (J/m²)	کسر وزنی wt٪	نوع پرکننده
	743.2	0.1	MWCNT
	746.9	0.5	MWCNT
	752.0	1	MWCNT
	145.1	0.1	DWCNT
	145.6	0.3	DWCNT
	146.1	0.5	DWCNT
		0.1	GNP
		0.5	GNP
167.5		1	GNP
167.6			
167.7			

18- نتيجەگىرى

نانوذرات گرافن را بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن نشان

19- مراجع

دهد.

- Aleni, H.M., Liaghat, G.H., Pol, M.H. and Afrouzian, A., "An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy fiber-reinforced laminates," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, 2015.
- [2] Alasvand Zarasvand, k., "Mechanical Property Determination of Graphene and Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Epoxy Nanocomposites," MSc Thesis, Shahrekord University, Iran, 2016.
- [3] Abbandanak, S., Siadati, M.H. and Eslami-farsani, R., "Effects of functionalized graphene nanoplatelets on the flexural behaviors of basalt fibers/epoxy composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 315-324, 2018.
- [4] Stankovich, S., Dikin, D.A., Dommett, G.H., Kohlhaas, K.M., Zimney, E.J., Stach, E.A., Piner, R.D., Nguyen, S.T. and Ruoff, R.S., "Graphene-Based Composite Materials," Nature, Vol. 442, No. 7100, pp. 282-286, 2006.
- [5] Moshrefzadeh-Sani, H. and Mohammadkhani, H., "A multi-scale cubic model to calculate the elastic modules of the graphene/polymer nano composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 740-746, 2020.
- [6] Babazade, A., Hadad, M. and Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.
- [7] Zappalorto, M., Salviato, M. and Quaresimin, M., "A multiscale model to describe nanocomposite fracture toughness enhancement by the plastic yielding of nanovoids," Composites Science and Technology, Vol. 72, No. 14, pp.1683-1691, 2012.
- [8] Shokrieh, M. M. and Zeinedini, A., "Effect of CNTs debonding on mode I fracture toughness of polymeric nanocomposites," Materials & Design, Vol. 101, pp. 56-65, 2016.

در مطالعه حاضر یک مدل چندمقیاسی برای تخمین اثر جداشدگی نانوذرات گرافن از رزین اطراف آن بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت اپوکسی/گرافن ارائه شده است. این مدل بر اساس همبستگی بین میدانهای تنش و جامعایی در مقیاس ماکرو، میکرو و نانو ایجاد شده است. یک المان حجمی نماینده بهمنظور یافتن میدان جابجایی در اطراف نانوذره گرافن در نظر گرفته شده است. در نهایت، اثر حضور نانوذرات بر افزایش چقرمگی شکست در اثر مکانیزم تخریب جدایش، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا اثر پارامترهای مختلفی مانند ابعاد نانوذرات گرافن و مدول یانگ نانوکامپوزیت بررسی شده است.

برخی از نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

1- افزایش چقرمگی شکست وابستگی قابل توجهی به درصد وزنی نانوذرات گرافن بکاررفته در نانوکامپوزیت دارد.

2- هرچه ابعاد نانوذرات بکار رفته از دیدگاه تئوری کوچکتر باشد اثر مطلوب تری در افزایش چقرمگی شکست خواهد داشت. اما از دیدگاه تجربی محدودیت ساخت نانوذرات با ابعاد کوچکتر وجود دارد.

5- در این تحقیق مکانیزم جدایش سطحی که از انواع مکانیزمهای اطراف نوک ترک است، مورد بررسی قرار گرفته. بدیهی است که اگر مکانیزم-های پیش روی ترک همچون بیرون کشیدگی را در نظر بگیریم نانوذرات با ابعاد بزرگتر مقدار چقرمگی شکست بیشتری را نتیجه میدهند. اما برای مکانیزمهای اطراف ترک نانوذرات کوچکتر نتایج بهتری را خواهند داشت.

4- افزایش چقرمگی شکست به مدول یانگ نانوکامپوزیت وابسته است بطوریکه با افزایش مدول یانگ نانوکامپوزیت چقرمگی شکست نیز افزایش خواهد یافت.

5- با مقایسه نتایج بدست آمده با کارهای تجربی محققین، مشخص شد که مدل پیشنهادی می تواند بطور رضایت بخشی اثر مکانیزم جداسازی characterization," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 36, No. 5, p. 573, 2003.

- [29] Her, S.C. and Zhang, K.C., "Mode I Fracture Toughness of Graphene Reinforced Nanocomposite Film on Al Substrate," Nanomaterials, Vol. 11, No. 7, pp, 1743, 2021.
- [30] Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Liaghat, G., Vahid, S., Spacie, C., Paton, K.R. and Sainsbury, T., "Improving the fracture toughness properties of epoxy using graphene nanoplatelets at low filler content," Nanocomposites, Vol. 3, No. 3, pp. 85-96, 2017.
- [9] Quaresimin, M., Salviato, M. and Zappalorto, M., "A multi-scale and multi-mechanism approach for the fracture toughness assessment of polymer nanocomposites," Composites Science and Technology, Vol. 91, pp. 16-21, 2014.
- [10] Shin, H., "Multiscale model to predict fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites," Composite Structures, Vol. 272, pp. 114236, 2021.
- [11] Karimi, M., Ghajar, R. and Montazeri, A., "Investigation of nanotubes length and their agglomeration effects on the elastoplastic behavior of polymer-based nanocomposites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 2, pp. 229-240, 2017.
- [12] Nielsen, Lawrence E. "Generalized equation for the elastic moduli of composite materials." Journal of Applied Physics 41, no. 11, pp.4626-4627, 1970.
- [13] Lewis, T.B. and Nielsen, L.E., "Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites," Journal of applied polymer science, Vol. 14, No. 6, pp. 1449-1471, 1970.
- [14] Zeinedini, A., "Effect of carbon nanotubes on strain energy release rate of mixed mode I/II delamination initiation in laminated composites," PhD Thesis, Science and Technology Department, Iran, 2017.
- [15] Mori, T. and Tanaka, K., "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions," Acta metallurgica, Vol. 21, No. 5, pp. 571-574, 1973.
- [16] Hill, R., "Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 11, No. 5, pp. 357-372, 1963.
- [17] Eshelby, J., "Elastic inclusions and inhomogeneties," Progr. Solid Mech, Vol. 2, p. 89-140, 1961.
- [18] Eskandariyun, A., "Estimating Mechanical Properties of Graphene/Polymer Nanocomposites using Multiscale Modeling," MSc Thesis, University of Tehran, Iran, 2018.
- [19] Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J., Sohn Lee, J., Taylor, A.C., Agarwal, R., Schueneman, G. and Sprenger, S., "The fracture and fatigue behaviour of nano-modified epoxy polymers," Journal of Materials Science, Vol. 42, pp. 7049-7051, 2007.
- [20] Hsieh, T.H., Kinloch, A.J., Masania, K., Sohn Lee, J., Taylor, A.C. and Sprenger, S., "The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles," Journal of materials science, Vol. 45, pp. 1193-1210, 2010.
- [21] Kolahi Toutakhaneh, H., "Fracture toughness and Fatigue properties of silica/epoxy nanocomposite using multi-scale method," MSc Thesis, Urmia University, Iran, 2019.
- [22] Liu, Y.J. and Chen, X.L., "Evaluations of the effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element," Mechanics of Materials, Vol. 35, No. 1–2, pp. 69-81, 2003.
- [23] Freund, L.B. and Hutchinson, J.W., "High strain-rate crack growth in rate-dependent plastic solids," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 33, No. 2, pp. 169-191, 1985.
- [24] Zappalorto, M., Salviato, M. and Quaresimin, M., "Influence of the interphase zone on the nanoparticle debonding stress," Composites Science and Technology, Vol. 72, No. 1, pp. 49-55, 2011.
- [25] Williams, J.G., "Particle toughening of polymers by plastic void growth," Composites science and technology, Vol. 70, No. 6, pp. 885-891, 2010.
- [26] Jiang, L.Y., Huang, Y., Jiang, H., Ravichandran, G., Gao, H., Hwang, K.C. and Liu, B., "A cohesive law for carbon nanotube/polymer interfaces based on the van der Waals force," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 54, No. 11, pp. 2436-2452, 2006.
- [27] Jiao, S. and Xu, Z., "Non-continuum intercalated water diffusion explains fast permeation through graphene oxide membranes," ACS nano, Vol. 11, No. 11, pp. 11152-11161, 2017.
- [28] Thostenson, E.T. and Chou, T.W., "On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and



نشريه علمى پژوهشى

علوم و فناوری **کامپوزیت** http://jstc.iust.ac.ir



بررسی اثرات سرعت برشی و پارامترهای خنک کاری برودتی بر زبری سطح در ماشینکاری کامپوزیت پایه فلزی SiC&A356-10%

 4 قاسم نجفی 1 ، سید علی نیکنام 2* ، بهنام داودی 8 ، ویکتور سانگمن

۱- دانشجوی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 2- استادیار ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 3- دانشیار ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، اکول تکنولوژی مونترال، کانادا
 * تهران، صندوق پستی 13141418، 131141684

چکیدہ	اطلاعات مقاله:
کامپوزیتهای پایه فلزی با توجه به نقاط قوتشان نسبت به نقاط ضعفشان امروزه بسیار مورد توجه هستند و در زمینههای صنعتی، ازجمله	دريافت: 1402/05/11
صنایع خودروسازی، هوافضا و انرژی مورد استفاده قرار میگیرند. از جمله کامپوزیتها میتوان کامپوزیتهای پایه آلومینیومی را نام برد. از	پذيرش: 1402/07/19
جمله مزایای این کامپوزیتها میتوان به مواردی همچون سختی و استحکام بالا و وزن سبک اشاره نمود. همچنین از عمده معایب این	
دسته از مواد پایین بودن قابلیت ماشین کاری، علیالخصوص سایش زیاد و سریع در ابزارهای برشی و مشکلات مربوط به کیفیت سطح	كليدواژگان
میباشد. تحقیقات محدودی در مورد تأثیر روش های خنک کاری مختلف، بخصوص خنک کاری برودتی بر زبری سطح صورت گرفته است.	کامپوزیت پایه فلزی،
لذا در این مطالعه اثر پارامترهای برشی و خنک کاری برودتی بر زبری سطح قطعه کار در ماشینکاری SiC A356-10% مورد بررسی	الومينيوم،
قرارگرفته است. بر اساس تحلیلهای صورت گرفته مشاهده شد که اثر پارامترهای برودتی و سرعت برشی بر شاخص زبری سطح (Ra)	زبری سطح،
مطلوب نبود و نتایج آماری با R ² در حدود 65 مبین عدم وجود رابطه قوی آماری بین پارامترهای مطالعه شده و زبری سطح Ra است. با	حنک کاری برودتی، افسیکا
این وجود، در بین پارامترهای برشی و خنک کاری مطالعه شده، فشار برودتی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح Ra داشت.	ماسین کاری،

Study the effects of cutting speed and Cryogenic lubrication parameters on the surface roughness when milling A356-10%SiC

Ghasem Najafy¹, Seyed Ali Niknam^{1*}, Behnam Davoodi¹, Victor Songmene²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Ecole de Technologie Superierue, Montreal, Canada

* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, saniknam@iust.ac.ir

Keywords	Abstract
Metal matrix composite, Aluminium alloys, Machining, Cryogenic cooling, Surface roughness	Nowadays, much attention has been paid to metal matrix composites due to their unique features and extensive applications in numerous manufacturing sectors such as automotive, aerospace and energy. Aluminium metal matrix composites (Al-MMCs) are among the most highly used MMCs. The unique features of Al-MMCs are high hardness and high resistance-to-weight ratio. Moreover, the main drawbacks are the low machinability, high and rapid tool wear, and complications in the surface quality in machining operations. Limited studies reported the use of cooling methods, such as cryogenic strategies, on the surface quality when machining Al-MMCs. Therefore, the effects of cutting parameters and cryogenic cooling method on the surface quality of A356-10%SiC have been studied in this work. According to the conducted analysis, it was observed that cryogenic cooling parameters and cutting speed had negligible statistical effects on the average surface roughness (Ra) of the tested material with R ² of 65%, which resembles a weak relationship between studied parameters and Ra. Nevertheless, the cryogenic pressure had the most significant effects on the variation of Ra amongst cutting and lubrication parameters.

تقسیم میشوند. برای اولین بار در سال 1940 میلادی از الیاف شیشه جهت تقویت پلاستیکهای مصرفی در ساخت پوشش پلاستیکی آنتن رادار هواپیما استفاده شد. در ادامه، اولین کامپوزیت فایبرگلاس پلاستیک در سال 1942 ساخته شد و طی جنگ جهانی در هواپیماسازی استفاده بیشتری یافتند. از

کامپوزیت از ترکیب ماکروسکوپی (اختلاط فیزیکی) دو یا چند ماده متمایز که فصل مشترک مشخصی بین آنها وجود دارد حاصل می شود. انواع کامپوزیت بر اساس زمینه به کامپوزیت زمینه سرامیکی، زمینه پلیمری و زمینه فلزی

1- مقدمه

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Najafy, G., Niknam, S. A., Davoodi, B., Songmene, V., "Study the effects of cutting speed and Cryogenic lubrication parameters on the surface roughness when milling A356-10%SiC," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2242-2246, 2023. https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2008596.1849

سال 1956 نیز استفاده وسیع کامپوزیتها در صنایع فضایی آغاز شد. از دیرباز تمام کشورهای صنعتی به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا هستند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیستمحیطی شوند [1]. کامپوزیتهای زمینه فلزی با زمینه آلیاژهای سبک از قبیل منیزیم و آلومینیوم و تقویتشده با ذرات سرامیکی از قبیل کاربید سیلیسیوم، آلومینا و زیرکونا را میتوان به عنوان دستهای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای وزن کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب حرارتی کم و مقاومت به سایش خوب میباشند. این مواد به دلیل خواص ویژهشان در سالهای اخیر کاربرد بسیاری در صنایع هوایی، خودروسازی، نظامی و ... پیداکردهاند [4].

على غم افزايش تقاضا براى كامپوزيت زمينه فلزى در محصولات هوافضا و خودروسازى، كماكان مشكلات ماشين كارى آنها حلنشده باقىمانده است [5]. ويژگىهاى خاص كامپوزيتهاى زمينه فلزى در طول ماشين كارى باعث شده است توانايى ماشين كارى آنها در كل ضعيف قلمداد شود [6]. تحقيقات اوليه در بهبود كيفيت ماشين كارى كامپوزيت هاى زمينه فلزى از سال 1980 و همزمان با استفاده روزافزون كامپوزيت زمينه فلزى در صنايع هوافضا و خودروسازى شروع شده است [8-7]. تعداد بسيار كمى از تلاشهاى صورت گرفته منجر به توليد مدلهاى پيشبينى كننده مؤلفههاى ماشين كارى امپوزيت زمينه فلزى شده است. مطالعه نيروهاى ماشين كارى و انتخاب صحيح پارامترهاى ماشين كارى جهت دريافت درک جامعى از رفتار اين مواد نياز است [4]. اكثر تحقيقات در ماشين كارى كامپوزيت زمينه فلزى با استفاده از ابزار كاربيدى يا الماس چند كريستال¹ انجام شده است [9]. با اين حال، بسيارى از مطالعات ادعا مىكنند كه ابزار كاربيدى يک انتخاب مناسب تحت شرايط خاص است [10].

در زمانی که سایش ابزار به سرعت شروع میشود، پارامترهای مختلف برای تعیین شرایط مناسب ابزار مورد بررسی قرار می گیرند [10,11]. این امر بر مفید بودن ابزار کاربیدی (به دلیل ارزانتر بودن) دلالت دارد. بسیاری از محققان پیشنهادهایی مبنی بر اینکه ابزار کاربیدی برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی مناسب نیست ارائه دادهاند. تعدادی از محققان به این نتیجه رسیدهاند که ابزارهای کاربیدی تحت شرایط خاصی برای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی مفید هستند [9].

امروزه دستیابی همزمان به حداکثر نرخ براده برداری، صافی سطح، دقت ابعادی و عمر مفید ابزار به منظور دستیابی به حداکثر راندمان و کاهش هزینههای تولید قطعات، امری بسیار ضروری به شمار میرود. از طرفی شرایط کاری و خواص مکانیکی ابزارها در فرآیندهای ماشینکاری، تأثیر بسزایی در ماشینکاری به کیفیت پایدار قطعات و کنترل هزینههای تولید دارند. در ماشینکاری برخی مواد به دلیل نرخ بسیار بالای سایش ابزار، شرایط سختی در ماشینکاری به وجود میآید. در واقع بالا بودن نرخ حرارت تولید شده در عامل اصلی بروز مشکل در این گونه شرایط به شمار میرود. عملی ترین و مؤثر ترین روش به منظور بهبود فرآیند ماشینکاری این دسته از مواد، کاهش دمای برش است. یکی از روشهای مؤثر در کاهش دمای برش استفاده از خنک کاری برودتی است [1] که نسبت به دیگر روشهای خنک کاری، توجه کمتری به آن شده است.

2- اهداف پژوهشی

در پایان جمع آوری اطلاعات و مطالعات در رابطه با کامپوزیت پایه آلومینیومی مشاهده گردید که میزان مطالعات در کامپوزیتها همواره با بررسی افزودن مواد تقویت کننده SiC در سالهای اخیر بسیار مورد توجه بوده است. با این حال، بررسی روشهای خنک کاری پایدار، بخصوص برودتی و پارامترهای خنک کاری برودتی و مقایسه آنها با روشهای خنک کاری مختلف بسیار محدود بوده و در مورد بررسی مستقیم پارامترهای برودتی در حین ماشین کاری اطلاعات چندانی برای کامپوزیتهای پایه فلزی موجود نیست. از این رو هدف شده است. لذا نوع خنک کاری برودتی و شناخت پارامترهای مؤثر آن، راهکاری مناسب جهت کاهش دشواریهای ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی و بهبود کیفیت سطح قطعه کار است. از این رو مقایسه عملکرد روش برودتی با دیگر روشهای مرسوم همچون غوطهوری و MQL جهت یافتن بهترین و بهینهترین

3- روش تحقيق

با استفاده از روش ریخته گری همزنی، قطعههای مکعبی شکل کامپوزیتی A356 با 10 درصد SiC با ابعاد 22 × 11.5 × 1.1 سانتیمتر ساخته و آماده شد که با نام تجاری SiC-00%SiC نشان داده می شود. بعد از اتمام عملیات ساخت قطعات کامپوزیتی، جهت حصول اطمینان از توزیع درست و همگن ذرات و تولید با کیفیت، یک قسمت از نمونه ساخت شده پولیش گردید و با میکروسکوپ الکترونی مطابق شکل 1 مورد بررسی قرار گرفت. به جز چند نقطه که این ذرات به هم چسبیده شدهاند، تقریباً در بقیه نقاط توزیع یکسان مشاهده شد. با توجه به این نکته که تولید کامپوزیتی که مقدار SiC به کار رفته در آن در هیچ منطقهای به هم نچسبیده باشند تقریباً غیرممکن است، لذا جهت اطمینان بیشتر، از تصاویر تحلیل مپ قطعات کامپوزیتی با دستگاه SEM استفاده شد.

برای انجام آزمایشهای فرزکاری، پارامترهای برشی مطابق مشاورههای فنی با شرکت سازنده ابزار و پارامترهای مؤثر روش برودتی انتخاب گردید. برای روش خنک کاری برودتی^۲ و مطابق جدول شماره 1. عمق برش ثابت 1mm، پیشروی ثابت 0.1 mm/z و طرح آزمایشی تاگوچی L9 به همراه یکبار تکرار آزمون مطابق جدول 2 استفاده شد.



Fig. 1 SEM image of A356 + 10 % SiC شکل 1 تصویر SEM از ماده کامپوزیت آلومینیومی به همراه SiC

² cryogenic

Table 1 Machining parameters used

جدول 1 پارامترهای برشی استفاده شده

	شرايط آزمايش		پارامترهای برشی
240	180	120	(m/min) سرعت برشی
3.5	2.5	1.5	(mm) قطر نازل
3.5	2.5	1.5	(Bar) فشار برودتي
45	30	15	(mm) فاصله نازل
-	-	45	(درجه) زاويه نازل
-	-	0.1	(mm/z) پیشروی
-	-	1	(mm) عمق برش
-	-	برودتى	مدل روانکاری

جدول 2 ماشین کاری برودتی با روش تاگوچی L9 DOE

 Table 2 The DOE-L9 orthogonal array used for cryogenic machining

سرعت برشی	فاصله نازل	فشار برودتی ۲۰۰۰	قطر نازل	شماره آبرا ه
m/min	mm	bar	mm	ارمايش
120	15	1.5	1.5	1
180	30	2.5	1.5	2
240	45	3.5	1.5	3
240	30	1.5	2.5	4
120	45	2.5	2.5	5
180	15	3.5	2.5	6
180	45	1.5	3.5	7
240	15	2.5	3.5	8
120	30	3.5	3.5	9

ساخت سيستم تزريق نيتروژن مايع

این سیستم (شکل 2) عمدتاً از یک کمپرسور باد، مخزن نیتروژن مایع، سیستم خشک کننده هوا، شلنگ استیل، نازل و فیکسچر نگهدارنده نازل و ابزار برشکاری، قطعه کار و فرز CNC تشکیل شده است. برای اطمینان از فشار مخزن، یک سیستم تخلیه سریع نیز استفاده گردید و برای کنترل جریان خروجی و جلوگیری از هدر رفت نیتروژن مایع، یک شیر جریان قبل از نازل قرار گرفت.



Fig. 2 Liquid nitrogen injection system

شكل 2 سيستم تزريق نيتروژن مايع

در سیستم خنککاری برودتی، هوای فشرده تولید شده توسط کمپرسور هوا قبل از مخزن نیتروژن مایع باید با استفاده از فیلتر خشک کن پنوماتیک خشک شود و بعد از وارد شدن به رگولاتور تنظیم فشار (برای تأمین فشار

معین)، به واسطه لولههای پنوماتیکی وارد لوله استیل داخل مخزن نیتروژن مایع شود. نیروی لازم برای فشار دادن مایع به سمت پایین توسط هوای فشرده خشک تأمین میشود. لوله خروجی استیل در زیر مخزن قرار می گیرد. همچنین نحوه اتصال و چیدمان نازل و قطعه کار مطابق شکل 3 است. همان طور که در شکل 3 مشاهده میشود، نیتروژن مایع مطابق با جدول 1 توسط نازل با زاویه 45 درجه به نوک ابزار برشی تزریق شد.



Fig. 3 Overview of cryogenic milling setup شکل 3 چیدمان قطعات و نازل در حین فرزکاری برودتی

4- تجزيه و تحليل

تمامی اندازه گیریهای کیفیت سطح ماشین کاری شده مطابق شکل 4 در بخشهای ابتدا، مرکز و انتهای قطعات انجام شد. سپس اندازهها به نرمافزار آماری تأثیر منتقل، و اثر پارامترهای ماشین کاری بر^۱ Ra که مؤلفههای اصلی کیفیت سطح هستند مورد بررسی قرار گرفت.



Fig. 4 The section of surface roughness measurement شکل 4 بخشهایی که زبری سطح اندازه گیری شد

زبری سطح در روش خنککاری برودتی

مقدار زبری سطح Ra در تمام آزمونهای برودتی در سه سرعت مختلف و در سه منطقه از قطعه کار اندازه گیری گردید. همچنین با استفاده از آنالیز واریانس، میزان R² برای Ra حدوداً ٪ 65 بود (شکل 5). میزان R² به این معنی است که رابطه قوی ریاضیاتی بین پارامترهای برشی و روانکاری برودتی با زبری سطح

¹ Average surface roughness

Ra وجود ندارد. همچنین میزان ²R شاخصههای Rz و Rz نیز به ترتیب ٪55 و ٪57 بودند. اعداد و آمار به دست آماده مبین رفتار ماده به علت وجود ناهمگن ذرات SiC میباشد که منجر میشود کیفیت سطح حساسیت چندانی به پارامترهای بررسی شده نداشته باشد. در نتیجه، کنترل و مدیریت تغییرات شاخصههای کیفیت سطح بر اساس پارامترهای برشی مطالعه شده عملاً امکان پذیر نیست.



Nozzle Diameter Pressure Nozzle Distance Cutting Speed

Fig. 5 Anova of Ra in the entrance section with R²=65% شکل 5 تحلیل آنالیز واریانس بر روی Ra در بخش Entrance با 2 65 R= 2

بر اساس شکل 6 و با در نظر گرفتن این نکته که Vc سرعت برشی و D قطر نازل و L فاصله نازل تا قطعه کار و P فشار برودتی میباشند، میتوان اذعان کرد که پارامترهای برودتی و برشی تأثیر چندانی بر روی زبری سطح ندارند. با این وجود، در بین پارامترهای برشی و خنککاری مطالعه شده، فشار برودتی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح Ra دارد.



Fig. 6 Effective parameters in surface roughness with $R^2{=}65\%$ شکل 6 پارامترهای مؤثر در زبری سطح با $R^2=65\%$

با توجه به شکل7 ، میزان زبری سطح در ابتدای ماشین کاری بیشترین مقدار را داشته و در ادامه مسیر ماشین کاری به سمت انتهای قطعه از میزان زبری کاسته و کیفیت سطح ارتقا مییابد. در سرعت برشی 2001/min ،بهترین کیفیت سطح در آزمون شماره 9 (مطابق جدول شماره 2) اتفاق افتاده است. با توجه به شکل 8، بهجز آزمون شماره 7 که افزایش ناگهانی زبری در ابتدا و انتهای ماشین کاری مشاهده میشود، میزان زبری سطح در این سرعت برشی تقریباً در همه آزمونها، در ابتدا بالاترین مقدار خود را داشته و در ادامه فرایند از میزان زبری سطح کاسته شده است.



شکل 8 نمودار زبری سطح در سرعت 180 m/min

شکل 9 نمودار زبری سطح در سرعت برشی 180 m/min را نشان می دهد که همراه با تکرار آزمون شماره 8 است. بر این اساس مشاهده می شود که پرش های ناگهانی مقادیر زبری سطح Ra از بین رفته و مشابه بیشتر آزمون ها، شیب زبری سطح رو به پایین بوده و رفته رفته کیفیت سطح بهتر شده است. این تفاوت در تکرار آزمون نشان گر این است که در آزمون قبل نوک ابزار با ذرات SiC برخورد کرده و در نتیجه با کنده شدن ذرات SiC از سطح قطعه، منجر به ایجاد حفره های ناگهانی در سطح قطعه شده است. مطابق جدول 2 در آزمون شماره 6 و تحت سرعت برشی مشابه، کیفیت سطح بهتری مشاهده شده است.



نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

با توجه به شکل 10، زبری سطح در این سرعت برشی نسبت به هم الگوهای مشابهی ندارند. این پراکندگی، پیچیدگی کشف عوامل مؤثر بر کیفیت سطح را نشان میدهد. با این حال با توجه به کلیات نمودارهای زبری سطح در هر سه سرعت برشی نسبت به روشهای خنککاری خشک و غوطهوری و حداقل روان کار در شرایط برشی مشابه [13]، افزایش چشمگیر زبری سطح در روش خنککاری برودتی قابل مشاهده است، زیرا مایع خنککاری به طور مؤثر گرمای برش را کاهش میدهد [12] و تولید لایه صاف سطح ماشینکاری را مهار میکند. با توجه به محدوده Ra به دست آمده در تمامی سطوح می توان گفت کیفیت سطح تشکیل شده در روش برودتی مطابق استاندارد ISO در محدوده N۵ تا N8 متغیر است که برای ماشینکاری دقیق مناسب می باشند.



شکل 10 نمودار زبری سطح در سرعت 240 m/min

5- نتيجەگىرى

از بررسی نتایج آزمونها و تحلیلهای آماری صورت گرفته، نتایج زیر قابل بیان است:

- مواد کامپوزیتی پایه آلومینیوم با تقویت کنندههای SiC موادی سخت هستند و بدلیل توزیع ناهمگن مواد تقویت کننده و ساینده در ماده پایه، شرایط ماشین کاری برای بدست آوردن کیفیت سطح مطلوب را بدلیل برخورد احتمالی نوک ابزار با مواد ساینده SiC موجود در ماده پایه کمی پیچیده می کند. به همین دلیل احتمال اندکی برای وجود رابطهای خطی بین زبری سطح با پارامترهای ماشین کاری وجود دارد. از این رو کنترل و بهینهسازی کیفیت سطح نیز دشوار است.
- در بررسیهای آماری مشاهده گردید که پارامترهای برودتی بر کیفیت سطح (Ra) به دلیل R² پایین (حدود 65 ٪) اثر قابل توجهی نداشت. این امر نشاندهنده عدم وجود رابطه معنادار بین نوع خنککاری و زیری سطح است.
- با استفاده از تحلیل آماری نتایج، پارامترهای برودتی و برشی تأثیر چندانی بر روی زبری سطح ندارند. با این وجود، در بین پارامترهای برشی و خنککاری مطالعه شده، فشار برودتی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح Ra دارد.
- در روش خنککاری برودتی، زبری سطح در هر سه سرعت برشی نسبت به روشهای قبلی افزایش چشمگیری را نشان میدهد. دلیل عمده این پدیده را میتوان به حضور دائم و مؤثر مایع روانکاری در سطح برشی دانست که گرمای حاصله از ماشین کاری را کاهش میدهد

و تولید لایه صاف سطح ماشین کاری را مهار می کند. با این وجود، آزمایشها و تحقیقات تکمیلی در این حوزه نیاز است.

6- تقدير و تشكر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری های علمی بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

7- منابع

- [1] Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2023.
- [2] Paulo Davim, J., "Diamond tool performance in machining metalmatrix composites," Journal of materials processing technology, vol. 128, no. 1-3, pp. 100-105, 2002.
- [3] António, C. C, and Davim, J, P., "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experiment and a genetic search model," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 33, no. 2, pp. 213-219, 2002.
- [4] Nicholls, C, J., Boswell, B., Davies, I, J., and Islam, M, N., "Review of machining metal matrix composites," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 33, pp. 2429-2441, 2017.
- [5] Gururaja, S., Ramulu, M., Pedersen, W., "Machining of MMCs: a review," Machining Science and Technology, vol. 17, no. 1, pp. 41-73, 2013.
- [6] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S, T., "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 57, pp. 83-101, 2012.
- [7] Aronson, R, B., "Machining composites," Manufacturing engineering, vol. 122, no. 1, 1999.
- [8] Rai, R, N., Datta, G., Chakraborty, M., and Chattopadhyay, A., "A study on the machinability behaviour of Al–TiC composite prepared by in situ technique," Materials Science and Engineering: A, vol. 428, No. 1-2, pp. 34-40, 2006.
- [9] Durante, S., Rutelli, G. and Rabezzana, F., 'Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools,' Surface and coatings technology, Vol. 94, pp. 632-640, 1997.
- [10] Said, M. S., Yusoff, M. S. and Hassan, C. H., 'Tool wear in machining AlSi/AlN metal matrix composite 10 wt% reinforcement using uncoated cutting tool,' In applied mechanics and materials, Vol. 465, pp. 973-977, 2014.
- [11] Sougavabar, M. A., Niknam, S. A., Davoodi, B. and Songmene, V., "Milling Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," In Persian. Materials, Vol. 15, No. 4, pp. 1533, 2022.
- [12] Bannazadeh, R., Riahi, M., Khosroabadi, M.,'' Experimental Study of Cryogenic Cooling Effect on Tool Wear and Power Consumption During Turning of AISI304'', In Persian. Amirkabir J. Mech. Eng., Vol. 50. No. 3. pp. 641-656. 2018
- [13] Saberi, M. Niknam, S. A. Hashemi, R., "On the impacts of cutting parameters on surface roughness, tool wear mode and size in slot milling of A356 metal matrix composites reinforced with silicon carbide elements" Journal of Engineering Manufacture., Vol. 235, No. 10. pp. 1655–1667, 2021

نشریه علمی پژوهشی



علوم و فناوری **کامپوزیسہ** http://jstc.iust.ac.ir

قالب پیشنویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرمافزار وُرد (استایل عنوان)

نام و نامخانوادگی نگارنده اول¹، نام و نامخانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و … نگارنده سوم³، …. (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمي نگارنده، رشته تخصصي، نام سازمان، نام شهر (استايل مشخصات نويسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوي دكترا، مهندسي مكانيك، دانشگاه تربيت مدرس، تهران

* شهر، صندوق پستى 13114-16846، پست الكترونيكى نويسنده عهدهدار مكاتبات (استايل مشخصات نويسندگان)

للاعات مقاله:	چکیده (سبک عنوان چکیده)
يافت:	در این قالب (تمپلیت)، شیوهی تهیهی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرمافزار وُرد برای مجله علمی پژوهشی
يرش:	علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالببندی مقاله، بخشهای مختلف آن، انواع قلمها و اندازه آنها، بهطور کامل در
یدواژگان (استایل عنوان کلید	استایلها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پِیست) آن در بخشهای مختلف و انتخاب استایل
ژگان)	مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه
داقل3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده	شده باشند، معذور است. برای آمادهسازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایلها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود
ما (استایل کلیدواژگان)	که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگیهای لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار
ش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای ید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند ش فارسی است. قلم انگلیسی بهکار . ته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو	برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه میباشد. چکیده باید بهطور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روشهای انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکلها، جدولها، فرمولها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
من است.	

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)	Abstract (Style: Abstract Title)		
Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As: Composites, Foam, Shear, Deflection	The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)		
متن خود در این فایل، سبک ³ مربوط را	1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1) مقدمه (سبک عنوان سطح 1)		

کپی و سپس چسباندن (پیست) متن خود در این قایل، سبک مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن میتوانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید: Paste option \rightarrow match with Destination format

برای آمادهسازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

³ Style

¹ Template ² Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 2, pp. 2247-2250, 2023. https://doi.org/...

پاراگرافهای دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازهی 5 میلیمتر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علایمی نظیر ، : . ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیهی این علایم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته میشوند.

حداکثر صفحات پیشنویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

$(3 \ e^{-1})$ اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح $2 \ e^{-1}$

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می ابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره گذاری شوند و نمی توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک تک آنها می توان یک جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیر متوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می شود [7،5،3].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نمودهاند [2-15]" خودداری شود. در مقالههای پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخشهای اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شدهاند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آنها باید اندک باشد. -1-2اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقالهی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آنها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات بهصورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاههای معتبر استنادی بینالمللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط میباشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شكلها، نمودارها و جدولها (استایل عنوان سطح 1)

شکلها، جدولها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می شوند. در صورتی که نتوان آنها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می شوند. (استایل متن اصلی)

1-2- شكلها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکلها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاههای معتبر استنادی بینالمللی، شکلها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکلها در زیر شکل قرار می گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راستچین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپچین باشد.
- به همهی شکلها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکلها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره میشود.
- ¹English (Style: Sub Title) ² Times New Roman

- شکلها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکانهای ذکر شده، مشخص نمایید: Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position
 - محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف میشوند.
- عناوین افقی و عمودی شکلها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک میآیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک میآیند(توجه شود واحدها همواره در کل شکلها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک میآیند).
- و اندازه قلم محور شکلها تایمز نیو رومن² با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکلها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.
- شکلها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب
 اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین³) رسم می شود.
- مجله بهصورت سیاه و سفید چاپ می شود. بنابراین اجزای شکلها و نمودارها باید به گونهای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به خصوص در شکل هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.
- استفاده از کلمات فارسی در شکلها قابل قبول نمیباشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاعها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکلهای هر مقاله ارائه گردند.
 - در کلیهی محورهای شکلها باید درجهبندی آنها روبه داخل باشد.
- از نویسندگان محترم درخواست میگردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به همریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان میدهد.

برای توضیحات تکمیلیتر در مورد تهیه شکلها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکلها و نمودارها مراجعه کنید.



Fig. 1 Results of three- point bending test for composite plate شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

³ Gridlines

2-2- جدولها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نكات كلى كه بايد در ترسيم جدولها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدولها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
- عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راستچین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپچین باشد.
- جدولها حتى الامكان فقط با سه خط افقى اصلى و بدون خطوط عمودى تنظيم مىشوند.
- به همهی جدولها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدولها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می شود.
- جدولها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول ها قابل قبول نمی باشد.
- در صورتی که از جدول های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می باشد.
- متون داخل جدولها باید به زبان فارسی و با قلم بینازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین،7pt با نوع قلم تايمز نيو رومن مىباشد.
- جدولها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینههای رنگی و خاکستری در تهیه جدولها پرهیز نمایید.

جدول 1 نمونه صحيح جدول مورد تاييد مجله را نشان مىدهد. برای توضیحات تکمیلیتر در مورد تهیه جدولها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکلها و نمودارها مراجعه کنید.

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

جدول 1 اندازه فونتها (استایل: عنوان جدول)

	لاتين	فارسى		زبان متن
_	تايمز نيو رومن	بىنازنين		نوع قلم
	9	10	عناوین بخشهای سطح 1	اندازه قلم
	8	9	عناوین بخشهای سطح 2	
	9	10	متن اصلی مقاله	
	8	9	عنوان شکلها و جدولها	
	8		متن داخل شکلها	
	7	8	پاورقی و پینوشت	
	8	9	متن در جدولها	
	9	9	فرمولها ^(*)	
	9		شماره روابط	
_	8		مراجع	

(*)فونت فرمول لاتين مىتواند كامبريا مث نيز باشد.

3- روابط و فرمولهای ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمولهای ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرمافزار آفیس با قلم کامبریا مث² 9pt و از سمت چپ تایپ میشوند و با شمارهگذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آنها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می شود. یادآور می شود در نسخه های 2007 به بعد نرم افزار آفیس، فونت كامبريا مث بهطور پيشفرض براى نوشتن روابط و فرمول ها بكار رفته و كافى است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتیالمقدرو برای تایپ فرمولها از نرمافزار مثتایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمولها رعایت نکات زیر الزامی است:

1- در فرمولنویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک میآیند، ولی اعداد، كلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غيرايتاليك مى آيند.

2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهيز شود.

3- وقتی ادامه فرمول در سطرهای بعدی آورده می شود، باید از سطر دوم به بعداز سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.

4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می شود.

5- دقت شود از نقطه مميز يا همان نقطه پايان جمله (a.b) به جاي نقطه ضرب (a·b) استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^{K}} = Q_{11}^{K} \cos^{4} \theta^{k} + 2(Q_{12}^{K} + Q_{66}^{K}) \sin^{2} \theta^{k} \cos^{2} \theta^{k} + Q_{22}^{K} \sin^{4} \theta^{k}$$
(1)

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt$$
(2)

$$\varepsilon_{xy}^{0} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$
(a-3)

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایهی املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصلهی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را بهصورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «میشود» است.

در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمهی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصلهی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل ها» را بهصورت «شکلها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادات» و «اساتید» اشتباه و درست آنها «پیشنهادها» و «استادان» است.

1-4- علايم، نشانهها و ارقام (استايل عنوان سطح 2 و 3)

از علایم و نشانه های متداول در زبان فارسی و همچنین از علایم و نشانه های به کار رفته در متون مهندسی مکانیک میتوان استفاده نمود. استفاده از ممیز

نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

¹ Insert -> Symbols -> Equation ² Cambria Math

³ Math Type

2337, 1963.

قالب پيش نويس مقالات نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

فارسی خطر بههم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقا یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست علایم و نشانهها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج میشود. این لیست بهصورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

```
    Kom<sup>-2</sup>) مدول یانگ (Nm<sup>-2</sup>)
    نیرو (Nm<sup>-2</sup>) نیرو
    (K) نی T
    دما (K) تنش (K)
    علایم یونانی
    م تنش (Nm<sup>-2</sup>)
    کرنش σ
    کرنش γ
    کرنش κ
    بعداد لایه
    زیرنویسها κ
    زیرنویسها در معوسط
```

6- تقدیر و تشکر و پیوستها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانهها آورده می شود. باید به پیوستها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون زدگی 5 میلی متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می شود. نکات زیر را در مرجع نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله
 باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونتها در مرجعنویسی باید با همان
 دقتی که در نمونهها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجددا تاکید میشود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نمودهاند [2–10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی
 که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است،
 خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است
 [5]." این نوع ارجاع <u>نادرست</u> است و کمکی به خواننده در درک مطلب
 نخواهد داشت.
 - ۲ از ارجاع به پایاننامههای کارشناسی خودداری نمایید.
 - نام مجلهها و نظایر آن به طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

رتوجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند) مثال: Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-

تذکر: برای نوشتن مراجع می توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و

فناوري كاميوزيت¹ در نرمافزار اندنُت² استفاده كنيد. اين فايل از طريق وب-

سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرمافزار انتقال یابد. این پوشه معمولا در مسیر زیر در دسترس

برای مراجع فارسی در این نرمافزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می شوند:

Program Files \rightarrow EndNote X# \rightarrow Styles

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آنها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

[2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ،

شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

است:

سال انتشار.

(In Persian) درج شود.

[3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه ها؛

[4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع؛

[5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه های الکترونیکی؛

 [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm, available in 13, February 2005.

استانداردها؛

[7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote

³ Language