



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



تحلیل سه بعدی تنش‌های پسماند در نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری با الیاف تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی

احمد رضا قاسمی^{۱*}، محمد محمدی^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

*کاشان، صندوق پستی ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷، ghasemi@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق به مطالعه توزیع تنش‌های پسماند در سلول واحد سه‌فازی شامل سه فاز رشته کربنی، نانولوله کربنی و ماتریس به شکل سه بعدی و با توسعه مدل دیسک دایره‌ای پرداخته شده است. توزیع تنش‌های پسماند سلول واحد در هر یک از فازها، با استفاده از دو روش المان محدود و حل تحلیلی، انجام شده است. ضریب انبساط حرارتی هر یک از دو فاز رشته کربنی و نانولوله کربنی، در راستاهای عرضی و طولی، به صورت متفاوت در نظر گرفته شده است و نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی بر رشته کربنی با استفاده از روش الکتروفورز، به صورت موازی و به صورت حلقه‌گون بر رشته کربنی در نظر گرفته شده است. درصد حجمی رشته کربنی نیز به صورت یکسان و برابر با ۶۰٪ در نظر گرفته شده است، لیکن توزیع تنش‌های پسماند، برای درصدهای متفاوت نانولوله کربنی شامل ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪ و برای حالت دوفازی شامل رشته کربنی و ماتریس انجام و مقایسه شده است. توزیع تنش‌های پسماند شامل تنش‌های شعاعی، تنش‌های مماسی، تنش‌های طولی و مجموع تنش‌های اصلی در هر یک از فازها مطالعه شده است. در پایان مجموع تنش‌های پسماند حاصل از دو روش المان محدود و روش تحلیلی توسعه یافته، برای سلول واحد سه‌فازی با یکدیگر مقایسه شده است، که از مطابقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشد.

دریافت: ۹۴/۷/۱۴

پذیرش: ۹۴/۹/۱۴

کلیدواژه‌ها:

سلول واحد سه‌فازی

تنش‌های پسماند

نانولوله کربنی

تحلیل المان محدود

Three-dimensional residual stresses analysis of nanocomposite polymeric matrix based on fiber reinforced carbon nanotubes

Ahmad Reza Ghasemi*, Mohammad Mohammadi

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

*P.O.B. 87317-51167, Kashan, Iran, ghasemi@kashanu.ac.ir

Keywords

Representative volume element
Residual stresses
Carbon nanotube
Finite element analysis

Abstract

In this research, distribution of residual stresses in three-phase representative volume element (RVE) consisting of carbon fiber, carbon nanotube and matrix, as three dimensional has been determined. Finite element analysis and cylinder analytical model have been used to determination of residual stresses in every phase. Cylinder analytical model has been developed to three-phase RVE. Coefficient of thermal expansion has been considered differently at various directions in carbon fiber and carbon nanotube phases. Placement of carbon nanotubes has been considered parallel to carbon fiber and as ring around carbon fiber using electrophoresis method. Different volume fraction of carbon nanotube has been considered as 0%, 1%, 2%, 3%, 4% and 5% and distribution of residual stresses of different volume fraction was compared together, but volume fraction of carbon fiber is considered as constant equal 60%. Radial residual stress, tangential residual stress, axial residual stress and residual stress invariant have been determined in different phases. Results of residual stress invariant of two different analysis as finite element and cylinder analytical model have been compared in different phases that are in good agreement together.

۱- مقدمه

اینگونه مواد، با توجه به انجام فرایند پخت و ترکیب مواد با ویژگی‌های متفاوت حرارتی، بوجود آمدن تنش‌های پسماند امری اجتناب ناپذیر است. بوجود آمدن تنش‌های پسماند در مواد مختلف، از جمله عوامل موثر در

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مواد کامپوزیتی، از جمله نسبت بالای مقاومت به وزن، این مواد به سرعت در صنایع مختلف گسترش یافته است. در

Please cite this article using:

Ghasemi, A. R. and Mohammadi, M., "Three-dimensional residual stresses analysis of nanocomposite polymeric matrix based on fiber reinforced carbon nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 23-30, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

نانو مانند نانوذرات، نانورشته و نانولوله در فاز ماتریس، از آن به عنوان زمینه‌های دوفازی برای الیاف استفاده می‌شود. تحقیقات انجام شده در زمینه توزیع تنش‌های پسماند در این گونه مواد، شامل تنش‌های پسماند ماکرومکانیک و بررسی خواص مکانیکی در چند لایه‌های کامپوزیتی می‌شود [۱۴-۱۶]. در نانوکامپوزیت‌های سه‌فازی که الیاف بوسیله مواد نانو تقویت شده‌اند، یکی از مواد نانو که جهت تقویت رشته‌های کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نانولوله‌های کربنی است. روش تقویت رشته کربنی بوسیله نانولوله‌های کربنی شامل روش سایزینگ^۶، روش الکتروفورز^۷ و روش تیخیر شیمیایی^۸ می‌باشد. در روش سایزینگ، رشته کربنی از درون ترکیب ماتریس و نانولوله کربنی عبور داده می‌شود، تا مخلوط رزین و نانولوله بر روی رشته کربنی قرار گیرد و موجب تقویت رشته کربنی شود [۱۷]. در روش الکتروفورز، با استفاده از ایجاد قطب‌های غیرهمنام بین محلول نانولوله و رشته کربنی، نانولوله‌های کربنی را وادار به قرار گرفتن بر روی رشته کربنی می‌کنند [۱۸-۲۰]. در روش انباشت بوسیله تیخیر شیمیایی (CVD)، بر اثر یک واکنش شیمیایی در درجه حرارت بالا، نانولوله‌های کربنی به صورت عمودی بر سطح رشته کربنی مورد نظر رشد می‌کنند [۲۱-۲۲]. تحلیل تنش‌های پسماند میکرومکانیک در اینگونه مواد سه‌فازی صورت نگرفته است و تنها تحقیقاتی در زمینه خواص مکانیکی اینگونه مواد انجام شده است [۲۳-۲۵].

در این تحقیق، به تعیین توزیع تنش‌های پسماند میکرومکانیک در سلول واحد سه‌فازی شامل رشته کربنی، نانولوله و ماتریس به صورت سه‌بعدی پرداخته شده است. در سلول واحد در نظر گرفته شده، رشته کربنی به روش الکتروفورز با نانولوله‌های کربنی تقویت شده است. به منظور توزیع تنش‌های پسماند در هر یک از فازها از تحلیل المان محدود و توسعه روش تحلیلی مخازن تحت فشار استفاده شده است. تحلیل تنش‌های پسماند شامل تنش‌های شعاعی، مماسی، طولی و مجموع تنش‌های اصلی می‌باشد، که برای درصد‌های حجمی مختلف نانولوله‌های کربنی شامل ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ انجام شده است. با توجه به متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی رشته کربنی و نانولوله، جهت گیری متفاوت نانولوله‌های کربنی بر رشته کربنی نیز در نظر گرفته شده است.

۲- تحلیل و مدل‌سازی سلول واحد سه‌فازی

مدل در نظر گرفته شده با توجه به تقویت رشته‌های کربنی توسط نانولوله‌های کربنی به روش الکتروفورز و استفاده از آن در ماتریس پلیمری می‌باشد. در روش الکتروفورز با استفاده از ایجاد قطب‌های مثبت و منفی در رشته کربنی، و محلول شامل نانولوله‌های کربنی موجب قرار گرفتن نانولوله‌های کربنی بر سطح خارجی رشته کربنی و تقویت آن می‌شود. سپس از این الیاف تقویت شده در زمینه پلیمری به عنوان ماتریس استفاده می‌شود [۱۸-۲۰]. سلول واحد سه‌فازی در نظر گرفته شده، شامل سه فاز رشته کربنی و نانولوله کربنی و ماتریسی از جنس اپوکسی می‌باشد. به منظور تحلیل توزیع تنش‌های پسماند در سلول واحد سه‌فازی، از مدل تحلیلی مخازن تحت فشار و تحلیل المان محدود استفاده شده است. خواص حرارتی و مکانیکی هر یک از فازها در جدول ۱ نشان داده شده است. درصد حجمی

کاهش مقاومت ماده می‌باشد، بنابراین شناخت تنش‌های پسماند و عوامل موثر بر ایجاد تنش‌های پسماند بویژه در مواد کامپوزیتی، همواره در سال‌های متوالی مورد توجه بوده است. تنش‌های پسماند به صورت کلی شامل تنش‌های پسماند ماکرو و تنش‌های پسماند میکرو می‌باشند. ماهیت تنش‌های پسماند ماکرو در مواد کامپوزیتی، ناشی از عدم تطابق خواص حرارتی در لایه‌های متفاوت مواد کامپوزیتی می‌باشد. تنش‌های پسماند میکرو، ناشی از عدم تطابق خواص حرارتی هر یک از فازهای متشکله می‌باشد. در زمینه تعیین تنش‌های پسماند ماکرو در مواد کامپوزیتی، روش‌های آزمایشی متفاوتی وجود دارد. یکی از روش‌های متداول تعیین تنش‌های پسماند ماکرو، روش سوراخکاری می‌باشد. قاسمی و شکرپه با استفاده از روش سوراخکاری مرحله‌ای^۱ و انجام حل دقیق^۲ جهت تعیین ضرایب کالیبراسیون، به تعیین تنش‌های پسماند در مواد اورتوتروپیک^۳ پرداختند. آنها با استفاده از روش انتگرال^۴ نیز به بررسی تنش‌های پسماند غیریکنواخت در مواد کامپوزیتی پرداختند [۱-۳]. قاسمی و محمدی از این روش برای تعیین تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز^۵ استفاده کردند [۴-۵]. در زمینه توزیع تنش‌های پسماند در مقیاس میکرو نیز تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. برای تعیین تنش‌های پسماند به صورت آزمایشی در مقیاس میکرو، از روش‌های غیر مخرب استفاده می‌شود. لوین و همکاران، به تحلیل تنش‌های پسماند در ماده کامپوزیتی تشکیل شده از نانوذرات کاربید سیلیکون در زمینه فلزی آلومینیم پرداختند [۶]. در این تحقیق آنها برای مطالعه تنش‌های پسماند موجود در ماده نانوکامپوزیت دو-فازی کاربید سیلیکون-آلومینیم، از روش پراش اشعه ایکس استفاده کردند. توزیع تنش‌های پسماند در نانوکامپوزیت کاربید سیلیکون-آلومینیم، در سال‌های بعد توسط تَد [۷]، با استفاده از روش پراش نوترونی و توسط وُو [۸]، با استفاده از روش تحلیلی دیسک دایره‌ای انجام شده است. وُو در مدل دیسک دایره ای، ذرات نانو کاربید سیلیکون به صورت صفحه دایره ای شکل و ماتریس آلومینیمی را به صورت حلقه ای هم مرکز در اطراف ذرات نانو مدل‌سازی نموده است، که نتایج توزیع تنش‌های پسماند در مدل‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشی از تطابق قابل قبولی برخوردار است. در سال ۲۰۰۴، کُیک به بررسی تنش‌های پسماند در مقیاس میکرو در یک سلول واحد شامل رشته کربن و ماتریس پرداخت و با استفاده از روابط انرژی، توزیع تنش‌های پسماند در طول سلول واحد را به دست آورد [۹]. در سال‌های بعد شکرپه و همکاران، با استفاده از روش انرژی و در نظر گرفتن ناحیه بین فازی در مرز دو فاز، توزیع تنش در سلول واحد دوفازی شامل الیاف و ماتریس را مورد بررسی قرار دادند [۱۰-۱۱]. علاوه بر روش‌هایی همچون روش انرژی و روش المان محدود، یکی دیگر از روش‌های تعیین تنش‌های پسماند میکرو در مواد کامپوزیتی، روش مخازن تحت فشار می‌باشد، که برای تعیین تنش‌های پسماند و خواص حرارتی به صورت سه بعدی در مواد کامپوزیتی دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲-۱۳]. در سال‌های اخیر یکی از موادی که بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است، نانوکامپوزیت‌های چند فازی، از جمله نانوکامپوزیت‌های سه‌فازی شامل فازهای رشته، نانو و ماتریس می‌باشد. در نانوکامپوزیت‌های سه‌فازی از فاز نانو به منظور تقویت فاز ماتریس و رشته کربنی استفاده می‌شود. در حالت تقویت فاز ماتریس، با همگن سازی ماده

1. Incremental Drilling
2. Exact Solution
3. Orthotropic Materials
4. Integral Method
5. Fiber Metal Laminates

6. Sizing Method
7. Electrophoresis Method
8. Chemical Vapor Method

$$r_d \leq r \leq r_n$$

$$\sigma_{n,r} = \frac{r_d^2 r_n^2 (\sigma_{r,a} - \sigma_{r,b})}{(r_n^2 - r_d^2) r^2} + \frac{r_n^2 \sigma_{r,b} - r_d^2 \sigma_{r,a}}{r_n^2 - r_d^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{n,\theta} = -\frac{r_d^2 r_n^2 (\sigma_{r,a} - \sigma_{r,b})}{(r_n^2 - r_d^2) r^2} + \frac{r_n^2 \sigma_{r,b} - r_d^2 \sigma_{r,a}}{r_n^2 - r_d^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{n,\theta} = \frac{\sigma_{n,\theta} - \nu_n (\sigma_{n,r} + \sigma_{n,z})}{E_n} + \alpha_n \Delta T \quad (6)$$

$$\varepsilon_{n,z} = \frac{\sigma_{n,z} - \nu_n (\sigma_{n,r} + \sigma_{n,\theta})}{E_n} + \alpha_n \Delta T \quad (7)$$

$$r_n \leq r \leq r_m$$

$$\sigma_{m,r} = \frac{r_m^2 r_n^2 \sigma_{r,b} - r_n^2 \sigma_{r,b}}{(r_m^2 - r_n^2) r^2} - \frac{r_n^2 \sigma_{r,b}}{r_m^2 - r_n^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{m,\theta} = -\frac{r_m^2 r_n^2 \sigma_{r,b} - r_n^2 \sigma_{r,b}}{(r_m^2 - r_n^2) r^2} - \frac{r_n^2 \sigma_{r,b}}{r_m^2 - r_n^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{m,\theta} = \frac{\sigma_{m,\theta} - \nu_m (\sigma_{m,r} + \sigma_{m,z})}{E_m} + \alpha_m \Delta T \quad (10)$$

$$\varepsilon_{m,z} = \frac{\sigma_{m,z} - \nu_m (\sigma_{m,r} + \sigma_{m,\theta})}{E_m} + \alpha_m \Delta T \quad (11)$$

$$V_d + V_n + V_m = 1 \quad (12)$$

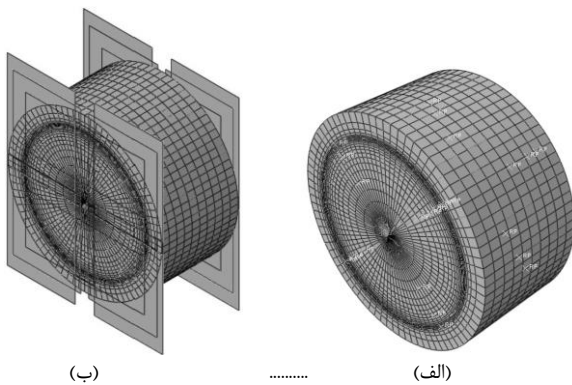
$$r = r_d \quad \varepsilon_{d,\theta} = \varepsilon_{n,\theta} \quad (13)$$

$$r = r_n \quad \varepsilon_{n,\theta} = \varepsilon_{m,\theta} \quad (14)$$

$$z = 0, L \quad \varepsilon_{d,z} = \varepsilon_{n,z} = \varepsilon_{m,z} \quad (15)$$

۲-۲- مدل‌سازی المان محدود

مدلسازی المان محدود سلول واحد سه فازی، در نرم افزار المان محدود آباکوس^۲ انجام شده است، که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ مدل المان محدود سلول واحد (الف) مش بندی (ب) اعمال شرایط مرزی

ابعاد سلول واحد برابر با واحد و نوع المان در نرم افزار به صورت C3D8R در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی کرنش‌های یکسان برای فازهای متفاوت نیز در لبه‌های آزاد در مدل المان محدود اعمال گشته است.

رشته کربنی به صورت ثابت و برابر با ۶۰٪، و درصد حجمی نانولوله با مقادیر مختلف از ۰٪ تا ۵٪ مطالعه شده است.

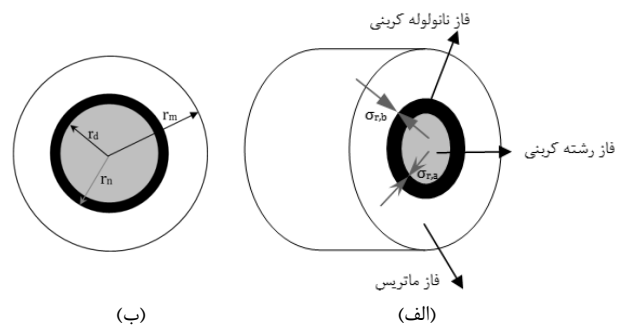
ابتدا توسعه مدل تحلیلی برای سلول واحد سه فازی ارائه شده و در پایان نتایج مربوط به تحلیل المان محدود و مقایسه آن صورت گرفته است.

جدول ۱ خواص حرارتی و مکانیکی فازهای مختلف [۲۶-۲۷]، [۸]

فاز	E (GPa)	ν	$\alpha^L \times 10^{-6}$	$\alpha^T \times 10^{-6}$	ΔT
رشته کربنی	۲۳۰	۰/۲	-۰/۴۱	۱۵	۱۰۰
نانولوله کربنی	۱۰۰۰	۰/۱	-۱/۵	۱۵	۱۰۰
اپوکسی ML506	۳/۱۳	۰/۳۵	۶۲/۴۵	۶۲/۴۵	۱۰۰

۲-۱- مدل تحلیلی مخازن تحت فشار

در شکل ۱ سلول واحد سه فازی نشان داده شده است و رشته کربنی در مرکز سلول واحد، نانولوله کربنی به عنوان فاز دوم بر روی فاز رشته کربنی و فاز ماتریس به عنوان فاز سوم بر فاز نانولوله قرار دارد.



شکل ۱ سلول واحد سه فازی (الف) تنش‌های بین فازی (ب) شعاع فازها

این نحوه قرارگیری سه فاز در سلول واحد، در حالت تقویت رشته‌های کربنی توسط نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش الکتروفورز و استفاده در زمینه‌ی ماتریس موجود می‌آید. در مدل‌های تحلیلی دوبعدی به منظور تعیین توزیع تنش از مدلی مانند دیسک دایره‌ای استفاده می‌شود که با توجه به سه بعدی بودن سلول واحد قابل کاربرد نیست، بنابراین از مدل مخازن تحت فشار استفاده شده است. مدل مخازن فشار برای حالت سه فازی توسعه داده شده است. در این مدل توزیع تنش‌های پسماند بر اساس تنش‌های بین فازی است. شرایط مرزی در مرز هر یک از فازها در ابتدا و انتهای سلول واحد در روابط (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است، که دارای کرنش طولی یکسان می‌باشند. اندیس‌های d, m, n به ترتیب مربوط به فازهای ماتریس، رشته کربنی و نانولوله کربنی می‌باشد. با توجه به شرایط مرزی و روابط ارائه شده، توزیع تنش در هر یک از فازها قابل محاسبه است. با توجه به پیچیدگی و حجم محاسبات، توزیع تنش با استفاده از نرم افزار متلب^۱ محاسبه شده است.

$$0 < r \leq r_d$$

$$\sigma_{d,\theta} = \sigma_{d,r} = \sigma_{r,a} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{d,\theta} = \frac{\sigma_{d,\theta} - \nu_d (\sigma_{d,r} + \sigma_{d,z})}{E_d} + \alpha_d^T \Delta T \quad (2)$$

$$\varepsilon_{d,z} = \frac{\sigma_{d,z} - \nu_d (\sigma_{d,r} + \sigma_{d,\theta})}{E_d} + \alpha_d^L \Delta T \quad (3)$$

2. Abaqus Finite Element Software

1. Matlab Software

۳- بررسی و تحلیل نتایج

توزیع تنش مماسی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است و توزیع تنش مماسی در فاز رشته کربنی و وجود نانولوله کربنی، شبیه به توزیع تنش شعاعی در این فاز می‌باشد. توزیع روند تغییرات آن بر اثر تنش مماسی در فاز نانو به صورت فشاری می‌باشد که برای ۱٪ نانولوله برابر ۲۲/۵۷- است. با افزایش درصد حجمی نانولوله، تنش مماسی کاهش یافته است، به طوری که در حالت ۵٪ نانولوله، تنش مماسی در فاز نانو برابر با ۲۲- مگاپاسکال است. توزیع تنش مماسی از حالت فشاری در فاز نانو به حالت کششی در فاز ماتریس تغییر یافته است و به تدریج از میزان این تنش در لبه آزاد کاسته شده است. افزایش در صد حجمی نانولوله موجب افزایش تنش مماسی در لبه آزاد شده است، به طوری که در حالت عدم وجود نانولوله، ۱٪ حجمی نانولوله و ۵٪ حجمی نانولوله به ترتیب تنش مماسی برابر با ۱۷/۱، ۱۷/۰۶ و ۱۸/۲۴ مگاپاسکال به دست آمده است.

توزیع تنش طولی در طول هر یک از سه فاز، با توجه به شرط مرزی کرنش یکسان در لبه‌ها، مستقل از مختصات محوری است که این امر در تئوری کلاسیک لایه‌ای نیز با توجه به فرض عدم جدایش در نظر گرفته شده است. نحوه توزیع تنش طولی در شعاع سلول واحد در شکل ۵ نشان داده شده است. تنش طولی در فاز رشته کربنی به صورت فشاری می‌باشد. با افزایش درصد حجمی نانولوله از مقدار تنش طولی در فاز رشته کربنی کاسته شده است و به ترتیب برای درصد حجمی‌های ۰٪، ۱٪ و ۵٪ نانولوله، تنش طولی در فاز رشته کربنی به ترتیب برابر با ۱۶/۸-، ۱۳/۷- و ۴/۶۳- مگاپاسکال می‌باشد. تنش طولی در فاز نانولوله کربنی نیز به صورت فشاری است که با افزایش درصد حجمی نانولوله، از تنش طولی در این فاز کاسته می‌شود. برای درصد حجمی‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ نانولوله به ترتیب مقادیر ۱۶۲/۵-، ۱۵۱/۴-، ۱۴۱/۵-، ۱۳۲/۷- و ۱۲۴/۸- مگاپاسکال برای تنش طولی در فاز نانو به دست آمده است. با توجه به مقدار مثبت ضریب انبساط حرارتی طولی فاز ماتریس در مقایسه با دو فاز دیگر، تنش طولی در این فاز به صورت کششی می‌باشد، که به ازای درصدهای حجمی متفاوت نانولوله برابر با ۰٪، ۱٪ و ۵٪ به ترتیب برابر با ۲۵/۱۸، ۲۵/۳ و ۲۵/۷۵ مگاپاسکال می‌باشد.

مجموع تنش‌های اصلی در هر یک از فازها نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. توزیع مجموع تنش‌های اصلی در هر یک از فازها به صورت مقدار ثابتی است. در فاز رشته کربنی و نانو به صورت فشاری و در فاز ماتریس به صورت کششی می‌باشد، که با افزایش درصد حجمی نانولوله، از مقدار تنش فشاری در فاز رشته کربنی و نانولوله کاسته می‌شود. مقادیر مجموع تنش‌های اصلی به روش المان محدود و مدل تحلیلی مخازن تحت فشار، برای درصد حجمی متفاوت نانولوله در هر فاز مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است که تطابق دو روش المان محدود و مخازن تحت فشار را نشان می‌دهد.

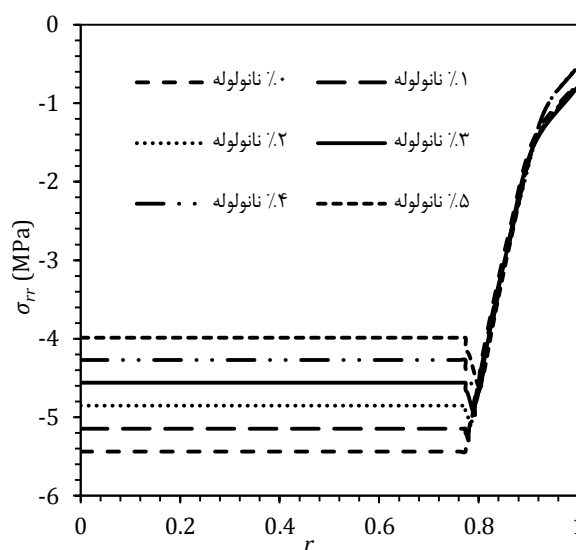
۳-۲- حالت دوم: نانولوله کربنی به صورت حلقه بر رشته کربنی

حالت دیگر نحوه قرارگیری نانولوله‌ها، به صورت حلقه‌ای بر رشته کربنی می‌باشد. بنابراین خواص حرارتی عرضی نانولوله در راستای طولی سلول واحد و خواص حرارتی طولی نانولوله در راستای عرضی سلول واحد قرار گرفته است. توزیع تنش شعاعی سلول واحد در این حالت از نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی، در شکل ۸ نشان داده شده است.

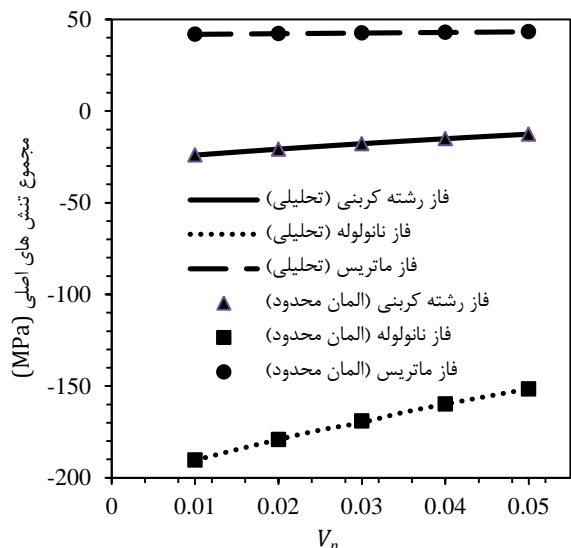
اگرچه ضرایب انبساط حرارتی در هنگام پخت برای فازهای مختلف ثابت در نظر گرفته شده است و از تغییرات حجم صرف نظر می‌شود، لیکن با توجه به اینکه ضریب انبساط حرارتی فازهای رشته کربنی و نانولوله کربنی در راستای طولی و عرضی برای هر فاز متفاوت است، نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی بر رشته کربنی حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق دو حالت متفاوت نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی بر رشته کربنی در نظر گرفته شده است. در حالت اول، نانولوله‌های کربنی به صورت موازی با رشته کربنی بر روی رشته کربنی قرار می‌گیرند و در حالت دوم، نانولوله‌های کربنی به صورت حلقه‌گون بر روی رشته کربنی متصور است. در این بخش، نتایج المان محدود برای تنش‌های پسماند در هر یک از فازها برای هر دو حالت نحوه قرارگیری نانولوله کربنی، محاسبه و مقایسه شده است.

۳-۱- حالت اول: نانولوله کربنی موازی با رشته کربنی

در این حالت، نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی بر رشته کربنی به گونه‌ای است که نانولوله‌های کربنی موازی با رشته کربنی می‌باشند. توزیع تنش شعاعی برای حالت اول نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی در امتداد شعاع سلول واحد برای درصد حجمی متفاوت نانولوله در شکل ۳ نشان داده شده است. توزیع تنش شعاعی در فاز رشته کربنی در طول شعاع به صورت ثابت می‌باشد. با افزایش درصد حجمی نانولوله کربنی از مقدار تنش شعاعی فشاری در این فاز کاسته می‌شود، به طوری که از مقدار ۵/۴- مگاپاسکال در حالت دوفازی (۰٪ حجمی نانولوله) به مقدار ۳/۹۸- برای وجود ۵٪ حجمی نانولوله کاهش یافته است. تغییرات تنش شعاعی در فاز نانولوله به گونه‌ای است که افزایش درصد حجمی نانولوله، موجب کاهش تنش شعاعی فشاری در فاز نانولوله می‌شود، اما اختلاف تنش شعاعی بین دو فاز رشته کربنی و نانولوله با افزایش درصد حجمی نانولوله کربنی افزایش می‌یابد. در فاز ماتریس نیز تنش شعاعی به صورت فشاری می‌باشد و افزایش درصد حجمی نانولوله موجب کاهش تنش شعاعی در این فاز می‌گردد. با نزدیک شدن به لبه آزاد از میزان تنش کاسته می‌شود.



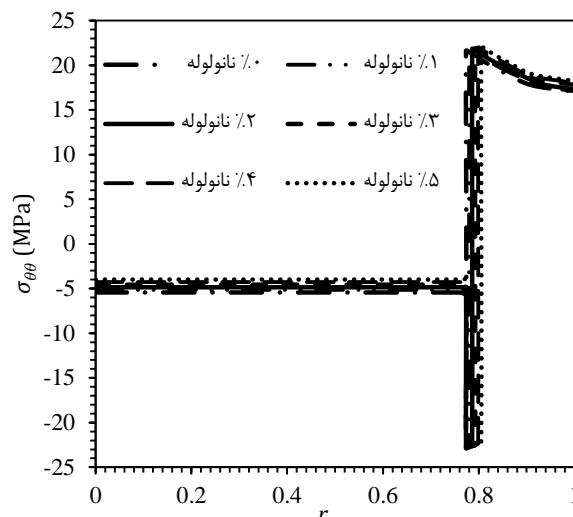
شکل ۳ توزیع تنش شعاعی در سلول واحد در حالت موازی بودن رشته کربنی و نانولوله



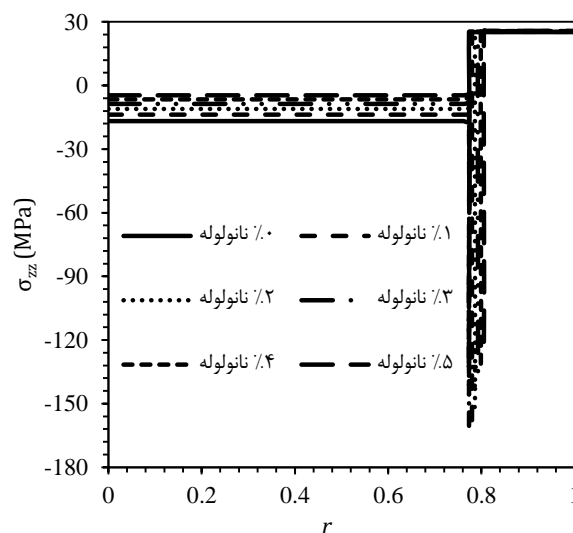
شکل ۷ مقایسه مجموع تنش های اصلی بدست آمده از روش المان محدود و روش تحلیلی

توزیع تنش شعاعی در فاز رشته کربنی با افزایش درصد حجمی نانولوله تغییر قابل ملاحظه ای کرده است، به طوری که در حالت دو فاز (۰٪ نانولوله)، تنش شعاعی در فاز رشته کربنی برابر با $5/43$ - مگاپاسکال است اما با وجود درصد حجمی نانولوله به مقدار ۱٪ و ۵٪، تنش شعاعی در فاز رشته کربنی به ترتیب برابر با $6/86$ و $48/49$ مگاپاسکال است، که نشان دهنده تغییر نوع تنش در فاز رشته کربنی به ازای وجود نانولوله کربنی می باشد. تنش شعاعی در فاز نانولوله با افزایش درصد حجمی نانولوله، کاهش می یابد، برای ۱٪ و ۵٪ حجمی نانولوله میزان تنش شعاعی در فاز نانو به ترتیب برابر با $4/49$ و $5/21$ مگاپاسکال به دست آمده است. تنش شعاعی در فاز ماتریس به صورت فشاری می باشد که در لبه آزاد سلول واحد از میزان تنش کاسته می شود. تغییرات ایجاد شده در تنش شعاعی فاز رشته کربنی کاملاً متفاوت با تغییرات ایجاد شده در حالت اول نحوه قرارگیری نانولوله های کربنی بدست آمده است، که نشان دهنده نحوه جهت گیری نانولوله های کربنی بر رشته کربنی می باشد. در این چیدمان توزیع تنش مماسی در فاز رشته کربنی، شبیه به توزیع تنش شعاعی در این فاز می باشد، که در شکل ۹ نشان داده شده است. توزیع تنش مماسی در فاز نانو مقدار قابل ملاحظه ای است، که این مقدار در حالت وجود ۱٪ حجمی نانولوله به صورت فشاری و برابر با 1470 - مگاپاسکال است با افزایش درصد حجمی نانولوله به مقدار ۵٪، میزان تنش مماسی در فاز نانو به 1312 - مگاپاسکال کاهش یافته است. بوجود آمدن چنین تنش بالایی، ناشی از تفاوت بالای ضریب انبساط حرارتی نانولوله و رشته کربنی در راستای عرضی سلول واحد است، که بر اثر نحوه قرارگیری نانولوله بوجود آمده است. البته عواملی دیگر همچون مدول بالای نانولوله های کربنی و درصد حجمی کم آنها نیز اثرگذار می باشد.

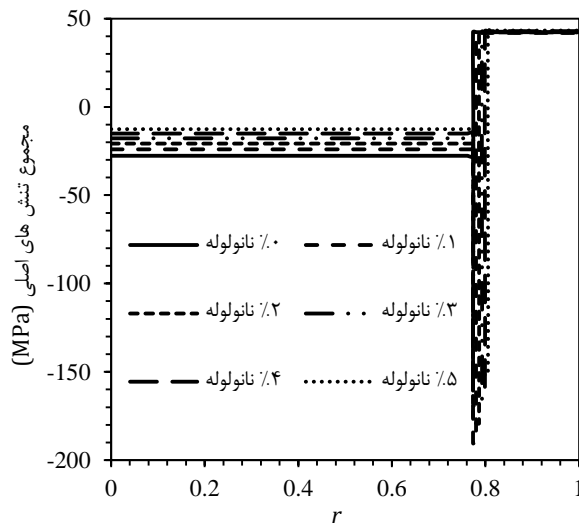
توزیع تنش طولی نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تنش طولی در حالت دو فاز، در فاز رشته کربنی برابر با $16/79$ - مگاپاسکال و در فاز ماتریس $25/19$ مگاپاسکال است. به ازای ۱٪ حجمی نانولوله، تنش طولی در فاز رشته کربنی، نانولوله و ماتریس به ترتیب برابر با $35/6$ ، 1223 و $24/95$ مگاپاسکال به دست آمده است و با افزایش درصد حجمی نانولوله به ۵٪، تنش طولی در سه فاز رشته کربنی، نانولوله و ماتریس به ترتیب برابر با $91/6$ ، 929 و $24/36$ مگاپاسکال به دست آمده است.



شکل ۴ توزیع تنش مماسی در سلول واحد در حالت موازی بودن رشته کربنی و نانولوله

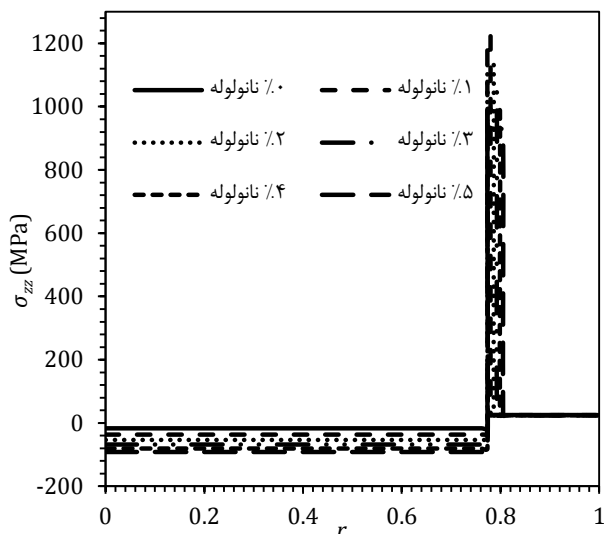


شکل ۵ توزیع تنش طولی در سلول واحد در حالت موازی بودن رشته کربنی و نانولوله

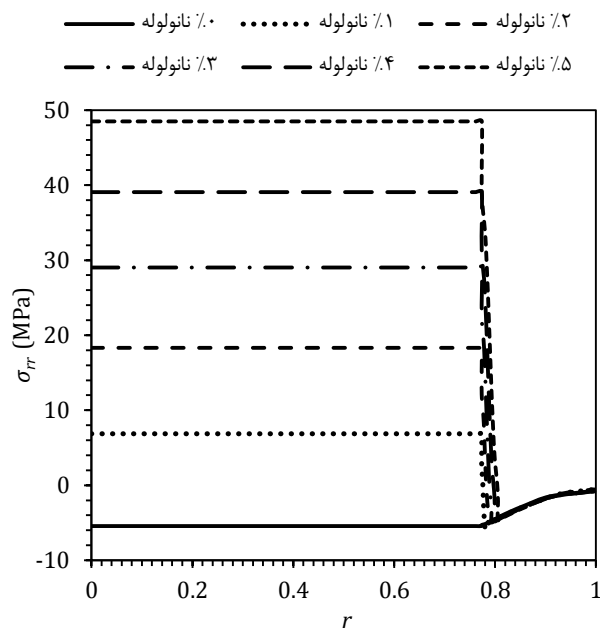


شکل ۶ توزیع مجموع تنش های اصلی در سلول واحد در حالت موازی بودن رشته کربنی و نانولوله

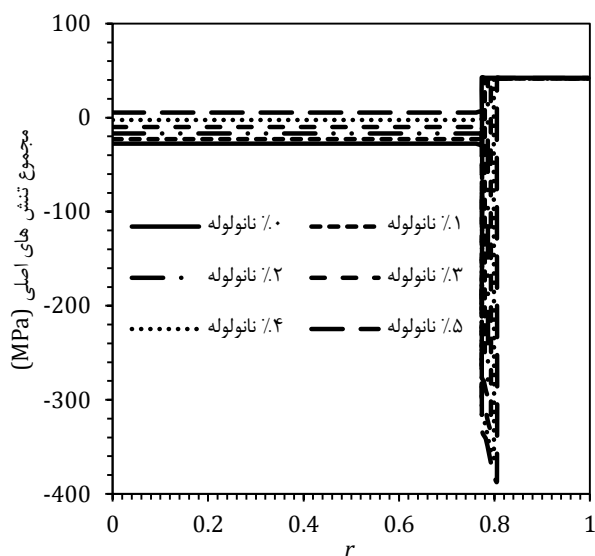
تنش طولی در هر یک از فازها شده است. در این حالت قرارگیری نانولوله‌های کربنی نیز، توزیع تنش طولی در هر فاز مستقل از مختصات طولی می‌باشد.



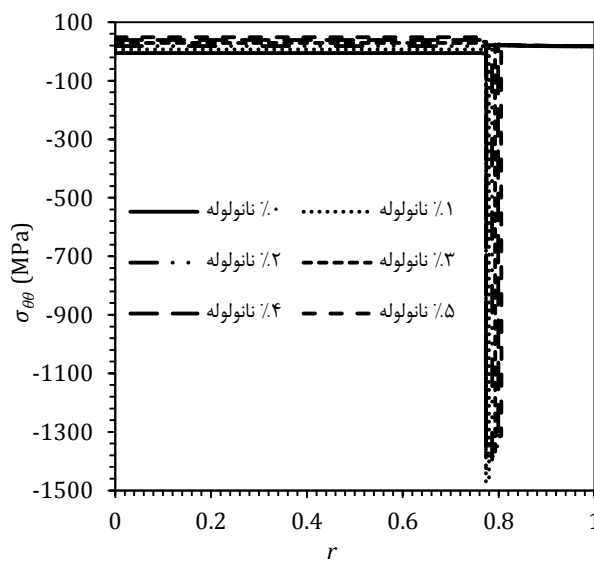
شکل ۱۰ توزیع تنش طولی در سلول واحد در حالت قرارگرفتن نانولوله به صورت حلقه گون بر رشته کربنی



شکل ۸ توزیع تنش شعاعی در سلول واحد در حالت قرارگرفتن نانولوله به صورت حلقه گون بر رشته کربنی



شکل ۱۱ توزیع مجموع تنش‌های اصلی در سلول واحد در حالت قرارگرفتن نانولوله به صورت حلقه گون بر رشته کربنی



شکل ۹ توزیع تنش مماسی در سلول واحد در حالت قرارگرفتن نانولوله به صورت حلقه گون بر رشته کربنی

۳-۳- اثرات تغییر دما

در این بخش اثر تغییر دما بر ضریب انبساط حرارتی و تنش‌های پسماند مطالعه شده است. به طور کلی تغییر دما بر روی ضریب انبساط حرارتی الیاف کربنی و نانولوله کربنی اثر ناچیزی دارد [۹-۱۱، ۲۸]، اما این اثر برای ماتریس پلیمری قابل توجه است. اگر مقادیر ضریب انبساط حرارتی برای یک رزین پلیمری در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و دمای پخت ۱۲۵ درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با $\frac{1}{60} \times 10^{-6}$ و $\frac{1}{45} \times 10^{-6}$ باشد، با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌ای، مجموع تنش‌های پسماند برای سه فاز رشته کربنی، نانولوله کربنی و ماتریس برای حالت نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی موازی با رشته کربنی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

مجموع تنش‌های اصلی در هر یک از فازها در طول شعاع سلول واحد، در شکل ۱۱ نشان داده شده است که در هر یک از فازها مقدار ثابتی است. به ازای ۱٪ حجمی نانولوله، مجموع تنش در فاز رشته کربنی، نانولوله و ماتریس به ترتیب برابر با ۲۲/۸، ۲۴۸ و ۴۱/۵ مگاپاسکال می‌باشد و برای ۵٪ حجمی نانولوله، به ترتیب برابر با ۵/۴، ۳۶۰ و ۴۲ مگاپاسکال است. در شکل ۱۲ مجموع تنش‌های مربوط به هر یک از فازها برای درصد حجمی متفاوت نانولوله با استفاده از دو روش روش المان محدود و مدل تحلیلی مخازن تحت فشار ارایه شده است. مقایسه نتایج تطابق بین دو روش را نشان می‌دهد. با توجه به شرط مرزی کرنش طولی یکسان در لبه‌های سلول واحد، ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیک متفاوت هر یک از فازها باعث توزیع متفاوت

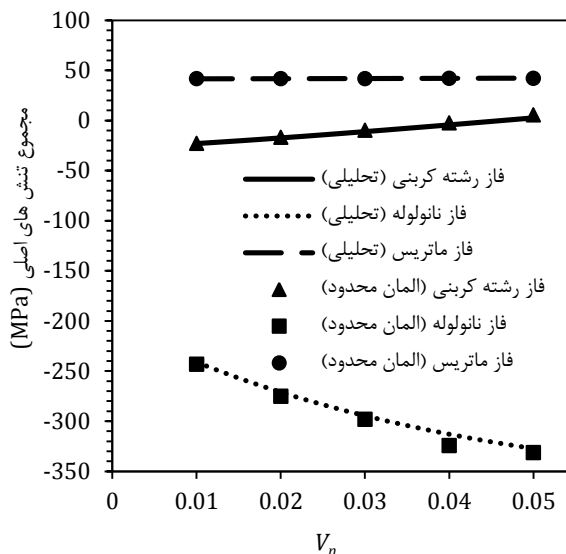
اول) و به صورت حلقه‌گون بر رشته کربنی (حالت دوم) در نظر گرفته شده است. توزیع تنش‌های پسماند بر اساس تحلیل المان محدود و توسعه روش تحلیلی مخازن تحت فشار برای درصد حجمی متفاوت نانولوله‌های کربنی شامل ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ در هر یک از فازها به صورت مجزا مطالعه شده است. در سلول واحد دوفازی (۰٪ حجمی نانولوله)، توزیع تنش شعاعی در هر دو فاز به صورت فشاری، توزیع تنش مماسی در فاز رشته کربنی به صورت فشاری و در فاز ماتریس کششی بدست آمده است. توزیع تنش طولی در فاز رشته کربنی از نوع تنش فشاری و در فاز ماتریس به صورت کششی می‌باشد. در حالت اول، وجود نانولوله کربنی و افزایش درصد حجمی آن به میزان ۵٪، موجب کاهش تنش شعاعی فشاری در هر سه فاز شده است، البته کاهش تنش فشاری به نحوی نیست که موجب تغییر نوع تنش شعاعی شود. تنش مماسی نیز با افزایش نانولوله‌های کربنی در هر سه فاز سلول واحد کاهش می‌یابد. اثر وجود نانولوله‌های کربنی در تنش طولی موجب کاهش تنش طولی فشاری در فاز رشته کربنی، ایجاد تنش طولی فشاری در فاز نانولوله و کاهش اندک تنش طولی کششی فاز ماتریس می‌شود. در حالت دوم نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی، تغییرات تنش در هر فاز متفاوت با حالت اول به دست آمده است. در حالت دوم نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی، وجود و افزایش نانولوله‌های کربنی موجب تغییر نوع تنش شعاعی فشاری به تنش شعاعی کششی و افزایش آن در فاز رشته کربنی شده است، اما در دو فاز دیگر تنش شعاعی به صورت فشاری باقی مانده است. تغییرات توزیع تنش مماسی در این حالت نیز به گونه‌ای است که موجب تغییر تنش مماسی فشاری به تنش مماسی کششی و افزایش آن در فاز رشته کربنی نسبت به حالت دوفازی شده است. تنش طولی نیز با وجود و افزایش نانولوله‌های کربنی، موجب افزایش تنش فشاری در فاز رشته کربنی شده است و تنش طولی کششی نیز در فاز نانولوله و ماتریس کاهش یافته است. با توجه به تحقیق انجام شده، وجود و افزایش نانولوله‌های کربنی به صورت موازی بر رشته کربنی، موجب کاهش تنش در فاز رشته کربنی و برهمکنش با فازهای دیگر می‌گردد، در حالی که در حالتی که نانولوله‌های کربنی به صورت حلقه‌گون بر رشته کربنی قرار دارند، وجود و افزایش نانولوله‌های کربنی موجب افزایش برهمکنش بین فازهای مختلف می‌گردد که وقوع آن در نانوکامپوزیت‌ها مناسب نمی‌باشد. مقایسه نتایج مربوط مجموع تنش‌های پسماند سلول واحد به روش المان محدود و روش تحلیلی مخازن تحت فشار، نیز نشان دهنده تطابق نتایج دو روش و صحت مدل مخازن تحت فشار می‌باشد.

۵- فهرست علائم

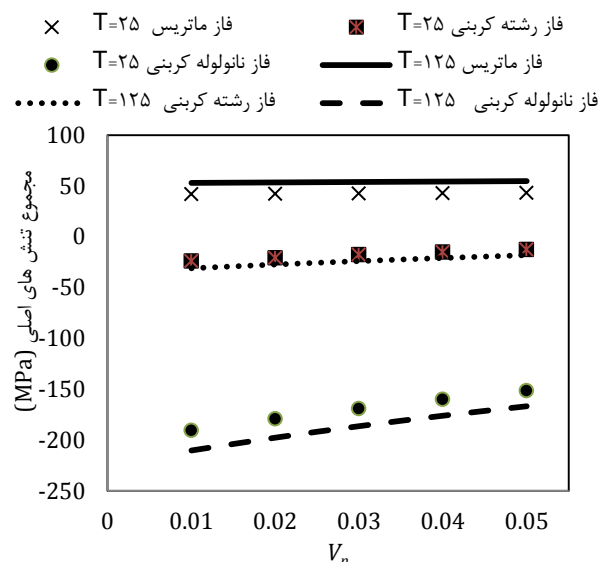
E	مدول الاستیک (GPa)
r	شعاع سلول واحد
V	درصد حجمی
Z	طول سلول واحد (mm)

علائم یونانی

α	ضریب انبساط حرارتی ($\frac{1}{c^0}$)
ΔT	تغییرات دما (c^0)
ϵ	کرنش
ν	ضریب پواسون
σ	تنش (MPa)



شکل ۱۲ مقایسه مجموع تنش‌های اصلی روش المان محدود و روش تحلیلی در حالت قرارگرفتن نانولوله به صورت حلقه‌گون بر رشته کربنی



شکل ۱۳ مقایسه مجموع تنش‌های اصلی به دست آمده در دماهای متفاوت محیط و دمای پخت

نتایج نشان می‌دهد که تغییر ضریب انبساط حرارتی ماتریس بر اثر دما، برای تنش‌های پسماند فاز ماتریس بیش از فاز رشته کربنی و نانولوله کربنی موثر می‌باشد. تغییر تنش‌های پسماند در نانولوله کربنی کمتر از ۱٪ به دست آمده است، و این تغییرات در فاز ماتریس کمتر از ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد، که در حدود ۲۰ درصد تنش‌های فاز ماتریس است.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق انجام شده، با اعمال و توسعه مدل مخازن تحت فشار، توزیع تنش‌های پسماند میکرومکانیک در یک سلول واحد سه‌فازی به صورت سه بعدی انجام شده است. سلول واحد سه‌فازی شامل فازهای رشته کربنی، نانولوله کربنی و ماتریس پلیمری می‌باشد. با توجه به متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی رشته کربنی و نانولوله کربنی در راستاهای عرضی و طولی، جهت‌گیری متفاوت نانولوله‌های کربنی به صورت موازی با رشته کربنی (حالت

[18] Haddon, R. C. Itkis, M. E. Bekyarova, E. and Yu, A., "Multiscale Carbon Nanotube-Fiber Reinforcements for Composites", US Pattern No.7867468, 2011.

[19] Li, J. Wu, Z. Huang, C. and Li, L., "Multiscale Carbon Nanotube-Woven Glass Fiber Reinforced Cyanate Ester/Epoxy Composites for Enhanced Mechanical and Thermal Properties", Composites science and technology, Vol. 104, pp. 81-88, 2014.

[20] An, Q. Rider, A. N. and Thostenoni, E. T., "Electrophoretic Deposition of Carbon Nanotubes onto Carbon-Fiber Fabric for Production of Carbon/Epoxy Composites with Improved Mechanical Properties", Carbon, Vol. 50, No. 11, pp. 4130-4143, 2012.

[21] Otsuka, K. Abe, Y. Kanai, N. Kobayashi, Y. Takenaka, S. and Tanabe, E., "Synthesis of Carbon Nanotubes on Ni/Carbon-Fiber Catalysts Under Mild Conditions", Carbon, Vol. 42, No. 4, pp. 727-736, 2004.

[22] Ismagilov, Z. R. Shikina, N. V. Kruchinin, V. N. Rudina, N. A. Ushakov, V. A. and Vasenin, N. T., "Development of Methods of Growing Carbon Nanofibers on Silica Glass Fiber Supports", Catalysis today, Vol. 102-103, pp. 85-93, 2005.

[23] Rahaman, A. and Kar, K., "Carbon Nanomaterials Grown on E-glass Fibers and Their Application in Composite", Composites Science and Technology, Vol. 101, No. 1, pp. 1-10, 2014.

[24] Rahaman, M. Zainuddin, S. Hosur, M. Malone, J. Salam, M. and Kumar, A., "Improvements in Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of E-glass/eEpoxy Composites Using Amino Functionalized MWCNTs", Composite Structures, Vol. 94, No. 8, pp. 2397-2406, 2012.

[25] Shazed, M. Suraya, A. Rahmanian, S. and Salleh, M. M., "Effect of Fibre Coating and Geometry on the Tensile Properties of Hybrid Carbon Nanotube Coated Carbon Fibre Reinforced Composite", Materials & Design, Vol. 54, pp. 660-669, 2014.

[26] Shokrieh, M. Daneshvar, A. and Akbari, S., "Reduction of Thermal Residual Stresses of Laminated Polymer Composites by Addition of Carbon Nanotubes", Materials & Design, Vol. 53, pp. 209-216, 2014.

[27] Hu, N. Qiu, J. Li, Y. Chang, C. Atobe, S. and Fukunaga, H., "Multi-Scale Numerical Simulations of Thermal Expansion Properties of CNT-Reinforced Nanocomposites", Nanoscale research letters, Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, 2013.

[28] Ghasemi, A. H. and Mohammadi, M., "Development of Circular Disk Model for Polymeric Matrix Nanocomposites", Accepted for publication in Journal of Computational Methodes in Engineering.

بالانویس‌ها

T	راستای عرضی
L	راستای طولی
زیرنویس‌ها	
d	فاز رشته کربنی
m	فاز ماتریس
n	فاز نانولوله
r	راستای شعاعی
θ	راستای مماسی

۶- مراجع

[1] Ghasemi, A. R. and Shokrieh, M. M., "Development of An Integral Method for Determination of Non-uniform Residual Stresses in Laminated Composites," In Persian, Iranian Journal of Polymer Science & Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 355-374, 2008.

[2] Shokrieh, M. M. and Ghasemi, A. R., "Simulation of Central Hole Drilling Process for Measurement of Residual Stresses in Isotropic, Orthotropic, and Laminated Composite Plates, Journal of composite materials, Vol. 41, No. 4, pp. 435-452, 2007.

[3] Ghasemi, A. R. Taheri-Behrooz, F. and Shokrieh, M. M., "Determination of Non-uniform Residual Stresses in Laminated Composites Using Integral Hole drilling Method: Experimental Evaluation", Journal of composite materials, Vol. 48, No. 4, pp. 415-425, 2014.

[4] Ghasemi, A. R. and Mohammadi, M., "Calculation of Calibration Factors for Determination of Residual Stresses in Fiber-metal Laminates Using Incremental Hole-drilling Method," In Persian, Journal of the science and technology of composites, Vol. 1, No. 1, pp. 35-44, 2014.

[5] Mohammadi, M. and Ghasemi, A. R., "Applications of the Incremental Hole-Drilling Method for Measurement of Non-Uniform Residual Stresses in Fiber Metal Laminates", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 335-345, 2015.

[6] Levin, I. M. Kaplan, W. D. Brandon, D. and Wieder, T., "Residual Stresses in Alumina-SiC Nanocomposites", Acta metallurgica et materialia, Vol. 42, No. 4, pp. 1147-1154, 1994.

[7] Todd, R. Bourke, M. Borsa, C. and Brook, R., "Neutron Diffraction Measurements of Residual Stresses in Alumina/SiC Nanocomposites, Acta materialia, Vol. 45, No. 4, pp. 1791-1800, 1997.

[8] Shokrieh, M., "Residual Stresses in Composite Materials", Woodhead Publishing, pp. 256-287, 2014.

[9] Quek, M., "Analysis of Residual Stresses in a Single Fibre-Matrix Composite". International Journal of Adhesion & Adhesive, Vol. 24, No. 5, pp. 379-388, 2004.

[10] Shokrieh, M.M. and Safarabadi, M., "Three-dimensional Analysis of Micro-residual Stresses in Fibrous Composites Based on the Energy Method: a Study Including Interphase Effects", Journal of Composite Materials, Vol. 46, No. 6, pp. 727-735, 2011.

[11] Shokrieh, M. M. Safarabadi, M. and Ghaanee, A. A., "New Three-dimensional Analytical Model to Simulate Microresidual Stresses in Polymer Matrix Composites", Mechanics of Composite Materials, Vol. 48, No. 3, pp. 273-284, 2012.

[12] Jayaraman, K. and Reifsnider, K. L., "Residual Stresses in a Composite with Continuously Varying Youngs Modulus in the Fiber/matrix Interphase", Journal of composite materials, Vol. 26, No. 6, pp. 770-791, 1992.

[13] Niak, R. A., "Simplified Micromechanical Equations for Thermal Residual Stress Analysis of Coated Fiber Composites", Journal of composites technology research, Vol. 14, No. 3, pp. 182-186, 1992.

[14] Ghasemi, A. R. Mohammadi, M. M. and Moradi, M., "Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Polymer Composites Reinforced by Multi-Walled Carbon Nanotube for Reduction of Residual Stresses", In Persian, Iranian journal of polymer science and technology, Vol. 27, No. 3, pp. 213-230, 2014.

[15] Gabr, M. H. Okumura, W. Ueda, H. Kuriyama, W. Uzawa, K. and Kimpara, I., "Mechanical and Thermal Properties of Carbon Fiber/polypropylene Composite Filled with Nano-clay", Composites Part B: Engineering, Vol. 69, pp. 94-100, 2015.

[16] Ghasemi, A. R. Mohammadi, M. and Mohandes, M., "The Role of Carbon Nanofibers on Thermo-mechanical Properties of Polymer Matrix Composites and Their Effect on Reduction of Residual Stresses", Composites Part B: Engineering, Vol. 77, pp. 519-527, 2015.

[17] Lubineau, G. and Rahaman, A., "A Review of Strategies for Improving the Degradation Properties of Laminated Continuous-fiber/Epoxy Composites with Carbon-based Nanoreinforcements", Carbon, Vol. 50, No. 7, pp. 2377-2395, 2012.