



اثرات فاز میانی بر خواص مکانیکی مواد مرکب با توزیع اتفاقی الیاف تحت بارگذاری خارج از محور

محمد جواد محمودی^{1*}، محمد کاظم حسنزاده اقدم²، رضا انصاری³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* تهران، صندوق پستی 167651719، sbu.ac.ir، mj_mahmoudi

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 دی 1393

پذیرش: 07 اسفند 1393

ارائه در سایت: 15 فروردین 1394

کلید واژگان:

ماده مرکب سه فاز

میکرومکانیک

بارگذاری خارج از محور

فاز میانی

توزیع اتفاقی

بنیان روابط خواص - ساختاری مناسب برای مواد مرکب سه فاز از اصل مهمی برای چنین موادی جهت طراحی‌های مطمئن می‌باشد. در این مطالعه، یک مدل تحلیلی پایه میکرومکانیکی سه بعدی جهت ارزیابی اثرات فاز میانی بر خواص مکانیکی مواد مرکب الیافی سه فاز تحت بارگذاری خارج از محور ارائه می‌شود. المان حجمی نماینده ماده مرکب شامل سه فاز تقویت (الیاف بلند)، زمینه و ناحیه فاز میانی می‌باشد که رفتار هر سه فاز بصورت ایزوتروپ و الاستیک خطی فرض می‌شوند. آرایش الیاف در زمینه بصورت اتفاقی با توزیع یکنواخت، فرض شده و الیاف توسط فاز میانی احاطه می‌شوند. اثرات فاز میانی مانند ضخامت و مدول یانگ آن بر خواص مکانیکی ماده مرکب الیافی در بارگذاری خارج از محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثرات درصد حجمی الیاف با در نظر گرفتن فاز میانی و بدون آن بر پاسخ ماده مرکب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با تعریف پارامتری تحت عنوان نسبت تقویت فاز میانی، نتایج نشان می‌دهد که شدت اثر فاز میانی بر مدول یانگ ماده مرکب از 0 درجه (بارگذاری طولی) تا 90 درجه (بارگذاری عرضی) افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با مدل میکرومکانیکی حاضر می‌تواند جهت طراحی بهینه مواد مرکب با بالاترین خواص مکانیکی مفید باشد.

Interphase effects on the mechanical properties of randomly distributed fiber reinforced composites subjected to off-axis loading

Mohammad Javad Mahmoodi^{1*}, Mohammad Kazem Hassanzadeh Aghdam², Reza Ansari³

1- Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Faculty of Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

3- Faculty of Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

* P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, mj_mahmoudi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 December 2014
Accepted 26 February 2015
Available Online 04 April 2015

Keywords:

Three-phase composite
Micromechanics
Off-axis loading
Interphase
Random distribution

ABSTRACT

Establishing accurate structure-property relationships for three-phase composites is a fundamental task about reliable design of such materials. In this study, a three-dimensional micromechanics-based analytical model is presented to evaluate the effects of interphase on the mechanical properties of three-phase fibrous composites under off-axis loading. The representative volume element of composites consists of three phases including reinforcement (long fiber), matrix and interphase all three phases of which are assumed to be isotropic and linear elastic. The state of arrangement of fiber within the matrix materials is assumed to be random with uniform distribution and fibers are surrounded by the interphase. The effects of interphase such as its thickness and stiffness on the mechanical properties of fibrous composites under off-axis loading are investigated. Moreover, the influences of fiber volume fraction with and without considering interphase on the response of composite materials are examined. By introducing a parameter which is called the interphase reinforcement ratio, the results demonstrate that the intensity of interphase effects on Young's modulus of composites increases from 0 degree (longitudinal loading) to 90 degrees (transverse loading). The obtained results by the present micromechanical model could be useful to optimal design of composite materials with superior mechanical properties.

چندجسسی از ریزساختارهای تشکیل‌دهنده آن ماده است. مشخصات ذاتی

ساختارهای تشکیل‌دهنده ماده مرکب در روش میکرومکانیک حفظ می-

شود و خواص مؤثر ماده مرکب بر حسب خواص اجزای تشکیل‌دهنده شامل

1- مقدمه

هدف اصلی علم میکرومکانیک بدست آوردن خواص ماکروسکوپی مواد

Please cite this article using:

M. J. Mahmoodi, M. K. Hassanzadeh Aghdam, R. Ansari, Interphase effects on the mechanical properties of randomly distributed fiber reinforced composites subjected to off-axis loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 217-226, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توزیع اتفاقی⁹ نانوذرات در زمینه پلیمری بر خواص ترمو-مکانیکی مواد مرکب توسعه داده شده است. همچنین این مدل جهت بررسی خرابی در مواد مرکب الیاف بلند دو فاز [13,14] و الیاف کوتاه¹⁰ دو فاز [15] تحت بارگذاری های چند محوری مورد استفاده قرار گرفته است.

از روش های عددی و مدل های تحلیلی جهت استخراج رفتار کلی مواد مرکب سه فاز با دانستن خواص اجزای سازنده ماده مرکب، استفاده می-شود. بمنظور مطالعه اثرات فاز میانی [16] و همچنین استفاده از پوشش هایی جهت محافظت از الیاف [17] از مدل های تحلیلی استوانه ای استفاده شده است. پاگانو و تاندن [18,19] با استفاده از مدل سلول واحد، خواص مؤثر مواد مرکب ترموآلاستیک¹¹ را استخراج کردند. در مرجع [20] روشی جهت حصول خواص مؤثر مواد مرکب سه فاز با الیاف پوشش داده شده، ارائه شده است. یه [21] اثرات فاز میانی را بر مواد مرکب الاستوپلاستیک مطالعه نمود. لاگایچه و همکارانش [22] با استفاده از روش عددی به بررسی رفتار مواد مرکب سه فاز پرداختند. لیو و همکارانش [23] با استفاده از روش المان مرزی¹²، خواص مکانیکی مواد مرکب سه فاز را مورد مطالعه قرار دادند. در [24] با استفاده از مدل المان محدود¹³ اثر پارامترهای فاز میانی بر خواص مکانیکی مواد مرکب الیاف بلند و مواد مرکب ذره ای کروی¹⁴ بررسی شد. بیشتر تحقیقات انجام شده در خصوص تحلیل مواد مرکب سه فاز محدود به آرایش منظم الیاف می شوند [24]. این در حالی است که در عمل توزیع الیاف در زمینه بصورت اتفاقی می باشد. از طرفی دیگر، مطالعات انجام شده در حوزه مواد مرکب الیافی سه فاز تنها تحت بارگذاری های طولی و عرضی مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف از این پژوهش بررسی اثرات فاز میانی بر خواص مکانیکی مواد مرکب الیافی سه فاز تحت بارگذاری خارج از محوری¹⁵ با استفاده از مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده [12] می باشد. به منظور در نظر گرفتن توزیع واقعی الیاف در زمینه و فاز میانی، المان حجمی نماینده ماده مرکب به $c \times r$ سلول گسترش می یابد. فاز میانی نیز بعنوان فاز سوم با خواص مکانیکی و ضخامت مشخص در ماده مرکب در نظر گرفته می شود که سطح خارجی الیاف را احاطه می کند. اثرات درصد حجمی الیاف و پارامترهای فاز میانی شامل مدول یانگ و ضخامت آن بر خواص مکانیکی ماده مرکب الیافی سه فاز از 0 درجه (بارگذاری طولی) تا 90 درجه (بارگذاری عرضی) مورد بررسی قرار می گیرد. بعلاوه نشان داده می شود که برخلاف مواد مرکب دوفازی که شامل توزیع اتفاقی الیاف در زمینه بوده و خواص مؤثر آن ها وابسته به تعداد سلول های المان نماینده نیست، در تحلیل مواد مرکب سه فاز انتخاب تعداد سلول های مناسب بسیار مهم است. در این تحلیل، سه فاز ماده مرکب شامل تقویت، زمینه و فاز میانی بعنوان یک ماده الاستیک خطی و ایزوتروپ در نظر گرفته می شوند. همچنین شرایط اتصال کامل بین فازهای ماده مرکب اعمال می شود.

2- المان حجمی نماینده

المان حجمی نماینده ماده مرکب سه فاز (الیاف، زمینه و فاز میانی) در شکل 1 نشان داده شده است. بیشتر مدل های المان محدود و تحلیلی جهت استخراج پاسخ مواد مرکب دو فاز [13] و سه فاز [24] آرایش الیاف را

فاز تقویت، زمینه و فاز میانی¹ بین فاز تقویت و زمینه در مواد مرکب چند فاز، نسبت حجمی آن ها و عکس العمل متقابل بین این فازها، که مربوط به هندسه میکروساختاری است، تعیین می شود. در این تحقیق، مطالعه میکرومکانیکی اثرات فاز میانی مواد مرکب سه فاز الیافی تحت بارگذاری خارج از محوری مورد بررسی قرار می گیرد. در این نوع از مواد مرکب فاز میانی بین الیاف و زمینه به دلیل استفاده از پوشش دهنده های محافظ² الیاف، وارد می شود.

فاز میانی در مواد مرکب تقویت شده الیافی لایه های نازکی بین الیاف، بعنوان فاز تقویت و زمینه هستند. بطور عمده این فازهای میانی به دو دلیل به وجود می آیند. یکی به دلیل واکنش شیمیایی بین فاز تقویت و زمینه و دوم، به علت استفاده از روکش های محافظ بر فاز تقویت در حین فرآیند تولید جهت اطمینان از اتصال مناسب بین فاز تقویت و زمینه می باشد [1]. با وجود ضخامت کم، این فازهای میانی می توانند اثرات عمده ای بر پاسخ مواد مرکب داشته باشند. بمنظور طراحی های بهینه و کاربرد مناسب چنین مواد مرکبی، بایستی اثرات فاز میانی بخوبی شناخته شود. در حقیقت، استفاده درست و مؤثر از مواد مرکب بستگی به انتقال بار از زمینه به فاز تقویت دارد که توسط همین فازهای میانی انجام می گیرد. در واقع بیشتر خرابی های شناخته شده در مواد مرکب مانند جدایی لایه میانی³ یا ترک در زمینه، در نزدیکی همین ناحیه اتفاق می افتد. بنابراین مدل سازی دقیق و درک صحیح از اثرات فاز میانی بر رفتار کلی مواد مرکب ضروری بنظر می رسد.

مدل های میکرومکانیکی عددی [۲,3] و تحلیلی [۴,5] متعددی جهت پیش بینی پاسخ مواد مرکب دو فاز تحت شرایط بارگذاری مختلف حرارتی و مکانیکی ارائه شده است. مدل های استوانه ای و سلول واحد⁴ دو گروه عمده از مدل های میکرومکانیکی تحلیلی با فرضیات ساده شونده هندسه مواد مرکب هستند. در مدل های استوانه ای، هندسه ای المان حجمی نماینده ماده مرکب شامل الیافی با مقطع دایروی احاطه شده با زمینه ای با مقطع دایروی می باشد [6]. در مدل های سلول واحد، سطح مقطع المان حجمی نماینده⁵ ماده مرکب شامل الیاف مستطیلی احاطه شده با مواد زمینه بصورت مستطیلی می باشد. روش سلولی⁶ [۷,8] و روش سلولی تعمیم یافته⁷ [۹,10] جز معروفترین مدل های سلول واحد هستند. یک مدل میکرومکانیکی تحلیلی بر پایه ی روش سلول واحد نیز در [11] بمنظور مطالعه رفتار مواد مرکب زمینه فلزی ارائه شده است. مدل سلول واحد ساده شده⁸ [12] یک مدل تحلیلی میکرومکانیکی بوده که رفتار کلی ماده مرکب را از ریزساختارهای تشکیل دهنده ی آن استخراج می نماید. دقت پاسخ این مدل میکرومکانیکی بستگی به مدل سازی دقیق فازها و عکس العمل بین آن ها در المان حجمی انتخاب شده برای ماده مرکب خواهد داشت. در روابط اولیه این مدل میکرومکانیکی [11]، المان حجمی نماینده ماده مرکب شامل 4 سلول بود که یکی از آن ها شامل الیاف و بقیه را مواد زمینه تشکیل می داد. قابلیت کاربرد این مدل در پیش بینی رفتار مواد مرکب دو فاز تحت شرایط مختلف بارگذاری با توجه به اعتبارسنجی های انجام گرفته با داده های تجربی و روش های عددی به اثبات رسیده است [11]. این مدل در مرجع [12] بمنظور بررسی اثرات

1- Interphase

2- Protective coatings

3- Interfacial debonding

4- Unit cell model

5- Representative volume element

6- Method of cell

7- Generalized method of cell

8- Simplified unit cell model

9- Random distribution

10- Short fiber

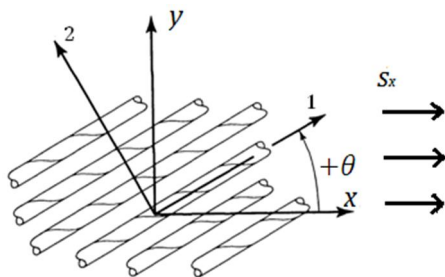
11- Thermoelastic composites

12- Boundary element method

13- Finite element method

14- Spherical particle composites

15- Off-axis loading



شکل 2 نمونه ی بارگذاری شده خارج از محور

رابطه (3) از تعادل تنش های عمودی و برشی (τ_{ik}^{ij}) در سطوح مشترک هر دو سلول مجاور بدست می آید:

$$\begin{aligned} \sigma_2^{1j} &= \sigma_2^{ij} \quad (i > 1) \\ \sigma_3^{i1} &= \sigma_3^{ij} \quad (j > 1) \\ \tau_{23}^{ij} &= 0, \tau_{13}^{ij} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

از سازگاری کرنش های میکرو (ε_{kl}^{ij}) داخل هر سلول می توان رابطه (4) را نوشت [12-11]:

$$\varepsilon_{12}^{i1} = \varepsilon_{12}^{ij} \quad (j \neq 1) \quad (4)$$

با فرض اتصال کامل لایه های میانی، تغییر مکان المان نماینده در یک جهت برابر مجموع تغییر مکان سلول های یک ردیف در همان جهت است، پس مطابق رابطه (5) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^c a_i \varepsilon_2^{i1} &= \sum_{i=1}^c a_i \varepsilon_2^{ij} = L_c \bar{\varepsilon}_2 \quad (j > 1) \\ \sum_{j=1}^r b_j \varepsilon_3^{1j} &= \sum_{j=1}^r b_j \varepsilon_3^{ij} = L_r \bar{\varepsilon}_3 \quad (i > 1) \\ \varepsilon_1^{ij} &= \bar{\varepsilon}_1 \quad (i > 1, j > 1) \end{aligned} \quad (5)$$

معادلات ساختاری سه بعدی برای سلول ij به صورت رابطه (6) بیان می شود:

$$\varepsilon^{ij} = S^{ij} \sigma^{ij} \quad (6)$$

که در آن ε^{ij} بردار کرنش نرمال، S^{ij} ماتریس نرمی حالت الاستیک، σ^{ij} بردار تنش نرمال است. از معادله (4) و با استفاده از قانون هوک در حالت بارگذاری برشی، معادله (7) را می توان نوشت:

$$\tau_{12}^{ij} = \frac{\tau_{12}^{i1}}{G_{i1}} G_{ij} \quad (j \neq 1) \quad (7)$$

با ترکیب معادلات (5) و (6)، معادلات (8) استخراج می شود:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^c \left\{ \frac{a_i}{E_{i1}} \sigma_2^{11} - \frac{a_i}{E_{ij}} \sigma_2^{1j} - \frac{a_i}{E_{i1}} v_{i1} \sigma_3^{i1} + \frac{a_i}{E_{ij}} v_{ij} \sigma_3^{ij} \right. \\ \left. - \frac{a_i}{E_{i1}} v_{i1} \sigma_1^{i1} + \frac{a_i}{E_{ij}} v_{ij} \sigma_1^{ij} \right\} \\ = 0 \quad (j \neq 1) \\ \sum_{j=1}^r \left\{ -\frac{b_j}{E_{1j}} v_{1j} \sigma_2^{1j} + \frac{b_j}{E_{ij}} v_{ij} \sigma_2^{ij} + \frac{b_j}{E_{1j}} \sigma_3^{11} - \frac{b_j}{E_{ij}} \sigma_3^{i1} \right. \\ \left. - \frac{b_j}{E_{1j}} v_{1j} \sigma_1^{1j} + \frac{b_j}{E_{ij}} v_{ij} \sigma_1^{ij} \right\} \\ = 0 \quad (i \neq 1) \\ \left\{ -\frac{1}{E_1} \sigma_2^{11} + \frac{v_{ij}}{E_{ij}} \sigma_2^{ij} - \frac{1}{E_{11}} \sigma_3^{11} + \frac{v_{ij}}{E_{ij}} \sigma_3^{i1} + \frac{1}{E_{11}} \sigma_1^{11} \right. \\ \left. + \frac{1}{E_{ij}} \sigma_1^{ij} \right\} = 0 \quad (i \neq 1, j \neq 1) \end{aligned} \quad (8)$$

که در رابطه (8) E_{ij} و G_{ij} به ترتیب مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون برای سلول ij می باشد.

بصورت منظم در نظر می گیرند. این آرایش منظم معمولاً بصورت مربعی یا شش گوش¹ می باشد. بعلاوه در بیشتر مدل های تحلیلی مانند روش سلولی [7،8] و تعمیم یافته روش سلولی [9،10] و مدل سلول واحد ساده شده [12،13] الیاف را بصورت مستطیلی در نظر می گیرند. اما در این پژوهش بمنظور در نظر گرفتن هندسه ی واقعی تر ماده مرکب و مدل سازی دقیق تر، المان حجمی نماینده ی ماده مرکب الیافی سه فازی به $r \times c$ سلول مستطیلی تقسیم می شود که الیاف بصورت اتفاقی با توزیع یکنواخت درون زمینه پخش شده و توسط فاز میانی احاطه می شوند (شکل 1). المان حجمی نماینده ماده مرکب دارای طول L_c و L_r به ترتیب در جهت x ، y و طول واحد در جهت z می باشد. اگر i متغیر شمارنده در جهت x و j در جهت y باشد، هر سلول با نام ij شناخته می شود و طول هر یک از سلول ها در جهت x با a_i و در جهت y با b_j مشخص می شود. در شکل 1، t/a ضخامت مؤثر فاز میانی را مشخص میکند.

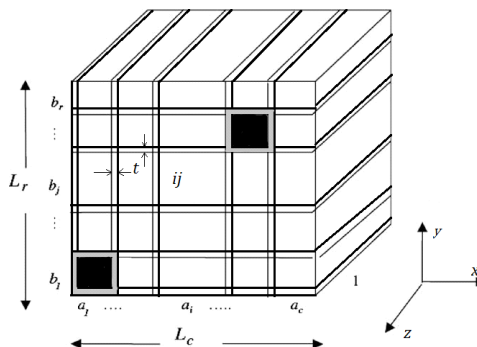
3- معادلات حاکم

در بارگذاری خارج از مرکز مطابق شکل 2، یک بار تک محوری به نمونه ای با الیاف همسو در یک زاویه مشخص (θ) نسبت به جهت بارگذاری وارد می شود. در این نمونه دو سیستم مختصات (x, y) و ($1, 2$) تعریف می شود. x و y به ترتیب جهات بارگذاری و عمود بر جهت بارگذاری بوده و 1 و 2 نیز به ترتیب در جهت الیاف و عمود بر الیاف تعریف می شود (شکل 2). حالت تنش داخل نمونه در مختصات اصلی ماده، شامل سه مولفه تنش، محوری (S_1)، عرضی (S_2) و برشی محوری (S_{12}) می باشد. این مولفه های تنش را میتوان مطابق رابطه (1) از تنش وارده (S_x) به نمونه خارج از محور محاسبه نمود. بر اساس ایده ی مدل های سلول واحد [11،7]، فرض می شود که مؤلفه های جابجایی داخل هر سلول توابعی خطی باشند. همچنین فرض می شود که تنش های نرمال وارده بر المان حجمی نماینده ماده مرکب هیچگونه تنش برشی داخل آن ایجاد نمی کند و بالعکس [15،25].

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos^2 \theta \\ \sin^2 \theta \\ -\sin \theta \cos \theta \end{Bmatrix} S_x \quad (1)$$

از معادله تعادل تنش های میکرو (σ_i^{ij}) در سلول ها و تنش های ماکرو (S_i) اعمالی در مرز المان نماینده از رابطه (2) بدست می آید:

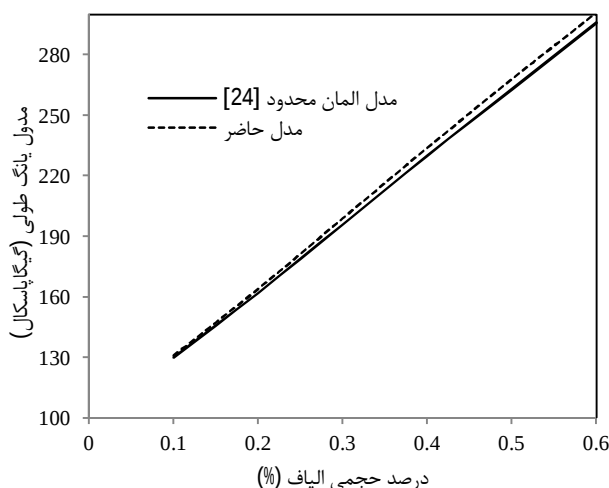
$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^r \sigma_2^{1j} b_j &= S_2 L_r, \quad \sum_{i=1}^c \sigma_3^{i1} a_i = 0 \\ \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^c b_j a_i \sigma_1^{ij} &= S_1 L_r L_c \end{aligned} \quad (2)$$



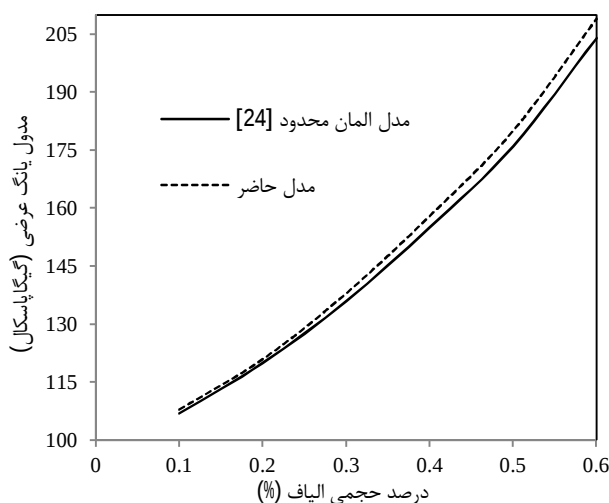
شکل 1 المان حجمی نماینده ماده مرکب الیافی سه فازی

جدول 2 مقایسه خواص مکانیکی ماده مرکب الیافی سه فازی با درصد حجمی 30%

خواص مکانیکی	مدل حاضر	مدل المان محدود [24]
مدول یانگ طولی (گیگاپاسکال)	250/58	251
مدول یانگ عرضی (گیگاپاسکال)	231/34	234
نسبت پواسون طولی	0/2997	0/3058
نسبت پواسون عرضی	0/2987	0/3



شکل 3 تغییرات مدول یانگ طولی در مقابل درصد حجمی



شکل 4 تغییرات مدول یانگ عرضی در مقابل درصد حجمی

با توجه به شکل 3 تغییرات مدول یانگ طولی ماده مرکب سه فازی در برابر درصد حجمی الیاف بصورت خطی می باشد. به ازای درصد حجمی بین 10 تا 60%، تغییرات مدول الاستیک در جهت طولی و عرضی بترتیب از 130 تا 300 گیگاپاسکال و 105 تا 210 گیگاپاسکال می باشد.

5-2- اثرات درصد حجمی الیاف

در این بخش اثرات درصد حجمی الیاف بر خواص مکانیکی ماده مرکب مورد نظر با در نظر گرفتن اثرات فاز میانی و بدون آن تحت بارگذاری خارج از محور مورد بررسی قرار می گیرد. ضخامت مؤثر فاز میانی 0/05 می باشد. شکل 5 تغییرات مدول یانگ نرمال شده را نسبت به زوایای خارج از محوری برای سه درصد حجمی 5، 25 و 50% نشان می دهد. بایستی توجه نمود که مدول

با توجه به معادلات (2)، (7) و (8)، یک دستگاه معادلات خطی با $rx + r + 2 \times c$ معادله با همین تعداد مجهول بصورت رابطه (9) بدست می آید:

$$[A]_{m \times m} \{\sigma\}_{m \times 1} = \{F\}_{m \times 1} \quad m = r \times c + r + 2 \times c \quad (9)$$

که $[A]$ ماتریس ضرایب، $\{\sigma\}$ و $\{F\}$ نیز به ترتیب بردار تنش و نیرو می باشند.

4- نوع ماده مرکب

ماده مرکب در نظر گرفته شده در این پژوهش نیکل/تنگستن، شامل زمینه نیکل تقویت شده با الیاف تنگستن می باشد. در این نوع از ماده مرکب با یک لایه از جنس کربن، فاز تقویت (تنگستن) را می پوشانند. سه فاز ماده مرکب در این تحلیل بعنوان یک ماده الاستیک خطی و ایزوتروپ در نظر گرفته می شود [26]. خواص اجزای سازنده این ماده مرکب سه فازی در جدول 1 ذکر شده است.

5- نتایج و بحث

با استفاده از المان حجمی نماینده ماده مرکب و مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده که به ترتیب در بخش های 2 و 3 توضیح داده شدند، خواص مکانیکی ماده مرکب سه فازی نیکل/تنگستن، که در آن الیاف تنگستن با پوشش کربنی پوشانده شده اند، تحت بارگذاری خارج از محور استخراج می شود. اثرات پارامترهای فاز میانی مانند مدول یانگ و ضخامت آن و همچنین درصد حجمی الیاف بر خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار می گیرد. المان حجمی نماینده ماده مرکب نیز به 50×50 سلول تقسیم می شود که برای تامین نتایج صحیح کافی می باشد.

5-1- اعتبارسنجی مدل

ابتدا به منظور اعتبارسنجی مدل میکرومکانیکی جهت حصول پاسخ مواد مرکب سه فازی، نتایج این مدل برای خواص مکانیکی طولی و عرضی با نتایج روش المان محدود [24] مقایسه می شود. جدول 2 نتایج مدول سلول واحد ساده شده را برای ماده مرکب مورد نظر که الیاف بصورت اتفاقی درون زمینه توزیع شده است را با نتایج روش المان محدود نشان می دهد. درصد حجمی الیاف و ضخامت مؤثر فاز میانی بترتیب برابر 30% و 0/015 می باشد. همانطور که داده های جدول 2 نشان می دهند، نتایج مدل میکرومکانیکی حاضر نزدیک به داده های مدل المان محدود می باشد.

نتایج تحلیلی و تجربی برای بارگذاری خارج از محور برای مواد مرکب سه فازی در تحقیقات قبلی انجام نگرفته است. مطالعات انجام شده در حوزه ی مواد مرکب الیافی سه فازی تنها تحت بارگذاری های طولی و عرضی مورد بررسی قرار گرفته است [24]. شکل های 3 و 4 تغییرات مدول الاستیک ماده مرکب سه فازی را در برابر درصد حجمی الیاف به ترتیب تحت بارگذاری طولی و عرضی نشان می دهد. ضخامت مؤثر فاز میانی 0/015 می باشد. همانطور که شکل های 3 و 4 نشان می دهند نتایج پیش بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر بسیار نزدیک به نتایج مدل سازی المان محدود در [24] می باشد.

جدول 1 خواص اجزای سازنده ماده مرکب سه فازی [26]

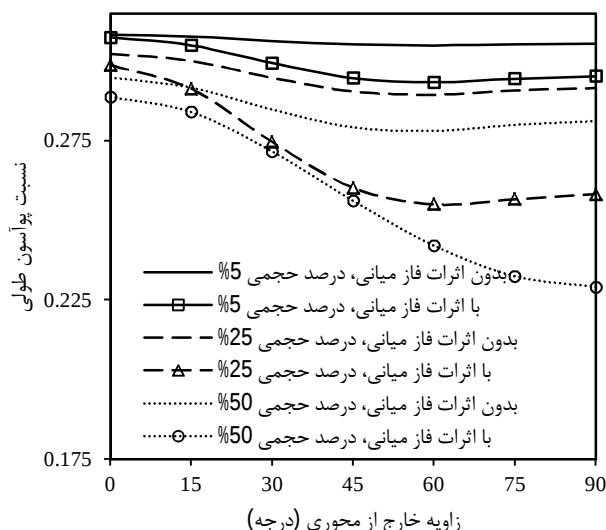
ماده	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	نسبت پواسون
تنگستن (تقویت)	345	0/28
نیکل (زمینه)	214	0/31
پوشش کربن (فاز میانی)	34/48	0/2

25 و 50% بترتیب 0/3076 تا 0/2954، 0/2989 تا 0/2583 و 0/2889 تا 0/2291 می‌باشد.

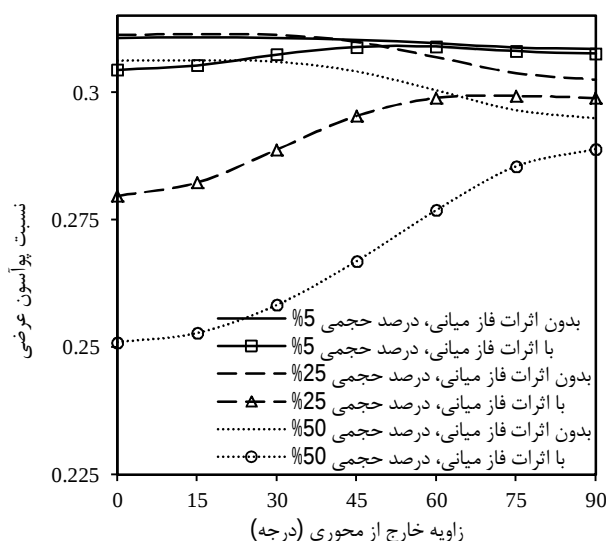
با توجه به شکل 6-ب با در نظر گرفتن اثرات فاز میانی، تغییرات نسبت پواسن مؤثر عرضی نسبت به زوایای خارج از محوری از 0 تا 90 درجه برای سه درصد حجمی 5، 25 و 50% بترتیب 0/3044 تا 0/3076، 0/2797 تا 0/2989 و 0/251 تا 0/2889 می‌باشد.

5-3- اثرات مدول یانگ فاز میانی

به منظور مطالعه اثرات مدول یانگ فاز میانی بر خواص مکانیکی ماده مرکب سه فازی تحت بارگذاری خارج از محور، مطابق [24] سه مقدار 3/448، 34/48 و 344/8 گیگاپاسکال برای مدول یانگ فاز میانی در نظر گرفته می‌شود. درصد حجمی الیاف و ضخامت مؤثر فاز میانی در این قسمت به ترتیب برابر 25% و 0/05 در نظر گرفته می‌شود. شکل 7 تغییرات مدول یانگ نرمال شده را نسبت به زوایای خارج از محوری برای سه مدول یانگ ذکر شده نشان می‌دهد. همچنین شکل 7 شامل نتایج بدون ملاحظه فاز میانی می‌باشد.



شکل 6-الف تغییرات نسبت پواسن طولی نسبت به زوایای خارج از محوری برای درصدهای حجمی مختلف

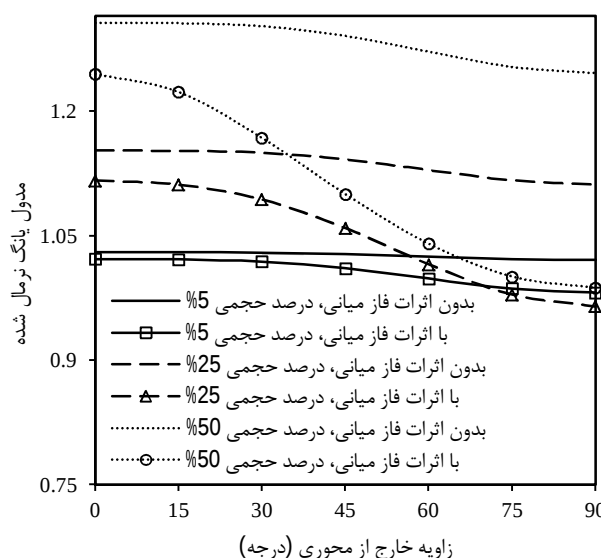


شکل 6-ب تغییرات نسبت پواسن عرضی نسبت به زوایای خارج از محوری برای درصدهای حجمی مختلف

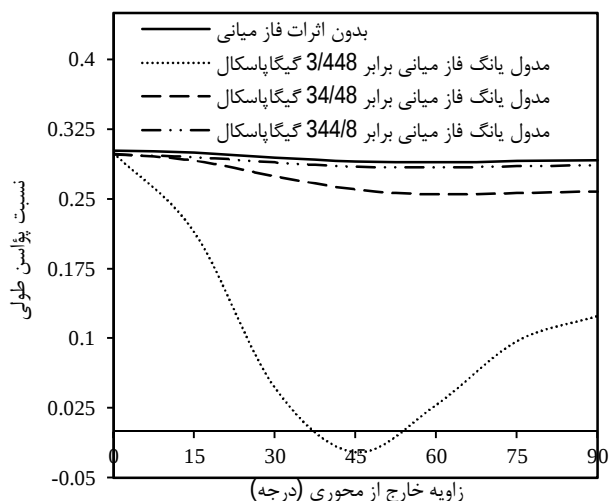
یانگ مؤثر ماده مرکب نسبت به مدول یانگ زمینه نرمال شده است.

با توجه به شکل 5 مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن فاز میانی باعث کاهش مدول یانگ مؤثر ماده مرکب می‌شود که با افزایش درصد حجمی الیاف در یک زاویه خارج از محوری مشخص، این میزان کاهش در مدول یانگ افزایش می‌یابد. در واقع دلیل کاهش مدول یانگ ماده مرکب سه فازی این است که مدول یانگ فاز میانی از مدول یانگ زمینه کمتر می‌باشد. بنابراین با افزایش مدول یانگ فاز میانی می‌توان مدول یانگ ماده مرکب را افزایش داد. از طرفی با افزایش درصد حجمی فاز تقویت، درصد حجمی فاز میانی افزایش یافته که باعث کاهش بیشتر در مدول یانگ ماده مرکب می‌شود. همانطور که شکل 5 نشان می‌دهد اختلاف بین نتایج مدل‌سازی با در نظر گرفتن فاز میانی و بدون آن برای سه درصد حجمی 5، 25 و 50% تحت زاویه صفر درجه (بارگذاری طولی) بترتیب 1/7976، 7/7468 و 13/1396 گیگاپاسکال می‌باشد. نکته مهم دیگری که از شکل 5 می‌توان دریافت این است که با افزایش زاویه خارج از محوری (0 تا 90 درجه) در یک درصد حجمی الیاف مشخص، با وجود فاز میانی و بدون آن، مدول یانگ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل 5 تغییرات مدول یانگ ماده مرکب از 0 تا 90 درجه برای درصد حجمی 25% با در نظر گرفتن اثرات فاز میانی و بدون آن بترتیب 238 تا 206 و 246 تا 237 گیگاپاسکال می‌باشد.

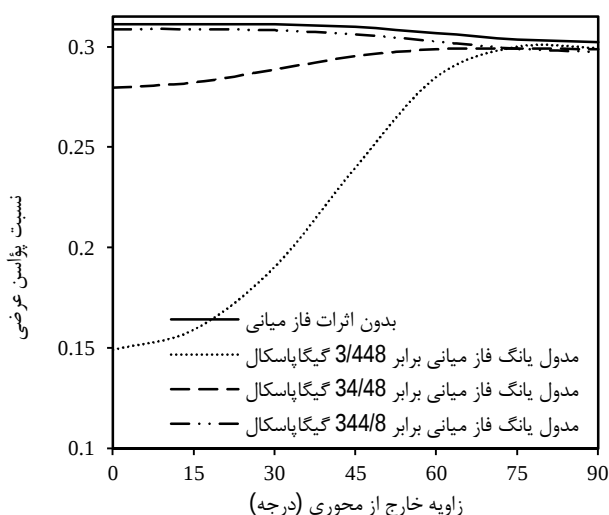
در شکل 6-الف و 6-ب به ترتیب تغییرات نسبت پواسن مؤثر طولی و عرضی را نسبت به زوایای خارج از محوری برای سه درصد حجمی 5، 25 و 50% نشان می‌دهد. با توجه به شکل 6-الف می‌توان مشاهده نمود که با در نظر گرفتن فاز میانی، با تغییر زاویه خارج از محوری از 0 تا 90 درجه، نسبت پواسن طولی کاهش می‌یابد در حالی که با توجه به شکل 6-ب، روند عکس در تغییرات نسبت پواسن عرضی مشاهده می‌شود. شکل 6-ب نشان می‌دهد که روند تغییرات نسبت پواسن عرضی در برابر زاویه خارج از محوری با در نظر گرفتن فاز میانی و بدون آن متفاوت است. در حالی که بدون منظور نمودن فاز میانی نسبت پواسن عرضی از 0 تا 90 درجه کاهش می‌یابد، با لحاظ نمودن فاز میانی ضریب پواسن عرضی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 6-الف با در نظر گرفتن اثرات فاز میانی، تغییرات نسبت پواسن مؤثر طولی نسبت به زوایای خارج از محوری از 0 تا 90 درجه برای سه درصد حجمی 5،



شکل 5 تغییرات مدول یانگ نسبت به زوایای خارج از محوری برای درصدهای حجمی مختلف



شکل 8-الف تغییرات نسبت پواسن طولی نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف مدول یانگ فاز میانی



شکل 8-ب تغییرات نسبت پواسن عرضی نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف مدول یانگ فاز میانی

5-4- اثرات ضخامت فاز میانی

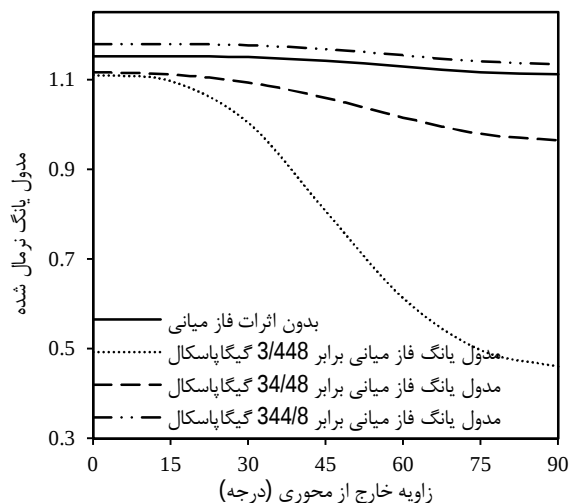
در این قسمت اثرات ضخامت فاز میانی بر خواص مکانیکی ماده مرکب سه فازی در برابر تغییرات زاویه خارج از محوری با در نظر گرفتن سه ضخامت موثر 0/01، 0/05 و 0/1 برای فاز میانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. درصد حجمی الیاف و مدول یانگ فاز میانی به ترتیب برابر 25% و 34/48 گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. شکل 9 تغییرات مدول یانگ نرمال شده را نسبت به زوایای خارج از محوری نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل 9 مشاهده می‌شود، نتایج مدل بدون اثرات فاز میانی مقادیر بیشتری را برای مدول یانگ موثر ماده مرکب به ازای کلیه مقادیر زوایای خارج از محوری پیش‌بینی می‌کند. از طرفی دیگر با افزایش ضخامت موثر فاز میانی تغییرات مدول یانگ ماده مرکب از 0 تا 90 درجه نیز بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش ضخامت فاز میانی اطراف فاز تقویت، درصد حجمی آن بیشتر شده و با توجه به اینکه مدول یانگ فاز میانی کمتر از مدول یانگ زمینه می‌باشد، موجب کاهش مدول الاستیک ماده مرکب سه فازی می‌شود. با توجه به شکل 9 بیشترین و کمترین تغییرات مدول

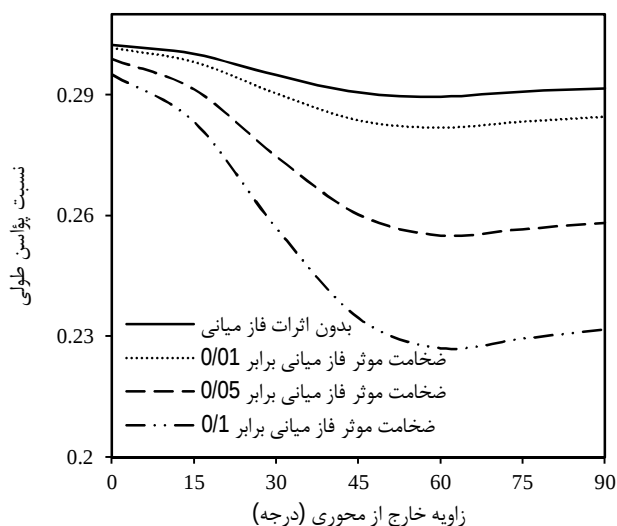
همانطور که از شکل 7 می‌توان نتیجه گرفت، اگر مدول یانگ فاز میانی بزرگتر از مدول یانگ زمینه باشد، باعث تقویت ماده مرکب و اگر کمتر از مدول یانگ زمینه باشد، باعث کاهش سفتی موثر ماده مرکب می‌شود. از طرفی اگر مدول یانگ فاز میانی خیلی کم در نظر گرفته شود (3/448 گیگاپاسکال)، تغییرات مدول یانگ از 0 تا 90 درجه بسیار زیاد خواهد بود. بطوریکه مدول یانگ ماده مرکب از 237 به 98 گیگاپاسکال کاهش می‌یابد. مطابق شکل 7، تا زاویه خارج از محوری 15 درجه تفاوت چندانی برای مدول یانگ ماده مرکب با در نظر گرفتن سفتی فاز میانی برابر 3/448 و 34/48 گیگاپاسکال وجود ندارد. اما از 15 درجه به بعد اختلاف نتایج حاصل از منظور نمودن این مقادیر برای فاز میانی بیشتر شده تا اینکه در 90 درجه (بارگذاری عرضی) به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین جهت طراحی بهینه و مطمئن بایستی توجه داشت که فاز میانی بیشترین تأثیر را بر مدول یانگ عرضی دارد.

در شکل 8-الف و 8-ب به ترتیب تغییرات نسبت پواسن مؤثر طولی و عرضی را نسبت به زوایای خارج از محوری برای سه مدول یانگ ذکر شده فاز میانی و بدون اثرات فاز میانی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 8-الف و 8-ب، مدل ارائه شده بدون اثرات فاز میانی مقادیر بیشتری را برای نسبت پواسن طولی و عرضی بدست می‌دهد. با منظور نمودن مدول یانگ فاز میانی برابر 3/448 گیگاپاسکال روند تغییرات برای نسبت پواسن طولی در برابر زاویه خارج از محوری در مقایسه با دو مقدار دیگر (34/48 و 344/8 گیگاپاسکال) برای مدول یانگ فاز میانی، متفاوت است. با در نظر گرفتن مدول یانگ فاز میانی برابر 3/448 گیگاپاسکال، نسبت پواسن طولی از 0 تا 45 درجه ابتدا بشدت کاهش یافته و سپس از 45 تا 90 درجه افزایش می‌یابد. در حالی که برای مقادیر دیگر مدول یانگ فاز میانی، نسبت پواسن طولی از 0 تا 45 درجه کاهش یافته و سپس ثابت می‌ماند.

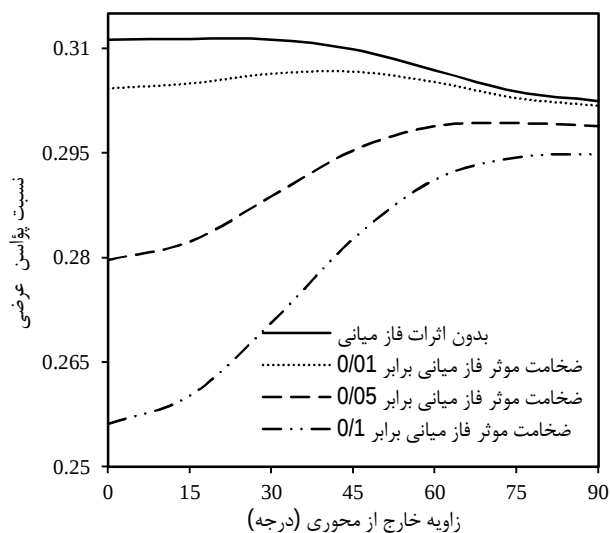
با توجه به شکل 8-ب، روند تغییرات نسبت پواسن عرضی در برابر زوایای خارج از مرکزی، برای دو مقدار مدول یانگ فاز میانی کمتر از مدول یانگ زمینه، از 0 تا 90 درجه در حال افزایش می‌باشد. در حالی که برای مدول یانگ فاز میانی برابر 344/8 گیگاپاسکال و بدون در نظر گرفتن اثرات فاز میانی، نسبت پواسن عرضی از 0 تا 90 درجه در حال کاهش می‌باشد. بیشترین و کمترین تغییرات نسبت پواسن عرضی به ترتیب در بارگذاری طولی و عرضی به ازای مقادیر مختلف مدول یانگ فاز میانی مشاهده می‌شود.



شکل 7 تغییرات مدول یانگ نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف مدول یانگ فاز میانی



شکل 10-الف تغییرات نسبت پواسن طولی نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف ضخامت فاز میانی



شکل 10-ب تغییرات نسبت پواسن عرضی نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف ضخامت فاز میانی

که C_{if} خواص ماده مرکب با در نظر گرفتن فاز میانی و اثرات هندسه تقویت و C_f خواص ماده مرکب بدون منظور نمودن اثرات فاز میانی می‌باشد. در رابطه (10)، M نیز خاصیت زمینه است.

در شکل 11، با مدل میکرومکانیکی ارائه شده، نسبت تقویت فاز میانی برای مدول یانگ مؤثر ماده مرکب در برابر زاویه خارج از مرکزی نشان داده شده است. در این مطالعه درصد حجمی الیاف و ضخامت مؤثر فاز میانی به ترتیب برابر 25% و 0/05 در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر زاویه خارج از محوری از 0 تا 90 درجه، شدت اثر فاز میانی بر مدول یانگ ماده مرکب بیشتر می‌شود، بطوریکه کمترین مقدار شدت اثر فاز میانی برای بارگذاری طولی (0 درجه) و بیشترین تأثیر آن برای بارگذاری عرضی (90 درجه) می‌باشد. مقادیر منفی برای نسبت تقویت فاز میانی بدین مفهوم است که به ازای مدول یانگ فاز میانی کوچکتر از مدول یانگ زمینه، مدول یانگ ماده مرکب کاهش می‌یابد. با توجه به شکل 11، با در نظر گرفتن مدول یانگ فاز میانی برابر 3/448 گیگاپاسکال، بیشترین اثر فاز میانی بر مدول یانگ ماده مرکب در بارگذاری عرضی مشاهده می‌شود. شکل 11 نشان

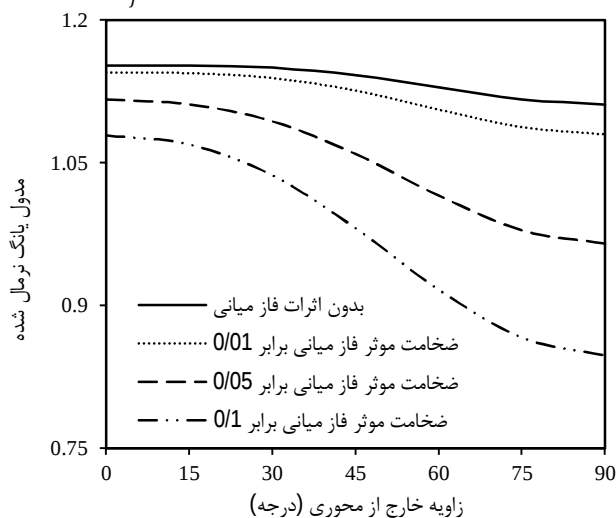
الاستیک به ازای زاویه 90 درجه (از 237 تا 181 گیگاپاسکال) و 0 درجه (246 تا 230 گیگاپاسکال) رخ می‌دهد.

در شکل 10-الف و 10-ب به ترتیب تغییرات نسبت پواسن مؤثر طولی و عرضی نسبت به زوایای خارج از محوری برای سه ضخامت ذکر شده فاز میانی و بدون اثرات فاز میانی نشان داده شده است. با توجه به شکل 10-الف و 10-ب، مدل ارائه شده بدون اثرات فاز میانی مقادیر بیشتری را برای نسبت پواسن طولی و عرضی به ازای کلیه مقادیر زوایای خارج از محوری بدست می‌دهد. با توجه به شکل 10-الف، نسبت پواسن طولی از 0 تا تقریباً 60 درجه با شیب زیادی کاهش یافته و از 60 تا 90 درجه با یک شیب بسیار کم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت فاز میانی تغییرات نسبت پواسن طولی از 0 تا 90 درجه بیشتر می‌شود. شکل 10-ب نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضخامت مؤثر فاز میانی برابر 0/01 نسبت پواسن عرضی از 0 تا حدود 45 درجه با شیب بسیار کمی افزایش یافته و سپس با یک شیب بیشتری از 45 تا 90 درجه کاهش می‌یابد. بدون در نظر گرفتن اثرات فاز میانی نیز نسبت پواسن عرضی تا 30 درجه ثابت بوده و از 30 تا 90 درجه (بارگذاری عرضی) کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به شکل 10-ب مشاهده می‌شود که اگر ضخامت مؤثر فاز میانی برابر 0/05 یا 0/1 در نظر گرفته شود، نسبت پواسن عرضی از 0 تا 90 درجه افزایش می‌یابد. تغییرات نسبت پواسن عرضی به ازای این دو ضخامت مؤثر به ترتیب از 0/2779 تا 0/2989 و 0/2562 تا 0/2949 می‌باشد.

5-5- بررسی شدت اثر فاز میانی

به منظور شناخت و ارزیابی بهتر اثرات فاز میانی بر خواص مکانیکی مواد مرکب چند فازی، پارامتری تحت عنوان نسبت تقویت فاز میانی ارائه می‌شود. این پارامتر بعنوان نسبت تقویت سازه‌ی ماده مرکب مورد نظر زمانی که تقویت ناشی از اثرات فاز میانی و الیاف باشد، نسبت به حالتی که فاز میانی در نظر گرفته نمی‌شود، ارائه می‌گردد. در حقیقت دلیل عمده استفاده از این تعریف جدا کردن اثرات تقویت ماده ناشی از هندسه فاز تقویت و یا خواص مواد از اثرات فاز میانی می‌باشد [12] برای یک خاصیت ماده مرکب (C)، نسبت تقویت فاز میانی با رابطه‌ی (10) تعریف می‌گردد:

$$IRR, C = \frac{C_{if} - C_f}{C_f - M} \quad (10)$$

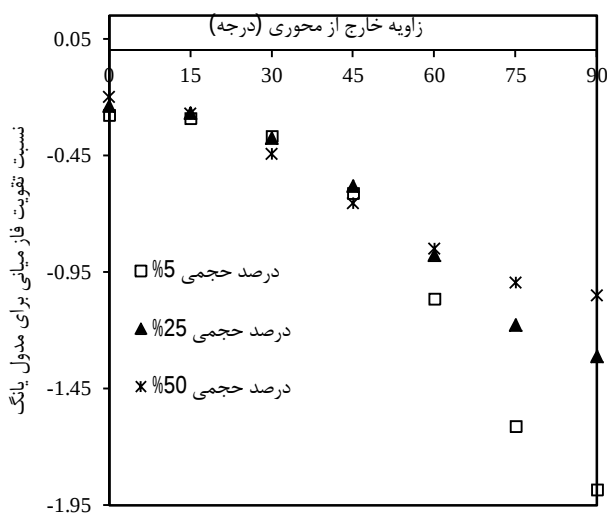


شکل 9 تغییرات مدول یانگ نسبت به زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف ضخامت فاز میانی

در شکل 13، با استفاده از مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده، نسبت تقویت فاز میانی برای مدول یانگ مؤثر ماده مرکب در برابر زاویه خارج از محوری نشان داده شده است. در شکل 13 اثرات درصد حجمی الیاف 5، 25 و 50% بر مدول یانگ ماده مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی ضخامت مؤثر و مدول یانگ فاز میانی بترتیب برابر 0/05 و 34/48 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. شکل 13 نشان می‌دهد که نسبت تقویت فاز میانی برای مدول یانگ ماده مرکب به ازای درصدهای حجمی الیاف مختلف، از 0 تا 45 درجه‌ی زاویه خارج از محوری تفاوت چندانی ندارد. اما از 45 تا 90 درجه، نسبت تقویت فاز میانی با کاهش درصد حجمی الیاف بیشتر می‌شود بطوریکه بیشترین مقدار آن در درصد حجمی الیاف 5% و تحت بارگذاری عرضی می‌شود. با توجه به شکل 13، نسبت تقویت فاز میانی برای درصد حجمی الیاف 5% از 0 تا 90 درجه، 0/276 تا 1/884 می‌باشد.

5-6- بررسی اثرات تعداد سلول‌های المان حجمی نماینده

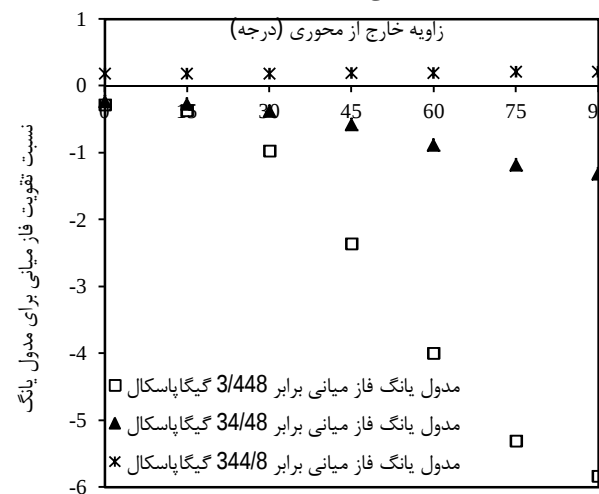
در تحقیقات قبلی نشان داده شده است که تعداد سلول‌های المان حجمی نماینده ماده مرکب دوفازی تأثیر چندانی بر پاسخ ماده مرکب با توزیع اتفاقی الیاف در زمینه تحت بارگذاری‌های طولی و عرضی ندارد. در این قسمت اثرات تعداد سلول‌های المان حجمی بر خواص مکانیکی ماده مرکب سه فازی با توزیع اتفاقی الیاف در زمینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در واقع هدف از این بخش، ارائه یک تحلیل حساسیت به تعداد مش برای المان حجمی نماینده ماده مرکب سه فازی با مدل میکرومکانیکی ارائه شده می‌باشد. بدین منظور المان حجمی نماینده ماده مرکب با تعداد سلول 25x25، 50x50 و 75x75 در نظر گرفته می‌شود. درصد حجمی الیاف نیز 25% فرض می‌شود. ابتدا بدون در نظر گرفتن اثرات فاز میانی، مدول یانگ ماده مرکب نیکل/تنگستن با تعداد المان‌های مورد نظر تحت بارگذاری خارج از محوری بدست می‌آید. شکل 14 تغییرات مدول یانگ ماده مرکب دوفازی را در زوایای خارج از محوری با تعداد سلول‌های 25x25، 50x50 و 75x75 نشان می‌دهد. شکل 14 نشان می‌دهد که تعداد سلول‌های المان حجمی نماینده ماده مرکب دوفازی تأثیر چندانی بر پاسخ ماده مرکب ندارد. نتایج مدل میکرومکانیکی با تعداد سلول‌های مختلف بسیار بهم نزدیک می‌باشند.



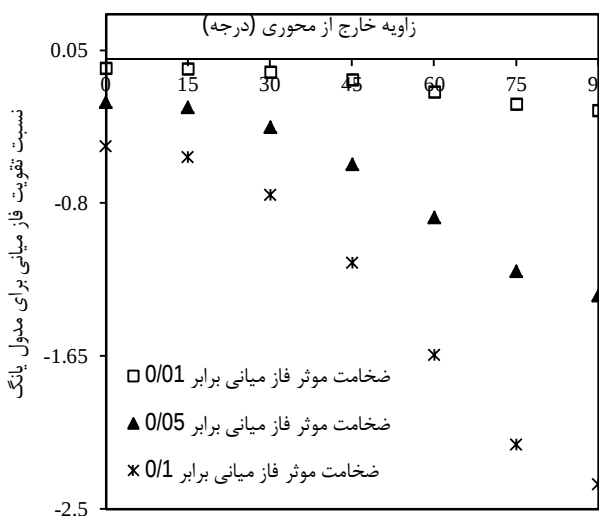
شکل 13 نسبت تقویت فاز میانی مدول یانگ در برابر زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف درصد حجمی الیاف

می‌دهد که برای سه مقدار 3/448، 34/48 و 344/8 گیگاپاسکال، تغییرات نسبت تقویت فاز میانی برای مدول الاستیک ماده مرکب از 0 تا 90 درجه بترتیب برابر 0/2795 تا 5/8308، 0/2369 تا 1/3124 و 0/1741 تا 0/2077 می‌باشد.

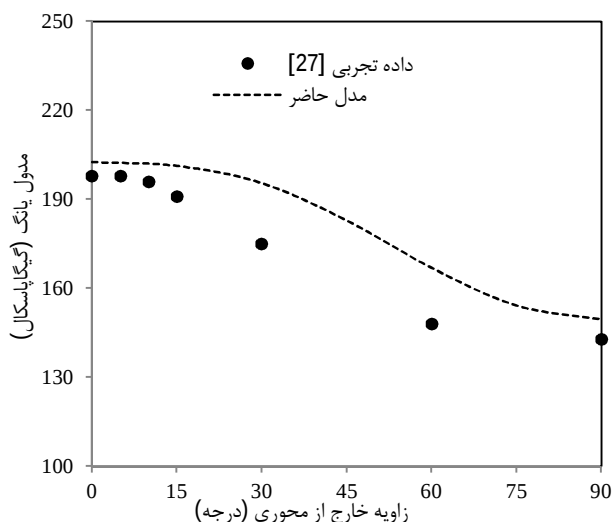
در شکل 12، با استفاده از مدل میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده، نسبت تقویت فاز میانی برای مدول یانگ ماده مرکب در برابر زاویه خارج از محوری نشان داده شده است. در شکل 12 اثرات ضخامت مؤثر فاز میانی 0/01، 0/05 و 0/1 بر مدول یانگ ماده مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه درصد حجمی الیاف و مدول یانگ فاز میانی بترتیب برابر 25% و 34/48 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 12 می‌توان مشاهده نمود که نسبت تقویت فاز میانی برای مدول یانگ ماده مرکب با افزایش زاویه خارج از محوری (از 0 تا 90 درجه) افزایش می‌یابد، بطوریکه به ازای مقادیر مختلف ضخامت مؤثر فاز میانی، بیشترین تأثیر فاز میانی در بارگذاری عرضی (90 درجه) مشاهده می‌شود. همانگونه که شکل 12 نشان می‌دهد با افزایش ضخامت فاز میانی، نسبت تقویت فاز میانی برای مدول الاستیک ماده مرکب افزایش می‌یابد.



شکل 11 نسبت تقویت فاز میانی مدول یانگ در برابر زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف مدول یانگ فاز میانی



شکل 12 نسبت تقویت فاز میانی مدول یانگ در برابر زوایای خارج از محوری برای مقادیر مختلف ضخامت فاز میانی



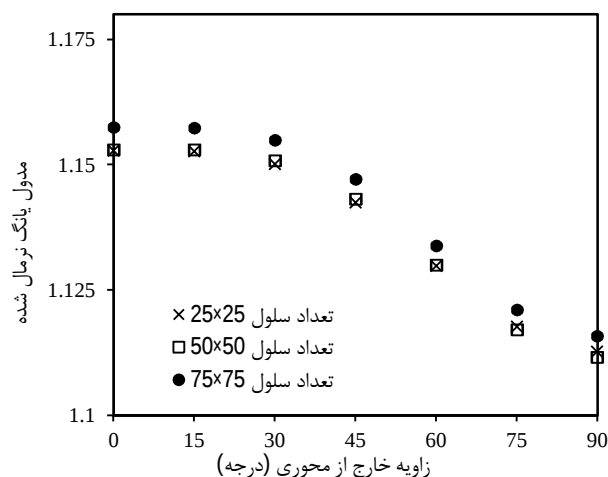
شکل 16 مقایسه مدول یانگ برای ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم تحت بارگذاری خارج از محور

6- جمع بندی و نتیجه گیری

با استفاده از یک مدل میکرومکانیکی سه بعدی، اثرات فاز میانی بر خواص مکانیکی ماده مرکب سه فاز نیکل/تنگستن که الیاف تنگستن با پوششی از جنس کربن روکش می شوند، بررسی شد. اثرات پارامترهای فاز میانی مانند مدول یانگ و ضخامت آن و همچنین اثرات درصد حجمی الیاف بر پاسخ ماده مرکب سه فاز مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نسبت تقویت فاز میانی بر خواص مکانیکی ماده مرکب بررسی شد. در تحلیل های انجام گرفته هر سه فاز اجزای تشکیل دهنده ماده مرکب شامل الیاف، زمینه و فاز میانی بصورت الاستیک خطی و ایزوتروپ فرض شد و شرایط اتصال کامل بین این فازها منظور گردید. از مطالعات انجام گرفته مشخص شد که اگر ماده مورد استفاده برای فاز میانی به اندازه کافی جهت انتقال بار بین فازها سفت نباشد، خواص موثر ماده مرکب، بویژه در جهت عرضی، به اندازه قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین با افزایش مدول یانگ فاز میانی می توان مدول یانگ ماده مرکب را افزایش داد. انتخاب مواد مناسب جهت استفاده بعنوان فاز میانی بایستی با دقت فراوان انجام بگیرد. همچنین بررسی های انجام شده نشان داد که برخلاف مواد مرکب دوفازی که پاسخ کلی ماده مرکب وابسته به تعداد سلول های المان حجمی ماده مرکب نیست، در مواد مرکب سه فاز انتخاب تعداد سلول های المان حجمی بمنظور تعادل بین دقت در مدل سازی و همچنین برآورد هزینه بسیار مهم می باشد. نتایج پیش بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر بسیار نزدیک به داده های روش المان محدود در خصوص مواد مرکب سه فاز و داده های تجربی برای مواد مرکب دو فاز تحت بارگذاری خارج از محور شد.

7- مراجع

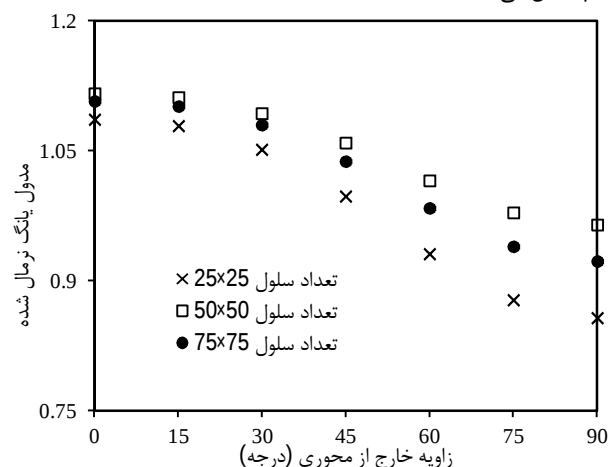
- [1] S. Nie, C. Basaran, A micromechanical model for effective elastic properties of particulate composites with imperfect interfacial bonds, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 14, pp. 4179-4191, 2005.
- [2] M. Eynbeygi, M. Mohammadi Aghdam, A micromechanical study on the electro-elastic behavior of piezoelectric fibrous composites using element free Galerkin method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 175-184, 2014 (In Persian)
- [3] M. Bayat, M. M. Aghdam, A micromechanics-based analysis of effects of square and hexagonal fiber arrays in fibrous composites using DQEM, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 32, pp. 32-40, 2012.
- [4] R. Hill, A self-consistent mechanics of composite materials. *Journal of the*



شکل 14 اثر تعداد سلول های المان حجمی بر مدول یانگ ماده مرکب دو فاز تحت بارگذاری خارج از محوری

حال تأثیر تعداد مختلف سلول های المان حجمی نماینده ماده مرکب سه فاز مورد بررسی قرار می گیرد. شکل 15 تغییرات مدول یانگ ماده مرکب سه فاز را در زوایای خارج از محوری با تعداد سلول های 25x25، 50x50 و 75x75 نشان می دهد. ضخامت مؤثر و مدول یانگ فاز میانی به ترتیب برابر 0/05 و 34/48 گیگاپاسکال در نظر گرفته می شود. شکل 15 نشان می دهد که نتایج مدل حاضر با تعداد سلول های 50x50 و 75x75 بهم نزدیک می باشد. از طرفی زمان لازم جهت اجرای برنامه با تعداد سلول 75x75 تقریباً 6 برابر زمان لازم جهت اجرا برنامه با تعداد سلول 50x50 می باشد. با توجه به زمان محاسبات و هزینه های مربوطه، بنظر می رسد که یک المان حجمی برای ماده مرکب سه فاز با تعداد سلول های 50x50 برای بررسی اثرات فاز میانی مناسب باشد.

با استفاده از مدل میکرومکانیکی ارایه شده، مدول الاستیک ماده مرکب دوفازی سیلیکون کارباید/تیتانیوم تحت بارگذاری خارج از محور که داده های تجربی برای آن موجود می باشد، استخراج می شود. شکل 16 نتایج پیش بینی شده توسط مدل حاضر را در مقایسه با داده های تجربی [27] نشان می دهد. خواص الاستیک اجزای سازنده این نوع ماده مرکب در [13] آمده است. درصد حجمی الیاف 33% می باشد. با توجه به شکل 16 تغییرات مدول یانگ برای ماده مرکب سیلیکون کارباید/تیتانیوم از 0 تا 90 درجه، از 150 تا 202 گیگاپاسکال می باشد.



شکل 15 اثر تعداد سلول های المان حجمی بر مدول یانگ ماده مرکب سه فاز تحت بارگذاری خارج از محوری

- [16] J. A. Nairn, Thermoelastic analysis of residual stresses in unidirectional, highperformance composites, *Polymer Composites*, Vol. 6, No. 2, 123-130, 1985.
- [17] Y. Mikata, M. Taya, Stress field in a coated continuous fiber composite subjected to thermo-mechanical loadings. *Journal of Composite Materials*, Vol. 19, No. 6, pp. 554-578, 1985.
- [18] N. J. Pagano, G. P. Tandon, Thermo-elastic model for multidirectional coated-fiber composites: traction formulation, *Composites Science and Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 247-269, 1990.
- [19] N. J. Pagano, G. P. Tandon, Elastic response of multidirectional coated fiber composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 273-293, 1990.
- [20] A. Dasgupta, S. M. Bhandarkar, A generalized self-consistent Mori-Tanaka scheme for fiber-composites with multiple interphases, *Mechanics of Materials*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-82, 1992.
- [21] J. R. Yeh, The effect of interphase on the transverse properties of composites, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 29, No. 20, pp. 2493-2502, 1992.
- [22] M. Lagache A. Agbossou, J. Pastor, Role of interphase on elastic behavior of composite materials: theoretical and experimental analysis, *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, pp. 1141-1157, 1994.
- [23] Y. J. Liu, N. Xu, J. F. Luo, Modeling of interphases in fiber-reinforced composites under transverse loading using boundary element method, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 67, pp. 41-49, 2000.
- [24] S. Kari, H. Berger, U. Gabbert, R. Guinovart-Díaz, J. Bravo-Castillero, R. Rodríguez-Ramos, Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 684-691, 2008.
- [25] M. J. Mahmoodei, M. K. Hassanzadeh Aghdam, R. Ansari, Effects of interphase damage on the elastoviscoplastic behavior of general unidirectional metal matrix composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 99-107, 2015 (In Persian).
- [26] Y. Benveniste, G. J. Dvorak, T. Chen, Stress fields in composites with coated inclusions, *Mechanics of Materials*, Vol. 7, pp. 305-317, 1989.
- [27] M. P. Thomas, Tensile properties of Ti-6-4/SM 1240 titanium metal matrix composite with off-axis fiber. SMC Technical report No. DERA/SMC/SM2/TR 970145, defense evaluation and research agency, Farnborough, UK; 1997.
- Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 13, pp. 213-22, 1965.
- [5] Z. Hashin, B.W. Rosen, The elastic moduli of fiber-reinforced materials, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 223-232, 1964.
- [6] M. Uemura, H. Iyama, Y. Yamaguchi, Thermal residual stresses in filament wound carbon-fiber-reinforced composites, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 2, No. 3-4, pp. 393-412, 1979.
- [7] J. Aboudi, Closed form constitutive equations for metal matrix composites, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 25, No. 9, , pp. 1229-1240, 1987.
- [8] J. Aboudi, Micromechanical analysis of composites by the method of cells, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 42, No. 7, pp. 193-221, 1989.
- [9] R. Haj-Ali, J. Aboudi, Nonlinear micromechanical formulation of the high fidelity generalized method of cells, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 13, pp. 2577-2592, 2009.
- [10] B.A. Bednarczyk, S.M. Arnold, Transverse Tensile and Creep Modeling of Continuously Reinforced Titanium Composites with Local Debonding, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 7, pp. 1987-2017, 2002.
- [11] M.M. Aghdam, D.J. Smith, M.J. Pavier, Finite Element Micromechanical Modelling of Yield and Collapse Behaviour of Metal Matrix Composites, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, No. 3, pp. 499-528, 2000.
- [12] R. Ansari, M. K. Hassanzadeh Aghdam, Effects of regular and random distribution of silica nanoparticles on the thermo-elastic and viscoelastic properties of polymer nanocomposites- Micromechanics-based analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 99-107, 2015 (In Persian).
- [13] M.J. Mahmoodei, M.M. Aghdam, M. Shakeri, Micromechanical modeling of interface damage of metal matrix composites subjected to off-axis loading, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 2, pp. 829-836, 2010.
- [14] M.J. Mahmoodei, M.M. Aghdam, Damage analysis of fiber reinforced Ti-alloy subjected to multi-axial loading—A micromechanical approach, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 27, pp. 7983-7990, 2011.
- [15] M.K. Hassanzadeh Aghdam, M.J. Mahmoodei, Micromechanical damage analysis of short fiber titanium matrix composites under combined axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 86-97, 2013. (In Persian)