مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳/ صفحه ۱۶۳–۱۷۴





# تحلیل خزش اولیه کره نانو کامیوزیتی جدارضخیم، تحت بارگذاری حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی براساس مدل ويسكوالاستيک برگر

هادی محمدی هویه'\*\*، علیرضا نداف اسکوئی کو مصطفی سیاح بادخور ک ً مدرس دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، سمنان دانشیار دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، سمنان مدرس دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، سمنان تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱/۲۲ ۱۳۹۵/۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

### چکیدہ

در این مقاله با استفاده از مدل برگر به بررسی تاریخچه تنشها و کرنشهای خزشی کره جدارضخیم نانوکامپوزیتی ساخته شده از پلی ايميد تقويت شده با نانو ذرات دى اكسيد سيليكون پرداخته شده است. بار گذارى كره، شامل ميدانهاى يكنواخت حرارتى و مغناطيسى بههمراه فشار هيدرواستاتيك داخلي ميباشد. با استفاده از روابط الاستيسيته، معادله ساختاري حاكم بر مسئله بهدست ميآيد. حل اين معادله با در نظر گرفتن شرایط مرزی مکانیکی، در لحظه صفر منجر به یافتن تنشها وکرنشهای ترموالاستیک میگردد. این تنشها در مرحله ابتدایی حل خزش مسئله مورد استفاده قرار می گیرند. با مشتق گیری زمانی از معادله حاکم بر مسئله و استفاده از مدل ساختاری برگر و ارتباط بین این مدل و روابط پرانتل-روس، معادله دیفرانسیل جدید حاکم بر مسئله در حالت خزشی حاصل میشود. حل این معادله با استفاده از روش عددی نرخ تنش، تاریخچه تنش ها وکرنش های خزشی را فراهم می نماید. نتایج این یژوهش نشان می دهند که بیشترین مقدار تنش مؤثر و کرنشهای خزشی در جداره داخلی کره اتفاق میافتد. همچنین مرحله اول خزش که تا حدود ۱۰۰۰ ثانیه به طول میانجامد با بیشترین سرعت تغییرات تنشها و کرنشها همراه بوده و بعد از این مرحله تنشها و کرنشها وارد مرحله پایدار شده و با سرعت تقريبا يكنواختى تغيير مىنمايند.

كلمات كليدى: كره نانو كامپوزيتى؛ خزش اوليه؛ مدل برگر؛ تاريخچه تنشها وكرنشها.

## Primary Creep Analysis of Nanocomposite Thick-Walled Sphere Under Thermal, Magnetic and Mechanical Loading Using Viscoelastic Bergurs Model

H. Mohammadi Hooyeh<sup>1,\*</sup>, A. Naddaf Oskouei<sup>2</sup>, M. Sayah Badkhor<sup>3</sup> <sup>1</sup> Lecturer, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Semnan, Iran. <sup>2</sup> Associate Professor, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Semnan, Iran. <sup>3</sup> Lecturer, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Semnan, Iran.

#### Abstract

In this study, stresses and strains history of nanocomposite thick walled sphere wich is made of Polyimide reinforced by SiO<sub>2</sub> nanoparticles are investigated using the viscoelastic Bergurs model. Loading of sphere includes the thermal and magnetic uniform field under hydrostatic inner pressure. Constitutive model of the problem based on elasticity relationship is obtained. Solving this equation with respect to mechanical boundary conditions leads to stresses and strains at zero time so called thermoelastic solution in which these stresses are used at beginning creep problem procedure. With differentiating of constitutive differential equation with respect of time and using relationship between Bergurs model and Prandtl-Reuss relations drives a new constitutive equation for creep. History of stresses and strains are provided by solving this equation using numerical strain rate method. Results show that maximum effective stress and creep strains occurs at inner surface. Also the primary creep stage occurs up to 1000 second with quick change of stresses and strains. After this stage the value of stresses and strains change with uniform speed.

Keywords: Nanocomposite Sphere; Primary Creep; Bergurs Model; History of Stresses and Strains.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۹۱۳۱۶۴۸۵۶۷ ؛ فکس: ۲۱۷۷۱۰۴۹۲۲

آدرس پست الکترونیک: hmohammadihooyeh@eyc.ac.ir

# محمدی هویه و همکاران ۱۶۴

#### ۱– مقدمه

یکی از مهمترین پلیمرهای مقاوم به حرارت پلی ايميدها (PIs) هستند. اين نوع پليمرها به علت خواص مکانیکی فوق العاده در محیطهای مختلف دمایی از مهمترین مواد مورد استفاده مهندسان میباشند. با افزودن برخی نانوذرات به این پلیمرها می توان باعث کاهش اثر ضریب انبساط حرارتی و همچنین افزایش خواص مکانیکی همانند چقرمگی شکست و استحکام کششی آنها گردید. به این پلیمرهای تقویت شده با نانوذره، نانو کامپوزیتهای معدنی می گویند [۱–۴]. باتوجه به اهمیت استفاده این نوع مواد در دماهای بالا تحلیل خزش این مواد از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در زمینه تحلیل خزش صورت گرفته است. لاو و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۲ به مدلسازی رفتار خزشی مخازن تحت فشار فولادی پرداختند. ارائه توزیع تنشهای الاستیک حرارتی در جداره، توزیع تنشهای مؤثر فن میسز برای سطوح مختلف و همچنین توزیع تنشهای مؤثر نورتون در طول زمان از مهمترین نتایج ایشان بهشمار میرود. قربانپور و همکارانش [۶] تأثیرات خزش وابسته به زمان، برروی رفتارهای الکتروترمومکانیکی یک کره پیزوالکتریک را بررسی کردند. آنها از یک روش عددی برای محاسبه تاریخچه تنشها، پتانسیل الکتریکی و جابهجایی در یک کره جدار ضخیم توخالی که تحت فشار داخلی و میدان دمایی قرارداشت، استفاده نمودند. روش استفاده شده، بر مبنای روش مندلسون استوار است که تغییرات تنش، جابهجایی و پتانسیل الکتریکی را در طی زمان، در طول ضخامت کره پیشبینی مینماید. دای و همکارانش [۷] تأثیرات بارگذاری مغناطیسی و حرارتی را بر روی رفتار ترموالاستیک مخازن استوانهای و کرهای جدارضخیم که از مواد هدفمند ساخته شدهاند را بررسی نمودند. تحلیل خزش کرههای پیزوالکتریک هدفمند تحت بار گذاری الکتروترمومکانیکال نیز توسط لقمان و مرادی [۸] بررسی گردید. آنها با استفاده از مدل ساختاری نورتن بازتوزیع تنشهای مؤثر و پتانسیل الکتریکی را در طول فرآیند خزش بررسی نمودند و نشان دادند که با اعمال پتانسیل الکتریکی میتوان میزان تنش مؤثر اعمالی بر کره را كاهش داد. لقمان و اعظمي [٩] يك حل جديد تحليلي-عددی برای دیسک دوار پیزوالکتریک از جنس پلیمر ارائه

نمودند. آنها رفتارخزشی مواد را بهصورت غیرخطی در نظر گرفتند و نشان دادند که نتایج حاصل از حل تحلیلی قرابت خوبی با نتایج عددی دارد. تحلیل خزش استوانههای جدارضخیم از جنس مواد مدرج تابعی که تحت یک میدان حرارتی قرار دارد توسط داوودی کشکولی و زمانی نژاد انجام شد [۱۰]. آنها با استفاده از روش نرخ تنش و به کارگیری بسط تیلور، توزیع تنشهای مماسی و شعاعی را برای گذشت ده ساعت از فرآیند خزش ارائه نمودند. آنها در اقدامی مشابه رفتار خزشی استوانههای چرخان هدفمند، تحت میدان حرارتی را بررسی نمودند. آنها توزیع تنشها، کرنشها و جابجایی شعاعی را برای ثوابت مختلف غیرهمگنی ماده، ارائه نمودند [11]. حسيني كردخيلي و ليواني [1۲] رفتار خزشي دیسک دوار با ضخامت متغیر که تحت شرایط مرزی مختلف قرار دارد را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که تغییرات دما تأثیر قابل توجهی بر روی نرخهای خزش دیسک دوار هدفمند دارد. وکیلی تهامی و همکاران [۱۳] در اقدامی جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک و براساس رفتار خزشی ماده به طراحی بهینه چندهدفه دیسک دوار هدفمند با خواص وابسته به دما پرداختند. آنها این کار را با اهدافی چون کاهش وزن و افزایش ضریب اطمینان کمینه انجام دادند.

در تمامی پژوهشهای گذشته تحلیل خزش به طور اجمالی برای هر سه ناحیه خزش انجام گرفته است و یا اینکه خزش در ناحیه پایدار بررسی شده است. اما از آنجا که ناحیه اولیه منحنی خزش با کم شدن آهنگ خزش و بیشترین سرعت تغییرات همراه است، تحلیل این ناحیه از اهمیت فراوانی برخوردار است. لذا در این پژوهش رفتارخزش کره جدارضخیم نانوکامپوزیتی تحت میدان حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی به طور موشکافانه برای ناحیه اولیه بررسی شده است. در ادامه مسئله برای مرحله ثانویه (حالت پایدار) نیز است. در ادامه مسئله برای مرحله ثانویه (حالت پایدار) نیز بررسی شده و با حالت اولیه مقایسه شده است. همچنین سیلیکا مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین منظور برای تحلیل خزش چنین موادی از مدل ساختاری برگر برای توصیف رفتار خزشی ماده استفاده گردیده است.

۲- هندسه، شرایط بارگذاری و مدل ساختاری
 ۲-۱- هندسه و بارگذاری

یک کره جدارضخیم نانو کامپوزیتی ساخته شده از پلی ایمید تقویت شده با ذرات دی اکسید سیلیکون با شعاع داخلی  $r_i$  و شعاع خارجی  $r_0$  در نظر گرفته شده است. این کره در معرض میدان دمایی یکنواخت با دمای سطح داخلی  $T_i$  و خارجی  $T_0$  ومیدان یکنواخت مغناطیسی  $\varphi$  می باشد. همچنین کره مورد نظر تحت فشار داخلی  $P_i$  قرار دارد. شکل ۱ سطح مقطعی از کره به همراه بارگذاری های مسئله را نشان می دهد.



شکل ۱- سطح مقطعی از کره نانوکامپوزیتی تقویت شده با ذرات دی اکسید سیلیکون

۲-۲- مدل ساختاری

برای پیش بینی رفتار خزشی مواد در بلندمدت از معادلات و اطلاعات به دست آمده از آزمایشات شتاب دار در مدت زمان کوتاه استفاده می شود. دو مدل برگر و فایندلی<sup>۱</sup> که از نتایج حاصل از این آزمایش ها به دست می آیند، به طور وسیعی برای پیش بینی رفتار خزشی مواد پلیمری استفاده می شود. مدل برگر که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است به-صورت مجموعه ترکیبی از دو مدل ماکسول<sup>۲</sup> و کلوین –ویت<sup>۲</sup> می باشد. در شکل ۲ نمایش المان های فنر و دمپری این مدل مشاهده می شود. رابطه (۱) در این مدل برای تنش اعمالی به صورت زیر نوشته می شود:

 $\sigma = E_1 \varepsilon_1 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \tag{1}$ (1)
(7) همچنین کرنش کل طبق این مدل بهصورت رابطه (

 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (۲)  $\eta_{29} \eta_{19}$  که در روابط (۱) و (۲)،  $E_{29} e_{2}$  مدول الاستیسیته و $\eta_{19} e_{27}$  و  $\dot{\sigma}_{12} e_{23} e_{13}$  مدول الاستیسیته و $\eta_{13} e_{23} e_{23}$   $\dot{\sigma}_{12} e_{23} e_{23}$  مدل ماکسول میباشد.  $\varepsilon_3 iیز که معرف مدل کلوین-ویت میباشد،$  $<math>\dot{\sigma}_{13} e_{23} e_{23}$  مدل ماکسول میباشد (۱) و (۲) تحت شرایط اولیه 0 = t مدل ساختاری به صورت (۱) و (۲) تحت شرایط اولیه (1) :

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_1} t , \quad \tau = \frac{\eta_2}{E_2} \tag{(7)}$$



شکل ۲- مدل برگر با المانهای فنر و دمپر

- در رابطه (۳)،  $\tau$  زمان تأخیری بوده که از مدل کلوین ویت بهدست میآید. با مشتق گیری از رابطه (۳) نرخ کرنش بهصورت زیر حاصل میشود:  $\dot{\epsilon}(\sigma,t) = \frac{\sigma}{n_c} + \frac{\sigma}{n_c} e^{-\frac{t}{\tau}}$  (۴)

کلیه اطلاعات مربوط به مدل برگر با استفاده از آزمایش وانگ و ژائو [۱۶] بر روی پلی ایمیدها حاصل گردید. در این پژوهش از دادههای مربوط به آزمایش نانو کامپوزیت با درصد ترکیبی دیاکسید سیلیکون به میزان ۱٪ استفاده شده است که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۱ ارائه شدهاند.

نوشته میشود:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Findley

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Maxwell <sup>3</sup> Kelvin-Voigt

و کامپوزیت با ۱٪	خزش مربوط به نانو	جدول ۱- پارامترهای
	سىد سىلىكون [١۶]	دى اك

$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\eta_1(\times 10^5 \text{GPas})$	$\eta_2$ (GPas)	$\tau(s)$
1/177	۶/۹۰۸	1/44	1811	222/2

منحنیهای کرنش و نرخ کرنش خزشی بهدست آمده توسط تستهای خزش کوتاه مدت بر روی نانوکامپوزیت مذکور برای تنشهای متفاوت در شکلهای ۳ و ۴ نشان داده شدهاند. دو ناحیه از سه ناحیه منحنی خزش در این دو شکل بهطور واضح مشاهده میشود. خزش اولیه تا زمان نزدیک به بهطور واضح مشاهده میشود. خزش اولیه تا زمان نزدیک به پیوسته کاهش میافتد که درطول آن نرخ کرنش خزشی پیوسته کاهش مییابد. مرحله ثانویه از زمان ۲۰۰۰ ثانیه شروع شده و در آن نرخ کرنش خزشی ثابت میباشد. کمترین نرخ کرنش خزشی نیز در این مرحله اتفاق میافتد.



شکل ۳- منحنی کرنش خزشی برای تستهای کوتاه مدت



۳- فرمول بندی مسئله
 ۳-۱- روابط کرنش – تغییر مکان

روابط بین کرنشها و تغییر مکان شعاعی در مختصات کروی بهصورت زیر نوشته میشود:

 $\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} , \quad \varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\phi} = \frac{u}{r}$ (۵)  $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{r} -$ 

۳-۲- روابط تنش – کرنش

روابط تنش–کرنش با فرض کرنش کل بهصورت مجموع کرنشهای الاستیک، حرارتی و خزشی بهصورت زیر نوشته می شود [۱۷]:

$$\sigma_r = c_{11}(\varepsilon_r - \varepsilon_r^c) + 2c_{12}(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^c) - \lambda_1 T \tag{9}$$

$$\sigma_{\theta} = c_{12}(\varepsilon_r - \varepsilon_r^c) + (c_{12} + c_{11})(\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\theta}^c) - \lambda_2 T \qquad (\forall)$$

$$\lambda_1 = c_{11} \alpha_r + 2c_{12} \alpha_\theta$$

$$\lambda_2 = c_{12}\alpha_r + (c_{11} + c_{12})\alpha_\theta \tag{(A)}$$

که در روابط (۶) تا (۸) تا (۸) نوب  $\alpha_r$ ،  $\alpha_{\theta}$ ،  $\alpha_r$ ,  $\epsilon_{\theta}^c$ ,  $\epsilon_r^c$  (۸) تا (۶) کرنشهای خرشی، ضرایب انبساط حرارتی و تنشها در جهات شعاعی و مماسی و *T* توزیع انتقال حرارت میباشد. همچنین  $\alpha = \alpha_{\theta} = \alpha_r$  و  $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$  و درنظر گرفته می شود. ضرایب <sub>11</sub> و <sub>12</sub> در ایز به صورت زیر تعریف می شوند که در آنها *E* و ۷ بیانگر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون می باشد.

 $c_{12} = \frac{E(v)}{(1-2v)(1+v)} \circ c_{11} = \frac{E(1-v)}{(1-2v)(1+v)}$ در ادامه با توجه به تقارن کروی  $\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi}$  در نظر گرفته می شود.

#### ۳–۳– معادله تعادل

معادله تعادل برای کره نانو کامپوزیتی در حضور میدان  
یکنواخت مغناطیسی به صورت زیر نوشته می شود:  

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_{\theta})}{r} + f_{\varphi} = 0$$
 (۹)  
که در رابطه (۹)،  $\sigma_r \ \theta_{\theta} \ \sigma_r$  نیش شعاعی و مماسی و  $\sigma_f$  نیروی  
لورنتز می باشد. نیروی لورنتز به صورت زیر تعریف می شود  
[۱۸] :  
 $f_{\varphi} = \mu H_{\varphi}^2 \ \frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{\partial u}{\partial u} + 2 \frac{u}{v} \right)$  (۱۰)

که در رابطه (۱۰) µ ضریب نفوذ مغناطیسی و H<sub>\phi</sub> شدت میدان مغناطیسی میباشد.

$$r - 4 - 1$$
 انتقال حرارتمعادله انتقال حرارت در حالت پایدار برای مسئله تکبعدیمعادله انتقال حرارت در حالت پایدار برای مسئله تکبعدیدر مختصات کروی برای کره نانوکامپوزیتی به صورت زیرنوشته می شود [۱۹]: $\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 K(r) \frac{d}{dr} T(r) \right) = 0$  $r \leq r_o$  $(11)$  $r^2 \leq r_o$  $r = r_o$ 

ثوابت مجهول A و B بهصورت رابطه (۱۳) بهدست می ایند:  

$$A = -\frac{r_i r_o}{r_o - r_i} (T_i - T_o)$$

$$B = \frac{r_o T_o - r_i T_i}{r_o - r_i}$$
(۱۳)

## ۳-۵- معادله دیفرانسیل حاکم بر مسئله

با قرار دادن روابط (۵) در روابط (۶) تا (۸) و سپس قرار دادن  
آنها در رابطه تعادل (۹) معادله دیفرانسیل مرتبه دوم حاکم  
بر کره بهصورت زیر حاصل می گردد:  
(۱۴)  
$$a_1 \frac{d^2u}{dr^2} + a_2 \frac{du}{dr} + a_3 u + a_4 = 0$$
  
که در رابطه (۱۴) ضرایب  $a_1 a_2 a_3 a_2 a_1$  به صورت زیر نوشته  
می شود:

$$a_{1} = r^{2}(\mu H_{\varphi}^{2} + c_{11})$$

$$a_{2} = 2r(\mu H_{\varphi}^{2} + c_{11})$$

$$a_{3} = -2(\mu H_{\varphi}^{2} + c_{11})$$

$$a_{4} = 2r(c_{11} - c_{12})\left(\varepsilon_{\theta}^{c} - \varepsilon_{r}^{c}\right) - r^{2}(c_{11}\frac{d\varepsilon_{r}^{c}}{dr})$$

$$+ 2c_{11}\frac{d\varepsilon_{\theta}^{c}}{dr}) - \lambda r^{2}\frac{dT}{dr} \quad (1\Delta)$$

$$\mathbf{T}$$
-ج- حل ترموالاستیک مسئله در لحظه صفر کرنشهای  
برای تحلیل ترموالاستیک مسئله در لحظه صفر کرنشهای  
خزشی را در معادله (۱۴) در نظر نگرفته و به حل آن  
میپردازیم. در این حالت جابجایی شعاعی بهصورت زیر  
میپردازیم. در این حالت جابجایی شعاعی بهصورت (۱۶  
نتیجه میشود:  
(۱۶)  $u(r) = \frac{c_1}{r^2} + C_2 r - \frac{\lambda A}{2(\mu H_{\phi}^2 + c_{11})}$   
با جایگذاری رابطه (۱۶) در رابطه (۵) و سپس جایگذاری در  
رابطه (۶) و (۷) داریم:

$$\sigma_r = 2c_{12} \left( \frac{c_1}{r^3} + C_2 - \frac{\lambda A}{2r(\mu H_{\varphi}^2 + c_{11})} \right) + c_{11} \left( \frac{-2C_1}{r^3} + C_2 \right)$$
(1V)

$$\begin{split} \sigma_{\theta} &= (c_{12} + c_{11}) \left( \frac{c_1}{r^3} + C_2 - \frac{\lambda A}{2r(\mu H_{\phi}^2 + c_{11})} \right) \\ &+ c_{12} (\frac{-2C_1}{r^3} + C_2) \quad (1 \wedge) \\ \pi^2 \\ \text{therefore a constraints of a constraint of a const$$

$$C_{1} = \frac{2}{S_{4} - S_{5}}, \quad C_{2} = \frac{3(4 - 2)}{S_{6}(S_{4} - S_{5})}$$

$$S_{1} = \frac{\lambda A}{2(\mu H_{\varphi}^{2} + c_{11})}$$

$$S_{2} = -P_{i} + \lambda T_{i} + \frac{2S_{1}}{r_{i}} c_{12}$$

$$S_{3} = \lambda T_{o} + \frac{2S_{1}}{r_{o}} c_{12}$$

$$\{S_{4}, S_{5}\} = 2(c_{12} - c_{11})\{\frac{1}{r_{i}^{3}}, \frac{1}{r_{o}^{3}}\} \quad (\Upsilon \cdot)$$

با داشتن مقدار جابجایی شعاعی در هر نقطه از ضخامت کره مقادیر تنشها و کرنشها در حالت ترموالاستیک حاصل خواهند شد.

**۳–۷– تحلیل خزش**  
برای تحلیل خزش مسئله، کرنشهای خزشی را که در حالت  
ترموالاستیک حذف گردیده بودند در رابطه (۱۴) درنظر  
گرفته و از این رابطه نسبت به زمان مشتق گرفته میشود:  

$$a_1 \frac{d^2 u}{dr^2} + a_2 \frac{du}{dr} + a_3 u + a_5 = 0$$
 (۲۱)  
 $a_1 \frac{d^2 u}{dr^2} + a_2 \frac{du}{dr} + a_3 u + a_5 = 0$  (۲۱)  
 $a_5 = 2r(c_{11} - c_{12}) \left(\dot{\varepsilon}_{\theta}^c - \dot{\varepsilon}_r^c\right) - r^2(c_{11} \frac{d\dot{\varepsilon}_r}{dr})$ 

$$(\nabla f) = \frac{dr^{c}}{dt} \frac{d\dot{c}^{c}}{dr}$$
((YY))  
+  $2c_{11}\frac{d\dot{c}^{c}}{dr}$ )

نرخهای کرنش خزشی از طریق روابط شناخته شده پرانتل-روس به رفتار یکبعدی خزشی ماده و تنشهای جاری طبق روابط زیر مربوط میشوند [۲۰]:

$$\dot{\varepsilon}_r^c = \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_r - 0.5(\sigma_\theta + \sigma_\phi)) \tag{(YT)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta}^{c} = \frac{\dot{\varepsilon}_{e}}{\sigma_{e}} (\sigma_{\theta} - 0.5(\sigma_{r} + \sigma_{\phi})) \tag{(1f)}$$

$$\dot{\varepsilon}^{c}_{\phi} = \frac{\dot{\varepsilon}^{e}_{e}}{\sigma_{e}} (\sigma_{\phi} - 0.5(\sigma_{\theta} + \sigma_{r})) \tag{7\Delta}$$

با فرض تقارن کروی $\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi}$ روابط (۲۳) تا (۲۵) بهصورت زیر بازنویسی میشوند:

$$\dot{\varepsilon}_{r}^{c} = \frac{\dot{\varepsilon}_{e}^{c}}{\sigma_{e}} (\sigma_{r} - \sigma_{\theta}) \tag{(77)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta}^{c} = \dot{\varepsilon}_{\phi}^{c} = -0.5\dot{\varepsilon}_{r}^{c} \tag{(YY)}$$

$$\begin{split} &+3r^2g_1(r)-g_2'(r))+\frac{2c_{12}c_4}{r^3}\\ &+\frac{2c_{12}}{3(\mu H_{\phi}^2+c_{11})r^3}(g_1(r)r^3\\ &-g_2(r))+(c_{12}-c_{11})(\frac{\eta_2+\eta_1e^{-\frac{r}{T}}}{\eta_2\eta_1})(\sigma_r-\sigma_\theta)\\ &+2c_{12}c_3+c_{11}c_3\qquad (\forall \forall)\\ &\sigma_\theta=\frac{c_{12}}{3(\mu H_{\phi}^2+c_{11})r^2}(g_1'(r)r^3+3r^2g_1(r)\\ &-g_2'(r))-\frac{2c_{12}}{3(\mu H_{\phi}^2+c_{11})r^3}(g_1(r)r^3-g_2(r))\\ &+c_{12}c_3-\frac{2c_{12}c_4}{r^3}\\ &+(c_{12}+c_{11})\left(\frac{c_3}{r^3}+c_3\right)\\ &+\frac{(c_{12}+c_{11})}{3(\mu H_{\phi}^2+c_{11})r^3}(g_1(r)r^3-g_2(r))\\ &+(c_{11}-c_{12})(\frac{\eta_2+\eta_1e^{-\frac{r}{T}}}{2\eta_2\eta_1})(\sigma_r-\sigma_\theta)\qquad (\forall \Lambda)\\ &q_1=q_2(r)\\ &+(c_{11}-c_{12})(\frac{\eta_2+\eta_1e^{-\frac{r}{T}}}{2\eta_2\eta_1})(\sigma_r-\sigma_\theta)\qquad (\forall \Lambda)\\ &q_1=q_2(r)\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &\sigma_r(r=r_l)=0\\ &g_1=\frac{2g(c_{11}-c_{22})}{r^3}-s_{7}+s_{\theta}+s_{\theta}-s_{10}-s_{11}}{-(c_{12}q_2+c_{11})}\\ &B=s_{7}-s_{8}-s_{9}+s_{10}+s_{11}-s_{12}+s_{13}\\ &+s_{14}-s_{15}-s_{16}\\ &R=\frac{2(c_{12}-c_{12})}{r^3}+\frac{r^3(c_{11}+2c_{12})}{r^3(c_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3}}{r^3(c_{11}+2c_{12})}\\ &+\frac{2c_{12}c_{11}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}\\ &+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{12}}}{r^3(q_{11}+2c_{12})}+\frac{2c_{12}c_{$$

نرخ کرنش خزشی مؤثر براساس مدل برگر بهصورت زیر  
نوشته میشود:  

$$\dot{\epsilon}_{e}^{c}(\sigma, t) = \frac{\sigma_{e}}{\eta_{1}} + \frac{\sigma_{e}}{\eta_{2}} e^{-\frac{t}{\tau}}$$
 (۲۸)  
 $\dot{\epsilon}_{e}^{c}(\sigma, t) = \frac{\sigma_{e}}{\eta_{1}} + \frac{\sigma_{e}}{\eta_{2}} e^{-\frac{t}{\tau}}$  (۲۸)  
 $\Delta$  در رابطه (۲۸)،  $g$  تنش مؤثر فون میسز و  $g^{3}$  نرخ کرنش  
 $\Delta$  در رابطه (۲۸)،  $g$  تنش مؤثر فون میسز و  $g^{3}$  نرخ کرنش  
 $\sigma_{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{r} - \sigma_{\theta})^{2} + (\sigma_{r} - \sigma_{\phi})^{2} + (\sigma_{\theta} - \sigma_{\phi})^{2}}$  (۲۹)  
 $\sigma_{e} = |\sigma_{r} - \sigma_{\theta}|$   
 $\dot{\epsilon}_{e}^{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(c_{r}^{2} - c_{\theta}^{2})^{2} + (c_{r}^{2} - c_{\phi}^{2})^{2} + (c_{\theta}^{2} - c_{\theta}^{2})^{2}}$  (۲۰)  
 $= |c_{r}^{2}|$   
 $|v_{2}^{2}| \sqrt{(c_{r}^{2} - c_{\theta}^{2})^{2} + (c_{r}^{2} - c_{\phi}^{2})^{2} + (c_{\theta}^{2} - c_{\theta}^{2})^{2}}$  (۳۰)  
 $= |c_{r}^{2}|$   
 $\dot{\epsilon}_{e}^{2} = \frac{\eta_{2} + \eta_{1} e^{-\frac{t}{\tau}}}{\eta_{2} \eta_{1}} (\sigma_{r} - \sigma_{\theta})$  (۳1)  
 $\dot{\epsilon}_{\theta}^{2} = -\frac{\eta_{2} + \eta_{1} e^{-\frac{t}{\tau}}}{2\eta_{2} \eta_{1}} (\sigma_{r} - \sigma_{\theta})$  (۳1)  
 $\dot{\epsilon}_{\theta}^{2} = -\frac{\eta_{2} + \eta_{1} e^{-\frac{t}{\tau}}}{2\eta_{2} \eta_{1}} (\sigma_{r} - \sigma_{\theta})$  (77)  
 $\dot{\epsilon}_{\theta}^{2} = (c_{12} - c_{11}) (\frac{\eta_{2} + \eta_{1} e^{-\frac{t}{\tau}}}{\eta_{2} \eta_{1}}) (3r(\sigma_{r} - \sigma_{\theta})$   
 $\mu + r^{2} \frac{d(\sigma_{r} - \sigma_{\theta})}{dr}$  (77)  
 $\dot{\epsilon}_{1} = a_{5}r^{-2} F_{2} = a_{5}r$   
 $g_{1}(r) = (f F_{1} dr) g_{2}(r) = (f F_{2} dr)$  (۳6)  
 $\eta_{1}(r) = (f F_{1} dr) g_{2}(r) = (f F_{2} dr)$  (76)  
 $\dot{\epsilon}_{1} = a_{5}r^{-2} F_{2} = a_{5}r$   
 $g_{1}(r) = (f F_{1} dr) g_{2}(r) = (f F_{2} dr)$  (76)  
 $\dot{\epsilon}_{1} = i_{1}(\frac{d\dot{u}}{dr} - \dot{\epsilon}_{1}) + 2c_{1}(c_{1}^{2} - \dot{\epsilon}_{0})$  (76)  
 $\dot{\epsilon}_{1} = c_{11}(\frac{d\dot{u}}{dr} - \dot{\epsilon}_{1}) + 2c_{12}(\frac{t}{r} - \dot{\epsilon}_{0})$  (76)  
 $\dot{\epsilon}_{1} = c_{11}(\frac{d\dot{u}}{dr} - \dot{\epsilon}_{1}) + 2c_{12}(\frac{t}{r} - \dot{\epsilon}_{0})$   
 $\dot{\epsilon}_{7} = -c_{11}(\frac{d\dot{u}}{dr} - \dot{\epsilon}_{1}) + 2c_{12}(\frac{t}{r} - \dot{\epsilon}_{0})$   
 $\dot{\epsilon}_{7} = -c_{2}(\frac{d\dot{u}}{dr} - \dot{\epsilon}_{1}) + (c_{12} + c_{11})(\frac{t}{r} - \dot{\epsilon}_{0})$  (76)  
 $\dot{\epsilon}_{7} = -\frac{2c_{11}c_{4}}{(dr} - c_{r}) + 2c_{11}(dr) - c_{0}(r)$   
 $\dot{\epsilon}_{7} = -\frac{2c_{11}c_{4}}{(dr} - c_{r}) + 2c_{11}(dr) - c_{0}(r)$   
 $\dot{\epsilon}_{7} = -\frac{2c_{11}c_{4}}{(dr} - c_{r}) + 2c_{11}(g_{1}(r)r^{3})$   
 $\dot{\epsilon}_{7} = -\frac{2c_{11}c_{4}}{(dr} - c_{r}) + 2c_{11}(g_{1}($ 

با تعیین شدن مقادیر مجهولات  $C_3$  و  $C_4$  مقادیر نرخ جابجایی شعاعی، نرخ تنش شعاعی، مماسی و فون میسز و نرخ کرنشها محاسبه خواهند شد. برای به دست آوردن تاریخچه تنشها، کرنشها و جابجایی شعاعی از روش نرخ تنش استفاده خواهد شد.

#### ۳-۸- روش نرخ تنش

ابتدا ضخامت کره به تعداد جزء یکسان تقسیمبندی میشود. شکل ۵ این تقسیمبندی را نشان میدهد.



شکل ۵ – تقسیمبندی ضخامت کره به تعداد جزء یکسان [۱۳]

با انتخاب یک جزء زمانی مناسب  $\Delta t_n$  برای شروع تحلیل مسئله، زمان کل سپری شده از فرآیند خزش را بهصورت مجموع جزءهای زمانی در تمامی مراحل در نظر میگیریم.  $t_j = \sum_{n=0}^j \Delta t_n$ (۴1) اندیس *j* در رابطه (۴۱) بیانگر مراحل تحلیل فرآیند خزش می باشد. در ادامه در لحظه صفر و در مرحله اول از حل، تنشهای خزشی و مماسی برای حالت ترموالاستیک در تمام جزءهای تقسیم بندی شده طبق روابط (۱۶) و (۱۷) بهدست میآید. با داشتن تنشهای مذکور طبق رابطه (۳۴) نرخ جابجایی محاسبه می شود. انتگرال های  $g_1(r)$  و  $g_2(r)$  با روشهای عددی مثل روش سیمسون بهدست میآیند. با داشتن نرخ جابجایی در تمام نقاط، نرخ تنشها طبق رابطه (۳۷) و (۳۸) محاسبه شده و سپس می توان طبق روابط زیر تنشهای جاری در هر مرحله از حل را محاسبه نمود.  $\sigma_r^{(j)}(r_i, t_j) = \sigma_r^{(j-1)}(r_i, t_{j-1}) + \dot{\sigma}_r^{(j)}(r_i, t_j)\Delta t^{(j)}$ (47)

 $\sigma_{\theta}^{(j)}(r_{i}, t_{j}) = \sigma_{\theta}^{(j-1)}(r_{i}, t_{j-1}) + \dot{\sigma}_{\theta}^{(j)}(r_{i}, t_{j})\Delta t^{(j)}$ (fr)

اندیس *i* در روابط (۴۲) و (۴۳) بیانگر جزءهای تقسیم بندی شده در راستای ضخامت کره میباشد.

#### ۴- نتایج عددی

در تمامی نتایج بدست آمده دادههای مربوط به جدول اکه پارامترهای خزشی مربوط به نانوکامپوزیت با ۱٪ دیاکسید سیلیکون میباشد مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین خواص مکانیکی و فیزیکی پلی ایمیدها زیر ارائه شدهاند [۲۲]:

E = 7.5 GPa  $\nu = 0.35$   $\alpha = 30 \times 10^{-6} \frac{1}{k}$  (ff) c, lclas will an angle of the second state of th

 $T_i = 50^{\circ}\text{C}$   $T_o = 30^{\circ}\text{C}$   $\frac{r_o}{r_i} = 2$ 

 $P_i = 100$ MPa  $P_o = 0$ MPa

 $H_{\varphi} = 2.23 \times 10^9 \frac{A}{m} \quad \mu = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$  (fa)

نمودار شکل ۶ توزیع انتقال حرارت یک بعدی را در امتداد ضخامت کره نشان میدهد. همانطور که مشاهده می-شود دما در سطح داخلی و خارجی شرایط مرزی مسئله را ارضا مینماید و با افزایش ضخامت کره، انتقال حرارت بدون بعد کاهش مییابد.

شکل ۷ نمودار تنش مماسی بدون بعد در امتداد ضخامت استوانه را در ناحیه اول، یعنی گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از پدیده خزش نشان میدهد. همانطور که مشهود است بیشترین تنش مماسی در سطح داخلی و کمترین آن در سطح خارجی کره اتفاق میافتد. با افزایش زمان میزان تنش مماسی در جداره داخلی و خارجی افزایش مییابد. همچنین با افزایش زمان اختلاف منحنیها کمتر شده و به حالت همگرایی نزدیکتر میشوند. این اختلافات زیاد منحنیها از حالت ترموالاستیک (لحظه صفر) تا رسیدن به حالت پایدار به خاطر تغییرات زیاد شیب منحنی خزش در ناحیه اول میباشد که در نمودار شکلهای ۳ و ۴ به خوبی مشاهده میشود.

نمودار تنش شعاعی بدون بعد برحسب نسبت شعاع در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود تنش شعاعی شرایط مرزی مسئله را ارضا می نماید. تنش شعاعی بدون بعد از مقدار ۱- در داخل تا مقدار خارجی صفر تغییر می نماید. تنش شعاعی با گذشت زمان به مقدار اند کی کاهش می یابد و بازهم منحنی ها با گذشت زمان به حالت پایدار نزدیک می شوند. ۱۲۰

محمدی هویه و همکاران



نمودار شکل ۱۰ تنش مؤثر بدون بعد را در راستای ضخامت کره نشان می دهد. این نمودار که از رابطه فون میسز ۲۹ نتیجه شده است شباهت زیادی به نمودار تنش مماسی شکل ۷ دارد. علت آن است که برای شرایط بارگذاری این مسئله مقادیر تنش مماسی بزرگتر از تنش شعاعی هستند، لذا مقادیر تنش مؤثر به تنش مماسی نزدیک خواهند بود. با گذشت زمان مقادیر تنش مؤثر در جداره داخلی به مقدار بیشتری نسبت به جداره خارجی افزایش می ابد که این روی داد باعث می شود که جداره داخلی با گذشت زمان در معرض بیشترین آسیب قرار گیرد.

کرنش مماسی و کرنش شعاعی خزشی برای ۱۰۰۰ ثانیه پس از شروع فرآیند خزش در شکلهای ۱۱ و ۱۲ نشان داده شدهاند. بیشترین مقدار کرنش خزشی از لحاظ قدرمطلقی در جداره داخلی قرار دارد. همچنین با گذشت زمان در این ناحیه افزایش کرنش خزشی مشاهده میشود. علت این روی داد آن است که سطح داخلی در معرض فشار داخلی بوده و همچنین دما در مرز داخلی بیشتر از سایر نواحی میباشد. با توجه به اینکه فرآیند خزش تراکم ناپذیر درنظر گرفته شده است و تقارن کروی در مسئله لحاظ گردید، لذا مشاهده میشود که مقادیر کرنش خزشی مماسی، نصف قرینه مقادیر کرنش خزشی مماسی، ماسی، مماسی مقادیر

نرخ کرنش مؤثر نیز برای ناحیه اول خزش در امتداد ضخامت کره در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج این نمودار که از رابطه ۳۰ مربوط به نرخ کرنش مؤثر فون میسز نتیجه شده است با مقادیر قدر مطلق نرخ کرنش خزشی شعاعی برابر است. همانگونه که مشاهده میشود با افزایش زمان نرخ کرنش مؤثر کاهش مییابد. منحنیهای نرخ کرنش مؤثر در راستای ضخامت با گذشت زمان با سرعت کمتری دچار تغییر شده و به حالت پایدار که پس از زمان حدود ۱۰۰۰ ثانیه میباشد نزدیک میشوند.



ضخامت کره برای مرحله اولیه خزش



شکل ۱۳ - تاریخچه نرخ کرنش مؤثر در راستای ضخامت کره برای مرحله اولیه خزش

تمامی نمودارهای پیشین برای حالت خزش اولیه و تا زمان ۱۰۰۰ ثانیه ترسیم گردیده بود اما در ادامه نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ برای مرحله ثانویه رسم گردیده است. در این حالت منحنیها از زمان ۲۰۰۰ تا۱۰۰۰ ثانیه ترسیم گردیدهاند. نمودار ۱۴ مربوط به تنش مؤثر بدون بعد و نمودار ۱۵ مربوط به نرخ کرنش مؤثر میباشد. همانطور که مشاهده میشود منحنیها در این مرحله با سرعت تقریبا یکنواختی با گذشت زمان تغییر میکنند. که نمودارهای شکل ۳ و ۴ ما میدستی و صحت این نتایج را نمایش میدهند. جدول ۲ و ۳ مقادیر تنش مؤثر بدون بعد را برای مرحله اولیه و ثانویه خزش در زمانهای مختلف بر حسب نسبت شعاعهای



شکل ۹ - تاریخچه نرخ تنش شعاعی در راستای ضخامت کره برای مرحله اولیه خزش



- این به تارید یېد علیل موجو به اولیه خزش ضخامت کره برای مرحله اولیه خزش





شکل ۱۵ - تاریخچه نرخ کرنش مؤثر در راستای ضخامت کره برای مرحله ثانویه خزش

بدون بعد مشهود است در یک نسبت شعاع خاص ( برای حالت خزش اولیه) مثلا مقدار ۰/۵، مقادیر تنش موثر از ۲/۱۳۸۱ در زمان ۲۰۰ ثانیه تا مقدار ۲/۶۰۱۸ در زمان ۱۲۰۰ ثانیه افزایش میابد. همچنین با افزایش نسبت شعاع از ۵/۰تا ۱ مقادیر تنش موثر در همه زمانها کاهش می یابد. جدول ۴ و ۵ نیز برای مقادیر نرخ کرنش مؤثر ارائه گردیده است. با افزایش زمان در یک نسبت شعاع خاص مشاهده می-شود که مقادیر نرخ تنش مؤثر کاهش می یابد و این مقادیر با اوزایش نسبت شعاع کاهش خواهد داشت. همانطوری که از ارقام جدولها در مراحل اولیه و ثانویه مشهود است در مرحله اوزایش زمان زیاد می باشد در حالی که سرعت تغییرات این افزایش زمان زیاد می باشد در حالی که سرعت تغییرات این

جدول ۶ نتایج حاصل از این پژوهش و مرجع [۲۳] را برای تنش شعاعی و مماسی بدون بعد نمایش میدهد. همانطور که مشاهده می شود نتایج پژوهش حاضر قرابت خوبی با نتایج حاصله در مرجع [۲۳] دارد.

جدول ۲- تنش مؤثر بدون بعد برای مرحله اولیه خزش

تنش مؤثر بدون بعد از گذشت					نسبت
۱۰۰۰	٨٠٠	۶	۴	۲۰۰	شعاع
ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	
۲/۶۰۱۸	۲/۵۶۹۸	۲/۵۱۰۲	۲/۳۸۹۰	٢/١٣٨١	۰/۵
١/۵٧٨٣	۱/۵۵۸۳	1/521.	1/440.	1/7898	• /۶
۱/•۳۵۹	۱/۰۲۲۵	•/٩٩٧۵	•/9484	۰/۸۳۹۲	• /Y
•/٧١٩٩	۰/۲۱۰۵	•/۶٩٢٨	•/۶۵۶λ	۰/۵۸۰۹	•/٨
۰/۵۲۳۰	•/2181	•/۵•۳۲	•/۴٧۶٧	•/47•9	٠/٩
•/٣٩۶۵	•/٣٩١٣	۰/۳۸۱۵	•/8810	•/5195	۱/۰۰

## جدول ۳- تنش مؤثر بدون بعد برای مرحله ثانویه خزش

تنش مؤثر بدون بعد از گذشت					نسبت
۱۰۰۰۰	٨	۶۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	شعاع
ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	
٣/١٧٠٩	٣/• ٣٨٩	7/9177	۲/۷۹۰۶	۲/۶۷۳۸	•/۵
1/9818	1/1499	1/7714	١/۶٩۵٩	1/8787	• /۶
1/2010	1/5185	1/1949	1/1140	۱/•۶۵۹	• /Y
•/\\\	•/እ۴٧۴	•/ <b>\\</b> \•Y	•/٧٧۵٣	•/४۴١١	•/٨
•/۶۴۴۳	•/8184	• /۵۸۹۵	•/۵۶۳۶	•/۵۳۸۵	٠/٩
•/۴۸۷۹	•/۴۶۶۹	•/۴۴۶۶	•/4211	•/4•11	۱/۰۰

جدول ۴- نرخ کرنش مؤثر برای مرحله اولیه خزش

نرخ کرنش مؤثر ( $^{-4}$ ا $)$ بعد از گذشت					نسبت
۱۰۰۰	٨	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	شعاع
ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	-
•/•٣٩۴	•/•۶٧۴	۰/۱۳۱۵	•/7774	•/۵۵۴۴	• /۵
•/•٣٣٩	٠/•۴٠٩	•/•٧٩٧	•/1948	• /۳۳۳۵	• /8
•/•10Y	•/•798	•/•۵۲۲	٠/١٠٧٩	•/5188	• /Y
•/•١•٩	۰/۰۱۸۶	•/•٣۶٣	•/•٧۴٩	•/10•8	• /٨
•/••٧٩	۰/۰۱۳۵	•/•794	•/•۵۴۴	•/١•٩١	٠/٩
•/••۶•	•/•١•٣	•/• • • •	•/•۴١٢	·/· ۸۲۸	۱/۰۰

### مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۳

۱۷۳	محمدی هویه و همکاران
-----	----------------------

ثانويه خزش	راي مرحله	مۇثرى	کرنش	۵- نړ خ	جدول
J-JJ-	,	; , , , , , , , ,	J J-	CF "	0,

نرخ کرنش مؤثر ( <sup>4–1</sup> 0×) بعد از گذشت					نسبت
۱۰۰۰۰	٨	۶۰۰۰	4	۲۰۰۰	شعاع
ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	ثانيه	
٠/•١٨٩	•/•19۴	•/•٢•٢	•/•٢١١	•/• ٢٢•	• /۵
•/•110	•/•١١٨	•/•17٣	•/• ١٢٨	•/•184	• /۶
•/••Y۵	•/•• ٧٧	•/••٨١	•/••A۵	•/••AA	• /Y
•/••۵۲	•/••۵۴	•/••۵۶	۰/۰۰۵۹	•/••۶١	• /٨
•/••٣٨	•/••٣٩	•/••۴١	•/••۴۳	•/••۴۵	٠/٩
•/••٢٩	•/••٣•	•/••٣١	•/••٣٢	•/••٣۴	۱/۰۰

، بدون بعد	نر مال	تنشهاي	۶– مقایسه	جدول
		6 0		· · ·

ی بدون بعد	تنش مماس	، بدون بعد	تنش شعاعي	نسبت
مرجع [۲۳]	پژوهش حاضر	مرجع [٢٣]	پژوهش حاضر	شعاع
•/۴٨۶۴	•/۴٨۴٣	-•/4917	-•/۴۸۹۶	• /۶
•/٣۴٩۶	•/٣۴۶٢	-•/7819	-•/YX•٣	• /Y
•/۲۸۹۳	•/۲۸۵۶	-•/۱۳۵λ	-•/١٣٢١	•/٨
•/۲۴۳۶	•/7417	-•/• <b>۵</b> ٩۶	-•/• <b>&amp;</b> •۶	٠/٩

## ۵- نتیجه گیری

در این کار رفتار خزشی یک کره نانوکامپوزیتی تقویت شده با ذرات دیاکسید سیلیکون که تحت بارهای مکانیکی، مغناطیسی و حرارتی قرار دارد بررسی گردید. تاریخچه تنشها و کرنشهای خزشی با استفاده از روش نرخ تنش به دست آمد. برای توصیف رفتار کره نانو کامپوزیتی از مدل ساختاری برگر که شامل دو مرحله اولیه و ثانویه خزش بود، استفاده شد. نتایج مهم این پژوهش به صورت زیر ارائه می گردد:

 بیشترین سرعت تغییرات نمودارها با گذشت زمان در مرحله اولیه خزش (حدود ۱۰۰۰ ثانیه) اتفاق میافتد. این در
 حالی است که منحنیها پس از پایان این مرحله وارد مرحله ثانویه شده و با سرعت تقریبا یکنواختی تغییر میکنند.

بیشترین مقادیر کرنش خزشی و همچنین تنش مؤثر در
 جداره داخلی اتفاق میافتد و جداره خارجی در معرض
 کمترین مقدار این پارامترها قرار دارد. لذا بیشترین آسیب
 خزشی در جداره داخلی رخ خواهد داد.

نرخ تنش شعاعی در ناحیه اول خزش با گذشت زمان
 کاهش مییابد. با نزدیک شدن به حالت پایدار مقادیر نرخ
 تنش شعاعی به مقدار صفر نزدیک میشوند.
 مقادیر نرخ کرنش مؤثر باگذشت زمان در هر دو مرحله
 اولیه و ثانویه خزش کاهش مییابد. این مقادیر برابر با قدر
 مطلق مقادیر نرخ کرنش خزشی شعاعی میباشد.

## ۶- فهرست علائم

مدول الاستيسيته، MPa	Ε
شدت میدان مغناطیسی، <sup>۱</sup> -Am	Н
ضریب رسانش گرمایی، <sup>1</sup> -Wm	K
فشار، MPa	Р
دما، K	Т
زمان، s	t
نرخ جابجایی شعاعی، <sup>1۔</sup> ms	ù
	علائم يونانى

ضریب نفوذ حرارتی، <sup>۲</sup> -K	α
نرخ کرنش، <sup>1</sup> -s	Ė
ضریب ویسکوز وابسته به زمان، GPas	η
ضريب نفوذ مغناطيسي، <sup>1-</sup> Hm	μ
ضريب پواسون	ν

نرخ تنش، <sup>-1</sup> MPas	σ
زمان تأخیری، s	τ
	بالانويسها

خزش	С
	زيرنويسها

مؤثر	е
داخلي	i

خارجى	0
محبط	$\phi$

میدان مغناطیسی 
$$arphi$$

۷- مراجع

- Wilson D, Stenzenberger HD, Hergenrother PM (1990) Polyimides, Blackie, Glasgow.
- [2] Volksen W, Hergenrother PM (1994) High performance polymers. Springer, Berlin.
- [3] Wang ZD, Lu JJ, Lib Y, Fu SY, Jiang SQ, Zhao XX (2005) Low temperature properties of PI/SiO2 nanocomposite films. Mat Sci Eng B-Solid 123: 216-221.

ان ۱۷۴	همكارا	هویه و	محمدى
--------	--------	--------	-------

آلومینیوم-سیلیکون کاربیدی با خواص وابسته به دما براساس رفتار خزشی. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۱۴(۱۲):۲۳-۳۴.

- [14] Ward IM, Sweeney J (2012) Mechanical properties of solid Polymers. Wiley, New York.
- [15] Jia Y, Peng K, Gong X, Zhang Z (2011) Creep and recovery of polypropylene/carbon nanotube composites. Int J Plasticity 27: 1239-1251.
- [16] Wang ZD, Zhao XX (2008) Modeling and characterization of viscoelasticity of PI/SiO2 nanocomposite films under constant and fatigue loading. Mater Sci Eng A 486: 517-527.
- [17] Loghman A, Aleayoub SMA, Hasani Sadi M (2012) Time-dependent magnetothermoelastic creep modeling of FGM spheres using method of successive elastic solution. Appl Math Model 36(2): 836-845.
- [18] Ghorbanpour Arani A, Haghparast E, Khoddami Maraghi Z, S Amir (2015) Static stress analysis of carbon nano-tube reinforced composite (CNTRC) cylinder under non-axisymmetric thermomechanical loads and uniform electro-magnetic fields. Composites B Eng 68: 136-145.
- [19] Akbari Alashti R, Khorsand M, Tarahhomi MH (2013) Thermo-elastic analysis of a functionally graded spherical shell with piezoelectric layers by differential quadrature method. Scientia Iranica B 20: 109-119.
- [20] You LH, Ou H, Zheng ZY (2007) Creep deformations and stresses in thick-walled cylindrical vessels of functionally graded materials subjected to internal pressure. Compos Struct 78: 285-291.
- [21] Loghman A,Shokouhi N (2009) Creep damage evaluation of thick-walled spheres using a longterm creep constitutive model. J Mech Sci Technol 23: 2577-2582.
- [22] Dolbow J, Gosez M (1996) Effect of out-of-plane properties of a polyimide film on the stress fields in microelectronic structures. Mech Mater 23: 311-321.
- [23] Saidi AR, Atashipour SR, Jomehzade E (2009) Exact elasticity solutions for thick-walled FG spherical pressure vessels with linearly and exponentially varying properties. Int J Eng (Trans A: Basics) 22(4): 405-416.

- [4] Chen XG, Guo JD, Zheng B, Li YQ, Fu ShY, He GH (2007) Investigation of thermal expansion of PI/SiO2 composite films by CCD imaging technique from 120 to 200 C. Compos Sci Technol 67: 3006-3013.
- [5] Law M, Payten W, Snowden K (2002) Modeling creep of pressure vessels with thermal gradients using Theta projection data. Int J Pres Ves Pip 79: 847-851.
- [6] Ghorbanpour Arani A, kolahchi R, Mosallaie Barzoki AA, Loghman A (2012) Electro-thermomechanical behaviors of FGPM spheres using analytical method and ANSYS software. Appl Math Model 36: 139-157.
- [7] Dai HL, Jiang HJ, Yang L (2012) Time-dependent behaviors of a FGPM hollow sphere under the coupling of multi-fields. Solid State Sci 14: 587-597.
- [8] Loghman A, Moradi M (2013) The analysis of time-dependent creep in FGPM thick walled sphere under electro -magneto -thermo -mechanical loadings. Mech Time-Depend Mater 17(2): 215-239.
- [9] Loghman A, Azami M (2015) A novel analyticalnumerical solution for nonlinear time-dependent electro-thermo-mechanical creep behavior of rotating disk made of piezoelectric polymer. Appl Math Model, Accepted 7 December 2015. DOI: 10.1016/j.apm.2015.12.008
- [10] Zamani Nejad M, Davoudi Kashkoli M (2014) Time-dependent thermo-creep analysis of rotating FGM thick-walled cylindrical pressure vessels under heat flux. Int J Eng Sci 82: 222-237.
- [11] Davoudi Kashkoli M, Zamani Nejad M (2014) Effect of heat flux on creep stresses of thick-walled cylindrical pressure vessels. J Appl Res Technol 12(3): 585-597.
- [12] Hosseini Kordkheili SA, Livani M (2013) Thermoelastic creep analysis of a functionally graded various thickness rotating disk with temperature-dependent material properties. Int J Pres Ves Pip 111: 63-74.

<sup>[</sup>۱۳] وکیلی تهامی ع، زهساز م، محمد علیزاده فرد آ (۱۳۹۳)

طراحى بهينه چندهدفه ديسک دوار با ساختار هدفمند