

تحلیل شروع سیلان در مخازن کروی جداره ضخیم FG تحت بارگذاری همزمان فشاری و گرادیان دمایی

منصور عسگری^۱، علی پرویزی^{۲*}، شهریار علی کرمی^۳

* نویسنده مسئول: aliparvizi@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله، تحلیل شروع سیلان در مخازن کروی جداره ضخیم FG تحت تاثیر بارگذاری همزمان فشار داخلی و گرادیان دمایی ارائه شده است. طراحی مخازن جداره ضخیم کروی تحت فشار، به عنوان محفظه نگه دارنده سیالات تحت بارهای حرارتی با گرادیان‌های دمایی بالا نیازمند به راه‌کاری جدید است. تحت فشار داخلی زیاد و دمای بالا، مخزن در بخشی از ضخامت خود وارد محدوده پلاستیک می‌شود؛ لذا، برای طراحی مخزن بررسی فشار و گرادیان دمایی که موجب شروع سیلان می‌شود نیاز است. مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، ضریب هدایت گرمایی و ضریب انبساط حرارتی به صورت تدریجی و طبق مدل توانی و در راستای شعاعی تغییر می‌کنند. برای توصیف رفتار ماده در ناحیه پلاستیک در کره جداره ضخیم FG تحت فشار داخلی و گرادیان دمایی، از معیار تسلیم ترسکا استفاده شده و رفتار مواد به صورت الاستیک-پلاستیک کامل فرض شده است.

واژه‌های کلیدی

شروع سیلان، کره جداره ضخیم FG، بارگذاری همزمان، بارگذاری فشاری و گرادیان دمایی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و هوا فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۱- مقدمه

طراحی مخازن جداره ضخیم کروی تحت فشار، به عنوان محفظه نگهدارنده سیالات تحت بارهای حرارتی با گرادیان های دمایی بالا با پیچیده گی های بسیاری همراه است. استفاده از این مخازن در دماها و فشارهای بسیار بالا، بخصوص در صنایع شیمیایی، هوافضا، صنایع خودرو، تاسیسات نیروگاهی اتمی، سیلندرهای فرایند اکستروژن نیاز به راهکارهای اساسی در طراحی این مخازن دارد. یکی از این راهکارها استفاده از مواد پیشرفته با مقاومت حرارتی بالا در ساخت چنین مخازنی می باشد. مواد FG^۴ به واسطه داشتن خصوصیات منحصر به فردی مانند نسبت مقاومت مکانیکی به وزن بالا، وزن کم سازه، مقاومت به ضربه بالا، مستهلک کننده ضربه، مقاومت بالا در برابر گرادیان شدید دما، مقاومت در برابر تنش های پسماند، بسیار موثر هستند [۱]. با توجه به بررسی های انجام شده، مطالعات محدودی در زمینه تحلیل مخازن کروی تحت بارگذاری همزمان فشاری و گرادیان دمایی انجام شده است. مندلسون^۵ [۲] به تحلیل تنش الاستوپلاستیک و ترموالاستوپلاستیک در کره جدار ضخیم و سیلندر استوانه ای دو سر باز پرداخت. وی به بیان تفصیلی روابط حاکم بر تنش- کرنش الاستیک و پلاستیک اجسام اشاره کرد است. بولی^۶ و وینر^۷ [۳] به تحلیل تنش های ترموالاستیک و ترموالاستوپلاستیک مخازن کروی پرداختند و برای هر کدام روابطی را ارائه دادند. والی^۸ [۴] به بررسی اجمالی در ارتباط با تحلیل تنش مخازن جداره ضخیم استوانه ای و کروی، تحت

اثر دما و فشار در حالت الاستیکوالاست و پلاستیک پرداخت. برای هر کدام، روابطی بر پایه ی فشار تسلیم ارائه و کمترین فشار داخلی لازم برای شکست الاستیک و فشار وارد بر دیواره ها ارائه کردند. کوپر^۹ [۵] حل دقیق رفتار کره جدار ضخیم با ماده الاستیک-پلاستیک کامل که تحت اثر گرادیان دما قرار گرفته، ارائه کرد. حل تقریبی که در آن از کرنش های الاستیک صرف نظر شده نیز بررسی گردیده و نشان داده شده که حل تقریبی در گرادیان دمایی بینهایت با حل دقیق یکسان خواهد بود. درینگتون^{۱۰} و جانسون^{۱۱} [۶] شروع اولین لایه پلاستیک برای نسبت های مختلف دما-فشار و نسبت شعاع هایی یک کره جدار ضخیم را بررسی کردند. در این مقاله نشان داده شد که با تغییر این نسبت ها، امکان ایجاد اولین لایه پلاستیک مخزن در هر شعاعی وجود دارد. تانیگاوا^{۱۲} [۷] مروری جامع بر تحلیل های ترموالاستیک صورت گرفته بر روی مواد FG انجام داد. و روابط مورد استفاده در طراحی ترموالاستیک مواد FG را دسته بندی کرده است. اباتا^{۱۳} و نودا^{۱۴} [۸] تاثیر نسبت کسر حجمی اجزاء در ماده FG را روی تنش های حرارتی در کره و پوسته استوانه ای دوار بررسی کردند. هدف آنها رسیدن به درک عمیقی از ترکیب تنش ها بود تا بتوانند کره و استوانه های توخالی ساخته شده از مواد FG، با بیشترین راندمان را طراحی کنند. آنها همچنین در رابطه با اندازه شعاع داخلی و بازه حرارتی مناسب بحث و بررسی کرده و در کار خود از تنش های حرارتی پایدار^{۱۵}

⁹Cowper¹⁰Derrington¹¹Johnson¹²Tanigawa¹³Obata¹⁴Noda¹⁵Steady-State⁴Functionally Graded⁵Mendelson⁶Boley⁷Weiner⁸Whalley

$$\begin{aligned} E &= E_0 r^{n_1} \\ \alpha &= \alpha_0 r^{n_2} \\ K &= K_0 r^{n_3} \\ \sigma_y &= \sigma_{y_0} r^{n_4} \end{aligned} \quad (1)$$

۳- معادلات مورد استفاده در تحلیل کره جداره ضخیم FG

۱-۳- معادله تعادل

در دستگاه مختصات کروی، تنش‌ها با σ_r و $\sigma_\theta = \sigma_\varphi$ و کرنش‌ها با ε_r و $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi$ نشان داده می‌شود. با د نظر گرفتن این فرضیات، معادله تعادل به شکل زیر به دست می‌آید [۳]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2)$$

۲-۳- روابط کاربردی بین تنش - کرنش

روابط بین تنش و کرنش با توجه به شرایط بارگذاری مخزن و تقارن در هندسه مخزن که کرنش‌ها و تنش‌های برش و تغییر مکان‌های مماسی برابر صفر هستند به شکل رابطه (۳) خلاصه می‌شوند [۲]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E(r)}[\sigma_r - 2\nu\sigma_\theta] + \alpha(r) \cdot \Delta T(r) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E(r)}[-\nu\sigma_r + (1 - \nu)\sigma_\theta] \\ &\quad + \alpha(r) \cdot \Delta T(r) \end{aligned} \quad (3)$$

۳-۳- روابط سازگاری

معادله سازگاری بر حسب کرنش به صورت زیر است:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta - \varepsilon_r}{r} = 0 \quad (4)$$

استفاده کردند. توتونچو^{۱۶} و اُزترک^{۱۷} [۹] تحلیل دقیق مخازن تحت فشار استوانه‌ای و کروی FG را ارائه کردند. آنها استوانه را در حالت کرنش صفحه‌ای با توزیع توانی مدول الاستیسیته در راستای شعاعی بررسی کردند. رد ریگوئز^{۱۸} و همکاران [۱۰] میکروساختار و رفتار مکانیکی یک نوع خاص FG از جنس AIA359/SiCp را مورد مطالعه قرار داد. وی با تهیه چند نمونه و انجام تست کشش و ضربه بر روی آنها، مقادیری برای مدول الاستیسیته، تنش سیلان و سختی این ماده خاص ارائه نمود. پرویزی و همکاران [۱۱] تنش و کرنش الاستوپلاستیک مخازن جداره ضخیم کروی و استوانه‌ای را تحت فشار داخلی و گرادیان دمایی با استفاده از مدل توانی برای مواد تابعی مدرج AIA359/SiCp در نظر گرفتند. آنها یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی تسلیم از طریق ضخامت برای استوانه ساخته شده از ماده تابعی مدرج AIA359/SiCp ارائه کردند. نایی و انصاری [۱۲] با در نظر گرفتن کار سختی، مخازن کروی جداره ضخیم FG را تحت فشار داخلی و خارجی و توزیع دمای متفاوت تحلیل نمودند و ترکیب‌های مختلف فشار داخلی و گرادیان دمایی برای شروع تسلیم را بررسی کردند.

۲- مدل سازی ماده FG

برای بیان تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی مواد از روش مدل توانی جهت محاسبه مدول الاستیسیته، ضریب انبساط حرارتی، ضریب هدایت گرمایی و تنش تسلیم استفاده شده است [۱۱]:

¹⁶Tutuncu

¹⁷Oztork

¹⁸Rodriguez-Castro

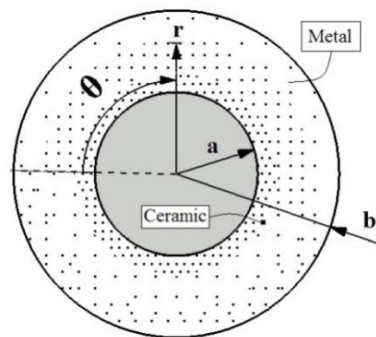
۴-۳- شرایط مرزی

با توجه به اینکه مخازن کروی جدار ضخیم معمولاً تحت شرایط فشار p و دمای کاری بالا T قرار دارند، شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی در سطح داخلی و خارجی کره بصورت زیر برقرار است:

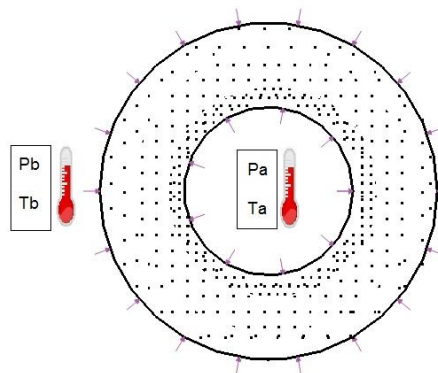
$$\sigma_r(a) = -p_a \text{ و } \sigma_r(b) = -p_b \quad (۵)$$

$$T_{(a)} = T_a \text{ و } T_{(b)} = T_b$$

شکل (۱) و (۲) نمایی شماتیک از یک کره FG را تحت شرایط بارگذاری و هندسه مناسب نشان می‌دهد.



شکل (۱) مدل هندسی کره جدار ضخیم FG



شکل (۲) نمایی شماتیک از یک کره FG تحت شرایط بارگذاری

۵-۳- معیار سیلان در کره جدار ضخیم FG

برای بررسی شرایط آغاز سیلان در کره جدار ضخیم FG از معیار ترسکا برای شروع سیلان کره استفاده می‌شود. سیلان

هنگامی شروع می‌شود که حداکثر تنش معادل برابر با تنش سیلان ماده شود، در نتیجه معیار سیلان با رابطه (۶) مشخص می‌شود، در این رابطه σ_1 و σ_3 به ترتیب حداکثر و حداقل تنش‌های اصلی در کره‌ی جداره ضخیم می‌باشند.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \quad (۶)$$

۴- تحلیل کره FG تحت اثر فشار داخلی و گرادیان دمایی

جهت تحلیل ترموالاستوپلاستیک کره جدار ضخیم FG تحت فشار داخلی p و گرادیان دمایی ΔT ابتدا باید معادله توزیع دما را محاسبه کرد.

۴-۱- معادله توزیع دما در کره FG

انتقال حرارت در کره FG به صورت یک بعدی و در راستای شعاعی فرض می‌شود و از تغییرات در جهت محیطی صرف- نظر می‌شود، از این رو معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت یک بعدی در کره برابر است با (۷):

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 K(r) \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (۷)$$

با قرار دادن ضریب هدایت گرمایی $K(r)$ از رابطه (۱)، در معادله انتقال حرارت یک بعدی و پس از حل معادله دیفرانسیل بر حسب متغیر r و استفاده از شرایط مرزی (۵)، شکل کلی معادله توزیع دما در کره FG به شکل (۸)، است:

$$T(r) = Q_0 (r^{-(n_3+1)} - a^{-(n_3+1)}) + T_a \quad (۸)$$

ثابت‌های موجود در رابطه توزیع دما عبارتند از:

$$Q_0 = \frac{T_a - T_b}{a^{-(n_3+1)} - b^{-(n_3+1)}} \quad (۹)$$

$$m_{1,2} = \frac{n_1 - 3 \pm \sqrt{\Delta}}{2}$$

$$\Delta = 9 - 6n_1 + n_1^2 + \frac{8n_1(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (13)$$

$$Q_4 = (n_2 - n_3)^2 + n_1(1 + n_2 - n_3) + A_1 - Q_1 - 1$$

$$Q_5 = n_2^2 + n_1 n_2 + 3A_2 - Q_1$$

جواب نهایی مجموع جواب عمومی و خصوصی می‌باشد. تنش شعاعی σ_r و محیطی σ_θ برای ناحیه کره جدار ضخیم FG تحت بارگذاری همزمان فشاری و گرادیان دمایی برابر

است با:

$$\sigma_r = C_1 r^{m_1} + C_2 r^{m_2} + \frac{Q_2}{Q_4} r^{A_1} + \frac{Q_3}{Q_5} r^{A_2}$$

$$\sigma_\theta = C_1 \left(1 + \frac{m_1}{2}\right) r^{m_1} + C_2 \left(1 + \frac{m_2}{2}\right) r^{m_2} + \frac{Q_2}{Q_4} \left(1 + \frac{A_1}{2}\right) r^{A_1} + \frac{Q_3}{Q_5} \left(1 + \frac{A_2}{2}\right) r^{A_2} \quad (14)$$

با اعمال شرایط مرزی (۵)، ثابت‌های موجود در رابطه (۱۴)، عبارتند از:

$$C_1 = \frac{1}{(1 - a^{(m_2-m_1)} b^{(m_1-m_2)}) a^{(m_1)}} \left(-p_a + a^{m_2} Q_6 - \frac{Q_2}{Q_4} a^{A_1} - \frac{Q_3}{Q_5} a^{A_2} \right)$$

$$C_2 = \frac{-1}{b^{m_2}} \left[p_b + \frac{b^{m_1}}{(1 - a^{(m_2-m_1)} b^{(m_1-m_2)}) a^{(m_1)}} \left(-p_a + a^{m_2} Q_6 - \frac{Q_2}{Q_4} a^{A_1} - \frac{Q_3}{Q_5} a^{A_2} \right) + \frac{Q_2}{Q_4} b^{A_1} + \frac{Q_3}{Q_5} b^{A_2} \right] \quad (15)$$

$$Q_6 = 1/b^{m_2} \left(p_b + \left(\frac{Q_2}{Q_4}\right) b^{A_1} + \left(\frac{Q_3}{Q_5}\right) b^{A_2} \right)$$

۲-۴- تعیین توزیع تنش الاستیک در کره FG

در ابتدا مدول الاستیسیته از معادله (۱)، و معادله توزیع دما (۸) در معادله کرنش-تنش (۳) جایگذاری می‌شود. سپس با جایگذاری نتیجه آن در معادله سازگاری کرنش (۴) و با استفاده از معادله تعادل (۲) و ساده سازی معادله ناهمگن زیر حاصل می‌شود:

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + A_3 r \frac{d\sigma_r}{dr} + Q_1 \sigma_r = Q_2 r^{A_1} + Q_3 r^{A_2} \quad (10)$$

و مقادیر ثابت عبارتند از:

$$A_1 = n_1 + n_2 - n_3 - 1$$

$$A_2 = n_1 + n_2$$

$$A_3 = 4 - n_1$$

$$Q_1 = -2n_1 \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{2E_0 \alpha_0 Q_0 (n_3 - n_2 + 1)}{(1-\nu)}$$

$$Q_3 = \frac{2E_0 \alpha_0 n_2 (Q_0 a^{-(n_3+1)} - T_a)}{(1-\nu)}$$

رابطه (۱۰)، دارای دو جواب عمومی و خصوصی است، که به ترتیب عبارتند از:

$$\sigma_{r_h} = C_1 r^{m_1} + C_2 r^{m_2} \quad (12)$$

$$\sigma_{r_p} = \frac{Q_2}{Q_4} r^{A_1} + \frac{Q_3}{Q_5} r^{A_2}$$

ثابت‌های موجود در رابطه (۱۲)، عبارتند از:

۳-۴- شروع سیلان در کره FG

با جایگذاری تنش تسلیم از رابطه (۱)، و تنشهای شعاعی و محیطی (۱۴) در رابطه (۶) معیار سیلان به صورت زیر در می-آید:

$$\begin{aligned} & \left(C_1 \frac{m_1}{2}\right) r^{m_1} + \left(C_2 \frac{m_2}{2}\right) r^{m_2} \\ & + \left(\frac{Q_2 A_1}{Q_4} \frac{A_1}{2}\right) r^{A_1} \\ & + \left(\frac{Q_3 A_2}{Q_5} \frac{A_2}{2}\right) r^{A_2} - (\sigma_{y_0}) r^{n_4} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

به طور کلی شروع سیلان می تواند از لایه داخلی، لایه میانی و لایه خارجی شروع شود و بستگی به جنس ماده n_3, n_2, n_1 و n_4 و ابعاد مخزن (b و a) دارد.

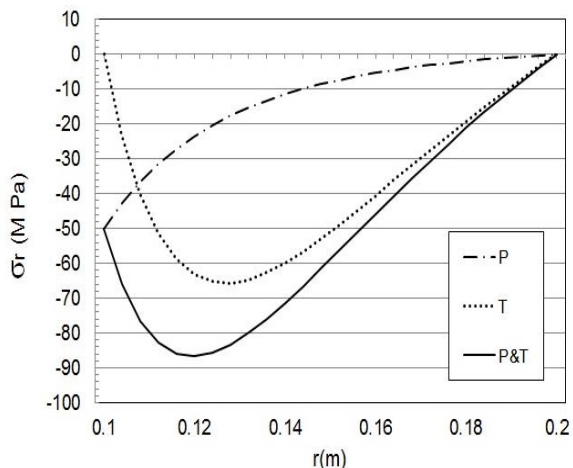
۵- بحث و بررسی نتایج

نتایج برای مخزنی از جنس Al A359/SiCp با ۳۰٪ کسر حجمی SiC در سطح داخلی و ۲۰٪ کسر حجمی SiC در سطح خارجی می باشند. شعاع داخلی و خارجی مخزن به ترتیب $a = 0.1m$ و $b = 0.2m$ و ضریب پواسان ثابت و برابر $\nu = 0.3$ فرض می شود. با توجه به خواص و هندسه و داده های بدست آمده از [۱۱]، ثابت های لازم و مقادیر ورودی تحلیل اعم از خواص مکانیکی و حرارتی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) خواص مکانیکی و حرارتی ماده FG از جنس AL

[۱۱A359/SiCp]				
a (m)	b (m)	E_0 (GPa/m ^{n₁})	σ_{y_0} (MPa/m ^{n₄})	α_0 (K ⁻¹)
۰/۱	۰/۲	۱۸/۱*۱۰ ^۹	۴۸/۷*۱۰ ^۶	۲۱*۶۸*۱۰ ^۶
K_0 (w/m.k)	n_1	n_2	n_3	n_4
۱۴۴/۷۳	-۰/۸۸	۰/۱۳۳	۰/۱۲۴	-۰/۸۲

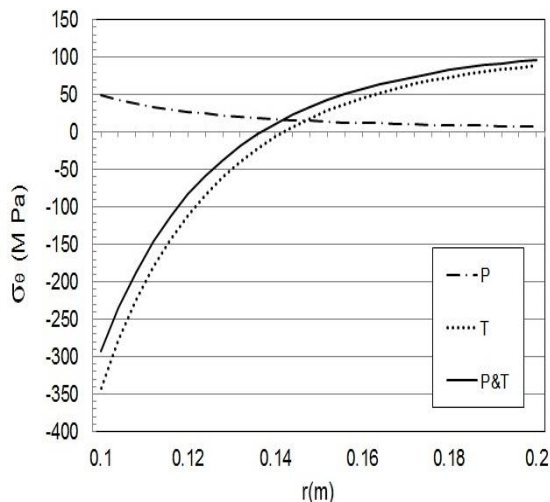
نتایج برای کره FG تحت بارگذاری همزمان و مجزای فشاری و گرایان دمایی به صورت نمودارهایی ارائه می شود. تنش های شعاعی، محیطی و موثر بر حسب شعاع به ترتیب در شکل های (۳) تا (۵) نمایش داده شده اند.



شکل (۳) مقایسه تنش های شعاعی، تحت بارهای فشاری، دمایی و ترکیب

فشار و دما در کره جدار ضخیم FG

$$(p_a = 50 \text{ MPa}, p_b = 0, T_a = 500 \text{ K}, T_b = 300 \text{ K})$$



شکل (۴) مقایسه تنش های محیطی، تحت بارهای فشاری، دمایی و ترکیب

فشار و دما در کره جدار ضخیم FG

$$(p_a = 50 \text{ MPa}, p_b = 0, T_a = 500 \text{ K}, T_b = 300 \text{ K})$$

می‌باشند. همچنین می‌توان با ثابت نگه داشتن یکی از پارامترهای فشار و یا دمای داخلی مخزن و با افزایش پارامترهای دیگر موجب ایجاد سیلان از داخل مخزن کروی گردید.

فهرست علائم:

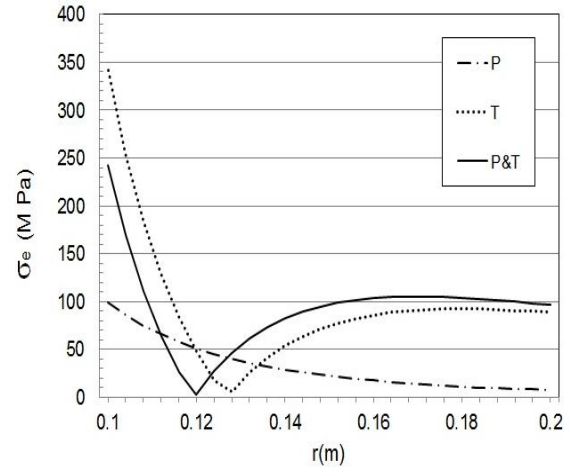
a, b	شعاع داخلی و خارجی مخزن کروی (m)
n_1, n_2	شاخص های مدول توانی برای مدول الاستیسته، ضریب پخش حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و تنش تسلیم
n_3, n_4	
p_a, p_b	فشار داخلی و خارجی مخزن (MPa)
T_a, T_b	دمای سطح داخل و خارج ($^{\circ}K$)
$\sigma_r, \sigma_{\theta}, \sigma_e$	تنش شعاعی، محیطی و موثر (MPa)
$\varepsilon_r, \varepsilon_{\theta}$	کرنش شعاعی و محیطی (mm)
E_0	ثابت مدول الاستیسته در مدل توانی
σ_{y_0}	ثابت تنش تسلیم در مدل توانی
α_0	ثابت ضریب پخش حرارتی در مدل توانی
K_0	ثابت ضریب هدایت حرارتی در مدل توانی

مراجع:

[۱] ملک زاده فرد، کرامت و نظری، علی، تحلیل ورق‌ها و پوسته‌های هدفمند تابعی، انتشارات الماس البرز، ۱۳۹۲، کرج.

[2] Mendelson A., Plasticity Theory and Application New York: The Macmillan Company, 1968.

[3] Boley B.A., Weiner J.H., International Journal of Thermal Stresses, New York, Wiley, 1960

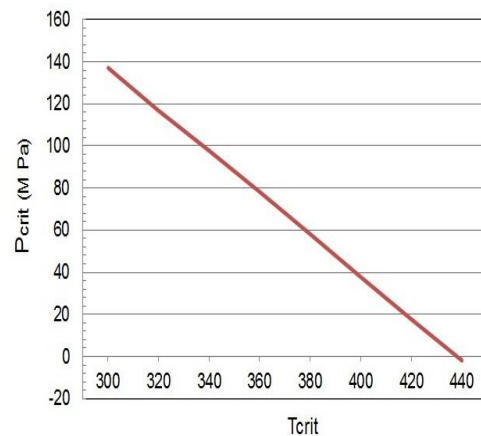


شکل (۵) مقایسه تنش‌های موثر، تحت بارهای فشاری، دمایی و ترکیب

فشار و دما در کره جدار ضخیم FG

$$(p_a = 50 \text{ MPa}, p_b = 0, T_a = 500 \text{ }^{\circ}K, T_b = 300 \text{ }^{\circ}K)$$

طبق نمودار (۵) ماکزیمم مقدار تنش موثر در شعاع داخلی بوده و در نتیجه سیلان از سطح داخلی آغاز می‌شود. برای شروع سیلان از سطح داخلی ترکیب‌های مختلفی از فشار و دمای داخلی را می‌توان در نظر گرفت. نمودار شکل (۶)، مقادیر مختلف ترکیبی فشار و دمای بحرانی لازم جهت شروع سیلان از سطح داخلی مخزن کروی را نشان می‌دهد.



شکل (۶) مقادیر مختلف ترکیبی فشار و دمای بحرانی لازم جهت شروع

سیلان از سطح داخلی مخزن کروی FG

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای بحرانی، فشار بحرانی کاهش یافته و مقادیر نمودار تقریباً دارای رفتار خطی

- [4] Whalley E., The Design of Pressure Vessels Subjected to Thermal Stress, Review, *International Journal of Mechanical Sciences*, 1960, pp. 379-395.
- [5] Cowper J.R., The elastoplastic thick-walled sphere subjected to a radial temperature gradient, *Transaction of the ASME*, 1960
- [6] Derrington M.G., Johnson W., The onset of yield in a thick spherical shell subject to internal pressure and a uniform heat flow, *Applied Science Research Series A*, Vol. 7, 1958, pp. 408-414.
- [7] Tanigawa Y., Some basic thermoplastic problems for nonhomogeneous structural Materials, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 48, 1995, pp. 377-389.
- [8] Obata Y., Noda N., Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and hollow sphere of functionally gradient material, *International Journal of Thermal Stresses*, Vol. 7, No. 17, 1994, pp. 471-488.
- [9] Tutuncu N. and Ozturk M., Exact solution for stresses in functionally graded pressure vessels, *Composites: Part B (Engineering)*, Vol. 32, 2001, pp. 683-686.
- [10] Rodríguez-Castro R., Wetherhold R.C., Kelestemur M.H., Microstructure and mechanical behavior of functionally graded Al A359/SiCp composite, *Materials Science and Engineering, A*, Vol. 323, 2002, pp. 445-456.
- [11] Parvizi A., Naghdabadi R., Arghavani J., Analysis of Al A359/SiCp Functionally Graded Cylinder Subjected to Internal Pressure and Temperature Gradient with Elastic-Plastic Deformation, *International Journal of Thermal Stresses*, Vol. 34, No. 10, 2011 1054-1070.
- [12] Nayebi A., Sadrabadi S.A., FGM Elastoplastic analysis under thermo mechanical loading, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2013.