

آنالیز تنش مخازن تحت فشار گروهی بر اثر فشار داخلی و تغییرات شعاعی درجه حرارت

دکتر محمدرضا اسلامی

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله تغییرات تنش های شعاعی و محیطی یک مخزن تحت فشار گروهی با زمان که تحت اثر فشار و درجه حرارت متفاوت داخل و خارج قرار گرفته است، بدست آورده شده است. روش محاسبه این تنش ها بر اساس یک روش ساده عددی است که تنش های الاستیک به عنوان تنش های اولیه استفاده نموده و در اثر خزش تنش های شعاعی و محیطی را با گرفتن فاصله زمانی کوچک ΔT در طول زمان محاسبه می شود، نتایج بدست آمده معلوم می نماید که نقطه ای که تنشهای محیطی صفر و شعاعی ماکزیمم می باشد نسبت مرکز کره میل نموده در حالی که هردو تنش تغییرات کاهش با زمان نشان داده و در اثر مرور زمان به وضعیت مطمئن تری از نظر توزیع تنش در ضخامت جدار مخزن می رسد.

۲- آنالیز تنش پس از انجام طرح اولیه:

این قسمت شامل آنالیز تنش و تعیین تمرکز تنش در اطراف سوراخ ها، تکیه گاه های مخزن، محل اتصالات خطوط لوله است که معمولاً همراه با اعمال نیرو و ممان به علت انبساط حرارتی می باشد، تمرکز تنش در اطراف پمپ و یا کمپرسور و یا وسایل دیگری که روی مخزن نصب گردیده اند مانند سینی های تقطیر در برج تقطیر، و بالاخره آنالیز استاتیکی و دینامیکی نیروهای باد و زلزله در جاهائی که احتمال وقوع آن پیش بینی می گردد.

۳- طرح نهائی و پیشنهاد عمر انتظاری:

مراحل اول و دوم که در بالا ذکر گردیده بیمه کننده کارکرد صحیح مخزن بلافاصله پس از طرح و قرار گرفتن در شرایط کاری و تحمل فشار و درجه حرارت محیط کار می باشد. پس از گذشت زمان توزیع تنش در نقاط مختلف مخزن به هیچ وجه همانند توزیع تنش در روز اول نبوده و اغلب اوقات به مقادیر بیشتری نسبت به حد تسلیم جسم میل نموده و پس از گذشت مدت زمانی مانند ۱۰ الی ۳۰ سال، منجر به انفجار مخزن می گردد. معیار طراحی در این مرحله، معمولاً بر اساس آنالیز خزش (وقتی نیروهای وارده استاتیکی باشند)

مخازن تحت فشار جدار ضخیم به شکل استوانه ای و گروهی در صنعت مورد استفاده فراوان دارند. به علت روند صنعت به طرف راندمان بیشتر - یعنی تولید انرژی با راندمان بیشتر و مصرف مواد ساختمانی و فلزی به مقدار کمتر - طرح اقتصادی مخازن تحت فشار که یکی از اجزاء تقریباً لاینفک هر صنعتی می باشند روز به روز اهمیت بیشتری پیدا نموده و به خصوص با بالا رفتن فشار و درجه حرارت تحولات ترمودینامیکی و شیمیائی و یا اتمی که ملزم به استفاده از مخازن تحت فشار می باشند طرح مکانیکی و آنالیز تنش صحیح و شناخت درست تغییرات تنش و کرنش در داخل یک مخزن تحت فشار را به صورت امر حیاتی پدیدار کرده است.

به طور معمول طرح یک مخزن تحت فشار - جدار نازک و یا جدار ضخیم - شامل سه مرحله به شرح زیر می باشد که رعایت آنها از سوی طراح و یا کارخانه سازنده الزامی است.

۱- طرح اولیه:

«طرح اولیه» که توسط کد و استانداردهای موجود مورد قبول کارخانه سازنده، به شرط رعایت کامل موارد ذکر شده در استاندارد انجام می پذیرد.

محاسبات:

یک مخزن تحت فشار کروی جدار ضخیم از مواد هموزن و ایزوتروپیک به شعاع داخلی a و خارجی b مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می شود. فرض بر این است که فشار و درجه حرارت در داخل و خارج کره به ترتیب P_a ، T_a ، P_b ، T_b می باشند. معادله تعادل در حالت تقارن کروی برابر است با:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

کرنش کل شعاعی و مماسی در داخل جدار کره که مجموع کرنش الاستیک، حرارتی و خزشی می باشند در این حالت برابرند با:

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

که رابطه کرنش و تغییر مکان U برابر است با:

$$\varepsilon_r = \frac{dU}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r} \quad (3)$$

با گذاشتن معادله (۳) در معادله (۲) برای تنش ها و بالاخره با جایگذاری در معادله (۱)، معادله تعادل بر حسب تغییر مکان U برابر می گردد با:

$$\begin{aligned} \frac{d^2U}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{2U}{r^2} = \\ \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{dT}{dr} + \frac{dg}{dr} + \frac{f}{r} \end{aligned} \quad (4)$$

که توابع g و f تابع کرنش خزشی بیوده و برابرند با:

$$\begin{aligned} f &= \frac{2(1-2\nu)}{1-\nu} (\varepsilon_r^c - \varepsilon_\theta^c) \\ g &= \varepsilon_r^c + \frac{2\nu}{1-\nu} \varepsilon_\theta^c \end{aligned} \quad (5)$$

معادله دیفرانسیل (۴) معادله اصلی و حاکم بر مسأله مورد نظر بوده و حل آن تغییر مکان U را بر حسب زمان ارائه می نماید. می توان به آسانی تحقیق نمود: با جایگذاری کرنش خزشی در معادله دیفرانسیل (۴) معادله دیفرانسیل غیرخطی از درجه بالا بدست خواهد آمد که حل تحلیلی آن تقریباً غیرممکن می نماید. به این علت معادله (۴) به شرح زیر جهت حل عددی تفکیک می گردد:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{2U}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{dT}{dr} \quad \text{برای } t = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2\dot{U}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\dot{U}}{dr} - \frac{2\dot{U}}{r^2} = \frac{d\dot{g}}{dr} + \frac{\dot{f}}{r} \quad \text{برای } t > 0 \quad (7)$$

و خستگی (وقتی نیروهای وارده دینامیکی باشند) استوار است. عمر مخزن توسط این مرحله از طراحی باید تعیین و به استفاده کننده رسماً اعلام گردد. اگر چنانچه این مرحله از طرح انجام پذیرفته نشده باشد، مخزن مسلماً پس از مدت زمان محدودی منفجر خواهد شد و طبق قوانین بین المللی کلیه خسارات جانی و مالی ناشی از آن رسماً متوجه سازنده مخزن خواهد بود. در اینجا باید متذکر شد که دو معیار فوق تنها معیارهای طراحی نمی باشند و بنا به تجربه کارخانجات سازنده مخازن تحت فشار نازک و ضخیم، معیارهای دیگری هم مانند «معیار فشار انفجار» و غیره نیز مورد استفاده قرار می گیرند. حتی به عنوان مثال پدیده خزش وقتی به عنوان ملاک تعیین عمر انتظاری مخزن مورد استفاده قرار می گیرد، جنبه های مختلفی خواهد داشت و نیاز به انجام محاسبات مختلفی در این زمینه می باشد. بعضی از این محاسبات نتایج اطمینان بخشی را ارائه می دهند و نهایتاً تعیین عمر مخزن بر روی آن قسمت از محاسبات خزش که منجر به واگرایی تنش در مخزن می گردد، استوار می شود.

چون هدف از ارائه این مقاله، بررسی خزش در مخازن جدار ضخیم می باشد لذا شناخت تاریخچه مختصری از این پدیده لازم به نظر می رسد... Nadai (۱) و Rabotnov (۲) پدیده خزش را به طور جامع تشریح و طراحی قطعات مختلفی را از جنبه های مختلف در اثر پدیده خزش بحث و معادلات اساسی و حاکم بر خزش را ارائه نموده اند. Marriot, Penny (۳) معادلات مربوط به خزش در استوانه ها و کره های جدار ضخیم را بسط داده و بحث کاملی نسبت به خزش و تغییرات تنش نسبت به زمان در اثر خزش ارائه داده اند. به علت این که معادلات حاکم غیرخطی بوده و راه حل کلی و عمومی به طور تحلیلی نمی توان برای آنها ارائه نمود، لذا روش های عددی مختلفی می توان برای تعیین تنش در قطعات مختلف عرضه کرد. بعضی از این روش ها توسط Sharifi (۴) و Sabbaghian و Eslami (۵) و Hult و Spence (۶) جهت قطعات مختلف مانند مخازن تحت فشار و برای شرایط خاص بارگذاری بحث شده اند. اخیراً Hata (۷) و Eslami (۸) متد عددی ساده و عمومی جهت محاسبه تنش و تغییرات آن برای سطوح و تیرها ارائه دادند که می توان جهت محاسبه تنش بر حسب زمان در مخازن تحت فشار نیز مورد استفاده قرار داد.

در این مقاله روش اخیر جهت استفاده تغییرات تنش بر حسب زمان به علت خزش در یک مخزن تحت فشار کروی بر اثر فشار داخل و تغییرات شعاعی درجه حرارت مورد استفاده قرار گرفته و تنش های شعاعی و مماسی بر حسب زمان با استفاده از روش عددی به دست آمده اند.

که معادله (۶) حل الاستیک در لحظه $t = 0$ را می دهد و معادله (۷) که بر حسب نرخ تغییرات تغییر مکان بر حسب زمان می باشد حل کرنش خزشی را که بلافاصله پس از اعمال نیرو روی مخزن شروع می شود بدست می دهد، در معادله بالا:

$$\dot{U} = \frac{dU}{dt}$$

الف - حل اولیه الاستیک

حل معادله دیفرانسیل (۶) برابر است با:

$$U = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\alpha}{r^2} \int_a^r T r^2 dr - A_1 r + \frac{A_2}{r^2} \quad (8)$$

که A_1 و A_2 ثابت های انتگرال می باشند و با استفاده از شرایط اولیه زیر پیدا می شوند.

$$\sigma_r = -P_a \quad r = a \quad \sigma_r = -P_b \quad r = b \quad (9)$$

با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۳) و سپس در معادله (۲)، تنش های الاستیک در لحظه $t = 0$ برابر می گردد با:

$$\sigma_r = \frac{1}{b^3 - a^3} [P_a a^3 (1 - \frac{b^3}{r^3}) - P_b b^3 (1 - \frac{a^3}{r^3})] + \frac{2E\alpha}{1-\nu} (1 - \frac{a^3}{r^3}) \int_a^b T r^2 dr - \frac{2E\alpha}{(1-\nu)r^3} \int_a^r T r^2 dr$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{b^3 - a^3} [P_a a^3 (1 + \frac{b^3}{r^3}) - P_b b^3 (1 + \frac{a^3}{r^3})] + \frac{2E\alpha}{1-\nu} (1 + \frac{a^3}{r^3}) \int_a^b T r^2 dr + \frac{E\alpha}{(1-\nu)r^3} \int_a^r T r^2 dr - \frac{E\alpha T}{1-\nu} \quad (10)$$

ب - حل خزش

نرخ تغییرات تغییر مکان، \dot{u} از انتگرال معادله (۷) برابر می شود با:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 r + \frac{\dot{A}_2}{r^2} + \frac{r}{3} \int_a^r \frac{\dot{f}}{r} dr \quad (11)$$

که \dot{A}_1 و \dot{A}_2 ثابت های انتگرال می باشند که توسط شرایط مرزی زیر پیدا می شوند:

$$\sigma_r = 0 \quad r = a \quad \sigma_r = 0 \quad r = b \quad (12)$$

در به دست آوردن معادله (۱۱) شرط غیر قابل تراکم بودن مواد مخزن در تحول خزشی، یعنی $\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta + \dot{\epsilon}_\varphi = 0$ استفاده گردیده است. با استفاده از نرخ تغییرات تغییر مکان از معادله (۱۱) همراه با معادلات (۳) و (۲) و تعریف f و g نرخ تغییرات تنش شعاعی و مماسی برابر می شوند:

$$\dot{\sigma}_r = \frac{2E}{1-\nu} [- \int_a^r \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{r} dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} (1 - \frac{a^3}{r^3}) \int_a^b \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{r} dr] \quad (13)$$

$$\dot{\sigma}_\theta = \frac{2E}{1-\nu} [- \int_a^r \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{r} dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} (1 + \frac{a^3}{2r^3}) \int_a^r \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{r} dr - \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{r}]$$

در معادلات بالا $\dot{\epsilon}_\theta$ نرخ تغییرات کرنش خزشی مماس، باید با تابع معادلی از تنش جایگزین شود. با در نظر گرفتن تئوری Von Mises و قوانین جاری مربوطه (۲)

$$\dot{\epsilon}_r^* = \frac{\dot{\epsilon}^*}{\sigma^*} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta^* = \frac{\dot{\epsilon}^*}{2\sigma^*} (\sigma_\theta - \sigma_r) = \dot{\epsilon}_\varphi^*$$

که $\dot{\epsilon}^*$ و σ^* به ترتیب نرخ تغییرات کرنش خزشی مؤثر و تنش مؤثر می باشند که طبق معادلات زیر تعریف شده اند.

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\dot{\epsilon}_r^* - \dot{\epsilon}_\theta^*)^2 + (\dot{\epsilon}_\theta^* - \dot{\epsilon}_\varphi^*)^2 + (\dot{\epsilon}_\varphi^* - \dot{\epsilon}_r^*)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2]^{\frac{1}{2}}$$

با در نظر گرفتن شرط تراکم ناپذیری و تقارن/کروی معادلات بالا به شرح زیر ساده می شوند:

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{2}{3} |(\dot{\epsilon}_\theta^* - \dot{\epsilon}_r^*)| \quad (16)$$

با جایگذاری معادلات (۱۶) در (۱۴)

$$\sigma^* = |\sigma_\theta - \sigma_r| \quad (17)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta^* = 0.5 \dot{\epsilon}^* \cdot \text{Sgn}(\sigma_\theta - \sigma_r)$$

که $\text{Sgn}(\sigma_\theta - \sigma_r)$ به معنی علامت $(\sigma_\theta - \sigma_r)$ می باشد. برای این که رابطه $\dot{\epsilon}_\theta^*$ کاملاً معلوم گردد باید رابطه بین کرنش خزش مؤثر و تنش مؤثر معلوم باشد. این رابطه معمولاً از طریق آزمایش معلوم می گردد. در این مقاله از قانون خزشی به شرح زیر استفاده گردیده است:

$$\dot{\epsilon}^* = B e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \sigma^{*n} \quad (18)$$

که T توزیع درجه حرارت در جدار کره، R ثابت عمومی گازها، ΔH انرژی فعال خزش و B و n ثابتهای مواد می باشند. با جایگذاری معادله (۱۷) و نهایتاً در معادلات (۱۳)، نرخ تغییرات تنش در $t > 0$ برابر می گردد با:

$$\dot{\sigma}_r = \frac{EB}{1-\nu} [- \int_a^r F dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} (1 - \frac{a^3}{r^3}) \int_a^b F dr] \cdot \text{Sgn}(\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (19)$$

۵- مدت عددی برای هر میزان از پیشرفت زمان می تواند تکرار گردد بدین ترتیب که σ_{r_i} و σ_{θ_i} محاسبه شده از معادله (۲۲) را به جای تنش های اولیه گرفته و روش را از مرحله (۳) تکرار نموده و تنش های جدیدتر را پس از گذشت t بعدی از معادله (۲۲) محاسبه نمود.

نتایج

نتایج عددی در منحنی های شکل (۲) الی (۷) ترسیم شده اند. توزیع درجه حرارت در ترسیم این نتایج مطابق معادله زیر در نظر گرفته شده است.

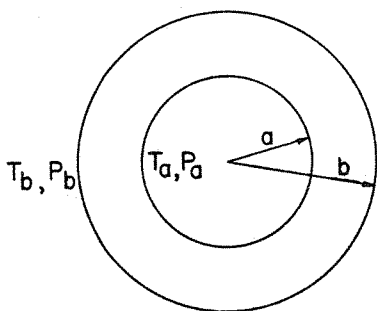
$$T = T_a - T_d (1 - a/r) (1 - a/b)$$

که $T_a - T_b = \Delta T$ و $T_d = \Delta T$ که در معادله بالا داده شده است حل معادلات انتقال حرارت یک بعدی در مختصات کروی می باشد، در معادلات یک فراسنج زمان برابر:

$$t_p = E B t (E \alpha T_d)^{n-1}$$

می باشد و بدین منظور در نظر گرفته شده است که بتوان از نتایج عددی داده شده برای مواد مختلف استفاده نمود.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که تغییرات تنش های شعاعی و مماس در جدار معززن نسبت به زمان در شرایط مختلف بارگذاری نسبت به تنش الاستیک در لحظه $t = 0$ کاهش یافته و تنش ها کمتر شده و بنابراین توزیع مجدد تنش ها در طول زمان در جهت ضریب اطمینان خواهد بود. نتایج این مقاله را می توان با نتایج حاصل در منبع راجعه (۱۰) که از دوروش عددی متفاوت حاصل شده اند مقایسه نموده نتیجه مقایسه به غیر از نقطه ای که تنش مماس صفر می گردد در بقیه کاملاً یکسان می باشد. علت این امر واگرایی روش عددی استفاده گردیده در منبع راجعه (۱۰) در اطراف نقطه ای که تنش مماس صفر می گردد می باشد.



شکل (۱) کره جدار ضخیم تحت فشار و درجه حرارت داخلی T_a و P_a و خارجی T_b و P_b

$$\sigma_{\theta} = \frac{EB}{1-\nu} \left[- \int_a^r F dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} \left(1 + \frac{a^3}{2r^3} \right) \int_a^b F dr - \frac{rF}{2} \right] \cdot \text{Sgn} (\sigma_{\theta} - \sigma_r)$$

که F در معادلات بالا برابر است با:

$$F = \frac{1}{r} e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \sigma^{*n} \quad (20)$$

معادلات تنش الاستیک که در معادله (۱۰) داده شده اند حال به عنوان شرط اولیه در حل معادلات بالا استفاده گردیده و نهایتاً تنش ها مطابق معادلات (۱۹) با زمان به علت خزش تغییر می نمایند. چون حل تحلیلی معادلات (۱۹)، که با جایگذاری σ^* تنش های σ_r و σ_{θ} در هر دو طرف معادلات ظاهر می گردند، پیچیده می باشد حل عددی به شرح زیر استفاده می گردد.

متد عددی

متد عددی که برای حل معادلات (۱۹) پیشنهاد می گردد به شرح زیر است:

- ۱- ضخامت کره $(b - a)$ به N گره تقسیم می شود، به طوری که شعاع هر گره r_i می باشد.
- ۲- تنش های الاستیک در لحظه $t = 0$ تعیین و $\sigma_{r_i}^0$ و $\sigma_{\theta_i}^0$ از معادلات (۱۰) در هر گره پیدا می شوند.
- ۳- از معادله (۲۰) F در هر گره پیدا می شود.
- ۴- از معادلات (۱۹)، با انتخاب یک فاصله زمانی کوتاه Δt ، تغییرات کوچک σ_{r_i} و σ_{θ_i} در هر گره از معادلات زیر پیدا می شوند.

$$\Delta \sigma_{r_i} = \frac{EB}{1-\nu} \left[- \int_a^{r_i} F dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} \left(1 - \frac{a^3}{r_i^3} \right) \int_a^b F dr \right] \Delta t \cdot \text{Sgn} (\sigma_{\theta} - \sigma_r)$$

$$\int_a^{r_i} F dr \Delta t \cdot \text{Sgn} (\sigma_{\theta} - \sigma_r)$$

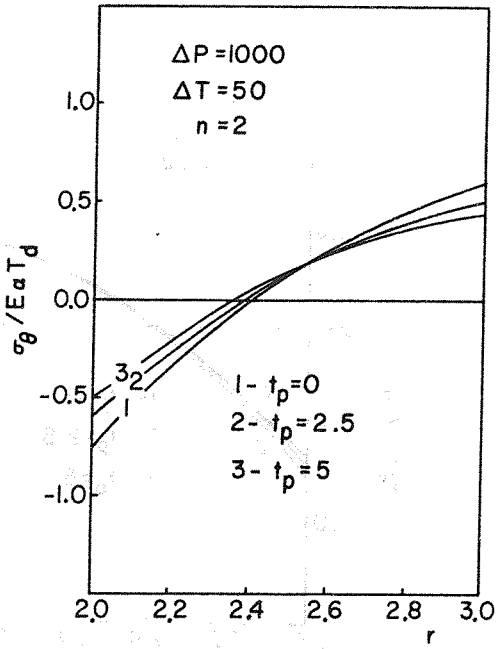
$$\Delta \sigma_{\theta_i} = \frac{EB}{1-\nu} \left[- \int_a^{r_i} F dr - \frac{b^3}{(a^3 - b^3)} \left(1 + \frac{a^3}{2r_i^3} \right) \int_a^b F dr - \frac{r_i F_i}{2} \right] \Delta t \cdot \text{Sgn} (\sigma_{\theta} - \sigma_r)$$

$$\int_a^b F dr - \frac{r_i F_i}{2} \Delta t \cdot \text{Sgn} (\sigma_{\theta} - \sigma_r)$$

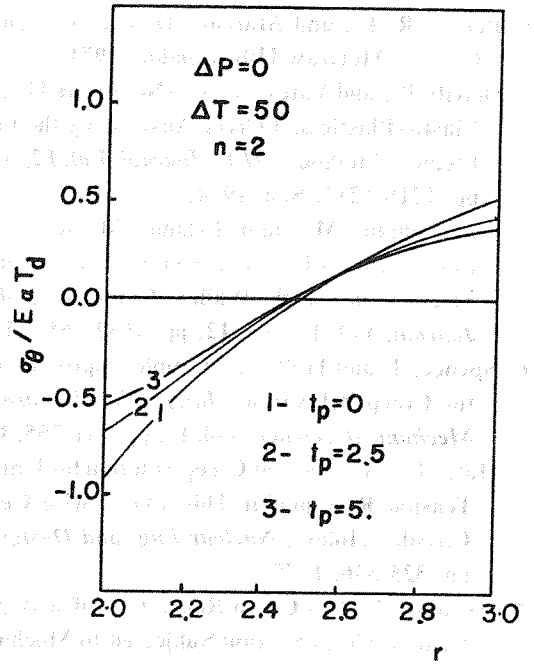
در ارزیابی انتگرال های بالا از هر متد کلاسیک انتگرال گیری می توان استفاده نمود و به جای تنش ها در تابع F مقدار تنش ها در فاصله زمانی ماقبل که معلوم می باشند (در لحظه $t = 0$) را جایگزین نمود. تنش های جدید پس از گذشت زمان Δt برابر می شوند با:

$$\sigma_{r_i} = \sigma_{r_i}^0 + \Delta \sigma_{r_i} \quad (22)$$

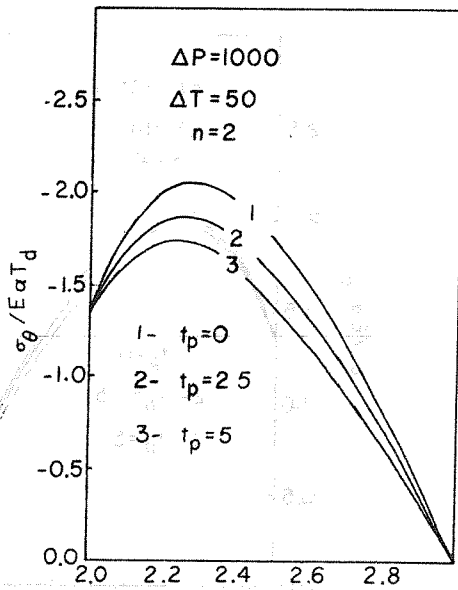
$$\sigma_{\theta_i} = \sigma_{\theta_i}^0 + \Delta \sigma_{\theta_i}$$



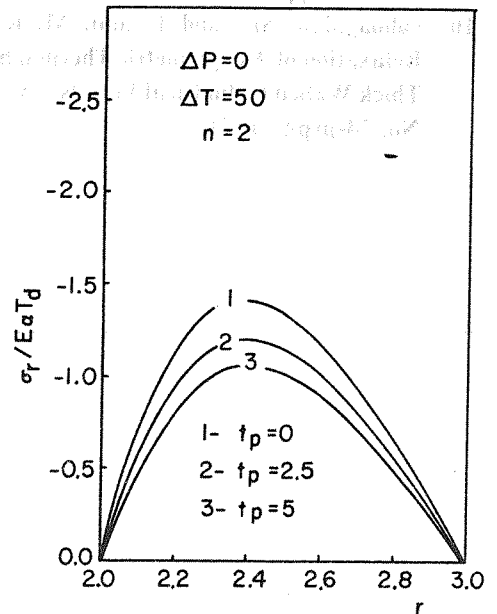
شکل (۱) تغییرات تنش محیطی با زمان



شکل (۲) تغییرات تنش محیطی با زمان وقتی $\Delta p = 0$, $\Delta t = 50$

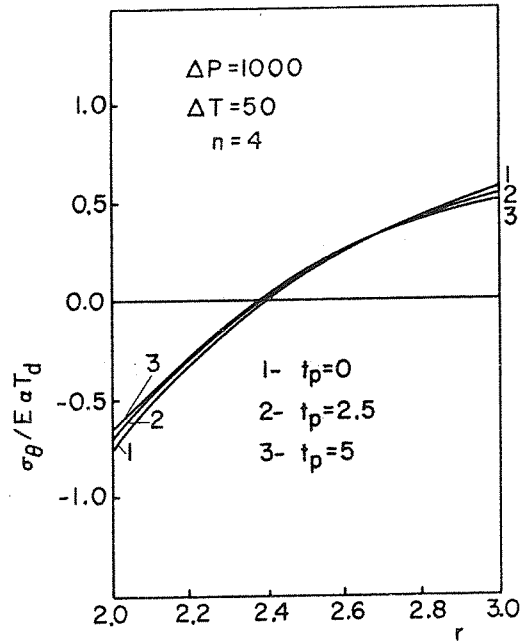


شکل (۳) تغییرات تنش شعاعی با زمان

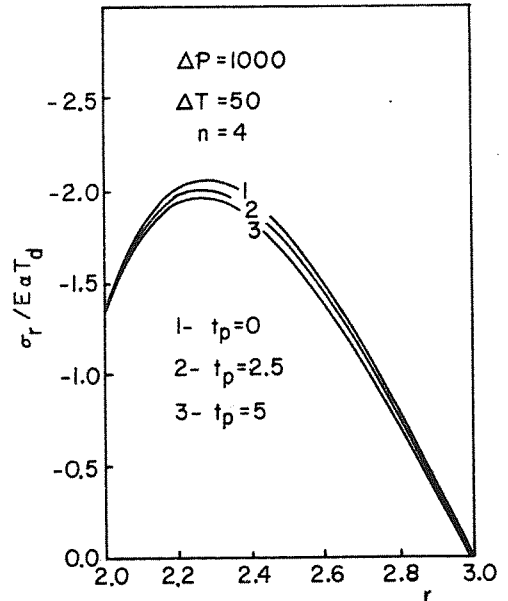


شکل (۴) تغییرات تنش شعاعی با زمان

1. Nadai, A., «Theory of Flow and Fracture of Solids», McGraw-Hill, NewYork, 1963.
2. Rabatnov, Y. N., «Creep Problems in Structural Members», Wiley, NewYork, 1969.
3. Penny, R. K., and Marriot, D. L., «Design for Creep», McGraw-Hill, London, 1971.
4. Sharifi, P., and Yates, D. N., «Nonlinear Thermo-Elastic-Plastic and Creep Analysis by the Finite Element Method», *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 9, pp. 1210-1215, Sep. 1974.
5. Sabbaghian, M., and Eslami, M. R. «Creep Relaxation of Nonaxisymmetric Thermal Stresses in Thick Walled Cylinders», *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 12, pp. 1652-1658, 1974.
6. Spence, J. and Hult, J., «Simple Approximations for Creep Relaxation» *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 15, pp. 741-755, 1973.
7. Hata, T., «A Transient Creep Solution for Uniaxial Tension Rectangular Thin Plates with Central Circular Holes», *Nuclear Eng. and Design*, 32, pp. 325-336, 1975.
8. Eslami, M. R., «Creep Relaxation of a Beam of General Cross Section Subjected to Mechanical and Thermal Loads», *tran, ASME, J. of Mechanical Design*, Vol. 100, No. 4, pp. 626-629, 1978.
9. Dorn, J. E., «Some Fundamental Experiments on High Temperature Creep», *J. Mech. Phys. Solids*, 3, pp. 85-116, 1954.
10. Sabbaghian, M., and Eslami, M. R., «Creep Relaxation of Axisymmetric Thermal Stresses in Thick Walled Cylindrical Vessels», ASME pap., No. 74-pvp-9, 1974.



شکل (۶) تغییرات تنش محیطی با زمان



شکل (۷) تغییرات تنش شعاعی با زمان