



بررسی استحکام و تخمین عمر خزش سیلندر موتور تراکتور MF 399 در حالت استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG)

رضا جعفرزاده^{۱*}، داود محمد زمانی^۱، اسعد مدرس مطلق^۲، ایرج رنجبر^۱

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد تاکستان

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

نویسنده مسئول: nazazartak@yahoo.com

چکیده

برای به دست آوردن عمر خزش یک سازه فلزی می‌توان روش تنش مرجع را به کار برد و برای به دست آوردن تنش مرجع در یک سازه‌ی فلزی مهم‌ترین گام تعیین بار گسیختگی پلاستیک سازه است. ترکیب روش المان محدود و تئوری آنالیز حدی یکی از روش‌های تعیین بار گسیختگی یک سیستم می‌باشد. در روش ترکیبی المان محدود و آنالیز حد پایین با کاربرد تقریب خطی سطح تسلیم و با اعمال روابط تعادل، شرایط مرزی و شرایط ناپوستگی مجاز استاتیکی تنش‌ها، معادلاتی موسوم به معادلات قیدها حاصل می‌شود. با کاربرد این معادلات و با توجه به شرایط بارگذاری و با بهره‌گیری از تکنیک بهینه‌سازی، یک میدان تنش مجاز استاتیکی که توسط آن حد پایینی برای بار گسیختگی به دست می‌آید، محاسبه می‌شود. بعد از تعیین بار گسیختگی تنش مرجع تعیین می‌گردد و با به کار بردن آن در این تحقیق عمر خزش در فشار و دمای بیشینه‌ی بوش سیلندر به دست می‌آید. به علت زیاد نبودن فشار و دمای اعمال شده به بوش سیلندر، عمر خزش بسیار بالا حاصل می‌شود و نشان دهنده این است که در این دما بوش سیلندر رفتار کاملاً الاستیک از خود بروز می‌دهد.

کلمات کلیدی: عمر خزش، المان محدود، برنامه‌ریزی غیر خطی، حد پایین بار گسیختگی، سیلندر MF 399

مقدمه

چگالی انرژی کرنشی که معیاری برای ارزیابی شکست خزشی می‌باشد در جداره‌ی درونی سیلندر بالاترین مقدار را دارد. فشار اعمال شده بر جداره‌ی درونی سیلندر با گذشت زمان باعث افزایش چگالی انرژی کرنشی در جداره‌ی درونی می‌شود. خزش در سیلندرها، مخازن و لوله‌های فلزی تحت فشاری که حدوداً در دمای بالاتر از 0.3-0.5 نقطه‌ی ذوب خود کار می‌کنند شروع شده و با گذشت زمان گسترش می‌یابد که در نهایت باعث صدمه دیدن سازه می‌گردد. بنابراین به دست آوردن عمر خزش یکی از موارد مهم طراحی قطعات مهندسی با نگرش ایمنی-خرابی می‌باشد. تئوری حد پایین بار گسیختگی یک ابزار قدرتمند برای تخمین عمر خزش به روش عددی می‌باشد. در این



تئوری فرض می‌شود که نمونه‌ی فلزی دارای رفتار کاملاً پلاستیک با یک جریان غیر همراه است و میدان تنش‌های استاتیکی مجاز تخمین حد پایینی از بار واقعی را نتیجه می‌دهند. میدان تنش‌های مجاز استاتیکی به این صورت تعریف می‌شوند که شرط تنش مرزی، تعادل و شرط تسلیم را ارضاء کنند. همچنین تنش‌ها بایستی در درون یا روی سطح تسلیم در فضای تنش قرار گیرند.

هرچند که تئوری حد پایین ابزار ویژه‌ی مفیدی برای تحلیل‌های استحکام می‌باشد، کاربرد آن اغلب در مسائل عملی که شامل بارگذاری و هندسه‌ی پیچیده می‌باشند مشکل است. یک روش چاره برای محاسبه‌ی حد پایین، که از المان محدود و برنامه ریزی خطی و غیر خطی بهره می‌گیرد توسط لیسمر (۱۹۷۰) و اسلون (۱۹۸۸) برای مورد خطی و مدرس مطلق (۱۹۹۷) و لیامن و اسلون (۲۰۰۲) برای مورد غیر خطی ارائه شده است. در این فرایند توده فلز به مجموعه‌ای از المان‌های مثلثی سه گرهی که متغیرهای گره‌ها تنش‌های مجهول هستند جدا می‌شود. به کار بردن شرایط حدی تنش، معادلات تعادل و شرط تسلیم منجر به بیان بار گسیختگی می‌شود که تابع بیشینه ساختن مجموعه‌ی قیود خطی تنش‌ها است. دایر بر اجتناب کردن از رخ دادن قیود غیر خطی در ماتریس قیدها، لیسمر (۱۹۷۰)، اسلون (۱۹۸۸) و مدرس مطلق (۱۹۹۷) سطح تسلیم را به وسیله‌ی تابع خطی از تنش‌های مجهول تقریب زدند. همچنین لیامن و اسلون (۲۰۰۲) با به کار بردن تقریب هذلولی سطح تسلیم به برنامه‌ریزی غیر خطی نائل شدند. مزیت عمده‌ی فرمولاسیون عددی تئوری حد پایین این است که می‌تواند با مسائل با بارگذاری و هندسه‌ی پیچیده سر و کار داشته باشد. اما اشکال اساسی آن این است که میزان زمان مورد نیاز برای حل مسئله برنامه‌ریزی حاصل از آن ممکن است به صورت معنی‌داری افزایش یابد به ویژه اگر الگوریتم یک جهتی متداول یا تجدید نظر یافته به کار رود. علت این امر این است که معیار تسلیم تقریب زده شده نوعاً تولید تعداد بسیار زیادی از قیود نابرابری در تنش‌های گرهی می‌نماید. اسلون (۱۹۸۸) با بهره‌گیری از الگوریتم مجموعه مؤثر در حل مسئله برنامه‌ریزی خطی بر این مشکل فائق آمد. علاوه بر این او این الگوریتم را به وسیله‌ی راهبرد فاکتوریزاسیون و بهنگام کردن رید (۱۹۷۶-۱۹۷۵) بهبود داد. و نیز برای رسیدن به این منظور مدرس مطلق با به کار بردن الگوریتم مجموعه-ی مؤثر درجه دوم محدب و راهبرد فاکتوریزاسیون و بهنگام کردن رید توانست برنامه‌ریزی درجه دوم تعیین حد پایین بار گسیختگی سازه مکانیکی را حل نماید. در این پژوهش الگوریتم مجموعه مؤثر درجه دوم محدب برای حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دوم مربوط به سازه سیلندر به کار رفته است.

مواد و روش‌ها

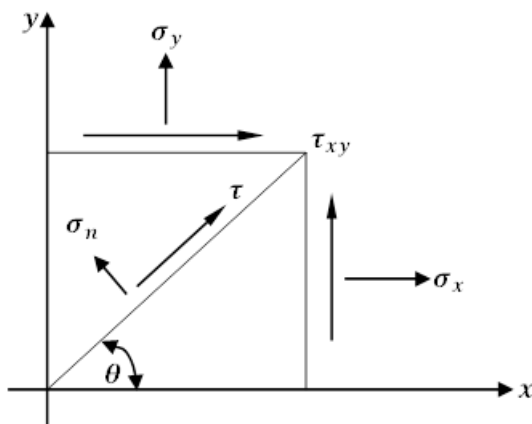
فرمولاسیون المان محدود تئوری حد پایین

بر پایه کارهای اسلون (۱۹۸۸)، فرمولاسیون المان محدود تئوری حد پایین از المان‌های مثلثی سه گرهی تنش بهره می‌برد. هر گره دارای سه درجه‌ی آزادی از نوع تنش‌های مجهول گره‌ای σ_x ، σ_y و τ_{xy} می‌باشد (شکل ۱).

بر طبق روابط زیر فرض بر این است که تغییرات تنش در طول هر المان به صورت خطی باشد.



$$\sigma_x = \sum_{i=1}^3 N_i \sigma_{xi} \quad ; \quad \sigma_y = \sum_{i=1}^3 N_i \sigma_{yi} \quad ; \quad \tau_{xy} = \sum_{i=1}^3 N_i \tau_{xy} \quad (1)$$



شکل ۱- تفکیک تنش‌ها به مؤلفه‌های قائم و برشی

که σ_x ، σ_y و τ_{xy} تنش‌های گرهی و N_i توابع شکل خطی می‌باشند. در المان‌های مثلثی سه گره‌ای تابع شکل برای هر المان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_1 = \frac{\xi_1 + \eta_1 x + \zeta_1 y}{2A} \quad ; \quad N_2 = \frac{\xi_2 + \eta_2 x + \zeta_2 y}{2A} \quad ; \quad N_3 = \frac{\xi_3 + \eta_3 x + \zeta_3 y}{2A} \quad (2)$$

که در این روابط مقادیر ξ_i ، η_i و ζ_i برابر است با:

$$\xi_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2 \quad ; \quad \eta_1 = y_2 - y_3 \quad ; \quad \zeta_1 = x_3 - x_2$$

$$\xi_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3 \quad ; \quad \eta_2 = y_3 - y_1 \quad ; \quad \zeta_2 = x_1 - x_3$$

$$\xi_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1 \quad ; \quad \eta_3 = y_1 - y_2 \quad ; \quad \zeta_3 = x_2 - x_1 \quad (3)$$

A مساحت المان است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}$$

مجهولات مسئله تنش‌های گره‌ای می‌باشند که در یک شبکه با تعداد N گره تعداد مجهولات مسئله برابر 3N خواهد بود.

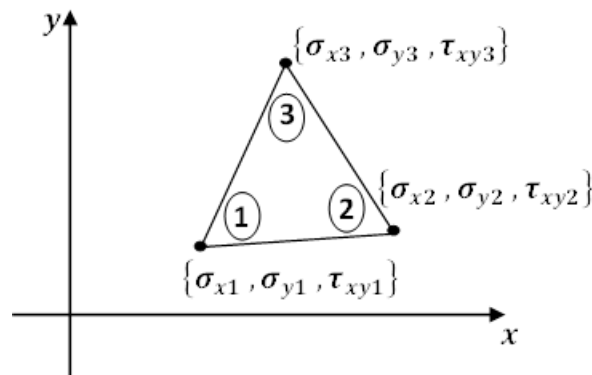
تعداد المان‌ها^۱

یکی از شروط روش المان محدود حد پایین ارضاء روابط تعادل در المان‌ها است. برای مسائل کرنش مسطح، در هر

^۱Equilibrium Equation



گره از المان سه مؤلفه تنش مجهول σ_x ، σ_y و τ_{xy} وجود دارد (شکل ۲). در مسائل کرنش مسطح مقدار $\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$ می‌باشد. برای تولید یک میدان تنش مجاز استاتیکی که بار گسیختگی پلاستیک را نتیجه می‌دهد باید تنش‌ها در سطح هر المان معادلات تعادل را ارضاء نماید.



شکل ۲- مثلث تنش سه گره‌ای خطی

برای المان نشان داده شده در شکل (۲) طبق تئوری الاستیسیته معادلات تعادل به شرح زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \gamma \quad (4)$$

در این معادلات، تنش‌های کششی مثبت فرض شده و γ وزن مخصوص فلز می‌باشد. از آنجا که تنش‌ها در سطح المان‌ها به صورت خطی توزیع شده‌اند با جاگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه (۴)، برای هر المان دو قید برابری^۲ روی تنش‌های گره‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$[A_{eq}] \vec{x} = \vec{b}_{eq} \quad (5)$$

$$[A_{eq}] = \frac{1}{2A_e} \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & \zeta_1 & \mu_2 & 0 & \zeta_2 & \mu_3 & 0 & \zeta_3 \\ 0 & \zeta_1 & \mu_1 & 0 & \zeta_2 & \mu_2 & 0 & \zeta_3 & \mu_3 \end{bmatrix}$$

$$\vec{x} = \{\sigma_{x1} \ \sigma_{y1} \ \tau_{xy1} \ \sigma_{x2} \ \sigma_{y2} \ \tau_{xy2} \ \sigma_{x3} \ \sigma_{y3} \ \tau_{xy3}\}^T \quad ; \quad \vec{b}_{eq} = \{0 \ \gamma\}^T$$

در رابطه (۵) A_e مساحت المان و ξ ، η و ζ ضرایب رابطه (۳) هستند.

با به دست آمدن ماتریس قیدهای $[A_{eq}]$ و بردار سمت راست \vec{b}_{eq} برای هر المان و تعمیم آن‌ها برای کل شبکه، قیدها و بردار سمت راست برای کل شبکه به دست می‌آید.

²Equality Constraint



شرایط مرزی^۳

در فرمولاسیون المان محدود حد پایین به منظور اعمال شرایط مرزی تعیین شده لازم است قیدهای اضافی بر تنش-های گره‌ای اعمال گردند. در مسئله دیواره فلزی که زیر بار ترکیبی از نیروهای برشی و قائم قرار دارد شرایط مرزی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\sigma_n^L = q = \text{constant} \quad ; \quad \tau^L = t = \text{constant} \quad (6)$$

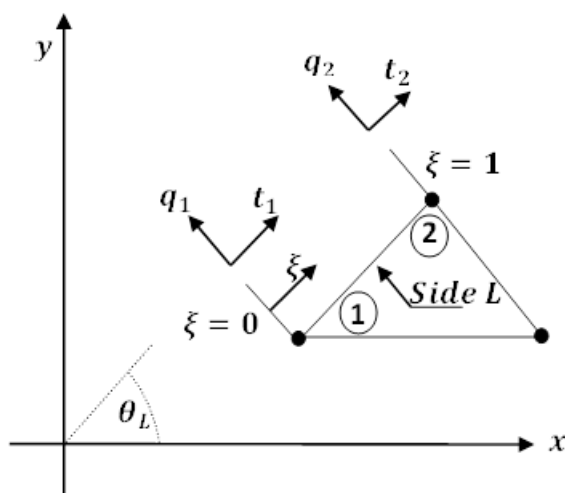
با توجه به تغییرات خطی مؤلفه‌های تنش σ_x ، σ_y و τ_{xy} در طول ضلع هر المان و با توجه به شکل (۳) شرایط کلی مرزی به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\sigma_n^L = q_1 + (q_2 - q_1)\xi \quad ; \quad \tau^L = t_1 + (t_2 - t_1)\xi \quad (7)$$

که L معرف ضلع المان مثلثی شکل است که تنش‌های مرزی معلوم بر آن وارد می‌شود. ξ مختصات محلی در راستای ضلع L ، تنش‌های قائم مرزی متناظر با گره‌های (1,2) و نیز تنش‌های برشی مرزی متناظر با گره‌های (1,2) می‌باشند.

برای ارضاء شرایط مرزی رابطه‌ی (۷) کافی است معادلات زیر در گره‌های دو طرف لبه‌های مرزی برقرار باشند:

$$\sigma_{n1} = q_1 \quad ; \quad \sigma_{n2} = q_2 \quad ; \quad \tau_1 = t_1 \quad ; \quad \tau_2 = t_2 \quad (8)$$



شکل ۳- شرایط مرزی تنش

حال اگر θ_L زاویه‌ی ضلع L با جهت مثبت محور x باشد (پاد ساعتگرد مثبت) و با استفاده از روابط (۹)، می‌توان قیدهای برابری را به‌دست آورد.

³Boundary Condition



$$\tau = -\frac{1}{2} \sin 2\theta \sigma_x + \frac{1}{2} \sin 2\theta \sigma_y + \cos 2\theta \tau_{xy} \quad ; \quad \sigma_n = \sin^2 \theta \sigma_x + \cos^2 \theta \sigma_y - \sin 2\theta \tau_{xy} \quad (9)$$

قیدهای برابری:

$$[A_{bound}] \vec{x} = \vec{b}_{bound} \quad (10)$$

که در آن:

$$[A_{bound}] = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta_l & \cos^2 \theta_l & -\sin 2\theta_l \\ -\frac{1}{2} \sin 2\theta_l & \frac{1}{2} \sin 2\theta_l & \cos 2\theta_l \end{bmatrix}$$

$$\vec{x} = \{\sigma_{x1} \quad \sigma_{y1} \quad \tau_{xy1} \quad \sigma_{x2} \quad \sigma_{y2} \quad \tau_{xy2}\}^T$$

$$\vec{b}_{bound} = \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$$

بنابراین برای هر ضلع از المان‌های شبکه که تنش‌های سطحی مرزی بر آن‌ها اثر می‌کند حداکثر چهار قید برابری تولید می‌شود. اگر ضلع مرزی به صورت آزاد و بدون بارگذاری باشد رابطه‌ی (۸) به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$\sigma_{n1} = \sigma_{n2} = \tau_1 = \tau_2 = 0$$

همچنین اگر ضلع مرزی، حاصل از تقارن هندسی مسئله باشد رابطه‌ی (۸) به صورت زیر در می‌آید:

$$\sigma_{n1} \neq 0 \quad \sigma_{n2} \neq 0 \quad ; \quad \tau_1 = \tau_2 = 0$$

معیار تسلیم

اگر در شرایط کرنش مسطح تنش‌های کششی را مثبت فرض کنیم، معیار تسلیم ون میسر می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$F = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2 - \frac{4}{3} S_y^2 = 0 \quad (11)$$

چون که تنش‌ها نباید از شرط تسلیم فراتر روند، از این‌رو برای برآورده کردن الزامات تئوری حد پایین، ضروری است که در هر مثلث تنش رابطه‌ای $F \leq 0$ ارضاء شود. برای فرمول‌بندی تئوری حد پایین به عنوان مسئله برنامه‌ریزی خطی یا درجه دوم، لازم است که رابطه (۱۱) توسط معیار تسلیم که تابعی خطی از تنش‌های مجهول است تقریب زده شود. برای اطمینان از این که جواب به دست آمده از تئوری حد پایین بسیار نزدیک به بار گسیختگی واقعی باشد، سطح تسلیم خطی شده بایستی در درون سطح تسلیم ون میسر در فضای تنش قرار گیرد.

با در نظر گرفتن:

$$X = \sigma_x - \sigma_y \quad ; \quad Y = 2\tau_{xy} \quad ; \quad R = \frac{2}{\sqrt{3}} S_y \quad (12)$$



شرط تسلیم ون میسر را می‌توان به صورت $X^2 + Y^2 = R^2$ نوشت. بر حسب متغیرهای X و Y همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است یک دایره رسم می‌شود. سطح تسلیم ون میسر به وسیله‌ی یک چند ضلعی محاطی با P_1 ضلع و P_1 رأس تقریب زده می‌شود. به طور کلی سطح تسلیم خطی شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_k \sigma_x + B_k \sigma_y + C_k \tau_{xy} \leq D \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, P_1 \quad (13)$$

که برای سطح تسلیم ون میسر:

$$A_k = \cos \frac{2\pi k}{P_1} \quad ; \quad B_k = -\cos \frac{2\pi k}{P_1} \quad ; \quad C_k = 2 \sin \frac{2\pi k}{P_1} \quad ; \quad D = R \cos \frac{\pi}{P_1} \quad (14)$$

قیود تحمیل شده بر تنش‌ها در هر گره به سبب خطی‌سازی معیار تسلیم، می‌توانند به وسیله رابطه ماتریسی (۱۵) خلاصه شوند:

$$[A_{yield}] \vec{x} \leq \vec{b}_{yield} \quad (15)$$

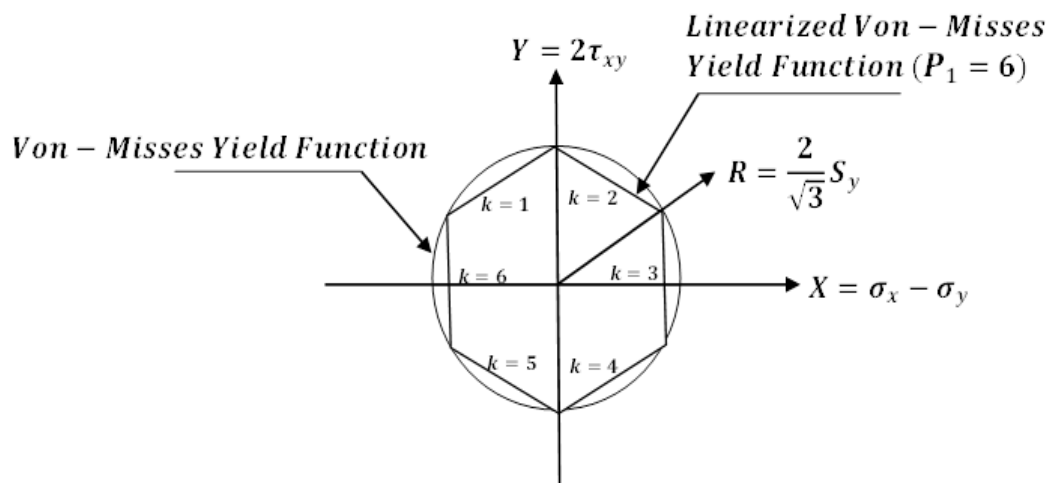
که در آن:

$$[A_{yield}] = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{P_1} & B_{P_1} & C_{P_1} \end{bmatrix}_{P \times 3}$$

$$\vec{x}^T = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}$$

$$\vec{b}_{yield}^T = \{D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_{P_1}\}$$

بنابراین شرط تسلیم خطی شده تولید P_1 قید نابرابری در هر گره بردار تنش می‌کند. از آنجا که $3E$ گره برای شبکه E مثلی داریم تعداد کل قیود نابرابری تولید شده برابر با $3P_1E$ می‌شود.



شکل ۴- تقریب خطی معیار تسلیم ون میسس

تابع هدف

در بیشتر مسائل کرنش مسطح، اگر بارهای خارجی مجهول در جهت قائم بر لبه‌ی مرزی المان اعمال شوند، نیاز به یافتن میدان مجاز تنش استاتیکی است که انتگرال زیر را بیشینه کند:

$$Q = h \int_S \sigma_n ds \quad (16)$$

که در آن Q بار گسیختگی است، h ضخامت خارج از صفحه و σ_n تنش قائمی است که بر روی قسمتی از لبه مرزی S وارد می‌شود. شکل (۵) لبه یک مثلث را نشان می‌دهد که توسط گرهای ۱ و ۲ معین شده است. اگر فرض شود تنش‌ها به صورت خطی در طول هر المان تغییر کنند، Q از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \frac{Lh}{2} (\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) \quad (17)$$

که در آن L طول لبه مرزی S و $(\sigma_{n1}, \sigma_{n2})$ تنش‌های قائم وارده بر گرهای ۱ و ۲ مثلث e هستند.

اگر بارهای خارجی مطابق شکل (۶) فقط در جهت مماس به لبه مرزی اعمال شوند، Q از رابطه (۱۸) دست می‌آید:

$$Q = \frac{Lh}{2} (\tau_1 + \tau_2) \quad (18)$$

که در آن (τ_1, τ_2) تنش‌های برشی در گرهای ۱ و ۲ از مثلث e هستند.

اگر بارگذاری خارجی در هر دو جهت قائم و مماسی بر لبه مرزی اعمال شود، برطبق روابط (۱۷) و (۱۸)، بار گسیختگی بیشینه شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q^2 = Q_x^2 + Q_y^2 \quad (19)$$



$$Q_x = \sum_s \frac{L_i h_i}{2} (\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) \sin \theta_s + \sum_s \frac{L_i h_i}{2} (\tau_1 + \tau_2) \cos \theta_s$$

$$Q_y = \sum_s \frac{L_i h_i}{2} (\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) \cos \theta_s + \sum_s \frac{L_i h_i}{2} (\tau_1 + \tau_2) \sin \theta_s$$

برای فرمولاسیون بار گسیختگی به صورت تابعی از تنش‌های مجهول σ_x ، σ_y و τ_{xy} ، روابط (۹) و (۱۹) ترکیب می‌شوند و نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$Q^2 = Q_x^2 + Q_y^2 = \{\sigma\}^T H \{\sigma\} \quad (20)$$

$$Q_x = C_1 \sigma_{x1} + C_2 \sigma_{y1} + C_3 \tau_{xy1} + \dots + C_{n-2} \sigma_{xn} + C_{n-1} \sigma_{yn} + C_n \tau_{xyn}$$

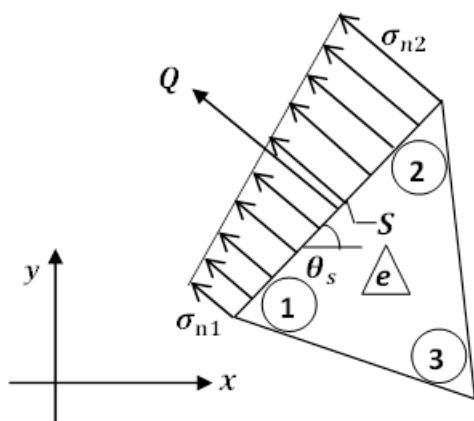
$$Q_y = CC_1 \sigma_{x1} + CC_2 \sigma_{y1} + CC_3 \tau_{xy1} + \dots + CC_{n-2} \sigma_{xn} + CC_{n-1} \sigma_{yn} + CC_n \tau_{xyn}$$

که در آن H ماتریس متقارن هسی، C_1 و CC_1 به ترتیب مولفه‌های بار خارجی مجهول در جهات x و y ، که توابعی از θ_s ، L_i و h_i می‌باشند. به طور کلی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی و درجه دوم تابع هدف به این شکل نوشته می‌شود:

$$Q = C^T \{\sigma\} + \frac{1}{2} \{\sigma\}^T H \{\sigma\}$$

که در آن C ضریب بخش خطی تابع هدف است. برای مثال، اگر فقط بارگذاری خارجی به صورت قائم روی لبه مرزی s وارد شود، با فرض ضخامت واحد در جهت خارج از سطح، ضریب بردار C به صورت زیر بیان می‌شود:

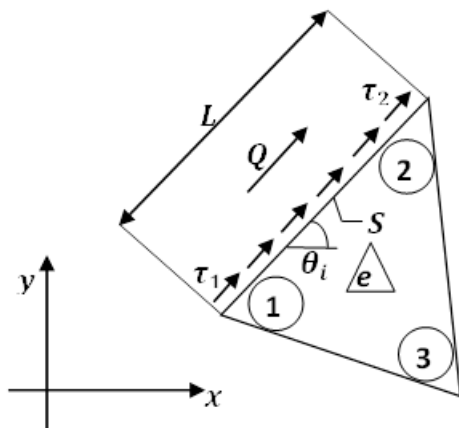
$$\{C^s\}^T = \frac{L}{2} \{\sin^2 \theta_s, \cos^2 \theta_s, -\sin 2\theta_s, \sin^2 \theta_s, \cos^2 \theta_s, -\sin 2\theta_s\}$$



$h = \text{Out - of Plane Thickness}$

$Q = \text{Normal Force}$

شکل ۵- بارگذاری در جهت قائم بر لبه مرزی



$h = \text{Out - of Plane Thickness}$

$Q = \text{Shear Force}$

شکل ۶- بارگذاری در جهت مماس بر لبه مرزی

نتایج و بحث

کاربرد بار گسیختگی در موتور MF 399

برای روشن ساختن کارائی روش ارائه شده در بالا، در این قسمت به حل مسئله‌ی عمر خزش سیلندر موتور تراکتور MF 399 تحت شرایط کرنش مسطح پرداخته می‌شود. منظور از حل مسئله‌ی فوق در گام اول به دست آوردن بار گسیختگی حدی تحت شرایط بارگذاری فشاری می‌باشد. برای فرمولاسیون المان محدود حد پایین بار گسیختگی و حل مسئله‌ی بهینه‌سازی حاصل از این فرمولاسیون، برنامه‌ی تدوین شده به زبان برنامه‌نویسی فترن تحت عنوان OPSTAL به کار می‌رود. در گام دوم بعد از حاصل شدن بار گسیختگی حدی تنش مرجع σ_r^4 محاسبه می‌شود و در گام سوم با در دست داشتن تنش مرجع و دمای بیشینه^۵ عمر خزش برای مسئله به دست می‌آید. سوخت به کار رفته برای موتور گاز CNG می‌باشد و فشار و دمای بیشینه اعمال شده بر دیواره درونی سیلندر با توجه به خصوصیات احتراق آن مد نظر بوده است.

بار گسیختگی حد پایین سیلندر موتور تراکتور MF 399

به علت متقارن بودن سیلندر در راستای محور طولی، می‌توان یک برش عمودی از آن را مورد بررسی قرار داد. سیلندر موتور تراکتور MF 399 به ابعاد، قطر داخلی ۱۰۰ mm، قطر خارجی ۱۲۰ mm، ارتفاع ۱۳۵ mm و فولاد Stainless-Steel با خصوصیات مکانیکی ($\nu = 0.3, E = 240 \times 10^6 \text{ P}_a$) در نظر گرفته شده است. این داده‌ها در نرم-افزار ANSYS برای یافتن مشخصات هندسی مسئله که شامل مختصات گره‌ها، خصوصیات المان‌ها و مشخصات المان‌های مرزی است به کار رفته است. برای دو بعدی کردن مسئله المان مثلثی PLANE 42 استفاده شده است. چون در این المان چهارگره‌ای، گره چهار با گره سه برهم منطبق شده و دارای یک مختصات می‌گردند.

⁴ $\sigma_r = \text{Refrence Stress}$

⁵Maximum Temperature



پس از المان‌بندی فایل داده‌های ورودی با پسوند .dat. تشکیل می‌شود. این فایل شامل شماره و مختصات گره‌ها، شماره و گره‌های تشکیل دهنده المان‌ها و گره‌های تشکیل دهنده لبه‌های مرزی می‌باشد.

بعد از تشکیل فایل ورودی، برنامه‌ی تحت فرترن به نام PRODAT اجرا می‌شود. برای حالت $P_1 = 24$ (تعداد اضلاع حاصل از خطی سازی معیار تسلیم) در این مسئله خروجی این برنامه به صورت زیر می‌باشد:

$$m=1440, \quad n=80, \quad NZ=5810, \quad r=62, \quad mr=1502$$

با مشخص شدن این داده‌ها، پارامترهای مهم پلاستیسیته به صورت زیر به دست می‌آید.

$$a(m+r, n)=a(1502, 62), \quad x(n+1)=x(73), \quad XA(m+r+2)=XA(1504), \quad JA(NZ+m+1)=JA(7251)$$

$$b(mr+1)=b(1503), \quad c(n)=c(80), \quad A_g(NZ+m+1)=A_g(7251)$$

با به کارگیری این پارامترها در برنامه اصلی OPSTAL، خروجی آن به صورت یک فایل هم‌نام با ورودی و با پسوند .lis. به دست می‌آید.

با استفاده از خروجی برنامه‌ی OPSTAL تابع هدف بهینه برابر با $A = -8427.76254 \text{ mm}^2$ به دست می‌آید، علامت منفی نشان دهنده‌ی فشاری بودن نیروی اعمالی به جداره‌ی درونی بوش سیلندر می‌باشد. فشار گسیختگی حد پایین پلاستیک به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q_c = A(2\pi \times L \times R) S_y = 8427.76254 (2\pi \times 135 \times 50) \times 240 = 47.69 \text{ MPa}$$

که در آن L ، R و S_y به ترتیب برابر با طول بوش سیلندر، شعاع درونی بوش سیلندر و تنش تسلیم می‌باشند.

چگالی انرژی کرنشی که معیاری برای ارزیابی شکست خزشی می‌باشد در جداره‌ی درونی بوش سیلندر بالاترین مقدار را دارد. فشار اعمال شده بر جداره‌ی درونی بوش سیلندر با گذشت زمان باعث افزایش چگالی انرژی کرنشی در جداره‌ی درونی می‌شود.

در آزمایشگاه موتورسازان تراکتورسازی تبریز فشار کاری بیشینه برای سیلندر تراکتور MF 399 در حالت استفاده از گاز (CNG) توسط حسگر فشاری جاسازی شده درون محفظه احتراق سیلندر اندازه‌گیری شده و مقدار آن در حدود $Q = 10 \text{ MPa}$ به دست آمده است.

از رابطه‌ی زیر می‌توان تنش مرجع را به دست آورد:

$$\sigma_r = \frac{Q}{Q_c} S_y = \frac{10}{47.69} \times 240 = 50.32 \quad (21)$$

که در آن Q ، Q_c و S_y به ترتیب فشار کاری بیشینه، فشار گسیختگی پلاستیک حد پایین و تنش تسلیم آلیاژ بوش سیلندر (چدن) می‌باشند.



جواب تحلیلی مسئله به جواب واقعی نزدیک‌تر می‌باشد و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Q_{c_t} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \times S_y \times \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) = 50.53 \text{ MPa} \quad (22)$$

که در آن فشار گسیختگی تحلیلی، S_y تنش تسلیم آلیاژ بوش سیلندر، R_i شعاع درونی بوش سیلندر و R_o شعاع بیرونی بوش سیلندر می‌باشد. برای بوش سیلندر تراکتور MF 399، $S_y = 240 \text{ MPa}$ ، $R_o = 60 \text{ mm}$ و $R_i = 50 \text{ mm}$ می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار $Q_c = 47.69$ برای حالت $P_1 = 24$ به دست آمد که حد پایینی از جواب تحلیلی $Q_{c_t} = 50.53$ می‌باشد. میزان خطای برنامه را از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\text{ERROR} = \frac{(Q_c - Q_{c_t})}{Q_{c_t}} \times 100 = \frac{(47.69 - 50.53)}{50.53} \times 100 = 5.6 \quad (23)$$

تخمین عمر خزش بوش سیلندر موتور تراکتور MF 399

بدنه موتور تراکتور MF 399 از چدن خاکستری^۶ و بوش سیلندر آن از چدن^۷ ساخته می‌شود تا مقاومت آن در مقابل سایش افزایش یابد. دمای دیواره درونی بوش سیلندر موتور دیزل (محل تماس با شعله) برابر با 190°C و دمای دیواره بیرونی آن (محل تماس با مایع خنک کننده) مساوی 90°C است (جان بی. لیل جدال و همکاران^۸، ۱۹۷۹). با در نظر گرفتن دمای جداره درونی بوش سیلندر و تنش وارد بر آن که از روش تنش مرجع محاسبه شد می‌توان پارامتر لارسون میلر^۹ را با توجه به شکل (۷) به دست آورد که در تنش مرجع مساوی با 50.32 مقدار آن در 23000 می‌باشد. سپس می‌توان از رابطه لارسون میلر اصلاح شده عمر خزش را تخمین زد:

$$P_{LM} = T \times (\log_{10} t_r + C) \quad (24)$$

$$23000 = (190 + 273) \times (\log_{10} t_r + 20)$$

$$t_r = 2.86 \times 10^{27} \text{ h}$$

لارسون و میلر (۱۹۵۲)، برون‌یابی خودشان را برای عدد ثابت C با استدلال عقلی ارائه دادند. آنها ملاحظه کردند که اگر T به طرف بی‌نهایت میل کند P_{LM} نیز به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، مگر اینکه $\log_{10} t_r + C = 0$ که در نتیجه -ی آن $\log_{10} t_r = -C$ می‌شود. گذشته از این آنها فرض کردند که در دمای بی‌نهایت اجزاء قطعه گسیخته شده با سرعت نور c حرکت کنند. اگر شکست در حالتی رخ دهد که اجزاء در مقیاس قطر اتم سازنده d از هم جدا شوند،

^۶Gray Cast Iron

^۷Cast Iron

^۸John B. Lil Jedahl

^۹Larson Miller



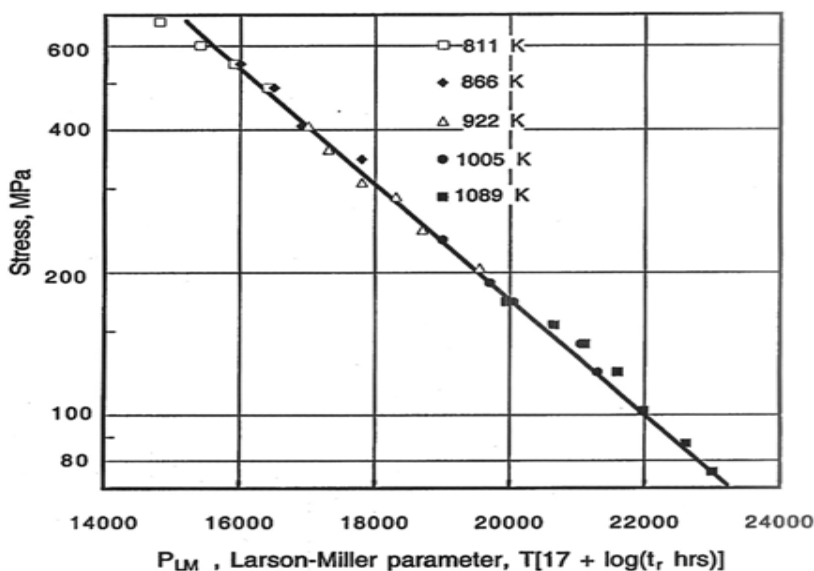
زمان شکست t برابر با $\frac{d}{c}$ می‌شود. اگر قطر $d = 25\text{nm}$ به عنوان نمونه فرض شود در نتیجه:

$$t = \left(0.25 \times 10^{(-9)} \text{ m} \div 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \div \left(3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}\right) = 2.3 \times 10^{-22} \text{ h}$$

$$C = -\log_{10} t_r = 21.63$$

اندازه C وابسته به جنس ماده است و به صورت تجربی به دست می‌آید. در فلزات آهنی مقدار آن معمولاً مابین ۱۵ الی ۳۰ قرار دارد. در آلیاژهای آهنی مقاوم به دمای بالا مقدار آن در حدود ۲۰ است.

در این مسئله برای عمر خزش بوش سیلندر عدد بسیار بزرگی حاصل شده است و علت آن به دو دلیل می‌باشد. اول اینکه به دلیل حرکت پیستون به طرف پایین در شروع احتراق گاز CNG، فشار حاصل از آن بر محفظه احتراق کاهش می‌یابد و در نتیجه تنش حاصل از آن بر بوش سیلندر و سایر قطعات درون محفظه احتراق کاهش می‌یابد و علت دوم گردش مایع خنک کننده با فشار حدوداً 100 kPa در پیرامون دیواره بیرونی بوش سیلندر است که این گردش مایع خنک کننده مانع از افزایش بیش از حد دمای بوش سیلندر می‌شود. نتیجه دیگر حاصل از جواب $t_r = 2.86 \times 10^{27} \text{ h}$ آن است که در این محدوده دما و فشار اعمال شده بر بوش سیلندر، بوش سیلندر وارد فاز پلاستیک نمی‌شود و رفتار الاستیک از خود بروز می‌دهد.



شکل ۷- تنش که به عنوان تابعی از پارامتر لارسون-میلر باعث گسیختگی خزشی می‌شود

نتیجه گیری

با به کار بردن برنامه‌ی کامپیوتری تدوین شده در این تحقیق (OPSTAL) مسئله‌ی بار گسیختگی حد پایین بوش سیلندر تراکتور MF 399 حل شد و با بکار بردن آن و استفاده از میزان فشار کارکرد بیشینه بوش سیلندر که در تراکتورسازی تبریز اندازه‌گیری شده است مقدار تنش مرجع حاصل شد. عدد به‌دست آمده برای عمر خزش بوش



سیلندر از روش تنش مرجع و رابطه لارسون میلر اصلاح شده ($t_r = 8760 \text{ year}$) سال می‌باشد. که عدد بسیار بزرگی است و نشان دهنده این است که بوش سیلندر در این دما و فشار کاری رفتار کاملاً الاستیک دارد.

منابع

1. Modarres-Motlagh, A. (1997). "Lower Bound to Collapse Load for Structures." A Thesis Submitted in Fulfillment of Requirements for the Degree of Philosophy, University of New South Wales, Australia.
2. Zarrabi, K., and Modarres-Motlagh, A. (1995). "Computation of Reference Stress for Remanent Life Determination by Combining limit Analysis and Finite Element Method." International Conference on Mechanics of Solids and Materials Engineering, Singapore.
3. Zarrabi, K., and Modarres-Motlagh, A. (1996). "Reference Stress Computation for Remanent Life Assessments of Plane Stress/Strain Problem." First Australian Congress on Applied Mechanics, Melbourne.
4. Sloan, S. W. (1988). "Lower Bound Limit Analysis using Finite Element and Linear Programming." International Journal of Analytical Method in Geomechanics, 12, 61-77.
5. Lyamin, A. V., and Sloan, S. W. (2003). "Mesh Generation for Lower Bound Limit Analysis." International Journal of Advances in Engineering Software, 34, 321-338.
6. Lyamin, A. V., and Sloan, S. W. (2002). "Upper Bound Limit Analysis using Finite Elements and Nonlinear Programming." International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 26(2), 181-216.
7. Lyamin, A. V., and Sloan, S. W. (2002). "Lower Bound Limit Analysis using Finite Elements and Nonlinear Programming." International Journal for Numerical Method in Engineering, 55(5), 573-611.
8. Augarde, C. E., Lyamin, A. V., and Sloan, S. W. (2001). "Stability of Untrained Plane Strain Heading Revisited." International Journal of Computers and Geotechnics, 30, 419-430.



Analysis of Strength and Estimate of the Creep Life in the Cylinder of Combustion Chamber in MF 399 Tractor Diesel Engine using CNG Fuel

Abstract

In order to determine creep life of a metal structure the reference stress method can be used. For calculating reference in a metal structure the most important step is calculating collapse load. Combined method of finite element and limit analyses is one of the methods used for determining collapse load. In combined method a linear approximation of yield surface is used and by applying the equilibrium, boundary and discontinuity condition the constraint equations are obtained. By implementation of the equations with optimization technique statically stress field is obtained, from which a lower safe limit to collapse load is calculated. In this paper the collapse load and reference stress was determined and with use of these parameters the creep life of cylinder bush, exhaust valve and piston for tractor MF 399 in maximum temperature and pressure with using CNG was obtained. In case of cylinder bush in spite of higher pressure due to lower temperature exerted, the creep life is extremely high and illustrating that cylinder bush is completely elastic.

Keywords: Creep life, Finite Element, Tractor Engine of MF 399, Compressed Natural Fuel Gas.