

مقایسه عمرهای خستگی پیش بینی شده برای نمونه‌های Pure Titanium با استفاده

از معیارهای کرنش پایه

صفا پیمان^۱، ابوالفضل رجیبی گوندره^۲

۱-دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه عمران

۲- دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه عمران

چکیده

قطعات مکانیکی در بارگذاری تناوبی مستعد بروز ترک های خستگی هستند، ارزیابی و پیش بینی زمان شروع ترک در قطعات مکانیکی برای تعیین بازدهی دوره‌ای و برنامه‌ریزی برای تعمیر و نگهداری آنها از اهمیت شایانی برخوردار است. برای برخی از سازه‌ها از قبیل بدنه هواپیما، مخازن تحت فشار، پل‌ها و توربین‌ها دلیل نوع استفاده از این قبیل سازه‌ها پی بردن به زمان شروع واماندگی مکانیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. واماندگی مکانیکی سازه‌ها به صورت ناگهانی تحت بارهای تناوبی اتفاق می‌افتد که عمدتاً تحت این بارها قرار دارند این در حالی است که بارها وارده به این سازه‌ها از تنش تسلیم آنها کمتر هستند و انتظار شکست خستگی در این شرایط نمی‌رود، به همین دلیل عدم توجه به آن باعث بروز خسارات زیادی می‌گردد. پیش‌بینی عمر قطعات تحت بارهای تناوبی باعث جلوگیری از خسارات ناشی از خرابی ناگهانی آنها خواهد شد و منجر به استفاده از مواد مناسب می‌شود. در دهه های اخیر برای محاسبه عمر خستگی معیار های مختلفی ارائه شده است که در یک تقسیم بندی کلی به دو دسته تنش پایه و کرنش پایه تقسیم می‌شوند. این معیارها با استفاده از جنس، بارهای وارده، شکل هندسی و ویژگی مکانیکی قطعه مورد بررسی عمر خستگی را تعیین می‌کند دلیل این که سازه‌های مورد استفاده در صنعت هوایی عمدتاً دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شوند و واماندگی خستگی این سازه‌ها با معیارهای کرنش پایه هماهنگی بیشتری دارند، برای اینکه بتوان در طراحی سازه‌های مکانیکی از نتایج معیارهای خستگی استفاده کرد باید کارایی آن سنجیده شود و عمر خستگی پیش بینی شده توسط این معیارها با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گیرد تا معیار مناسب برای سازه مورد نظر بدست آید. در این مقاله با استفاده از نتایج آزمایش مربوط به Pure Titanium تحت بارگذاری‌های کشش خالص، پیچش خالص، کشش و پیچش توام با اختلاف فاز ۴۵ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرد و عمر خستگی قطعه مورد نظر با استفاده از معیارهای مختلف کرنش پایه بدست می‌آید و با نتایج تجربی نمونه مورد نظر مقایسه شده و ویژگی های هر مدل بیان می‌گردد.

واژه های کلیدی:

خستگی، کرنش پایه، صفحه بحرانی، ترکیبی انرژی پایه- صفحه بحرانی، کرنش پلاستیک

مقدمه

سازه‌های مکانیکی عمدتاً تحت بارهای تناوبی دچار واماندگی مکانیکی می‌شوند. [۳] این واماندگی در بعضی از موارد منجر به خسارت جبران

ناپذیری می‌شود، با تعیین عمر خستگی این قطعات زمان بازدید دوره‌ای از این قطعات مشخص شده و قبل از ایجاد خسارت می‌توان به تعمیر آن اقدام کرد. [۱۲] برخی از سازه‌هایی مکانیکی از قبیل هواپیما و توربین بدلیل نوع بارگذاری و تاریخچه تنش و کرنش و نوع استفاده از این قطعات مکانیکی، دیگر دیدگاه طراحی عمر نامحدود برای این قطعات کاربرد ندارد. با پی بردن به زمان شروع ترک خستگی، زمان تعمیرات و تعویض آنها را تعیین می‌گردد. برای تعیین عمر خستگی روش های مختلفی وجود دارد، بطور کلی معیارهای خستگی به دو دسته‌ی تنش پایه و کرنش پایه تقسیم می‌شوند بدلیل این که سازه‌های مورد استفاده در صنعت هوایی عمدتاً دچار کرنش پلاستیک زیادی می‌شوند و واماندگی خستگی این سازه‌ها با معیارهای کرنش پایه هماهنگی بیشتری دارند. [۱۱] معیار های کرنش پایه به چهار دسته‌ی معیارهای کرنش پایه ابتدایی، انرژی پایه، صفحه بحرانی، و ترکیبی صفحه بحرانی- انرژی تقسیم بندی می‌شوند. [۴]

در این مقاله از معیار های خستگی: کرنش عمودی بیشینه، براون میلر (Brown- Miller)، فاطمی- سوشی (Fatemi-Socie)، اسمیت- واتسون- تاپر (Smith - Watson - Topper)، لیو (Liu)، چو- کانلی- بانن (Chu- Conle -Bonnen)، گلینکا- ونگ- پلامتری (Glinka -Wang -Plumtree) استفاده شده است. [۳-۹] معیارهای خستگی کرنش پایه با در اختیار داشتن تاریخچه تنش- کرنش بارگذاری متناسب یا نامتناسب و خواص مکانیکی سازه عمر خستگی را تعیین می‌کنند. با توجه به اینکه هر یک از معیارهای کرنش پایه پارامتری از تنش و کرنش را ملاک پیش بینی واماندگی مکانیکی قرار می‌دهند عمرهای متفاوتی را برای نمونه‌هایی مورد بررسی تعیین می‌کنند که بعضاً این عمر خستگی با نتایج تجربی فاصله زیادی داشته و قابل اعتماد نیستند، قبل از استفاده از این معیارها برای طراحی خستگی ابتدا باید کارایی آنها سنجیده شود، تا معیار مناسب برای سازه مورد نظر مشخص شود.

مطالعات انجام شده در این پژوهش حاصل مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های Pure Titanium تحت بارگذاری‌های کششی، پیچشی و کشش و پیچش توام با اختلاف فاز ۴۵ درجه است. [۱۰] با استفاده از معیارهای صفحه بحرانی و واماندگی خستگی این نمونه‌ها ارزیابی می‌گردند.

برای محاسبه عمر خستگی از کد نویسی در نرم افزار MAPLE 16 استفاده شده است و نتایج هر یک از معیارها با استفاده از شکل‌های ۲ تا ۹ نشان داده می‌شود، در این نمودارها محور افقی نشان دهنده‌ی عمر تجربی و محور قائم نشان دهنده‌ی عمر تخمینی می‌باشد، نیمساز نمودارها نشان دهنده‌ی حالت مطلوب است که در آن عمر تجربی و تخمینی با هم

۱-مربی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۰۹۱۹۳۴۶۱۷۸۶، abolfazl3273@gmail.com

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} (1+k \frac{\sigma_{n,\max}}{S_y}) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b\gamma} + \gamma_f' (2N_f)^{c\gamma} \quad (5)$$

مقدار k را می‌توان توسط منطبق کردن اطلاعات خستگی حاصل از آزمایش‌های پیچش ساده به دست آورد. هنگامی که داده‌های آزمایشگاهی در دسترس نباشد به‌عنوان یک تقریب اولیه می‌توان مقدار k را برابر ۱ فرض کرد. در مدل فاطمی سوشی اثرات تنش متوسط یا پسماند بر روی عمر خستگی، توسط بخش ماکزیمم تنش نرمال در نظر گرفته می‌شود. [۱]

معیار اسمیت، واتسون و تاپر:

صفحه‌ی بحرانی مدل‌های بران-میلر و فاطمی-سوشی اصولاً برای موادی ارائه شده‌اند که مکانیزم واماندگی حاکم بر جوانه زنی و رشد ترک برش باشد، برای موادی که عامل اصلی واماندگی آن‌ها رشد ترک روی صفحات کرنش یا تنش کششی بیشینه (مثل چدن) می‌باشد، مدل آسیب دیگری لازم است. در این گونه مواد ترک‌ها در اثر برش جوانه می‌زنند، اما عمرها توسط رشد ترک روی صفحات عمود بر تنش و کرنش اصلی بیشینه کنترل می‌شود، اسمیت و همکارانش رابطه مناسبی را که شامل هر دو بازه کرنش سیکلی و تنش بیشینه باشد پیشنهاد داده‌اند، این مدل که معمولاً پارامتر SWT نامیده می‌شود، در بارگذاری‌های چند محوره پارامتر SWT براساس بازه کرنش اصلی $\Delta\epsilon_n$ و تنش بیشینه روی صفحه بازه کرنش اصلی می‌باشد.

$$\sigma_{n-\max} \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = \frac{\sigma_f'^2}{G} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (7)$$

این مدل برای موادی که تحت مود کششی آسیب می‌بینند، مناسب است. در نظر گرفتن تنش عمودی بیشینه روی صفحه بحرانی، سبب می‌شود، اثر تنش متوسط در این معیار وارد گردد. [۶]

معیار لیو

معیار لیو از نوع ترکیبی صفحه بحرانی و انرژی می‌باشد. معیارهای ترکیبی ویژگی‌های معیارهای صفحه بحرانی و انرژی را دارا می‌باشند. این مدل نخست صفحه با بیشینه حاصل ضرب بازه تنش عمودی در بازه کرنش عمودی را به‌عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد و مقدار به‌دست‌آمده برای آن را با حاصل ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی روی همان صفحه جمع می‌کند سپس صفحه با بیشینه حاصل ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی را به‌عنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد و مقدار به‌دست‌آمده برای آن را با حاصل ضرب بازه تنش عمودی در بازه کرنش عمودی روی همان صفحه جمع می‌کند. رابطه‌های ارائه شده برای این مدل به ترتیب برای موادی که تحت مود کششی و مود برشی آسیب می‌بینند، مناسب می‌باشند:

$$\Delta W_I = 4\sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} + \frac{4\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} \quad (9)$$

$$\Delta W_I = (\Delta\sigma_n \Delta\epsilon_n)_{\max} + \Delta\tau_n \Delta\gamma_n$$

$$\Delta W_{II} = 4\gamma_f' (2N_f)^{b\gamma+c\gamma} + \frac{4\tau_f'^2}{G} (2N_f)^{2b\gamma} \quad (10)$$

$$\Delta W_{II} = \Delta\sigma_n \Delta\epsilon_n + (\Delta\tau_n \Delta\gamma_n)_{\max}$$

در این معیار مود آسیب برشی دارای دو صفحه بحرانی است که بر هم عمود می‌باشند. [۷]

معیار چو، کانلی و بانن:

برابر است و فاصله عمرهای پیش بینی شده توسط معیارهای مختلف از خط نیمساز نمودارها نشان دهنده‌ی خطای عمر محاسبه شده می‌باشد.

معرفی معیارها

معیار کرنش عمودی بیشینه

معیار کرنش عمودی بیشینه یک معیار صفحه بحرانی است، این مدل صفحه بازه کرنش عمودی بیشینه را به‌عنوان صفحه بحرانی در نظر گرفته و عمر خستگی را از رابطه زیر تعیین می‌کند:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

در این رابطه $\Delta\epsilon$ بازه کرنش محوری، σ_f' ضریب مقاومت خستگی محوری، ϵ_f' ضریب شکل پذیری خستگی محوری، E مدول الاستیسیته، N_f عمر خستگی، b و c به ترتیب نمای مقاومت تسلیم و نمای شکل پذیری خستگی محوری هستند.

معیار براون - میلر

براون و میلر تست‌های ترکیبی کشش و پیچش را با بازه کرنش برشی ثابت انجام دادند، بازه کرنش عمودی روی صفحه کرنش بیشینه توسط نسبت کرنش کششی به کرنش پیچشی $\frac{\Delta\epsilon}{\Delta\gamma}$ تغییر می‌کند، آنها نشان دادند که برای توضیح فرآیند خستگی به دو پارامتر کرنش نیاز است یکی کرنش برشی بیشینه و دیگری کرنش عمودی در صفحه کرنش برشی بیشینه و رابطه ای بصورت زیر ارائه دادند:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max} + S\Delta\epsilon_n}{2} = A \frac{\sigma_f' - 2\sigma_{n,\text{mean}}}{E} (2N_f)^b + B\epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

که در آن $\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}$ دامنه کرنش برشی ماکزیمم و $\Delta\epsilon_n$ محدوده کرنش نرمال بر روی صفحه $\Delta\gamma_{\max}$ می‌باشد و S عدد ثابتی که وابسته به نوع ماده است که میزان اهمیت کرنش عمودی برای یک مدل عمومی براساس بیان آسیب خستگی است. A, B استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{n-\text{mean}} = \sigma_{n,\max} - \frac{\sigma_{n,\max} - \sigma_{n,\min}}{2} \quad (3)$$

$$A = 1.3 + .7S, B = 1.5 + .5S$$

S در رابطه بالا از خواص ماده می‌باشد و اثر کرنش عمودی روی رشد ترک را نشان می‌دهد. می‌توان این پارامتر را از آزمایش پیچش که در آن $\Delta\epsilon_n = 0$ می‌باشد، به شکل رابطه زیر به دست آورد: [۵]

$$\frac{\tau_f' (2N_f)^{b\gamma}}{S} = \frac{\tau_f' (2N_f)^{c\gamma} - (1+\nu) \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (1+\nu_p) (2N_f)^c}{(1-\nu) \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (1-\nu_p) (2N_f)^c} \quad (4)$$

در این روابط τ_f' ضریب مقاومت خستگی پیچشی و G مدول برشی و $b\gamma$ نمای خستگی پیچشی و γ_f' ضریب شکل پذیری خستگی پیچشی و $c\gamma$ نمای شکل پذیری خستگی پیچشی و ν_e ضریب پواسون الاستیک و ν_p ضریب پواسون پلاستیک و $\sigma_{n,\max}$ بیشینه تنش محوری بر روی صفحه بحرانی و $\sigma_{n,\min}$ میانگین تنش محوری بر روی صفحه بحرانی. [۵]

معیار فاطمی-سوشی

یک مدل عمومی براساس بیان فیزیکی آسیب خستگی مدل فاطمی سوشی است. در این مدل پارامترهای حاکم بر آسیب خستگی عبارتند از: دامنه کرنش برشی ماکزیمم $\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}$ و ماکزیمم تنش نرمال $\sigma_{n,\max}$ که بر روی صفحه با ماکزیمم دامنه کرنش برشی عمل می‌کند.

جدول ۴- نتایج آزمایش خستگی مربوط به بارگذاری پیچشی

شماره آزمایش	$\frac{\Delta\tau}{2} (Mpa)$	$\frac{\Delta\gamma}{2}$	$2N_f$
۱	۳۰۳	۰,۰۱۹۱	۸۸۲
۲	۳۰۰	۰,۰۱۹۱	۹۴۰
۳	۲۹۷	۰,۰۱۵۶	۱۸۲۰
۴	۲۹۴	۰,۰۱۵۶	۱۹۰۶
۵	۲۷۹	۰,۰۱۲۱	۴۰۹۰
۶	۲۷۶	۰,۰۱۲۱	۴۲۰۰

جدول ۵- نتایج آزمایش خستگی مربوط به پیچش و کشش توام با اختلاف فاز ۴۵ درجه

شماره آزمایش	$\frac{\Delta\sigma}{2} (Mpa)$	$\frac{\Delta\tau}{2} (Mpa)$	$\frac{\Delta\epsilon}{2}$	$\frac{\Delta\gamma}{2}$	$2N_f$
۱	۳۸۸	۲۳۴	۰,۰۱۵	۰,۰۰۸۷	۴۰۰
۲	۳۸۹	۲۳۹	۰,۰۱۵	۰,۰۰۸۷	۴۲۲
۳	۳۸۰	۲۳۰	۰,۰۱۲۳	۰,۰۰۷۱	۷۳۶
۴	۳۸۳	۲۲۹	۰,۰۱۲۳	۰,۰۰۷۱	۷۴۴
۵	۳۶۷	۲۲۲	۰,۰۰۹۵	۰,۰۰۵۳	۱۷۸۰
۶	۳۷۲	۲۲۵	۰,۰۰۹۵	۰,۰۰۵۳	۱۸۶۲

نتیجه‌گیری

معیار براون میلر برای هر سه بارگذاری انجام شده بر روی نمونه Pure Titanium عمرخستگی قابل قبولی را ارائه می‌دهد، معیار چو برای عمرهای کمتر از ۱۰۰۰ برای پیچش و کشش خالص مناسب بود اما در عمرها بالاتر دچار خطای زیادی می‌شود، همچنین برای بارگذاری چند محوره این معیار مناسب نیست.

معیار فاطمی سوشی بدلیل این که تنش نرمال و همچنین کرنش برشی ماکزیموم را ملاک عمل خود قرار می‌دهد برای بارگذاری پیچشی، کشش خالص و همچنین بارگذاری چند محوره مناسب است، این معیار برای موادی مناسب هست که مود شکست آن‌ها برشی است. معیار گلینگا-ونگ- پلامتری برای بارگذاری کشش خالص ارزیابی مناسبی را انجام می‌دهد اما برای بارگذاری‌های پیچش خالص و بارگذاری چند محوره این معیار عمر خستگی مناسبی را تعیین نمی‌کند. مد کششی لیو برای بارگذاری کشش خالص مناسب است ولی برای بارگذاری‌های پیچش خالص و بارگذاری چند محوره نتایجی چندان مناسبی را ارائه نمی‌دهند. مد برشی لیو برای بارگذاری پیچش خالص مناسب بوده و برای بارگذاری‌های کشش خالص و چند محوری که ترکیبی برش و پیچش باشند مناسب نیست. معیار اسمیت- واتسون- تاپر برای بارگذاری کشش خالص عمر مناسبی را پیش بینی می‌کند در کل برای موادی کاربرد دارد که مد شکست آن‌ها کششی باشد، ولی برای بارگذاری‌های پیچش خالص و چندمحوره مناسب نیست. معیار کرنش عمودی بیشینه مناسب بارگذاری محوری است همچنین برای بارگذاری پیچش خالص و بارگذاری چند محوره دارای خطای زیادی است.

در میان معیارهای مورد بررسی برای نمونه Pure Titanium معیارهای براون - میلر و فاطمی- سوشی نتایج بهتری نسبت به بقیه معیارها ارائه می‌دهند، این دو معیار صفحه کرنش برشی بیشینه را بعنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرند این دو معیار مناسب موادی هستند که مد شکست آنها برشی هستند به همین دلیل می‌توان پی برد که مد شکست خستگی Pure Titanium برشی است. معیارهای خستگی هر کدام پارامتری را بعنوان مبنای محاسبه عمر خستگی قرار می‌دهند و با توجه اینکه مواد مختلفی در طبیعت وجود دارد و هر کدام براساس مواد خاص خود دچار

معیار چو، کانلی، بانن از نوع معیارهای ترکیبی صفحه بحرانی و انرژی می‌باشد. معیار مزبور به جای دامنه تنش‌ها از تنش بیشینه استفاده می‌نماید و صفحه‌ای با مقدار $\frac{\Delta\epsilon}{2} + \sigma_{n,max} \frac{\Delta\gamma}{2} + \tau_{n,max}$ بیشینه را بعنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد. همه پارامترهای رابطه زیر روی این صفحه به‌دست آمده‌اند:

$$\Delta W^* = 1.02 \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + 1.04 \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (11)$$

$$\Delta W^* = \left(\tau_{n,max} \frac{\Delta\gamma}{2} + \sigma_{n,max} \frac{\Delta\epsilon}{2} \right)_{max}$$

فیزیک این مدل بر این اساس است که می‌کوشد، سهم هریک از تنش‌ها و کرنش‌های کششی و برشی را متوسط گیری نماید. اگر بازه تنش برشی روی صفحه موردنظر صفر باشد، مدل چو و همکاران اثر تنش متوسط را در نظر نمی‌گیرد. [۸]

معیار گالینگا، ونگ و پلامتری

معیار گالینگا، ونگ و پلامتری یک معیار ترکیبی صفحه بحرانی و انرژی می‌باشد. این مدل بر اساس صفحه‌ای است که بیشترین کار برشی را تحمل می‌نماید، به عبارت دیگر مدل مورد بررسی صفحه با بیشینه حاصل‌ضرب بازه تنش برشی در بازه کرنش برشی را بعنوان صفحه بحرانی در نظر می‌گیرد. [۹]

همه پارامترهای رابطه زیر روی این صفحه به‌دست آمده‌اند:

$$\Delta W^* = \left(\frac{\tau_f'^2}{G} (2N_f)^{2b\gamma} + \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{b\gamma+c\gamma} \right) \left(1 + \frac{1}{1 - (2N_f)^{2b\gamma}} \right) \quad (12)$$

$$\Delta W^* = \frac{\Delta\epsilon\Delta\gamma}{4} \left(\frac{\tau_f'}{\tau_f' - \tau_{nmax}} + \frac{\sigma_f'}{\sigma_f' - \sigma_{nmax}} \right)$$

داده‌های تجربی

مجموعه‌ای آزمایش‌های واماندگی خستگی بر روی نمونه‌های شکل ۱ که از جنس Pure Titanium است و تحت بارگذاری‌های کشش خالص مطابق جدول ۳، پیچش خالص مطابق جدول ۴ و پیچش و کشش توام مطابق جدول ۵ قرار گرفته است انجام گرفته. [۱۰] نتایج حاصل از هر یک از معیارها در شکل‌های ۲ تا ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی Pure Titanium

ν_e	$\tau_f (MPa)$	$\sigma_f (MPa)$	$\sigma_y (MPa)$	G(Gpa)	E(Gpa)
۰,۴	۴۸۵	۶۴۵	۴۷۵	۴۰	۱۱۲

جدول ۲- ثوابت مورد استفاده در مدل‌ها

k	γ_f	ϵ_f	c_γ	b_γ	c	b
۰,۶	۰,۴۱۷	۰,۵۴۸	-۰,۵۲۳	-۰,۰۶۹	-۰,۶۴۶	-۰,۰۳۳

جدول ۳- نتایج آزمایش خستگی مربوط به بارگذاری کششی

شماره آزمایش	$\frac{\Delta\sigma}{2} (Mpa)$	$\frac{\Delta\epsilon}{2}$	$2N_f$
۱	۵۳۵	۰,۰۱۶۸	۲۰۰
۲	۵۲۰	۰,۰۱۱۵	۸۳۰
۳	۵۰۹	۰,۰۱۰۷	۱۵۶۲
۴	۵۰۰	۰,۰۰۸۷	۲۱۴۰
۵	۴۸۵	۰,۰۰۶۱	۶۴۳۰

شکل ۹-SWT

مراجع

1. Fatemi.A and D.F.Socie., A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out of Phase Loading., *Fatigue Fract,Eng,Mater,Struct.*,Vol.11,No.3,1988 ,p.149.
۲. قاجار، رحمت ا...، و پیمان، صفا، و علیزاده کاکلر، جواد، ارائه یک مدل کرنش پایه بهبود یافته برای محاسبه عمر خستگی چند محوری فلزات. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک جامدات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، سال چهارم، شماره اول تابستان ۱۳۹۰، ص ۱۷-۲۵.
3. Socie D. F., Marquis G. B., *Multiaxial Fatigue*, 1 ed. SAE,2000,
4. Han C., Chen X. , Kim K. S., Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading, *Int. J. of Fatigue*, 24 (9), 2002, pp. 913-922.
5. Brown M., Miller K. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions, *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers*, Vol. 187, 1973, pp. 745-756.
6. Smith R. N., Watson P., Topper T. H., A stress strain parameter for the fatigue of metal, *Journal of Materials*, 5 (4), 1970, pp. 767-778.
7. Liu K. C., A method based on virtual strain energy parameters for multiaxial fatigue life prediction, *ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 67-84.
8. Chu C. C., Conle F. A. , Bonnen, J. F., Multiaxial stress-strain modeling and fatigue life prediction of SAE axel shaf, *ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials*, 1993, pp. 37-54.
9. Glinka G., Wang G., Plumtree A., Mean stress effects in multiaxial fatigue, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 18 (7/8), 1995, pp. 755-764.
10. Shamsaei.N , Gladskyi.M, Panasovskyi.K, Shukaev .S, Fatemi.A, Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects, *International Journal of Fatigue* 32 ,2010, pp. 1862-1874.
۱۱. قاجار، رحمت ا...، و قاجار، محسن، تحلیل سازه‌های مکانیکی تحت خستگی چند محوره، ۱۳۸۹، ص ۱۸۴-۲۰۲.
12. Doudard, C., Calloch, S., Cugy, P., Galtier A., and Hild, F., "A Probabilistic Two-Scale Model for High Cycle Fatigue Life Predictions," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 28, pp. 279-288, 2005.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop