

بررسی اثر بارگذاری بدون ترتیب بر عمر خستگی فولاد ساختمانی

جمشید آقازاده (دانشیار)

فاطمه میزایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا سبا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بارگذاری‌های موجود در طبیعت و سازه‌ها عمدتاً دامنه‌ی متغیر دارند و در شرایط بارگذاری واقعی، بارگذاری خستگی با دامنه‌ی کرنش‌های ثابت کم‌تر اتفاق می‌افتد. در این نوشتار، عمر خستگی فولاد کم کرن در بارگذاری با دامنه‌ی متغیر و بدون ترتیب مورد بررسی قرار گرفته است. از یافته‌های آزمایش‌ها در می‌یابیم که استفاده از قانون جمع صدمات ماینر و منحنی‌های با دامنه‌ی ثابت عمر خستگی می‌تواند روش مناسبی برای محاسبه‌ی عمر خستگی در بارگذاری تصادفی باشد. همچنین برای شمارش چرخه‌ها، روش جریان بارانی اصلاح‌شده نتیجه‌ی مناسب در پی خواهد داشت. نتایج تحقیقات حاضر نشان می‌دهد که فرضیات فوق، با داده‌های تجربی ارائه شده در این نوشتار هم‌خوانی خوبی دارد، و نیز محاسبات مربوط به اثر تغییرات دامنه‌ی تنش به‌هنگام بارگذاری بدون ترتیب بر رشد ترک خستگی، نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب نتایج با رابطه‌ی پاریس است.

مقدمه

در شرایط بارگذاری واقعی، بارگذاری خستگی با دامنه‌ی تنش یا کرنش ثابت کم‌تر اتفاق می‌افتد. انطباق آزمون‌های خستگی با شرایط واقعی کارکرد قطعات و ماشین‌ها نیز بسیار مشکل است.

با توجه به اهمیت تعیین عمر خستگی در شرایط کاری واقعی یا بارگذاری دوره‌ی با دامنه‌ی تنش یا کرنش متغیر، روش‌های مختلفی برای ساده‌سازی و تطبیق شرایط واقعی با مفاهیم و روابط ساده‌تر خستگی با دامنه‌ی ثابت، ارائه شده است.

چون معمولاً رشد ترک براساس دامنه‌ی تنش وارده فرموله می‌شود، اسپکتروم‌های بار معمولاً بایستی تبدیل به تنش شوند. بنابراین برای حل مسئله‌ی پیش‌بینی عمر خستگی تحت شرایط بارگذاری بدون ترتیب، تعیین اندازه، ترتیب و فرکانس تنش‌ها در مناطق حساس و کرنش‌های مربوطه ضروری است. منحنی‌های دامنه‌ی ثابت عمر خستگی در بهترین شرایط ارائه دهنده‌ی یک تخمین محافظه‌کارانه‌اند.

در ساده‌ترین روش برای تعیین عمر خستگی تحت بارگذاری بدون ترتیب، می‌توان از معادلات دامنه‌ی ثابت بارگذاری دوره‌ی استفاده کرد، به شرط اینکه این دامنه‌ی ثابت برابر مقدار بیشینه‌ی اندازه گرفته شده در اسپکتروم بار قرار داده شود و سپس با اعمال یکی از معادلات خستگی، تعداد دوره‌ها را تا شکست به دست آورد. در این حالت لازم است ثابت‌های معادلات مشخص باشند.

اسپکتروم حقیقی بار که بر حسب تغییرات تنش با زمان بیان شده باشد در سازه‌ها توسط روش‌های مختلفی تعیین می‌شود. اسپکتروم‌های

به دست آمده را می‌توان یا مستقیماً در شرایط آزمون آزمایشگاهی اعمال کرد — که در این صورت، ماشین‌های سروهیدرولیک مورد نیاز است — یا آنکه اسپکتروم بدون ترتیب را توسط اسپکتروم بلوک دوره‌های تناوبی یا مشخصات سازگار با فرایندهای بدون ترتیب مدل‌سازی کرد.^[۱] سپس باید نتایج این اندازه‌گیری‌ها را به یک «بسته‌ی بار» تبدیل کرد که این بسته به نام اسپکتروم خوانده می‌شود. سپس با استفاده از شدت اسپکتروم و شمارش پیک‌ها، می‌توان نمودارهای معادل‌سازی عمر در سطوح مختلف تنش در بارگذاری بدون ترتیب را رسم کرد.^[۲]

برای شمارش پیک‌ها روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: قطع مرتبه^[۳]، شمارش محدوده^[۴] و روش جریان بارانی.^[۵]

همچنین در مورد تاریخچه‌های تنش‌ی که پیک‌های تنش‌ی ناگهانی دارند می‌توان با روش‌های مختلف بهینه‌سازی مانند برش^[۶] یا پیرایش^[۷] آنها را ساده‌سازی کرد. سپس می‌توان تاریخچه‌ی تنش‌ی را به بلوک‌های تنش‌ی با دامنه‌ی ثابت تبدیل کرد و عمر خستگی را به کمک قانون ماینر تخمین زد. ارزیابی عمر خستگی تحت شرایط بارگذاری بدون ترتیب و براساس جمع خطی تنش‌های دوره‌ی با توجه به قانون ماینر قابل انجام است.^[۸]

روش آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها، از فولاد ساختمانی به شکل میلگرد و به قطر ۱۰ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی ذکرشده در جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد آزمایش (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S
۰٫۲۵	۰٫۱۸	۰٫۵۴	۰٫۰۲۴	۰٫۰۰۲
W	Ti	Co	Al	Sn
ناچیز	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۹
Cr	Ni	Mo	Cu	V
۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۱۳	۰٫۰۰۲
Pb	As	Sb	Zr	Nb
ناچیز	۰٫۰۰۷	ناچیز	۰٫۰۰۱	ناچیز

انتخاب نمونه‌های شیاردار، اثر پیچیده‌ی مرحله‌ی جوانه‌زنی بر تحلیل خستگی در بارگذاری بدون ترتیب، به حداقل می‌رسد. رسم منحنی‌های S-N: از آنجا که مبنای این تحقیق، تعیین عمر خستگی در بارگذاری بدون ترتیب با استفاده از داده‌های منحنی‌های عمر خستگی در شرایط بار ثابت بوده است، از روابط مانسن - کافین در شرایط کنترل‌شده استفاده شد. بدین منظور منحنی S-N این فولاد به روش Weibull به دست آمد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عمر خستگی در شکل ۲ به صورت منحنی S-N برای این فولاد نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این منحنی، از روابط مانسن - کافین در شرایط کنترل شده، ثابت‌های مانسن - کافین به صورت زیر محاسبه شدند.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

$$\sigma'_f = 100.16$$

$$b = -0.158 \quad (1)$$

آزمایش‌های بارگذاری بدون ترتیب: در این تحقیق جمعاً ۴۷ تاریخچه‌ی بارگذاری بررسی شد. در مرحله‌ی اول تعداد ۱۹ نمونه تحت آزمایش خستگی با دامنه‌ی متغیر بارگذاری تا مرحله‌ی شکست قرار گرفتند. بارگذاری متغیر به پنج روش به نمونه‌ها اعمال شد: ۱. بارگذاری با ترتیب افزایشی تنش‌ها؛ ۲. بارگذاری با ترتیب کاهش‌ی تنش‌ها؛ ۳. بارگذاری با ترتیب کاهش‌ی - افزایشی؛ ۴. بارگذاری با ترتیب افزایش - کاهش‌ی؛ ۵. بارگذاری بدون ترتیب خاص.

برای دقیق‌تر بودن آزمایش‌ها، انتخاب تنش‌ها به گونه‌ی بوده است که بارگذاری در محدوده‌ی تنش‌هایی از حد خستگی تا تنش شکست، انجام شود. شش نمونه از بلوک‌های ترسیم شده‌ی تاریخچه‌ی بارهای اعمالی به هر یک از نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

شمارش دوره‌ها: مناسب‌ترین روش برای شمارش دوره‌ها، روش جریان

آزمون کشش: برای تعیین مشخصات مکانیکی، این فولاد تحت آزمایش کشش قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده از نوع زوئیک با ظرفیت ۳۰ تن، و اندازه‌ی نمونه مطابق استاندارد ASTM به طول ۹۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر بود. سرعت کشش دستگاه ۲ mm/min بود. نتایج آزمایش کشش در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت تسلیم این فولاد ۳۶۶ MPa، حداکثر مقاومت کششی ۴۵۰ MPa و افزایش طول آن ۳۱٪ است. این فولاد را می‌توان در رده‌ی ST۴۲ در نظر گرفت.

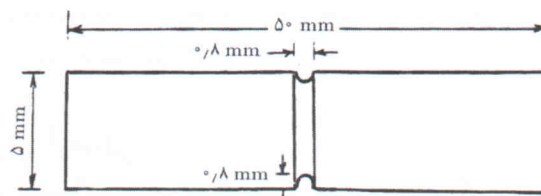
آزمون خستگی: دستگاه مورد استفاده از نوع دستگاه خستگی خمشی - چرخشی Wohler، با سرعت چرخش ۲۸۵۰ دور در دقیقه و قدرت ۰٫۲۵ اسب بخار بود. تنظیم نمونه و تغییر سطوح تنش در این دستگاه، به صورت دستی و با تغییر محل وزنه روی خطکش مدرج، با دقت بسیار زیاد انجام گرفته است.

ابعاد دقیق نمونه‌های خستگی، که از نوع شیاردار و با قطر ۵ mm انتخاب شدند، در شکل ۱ نشان داده شده است.

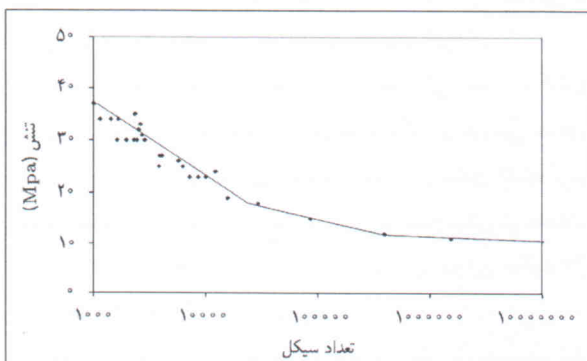
پس از ماشین‌کاری، و به منظور کاهش اثر پارامتر ماشین‌کاری بر عمر خستگی، عملیات پرداخت ظریف بر روی شیاردار انجام گرفت. با

جدول ۲. نتایج آزمایش کشش.

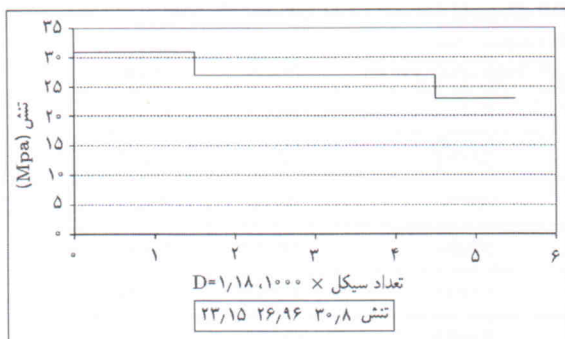
E (N/Kmm ^۲)	YS بالایی (N/mm ^۲)	UTS (N/mm ^۲)	کشش در شکست ۳۰٫۱۲
۸۳	۳۶۶	۴۵۰	



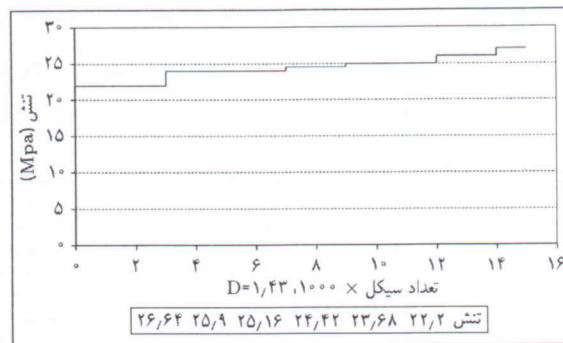
شکل ۱. شکل و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش.



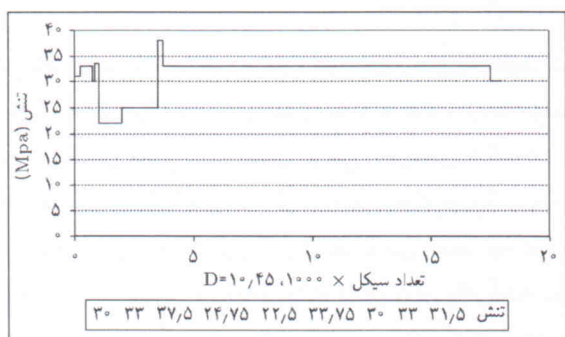
شکل ۲. منحنی S-N به دست آمده از نتایج جدول ۲.



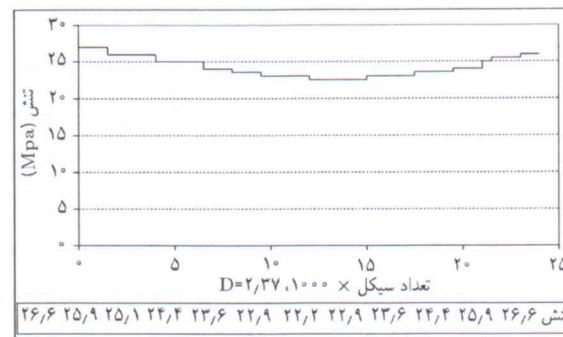
ج) نمونه‌ی بارگذاری با ترتیب کاهش؛



الف) نمونه‌ی بارگذاری با ترتیب افزایش؛



د) نمونه‌ی بارگذاری با ترتیب بی‌نظم.



ب) نمونه‌ی بارگذاری با ترتیب کاهش و سپس افزایش؛

شکل ۳. تاریخچه‌ی بارهای اعمالی به نمونه‌ها.

خستگی، با استفاده از قانون ماینر به صورت رابطه‌ی ۳ و رابطه‌ی مانسن — کافین در شرایط تنش کنترل شده به صورت:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (5)$$

و ثابت‌های آن، و منحنی عمر خستگی در شرایط تنش یا کرنش ثابت و تحلیل دوره‌ها با روش جریان بارانی اصلاح شده، نوشته شده است. [۱۱] (این برنامه به زبان پاسکال نوشته شده است ضمیمه ۱).

همان‌طور که در متن برنامه دیده می‌شود b و σ'_f ثابت‌های رابطه‌ی مانسن — کافین در شرایط تنش کنترل شده‌اند که ابتدا باید مقدار آنها را پس از رسم منحنی S-N محاسبه، و قبل از اجرای برنامه آنها را وارد کرد، و سپس برای استفاده از برنامه فقط باید میزان تنش و تعداد دوره‌ها را برای آن سطح تنش خاص مشخص کرد. رایانه مقدار صدمه را محاسبه کرده و با وارد کردن تنش و دوره‌های جدید، مقدار صدمه‌ی قبلی را با صدمه‌ی جدید جمع می‌کند و با رسیدن مجموع صدمه به عدد ۱، دستور توقف کار و در واقع پایان عمر خستگی قطعه را می‌دهد. بنابراین، این روش پیش‌بینی می‌کند که آیا با کاربرد یک تاریخچه‌ی تنشی خاص در مورد یک قطعه، شکست اتفاق می‌افتد یا خیر؛ هم‌چنین عمر باقی‌مانده را برای قطعات در حال کار تعیین می‌کند. پس از نوشتن این برنامه بایستی مشخص می‌شد که آیا فرضیات با

بارانی است. در مورد حلقه‌ها و تاریخچه‌های پیچیده بهتر است از رایانه برای محاسبه‌ی تعداد دوره‌ها استفاده شود. برای شمارش و حذف نیم‌دوره‌ها، می‌بایست منحنی کرنش — زمان در یک بیشینه یا کمینه شروع شده و در همان نقطه خاتمه یابد. بنابراین وجود تاریخچه‌ی کل قطعه ضروری است. به عبارت دیگر، با این روش نمی‌توان قطعاتی را که در حال آزمایش‌اند، به صورت هم‌زمان تحلیل کرد، و حتماً لازم است که ابتدا آزمایش پایان یابد و منحنی کامل به دست آید و سپس شمارش انجام گیرد. برای این حالت الگوریتمی نیز ارائه شده است. [۱۱] الگوریتم پیشنهاد شده‌ی دیگر، مربوط به حالت تحلیل هم‌زمان برای قطعاتی است که در حال آزمایش‌اند. [۱۱]

برای تعیین عمر خستگی می‌توان از روابط زیر استفاده کرد و طول عمر باقی‌مانده‌ی قطعه تا شکست را به دست آورد.

$$D = \left(\frac{N}{N_f}\right)_i \quad (2)$$

$$\sum_i \left(\frac{N}{N_f}\right)_i = 1 \quad (3)$$

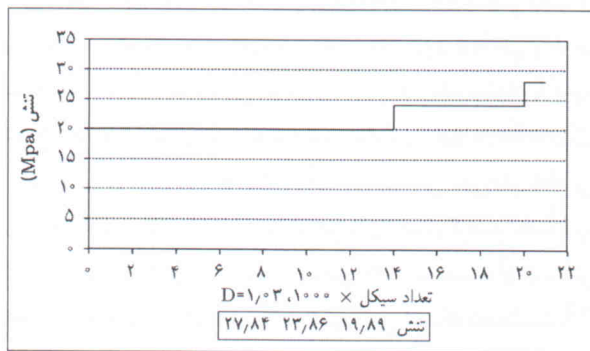
$$D = \frac{1}{2N_f} = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_f}\right)^{-\frac{1}{b}} \quad (4)$$

تعیین عمر خستگی: برنامه‌ی رایانه‌ی استفاده شده برای تعیین عمر

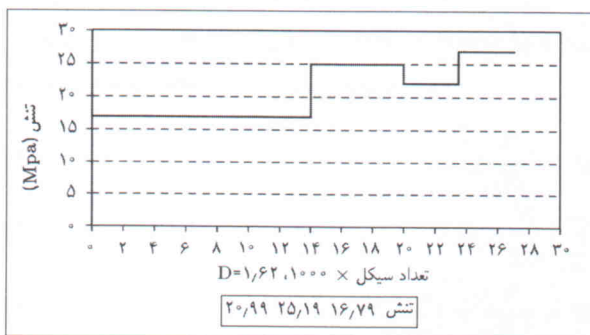
جدول ۳. مقایسه‌ی مجموع صدمات پیش‌بینی شده‌ی نظری، متوسط نتایج آزمون‌ها و مقادیر واقعی صدمه.

شماره‌ی آزمون	متوسط D	D نظری	D واقعی	پیش‌بینی شده‌ی متوسط N	N نظری	N واقعی
۲۰	۱٫۱۸	۱	۱٫۰۳	۲۱۶۰۰	۲۰۷۴۰	۲۰۹۰۰
۲۱	۱٫۱۸	۱	۱٫۰۶	۱۸۲۶۳	۱۷۶۰۰	۱۷۸۱۳
۲۲	۱٫۱۸	۱	۰٫۹۷	۴۳۷۰	۳۳۲۵	۳۱۵۰
۲۳	۱٫۱۸	۱	۱٫۶۲	۲۴۵۶۰	۲۳۵۳۷	۲۷۰۷۵
۲۴	۱٫۱۸	۱	۱٫۴۳	۱۹۶۱۳	۱۸۴۶۳	۲۱۱۳۸
۲۵	۱٫۱۸	۱	۰٫۸۷	۴۷۲۲۵	۲۹۲۲۵	۱۷۰۰۱
۲۶	۱٫۱۸	۱	۱٫۳۴	۲۳۸۲۵۰	۲۸۸۰۰۰	۲۴۲۲۵۰

در این مقطع، و براساس این مقدار متوسط، چند نظام بارگذاری به‌گونه‌ی طراحی شد که با این نسبت متوسط و قانون ماینر هم‌خوانی داشته باشد. سپس تاریخچه‌های بارگذاری طراحی شده به قطعات اعمال شد و تفاوت بین دوره‌های پیش‌بینی شده تا مرحله‌ی شکست و تعداد دوره‌های واقعی اعمالی به نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۵ نمونه‌هایی از تاریخچه‌های پیش‌بینی شده و تاریخچه‌های واقعی را نشان می‌دهد. جدول ۳ و نمودار شکل ۶ نیز مقایسه‌ی بین مجموع صدمات پیش‌بینی شده‌ی نظری، متوسط نتایج آزمون‌ها و مقادیر واقعی صدمه، و نیز تعداد دوره‌های پیش‌بینی شده و واقعی را نشان می‌دهد.



الف) تاریخچه‌ی پیش‌بینی شده؛



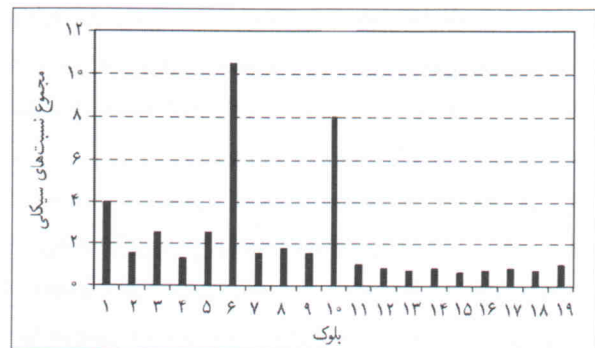
ب) تاریخچه‌ی واقعی.

شکل ۵. نمونه‌هایی از تاریخچه‌های پیش‌بینی شده و تاریخچه‌های واقعی.

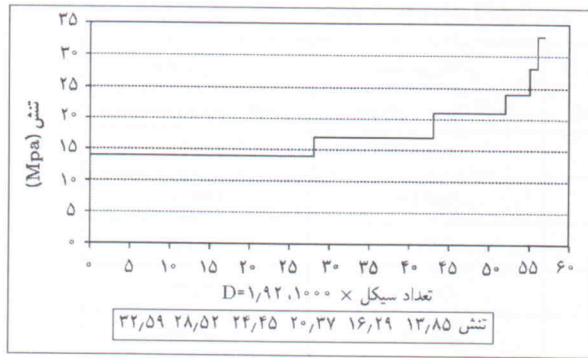
نتایج تجربی سازگارند یا خیر. به این منظور تغییری در برنامه ایجاد شد که در آن به‌جای این‌که با رسیدن مقدار صدمه به عدد ۱ برنامه متوقف شود، محاسبه‌ی مجموع نسبت‌های دوره‌ی تا مرحله‌ی شکست (که لزوماً عدد ۱ نیست) ادامه یابد تا بتوان تشخیص داد که جمع نسبت‌های دوره‌ی در عمل و حداقل برای این شرایط خاص حدوداً چه عددی است و آیا واقعاً می‌توان به برنامه‌ی نوشته شده و روش به‌کار گرفته شده در تعیین عمر خستگی اعتماد کرد یا خیر. برنامه‌ی تصحیح شده‌ی مذکور نیز در ضمیمه‌ی ۲ آورده شده است.

پس از مشخص شدن برنامه‌ی رایانه‌ی، برای تاریخچه‌های تنش شکل ۳، مقدار مجموع صدمه محاسبه شد که برای هر نظام بارگذاری نتایج در زیر آن آمده است. شکل ۴ نیز نمودار مجموع نسبت‌های دوره‌ی را در آزمایش‌های مختلف به‌منظور مقایسه و بحث و بررسی بر روی آنها نشان می‌دهد.

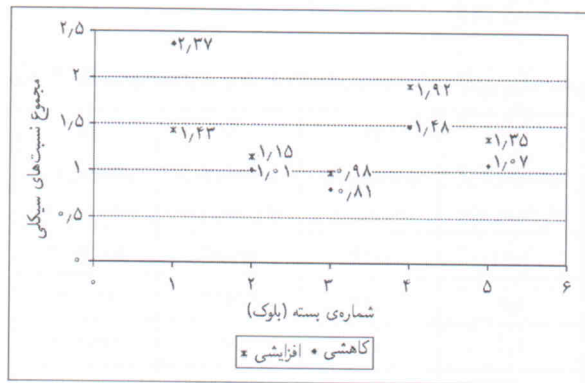
آزمایش‌های تعیین عمر باقی‌مانده: با توجه به سازگاری مناسب بین برنامه‌ی نوشته شده و نتایج آزمایش‌ها، در مرحله‌ی بعد پروژه‌ی انجام آزمایش‌هایی برای تخمین عمر باقی‌مانده‌ی قطعات اجرا شد. با بررسی نمودار شکل ۴ و کنار گذاشتن سه مقدار مربوط به آزمون‌های شماره‌ی ۱، ۶ و ۱۰ که تفاوت زیادی با بقیه‌ی مجموع نسبت‌های دوره‌ی دارند، مقدار متوسط مجموع صدمه برای سایر آزمون‌ها برابر ۱٫۱۸ تعیین شد.



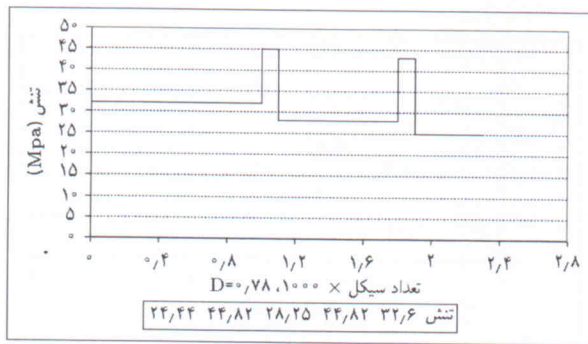
شکل ۴. نمودار مجموع نسبت‌های دوره‌ی در آزمایش‌های مختلف.



شکل ۸. تاریخچه‌هایی با ترتیب افزایشی و کاهششی تنش‌ها.



شکل ۹. مقدار صدمه در تاریخچه‌هایی با ترتیب افزایشی و کاهششی تنش‌ها.



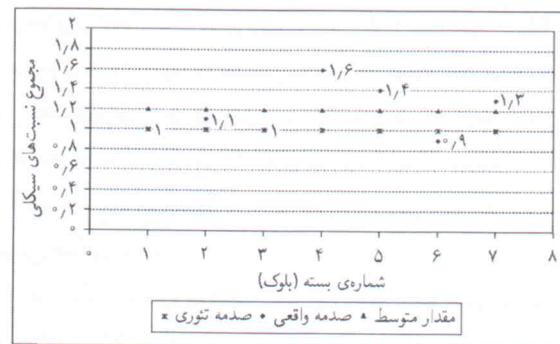
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی دارای پیک ناگهانی تنش.

آزمون‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۵ و شکل ۹ مقدار صدمه در آزمون‌های افزایشی و کاهششی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آزمون‌های اثر پیک ناگهانی تنش بر عمر خستگی: برای این منظور به‌هنگام آزمایش ۵ عدد از نمونه‌ها، و مدتی بعد از اعمال یک سطح تنش به نمونه، یک افزایش ناگهانی تنش به نمونه اعمال شد (تقریباً در حد σ_{uts}) و سپس مجدداً شرایط تنشی قبلی برقرار شد. نمونه‌ی از تاریخچه‌ی تنشی اعمالی در شکل ۱۰ دیده می‌شود و مقایسه‌ی مقادیر مربوط با داده‌های به‌دست آمده بدون پیک تنشی در جدول ۶ و شکل ۱۱ آورده شده است.

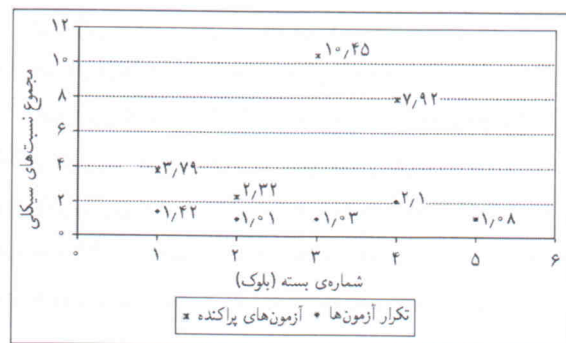
آزمون مجدد تاریخچه‌های با مجموع صدمه دور از عدد ۱: برای بررسی علت وجود جواب‌های پراکنده تاریخچه‌های ۱، ۵، ۶، ۹ و ۱۰ مجدداً تکرار شد، که نتایج آن در شکل ۷ و جدول ۴ با مقادیر آزمون‌های اولیه مقایسه شده است.

عدم تکرار پراکندگی نتایج، نشان می‌دهد که علت وجود پراکندگی در نتایج اولیه عواملی مانند آماده‌سازی نمونه‌ها، تنظیم دستگاه و نیرو بوده است. به نظر می‌رسد که علت اینکه در تاریخچه‌ی شماره‌ی ۱۰ مجموع صدمه بیشتر از ۲ است، وجود پیک تنش باشد.

آزمون تاریخچه‌هایی با ترتیب افزایشی و کاهششی تنش‌ها: برای بررسی میزان حساسیت مقدار مجموع نسبت‌های دوره‌ی به ترتیب تنش‌ها یا کرنش‌ها، چند آزمون انجام شد. شکل ۸ نمونه‌ی از این



شکل ۶. تعداد دوره‌های پیش‌بینی شده و واقعی.



شکل ۷. نتایج تکرار تاریخچه‌های با مجموع صدمه دور از یک، و مقایسه با مقادیر قبلی.

جدول ۴. نتایج تکرار تاریخچه‌های با مجموع صدمه دور از یک.

شماره‌ی آزمون جدید	در	در	شماره‌ی تاریخچه‌ی اولیه
۱,۲۴	۳,۷۹	۳۰	۱
۱,۰۱	۲,۳۲	۲۷	۵
۱,۰۳	۱۰,۴۵	۲۸	۶
۲,۱۴	۷,۹۲	۲۹	۱۰
۱,۰۸	۱,۰۸	۳۱	۹

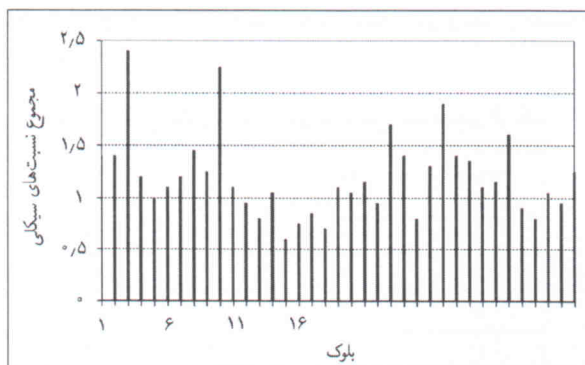
جدول ۵. مقایسه‌ی نتایج تاریخچه‌هایی با ترتیب افزایشی و کاهششی تنش‌ها.

شماره‌ی تاریخچه	شماره‌ی تاریخچه	D در تاریخچه‌ی افزایشی تنش‌ها	D در تاریخچه‌ی کاهششی تنش‌ها	تعداد دوره‌ها در تاریخچه‌های با ترتیب افزایشی	تعداد دوره‌ها در تاریخچه‌های با ترتیب کاهششی
۲۰	۱,۱۸	۱	۱,۰۳	۲۱۶۰۰	۲۰۷۴۰
۲۱	۱,۱۸	۱	۱,۰۶	۱۸۲۶۳	۱۷۶۰۰
۲۲	۱,۱۸	۱	۰,۹۷	۴۳۷۰	۳۳۲۵
۲۳	۱,۱۸	۱	۱,۶۲	۲۴۵۶۰	۲۳۵۳۷
۲۴	۱,۱۸	۱	۱,۴۳	۱۹۶۱۳	۱۸۴۶۳
۲۵	۱,۱۸	۱	۰,۸۷	۴۷۲۲۵	۲۹۲۲۵
۲۶	۱,۱۸	۱	۱,۳۴	۲۳۸۲۵۰	۲۸۸۰۰۰

عمر خستگی ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج کل آزمون‌ها (شکل ۱۲) برمی‌آید، در ۱۴ آزمون از ۳۷ آزمون مورد بازمینی، مجموع خطی دوره‌ها برابر عدد ۱ یا به بیانی دقیق‌تر 1 ± 0.1 بود. یعنی در ۳۸٪ از آزمون‌ها شکست دقیقاً در نقطه‌ی که قانون ماینر پیشنهاد می‌کند اتفاق می‌افتد. فقط در ۳ مورد از کل آزمون‌ها (یعنی در ۸٪ از کل آزمون‌ها) شکست در حوالی نقطه‌ی ۲ اتفاق می‌افتد که قابل صرف‌نظر است. لذا قانون جمع خطی نسبت‌های دوره‌ی در این شرایط با تقریب بسیار خوبی صادق است.

در حالت عادی، شکست حتی در جمع نسبت‌های دوره‌ی تا عدد ۱۰ نیز گزارش شده است^[۱۲] و محققین دیگر نیز از جمله پولاک و کلسنیل^[۱۳] این نظریه را تأیید کرده‌اند و این روش را به همراه تحلیل جریان بارانی به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های تخمین عمر خستگی قطعات در بارگذاری بدون ترتیب معرفی کرده‌اند.

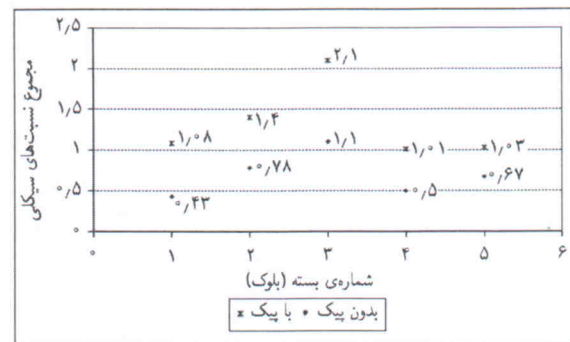
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار مجموع صدمه تطابق خوبی با مقدار نظری آن و حتی مقدار متوسط آزمون‌های قبلی دارد (در بدترین حالت ۴۴٪ خطا در مقایسه با مقدار متوسط مجموع صدمه و ۶۲٪ با مجموع صدمه‌ی نظری) همین حالت در مورد تعداد دوره‌های پیش‌بینی شده در هر سه حالت روش متوسط، روش پیشنهاد



شکل ۱۲. نتایج کل آزمون‌ها برای مجموع نسبت‌های دوره‌ی.

جدول ۶. مقایسه‌ی مقادیر مربوط، با داده‌های به‌دست آمده بدون پیک تنش.

D	D	N	N
در تاریخچه‌های بدون وجود پیک	در تاریخچه‌های با وجود پیک	در تاریخچه‌های بدون وجود پیک	در تاریخچه‌های با وجود پیک
۱,۹۲	۰,۴۳	۵۶۷۶۳	۵۱۴۵۰۲
۱,۴	۰,۷۸	۴۵۵۳۳	۲۲۳۸۳
۲,۱	۱,۱	۲۸۷۶۰	۲۲۹۵۰۴
۰,۰۱	۰,۵	۱۰۴۹۸	۳۵۲۵۵
۱,۰۳	۰,۶۷	۳۵۶۵	۳۳۴۰۶



شکل ۱۱. مقایسه‌ی مقادیر مربوط، با داده‌های به‌دست آمده بدون پیک تنش.

بحث

شیاردار بودن نمونه‌ها، مرحله‌ی جوانه‌زنی ترک‌ها را به حداقل می‌رساند، اما آن را کاملاً حذف نمی‌کند. پراکندگی در داده‌های S-N را می‌توان به مسئله‌ی جوانه‌زنی از انتهای شیار، خطا در بستن نمونه به دستگاه، کیفیت سطحی در محل شیار، تنظیمات دستگاه و نیرو نسبت داد.

در این پژوهش، با استفاده از ثابت‌های منحنی‌های عمر خستگی در شرایط تنش یا کرنش ثابت و ترکیب آن با قانون ماینر، برنامه‌ی ارزیابی

منظور تعیین عمر خستگی قطعات استفاده کرد. اما باید بدانیم که در حالت کاهشی، این قانون تخمین بهتری از عمر قطعه، و در آزمون‌های واقعی تخمین کم‌تری از عمر واقعی قطعه می‌دهد. بنابراین در حالت بارگذاری کاهشی، این قانون خطرناک است و بایستی یک ضریب اطمینان همراه با این قانون در نظر گرفت.

برخی محققین اعتقاد دارند که به دلیل احتمال کم وجود این پیک‌ها و همچنین زمان اعمال کم آن‌ها، اثر این پیک‌ها را نباید در محاسبات مربوط به رشد ترک و تحلیل عمر خستگی در نظر گرفت. از آنجا که وارد شدن این پیک‌ها در زمان کوتاهی صورت می‌گیرد، در نظر گرفتن آنها سبب کاهش زیادی در محاسبه‌ی عمر مفید قطعات می‌گردد. لذا امروزه با روش برش، پیک‌های تند به حدی که سطح برش مشخص می‌کند، کاسته می‌شوند. در این روش پیک‌ها حذف نمی‌شوند و تنها، اندازه‌ی آن‌ها به اندازه‌ی بزرگ‌ترین سطح تنش یا کرنش مجاز، کاهش داده می‌شود.

همانطور که از نتایج آزمایش‌های طراحی شده، جدول ۶ و نیز در نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود، وجود پیک‌های تند سبب افت شدید عمر قطعه می‌شود و در نتیجه، شکست در مجموع صدمه‌ی خیلی کم‌تری نسبت به تاریخچه‌های بدون پیک اتفاق می‌افتد. از نتایج آزمایش‌ها چنین به نظر می‌رسد که استفاده از روش برش باید با احتیاط زیادی توأم باشد.

در تاریخچه‌ی نشان داده شده در شکل ۱۰ بعد از بارگذاری اولیه در تنش ۳۲/۶ MPa، تنش به‌طور ناگهانی به ۴۴/۸۲ MPa افزایش یافته و مجدداً به سطح تنش قبلی بازگردانده شده است. تعداد دوره‌های اعمالی در پیک تنشی حدود ۵۰ دوره بوده است. با توجه به این که در این تاریخچه دو پیک تنشی اعمال شده است (۱۰۰ سیکل)، با فرض انجام برش (به سطح تنش ۳۲/۶ MPa)، صدمه‌ی ناشی از پیک‌ها ۲/۰۷ می‌شود، در صورتی که در عمل، در نتایج آزمایش این دو تاریخچه، حدود ۶۲/۰ اختلاف دیده می‌شود که بحث فوق به مفهوم لزوم انجام محتاطانه‌ی عمل برش است. یعنی اگر پیک‌های موجود در یک تاریخچه‌ی تنشی سبب رشد بسیار سریع ترک شوند، از اثر آنها نمی‌توان صرف نظر کرد و عمل برش فقط در تاریخچه‌هایی که احتمال وقوع پیک‌ها بسیار اندک باشد مجاز است.

اثر دامنه‌ی تنش بر رشد ترک خستگی: برای ارزیابی سرعت رشد ترک از نتایج شکست‌نگاری استفاده شد. بدین منظور سطوح شکست، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نظریه‌ی رایدر می‌توان در مرحله‌ی یکنواخت رشد ترک خستگی، سرعت رشد ترک خستگی $(\frac{dA}{dN})$ را برابر فاصله‌ی موج^۶ در نظر گرفت.^[۱۴]

از طرفی با توجه به ثابت بودن دامنه‌ی تنش دوره‌ی، و نه دامنه‌ی

شده‌ی نظری و آزمون عملی دیده می‌شوند. چنان‌که ملاحظه می‌شود نه تنها تعداد دوره‌ها از یک مرتبه‌اند، بلکه از نظر ارقام مرتبه نیز هماهنگ‌اند. یولاک و کلسنیل^[۱۳] که از رابطه‌ی مانسن - کافین در حالت کرنش کنترل شده استفاده کردند، به این نتیجه رسیدند که عمر خستگی یک نمونه در اثر بارگذاری با دامنه‌ی متغیر را می‌توان از داده‌های مربوط به عمر خستگی در دامنه‌ی ثابت و رفتار تنش - کرنش حقیقی به دست آورد. به نظر می‌رسد که بهترین روش محاسبه‌ی عمر خستگی در قطعاتی که تحت دوره‌هایی با دامنه‌ی متغیر قرار گرفته‌اند، استفاده از قانون تجمع صدمه‌ی خستگی ماینر است. برای شمارش دوره‌ها از منحنی کرنش - زمان یا تنش - زمان، روش جریان بارانی اصلاح شده بهترین نتایج را ارائه می‌دهد.

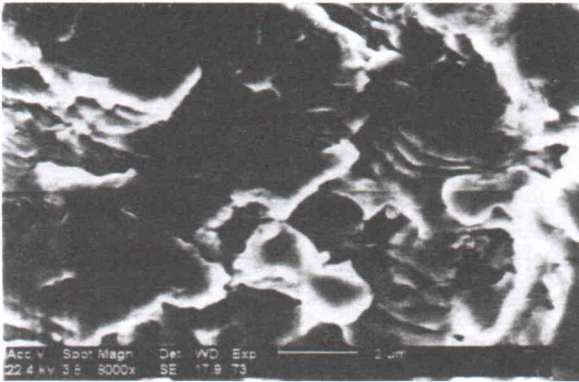
دو محدودیت اصلی قانون ماینر در این است که اولاً این قانون برای بارگذاری پر دامنه صادق است، ثانیاً ترتیب تنش‌ها را در نظر نمی‌گیرد. در بارگذاری‌های پر دامنه، تعداد دوره‌های لازم برای جوانه‌زنی ترک (N_0) اندک است و از آن‌ها در مقابل کل دوره‌های اعمالی می‌توان صرف نظر کرد. لذا در حالت بارگذاری با ترتیب کاهشی، ترک خیلی سریع در دامنه‌ی بالاتر جوانه می‌زند و در دامنه‌ی پایین که جوانه‌زنی به تعداد دوره‌های زیاد نیاز دارد، رشد می‌کند و بنابراین شکست در دوره‌های کم‌تر از حد پیش‌بینی شده پیش می‌آید و مقدار $\sum_i \left(\frac{N}{N_i}\right)$ کوچک‌تر از ۱ است. اما در بارگذاری با دامنه‌ی تنش یا کرنش اندک، از قسمت عمده‌ی عمر قطعه در مرحله‌ی جوانه‌زنی ترک صرف می‌شود و ترک دیرتر جوانه می‌زند. نمی‌توان از تعداد دوره‌های مرحله‌ی جوانه‌زنی در مقابل تعداد کل دوره‌ها صرف نظر کرد. بنابراین در شرایط افزایشی بارها، چون قسمت عمده‌ی دوره‌ها صرف جوانه‌زنی می‌شود، پس $\sum_i \left(\frac{N}{N_i}\right)$ بزرگ‌تر از ۱ است.

در نمونه‌های مورد آزمون در این تحقیق، به دلیل شیاردار بودن و حذف مرحله‌ی جوانه‌زنی ترک، محدودیت قانون ماینر در مورد در نظر نگرفتن ترتیب تنش‌ها از بین می‌رود. همانطور که در جدول ۵ و نیز شکل ۹ دیده می‌شود، در نمونه‌های با ترتیب کاهشی، مجموع نسبت‌های دوره‌ی به کم‌تر از عدد یک نمی‌رسد.

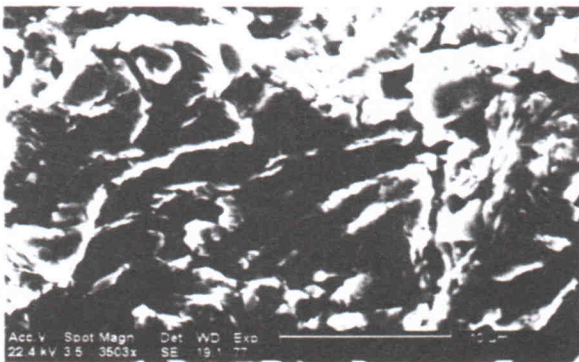
همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، مطابق پیش‌بینی‌های نظری مجموع صدمه در آزمون‌های کاهشی نسبت به آزمون‌های افزایشی عملاً کم‌تر است.

بررسی دقیق‌تر جدول ۵ نشان می‌دهد که عدد صدمه در آزمون‌های کاهشی (پر دامنه) نسبت به آزمون‌های افزایشی (کم دامنه) به عدد ۱ در قانون ماینر نزدیک‌تر است و همین موضوع، صادق بودن قانون ماینر در دوره‌های پر دامنه را ثابت می‌کند.

البته در آزمون‌های افزایشی نیز عدد صدمه علی‌رغم بزرگ‌تر بودن، باز نزدیک به عدد ۱ است. به نظر می‌رسد که می‌توان از این روش به



شکل ۱۳. سطح شکست میکروسکوپی به دست آمده از سطح تنش ۳۱ MPa.



شکل ۱۴. سطح شکست میکروسکوپی به دست آمده از سطح تنش ۱۲٫۶ MPa.

برای اجتناب از خطای اندازه‌گیری به هنگام فرانتوگرافی، سعی شد که سطوحی که موج‌ها در آن اندازه‌گیری می‌شود، حتی‌الامکان سطوح عمود بر راستای تنش و همچنین در جهت رشد ترک خستگی باشند. از طرفی سرعت رشد ترک خستگی با توجه به رابطه‌ی پاریس برای دو سطح تنشی مذکور به ترتیب برابر $\frac{\mu m}{Cycle} / 0.77$ و $\frac{\mu m}{Cycle} / 0.48$ محاسبه شد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، نتایج آزمایش و نتایج محاسبه شده از تطابق نسبی برخوردارند.

ملاحظه می‌شود که در تنش ۳۱ MPa نتایج محاسبه‌ی فواصل آثار موج، با نتایج آزمایش تطابق خوبی دارد و فرض برابری سرعت رشد با فاصله‌ی آثار موج خستگی صحیح است. اما به نظر می‌رسد علت تفاوت قابل ملاحظه‌ی فاصله‌ی آثار موج محاسبه شده در سطح تنش ۱۲٫۶ MPa با نتایج آزمایش، این است که سطح تنش اعمالی تنها اندکی بیشتر از تنش آستانه‌ی ۱۰ MPa است [۱۶] و قسمت اعظم دوره‌ها صرف جوانه‌زنی ترک می‌شود و در محاسبات مربوط به رشد ترک نباید وارد شود. علی‌رغم شیاردار بودن، رشد ترک خستگی به جوانه‌زنی ترک خستگی در عمق نیاز دارد.

با توجه به نظریه‌ی نامکین [۱۷] در دامنه‌ی تنش‌های نزدیک به تنش آستانه‌ی الزاماً به‌ازای هر دوره، یک فاصله‌ی موج تشکیل نمی‌شود

شدت تنش دوره‌ی (ΔK) در بارگذاری خمشی - چرخشی با افزایش طول ترک، دامنه‌ی شدت تنش دوره‌ی مرتباً افزایش می‌یابد. لذا در این تحقیق، سرعت رشد ترک خستگی با توجه به اندازه‌ی طول ترک خستگی و یا به عبارت دقیق‌تر، فاصله‌ی محل مورد بررسی از محل جوانه‌زنی ترک اندازه‌گیری شد.

با توجه به ارتباط شدت تنش زاویه‌ی $(K\alpha)$ با جهت رشد ترک، به منظور انجام دقیق اندازه‌گیری‌ها لازم بود که مسیر رشد ترک دقیقاً مشخص شود. با توجه به فاصله‌ی اندک محل‌های بررسی رشد ترک تا محل جوانه‌زنی، با تقریب خوبی مسیر رشد ترک را می‌توان به صورت خط مستقیم در نظر گرفت.

از طرفی برای از بین بردن خطا، سعی شد قسمت‌هایی از سطح شکست که در مسیر شعاعی رشد ترک (عمود بر سطح خارجی و در راستای مرکز نمونه) قرار دارند برای تحلیل رشد ترک در نظر گرفته شود. برای محاسبه‌ی سرعت رشد ترک خستگی با توجه به رابطه‌ی پاریس به صورت

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$$

که در آن

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

است، و نیز با توجه به این که در شرایط بارگذاری خمشی - چرخشی $\Delta K = K_{max}$ و همچنین صرف نظر از مقدار طول رشد ترک در یک دوره نسبت به کل طول ترک، می‌توان نوشت:

$$\Delta K = Y \sigma_{max} \sqrt{\pi a F(w)} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای Y و $F(w)$ برای این شرایط هندسی از نظر نمونه‌ها و طول ترک، می‌توان نشان داد: [۱۵]

$$\Delta K = 1.23 \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

و با انتخاب ثابت‌های پاریس برای فولاد مورد آزمایش، به صورت $A = 3.7 \times 10^{-10}$ و $m = 3/6$ با توجه به نتایج مربوط به فولادی مشابه از نظر ترکیب شیمیایی و اندازه دانه [۱۶]، می‌توان سرعت رشد ترک خستگی را در منطقه‌ی یکنواخت رشد ترک برای هر سطح تنش و طول ترک با تقریب خوبی محاسبه کرد.

با بررسی فاصله‌ی دو نقطه، از محل جوانه‌زنی ترک در راستای شعاعی رشد ترک، تحت تنش دوره‌ی ۳۱ MPa فاصله‌ی آثار موج در حدود $0.7 \mu m$ (تصویر ۱۳) و تحت تنش دوره‌ی ۱۲٫۶ MPa حدود $0.3 \mu m$ (تصویر ۱۴) اندازه‌گیری شد.

۲. جمع خطی نسبت‌های دوره‌ی درکلیه‌ی آزمایش‌ها در حول و حوش نقطه‌ی ۱ است که با قانون ماینر همخوانی خوبی نشان می‌دهد.
۳. با فرضیات انجام شده می‌توان به خوبی عمر باقی‌مانده برای قطعات در حال کار را تخمین زد.
۴. جمع خطی نسبت‌های دوره‌ی در نمونه‌های شیاردار در حالت کاهش‌ی نسبت به حالت افزایش‌ی به عدد ۱ نزدیک‌تر است و این خود تأیید اعتبار قانون ماینر به‌ویژه در شرایط کاهش‌ی تنش‌ها است.
۵. با عملیات برش پیک‌ها در تاریخچه‌ی تنش بایستی محتاطانه برخورد کرد. اگر پیک‌ها واقعاً در سیستم بارگذاری موجود باشند دقت عمل برش نه فقط به شدت پیک تنش‌ی، بلکه به جنس ماده و سابقه‌ی ترمومکانیکی آن بستگی دارد.

و ممکن است تعداد زیادی دوره صرف ایجاد یک فاصله‌ی موج می‌شود.

با توجه به عدم امکان انجام آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری دقیق دامنه‌ی شدت تنش آستانه‌ی K_{th} ، در روش مورد استفاده در این پروژه، کاربرد روابط مربوط به محاسبه‌ی سرعت رشد ترک خستگی در محدوده‌های نزدیک به دامنه‌ی تنش آستانه‌ی امکان‌پذیر نبود.

نتیجه‌گیری

۱. امکان تحلیل بارگذاری بدون ترتیب در خستگی فولاد ساختمانی در شرایط خمشی - چرخشی با استفاده از قانون جمع خطی صدمات روابط مانسن - کافین وجود دارد.

پانوش

1. Level Crossing
2. rain counting
3. range flow
4. clipping
5. truncation
6. stiration

منابع

1. Billy, M. and Kliman, V. Measurement, Evaluation and Simulation of Service random Processes, Veda, Bratislava (1984).
2. Broek, D., the Practical Use of Fracture Mechanics, 175 (1991).
3. Dowling, N.E. Materials Journal., 7, 71, (1972).
4. Khosrovahen A., and Dowling N.E., Int. J.Fracture, 12, 99, (1990).
5. Koibuchi K., and Kotani S., ASTM STP516, ASTM 229-245 (1973).
6. Matsuishi M. and Endo T., Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, March (1968).
7. Broek D., As, Ref 2, 191.
8. Broek D., As, Ref 2, 195.
9. Polak J. and Klesnil M., Fatigue Eng. Mat, Strc. 1, 133, (1972).
10. Miner M.A., Appl J. Mech. 12, 159, (1945).
11. Mirzai F., Effect of Random Loading on Fatigue Life of Structural Steel, MSc Dissertation, 1997, AmirKabir University of Technology.
12. Klesnil, M. and Lukas, P. Fatigue of Metallic Materials, 249 (1992).
13. Polak, J. and Klesnil, M. Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life in Variable Amplitude Loading, Fatigue of Eng. Materials and Structures, 1, pp.123-133 (1978).
14. Laird, C. and Smith, GC. Phil, Mag 7, 847 (1962).
15. Pook, L.P. Marsh, K.J. Frost, N.G. Metal Fatigue, clarendon press, Oxford, (1974).
16. Rolf and Barsom, Engineering Fracture Mechanics, 3rd ed The Hague Sijthoff and Noordhoff, (1978).
17. B Tomkins, Metal Science, P408 (1980).

ضمیمه‌ی ۱:

```

program a;
var
Qa,Qf,b,m,Nf::real;
function power (a,c:real):real;
begin
    power:=exp(c*ln(a));
end;
begin
    writeln( 'inter b,Qf' );
    read (b.Qf);
    Nf:=0;
    Qa:=1;
    while Nf < 1 do
    begin
        writeln ('inter Qa,M');
        read (Qa,M);
        Nf:=(power (Qa/Qf, -1/b))*m+Nf;
        writeln ( 'Nf= ', Nf:5 : 2);
    end;
    readln;
    readln;
end.

```

ضمیمه‌ی ۲:

```

program a;
var
Qa,Qf,b,m,Nf::real;
function power (a,c:real):real;
begin
    power:=exp(c*ln(a));
end;
begin
    writeln( 'inter b,Qf' );
    read (b.Qf);
    Nf:=0;
    Qa:=1;
    while Nf < 50 do
    begin
        writeln ('inter Qa,M');
        read (Qa,M);
        Nf:=(power (Qa/Qf, -1/b))*m+Nf;
        writeln ( 'Nf= ', Nf:5 : 2);
    end;
    readln;
    readln;
end.

```