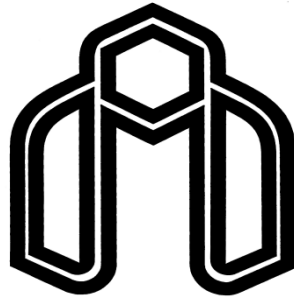


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

پیش بینی عمر خستگی کم چرخه ی فولاد SS304 بر اساس
انرژی کرنش پلاستیک به صورت تجربی و عددی

دانشجو: امیر شهینواز

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به آنان که وجودم برایشان همه رنج بود

و وجودشان برایم همه مهر

تقدیم به مهربانترین پدر و تقدیم به صبورترین مادر

آنان که توانشان رفت تا به توان برسم

مویشان سپیدگشت تا رویم سپید بماند

آنان که راستی قائم در شگستگی قائمان بقایافت

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که منت نهاد، هستی بخشید و توفیق کسب علم و دانش داد. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که در این پروژه از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

بدین وسیله از کلیه اساتید گران‌قدرم که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم بی‌نهایت سپاس گذارم. به ویژه استاد محترم جناب آقای دکتر محمود شریعتی که با راهنمایی‌های مدبرانه، نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را به عهده داشتند. در پایان از کلیه عزیزانی که تا بدین جا زحمات زیادی را برایم کشیده‌اند تشکر می‌کنم. از خانواده خوبم که از آغاز تا کنون مشوق و پشتیبانم بودند. به خصوص خواهر خوبم خانم شیلا شهنواز که زحمات زیادی را در این مدت متقبل شدند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

امیر شهنواز

دانشجوی کارشناسی ارشد

گروه طراحی کاربردی

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

شهریور ۱۳۹۳

تعهدنامه

اینجانب امیر شهنواز دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان "پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه‌ی فولاد SS304 بر اساس انرژی کرنش پلاستیک به صورت تجربی و عددی" تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- م. شریعتی، ا. شهنواز، "پیش بینی عمر خستگی کم چرخه‌ی فولاد SS304 بر اساس معیار انرژی و پردازش تصویر در بارگذاری کشش-فشار تک محوره"، مهندسی مکانیک مدرس، تحت داوری.
- ۲- م. شریعتی، ا. شهنواز، "مدلسازی رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد SS304 تحت بارگذاری کشش-فشار تک محوره"، "مهندسی مکانیک تربیت مدرس"، تحت داوری.

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی، طول عمر فولاد SS304 تحت بارگذاری خستگی کم چرخه پرداخته شده است. ابتدا به منظور شناخت بیشتر رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد SS304، رفتار آن در آزمایش کشش تک محوره مدل سازی شد. سپس به تحلیل تجربی تخمین عمر این فولاد با توجه به رویکرد انرژی و تکنیک پردازش تصویر پرداخته شده است. در پایان به تحلیل عددی تخمین عمر خستگی در نرم افزار کمسول پرداخته شده است.

در بحث مدل سازی رفتار الاستیک-پلاستیک، رفتار این نوع فولاد به صورت کامل در آزمایش کشش-فشار با روابط ریاضی با توجه به در نظر گرفتن اثر باوشینگر مدل سازی و بیان شده است. نتایج و روابط به دست آمده به خوبی با رفتار فولاد SS304 در آزمایش کشش مطابقت دارد. به منظور تحلیل تجربی با توجه به رویکرد انرژی هیستریزیس آزاد شده در طی بارگذاری سیکلی، تعاریف مختلفی از انرژی شده بیان شده است، انرژی آزاد شده در سیکل اول، سیکل آخر، درصد سیکل طی شده، کل انرژی سیکل های طی شده و در نظر گرفتن تمام حالت های ممکن بر اساس کمترین سیکل طی شده. نتایج تجربی نشان می دهند، به طور کلی در نظر گرفتن سیکل های میانی به مراتب، دقت بیشتری نسبت بقیه ی حالات انرژی دارند. در بحث پردازش تصویر، از سطح نمونه، هنگامی که تحت بارگذاری سیکلی می باشد، با توجه به فرکانس بارگذاری با استفاده از دوربین های میکروسکوپی عکس برداری می شود. نتایج پردازش تصویر به دست آمده از تحلیل این عکس ها نشان می دهد خستگی ماده با ظاهر و به عبارتی با سطح نمونه در ارتباط است. هرچه ماده سیکل های پایانی خود نزدیک می شود، نمودار به دست آمده از پردازش تصویر نیز سیر نزولی طی می کند.

برای تحلیل عددی تخمین عمر خستگی پس از بررسی نرم افزارهایی که قابلیت تحلیل خستگی را دارند، در نهایت نرم افزار کمسول انتخاب شد و مدل سازی در آن صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد تحلیل عددی نرم افزار، که بر اساس معیارهای خستگی تنش و کرنش به

تشخیص عمر خستگی می‌پردازد، هرچند نزدیک به نتایج تجربی می‌باشند، اما نمی‌تواند به صورت دقیق عمر ماده را تخمین بزند.

کلید واژه: خستگی کم‌چرخه، انرژی هیستریزیس، مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک، پردازش تصویر.

فهرست مطالب

چکیده	خ
فهرست علائم و نشانه‌ها	س
فهرست شکل‌ها	ص
فهرست جدول‌ها	ع
فصل ۱	۱
۱-۱- بارگذاری سیکلی	۲
۲-۱- خستگی	۳
۳-۱- تاریخچه‌ی خستگی	۳
۱-۳-۱- تاریخچه‌ی عمر خستگی بر اساس معیار انرژی	۱۱
فصل ۲	۱۳
۱-۲- مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد SS304 در آزمایش کشش-فشار	۱۴
۲-۲- دستگاه آزمایش	۱۵
۳-۲- مدل‌سازی رفتار ماده	۱۸
۱-۳-۲- مدل‌سازی فاز بارگذاری	۱۹
۱-۱-۳-۲- بارگذاری خطی O-A	۱۹
۲-۱-۳-۲- بررسی مدول یانگ در بارگذاری	۱۹
۳-۱-۳-۲- بررسی استحکام تسلیم	۲۱
۲-۳-۲- بارگذاری غیرخطی A-B-C	۲۲
۳-۳-۲- مدل‌سازی فاز باربرداری C-D	۲۴

۲۴	.....C-D رفتار الاستیک خطی ۱-۳-۳-۲
۲۶	----- بررسی اثر باوشینگر ۴-۳-۲
۲۸	----- D-E باربرداری غیرخطی ۵-۳-۲
۳۴	..... نتیجه‌گیری ۴-۲
۳۷	فصل ۳
۳۸	..... ۱-۳-مقدمه
۳۸	..... ۲-۳-پیش‌بینی عمر خستگی
۴۱	----- ۱-۲-۳-پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس معیار انرژی
۴۳	..... ۳-۳-آزمایش‌های تجربی آزمون خستگی
۴۴	----- ۱-۳-۴-محاسبه‌ی انرژی
۵۰	----- ۲-۳-۳-تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها
۵۱	----- ۳-۳-۳-تغییرات شیب حلقه هیستریزس
۵۲	..... ۴-۳-پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس پردازش تصویر
۵۸	..... ۵-۳-رشد ترک در قطعه‌ی تحت بارگذاری
۶۳	..... ۶-۳-نتیجه‌گیری
۶۵	فصل ۴
۶۶	..... ۱-۴-مقدمه‌ای بر تحلیل عددی
۶۶	----- ۱-۱-۴-روش اجزای محدود
۶۹	..... ۲-۴-معرفی نرم‌افزار COMSOL
۷۰	----- ۱-۲-۴-نحوه‌ی تخمین عمر در نرم‌افزار کمسول
۷۱	..... Findely-۱-۱-۲-۴-دیدگاه تنش

۷۱	.....Matake-دیدگاه تنش-۲-۱-۲-۴
۷۱	..... Maximum Normal Stress-دیدگاه تنش-۳-۱-۲-۴
۷۱	.....SWT-دیدگاه کرنش-۴-۱-۲-۴
۷۲	.....Wang-Brown-دیدگاه کرنش-۵-۱-۲-۴
۷۹	..... فصل ۵
۸۰	.....۱-۵-نتایج
۸۲	.....۲-۵-پیشنهادها
۸۴	..... منابع
۸۹	.....واژه نامه فارسی به انگلیسی
۹۰	.....واژه نامه انگلیسی به فارسی

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم اختصاری	عنوان
E^U	مدول یانگ باربرداری
E^L	مدول یانگ بارگذاری
e_{PL}^{L*}	حداکثر کرنش پلاستیک
e_{PL}^u	کرنش پلاستیک بارگذاری
e_{PL}^L	کرنش الاستیک بارگذاری
BEF	ضریب اثر باوشینگر
N_f	عمر(تعداد سیکل طی شده تا شکست)
ΔW	انرژی کل
ΔW_e	انرژی کرنش الاستیک
ΔW_p	انرژی کرنش پلاستیک
E_{tg}	مدول یانگ مماسی
E	مدول یانگ
σ_n	بیشترین تنش نرمال
$\Delta \tau$	بیشترین کرنش برشی
$\sigma_{f'}$	ضریب مقاومت خستگی
$\varepsilon_{f'}$	ضریب شکست خستگی
b	توان مقاومت خستگی
c	توان شکست خستگی
W_{One}	انرژی سیکل اول

W_{End}

W_{Total}

$W_{Percent\ cycle}$

انرژی سیکل آخر

کل انرژی سیکل طی شده

انرژی درصد سیکل طی شده

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) خصوصیات بارگذاری سیکلی ۲
- شکل (۲-۱) دستگاه اختراع شده توسط آلبرت ۴
- شکل (۳-۱) دستگاه آزمایش خستگی خمش وهلر ۶
- شکل (۴-۱) مقایسه مقالات چاپ شده بین سال‌های ۱۹۲۵-۱۹۴۵ در کشورهای انگلستان، آمریکا و آلمان [۲۷] ۹
- شکل (۱-۲) دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲ ۱۶
- شکل (۲-۲) طول سنج استاندارد دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲ ۱۶
- شکل (۳-۲) فیکسچر استاندارد دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲ ۱۷
- شکل (۴-۲) ابعاد هندسی نمونه مورد آزمایش کشش بر حسب میلی‌متر ۱۷
- شکل (۵-۲) منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش‌های مختلف انجام شده به ازای جابجایی‌های متفاوت ۱۸
- شکل (۶-۲) رفتار تنش-کرنش تک محوره برای توصیف رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری با یک مقدار معین کرنش ایجاد شده [۴۷] ۱۹
- شکل (۷-۲) انطباق پیشنهادی مدول یانگ باربرداری فولاد SS304 ۲۵
- شکل (۸-۲) تغییرات ضریب اثر باوشینگر در مقابل تغییرات کرنش پلاستیک در افسست ۰/۰۱٪ ۲۸
- شکل (۹-۲) منحنی تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی برای داده‌های آزمایشگاهی نمونه‌ی دوم ۲۹
- شکل (۱۰-۲) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای آزمایش دوم ۳۰
- شکل (۱۱-۲) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی

- ۳۰ برای آزمایش سوم
- شکل (۱۲-۲) انطباق منحنی تنش- کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای
- ۳۱ آزمایش چهارم
- شکل (۱۳-۲) انطباق منحنی تنش- کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی پیشنهادی
- ۳۳ جدید برای آزمایش دوم
- شکل (۱۴-۲) انطباق منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی
- ۳۳ پیشنهادی جدید برای آزمایش سوم
- شکل (۱۵-۲) انطباق منحنی‌های تنش- کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی
- ۳۳ پیشنهادی جدید برای آزمایش چهارم
- شکل (۱-۳) نمایش اجزای چگالی انرژی و حلقه‌ی هیستریزیس
- ۴۲ شکل (۲-۳) ابعاد هندسی نمونه‌ی آزمایش خستگی بر حسب میلی‌متر
- ۴۴ شکل (۳-۳) نحوه‌ی انتخاب سیکل‌ها برای تخمین عمر بر اساس انرژی حالت پنجم
- ۴۶ شکل (۴-۳) منحنی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب درصد سیکل در نظر گرفته شده برای
- ۴۷ حالت چهارم در نظر گرفتن انرژی
- شکل (۵-۳) منحنی دو بعدی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب انتخاب سیکل‌های در نظر گرفته
- ۴۸ شده برای حالت پنجم در نظر گرفتن انرژی
- شکل (۶-۳) منحنی سه بعدی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب انتخاب سیکل‌های در نظر گرفته
- ۴۹ شده برای حالت پنجم در نظر گرفتن انرژی
- شکل (۷-۳) (الف)- منحنی انرژی بر حسب تعداد سیکل $Amp=0/05, Mean=0/20$ ، (ب)-
- ۵۰ منحنی انرژی بر حسب تعداد سیکل $Amp=0/20, Mean=0/0$
- ۵۱ شکل (۸-۳) تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها
- ۵۱ شکل (۹-۳) تغییرات شماتیک شیب حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش

- شکل (۳-۱۰) تغییرات شیب حلقه‌ی هیستریزیس ۵۲
- شکل (۳-۱۱) دوربین دینو لایت برای استفاده از عکس برداری در پردازش تصاویر ۵۴
- شکل (۳-۱۲) نحوه‌ی قرار گرفتن دوربین برای عکس برداری از نمونه‌ها ۵۴
- شکل (۳-۱۳) (الف) - سطح نمونه قبل از اسپری تمیز کننده، (ب) - سطح نمونه بعد از استفاده از اسپری تمیز کننده ۵۵
- شکل (۳-۱۴) ایجاد و رشد ریزترک‌ها در قطعه-عکس برداری با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر انجام شده است، (الف) - در سیکل‌های ابتدایی، (ب) - در سیکل‌های انتهایی ۵۶
- شکل (۳-۱۵): منحنی به دست از پردازش تصویر بر حسب عمر ۵۷
- شکل (۳-۱۶) شماتیک نحوه‌ی شکل‌گیری و رشد ترک، (الف) - لغزش صفحه‌های کریستالوگرافیک، (ب) - پیدایش ترک [۵۵] ۵۹
- شکل (۳-۱۷) تغییر شکل لبه‌های نوک ترک هنگام بارگذاری سیکلی، (الف) - بعد از فشار، (ب) - بعد از کشش، ۵۹
- شکل (۳-۱۸) مراحل ایجاد و رشد ترک در نمونه‌ی تحت بارگذاری خستگی ۶۰
- شکل (۳-۱۹) حفره‌های موجود در نمونه و مسیر رشد ترک [۵۵] ۶۱
- شکل (۳-۲۰) وجود حفره‌های کنترل کننده مسیر رشد ترک در نمونه‌های فولاد SS304 ۶۲
- شکل (۳-۲۱) سطح شکست نمونه‌های گروه T5 ۶۲
- شکل (۴-۱) نحوه‌ی بدست آوردن ضرایب معادله‌های SWT و کوفین-مانسون ۷۳
- شکل (۴-۲) محدوده الاستیک و پلاستیک در معادله‌های SWT و کوفین-مانسون ۷۳
- شکل (۴-۳) قطعه‌ی مش زده شده در نرم‌افزار کمسول ۷۴
- شکل (۴-۴) موقعیت اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در قطعه مدل شده در نرم‌افزار کمسول .. ۷۵
- شکل (۴-۵) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T1 ۷۶
- شکل (۴-۶) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T2 ۷۷

شکل (۷-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T3 ۷۷

شکل (۸-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه‌های T1, T2, T3 ۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی فولاد SS304 ۱۷
- جدول (۲-۲) مدول یانگ بارگذاری و باربرداری آزمایش‌های انجام شده ۲۰
- جدول (۳-۲) استحکام تسلیم برای فولاد SS304 به ازای مقادیر مختلف افست ۲۲
- جدول (۴-۲) ضرایب معادله‌ی (۴-۲) حاصل از برازش اطلاعات آزمایشگاهی ۲۳
- جدول (۵-۲) ضرایب معادله‌ی پیشنهادی برای بارگذاری غیرخطی فولاد SS304 ۲۳
- جدول (۶-۲) ضرایب معادلات (۷-۲) تا (۹-۲) برای فاز باربرداری فولاد SS304 ۲۵
- جدول (۷-۲) پارامترهای معادله‌ی (۱۰-۲) برای فولاد SS304 ۲۷
- جدول (۸-۲) استحکام تسلیم فشاری در افست‌های مختلف برای فولاد SS304 ۲۷
- جدول (۹-۲) ضرایب معادله‌ی (۱۴-۲) ۳۲
- جدول (۱-۳) روابط متداول استفاده برای خستگی به شکل $Y = A(X)\alpha + B(X)\beta$ [۵۲] ۴۰
- جدول (۲-۳) آزمایش‌های خستگی انجام شده بر روی نمونه‌های فولاد SS304 به صورت جابجایی کنترل ۴۴
- جدول (۳-۳) ضرایب معادله‌های (۵-۳) و (۶-۳) برای ۳ حالت اول انرژی در نظر گرفته شده ... ۴۶
- جدول (۴-۳) ثابت‌های روابط (۵-۳) و (۶-۳) و رگرسیون حداقل مربعات برای حالت چهارم انتخاب انرژی ۴۷
- جدول (۵-۳) ثابت‌های روابط (۵-۳) و (۶-۳) و رگرسیون حداقل مربعات برای حالت پنجم انتخاب انرژی ۵۰
- جدول (۶-۳) آزمایش‌های تجربی انجام گرفته برای استفاده از تخمین عمر با استفاده از پردازش تصویر ۵۷
- جدول (۱-۴) آزمایش‌های گروه T1, T2, T3-نتایج عددی و تجربی ۷۵

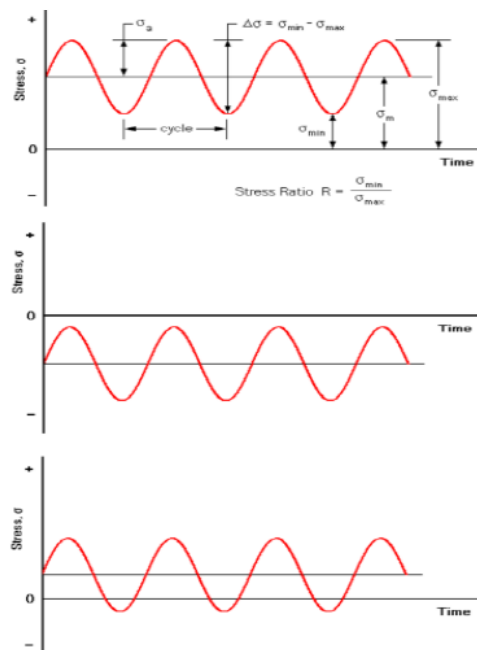
جدول ۲-۴ پارامترهای به کار رفته در نرم افزار کمسول ۷۶

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- بارگذاری سیکلی^۱

بارگذاری سیکلی، بارگذاری است که به صورت تناوبی و با شکل موج‌های مختلفی از قبیل سینوسی، مربعی، مثلثی و ... می‌تواند به یک قطعه و یا سازه‌ی مکانیکی وارد شود. همچنین این بارگذاری می‌تواند دارای مقدار میانگین نیز باشد. این مقدار میانگین می‌تواند بارگذاری را به صورت کاملاً کششی، کاملاً فشاری و یا فشاری-کششی تبدیل کند. مقدار میانگین برابر نصف مجموع حداکثر تنش و حداقل تنش در یک سیکل؛ دامنه تنش، برابر نصف تفاضل حداکثر تنش و حداقل تنش در یک سیکل می‌باشد که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. بارگذاری سیکلی می‌تواند به دو صورت تنش-کنترل^۲ و کرنش-کنترل^۳ انجام شود. مقدار حداکثر تنش در هر سیکل می‌تواند از مقدار تنش تسلیم ماده بیشتر و یا کمتر باشد که عامل تعیین‌کننده‌ی انواع خستگی است. بارگذاری سیکلی در نهایت می‌تواند باعث زوال ماده و ایجاد پدیده‌ی شکست در سازه‌ها شود.



شکل (۱-۱) خصوصیات بارگذاری سیکلی

^۱ Cyclic Loading

^۲ Stress-control

^۳ Strain-control

۱-۲- خستگی^۱

تقریباً از حدود ۱۷۰ سال قبل معلوم شده است که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیکی رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. که این نام‌گذاری احتمالاً به این دلیل است که به طور کلی شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. هیچ‌گونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. با پیشرفت صنعت و افزایش وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تناوبی و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی می‌باشد.

۱-۳- تاریخچه‌ی خستگی

آنچه که ما امروزه تحت عنوان علم خستگی می‌شناسیم و از نتایج آن بهره می‌بریم، تاریخچه‌ای نسبتاً طولانی دارد، تاریخی که به حدود ۱۷۰ سال قبل باز می‌گردد. در این قسمت به معرفی مختصری از تاریخچه و کارهای انجام شده در زمینه‌ی خستگی می‌پردازیم. تاریخ خستگی را می‌توان به دو دوره‌ی کلی تبدیل کرد: ۱- دوره‌ی قبل از وهلر^۲، ۲- دوره‌ی بعد از وهلر

۱- ۱۸۳۷-۱۸۵۸: دوره قبل از وهلر

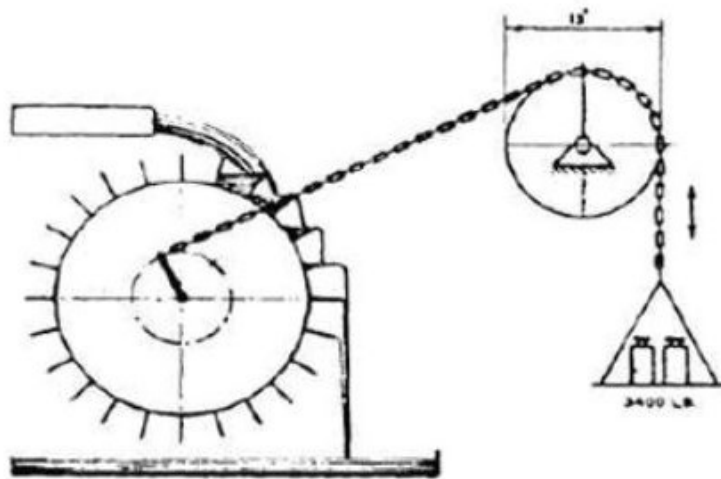
تاریخچه‌ی خستگی با آلبرت^۳ شروع می‌شود [۱]. او که یک مهندس عمران در معدن بود، در سال ۱۸۳۷ اولین نتایج آزمایش خستگی را منتشر کرد. بدین منظور دستگاه آزمایشی اختراع کرد (شکل

^۱ Fatigue

^۲ Wohler

^۳ Albert

(۲-۱) تا بتواند زنجیرهای حمل‌کننده در معدن کلاویوستال^۱ را آزمایش کند. لذا آزمایش‌های او بر روی اجزای واقعی بود نه فقط مواد. آزمایش‌های او منجر به اختراع طناب سیمی شد که جایگزینی مناسب برای زنجیرهای مورد استفاده در معادن شد.



شکل (۲-۱) دستگاه اختراع‌شده توسط آلبرت

در سال ۱۸۴۲ رنکین^۲ [۲] که بیشتر در علم ترمودینامیک با نام "روش رنکین"^۳ شناخته شده است، درباره‌ی مقاومت خستگی ریل‌های راه‌آهن تحقیق کرد.

بر اساس منابع معتبر چاپ شده اصطلاح خستگی برای اولین بار در سال ۱۸۵۴ توسط مردی انگلیسی به نام برایت ویت^۴ [۳] به کار برده شده است. در این مقاله [۳] او شکست‌های زیادی در ریل‌های راه‌آهن، پمپ آب، میل‌لنگ، شفت پروانه و ... را گزارش می‌دهد. همچنین تنش مجاز برای بارگذاری خستگی نیز توسط او در این مقاله ثبت شده است.

در این دوره شکست‌های زیادی در ریل‌های راه‌آهن اتفاق افتاد، برای مثال در ۵ اکتبر ۱۸۴۲ به

^۱ Clausthal

^۲ Rankin

^۳ Rankine process

^۴ Braithwaite

دلیل شکست محور لکوموتیو در ورسای منجر به مرگ ۶۰ نفر گردید [۴]. همچنین اتفاقات دیگری در [۵] گزارش شده که همگی ناشی از شکست خستگی در محورها، ریل‌ها و ... می‌باشد.

۲- ۱۸۵۰-۱۸۷۰ وهلر

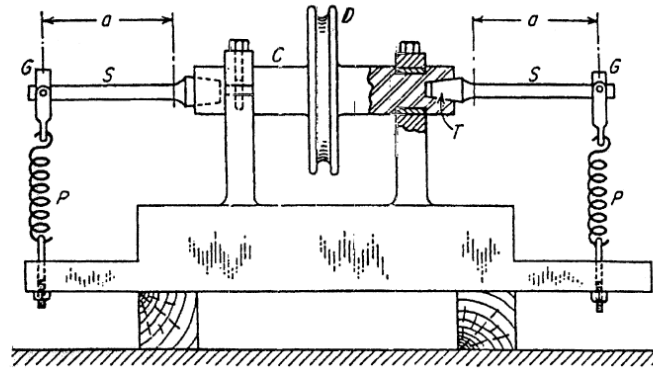
وهلر، رئیس راه‌آهن سلطنتی در فرانکفورت بارهای جانبی^۱ محورهای راه‌آهن را با انحراف سنج^۲ در اوایل ۱۸۵۸ [۶] و ۱۸۶۰ [۷] اندازه‌گیری کرد. او برای ادامه‌ی آزمایش‌های خود دستگاه آزمایش خستگی خمش را اختراع کرد. کارها و نتایجی که او به دست آورد در زمان خود بسیار جدید و کلیدی بود. به طور خلاصه می‌توان کارهای انجام شده توسط وهلر شامل سنجش بارهای جانبی، محاسبه‌ی تنش‌های جانبی متناظر، طراحی برای عمر محدود، مشاهده‌ی انتشار ترک و پیشنهادهای کمی برای کاهش تأثیر دندان، را کاملاً تحسین کرد.

در سال ۱۸۶۷ مجله‌ی تخصصی انگلیسی بنام "Engineering" در مورد نتایج به دست آمده توسط وهلر در نمایشگاه بازرگانی جهان در پاریس نوشت: "مدت‌ها پس از فراموشی بسیاری از افرادی که مدال‌های بُرد خود را در این نمایشگاه نشان می‌دهند، کار بنیادی وهلر در اذهان خواهد ماند" [۸]. گاق^۳ در ۱۹۲۴ در کتاب خود از وهلر با احترام به عنوان اولین نفر در مورد خستگی به شیوه‌ی ذیل یاد می‌کند: "کار وهلر در زمان به عنوان یک اثر تاریخی به خاطر هوش وی به عنوان یک مهندس و دانشمند زنده خواهد بود" [۹].

^۱ Service load

^۲ Deflection gages

^۳ Gough



شکل (۳-۱) دستگاه آزمایش خستگی خمش وهلر

۳- ۱۸۷۰-۱۹۰۵

باوشینگر، پروفیسور مکانیک در دانشگاه پلی تکنیک مونیخ نام دیگری است که باید ذکر شود. نظریه‌ی او تحت عنوان اثر باوشینگر [۱۰، ۱۱] یعنی «تغییر حد الاستیکی، اغلب به واسطه‌ی تکرار چرخه‌های تنش» بنیاد فرضیات مانسون و کوفین است که از دهه‌ی ۱۹۵۰ نشأت گرفت و امروزه همچنان در زمینه‌ی خستگی کم‌چرخه برای تخمین عمر خستگی استفاده می‌شود.

کیرچ^۱ [۱۲] در ۱۸۹۸ اولین کسی بود که ضریب تمرکز تنش ۳ را برای یک سوراخ دایروی در یک صفحه‌ی نامحدود محاسبه کرد. اوینگ^۲ و هومفری^۳ [۱۳] در ۱۹۰۳ صفحات لغزش را روی سطح نمونه‌های خمش-پیچش مشاهده کردند. نتایج آن‌ها اولین توصیف متالوژی از فرایند خستگی بود. پس از آن زمان، بی‌شمار مقالات متالوژی در مورد خستگی منتشر شده است. از جمله می‌توان به تئوری مهم جابجاشدگی پولانی^۴ [۱۴] در سال ۱۹۳۴ پرداخت که اوروان^۵ [۱۵] در ۱۹۳۹ برای خستگی اعمال کرد، کار او بنیاد بسیاری از مقالات متالوژی در مورد رفتار خستگی فلزات شکل داد.

^۱ kirsch

^۲ Ewing

^۳ Humfrey

^۴ Polanyi

^۵ Orowan

اوروان [۱۵] فرایند کرنش سختی^۱ سیکلی را مطرح کرد، که پس از کاهش چکش خواری به ترک منتج می‌شود. بنابراین مدل وی یک فرایند گسسته بود. اما در حال حاضر مشاهده‌ی ترک‌ها در میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که خستگی یک فرایند پیوسته است.

۴ - ۱۹۰۵-۱۹۲۵

سال‌های بین ۱۹۰۵ و ۱۹۲۵ قلمرو آمریکایی‌ها و انگلیسی‌ها بودند. اولین آزمایش خستگی در مقیاس وسیع بر روی اجزای سازنده‌ی هواپیما در تأسیسات هوایی سلطنتی در انگلستان انجام شد [۱۶]. «تأثیر دندان» توسط هین آلمانی [۱۷] در سال ۱۹۱۴ ابداع شد اما پیش از آن به طور ضمنی توسط رنکین در سال ۱۸۴۲، وهلر در ۱۸۶۰ بحث شد. اولین آزمایش‌ها برای بهبود مقاومت خستگی اجزا در انگلستان در خلال جنگ جهانی اول انجام شدند [۱۸].

۵ - ۱۹۲۰-۱۹۴۵

در این دوره‌ی زمانی تقریباً کل دانش خستگی که ما امروزه از آن لذت می‌بریم، بنیان‌گذاری شد. موضوعات ذیل در این بازه‌ی خلق یا بررسی شدند:

- مبنای مکانیک شکست در ۱۹۲۰ توسط گریفیث^۲ [۱۹].
- مقاومت خستگی تحت دامنه‌های متغیر توسط گسنر^۳ [۲۰].
- اندازه‌گیری تنش‌ها و بارهای خستگی روی بسیاری از اجزا توسط لهر^۴ [۲۱].
- اندازه‌گیری طیف‌های مختلف بارگذاری روی فنرهای اتومبیل توسط باستون^۵ و بردلی^۶ [۲۲].

^۱ Strain hardening

^۲ Griffith

^۳ Gassner

^۴ Lehr

^۵ Baston

^۶ Bradley

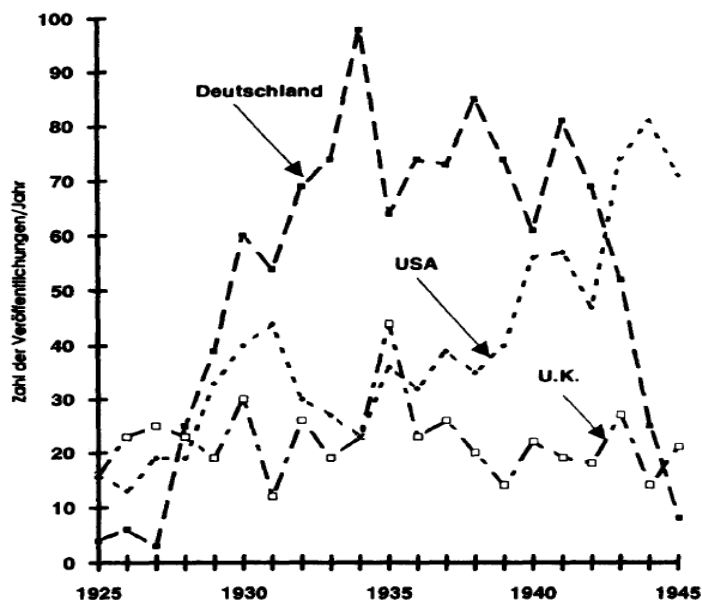
- روش‌های مکانیکی برای بهبود مقاومت خستگی با استفاده از القای تنش‌های باقیمانده‌ی مانند: کارسختی، ساچمه زنی و ... تام^۱ و همکاران [۲۳].
 - اولین کتاب در مورد خستگی در سال ۱۹۲۴ توسط گاق [۹] در انگلستان، ۱۹۲۹ توسط گرفت^۲ [۲۴] در اشتوتگارت.
 - فرضیه انباشت آسیب ناشی از خستگی برای تخمین عمر تحت دامنه‌های متغیر در ۱۹۴۵ توسط ماینر^۳ آمریکایی [۲۵].
 - اولین آزمایش‌های انتشار ترک^۴ در ۱۹۳۶ توسط دی فرست [۲۶] آمریکایی.
- این دوره‌ی زمانی تحت قلمرو آلمان‌ها بود. اثبات این ادعا را می‌توان در شکل (۱-۴) با نشان دادن تعداد مقالات در حوزه‌ی خستگی بین ۱۹۲۵ و ۱۹۴۵ مشاهده کرد که در بین کشورهای مثل آمریکا، انگلستان و آلمان تقسیم شده است. دیگر کشورها حداقل به لحاظ عددی نقشی ایفا نمی‌کنند. تعداد مقالات به ازای هر سال قطعاً اثبات اهمیت کار صورت گرفته در هر یک از کشورها نیست، ولی با نگاه بیشتر به جزئیات مقالات درمی‌یابیم که مقالات مهم در حوزه‌ی روش طراحی و کاربرد برای مسائل صنعتی، تقریباً منحصر به آلمان بودند.

^۱ Thum

^۲ Graft

^۳ Miner

^۴ Crack-Propagation



شکل (۴-۱) مقایسه مقالات چاپ شده بین سال‌های ۱۹۲۵-۱۹۴۵ در کشورهای انگلستان، آمریکا و آلمان [۲۷]

های^۱ [۲۸] انگلیسی که برای تحقیق خستگی معروف شد، در سال ۱۹۱۷ به خستگی ناشی از خوردگی اشاره کرد.

ضریب شدت تنش خستگی K_f توسط تام خلق شد [۲۷]. اهمیت کار تام آن است که هرگز آزمایش‌های فاقد عمومیت (تک کاره) را انجام نداد. او دانش پراکنده شده در همه‌ی منابع را جمع آوری کرد، شکاف‌ها را در این دانش بست، و به فرم مفیدی برای طراح و مهندس معمولی تبدیل کرد. بنابراین تام از اهمیت بسیاری برای دانش مهندسی موجود در آن زمان برخوردار بود. ۵۲۴ مقاله از تام و همکارانش از ۱۹۲۲ تا ۱۹۵۶ گواه زحماتش هستند. بخش کوچکی از موضوعاتی که وی بررسی کرده است در ذیل آمده است:

- ضرایب تمرکز تنش
- روش‌های سریع تعیین حد خستگی

^۱ Haigh

- تأثیر تکرار آزمایش روی حد خستگی تحت فرسایش
- قوانین شکست خستگی
- حد خستگی در دمای پایین
- تنش‌های استاتیک باقیمانده و تأثیرشان روی مقاومت خستگی
- تنش‌های خستگی مجاز

نوبر^۱ در ۱۹۷۳ اولین کتاب جامع در مورد محاسبه‌ی تئوری ضرایب تمرکز تنش و حتی ضرایب شدت تنش خستگی را منتشر کرد [۲۹].

۶- ۱۹۴۵-۱۹۶۰

این دوره زمان برداشت سال‌های ۱۹۲۰-۱۹۴۵ بود. در همه‌ی کشورهای صنعتی، خستگی بررسی شد. تعداد مقاله‌ها در حد چشمگیری زیاد شد. بیشترین تمرکز این دوره بر روی ایمنی خودروها، هواپیما و دیگر وسایل نقلیه بود.

در شروع سال ۱۹۵۵ بحث در مورد «عمر ایمن» و «ایمنی شکست» آغاز شد. عمر ایمن بدان معنی است که عمر جزء سازنده‌ی یک وسیله، تا رسیدن به انتهای عمر باید قبلاً تعیین شده باشد؛ ایمنی شکست بدان معنی است که شکست جزء سازنده‌ی اولیه به واسطه‌ی خستگی نباید ایمنی یک وسیله را به خطر اندازد.

ماشین‌های آزمایش خستگی سروویدرولیک در ابتدا برای برنامه‌ی عظیم تحقیقاتی USAF^۲ در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ توسعه یافت، که امکان آزمایش مواد در فرکانس‌های بالا را میسر می‌کرد. از این زمان به بعد بود که امکان چک کردن قوانین ماینر محتمل شد.

بر اساس نظریات باوشینگر، مانسون [۳۰] و کوفین [۳۱، ۳۲] در ۱۹۵۴ رفتار مواد فلزی را تحت

^۱ Neuber

^۲ United States Air Force

بارگذاری سیکلی کرنش کنترل با ۴ پارامتر ارائه دادند. در واقع رابطه‌ی ارائه‌شده توسط آن‌ها برای اولین بار خستگی را توسط روابطی دقیق تعریف و توصیف کرد به طوری که حتی امروزه از روابط آن‌ها در خستگی استفاده می‌شود. آن‌ها سپس زمینه‌ی جدیدی را در علم خستگی به وجود آوردند تحت عنوان "خستگی کم‌چرخه"^۱.

بسیاری از انجمن‌های مهندسی و علمی، همایش‌های خستگی را در سال‌های ۱۹۴۵-۱۹۶۰ سازمان‌دهی کردند. قوانین استاندارد ASTM^۲ در مورد طرح ریزی و اجرای آزمایش‌های خستگی، استفاده از آمار، دستگاه‌های بزرگ آزمایش خستگی و ... در این دوره به وجود آمدند [۳۳].

۱-۳-۱- تاریخچه‌ی عمر خستگی بر اساس معیار انرژی

پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس معیار انرژی برای اولین بار توسط هالفورد در ۱۹۶۶ بر اساس روابط کوفین-مانسون مطرح شد.

هالفورد^۳ [۳۴] یک شیوه‌ی تحلیلی را برای خستگی چرخه‌ی فلزات بر اساس مفهوم انرژی پلاستیکی ارائه کرد. الین^۴ و کوجاوسکی^۵ [۳۵] معیارهای انرژی را برای پیش‌بینی طول عمر خستگی فلزات مطرح کردند و به کار بردند. گولوس^۶ و الین [۳۶] تئوری یکپارچه شده‌ای را مبتنی بر نظریه کل چگالی انرژی کرنشی برای آسیب خستگی انباشته شده ارائه کردند و نشان دادند که شکست خستگی کم‌چرخه^۷ و پرچرخه^۸ می‌تواند بر حسب مجموع انرژی پلاستیکی و کششی (یعنی چگالی انرژی کرنشی کل به ازای هر چرخه) بیان شود.

^۱ Low Cycle Fatigue

^۲ American Society for Testing and Material

^۳ Halford

^۴ Ellyin

^۵ Kujawski

^۶ Golos

^۷ Low-cycle

^۸ Hight-cycle

جاهد^۱ و وروانی-فراهانی^۲ [۳۷] مدل‌های کران فوقانی و تحتانی طول عمر خستگی را با استفاده از ویژگی‌های خستگی مبتنی بر انرژی توسعه دادند. مدل‌های توسعه یافته توسط آن‌ها برای ارزیابی و پیش‌بینی طول عمر خستگی انواع مواد فلزی استفاده شدند و نتایج به دست آمده، همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند. فراهانی و همکاران [۳۸] پارامتر آسیب خستگی مبتنی بر انرژی صفحه‌ای بحرانی را به کار بردند و طول عمرهای خستگی فولاد کم کربن و ۲ آلیاژ آلومینیومی را در معرض شرایط بارگذاری دامنه‌ی متغیر پیش‌بینی کردند. آن‌ها تأثیرات تاریخچه‌ی ماده، چرخه‌های کوچک و بارگذاری مرحله‌ای را در تحلیل آسیب خستگی گنجانده و با موفقیت طول عمرهای خستگی کم‌چرخه و پرچرخه را با عوامل منطقی مرتبط کردند. سوگیورا^۳ و همکاران [۳۹] مدلی را برای تخمین استحکام خستگی کم‌چرخه‌ی فلزات ساختاری تحت وضعیت بارگذاری چند محوری با استفاده از مفهوم کار پلاستیک و با ورود حداکثر تنش اصلی کششی به عنوان پارامتر ثانوی، برای تخمین پیشرفت شکست، مطرح کردند. لی^۴ و همکاران [۴۰] مدل پیش‌بینی طول عمر خستگی مبتنی بر انرژی را با استفاده از چگالی انرژی کرنشی پلاستیکی برای انواع مواد توسعه دادند. این مدل به خوبی رفتار خستگی این فلزات را پیش‌بینی کرد. لای^۵ و همکاران [۴۱] رویکرد مبتنی بر انرژی کرنشی را برای مکانیزم آسیب خستگی کم‌چرخه در فولاد فنی بسیار مستحکم ارائه کردند. بعلاوه، محققین مختلف، مدل‌های مبتنی بر انرژی را برای پیش‌بینی طول عمر خستگی و ارزیابی پارامترهای آسیب خستگی برای فولاد و دیگر مواد به کار گرفتند [۴۲-۴۵].

^۱ Jahed

^۲ Varvani Farahani

^۳ Sugiura

^۴ Lee

^۵ Li

فصل ۲

مدل سازی رفتار الاستیک-پلاستیک

۲-۱- مدل سازی رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد SS304 در آزمایش کشش-

فشار

به منظور شناخت بیشتر رفتار الاستیک-پلاستیک SS3 و بررسی خواص مکانیکی این فولاد در این قسمت، رفتار آن در آزمایش کشش-فشار تک محوره به صورت کامل مدل می‌گردد. توصیف مدل ریاضی دقیق رفتار الاستیک-پلاستیک مواد پر کاربرد به دلیل رفتار غیرخطی به خصوص در حالت باربرداری و نیز وجود اثر باوشینگر همواره کاری پیچیده بوده است. به ویژه در تحلیل فرایندهایی مثل اتوفرتاژ، وجود یک مدل دقیق برای ماده، مهم‌ترین نقش را در دقت این تحلیل ایفا می‌کند.

اگر چه این مواد رفتار تقریباً الاستیک و کاملاً پلاستیکی در فاز بارگذاری آزمایش تک محوری کشش-فشار از خود نشان می‌دهند، ولی در بخش باربرداری، بالاخص به دلیل اثر باوشینگر [۱۰، ۱۱] و سخت شوندگی غیرخطی قوی [۶۰، ۶۱]، نشان از رفتار پیچیده دارد. در این خصوص برخی مؤلفین مثل مگاهد^۱ و عباس^۲ [۶۲] در سال ۱۹۹۱ سعی در توصیف رفتار لوله‌های جدار نازک در بارگذاری باربرداری داشتند، همچنین ترویانو^۳ و همکاران [۴۸] سعی کردند با در نظر گرفتن اثر باوشینگر رفتار فولادهای زرهی، را توصیف کنند. پارکر^۴ و همکاران [۴۷] با در نظر گرفتن اثر باوشینگر و کرنش سختی

¹ Megahed

² Abbas

³ Troiano

⁴ Parker

روابط ریاضی را که شامل این دو مهم باشد، برای فولادهای A723, HY 8Mo معرفی کردند. هانگ^۱ [۶۳] سعی کرد یک سری مدل‌های ریاضی برای توصیف دقیق برخی فولادها بدست آورد. از سوی دیگر، برخی محققین مثل جاهد^۲ و همکاران [۶۴، ۶۵] و پری^۳ و همکاران [۴۶] فرایند اتوفرتاژ را با استفاد از داده‌های آزمایشگاهی تحلیل کردند؛ ولی هیچ توصیف ریاضی از مدل‌های ماده ارائه نکردند. فراهانی و همکاران [۴۹] نیز یک مدل ریاضی برای دو فولاد تحقیقاتی ارائه دادند و سعی کردند مدل ریاضی بهبود یافته بر اساس کارهای پارکر برای فولادهای A723 و DINI 6959 بدست آورند. اکبری و فرهنگ‌دوست [۵۹] به بررسی اثر باوشینگر در لوله‌های آلیاژ آلومینیوم A7075 پرداختند و مدلی ریاضی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای این آلیاژ بدست آوردند.

۲-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک ۸۸۰۲ اینسترون^۴ انجام شده است. که توانایی اعمال بار دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتون را دارد (شکل (۱-۲)). همچنین برای نمونه‌های استاندارد استفاده شده در این تحقیق از فیکسچر^۵ (شکل (۳-۲)) استاندارد دستگاه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش‌ها از طول‌سنج^۶ (شکل (۲-۲)) که طول سنج‌های آن ۲۵ میلی‌متر است، استفاده شده است. همچنین تعداد نقاط نمونه برداری برای هر نمونه در هر سیکل برابر ۱۰۰ نقطه می‌باشد.

^۱ Hung

^۲ Jahed

^۳ Perry

^۴ Instron

^۵ Fixture

^۶ Extensometer



شکل (۱-۲) دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲



شکل (۲-۲) طول سنج استاندارد دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲

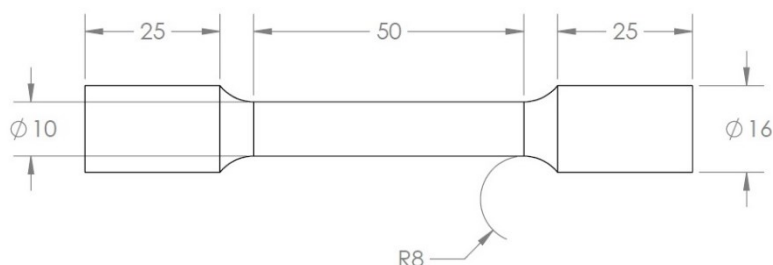


شکل (۳-۲) فیکسچر استاندارد دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲

نمونه‌ها بر اساس آزمایش کشش استاندارد ASTM-E8 با طول سنجه‌ی ۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر انجام شده است (شکل (۴-۲)). آزمایش‌ها با سرعت ۰/۰۵ mm/s و به صورت جابجایی-کنترل انجام شده است. جدول (۱-۲) خواص شیمیایی ماده مورد بحث را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی فولاد SS304

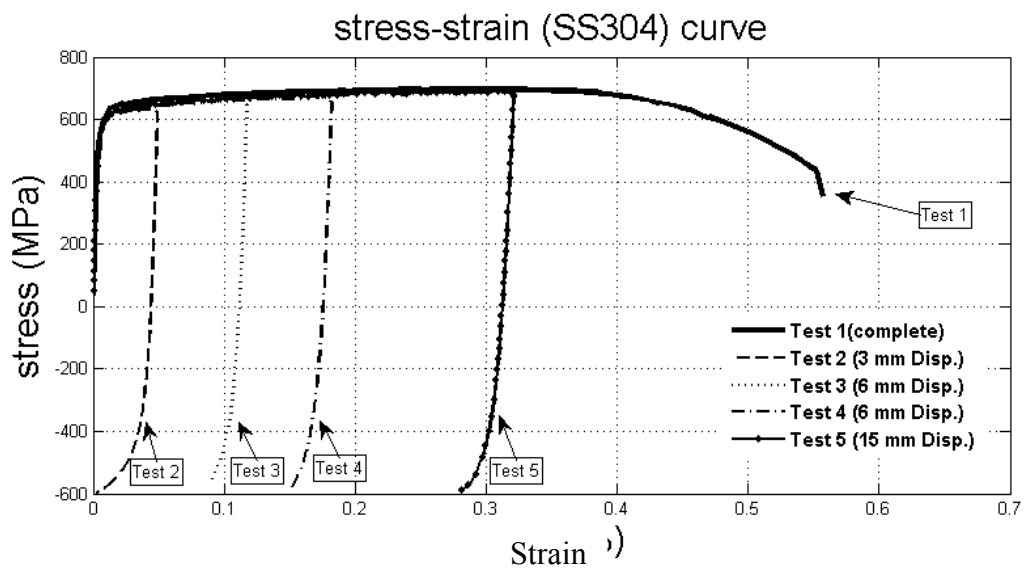
Grade	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
SS304	0.08	2.00	0.75	0.045	0.03	20.00	8.00-10.50	0.10



شکل (۴-۲) ابعاد هندسی نمونه مورد آزمایش کشش بر حسب میلی‌متر

شکل (۵-۲)، منحنی تنش-کرنش تک سیکلی حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته به ازای کرنش‌های مختلف را در یک نمودار نشان می‌دهد. تعداد ۵ نمونه‌ی یکسان همانند شکل (۴-۲) تهیه

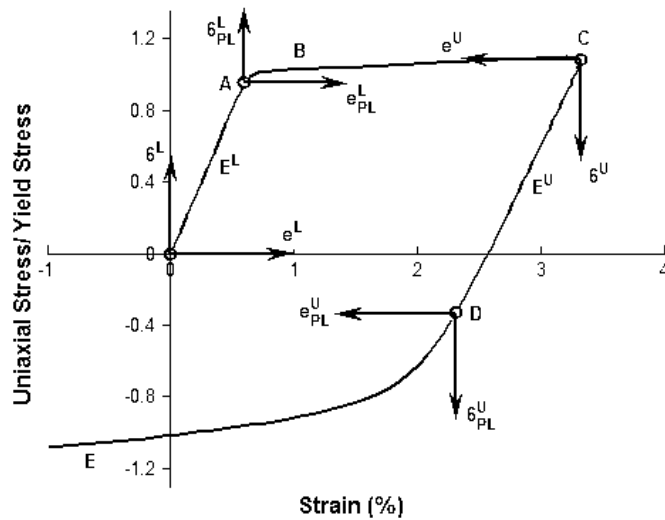
شد و سپس آزمایش‌های کشش-فشار تک سیکلی با مقدار جابجایی‌های مختلف بر روی آن‌ها انجام گردید. آزمایش شماره ۱، آزمایش کشش کامل است (نیم سیکل) که در آن نمونه تا گسیختگی کامل تحت کشش قرار گرفته است. هدف از انجام این آزمایش، فهمیدن محدوده کرنش شکست کامل ماده می‌باشد تا بتوان آزمایش‌ها را با توجه به کرنش گسیختگی کامل ماده به صورت مناسب انجام داد.



شکل (۵-۲) منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش‌های مختلف انجام شده به ازای جابجایی‌های متفاوت

۲-۳- مدل سازی رفتار ماده

شکل (۶-۲) بخش‌های مهم بارگذاری و باربرداری در آزمایش کشش-فشار تک محوره در مواد با مقدار کرنش کلی (کرنش الاستیک+کرنش پلاستیک) را نشان می‌دهد. بخش بارگذاری (کشش) شامل رفتار الاستیک خطی O-A و کرنش سختی A-B-C است. همچنین بخش باربرداری (فشاری)، شامل رفتار الاستیک خطی C-D و سخت‌شوندگی غیرخطی D-E می‌باشد.



شکل (۶-۲) رفتار تنش-کرنش تک محوره برای توصیف رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری با یک مقدار معین کرنش ایجاد شده [۵۹]

۲-۳-۱- مدل سازی فاز بارگذاری

۲-۳-۱-۱- بارگذاری خطی O-A

ماده از نقطه‌ی O تا نقطه‌ی تسلیم A رفتاری الاستیک دارد و از قانون هوک به صورت زیر تبعیت می‌کند:

$$\sigma^L = E^L \varepsilon^L \quad (۱-۲)$$

که E^L در این رابطه ضریب یانگ بارگذاری^۱ می‌باشد.

۲-۳-۱-۲- بررسی مدول یانگ در بارگذاری

در سال‌های اخیر بسیاری از محققان نشان داده‌اند که منحنی تنش-کرنش تک محوره در بارگذاری و باربرداری غیرخطی است و در نتیجه مدول یانگ یک مقدار ثابت نیست. پری و همکارانش [۴۶]

^۱ Loading

روش‌های مختلف تعیین مدول یانگ را مورد بررسی قرار داده و روش مدول یانگ میانگین را برای مدل‌سازی رفتار عملی ماده معرفی کردند.

آن‌ها در این روش به دلیل آنکه دو انتهای منحنی تنش- کرنش بارگذاری یا باربرداری حالت نسبتاً غیرخطی بالایی دارد، ۵٪ ابتدا و انتهای منحنی را از محاسبات حذف کرده و مدول مماسی را در امتداد بقیه‌ی منحنی محاسبه کردند. مدول یانگ مماسی (E_{tg}) برای هر نقطه طبق رابطه‌ی (۲-۲) تعیین می‌شود و مدول یانگ میانگین نیز حاصل جمع مدول یانگ مماسی در نقاط مختلف در امتداد کل منحنی بارگذاری-باربرداری می‌باشد، که از رابطه‌ی (۳-۲) به دست می‌آید.

$$(E_{tg})_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} \quad (2-2)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{tg})_i}{N} \quad (3-2)$$

جدول (۲-۲) مدول یانگ بارگذاری و باربرداری نمونه‌های آزمایش شده را به روشی که در بالا ذکر شد، نشان می‌دهد.

جدول (۲-۲) مدول یانگ بارگذاری و باربرداری آزمایش‌های انجام شده

آزمایش ۲	$E^L = 151.6 \text{ Gpa}$
آزمایش ۲	$E^U = 120.3 \text{ Gpa}$
آزمایش ۳	$E^L = 170.4 \text{ Gpa}$
آزمایش ۳	$E^U = 112.2 \text{ Gpa}$
آزمایش ۴	$E^L = 160.6 \text{ Gpa}$
آزمایش ۴	$E^U = 96.44 \text{ Gpa}$
آزمایش ۵	$E^L = 177.5 \text{ Gpa}$
آزمایش ۵	$E^U = 80.84 \text{ Gpa}$

۲-۳-۱-۳- بررسی استحکام تسلیم

برای مسائل الاستیسیته، تعریف نقطه دقیق (افست صفر) بسیار مهم است که این نقطه عموماً به صورت مقدار افست کرنش پلاستیک تعریف می‌شود. افست، میزان کرنش پلاستیک قابل قبولی است که پس از باربرداری به دست می‌آید. عموماً در کاربردهای مهندسی مقادیر افست کرنش پلاستیک ۰/۱٪ یا ۰/۲٪ استفاده می‌شود. پری و همکارانش روش‌های مختلف تعیین نقطه تسلیم با افست‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و روش جدیدی به نام مقدار افست دقیق صفر^۱ تعریف کردند [۴۶]. در این روش نقطه تسلیم با استفاده از نقطه تغییر ناگهانی^۲ در منحنی ضریب مماسی^۳ به دست می‌آید.

با توجه به آنکه ضریب مماسی منحنی بعضی از مواد به صورت ناگهانی تغییر نمی‌کند، بنابراین به روش مذکور نمی‌توان نقطه تسلیم را در آن‌ها پیدا کرد. از طرف دیگر تعداد نقاط نمونه‌برداری شده آزمایشگاهی در حوالی نقطه تسلیم تأثیر زیادی در تعیین نقطه تغییر ناگهانی دارد. پارکر و همکارانش پیشنهاد کردند که برای تعیین استحکام تسلیم از افست کوچک ۰/۰۱ درصد استفاده شود؛ مگر آنکه ماده دارای نقطه تسلیم تیز باشد، که در این صورت باید از افست دقیق صفر استفاده کرد [۴۷].

جدول (۲-۳) مقادیر استحکام تسلیم برای فولاد SS304 را به ازای افست‌های مختلف نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مقدار افست در تعیین استحکام تسلیم در فولاد SS304 اهمیت دارد. به ازای افست‌های مختلف مقادیر عددی استحکام تسلیم متفاوتی به دست می‌آید. دلیل این تفاوت در رفتار غیرخطی انتقالی A-B در فولاد SS304 می‌باشد.

^۱ Exact zero offset value

^۲ Knee-point

^۳ Tangent modulus

جدول (۳-۲) استحکام تسلیم برای فولاد SS304 به ازای مقادیر مختلف افست

Offset(%)	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱
Stress(MPa)	۵۴۵/۳	۴۸۸/۳	۴۲۵/۵	۳۷۹/۲	۳۶۸/۸
Strain(%)	۰/۰۰۵۲۵	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۰۳	۰/۰۰۲۴۶	۰/۰۰۲۲۵

۲-۳-۲- بارگذاری غیرخطی A-B-C

در این بخش رفتار ماده پلاستیک است و دارای رفتار سخت‌شوندگی غیرخطی می‌باشد. فولاد SS304 مانند بسیاری از فولادها در محدوده A-C رفتاری غیرخطی دارد؛ ولی محدوده B-C را می‌توان دارای رفتاری خطی با شیب بسیار کم همانند مراجع [۴۷-۴۹] تعریف نمود.

پارکر و همکاران برای توصیف رفتار پلاستیک در دستگاه مختصات $e_{PL}^L A \sigma_{PL}^L$ رابطه‌ای را به صورت

زیر ارائه دادند [۴۷]:

$$\frac{\sigma_{PL}^L}{\sigma_Y} = B_1 \tanh(B_2 e_{PL}^L) + B_3 e_{PL}^L \quad (۴-۲)$$

در این رابطه درصد کرنش پلاستیک است. عبارت اول رابطه‌ی (۴-۲) بخش خطی A-B و

عبارت دوم این رابطه رفتار کرنش سختی B-C را توضیح می‌دهد. همچنین B_3 ، B_2 و B_1 ضرایب معادله هستند که بستگی به رفتار ماده دارند.

برای فولاد SS304 با برازش بر اطلاعات آزمایشگاهی این ضرایب در جدول (۴-۲) نشان داده

شده‌اند.

جدول (۴-۲) ضرایب معادله‌ی (۴-۲) حاصل از برازش اطلاعات آزمایشگاهی

$f(x)$	$B_1 \tanh(B_2 x) + B_3 x$
R-square	۰/۹۰۸۲
B_1	۱/۲۱۲
B_2	۲۰۷/۷
B_3	۰/۲۶۹۵

همچنین رابطه‌ی پیشنهادی دیگری رابطه (۵-۲) نیز با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمد و همان طور که در جدول (۵-۲) مشاهده می‌شود، دارای ضریب حداقل مربعات^۱ بیشتری نسبت به رابطه‌ی پارکر و همکاران [۵۲] است و این به معنای دقیق‌تر بودن رابطه‌ی پیشنهادی می‌باشد. ضرایب معادله‌ی (۵-۲) در جدول (۵-۲) نشان داده شده‌است.

$$\frac{\sigma_{PL}^L}{\sigma_Y} = a \cdot \exp(bx) + c \cdot \exp(dx) \quad (۵-۲)$$

جدول (۵-۲) ضرایب معادله‌ی پیشنهادی برای بارگذاری غیرخطی فولاد SS304

$f(x)$	$a \cdot \exp(bx) + c \cdot \exp(dx)$
R-square	۰/۹۶۱۳
a	۱/۲۲۸
b	۰/۱۶۰۱
c	-۰/۲۳۳۹
d	-۷۶/۴۷

^۱ Coefficients of least squares

۲-۳-۳- مدلسازی فاز باربرداری C-D

۲-۳-۳-۱ رفتار الاستیک خطی C-D

ماده از نقطه تسلیم C تا نقطه تسلیم D رفتار الاستیک خطی دارد و از قانون هوک تبعیت می کند که رابطه‌ی آن در دستگاه مختصات جدید $e^U D \sigma^U$ در رابطه‌ی (۶-۲) نشان داده شده است.

$$\sigma^U = E^U \varepsilon^U \quad (۶-۲)$$

E^U در این رابطه ضریب یانگ باربرداری^۱ می باشد که تابع e_{PL}^{L*} است و با کاهش e_{PL}^{L*} افزایش می یابد. حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده قبل از باربرداری نمونه می باشد.

معادلات (۷-۲)، (۸-۲) بر اساس مرجع [۴۷] و معادله‌ی (۹-۲) بر اساس مرجع [۴۹] معرفی شده اند که رفتار فولاد SS304 را در این محدوده نشان می دهد. ضرایب هر معادله با توجه به اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده در جدول (۶-۲) نشان داده شده اند.

$$E^U/E^L = 1.0 - A1. e_{PL}^{L*} + A2. (e_{PL}^{L*})^2 \quad (۷-۲)$$

$$E^U/E^L = 1.0 - A1. \tanh(A2. e_{PL}^{L*}) \quad (۸-۲)$$

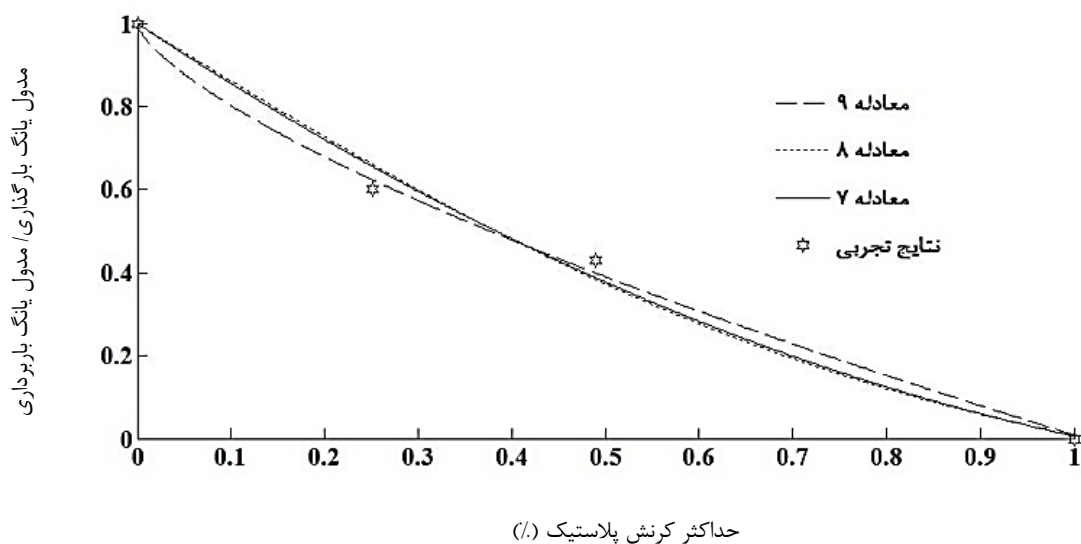
$$E^U/E^L = 1.0 - A1. \tanh(A2. (e_{PL}^{L*})^{A3}) \quad (۹-۲)$$

^۱ Unloading

جدول (۶-۲) ضرایب معادلات (۷-۲) تا (۹-۲) برای فاز باربرداری فولاد SS304

$E^U/E^L = 1.0 - A1 \cdot e_{pL}^* + A2 \cdot (e_{pL}^*)^2$		$E^U/E^L = 1.0 - A1 \cdot \tanh(A2 \cdot e_{pL}^*)$		$E^U/E^L = 1.0 - A1 \cdot \tanh(A2 \cdot (e_{pL}^*)^{43})$	
R-square	۰/۹۹۰۷	R-squar	۰/۹۸۸۸	R-square	۰/۹۹۷۱
A1	۱/۴۹۹	A1	۱/۲۲	A1	۱۲/۳۵
A2	۰/۵۰۵۶	A2	۱/۱۳۷	A2	۰/۰۸۰۳
				A3	۰/۷۰۰۹

شکل (۷-۲) نمودار روابط فوق برای فولاد SS304 را نشان می‌دهد. در این نمودار مقادیر محورهای X و Y نرمالیزه شده است. همان طور که از شکل پیداست با افزایش کرنش پلاستیک نسبت مدول یانگ باربرداری به مدول یانگ بارگذاری کاهش می‌یابد. محمدی و همکارانش [۵۰] به این نتیجه رسیدند که میزان مدول الاستیسیته در آلیاژ آلومینیوم A5083 در حالت کشش و در حالت باربرداری با یکدیگر برابر هستند؛ در صورتی که در بسیاری از فولادها میزان کاهش مدول الاستیسیته در هنگام باربرداری بیشتر از بارگذاری می‌باشد [۴۷].



شکل (۷-۲) انطباق پیشنهادی مدول یانگ باربرداری فولاد SS304

۲-۳-۴- بررسی اثر باوشینگر

در اغلب مواد، ایجاد تغییر شکل پلاستیک در یک جهت، روی رفتار پلاستیکی آن مواد در جهت عکس تأثیر می‌گذارد. اگر نمونه‌ای در جهت کشش تحت تأثیر قرار بگیرد، به طوری که در آن تغییر شکل پلاستیک ایجاد گردد، سپس در جهت فشار قرار گیرد، استحکام کششی در جهت فشار کمتر از استحکام تسلیم کششی اولیه ماده است. به طور کلی برای معکوس کردن جهت لغزش روی یک صفحه لغزش ویژه، تنش کمتری لازم است تا برای ادامه لغزش در جهت اولیه [۱۱]. جهت‌دار بودن کارسختی، اثر باوشینگر (BEF) نامیده می‌شود که پدیده‌ای کلی در فلزات چند بلوری است و به عنوان نسبت استحکام تسلیم فشاری به استحکام تسلیم کششی شناخته می‌شود.

روش‌های مختلف تعیین اثر باوشینگر توسط پری و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۴۶، ۵۱]. آن‌ها نسبت استحکام تسلیم فشاری به استحکام کششی اولیه با مقدار افست صفر را برای تعریف اثر باوشینگر بکار بردند. با توجه به این که رسیدن به افست صفر عملاً سخت و یا غیر ممکن است؛ بنابراین با تبعیت از روش پارکر و همکاران [۴۷] و بررسی‌های صورت گرفته در مرجع [۴۹] مقدار افست کوچک ۰/۰۱ درصد برای ضریب اثر باوشینگر در فولاد SS304 بکار رفته است.

معادله‌ی (۲-۱۰)، انطباق پیشنهادی^۱ برای تعیین ضریب اثر باوشینگر در فولاد SS304 می‌باشد که با برازش بر داده‌های تجربی به ازای افست‌های ۰/۰۱٪، ۰/۰۲٪، ۰/۰۵٪، ۰/۱٪ و ۰/۲٪ به دست آمده است. ضرایب a، b، و c در جدول (۲-۷) مرتب شده‌اند.

$$BEF = 1.0 + a \tanh(b(e_{PL}^*)^c) = \frac{\text{استحکام تسلیم فشاری}}{\text{استحکام تسلیم کششی}} \quad (۲-۱۰)$$

^۱ Proposed Fit

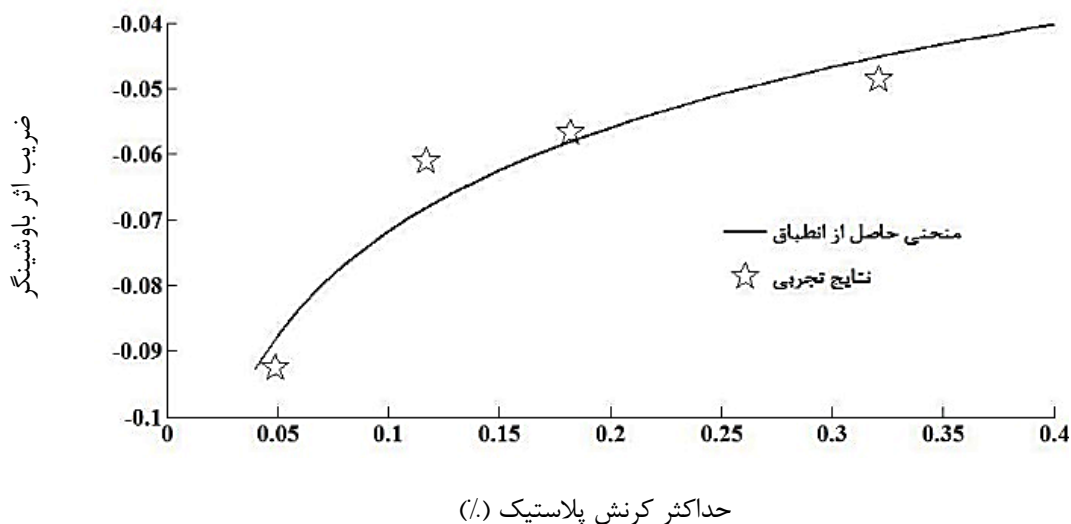
جدول (۷-۲) پارامترهای معادله‌ی (۱۰-۲) برای فولاد SS304

افست (%)	a	b	c	رگرسیون حداقل مربعات
۰/۲	-۱/۶۷۳	۱/۲۴۳	-۰/۰۴۳۶۵	۰/۹۴۸۱
۰/۱	-۱/۵۱۴	۱/۲۵۲	-۰/۰۵۲۸۳	۰/۹۲۳۴
۰/۰۵	-۱/۳۳۸	۱/۳۸	-۰/۰۶۸۷۳	۰/۹۱۷۳
۰/۰۲	-۱/۷۰۳	۰/۷۳۵۷	-۰/۰۳۳۷۴	۰/۹۴۹۵
۰/۰۱	-۱/۹۲	۰/۵۹۱۶	-۰/۰۲۷۴۷	۰/۹۲۵۲

جدول (۸-۲) استحکام تسلیم فشاری در افست‌های مختلف برای فولاد SS304

استحکام تسلیم فشاری					
Offset	0.2 %	0.1 %	0.05 %	0.02 %	0.01 %
3 mm	-268.2	-175.6	-106.8	-55.26	-34.18
6 mm	-252.1	-170	-101.5	-46.44	-22.56
9 mm	-250	-158.12	-91.52	-39.52	-20.95
15 mm	-243.6	-154.4	-89.4	-38.17	-17.98

شکل (۸-۲) تغییرات ضریب اثر باوشینگر را در افست ۰/۰۱ درصد نشان می‌دهد.



شکل (۸-۲) تغییرات ضریب اثر باوشینگر در مقابل تغییرات کرنش پلاستیک در افسست ۰/۰۱٪

همانطور که در

شکل (۸-۲) دیده می‌شود، با افزایش سطح کرنش پلاستیک، "مقدار" ضریب اثر باوشینگر کاهش می‌یابد.

۲-۳-۵- باربرداری غیرخطی D-E

مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی غیرخطی^۱ D-E، بسیار سخت و دشوار است. پارکر و همکاران [۴۷]، [۴۸] مدل مجانب دار ارائه شده توسط چابوشه^۲ را برای توصیف رفتار فولادها در این ناحیه به کار گرفته‌اند. آن‌ها مدل بهبود یافته‌ای را پیشنهاد دادند که اثر باوشینگر را دخالت می‌دهد و دارای دو مشخصه‌ی مهم است. اول آنکه توانایی آن را دارد که بر تمام سری‌های منحنی‌های این بخش که تابعی از کرنش پلاستیک ایجاد شده هستند، انطباق لازم را ایجاد نماید؛ دوم آنکه، برای مقادیر بزرگ کرنش فشاری، به شکلی مجانب گونه به سمت یک باند حرکت می‌نماید. با توجه به دو مشخصه مهم مدل پارکر و همکاران [۴۷]، باربرداری غیر خطی پیچیده مذکور می‌تواند توسط رابطه‌ی (۲-۱۱) مدل‌سازی شود.

$$\begin{aligned}\sigma_{PL}^U / \sigma_Y &= (1 + B_1 - BEF) \operatorname{Tanh}(\gamma e_{PL}^U) + BEF + B_3 e_{PL}^U \\ \gamma &= C_1 e_{PL}^{L* C_2} \\ B_1 &= 1.212 \\ B_3 &= 0.2695\end{aligned}\quad (۲-۱۱)$$

در این رابطه σ_{PL}^U و e_{PL}^U به ترتیب تنش و کرنش عمودی در دستگاه مختصات σ_{PL}^U E e_{PL}^U می‌باشند. همچنین B_1 و B_3 ضرایب موجود در معادله‌ی (۲-۴) می‌باشند که بیشتر به دست آمد. همچنین γ و BEF هر دو تابعی از e_{PL}^{L*} می‌باشند که BEF همان ضریب اثر باوشینگر است. معادله‌ی (۲-۱۱) توسط

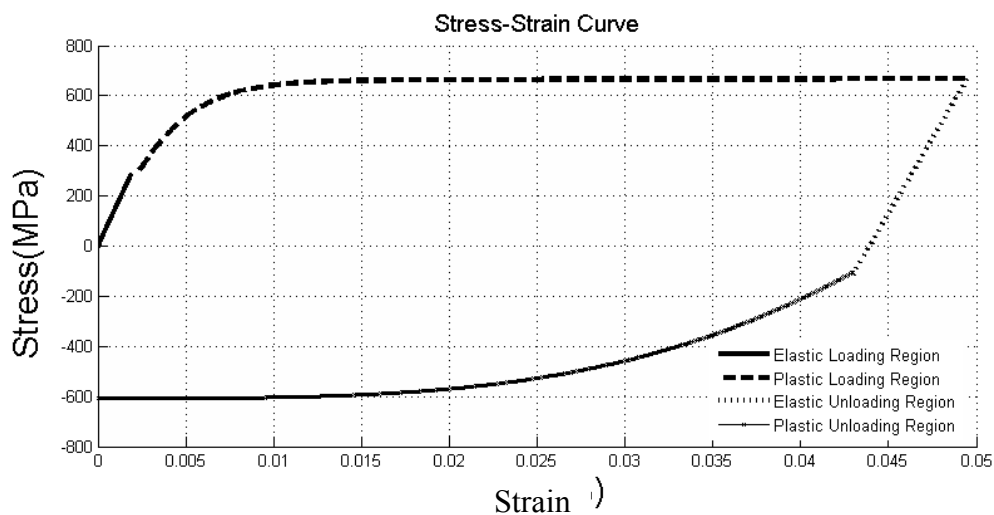
^۱ Nonlinear hardening behavior

^۲ Chaboche

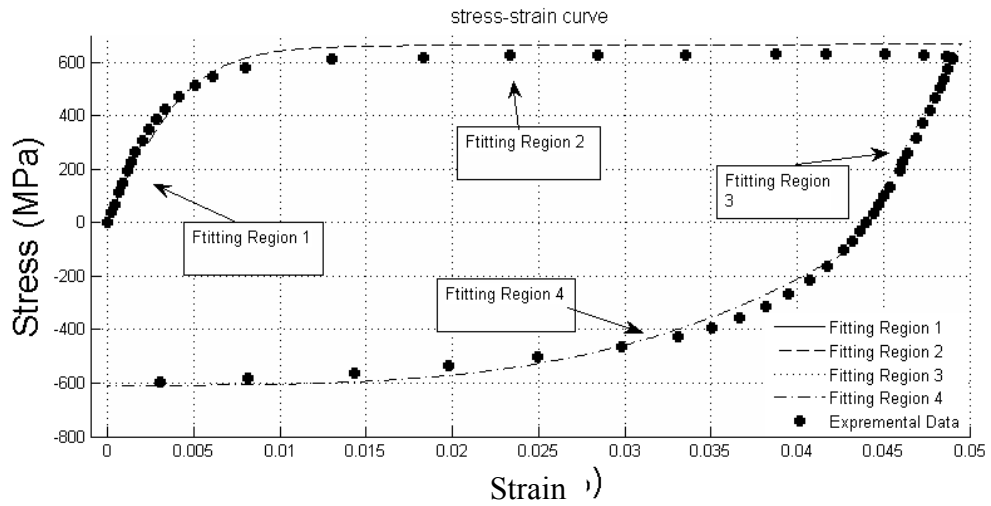
پارکر و همکاران [۴۷] به صورت گسترده برای مدل‌سازی چندین فولاد به کار رفته است. رابطه‌ی (۱۱-۲) با برازش بر داده‌های آزمایشگاهی برای فولاد SS304 در بخش D-E پیشنهاد می‌شود.

در شکل (۹-۲) به ترتیب بارگذاری الاستیک، بارگذاری پلاستیک، باربرداری الاستیک و باربرداری پلاستیک که حاصل معادله‌های به دست آمده در این تحقیق بود را برای آزمایش ۲ می‌توان مشاهده کرد که هر قسمت به صورت جداگانه توضیح داده شده و روابط آن بررسی شد. در شکل (۱۰-۲) می‌توان انطباق نمودارهای حاصل از معادله‌های پیشنهادی را با نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مشاهده نمود. همانطور که ملاحظه می‌شود تطبیق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

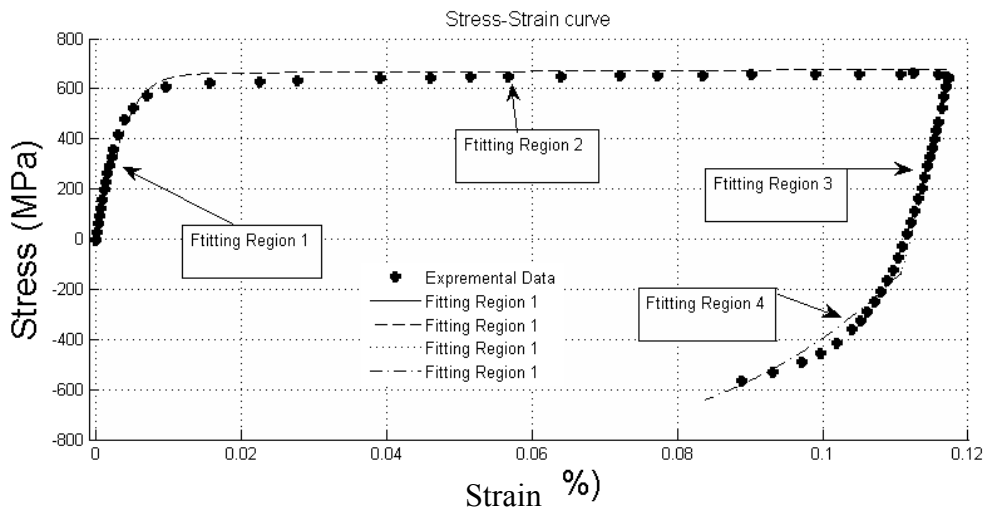
همچنین در ادامه انطباق منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



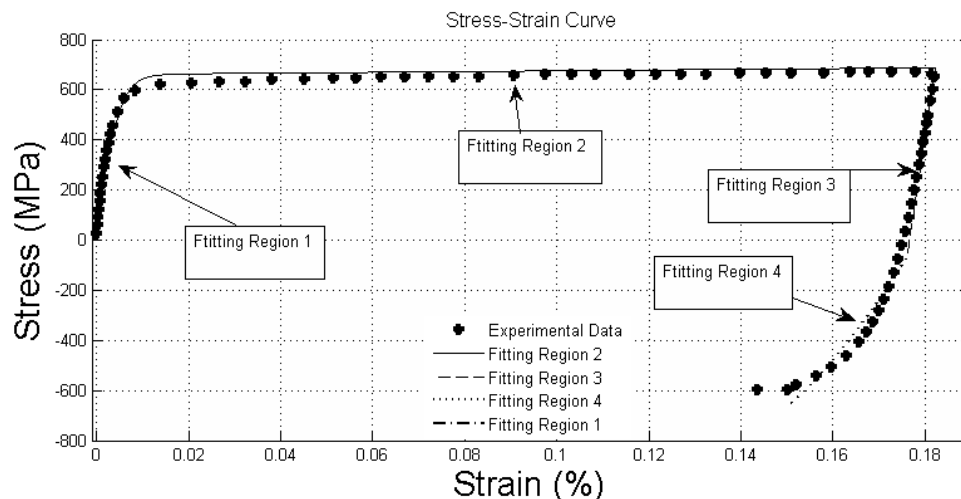
شکل (۹-۲) منحنی تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی برای داده‌های آزمایشگاهی نمونه‌ی دوم



شکل (۱۰-۲) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای آزمایش دوم



شکل (۱۱-۲) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای آزمایش سوم



شکل (۱۲-۲) انطباق منحنی تنش- کرنش حاصل از معادلات پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای آزمایش چهارم

در شکل (۲-۱۰)، شکل (۲-۱۱) و شکل (۲-۱۲) مراحل نخست، یعنی بارگذاری الاستیک، بارگذاری پلاستیک و باربرداری الاستیک تطبیق بسیار خوب و قابل قبولی دارد، اما هرچه کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد، انطباق قسمت چهارم یعنی باربرداری پلاستیک با خطای بیشتری همراه می‌شود، لذا تصمیم بر آن گرفته شد تا رابطه‌ی جدیدی برای این قسمت (باربرداری پلاستیک) و تکمیل کار در نظر گرفته شود.

با توجه به وابستگی این قسمت به کرنش پلاستیک، کرنش پلاستیک حداکثر و همچنین ضریب اثر باوشینگر پس از سعی بسیار رابطه‌ای در گرفته شد که برای اولین بار برای فولاد SS304 به کار می‌رود. رابطه‌ی جدید برای قسمت باربرداری پلاستیک:

$$y = \frac{A_1 + A_2x}{1 + A_3x + A_4x^2} \quad (12-2)$$

در معادله‌ی فوق x کرنش پلاستیک در منطقه باربرداری پلاستیک می‌باشد، و ضرایب A_4, A_3, A_2, A_1 تابعی از نسبت کرنش پلاستیک حداکثر به ضریب اثر باوشینگر می‌باشند، یعنی:

$$A_4, A_3, A_2, A_1 = f\left(\frac{e_{PL}^{L*}}{BEF}\right) = x_{BEF}^{L*} \quad (13-2)$$

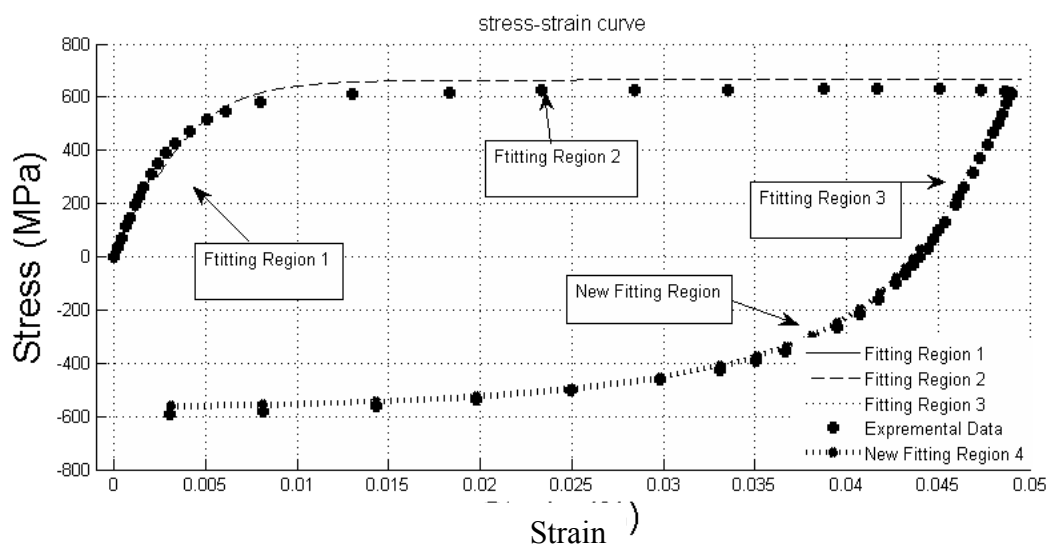
$$A_i = a_i * \exp(b_i * x_{BEF}^{L*}) + c_i * \exp(d_i * x_{BEF}^{L*}), i = 1,2,3,4 \quad (14-2)$$

ضرایب a,b,c,d در رابطه‌ی فوق در جدول (۹-۲) مرتب شده‌اند.

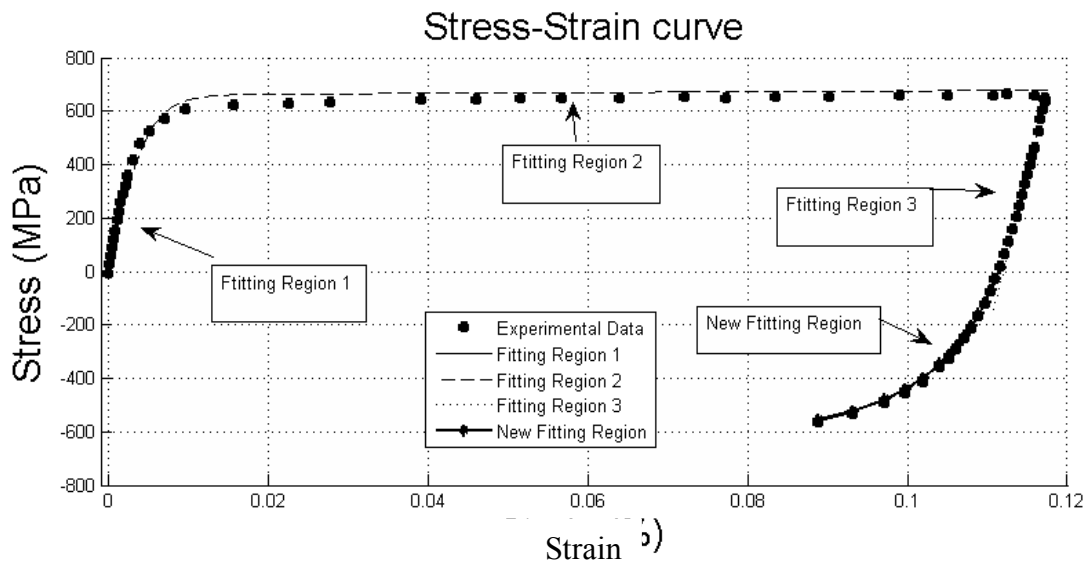
جدول (۹-۲) ضرایب معادله‌ی (۱۴-۲)

	a_i	b_i	c_i	d_i
A_1	-1.057	0.2657	$1.923e - 14$	-42.57
A_2	$6.75e5$	112	21.48	3.576
A_3	-5.346	-0.003224	-32.08	6.463
A_4	$8.402e - 15$	-47	87.64	4.527

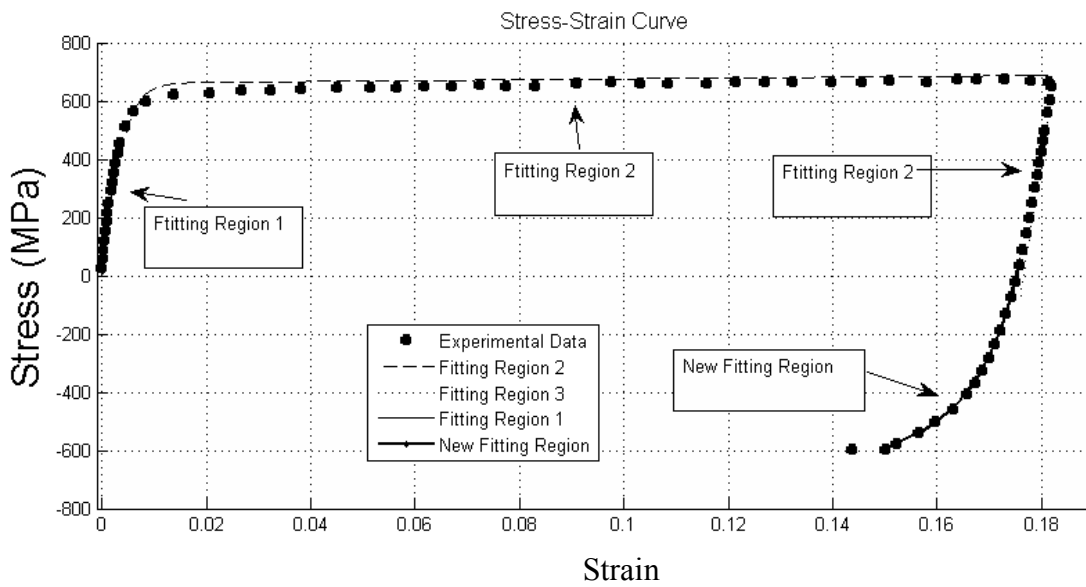
نمودارهای حاصل از روابط فوق برای آزمایش‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب در شکل (۱۳-۲)، شکل (۱۴-۲) و شکل (۱۵-۲) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، منحنی تنش-کرنش انطباقی حاصل از معادله‌های پیشنهادی جدید تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.



شکل (۲-۱۳) انطباق منحنی تنش-کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی پیشنهادی جدید برای آزمایش دوم



شکل (۲-۱۴) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی پیشنهادی جدید برای آزمایش سوم



شکل (۲-۱۵) انطباق منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و معادله‌ی پیشنهادی جدید برای آزمایش چهارم

همانطور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود، با افزایش کرنش پلاستیک، خطا افزایش نمی‌یابد،

و در تمامی آزمایش‌ها در قسمت باربرداری پلاستیک تطبیق خوبی بین نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و رابطه‌ی پیشنهادی جدید وجود دارد، در صورتی که اگر این قسمت با استفاده از روابط پارکر و همکاران [۴۷] تطبیق داده شود، با افزایش کرنش پلاستیک، خطای قابل ملاحظه‌ای میان داده‌های آزمایشگاهی و معادلات به دست آمده پیش می‌آید.

۲-۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های تک محوره کشش-فشار فولاد SS304 با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به منظور توصیف مدل ریاضی دقیق آن انجام شد. خلاصه نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- روابطی برای مدول یانگ باربرداری معرفی شد و مشاهده شد در تمامی معادلات معرفی شده مدول یانگ باربرداری همواره مقدار کمتری از مدول یانگ بارگذاری دارد و با افزایش کرنش پلاستیک حداکثر، کاهش می‌یابد.

۲- در قسمت بارگذاری غیرخطی رابطه‌ای نمایی معرفی شد که دارای ضریب حداقل مربعات بیشتری نسبت به رابطه‌های پیشین معرفی شده است که این به معنای دقیق‌تر بودن رابطه‌ی معرفی شده برای فولاد SS304 می‌باشد.

۳- اثر باوشینگر که به معنای جهت‌دار بودن سفتی می‌باشد، در فولاد SS304 مشاهده شد، و تأثیر بسزایی در مدل‌سازی رفتار پلاستیک مخصوصاً در حالت باربرداری دارد. همچنین مشاهده شد مقدار ضریب اثر باوشینگر با افزایش کرنش پلاستیک حداکثر، کاهش می‌یابد.

۴- استحکام تسلیم ماده به ازای افستهای مختلف به دست آمد، و مشاهده شد میزان افسه در نظر گرفته شده تأثیر قابل توجهی در استحکام تسلیم ماده دارد.

۵- در قسمت باربرداری پلاستیک مشاهده شد با افزایش کرنش پلاستیک، خطای قابل ملاحظه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و معادلات پیشنهادی پیشین وجود دارد. لذا رابطه‌ی جدیدی برای

قسمت باربرداری پلاستیک ماده معرفی شد که تطابق بسیار خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی

دارد.

فصل ۳

خستگی

۳-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی عمر فولاد SS304 با توجه به انرژی هیستریزیس آن در حالت خستگی کم چرخه پرداخته شده است. انرژی هیستریزیس آزاد شده در چند حالت بررسی شد. در اولین گام انرژی آزاد شده در تمام سیکل‌ها مدنظر قرار داده شد. سپس انرژی آزاد شده در سیکل اول و بعد انرژی آزاد شده سیکل‌های میانی مبنای تخمین عمر فولاد SS304 قرار داده شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب بهترین و دقیق‌ترین سیکل ممکن برای تخمین عمر فولاد به دست آمد. نکته‌ی مهم و قابل تأمل این است که در تمام حالات تخمین عمر فولاد بر اساس انرژی آزاد شده در سیکل‌های میانی نتایج بهتری نسبت به انرژی آزاد شده در سیکل اول و یا انرژی آزاد شده در تمام سیکل‌ها را داراست. همچنین با استفاده از عکس‌هایی که از سطح نمونه‌های در حال بارگذاری گرفته شد و تکنیک پردازش تصویر نیز می‌توان به عمر خستگی این نوع مواد پی برد. نمودارهایی که از پردازش تصویر به دست آمد، نشان داد نمونه هرچه به سمت شکست پیش می‌رود، سطح ظاهری آن نیز با رشد ریزترک‌ها تغییر پیدا می‌کند.

۳-۲- پیش‌بینی عمر خستگی

آزمایش‌هایی که به منظور مطالعه‌ی خستگی بر روی مواد انجام می‌شوند در دو دسته قرار می‌گیرند:

۱- آزمایش‌های خستگی تنش کنترل

۲- آزمایش‌های خستگی کرنش کنترل

اگر پاسخ مواد به این آزمایش‌ها در محدوده‌ی الاستیک باشد، این دو مجموعه آزمایش معادل یکدیگر می‌باشند و چنانچه پاسخ مواد در محدوده‌ی الاستیک-پلاستیک باشد، نتایج این دو مجموعه آزمایش می‌توانند کاملاً متفاوت از یکدیگر باشند. در آزمایش‌های تنش-کنترل، وجود تنش میانگین می‌تواند منجر به انباشتگی کرنش پلاستیک در هر سیکل شود که همان کرنش رچتینگ^۱ است.

^۱ Ratcheting

کرنش رچتینگ می تواند باعث آسیب بیشتر و در نتیجه عمر خستگی کوتاه تر شود. در آزمایش های کرنش-کنترل در مراحل اولیه رهايش تنش میانگین رخ می دهد که این امر باعث کم شدن اثرات تنش میانگین بر عمر خستگی خواهد شد.

پایه و اساس تمام روابط مطرح شده در زمینه ی خستگی، رابطه ی (۱-۳) می باشد:

$$N = C/(\varepsilon_p)^d \quad (1-3)$$

در این رابطه N تعداد سیکل های طی شده تا شکست ماده، ε_p کرنش پلاستیک، C و d ثابت های ماده می باشند. این رابطه در سال ۱۹۵۴ به طور همزمان و جداگانه، توسط کوفین [۳۰] و مانسون [۳۱، ۳۲] مطرح شد. البته آن ها در اولین ارائه ی خود مقدار d برابر ۲ معرفی کردند، اما سپس پذیرفتند که برای هر ماده این مقدار می تواند متفاوت باشد. بعد از مطرح شدن این موضوع که کرنش کلی صورت گرفته در یک قطعه تحت بارگذاری، مجموعه کرنش پلاستیک و الاستیک می باشد، (که هر دوی آن ها را می توان با رابطه ای نمایی نشان داد)، رابطه ای که آن ها معرفی کردند، توسط مورو و باسکووئین دچار تغییراتی شد و به صورت رابطه ی (۲-۳) نشان داده شد. البته امروزه رابطه ی (۲-۳) همان رابطه ی کوفین-مانسون شناخته می شود و در بسیاری از کتب و مجلات معتبر علمی، این رابطه تحت عنوان رابطه ی کوفین-مانسون بکار می رود.

$$\Delta\varepsilon = \text{total strain range} = \text{elastic strain range} + \text{plastic strain range} = X(N_f)^x + Y(N_f)^y \quad (2-3)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

در کتاب جامع و معتبری که در سال ۲۰۰۶ توسط مانسون و هالفورد [۵۲] (که هر دوی آن ها را می توان از پیشگامان علم خستگی در مکانیک برشمرد) به چاپ رسید، روابط متعدد به کار برده شده برای خستگی، معرفی و تاریخچه ی هر کدام بررسی شده است. این روابط به طور خلاصه در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳) روابط متداول استفاده برای خستگی به شکل $[\Delta\epsilon] Y = A(X)^\alpha + B(X)^\beta$

Double power-law relation	X	Y	A	B	α	β
Strain-life curve:						
(i) Actual (obtained from fatigue tests)						
$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c$	$2N_f$	$\frac{\Delta\epsilon}{2}$	$\frac{\sigma_f'}{E}$	ϵ_f'	b	c
(ii) Approximate (universal slopes method)						
$\Delta\epsilon = 3.5\sigma_u N_f^{-0.12} + D^{0.6} N_f^{-0.6}$	N_f	$\Delta\epsilon$	$3.5\sigma_u$	$D^{0.6}$	-0.12	-0.6
Monotonic stress-strain curve:						
$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n}$	σ	ϵ	$\frac{1}{E}$	$K^{-1/n}$	1	$1/n$
Cyclic stress-strain curve:						
(i) Obtained from relevant test data						
$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'}$	σ	ϵ	$\frac{1}{E}$	$(K')^{-1/n'}$	1	$1/n'$
(ii) Derived from strain-life relation						
$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_f' \left(\frac{\sigma}{\sigma_f'}\right)^{c/b}$	σ	ϵ	$\frac{1}{E}$	$\epsilon_f' \sigma_f'^{-c/b}$	1	c/b
(iii) "Double-amplitude" (hysteresis) curve						
$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'}$	$\Delta\sigma$	$\Delta\epsilon$	$\frac{1}{E}$	$2(2K')^{-1/n'}$	1	$1/n'$
Smith-Watson-Topper parameter:						
$\sigma_{max} E \frac{\Delta\epsilon}{2} = \sigma_f'^2 (2N_f)^{2b} + E \epsilon_f' \sigma_f' (2N_f)^{b+c}$	$2N_f$	$\sigma_{max} E \frac{\Delta\epsilon}{2}$	$\sigma_f'^2$	$E \epsilon_f' \sigma_f'$	$2b$	$b+c$
Neuber notch-strain analysis:						
(i) For static loading						
$K_t^2 \sigma \epsilon = \frac{\sigma_{notch}^2}{E} + \left(\frac{\sigma_{notch}}{K}\right)^{1/n}$	σ_{notch}	$K_t^2 \sigma \epsilon$	$\frac{1}{E}$	$K^{-1/n}$	2	$\frac{(n+1)}{n}$
(ii) For cyclic loading						
$K_t^2 \Delta\sigma \Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma_{notch}^2}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma_{notch}}{2K'}\right)^{1/n'}$	$\Delta\sigma_{notch}$	$K_t^2 \Delta\sigma \Delta\epsilon$	$\frac{1}{E}$	$2(2K')^{-1/n'}$	2	$\frac{(n'+1)}{n'}$

به طور کلی تئوری‌هایی را که برای بررسی عمر خستگی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند بسته به دیدگاهی که این تئوری‌ها دارند می‌توان به سه دسته‌ی کلی تقسیم نمود [۵۴]: خستگی از دیدگاه تنش، خستگی از دیدگاه کرنش و خستگی از دیدگاه انرژی. در هر یک از این سه دیدگاه رابطه‌ی بین کمیت آسیب و عمر خستگی به طور عمومی به شکل رابطه‌ی (۳-۳) می‌باشد:

$$\Psi = \kappa \cdot (N_f)^\gamma + \psi_0 \quad (3-3)$$

به طوری که Ψ کمیت آسیب، N_f عمر خستگی، ψ_0 حد خستگی و κ ، γ نیز کمیت‌هایی مربوط به ماده می‌باشند. حال بسته به این که کمیت آسیب انتخاب شده تابعی از تنش، کرنش یا انرژی کرنشی باشد، تحلیل خستگی می‌تواند با هر یک از سه دیدگاه تنش، کرنش و یا انرژی صورت گیرد.

بررسی خستگی از دیدگاه انرژی کرنشی تا حدودی متفاوت از دو دیدگاه قبلی می‌باشد. چرا که در

هر یک از دیدگاه‌های تنش و یا کرنش محاسبات انجام شده فقط بر مبنای یک کمیت است. به طور مثال چنانچه از دیدگاه تنش به مسئله‌ی خستگی بپردازیم، محاسبات ما فقط بر مبنای مقادیر تنش در طول انجام آزمایش می‌باشد و مقادیر کرنش عملاً تأثیری بر نتایج نخواهند داشت. برتری دیدگاه انرژی بر دو دیدگاه دیگر، همین دخالت هر دو کمیت تنش و کرنش در محاسبات می‌باشد. و این به معنای دخالت دادن رابطه‌ی تنش-کرنش در بررسی خستگی می‌باشد، شریعتی و همکاران [۵۶] در سال ۲۰۱۲ در بررسی رفتار خستگی پلی استال و شریعتی و محرابی [۵۷] در سال ۲۰۱۴ به برتری دیدگاه انرژی نسبت به دیدگاه تنش و کرنش پی‌بردند.

۳-۲-۱- پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس معیار انرژی

در بحث خستگی دو نوع چگالی انرژی کرنشی مطرح می‌شود. یکی چگالی انرژی کرنشی تلف شده یا چگالی انرژی کرنش پلاستیک (Dissipated Strain Energy Density) که به اختصار DSED یا ΔW_p و یا ΔW_d نامیده می‌شود، و دیگری دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی الاستیک (Elastic Strain Energy Density Amplitude) که به اختصار ESEDA یا ΔW_e نامیده می‌شود.

در سال ۱۹۶۶ هالفورد [۳۴] برای اولین بار خستگی را بر اساس انرژی حلقه‌ی هیستریزس در بارگذاری سیکلی توصیف کرد. برای بارگذاری با دامنه‌ی ثابت، انرژی کرنشی کلی حلقه‌های هیستریزس در هر سیکل برابر با مجموع انرژی الاستیک و پلاستیک است و به صورت زیر به دست می‌آید [۳۴]:

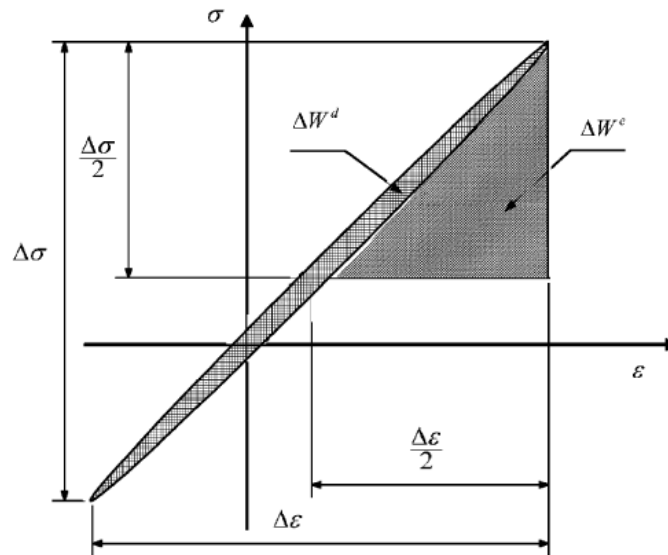
$$\Delta W = \Delta W_e + \Delta W_p$$

$$\Delta W = \oint_{cycle} \sigma d\varepsilon_e + \oint_{cycle} \sigma d\varepsilon_p \quad (۴-۳)$$

که در آن $\varepsilon_p = \frac{\sigma}{E}$ کرنش الاستیکی است و ΔW_e انرژی کرنشی الاستیکی است؛

ماده هستند که در آن ضریب کرنش سختی سیکلی و توان کرنش سختی سیکلی می‌باشد.

شکل (۱-۳) رابطه‌ی حلقه‌ی هیستریزیس و انرژی پلاستیک و الاستیک را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۱-۳) نمایش اجزای چگالی انرژی و حلقه‌ی هیستریزیس

هالفورد [۳۴] و گولوس و الین [۳۶] و دیگر محققین مطرح کرده‌اند که انرژی کرنش پلاستیک

حلقه‌ی هیستریزیس با تعداد سیکل‌های طی شده تا شکست ماده N_f از طریق تابع انرژی مرتبط است

و می‌تواند به شرح ذیل نوشته شود:

$$\Delta W_p = A(N_f)^\alpha \quad (۵-۳)$$

که در آن A و α ثابت‌های ماده هستند.

همچنین کوجاوسکی و الین [۳۵] رابطه‌ی انرژی و سیکل‌های خستگی را به صورت زیر عنوان کرد:

$$\Delta W_p = A(N_f)^\alpha + B \quad (6-3)$$

که در آن A و α ثابت‌های ماده هستند و B حد خستگی معرفی شده است.

با استفاده از روابط (6-3) و (5-3) می‌توان طول عمر خستگی بر حسب تعداد سیکل‌های طی شده تا شکست، را با استفاده از انرژی هیستریزیس به ازای هر چرخه و ثابت‌های ماده به شرح ذیل تخمین زد:

$$N_f = \left(\frac{\Delta W_p}{A}\right)^{1/\alpha} \quad (7-3)$$

$$N_f = \left(\frac{\Delta W_p - B}{A}\right)^{1/\alpha} \quad (8-3)$$

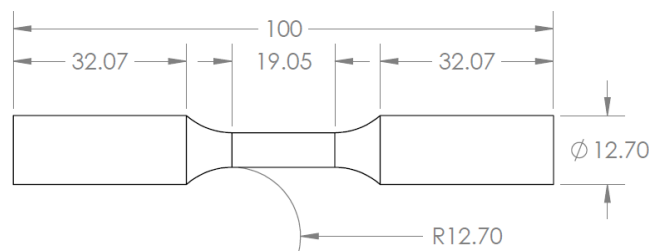
ثابت‌های A ، B و α با برآزش بر اطلاعات آزمایشگاهی به دست می‌آیند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳-۳- آزمایش‌های تجربی آزمون خستگی

آزمون خستگی انجام گرفته به صورت جابجایی-کنترل می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش خستگی بر اساس استاندارد ASTM-E1049 ساخته شده است. که استانداردی مخصوص آزمایش‌های خستگی کم‌چرخه^۱ و در حالت جابجایی-کنترل^۲ می‌باشد. هندسه‌ی نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش خستگی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. آزمایش‌های خستگی با فرکانس ۳ هرتز انجام شده است. جدول (۲-۳) آزمایش‌های خستگی انجام گرفته را در ۵ گروه که با توجه به کرنش میانگین دسته‌بندی شده‌اند، نشان می‌دهد.

^۱ Low Cycle Fatigue

^۲ Strain-control Fatigue



شکل (۲-۳) ابعاد هندسی نمونه‌ی آزمایش خستگی برحسب میلی‌متر

۳-۳-۱- محاسبه‌ی انرژی

انرژی آزاد شده در هر سیکل را می‌توان با رابطه‌ی (۳-۴) به دست آورد. در این تحقیق برای محاسبه‌ی انرژی هر سیکل، سطح داخلی هر حلقه‌ی هیستریزیس با استفاده از نرم‌افزار متلب محاسبه شده است.

عبدالا و همکاران [۵۳] انرژی را برای سیکل اول، سیکل آخر و سیکل میانی برای دو فولاد BS 460B, BS B500B به کار بردند. آن‌ها سیکل میانی را سیکل دوم تا پنجم مد نظر قرار دادند، اینکار به دلیل مساوی نبودن سیکل‌هایی که هر نمونه طی می‌کند باعث بروز خطا می‌شود. به عنوان مثال ممکن است قطعه‌ای ۲۰۰ سیکل را طی نماید در صورتی که نمونه‌ای دیگر بالای ۷۰۰۰ سیکل را طی نماید. ما در این تحقیق برای اولین بار سیکل میانی را به صورت‌های مختلف مورد نظر قرار می‌دهیم و همان‌طور که در ادامه مشاهده خواهد شد، نتایج به مراتب بهتر و دقیق‌تری حاصل خواهد شد.

جدول (۲-۳) آزمایش‌های خستگی انجام شده بر روی نمونه‌های فولاد SS304 به صورت جابجایی کنترل

Life(Cycle)	Amp Strain(mm)	Mean Strain(mm)	Group	Sub Group	Number
1503	0.20	0.00	T1	T1.1	1
408	0.30	0.00	T1	T1.2	2
201	0.35	0.00	T1	T1.3	3
173	0.40	0.00	T1	T1.4	4
3990	0.17	0.02	T2	T2.1	5
1521	0.20	0.02	T2	T2.2	6
654	0.25	0.02	T2	T2.3	7

548	0.30	0.02	T2	T2.4	8
8805	0.15	0.05	T3	T3.1	9
1601	0.20	0.05	T3	T3.2	10
680	0.25	0.05	T3	T3.3	11
235	0.35	0.05	T3	T3.4	12
180	0.38	0.05	T3	T3.5	13
4155	0.17	0.07	T4	T4.1	14
817	0.25	0.07	T4	T4.2	15
704	0.30	0.07	T4	T4.3	16
196	0.40	0.07	T4	T4.4	17
11645	0.15	0.10	T5	T5.1	18
1647	0.20	0.10	T5	T5.2	19
762	0.30	0.10	T5	T5.3	20
202	0.40	0.10	T5	T5.4	21

کل حالت‌های مختلف برای محاسبه‌ی انرژی به صورت زیر می‌باشد:

۱- انرژی سیکل اول که به اختصار W_{One} نشان داده شده است.

۲- انرژی سیکل آخر W_{End} که به اختصار نشان داده شده است.

۳- کل انرژی سیکل‌های طی شده که به اختصار W_{Total} نشان داده شده است.

۴- درصد سیکل طی شده از ۱ تا ۹۹ درصد. به عنوان مثال هنگامی که می‌خواهیم ۵٪ تعداد

سیکل‌ها را محاسبه می‌کنیم، برای نمونه‌ای که ۲۰۰ سیکل طی کرده ۱۰ سیکل و برای نمونه‌ای

که ۸۰۰۰ سیکل طی کرده است ۴۰۰ سیکل را در نظر می‌گیریم. این کار از ۱٪ سیکل طی

شده تا ۹۹٪ سیکل طی شده انجام می‌شود. درصد سیکل طی شده به اختصار $W_{Percent\ cycle}$

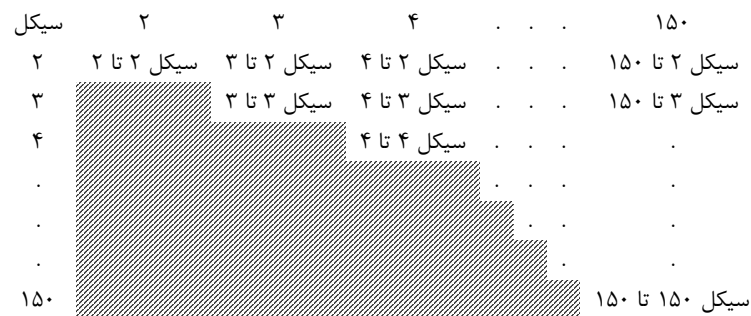
نشان داده شده است.

۵- در نظر گرفتن تمام حالت‌های ممکن بر اساس نمونه‌ای که کمترین سیکل را پیموده است. به

طور مثال فرض کنید نمونه‌ای که کمترین سیکل ممکن را طی نموده است برابر ۱۵۰ سیکل

باشد، حال برای تمام نمونه‌ها ۱۵۰ سیکل اولشان را مد نظر قرار می‌دهیم. شکل (۳-۳) به

خوبی، چگونگی در نظر گرفتن سیکل‌ها را نشان می‌دهد که بالغ بر پانزده هزار حالت ممکن را به منظور پی بردن به دقیق‌ترین جواب ممکن در این مرحله بررسی کرده‌ایم.



شکل (۳-۳) نحوه‌ی انتخاب سیکل‌ها برای تخمین عمر بر اساس انرژی حالت پنجم

برای بررسی دقت هر کدام از روابط فوق معیار رگرسیون حداقل مربعات را مد نظر قرار داده که مقدار آن هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان از دقت بالای آن رابطه دارد. همچنین برای هر دو رابطه‌ی (۳-۵) و (۳-۶) و دقت هر کدام را محاسبه شده است.

در جدول (۳-۳)، برای حالت اول ذکر شده ثابت‌های معادله‌ی (۳-۵) و (۳-۶) و همچنین رگرسیون حداقل مربعات برای هر حالت نشان داده شده است.

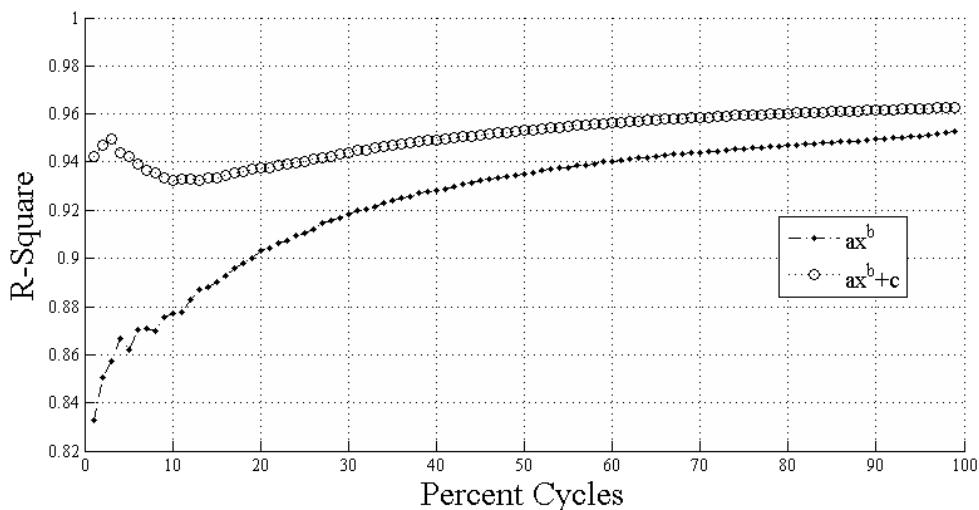
جدول (۳-۳) ضرایب معادله‌های (۳-۵) و (۳-۶) برای حالت اول انرژی در نظر گرفته شده

		$ax^b + c$				ax^b		
		a	b	c	$R - Square$	a	b	$R - Square$
W_{One}	حالت اول	1.954e9	-0.8796	1.061e6	0.9749	1.019e9	-0.746	0.9724
W_{End}	حالت دوم	7.065e20	-6.199	3.646e6	0.4893	6.326e7	-0.3649	0.4743
W_{Total}	حالت سوم	4.37e7	0.6352	2.839e9	0.9631	3.129e8	0.4388	0.9530

همان طور که در جدول (۳-۳) مشاهده می‌شود، رابطه‌ی (۳-۶) دقت بیشتری از رابطه‌ی (۳-۵) دارد؛ زیرا در هر ۳ حالت دارای رگرسیون حداقل مربعات بیشتری است. همچنین هنگامی که برای

تخمین عمر از انرژی آزاد شده در سیکل اول استفاده می‌شود، نسبت به ۲ حالت دیگر، انرژی آزاد شده در سیکل آخر و انرژی کل سیکل‌ها دارای دقت بیشتری می‌باشد.

برای حالت چهارم، یعنی، درصد سیکل طی شده، رگرسیون حداقل مربعات با منحنی شکل (۳-۴) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد سیکل‌های در نظر گرفته شده، رگرسیون حداقل مربعات افزایش می‌یابد و این بدان معناست که اگر بخواهیم از این روش برای محاسبه تخمین عمر استفاده کنیم، بهتر است تمام سیکل‌ها را در نظر بگیریم. همچنین باز هم دیده می‌شود رابطه‌ی (۳-۶) از رابطه‌ی (۳-۵) دارای دقت بیشتری می‌باشد؛ چرا که به ازای هم‌مقدیر، بالاتر از منحنی به دست آمده از رابطه‌ی (۳-۵) می‌باشد. همچنین دیده می‌شود هرچه درصد سیکل‌های در نظر گرفته شده افزایش می‌یابد، اختلاف بین ۲ منحنی کاهش می‌یابد.



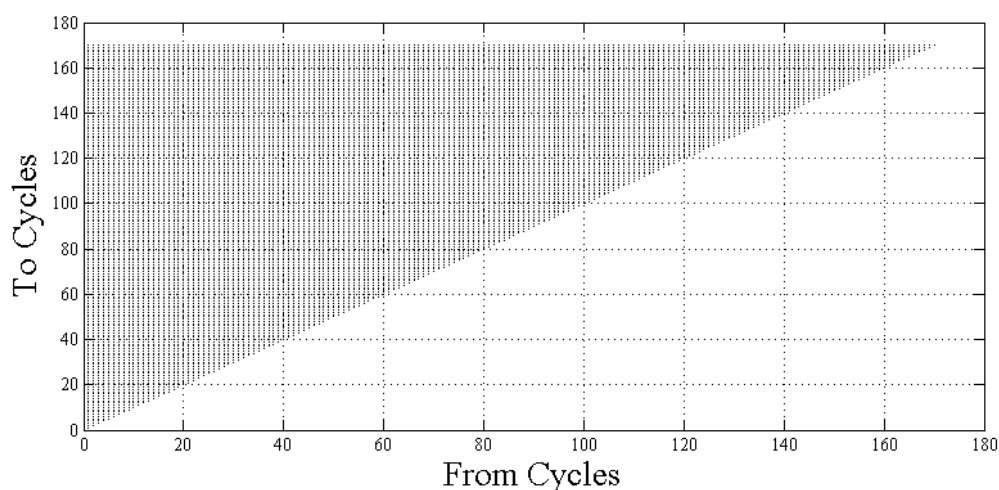
شکل (۳-۴) منحنی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب درصد سیکل در نظر گرفته شده برای حالت چهارم در نظر گرفتن انرژی

برای بهترین حالت درصد در نظر گرفته شده، یعنی ۹۹٪ سیکل‌ها، ثابت‌های روابط (۳-۵) و (۳-۶) به صورت زیر به دست می‌آیند:

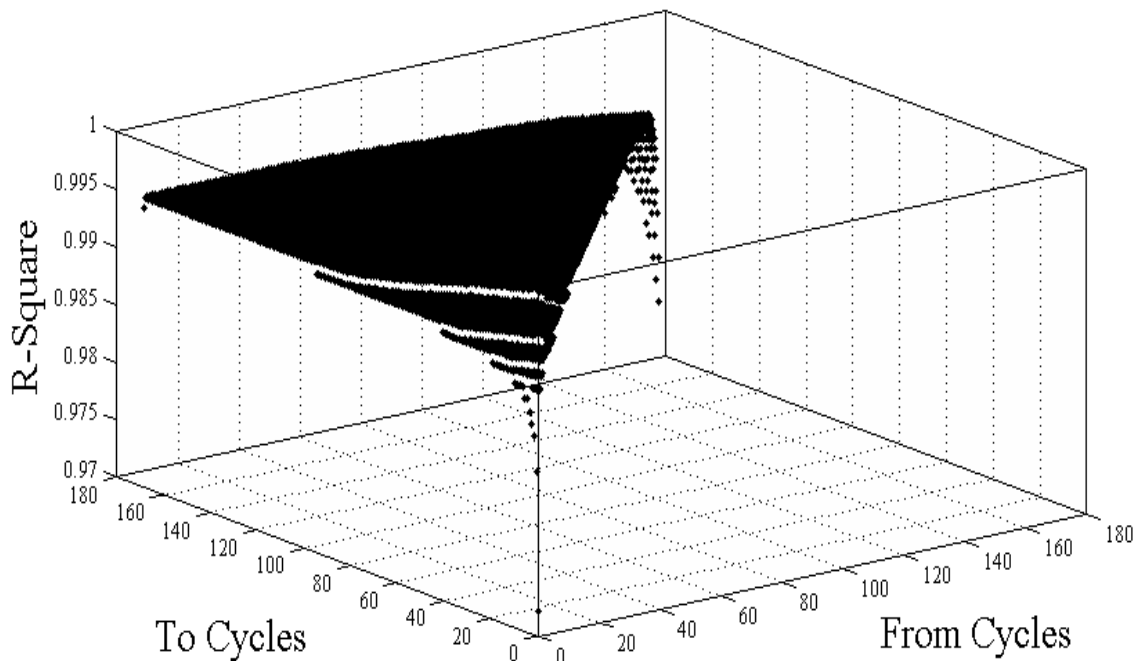
جدول (۳-۴) ثابت‌های روابط (۳-۵) و (۳-۶) و رگرسیون حداقل مربعات برای حالت چهارم انتخاب انرژی

		$ax^b + c$				ax^b		
		a	b	c	$R - Square$	a	b	$R - Square$
$W_{Percent}$	حالت چهارم	4.238e7	0.6372	2.844e9	0.9629	3.124e8	0.4378	0.9526

در شکل (۵-۳) منحنی ۲ بعدی و در شکل (۶-۳) نمودار ۳ بعدی حالت پنجم، یعنی تمامی سیکل‌های ممکن بر اساس کمترین سیکل طی شده، نشان داده شده است. محورهای x و y شمارنده سیکل‌ها می‌باشند و محور z رگرسیون حداقل مربعات را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حالتی گنبدی شکل به خود دارد که نشان دهنده این است که بیشترین دقت را می‌توان هنگامی به دست آورد که از سیکل‌های میانی برای تخمین عمر استفاده می‌کنیم. دلیل این رفتار را می‌توان در منحنی انرژی آزاد شده هر نمونه پیدا کرد.



شکل (۵-۳) منحنی دو بعدی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب انتخاب سیکل‌های در نظر گرفته شده برای حالت پنجم در نظر گرفتن انرژی



شکل (۶-۳) منحنی سه بعدی رگرسیون حداقل مربعات بر حسب انتخاب سیکل‌های در نظر گرفته شده برای حالت پنجم در نظر گرفتن انرژی

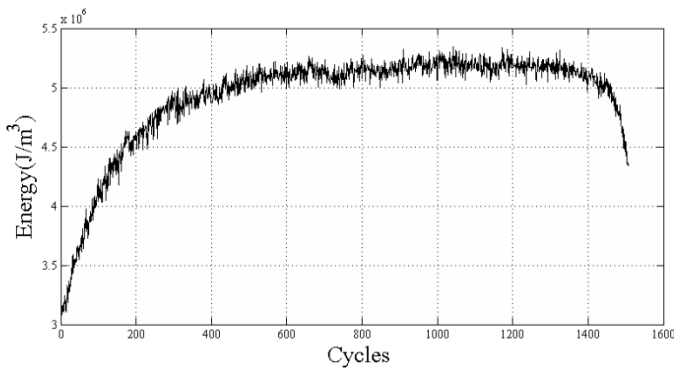
در شکل (۷-۳) منحنی انرژی بر حسب سیکل برای ۲ نمونه نشان داده شده است. همان طور که در این شکل می‌توان دید انرژی آزاد شده ابتدا شروع به افزایش می‌کند، سپس تقریباً حالت پایداری به خود می‌گیرد و در سیکل‌های انتهایی دوباره شروع به کاهش می‌کند. حال با توجه به این رفتار که در منحنی انرژی تمام نمونه‌ها دیده می‌شود و مدنظر قرار دادن این موضوع که رگرسیون حداقل مربعات، هنگامی بیشترین مقدار را دارد که کمترین اختلاف عددی بین داده‌ها را داشته باشد، (یعنی اگر تمام داده‌ها مقداری مساوی با یکدیگر داشته باشند، رگرسیون حداقل مربعات دارای مقدار عددی ۱ می‌باشد) می‌توان علت گنبدی شکل بودن، شکل (۶-۳) را فهمید؛ زیرا هرچه به سیکل‌های میانی نزدیک‌تر می‌شویم، پایداری انرژی آزاد شده افزایش می‌یابد. به عبارتی انرژی‌های آزاد شده در هر نمونه در سیکل‌های میانی مقادیر نزدیک‌تری به یکدیگر دارند و این نزدیکی باعث افزایش دقت در تخمین عمر بر اساس انرژی می‌شود. بیشترین مقدار رگرسیون حداقل مربعات در این حالت هنگامی اتفاق می‌افتد که سیکل ۱۳۷ تا ۱۳۷ طی می‌شود. برای بهترین حالت، یعنی سیکل ۱۳۷ تا ۱۳۷، ثابت‌های روابط

(۵-۳) و (۶-۳) به صورت زیر به دست می آیند:

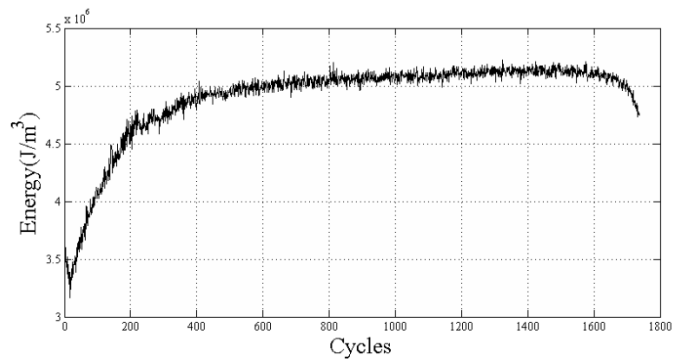
جدول (۵-۳) ثابت‌های روابط (۵-۳) و (۶-۳) و رگرسیون حداقل مربعات برای حالت پنجم انرژی

		$ax^b + c$				ax^b		
		a	b	c	$R - Square$	a	b	$R - Square$
$W_{Percent}$	حالت پنجم	6.929e8	-0.6737	-4.291e5	0.99610	8.373e8	-0.7136	0.99575

همان طور که در جدول (۵-۳) مشاهده می‌شود، رابطه‌ی (۶-۳) در این حالت هم دارای دقت بیشتری نسبت به رابطه‌ی (۵-۳) است زیرا دارای رگرسیون حداقل مربعات بیشتری می‌باشد.



(ب)

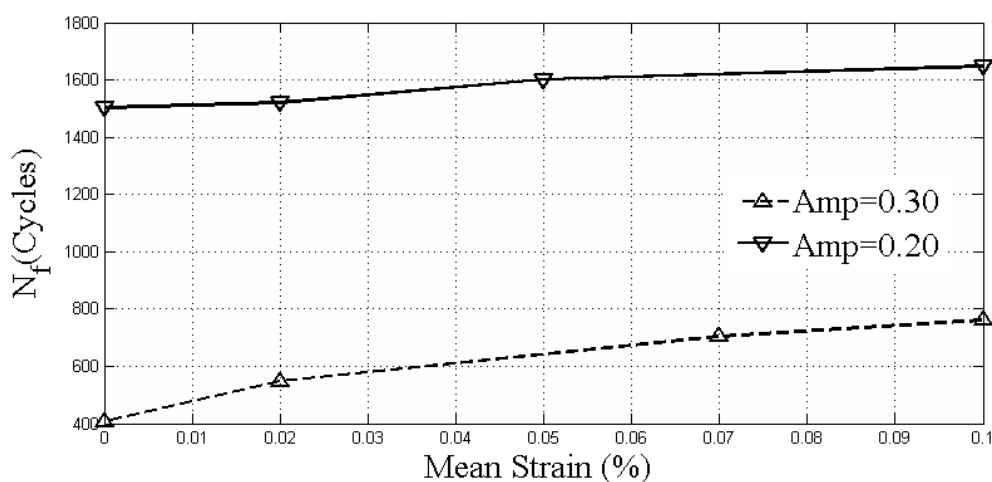


(الف)

شکل (۷-۳) (الف) - منحنی انرژی بر حسب تعداد سیکل $Mean=0/20$, $Amp=0/0.5$, (ب) - منحنی انرژی بر حسب تعداد سیکل $Mean=0/0$, $Amp=0/20$

۳-۳-۲- تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها

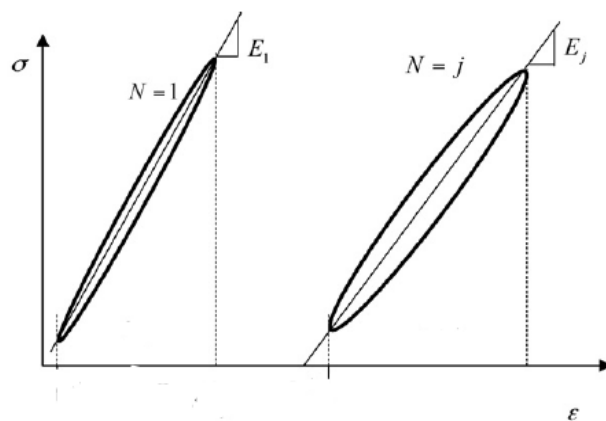
در شکل (۸-۳) تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها نشان داده شده است. برای ۲ حالت دامنه کرنش $0/2$ و $0/3$ و به ازای کرنش‌های میانگین‌های مختلف این شکل رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش کرنش میانگین باعث افزایش ناچیز عمر ماده می‌شود.



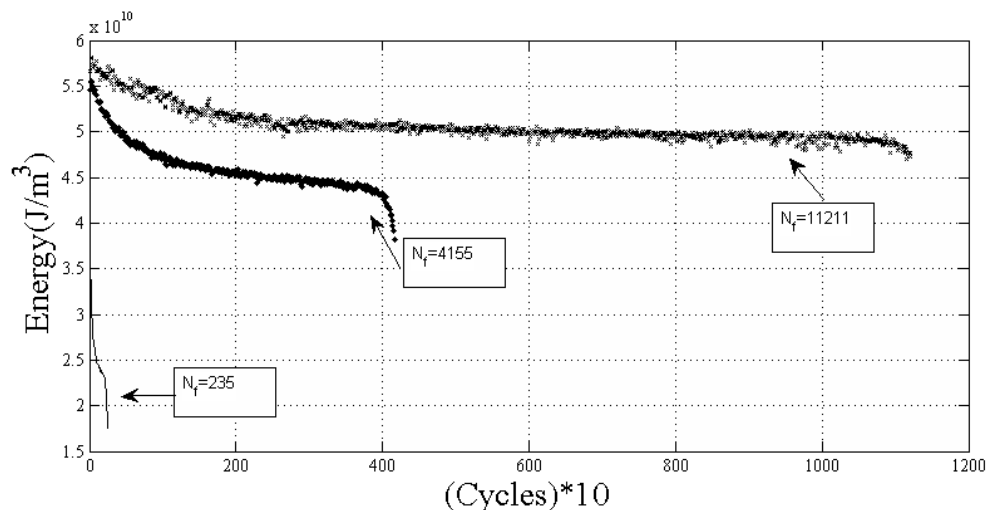
شکل (۸-۳) تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها

۳-۳-۳- تغییرات شیب حلقه هیستریزیس

شیب حلقه‌ی هیستریزیس مطابق با تعریف مرجع [۵۴] به صورت شیب خط واصل نقاط بیشینه و کمینه حلقه‌ی هیستریزیس تعریف می‌گردد. شماتیک این تعریف در شکل (۹-۳) نشان داده شده است. نمودار آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای سه آزمایش در شکل (۱۰-۳) رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، مقدار شیب کم شده است که بیانگر نرم شوندگی ماده است. با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، علاوه بر کاهش شیب، نرخ کاهش شیب افزایش یافته که نشان دهنده بیشتر شدن نرم شوندگی با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است.



شکل (۹-۳) تغییرات شماتیک شیب حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش



شکل (۳-۱۰) تغییرات شیب حلقه‌ی هیستریزس

۳-۴- پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس پردازش تصویر

بررسی عمر خستگی به شیوه‌های متعددی تا کنون در طی سالیان دراز انجام شده و روابط بسیاری بدین منظور توسط محققین و دانشمندان علم مکانیک ارائه شده است. نکته‌ی مشترک بین تمامی راه‌ها و روابط ارائه شده این است که توسط آن‌ها می‌توان کل عمر یک نمونه را پیش‌بینی کرد؛ اما نمی‌توان به پیش‌بینی عمر باقی‌مانده‌ی آن‌ها پرداخت. منظور این نیست که قطعه‌ای را به شما بدهند و بدانید تحت بارگذاری معلوم، به طور مثال ۷۰۰۰ سیکل طی می‌کند و ۱۰۰۰ سیکل طی شده است، حال چند سیکل دیگر تقریباً می‌تواند تحمل کند، شرایطی را در نظر بگیرید که شما فقط نوع بارگذاری را می‌دانید و هیچ اطلاعاتی از تاریخچه‌ی بارگذاری قطعه ندارید! این موضوع در زندگی واقعی ما بسیار زیاد اتفاق می‌افتد. شرایطی را در نظر بگیرید که به عنوان یک متخصص علم مکانیک، با شکست با قطعه‌ای از یک هواپیما مواجهید که در پرواز تحت ارتعاش قرار گرفته و به عبارتی تحت بارگذاری سیکلی (سیکلی تصادفی) قرار دارد و به ظاهر هیچ‌گونه ترکی روی آن وجود ندارد تا دستور تعویض آن را صادر نمایید. آنگاه نظر شما را راجع به ادامه کارکرد این قطعه می‌خواهند. در این شرایط چه می‌کنید؟ برای کاهش مسئولیت خود دستور به تعویض این قطعه می‌دهید، یا نه؟ با تکیه بر علم مکانیک خود و به منظور

کاهش هزینه‌ی شرکت هواپیمایی به دنبال راهی هستید تا با اعتماد به نفس بتوانید با در نظر گرفتن ضریب اطمینان، بگویید این قطعه جوابگوی شرایط این پرواز می‌باشد. در این شرایط هیچ رابطه‌ی ریاضی که تاکنون ارائه شده است نمی‌تواند شما را یاری کند؛ چرا که هیچ اطلاعی در مورد گذشته‌ی آن ندارید، مگر آنکه خاصیتی را بتوانید پیدا کنید که حال و روز قطعه را در همان لحظه به خوبی نشان دهد. این خاصیت چیزی نمی‌تواند باشد جز ظاهر آن!

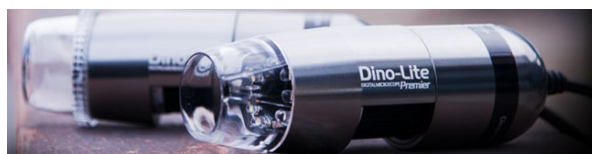
مقدمه‌ی فوق دلیلی است برای پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس پردازش تصویر. شاید مد نظر قرار دادن شرایط ذکر شده و پیدا کردن شرایطی که با اطمینان برای هر قطعه‌ای بتوان اظهار نظر نمود دور از ذهن باشد؛ اما با توسعه‌ی علم پردازش تصویر و ایجاد داده‌های مناسب برای هر قطعه در آینده‌ای نه چندان دور به عنوان یکی از روش‌های مهم و تأثیرگذار در علم مکانیک شکست می‌توان از این روش بهره جست.

برای استفاده از پردازش تصویر در پیش‌بینی خستگی مواد، از سطح قطعه هنگامی که تحت بارگذاری سیکلی قرار دارد، در هر ۱ ثانیه عکسی از سطح قطعه گرفته می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده همان نمونه‌های استفاده شده برای پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس انرژی می‌باشند و فرکانس دستگاه در این حالت برابر ۱ می‌باشد.

عکس‌های گرفته شده توسط دوربین میکروسکوپی دینو لایت^۱ (شکل ۳-۱۱) که قابلیت بزرگنمایی^۲ تا ۲۰۰ برابر را دارا می‌باشد، گرفته شده است. دوربین توسط یک پایه (شکل ۳-۱۲) در نزدیکی قطعه نصب می‌شود و عکس‌ها به صورت اتوماتیک توسط نرم‌افزار دوربین گرفته می‌شود تا دوربین هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشد. این کار باعث افزایش دقت در عکس‌های گرفته شده می‌شود.

^۱ Dino-Light

^۲ Zoom

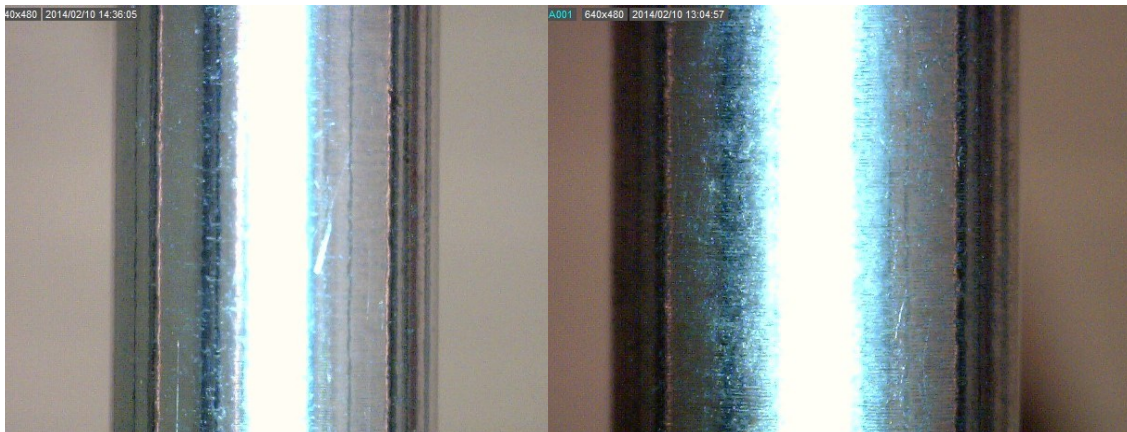


شکل (۱۱-۳) دوربین دینو لایت برای استفاده از عکس برداری در پردازش تصاویر



شکل (۱۲-۳) نحوه‌ی قرار گرفتن دوربین برای عکس برداری از نمونه‌ها

سطح قطعات با استفاده از اسپری مخصوص تمیز شده است، تا میزان آلاینده‌گی و کثیفی روی سطح قطعه تأثیری در عکس‌های گرفته شده نداشته باشد. در شکل (۱۳-۳) تفاوت سطح ۲ قطعه را قبل و بعد استفاده از اسپری مخصوص می‌توان دید. همچنین تراشکاری قطعات با استفاده از دستگاه CNC انجام شده است تا بتوان صافی سطح بالا و یکنواختی را برای تمام قطعات به طور یکسان ایجاد کرد. بزرگنمایی عکس‌های گرفته شده ۵۰ برابر می‌باشد.



(ب)

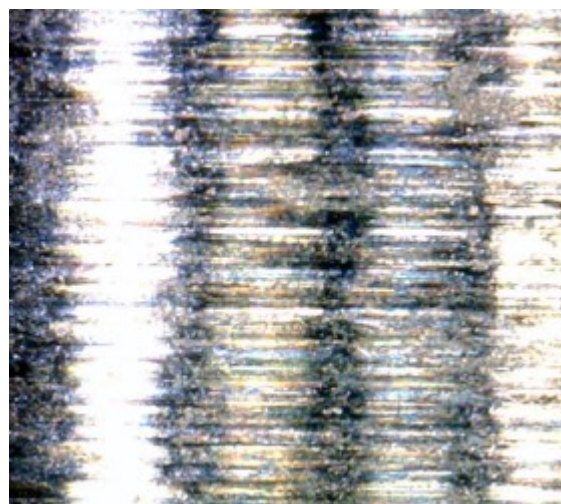
(الف)

شکل (۳-۱۳) (الف) - سطح نمونه قبل از اسپری تمیز کننده، (ب) - سطح نمونه بعد از استفاده از اسپری تمیز کننده هنگامی که از سطح قطعات با بزرگنمایی ۵۰ برابر عکس برداری می‌شود، شاید به ظاهر و با چشم غیر مسلح تغییری در ظاهر آن دیده نشود؛ اما در واقع قطعه هرچه به سمت شکست پیش می‌رود، رشد ریزترک‌ها در سطح قطعه باعث افزایش نقاط تیره در عکس می‌شود. این موضوع را می‌توان هنگامی که عکس‌ها با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر گرفته می‌شود، در شکل (۳-۱۴) به وضوح مشاهده کرد. همچنین نامنظم شدن و به هم ریختگی سطح قطعه را به راحتی می‌توان در این شکل مشاهده کرد.

وجود این ریزترک‌ها در واقع مبنایی برای محاسبه عمر خستگی با استفاده از پردازش تصویر می‌باشد. رشد این ترک‌ها باعث به وجود آمدن نقاط سیاهی در تصویر می‌شوند. با استفاده از پردازش تصویر می‌توان پیکسل‌های هر عکس را از لحاظ تعداد رنگ مشاهده کرد. هر عکس در نرم‌افزار متلب شاید نزدیک به صدها هزار پیکسل می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل (۳-۱۴) ایجاد و رشد ریز ترک‌ها در قطعه-عکس برداری با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر انجام شده است، (الف)-در سیکل‌های ابتدایی، (ب)-در سیکل‌های انتهایی

عکس‌های به دست آمده از هر آزمایش به ۲۵۶ گری^۱ تبدیل می‌گردند. با این کار در واقع عکس‌های به دست آمده به تصاویر سیاه و سفیدی تبدیل می‌گردند که هر پیکسل با عدد صفر برای رنگ کاملاً سیاه، تا عدد ۲۵۶ برای کاملاً سفید، نشان داده می‌شود. با اندازه‌گیری این پیکسل‌ها به نتایج جالبی برای پیش‌بینی عمر خستگی می‌توان دست یافت.

لازم به ذکر است این نوع استفاده از پردازش تصویر شاید برای هر ماده و جنسی مناسب نباشد، اما نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، پیدا کردن خاصیتی^۲ است که در هر عکس تغییر کند. شاید برای پیدا کردن این خاصیت‌ها نیاز باشد از فیلترهای متفاوت پردازش تصویر استفاده کرد، اما در این تحقیق نیاز به استفاده از این فیلترها نبوده، چرا که در هر عکس خاصیتی وجود دارد که به وضوح تغییر می‌کند. به منظور یکسان سازی شرایط محیطی عکس برداری، تمامی عکس‌ها در ساعت معینی از روز گرفته

^۱ Gray

^۲ Feature

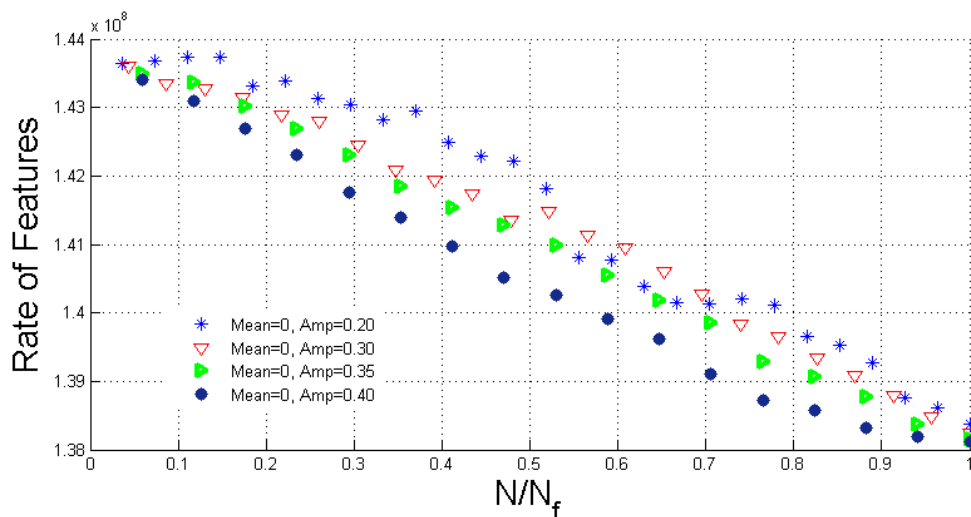
شده تا تمامی شرایط از نظر نوردی نیز یکسان باشد.

آزمایش‌های انجام شده در جدول (۳-۶) نشان داده شده است.

جدول (۳-۶) آزمایش‌های تجربی انجام گرفته برای استفاده از تخمین عمر با استفاده از پردازش تصویر

	Amp Strain(mm)	Mean Strain(mm)	Life(Cycle)
Test 1	0.20	0	2231
Test 2	0.30	0	812
Test 3	0.35	0	401
Test 4	0.40	0	180

در شکل (۳-۱۵) منحنی‌های به دست آمده از پردازش تصویر بر حسب N/N_f نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۵) منحنی به دست از پردازش تصویر بر حسب عمر

همان طور که در شکل (۳-۱۵) مشاهده می‌شود، قطعه همچنان که به سمت سیکل‌های پایانی می‌رود، حالت نزولی به خود می‌گیرد. این به معنای افزایش نقاط سیاه درون تصویر است؛ یعنی قطعه هرچه به سمت شکست پیش می‌رود، ریزترک‌ها روی سطح قطعه افزایش می‌یابند و یا رشد کرده و طول آن‌ها افزایش می‌یابد. از دیدگاه پردازش تصویر، نقاط سیاه روی جسم افزایش یافته است که این پدیده باعث نزولی شدن نمودار فوق می‌گردد. همچنین هنگامی که دامنه افزایش می‌یابد، در واقع سطح

ریزترک‌ها بیشتر شده که منجر به افزایش نقاط سیاه درون جسم می‌گردد. لذا هرچه دامنه افزایش یابد، داده‌های پردازش تصویر در سطح پایین‌تری نسبت به نقاط با دامنه‌ی پایین‌تر قرار می‌گیرند.

نکته‌ی جالب و قابل توجه آن است که، هنگامی که قطعه‌ای به طور مثال ۷۰۰۰ سیکل عمر دارد، پس از طی ۲۰۰۰ سیکل از دستگاه باز می‌شود (تحت بارگذاری نیست) و از سطح آن عکس‌برداری می‌شود، پس از پردازش تصویر به همان محدوده جوابی می‌رسیم که طی بارگذاری به آن در سیکل ۲۰۰۰ ام می‌رسیم، در حالی که به ظاهر هیچ‌گونه تغییری در آن رخ نداده و هیچ‌گونه ترکی در آن وجود ندارد که منجر به شکست آن شود، در واقع برای این گونه مواد نیز می‌توان گفت: "رنگ رخساره خبر می‌دهد از سرّ درون".

۳-۵- رشد ترک در قطعه‌ی تحت بارگذاری

شکست ناشی از خستگی را می‌توان ایجاد و رشد یک ترک در نمونه دانست که از لغزش پی‌درپی صفحه‌های کریستالوگرافیک^۱ روی هم ایجاد می‌شود (شکل ۳-۱۶-الف). این لغزش‌ها باعث پیدایش میکرو ترک‌ها^۲ در نمونه می‌شوند. اکثر اوقات وجود حفره‌ها و گسستگی‌های درون قطعه باعث تسریع این روند می‌گردد. اتصال میکرو ترک‌ها به یکدیگر باعث پیدایش ماکرو ترک‌ها^۳ یا همان ترک می‌گردد (شکل ۳-۱۶-ب). در این زمان ترک به اندازه کافی بزرگ شده است (بزرگ‌تر از ۳۰۰ میکرو متر) تا تحت تنش برشی قرار نداشته باشد، بلکه تحت تنش نرمال (بارگذاری) قرار می‌گیرد، لذا یک رشد پیوسته و سیکل به سیکل پیدا می‌کند. در نوک ترک، ۲ لبه‌ی پلاستیک به خاطر تمرکز تنش شکل می‌گیرد. هرچند این لبه‌ها به خاطر تنش برشی شکل می‌گیرند، اما زاویه‌ی آن‌ها با صفحه‌ی ترک حدود ۶۰ درجه می‌باشد و نه ۴۵ درجه. این موضوع به طور موثرتر توسط LEFM^۴ توضیح داده می‌شود [۵۵].

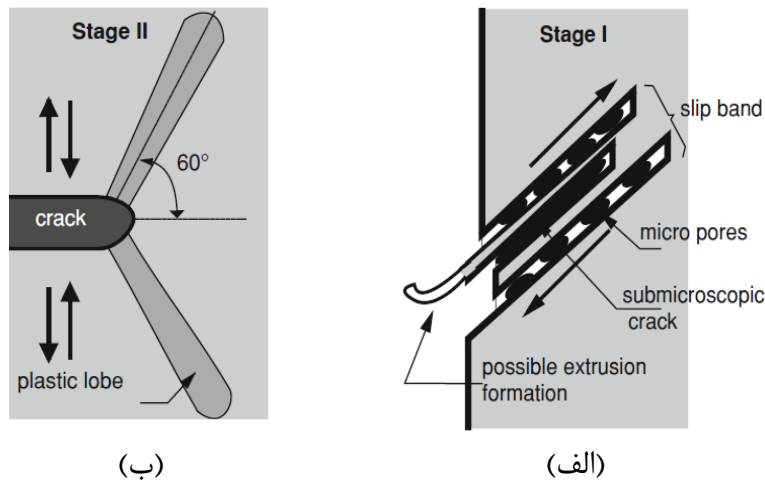
^۱ Crystallographic

^۲ Micro crack

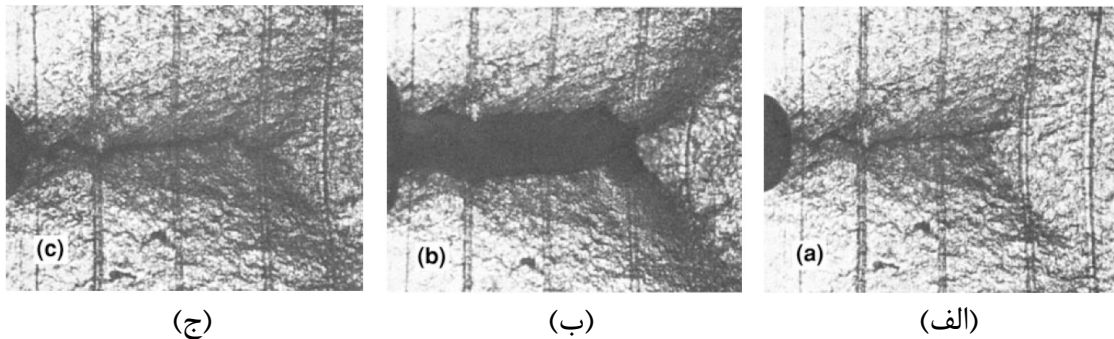
^۳ Macro crack

^۴ Linear Elastic Fracture Mechanics

شکل (۳-۱۷) این صفحات را به خوبی نشان می‌دهد.

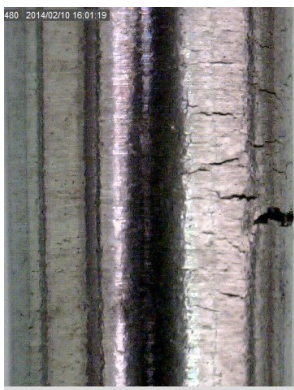


شکل (۳-۱۶) شماتیک نحوه‌ی شکل‌گیری و رشد ترک، (الف)- لغزش صفحه‌های کریستالوگرافیک، (ب)- پیدایش ترک [۵۵]

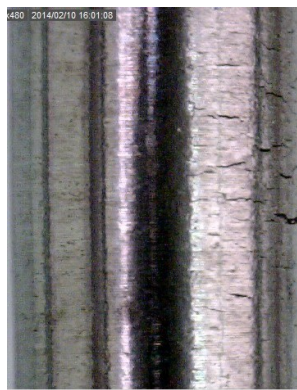


شکل (۳-۱۷) تغییر شکل لبه‌های نوک ترک هنگام بارگذاری سیکلی، (الف)- بعد از فشار، (ب)- بعد از کشش، (ج)- دوباره پس از کشش [۵۵]

شکل (۳-۱۸) مراحل رشد ترک، که باعث شکست قطعه می‌شود را نشان می‌دهد. لبه‌های ایجاد شده در نوک ترک تحت زاویه‌ی ۶۰ درجه به خوبی در این شکل نشان داده شده است. توجه شود که این نمونه شامل محاسبات پردازش تصویر نبوده و فقط به منظور مشاهده‌ی چگونگی رشد ترک انجام شده است. محاسبات پردازش تصویر شامل نمونه‌هایی است که قطعه توسط اسپری مخصوص تمیز شده و همچنین عکس‌های نمونه شامل ترک منجر به شکست ماده نمی‌باشد.



N=174 -۲



N=168 -۱



N=181 -۴



N=177 -۳



N=185 -۶

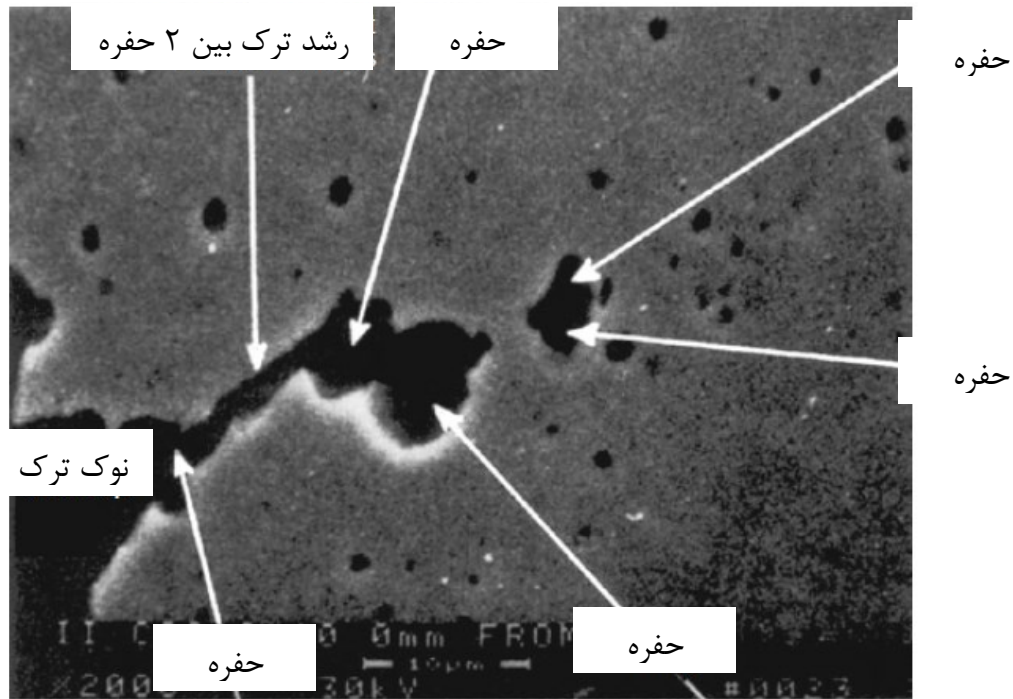


N=183 -۵

شکل (۳-۱۸) مراحل ایجاد و رشد ترک در نمونه‌ی تحت بارگذاری خستگی

وجود حفره‌ها و نابجایی‌ها در قطعه، اغلب نحوه‌ی رشد ترک را کنترل می‌کنند. به عبارتی باعث

می شوند ترک در یک مسیر صاف و از پیش تعیین شده رشد نکند، بلکه حین رشد به سمت این حفره‌ها تغییر جهت دهد [۵۵]. شکل (۱۹-۳) چگونگی انحراف ترک به سمت حفره‌های درون قطعه نشان می‌دهد.

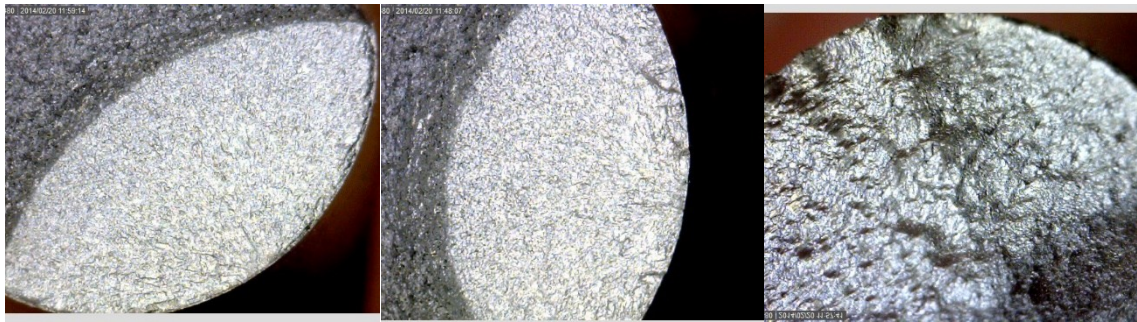


شکل (۱۹-۳) حفره‌های موجود در نمونه و مسیر رشد ترک [۵۵]

در شکل (۲۰-۳) این حفره‌ها در سطح برخی نمونه‌های شکسته شده‌ی این رساله نشان داده شده است. شکل (۲۱-۳) سطح شکست را برای نمونه‌های آزمایش شده گروه T5 نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دامنه‌ی کرنش، سطح شکست ماده نیز سخت‌تر و یا به عبارتی دارای به هم ریختگی بیشتری می‌شود.



شکل (۳-۲۰) وجود حفره‌های کنترل کننده مسیر رشد ترک در نمونه‌های فولاد SS304



Mean = ۰.۱, Apm = ۰.۱۵-۳

Mean = ۰.۱, Apm = ۰.۲۰-۲

Mean = ۰.۱, Apm = ۰.۴۰-۱

شکل (۳-۲۱) سطح شکست نمونه‌های گروه T5

۳-۶- نتیجه گیری

آزمایش‌های خستگی کم چرخه بر روی فولاد SS304 توسط دستگاه INSTRON 8802 به منظور تخمین عمر خستگی با توجه به رویکرد انرژی حلقه‌ی هیستریزیس انجام شد. همچنین با استفاده از تکنیک پردازش تصویر سعی شد عمر خستگی این فولاد تخمین زده شود. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- انرژی حلقه هیستریزیس، یا انرژی آزاد شده در طی سیکل‌های خستگی، پارامترهای مهم و از طرفی دقیق برای تخمین عمر مواد به شمار می‌رود.

۲- به طور کلی در نظر گرفتن انرژی آزاد شده در سیکل‌های میانی نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به انرژی سیکل‌های ابتدایی و انتهایی ماده دارد. این موضوع بدین دلیل اتفاق می‌افتد که در حلقه‌های هیستریزیس یک نمونه، هنگامی که منحنی انرژی آن‌ها رسم می‌شود، در ابتدا و انتهای منحنی به ترتیب شاهد صعود و نزول در نمودار هستیم؛ در حالی که در سیکل‌های میانی، منحنی حالتی پایدار و یکنواخت به خود می‌گیرد.

۳- اگر بخواهیم درصد سیکل‌های طی شده را مبنایی برای محاسبه‌ی تخمین عمر قرار دهیم، بهتر است ۱۰۰٪ سیکل‌ها مورد استفاده قرار داد، زیرا هرچه درصد استفاده از سیکل‌ها افزایش می‌یابد، نتایج به مراتب دقیق‌تری حاصل خواهد شد.

۴- برای هر حالت استفاده از انرژی، ۲ رابطه پیشنهاد شد، در تمامی حالت‌ها رابطه‌ی (۳-۶) دارای جواب دقیق‌تر و بهتری از رابطه‌ی (۳-۵) می‌باشد.

۵- با استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌توان به تخمین عمر خستگی مواد پرداخت. با استفاده از این روش حتی بعد از اعمال بارگذاری نیز می‌توان تخمینی برای عمر باقیمانده‌ی نمونه به دست آورد. برای استفاده از این روش کفایت خصوصیتی در سطح نمونه پیدا کرد که در طی بارگذاری تغییر کند.

۶- در این تحقیق، رشد ریزترک‌ها و در نتیجه ایجاد نقاطی سیاه بر روی تصویر مبنای محاسبات پردازش تصویر می‌باشد. مشاهده شد هرچه نمونه به سیکل‌های انتهایی نزدیک می‌شود؛ رشد ریزترک‌ها افزایش می‌یابد و لذا نمودار حاصله از تصاویر، پردازش تصویر سیر نزولی طی می‌کند که در واقع گویای این موضوع می‌باشد که تصویر تیره‌تر شده است.

۷- با افزایش دامنه‌ی جابجایی نمونه‌های مورد آزمایش، تصاویر به دست آمده از پردازش تصویر در سطح پایین‌تری از تصاویر دامنه‌های کمتر قرار می‌گیرد. این موضوع نیز گواه بر این قضیه می‌باشد که هرچه دامنه بیشتر شود، در واقع سطح ریزترک‌ها و در نتیجه نقاط تیره‌ی تصویر نمونه افزایش می‌یابد.

فصل ۴

تحلیل عددی، تحت بارگذاری خستگی و

مقایسه نتایج عددی و تجربی

۴-۱- مقدمه‌ای بر تحلیل عددی

افزایش روز افزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آن‌ها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه زمینه‌های علمی و فنی شده که حوزه مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است.

در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم ایجاد می‌شود و به‌کارگیری روش‌های کلاسیک موجود (به عنوان مثال تئوری الاستیسیته در مورد توزیع تنش) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده، با شرایط مرزی و اولیه متنوع می‌شود که عملاً حل این معادلات به روش تحلیلی را غیرممکن می‌سازد و باید برای حل از روش‌های عددی کمک گرفت.

در میان روش‌های عددی متعدد موجود برای حل این‌گونه مسائل، سه شاخه را می‌توان به عنوان اصلی‌ترین روش‌های شناخته شده نام برد که به ترتیب پیدایش عبارتند از روش اجزاء محدود (FEM)، روش المان مرزی (BEM) و روش بدون المان (EFM).

۴-۱-۱- روش اجزای محدود

روش اجزای محدود روشی است که برای حل بسیاری از مسائل شاخه‌ی مهندسی به کار می‌رود و دارای دو تقسیم بندی اولیه است. در یکی از این تقسیم‌بندی‌ها برای به دست آوردن تغییر مکان در نقاط اتصال اجزا و محاسبه‌ی نیروی اعضای سازه‌ها از اجزای مجزا استفاده می‌شود. این روش که تحلیل ماتریسی سازه‌ها نام دارد، دارای نتایجی مطابق با تحلیل کلاسیک سازه‌هاست. در تقسیم‌بندی نوع دوم از اجزای محیط پیوسته برای تعیین حل‌های تقریبی در مباحث انتقال گرما، مکانیک سیالات و مکانیک

جامدات استفاده می‌شود. در این روش حل تقریبی پارامترهای مطلوب در نقاطی که گره^۱ نامیده می‌شوند، به دست می‌آیند. اگر چه مفهوم اجزای محدود در واقع برای شاخه‌ی دوم تقسیم‌بندی فوق مصداق پیدا می‌کند؛ ولی این روش هر دو تقسیم‌بندی را در بر می‌گیرد به طوری که برنامه‌های جامع رایانه‌ای که بر اساس این روش نوشته می‌شوند، قابلیت حل هر دو گروه از مسائل را دارند.

توسط روش اجزای محدود، مفاهیم متعددی از ریاضیات با هم پیوند خورده تا دسته‌ای از معادلات خطی و یا غیرخطی ایجاد شوند. این معادلات که تعداد آن‌ها گاه از ۲۰۰۰۰ معادله نیز فراتر می‌رود، به قدرت محاسباتی بالا توسط رایانه نیاز دارند. بنابراین در صورت عدم دسترسی به رایانه، این روش ارزش کاربردی چندانی نخواهد داشت.

در اوایل دهه ۱۹۶۰ مهندسان از این روش برای حل تقریبی مسائل تحلیل تنش، جریان سیال، انتقال گرما و ... استفاده کردند. انتشار کتابی در سال ۱۹۵۵ توسط آرجیریس^۲ درباره تئوری‌های انرژی و روش‌های ماتریسی، پایه گسترش بیشتر در بررسی اجزای محدود را بنا نهاد. اولین کتاب در زمینه روش اجزای محدود در سال ۱۹۶۷ به وسیله چونگ^۳ و زینکویچ^۴ منتشر شد. در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ تحلیل اجزای محدود برای مسائل غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ بکار برده شد. کتاب^۵ درباره محیط‌های پیوسته غیرخطی در سال ۱۹۷۲ به چاپ رسیده و پایه‌های ریاضیاتی این روش در دهه ۱۹۷۰ بنیان نهاده شد.

امروزه با پیشرفت و توسعه رایانه‌های بزرگ، نسخه‌های تجاری نرم‌افزارهایی که بر اساس این روش به تحلیل مسائل پیچیده مهندسی می‌پردازند، به بازار آمده و سهم بسزایی را در طراحی و تحلیل قطعات جدید بر عهده گرفته است. روند کلی در اجزای محدود، تقسیم‌بندی مدل به اجزای کوچک‌تر (المان)،

^۱ Node

^۲ Argyris

^۳ Chung

^۴ Zienkiewicz

^۵ Oden

تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر المان‌ها به دستگاه معادلات چند مجهولی، حل معادلات در گره‌ها و یافتن جواب در دیگر نقاط مدل به کمک توابع شکل المان‌ها می‌باشد. المان‌ها متناسب با شکل مسئله می‌توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند.

از جمله نرم‌افزارهایی که قابلیت مدل‌سازی خستگی را دارند، می‌توان به نرم‌افزارهای زیر اشاره کرد:

۱- Abaqus CAE

۲- ANSYS

۳- FEMFat^۱

۴- MSC Nastran/MSC Fatigue

۵- Comsol Multiphysics

برای تشخیص عمر خستگی هر کدام از نرم‌افزارهای فوق به طور کلی از دیدگاه‌های زیر پیروی می‌کنند:

۱- خستگی از دیدگاه کرنش

۲- خستگی از دیدگاه تنش

۳- قوانین ماینر (یا ماینر بهینه شده)

برای مدل‌سازی رفتار خستگی فولاد SS304، ابتدا سعی شد از نرم‌افزار اباکوس استفاده شود. نرم‌افزار اباکوس از نظر تحلیلی، نرم‌افزاری بسیار قوی در نه تنها در زمینه مکانیک بلکه تقریباً در تمامی علوم مهندسی می‌باشد. اما در زمینه پیش‌بینی عمر خستگی شاید بتوان گفت از دیگر نرم‌افزارهای موجود کمی عقب مانده است. نقص عمده این نرم‌افزار در تحلیل خستگی زمان بسیار طولانی آن در بارگذاری می‌باشد. هنگامی که مدل‌سازی با این نرم‌افزار انجام شد، مشاهده شد هر یک سیکل تقریباً ۳۰ دقیقه زمان می‌برد. یعنی اگر نمونه‌ای به طور مثال ۱۰۰۰ سیکل برای شکست لازم

^۱ Finite Element Method Fatigue

داشته باشد، تقریباً ۲۰ روز زمان می‌گیرد.

نرم‌افزار انسیس نیز دارای ماژول خستگی می‌باشد، اما این ماژول فقط بر اساس منحنی S-N به پیش‌بینی عمر خستگی می‌پردازد.

نرم‌افزار FEMFat بر اساس قوانین ماینر و ماینر بهینه شده به تحلیل خستگی می‌پردازد که شاید چندان دقیق نباشد. این نرم‌افزار به تنهایی قابلیت مدل‌سازی و مش‌زدن را ندارد و باید به صورت ترکیبی با نرم‌افزارهایی مانند اباکوس یا انسیس مورد استفاده قرار بگیرد.

نرم‌افزار MSC nastran در ترکیب با نرم‌افزار MSC Fatigue نیز قابلیت تحلیل خستگی را بر اساس دیدگاه تنش و کرنش دارد، اما محیط کاربری آن محیطی گرافیکی نمی‌باشد و مدل‌سازی و تحلیل کاملاً در محیطی کد نویسی شده صورت می‌گیرد، به همین دلیل تحلیل در این نرم‌افزار کمی پیچیده و سخت می‌باشد.

شاید بهترین نرم‌افزار موجود برای تحلیل خستگی را بتوان نرم‌افزار COMSOL دانست. این نرم‌افزار با استفاده از دیدگاه‌های تنش و کرنش به بررسی عمر ماده می‌پردازد. این نرم‌افزار علاوه بر اینکه دارای سرعت تحلیل به نسبت بالایی می‌باشد دارای محیط کاربری آسان همانند نرم‌افزارهای اباکوس یا انسیس می‌باشد.

۴-۲- معرفی نرم‌افزار COMSOL

یک مجموعه کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزاء محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. این نرم‌افزار می‌تواند در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد. همچنین فرصتی برای حل مشکل به عنوان یک فرمول ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیکی (انتخاب مدل فیزیکی، به عنوان مثال مدل فرایند انتشار) را به کاربر

می‌دهد. بدیهی است، در هر مورد سیستم معادلات حل خواهد شد، تفاوت فقط در امکان استفاده از سیستم‌های فیزیکی و جسمی و واحدها نهفته است. در این نرم‌افزار می‌توان از معادلات پیش‌تعریف‌شده برای اکثر پدیده‌های انجام گرفته در علوم و فناوری استفاده کرد، مانند انواع روش‌های انتقال حرارت و برق، تئوری الاستیسیته، نفوذ مولکولی و انتقال جرم، انتشار موج و جریان سیال.

با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics می‌توان طراحی و شبیه‌سازی پروژه‌های مهندسی برق، مکانیک، علوم زمین، شیمی، فیزیک، نجوم و کوانتوم را انجام داد. همچنین این برنامه امکان تعامل با نرم‌افزارهای مهندسی دیگر مانند کتیا و متلب را دارد.

این نرم‌افزار در سال ۱۹۸۶ توسط دانشجویان مؤسسه سلطنتی فناوری سوئد ایجاد شد. نام قبلی این نرم‌افزار FEMLAB بوده است و از سال ۲۰۰۵ به COMSOL Multiphysics تغییر نام داده است.

۴-۲-۱- نحوه‌ی تخمین عمر در نرم‌افزار کمسول

تخمین عمر در نرم‌افزار کمسول بر اساس معیارهای زیر صورت می‌گیرد [۵۸]:

۱- تخمین عمر بر اساس تنش

Findley Criterio ✓

Matake Criterion ✓

Maximum Normal Stress Criterion ✓

۲- تخمین عمر بر اساس کرنش

Smith-Watson-Topper(SWT) Model ✓

Wang-Brang Model ✓

در ادامه به تشریح مدل‌های ذکر شده می‌پردازیم:

۴-۲-۱-۱- دیدگاه تنش- Findely

$$\left(\frac{\Delta\tau}{2} + \kappa \cdot \sigma_n\right)_{max} = f \quad (1-4)$$

در این رابطه κ و f ثابت‌های ماده می‌باشند. $\Delta\tau$ بیشترین تنش برشی روی یک صفحه و σ_n بیشترین تنش نرمال در همان صفحه است.

۴-۲-۱-۲- دیدگاه تنش- Matake

$$\left(\frac{\Delta\tau}{2}\right)_{max} + \kappa \cdot \sigma_n = f \quad (2-4)$$

این رابطه همانند رابطه فایندلی می‌باشد با این تفاوت که تنش برشی روی صفحه بحرانی در نظر گرفته می‌شود و تنش نرمال روی آن صفحه محاسبه می‌گردد.

۴-۲-۱-۳- دیدگاه تنش- Maximum Normal Stress

$$(\Delta\sigma_n)_{max} = f \quad (3-4)$$

در این رابطه فقط بیشترین تنش نرمال روی صفحه در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲-۱-۴- دیدگاه کرنش- SWT

$$\sigma_n \cdot \left(\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}\right)_{max} = \frac{\sigma_{f'}^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_{f'} \varepsilon_{f'} (2N_f)^{b+c} \quad (4-4)$$

در این رابطه

N_f : عمر ماده (تعداد سیکل طی شده تا شکست)

$\sigma_{f'}$: ضریب مقاومت خستگی

$\varepsilon_{f'}$: ضریب شکست خستگی

b : توان مقاومت خستگی

c : توان شکست خستگی

می باشد.

۴-۲-۱-۵- دیدگاه کرنش- Wang-Brown

$$\left(\frac{\Delta\gamma}{2}\right)_{max} + S\Delta\varepsilon_n = (1 + \nu + (1 - \nu)S) \frac{\sigma_{f'}}{E} (2N_f)^{2b} + \frac{(3 + S)}{2} \quad (۵-۴)$$

این مدل بر اساس پیدا کردن بیشترین کرنش برشی $\Delta\gamma$ استوار است. پارامتر S برای خستگی کم چرخه بین ۱ و ۲/۴ تعریف شده است.

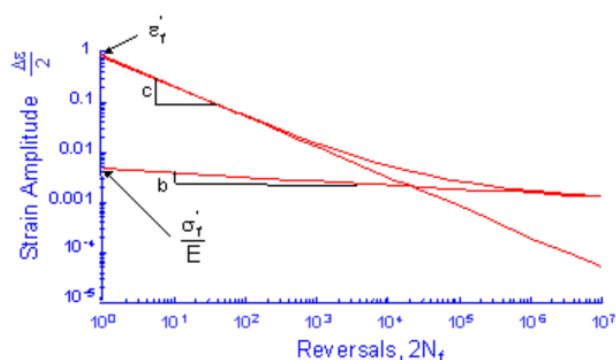
به منظور تخمین عمر در این تحقیق از مدل SWT استفاده شده است که در واقع پایه و اساس آن روابط کوفین-مانسون به عبارتی رابطه‌ی بهینه شده‌ی کوفین-مانسون می باشد. با نگاهی به رابطه کوفین-مانسون و مدل SWT داریم:

$$SWT: \sigma_n \cdot \left(\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}\right)_{max} = \frac{\sigma_{f'}^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_{f'} \varepsilon_{f'} (2N_f)^{b+c} \quad (۶-۴)$$

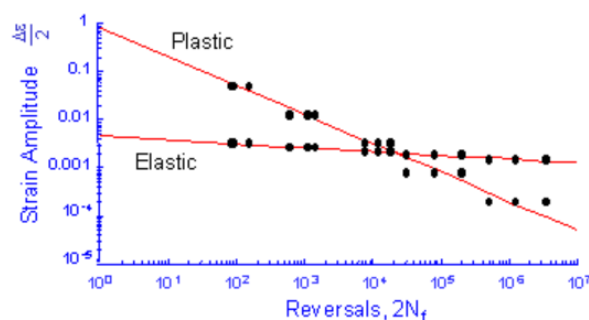
$$\text{coffin - manson: } \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7-4)$$

بخش اول رابطه‌ی (۶-۴) و (۷-۴) محدوده‌ی الاستیک، و بخش دوم محدوده‌ی پلاستیک را در نظر می‌گیرد، که در واقع نشان دهنده‌ی این موضوع می‌باشد که این تئوری فقط در محدوده‌ی الاستیک یا LEFM معتبر نیست، بلکه در نواحی الاستو پلاستیک نیز معتبر می‌باشد.

در شکل (۱-۴) و شکل (۲-۴) ضرایب معادله‌های (۶-۴) و (۷-۴) نشان داده شده‌است. این شکل‌ها به درستی نشان می‌دهند که تئوری فوق در واقع جمع نواحی الاستیک و پلاستیک می‌باشد.



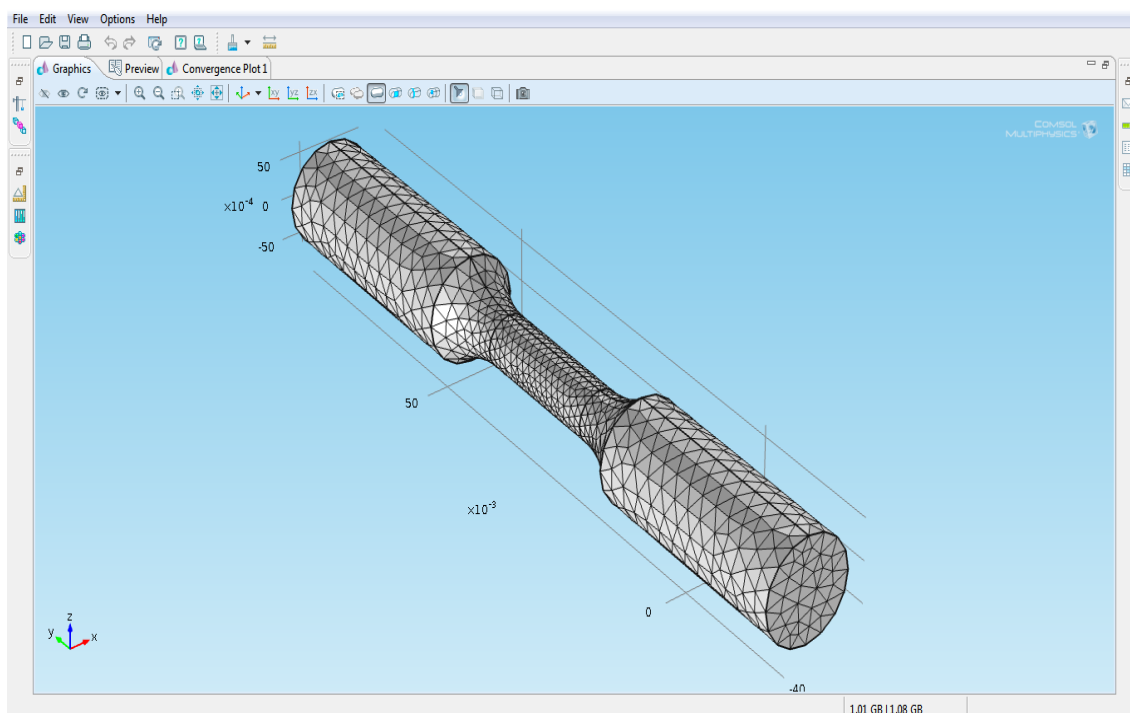
شکل (۱-۴) نحوه‌ی بدست آوردن ضرایب معادله‌های SWT و کوفین-مانسون



شکل (۲-۴) محدوده‌ی الاستیک و پلاستیک در معادله‌های SWT و کوفین-مانسون

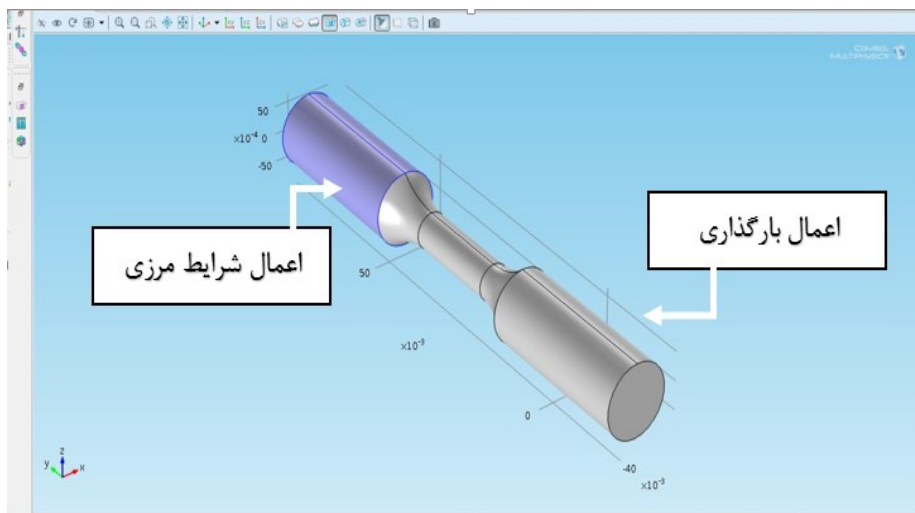
برای شبیه سازی با شرایط واقعی در آزمایشگاه، نمونه به طور کامل در محیط نرم افزار مدل شد.

همچنین شرایط مرزی و بارگذاری دقیقاً بر اساس شرایط آزمایش‌های تجربی تعریف شد. در شکل (۳-۴) نمونه مدل‌سازی شده و مش زده شده در نرم‌افزار کمسول نشان داده شده است. همچنین شرایط مرزی و بارگذاری نمونه در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است مش بندی قطعات در نرم‌افزار کمسول به صورت خودکار صورت می‌گیرد و کاربر فقط برای نواحی حساس می‌تواند مش‌های کوچک‌تری انتخاب کند تا به جواب دقیق‌تری برسد.



شکل (۳-۴) قطعه‌ی مش زده شده در نرم‌افزار کمسول

لازم به ذکر است نرم‌افزار کمسول نتایج طول عمر را بر حسب زمان نشان می‌دهد، که با توجه به فرکانس بارگذاری یعنی ۳ هرتز می‌توان تعداد سیکل‌ها یا همان عمر ماده را محاسبه کرد.



شکل (۴-۴) موقعیت اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در قطعه مدل شده در نرم افزار کمسول

آزمایش‌های صورت گرفته برای گروه T1، T2 و T3 به صورت زیر می‌باشد:

جدول (۱-۴) آزمایش‌های گروه T1، T2، T3-نتایج عددی و تجربی

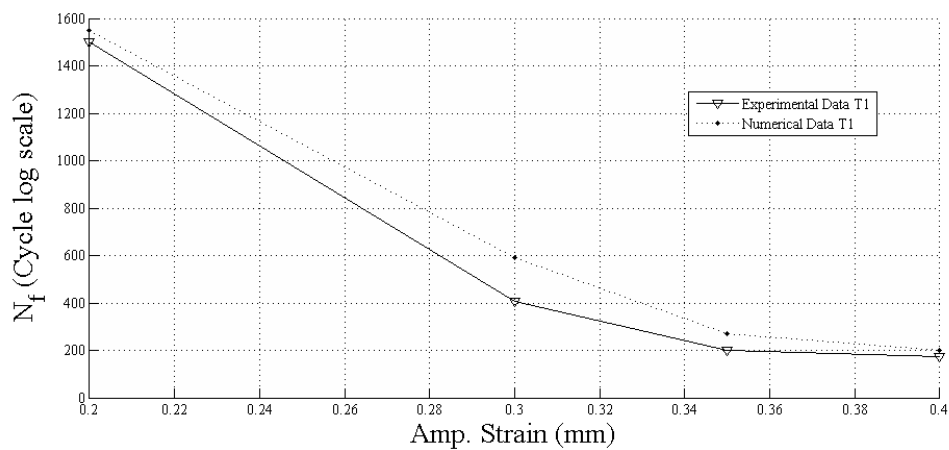
Life(Cycle) Numerical	Life(Cycle) Experimental	Amp Strain(mm)	Mean Strain(mm)	Group	Sub Group	Number
1550	1503	0.20	0.00	T1	T1.1	1
592	408	0.30	0.00	T1	T1.2	2
269	201	0.35	0.00	T1	T1.3	3
201	173	0.40	0.00	T1	T1.4	4
4201	3990	0.17	0.02	T2	T2.1	5
1653	1521	0.20	0.02	T2	T2.2	6
802	654	0.25	0.02	T2	T2.3	7
689	548	0.30	0.02	T2	T2.4	8
8906	8805	0.15	0.05	T3	T3.1	9
1706	1601	0.20	0.05	T3	T3.2	10
796	680	0.25	0.05	T3	T3.3	11
301	235	0.35	0.05	T3	T3.4	12
269	180	0.38	0.05	T3	T3.5	13

نتایج بدست آمده و مقایسه آن‌ها برای گروه T1، T2 و T3 به ترتیب در شکل (۴-۵)، شکل (۴-۶)

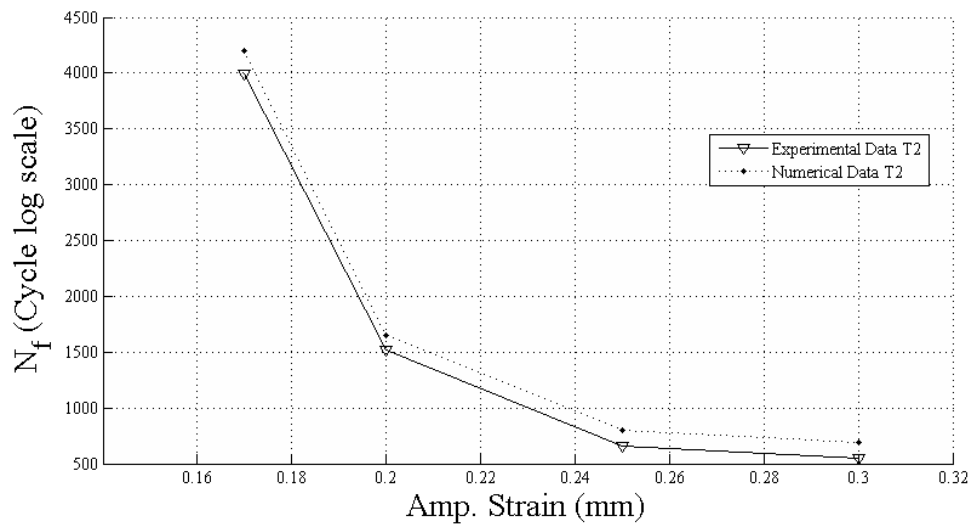
و شکل (۷-۴) نشان داده شده است. همچنین شکل (۸-۴) نمودار ۳ بعدی مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی را با یکدیگر نشان می‌دهد. پارامترهای مورد نیاز برای مدل SWT در قسمتی تحت عنوان "کتابخانه مواد" وجود دارد (جدول ۲-۴). تعیین پارامترهای دیگر مانند تنش نهایی، تنش شکست و ضریب پواسون توسط کاربر صورت می‌گیرد.

جدول (۲-۴) پارامترهای به کار رفته در نرم افزار کمسول

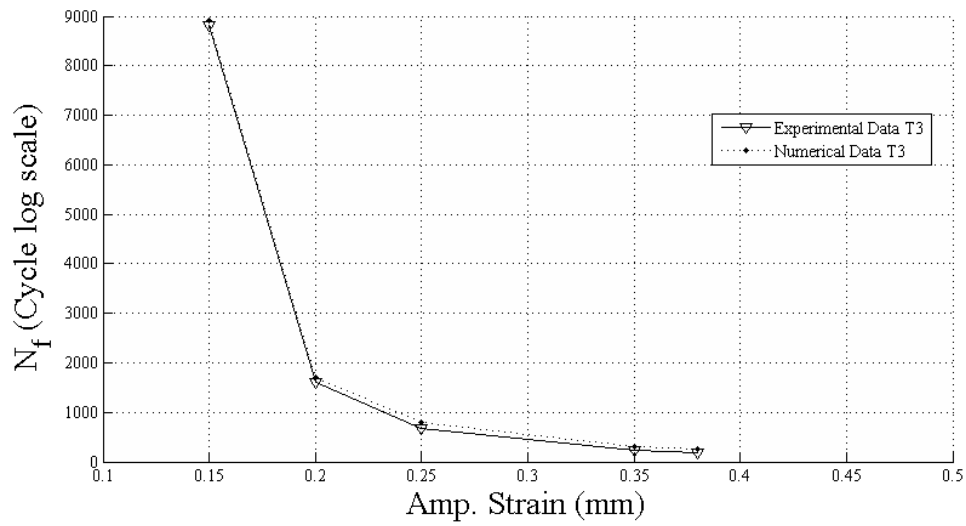
σ_f' : ضریب مقاومت خستگی	۱۳۲۳ Mpa
ϵ_f' : ضریب شکست خستگی	۰/۳۷۵
b : توان مقاومت خستگی	-۰/۰۹۷
C : توان شکست خستگی	-۰/۶



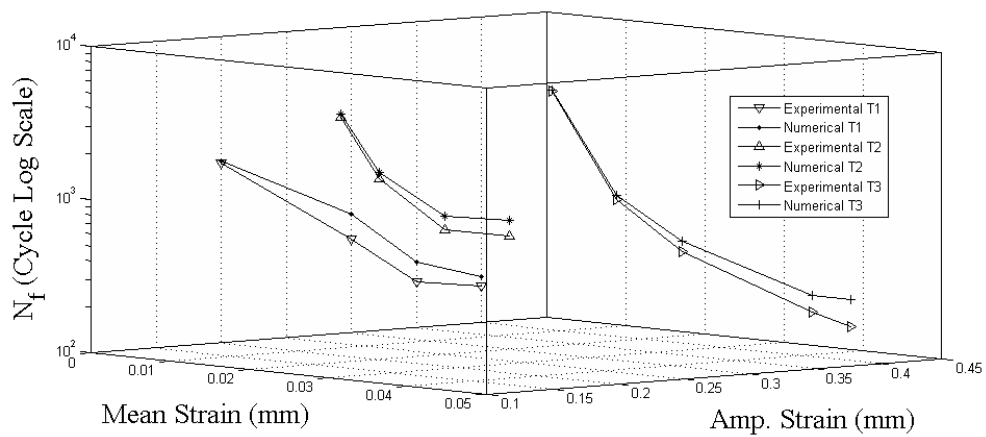
شکل (۵-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T1



شکل (۶-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T2



شکل (۷-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه T3



شکل (۸-۴) مقایسه نتایج عددی و تجربی گروه‌های T1, T2, T3

دلیل اختلاف در نمودارهای تخمین عمر را می‌توان، اولاً در نقص تئوری‌های ارائه شده و یا نقص‌های ماده دانست، همان‌طور که پیش از آن ذکر شد، وجود حفره‌ها و گسستگی‌ها در قطعه باعث کاهش عمر ماده می‌شود.

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتایج

با توجه به مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک و آزمایش‌های خستگی انجام شده بر روی نمونه‌های فولاد SS304، همچنین پیش‌بینی عمر بر اساس تکنیک پردازش تصویر و مدل‌سازی در نرم‌افزار کمسول می‌توان نتایج زیر را به دست آورد.

۱- در مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک مشاهده شد مدول یانگ باربرداری، همواره مقدار کمتری از مدول یانگ بارگذاری دارد و با افزایش کرنش پلاستیک حداکثر، کاهش می‌یابد.

۲- اثر باوشینگر که به معنای جهت‌دار بودن سفتی می‌باشد، در فولاد SS304 مشاهده شد، و نشان داده شده تأثیر بسزایی در مدل‌سازی رفتار پلاستیک مخصوصاً در حالت باربرداری دارد. همچنین مشاهده شد مقدار ضریب اثر باوشینگر با افزایش کرنش پلاستیک حداکثر، کاهش می‌یابد.

۳- استحکام تسلیم فولاد SS304 به ازای افسست‌های مختلف به دست آمد، و مشاهده شد میزان افسست در نظر گرفته شده تأثیر قابل توجهی در استحکام تسلیم ماده دارد.

۴- در مدل‌سازی رفتار الاستیک-پلاستیک فولاد SS304 در قسمت باربرداری پلاستیک مشاهده شد با افزایش کرنش پلاستیک خطای قابل ملاحظه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و معادلات پیشنهادی پیشین وجود دارد؛ لذا رابطه‌ی جدیدی برای قسمت باربرداری پلاستیک ماده معرفی شد که تطابق بسیار خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

۵- انرژی حلقه هیستریزیس، یا انرژی آزاد شده در طی سیکل‌های خستگی، پارامتر مهم و از طرفی دقیق برای تخمین عمر مواد به شمار می‌رود.

۶- به طور کلی در نظر گرفتن انرژی آزاد شده در سیکل‌های میانی نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به انرژی سیکل‌های ابتدایی و انتهایی ماده دارد. این موضوع بدین دلیل اتفاق می‌افتد که در حلقه‌های هیستریزیس یک نمونه، هنگامی که منحنی انرژی آن‌ها رسم می‌شود، در ابتدا و

انتهای منحنی به ترتیب شاهد صعود و نزول در نمودار هستیم در حالی که در سیکل‌های میانی منحنی حالتی پایدار و یکنواخت به خود می‌گیرد.

۷- اگر بخواهیم درصد سیکل‌های طی شده را مبنایی برای محاسبه‌ی تخمین عمر قرار دهیم، بهتر است ۱۰۰٪ سیکل‌ها مورد استفاده قرار داد؛ زیرا هرچه درصد استفاده از سیکل‌ها افزایش می‌یابد، به نتایج به مراتب دقیق‌تری دست پیدا می‌کنیم.

۸- برای هر حالت استفاده از انرژی ۲ رابطه پیشنهاد شد، در تمامی حالت‌ها رابطه‌ی (۳-۶) دارای جواب دقیق‌تر و بهتری از رابطه‌ی (۳-۵) می‌باشد.

۹- با استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌توان به تخمین عمر خستگی مواد پرداخت. با استفاده از این روش حتی بعد از اعمال بارگذاری نیز می‌توان تخمینی برای عمر باقیمانده‌ی نمونه به دست آورد. برای استفاده از این روش کفایت خصوصیتی در سطح نمونه پیدا کرد که در طی بارگذاری تغییر کند.

۱۰- در این تحقیق، رشد ریزترک‌ها و در نتیجه ایجاد نقاطی سیاه بر روی تصویر مبنای محاسبات پردازش تصویر می‌باشد. مشاهده شد هرچه نمونه به سیکل‌های انتهایی نزدیک می‌شود، رشد ریزترک‌ها افزایش می‌یابد. لذا نمودار حاصله از تصاویر، پردازش تصویر سیر نزولی طی می‌کند که در واقع گویای این موضوع می‌باشد که تصویر تیره‌تر شده است.

۱۱- با افزایش دامنه‌ی جابجایی نمونه‌های مورد آزمایش، تصاویر به دست آمده از پردازش تصویر در سطح پایین‌تری از تصاویر دامنه‌های کمتر قرار می‌گیرد، که این موضوع نیز گواه بر این قضیه می‌باشد که هرچه دامنه بیشتر شود، در واقع سطح ریزترک‌ها و در نتیجه نقاط تیره‌ی تصویر نمونه افزایش می‌یابد.

۱۲- با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود به خوبی می‌توان رفتارهای نرم شونده‌ی و سخت‌شونده‌ی ماده را پیش‌بینی کرد. اما این نرم‌افزارها در تخمین عمر ماده کمی ضعف دارند. نمونه SS304 در نرم‌افزار کمسول مدل‌سازی شد و در تحت بارگذاری خستگی قرار

گرفت، تخمین عمر در نرم‌افزار به طور کلی بیشتر از نمونه عمر واقعی ماده بود که دلیل آن را می‌توان نقص تئوری‌های ارائه شده در زمینه پیش‌بینی خستگی و همچنین نقایص ریز ساختاری موجود در نمونه ساخته شده آزمایشگاهی دانست. چرا که وجود حفره‌ها و گسستگی‌ها در ماده هنگام ریخته‌گری و یا تراشکاری باعث تشکیل و رشد هرچه سریع‌تر ترک‌ها می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌های خستگی صورت گرفته بر روی نمونه‌های SS304 و همچنین مدل‌سازی عددی و تخمین عمر بر اساس تکنیک پردازش تصویر، پیشنهادهای زیر جهت تحقیق و مطالعه بیشتر در این زمینه ارائه می‌گردد:

۱- در صورت وجود امکانات و بهره‌مندی از سری جدیدتر دستگاه‌های آزمایش خستگی اینسترون، می‌توان نمونه‌ها را تحت بارگذاری چند محوره به صورت ترکیبی از بارگذاری محوری کششی-فشاری و بارگذاری پیچشی قرار داد.

۲- بالا بردن دقت تراشکاری و صافی سطح با استفاده از عملیات سنگ زنی و یا روش لپینگ (یک فرایند سایشی، که توسط ذرات ساینده در لایه‌هایی از سیال که بین ابزار لپینگ و قطعه کار قرار می‌گیرد) که می‌تواند به از بین بردن نقص‌های بسیار ریز در حد میکرون و همچنین یکدستی نمونه‌ها کمک کند که این امر مستلزم هزینه بسیار زیاد جهت تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

۳- می‌توان تأثیر عوامل مختلف مانند فرکانس بارگذاری، دما، قطر نمونه و صافی سطح را در عمر یک ماده بررسی کرد.

۴- با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته‌تر در عکس‌برداری، می‌توان به توسعه‌ی علم پردازش تصویر در خستگی کمک کرد. عکس‌برداری در فرکانس‌های بالا و همچنین با قابلیت بزرگنمایی

بیشتر مستلزم وجود دوربین‌های پیشرفته‌تر می‌باشد.

۵- با تعریف استاندارد واحد برای شرایط عکس‌برداری می‌توان به ارائه روابط خستگی بر اساس پردازش تصویر پرداخت. در حال حاضر به دلیل جدید بودن این تکنیک روابط تئوری در این زمینه وجود ندارد.

۶- می‌توان از نمونه‌های توخالی برای انجام آزمایش استفاده کرد. البته تهیه و یا ساخت این نمونه‌ها در ابعاد کوچک بسیار مشکل و پرهزینه می‌باشد.

۷- نرم‌افزارهای موجود در زمینه پیش‌بینی عمر خستگی مواد کمی نقص دارند، می‌توان کد نویسی در این نرم‌افزارها و یا لینک کرده آن‌ها با یکدیگر دقت حل‌های عددی را بالا برد.

منابع

- [1] W. A. J. Albert, (1837), "About drive cables on the resin", *Archive for mineralogy geology Mining and Metallurgy*, Vol. 10, pp. 215-234.
- [2] W. J. M. Rankine, (1843), "On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the mean of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction", *J. Franklin Inst.*, Vol. 36, pp. 178-180.
- [3] F. Braithwaite, (1854), "On the fatigue and consequent fracture of metals", *Institution of Civil Engineers (Minutes of Proceedings)*, Vol. 13, pp. 463-474.
- [4] R. A. Smith, (1990), "The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue", *Fatigue 90*, Vol. 4, EMAS, Birmingham.
- [5] J. E. McConnell, (1850), "On the deterioration of railway axles". *Proc. Inst. Mech. Eng*, pp. 5-19.
- [6] A. Wohler, (1858) "Report fiber Experiments which. Upon the royal Niederschlesisch-Brandenburg railroad with apparatus for measuring the deflection and Verde Hung of railway axles", *J. Construction*, Vol. 8, pp. 641- 652..
- [7] A. Wohler, (1860) "Attempts to determine the forces acting on the rail car axles", *J. Construction*, Vol. 10, pp. 583-616.
- [8] "Wohler's experiments on the strength of metals". (1867), *mag. Engineering*, Vol. 4, pp. 160-161.
- [9] H. J. Gough, "The Fatigue of Metals", (1924) London, Scott, Greenwood.
- [10] J. Bauschinger, (1886), "On the reduction of elasticity and the strength of the iron and steel by stretching and squeezing, by heating", *Mitt. Mech.-Tech. Lab. Miinch.* Vol. 13, pp. 1-115.
- [11] J. Bauschinger, (1881) "Liber reducing the elasticity and the elasticity modulus of various metals". *Civil Engineer*, Vol. 27, pp. 289-348.
- [12] Kirsch, (1898), "The theory of elasticity and the needs of the Strength of Materials", *Journal of the Association of German Engineers*, Vol. 42, pp, 797-807.
- [13] J. A. Ewing and J. C. W. Humfrey, (1903), "The fracture of metals under repeated alternations of stress". *Phil. Trans. Royal Society*, London, Vol. CC, pp. 241 - 250

- [14] M. Z. Polanyi, (1934), “an art that could make a crystal plastically”, *Magazine for Physics*, Vol. 89, pp. 660-664.
- [15] E. Orowan, (1939), “Theory of the fatigue of metals”. *Proc. Royal Society, Set. A*, Vol. 171, pp. 79-105.
- [16] W. D. Douglas, (June 1918), “Methods employed at the Royal Aircraft Establishment for the experimental determination of the ultimate strength of aeroplane structures”, *Advis. Comm. Aero. Rep. Memo*, No. 476.
- [17] E. Heyn, (1914), “The notching effect and its significance for the design engineer”, *ZVVDI Vol. 58.*, pp. 383-391.
- [18] T. E. Stanton and R. G. C. Batson, (1917), “The effect on the resistance to fatigue of crankshafts of a variation on the radius of curvature of fillets”, *Advisory Committee for Aeronautics (Great Britain), Internal Combustion Engine Sub Committee Vol. 15*, pp. 6.
- [19] A. A. Griffith, (1921), “Stress concentrations in design and practice”, *Rep. Brit. Ass.*, pp. 316-324.
- [20] E. Gassner, (1939), “Strength tests with repeated stress in aircraft”, *German Sky Guard*, Vol. 6, pp. 61-64.
- [21] E. Lehr, (1941) “Shape and material utilization”. *Steel and iron.*, Vol. 61, pp 54-63.
- [22] R. G. Batson, J. Bradley, (1931), “Static and endurance tests of laminate springs, made of carbon and alloy steels”, *Department of Scientific and Industrial Research, London*, Special Rep. No. 13. Researches on Springs No. 6.
- [23] A. Thum and W. Bautz, (1935) “Causes the increase of the durability hold down rods”. *Research in the field of engineering* Vol. 6, pp. 3-7.
- [24] O. Graf, (1929), “The fatigue strength of materials and structural elements”. Julius Springer, Berlin.
- [25] M. A. Miner, (1945), “Cumulative damage in fatigue”. *Trans. ASME J. appl. Mech.*, Vol. 12, pp. A159-A164.
- [26] A. V. De Forest, (1936), “The rate of growth of fatigue cracks”. *Trans. ASME* Vol. 58, pp.A23-A25.
- [27] W. Schutz, (1966), “A History of Fatigue”, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 54, pp. 264-300.
- [28] B. P. Haigh, (1917), “Experiments on the fatigue of brasses”, *J. Inst. Met.*, Vol. 18, pp. 55-86.

- [29] H. Neuber, (1937), “Notch stress theory basis for an accurate stress calculation”, Springer-Verlag Berlin.
- [30] S. S. Manson, (1953), “Behaviour of materials under conditions of thermal stress”, *Univ. Mich. Eng. Res. Inst.*, Vol. 27, pp. 9-75
- [31] L. F. Coffin, (1954), “The problem of thermal stress fatigue in austenitic steels at elevated temperatures”, *ASTM Special Technical Publication*, pp. 165.
- [32] L. F. Coffin, (1954), “A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal”. *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 931-950.
- [33] Manual on fatigue testing. (1949). ASTM, STP No. 91.
- [34] Halford GJ. (1966) “The energy required for fatigue”. *J Mater*, Vol. 1(1), pp.3-18.
- [35] Ellyin F, Kujawski D. (1984) “Plastic strain energy in fatigue failure”. *ASME J. Pressure Vessel. Technol.*, Vol. 106(4), pp. 342-347.
- [36] Golos K, Ellyin FA. (1988) “A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage”. *ASME J. Pressure. Vessel. Technol.*, Vol. 110(1) pp.36-41.
- [37] Jahed H, Varvani-Farahani A. (2006) “Upper and lower fatigue life limits model using energy-based fatigue properties”. *Int. J. Fatigue.*, Vol. 28, pp. 467–73.
- [38] Farahani AV, Kianoush MR, Sharma M. (2007) “Fatigue failure assessment of engineering components under service loading conditions”, *Mater. Des.*, Vol. 28, pp. 575–80.
- [39] Sugiura K, Chang KC, Lee GC. (1991) “Evaluation of low-cycle fatigue strength of structural metal”. *ASCE J. Eng. Mech.*, Vol. 117(10), pp. 2373–2383.
- [40] Lee K-O, Hong S-G, Lee S-B. (2008) “A new energy-based fatigue damage parameter in life prediction of high-temperature structural materials”. *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 496, pp. 471–477.
- [41] Li DM, Nam WJ, Lee CS. (1998) “A strain energy-based approach to the low-cycle fatigue damage mechanism in a high-strength spring steel”, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 29(5), pp. 1431–9.
- [42] Berto F, Croccolo D, Cuppini R. (2008) “Fatigue strength of a fork-pin equivalent coupling in terms of the local strain energy density”, *Mater. Des.*, Vol. 29, pp. 1780–92.
- [43] Farahani AV. (2000) “A new energy critical plane parameter for fatigue life assessment of various metallic materials subjected to in-phase and out-of-phase multiaxial fatigue loading conditions”. *Int. J. Fatigue*, Vol. 22 pp. 295–305.

- [44] Park J, Nelson D. (2000) “Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life”. *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, pp. 23–39.
- [45] Duyi Y, Zhenlin W. (2001) “A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue”. *Int. J. Fatigue.*, Vol. 23, pp. 679–87.
- [46] Perry, J., Perl, M., Shneck, R., and Haroush, S., (2006), “The Influence of the Bauschinger Effect on the Yield Stress, Young’s Modulus, and Poisson’s Ratio of a Gun Barrel Steel,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 128, pp. 179–184.
- [47] Parker, A. P., Troiano, E., Underwood, J. H., and Mossey, C., (2003), “Characterization of Steels Using a Revised Kinematic Hardening Model Incorporating Bauschinger Effect,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 125, pp. 277–281.
- [48] Troiano, E., Parker, A. P., Underwood, J. H., and Mossey, C., (2003), “Experimental Data, Numerical Fit and Fatigue Life Calculations Relating to Bauschinger Effect in High Strength Armament Steels,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 125, pp. 330–334.
- [49] Farrahi, G. H., Hosseinian, E., and Assempour, A., (2009), “On the Material Modeling of the Autofrettaged Pressure Vessel Steels,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, Vol.131, pp. 1-6.
- [50] Mohammadi, M., Farrahi, G. H., and Hosseini, S. H., (2007), “Bauschinger Effect Investigation of an Aluminum Alloy, and its Application in Autofrettaged and Compound Tubes,” *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, Vol. 6, pp. 629-637.
- [51] Seifi, R., and Babalhavaeji, M., (2012), “Bursting Pressure of Autofrettaged Cylinders with Inclined External Cracks,” *Int. J. pressure Ves. Piping.*, Vol. 89, pp. 112-119.
- [52] S. S. Manson, G. R. Halford, (2006) “Fatigue and Durability of Structural of Material”, ASM International press, United States of America, pp. 434.
- [53] J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, F. Oudah, K. Abdelrahman, (2009), “Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars”, *Mater. Des.*, Vol. 30, pp. 4405-4413.
- [54] G. Tao, Z. Xia, (2007) “Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life”, *Polymer Testing*, Vol. 26, pp. 451-460.

- [55] P. P. Milella, (2013) "Fatigue and Corrosion in Metals", Springer, pp. 79-83.
- [56] M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H. R. Eipakchi, (2012), "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", *Mat. Des.* Vol. 34, pp. 302-312.
- [57] م. شریعتی، ح. محرابی، (۲۰۱۴)، "تحلیل تجربی تأثیر رجتینگ بر عمر خستگی فولاد Ck45 در بارگذاری چرخه‌ای تک محوری، فنی مهندسی مدرس، دوره ۱۳، صفحه ۷۵-۸۳.
- [58] Comsol multi physics help, (2013), version number 4.3.2.189.
- [59] K. AliAkbari, kh. Farhangdoust, (2013) "Investigation of Bauschinger effect in the autofrettaged tubes made from A7075 Aluminum alloy using experimental data", *J. solid. Fluid. Mech.* Vol. 3, pp. 11-18.
- [60] P. C. T. Chen, (1986), "The Bauschinger and Hardening Effect on Residual Stresses in an Autofrettaged Thick-Walled Cylinders", *ASME Journal Pressure Vessel Technology*, Vol. 108, pp. 108-112.
- [61] A. Stacey, G. A. Webster, (1988), Determination of Residual Stress Distribution in Autofrettaged Tubing, *International Journal Pressure Vessels Piping*, Vol. 31, pp. 205-220.
- [62] M. M. Megahed, A. T. Abbas, Influence of Reverse Yielding on Residual Stresses Induced by Autofrettage, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, pp. 139-150, 1991.
- [63] Huang, X., "A General Autofrettage Model of a Thick-Walled Cylinder Based on Tensile-Compressive Stress-Strain Curve of a Material," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 40, pp. 599-608, 2005.
- [64] H. Jahed, G. Ghanbari, Actual Unloading Behavior and Its Significance on Residual Stress in Machined Autofrettaged Tubes, *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 125, pp. 321-325, 2003.
- [65] H. Jahed, B. Ahmadi, M. Shambouli, Re-Autofrettage," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 128, pp. 223-226, 2006.

واژه نامه فارسی به انگلیسی

Extensometer	طول سنج	Linear elastic	الاستیک خطی
Strain	کرنش	Strain energy	انرژی کرنشی
Fracture mechanics	مکانیک شکست	Stress	تنش
Life	عمر	Cycle	چرخه-سیکل
Fixture	نگهدارنده	Low cycle fatigue	خستگی کم چرخه
Fatigue	خستگی	Finite Element Method	روش اجزای محدود

واژه نامه انگلیسی به فارسی

Cycle	چرخه-سیکل	Linear elastic	الاستیک خطی
Extensometer	طول سنج	Low cycle fatigue	خستگی کم چرخه
Fracture mechanics	مکانیک شکست	Strain	کرنش
Finite Element Method	روش اجزای محدود	Strain energy	انرژی کرنشی
Fixture	نگهدارنده	Stress	تنش
Life	عمر	Fatigue	خستگی

Abstract

In this thesis numerical and experimental study of low-cycle fatigue life of steel SS304 loading was investigated.

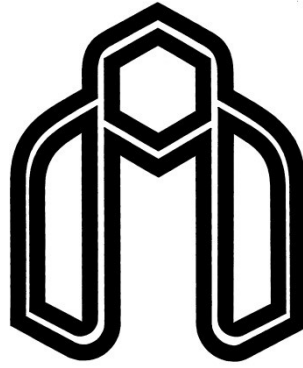
First, in order to better understand the behavior of elastic-plastic behavior of steel SS304 in uniaxial tensile test was modeled. After that, the experimental analysis to estimate life of this steel according to the energy approach and image processing techniques have been investigated. At the end, the fatigue life estimation of numerical analysis with comsol software discussed.

The results obtained from the mathematical modeling of the tensile test corresponded well with the behavior of SS304 steel. Approach in order to experimental analysis considering hysteresis energy released during the loading cycle, the various definitions of energy is expressed, energy released in the first cycle, the last cycle, the percentage of the cycle, the total energy cycles over and consider all possible states based on the least cycles are done.

Experimental results show that, in general considering the the intermediate cycles are far more accurate than other modes of energy. In the image processing, when the sample is under cyclic loading, the surface is photographed using a microscope camera. Image processing results obtained from the analysis of these images shows that fatigue is related with the appearance of the sample, near the end of the cycle, the graph obtained from the image processing will continue to deteriorate.

After reviewing software for numerical analysis to estimate fatigue life fatigue analysis capabilities have finally been chosen Comsol software and modeling was conducted. The results obtained showed that numerical simulation software, based on the criteria of fatigue, stress and strain, the detection of fatigue life is concerned, however, are closer to the experimental results, it can not accurately estimate the lifetime of the material.

Key words: low-cycle fatigue, Energy hysteresis, Elastic-plastic behavior modeling, Image processing.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

**Numerical and experimental analysis of low
cycle fatigue life of SS304 with plastic strain
energy approach**

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc)

Amir shahnavaz

Supervisor:

Dr. M. Shariati

Date: August 2014