

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تحلیل عددی و تجربی برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی فولاد

CK45 در بارگذاری سیکلی تک محوری

نام دانشجو:

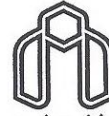
حامد محرابی

اساتید راهنما:

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمید رضا ایپکچی

بهار ۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حامد محرابی رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان تحلیل عددی و تجربی برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی فولاد CK45 در بارگذاری سیکلی تک محوری

که در تاریخ ۱۳۹۲/۳/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : عالی) امتیاز ۲۰	<input checked="" type="checkbox"/>	دفاع مجدد	<input type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
---------------------------------	-------------------------------------	-----------	--------------------------	-------	--------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر محمود شریعتی	۱- استاد راهنما
	دانشیار	دکتر حمیدرضا ایپک چی	۲- استاد راهنما
	استادیار	دکتر مجید محمدی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر محمدباقر نظری	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:



تقدیم

به پاس تحسیر عظیم و انانیتان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین
روزگار ان بهترین پشتیبان است
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در
پناهشان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از اساتید فاضل و اندیشمند آقایان دکتر شریعتی و دکتر ایپکچی به عنوان اساتید راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارم. همچنین از تمامی دوستانی که همواره در این مسیر یار و یاور اینجانب بوده‌اند سپاس گذارم. از خانواده خوبم که در تمامی لحظات مشوق و پشتیبانم بوده‌اند تشکر می‌کنم. امید است که بتوانم اندک سهمی در توسعه و پیشرفت کشورم داشته باشم.

حامد محرابی

دانشجوی کارشناسی ارشد

گروه طراحی کاربردی،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شاهرود،

خرداد ماه ۱۳۹۲.

تعهد نامه

اینجانب حامد محرابی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " تحلیل عددی و تجربی برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی فولاد CK45 در بارگذاری سیکلی تک محوری " تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپکچی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Shariati. M., Mehrabi. H. and Eipakchi. H.R, "An Investigation into the Fatigue and Ratcheting Behaviors of CK45 Steel under Stress-control Loading", *International Journal of Fatigue*, Under Review.

2- Shariati. M., Mehrabi. H. and Eipakchi. H.R, "Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of CK45 steel", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Under Review.

۳- محمود شریعتی، حامد محرابی، " تحلیل تجربی تأثیر رچتینگ بر عمر خستگی فولاد CK45 در بارگذاری چرخه‌ای تک محوری " ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، آماده انتشار.

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی برای فولاد های CK45 و SS316 در بارگذاری سیکلی تک محوری پرداخته شده است. بارگذاری ها شامل دو نوع تنش-کنترل و کرنش-کنترل می باشند. آزمایش های تنش-کنترل به صورت دو مرحله ای و آزمایش های کرنش-کنترل به صورت یک مرحله ای انجام شده اند. همچنین رفتار رچتینگ و رفتار نرم شوندگی سیکلی نیز به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مطالعه تأثیر پارامتر های دامنه تنش یا دامنه کرنش، تنش میانگین یا کرنش میانگین، نسبت تنش و تعداد سیکل پیش رچتینگ برای آزمایش های دو مرحله ای مورد بررسی قرار گرفته اند. آزمایش های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام گردیده اند. تحلیل های عددی توسط نرم افزار آباکوس، برای سه مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی، ایزوتروپیک و مدل ترکیبی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه شده اند. برای فولاد SS316 به دلیل بارگذاری با مقدار زیاد در آزمایش خستگی نسبت به بارگذاری آزمایش پیش رچتینگ، با پدیده اضافه بار مواجه می باشیم که باعث افزایش عمر خستگی می شود و برای فولاد CK45 به دلیل بارگذاری با مقدار کم در آزمایش خستگی، تنها عامل موثر بر عمر خستگی رچتینگ بوجود آمده در مرحله آزمایش پیش رچتینگ می باشد که باعث کاهش عمر خستگی می گردد. در بارگذاری کرنش-کنترل برای نمونه های CK45 رفتار سیکلی متغییر با سیکل و دامنه تنش، به صورت سخت شونده و نرم شونده مشاهده گردید و برای نمونه های SS316 رفتار کاملاً نرم شونده مشاهده گردید. در این نوع بارگذاری برای هر دو نمونه افزایش دامنه کرنش باعث کاهش عمر خستگی می گردد. همچنین با استفاده از روش انرژی نیز مدل هایی جهت پیش بینی عمر خستگی در حالت کرنش-کنترل ارائه شده است. به طور کلی معلوم شد که عمر خستگی به طور چشم گیری متأثر از دامنه تنش و یا دامنه کرنش می باشد و تأثیر تنش میانگین و یا کرنش میانگین بر عمر خستگی اندک می باشد. همچنین در حل عددی توسط نرم افزار آباکوس مشخص شد که تنها مدل سخت شوندگی که قابلیت شبیه سازی صحیح رفتار رچتینگ را دارد، مدل سخت شوندگی ترکیبی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک می باشد و دو مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی و ایزوتروپیک به تنهایی قادر به شبیه سازی رفتار رچتینگ نمی باشند.

کلید واژه: برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی، بارگذاری سیکلی تک محوری، نرم شوندگی، مدل

سخت شوندگی، پدیده اضافه بار، رفتار رها سازی

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

ج	فهرست علائم و نشانه‌ها	.....
د	فهرست جدول‌ها	.....
ه	فهرست شکل‌ها	.....
۱	فصل ۱- مقدمه ای بر بارگذاری سیکلی	.....
۱-۱	انواع بارگذاری سیکلی	.....
۲-۱	مقدمه‌ای بر مکانیک شکست	.....
۳-۱	تاریخچه مکانیک شکست	.....
۴-۱	مروری بر تاریخچه بارگذاری سیکلی	.....
۵-۱	انواع سخت‌شوندگی‌ها	.....
۱-۵-۱	سخت‌شوندگی ایزوتروپیک	.....
۲-۵-۱	سخت‌شوندگی سینماتیکی	.....
۶-۱	تعریف خستگی	.....
۷-۱	تعریف رچتینگ	.....
۸-۱	تأثیر تنش یا کرنش میانگین در بارگذاری سیکلی	.....
۹-۱	اندر کنش رفتار رچتینگ-خستگی مواد	.....
۱۰-۱	مروری بر کارهای گذشته	.....
۲۱	فصل ۲- تحلیل تجربی	.....
۱-۲	مقدمه ای بر آزمایش‌های انجام شده	.....
۲-۲	دستگاه آزمایش	.....
۳-۲	نتایج تجربی روی نمونه های آزمایش فولاد CK45	.....
۱-۳-۲	هندسه و خواص مکانیکی	.....
۲-۳-۲	بارگذاری تنش-کنترل	.....
۳-۳-۲	بارگذاری کرنش-کنترل	.....
۴-۲	نتایج تجربی بر روی نمونه های آزمایشی فولاد SS316	.....
۱-۴-۲	هندسه و خواص مکانیکی	.....
۲-۴-۲	بارگذاری تنش-کنترل	.....
۳-۴-۲	بارگذاری کرنش-کنترل	.....
۵-۲	نتیجه گیری	.....
۸۹	فصل ۳- تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی با تجربی	.....

۹۰	مقدمه ای بر تحلیل عددی	۱-۳
۹۳	معرفی نرم افزار آباکوس	۲-۳
۹۶	شبیه سازی و بررسی پدیده رچتینگ در نرم افزار آباکوس	۳-۳
۱۰۰	مقایسه نتایج عددی با تجربی	۴-۳
۱۰۱	مقایسه نتایج تحت بارگذاری تنش-کنترل	۱-۴-۳
۱۰۵	مقایسه نتایج تحت بارگذاری کرنش-کنترل	۲-۴-۳
۱۱۵	نتیجه گیری	۵-۳
۱۱۷	فصل ۴ - نتیجه گیری و پیشنهادها	
۱۱۸	نتیجه گیری	۱-۴
۱۲۱	پیشنهادها	۲-۴
۱۲۳	فهرست مراجع	
۱۲۶	واژه نامه فارسی به انگلیسی	
۱۲۷	واژه نامه انگلیسی به فارسی	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
نسبت تنش	R
ضریب مسیر	φ
آسیب خستگی	D_f
زمان توقف	t_h
طول سنجه	l
قطر سنجه	d
مدول الاستیسیته	E
تنش تسلیم	σ_y
تنش نهایی	S_u
ضریب پواسیون	ν
مدول سخت‌شوندگی سینماتیک	c
مدول یانگ	E
کرنش پلاستیک	ε^{pl}
کرنش رچتینگ	ε_r
بیشترین کرنش	ε_{max}
کمترین کرنش	ε_{min}
دامنه کرنش	$\Delta\varepsilon/2$
ثابت ماده	b
ثابت ماده	C
ثابت ماده	γ
ثابت ماده	Q_∞
تنش زمینه	α

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده CK45	۲۴
جدول ۲-۲: ترکیب شیمیایی فولاد CK45	۲۴
جدول ۳-۲: مشخصه های آزمایش رچتینگ برای نمونه های CK45 (تعداد چرخه ۱۰۰۰ سیکل)	۲۶
جدول ۴-۲: مشخصات و نتایج آزمایش های تنش-کنترل برای نمونه های فولاد CK45	۳۲
جدول ۵-۲: چیدمان آزمایش برای آزمایش کرنش-کنترل فولاد CK45	۴۱
جدول ۶-۲: نتایج آزمایش خستگی کرنش-کنترل و انرژی کرنشی ایجاد شده برای فولاد CK45	۵۲
جدول ۷-۲: روابط بدست آمده برای پیش بینی عمر خستگی به روش انرژی و ضرایب آن	۵۴
جدول ۸-۲: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS316	۵۷
جدول ۹-۲: ترکیب شیمیایی فولاد SS316	۵۷
جدول ۱۰-۲: مشخصه های آزمایش رچتینگ برای نمونه های SS316 (تعداد چرخه ۱۰۰۰ سیکل)	۵۹
جدول ۱۱-۲: مشخصات و نتایج آزمایش های تنش-کنترل برای نمونه های فولاد SS316	۶۵
جدول ۱۲-۲: چیدمان آزمایش برای آزمایش کرنش-کنترل فولاد SS316	۷۳
جدول ۱۳-۲: نتایج آزمایش خستگی کرنش-کنترل و انرژی کرنشی ایجاد شده برای فولاد SS316	۸۰
جدول ۱۴-۲: روابط بدست آمده برای پیش بینی عمر خستگی به روش انرژی و ضرایب آن	۸۲

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۲	شکل ۱-۱: خصوصیات بارگذاری سیکلی
۶	شکل ۲-۱: منحنی تنش-کرنش برای بارگذاری تک محوری
۶	شکل ۳-۱: سخت‌شوندگی ایزوتروپیک-اشکال یکسان با اندازه‌های مختلف
۷	شکل ۴-۱: اثر باشینگر در بارگذاری تک محوری
۷	شکل ۵-۱: سخت‌شوندگی سینماتیکی-اشکال یکسان و اندازه‌های یکسان
۱۲	شکل ۶-۱: تغییرات عمر خستگی نسبت به تنش میانگین با دامنه تنش‌های مختلف
۱۶	شکل ۷-۱: نرخ کرنش میانگین مثبت
۱۷	شکل ۸-۱: نرخ کرنش میانگین منفی
۱۷	شکل ۹-۱: پیش‌کرنش پلاستیک
۲۳	شکل ۱-۲: دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و نمونه‌های آزمایش
۲۴	شکل ۲-۲: ابعاد هندسی نمونه بر حسب میلی‌متر
۲۵	شکل ۳-۲: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده برای فولاد CK45
۲۷	شکل ۴-۲: رفتار رچتینگ نمونه CK45 تحت آزمایش شماره ۱
۲۸	شکل ۵-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با تنش میانگین ثابت ۳۰۰ MPa
۲۹	شکل ۶-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با تنش میانگین ثابت ۲۶۰ MPa
۳۰	شکل ۷-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۲۸۰ MPa
۳۰	شکل ۸-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۳۰۰ MPa
۳۱	شکل ۹-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa
۳۱	شکل ۱۰-۲: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۸۰ MPa
۳۴	شکل ۱۱-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به دامنه تنش پیش‌رچتینگ با تنش میانگین ثابت
۳۵	شکل ۱۲-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به تنش میانگین پیش‌رچتینگ با دامنه تنش ثابت
۳۶	شکل ۱۳-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش پیش‌رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۶۰ MPa
۳۶	شکل ۱۴-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش پیش‌رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۸۰ MPa
۳۷	شکل ۱۵-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به تعداد سیکل پیش‌رچتینگ با دامنه تنش و تنش میانگین ثابت ۳۰۰ MPa
۳۸	شکل ۱۶-۲: رفتار رچتینگ در آزمایش خستگی خالص برای نمونه CK45
۳۹	شکل ۱۷-۲: پدیده الاستیک شیکدان در آزمایش خستگی برای نمونه CK45 پیش‌رچتینگ شده با دامنه تنش و تنش میانگین ۳۰۰ MPa
۴۰	شکل ۱۸-۲: رابطه نسبت دامنه تنش دو مرحله بارگذاری با عمر خستگی
۴۱	شکل ۱۹-۲: مقایسه مقدار عمر خستگی تجربی با مقدار پیشی بینی شده

- شکل ۲-۲۰: منحنی هیستریزیس برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪..... ۴۳
- شکل ۲-۲۱: تغییرات دامنه تنش نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری کرنش-کنترل متقارن..... ۴۳
- شکل ۲-۲۲: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪..... ۴۵
- شکل ۲-۲۳: تغییرات تنش متوسط نسبت به تعداد چرخه‌ها برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪..... ۴۶
- شکل ۲-۲۴: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به دامنه کرنش..... ۴۷
- شکل ۲-۲۵: مقایسه منحنی‌های هیستریزیس برای کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش‌های ۰/۸۳٪، ۱/۲۵٪ و ۱/۶۶٪..... ۴۷
- شکل ۲-۲۶: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪..... ۴۸
- شکل ۲-۲۷: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین‌های مختلف و دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪..... ۴۹
- شکل ۲-۲۸: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به کرنش میانگین..... ۴۹
- شکل ۲-۲۹: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪..... ۵۰
- شکل ۲-۳۰: انرژی کرنشی کل نسبت به تعداد نیم سیکل..... ۵۳
- شکل ۲-۳۱: انرژی کرنشی متوسط نسبت به تعداد نیم سیکل..... ۵۳
- شکل ۲-۳۲: انرژی کرنشی سیکل اول نسبت به تعداد نیم سیکل..... ۵۴
- شکل ۲-۳۳: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی کل..... ۵۵
- شکل ۲-۳۴: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی متوسط..... ۵۵
- شکل ۲-۳۵: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی سیکل اول..... ۵۵
- شکل ۲-۳۶: مقایسه عمر خستگی پیش بینی شده با عمر خستگی تجربی..... ۵۶
- شکل ۲-۳۷: منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده برای فولاد SS316..... ۵۸
- شکل ۲-۳۸: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین ۳۱۰ MPa و دامنه تنش ۳۱۰...۶۰ MPa..... ۶۰
- شکل ۲-۳۹: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین ۳۱۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰...۶۰ MPa..... ۶۰
- شکل ۲-۴۰: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین ۲۸۰ MPa و دامنه تنش ۳۱۰...۶۱ MPa..... ۶۱
- شکل ۲-۴۱: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین ۲۸۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰...۶۱ MPa..... ۶۱
- شکل ۲-۴۲: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با تنش میانگین ۳۱۰ MPa..... ۶۲
- شکل ۲-۴۳: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با تنش میانگین ۲۸۰ MPa..... ۶۲
- شکل ۲-۴۴: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۲۵۰ MPa..... ۶۳
- شکل ۲-۴۵: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۳۱۰ MPa..... ۶۳
- شکل ۲-۴۶: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۳۰ MPa..... ۶۴
- شکل ۲-۴۷: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa..... ۶۵
- شکل ۲-۴۸: نمودار عمر خستگی بر حسب دامنه تنش رچتینگ با تنش میانگین ثابت..... ۶۸
- شکل ۲-۴۹: نمودار عمر خستگی بر حسب تنش میانگین رچتینگ با دامنه تنش ثابت..... ۶۹
- شکل ۲-۵۰: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش برای حداکثر تنش ۵۳۰ MPa..... ۶۹

- شکل ۲-۵۱: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa ۷۰
- شکل ۲-۵۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به تعداد سیکل آزمایش پیش رچتینگ با دامنه تنش و تنش میانگین ثابت ۳۱۰ MPa ۷۱
- شکل ۲-۵۳: رفتار رچتینگ در آزمایش خستگی خالص برای نمونه SS316 ۷۲
- شکل ۲-۵۴: پدیده الاستیک شیکدان در آزمایش خستگی برای نمونه SS316 پیش رچتینگ شده با دامنه تنش و تنش میانگین ۳۱۰ MPa ۷۲
- شکل ۲-۵۵: منحنی هیستریزس برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪ ۷۴
- شکل ۲-۵۶: تغییرات دامنه تنش نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری کرنش-کنترل متقارن ۷۴
- شکل ۲-۵۷: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ ۷۵
- شکل ۲-۵۸: رفتار رها سازی در ۱۰۰ سیکل اول حلقه های هیستریزس برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۰/۸۳٪ ۷۵
- شکل ۲-۵۹: تغییرات تنش متوسط نسبت به تعداد چرخه‌ها برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ ۷۶
- شکل ۲-۶۰: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به دامنه کرنش ۷۷
- شکل ۲-۶۱: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ ۷۸
- شکل ۲-۶۲: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین‌های مختلف و دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ ۷۹
- شکل ۲-۶۳: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به کرنش میانگین ۷۹
- شکل ۲-۶۴: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ ۷۹
- شکل ۲-۶۵: انرژی کرنشی کل نسبت به تعداد نیم سیکل ۸۱
- شکل ۲-۶۶: انرژی کرنشی متوسط نسبت به تعداد نیم سیکل ۸۱
- شکل ۲-۶۷: انرژی کرنشی سیکل اول نسبت به تعداد نیم سیکل ۸۱
- شکل ۲-۶۸: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی کل ۸۲
- شکل ۲-۶۹: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی متوسط ۸۳
- شکل ۲-۷۰: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی سیکل اول ۸۳
- شکل ۲-۷۱: مقایسه عمر خستگی پیش بینی شده با عمر خستگی تجربی ۸۴
- شکل ۳-۱: تصویر قطعه مدل شده در محیط آباکوس ۹۶
- شکل ۳-۲: نقاط مورد نیاز در روش نیم سیکل ۹۷
- شکل ۳-۳: نقاط مورد نیاز در روش استیبلایز ۹۸
- شکل ۳-۴: نقاط مورد نیاز برای سخت‌شوندگی سیکلی در روش ترکیبی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک ۹۹
- شکل ۳-۵: بدست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی ۱۰۰
- شکل ۳-۶: ایجاد حلقه بسته در بارگذاری تنش-کنترل با مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی برای نمونه های SS316 ۱۰۱

شکل ۳-۷: نمودار تنش- کرنش در حالت تنش-کنترل با مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای نمونه های SS316	۱۰۲
شکل ۳-۸: مقایسه نتایج تنش-کرنش تجربی و عددی برای بارگذاری نامتقارن با تنش میانگین ۳۰۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰ MPa	۱۰۲
شکل ۳-۹: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین ۲۸۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰ MPa	۱۰۳
شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین ۳۰۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰ MPa	۱۰۴
شکل ۳-۱۱: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین ۳۱۰ MPa و دامنه تنش ۲۸۰ MPa	۱۰۴
شکل ۳-۱۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین ۳۱۰ MPa و دامنه تنش ۳۱۰ MPa	۱۰۵
شکل ۳-۱۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی با مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی	۱۰۶
شکل ۳-۱۴: مقایسه نتایج تجربی و عددی با مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک	۱۰۶
شکل ۳-۱۵: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه تنش بر حسب سیکل برای بارگذاری متقارن محوری با دامنه کرنش ۱/۲۵٪	۱۰۷
شکل ۳-۱۶: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه تنش بر حسب سیکل برای بارگذاری متقارن محوری با دامنه کرنش ۰/۸۳٪	۱۰۷
شکل ۳-۱۷: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزس برای تنش میانگین ۱/۲۵٪ و دامنه کرنش ۱/۶۶٪	۱۰۸
شکل ۳-۱۸: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۱/۶۶٪	۱۰۹
شکل ۳-۱۹: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۱/۲۵٪	۱۰۹
شکل ۳-۲۰: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۰/۸۳٪	۱۱۰
شکل ۳-۲۱: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۰/۸۳٪	۱۱۱
شکل ۳-۲۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۱/۲۵٪	۱۱۱
شکل ۳-۲۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۱/۲۵٪	۱۱۲
شکل ۳-۲۴: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۱/۶۶٪	۱۱۲

شکل ۳-۲۵: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای تنش میانگین $1/66\%$ و دامنه کرنش $0/83\%$ ۱۱۳

شکل ۳-۲۶: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای کرنش میانگین $1/66\%$ و دامنه کرنش $0/83\%$ ۱۱۴

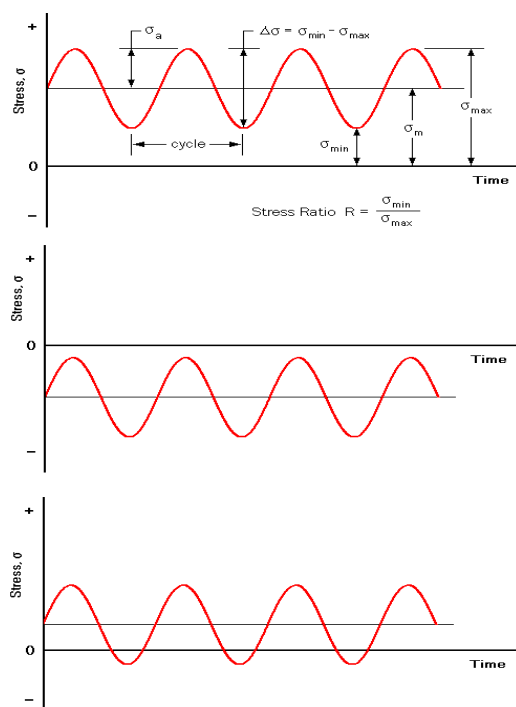
شکل ۳-۲۷: مقایسه نتایج تجربی و عددی تغییرات تنش متوسط نسبت به سیکل برای کرنش میانگین $1/66\%$ و دامنه کرنش $0/83\%$ ۱۱۴

شکل ۳-۲۸: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه کرنش پلاستیک بر حسب سیکل برای کرنش میانگین $1/66\%$ ۱۱۵

فصل ۱- مقدمه ای بر بارگذاری سیکلی

۱-۱- انواع بارگذاری سیکلی

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 سازه 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 و نسبت تنش برابر نسبت تنش حداقل به تنش حداکثر می‌باشد. (شکل ۱-۱) بارگذاری سیکلی در آزمایش‌ها می‌تواند به دو صورت تنش-کنترل و کرنش-کنترل نیز انجام شود. مقدار حداکثر تنش در هر سیکل می‌تواند از مقدار تنش تسلیم ماده بیشتر و یا کمتر باشد که عامل تعیین کننده انواع خستگی و وجود پدیده رچتینگ نیز می‌باشد. بارگذاری سیکلی در نهایت می‌تواند باعث زوال و ایجاد پدیده شکست در سازه‌ها شود.



شکل ۱-۱: خصوصیات بارگذاری سیکلی

۲-۱ - مقدمه‌ای بر مکانیک شکست

پدیده شکست در اجسام، یکی از عمده‌ترین مسائلی است که انسان از زمان ساختن ساده‌ترین ابزارها با آن مواجه بوده و به دلیل پیشرفت تکنولوژی در عصر جدید، این مسئله از اهمیت بیشتری نسبت به گذشته برخوردار است. متلاشی شدن بسیاری از هواپیماها و فضاپیماها در طی دهه های گذشته، لزوم درک دقیق‌تری از مکانیک شکست^۱ در اجسام را در علوم جدید ایجاب می‌کند. در واقع گسیختگی نهایی بسیاری از تجهیزات و سازه های صنعتی، نه تنها عواقب جانی ناگواری در پی دارد، بلکه ضررهای چشمگیر اقتصادی را نیز فراهم می‌آورد. بسیاری از سازه های مکانیکی در اثر رشد ترک‌ها که ممکن است در حین عملیات ساخت و یا حمل و نقل به وجود آید، دچار شکستگی گردند. کاربرد این علم در زمینه طراحی قطعات و سازه های مختلف در صنایع بسیار زیادی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این صنایع می‌توان به صنایع نیروگاهی، خودرو سازی، کشتی سازی و همچنین به صنایع هوا و فضایی اشاره کرد.

۳-۱ - تاریخچه مکانیک شکست

شکست معمولاً به دلیلی وجود ترک‌ها بوجود می‌آید. ترک در تمامی سازه‌ها به دلیل نقص در تولید و یا بارگذاری‌های مختلف بوجود می‌آید. اگر نوع بارگذاری سیکلی باشد گسترش ترک‌ها و شکست از نوع خستگی است. مطالعه مکانیک شکست می‌تواند از شکست سازه‌ها جلوگیری کند. تکامل مکانیک شکست را می‌توان از سه دیدگاه: تحلیلی، تجربی و عددی بررسی کرد.

بر اساس گزارش‌ها در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۸۲ خرابی و خسارت حاصله از وجود ترک در سازه‌ها نزدیک ۱۱۹ میلیارد دلار تخمین زده شده است. همچنین گزارشی دیگر در سال ۱۹۹۱ نشان می‌دهد که اگر در اروپا از تکنولوژی‌های جدید مطالعه ترک‌ها استفاده شود نزدیک به ۸۰ میلیارد دلار در سال صرفه جویی می‌شد. اولین مطالعه بر روی مکانیک شکست را می‌توان به سال

^۱ Fracture Mechanics

۱۵۰۰ میلادی زمانی که لئوناردو داوینچی^۱ برای اولین بار به بررسی رابطه معکوس طول و استحکام طناب پی برد، نسبت داد. او همچنین رابطه‌ی اندازه و استحکام سازه‌ها را مورد مطالعه قرار داد. صد سال بعد گالیلو گالیله^۲ برای اولین بار مسئله ترک و سازه‌ها را از دیدگاه ریاضی مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۸۹۸ جی. کریش^۳ توانست راه حلی تحلیلی برای بررسی تنش در اطراف یک سوراخ دایره‌ای واقع شده در یک صفحه بی‌نهایت تحت بار یکنواخت کششی را بدست آورد. او را می‌توان پیشگام تحلیل ترک‌ها معرفی کرد. در سال ۱۹۰۷ ایده او توسط ریاضی دان روسی ابوری واسیلیویچ کولوسوو^۴ گسترش یافت. در سال ۱۹۱۳ اینگلیس^۵ کار کولوسوو را با ارائه مقاله‌ای درباره‌ی تحلیل تنش در نزدیکی نوک ترک کامل کرد. در سال ۱۹۲۰ مهندس جوانی به نام آلن آرنولد گریفیت^۶ به مطالعه ترک‌ها در مواد ترد پرداخت او دست به انجام آزمایش بر روی شیشه زد. آزمایش او نشان داد که اگر در مواد ترد، ترک و یا نقصی وجود داشته باشد تنش در آن نقاط متمرکز شده و به سرعت در اطراف نوک ترک افزایش می‌یابد. ایده اصلی مطالعه گریفیت این بود که رشد ترک با رابطه بین انرژی کرنشی و انرژی سطحی لازم برای ایجاد سطح جدید بعد از رشد ترک بدست می‌آید. مطالعات زیادی بعد آن زمان تا زمان حال بر روی مکانیک شکست انجام شده است. ادامه این مطالعات باعث ایجاد روش اجزای محدود برای بررسی پدیده مکانیک شکست شده است [۱].

۴-۱- مروری بر تاریخچه بارگذاری سیکلی

سازه‌های مهندسی غالباً تحت بارگذاری‌های سیکلی و تناوبی قرار دارند که این بارگذاری می‌تواند تحت یک تنش میانگین و یا یک کرنش میانگین باشد. پدیده مهمی که در سال ۱۹۷۰ [۲] معرفی، و در دو دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است، رچتینگ می‌باشد، که به صورت انباشتگی سیکل

^۱ Leonardo da Vinci

^۲ Galileo Galilei

^۳ G. Kirsch

^۴ Iury Vasilievich Kolosov

^۵ Inglis

^۶ Alan Arnold Griffith

به سیکل کرنش پلاستیک در سازه‌های تحت بارگذاری سیکلی با دامنه تنش ثابت و تنش میانگین غیر صفر تعریف می‌شود. این پدیده در خستگی‌های کم تکرار قابل مشاهده است. برای ایجاد این پدیده، تنش اعمالی باید به تنش تسلیم سازه برسد. رچتینگ می‌تواند عمر خستگی سازه را کاهش دهد، و یا منجر به خرابی سیستم تحت ارتعاش یا بارگذاری سیکلی شود. بنابراین پدیده مذکور، پارامتر مهمی جهت پیش‌بینی عمر خستگی سازه‌های مهندسی می‌باشد [۳].

در گذشته طراحان، قطعات مهندسی را تنها با استفاده از خواص مواد در ناحیه الاستیک طراحی می‌کردند. با گذشت زمان و پیشرفت علم مهندسی نیاز به طراحی و ساخت قطعاتی با ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و در عین حال سبک احساس شد. برای رفع این نیاز، مهندسان ایده استفاده از ظرفیت ماده در محدوده پلاستیک را مطرح کردند. البته پیش‌بینی رفتار ماده در این حالت به نوع و میزان بارگذاری و جنس ماده بستگی دارد و می‌تواند با تعداد اندکی بارگذاری و بار برداری در محدوده پلاستیک، دچار گسیختگی شود و یا برعکس، قابلیت تحمل تعداد بسیار زیادی بارگذاری و بار برداری در ناحیه پلاستیک را داشته باشد. بررسی این پدیده منجر به بوجود آمدن شاخه رچتینگ و خستگی کم چرخه در علم پلاستیسیته شد. با ورود بارگذاری به ناحیه پلاستیک ماده می‌تواند دو نوع رفتار سخت‌شوندگی از خود نشان دهد. در ادامه به بررسی مختصری بر روی انواع رفتارهای سخت‌شوندگی و پدیده رچتینگ و خستگی مواد خواهیم پرداخت.

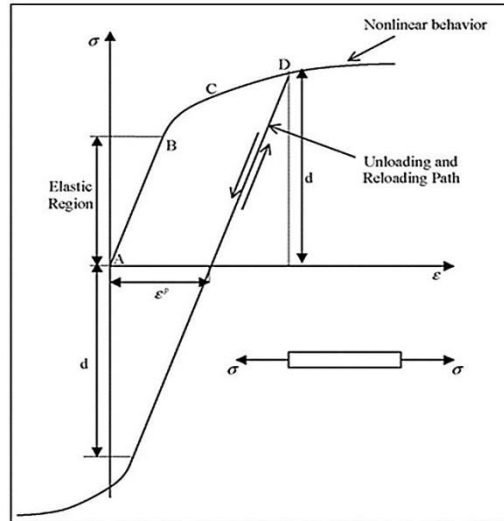
۱-۵- انواع سخت‌شوندگی ها

۱-۵-۱- سخت‌شوندگی ایزوتروپیک

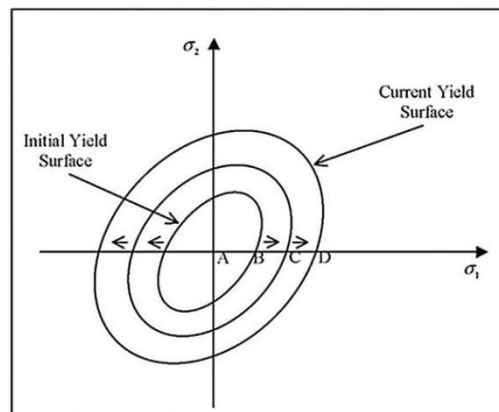
سخت‌شوندگی ایزوتروپیک^۱ مربوط به تغییر در اندازه سطح تسلیم است. به عنوان مثال اگر یک قطعه استاندارد آزمایش را تحت بار کششی تک محوری بیشتر از تنش تسلیم قرار دهیم، سپس بار را برداریم و دوباره تحت بارگذاری فشاری تک محوره قرار دهیم، مقدار تنش تسلیم جدید در فشار با

^۱ Isotropic hardening

مقدار تنش تسلیم در کشش برابر خواهد بود (شکل ۲-۱) به همین دلیل سطح تسلیم بزرگ‌تر می‌شود (شکل ۳-۱).



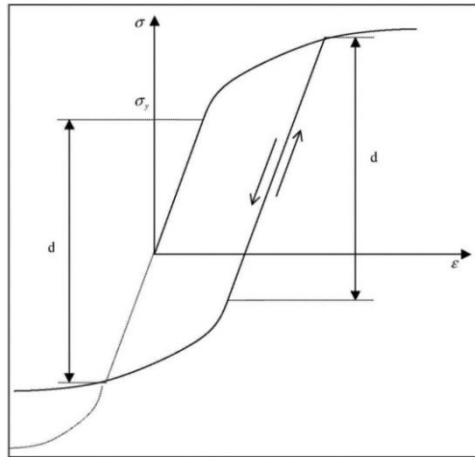
شکل ۲-۱: منحنی تنش-کرنش برای بارگذاری تک محوری [۴]



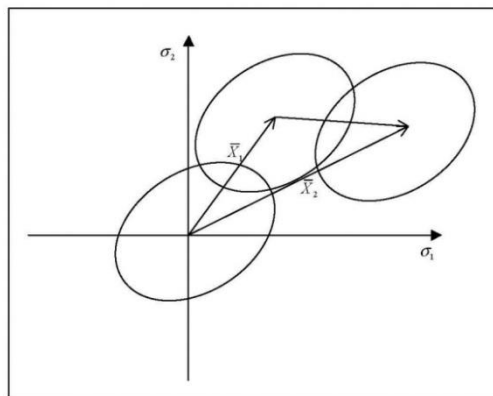
شکل ۳-۱: سخت‌شوندگی ایزوتروپیک-اشکال یکسان با اندازه‌های مختلف [۴]

۱-۵-۲ - سخت‌شوندگی سینماتیکی

سخت‌شوندگی سینماتیکی^۱ مربوط به جابجایی سطح تسلیم در فضای تنش انحرافی است. به عنوان مثال اگر یک قطعه استاندارد آزمایش را تحت بار کششی تک محوری بیشتر از تنش تسلیم قرار دهیم، سپس بار را برداریم و دوباره تحت بار گذاری فشاری تک محوره قرار دهیم، نقطه تنش تسلیم فشاری جدید از مقدار اصلی آن کوچک‌تر خواهد بود. به این رفتار اثر باشینگر^۲ می‌گویند (شکل ۴-۱). در این نوع سخت‌شوندگی مرکز سطح تسلیم در فضای تنش جابجا می‌شود (شکل ۵-۱).



شکل ۴-۱: اثر باشینگر در بارگذاری تک محوری [۴]



شکل ۵-۱: سخت‌شوندگی سینماتیکی-اشکال یکسان و اندازه های یکسان [۴]

^۱ Kinematic hardening

^۲ Bauschinger

۱-۶- تعریف خستگی

از سال ۱۸۵۰ 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 دینامیک رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. که این نام‌گذاری احتمالاً مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می‌شود 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 تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری 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 باشد.

۱-۷- تعریف رچتینگ

رچتینگ^۱ انباشتگی کرنش پلاستیک در طی سیکل‌های بار گذاری به ازای مقدار مشخص دامنه تنش و تنش میانگین غیر صفر است. وقتی بار گذاری تکرار می‌شود حلقه‌های منحنی هیستریزیس جابجا می‌شوند و در نهایت به یکدیگر نزدیک شده و به مقدار تقریبی ثابتی می‌رسند که به آن سیکل پایا می‌گویند.

۱-۸- تأثیر تنش یا کرنش میانگین در بارگذاری سیکلی

^۱ Ratchetting

به خوبی می‌دانیم که عملیات خستگی به شدت به تنش میانگین مثبت در هر دو حالت خستگی کم چرخه و پر چرخه، حساس است. به این صورت که تنش میانگین مثبت باعث باز شدن ترک و افزایش سرعت باز شدن آن و در نتیجه کاهش عمر خستگی می‌شود. وقتی اثرات تنش میانگین مثبت را بررسی می‌کنیم با دو نوع آزمایش روبرو هستیم: آزمایش تنش-کنترل با تنش میانگین ثابت و آزمایش کرنش-کنترل با کرنش میانگین ثابت. اگر آزمایش برای مواد در محدوده الاستیک باشد، یعنی آزمایش خستگی پر چرخه، نتایج دو حالت تنش-کنترل و کرنش-کنترل با یکدیگر فرقی ندارد. اما اگر آزمایش در محدوده الاستیک-پلاستیک انجام شود، یعنی حالت خستگی کم چرخه پاسخ تنش-کنترل با کرنش-کنترل متفاوت است. در حالت کرنش-کنترل، ایجاد تغییر شکل پلاستیک باعث رهايش تنش میانگین می‌شود و معمولاً این رهايش در مراحل اولیه عمر اتفاق می‌افتد. بنابراین عمر خستگی کم چرخه در مقایسه با حالت بدون کرنش میانگین یا کاملاً بازگشت پذیر، زیاد تحت تأثیر کرنش میانگین نیست. در حالت تنش-کنترل، تغییر شکل پلاستیک باعث ایجاد کرنش رچتینگ می‌شود و کرنش رچتینگ انباشته شده می‌تواند باعث خرابی و کاهش عمر خستگی ماده شود. در این حالت علاوه بر اثرات مستقیم تنش میانگین باید اثرات رچتینگ را نیز بر روی عمر خستگی لحاظ کرد [۵].

۹-۱- اندر کنش رفتار رچتینگ-خستگی مواد

رچتینگ انباشتگی کرنش پلاستیک در طی بار گذاری سیکلی نا متقارن می‌باشد، با این شرط که مقدار تنش وارد شده به اندازه کافی بزرگ باشد (بزرگ‌تر از تنش تسلیم ماده). این پدیده فاکتور بسیار مهمی در طراحی قطعاتی است که تحت چنین بار گذاری‌هایی قرار دارند. از طرفی در بارگذاری‌های سیکلی با پدیده خستگی روبرو هستیم که به شکست مواد، در نتیجه بارگذاری متناوب گفته می‌شود. پدیده رچتینگ به تنهایی توسط افراد زیادی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است و روابط تحلیلی بسیاری برای آن بدست آمده است، همچنین پدیده خستگی نیز به طور وسیعی مورد

مطالعه قرار گرفته است و مقالات بسیاری در این زمینه وجود دارد. اما در مورد اندر کنش رچتینگ-خستگی که شامل بررسی تأثیر کرنش رچتینگ بر روی عمر خستگی می‌شود تا کنون مطالعات کمی صورت گرفته است. از آنجا که پدیده رچتینگ می‌تواند بر روی عمر خستگی مواد تأثیر بگذارد، نیاز به بررسی رابطه رچتینگ-خستگی احساس می‌شود. این اندر کنش می‌تواند سهم بزرگی در طراحی قطعاتی باشد که تحت بارهای سیکلی قرار دارند. با مطالعه رچتینگ می‌توان از حداکثر توان یک قطعه در بارگذاری سیکلی استفاده کرد. اما اگر در قطعه ای که تحت بارگذاری سیکلی قرار دارد پدیده رچتینگ ایجاد شود و معیار شکست در این قطعه خستگی باشد، معمولاً پدیده رچتینگ با ایجاد کرنش پلاستیک باعث کاهش عمر خستگی می‌شود که در اینجا پدیده رچتینگ عاملی مضر در طراحی شناسایی می‌شود. پیش از آنکه بخواهیم عمر خستگی یک ماده تحت بارگذاری سیکلی نامتقارن را با حداکثر تنش بیشتر از تنش تسلیم پیش بینی کنیم و یا یک مدل زوال خستگی مناسب برای آن در نظر بگیریم، باید تأثیر پدیده رچتینگ بر روی عمر خستگی و همچنین تأثیر آسیب خستگی بر روی رچتینگ یک ماده را به صورت کامل درک کرده باشیم. وجود رچتینگ در حین بارگذاری سیکلی باعث کاهش زمان شروع ترک شده و در نهایت باعث فروپاشی سازه می‌شود. پارامترهایی مانند تنش میانگین، دامنه تنش، نسبت تنش و تنش بیشینه در بارگذاری سیکلی تنشی از جمله مواردی است که می‌توان آن‌ها را بر روی نمونه های آزمایش بررسی نمود و تأثیر آن‌ها را بر روی منحنی عمر خستگی مشاهده نمود. به عنوان یک مثال کاربردی از این بحث می‌توان به مطالعه انجام شده توسط دو مرکز تحقیقاتی بخش علوم و تکنولوژی مواد لابراتور ملی متالوژی هند و بخش ایمنی راکتور مرکز مطالعاتی اتمی بهابا در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد [۶]. به دلیل زلزله خیز بودن منطقه قرار گیری نیروگاه هسته ای و قرار گرفتن تجهیزات نیروگاه تحت خستگی و نیروهای سیکلی حاصل از زمین لرزه، امکان دارد در تجهیزات نیروگاه پدیده رچتینگ همراه با خستگی، طی دو مرحله بارگذاری ایجاد شود که مطالعه اندرکنش رچتینگ-خستگی در طراحی این تجهیزات نقش بسیار مهمی خواهد داشت.

۱۰-۱- مروری بر کارهای گذشته

تا کنون مطالعات تجربی بسیاری در زمینه رچتینگ و خستگی مواد مختلف انجام گرفته است. از کارهای انجام گرفته در این زمینه می توان به مطالعات انجام گرفته در دانشگاه صنعتی شاهرود، که توسط شریعتی و حاتمی انجام شده است اشاره کرد. آنها به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی مواد پلیمری پلی استال [۷] و همچنین بررسی رفتار رچتینگ و خستگی پوسته های استوانه ای پرداخته اند [۸].

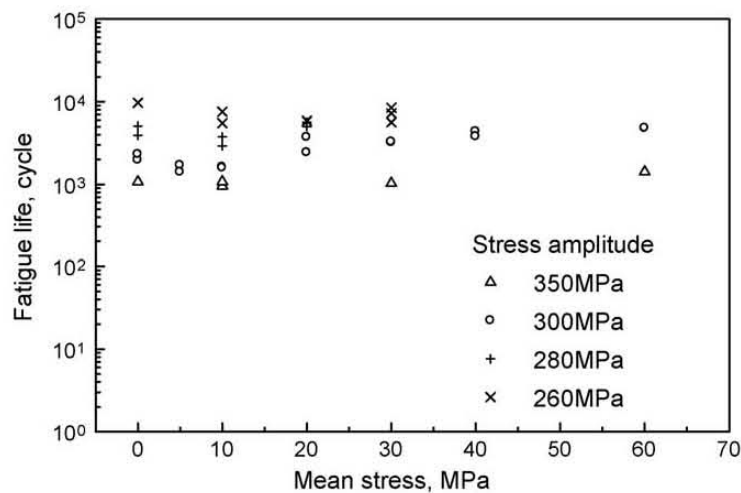
تعداد مطالعات انجام شده در زمینه اندر کنش رچتینگ-خستگی بسیار کم می باشد و بیشتر شامل حالت بارگذاری تک محوری می باشد و در موارد کمی حالت چند محوری و یا پیچشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از مقالات اولیه در این زمینه، در سال ۱۹۹۱ توسط آتراسون و همکارانش در کنفرانسی در ژاپن ارائه شده است [۹]. در این مقاله از استوانه های توخالی با جنس فولاد 304L استفاده شده است و آزمایش به صورت کرنش-کنترل و با بار گذاری پیچشی همراه با بار محوری ثابت به عنوان تنش میانگین انجام شده است. این مقاله در انتها به این نتیجه رسیده است که رابطه ای بین رچتینگ و خستگی وجود ندارد که بر خلاف نتایج بدست آمده در مقالات نوشته شده پس از آن می باشد.

از مؤثرترین کارها در این زمینه می توان به مقالات گوژنگ کانگ و یوجی لیو اشاره کرد که در طی سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ با ارائه پنج مقاله مرتبط با هم به بررسی بارگذاری تک محوری، چند محوری و فلزات با رفتار سخت شونده گی متفاوت و ارائه چند راه حل تحلیلی پرداخته اند.

در ابتدا آنها به مطالعه رفتار رچتینگ و عمر خستگی و همچنین رابطه بین آنها برای آزمایش بر روی فولاد ضد زنگ SS304 تحت بار گذاری تک محوری تناوبی در دمای اتاق پرداختند. کرنش رچتینگ و عمر خستگی ماده در حالت های مختلف بار گذاری اندازه گیری شد و اثرات تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش بر روی کرنش رچتینگ و عمر نهایی شکست بحث شد. همچنین تغییرات دامنه کرنش (به عنوان خروجی) با تعداد سیکل ها توضیح داده شد تا بتوان در مورد رابطه رفتار

رچتینگ و شکست بر اثر خستگی بحث کرد. نتایج آزمایشگاهی در این مطالعه نشان می‌دهند که کرنش رچتینگ و عمر خستگی ماده به طور چشمگیری به تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش برای ماده تحت تنش تک محوری متناوب بستگی دارد. تأثیر رچتینگ بر روی عمر خستگی بر خلاف دیگر مقالات تنها در بازه خاصی از تنش میانگین نتیجه گرفته شده است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی سیکلی^۱ به طور چشمگیری متأثر از دامنه کرنش می‌باشد و حالت پایای سیکلی بعد از تعداد مشخصی سیکل در صورتی که دامنه کرنش کوچک باشد بدست می‌آید و اگر دامنه کرنش بزرگ باشد، هیچ وقت به حالت پایا نمی‌رسد. عمر خستگی مواد عمدتاً متأثر از دامنه کرنش می‌باشد. تغییر در کرنش میانگین به مقدار کمی بر روی عمر خستگی تأثیر دارد. در این پژوهش تأثیر رچتینگ بر روی عمر خستگی بر خلاف دیگر مقالات تنها در بازه خاصی از تنش میانگین‌ها نتیجه گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۶ دیده می‌شود، بیشترین کاهش عمر در تنش میانگین بین ۱۰ MPa تا ۲۰ MPa رخ داده است [۱۰].



شکل ۱-۶: تغییرات عمر خستگی نسبت به تنش میانگین با دامنه تنش‌های مختلف [۱۰].

^۱ Hardening/Softening

در ادامه آن‌ها به بررسی تأثیر خاصیت نرم‌شوندگی و یا سخت‌شوندگی بر اندر کنش خستگی و رچتینگ مواد پرداختند. در این مطالعه نویسندگان به بررسی رابطه رچتینگ-خستگی برای بارگذاری سیکلی تک محوری و برای حالت‌هایی با تنش میانگین و دامنه تنش متفاوت، برای جنس فولاد 42CrMo در دو حالت آبدیده و تابدیده پرداخته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که رفتار 42CrMo تابدیده با حالت آبدیده متفاوت است که دلیل آن وجود ویژگی سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی متفاوت در دو حالت است. در حالت تابدیده مشخصه سیکلی پایدار است، اما در حالت آبدیده از خود حالت نرم‌شوندگی نشان می‌دهد. این مطالعه به تأثیر مشخصه سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی در پاسخ رچتینگ و خستگی می‌پردازد. مطالعه آن‌ها نشان داد که برای فولاد تابدیده با مشخصه سیکلی پایدار کرنش رچتینگ با تنش میانگین و دامنه تنش افزایش می‌یابد و آهنگ افزایش کرنش رچتینگ با افزایش سیکل‌ها کاهش می‌یابد و بعد از تعداد سیکلی مشخص این نرخ ثابت می‌شود. برای فولاد آبدیده با مشخصه سیکلی نرم شونده سه مرحله برای کرنش رچتینگ به دلیل سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی رخ می‌دهد. اولین مرحله نرخ کرنش رچتینگ کاهش می‌یابد. مرحله دوم تقریباً با نرخ ثابت سپری می‌شود و در مرحله سوم نرخ کرنش رچتینگ افزایش سریع پیدا می‌کند [۱۱].

آن‌ها در مطالعه ای دیگر سعی در ارائه روابط و روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی عمر خستگی متأثر از پدیده رچتینگ کردند. آن‌ها کاهش در عمر خستگی را به دو دلیل رفتار نرمی-سختی سیکلی مواد و پدیده رچتینگ نسبت می‌دهند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی دو روش بر پایه تنش برای پیش‌بینی عمر خستگی مواد تحت بار غیر متقارن و با توجه به رابطه رچتینگ-خستگی ارائه شده است. روش اصلی که روش زوال بر اساس تنش (SBF^1) نام دارد عمر خستگی را بر اساس رابطه باسکویین برای بار گذاری متقارن بدون تنش میانگین در نظر می‌گیرد و سپس تأثیر تنش میانگین و کرنش رچتینگ را با اضافه کردن ترم دیگری که تابع نسبت تنش (R) می‌باشد در نظر می‌گیرد. با مقایسه

¹ Stress-based failure model

نتایج بدست آمده از این روش با نتایج آزمایشگاهی معلوم می‌شود که این روش فقط برای موادی با رفتار سیکلی پایدار مثل فولاد تاب‌دیده^۱ 42CrMo مناسب است. در این روش تأثیر رفتار نرم‌شوندگی در نظر گرفته نمی‌شود. در روش دوم یعنی روش زوال بر اساس تنش بهبود یافته،^۲ MSBF با معرفی متغیر اسکالری به نام FP تأثیر رفتار نرم‌شوندگی نیز در عمر خستگی لحاظ شده است. با استفاده از این روش می‌توان عمر خستگی موادی مثل فولاد آبدیده 42CrMo و فولاد ضد زنگ SS304 را به خوبی پیش بینی کرد [۱۲].

در انتها آن‌ها به بررسی اندر کنش رچتینگ-خستگی مواد در حالت بارگذاری چند محوری پرداختند. این مطالعه در ادامه کارهای قبلی از گروه نویسندگان به آزمایش بر روی سه ماده قبلی و ارائه فرمول و روش‌های تحلیلی برای پیش بینی عمر خستگی و تأثیر رچتینگ در حالت بارگذاری چند محوری می‌پردازد. این مطالعه را می‌توان جزو معدود مطالعاتی دانست که رابطه رچتینگ خستگی را در حالت چند محوری بررسی کرده است. در این مطالعه با در نظر گرفتن بارگذاری چند محوری ابتدا با ارائه فرمول جدیدی برای پارامتر خستگی (FP) در حالت تک محوری و بسط دادن آن برای حالت چند محوری به وسیله صفحه بحرانی تنش و تنش معادل وون میسرز، پارامتر خستگی جدیدی برای بارگذاری چند محوری تعریف می‌شود و سپس با تعریف ضریب مسیر، (ϕ) برای پارامتر خستگی اقدام به ارائه فرمولی برای تعیین عمر خستگی در حالت چند محوری می‌شود [۱۳].

زیا و همکارانش دو نوع پیش بارگذاری- قبل از انجام آزمایش خستگی- در نظر گرفتند. در نوع اول، با دامنه تنش مشخص شروع به افزایش تدریجی تنش میانگین کردند تا تنش حداکثر به مقدار تنش حداکثر مشخص برای آزمایش خستگی برسد و سپس آزمایش خستگی را انجام دادند. در نوع دوم افزایش تنش میانگین به مقدار ۱۰۰ MPa بیشتر از تنش حداکثر مشخص برای آزمایش خستگی انجام گرفت و سپس تنش میانگین را کاهش می‌دهند تا به مقدار تنش حداکثر مشخص برای آزمایش

^۱ Annealed

^۲ Modified stress-based failure model

خستگی برسد و آزمایش خستگی انجام می‌شود. این مطالعه اثر وجود تنش میانگین و رچتینگ را بر روی عمر خستگی بررسی کرده و سعی می‌کند با ارائه روش‌های تحلیلی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شود. آن‌ها هم چنین به این نتیجه رسیدند که تنش میانگین مثبت و کرنش رچتینگ بر روی عمر خستگی تأثیر می‌گذارند. همچنین رفتار رچتینگ به سابقه بارگذاری ربط دارد. با پیش بارگذاری نوع دوم که حداکثر تنش در سیکل بیشتر از حداکثر تنش در آزمایش خستگی است مقدار رچتینگ در طی آزمایش خستگی کاهش می‌یابد و در نتیجه عمر خستگی افزایش می‌یابد. به تعبیری دیگر ایجاد اضافه بار^۱ در طی بارگذاری باعث کاهش انباشتگی کرنش رچتینگ در آزمایش خستگی می‌شود [۵].

ژیانچی یانگ در مطالعه‌ای به تأثیر وجود کرنش میانگین در آزمایش خستگی کم چرخه و تأثیر تنش میانگین و دامنه تنش‌های مختلف در عمر قطعات پرداخته است. او همچنین با تعریف آسیب خستگی، D_f به مطالعه تأثیر تنش میانگین و دامنه تنش‌های مختلف بر روی D_f برای فولاد کربنی ۴۵ پرداخته است. در واقع این مطالعه تأثیر بارگذاری‌های مختلف تنشی، بر روی آسیب خستگی را بررسی کرده است. همچنین تأثیر وجود کرنش میانگین در حالت کرنش-کنترل برای آزمایش خستگی کم چرخه بررسی شده است. اثر تنش میانگین و دامنه تنش نیز در حالت تنش-کنترل نیز روی عمر خستگی بررسی شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در بارگذاری متقارن کرنشی عمر خستگی با تعداد سیکل کم (LCF^2) به دامنه کرنش پلاستیک بستگی دارد که با استفاده از رابطه منسون-کافین^۳ هم قابل تایید است. همچنین در آزمایش LCF کنترل شونده با کرنش، عمر خستگی تحت تأثیر دامنه کرنش است و تأثیر کرنش میانگین بر روی آن کم است. اما کرنش میانگین تأثیر لحظه‌ای زیادی بر روی رفتار پلاستیک ماده دارد. عمر زوال رچتینگ با افزایش دامنه تنش-در آزمایش کنترل شونده با تنش-کاهش می‌یابد. افزایش تنش میانگین نیز تأثیر کمتری بر کاهش این

^۱ Overloading

^۲ Low cycle fatigue

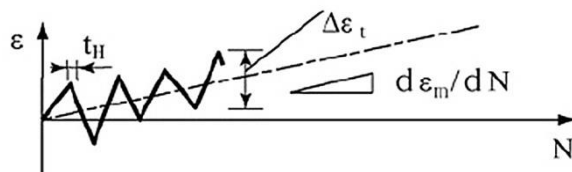
^۳ Manson-Coffin

عمر دارد و وقتی دامنه تنش خیلی زیاد و تنش میانگین کم باشد D_f ، آسیب خستگی زیاد است و برعکس [۱۴].

صنایع سنگین میتسویشی و مرکز تحقیقات صنایع الکتریکی ژاپن در مطالعه ای به بررسی خستگی و رچتینگ و برهم کنش آنها در رآکتورها می پردازد. در این مطالعه برای اولین بار کرنش میانگین ثابت نمی باشد و با دو حالت نرخ مثبت خطی و نرخ منفی خطی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهند که نرخ مثبت کرنش میانگین باعث کاهش عمر خستگی می شود در صورتی که نرخ منفی (کشش) تأثیری بر روی عمر خستگی ندارد. همچنین از هلد تایم^۱ نیز در بارگذاری سیکلی در این آزمایش استفاده شده است. هلد تایم (t_H) به مدت زمان مکثی گفته می شود که در حداکثر مقدار کرنش وارده در هر سیکل ایجاد می شود. جنس مورد آزمایش در این تحقیق فولاد زد زنگ 316FR می باشد و نوع بارگذاری کرنش-کنترل می باشد. سه حالت مختلف برای آزمایش خستگی و رچتینگ در این مطالعه نظر گرفته شده است:

۱. آزمایش خستگی و رچتینگ کششی

کرنش میانگین نسبت به سیکل با شیب مثبت به صورت خطی افزایش می یابد (شکل ۷-۱).

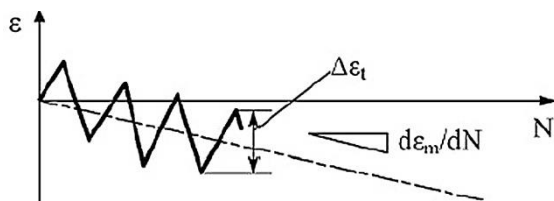


شکل ۷-۱: نرخ کرنش میانگین مثبت [۱۵].

۲. آزمایش خستگی و رچتینگ فشاری

کرنش میانگین نسبت به سیکل با شیب منفی به صورت خطی افزایش می یابد (شکل ۸-۱).

^۱ Hold Time

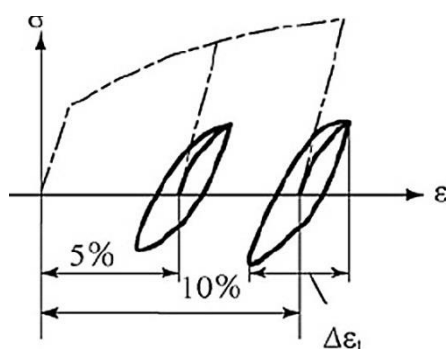


شکل ۸-۱: نرخ کرنش میانگین منفی [۱۵].

۳. آزمایش خستگی با وجود پیش کرنش

مقدار مشخصی کرنش پلاستیک قبل از آزمایش خستگی در قطعه ایجاد می‌شود (شکل

(۹-۱).



شکل ۹-۱: پیش کرنش پلاستیک [۱۵].

آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که رچتینگ کششی عمر خستگی را کم می‌کند در صورتی که رچتینگ فشاری بی تأثیر است. تأثیر کاهش عمر با کاهش بازه کرنش بیشتر می‌شود. پیش کرنش فشاری نیز باعث کاهش عمر خستگی می‌شود؛ اما تأثیر آن به اندازه رچتینگ کششی با همان انباشتگی کرنش نیست. همچنین کرنش میانگین تأثیر کمی بر روی آهنگ رشد ترک دارد، بنابراین دلیل اصلی کاهش عمر با رچتینگ کششی، کاهش زمان شروع ترک است و عمر قطعات در

آزمایش خستگی-رچتینگ با بازه کرنش و حداکثر تنش سیکلی کششی در ارتباط است [۱۵].

لیم و همکارانش آزمایش خستگی تنش-کنترل برای آلیاژ مس در دمای اتاق همراه با تنش

میانگین و بدون تنش میانگین انجام دادند. آن‌ها کرنش رچتینگ نیز برای چهار حالت بارگذاری با

دامنه تنش‌ها و تنش میانگین‌های متفاوت را اندازه‌گیری کردند. در آزمایش آن‌ها دیده می‌شود که با

افزایش نرخ تنش، کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد. در مطالعه آن‌ها روش‌های ^۱SWT و واکر^۲ برای در نظر گرفتن تأثیر تنش میانگین در پیش بینی عمر خستگی برای بازه ۱۰^۲ تا ۱۰^۵ سیکل، روش‌های مورد قبولی بودند. همچنین تأثیر نرخ تنش را نیز بر روی کرنش رچتینگ بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که روند افزایش کرنش رچتینگ را می‌توان به سه قسمت تقسیم کرد. ابتدایی، ثانویه (پایا) و قسمت نهایی. کرنش رچتینگ با حالتی پایا در بیشتر عمر خستگی با مقدار پایین تنش افزایش می‌یابد. منطقه پایا با افزایش مقدار تنش کوچک‌تر می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که رابطه مقدار کرنش رچتینگ با زوال تحت تأثیر عواملی مانند دامنه تنش، تنش میانگین، نرخ تنش و نوع ماده می‌باشد. برای ماده آزمایش در این مقاله کرنش رچتینگ با افزایش تنش میانگین و دامنه تنش افزایش می‌یابد و با افزایش نرخ تنش کاهش می‌یابد [۱۶].

هنگ گایو و زو چن به بررسی آزمایش خستگی چند محوری تحت بارگذاری ترکیبی محوری و پیچشی و بررسی رابطه رچتینگ و خستگی در این حالت برای Sn-3.5Ag پرداختند. در این مطالعه مشاهده می‌شود که کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد مادامی که عمر خستگی با افزایش تنش محوری و دامنه کرنش برشی، کاهش یابد. این مطالعه با بارگذاری متفاوت نسبت به مطالعات پیشین و ارائه روش‌های تحلیلی به بررسی رابطه رچتینگ خستگی پرداخته است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنش کوچک محوری باعث ایجاد کرنش رچتینگ زیاد در ماده مورد نظر می‌شود. رابطه بین کرنش رچتینگ و تعداد سیکل در میانه عمر خطی است. افزایش تنش محوری یا کرنش برشی باعث افزایش کرنش رچتینگ می‌شود که این پدیده بر روی عمر خستگی تأثیر می‌گذارد. همچنین از آنجایی که در روش کرنش معادل و روش صفحه بحرانی کرنش رچتینگ در نظر گرفته نمی‌شود روش‌های پیش بینی عمر خستگی برای حالت‌های چند محوری با کرنش رچتینگ مناسب نیستند. آن‌ها دریافتند که

^۱ Smith-Watson-Topper

^۲ Walker

مدل کافین که کرنش سیکی و رچتینگ را با هم ترکیب کرده است، مناسب پیش بینی عمر خستگی با رچتینگ کوچک است و وقتی رچتینگ زیاد باشد نتایج دقیق نخواهد بود [۱۷].

دو مرکز تحقیقاتی بخش علوم و تکنولوژی مواد لابراتوار ملی متالوژی هند و بخش ایمنی راکتور مرکز مطالعاتی اتمی بهابا در سال ۲۰۱۰ مطالعه ای به منظور بررسی پدیده رچتینگ و خستگی لوله های بکار رفته در یک نیروگاه اتمی را انجام داده‌اند. هدف از این مطالعه بررسی رچتینگ بوجود آمده در لوله های فولادی Sa33 یک نیروگاه اتمی می‌باشد که بر اثر یک نویز خارجی مثل زمین لرزه در نقاط حساس خط لوله مثل زانویی‌ها و اتصالات تی شکل بوجود می‌آیند. وجود فشار داخلی در لوله‌ها می‌تواند نقش تنش میانگین را ایفا کند و بار سیکی حاصل از زمین لرزه نیز می‌تواند رچتینگ یا انباشتگی کرنش پلاستیک در طی هر سیکل را ایجاد کند. این پدیده می‌تواند تأثیر زیادی بر روی عمر خستگی این لوله‌ها داشته باشد. در این مطالعه آزمایش رچتینگ به صورت تنش-کنترل و در حالت تک محوری برای ترکیب‌های مختلف تنش میانگین و دامنه تنش‌های مختلف انجام می‌شود و در ادامه آزمایش خستگی کم چرخه برای نمونه های از پیش رچتینگ شده انجام و با حالت بدون پیش رچتینگ مقایسه می‌شود. این مقایسه نشان می‌دهد که انباشتگی کرنش پلاستیک باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. همچنین این مطالعه مشخص کرد که افزایش دامنه تنش و تنش میانگین، باعث افزایش کرنش رچتینگ می‌شود. زمانی مقدار کرنش رچتینگ قابل ملاحظه می‌شود که مقدار تنش حداکثر در طی روند آزمایش رچتینگ، صرف نظر از نسبت تنش، از مقدار تنش تسلیم ماده بیشتر شود. این مسئله باعث پیدایش انباشتگی زیاد کرنش رچتینگ در سیکل‌های ابتدایی می‌شود. کرنش رچتینگ می‌تواند با توجه به مقدار نسبی تنش میانگین و دامنه تنش و پاسخ پلاستیک سیکی ماده در طی آزمایش ادامه داشته باشد و یا متوقف شود. همچنین اثر دامنه تنش بر روی انباشتگی رچتینگ بیشتر از تنش میانگین است؛ و انباشتگی رچتینگ عمر خستگی را کاهش می‌دهد [۶].

در این پژوهش از فولاد CK45 استفاده شده است. فولاد Ck45 به عنوان یک فولاد بسیار مهم و پرکاربرد به صورت گسترده در سازه های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولاد در قطعات با

استحکام بالا به ویژه در خودروها و هواپیماها که در معرض بارهای چرخه ای قرار دارند؛ مانند میل لنگ، سگدست، شاتون، میل محور وسایل نقلیه، انواع شافت و چرخ‌دنده های کوچک کاربرد دارد. مطالعات انجام شده، برای چند ماده خاص و عمدتاً آزمایش‌های تک مرحله ای انجام شده‌اند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پدیده رچتینگ بر عمر خستگی فولاد Ck45 تحت بارگذاری چرخه ای تک محوری در حالت تنش-کنترل و به صورت دو مرحله‌ای و همچنین بررسی رفتار سیکلی و عمر خستگی این فولاد در بارگذاری کرنش-کنترل، می‌باشد.

فصل ۲ - تحلیل تجربی

۱-۲- مقدمه ای بر آزمایش‌های انجام شده

در این فصل آزمایش‌های تجربی مختلفی بر روی نمونه‌های استاندارد از دو جنس فولاد CK45 و فولاد SS316 انجام گرفته است. همچنین نمودارهای هیستریزیس و عمر خستگی بدست آمده برای هر نمونه و جنس، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها به دو صورت تنش-کنترل و کرنش-کنترل انجام شده‌اند. آزمایش‌های تنش-کنترل انجام شده در این تحقیق، به صورت دو مرحله‌ای می‌باشند. در مرحله اول، بارگذاری با تنش میانگین غیر صفر وارد ناحیه پلاستیک می‌شود تا در نمونه‌ها کرنش رچتینگ ایجاد شود. در این مرحله آزمایش، به تعداد ۱۰۰۰ سیکل بر روی نمونه‌ها بارگذاری انجام می‌شود. در مرحله دوم، نمونه‌های از پیش رچتینگ شده با بارگذاری‌ها مختلف، تحت آزمایش خستگی غیر متقارن با بارگذاری ثابت قرار می‌گیرند؛ این مرحله تا شکست نمونه‌ها ادامه پیدا می‌کند. آزمایش‌های کرنش-کنترل به صورت یک مرحله‌ای و جهت تعیین رفتار سیکلی ماده و همچنین بررسی تأثیر دامنه کرنش و کرنش میانگین بر عمر خستگی انجام شده‌اند.

۲-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون^۱ ۸۸۰۲ انجام شده‌اند (شکل ۱-۲)، که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن را دارد. همچنین برای نمونه‌های استاندارد استفاده شده در این مطالعه از فیکسچر^۲ استاندارد دستگاه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش‌ها، از طول سنج^۳ نیز استفاده شده است.

^۱ Instron

^۲ Fixture

^۳ Extensometer



شکل ۲-۱: دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و نمونه های آزمایش

۲-۳- نتایج تجربی روی نمونه های آزمایش فولاد CK45

۲-۳-۱- هندسه و خواص مکانیکی

نمونه های آزمایش در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM E466 [۱۸] به صورت میله‌هایی با طول سنجه^۱ ۳۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۲-۲). آزمایش کشش ساده نیز با استفاده از همین نمونه‌ها با فرکانس $\frac{mm}{s}$ ۰/۰۱ انجام شده است؛ که نمودار آن در شکل ۲-۳ دیده می‌شود. هندسه و خواص مکانیکی ماده مورد بحث در جدول ۲-۱ نشان داده شده‌اند. همچنین جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی ماده مورد بحث را نشان می‌دهد. تمامی آزمایش‌های سیکلی با فرکانس ۱۰ هرتز انجام گرفته‌اند و به دلیل جلوگیری از تأثیر پارامتر نرخ بارگذاری، از تغییر آن در طول آزمایش‌ها و مراحل مختلف آزمایش خودداری شده است.

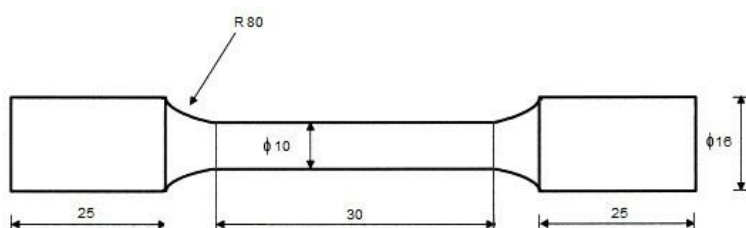
^۱ Gauge

جدول ۱-۲: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده CK45

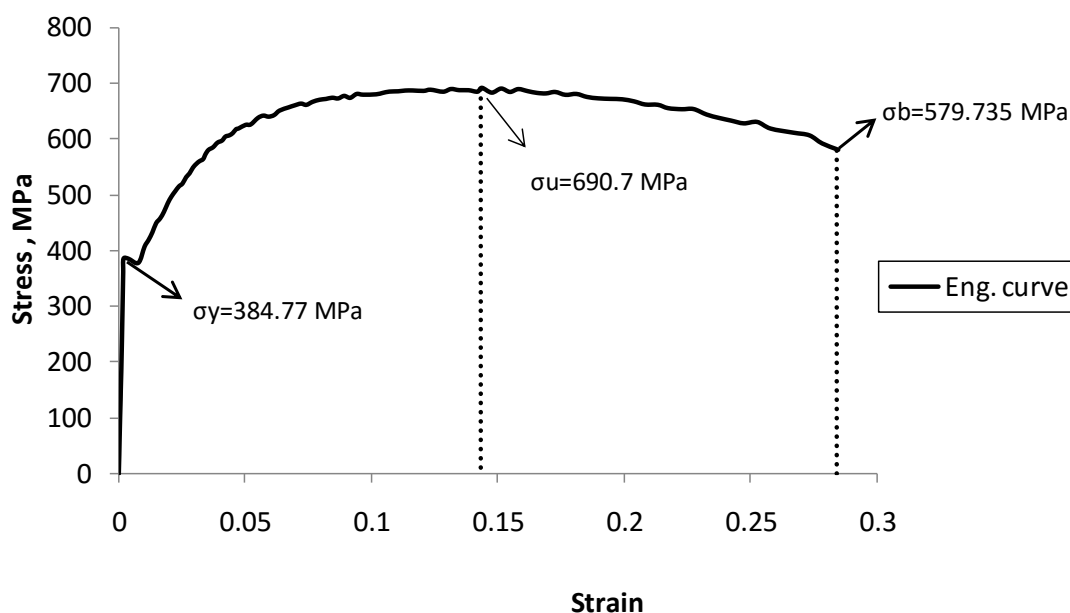
مقدار	مشخصات
$l=30\text{ mm}$	طول سنجه
$d=10\text{ mm}$	قطر سنجه
$E= 204.002\text{ (GPa)}$	مدول الاستیسیته
$\sigma_y = 384.77\text{ (MPa)}$	تنش تسلیم
$S_u = 690.7\text{ (MPa)}$	تنش نهایی
$\nu =0.3$	ضریب پواسون

جدول ۲-۲: ترکیب شیمیایی فولاد CK45

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Others
0.46	0.40	0.65	0.40	0.10	0.40	$(Cr+Mo+Ni) = 0.63$



شکل ۲-۲: ابعاد هندسی نمونه بر حسب میلی متر



شکل ۲-۳: منحنی تنش- کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده برای فولاد CK45

۲-۳-۲ - بارگذاری تنش-کنترل

آزمایش‌های تنش-کنترل انجام شده در این تحقیق، به صورت دو مرحله ای می‌باشند. در مرحله اول، بارگذاری با تنش میانگین غیر صفر وارد ناحیه پلاستیک می‌شود تا در نمونه‌ها کرنش رچتینگ ایجاد شود. در این مرحله آزمایش، به تعداد ۱۰۰۰ سیکل بر روی نمونه‌ها بارگذاری انجام می‌شود. در مرحله دوم، نمونه‌های از پیش رچتینگ شده با بارگذاری‌های مختلف، تحت آزمایش خستگی غیر متقارن با بارگذاری ثابت قرار می‌گیرند؛ این مرحله تا شکست نمونه‌ها ادامه پیدا می‌کند. هدف از این آزمایش‌ها در این تحقیق عبارت است از:

- ✓ بررسی تأثیر دامنه تنش، تنش میانگین و نسبت تنش، بر رفتار رچتینگ نمونه‌ها در ۱۰۰۰ سیکل مرحله اول آزمایش.
- ✓ مطالعه تأثیر کرنش رچتینگ بر عمر خستگی با بررسی عمر خستگی نمونه‌های پیش-رچتینگ شده، تحت بارگذاری‌های مختلف.

بارگذاری مرحله خستگی به گونه ای انتخاب شده است؛ که حداکثر تنش در هر سیکل از مقدار تنش تسلیم بیشتر نشود.

۲-۳-۲-۱- تعریف چیدمان مناسب برای انجام آزمایش

با توجه به خواص مکانیکی ماده مورد بررسی، تنش میانگین و دامنه تنش 192MPa برای آزمایش خستگی در نظر گرفته شده است. دلیل این انتخاب بیشتر نشدن حداکثر تنش در هر سیکل، از تنش تسلیم و همچنین زیاد نشدن تعداد سیکل خستگی می باشد. برای آزمایش رجتینگ از مقادیر 260MPa ، 280MPa ، 300MPa و 320MPa برای دامنه تنش و تنش میانگین استفاده شده است. هدف از تنظیم این چیدمان بررسی تأثیر پارامترهای تنش میانگین، دامنه تنش، نسبت تنش و تعداد سیکل آزمایش رجتینگ بر عمر خستگی می باشد. مشخصه های آزمایش و نتایج تجربی بدست آمده در قسمت های بعدی به طور کامل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۳-۲-۲- بررسی رفتار رجتینگ

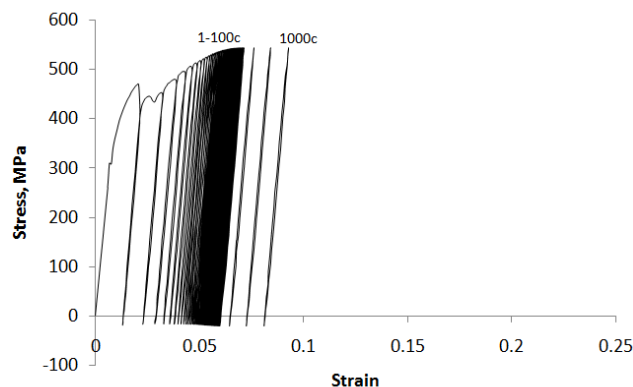
هدف از این بحث بررسی تجربی تأثیر سه پارامتر دامنه تنش، تنش میانگین و نسبت تنش بر رفتار رجتینگ، در بارگذاری چرخه ای تک محوری در 1000 سیکل، برای نمونه های استاندارد CK45 می باشد. به این منظور آزمایش هایی مطابق جدول ۲-۳ انجام شده اند.

جدول ۲-۳: مشخصه های آزمایش رجتینگ برای نمونه های CK45 (تعداد چرخه 1000 سیکل)

شماره آزمایش	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	نسبت تنش حداکثر (MPa)	نسبت تنش
۱	۲۶۰	۲۸۰	۵۴۰	-۰/۰۳
۲	۲۶۰	۳۲۰	۵۸۰	-۰/۱۰۳
۳	۲۶۰	۳۰۰	۵۶۰	-۰/۰۷۱
۴	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۰
۵	۳۰۰	۲۸۰	۵۸۰	۰/۰۳۴
۶	۳۰۰	۲۶۰	۵۶۰	۰/۰۷۱

۰/۰۶۶	۶۰۰	۲۸۰	۳۲۰	۷
۰	۵۶۰	۲۸۰	۲۸۰	۸
-۰/۰۳۴	۵۸۰	۳۰۰	۲۸۰	۹

شکل ۲-۴ رفتار رچتینگ مربوط به آزمایش شماره ۱ (با کمترین مقدار تنش حداکثر) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کرنش رچتینگ به خوبی در هر سیکل انباشته می‌شود و با افزایش تعداد سیکل‌ها نرخ این انباشتگی کاهش می‌یابد؛ اما به حالت اشباع نمی‌رسد. بنابراین می‌توان گفت که نمونه‌ها در ۱۰۰۰ سیکل ابتدایی رفتار رچتینگ، بدون وجود پدیده تعدیل پلاستیک^۱ را نشان می‌دهند. قابل توجه است که، دلیل نا منظم بودن سیکل‌های ابتدایی، بالا بودن فرکانس بارگذاری می‌باشد. این مشکل را می‌توان با انجام یک مرحله پیش بار، با بارگذاری بسیار پایین برطرف کرد.



شکل ۲-۴: رفتار رچتینگ نمونه CK45 تحت آزمایش شماره ۱

الف) تأثیر دامنه تنش بر رفتار رچتینگ

شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ کرنش رچتینگ برای سه دامنه تنش و تنش میانگین ثابت، در ۱۰۰۰ سیکل را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود، کاهش کرنش رچتینگ در دامنه تنش ۲۶۰ MPa بسیار چشمگیر می‌باشد؛ در صورتی که این کاهش در دامنه تنش ۲۸۰ MPa اندک

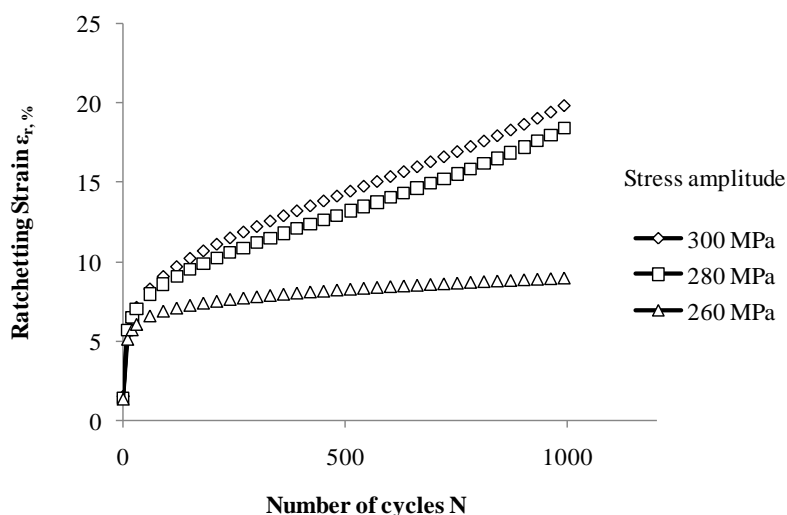
^۱ Plastic shakedown

می‌باشد. همچنین در شکل ۲-۶ مشاهده می‌شود که افزایش کرنش رچتینگ در دامنه 320MPa بسیار زیاد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش یا کاهش کرنش رچتینگ وابسته به افزایش یا کاهش دامنه تنش می‌باشد؛ اما رابطه آن خطی نیست و در بعضی از دامنه تنش‌ها افزایش و یا کاهش کرنش رچتینگ با نرخ بسیار زیادی اتفاق می‌افتد؛ به طور کلی می‌توان گفت که دامنه تنش تأثیر زیادی بر روی کرنش رچتینگ دارد و با افزایش آن کرنش رچتینگ نیز افزایش می‌یابد.

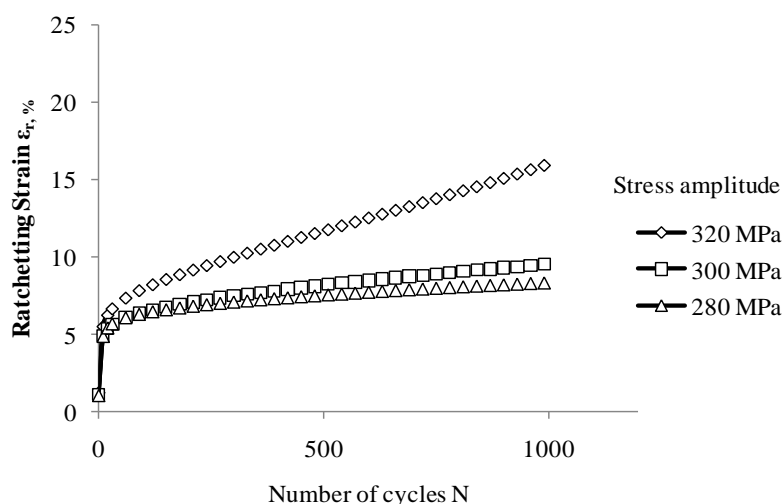
برای محاسبه کرنش رچتینگ از رابطه (۱-۲) استفاده شده است [۱۰].

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} (\ln(1 + \varepsilon_{max}) + \ln(1 + \varepsilon_{min})) \quad (1-2)$$

که در این رابطه پارامترهای ε_r ، ε_{max} و ε_{min} به ترتیب برابر کرنش رچتینگ، بیشترین مقدار کرنش در هر سیکل و کمترین مقدار کرنش در هر سیکل می‌باشند.



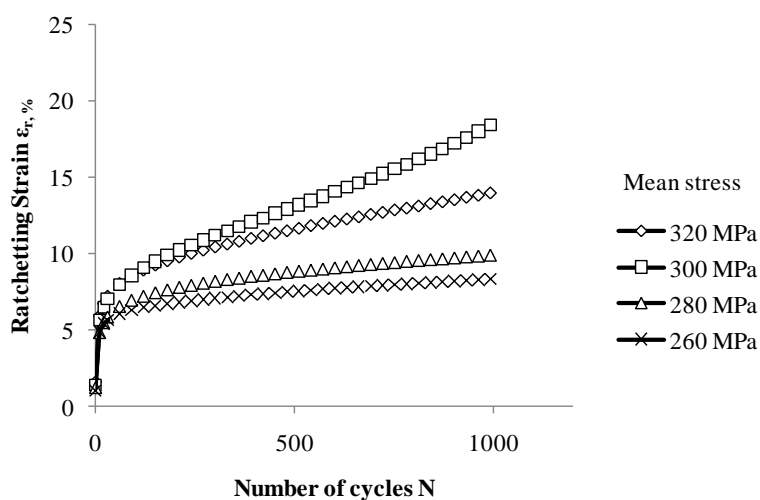
شکل ۲-۵: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با تنش میانگین ثابت 300MPa



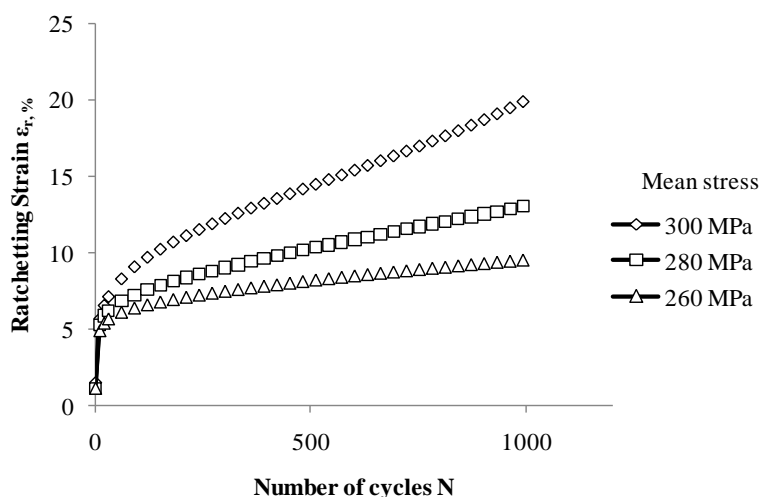
شکل ۲-۶: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با تنش میانگین ثابت ۲۶۰ MPa

ب) تأثیر تنش میانگین بر رفتار رچتینگ

شکل ۲-۷ کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل برای دامنه تنش ثابت ۲۸۰ MPa را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که برای تنش میانگین‌های کمتر از ۳۰۰ MPa با کاهش تنش میانگین، کرنش رچتینگ نیز کاهش می‌یابد. اما برای تنش میانگین‌های بالای ۳۰۰ MPa بعد از تعداد سیکلی مشخص، با افزایش تنش میانگین، کرنش رچتینگ کاهش می‌یابد. به صورتی که برای ۸۰ سیکل ابتدایی کرنش رچتینگ با افزایش تنش میانگین افزایش می‌یابد و برای سیکل‌های بعدی تا انتها این روند معکوس می‌شود. شکل ۲-۸ کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل برای دامنه تنش ثابت ۳۰۰ MPa را نشان می‌دهد. در این دامنه تنش نیز افزایش تنش میانگین باعث افزایش کرنش رچتینگ می‌شود.



شکل ۲-۷: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۲۸۰ MPa



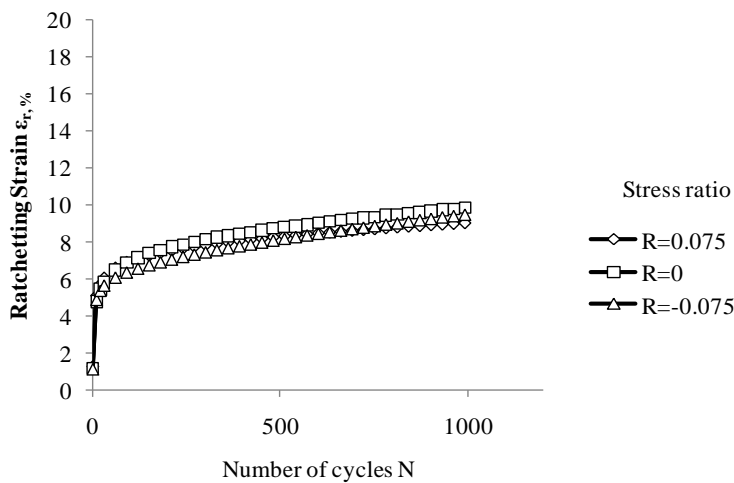
شکل ۲-۸: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت ۳۰۰ MPa

ج) تأثیر نسبت تنش بر رفتار رچتینگ

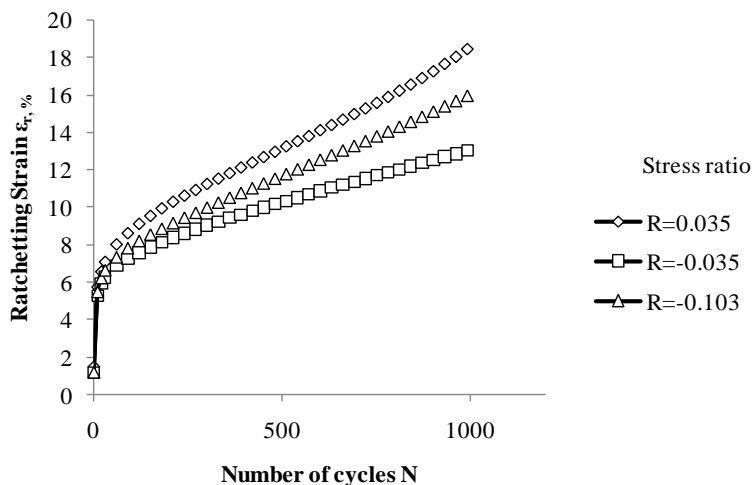
برای بررسی تأثیر نسبت تنش بر رفتار رچتینگ و همچنین عمر خستگی، آزمایش‌هایی با مقدار حداکثر تنش^۱ ثابت و نسبت تنش‌های مختلف انجام شده‌اند. شکل ۲-۹ کرنش رچتینگ بر حسب سیکل را برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa و سه نسبت تنش مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که

^۱ Peak stress

ملاحظه می‌شود برای ۱۰۰ سیکل ابتدایی بیشترین کرنش رچتینگ متعلق به نسبت تنش بیشتر یعنی $R=0/0.75$ می‌باشد. اما این روند با افزایش سیکل‌ها تغییر می‌کند به طوری که در انتها کرنش رچتینگ نهایی آن، پایین‌ترین مقدار را داراست. کرنش رچتینگ متعلق به نسبت تنش $R=0/0.75$ از قرینه آن یعنی $R=-0/0.75$ برای ۶۰۰ سیکل ابتدایی مقدار بیشتری دارد؛ اما از ۶۰۰ سیکل به بعد این روند برعکس می‌شود. شکل ۲-۱۰ کرنش رچتینگ بر حسب سیکل را برای حداکثر تنش 560MPa نشان می‌دهد. بیشترین کرنش رچتینگ متعلق به بیشترین مقدار نسبت کرنش یعنی $R=0/0.53$ می‌باشد. اما کمترین کرنش رچتینگ متعلق به کمترین نسبت تنش نمی‌باشد.



شکل ۲-۹: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش 560MPa



شکل ۲-۱۰: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش 580MPa

۲-۳-۲-۳- بررسی عمر خستگی

در این قسمت، عمر خستگی نمونه های پیش رچتینگ شده و همچنین تأثیر دامنه تنش، تنش میانگین، نسبت تنش و تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش پیش رچتینگ، بر عمر خستگی نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد. جدول ۲-۴ مشخصات مربوط به هر آزمایش و نتایج حاصله برای عمر خستگی را نشان می دهد. آزمایش شماره ۱ مربوط به خستگی خالص می باشد. در این آزمایش نمونه تحت پیش رچتینگ قرار نگرفته است تا بتوان نمونه های پیش رچتینگ شده را با آن مقایسه نمود. همچنین جهت افزایش دقت، هر آزمایش چندین بار تکرار شده و میانگین نتایج ثبت شده است. جهت مقایسه و بررسی نتایج بدست آمده و همچنین تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر عمر خستگی، نمودارهای مختلفی رسم شده است. قابل توجه است که ابتدا نمونه ها تحت آزمایش پیش-رچتینگ با بارگذاریهای مختلف قرار می گیرند و سپس عمر خستگی آنها با یک بارگذاری ثابت برای همه نمونه ها، اندازه گیری می شود.

جدول ۲-۴: مشخصات و نتایج آزمایش های تنش-کنترل برای نمونه های فولاد CK45

شماره آزمایش	آزمایش پیش رچتینگ			آزمایش خستگی		
	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	تعداد چرخه	دامنه تنش (MPa)	تنش میانگین (MPa)	عمر خستگی نمونه ها (10- cycle)
۱	-	-	-	۱۹۲	۱۹۲	۱۲۴
۲	۲۶۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۸۶
۳	۲۶۰	۳۲۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۳
۴	۲۶۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۴
۵	۳۰۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۶
۶	۳۰۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۷۲

۱۴/۵۱	۱۰۶	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۰۰	۲۶۰	۳۰۰	۷
۴۰/۳۲	۷۴	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۰۰	۲۸۰	۳۲۰	۸
۵۲/۴۱	۵۹	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۰۰	۲۸۰	۲۸۰	۹
۶۱/۲۹	۴۸	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۰۰	۳۰۰	۲۸۰	۱۰
۵۳/۲۲	۵۸	۱۹۲	۱۹۲	۸۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۱۱
۱۳/۷۰	۱۰۷	۱۹۲	۱۹۲	۶۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۱۲

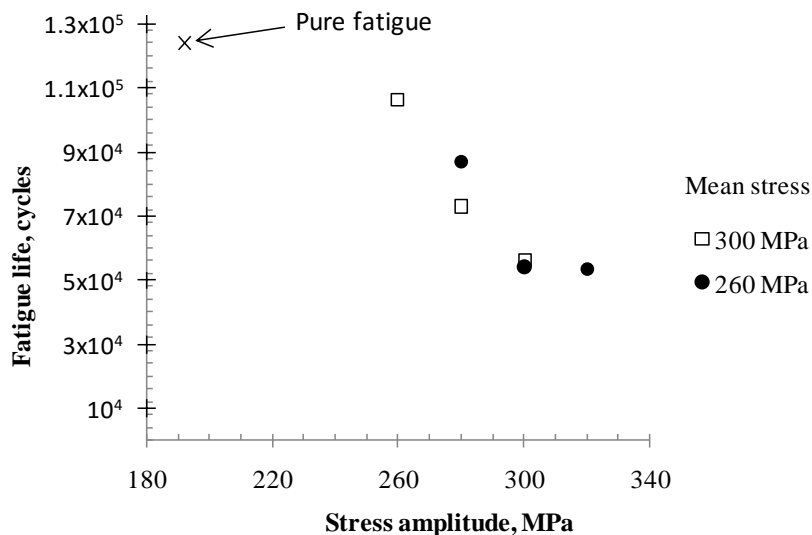
الف) تأثیر دامنه تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی

شکل ۲-۱۱ تأثیر دامنه تنش مرحله پیش رچتینگ، با تنش میانگین ثابت بر عمر خستگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود پیش رچتینگ باعث کاهش عمر خستگی نسبت به حالت خستگی خالص شده است. این کاهش عمر مطابق جدول ۲-۴، برای کمترین دامنه تنش، یعنی 260 MPa برابر $14/51\%$ و برای بیشترین دامنه تنش، یعنی 320 MPa برابر $57/25\%$ می‌باشد. نتایج نشان دهنده تأثیر زیاد دامنه تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی می‌باشد. به گونه‌ای که با افزایش دامنه تنش پیش رچتینگ، درصد کاهش عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد. درصد کاهش عمر برابر درصد انحراف عمر نسبت به عمر خستگی خالص می‌باشد که به صورت

$$100 \cdot \frac{\text{عمر خستگی} - \text{عمر خستگی خالص}}{\text{عمر خستگی}} \text{ محاسبه می‌شود. این روند مطابق شکل ۲-۱۱ برای هر دو تنش}$$

میانگین صادق است و تغییر در تنش میانگین تأثیر چندانی بر عمر خستگی نداشته است. به گونه‌ای که بیشترین اختلاف در درصد کاهش عمر خستگی برابر $11/29\%$ ، برای دامنه تنش 280 MPa و دو تنش میانگین 300 MPa و 260 MPa می‌باشد و در موارد دیگر این اختلاف ناچیز است. در انتها می‌توان گفت که تنش میانگین تأثیر چندانی بر عمر خستگی نداشته است و عمر خستگی نمونه‌ها به

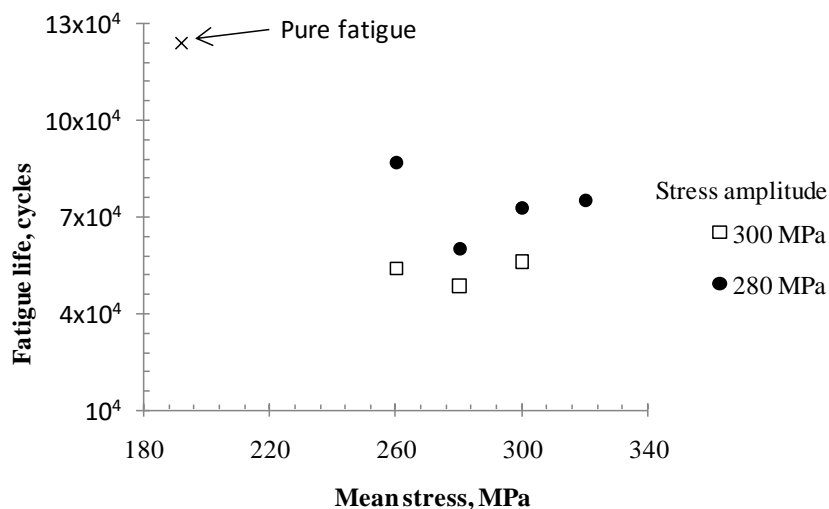
طور چشم گیری متأثر از دامنه تنش رچتینگ می‌باشد و با افزایش آن عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱-۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به دامنه تنش پیش رچتینگ با تنش میانگین ثابت

ب) تأثیر تنش میانگین پیش رچتینگ بر عمر خستگی

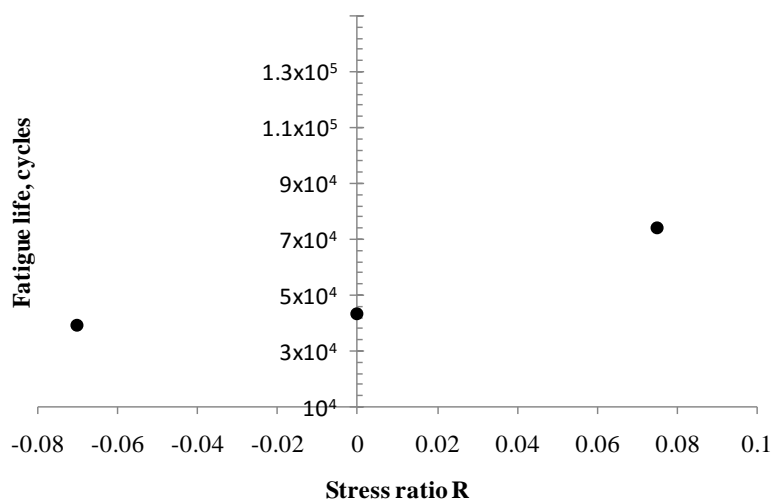
شکل ۱۲-۲ تأثیر تنش میانگین مرحله پیش رچتینگ با دامنه تنش ثابت را بر عمر خستگی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تأثیر تنش میانگین بر عمر خستگی اندک می‌باشد (بیشترین اختلاف در درصد کاهش عمر خستگی برابر ۱۱/۲۹٪)؛ اما برای هر دو دامنه تنش ۳۰۰ MPa و ۲۸۰ MPa عمر خستگی در تنش میانگین ۲۸۰ MPa کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. مقدار کاهش عمر خستگی در این تنش میانگین خاص برای دامنه تنش ۳۰۰ MPa برابر ۶۱/۲۹٪ و برای دامنه تنش ۲۸۰ MPa برابر ۵۲/۴۱٪ می‌باشد؛ که این مقدار کاهش از میانگین مقدار کاهش در تنش میانگین‌های دیگر برای دامنه تنش‌های ۳۰۰ MPa و ۲۸۰ MPa به ترتیب ۵/۶۵٪ و ۱۴/۷۸٪ بیشتر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر کرنش رچتینگ بر کاهش عمر خستگی، در بعضی از تنش‌های میانگین بیشتر است [۱۰]. دلیل آن را می‌توان در تغییرات ساختاری و متالورژیکی ایجاد شده در ماده جستجو کرد؛ که البته خود یک مبحث مستقل است.



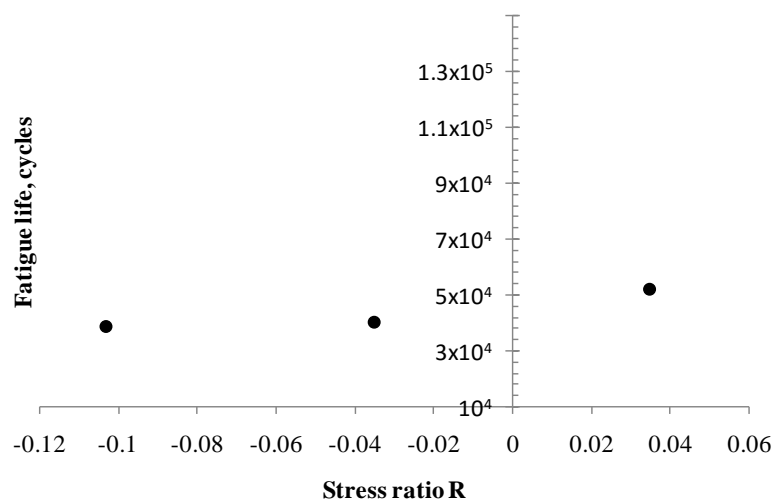
شکل ۲-۱۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به تنش میانگین پیش رچتینگ با دامنه تنش ثابت

ج) تأثیر نسبت تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی

شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ نمودارهای عمر خستگی بر حسب نسبت تنش در آزمایش رچتینگ، برای دو تنش حداکثر ثابت را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو تنش حداکثر ثابت، با افزایش نسبت تنش، عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد. برای تنش حداکثر ثابت ۵۶۰ MPa، با افزایش مقدار نسبت تنش، درصد کاهش عمر از ۵۶/۴۵٪ به ۱۴/۵۱٪ کاهش می‌یابد. افزایش عمر خستگی با افزایش نسبت تنش، در تنش حداکثر ثابت ۵۸۰ MPa شدت کمتری دارد به صورتی که، با افزایش مقدار نسبت تنش، درصد کاهش عمر از ۵۷/۲۵٪ به ۴۱/۹۳٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱۳: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش پیش رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۶۰MPa

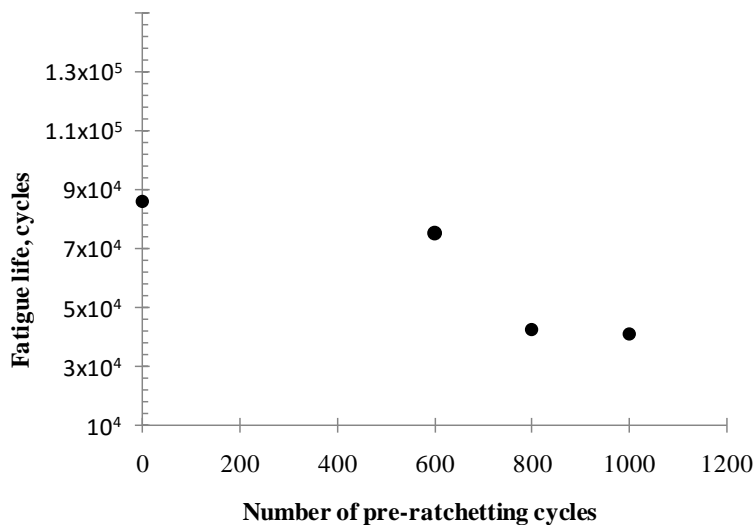


شکل ۲-۱۴: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش پیش رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۸۰MPa

د) تأثیر تعداد سیکل رچتینگ بر روی عمر خستگی

برای تعیین تأثیر تعداد چرخه پیش رچتینگ بر عمر خستگی، مرحله پیش رچتینگ چند نمونه آزمایش، با تعداد چرخه متفاوت در دامنه تنش و تنش میانگین ثابت انجام شده و عمر خستگی آنها بدست آمده؛ که نتیجه آن در شکل ۲-۱۵ قابل مشاهده است. همان طور که ملاحظه می شود، با کاهش تعداد چرخه پیش رچتینگ، عمر خستگی افزایش می یابد به طوری که در تعداد ۶۰۰ چرخه بارگذاری، عمر خستگی به حالت بدون پیش رچتینگ یا خستگی خالص نزدیک می شود. همچنین مشاهده می شود که تأثیر اصلی کرنش رچتینگ بر عمر خستگی طی چرخه های ۶۰۰ تا ۸۰۰ بوده

است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که عمر خستگی به صورت قابل ملاحظه‌ای متأثر از دامنه تنش مرحله پیش رچتینگ می‌باشد و تأثیر تنش میانگین بر روی آن اندک است. همچنین با افزایش نسبت تنش عمر خستگی افزایش می‌یابد.

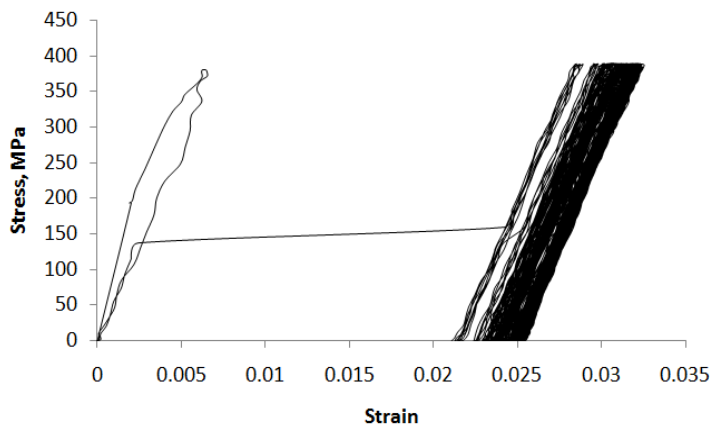


شکل ۲-۱۵: تغییرات عمر خستگی نسبت به تعداد سیکل پیش رچتینگ با دامنه تنش و تنش میانگین ثابت ۳۰۰MPa

ه) بررسی تأثیر اضافه بار بر عمر خستگی نمونه‌ها

به دلیل اینکه رفتار رچتینگ به سابقه بارگذاری ربط دارد، اگر در مرحله اول آزمایش که شامل آزمایش رچتینگ می‌باشد، حداکثر تنش در هر سیکل بیشتر از حداکثر تنش در هر سیکل مرحله دوم آزمایش، یعنی آزمایش خستگی شود با پدیده اضافه بار مواجه خواهیم شد. این پدیده باعث افزایش عمر خستگی می‌شود [۵]. دلیل این افزایش عمر را می‌توان حذف کرنش رچتینگ بوجود آمده در آزمایش خستگی دانست. در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های CK45 مشاهده شد که در آزمایش خستگی خالص نیز مقداری کرنش رچتینگ ایجاد شده است که خود عامل کاهش عمر خستگی می‌باشد. (شکل ۲-۱۶) همچنین مشاهده شد که در نمونه‌های پیش رچتینگ شده در

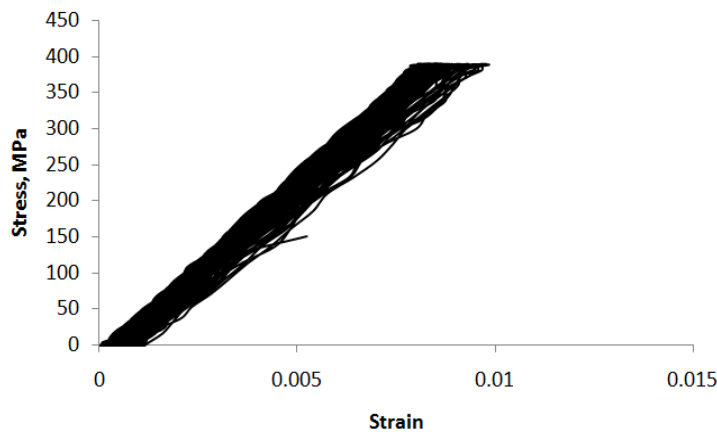
آزمایش خستگی، کرنش رچتینگ ایجاد نمی‌شود و با پدیده شیکدان الاستیک^۱ مواجه هستیم (شکل ۲-۱۷). بنا بر این می‌توان گفت یکی از دلایل افزایش عمر خستگی به دلیل پدیده اضافه بار، حذف کرنش رچتینگ در آزمایش خستگی می‌باشد. در نمونه های CK45 تأثیر این پدیده ناچیز بوده است و عامل تأثیر گذار بر روی عمر خستگی همواره کرنش رچتینگ ایجاد شده در مرحله پیش رچتینگ می‌باشد. دلیل آن را می‌توان در انتخاب بارگذاری آزمایش خستگی دانست. حداکثر تنش در هر سیکل در آزمایش خستگی برابر ۳۸۴ MPa می‌باشد که این مقدار برابر تنش تسلیم ماده در آزمایش کشش ساده می‌باشد. بنابراین هر سیکل بارگذاری تنها مقدار کمی وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و با پدیده شیکدان پلاستیک^۲ مواجه هستیم، در نتیجه کرنش پلاستیک انباشته شده در آزمایش خستگی خالص بسیار کم می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که در آزمایش‌های انجام شده دو عامل بر عمر خستگی تأثیر دارد. عامل اول پیش رچتینگ که باعث کاهش عمر خستگی می‌شود و عامل دوم اضافه بار که باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. قابل توجه است که، دلیل نا منظم بودن سیکل اول در شکل ۲-۱۶، فرکانس بالای دستگاه می‌باشد که پس از چند سیکل برطرف می‌شود.



شکل ۲-۱۶: رفتار رچتینگ در آزمایش خستگی خالص برای نمونه CK45

^۱ Elastic Shakedown

^۲ Plastic Shakedown



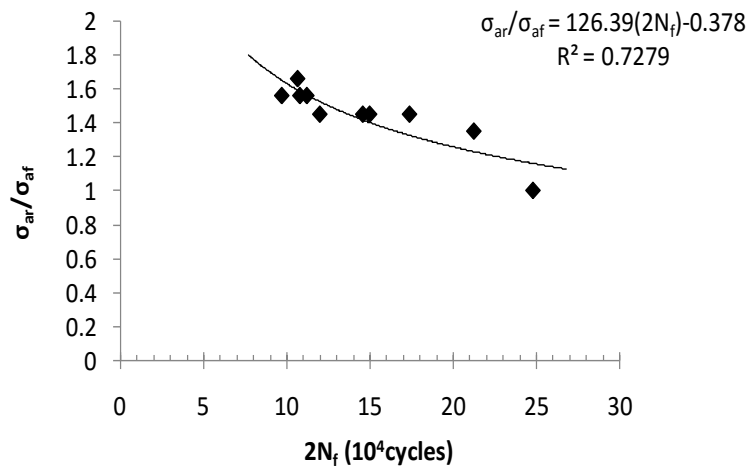
شکل ۲-۱۷: پدیده الاستیک شیکدان در آزمایش خستگی برای نمونه CK45 پیش رچتینگ شده با دامنه تنش و تنش میانگین ۳۰۰MPa

و) پیش بینی عمر خستگی

با توجه به نتایج تجربی بدست آمده برای عمر خستگی در آزمایش‌های دو مرحله ای، می‌توان نتیجه گرفت که در بارگذاری دو مرحله ای تنش-کنترل با شرط عدم ورود بارگذاری مرحله دوم (آزمایش خستگی) به ناحیه پلاستیک، پارامتر موثر بر عمر خستگی، دامنه تنش در ۱۰۰۰ چرخه ابتدایی مرحله پیش رچتینگ می‌باشد. جهت بدست آوردن رابطه ای برای پیش بینی عمر خستگی نمونه های CK45 تحت بارگذاری دو مرحله ای، نمودار نسبت دامنه تنش در مرحله پیش رچتینگ به دامنه تنش در مرحله آزمایش خستگی (σ_{ar}/σ_{af})، نسبت به نیم چرخه تا شکست نمونه‌ها رسم شده است (شکل ۲-۱۸). همچنین با استفاده از بررسی رگرسیون حداقل مربعات، رابطه (۲-۲) که بیانگر ارتباط بین عمر خستگی و نسبت دامنه تنش دو مرحله بارگذاری می‌باشد، بدست آمده است:

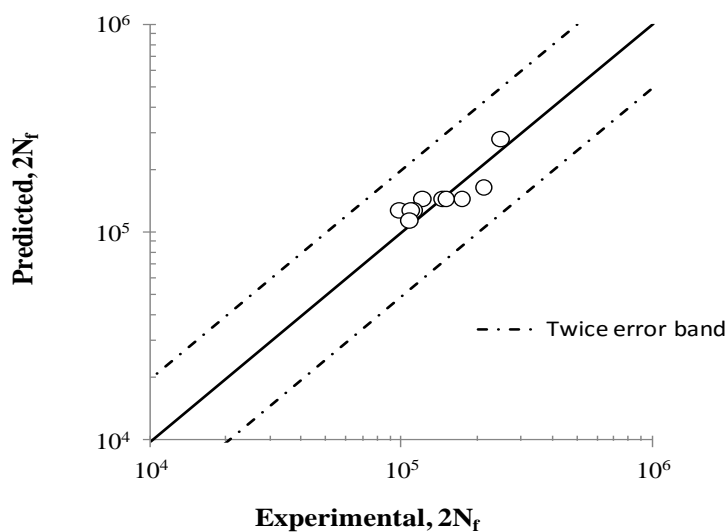
$$\frac{\sigma_{ar}}{\sigma_{af}} = 126.39(2N_f)^{-0.378} \quad (2-2)$$

در این روش، مربع ضریب همبستگی (R^2) هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، رابطه از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود؛ که در اینجا مقدار این ضریب برابر با ۰/۷۲۷۹ بدست آمده است؛ که نشان دهنده دقت قابل قبول رابطه بدست آمده می‌باشد.



شکل ۲-۱۸ رابطه نسبت دامنه تنش دو مرحله بارگذاری با عمر خستگی

برای بررسی دقت رابطه بدست آمده، نتایج تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط رابطه (۲-۲)، با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۲-۱۹). در صورتی که تعداد نیم چرخه تجربی و تعداد نیم چرخه پیش بینی شده با یکدیگر برابر باشند، مقدار خطا صفر می‌باشد و نقاط بدست آمده از نتایج تجربی (محور افقی) و پیش بینی شده (محور قائم) بر روی خط ممتد قرار می‌گیرند و در صورت وجود اختلاف در نتایج، این نقاط از خط ممتد دور می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقاط پیش بینی شده از دقت خوبی برخوردار می‌باشند و همگی در داخل محدوده دو برابر خطا قرار دارند. بنابراین می‌توان با استفاده از رابطه (۲-۲) و با دقت قابل قبولی، عمر خستگی نمونه های استاندارد Ck45 تحت بارگذاری تنش-کنترل دو مرحله ای با فرض بارگذاری به مقدار ۱۰۰۰ سیکل در مرحله اول را پیش بینی کرد.



شکل ۲-۱۹ مقایسه مقدار عمر خستگی تجربی با مقدار پیشی بینی شده

۲-۳-۳ - بارگذاری کرنش-کنترل

در بارگذاری کرنش-کنترل به بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده پرداخته می‌شود. همچنین تأثیر دامنه کرنش و کرنش میانگین بر روی عمر نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. قابل توجه است که بر خلاف بارگذاری تنش-کنترل، بارگذاری نمونه‌ها تنها شامل یک مرحله می‌باشد. جدول ۲-۵ چیدمان آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵: چیدمان آزمایش برای آزمایش کرنش-کنترل فولاد CK45

شماره آزمایش	کرنش میانگین	دامنه کرنش
۱	٪۰	٪۰/۸۳
۲	٪۰	٪۱/۲۵

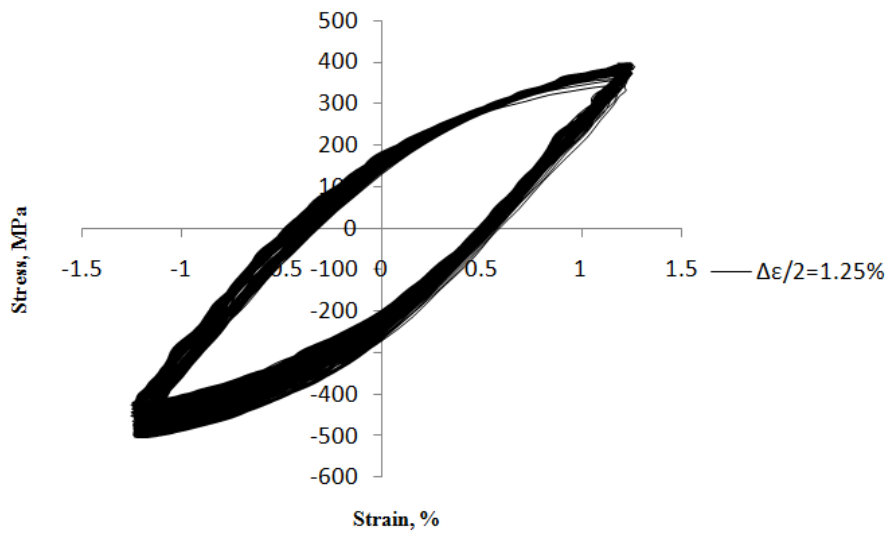
۰/۸۳٪	۰/۸۳٪	۳
۰/۸۳٪	۱/۲۵٪	۴
۰/۸۳٪	۱/۶۶٪	۵
۱/۲۵٪	۰/۸۳٪	۶
۱/۲۵٪	۱/۲۵٪	۷
۱/۲۵٪	۱/۶۶٪	۸
۱/۶۶٪	۰/۸۳٪	۹
۱/۶۶٪	۱/۲۵٪	۱۰
۱/۶۶٪	۱/۶۶٪	۱۱

۲-۳-۱- بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده

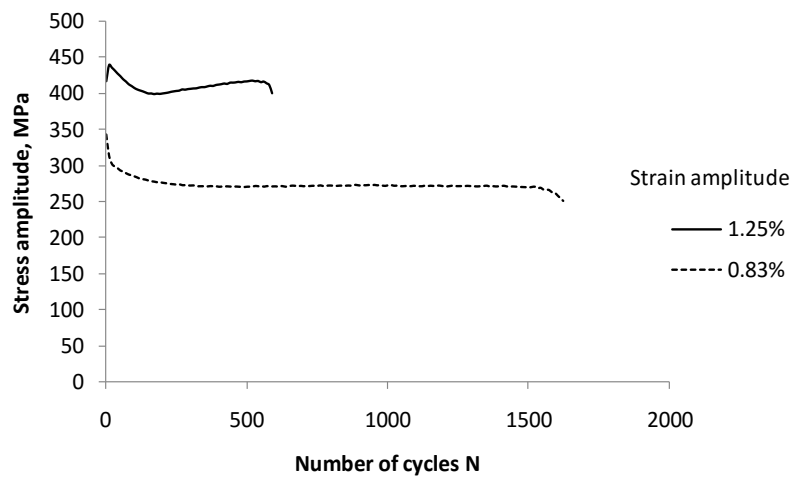
برای بررسی رفتار نرم‌شوندگی سیکلی ماده، نمونه‌ها را تحت بارگذاری کرنش-کنترل قرار می‌دهیم. بارگذاری به صورت متقارن یعنی بدون کرنش میانگین در نظر گرفته شده است، تا رفتار رهاسازی^۱ در نمونه‌ها ایجاد نشود. شکل ۲-۲۰ حلقه‌های هیستریزیس برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عدم تقارن تنش در ناحیه کششی و فشاری حلقه‌های هیستریزیس مشهود است. همچنین واضح است که نرم‌شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از قسمت کششی می‌باشد. شکل ۲-۲۱ نمودار دامنه تنش بر حسب سیکل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، رفتار سیکلی ماده در دامنه کرنش ۰/۸۳٪ به صورت نرم شونده می‌باشد که در سیکل‌های ابتدایی شیب آن زیاد است و در ادامه کاهش می‌یابد تا رفتار سیکلی ماده ثابت شود. رفتار سیکلی ماده با افزایش دامنه کرنش تغییر می‌کند به صورتی که برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪ رفتار سیکلی ماده برای تعداد کمی سیکل (تقریباً ۱۵ سیکل) به صورت سخت شونده با شیب زیاد است و

^۱ Relaxation

سپس شروع به رفتار نرم شونده می‌کند و پس از گذشت تقریباً ۲۰۰ سیکل این رفتار دوباره به رفتار سخت شونده با شیب کم تبدیل می‌شود.



شکل ۲-۲۰: منحنی هیستریزیس برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪



شکل ۲-۲۱: تغییرات دامنه تنش نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری کرنش-کنترل متقارن

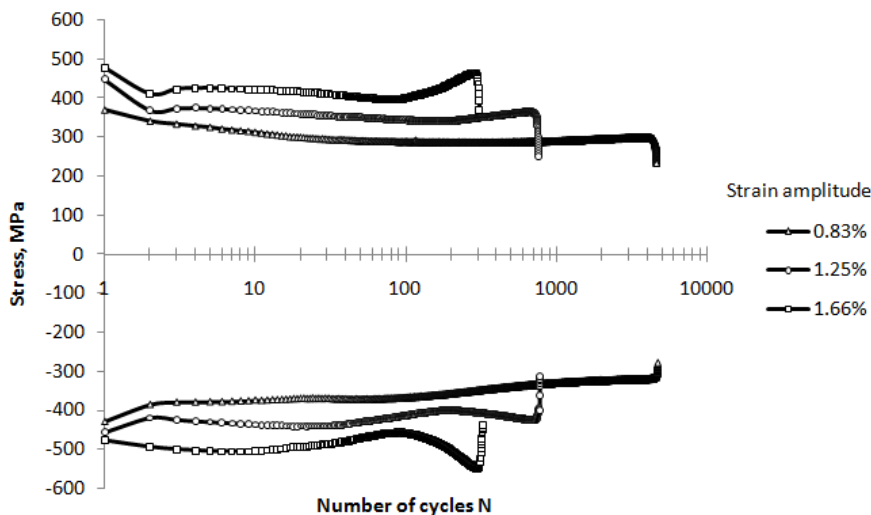
۲-۳-۳-۲- بررسی رفتار رها سازی^۱ در بارگذاری نا متقارن

وجود کرنش میانگین در بارگذاری کرنش-کنترل باعث ایجاد تنش میانگین در نمونه‌ها می‌شود. این تنش میانگین با افزایش تعداد سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد و یا به عبارت دیگر نمونه‌ها دچار رفتار رها سازی می‌شوند. این رفتار به طور کلی باعث انتقال حلقه‌های هیستریزیس به سمت پایین می‌شود. البته این رفتار می‌تواند برای مواد مختلف متفاوت باشد. سیواپراساد^۲ و همکارانش تأثیر رفتار رها سازی بر روی فولاد SA333 را تنها در کاهش بیشترین تنش کششی سیکلی گزارش کردند [۱۹].

شکل ۲-۲۲ نمودار بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رها سازی تأثیر چندانی بر رفتار سیکلی ماده در بارگذاری‌های مورد نظر نداشته است. با دقت در ناحیه فشاری نمودارها مقدار کمی سخت‌شوندگی در یک چهارم ابتدایی عمر نمونه‌ها مشاهده می‌گردد که با افزایش دامنه کرنش مقدار آن افزایش یافته و سریع‌تر اتفاق می‌افتد. از آنجایی که در همان بازه سیکلی در ناحیه کششی شاهد رفتار نرم‌شوندگی می‌باشیم، می‌توان گفت که منحنی‌های هیستریزیس در حال انتقال به سمت پایین می‌باشند که دلیل آن ایجاد رفتار رها سازی به علت وجود کرنش میانگین در بارگذاری می‌باشد.

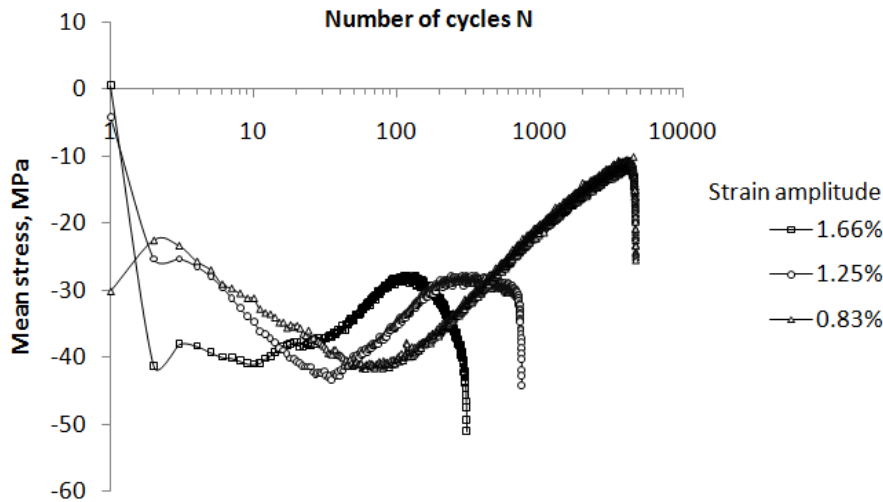
^۱ Relaxation

^۲ Sivaprasad



شکل ۲-۲۲: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت ۰.۱۶۶٪

شکل ۲-۲۳ تغییرات تنش متوسط در هر حلقه هیستریزیس نسبت به تعداد چرخه‌ها تا شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تنش متوسط برای هر حلقه هیستریزیس برابر میانگین مجموع حداکثر نیروی کششی و فشاری در آن حلقه هیستریزیس می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نقطه شروع منحنی‌ها با افزایش دامنه کرنش به صفر نزدیک‌تر می‌شود به طوری که در بیشترین دامنه کرنش برابر ۰.۱۶۶٪، تنش میانگین از مقدار ۵ MPa شروع می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه دامنه کرنش کوچک‌تر می‌شود، مقدار تنش متوسط در اولین حلقه منفی‌تر می‌گردد. با افزایش دامنه کرنش، تنش میانگین در سیکل ابتدایی با شیب زیاد و در چند سیکل ابتدایی بعدی با شیب ملایم‌تری افت می‌کند. این رفتار به دلیل وجود کرنش میانگین و ایجاد رفتار رها سازی می‌باشد. در ادامه تا یک چهارم ابتدایی عمر نمونه‌ها شاهد افزایش تنش میانگین به دلیل بیشتر بودن نرخ نرم‌شوندگی در ناحیه فشاری می‌باشیم؛ و در انتها سخت‌شوندگی اتفاق می‌افتد که به علت بیشتر بودن نرخ سخت‌شوندگی در ناحیه فشاری می‌باشد. همچنین دلیل منفی بودن تنش میانگین در طول عمر نمونه‌ها، تحمل بار بسیار بیشتر در ناحیه فشاری نسبت به ناحیه کششی است.



شکل ۲-۲۳: تغییرات تنش متوسط نسبت به تعداد چرخه‌ها برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪

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

برای بررسی تأثیر دامنه کرنش بر عمر نمونه‌ها آزمایش‌هایی با کرنش میانگین ثابت و دامنه تنش‌های مختلف انجام گردید. شکل ۲-۲۲ تغییر در بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل را با تغییر دامنه کرنش و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ نشان می‌دهد. افزایش دامنه کرنش باعث افزایش تنش کششی و فشاری می‌شود و همچنین باعث تغییر در رفتار ماده می‌گردد، به گونه‌ای که با افزایش دامنه کرنش، در انتهای عمر نمونه‌ها سخت‌شوندگی ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۲۴ دیده می‌شود با افزایش دامنه کرنش، عمر نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود این روند کاهش برای کرنش میانگین‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد و کرنش میانگین در این روند بی تأثیر است. علت این کاهش عمر را می‌توان در افزایش کار پلاستیک انجام شده در هر سیکل دانست. همان‌طور که در شکل ۲-۲۵ دیده می‌شود، با افزایش دامنه کرنش سطح محصور شده توسط حلقه‌های هیستریزس زیاد می‌گردد و این بدان معناست که کار پلاستیک انجام شده در هر سیکل افزایش می‌یابد [۲۰]. همچنین در شکل ۲-۲۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه کرنش، دامنه کرنش پلاستیک نیز افزایش می‌یابد و می‌دانیم که دامنه کرنش پلاستیک تأثیر به‌سزایی بر عمر خستگی دارد و افزایش

دامنه کرنش پلاستیک باعث کاهش عمر خستگی می‌شود [۱۴]. تأثیر دامنه کرنش پلاستیک بر عمر

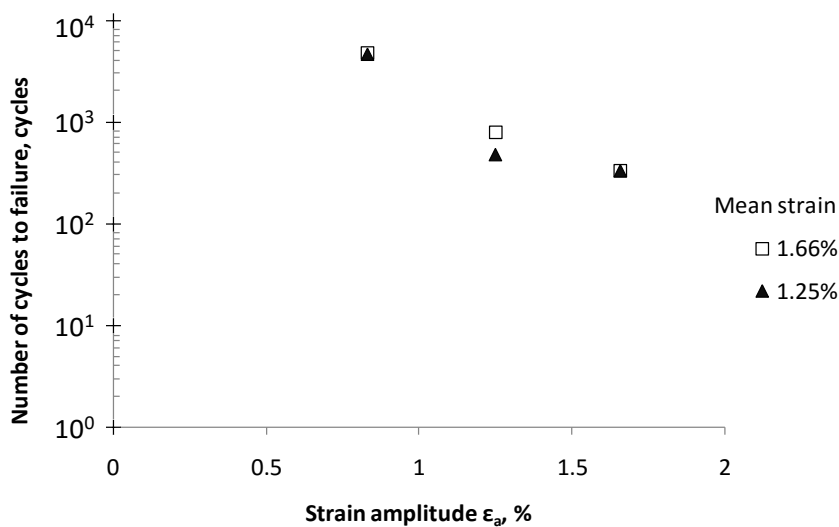
خستگی را می‌توان در نمودارهای شکل ۲-۲۴ و شکل ۲-۲۶ مشاهده نمود.

برای محاسبه دامنه کرنش پلاستیک از رابطه (۳-۲) استفاده شده است:

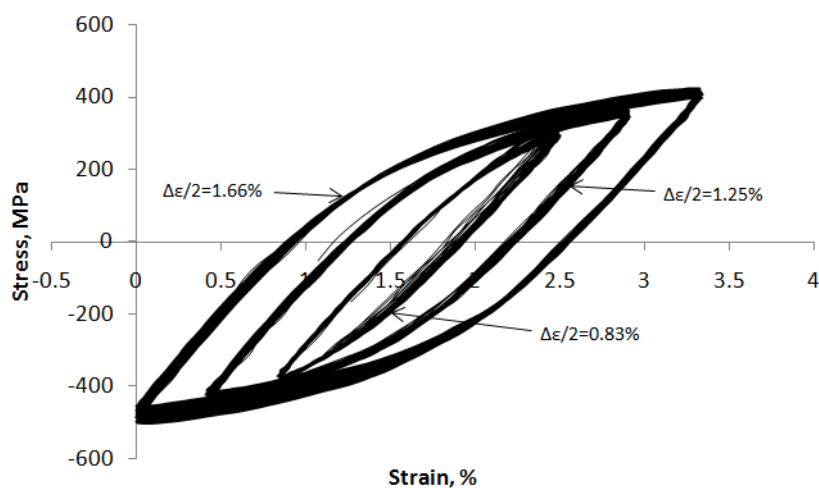
$$\frac{\Delta \varepsilon^p}{2} = \frac{\Delta \varepsilon}{2} - \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad (3-2)$$

که در آن $\Delta \varepsilon^p$ ، $\Delta \varepsilon$ ، $\Delta \sigma$ و E به ترتیب بازه کرنش پلاستیک، بازه کرنش کل، بازه تنش و مدول یانگ

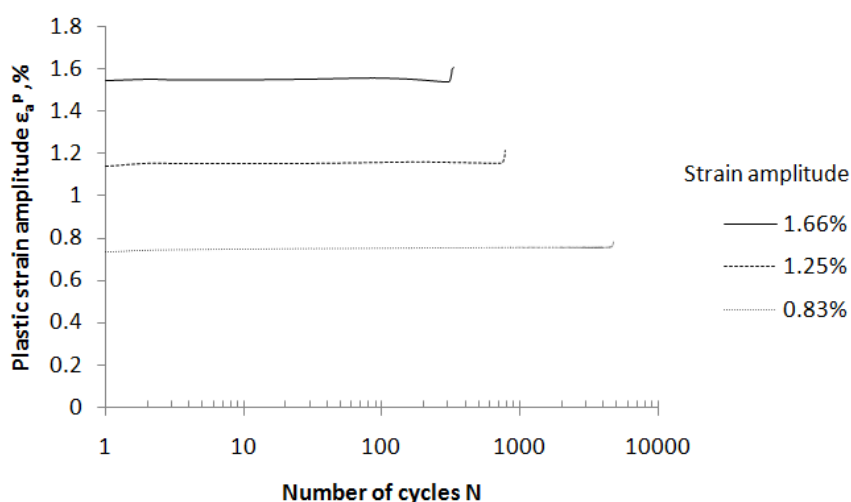
می‌باشد.



شکل ۲-۲۴: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به دامنه کرنش



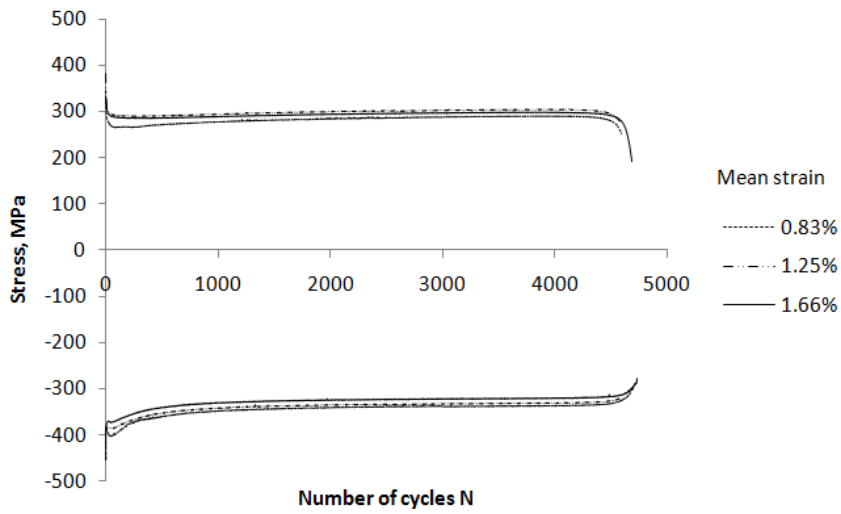
شکل ۲-۲۵: مقایسه منحنی‌های هیستریزس برای کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش‌های ۰/۸۳٪، ۱/۲۵٪ و ۱/۶۶٪



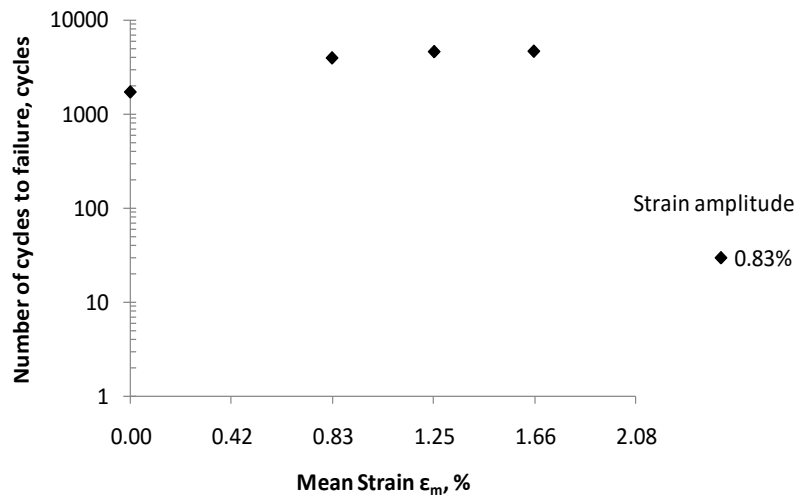
شکل ۲-۲۶: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪

۲-۳-۳-۴- تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها

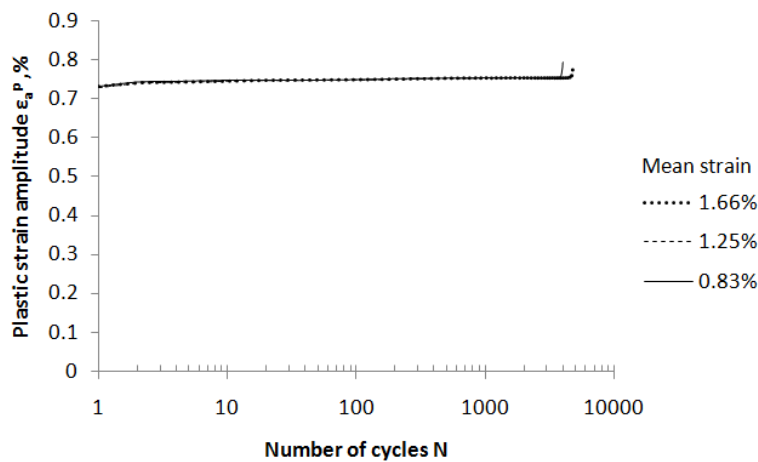
شکل ۲-۲۷ کمترین و بیشترین تنش در هر سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر در کرنش میانگین بر رفتار سیکلی و بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل تأثیری ندارد. شکل ۲-۲۸ عمر نمونه‌ها برای کرنش‌های میانگین مختلف با دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها ناچیز است و با افزایش کرنش میانگین عمر نمونه‌ها به مقدار اندکی افزایش می‌یابد. شکل ۲-۲۹ دامنه کرنش پلاستیک بر حسب سیکل برای کرنش میانگین‌های مختلف با دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه کرنش پلاستیک با تغییر دامنه کرنش تقریباً ثابت می‌ماند. به‌طور کلی می‌توان گفت که تأثیر کرنش میانگین بر دامنه کرنش پلاستیک و عمر نمونه‌ها اندک می‌باشد.



شکل ۲۷-۲: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین‌های مختلف و دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪



شکل ۲۸-۲: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به کرنش میانگین



شکل ۲-۲۹: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪

۲-۳-۳-۵- پیش بینی عمر خستگی بر اساس انرژی

برای پیش بینی عمر خستگی از مدل‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. این مدل‌ها می‌توانند بر اساس انرژی و یا تنش / کرنش باشند. متداول‌ترین روش بر اساس تنش / کرنش، مدل کافین-مانسن^۱ می‌باشد. که با استفاده از یک سری ثابت‌های مختص ماده، عمر خستگی را به تنش یا کرنش مرتبط می‌سازد. در روش انرژی، عمر خستگی ماده، به انرژی کرنشی ایجاد شده در طی سیکل‌های بارگذاری تا زوال ماده مربوط می‌شود. در بارگذاری با دامنه ثابت، انرژی کرنشی در هر سیکل برابر مجموع انرژی کرنشی الاستیک و انرژی کرنشی پلاستیک می‌باشد؛ که با روابط (۲-۴) و (۲-۵) نشان داده می‌شود [۲۱-۲۳].

$$\Delta W = \Delta W_e + \Delta W_p \quad (۲-۴)$$

$$\Delta W = \oint_{cycle} \sigma d\varepsilon_e + \oint_{cycle} \sigma d\varepsilon_p \quad (۲-۵)$$

^۱ Coffin-Manson

که در این روابط، ΔW ، ΔW_e ، ΔW_p ، ε_e و ε_p به ترتیب برابر انرژی کرنشی کل، انرژی کرنشی الاستیک، انرژی کرنشی پلاستیک، کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک می‌باشد. کرنش پلاستیک و کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک را می‌توان با فرض اینکه منحنی‌های سیکلی کرنش از نوع رامبرگ-اوسگود^۱ باشد به صورت زیر نوشت [۲۴]:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (۶-۲)$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (۷-۲)$$

که در این روابط، E برابر مدول الاستیسیته و n و K ضرایب ثابت ماده می‌باشند.

همچنین رابطه (۸-۲) توسط هالفورد^۲ [۲۱] و کولوز^۳ و الین^۴ [۲۲] ارائه شده است. این رابطه نشان دهنده ارتباط بین انرژی کرنشی هیستریزیس و تعداد نیم سیکل تا شکست می‌باشد.

$$\Delta W = A(2N_f)^\alpha \quad (۸-۲)$$

در این رابطه $2N_f$ برابر تعداد نیم سیکل تا شکست می‌باشد. A و α ثابت‌های ماده می‌باشند که به ترتیب معرف ظرفیت جذب انرژی ماده و نمای خستگی می‌باشند.

انرژی کرنشی هیستریزیس ایجاد شده در هر سیکل، با توجه به رابطه (۵-۲) برابر سطح زیر حلقه هیستریزیس بدست آمده از آزمایش‌های تجربی کرنش-کنترل می‌باشد. در این تحقیق، برای بدست آوردن سطح زیر این حلقه‌ها از روش عددی مونت-کارلو^۵ استفاده شده است. همچنین برای پیش بینی عمر خستگی از سه معیار انرژی کل، برابر با مجموع انرژی کرنش ایجاد شده در طی کل سیکل‌های بارگذاری، انرژی سیکل اول، برابر با انرژی ایجاد شده در سیکل اول بارگذاری و انرژی

^۱ Ramberg-Osgood

^۲ Halford

^۳ Colos

^۴ Ellyin

^۵ Monte Carlo

متوسط، برابر میانگین انرژی کرنش در طی سیکل‌های دوم تا پنجم، استفاده شده است [۲۵،۲۶]. سه

رابطه زیر را می‌توان از رابطه (۸-۲) بدست آورد:

$$\Delta W_t = A(2N_f)^\alpha \quad (9-2)$$

$$\Delta W_a = A(2N_f)^\alpha \quad (10-2)$$

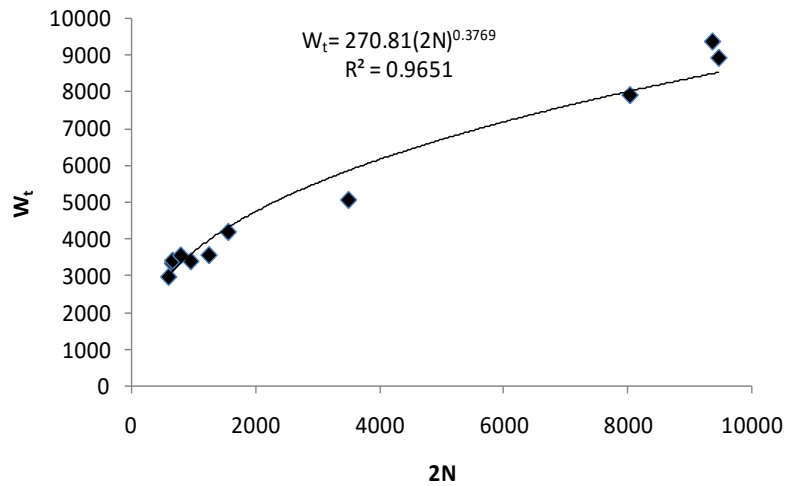
$$\Delta W_1 = A(2N_f)^\alpha \quad (11-2)$$

که در این روابط ΔW_t ، ΔW_a و ΔW_1 به ترتیب برابر انرژی کرنشی کل، انرژی کرنشی متوسط و انرژی کرنشی سیکل اول می‌باشد. مشخصات آزمایش‌ها، عمر خستگی تجربی و انرژی محاسبه شده از سطح زیر نمودار منحنی‌های هیستریزس در جدول ۲-۶ آورده شده است.

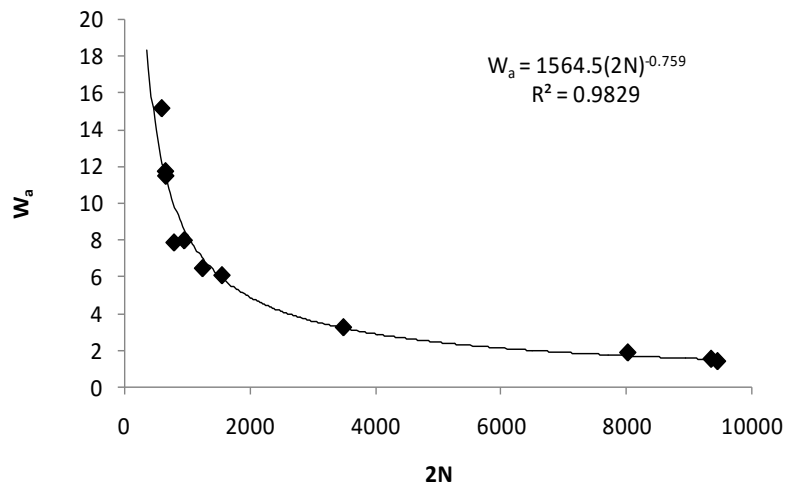
جدول ۲-۶: نتایج آزمایش خستگی کرنش-کنترل و انرژی کرنشی ایجاد شده برای فولاد CK45

شماره آزمایش	کرنش متوسط (%)	دامنه کرنش (%)	عمر خستگی	W_t	W_a	W_1
۱	۱/۶۶	۱/۶۶	۳۳۰	۳۳۵۱/۳۸۵	۱۱/۷۳۵۰۶	۱۳/۴۸۸۶
۲	۱/۶۶	۱/۲۵	۷۸۰	۴۲۰۲/۳۶۴	۶/۰۷۲۰۱۶	۸/۳۴۸۷۰۷
۳	۱/۶۶	۰/۸۳	۴۷۲۹	۸۹۲۱/۲	۱/۳۹۵۸۹۱	۲/۵۷۳۹۴
۴	۱/۲۵	۱/۶۶	۳۳۲	۳۴۲۵/۶۲۱	۱۱/۴۸۵	۱۳/۰۶۰
۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۴۷۹	۳۴۰۸/۹۷	۷/۹۷۴	۹/۳۵۲
۶	۱/۲۵	۰/۸۳	۴۶۷۸	۹۳۶۴/۹۵۳	۱/۵۲۲	۲/۵۴۸
۷	۰/۸۳	۱/۶۶	۳۰۰	۲۹۸۶/۳۶۴	۱۵/۱۶۵	۱۷/۳۶۹
۸	۰/۸۳	۱/۲۵	۳۹۸	۳۵۶۵/۳۶۵	۷/۸۵۶	۹/۷۵۲
۹	۰/۸۳	۰/۸۳	۴۰۱۴	۷۹۱۱/۷۴	۱/۸۶۹	۲/۹۰۹
۱۰	۰	۱/۲۵	۶۲۵	۳۵۷۴/۲۴۶	۶/۴۵۵	۶/۸۷۲
۱۱	۰	۰/۸۳	۱۷۴۸	۵۰۷۰/۳۸۲	۳/۲۴۱	۳/۳۷۹

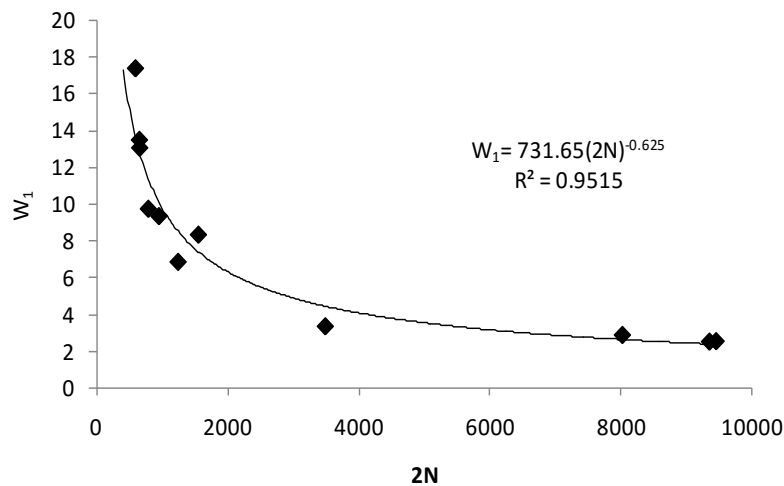
با توجه به جدول ۲-۶، نمودار انرژی کرنشی بر حسب تعداد نیم سیکل برای سه معیار انرژی مختلف رسم شده است (شکل‌های ۲-۳۰ تا ۲-۳۲). همچنین با استفاده از بررسی رگرسیون حداقل مربعات، رابطه‌هایی که بیانگر ارتباط بین انرژی کرنشی و تعداد نیم سیکل می‌باشد، بدست آمده است؛ که در جدول ۲-۷ آورده شده است.



شکل ۲-۳۰: انرژی کرنشی کل نسبت به تعداد نیم سیکل



شکل ۲-۳۱: انرژی کرنشی متوسط نسبت به تعداد نیم سیکل



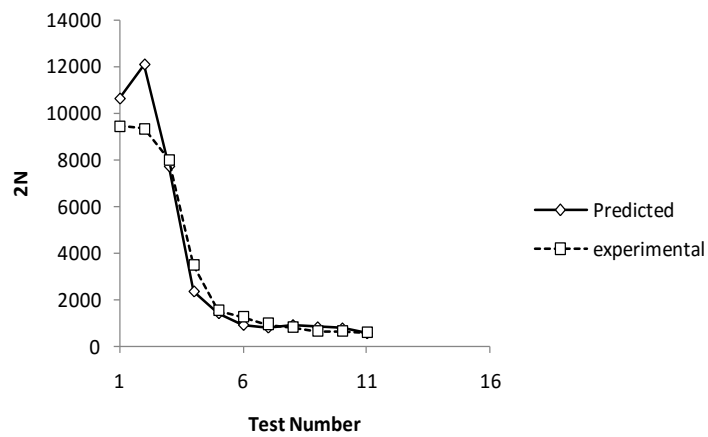
شکل ۲-۳: انرژی کرنشی سیکل اول نسبت به تعداد نیم سیکل

جدول ۲-۷: روابط بدست آمده برای پیش بینی عمر خستگی به روش انرژی و ضرایب آن

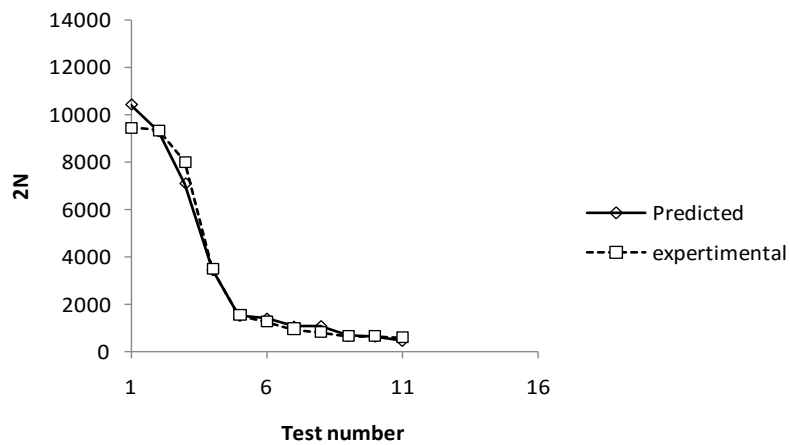
رابطه بدست آمده	ضریب ثابت A (R^2 مربع ضریب همبستگی)	ضریب ثابت α
$W_t = 270.81(2N)^{0.3769}$	0.9651	0.3769
$W_a = 1564.5(2N)^{-0.759}$	0.9829	-0.759
$W_1 = 731.65(2N)^{-0.625}$	0.9515	-0.625

در روش رگرسیون حداقل مربعات، هر چه مربع ضریب همبستگی (R^2)، به عدد ۱ نزدیکتر باشد، رابطه از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به جدول ۲-۷، مشاهده می‌شود؛ که این ضرایب به مقدار ۱ نزدیک می‌باشند و در نتیجه روابط به دست آمده از دقت بالایی برخوردار هستند. با توجه به روابط بدست آمده در جدول ۲-۷ و روابط (۲-۹) تا (۲-۱۱) می‌توان گفت که ضرایب ثابت A و α برای فولاد CK45 و سه معیار مختلف انرژی برابر ستون‌های اول و دوم این جدول می‌باشند.

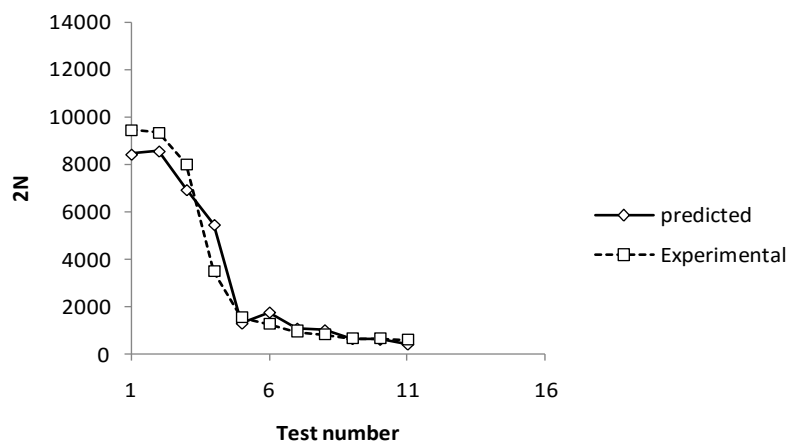
جهت بررسی مقدار دقت روابط بدست آمده، تعداد نیم سیکل تجربی و پیش بینی شده توسط هر سه رابطه برای تمامی آزمایش‌ها رسم شده است (شکل‌های ۲-۳۳ تا ۲-۳۵). همان طور که مشاهده می‌شود، نتایج تجربی و پیش بینی شده از انطباق قابل قبولی برخوردار هستند و بیشترین انطباق متعلق به رابطه بدست آمده بر اساس انرژی میانگین می‌باشد.



شکل ۲-۳۳: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی کل

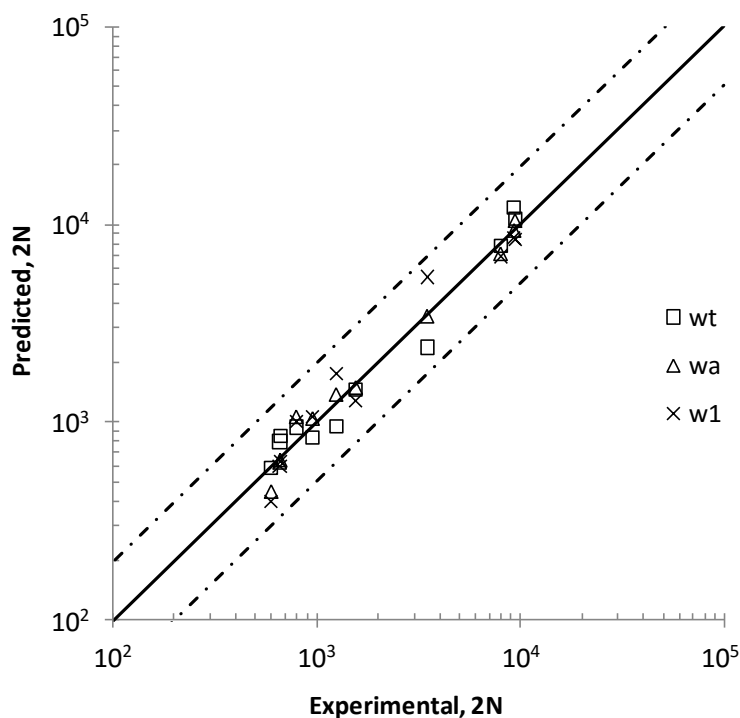


شکل ۲-۳۴: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی متوسط



شکل ۲-۳۵: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی سیکل اول

شکل ۲-۳۶ نمودار تعداد نیم سیکل پیش بینی شده نسبت به تعداد نیم سیکل تجربی را برای هر سه معیار انرژی نشان می‌دهد. خطوط مقطع، نشان دهنده محدوده دو برابر خطا می‌باشند. در صورتی که تعداد نیم سیکل تجربی و تعداد نیم سیکل پیش بینی شده با یکدیگر برابر باشند، مقدار خطا صفر می‌باشد و نقاط بدست آمده از نتایج تجربی (محور افقی) و پیش بینی شده (محور قائم) بر روی خط ممتد قرار می‌گیرند و در صورت وجود اختلاف در نتایج، این نقاط از خط ممتد دور می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ تمامی نقاط در داخل محدوده دو برابر خطا قرار دارند و نقاط مربوط به انرژی متوسط، نسبت به نقاط دیگر، به خط ممتد نزدیک‌تر هستند که نشان دهنده دقت بیشتر این معیار انرژی می‌باشد.



شکل ۲-۳۶: مقایسه عمر خستگی پیش بینی شده با عمر خستگی تجربی

۴-۲- نتایج تجربی بر روی نمونه های آزمایشی فولاد SS316

۴-۲-۱- هندسه و خواص مکانیکی

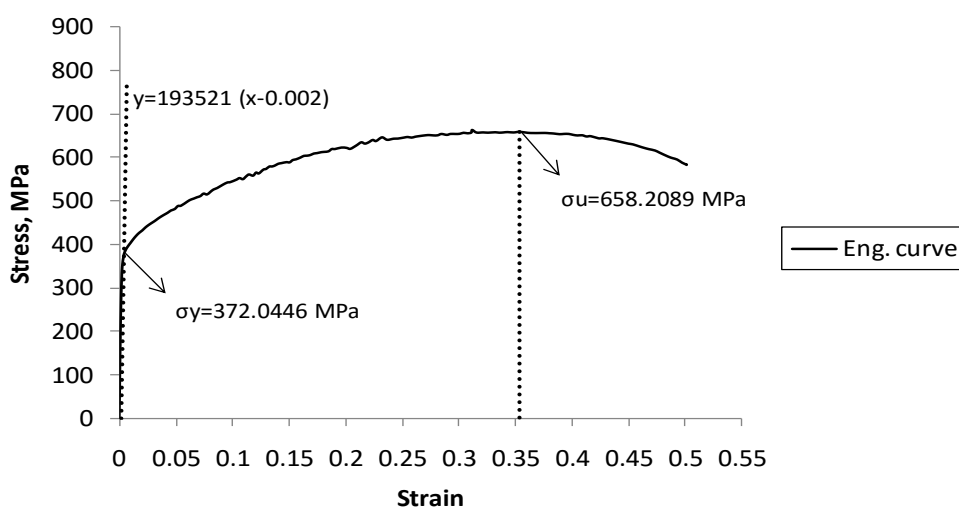
نمونه های آزمایش برای جنس SS316 همانند نمونه های جنس قبلی، میله هایی با طول سنجه ۳۰ میلی متر و قطر ۱۰ میلی متر می باشند. آزمایش کشش ساده نیز با استفاده از همین نمونه ها انجام شده است که نمودار آن در شکل ۲-۳۷ دیده می شود. مقدار تنش تسلیم بدست آمده برای فولاد SS316 از ترسیم خط ۰/۲٪ تعیین شده است. هندسه و خواص مکانیکی ماده مورد بحث در جدول ۲-۸ نشان داده شده اند. همچنین جدول ۲-۹ ترکیب شیمیایی ماده مورد بحث را نشان می دهد.

جدول ۲-۸: مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ماده SS316

مشخصات	مقدار
طول سنجه	$l=30 \text{ mm}$
قطر سنجه	$d=10 \text{ mm}$
مدول الاستیسیته	$E= 193.52 \text{ (GPa)}$
تنش تسلیم	$\sigma_y = 372.044 \text{ (MPa)}$
تنش نهایی	$S_u = 658.208 \text{ (MPa)}$
ضریب پواسون	$\nu =0.3$

جدول ۲-۹: ترکیب شیمیایی فولاد SS316

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	N
0.08	0.75	2.0	18.0	3.00	14	0.045	0.03	0.10



شکل ۲-۳۷: منحنی تنش - کرنش بدست آمده از آزمایش کشش ساده برای فولاد SS316

۲-۴-۲ - بارگذاری تنش - کنترل

آزمایش برای هر نمونه شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول ابتدا نمونه‌ها تحت بارگذاری با دامنه تنش و تنش میانگین بالا جهت ایجاد پدیده رچتینگ قرار می‌گیرند. در مرحله بعد نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند تا تأثیر پدیده رچتینگ بر عمر خستگی آن‌ها بررسی شود.

۲-۴-۲-۱- تعریف چیدمان مناسب برای انجام آزمایش

با توجه به خواص مکانیکی ماده مورد بررسی، تنش میانگین و دامنه تنش 230 MPa را برای آزمایش خستگی کششی در نظر گرفته شده است. قابل توجه است که چیدمان در نظر گرفته شده برای آزمایش خستگی متفاوت با چیدمان آزمایش خستگی جنس CK45 می‌باشد؛ به این صورت که، بر خلاف آزمایش خستگی CK45، حداکثر تنش در هر سیکل از مقدار تنش تسلیم در آزمایش کشش ساده بیشتر می‌باشد. برای آزمایش رچتینگ از دامنه تنش‌های 310 MPa ، 280 MPa ، 250 MPa و 220 MPa و تنش میانگین‌های 310 MPa ، 300 MPa ، 280 MPa ، 250 MPa ، 220 MPa استفاده شده است. هدف از تنظیم این چیدمان بررسی تأثیر پارامترهای تنش میانگین، دامنه تنش، نسبت

تنش و تعداد سیکل آزمایش رچتینگ بر عمر خستگی می‌باشد. جدول کامل مشخصه های آزمایش و نتایج تجربی بدست آمده در قسمت‌های بعدی به طور کامل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۴-۲-۲- بررسی رفتار رچتینگ

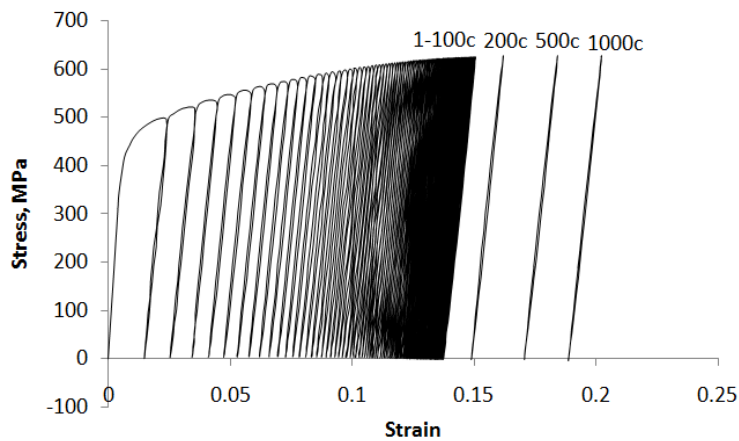
هدف از این بحث بررسی تجربی تأثیر سه پارامتر دامنه تنش، تنش میانگین و نسبت تنش در بارگذاری چرخه ای تک محوری در ۱۰۰۰ سیکل، برای نمونه های استاندارد SS316 می‌باشد. به این منظور آزمایش‌هایی مطابق جدول ۲-۱۰ انجام شده‌اند.

جدول ۲-۱۰: مشخصه های آزمایش رچتینگ برای نمونه های SS316 (تعداد چرخه ۱۰۰۰ سیکل)

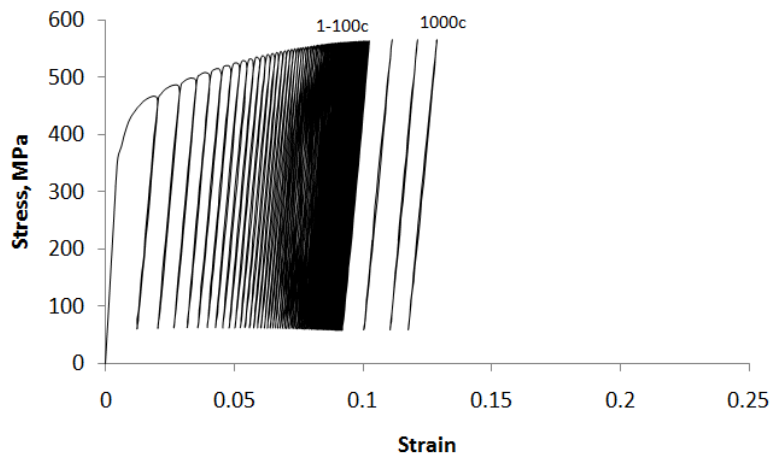
شماره آزمایش	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	تنش حداکثر (MPa)	نسبت تنش
۱	۲۸۰	۳۱۰	۵۹۰	-۰/۰۵۰
۲	۲۸۰	۲۸۰	۵۶۰	۰
۳	۲۸۰	۲۵۰	۵۳۰	۰/۰۵۶
۴	۳۱۰	۳۱۰	۶۲۰	۰
۵	۳۱۰	۲۸۰	۵۹۰	۰/۰۵۰
۶	۳۱۰	۲۵۰	۵۶۰	۰/۰۷۱
۷	۳۱۰	۲۲۰	۵۳۰	۰/۱۶۹
۸	۳۰۰	۲۵۰	۵۵۰	۰/۰۹۰
۹	۲۵۰	۲۵۰	۵۰۰	۰
۱۰	۲۲۰	۲۵۰	۴۷۰	-۰/۰۶۳
۱۱	۲۵۰	۳۱۰	۵۶۰	-۰/۱۰۷
۱۲	۲۲۰	۳۱۰	۵۳۰	-۰/۱۶۹

شکل ۲-۳۸ تا ۲-۴۱ نمودارهای تنش- کرنش در حالت تنش-کنترل برای تنش میانگین‌های ۳۱۰ MPa و ۲۸۰ MPa و دامنه تنش‌های ۲۸۰ MPa و ۲۵۰ MPa را نشان می‌دهند. همان‌طور که

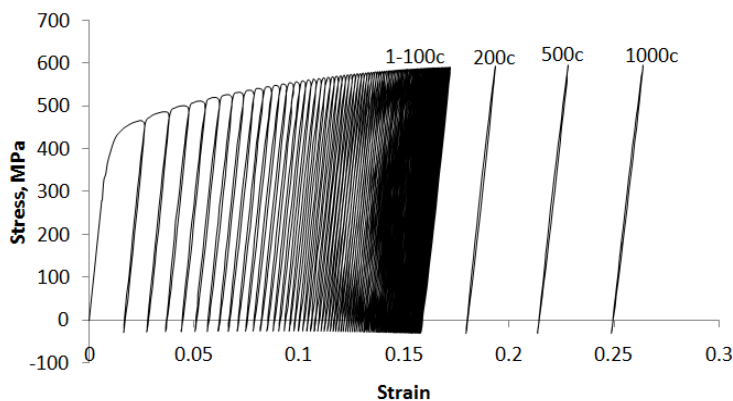
مشاهده می‌شود، بعد از هر سیکل بارگذاری مقداری کرنش پلاستیک انباشته می‌شود. نرخ این کرنش ثابت نمی‌باشد، به طوری که در سیکل‌های ابتدایی مقدار این نرخ زیاد می‌باشد و با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد. کاهش دامنه تنش باعث کم شدن انباشتگی کرنش پلاستیک در تعداد سیکل ثابت می‌شود. اما کاهش تنش میانگین در دامنه تنش ثابت تأثیر چندانی بر انباشتگی کرنش پلاستیک ندارد.



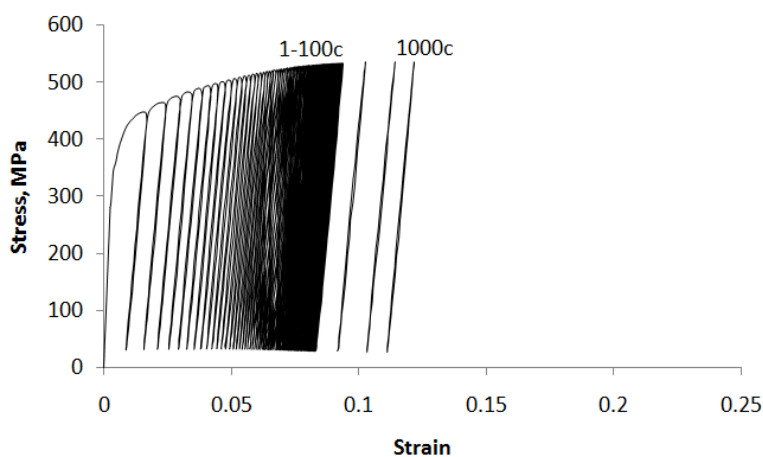
شکل ۲-۳۸: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین 310 MPa و دامنه تنش 310 MPa



شکل ۲-۳۹: نمودار تنش-کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین 310 MPa و دامنه تنش 250 MPa



شکل ۴۰-۲: نمودار تنش- کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین 280 MPa و دامنه تنش 310 MPa

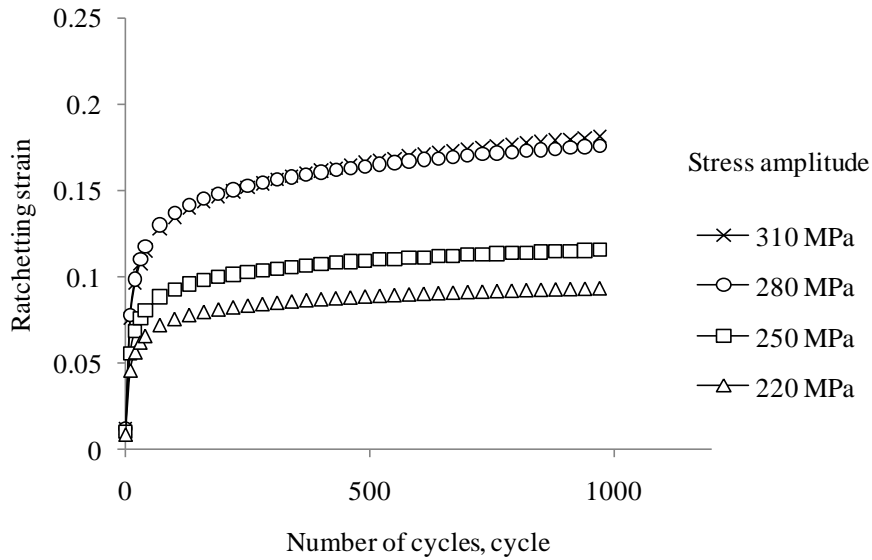


شکل ۴۱-۲: نمودار تنش- کرنش آزمایش رچتینگ با تنش میانگین 280 MPa و دامنه تنش 250 MPa

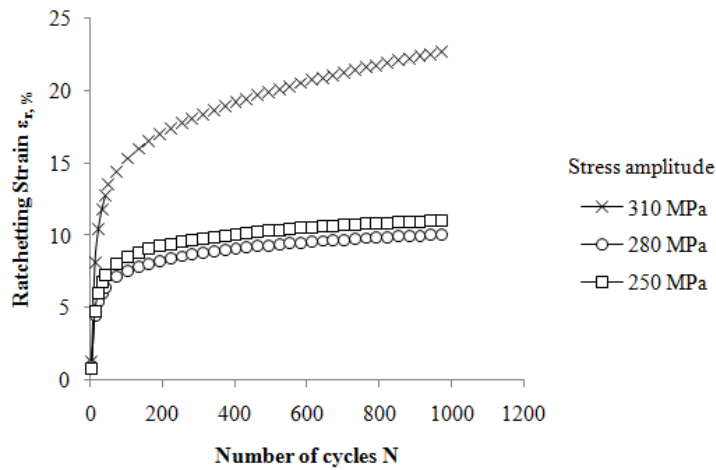
الف) تأثیر دامنه تنش بر رفتار رچتینگ

شکل ۴۲-۲ کرنش رچتینگ برای چهار دامنه تنش و تنش میانگین 310 MPa را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای دامنه تنش‌های بیشتر از 250 MPa کرنش رچتینگ به طور محسوسی افزایش می‌یابد. برای دو دامنه تنش 280 MPa و 310 MPa منحنی‌های کرنش رچتینگ تقریباً بر روی هم قرار دارند؛ با این تفاوت که منحنی دامنه تنش 310 MPa شیب بیشتری دارد. شکل ۴۳-۲ نیز کرنش رچتینگ بر حسب سیکل را برای تنش میانگین 280 MPa نشان می‌دهد، در

این تنش میانگین اختلاف زیادی بین کرنش رچتینگ با دامنه تنش ۳۱۰ MPa و دیگر دامنه تنش‌ها دیده می‌شود. همچنین کرنش رچتینگ دو دامنه تنش دیگر تقریباً بر یکدیگر منطبق می‌باشند.



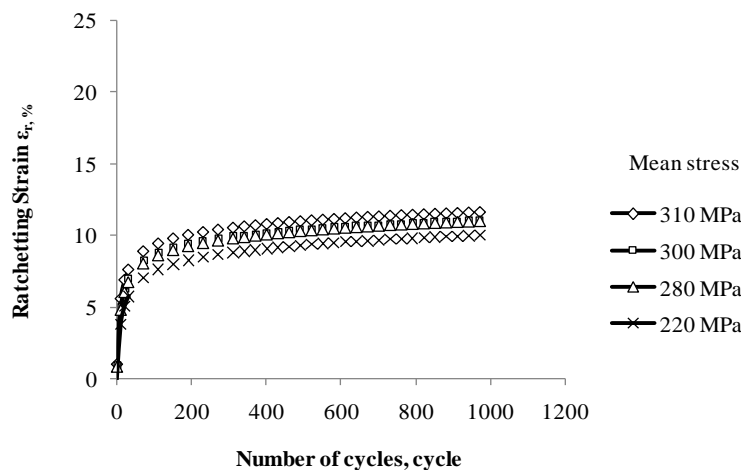
شکل ۲-۴۲: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با تنش میانگین ۳۱۰ MPa



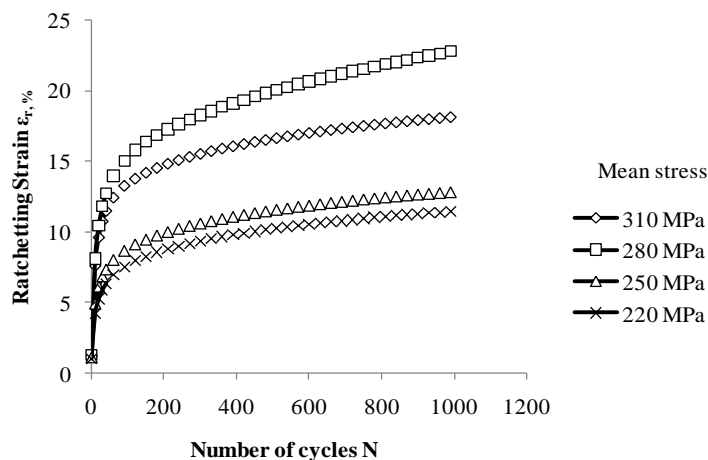
شکل ۲-۴۳: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با تنش میانگین ۲۸۰ MPa

ب) تأثیر تنش میانگین بر رفتار رچتینگ

شکل ۲-۴۴ کرنش رچتینگ نسبت به تعداد سیکل برای تنش میانگین‌های مختلف و دامنه تنش 250 MPa را نشان می‌دهد. همان‌طور ملاحظه می‌شود، برای این دامنه تنش، افزایش تنش میانگین به مقدار کمی باعث افزایش کرنش رچتینگ در آزمایش رچتینگ می‌شود. شکل ۲-۴۵ کرنش رچتینگ برای دامنه تنش 310 MPa را نشان می‌دهد. تغییرات کرنش رچتینگ برای تنش میانگین‌های مختلف در این دامنه تنش بیشتر می‌باشد. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر تنش میانگین در دامنه تنش‌های بالاتر بر کرنش رچتینگ ماده مورد بررسی تأثیر بیشتری دارد.



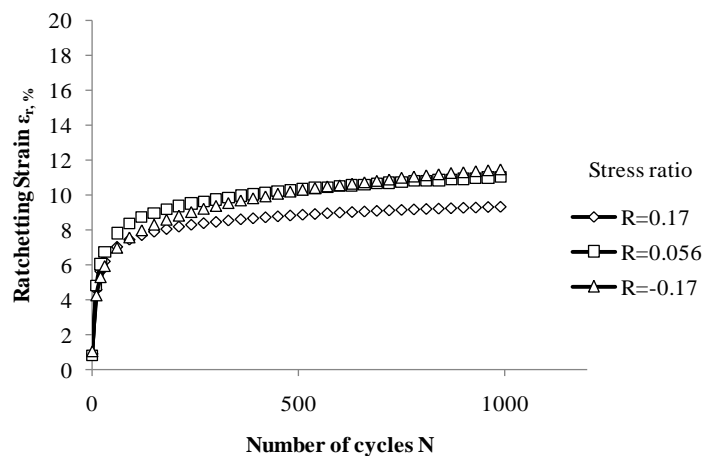
شکل ۲-۴۴: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت 250 MPa



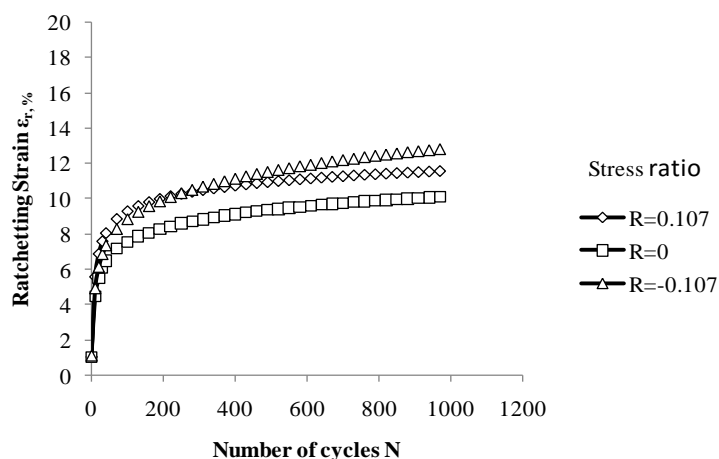
شکل ۲-۴۵: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با دامنه تنش ثابت 310 MPa

ج) تأثیر نسبت تنش بر رفتار رچتینگ

شکل ۲-۴۶ کرنش رچتینگ بر حسب سیکل را برای حداکثر تنش ۵۳۰ MPa و سه نسبت تنش مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای ۶۰۰ سیکل ابتدایی کرنش رچتینگ متعلق به نسبت تنش بیشتر یعنی $R=0,17$ بیشترین مقدار را ندارد. اما این روند با افزایش سیکل‌ها تغییر می‌کند به طوری که در انتها کرنش رچتینگ نهایی آن، بیشترین مقدار را دارد. شکل ۲-۴۷ کرنش رچتینگ بر حسب سیکل را برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa نشان می‌دهد. کرنش رچتینگ متعلق به بیشترین نسبت تنش تنها برای ۳۰۰ سیکل ابتدایی بیشترین مقدار را داراست و در انتها کوچک‌ترین نسبت تنش دارای بیشترین کرنش رچتینگ می‌باشد.



شکل ۲-۴۶: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۳۰ MPa



شکل ۲-۴۷: تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به سیکل برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa

۲-۴-۲-۳- بررسی عمر خستگی

در این قسمت، عمر خستگی نمونه های پیش رچتینگ شده و همچنین تأثیر دامنه تنش، تنش میانگین، نسبت تنش و تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش پیش رچتینگ، بر عمر خستگی نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد. جدول ۲-۱۱ مشخصات مربوط به هر آزمایش و نتایج حاصله برای عمر خستگی را نشان می دهد.

جدول ۲-۱۱: مشخصات و نتایج آزمایش های تنش-کنترل برای نمونه های فولاد SS316

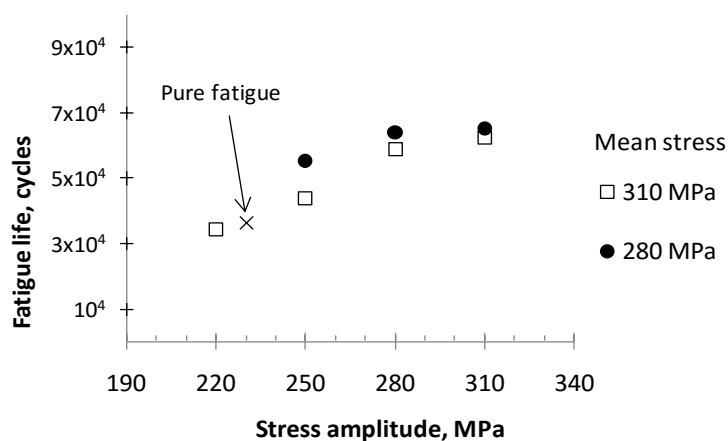
درصد افزایش عمر خستگی	آزمایش خستگی			آزمایش پیش رچتینگ			شماره آزمایش
	عمر خستگی نمونه ها (10 ³ cycle)	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	تعداد چرخه	دامنه تنش (MPa)	تنش میانگین (MPa)	
-	۳۶	۲۳۰	۲۳۰	-	-	-	۱
۸۰/۵۵	۶۵	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۳۱۰	۲۸۰	۲
۷۷/۷۷	۶۴	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۸۰	۲۸۰	۳

۵۲/۷۷	۵۵	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۸۰	۴
۷۲/۲۲	۶۲	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۵
۶۱/۱۱	۵۸	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۸۰	۳۱۰	۶
۱۹/۴۴	۴۳	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۱۰	۷
-۵/۵۵	۳۴	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۲۰	۳۱۰	۸
۱۹/۴۴	۴۳	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۹
۶۶/۶۶	۶۰	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۰
۲/۷۷	۳۷	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۵۰	۲۲۰	۱۱
۱۳۸/۸۸	۸۶	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۳۱۰	۲۵۰	۱۲
۲۵/۰۰	۴۵	۲۳۰	۲۳۰	۱۰۰۰	۳۱۰	۲۲۰	۱۳
۴۱/۶۶	۵۱	۲۳۰	۲۳۰	۸۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۱۴
-۴۱/۶۶	۲۱	۲۳۰	۲۳۰	۶۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۱۵

آزمایش شماره ۱ مربوط به خستگی خالص می‌باشد. در این آزمایش نمونه تحت پیش‌رچتینگ قرار نگرفته است تا بتوان نمونه‌های پیش‌رچتینگ شده را با آن مقایسه نمود. همچنین جهت افزایش دقت، هر آزمایش چندین بار تکرار شده و میانگین نتایج ثبت شده است. جهت مقایسه و بررسی نتایج بدست آمده و همچنین تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر عمر خستگی، نمودارهای مختلفی رسم شده است. قابل توجه است که ابتدا نمونه‌ها تحت آزمایش پیش-رچتینگ با بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرند و سپس عمر خستگی آن‌ها با یک بارگذاری ثابت برای همه نمونه‌ها، اندازه‌گیری می‌شود.

الف) تأثیر دامنه تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی

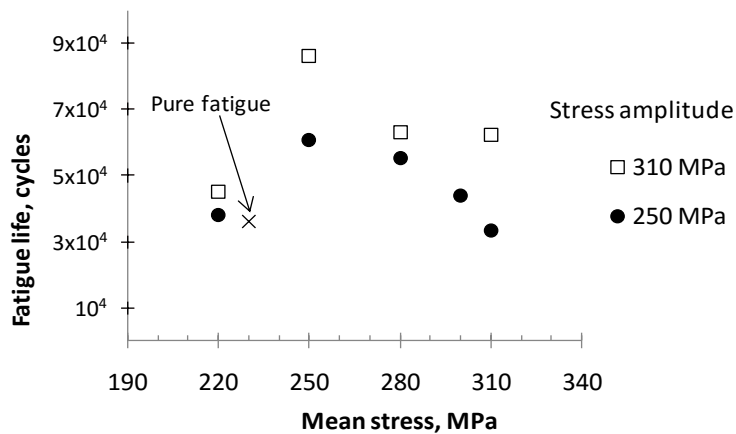
همان‌طور که در شکل ۲-۴۸ ملاحظه می‌شود؛ عمر خستگی نمونه‌های پیش رچتینگ شده از عمر خستگی خالص بیشتر شده است. این رفتار کاملاً بر خلاف رفتار فولاد CK45 می‌باشد که در قسمت قبل بررسی شد. دلیل این رفتار، ایجاد پدیده اضافه بار می‌باشد. دلیل بوجود آمدن این پدیده در آزمایش‌های تجربی انجام شده بر نمونه‌های SS316، انتخاب هدفمند میزان بارگذاری در آزمایش خستگی می‌باشد. در این آزمایش، بر خلاف آزمایش خستگی فولاد CK45، بارگذاری وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. همچنین با افزایش دامنه تنش پیش رچتینگ عمر خستگی بیشتر می‌شود که نشان دهنده افزایش تأثیر پدیده اضافه بار می‌باشد. برای تنش میانگین 310 MPa ، وقتی دامنه تنش از مقدار 230 MPa (مقدار دامنه تنش آزمایش خستگی) کمتر می‌شود؛ پدیده اضافه بار تأثیر خود را از دست می‌دهد و عمر خستگی نزدیک به عمر خستگی خالص بدست می‌آید. با توجه به جدول ۲-۱۱ بیشترین میزان افزایش عمر خستگی در نمودار شکل ۲-۴۸، مربوط به بیشترین دامنه تنش، برابر $80/55\%$ و و کمترین افزایش عمر خستگی مربوط به کمترین دامنه تنش برابر $5/55\%$ می‌باشد. علامت منفی نشان دهنده کاهش عمر خستگی می‌باشد. دلیل این کاهش را می‌توان در رچتینگ ایجاد شده در آزمایش پیش رچتینگ و عدم وجود پدیده اضافه بار در آزمایش خستگی دانست. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دامنه تنش پیش رچتینگ باعث افزایش تأثیر پدیده اضافه بار و در نتیجه افزایش عمر خستگی می‌شود.



شکل ۲-۴۸: نمودار عمر خستگی بر حسب دامنه تنش رچتینگ با تنش میانگین ثابت

ب) تأثیر تنش میانگین پیش رچتینگ بر عمر خستگی

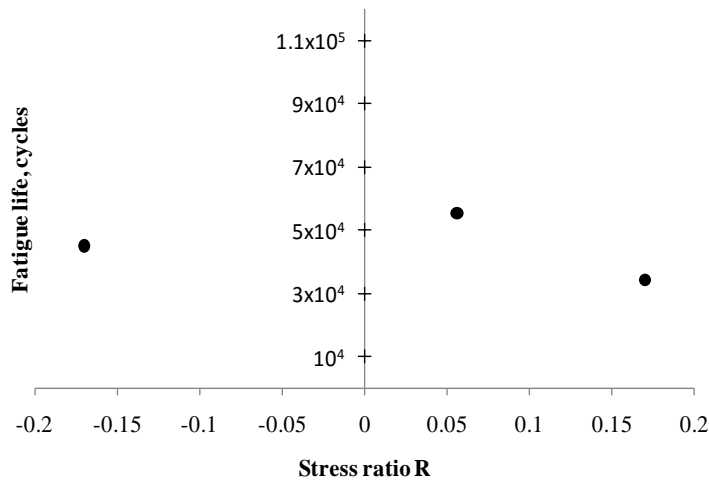
شکل ۲-۴۹ نشان می‌دهد که با کاهش تنش میانگین عمر خستگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این رفتار بر خلاف رفتار فولاد CK45 در قسمت قبلی است. این روند تنها تا تنش میانگین ۲۳۰ MPa، (برابر با تنش میانگین آزمایش خستگی خالص) ادامه دارد. برای تنش میانگین ۲۲۰ MPa شاهد افت شدید عمر خستگی می‌باشیم. این کاهش شدید عمر به دلیل کمتر شدن تنش میانگین از تنش میانگین آزمایش خستگی خالص می‌باشد. بنا بر این می‌توان گفت، برای دو دامنه تنش ذکر شده در نمودار شکل ۲-۴۹، بیشترین عمر خستگی مربوط به تنش میانگین ۲۵۰ MPa می‌باشد (برابر با ۱۳۸/۸۸٪ افزایش عمر) و در نتیجه بیشترین تأثیر پدیده اضافه بار در این تنش میانگین است. با کاهش تنش میانگین از مقدار ۲۳۰ MPa، تأثیر اضافه بار برای هر دو دامنه تنش به شدت کاهش یافته و مقدار عمر خستگی به عمر خستگی حالت بدون پیش رچتینگ نزدیک می‌شود. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت که، با کاهش تنش میانگین پیش رچتینگ، عمر خستگی افزایش می‌یابد. البته این روند تنها تا مقدار ۲۳۰ MPa، برابر با تنش میانگین خستگی خالص صادق می‌باشد و برای مقادیر کمتر از آن مقدار عمر خستگی نزدیک به مقدار حالت بدون پیش رچتینگ می‌باشد.



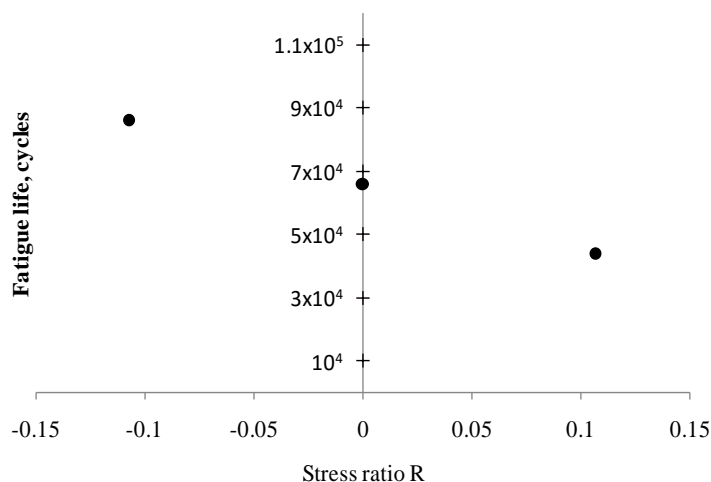
شکل ۲-۴۹: نمودار عمر خستگی بر حسب تنش میانگین رچتینگ با دامنه تنش ثابت

ج) تأثیر نسبت تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی

شکل ۲-۵۰ و شکل ۲-۵۱ نمودارهای عمر خستگی بر حسب نسبت تنش در آزمایش رچتینگ برای دو حداکثر تنش مختلف را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بر خلاف فولاد CK45 در هر دو حداکثر تنش، با افزایش نسبت تنش عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد.



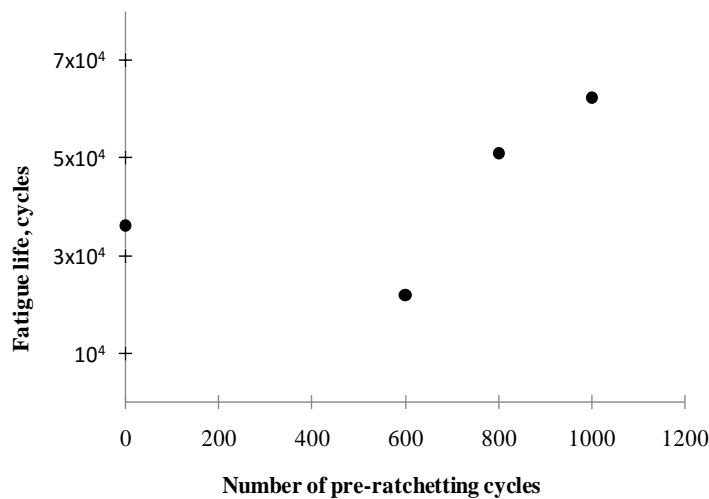
شکل ۲-۵۰: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش برای حداکثر تنش ۵۳۰ MPa



شکل ۲-۵۱: تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش برای حداکثر تنش ۵۶۰ MPa

د) تأثیر تعداد سیکل رچتینگ بر روی عمر خستگی

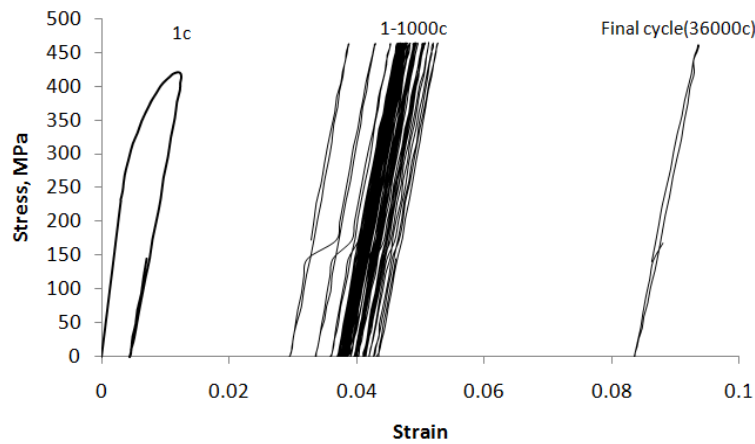
برای بررسی تأثیر تعداد سیکل رچتینگ بر روی عمر خستگی نمونه‌ها، آزمایش‌های شماره ۱۲ و ۱۳ انجام شده است. این آزمایش‌ها دارای دامنه تنش و تنش میانگین ثابت هستند و تنها تعداد سیکل رچتینگ آن‌ها تغییر می‌کند و سپس عمر خستگی آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شکل ۲-۵۲ نمودار عمر خستگی بر حسب تعداد سیکل آزمایش رچتینگ برای تنش میانگین و دامنه تنش ۳۱۰ MPa را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل ملاحظه است، کاهش تعداد سیکل رچتینگ بر خلاف فولاد CK45 باعث کاهش عمر خستگی می‌شود که دلیل آن در کمتر شدن اثر اضافه بار می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در ۶۰۰ سیکل ابتدایی شاهد کاهش عمر خستگی می‌باشیم. این رفتار نشان می‌دهد که پدیده اضافه بار در ۶۰۰ سیکل ابتدایی بوجود نمی‌آید و همچنین کرنش رچتینگ بوجود آمده در طی آن، باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. اما با افزایش تعداد سیکل پیش رچتینگ به مقدار ۸۰۰ سیکل و بیشتر عمر خستگی از مقدار عمر خستگی خالص بیشتر می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که پدیده اضافه بار برای تعداد سیکل پیش رچتینگ بیشتر از ۶۰۰ سیکل اتفاق می‌افتد.



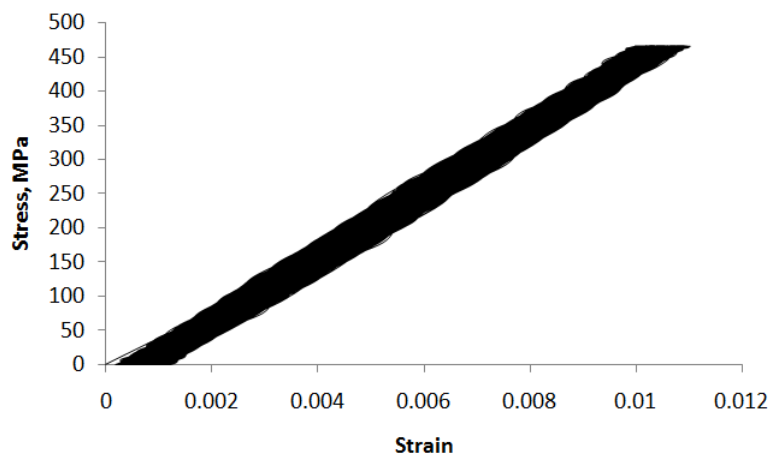
شکل ۲-۵۲: تغییرات عمر خستگی نسبت به تعداد سیکل آزمایش پیش رچتینگ با دامنه تنش و تنش میانگین ثابت ۳۱۰ MPa

ه) بررسی تأثیر اضافه بار بر عمر خستگی نمونه‌ها

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی ذکر شد، پدیده اضافه بار در بارگذاری سیکلی هنگامی ایجاد می‌شود که حداکثر بار مرحله اول بارگذاری بیشتر از حداکثر بار مرحله دوم باشد. در آزمایش با نمونه های SS316 بر خلاف نمونه های CK45، حداکثر بار مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی بیشتر از تنش تسلیم در نظر گرفته شده است و در آزمایش خستگی خالص کرنش رچتینگ قابل توجهی ایجاد می‌شود. (شکل ۲-۵۳) این کرنش رچتینگ ایجاد شده باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. با انجام آزمایش رچتینگ و ایجاد پدیده اضافه بار، کرنش رچتینگ در مرحله آزمایش خستگی از بین می‌رود و با پدیده شیکدان الاستیک مواجه هستیم (شکل ۲-۵۴). از آنجایی که تأثیر این پدیده بیشتر از تأثیر کرنش رچتینگ ایجاد شده در آزمایش رچتینگ است، عمر خستگی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که دلیل غلبه تأثیر اضافه بار بر تأثیر کرنش رچتینگ ایجاد شده در آزمایش رچتینگ در نمونه های SS316، ورود بارگذاری آزمایش خستگی به ناحیه پلاستیک و ایجاد کرنش رچتینگ قابل توجه در نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۲-۵۳: رفتار رجتینگ در آزمایش خستگی خالص برای نمونه SS316



شکل ۲-۵۴: پدیده الاستیک شیکدان در آزمایش خستگی برای نمونه SS316 پیش رجتینگ شده با دامنه تنش و تنش میانگین ۳۱۰ MPa

۲-۴-۳ - بارگذاری کرنش-کنترل

در بارگذاری کرنش-کنترل به بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده پرداخته می‌شود. همچنین تأثیر دامنه کرنش و کرنش میانگین بر روی عمر نمونه‌ها را مورد بررسی قرار می‌گیرد. توجه است که بر خلاف بارگذاری تنش-کنترل، بارگذاری نمونه‌ها تنها شامل یک مرحله می‌باشد. جدول ۲-۱۲ چیدمان آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

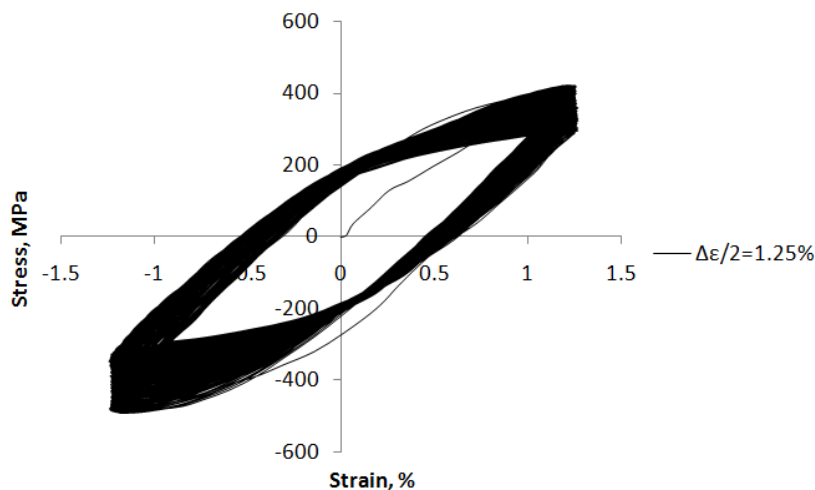
جدول ۲-۱۲: چیدمان آزمایش برای آزمایش کرنش-کنترل فولاد SS316

شماره آزمایش	کرنش میانگین	دامنه کرنش
۱	٪۰	٪۰/۸۳
۲	٪۰	٪۱/۲۵
۳	٪۰/۸۳	٪۰/۸۳
۴	٪۱/۲۵	٪۰/۸۳
۵	٪۱/۶۶	٪۰/۸۳
۶	٪۰/۸۳	٪۱/۲۵
۷	٪۱/۲۵	٪۱/۲۵
۸	٪۱/۶۶	٪۱/۲۵
۹	٪۰/۸۳	٪۱/۶۶
۱۰	٪۱/۲۵	٪۱/۶۶
۱۱	٪۱/۶۶	٪۱/۶۶

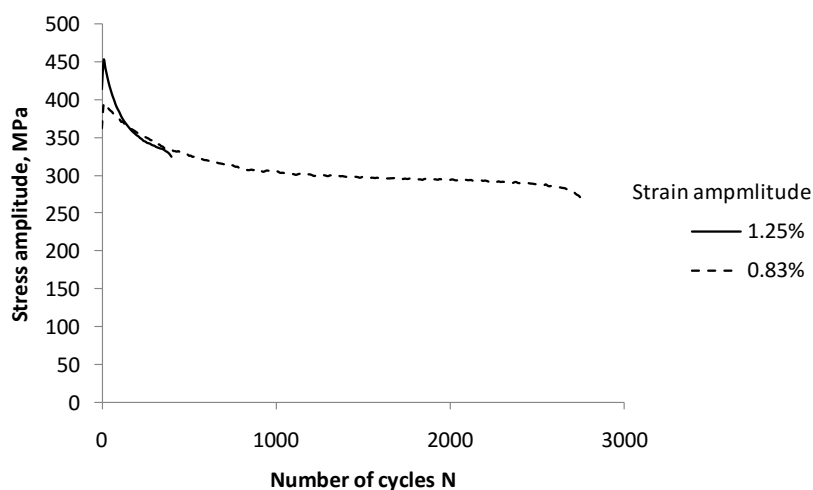
۲-۴-۳-۱- بررسی رفتار سخت‌شوندگی / نرم‌شوندگی سیکلی ماده

برای بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده، نمونه‌ها را تحت بارگذاری کرنش-کنترل قرار می‌دهیم. بارگذاری به صورت متقارن یعنی بدون کرنش میانگین در نظر گرفته شده است تا رفتار رهاسازی در نمونه‌ها ایجاد نشود. شکل ۲-۵۵ حلقه‌های هیستریزیس برای دامنه کرنش ٪۱/۲۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نرم‌شوندگی در قسمت فشاری بیشتر از قسمت کششی می‌باشد. شکل ۲-۵۶ نمودار دامنه تنش بر حسب سیکل را نشان می‌دهد. رفتار سیکلی ماده در دامنه کرنش ٪۰/۸۳ برای تعداد کمی سیکل (تقریباً ۱۵ سیکل) به صورت سخت‌شونده با شیب زیاد است و سپس شروع به رفتار نرم‌شونده می‌کند. رفتار سیکلی ماده با افزایش دامنه کرنش تغییر

می‌کند به صورتی که برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪ شیب نرم‌شوندگی به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۵۵: منحنی هیستریزیس برای دامنه کرنش ۱/۲۵٪

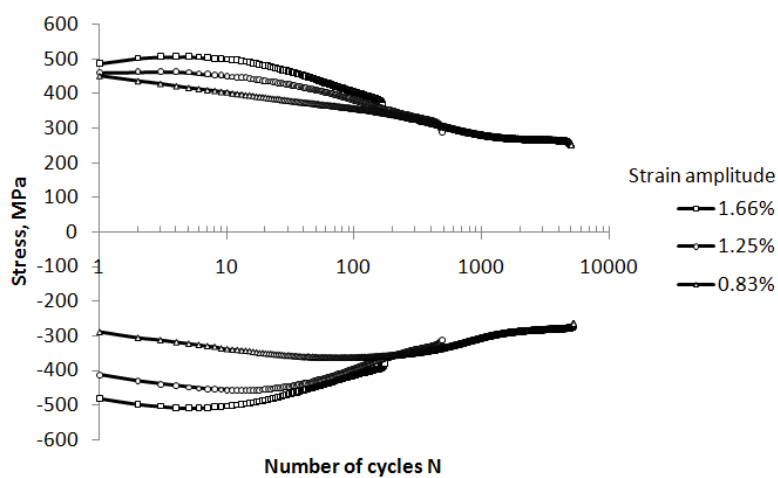


شکل ۲-۵۶: تغییرات دامنه تنش نسبت به تعداد سیکل برای بارگذاری کرنش-کنترل متقارن

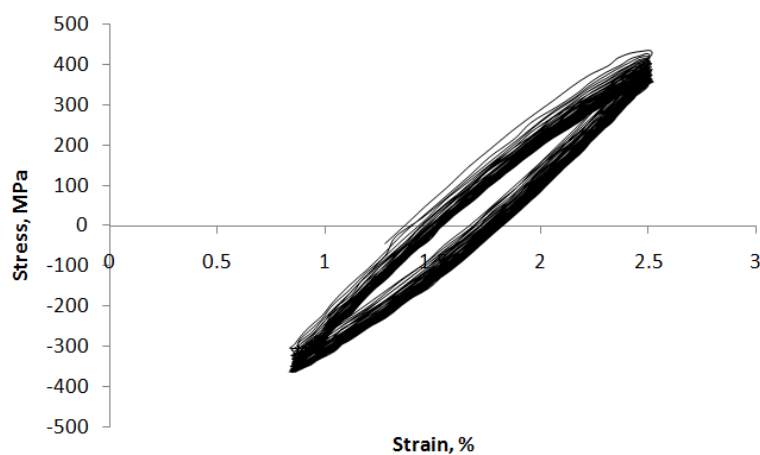
۲-۴-۳-۲- بررسی رفتار رها سازی در بارگذاری نا متقارن

همان طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، وجود کرنش میانگین در بارگذاری کرنش-کنترل باعث ایجاد تنش میانگین در نمونه‌ها می‌شود و این تنش میانگین با افزایش تعداد سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نمونه‌ها دچار رفتار رها سازی می‌شوند و این رفتار به طور کلی باعث انتقال حلقه های هیستریزیس به سمت پایین می‌شود. شکل ۲-۵۷ نمودار بیشترین و کمترین تنش در هر

سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ را نشان می‌دهد. در دامنه کرنش ۰/۸۳٪ رفتارها سازی برای ۱۰۰ سیکل اول به صورت افت تنش کششی و افزایش تنش فشاری، به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش دامنه کرنش اثر رهاسازی کمتر می‌شود که دلیل آن را می‌توان در کمتر شدن نسبت کرنش میانگین به دامنه کرنش دانست. شکل ۲-۵۸ حلقه های هیستریزیس برای ۱۰۰ سیکل اول بارگذاری با دامنه کرنش ۰/۸۳٪ و کرنش میانگین ۱/۶۶٪ را نشان می‌دهد. رفتارها سازی به وضوح به صورت انتقال حلقه‌ها به سمت پایین قابل رویت است.

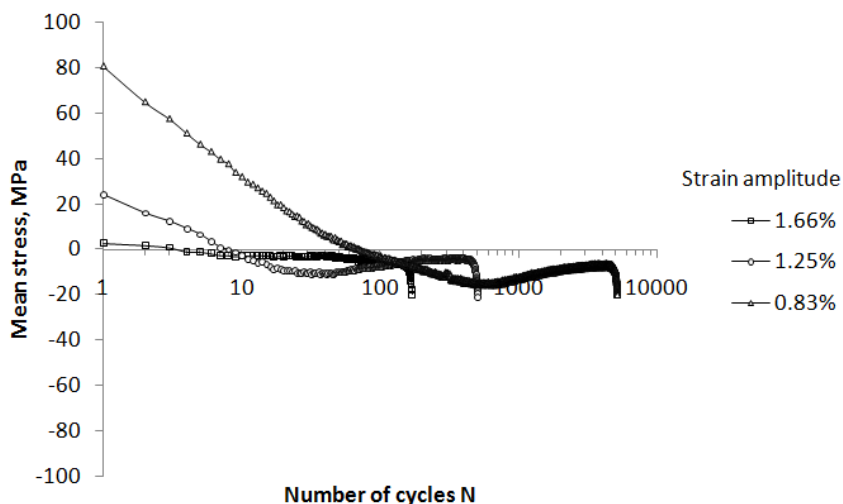


شکل ۲-۵۷: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪



شکل ۲-۵۸: رفتارها سازی در ۱۰۰ سیکل اول حلقه های هیستریزیس برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۰/۸۳٪

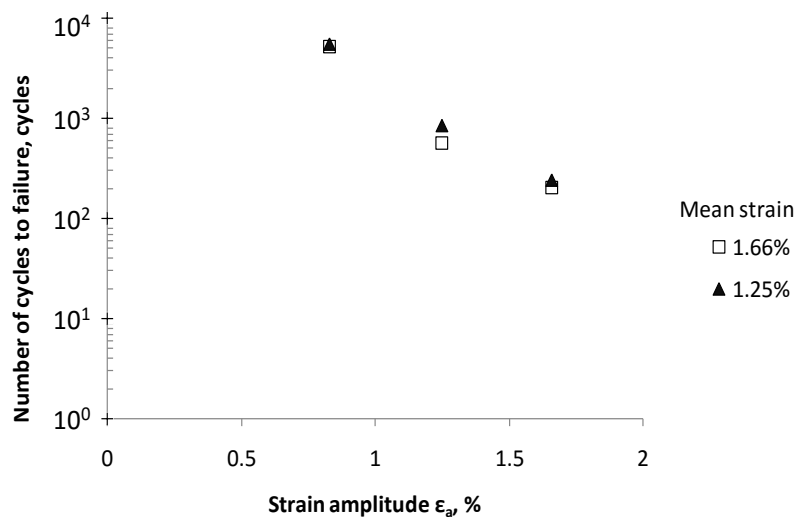
شکل ۲-۵۹ تغییرات تنش متوسط در هر حلقه هیستریزیس نسبت به تعداد چرخه‌ها تا شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. تنش متوسط برای هر حلقه هیستریزیس برابر میانگین مجموع حداکثر نیروی کششی و فشاری در آن حلقه هیستریزیس می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نقطه شروع منحنی‌ها با افزایش دامنه کرنش به صفر نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که در بیشترین دامنه کرنش برابر ۱/۶۶٪، تنش میانگین از مقدار تقریبی ۲ MPa شروع می‌شود. به عبارتی دیگر هر چه دامنه کرنش کوچک‌تر می‌گردد، مقدار تنش متوسط در اولین حلقه، عدد مثبت بزرگ‌تری می‌شود. همچنین به خوبی رفتار رها سازی در این نمودار قابل رویت است. تنش متوسط در چند سیکل ابتدایی به سرعت افت کرده، به مقدار کمی وارد ناحیه منفی می‌شود و در انتها دوباره به مقدار صفر نزدیک می‌شود. دلیل منفی شدن تنش متوسط را می‌توان در رفتار غیر یکسان نرم‌شوندگی در قسمت‌های فشاری و کششی بارگذاری دانست. به این صورت که اگر رفتار نرم‌شوندگی در ناحیه کششی بیشتر باشد، تنش متوسط وارد ناحیه منفی می‌شود و اگر نرم‌شوندگی در ناحیه فشاری بیشتر باشد، تنش متوسط به سمت ناحیه مثبت حرکت می‌کند.



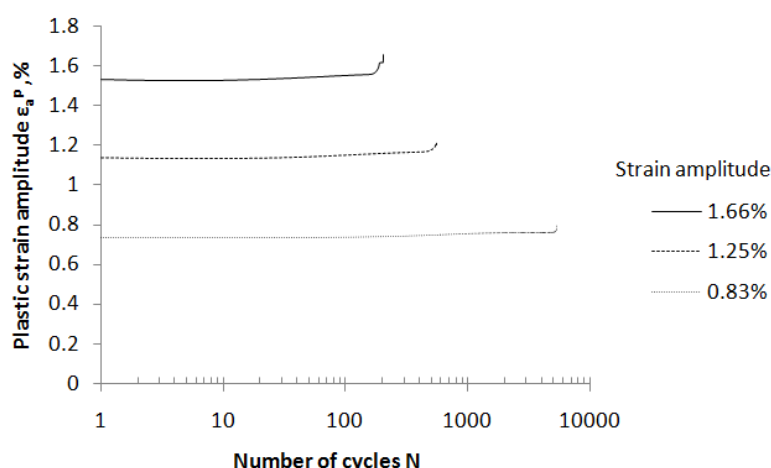
شکل ۲-۵۹: تغییرات تنش متوسط نسبت به تعداد چرخه‌ها برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪

۲-۴-۳-۳- تأثیر دامنه کرنش بر عمر نمونه‌ها

شکل ۲-۵۷ تغییر در بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل را با تغییر در دامنه کرنش و کرنش میانگین ثابت ۱/۶۶٪ نشان می‌دهد. افزایش دامنه کرنش باعث افزایش تنش کششی و فشاری می‌شود و همچنین باعث تغییر در رفتار ماده می‌شود به گونه‌ای که با افزایش دامنه کرنش رفتار نرم شونده شدت بیشتری پیدا می‌کند. شکل ۲-۶۰ تأثیر دامنه کرنش بر عمر نمونه‌ها با کرنش میانگین ثابت و دامنه تنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش دامنه کرنش عمر نمونه‌ها کاهش می‌یابند. همان‌طور که دیده می‌شود، این روند کاهش برای کرنش میانگین‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد و کرنش میانگین تأثیر چندانی ندارد. علت این کاهش عمر را می‌توان در افزایش کار پلاستیک انجام شده در هر سیکل دانست. در شکل ۲-۶۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه کرنش، دامنه کرنش پلاستیک نیز افزایش می‌یابد و می‌دانیم که دامنه کرنش پلاستیک تأثیر به‌سزایی بر عمر خستگی دارد و افزایش دامنه کرنش پلاستیک باعث کاهش عمر خستگی می‌شود [۱۴].



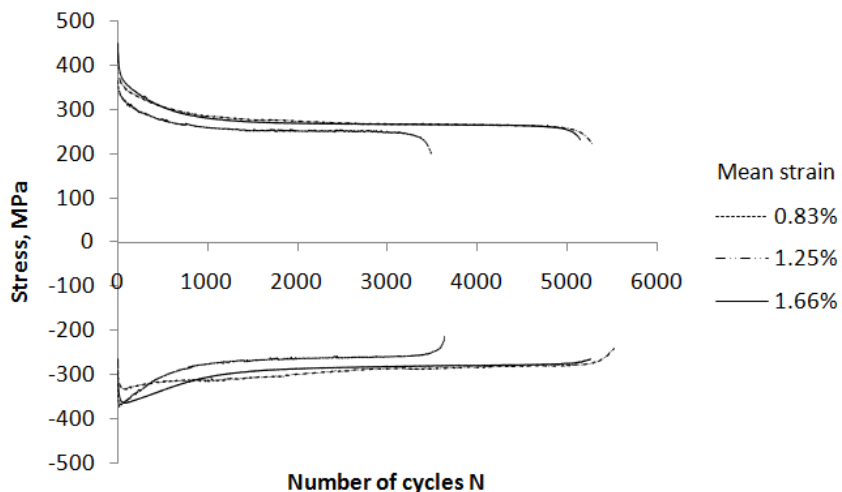
شکل ۲-۶۰: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به دامنه کرنش



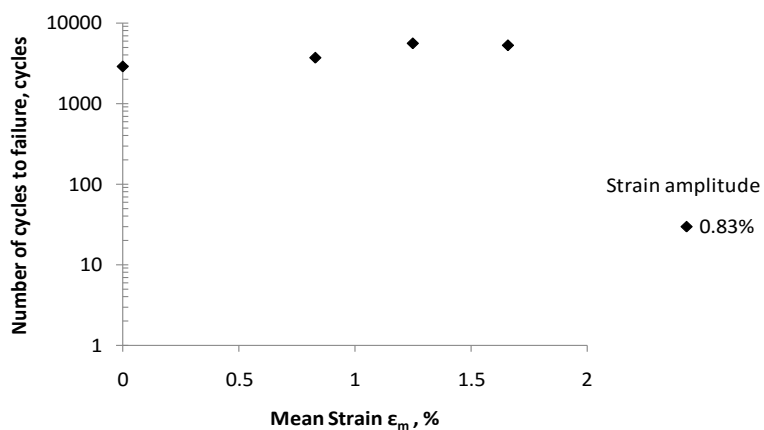
شکل ۲-۶۱: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای کرنش میانگین ثابت ۰/۶۶٪

۲-۴-۳-۴ - تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها

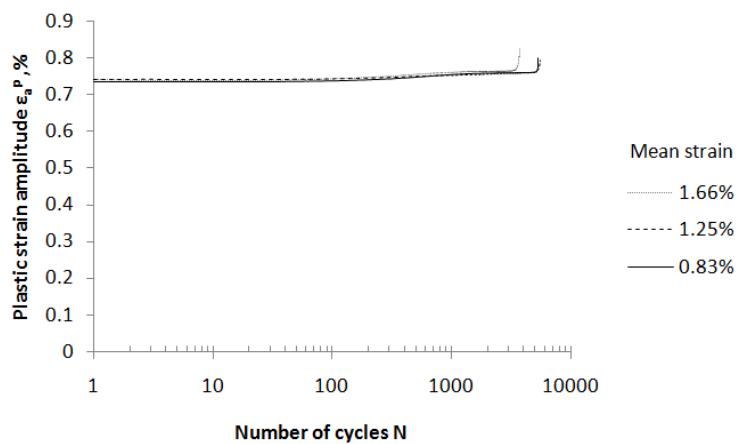
شکل ۲-۶۲ نمودار بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. شکل ۲-۶۳ عمر نمونه‌ها برای کرنش‌های میانگین مختلف با دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تأثیر کرنش میانگین بر عمر نمونه‌ها ناچیز است و با افزایش کرنش میانگین عمر نمونه‌ها به مقدار اندکی افزایش می‌یابد. شکل ۲-۶۴ دامنه کرنش پلاستیک بر حسب سیکل برای کرنش میانگین‌های مختلف با دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش کرنش میانگین باعث ایجاد افزایش اندکی در تنش فشاری و کششی در هر سیکل می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که تنش میانگین تأثیر اندکی بر بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل دارد. همچنین کرنش میانگین بر رفتار سیکلی ماده بی‌تأثیر است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دامنه کرنش پلاستیک با تغییر دامنه کرنش تقریباً ثابت می‌ماند. به طور کلی می‌توان گفت که تأثیر کرنش میانگین بر دامنه کرنش پلاستیک و عمر نمونه‌ها اندک می‌باشد.



شکل ۲-۶۲: تغییرات بیشترین و کمترین تنش در هر سیکل بارگذاری برای کرنش میانگین‌های مختلف و دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪



شکل ۲-۶۳: تغییرات عمر نمونه‌ها نسبت به کرنش میانگین



شکل ۲-۶۴: تغییرات دامنه کرنش پلاستیک نسبت به سیکل برای دامنه کرنش ثابت ۰/۸۳٪

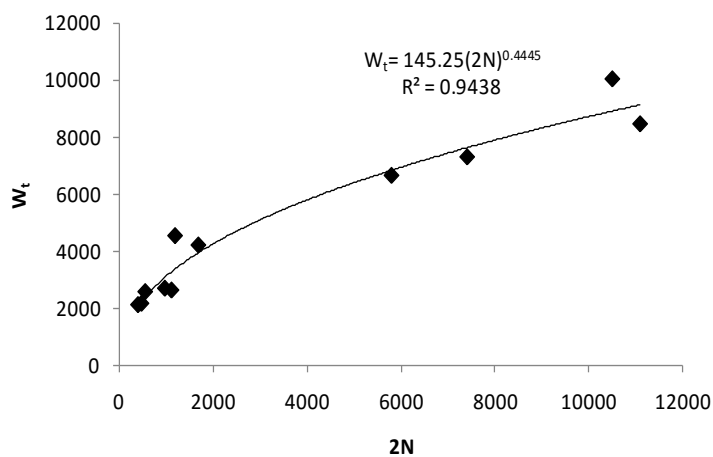
۲-۴-۳-۵- پیش بینی عمر خستگی بر اساس انرژی

در این بخش، جهت پیش بینی عمر خستگی نمونه های فولاد SS316 بر اساس انرژی، مشابه بخش ۳-۳-۵ برای فولاد CK45، عمل شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش خستگی و همچنین انرژی کرنشی محاسبه شده به وسیله حل عددی مونت-کارلو از حلقه های هیستریزس، در جدول ۲-۱۳ نشان داده شده است.

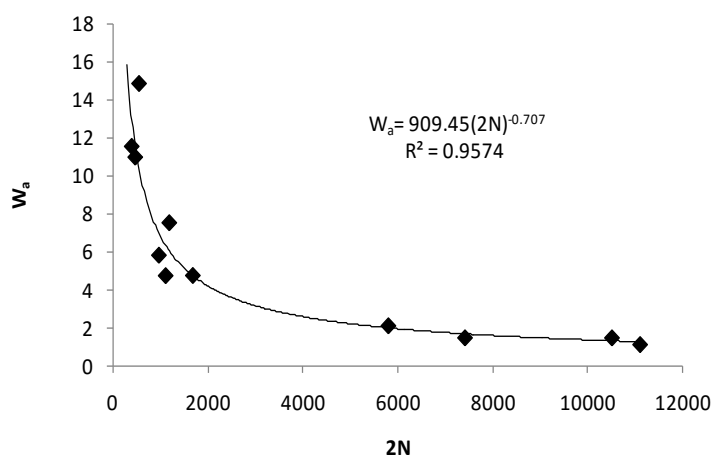
جدول ۲-۱۳: نتایج آزمایش خستگی کرنش-کنترل و انرژی کرنشی ایجاد شده برای فولاد SS316

شماره آزمایش	کرنش متوسط (%)	دامنه کرنش (%)	عمر خستگی	W_t	W_a	W_1
۱	۱/۲۵	۰/۸۳	۵۵۵۱	۸۴۵۸/۰۵۳	۱/۱۴۹	۱/۹۸۴
۲	۱/۶۶	۰/۸۳	۵۲۵۵	۱۰۰۳۲/۹۹	۱/۵۰۳	۲/۳۱۰
۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۳۷۰۹	۷۳۰۰/۸۹۷	۱/۵۰۵	۲/۲۳۷
۴	۰	۰/۸۳	۲۹۰۳	۶۶۵۲/۳۱۷	۲/۱۳۹	۲/۵۴۱
۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۸۴۶	۴۲۱۳/۳۲۳	۴/۷۸۸	۷/۲۷۰
۶	۰/۸۳	۱/۲۵	۵۹۸	۴۵۴۱/۶۵۸	۷/۵۶۶	۸/۱۵۶
۷	۱/۶۶	۱/۲۵	۵۶۰	۲۶۳۵/۹۳۱	۴/۷۷۹	۸/۱۳۳
۸	۰	۱/۲۵	۴۸۹	۲۶۹۹/۹۷۵	۵/۸۵۵	۶/۴۲۴
۹	۰/۸۳	۱/۶۶	۲۸۰	۲۵۸۰/۳۷۴	۱۴/۸۹۸	۱۵/۲۱۴
۱۰	۱/۲۵	۱/۶۶	۲۴۰	۲۱۷۰/۶۰۶	۱۱/۰۲۲	۱۱/۷۲۸
۱۱	۱/۶۶	۱/۶۶	۲۰۳	۲۱۲۴/۶۲۶	۱۱/۵۸۷	۱۳/۸۵۸

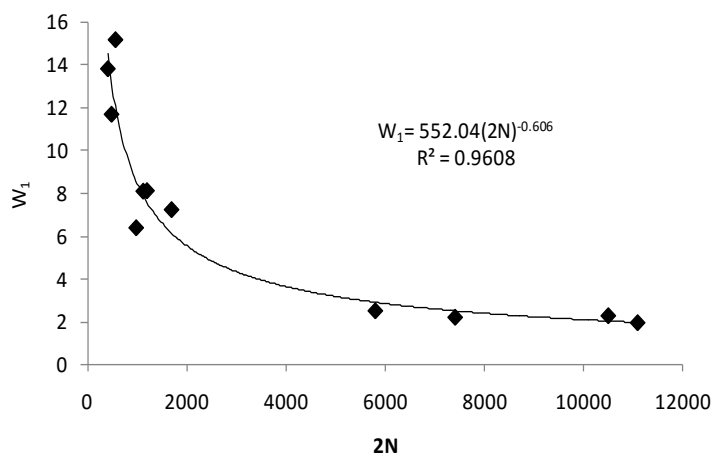
با توجه به جدول ۲-۱۳، نمودار انرژی کرنشی بر حسب تعداد نیم سیکل برای سه معیار انرژی مختلف رسم شده است (شکل های ۲-۶۵ تا ۲-۶۷). همچنین با استفاده از بررسی رگرسیون حداقل مربعات، روابطی که بیانگر ارتباط بین انرژی کرنشی و تعداد نیم سیکل می باشد، بدست آمده است. که این مقادیر در جدول ۲-۱۴ آورده شده است.



شکل ۲-۶۵: انرژی کرنشی کل نسبت به تعداد نیم سیکل



شکل ۲-۶۶: انرژی کرنشی متوسط نسبت به تعداد نیم سیکل



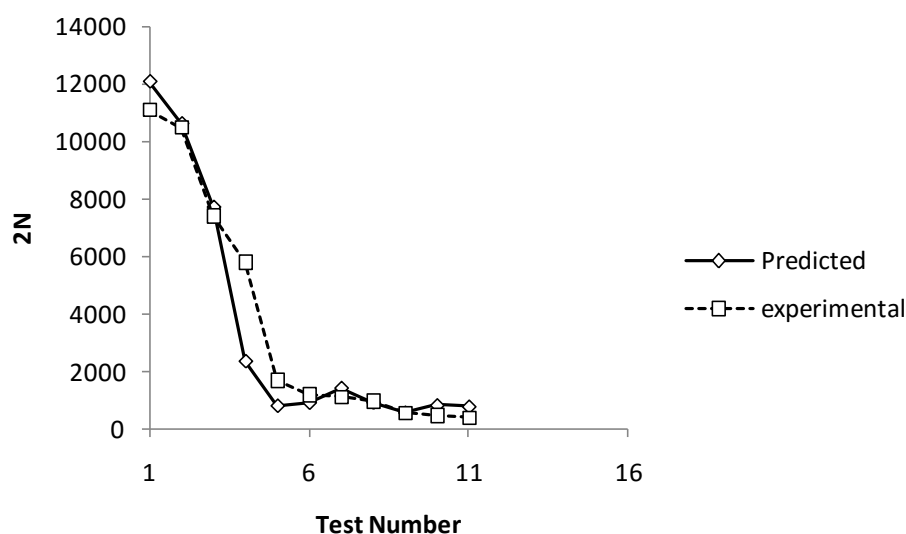
شکل ۲-۶۷: انرژی کرنشی سیکل اول نسبت به تعداد نیم سیکل

جدول ۲-۱۴: روابط بدست آمده برای پیش بینی عمر خستگی به روش انرژی و ضرایب آن

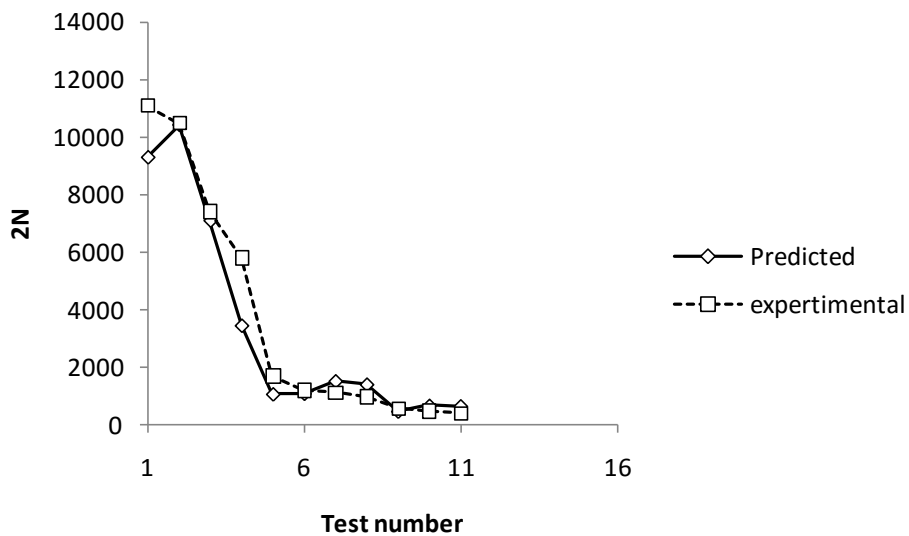
رابطه بدست آمده	ضریب ثابت α	ضریب ثابت A	R^2 مربع ضریب همبستگی
$W_t = 145.25(2N)^{0.4445}$	0.4445	145.25	0.9438
$W_a = 909.45(2N)^{-0.707}$	-0.707	909.45	0.9574
$W_l = 552.04(2N)^{-0.606}$	-0.606	552.04	0.9608

در روش رگرسیون حداقل مربعات، هر چه مربع ضریب همبستگی (R^2)، به عدد ۱ نزدیک تر باشد رابطه از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به جدول ۲-۱۴، مشاهده می شود؛ که این ضرایب به مقدار ۱ نزدیک می باشند و در نتیجه روابط به دست آمده از دقت بالایی برخوردار هستند. با توجه به روابط بدست آمده در جدول ۲-۱۴ و روابط (۲-۹) تا (۲-۱۱) می توان گفت که ضرایب ثابت α و A برای فولاد SS316 و سه معیار مختلف انرژی برابر ستون های اول و دوم این جدول می باشند.

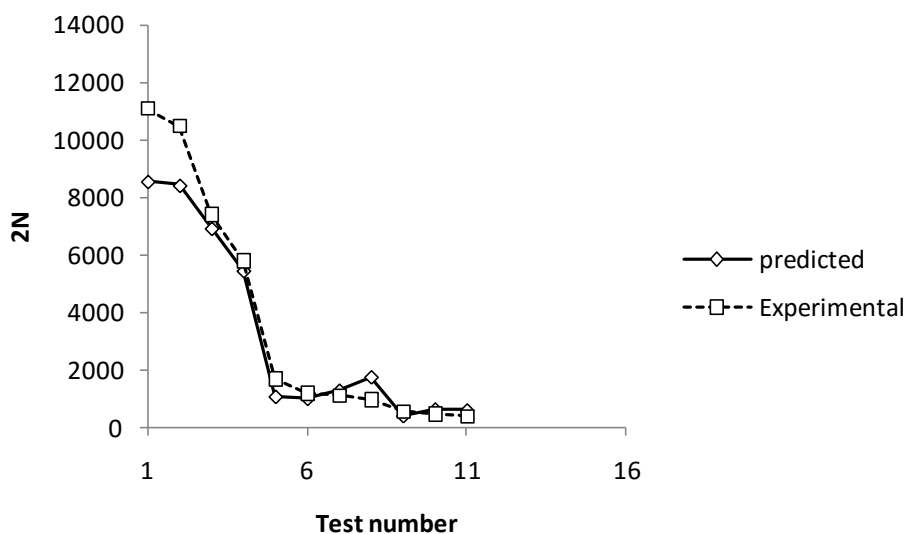
جهت بررسی مقدار دقت روابط بدست آمده، تعداد نیم سیکل تجربی و پیش بینی شده توسط هر سه رابطه برای تمامی آزمایش ها رسم شده است (شکل های ۲-۶۸ تا ۲-۷۰). همان طور که مشاهده می شود، نتایج تجربی و پیش بینی شده از انطباق قابل قبولی برخوردار هستند.



شکل ۲-۶۸: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی کل



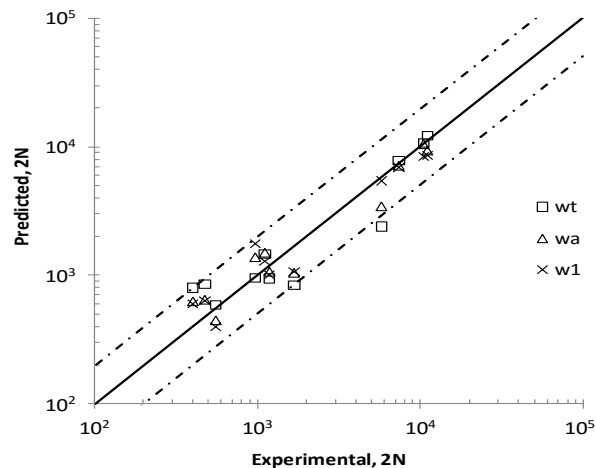
شکل ۲-۶۹: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی متوسط



شکل ۲-۷۰: مقایسه نتایج تجربی و پیش بینی شده بر اساس معیار انرژی سیکل اول

شکل ۲-۷۱ نمودار تعداد نیم سیکل پیش بینی شده نسبت به تعداد نیم سیکل تجربی را برای هر سه معیار انرژی نشان می‌دهد. خطوط مقطع، نشان دهنده محدوده دو برابر خطا می‌باشند. در صورتی که تعداد نیم سیکل تجربی و تعداد نیم سیکل پیش بینی شده با یکدیگر برابر باشند، مقدار خطا صفر می‌باشد و نقاط بدست آمده از نتایج تجربی (محور افقی) و پیش بینی شده (محور قائم) بر

روی خط ممتد قرار می‌گیرند و در صورت وجود اختلاف در نتایج، این نقاط از خط ممتد دور می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک نقطه مربوط به رابطه انرژی کل خارج محدوده دو برابر خطا و دو نقطه دیگر آن بر روی مرز قرار دارند. بنا بر این، استفاده از رابطه بر اساس انرژی کل برای این فولاد، دقت چندانی ندارد.



شکل ۲-۷۱: مقایسه عمر خستگی پیش بینی شده با عمر خستگی تجربی

۲-۵- نتیجه گیری

در این فصل به مطالعه رفتار رچتینگ و تأثیر آن بر روی عمر خستگی نمونه های آزمایش برای دو جنس SS316 و CK45 تحت بار گذاری های چرخه ای پرداخته شد. بار گذاری ها به دو صورت تنش-کنترل و کرنش-کنترل اعمال گردیدند که در حالت تنش-کنترل به صورت دو مرحله ای و در حالت کرنش-کنترل به صورت تک مرحله ای انجام گرفته‌اند. تأثیر پارامتر های مختلفی مانند دامنه تنش، تنش میانگین، نسبت تنش، تعداد سیکل پیش رچتینگ، دامنه کرنش، کرنش میانگین، دامنه کرنش پلاستیک بر روی عمر خستگی نمونه های آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین رفتار رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی یا سخت‌شوندگی سیکلی و رفتار رها سازی نمونه‌ها نیز بررسی شدند. با استفاده

از روش انرژی رابطه ای جهت پیش بینی عمر خستگی در بارگذاری کرنش-کنترل ارائه شد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی در زیر آورده شده‌اند.

۱. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله اول بارگذاری یعنی مرحله پیش رچتینگ، در نمونه‌ها پدیده رچتینگ ایجاد می‌شود. میزان کرنش رچتینگ ایجاد شده به دامنه تنش، تنش میانگین بستگی دارد. برای هر دو نمونه های CK45 و SS316 کرنش رچتینگ برای اکثر موارد با افزایش دامنه تنش و تنش میانگین، افزایش می‌یابد و تأثیر دامنه تنش از تنش میانگین بیشتر است.

۲. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله اول بارگذاری یعنی مرحله پیش رچتینگ، تأثیر نسبت تنش بر روی کرنش رچتینگ برای بازه مورد نظر از نسبت تنش‌ها و حداکثر تنش‌های معین، روال مشخصی ندارد. اما به طور کلی می‌توان گفت که معمولاً برای نمونه های SS316 بیشترین کرنش رچتینگ متعلق به کوچک‌ترین نسبت تنش و برای نمونه‌های CK45 بیشترین کرنش رچتینگ متعلق به بزرگ‌ترین نسبت تنش می‌باشد.

۳. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های CK45 مشخص شد که هر چه دامنه تنش پیش رچتینگ بیشتر باشد، عمر خستگی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این قضیه برای تنش میانگین پیش رچتینگ صادق نمی‌باشد. تأثیر تنش میانگین بر عمر خستگی اندک است به گونه ای که برای نمونه CK45 برای بازه زیادی از تنش میانگین‌ها عمر خستگی با افزایش تنش میانگین با نرخ بسیار اندکی افزایش می‌یابد که می‌توان گفت تقریباً ثابت می‌باشد؛ اما اگر تنش میانگین را به مقدار زیادی کاهش دهیم، به دلیل کاهش اثر قابل توجه پدیده رچتینگ، عمر خستگی افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که عمر خستگی به میزان قابل توجهی متأثر از دامنه تنش می‌باشد و تنش میانگین تأثیر اندکی بر روی آن دارد.

۴. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های SS316 مشخص شد که هر چه دامنه تنش پیش رچتینگ بیشتر باشد، عمر خستگی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد که این نتیجه بر خلاف نتیجه بدست آمده برای نمونه های CK45 می باشد. دلیل افزایش عمر، ایجاد پدیده اضافه بار می باشد. به طور کلی می توان گفت که دو عامل بر عمر خستگی تأثیر دارند. عامل اول، تأثیر پدیده رچتینگ در مرحله پیش رچتینگ که باعث کاهش عمر خستگی می شود و عامل دوم، تأثیر پدیده اضافه بار در مرحله آزمایش خستگی که باعث افزایش عمر خستگی می گردد. به دلیل تفاوت در انتخاب چیدمان خستگی برای نمونه های SS316، عامل اضافه بار بر روی این نمونه ها تأثیر زیادی داشته است. این روند برای تنش میانگین برعکس می باشد. با کاهش تنش میانگین به مقدار کمی عمر خستگی افزایش می یابد که دلیل آن تأثیر عامل پدیده رچتینگ در پیش رچتینگ می باشد. اما از تنش میانگین خاصی کمتر (کمتر از تنش میانگین آزمایش خستگی خالص) عمر خستگی به شدت کاهش می یابد که دلیل آن افت شدید اثر اضافه بار می باشد.

۵. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های SS316 و CK45 مشخص شد که اگر بارگذاری آزمایش خستگی خالص به مقداری زیاد باشد که باعث ایجاد کرنش رچتینگ قابل ملاحظه ای در این مرحله شود، نمونه ها تحت تأثیر پدیده اضافه بار قرار می گیرند.

۶. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های CK45 مشخص شد که عمر خستگی، با کاهش تعداد سیکل پیش رچتینگ، به دلیل کم شدن عامل تأثیر رچتینگ در پیش رچتینگ، زیاد و برای نمونه های SS316 به دلیل کم شدن عامل اضافه بار کم می شود.

۷. در بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری، برای نمونه های CK45 برای دامنه کرنش‌های کوچک رفتار کاملاً نرم‌شوندگی و برای دامنه کرنش‌های بزرگ برای تعداد کمی سیکل (تقریباً ۱۵ سیکل) به صورت سخت شونده با شیب زیاد است و سپس شروع به رفتار نرم شونده می‌کند و پس از گذشت تقریباً ۲۰۰ سیکل این رفتار دوباره به رفتار سخت شونده با شیب کم تبدیل می‌شود و برای نمونه های SS316 برای تعداد کمی سیکل (تقریباً ۱۵ سیکل) به صورت سخت شونده با شیب زیاد است و سپس شروع به رفتار نرم شونده می‌کند. با افزایش دامنه کرنش شیب نرم‌شوندگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین کرنش میانگین بر رفتار سیکلی دو نمونه مورد آزمایش تأثیری نداشته است.

۸. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 وجود کرنش میانگین باعث ایجاد تنش میانگین در طول آزمایش می‌شود که کم شدن این تنش میانگین باعث ایجاد رفتار رها سازی در نمونه‌ها می‌شود. این رفتار در نمونه های SS316 با کاهش دامنه کرنش به خوبی دیده می‌شود. در نمونه های CK45 به علت عدم تقارن تنش در ناحیه فشاری و کششی و یا به عبارتی دیگر تحمل بیشتر بار در ناحیه فشاری رفتار رها سازی به خوبی دیده نمی‌شود.

۹. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 افزایش دامنه کرنش باعث کاهش شدید عمر خستگی می‌شود و افزایش کرنش میانگین به میزان بسیار کمی باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که عمر خستگی به مقدار زیادی متأثر از دامنه کرنش می‌باشد و کرنش میانگین تقریباً بر روی آن بی تأثیر است.

۱۰. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 مشخص شد که عمر خستگی نمونه‌ها در ارتباط مستقیم با دامنه کرنش پلاستیک است. به گونه ای که با افزایش دامنه کرنش پلاستیک، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۱۱. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های SS316 رابطه ارائه شده به وسیله معیار انرژی کل، جهت پیش بینی عمر خستگی، از دقت مناسبی برخوردار نمی باشد و برای نمونه های CK45 رابطه بر اساس انرژی میانگین دارای بیشترین دقت می باشد.

فصل ۳ - تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی با تجربی

۳-۱- مقدمه ای بر تحلیل عددی

در روش حل دقیق همان گونه که از نام آن مشخص است، به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان حرارتی، میدان تنش، میدان الکتریکی و ... می‌پردازند. در حالی که در روش دوم به حل تقریبی و عددی این مسئله پرداخته می‌شود. روش تجربی یا آزمایشگاهی نیز با توجه به این که برگرفته و مبتنی بر خود واقعیت است، روش مناسبی محسوب می‌شود. در این میان روش حل عددی که روش اجزاء محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، جزء یکی از پر کاربردترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. از جمله مزیت‌های حل عددی خصوصاً اجزاء محدود نسبت به روش‌های دیگر به شرح زیر است:

ضعف عمده روش آزمایشگاهی پر هزینه و زمان‌گیر بودن آن می‌باشد؛ در حالی که در روش حل عددی این چنین نیست. روش حل دقیق از تحلیل مدل‌هایی با هندسه پیچیده همچنین در اغلب مسائل غیر خطی خصوصاً در مواردی که درجه غیر خطی بودن معادلات بالا باشد، عاجز است و تنها روش‌های عددی خصوصاً روش اجزاء محدود در این زمینه کارگشاست. در مسائلی که شرایط مرزی کمی پیچیده می‌شود نیز حل دقیق ناتوان است و تنها روش‌های مرسوم عددی در حل این نوع مسائل به کار می‌رود. اصطلاح اجزاء محدود اولین بار توسط کلوق^۱ در سال ۱۹۶۰ جهت حل مسائل الاستیسیته دو بعدی به کار گرفته شد، هرچند اولین شخصی که از این روش در حل مسائل پیش از استفاده نمود کورانت^۲ در سال ۱۹۴۳ است. از آن پس در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ برنامه‌های کامپیوتری گوناگونی نظیر نسترن^۳، انسیس^۴ و مارک^۵ که از روش اجزاء محدود برای تحلیل استفاده می‌کنند شکل گرفت. با پیشرفت روز افزون سرعت کامپیوترها استفاده از این روش

^۱ Clough

^۲ Courant

^۳ NASTRAN

^۴ ANSYS

^۵ MARC

بسیار مناسب‌تر و مقرون به صرفه شد. امروزه در سراسر جهان هزاران مهندس و محقق در هر روز برای تحلیل مسائل مختلف از این ابزار نیرومند استفاده می‌کنند.

در روش اجزاء محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم و با کمینه نمودن انرژی پتانسیل حل می‌شوند. روش کار بدین صورت است که کل مدل هندسی به اجزاء کوچک‌تری به نام المان تقسیم می‌شود، هر المان خود دارای گره‌هایی است که مقادیر ورودی (بارگذاری و شرایط مرزی) و خروجی (نتایج) به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. روش اجزاء محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسایل فیزیکی می‌باشد که توسط معادله دیفرانسیل توصیف می‌شوند. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش‌های عددی متمایز می‌سازد

۱. در این روش از یک فرمول‌بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می‌شود.

۲. در این روش از توابع هموار به طور قطعه ای پیوسته جهت تقریب کمیات مجهول استفاده می‌شود.

مشخصه دوم، روش اجزاء محدود را از سایر روش‌های عددی که فرمول‌بندی انتگرالی دارند، متمایز می‌کند. روش اجزاء محدود را می‌توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱- تقسیم ناحیه مورد بحث به تعداد زیادی زیر ناحیه کوچک موسوم به المان نقاط اتصال المان‌ها به یکدیگر، گره نامیده می‌شود.

۲- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که همواره یا خطی است و یا مرتبه دوم. پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می‌شود.

۳- استخراج دستگاه معادلات جبری. در صورت استفاده از روش گالرکین، تابع وزنی برای هر گره مشخص شده و سپس انتگرال باقیمانده وزنی تشکیل می‌گردد. با انتگرال گیری، برای هر گره یک معادله جبری ایجاد می‌گردد که پس استخراج معادلات همه گره‌ها، دستگاه معادلات بوجود می‌آید.

۴- حل دستگاه معادلات ایجاد شده

۵- محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گرهی

در مرحله اول همان‌گونه که اشاره گردید، هندسه مسئله به نواحی کوچکی موسوم به المان تقسیم می‌گردد. نقاط اشتراک المان‌ها، گره‌ها می‌باشند. به مجموعه یک المان با گره‌هایش یک مش گفته می‌شود. المان‌ها می‌توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند. همچنین بسته به بعد المان، اشکال مختلف برای یک المان قابل تصور است. یک المان دو بعدی می‌تواند به شکل مثلث، مربع و یا شکل دلخواه دیگری باشد. از طرفی یک المان سه بعدی نیز می‌تواند اشکالی مانند چهار وجهی، هرم، منشور و یا مکعب داشته باشد. مش بندی هندسه مسئله از مراحل مهم مدل سازی می‌باشد که مستلزم دقت و مهارت مناسب می‌باشد. در مرحله دوم، در واقع تقریب اولیه برای جواب مسئله به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول در نظر گرفته می‌شود. این تقریب در محدوده یک المان زده می‌شود و برای کل شکل مسئله انجام نمی‌گیرد به عنوان مثال $u = c_1x + c_2$ یک تقریب خطی برای توزیع جابجایی در یک المان یک بعدی است. در خصوص مسایلی که توسط نرم افزار حل می‌شوند، چون می‌توان ابعاد المان‌ها را بسیار ریز انتخاب کرد، هیچ گاه تقریبی با درجه بیشتر از دو زده نمی‌شود. به عبارت دیگر تقریب اولیه برای جواب همواره در نرم افزارها یا خطی است و یا سهموی. در مرحله بعد معادله حاکم برای تک تک گره‌ها نوشته شده و پس از انتگرال گیری‌های لازم، به فرم یک معادله جبری تبدیل می‌شود. برای روشن تر شدن موضوع به معرفی مفهوم تابع شکلی می‌پردازیم. همان‌گونه که ذکر شد در یک تحلیل اجزاء محدود ابتدا مقادیر گرهی کمیت مد نظر محاسبه می‌گردد و سپس با میان یابی

در هر نقطه دلخواه می‌توان مقدار کمیت مجهول را بدست آورد. بنابراین می‌بایست مرتبه میان یابی معلوم باشد که همان‌گونه که در مرحله قبل اشاره گردید، یا خطی و یا مرتبه دو است

۳-۲- معرفی نرم افزار آباکوس

در سال ۱۹۷۷ دکتر هیبیت^۱ نرم افزار آباکوس را پایه گذاری نمود. در سال ۱۹۷۸، هیبیت به همراه دو شریک خود کارلسون^۲ و سورنسن^۳ شرکتی را به نام HKS تاسیس کردند که اولین ویرایش آباکوس را منتشر کرد. پس از سال‌ها، نرم افزار اصلی اجزای محدود تحت عنوان آباکوس/استاندارد^۴ تکمیل شد. در سال ۱۹۹۹، آباکوس/صریح^۵ بر مبنای روش حل دینامیکی صریح منتشر شد و در سال ۱۹۹۹، آباکوس/سی‌ای‌ایی^۶ برای انجام عملیات پیش پردازش و پس پردازش تکمیل و به بازار عرضه شد. در سال ۲۰۰۲ شرکت HKS، به آباکوس تغییر نام داد. نام این نرم افزار و لوگوی آن از کلمه یونانی " abax" ($\alpha\beta\alpha\xi$) به معنای به طور کامل پوشیده از شن گرفته شده است [۲۷].

یک بسته نرم افزاری آباکوس دارای سه محصول اصلی است:

۱. آباکوس/استاندارد

محصول اصلی- با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسایل خطی و غیر خطی شامل مسایل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول دستگاه معادلات حاکم را در هر دو نمو^۷ به صورت ضمنی^۱ تحلیل می‌کند. در این روش، کاربر می‌تواند

^۱ Hibitt

^۲ Karlsson

^۳ Sorensen

^۴ ABAQUS/Standard

^۵ ABAQUS/Explicit

^۶ ABAQUS/CAE

^۷ Increment

میزان نمو در هر مرحله را تعیین کند یا از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده برای این منظور استفاده نماید.

۲. آباکوس/صریح

محصولی با اهداف ویژه- برای مدل سازی مسایل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی، همچنین مسایل شبه استاتیکی یا مسایل غیر خطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند، مانند شکل دهی مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال گیری صریح به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسایل غیر خطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم افزار بر اساس شرایط پایداری میزان نمو را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

۳. آباکوس/سی‌ای‌ای

یک رابط گرافیکی- این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را سریعاً و به سادگی بسازد یا از یک نرم افزار مدل سازی دیگر وارد کند.

نرم افزار آباکوس یک نرم افزار اجزاء محدود قدرتمند است که در عین توانایی‌های گسترده، به سادگی قابل یادگیری و استفاده است. نرم افزار آباکوس قابلیت شبیه سازی مسایل پیچیده مهندسی را در زمینه های مختلف مهندسی عمران، مهندسی مکانیک و... دارد. از آنجایی که انجام آزمایشات عملی بسیار پرهزینه است، استفاده از شبیه سازی اجزا محدود می‌تواند به عنوان یک ابزار جایگزین به کار برده شود. نکته ای باید به آن توجه کرد این است که استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود بدون آشنایی با روش اجزاء محدود می‌تواند منجر به شبیه سازی‌های نادرست و نتایج گمراه کننده گردد.

^۱ Implicit

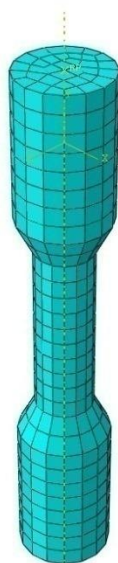
بنابراین توصیه می‌شود قبل از استفاده از نرم افزار، کاربران آشنایی نسبی با روش اجزاء محدود داشته باشند. به دلیل وجود محیط گرافیکی ساده در نرم افزار آباکوس ممکن است، کاربران تصور کنند که با استفاده از روش سعی و خطا و کسب تجربه می‌توانند مدل‌سازی را بدون آموزش فراگیرند. با این حال استفاده از این سایت به کاربران کمک می‌کند تا سریع‌ترین و مناسب‌ترین ابزار را در حین مدل‌سازی مورد استفاده قرار دهند. در این سایت سعی شده است که روش استفاده از نرم افزار آباکوس در قالب تعدادی مثال حل شده به صورت گام به گام آموزش داده شود. از مزایای این نرم افزار نسبت به دیگر نرم افزارهای موجود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- توان بالای تحلیل مسائل غیر خطی نظیر رفتار پلاستیک و تغییر شکل‌های بزرگ
- تحلیل شکست قطعات و رشد ترک علاوه بر جوانه زنی که بدین ترتیب می‌توان رشد دینامیکی ترک را در مواد ایزوتروپ و مواد مرکب پیش بینی نمود.
- دارا بودن قابلیت‌های ویژه در حوزه مسائل مربوط به مواد کامپوزیت
- توانایی حل مسائل گوناگون به دو روش ضمنی و صریح
- وجود زیر برنامه های مختلف در این نرم افزار و دسترسی آسان به آن‌ها که بدین ترتیب می‌توان از تئوری‌های به کار رفته در حل هر مسئله آگاهی یافت.

به طوری که سهولت دستیابی و فهم نحوه عملکرد زیر برنامه های این نرم افزار موجب گشته تا مجامع دانشگاهی بین‌المللی از آن بیش از نرم افزارهای دیگر در مقاله های علمی منتشر شده استفاده کنند. این بدین معنا است که کاربر می‌تواند تمام زیر برنامه های مرتبط با موضوع کار خود را در محیط نرم افزار تغییر داده و در حقیقت از آن به نفع خود استفاده کند.

۳-۳- شبیه سازی و بررسی پدیده رچتینگ در نرم افزار آباکوس

ابتدا قطعه آزمایش را مطابق شکل ۳-۱ در محیط طراحی نرم افزار آباکوس به صورت سه بعدی مدل می‌کنیم. همچنین برای بدست آوردن نتایج دقیق‌تر سعی می‌گردد نوع و نحوه بارگذاری و همچنین شرایط مرزی تا جای امکان مشابه شرایط آزمایشگاهی باشد.

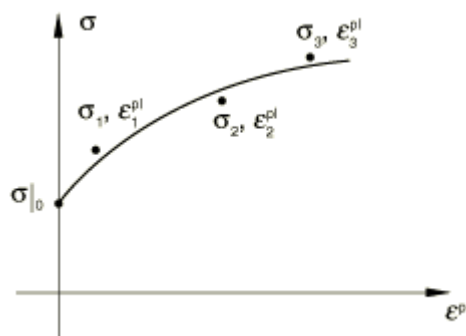


شکل ۳-۱: تصویر قطعه مدل شده در محیط آباکوس

در این مدل سازی از المان $C3D8R$ برای مش بندی استفاده شده است که یک المان سه بعدی با هشت گره به شکل چهار ضلعی می‌باشد. تعیین نوع رفتار سخت‌شوندگی و همچنین طریقه تعیین خواص سیکلی ماده در قسمت پلاستیک از زیر شاخه های قسمت جنس در نرم افزار انجام می‌شود. تعیین مدل سخت‌شوندگی در این قسمت انجام می‌شود سه نوع سخت‌شوندگی در این نرم افزار پیش بینی شده است: مدل اول ایزوتروپیک می‌باشد. در این حالت دامنه سیکلی نمودار تنش- کرنش در حالت فشاری و کششی در هر سیکل با هم برابر است. در نتیجه همواره متقارن نسبت به محور کرنش‌ها باقی می‌ماند اما حلقه‌ها با افزایش سیکل‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. مدل دوم سینماتیک است. این مدل تنها سخت‌شوندگی در حالت سینماتیک خطی را در نظر می‌گیرد. در این حالت با

افزایش سیکل‌های بار گذاری نمودار سیکلی تنش- کرنش به جای بزرگ‌تر شدن شیفت می‌کند و جابجا می‌شود و از حالت متقارن خارج می‌شود. این مدل خطی است و تنها به مختصات دو نقطه از تنش و کرنش پلاستیک احتیاج است و در انتها مدل ترکیبی^۱ می‌باشد. در این حالت از هر دو خاصیت ایزوتروپیک و سینماتیک استفاده می‌شود. این مدل غیر خطی است. لازم به تذکر است که برای بررسی رفتار رچتینگ در این مطالعه از این مدل سخت‌شوندگی استفاده شده است تا هر دو نوع سخت‌شوندگی در حالت غیر خطی در نظر گرفته شود. داده‌های ورودی مورد نیاز برای این مدل را می‌توان به سه روش به آباکوس وارد نمود: روش اول نیم سیکل^۲ می‌باشد، در این روش از نقاط مربوط به نیم سیکل اول منحنی سیکلی تنش-کرنش استفاده می‌شود و برای بررسی با تعداد سیکل‌های کم در نظر گرفته شده است. در این مطالعه نیز از این روش استفاده شده است. نقاطی که باید در این روش وارد شوند، تنش در نقاط روی نمودار شکل ۳-۲ و کرنش پلاستیک متناظر با آن می‌باشد.

$$(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$$



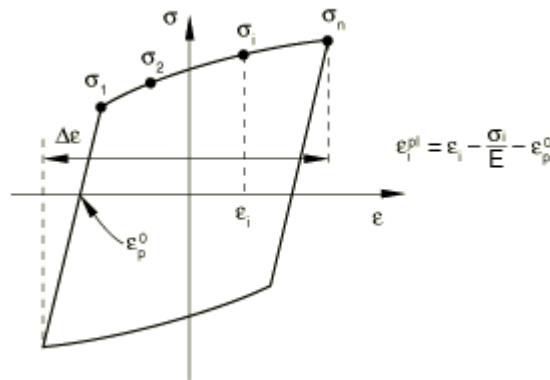
شکل ۳-۲: نقاط مورد نیاز در روش نیم سیکل [۲۸].

^۱ Combined

^۲ Half cycle

روش دوم پارامتر^۱ می‌باشد. در این روش رفتار سخت‌شوندگی ماده با پارامترهای سخت‌شوندگی مشخص می‌شود. این پارامترها شامل: γ, C و تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر می‌باشند. همچنین با استفاده از گزینه تعداد تنش زمینه^۲ می‌توان تعداد آن را افزایش داد و از چند جفت γ, C در صورت وجود استفاده نمود و در نهایت روش سوم، روش پایا^۳ می‌باشد. در این روش برای دادن خواص سخت‌شوندگی به نرم افزار تعدادی نقاط از منحنی پایا تنش کرنش سیکلی استخراج شده و به نرم افزار داده می‌شود. نقاط مورد نظر $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$ می‌باشند. برای بدست آوردن این نقاط از رابطه (۱-۳) و نمودار شکل ۳-۳ استفاده می‌کنیم:

$$\varepsilon_i^{pl} = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p \quad (1-3)$$



شکل ۳-۳: نقاط مورد نیاز در روش استیبلاز [۲۸].

علاوه بر این داده‌ها در قسمت ساب آپشن^۴ نیز باید اطلاعاتی در قسمت سخت‌شوندگی سیکلی^۵ داده شود. این قسمت مربوط به خواص ایزوتروپیک ماده می‌شود. برای وارد کردن این داده‌ها نیز دو روش وجود دارد: روش اول استفاده از پارامترهای b, Q_∞ و تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر

^۱ Parameters

^۲ Number of back-stress

^۳ Stabilized

^۴ Suboptions

^۵ cyclic hardening

می‌باشد و روش دوم استفاده از نمودار سیکلی تنش-کرنش می‌باشد. نقاط مورد نظر در این روش

$(\dot{\sigma}_i, \bar{\varepsilon}_i^{pl})$ هستند. که از رابطه (۲-۳) بدست می‌آید.

$$\dot{\sigma}_i = \sigma_i^t - \alpha_i \quad (۲-۳)$$

α_i که معرف تنش زمینه می‌باشد از رابطه (۳-۳) بدست می‌آید که می‌توان به صورت تقریبی برابر

رابطه (۴-۳) در نظر گرفت.

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2} \quad (۳-۳)$$

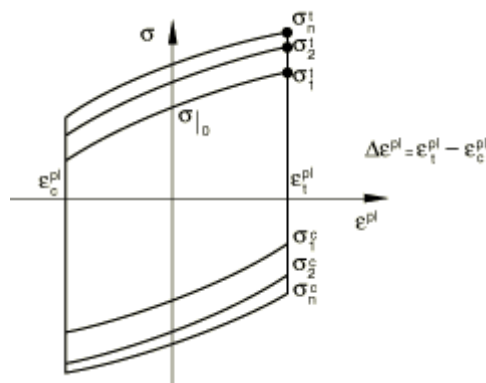
$$\alpha_i = \frac{\sigma_1^t - \sigma_1^c}{2} \quad (۴-۳)$$

مقدار $\bar{\varepsilon}_i^{pl}$ از رابطه (۵-۳) بدست می‌آید و $\Delta\varepsilon$ برابر بازه کرنش در نمودار سیکلی تنش-کرنش

می‌باشد. نمونه ای از این نمودار در شکل ۴-۳ آورده شده است [۲۸].

$$\bar{\varepsilon}_i^{pl} = \frac{1}{2}(4i - 3)\Delta\varepsilon^{pl} \quad (۵-۳)$$

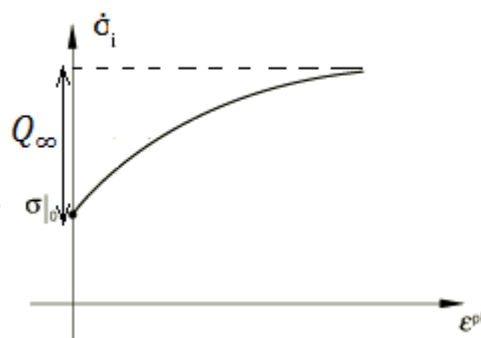
$$\Delta\varepsilon^{pl} = \Delta\varepsilon - 2\frac{\sigma_1^t}{E} \quad (۶-۳)$$



شکل ۴-۳: نقاط مورد نیاز برای سخت‌شوندگی سیکلی در روش ترکیبی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک [۲۸].

نقاط بدست آمده را می‌توان به نرم افزار داد و یا می‌توان آن‌ها را رسم کرده تا نموداری مشابه

نمودار شکل ۳-۵ بدست آید:



شکل ۳-۵: بدست آوردن پارامترهای سخت‌شوندگی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار Q_∞ را می‌توان از نمودار شکل ۳-۵ بدست آورد. برای بدست آوردن مقدار b نیز می‌توان با استفاده رابطه (۳-۷) که به معادله چابوچه معروف است و نوشتن یک کد ساده در نرم افزار متلب^۱ و به روش فیت کردن و سعی و خطا بدست آورد.

$$\sigma = \sigma|_0 + Q_\infty (1 - e^{-b\bar{\epsilon}^{pl}}) \quad (۳-۷)$$

۳-۴ - مقایسه نتایج عددی با تجربی

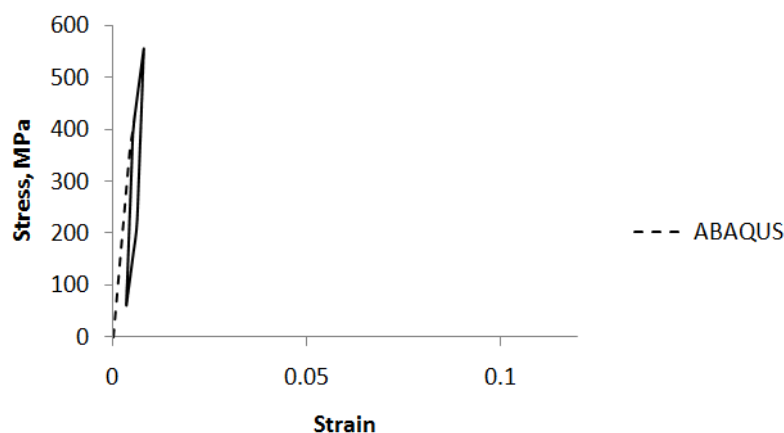
در این بخش به مقایسه نتایج تجربی و عددی توسط نرم افزار آباکوس ورژن ۶،۱۰ می‌پردازیم. نتایج عددی تنها برای جنس SS316 برای دو حالت بارگذاری تنش-کنترل و کرنش-کنترل بدست آمده‌اند. برای نمونه های فولاد CK45، به دلیل عدم تقارن تنش در ناحیه کششی و فشاری حلقه های هیستریزس حل عددی انجام نشده است. قابل توجه است که، برای فولادهایی با خاصیت ذکر شده

^۱ MATLAB

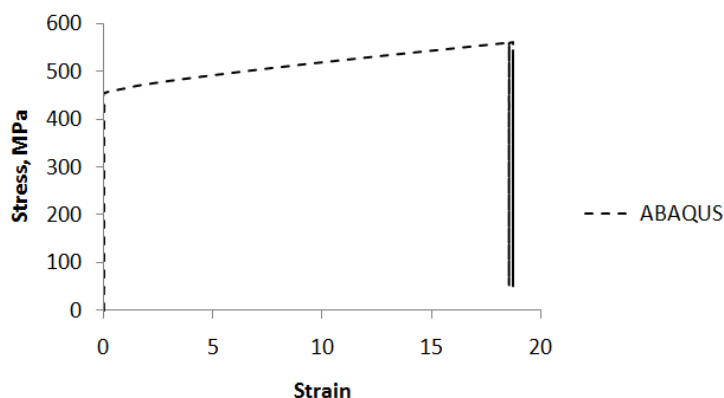
مانند فولاد CK45، نمی‌توان از روش‌های بکار برده شده در این مطالعه، برای بررسی عددی نمونه‌ها، استفاده کرد.

۳-۴-۱- مقایسه نتایج تحت بارگذاری تنش-کنترل

از مدل‌های سخت‌شوندگی موجود در نرم افزار آباکوس تنها مدلی که می‌تواند رفتار رچتینگ قطعه مورد نظر را به درستی شبیه سازی کند، مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک است. دو مدل سخت‌شوندگی دیگر یعنی ایزوتروپیک و سینماتیک خطی به تنهایی نمی‌توانند رفتار رچتینگ را به درستی شبیه سازی کنند و یک حلقه بسته بدون رچتینگ را شبیه سازی می‌کنند. شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ نمودارهای تنش کرنش برای این دو مدل سخت‌شوندگی در حالت بارگذاری تنش-کنترل برای تنش میانگین ۳۰۰ MPa و دامنه تنش ۲۵۰ MPa را نشان می‌دهد.

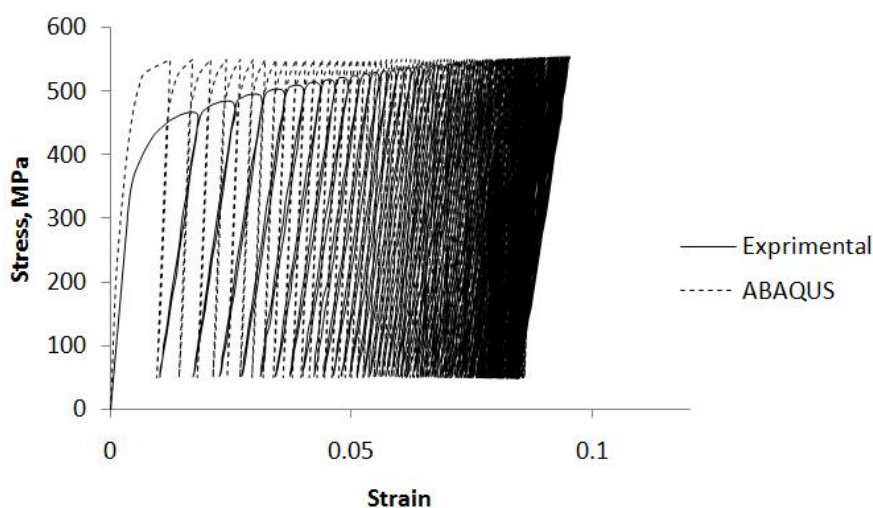


شکل ۳-۶: ایجاد حلقه بسته در بارگذاری تنش-کنترل با مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی برای نمونه های SS316



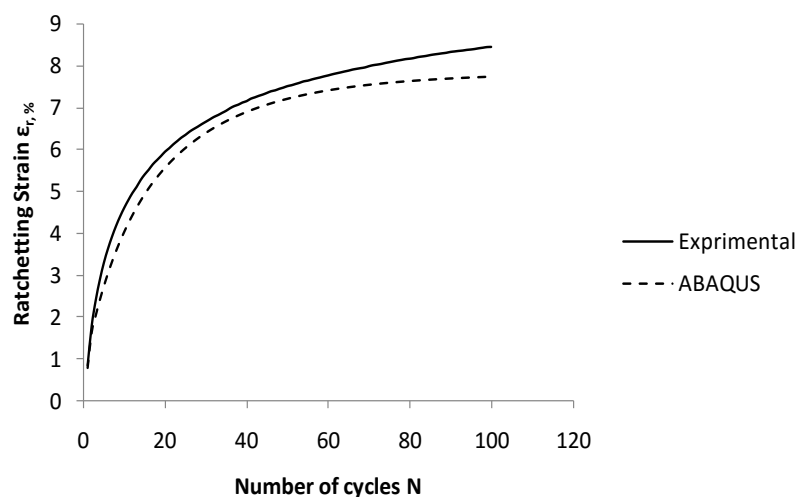
شکل ۳-۷: نمودار تنش- کرنش در حالت تنش-کنترل با مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک برای نمونه های SS316

شکل ۳-۸ به مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودار تنش-کرنش برای ۱۰۰ سیکل اول و بارگذاری نامتقارن با تنش میانگین 300 MPa و دامنه تنش 250 MPa می‌پردازد. در اینجا از مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی انطباق خوبی بر نتایج تجربی دارند و نتایج عددی نیز رفتار رجتینگ را به خوبی نشان می‌دهند.

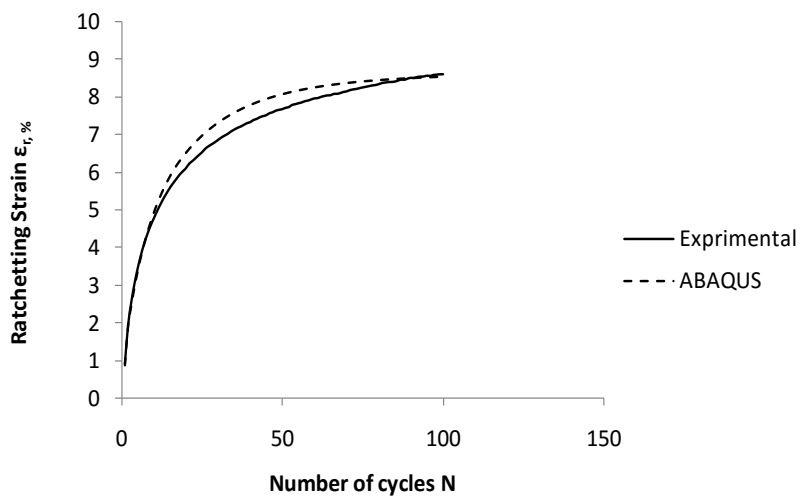


شکل ۳-۸: مقایسه نتایج تنش-کرنش تجربی و عددی برای بارگذاری نامتقارن با تنش میانگین 300 MPa و دامنه تنش 250 MPa

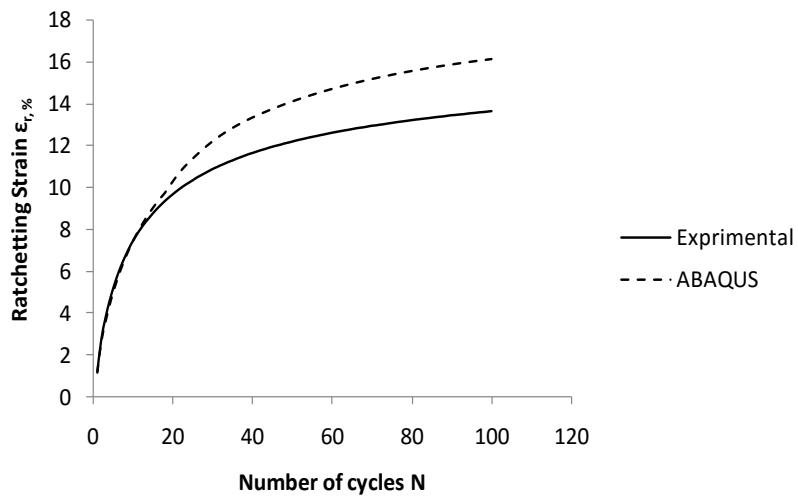
شکل ۹-۳ تا شکل ۱۲-۳ به مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای ۱۰۰ سیکل ابتدایی می‌پردازند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شکل ۹-۳، شکل ۱۰-۳ و شکل ۱۱-۳ نتایج تجربی و عددی انطباق خوبی از خود نشان می‌دهند و برای بارگذاری با تنش میانگین 310 MPa و دامنه تنش 280 MPa کرنش رچتینگ عددی اندکی از کرنش رچتینگ آزمایشگاهی بیشتر است. اما در شکل ۱۲-۳ کرنش رچتینگ عددی فاصله بیشتری از مقدار آزمایشگاهی آن گرفته است. دلیل آن را در رفتار خاص ماده باید دانست که کرنش رچتینگ آن از یک مقدار دامنه تنش معین به بالا افزایش نمی‌یابد و حتی در سیکل‌های ابتدایی مقداری کاهش نیز می‌یابد. نرم افزار آباکوس این رفتار خاص را نتوانسته است شبیه سازی کند.



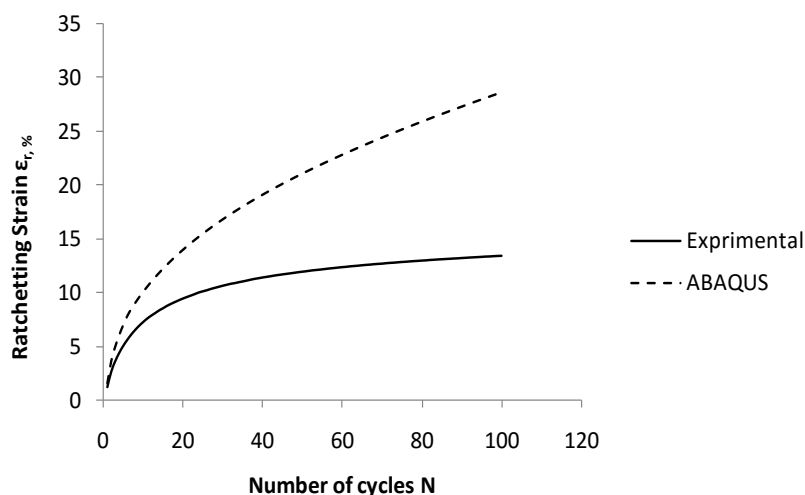
شکل ۹-۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین 280 MPa و دامنه تنش 250 MPa



شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین 300MPa و دامنه تنش 250MPa



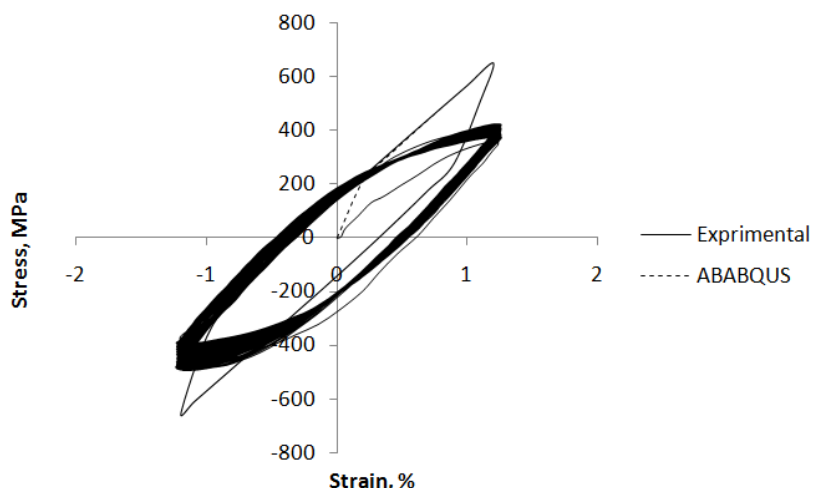
شکل ۳-۱۱: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین 310MPa و دامنه تنش 280MPa



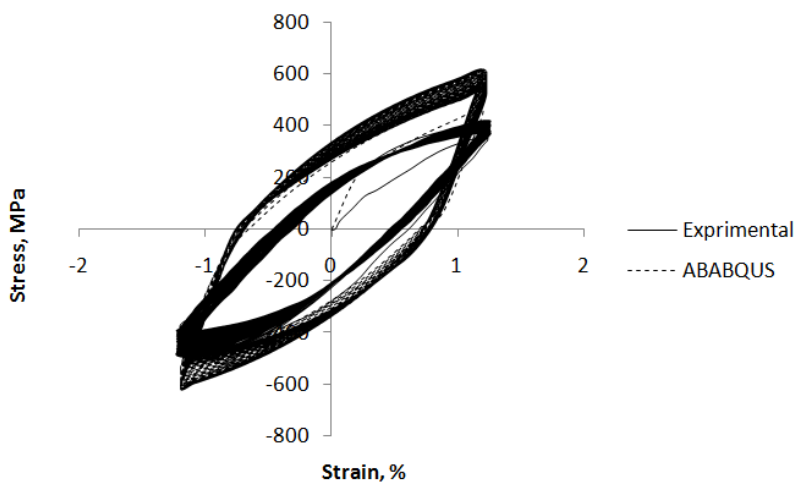
شکل ۳-۱۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی کرنش رچتینگ برای بارگذاری با تنش میانگین 310MPa و دامنه تنش 310MPa

۳-۴-۲ - مقایسه نتایج تحت بارگذاری کرنش-کنترل

شکل ۳-۱۳ به مقایسه نتایج تجربی منحنی‌های هیستریزیس تحت بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری برای دامنه کرنش $1/25\%$ ، با نتایج عددی حاصل از مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی پرداخته است. به دلیل اینکه در این مدل فقط مرکز سطح تسلیم در فضای تنش انتقال می‌یابد، نتوانسته است رفتار نرم‌شوندگی نمونه‌ها را شبیه سازی کند. در مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک علاوه بر انتقال مرکز سطح تسلیم، اندازه سطح تسلیم نیز در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می‌کند. بنا بر این، این مدل انطباق مناسبی با نتایج تجربی دارد که در شکل ۳-۱۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی با مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی

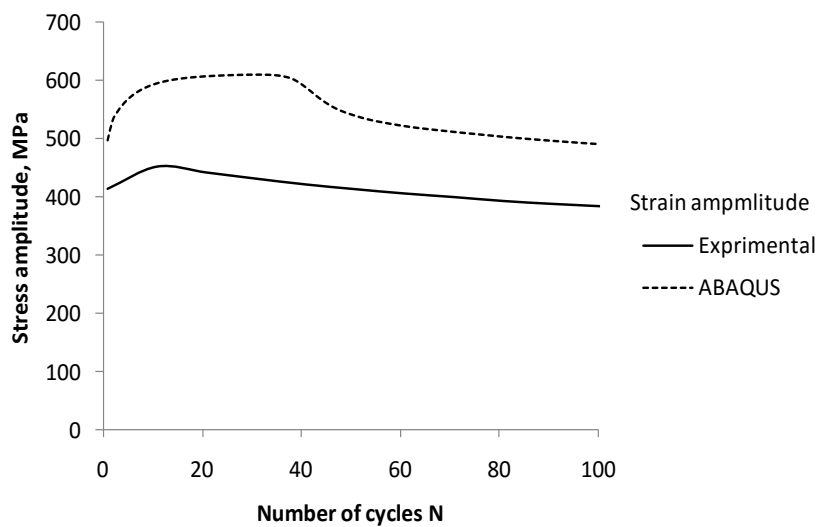


شکل ۳-۱۴: مقایسه نتایج تجربی و عددی با مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک

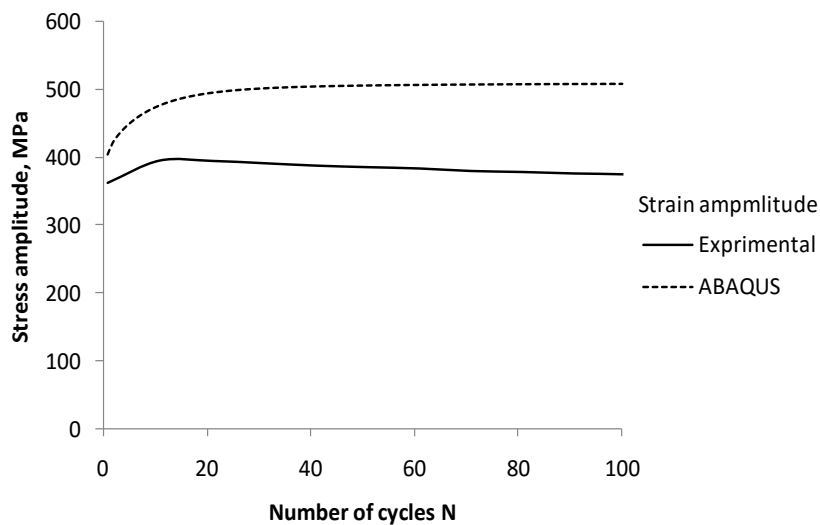
۳-۴-۲-۱- بررسی رفتار سخت‌شوندگی/نرم‌شوندگی سیکلی ماده

شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ به مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودار دامنه تنش بر حسب سیکل برای بار گذاری متقارن محوری و دامنه کرنش‌های ۰.۱/۲۵٪ و ۰.۰/۸۳٪ برای ۱۰۰ سیکل ابتدایی می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج عددی گرفته شده از نرم افزار آباکوس از دقت نسبتاً قابل قبولی برخوردار هستند و به درستی سخت‌شوندگی ابتدایی و نرم‌شوندگی در ادامه را نشان می‌دهند. مقدار

دامنه تنش در نتایج عددی از نتایج تجربی بیشتر می‌باشد. مقدار خطای میانگین برای دامنه کرنش $1/25$ برابر $31/29\%$ و برای دامنه کرنش $0/83$ برابر $18/59\%$ می‌باشد. بنا بر این، می‌توان نتیجه گرفت که در دامنه کرنش‌های کمتر، دقت روش عددی بیشتر می‌باشد.



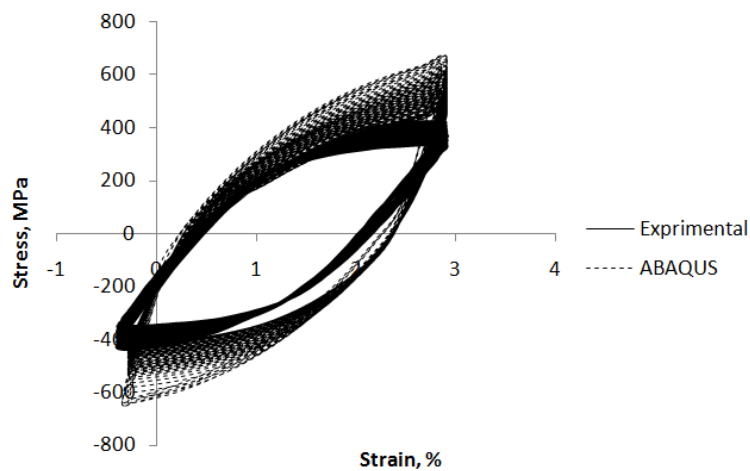
شکل ۳-۱۵: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه تنش بر حسب سیکل برای بارگذاری متقارن محوری با دامنه کرنش $1/25$



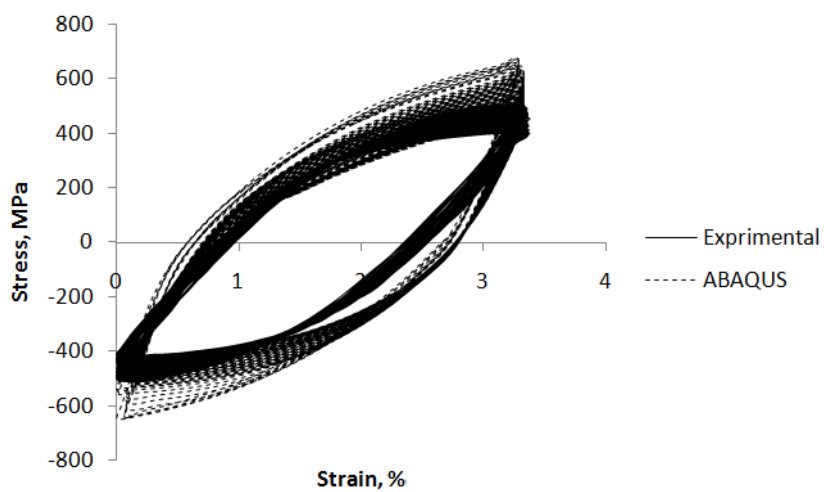
شکل ۳-۱۶: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه تنش بر حسب سیکل برای بارگذاری متقارن محوری با دامنه کرنش $0/83$

۳-۴-۲-۲- بررسی تأثیر کرنش میانگین و دامنه کرنش بر رفتار سیکلی و حلقه های هیستریزیس

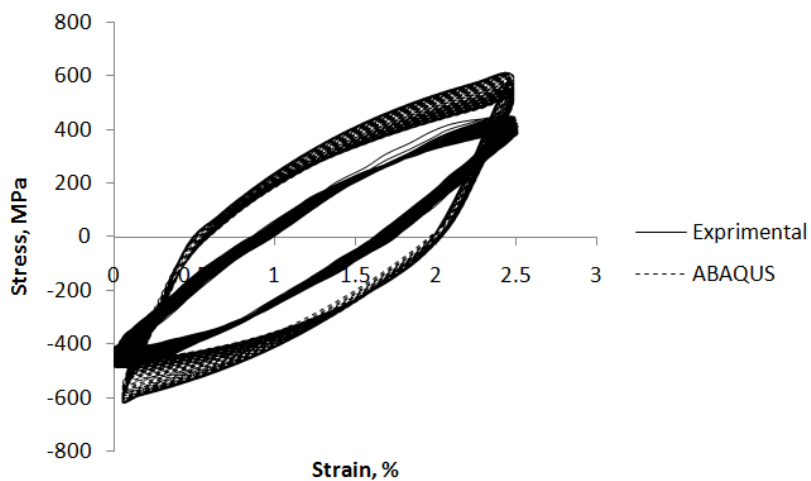
شکل‌های ۱۷-۳ تا ۲۰-۳ به مقایسه منحنی‌های هیستریزیس برای سه بارگذاری نامتقارن مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج عددی از انطباق خوبی بر نتایج آزمایشگاهی برخوردار است و برای دامنه کرنش‌های زیاد رفتار نرم‌شوندگی به خوبی دیده می‌شود. با کاهش حداکثر کرنش این انطباق کمتر و خطا بیشتر می‌شود.



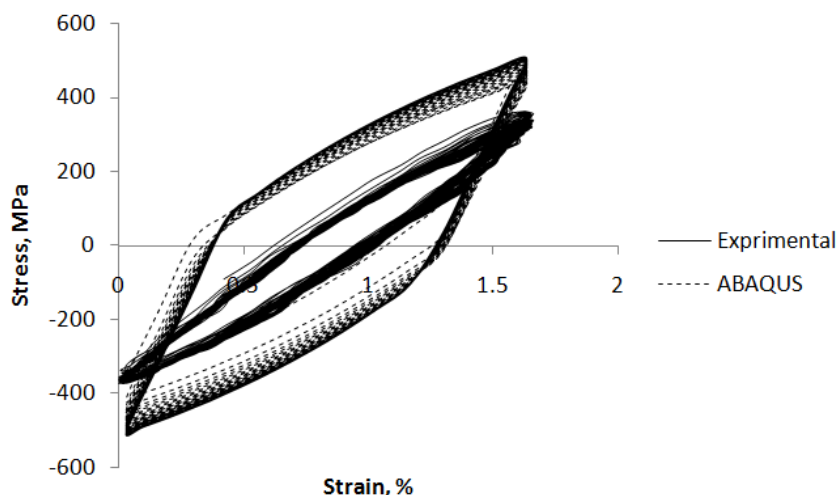
شکل ۱۷-۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای تنش میانگین ۱/۲۵٪ و دامنه کرنش ۱/۶۶٪



شکل ۳-۱۸: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۱/۶۶٪

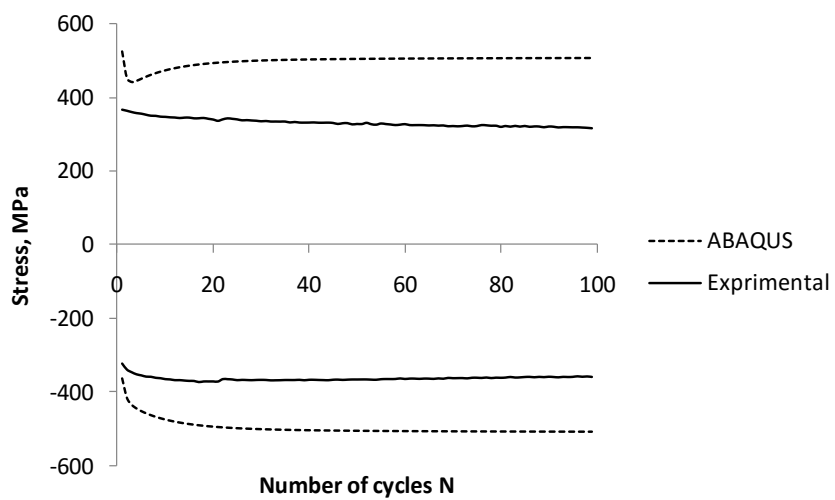


شکل ۳-۱۹: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۱/۲۵٪

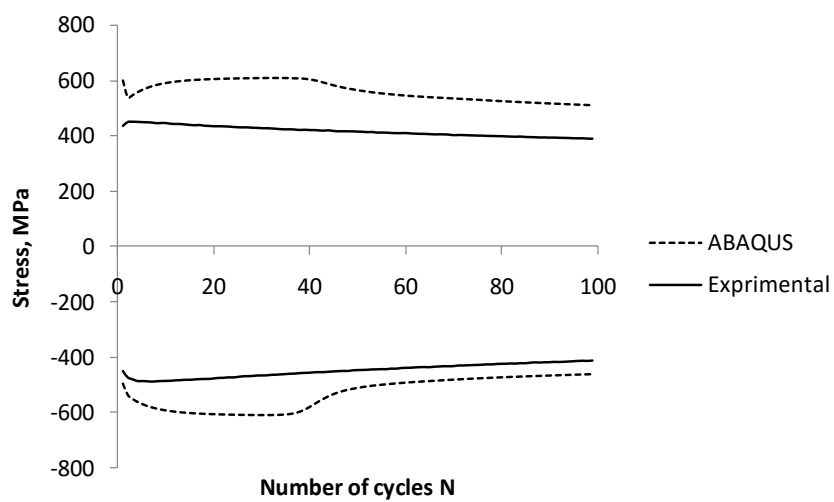


شکل ۳-۲۰: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای دامنه کرنش و کرنش متوسط ۰/۸۳٪

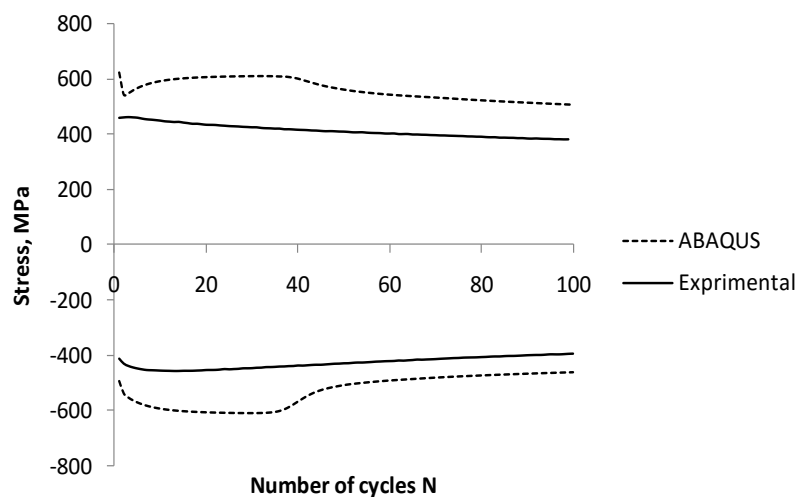
شکل‌های ۳-۲۱ تا ۳-۲۴ به مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای ۱۰۰ سیکل اول می‌پردازند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علاوه بر انطباق نسبتاً قابل قبول نتایج عددی بر نتایج آزمایشگاهی نرم افزار آباکوس توانسته است به درستی رفتار نرم‌شوندگی و یا سخت‌شوندگی را شبیه‌سازی کند. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که بیشترین انطباق برای بارگذاری با حداکثر کرنش اتفاق افتاده است. به صورتی که بیشترین خطا مربوط به دامنه کرنش و کرنش میانگین ۰/۸۳٪، برابر ۵۱/۳۹٪ و کمترین خطا مربوط به دامنه کرنش و کرنش میانگین ۱/۶۶٪، برابر ۱۹/۴۷٪ می‌باشد.



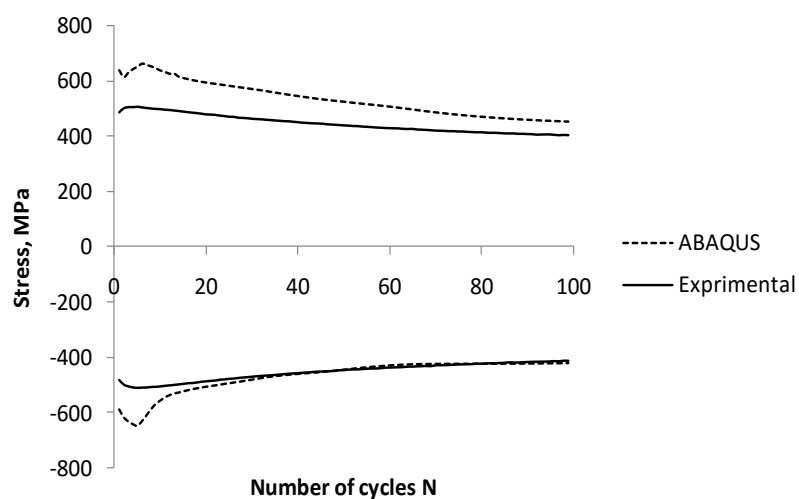
شکل ۳-۲۱: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۰/۸۳٪



شکل ۳-۲۲: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۰/۲۵٪



شکل ۳-۲۳: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۱/۲۵٪



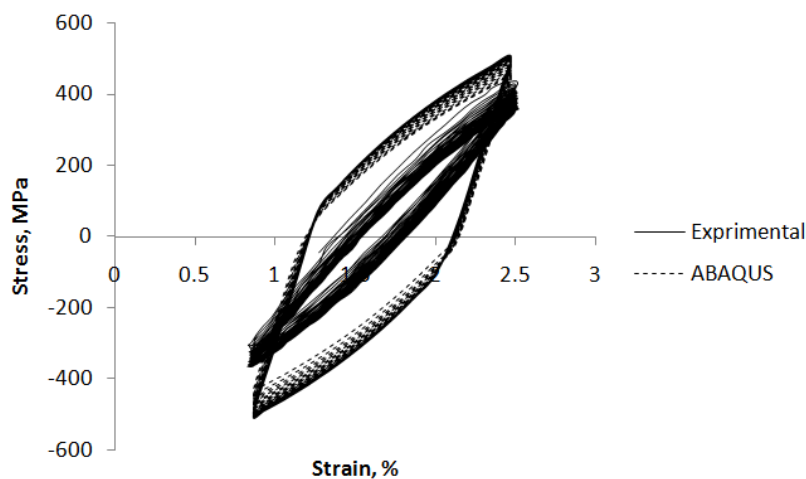
شکل ۳-۲۴: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای دامنه کرنش و کرنش میانگین ۱/۶۶٪

۳-۴-۲-۳- بررسی رفتارها سازی در بارگذاری نا متقارن

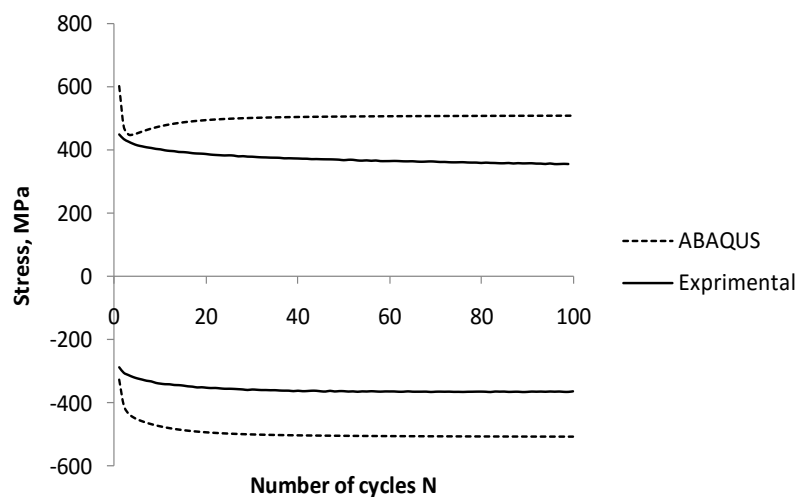
شکل ۳-۲۵ به مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای تنش میانگین ۱/۶۶٪ و

دامنه کرنش ۰/۸۳٪ می‌پردازد. به دلیل نسبت مناسب دامنه کرنش به کرنش میانگین، در ۱۰۰

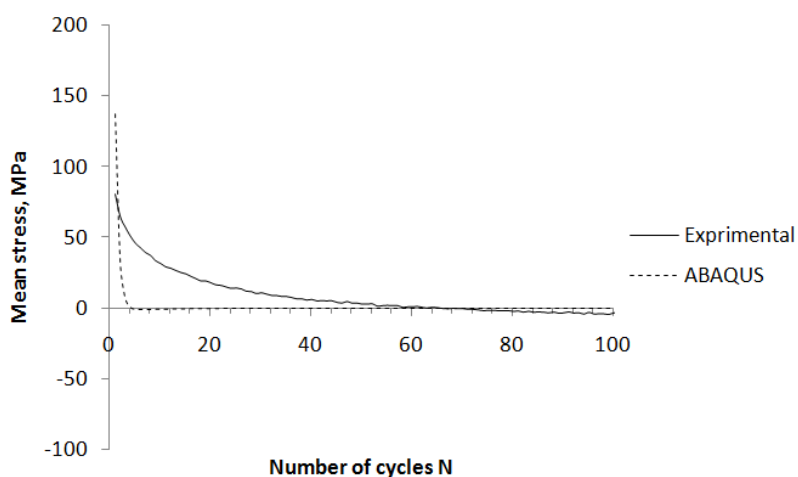
سیکل اول نتایج تجربی، شاهد رفتار رهاسازی می‌باشیم. این رفتار با انتقال حلقه‌ها به سمت پایین قابل رویت است. نرم افزار آباکوس نیز به خوبی توانسته است این رفتار را شبیه سازی کند. با دقت در نتایج عددی که با خط چین مشخص شده‌اند، انتقال حلقه های هیستریزیس به سمت پایین قابل رویت می‌باشد. برای مشخص شدن بیشتر چگونگی شبیه سازی این رفتار توسط نرم افزار آباکوس در شکل ۳-۲۶ نمودار حداکثر و حداقل تنش برای این بارگذاری آورده شده است. همان‌طور از این نمودار مشخص است، رفتار رهاسازی در نتایج تجربی به صورت ملایم و تدریجی است، اما برای نتایج عددی این رفتار سریع و با شدت زیاد در سیکل‌های ابتدایی اتفاق می‌افتد. همچنین شکل ۳-۲۷ نتایج تجربی و عددی برای تغییرات تنش متوسط در هر حلقه هیستریزیس نسبت به تعداد چرخه‌ها برای ۱۰۰ سیکل ابتدایی را نشان می‌دهد. رفتار رهاسازی با افت تنش متوسط در نتیجه تجربی به صورت خطی و با شیب کم در طی ۱۰۰ سیکل ابتدایی اتفاق می‌افتد، اما در نتایج عددی این رفتار به صورت غیر خطی و با شیب خیلی زیاد در چند سیکل اول مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۵: مقایسه نتایج تجربی و عددی منحنی‌های هیستریزیس برای تنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۰/۸۳٪



شکل ۳-۲۶: مقایسه نتایج تجربی و عددی حداکثر و حداقل تنش برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۰/۸۳٪

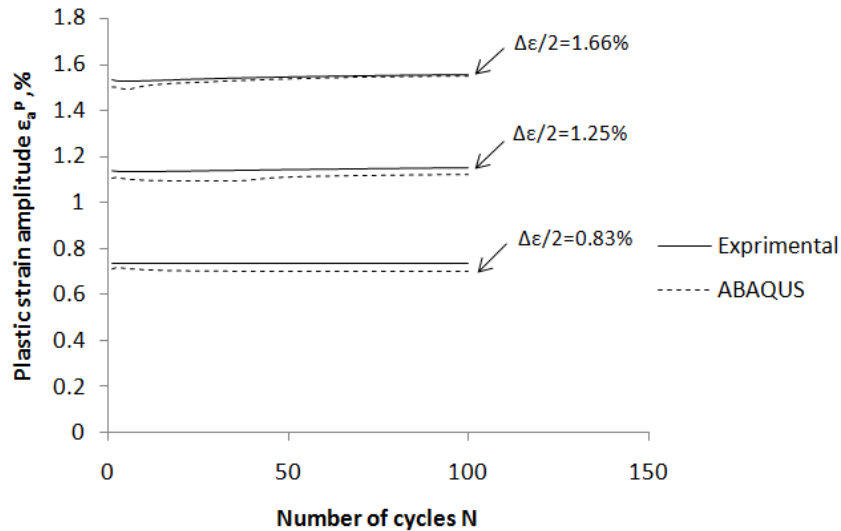


شکل ۳-۲۷: مقایسه نتایج تجربی و عددی تغییرات تنش متوسط نسبت به سیکل برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪ و دامنه کرنش ۰/۸۳٪

۳-۴-۲-۴- بررسی دامنه کرنش پلاستیک بوجود آمده در دامنه کرنش‌های مختلف

شکل ۳-۲۸ دامنه کرنش پلاستیک بوجود آمده در دامنه کرنش‌های مختلف و کرنش میانگین ثابت برای ۱۰۰ سیکل اول نتایج عددی و تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید نتایج

عددی از دقت خوبی برخوردارند و در هر سه دامنه کرنش، دامنه کرنش پلاستیک را به مقدار بسیار کمی از نتایج تجربی کمتر نشان می‌دهند.



شکل ۳-۲۸: مقایسه نتایج تجربی و عددی دامنه کرنش پلاستیک بر حسب سیکل برای کرنش میانگین ۱/۶۶٪.

۳-۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج عددی بدست آمده از شبیه سازی‌های انجام شده توسط نرم افزار آباکوس و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی، نتایج زیر بدست آمده‌اند:

۱. برای شبیه سازی رفتار رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی سیکلی نمونه های SS316 تنها می‌توان از مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده نمود. زیرا در این مدل علاوه بر انتقال مرکز سطح تسلیم، اندازه سطح تسلیم نیز در فضای تنش به طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر می‌کند. دو مدل سخت‌شوندگی موجود دیگر یعنی مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک خطی نمی‌توانند رفتار رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی سیکلی را شبیه سازی کنند. دلیل آن اینست که در مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک تنها اندازه سطح

تسلیم تغییر می‌کند و در مدل سخت‌شوندگی سینماتیک خطی تنها مرکز سطح تسلیم انتقال می‌یابد.

۲. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری، با افزایش دامنه تنش از دقت نتایج عددی کاسته می‌شود. که دلیل آن را در رفتار خاص ماده باید دانست که کرنش رجتینگ آن از یک مقدار دامنه تنش معین به بالا افزایش نمی‌یابد و حتی در سیکل‌های ابتدایی مقداری کاهش نیز می‌یابد و نرم افزار آباکوس این رفتار خاص را نتوانسته است شبیه سازی کند.

۳. در بارگذاری کرنش-کنترل، نرم افزار آباکوس به خوبی توانسته است رفتار نرم‌شوندگی را با تقریب خوبی شبیه سازی کند. در اینجا انطباق بیشتری بین نتایج تجربی و عددی در بارگذاری‌ها با حداکثر بار بیشتر دیده می‌شود.

۴. در بارگذاری کرنش-کنترل نامتقارن محوری، نرم افزار آباکوس نتوانسته است رفتار رها سازی را شبیه سازی کند. با این تفاوت که رها سازی در نتایج عددی به صورت یک مرتبه ای یعنی با شیب بسیار زیاد و در طی تعداد سیکل کم اتفاق می‌افتد؛ اما در نتایج تجربی این رفتار با شیب کمتر و در طی تعداد سیکل بیشتری اتفاق می‌افتد.

۵. در بارگذاری کرنش-کنترل نامتقارن محوری، نتایج عددی برای پیش بینی مقدار دامنه کرنش پلاستیک از انطباق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است.

فصل ۴ - نتیجه گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی دو جنس SS316 و CK45 و همچنین نتایج عددی بدست آمده توسط نرم افزار آباکوس برای جنس SS316 می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

۱. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله اول بارگذاری یعنی مرحله پیش رچتینگ، در نمونه‌ها پدیده رچتینگ ایجاد می‌شود. میزان کرنش رچتینگ ایجاد شده به دامنه تنش، تنش میانگین بستگی دارد. برای هر دو نمونه های SS316 و CK45 کرنش رچتینگ برای اکثر موارد با افزایش دامنه تنش و تنش میانگین، افزایش می‌یابد و تأثیر دامنه تنش از تنش میانگین بیشتر است.

۲. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله اول بارگذاری یعنی مرحله پیش رچتینگ، تأثیر نسبت تنش بر روی کرنش رچتینگ برای بازه مورد نظر از نسبت تنش‌ها و حداکثر تنش‌های معین، روال مشخصی ندارد.

۳. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های CK45 مشخص شد که هر چه دامنه تنش پیش رچتینگ بیشتر باشد عمر خستگی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. تأثیر تنش میانگین بر عمر خستگی اندک و محدود به تنش میانگین مشخص می‌باشد.

۴. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های SS316 مشخص شد که هر چه دامنه تنش پیش رچتینگ بیشتر باشد، عمر خستگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که این نتیجه بر خلاف نتیجه بدست آمده برای نمونه های CK45 می‌باشد. دلیل افزایش عمر، ایجاد پدیده اضافه بار می‌باشد. با کاهش

تنش میانگین به مقدار کمی عمر خستگی افزایش می‌یابد که دلیل آن تأثیر عامل پدیده رچتینگ در پیش رچتینگ می‌باشد. اما از تنش میانگین خاصی کمتر (کمتر از تنش میانگین آزمایش خستگی خالص) عمر خستگی به شدت کاهش می‌یابد که دلیل آن افت شدید اثر اضافه بار می‌باشد.

۵. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های CK45 و SS316 مشخص شد که اگر بارگذاری آزمایش خستگی خالص به مقداری زیاد باشد که باعث ایجاد کرنش رچتینگ قابل ملاحظه ای در این مرحله شود، نمونه‌ها تحت تأثیر پدیده اضافه بار قرار می‌گیرند.

۶. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری و مرحله دوم بارگذاری یعنی آزمایش خستگی، برای نمونه های CK45 مشخص شد که عمر خستگی، با کاهش تعداد سیکل پیش رچتینگ، به دلیل کم شدن عامل تأثیر رچتینگ در پیش رچتینگ، زیاد و برای نمونه های SS316 به دلیل کم شدن عامل اضافه بار کم می‌شود.

۷. در بارگذاری کرنش-کنترل متقارن محوری، برای نمونه های CK45 برای دامنه کرنش‌های کوچک رفتار کاملاً نرم‌شوندگی و برای دامنه کرنش‌های بزرگ رفتار سیکلی ترکیبی از نرم‌شوندگی و سخت‌شوندگی می‌باشد. و برای نمونه های SS316 برای تعداد کمی سیکل (تقریباً ۱۵ سیکل) به صورت سخت‌شونده با شیب زیاد است و سپس شروع به رفتار نرم‌شونده می‌کند. با افزایش دامنه کرنش شیب نرم‌شوندگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین کرنش میانگین بر رفتار سیکلی دو نمونه مورد آزمایش تأثیری نداشته است.

۸. در بارگذاری کرنش-کنترل نامتقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 وجود کرنش میانگین باعث ایجاد تنش میانگین در طول آزمایش می‌شود که کم شدن این تنش میانگین باعث ایجاد رفتار رها سازی در نمونه‌ها می‌شود. این رفتار در نمونه های SS316 با کاهش دامنه کرنش به خوبی دیده می‌شود. در نمونه های CK45 به علت عدم تقارن تنش در

ناحیه فشاری و کششی و یا به عبارتی دیگر تحمل بیشتر بار در ناحیه فشاری رفتار رها سازی به خوبی دیده نمی‌شود.

۹. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 افزایش دامنه کرنش باعث کاهش شدید عمر خستگی می‌شود و افزایش کرنش میانگین به میزان بسیار کمی باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که عمر خستگی به مقدار زیادی متأثر از دامنه کرنش می‌باشد و کرنش میانگین تقریباً بر روی آن بی تأثیر است.

۱۰. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های CK45 و SS316 مشخص شد که عمر خستگی نمونه‌ها در ارتباط مستقیم با دامنه کرنش پلاستیک است. به گونه ای که با افزایش دامنه کرنش پلاستیک، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۱۱. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، برای نمونه های SS316 رابطه ارائه شده به وسیله معیار انرژی کل، جهت پیش بینی عمر خستگی، از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشد و برای نمونه های CK45 رابطه بر اساس انرژی میانگین دارای بیشترین دقت می‌باشد.

۱۲. برای شبیه سازی رفتار رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی سیکلی نمونه های SS316 تنها می‌توان از مدل سخت‌شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده نمود.

۱۳. در بارگذاری تنش-کنترل نامتقارن محوری، با افزایش دامنه تنش از دقت نتایج عددی کاسته می‌شود. که دلیل آن را در رفتار خاص ماده باید دانست که کرنش رچتینگ آن از یک مقدار دامنه تنش معین به بالا افزایش نمی‌یابد و حتی در سیکل‌های ابتدایی مقداری کاهش نیز می‌یابد و نرم افزار آباکوس این رفتار خاص را نتوانسته است شبیه سازی کند.

۱۴. در بارگذاری کرنش-کنترل، نرم افزار آباکوس به خوبی توانسته است رفتار نرم‌شوندگی را با تقریب خوبی شبیه سازی کند. در اینجا انطباق بیشتری بین نتایج تجربی و عددی در بارگذاری‌ها با حداکثر بار بیشتر دیده می‌شود.

۱۵. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، نرم افزار آباکوس توانسته است رفتار رها سازی را شبیه سازی کند. با این تفاوت که رها سازی در نتایج عددی به صورت یک مرتبه ای یعنی با شیب بسیار زیاد و در طی تعداد سیکل کم اتفاق می افتد اما در نتایج تجربی این رفتار با شیب کمتر و در طی تعداد سیکل بیشتری اتفاق می افتد.

۱۶. در بارگذاری کرنش-کنترل نا متقارن محوری، نتایج عددی برای پیش بینی مقدار دامنه کرنش پلاستیک از انطباق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است.

۲-۴- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌های تجربی متعدد و بارگذاری‌های گوناگونی که بر روی نمونه‌های آزمایش از دو جنس مختلف انجام گردیده است و همچنین با توجه به مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی بدست آمده از نرم افزار آباکوس، پیشنهادات زیر جهت تحقیق و مطالعه بیشتر در این زمینه ارائه می‌گردند:

۱. در صورت وجود امکانات و بهره‌مندی از سری جدید تر دستگاه‌های آزمایش خستگی اینسترون، می‌توان نمونه‌ها را تحت بارگذاری چند محوره به صورت ترکیبی از بارگذاری محوی کششی- فشاری و بارگذاری پیچشی با تعریف مسیرهای مختلف، قرار داد.

۲. تا کنون حل‌های تحلیلی بسیار کم و محدودی برای پیش بینی عمر خستگی نمونه‌های پیش رچتینگ شده و همچنین تأثیر رچتینگ بر عمر خستگی نمونه‌ها، ارائه شده است و حل‌های تحلیلی موجود تنها برای جنس‌های مشخصی ارائه شده‌اند. می‌توان ارائه روش‌های حل تحلیلی برای دو جنس مورد آزمایش در این مطالعه را به عنوان ادامه تحقیق در این زمینه پیشنهاد داد.

۳. بالاتر بردن دقت تراشکاری و صافی سطح با استفاده از عملیات سنگ زنی دقیق و یا روش لپینگ^۱ (یک فرآیند سایشی، که توسط ذرات ساینده در لایه‌هایی از سیال که بین ابزار

^۱ Lapping

لپینگ و قطعه کار قرار می‌گیرد) که می‌تواند به از بین بردن نقص‌های بسیار ریز در حد میکرون و همچنین یکدستی نمونه‌ها کمک کند. البته این امر مستلزم هزینه بسیار زیاد جهت تهیه نمونه‌های آزمایش می‌باشد.

۴. می‌توان تأثیر فرکانس بارگذاری و همچنین تأثیر دما بر روند آزمایش را در بارگذاری چرخه ای مورد مطالعه قرار داد.

۵. از آنجایی که رفتار سیکلی در نیم سیکل بارگذاری و رفتار کششی ساده در آزمایش‌های تجربی برای مواد فرق دارد. برای بهبود بخشیدن دقت آزمایش‌های تجربی تحت بارگذاری چرخه ای و ایجاد رفتار سیکلی مناسب در سیکل‌های ابتدایی می‌توان ابتدا قطعات را تحت بارگذاری با میزان بار بسیار پایین قرار داد تا خستگی بر روی آن اثر نداشته باشد سپس با افزایش بار، به مقدار بارگذاری مشخص شده در چیدمان آزمایش رسید تا رفتار ماده از ابتدا به صورت سیکلی بدون خطا باشد. این امر مستلزم توانایی برنامه ریزی شدن دستگاه جهت تغییر بارگذاری به صورت خودکار می‌باشد.

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

۷. می‌توان با لینک کردن نرم افزار متلب و نرم افزار آباکوس و همچنین نوشتن سابروتین^۱ برای نرم افزار آباکوس سعی در بالا بردن دقت حل‌های عددی نمود.

^۱ Subroutine

فهرست مراجع

- [1] Raducanu Razvan., (2009), " Some remarks on the history of fracture mechanics", *3RD Internatioanl conference on applied mathematics, simulation, modeling (ASM'09), Athens, Greece.*
- [2] Gang Tao, Zihui Xia., (2007), "Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life" , *Polymer Testing ,n. 26, pp. 451–460.*
- [3] Syed M. Rahman, Tasnim Hassan,Edmundo Corona., (2008), " Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure" , *International Journal of Plasticity, n. 24, pp. 1756–1791.*
- [4] Araújo M., (1998), Master of Science thesis, "Non-Linear Kinematic Hardening Model for Multiaxial Cyclic Plasticity, The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- [5] Xia Z., Kujawski D. and Ellyin F, Zhao Li., (1996), "Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel", *International Journal of Fatigue, Vol. 18, No, 5, pp. 335-341.*
- [6] S. Sivaprasad, Surajit K Paul, S. Tarafder, Suneel K Gupta, Vivek Bhasin., (2011), "Cyclic plastic deformation behaviour of PHT piping materials-An experimental investigation", *Transactions, SMiRT 21, New Delhi, India.*
- [7] Shariati M., Hatami H., (2011), "An Experimental Study on the Ratcheting and Fatigue Behavior of Polyacetal Under Uniaxial Cyclic Loading", *Materials and Design, Vol. 34, pp. 302-312.*
- [8] Shariati M., Hatami H., (2012), "Experimental and Numerical Investigations on the Ratcheting Characteristics of Cylindrical Shell Under Cyclic Axial Loading", *Structural Engineering and Mechanics, Vol. 44, pp. 753-762.*
- [9] Autrusson B, Acker D, Hakeh N., (1991), " Fatigue-ratchetting interaction" , *International Conférence on Structural Mechanics in Reactor Technology, P18-23, Tokyo, Japan.*
- [10] Guozheng Kang, Yujie Liu, Zhao Li., (2006), " Experimental study on ratchetting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing" , *Materials Science and Engineering A 435–436.*
- [11] Guozheng Kang, Yujie Liu., (2008), " Uniaxial ratchetting and low-cycle fatigue failure of the steel with cyclic stabilizing or softening feature", *Materials Science and Engineering A 472 pp. 258–268.*
- [12] Yujie Liu, Guozheng Kang, Qing Gao., (2008), "Stress-based fatigue failure models for uniaxial ratchetting–fatigue interaction", *International Journal of Fatigue 30, pp. 1065–1073.*

- [13] Yujie Liu, Guozheng Kang, Qing Gao., (2010), "A multiaxial stress-based fatigue failure model considering ratcheting-fatigue Interaction", *International Journal of Fatigue* 32 pp. 678–684.
- [14] Xianjie Yang., (2005), " Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading ", *International Journal of Fatigue* 27 (2005) 1124–1132.
- [15] Shingo Date, Hiroshi Ishikawa, Tomomi Otani, Yukio Takahashi., (2008), " Effect of ratcheting deformation on fatigue and creep-fatigue life of 316FR stainless steel" *Nuclear Engineering and Design* 238 pp. 336–346.
- [16] C.-B. Lim, K.S. Kim, J.B. Seong., (2009), "Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial cyclic loading with mean stress" , *International Journal of Fatigue* 31 pp. 501–507.
- [17] Hong Gao, Xu Chen., (2009), "Effect of axial ratcheting deformation on torsional low cycle fatigue life of lead-free solder Sn–3.5Ag" *International Journal of Fatigue* 31 pp. 276–283.
- [18] ASTM E466-96, (2002), "*Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*", ASTM International, USA.
- [19] Kalpakjian, Schmid., (2001), "*Manufacturing Engineering and Technology*", Prentice-Hall, ch02, pp. 19.
- [20] Ali Fatemi., (2001), " *Cyclic Deformation & e-N Approach* ", University of Toledo, ch05, pp. 30.
- [21] GJ. Halford., (1966), "The energy required for fatigue" *Journal of Materials* 1(1) pp. 3-18.
- [22] K. Colos, FA. Ellyin., (1988), "A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage" *ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 110(1) pp. 36-41.
- [23] DS. Tchankov, KV Vesselinov., (1998), "Fatigue life prediction under random loading using total hysteresis energy" *International Journal of Pressure Vessels Piping* 75 pp. 955-960.
- [24] T. Lagoda., (2001), "Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading part I: the model elaboration" *International Journal of Fatigue* 23 pp. 467-480.
- [25] JA. Abdalla, RA. Hawileh., (2009), "Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of BS 460B and BS B500B steel bars" *Materials and Design* 30 pp. 4405-4413.
- [26] LU. Yunrong, HU. Chongxiang., (2012), "Energy-based prediction of low-cycle fatigue life of high-strength structural steel" *Journal of Iron and Steel Research, International* 19(10) pp. 47-53.

[۲۷] خلخالی، ابوالفضل؛ (۱۳۸۶)، " تحلیل اجزای محدود با کمک ABAQUS"، موسسه فرهنگی هنری دیبا گران

- [28] ABAQUS Analysis User's manual, (2010), v6.10, section 20.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.

واژه نامه فارسی به انگلیسی

Modified stress-based failure model	روش زوال بر اساس تنش بهبود یافته	Overloading	اضافه بار
Relaxation	رها سازی	ABAQUS/Standard	آباکوس/استاندارد
Hold time	زمان مکث در بار گذاری	ABAQUS/Explicit	آباکوس/صریح
Isotropic hardening	سخت شوندگی ایزوتروپیک	Stabilized	پایا شده
hardening/softening	سخت شوندگی یا نرم شوندگی	Annealed	تابدیده
Implicit	ضمنی	Combined	ترکیبی
Extensometer	طول سنج	Number of back-stress	تعداد تنش زمینه
Fracture mechanic	مکانیک شکست	peak stress	تنش بیشینه
Increment	نمو	Low cycle fatigue	خستگی کم چرخه
Half cycle	نیم سیکل	Ratchetting	رچتینگ
		Stress-based failure model	روش زوال بر اساس تنش

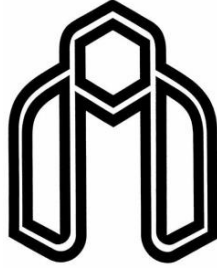
واژه نامه انگلیسی به فارسی

Isotropic hardening	سخت شوندگی ایزوتروپیک	ABAQUS/Explicit	آباکوس/صریح
Low cycle fatigue	خستگی کم چرخه	ABAQUS/Standard	آباکوس/استاندارد
Modified stress-based failure model	روش زوال بر اساس تنش بهبود یافته	Annealed	تابدیده
Number of back-stress	تعداد تنش زمینه	Combined	ترکیبی
Overloading	اضافه بار	Extensometer	طول سنج
peak stress	تنش بیشینه	Fracture mechanics	مکانیک شکست
Ratchetting	رچتینگ	Half cycle	نیم سیکل
Relaxation	رها سازی	hardening/softening	سخت شوندگی / نرم شوندگی
Stabilized	پایا شده	Hold time	زمان مکث در بار گذاری
Stress-based failure model	روش زوال بر اساس تنش	Implicit	ضمنی
		Increment	نمو

Abstract

Numerical and experimental analysis of ratchetting-fatigue interaction was investigated by uniaxial cyclic loading for stress-controlled and strain-controlled tests. The softening and relaxation behavior of specimens were also investigated in this study. Effects of many parameters on fatigue life are studied in this investigation, some of which are: stress or strain amplitude, mean stress or mean strain, stress ratio and number of pre-ratchetting cycles for two steps tests. Experimental tests were performed using an INSTRON 8802 servo-hydraulic machine. The numerical analysis was carried out by ABAQUS software using three kind of hardening models to describe plasticity: isotropic hardening, linear kinematic hardening and nonlinear isotropic/kinematic hardening and the results were compared with experimental results. Since for SS316 stainless steel specimens peak stress for pure fatigue test is relatively high, overloading influence occurs which resulting in increasing fatigue life. On the other hand, for CK45 specimens the peak stress for pure fatigue test is relatively low and only pre-ratchetting influence occurs which resulting in decreasing fatigue life. In uniaxial cyclic loading for strain-controlled condition, CK45 specimens show different cyclic behavior depend on strain amplitude and number of cycles but SS316 specimens only show softening behavior. For two kinds of specimens by increasing strain amplitude fatigue life decrease greatly. Also, for predicting fatigue life under strain-controlled tests, energy-based models were developed. In general, fatigue life of specimens is greatly depending on mean stress or mean strain and effect of stress amplitude or strain amplitude on fatigue life is very low. The non-linear isotropic/kinematic hardening model simulates the softening and ratcheting behavior of specimens accurately but the isotropic and linear kinematic hardening models can not simulate the softening and ratcheting behavior of specimens.

Keywords: Ratchetting-Fatigue Interaction, Uniaxial Cyclic Loading, Softening, Hardening Model, Overloading, Relaxation.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

***Numerical and Experimental Analysis of Ratchetting-
Fatigue Interaction of CK45 Steel in Uniaxial Cyclic Loading***
Thesis

***Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechanical Engineering, Applied Design***

By:

Hamed Mehrabi

Supervisor:

Dr. Mahmoud Shariati

Dr. Hamid Reza Epakchi

Spring 2013