http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دی ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۰ ص ص ۷۵-۸۳

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۲/۳۰
ارائه در سایت ۹۲/۷/۳۰

تحلیل تجربی تأثیر رچتینگ بر عمر خستگی فولاد Ck45 در بارگذاری چرخه‌ای تک محوری

محمود شریعتی[1*]، حامد محرابی[2]

۱- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* شاهرود، صندوق پستی ۳۱۶، mshariati@sharoodut.ac.ir

چکیده- در این مقاله به تحلیل تجربی رفتار رچتینگ و برهم کنش پدیده رچتینگ-خستگی فولاد CK45 در بارگذاری چرخه‌ای تک محوری پرداخته شده است. بارگذاری‌ها به صورت تنش-کنترل می‌باشند. آزمایش‌های تنش-کنترل به صورت دو مرحله‌ای و به منظور بررسی تأثیر کرنش رچتینگ بر عمر خستگی انجام شده‌اند. به گونه‌ای که ابتدا نمونه‌ها تحت آزمایش پیش-رچتینگ با بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرند و سپس عمر خستگی آنها با یک بارگذاری ثابت برای همه نمونه‌ها، اندازه گیری می‌شود. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهند که عمر خستگی به میزان زیادی متأثر از دامنه تنش پیش-رچتینگ می‌باشد. همچنین تأثیر تنش میانگین، اندک و محدود به یک تنش میانگین خاص می‌باشد.

کلیدواژگان: رچتینگ، خستگی، بارگذاری چرخه‌ای تک محوری، فولاد Ck45.

Experimental study of ratcheting influence on fatigue life of Ck45 in uniaxial cyclic loading

M. Shariati[1*], H. Mehrabi[2]

1- Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran
2- MSc., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran
* P.O.B. 316 Shahrood, Iran. mshariati@sharoodut.ac.ir

Abstract- In this paper, experimental analysis of ratchetting-fatigue interaction and ratcheting behavior of Ck45 steel were investigated by uniaxial cyclic loading under stress-controled tests. Stress-controled tests performed in two steps in order to evaluate ratchetting strain influence on fatigue life of specimens. First, pre-ratchetting tests were performed with various loading setups and then, their fatigue life were measured in fatigue test with a constant load for all specimens. In uniaxial cyclic loading for stress-control condition, fatigue life of specimens depends greatly on pre-ratchetting stress amplitude and influence of mean stress on fatigue life is limited to a specific mean stress.

Keywords: Ratchetting, Fatigue, Uniaxial Cyclic Loading, Ck45 steel.

۱- مقدمه

فولاد Ck45 به عنوان یک فولاد بسیار مهم و پرکاربرد به صورت گسترده در سازه های مهندسی استفاده می‌شود. این فولاد در قطعات با استحکام بالا به ویژه در خودروها و هواپیماها که در معرض بارهای چرخه‌ای قرار دارند، مانند میل لنگ، سگدست، شاتون، میل محور وسایل نقلیه، انواع شافت و چرخدنده‌های کوچک کاربرد دارد. سازه‌های مهندسی غالباً تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای قرار دارند. با ورود بارگذاری‌ها به ناحیه پلاستیک، دو پدیده رچتینگ و خستگی کم چرخه اهمیت بالایی در طراحی این سازه‌ها پیدا می‌کنند. تاکنون

مطالعات زیادی برای درک رفتار رچتینگ و خستگی مواد مختلف، توسط محققان انجام گرفته است. از جمله این مطالعات می‌توان به کارهای انجام شده توسط اوهنو [۱]، باری و حسن [۲]، عبدالکریم [۳]، کانگ و همکاران [۴]، خویی و جمالی [۵] و چابوچه [۶] اشاره کرد. همچنین مطالعات متعددی بر رفتار رچتینگ و عمر خستگی فولاد CK45 انجام شده است. از جمله آنها می‌توان به مطالعه انجام شده توسط یانگ [۷] ، که به بررسی عمر خستگی و رفتار رچتینگ این فولاد به طور جداگانه برای نمونه های استاندارد با مقطع گرد پرداخته است، اشاره کرد. این مطالعات به ارائه مدل‌های مختلف و بررسی رفتار رچتینگ پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که رفتار رچتینگ وابسته به جنس ماده می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر شریعتی و حاتمی به بررسی رفتار رچتینگ و خستگی مواد پلیمری پلی استال [۸] و همچنین رفتار رچتینگ و خستگی پوسته‌های استوانه‌ای پرداخته‌اند [۹]. تمامی این مطالعات تنها به بررسی رفتار رچتینگ و مدل‌های مختلف آن می‌پردازند و به تأثیر کرنش رچتینگ ایجاد شده در بارگذاری چرخه‌ای تنش-کنترل، بر عمر خستگی و یا به عبارت دیگر، به برهم کنش پدیده رچتینگ و خستگی پرداخته نشده است.

وجود تنش میانگین در بارگذاری تنش-کنترل چرخه‌ای می‌تواند باعث ایجاد پدیده رچتینگ شود. این پدیده بر عمر خستگی مواد تأثیر می‌گذارد. تاکنون مطالعات تجربی اندکی در این زمینه انجام شده است. زیا و همکاران به بررسی تجربی تأثیر تنش میانگین و کرنش رچتینگ بر عمر خستگی فولاد و ارائه یک راه حل تحلیلی برای پیش‌بینی عمر خستگی پرداخته‌اند [۱۰]. کانگ و همکاران به بررسی اثرات تنش میانگین، دامنه تنش و نسبت تنش بر روی کرنش رچتینگ و عمر خستگی فولاد SS304 پرداخته‌اند. مطالعه آنها نشان داد که رچتینگ ایجاد شده در بارگذاری چرخه‌ای بر عمر خستگی تأثیر منفی می‌گذارد و افزایش دامنه تنش باعث کاهش عمر خستگی می‌شود [۱۱]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر از این محققان به بررسی تأثیر رچتینگ بر روی عمر خستگی فولاد 42CrMo و تأثیر رفتار نرم‌شوندگی یا سخت‌شوندگی چرخه‌ای پرداخته شده است. این مطالعه نشان داد که رفتار سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی چرخه‌ای مواد بر اندرکنش رچتینگ- خستگی مواد در حالت بارگذاری چرخه‌ای تک محوری تأثیر دارد [۱۲]. همچنین در موارد محدودی تأثیر رچتینگ بر عمر خستگی، به صورت چند محوره بررسی شده است. گاوو و همکاران به مطالعه اثر کرنش رچتینگ محوری بر عمر خستگی پیچشی نوعی لحیم بدون سرب پرداختند. آنها با استفاده از بارگذاری‌های تنش-کنترل چند محوره دریافتند که با افزایش کرنش رچتینگ محوری عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین معادلاتی را برای بیان عمر خستگی تحت بارگذاری‌های چند محوره بیان نمودند [۱۳]. کانگ و همکاران با انجام آزمایش‌های تجربی و تعریف ضریب مسیر برای مسیر بارگذاری چند محوره، به ارائه روابطی جهت پیش‌بینی عمر خستگی در حالت بارگذاری چند محوره پرداخته‌اند [۱۴].

این مطالعات برای چند ماده خاص و عمدتاً آزمایش‌های تک مرحله‌ای انجام شده‌اند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پدیده رچتینگ بر عمر خستگی فولاد Ck45 تحت بارگذاری چرخه‌ای تک محوری در حالت تنش-کنترل و به صورت دو مرحله‌ای است.

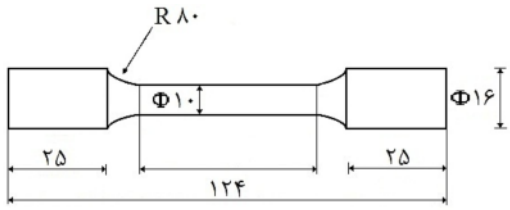
۲- هندسه و خواص مکانیکی ماده

نمونه‌های آزمایش خستگی بر اساس استاندارد ASTM E466 [۱۵] به صورت میله‌هایی با طول سنجه[1] ۳۰ mm و قطر ۱۰mm در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱). آزمایش کشش ساده نیز با استفاده از همین نمونه‌ها و به وسیله دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون[2] ۸۸۰۲ با فرکانس $0/01\ mm/s$ انجام شده که نمودار آن در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بالا بردن دقت اندازه‌گیری از طول سنج[3] در وسط نمونه‌های آزمایش استفاده شده است. همچنین خواص مکانیکی فولاد در جدول ۱ آورده شده است.

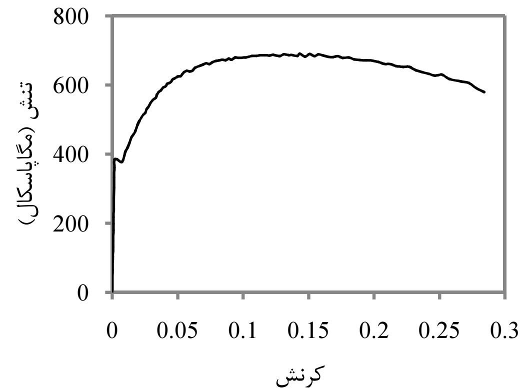
۳- آزمایش‌های تنش-کنترل

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.

1. Gauge Length
2. INSTRON
3. Extensometer



شکل ۱ ابعاد هندسی نمونه آزمون کشش و خستگی بر حسب میلی‌متر



شکل ۲ منحنی تنش- کرنش مهندسی به دست آمده از آزمایش کشش ساده برای فولاد Ck45

جدول ۱ خواص مکانیکی فولاد Ck45

خاصیت	مقدار
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۴
تنش تسلیم (MPa)	۳۸۴
تنش نهایی (MPa)	۶۹۰
ضریب پواسون	۰/۳
حداکثر ازدیاد طول نسبی (٪)	۲۸
حد دوام (MPa)	۳۱۰

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. هدف از این آزمایش‌ها در این تحقیق عبارت است از:

۱- بررسی تأثیر دامنه تنش، تنش میانگین و نسبت تنش، بر رفتار رچتینگ نمونه‌ها در ۱۰۰۰ سیکل مرحله اول آزمایش.

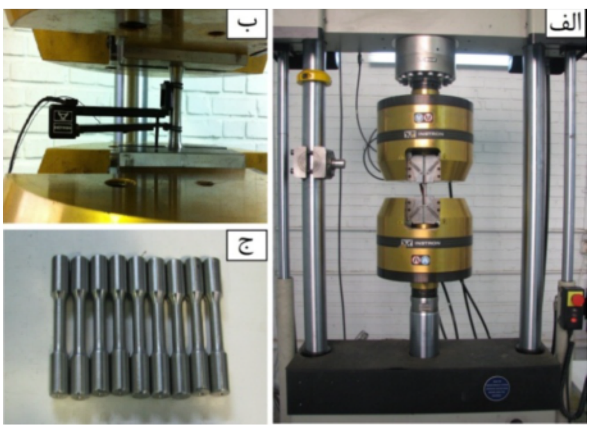
۲- مطالعه تأثیر کرنش رچتینگ بر عمر خستگی با بررسی عمر خستگی نمونه‌های پیش-رچتینگ شده، تحت بارگذاری‌های مختلف.

بارگذاری مرحله خستگی به گونه‌ای انتخاب شده است که حداکثر تنش در هر سیکل از مقدار تنش تسلیم بیشتر نشود. کلیه آزمایش‌های خستگی با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ تحت بارگذاری چرخه‌ای تک محوری انجام شده‌اند. همچنین آزمایش‌ها در حالت تنش-کنترل و با فرکانس ۱۰Hz انجام شده‌اند. نمونه‌ها و همچنین نحوه قرار گرفتن آنها در دستگاه، در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۱- بررسی رفتار رچتینگ

هدف از این بحث بررسی تجربی تأثیر سه پارامتر دامنه تنش، تنش میانگین و نسبت تنش در بارگذاری چرخه‌ای تک محوری در ۱۰۰۰ سیکل، برای نمونه‌های استاندارد Ck45 می‌باشد. به این منظور آزمایش‌هایی مطابق جدول ۲ انجام شده‌اند.

شکل 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[1] را نشان می‌دهند.



شکل ۳ الف- دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ ب- نمای نزدیک از نحوه قرار گرفتن نمونه در فک‌های دستگاه و اتصال آن به طول سنج ج- نمونه های استاندارد.

1. Plastic Shakedown

در این تحقیق، برای محاسبه کرنش رچتینگ از رابطه (۱) استفاده شده است [۱۱]:

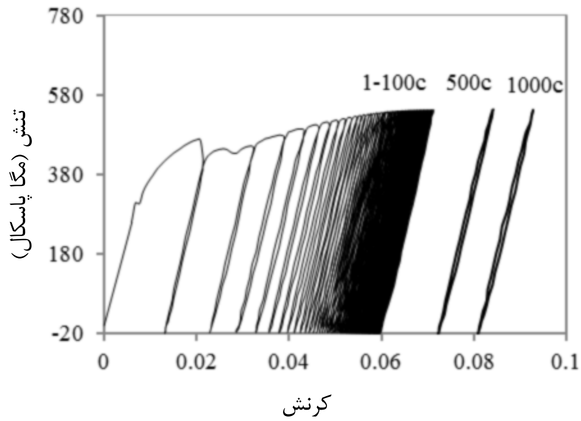
$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}\left[\ln(1+\varepsilon_{max}) + \ln(1+\varepsilon_{min})\right] \qquad (۱)$$

که در آن 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.

شکل‌های ۵ و ۶ تأثیر دامنه تنش بر کرنش رچتینگ انباشته شده در هر سیکل را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش دامنه تنش باعث افزایش کرنش رچتینگ می‌شود. البته این افزایش یکنواخت نیست. برای تنش میانگین ثابت ۲۶۰MPa (شکل ۵)، افزایش کرنش رچتینگ از دامنه تنش ۳۰۰MPa به دامنه تنش ۳۲۰MPa بسیار بیشتر از دیگر دامنه تنش‌ها می‌باشد.

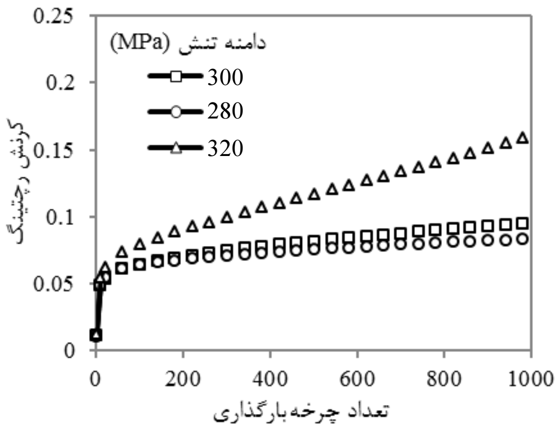
جدول ۲ مشخصه‌های آزمایش رچتینگ (تعداد چرخه ۱۰۰۰ سیکل)

شماره آزمایش	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	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
۷	۳۲۰	۲۸۰	۶۰۰	۰/۰۶۶
۸	۲۸۰	۲۸۰	۵۶۰	۰
۹	۲۸۰	۳۰۰	۵۸۰	-۰/۰۳۴

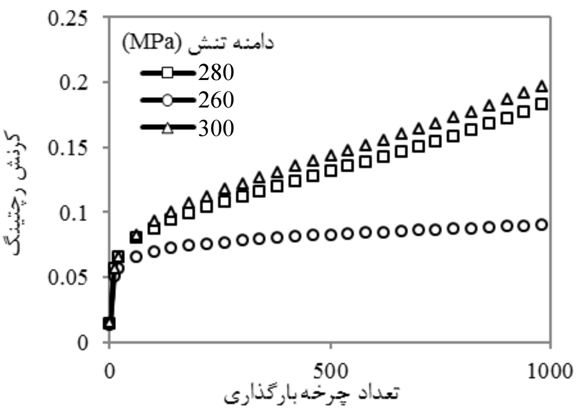


شکل ۴ رفتار رچتینگ نمونه CK45 تحت آزمایش شماره ۱

این موضوع برای تنش میانگین ثابت ۳۰۰MPa (شکل ۶) نیز صادق است ؛ به طوری که افزایش ناگهانی کرنش رچتینگ از دامنه تنش ۲۶۰MPa به دامنه تنش ۲۸۰MPa کاملاً واضح است.



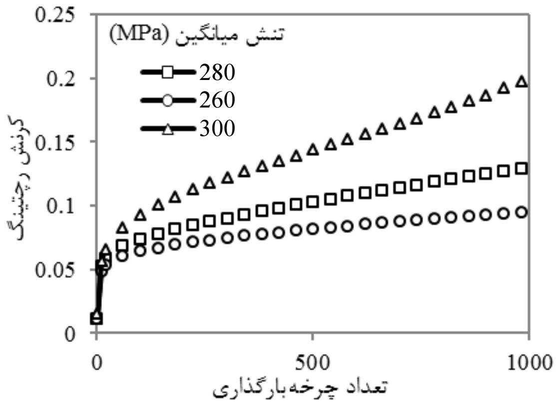
شکل ۵ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه با تنش میانگین ثابت ۲۶۰MPa



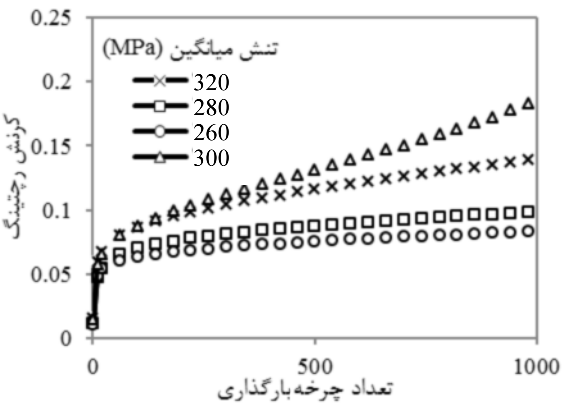
شکل ۶ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه با تنش میانگین ثابت ۳۰۰MPa

شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر تنش میانگین بر کرنش رچتینگ را نشان می‌دهند. در دامنه تنش ثابت ۳۰۰MPa (شکل ۷) مقدار کرنش رچتینگ در هر سیکل با افزایش تنش میانگین، افزایش می‌یابد اما در دامنه تنش ثابت ۲۸۰MPa (شکل ۸)، برای تنش میانگین‌های بالای ۳۰۰ MPa این روند تنها برای چند چرخه ابتدایی (تقریباً ۸۰ چرخه) صادق است.

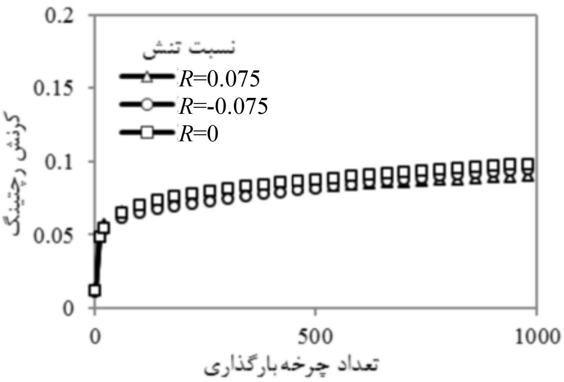
شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر نسبت تنش بر کرنش رچتینگ در نسبت تنش ثابت را نشان می‌دهند.



شکل ۷ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه با دامنه تنش ثابت ۳۰۰MPa

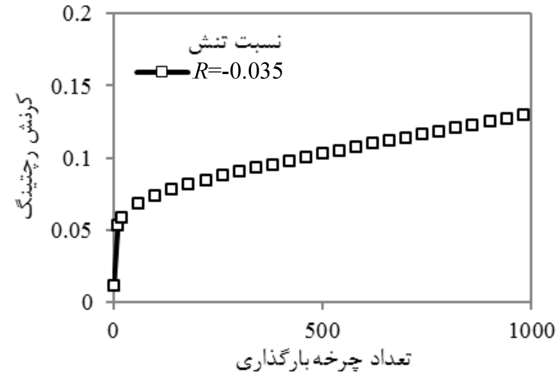


شکل ۸ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه با دامنه تنش ثابت ۲۸۰MPa



شکل ۹ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه برای تنش حداکثر ۵۶۰MPa

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات کرنش رچتینگ برای بازه نسبت تنش مشخص شده، از روند به خصوصی پیروی نمی‌کند.



شکل ۱۰ تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به تعداد چرخه برای تنش حداکثر ۵۸۰MPa

در کل می‌توان نتیجه گرفت که برای آزمایش‌های تجربی انجام گرفته، افزایش دامنه تنش یا تنش میانگین باعث افزایش کرنش رچتینگ می‌شود؛ اما تغییرات نسبت تنش در این محدوده بارگذاری، تأثیر مشخصی بر کرنش رچتینگ ندارد.

۳-۲- بررسی عمر خستگی

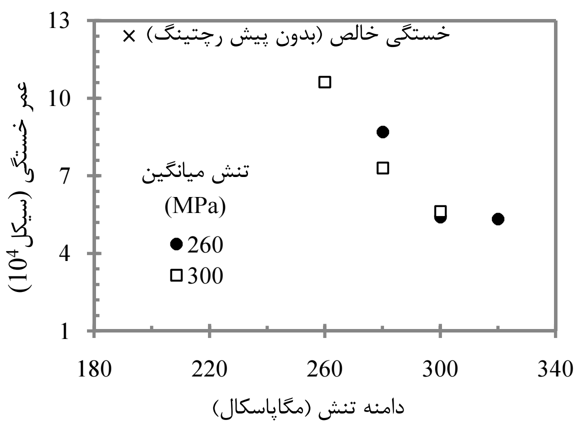
در این قسمت، عمر خستگی نمونه‌های پیش رچتینگ شده و همچنین تأثیر دامنه تنش، تنش میانگین، نسبت تنش و تعداد سیکل بارگذاری در آزمایش پیش رچتینگ، بر عمر خستگی نمونه‌ها بررسی می‌شود. جدول ۳ مشخصات مربوط به هر آزمایش و نتایج حاصله برای عمر خستگی را نشان می‌دهد. آزمایش شماره ۱ مربوط به خستگی خالص است. در این آزمایش نمونه تحت پیش رچتینگ قرار نگرفته است تا بتوان نمونه‌های پیش رچتینگ شده را با آن مقایسه نمود. همچنین جهت افزایش دقت، هر آزمایش چندین بار تکرار شده و میانگین نتایج ثبت شده است.

برای مقایسه و بررسی نتایج بدست آمده و همچنین تحلیل تأثیر پارامتر های 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، اندازه گیری می‌شود. شکل ۱۱ تأثیر دامنه تنش مرحله پیش رچتینگ، با تنش میانگین ثابت را بر عمر خستگی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود پیش رچتینگ باعث کاهش عمر خستگی نسبت به حالت خستگی خالص شده است.

جدول ۳ مشخصات و نتایج آزمایش‌های تنش-کنترل

شماره آزمایش	آزمایش پیش رچتینگ			آزمایش خستگی			درصد کاهش عمر خستگی
	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	تعداد چرخه	تنش میانگین (MPa)	دامنه تنش (MPa)	عمر خستگی نمونه‌ها (10^3 cycle)	
	-	-	-	۱۹۲	۱۹۲	۱۲۴	
۲	۲۶۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۸۶	۳۰/۶۴
۳	۲۶۰	۳۲۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۳	۵۷/۲۵
۴	۲۶۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۴	۵۶/۴۵
۵	۳۰۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۶	۵۴/۸۳
۶	۳۰۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۷۲	۴۱/۹۳
۷	۳۰۰	۲۶۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۶	۱۴/۵۱
۸	۳۲۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۷۴	۴۰/۳۲
۹	۲۸۰	۲۸۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۹	۵۲/۴۱
۱۰	۲۸۰	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۴۸	۶۱/۲۹
۱۱	۳۰۰	۳۰۰	۸۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۵۸	۵۳/۲۲
۱۲	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۹۲	۱۹۲	۱۰۷	۱۳/۷۰

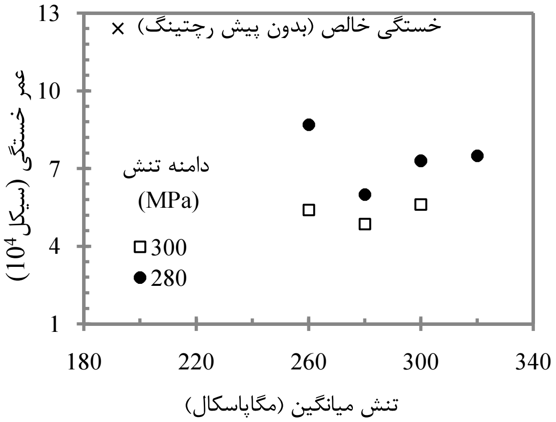
این کاهش عمر مطابق جدول ۳، برای کمترین دامنه تنش، یعنی ۲۶۰MPa برابر ۱۴/۵۱٪ و برای بیشترین دامنه تنش، یعنی ۳۲۰MPa برابر ۵۷/۲۵٪ می‌باشد که نشان دهنده تأثیر زیاد دامنه تنش پیش رچتینگ بر عمر خستگی است. به گونه‌ای که با افزایش دامنه تنش پیش رچتینگ، درصد کاهش عمر خستگی نیز افزایش می‌یابد. این روند مطابق شکل ۱۱ برای هر دو تنش میانگین صادق است و تغییر در تنش میانگین تأثیر چندانی بر عمر خستگی نداشته است.



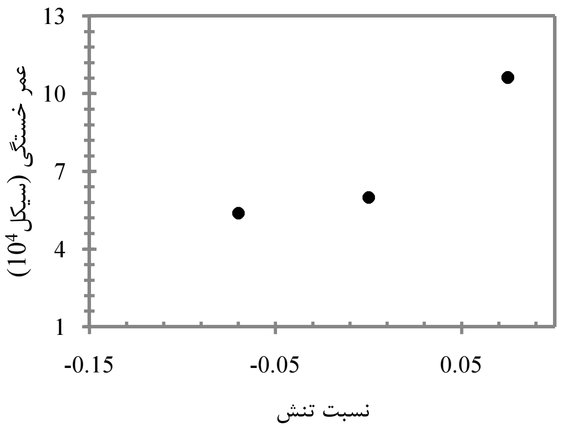
شکل ۱۱ تغییرات عمر خستگی نسبت به دامنه تنش مرحله پیش رچتینگ با تنش میانگین ثابت

به گونه‌ای که بیشترین اختلاف در درصد کاهش عمر خستگی برابر ۱۱/۲۹٪، برای دامنه تنش ۲۸۰MPa و دو تنش میانگین ۳۰۰MPa و ۲۶۰MPa می‌باشد و در موارد دیگر این اختلاف ناچیز است.

شکل ۱۲ 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 ۳۰۰MPa و ۲۸۰MPa عمر خستگی در تنش میانگین ۲۸۰MPa کاهش قابل ملاحظه ای داشته است. مقدار کاهش عمر خستگی در این تنش میانگین خاص برای دامنه تنش ۳۰۰MPa برابر ۶۱/۲۹٪ و برای دامنه تنش ۲۸۰MPa برابر ۵۲/۴۱٪ است که این مقدار کاهش از میانگین مقدار کاهش در تنش میانگین‌های دیگر برای دامنه تنش‌های ۳۰۰MPa و ۲۸۰MPa 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 [۱۱]. دلیل آن را می‌توان در تغییرات ساختاری و متالوژیکی ایجاد شده در ماده جستجو کرد که البته خود یک مبحث مستقل است.



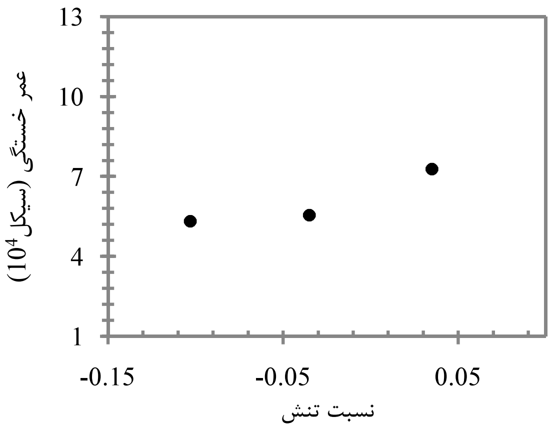
شکل ۱۲ تغییرات عمر خستگی نسبت به تنش میانگین مرحله پیش رچتینگ با دامنه تنش ثابت



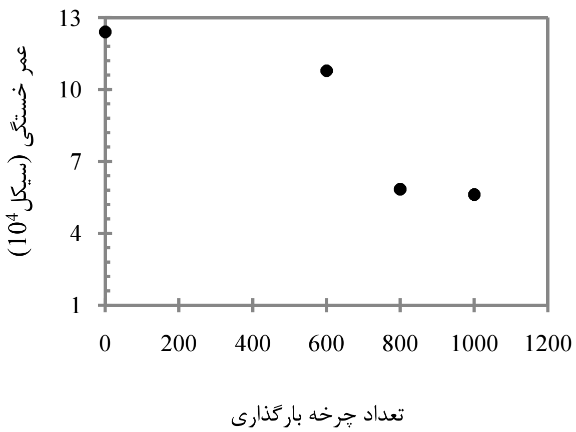
شکل ۱۳ تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش مرحله پیش رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۶۰MPa

شکل‌های ۱۳ و 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 ۵۸۰MPa شدت کمتری دارد به صورتی که، با افزایش مقدار نسبت تنش، درصد کاهش عمر از ۵۷/۲۵٪ به ۴۱/۹۳٪ کاهش می‌یابد.

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 به دست آمده است که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با کاهش تعداد چرخه پیش رچتینگ، عمر خستگی افزایش می‌یابد به طوری که در تعداد ۶۰۰ چرخه بارگذاری، عمر خستگی به حالت بدون پیش رچتینگ یا خستگی خالص نزدیک می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر اصلی کرنش رچتینگ بر عمر خستگی طی چرخه‌های 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 ۱۴ تغییرات عمر خستگی نسبت به نسبت تنش مرحله پیش رچتینگ با حداکثر تنش ثابت ۵۸۰MPa



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

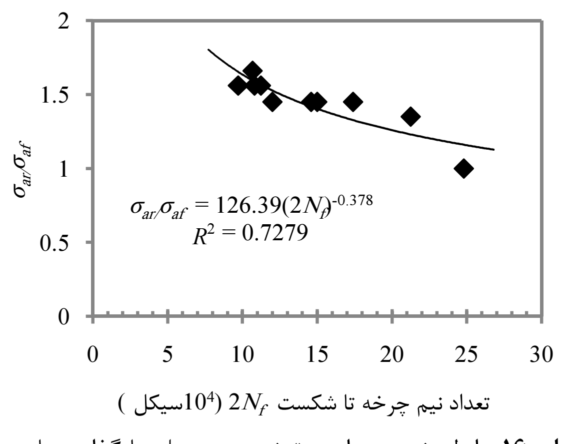
۴-۳- پیش‌بینی عمر خستگی

با توجه به نتایج تجربی بدست آمده برای عمر خستگی در قسمت قبل، می‌توان نتیجه گرفت که در بارگذاری دو مرحله‌ای تنش-کنترل با شرط عدم ورود بارگذاری مرحله دوم (آزمایش خستگی) به ناحیه پلاستیک، پارامتر مؤثر بر عمر خستگی، دامنه تنش در ۱۰۰۰ چرخه ابتدایی مرحله پیش رچتینگ می‌باشد. برای به دست آوردن رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌های Ck45 تحت بارگذاری دو مرحله‌ای، 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 ۱۶). همچنین با استفاده از بررسی رگرسیون حداقل مربعات، رابطه (۲) که بیانگر ارتباط بین عمر خستگی و نسبت دامنه تنش دو مرحله بارگذاری می‌باشد، به دست آمده است:

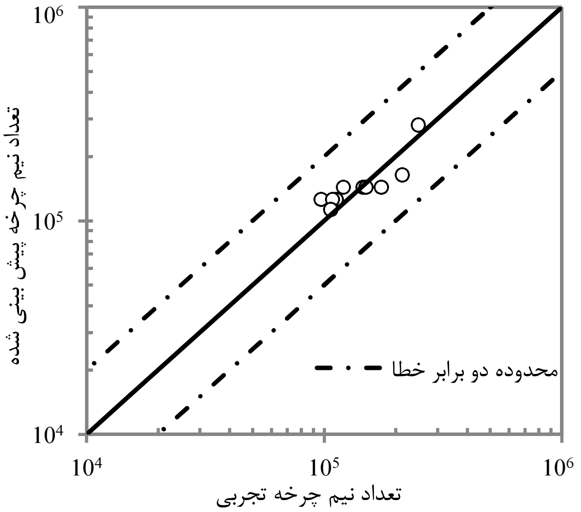
$$\frac{\sigma_{ar}}{\sigma_{af}} = 126.39(2N_f)^{-0.378} \qquad (۲)$$

در این روش، مربع ضریب تناسب (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 این رابطه است.

برای بررسی دقت رابطه بدست آمده، نتایج تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط رابطه (۲)، با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۱۷). در صورتی که تعداد نیم چرخه تجربی و تعداد نیم چرخه پیش‌بینی شده با یکدیگر برابر باشند، مقدار خطا صفر است 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.



شکل ۱۶ رابطه نسبت دامنه تنش دو مرحله بارگذاری با عمر خستگی



شکل ۱۷ مقایسه مقدار عمر خستگی تجربی با مقدار پیشی بینی شده

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقاط پیش بینی شده دقت خوبی دارند و همگی در داخل محدوده دو برابر خطا قرار دارند. بنابراین می‌توان با استفاده از رابطه (۲) و با دقت قابل قبولی، عمر خستگی نمونه‌های استاندارد Ck45 تحت بارگذاری تنش-کنترل دو مرحله‌ای با فرض بارگذاری به مقدار ۱۰۰۰ سیکل در مرحله اول را پیش‌بینی کرد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اطلاعات و نمودارهای بدست آمده از آزمایش‌های تجربی انجام شده برای بارگذاری‌های تنش-کنترل دو مرحله‌ای، می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد:

۱- در آزمایش‌های تنش-کنترل نامتقارن محوری، به طور کلی، افزایش دامنه تنش و تنش میانگین باعث افزایش کرنش رچتینگ انباشته شده در نمونه‌ها می‌شود و تغییرات کرنش رچتینگ نسبت به نسبت تنش، رفتار مشخصی ندارد.

۲- در آزمایش‌های تنش-کنترل نا متقارن محوری، تغییرات دامنه تنش پیش رچتینگ تأثیر چشم‌گیری بر عمر خستگی دارد. به صورتی که با افزایش دامنه تنش، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش عمر، برای کمترین دامنه تنش یعنی ۲۶۰MPa برابر ۱۴/۵۱٪ و برای بیشترین دامنه تنش یعنی ۳۲۰MPa برابر ۵۷/۲۵٪ می‌باشد.

۳- در آزمایش‌های تنش-کنترل نامتقارن محوری، تغییرات تنش میانگین پیش رچتینگ تأثیر اندکی بر عمر

خستگی دارد. (بیشترین اختلاف در درصد کاهش عمر خستگی برابر ۱۱/۲۹٪ است). همچنین عمر خستگی در تنش میانگین ۲۸۰MPa کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند که نشانگر تأثیر بیشتر کرنش رچتینگ بر کاهش عمر خستگی در این تنش میانگین خاص می‌باشد. این مقدار کاهش از میانگین مقدار کاهش در تنش میانگین‌های دیگر برای دامنه تنش‌های ۳۰۰MPa و ۲۶۰MPa به ترتیب ۵/۶۵٪ و ۱۴/۷۸٪ بیشتر می‌باشد.

۴- در آزمایش‌های تنش-کنترل نا متقارن محوری، با افزایش نسبت تنش پیش رچتینگ، عمر خستگی نمونه‌ها 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.

۵- در آزمایش‌های تنش-کنترل نا متقارن محوری، با کاهش تعداد چرخه پیش رچتینگ، عمر خستگی افزایش می‌یابد. به طوری که در تعداد چرخه ۶۰۰ عمر خستگی به حالت بدون پیش رچتینگ یا خستگی خالص نزدیک می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر اصلی کرنش رچتینگ بر عمر خستگی طی چرخه‌های ۶۰۰ تا ۸۰۰ بوده است.

۵- مراجع

[1] Ohno N., "Recent Progress in Constitutive Modeling for Ratcheting", *Materials Science Research International*, Vol. 3, 1997, pp. 1-9.
[2] Bari S, Hassan T., "An Advancement in Cyclic Plasticity Modeling for Multiaxial Ratchetting Simulation", *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, 2002, pp. 873-894.
[3] Abdel-Karim M., "Shakedown of Complex Structures According to Various Hardening Rules", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005, pp. 427-458.
[4] Kang GZ., Li YG., "Uniaxial Ratchetting and Failure Behaviours of Two Steels", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 43, 2005, pp. 199-209.
[5] Khoei AR., Jamali N., "On the Implementation of a Multi-surface Kinematic Hardening Plasticity and its Applications", *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, 2005, pp. 1741-1770.
[6] Chaboche JL., "A Review of Some Plasticity and Viscoplastic Constitutive Models", *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, 2008, pp. 1642-16493.
[7] Yang X., "Low Cycle Fatigue and Cyclic Stress Ratcheting Failure Behavior of Carbon Steel 45 Under Uniaxial Cyclic Loading", *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, 2005, pp. 1124-1132.
[8] Shariati M., Hatami H., "An Experimental Study on the Ratcheting and Fatigue Behavior of Polyacetal Under Uniaxial Cyclic Loading", *Materials and Design*, Vol. 34, 2011, pp. 302-312.
[9] Shariati M., Hatami H., "Experimental and Numerical Investigations on the Ratcheting Characteristics of Cylindrical Shell Under Cyclic Axial Loading", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 44, 2012, pp. 753-762.
[10] Xia Z., Kujawski D., "Effect of Mean Stress and Ratcheting Strain on Fatigue Life of Steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 18, 1996, pp. 335-341.
[11] Kang G., Liu Y., "Experimental Study on Ratchetting-Fatigue Interaction of SS304 Stainless Steel in Uniaxial Cyclic Stressing", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 435-436, 2006, pp. 396-404.
[12] Kang G., Liu Y, "Uniaxial Ratchetting and Low-Cycle Fatigue Failure of the Steel with Cyclic Stabilizing or Softening Feature", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 472, 2008, pp. 258-268.
[13] Gao H., Chen X., "Effect of Axial Ratcheting Deformation on Torsional Low Cycle Fatigue Life of Lead-Free Solder Sn–3.5Ag", *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, 2009, pp. 276-283.
[14] Liu Y., Kang G., "A Multiaxial Stress-Based Fatigue Failure Model Considering Ratcheting Fatigue Interaction", *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 2010, pp. 678-684.
[15] ASTM E-466-94, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials,* ASTM Annual Standards, 2002.