



دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۳ تا ۲۱
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 13- 21



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

تحلیل تجربی رفتار رچتینگ لوله پلی استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره و فشار داخلی

محمود شریعتی^{۱*}، جواد یزدان نژاد^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت ۱۳۹۱/۲/۲۹، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۳۰)

چکیده

در این مقاله آزمایش‌هایی تجربی به منظور تحلیل رفتار رچتینگ ماده پلی استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره و فشار داخلی طراحی و انجام شد. آزمایش‌های تجربی در این تحقیق به وسیله یک دستگاه پیشرفته سروهیدرولیکی انجام شده و اثر دامنه تنش، تنش میانگین و فشار داخلی بر کرنش رچتینگ و رفتار نرم‌شوندگی یک لوله از جنس پلی استال بررسی شد. یک عامل سخت‌شوندگی مناسب معرفی شد و نسبت عمر خستگی ماده پلی استال با آن مورد بررسی قرار گرفت. در یک سیکل بارگذاری معین برای نمونه‌ای که عامل سخت‌شوندگی آن بزرگتر باشد، عمر خستگی کمتری مشاهده شد. نرم‌شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌ای که مقدار کرنش رچتینگ بیشتری دارد، عمر خستگی کمتری دارد.

کلمات کلیدی

کرنش رچتینگ، پلی استال، فشار داخلی، آزمایش تجربی.

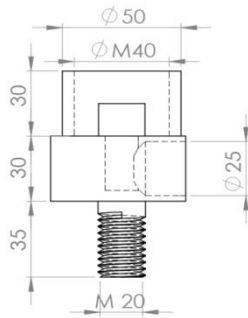
* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: mshariati44@gmail.com

۱- مقدمه

سازه‌های مهندسی معمولاً تحت بارگذارهای سیکلی و تناوبی قرار دارند. یک نگرانی بسیار مهم در تاسیسات نیروگاه‌های هسته ای، صنایع شیمیایی، سازه‌های دریایی، اجزای ماشین، ساختمان های فلزی و سازه‌های پل‌ها تحت یک زوال خستگی کم چرخه، غیر قابل انتظار و پیش‌بینی بودن آن است. ترک‌های ناشی از خستگی در سازه‌ها و اجزای ماشین می‌توانند در محلی که تحت بارگذاری برگشتی مکرر در طی یک زلزله، آب و هوای بد و یا در شرایط سرویس‌دهی و تنش‌های گرمایی و مکانیکی باشد، ایجاد شود. رچتینگ پدیده‌ای است که اگر ماده‌ای تحت بارگذاری سیکلی به صورت تنش-کنترل با مقدار میانگین غیر صفر باشد، ایجاد شده و باعث تجمع افزایشی تغییر شکل ماده می‌شود. لازم به ذکر است برای مواد فلزی وقتی که مقدار تنش از مقدار استحکام ماده فراتر رود و تغییر شکل پلاستیک ایجاد گردد، رچتینگ اتفاق می‌افتد [۱]. وجود رچتینگ در حین بارگذاری سیکلی باعث کاهش زمان شروع رشد ترک شده و در نهایت باعث فروپاشی سازه می‌شود [۲].

با توجه به اهمیت پدیده رچتینگ، محققین زیادی در این زمینه به پژوهش و تحقیق پرداخته‌اند. زیبا^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۶ اثر تنش میانگین کششی با و بدون کرنش رچتینگ بر روی عمر خستگی را مورد تحقیق قرار دادند. یک تئوری خستگی بر اساس انرژی ارائه کرده و اثرات تنش میانگین و رچتینگ را بر روی عمر مواد محاسبه نموده و نشان دادند، نتایج ارائه شده با نتایج تجربی، همخوانی خوبی دارد [۳]. تائو^۲ و زیبا در سال ۲۰۰۷ رفتار رچتینگ یک اپوکسی رزین را بررسی و اثرات آن بر روی عمر خستگی را به صورت آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار دادند. آنها نشان دادند کرنش رچتینگ و نرخ انباشتگی آن به دامنه تنش و مقدار تنش میانگین حساس است. عمر خستگی این آزمایش‌ها با آزمون‌های قبلی که تحت تغییرات کرنش-کنترل بودند، مقایسه شد و مشاهده گردید که کرنش رچتینگ اثر مشهودی بر روی عمر خستگی برای اپوکسی پلیمر ندارد [۱]. هارتمن^۳ رفتار پلی‌استال را در سال ۲۰۰۵ مورد مطالعه قرار داد. وی مشاهده کرد این پلیمر دارای رفتار کششی و فشاری نامتقارن است [۴]. شن^۴ و هوی^۵ در سال ۲۰۰۵ طی مقاله‌ای وابستگی نرخ بارگذاری بر روی پاسخ تنش-کرنش و رفتار رچتینگ PTFE پلی‌تترافلئوراتیل را تحت فشار مورد مطالعه قرار داده‌اند. نشان داده شد که PTFE ماده‌ای است که به نرخ بارگذاری وابسته است [۵]. ژانگ^۶ و شن در سال ۲۰۰۹ یک سری آزمایش‌هایی بر روی قطعات استوانه‌ای توپر PTFE انجام

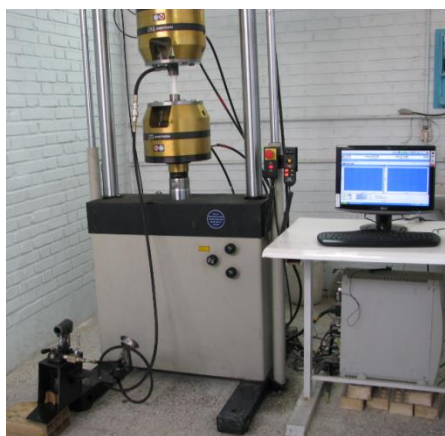
دادند. اثرات تنش محوری با محدوده تغییرات کرنش برشی و نرخ کرنش برشی و تاریخچه آن بر روی رفتار PTFE مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها مشاهده کردند در طی ۵۰ سیکل اول، نرخ کرنش رچتینگ با افزایش تعداد سیکلها کاهش می‌یابد و رشد کرنش رچتینگ بسیار تند و سریع بوده و بعد از آن به یک روند پایا می‌رسد. همچنین دریافتند که رچتینگ چند محوره نسبت به تاریخچه بارگذاری حساس است [۶]. لیو^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۸ در مطالعه‌ای رفتار رچتینگ PMMA در دماهای مختلف و سطح‌های مختلف تنش را به صورت آزمایشگاهی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به وابستگی بین کرنش رچتینگ در هر سیکل و انرژی حلقه هیستریزس یک مدل جدید برای تجمع کرنش رچتینگ توسعه داده شد که اثرات دما، فرکانس بارگذاری و تنش میانگین و دامنه تنش بر روی انباشتگی نرخ کرنش رچتینگ را توضیح می‌دهد [۷]. در سال ۲۰۰۶ مهان راج^۸ و همکاران تاثیرات دما و کرنش را بر روی تنش اعمالی مورد بررسی قرار دادند. در تمام آزمایش‌ها مراحل تغییر شکلی شبیه رفتار ویسکوالاستیک اطراف نقطه تسلیم مشاهده شد [۸]. شریعی و همکاران در سال ۱۳۹۰ به مطالعه رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ای پرداختند و مشاهده کردند که نرخ کرنش رچتینگ در چند سیکل ابتدایی زیاد بوده و به مرور کاهش می‌یابد [۹]. در سال ۲۰۱۲ شریعی و همکاران به مطالعه‌ی تجربی رفتار پلی‌استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره پرداختند. آن‌ها نشان دادند که بزرگی و نرخ کرنش رچتینگ به دامنه تنش و تنش میانگین اعمال شده حساس بوده و ماده از خود رفتار نرم‌شوندگی نشان می‌دهد. برای نشان دادن اثر تنش میانگین بر عمر خستگی پلی‌استال، تابع تنش میانگین در قالب کمیت آسیب معادل معرفی شده و ثوابت ماده برای تنش، کرنش و انرژی محاسبه نمودند [۱۰]. شریعی و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار نرم‌شوندگی پلی‌استال را تحت بارگذاری تناوبی کرنش-کنترل به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. مدلسازی عددی با نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل‌های پیشرفته پلاستیسیته از جمله سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، سخت‌شوندگی سینماتیک خطی و مدل سخت-شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک غیرخطی انجام شده است [۱۱]. شریعی و حاتمی در سال ۲۰۱۲ رفتار رچتینگ و نرم-شوندگی پوسته استوانه‌ای آلیاژ SS304L را مورد مطالعه قرار دادند. اثر دامنه تنش و گشودگی بر رچتینگ در آزمایش‌های تنش-کنترل و رفتار نرم‌شوندگی در آزمایش‌های کرنش-کنترل را بررسی کردند و نشان دادند افزایش شعاع گشودگی و دامنه



شکل (۲): فیکسچرهای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

تمام آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802 نشان داده شده در شکل (۳) انجام شده است. این دستگاه توانایی اعمال بارگذاری دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ kN داشته که به منظور بهبود دقت اندازه‌گیری از نیروسنج با ظرفیت ۲۵ kN استفاده شد. خروجی‌های دستگاه، جابجایی و نیرو بوده که دقت اندازه‌گیری نیرو معادل ± 1 N و جابجایی معادل ± 0.01 mm است.

برای اعمال فشار داخلی از یک پمپ دستی استفاده شد. به منظور تنظیم فشار داخلی و ثابت نگه داشتن آن از یک فشارسنج و یک شیر استفاده شده تا با رسیدن به میزان فشار دلخواه، مسیر برگشت روغن به مخزن را از پمپ ایزوله نماید. با توجه به سیکلی بودن بارگذاری و تغییر متناوب مقدار نیرو، نمونه بطور پیوسته تغییر شکل و تغییر حجم می‌دهد. این تغییر شکل و تغییر حجم، موجب تغییر و نوسان فشار داخلی می‌شود. برای غلبه بر این امر از یک آکومولاتور استفاده شده است. در شکل (۴) شماتیک مدار سیستم هیدرولیکی و در شکل (۵) سیستم دستی ایجاد فشار داخلی آورده شده‌اند.

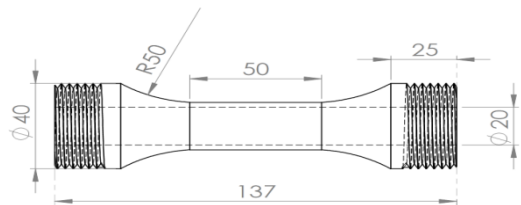


شکل (۳): دستگاه سروهیدرولیک INSTRON 8802

تنش موجب افزایش کرنش رچتینگ می‌شود [۱۲]. تیبانوف و نویکوف در سال ۲۰۱۲، با ملاحظه کردن سطح نرم‌شوندگی و یا سخت‌شوندگی، یک مدل محاسباتی در نظر گرفتند تا عمر خستگی پر چرخه مواد را تعیین کنند [۱۳]. شیو و همکاران در سال ۲۰۱۰، اثر پیش‌کرنش کششی بر رچتینگ فولاد ضد زنگ ۴۳۰ با یک سری آزمایش‌های تجربی در سه سطح مختلف پیش‌کرنش مطالعه کردند. نتایج نشان داد افزایش سطح پیش‌کرنش موجب کاهش عمر خستگی می‌شود. اثر پیش‌کرنش در خستگی پرچرخه بیشتر نمایان است [۱۴]. دروزدوف در سال ۲۰۱۲، آزمایش‌های تنش-کنترل و کرنش-کنترل بر روی پلی-پروپیلین انجام داده و یک مدل رفتاری را توسعه داد و به خوبی رفتار را توصیف می‌نمود. شبیه‌سازی عددی نشان داد که کرنش پلاستیک منتج به زوال خستگی آزمایش‌ها در رچتینگ می‌شود [۱۵].

۲- نمونه‌ها و تجهیزات آزمایش

برای تهیه‌ی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی از میلگردهای پلی‌استال با قطر ۴۰ mm استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، طول سنجه نمونه‌ها ۲۵ mm و قطر خارجی و داخلی آن‌ها به ترتیب برابر ۵۰ mm و ۲۰ mm است.

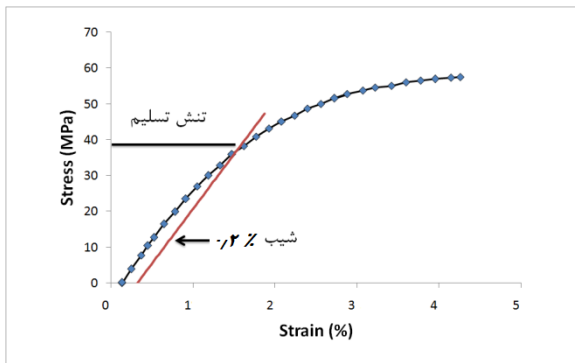


شکل (۱): ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

از آنجا که دو سر نمونه‌ها رزوه شده است، برای اتصال نمونه‌ها به فک‌های دستگاه، فیکسچرهایی مطابق شکل (۲) طراحی شد. مطابق شکل (۲) یکی از فیکسچرها دارای سوراخی است تا با عبور روغن از آن فشار داخلی در نمونه‌ها ایجاد شود.



خواص مکانیکی	کشش
مدول یانگ (E)	۳۱۰۰ MPa
تنش تسلیم (σ_y)	۳۸/۱۹ MPa
کرنش تسلیم (ϵ_y)	۱/۵۷ %



شکل (۶): نمودار تنش-کرنش پلی استال حاصل از آزمایش کشش ساده

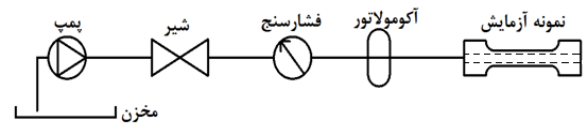
برای تحقیق درباره‌ی اثر تنش میانگین و دامنه تنش، آزمایش‌های تجربی مطابق جدول (۳) به سه گروه GT1 تا GT3 تقسیم شده است. در هر یک از این گروه‌ها در یک حالت مقادیر تنش میانگین یا دامنه‌ی تنش و یا فشار داخلی ثابت و در حالت دیگر متغیر است. به این ترتیب می‌توان تأثیرات بارگذاری را در هر آزمایش مشاهده نمود.

در طول انجام هر آزمایش، داده‌های نیرو و جابجایی ثبت و بر اساس آنها تحلیل کمی پارامترهای مکانیکی مانند کرنش رچتینگ، حدود تغییرات کرنش، شیب حلقه‌های هیستریزس و عامل سخت‌شوندگی انجام شده است. در ادامه به بحث و بررسی هریک از این پارامترهای مکانیکی پرداخته می‌شود.

جدول (۲): کمیت‌های اندازه گیری شده در آزمایش‌های تجربی

نمونه	فرکانس (Hz)	فشار داخلی (bar)	دامنه نیرو (kN)	نیروی متوسط (kN)
SP1	۰/۳۸۰۹	۱۰	۵/۲۵	۵/۶
SP2	۰/۳۵۷۱	۰	۵/۶	۵/۶
SP3	۰/۳۵۷۱	۱۰	۵/۶	۵/۶
SP4	۰/۳۵۷۱	۳۰	۵/۶	۵/۶
SP5	۰/۳۳۶۱	۱۰	۵/۹۵	۵/۶
SP6	۰/۳۵۷۱	۱۰	۵/۶	۵/۲۵
SP7	۰/۳۵۷۱	۱۰	۵/۶	۵/۹۵

جدول (۳): گروه‌بندی آزمایش‌ها



شکل (۴): شماتیک سیستم هیدرولیکی ایجاد فشار داخلی



شکل (۵): سیستم دستی ایجاد فشار داخلی

۲- رویه آزمایش و نتایج حاصله

با انجام آزمایش کشش ساده، طبق استاندارد ASTM E 8-03 مدول یانگ و تنش تسلیم ماده مورد آزمایش محاسبه شده است. در شکل (۶) نمودار تنش بر حسب کرنش حقیقی نشان داده شده است. شیب منطقه خطی نمودار تنش-کرنش معرف مدول یانگ است. برای بدست آوردن تنش تسلیم، یک خط به موازات ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش ترسیم شده است. محل تقاطع معرف تنش تسلیم ماده است. از خط با شیب ۰/۲٪ مطابق شکل (۶) برای بدست آوردن مدول یانگ و تنش تسلیم استفاده شده است. مقادیر محاسبه شده در جدول (۱) آمده است.

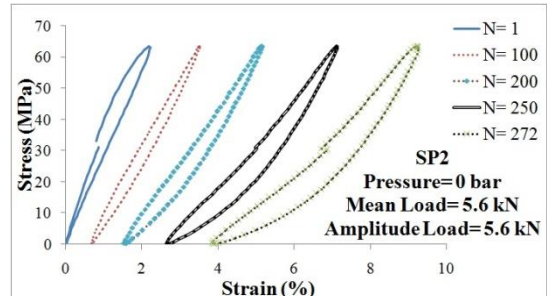
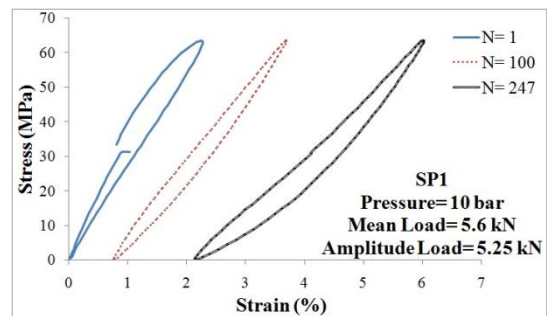
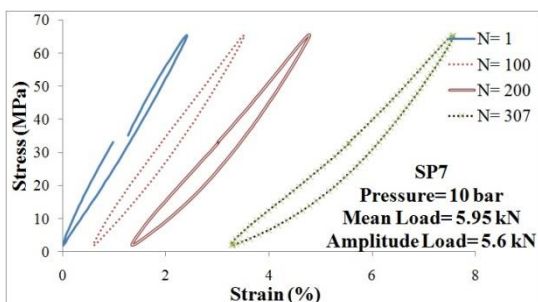
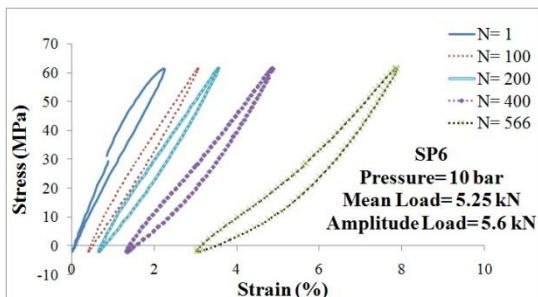
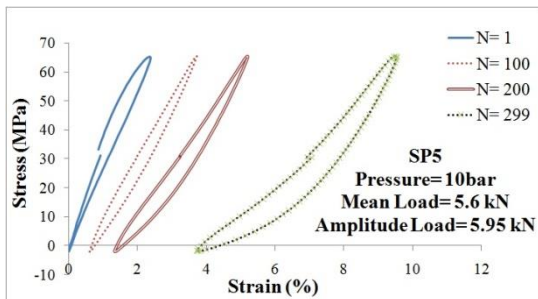
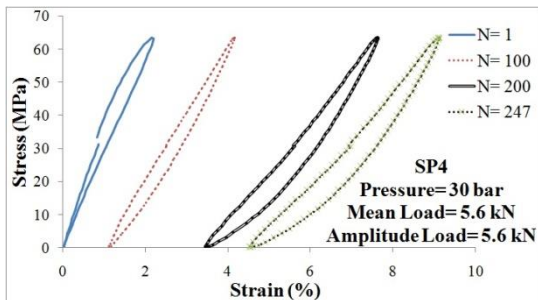
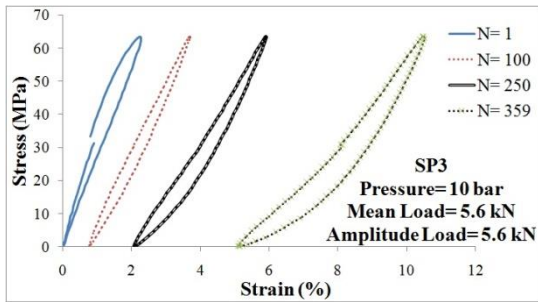
تمام آزمایش‌های انجام شده، تحت شرایط تنش-کنترل بوده و در دمای محیط انجام شده است. با توجه به آنکه رفتار رچتینگ به نرخ بارگذاری وابسته است [۸ و ۱۶] و از طرف دیگر، نرخ‌های بالای بارگذاری منجر به افزایش دما و تغییرات خواص مکانیکی می‌شود؛ نرخ بارگذاری مقدار 8 kN/sec در نظر گرفته شده است تا شرایط پایدار و دما ثابت حاکم باشد. برای اعمال مقدار نرخ بارگذاری در آزمایش‌ها، لازم است از رابطه (۱) استفاده کرده و فرکانس مورد نیاز را محاسبه نمود:

$$\omega = \frac{\sigma}{4F_{amp}} \quad (1)$$

که در آن ω فرکانس، σ نرخ بارگذاری تنش و F_{amp} دامنه‌ی تنش است. در جدول (۲) خلاصه شرایط بارگذاری، همچنین مقادیر تنش میانگین، دامنه تنش و فشار داخلی اعمال شده در حین آزمایش‌های تجربی آورده شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی پلی استال

شماره آزمایش‌های	شماره گروه	تنش میانگین	دامنه تنش	فشار داخلی
SP2, SP3, SP4	GT1	ثابت	ثابت	متغیر
SP3, SP6, SP7	GT2	متغیر	ثابت	ثابت
SP1, SP3, SP5	GT3	ثابت	متغیر	ثابت



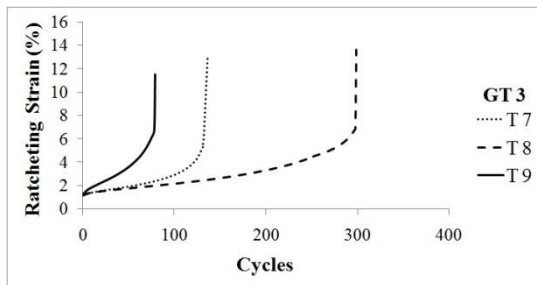
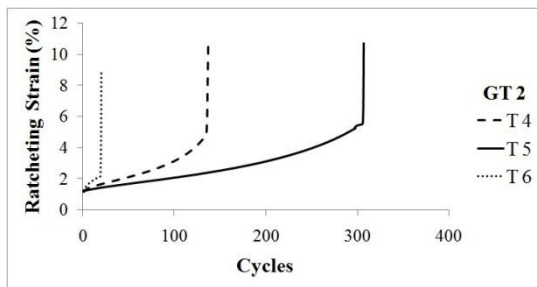
شکل (۷): حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش نمونه‌های SP1 الی SP7

۳-۱- حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش

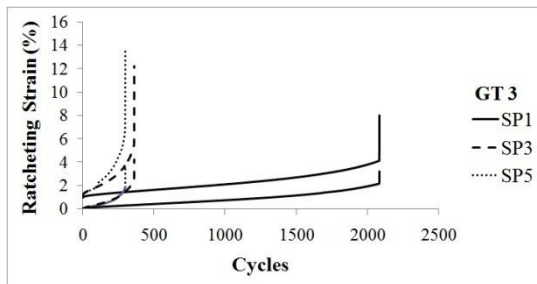
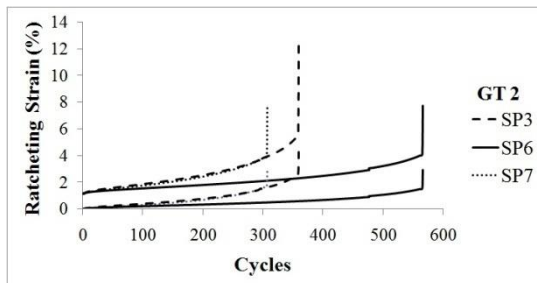
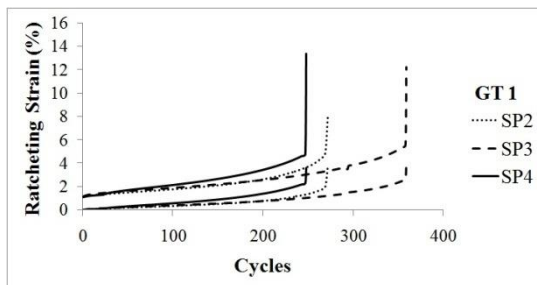
اطلاعات پایه‌ای رفتار سیکلی یک ماده را می‌توان در شکل حلقه هیستریزس تنش-کرنش سیکلی آن ماده جستجو کرد. تغییر شکل سیکلی، باعث به‌دست آمدن یک حلقه هیستریزس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد. حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش نمونه‌های SP1 الی SP7 در شکل (۷) نشان داده شده است. گفتنی است در آزمایش‌هایی که کرنش رچتینگ ایجاد می‌شود، حلقه هیستریزس بسته نمی‌شود. این نکته خود نشان دهنده انباشتگی کرنش با افزایش تعداد سیکل‌هاست که بیانگر مفهوم کرنش رچتینگ است. مشاهده می‌شود که با افزایش شماره سیکل، تغییرات کرنش بیشتری در حلقه مشاهده می‌شود. افزایش محدوده تغییرات کرنش بیانگر نرم‌شوندگی بیشتر ماده است.

۳-۲- تغییرات کرنش رچتینگ

تغییرات کرنش رچتینگ را به صورت کمی می‌توان به عنوان نمو قله کرنش بعد از هر سیکل معرفی نمود (رابطه‌ی (۲)):



شکل (۸): کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1 تا GT3



شکل (۹): تغییرات حدود کرنش آزمایش‌های گروه GT1 تا GT3

۳-۴- تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس

شیب حلقه هیستریزیس مطابق با تعریف مرجع [۷] به صورت شیب خط واصل نقاط بیشینه و کمینه حلقه هیستریزیس تعریف می‌گردد. شماتیک این تعریف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نمودار آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای سه گروه

$$\delta \varepsilon = \varepsilon_{n+1}^{peak} + \varepsilon_n^{peak} \quad (2)$$

و یا می‌توان آن را به عنوان کرنش میانگین هر سیکل مطابق رابطه (۳) تعریف کرد. در این مطالعه از رابطه (۳) برای تعریف کرنش رچتینگ استفاده شده است:

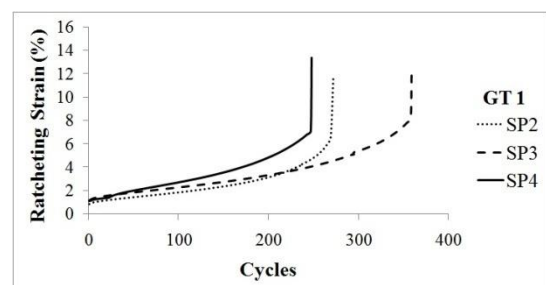
$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} (\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}) \quad (3)$$

نمودارهای کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری شبیه نمودار خزش است (شکل (۸)). هر نمودار دارای قسمتی بوده که دارای رشد نسبتاً کمی است و در نهایت دارای رشد بسیار سریع کرنش رچتینگ می‌باشد. به همین دلیل بعضی از پژوهشگران آن را خزش سیکلی نیز نامیده‌اند [۱].

در یک سیکل معین، ملاحظه می‌شود نمونه‌ای که مقدار کرنش رچتینگ بیشتری دارد، دارای عمر خستگی کمتری است. با توجه به نمودار GT2 که تنش میانگین متغیر است، افزایش کرنش میانگین منجر به کاهش عمر خستگی می‌شود. با توجه به نمودار GT3 که دامنه تنش متغیر است، افزایش دامنه تنش منجر به کاهش عمر خستگی می‌شود. مقایسه این دو وضعیت نشان می‌دهد، تنش میانگین اثر بیشتری نسبت به دامنه تنش دارد.

۳-۳- تغییرات حدود کرنش

کرنش رچتینگ از میانگین کمینه و بیشینه مقدار کرنش در هر سیکل بدست می‌آید. حال اگر هر دو مقدار در یک نمودار رسم شوند، حدود تغییرات کرنش قابل مشاهده است. علاوه بر نتایج مشابه به نمودارهای کرنش رچتینگ، نکته دیگری که قابل مشاهده است، این است که با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، نمودارهای مربوط به سیکل‌های بارگذاری مختلف از هم دور می‌شوند. این امر نشان دهنده نرم‌شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است. حدود تغییرات کرنش آزمایش‌های تنش-کنترل، برای آزمایش‌هایی با تنش میانگین ثابت و دامنه‌ی تنش متغیر در شکل (۹) نمایش داده شده است.



۳-۵- عامل سخت‌شوندگی

در اینجا با توجه به تعاریفی که در مرجع [۱۷] ارائه شده است، عامل سخت‌شوندگی معرفی و محاسبه شده و نمودارهای آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری رسم شده است. هر حلقه هیستریزیس یک هندسه معینی دارد که پهنای حلقه دو برابر دامنه کرنش پلاستیک $\Delta \varepsilon^P$ و ارتفاع حلقه دو برابر دامنه تنش $\Delta \sigma$ است. دامنه تنش با دامنه کرنش الاستیک با رابطه خطی هوک متناسب است. بنابراین شکل حلقه هیستریزیس با نسبت دامنه کرنش پلاستیک $\Delta \varepsilon^P$ به دامنه کرنش الاستیک $\Delta \varepsilon^e$ ، که نسبت کرنش (SR) نامیده می‌شود، بیان می‌گردد. [۱۷].

$$SR = \frac{\Delta \varepsilon^P}{\Delta \varepsilon^e} \quad (۴)$$

دامنه کرنش کلی $\Delta \varepsilon$ از مجموع دامنه کرنش پلاستیک $\Delta \varepsilon^P$ و دامنه کرنش الاستیک $\Delta \varepsilon^e$ بدست می‌آید. بنابراین برای یک مدول الاستیسیته معین، دامنه تنش $\Delta \sigma$ و دامنه کرنش کلی $\Delta \varepsilon$ و نسبت کرنش (SR) یک حلقه هیستریزیس، به صورت زیر روابط (۵) و (۶) بیان می‌شود:

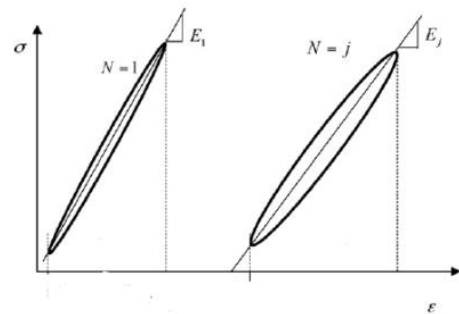
$$\Delta \varepsilon^P = \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon^e \quad (۵)$$

$$SR = \frac{E \Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} - 1 \quad (۶)$$

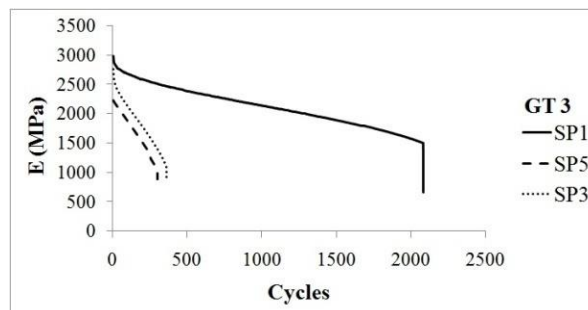
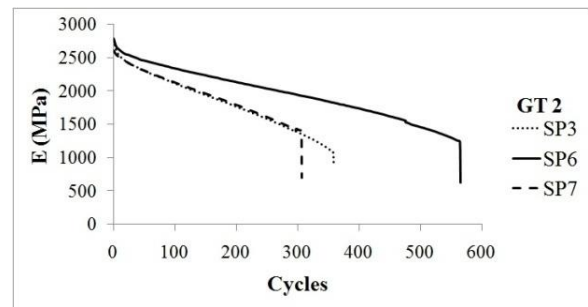
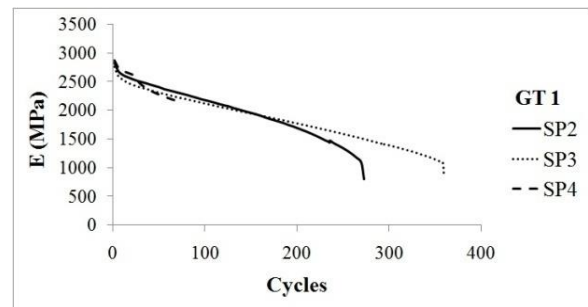
عامل سخت‌شوندگی (H)، نسبت کرنش در سیکل معین SR_s به نسبت کرنش در سیکل اول SR_1 می‌باشد. یعنی $H = \frac{SR_s}{SR_1}$. با توجه به رابطه (۶)، قابل درک است که برای مواد سخت‌شونده سیکلی، $H > 1$ و برای مواد نرم‌شونده سیکلی، $H < 1$ است.

با توجه به نمودارهای شکل (۱۲)، ملاحظه می‌شود در نمونه با مقادیر بارگذاری کمتر، مقادیر عامل سخت‌شوندگی بزرگتر بوده و یا به عبارتی نرم‌شوندگی بیشتری دیده می‌شود. نمونه‌ای که دارای عمر خستگی کمتری است، دارای مقادیر بیشتر عامل سخت‌شوندگی است. بنابراین در یک سیکل معین، عامل سخت‌شوندگی را محاسبه نموده و در صورت بزرگتر بودن از مقدار نمونه آزمایش شده قبلی، می‌توان پیش بینی کرد که نمونه عمر خستگی کمتری نسبت به نمونه قبلی خواهد داشت.

آزمایش در شکل (۱۱) رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، مقدار شیب کم شده است که بیانگر نرم‌شوندگی ماده است. با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، علاوه بر کاهش شیب، نرخ کاهش شیب افزایش یافته که نشان‌دهنده بیشتر شدن نرم‌شوندگی با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است.



شکل (۱۰): شیب حلقه هیستریزیس [۷]



شکل (۱۱): تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش

۶- نمودار شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که نرم‌شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری بیشتر می‌شود.
۷- در هر سیکل بارگذاری، نمونه با فشار داخلی ۳۰ bar، کرنش رچتینگ بیشتری دارد. بنابراین عمر خستگی کمتری دارد.

۵- مراجع

[۱] Tao, Gang; Xia, Zihui, "Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life", Polymer Testing, Vol. 26, pp. 451- 460, 2007.

[۲] Rahman, Syed M.; Hassan, Tasnim, "Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic ending and steady internal pressure", Edmundo Corona, International Journal of Plasticity, Vol. 24, pp. 1756- 1791, 2008.

[۳] Xia, Z.; Kujawski, D.; Ellyin, F., "Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel", Int J. Fatigue Vol. 18 No. 5, pp. 335- 341, 1996.

[۴] Hartmann, Stefan, "Modeling and Simulation of Polyoxymethylene", PAMM Proc. Appl. Math. Mech., Vol. 5, pp. 273- 274, 2005.

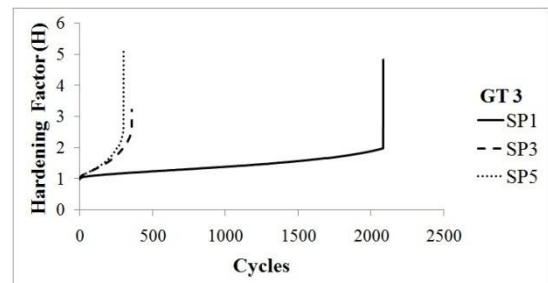
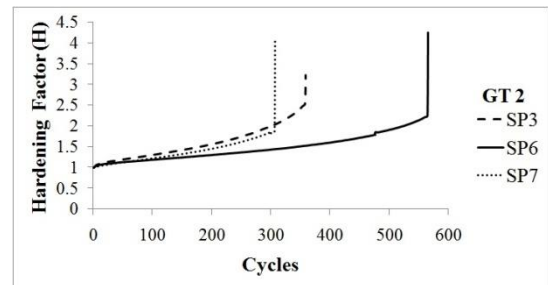
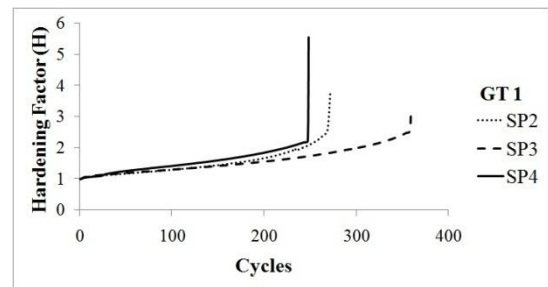
[۵] Chen, Xu; Hui, Shucai, "Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression", Polymer Testing, Vol. 24, pp. 829- 833, 2005.

[۶] Zhang, Zhe; Chen, Xu; "Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature", Polymer Testing, Vol. 28, pp. 288- 295, 2009.

[۷] Liu, Wei; Gao, Zongzhan; Yue, Zhufeng, "Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA", Materials Science and Engineering A, Vol. 492, pp. 102- 109, 2008.

[۸] Mohanraj, J.; Barton, D.C.; Ward, I.M.; Dahoun, A.; Hiver, J.M.; G'Sell, C, "Plastic deformation and damage of polyoxymethylene in the large strainrange at elevated temperatures", Polymer, Vol. 47, pp. 5852- 5861, 2006.

[۹] شریعتی، محمود، ایپک چی، حمیدرضا؛ حاتمی، حسین، "بررسی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری تناوبی"، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، اردیبهشت، ج. دوم، صفحه ۶۹، سال ۱۳۹۰.



شکل (۱۲): تغییرات عامل سخت‌شوندگی گروه‌های GT1 الی GT3

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌های تنش-کنترل در دمای محیط آزمایشگاه بر روی نمونه‌های پلی‌استال انجام شد. آزمایش‌هایی با دامنه‌ی تنش و تنش میانگین و فشار داخلی متفاوت انجام گرفت و رفتار کرنش، کرنش رچتینگ و شیب حلقه‌های هیستریزس و عامل سخت‌شوندگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عبارتند از:

۱- ملاحظه می‌شود نمونه‌ای که مقدار کرنش رچتینگ بیشتری دارد، عمر خستگی کمتری دارد.

۲- افزایش تنش میانگین و دامنه تنش منجر به کاهش عمر خستگی می‌شود.

۳- تنش میانگین اثر بیشتری نسبت به دامنه تنش داراست.

۴- در نمونه با مقادیر بارگذاری کمتر، مقادیر عامل سخت‌شوندگی بزرگتر بوده و یا به عبارتی رفتار نرم‌شوندگی بیشتری دیده می‌شود.

۵- با توجه به نمودار شکل‌های (۱۱) و (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت: نرم‌شوندگی بیشتر ماده باعث کاهش عمر خستگی می‌شود.

- reversed loading condition”, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, pp. 766- 775, 2011.
- Drozhdov, A.D., “Stress- and strain-controlled cyclic deformation of polypropylene”, Computational Materials Science, Vol. 58, pp. 35- 43, 2012. [۱۵]
- Tao, G.; Xia, Z., “Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life”, Polymer Testing, Vol. 26, pp. 451- 460, 2007. [۱۶]
- Paul, S.K.; Sivaprasad, S.; Dhar, S.; Tarafder, S., “Cyclic plastic deformation and cyclic hardening/softening behavior in 304LN stainless steel”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 54, pp. 63- 70, 2010. [۱۷]
- Shariati , M.; Hatami ,H.; Yarahmadi ,H.; Eipakchi ,H, “An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading”, Materials & Design, Vol. 34, pp. 302- 312, 2012. [۱۰]
- Shariati, M.; Hatami, H.; Eipakch, H.; Yarahmadi, Torabi, H., “Experimental and numerical investigation on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading”, Polymer- Plastic technology and engineering, Vol. 50, pp. 1- 7, 2011. [۱۱]
- Shariati, M.; Hatami, H., “Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 58, pp. 35- 43, 2012. [۱۲]
- Tsyban’ov , G.V.; Novikov , A.I., “Ultimate hardening/softening model of material for fatigue crack initiation onset and determination of its parameters”, International Journal of Fatigue, Vol. 39, pp. 15- 24, 2012. [۱۳]
- Chiou , Yung-Chuan; Jen, Yi-Ming; Weng, Wen-Kai, “Experimental investigation on the effect of tensile pre-strain on ratcheting behavior of 430 Stainless Steel under fully-

۶- زیر نویس ها

-
- ^۱ Xia
^۲ Tao
^۳ Hartmann
^۴ Chen
^۵ Hui
^۶ Zhang
^۷ Liu
^۸ Mohanraj
^۹ Gage length