





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

مطالعه رفتار رچتینگ لوله پلیمری تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی

دانشجو:

جواد یزدان نژاد

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اردیبهشت ۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جواد یزدان نژاد

تحت عنوان:

مطالعه رفتار رچتینگ لوله پلیمری تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
(رساله دکتری) مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			جناب دکتر محمود شریعتی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			جناب دکتر مهدی گردویی
			جناب دکتر حمیدرضا ایپکچی

تقدیم می‌کنم به

پدرم، که این روزها پدر بودنش را می‌فهمم و حس می‌کنم جای خالی اش را؛

مادرم، که به حق ایثار کرد تمام زندگی اش را و دیدن نشان ام تمام زندگی ام را؛

و خواهرانم، که مادرانه دلسوزم اند و پشتوانه زندگی ام.

باشد که ذره‌ای از محبتشان را سپاس کرده باشم.

پس از حمد و سپاس خداوند منان بر خود لازم می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از تمام کسانی که مرا در انجام پایان‌نامه یاری کردند، اعلام دارم. تشکر ویژه از جناب آقای دکتر شریعتی که همیشه برایشان زحمت داشتم و توفیق و افتخاری بود تا از علم و دریای تجربه ایشان بهره برم. همچنین از آقایان مهندس حاتمی، مهندس درزی، مهندس زمانی آقای، مهندس صمصامی، مهندس ضیایی، مهندس قارونی، مهندس کلاسنگیانی، مهندس نجاریان، مهندس نیازمند و آقای نباتیان برای تمام زحمتهایم سپاس گزارم.

اینجانب **جواد یزدان نژاد** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه: " مطالعه رفتار رچتینگ لوله پلیمری تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی " تحت راهنمایی **دکتر محمود شریعتی** متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

یکی از مودهای زوال حاصل از خستگی، پدیده رچتینگ است. رچتینگ پدیده ای است که تجمع افزایش یافته و تصاعدی تغییر شکل ماده تحت بارگذاری سیکلی مخصوصا به صورت تنش-کنترل با مقدار میانگین غیر صفر را در پی دارد. لذا ضروری است رفتار رچتینگ و عوامل موثر بر آن بررسی شود تا بتوان آن را کنترل و عمر خستگی قطعات را بیشتر کرد. از طرفی با توجه به کاربرد رو به افزایش ماده پلیمری پلی استال در قطعات صنعتی، مطالعه بر روی خواص خستگی آن من جمله رفتار رچتینگ امری لازم می نماید؛ بدین منظور آزمایش‌هایی تجربی برای تحقیق در این رابطه طراحی و انجام شد.

آزمایش‌هایی تجربی در این تحقیق به وسیله یک دستگاه پیشرفته سروهیدرولیکی انجام شد و اثر فرکانس، ضخامت، دامنه تنش، تنش میانگین و فشار داخلی بر کرنش رچتینگ یک لوله از جنس پلی-استال تعیین گردید. رابطه‌ای برای پیش بینی عمر خستگی بر اساس دو دیدگاه تنش و کرنش مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد دیدگاه تنش نسبت به دیدگاه کرنش در پیش بینی این امر موفق‌تر است. حل تحلیلی برای محاسبه ضریب پواسون در مناطق الاستیک و پلاستیک ارائه شد. همچنین مشاهده شد که اگر فرکانس از یک مقدار معینی بیشتر شود، زمان انجام آزمایش ثابت شده و تغییرات چندانی ندارد. اثر ضخامت لوله مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که اگر تنش محوری یکسانی به نمونه اعمال شود، ضخامت آن اثری بر عمر خستگی ندارد و با افزایش ضخامت، کرنش نهایی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد در یک بارگذاری یکسان، در فشار داخلی ۱۰ بار، نمونه بیشترین عمر خستگی و در فشار داخلی ۳۰ بار، کمترین عمر خستگی را به نمایش می‌گذارد.

واژگان کلیدی: پلی‌استال، کرنش رچتینگ، خستگی، فشار داخلی، آزمایش‌های تجربی، آزمایش-

های تنش-کنترل

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

[1] Mahmoud Shariati, Javad Yazdannezhad , An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading and internal pressure, The International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics, Iran University of Science and Technology, March 2012.

[۲] محمود شریعتی، جواد یزدان نژاد، بررسی تجربی اثر فرکانس و ضخامت بر رفتار رچتینگ لوله پلی‌استال تحت بارگذاری محوری تناوبی، یازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، اسفند ۱۳۹۰، صفحه ۲۱۶.

[۳] محمود شریعتی، جواد یزدان نژاد، بررسی رفتار رچتینگ و عمر خستگی لوله پلی‌استال تحت بار محوری تناوبی و فشار داخلی، بیستمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شیراز، اردیبهشت ۱۳۹۱، صفحه ۸۰.

[۴] محمود شریعتی، جواد یزدان نژاد، تحلیل تجربی رفتار رچتینگ لوله پلی‌استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره و فشار داخلی، مجله علمی پژوهشی امیرکبیر، تحت داوری.

دیگر مقالات مرتبط

[۵] محمود شریعتی، روح الله درزی، جواد یزدان نژاد، بررسی تجربی تاثیر گشودگی دایروی بر رفتار رچتینگ ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری محوری سیکلی، یازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، اسفند ۱۳۹۰، صفحه ۲۰۶.

[۶] محمود شریعتی، روح الله درزی، جواد یزدان نژاد، بررسی تجربی تاثیر اندازه شعاع گشودگی بر رفتار رچتینگ ورقهای مستطیلی حاوی گشودگی تحت بارگذاری محوری سیکلی، یازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، اسفند ۱۳۹۰، صفحه ۳۱۳.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ رچتینگ
۴	۳-۱ پلیمرها
۵	۱-۳-۱ تاریخچه پلیمرها
۶	۲-۳-۱ تقسیم بندی پلیمرها
۷	۳-۳-۱ پلیمرهای مهندسی
۱۱	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۱۹	فصل سوم: آزمایشات تجربی
۲۰	۱-۳ آماده سازی نمونه‌های آزمایش
۲۱	۲-۳ دستگاه آزمایش
۲۲	۳-۳ سیستم ایجاد فشار داخلی
۲۴	۴-۳ آزمایش کشش ساده
۲۶	۱-۴-۳ تعیین مدول یانگ و تنش تسلیم
۲۷	۵-۳ گروه‌بندی آزمایش های تنش - کنترل
۲۹	۱-۵-۳ حلقه های هیستریزس
۳۱	۱-۱-۵-۳ اثر فشار داخلی
۳۵	۲-۱-۵-۳ اثر دامنه تنش
۳۶	۳-۱-۵-۳ اثر تنش میانگین
۳۸	۲-۵-۳ کرنش رچتینگ
۴۳	۳-۵-۳ حدود تغییرات کرنش

۴۷	۴-۵-۳ شیب حلقه هیستریزیس
۵۲	۵-۵-۳ عامل سخت شوندگی
۵۵	۶-۳ اثر ضخامت لوله و فرکانس بارگذاری
۵۵	۱-۶-۳ نحوه آزمایش
۵۶	۲-۶-۳ بررسی شیب حلقه هیستریزیس
۵۹	فصل چهارم: تحلیل نتایج
۶۰	۱-۴ معیارهای خستگی
۶۰	۱-۱-۴ خستگی از دیدگاه تنش
۶۴	۲-۱-۴ خستگی از دیدگاه کرنش
۶۸	۲-۴ محاسبه تحلیلی کرنش شعاعی
۷۲	۳-۴ بررسی اثر ضخامت و فرکانس
۷۵	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۷۶	۱-۵ نتیجه‌گیری
۷۹	۲-۵ پیشنهادات
۸۰	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: چند نمونه پلی‌استال
- شکل ۱-۳: هندسه نمونه آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)
- شکل ۲-۳: نقشه فیکسچر مورد استفاده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)
- شکل ۳-۳: هندسه فیکسچرهای استفاده شده در آزمایش‌های تجربی
- شکل ۴-۳: دستگاه سروهیدرولیک به همراه سیستم ایجاد فشار داخلی
- شکل ۵-۳: شماتیک سیستم هیدرولیکی ایجاد فشار داخلی
- شکل ۶-۳: سیستم هیدرولیکی ایجاد فشار داخلی
- شکل ۷-۳: نمودار نیرو جابجایی ماده پلی‌استال
- شکل ۸-۳: نمودار تنش کرنش-حقیقی ماده پلی‌استال
- شکل ۹-۳: نحوه محاسبه تنش تسلیم و مدول یانگ
- شکل ۱۰-۳: حلقه هیستریزس
- شکل ۱۱-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT1
- شکل ۱۲-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT2
- شکل ۱۳-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT3
- شکل ۱۴-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT4
- شکل ۱۵-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT5
- شکل ۱۶-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT6
- شکل ۱۷-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT7
- شکل ۱۸-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT8
- شکل ۱۹-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT9
- شکل ۲۰-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT10
- شکل ۲۱-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT11
- شکل ۲۲-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT12
- شکل ۲۳-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT13
- شکل ۲۴-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT14
- شکل ۲۵-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT15
- شکل ۲۶-۳: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT16
- شکل ۲۷-۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1
- شکل ۲۸-۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2
- شکل ۲۹-۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3
- شکل ۳۰-۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4

۴۰	شکل ۳-۳۱: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT6
۴۱	شکل ۳-۳۲: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT7
۴۱	شکل ۳-۳۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT8
۴۱	شکل ۳-۳۴: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9
۴۱	شکل ۳-۳۵: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT10
۴۲	شکل ۳-۳۶: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT11
۴۲	شکل ۳-۳۷: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT12
۴۲	شکل ۳-۳۸: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT13
۴۲	شکل ۳-۳۹: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT14
۴۳	شکل ۳-۴۰: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT15
۴۳	شکل ۳-۴۱: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT16
۴۳	شکل ۳-۴۲: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1
۴۴	شکل ۳-۴۳: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2
۴۴	شکل ۳-۴۴: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3
۴۴	شکل ۳-۴۵: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4
۴۴	شکل ۳-۴۶: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT5
۴۵	شکل ۳-۴۷: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT6
۴۵	شکل ۳-۴۸: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT7
۴۵	شکل ۳-۴۹: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT8
۴۵	شکل ۳-۵۰: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9
۴۶	شکل ۳-۵۱: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT10
۴۶	شکل ۳-۵۲: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT11
۴۶	شکل ۳-۵۳: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT12
۴۶	شکل ۳-۵۴: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT13
۴۷	شکل ۳-۵۵: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT14
۴۷	شکل ۳-۵۶: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT15
۴۷	شکل ۳-۵۷: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT16
۴۸	شکل ۳-۵۸: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT1
۴۸	شکل ۳-۵۹: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT2
۴۸	شکل ۳-۶۰: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT3
۴۹	شکل ۳-۶۱: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT4
۴۹	شکل ۳-۶۲: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT6
۴۹	شکل ۳-۶۳: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT7
۴۹	شکل ۳-۶۴: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT8
۵۰	شکل ۳-۶۵: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT9

- شکل ۳-۶۶: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT10 ۵۰
- شکل ۳-۶۷: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT11 ۵۰
- شکل ۳-۶۸: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT12 ۵۰
- شکل ۳-۶۹: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT13 ۵۱
- شکل ۳-۷۰: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT14 ۵۱
- شکل ۳-۷۱: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT15 ۵۱
- شکل ۳-۷۲: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT16 ۵۱
- شکل ۳-۷۳: عامل سخت شوندگی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT1 تا GT7 ۵۴
- شکل ۳-۷۴: عامل سخت شوندگی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT8 تا GT10 ۵۴
- شکل ۳-۷۵: عامل سخت شوندگی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT11 تا GT16 ۵۵
- شکل ۳-۷۶: شیب حلقه هیستریزس برای نمونه با ضخامت‌های مختلف ۵۷
- شکل ۴-۱: تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش ۶۲
- شکل ۴-۲: برازش منحنی توانی از دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی ۶۲
- شکل ۴-۳: تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش ۶۳
- شکل ۴-۴: نمودار دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی ۶۴
- شکل ۴-۵: معرفی دامنه کرنش و کرنش میانگین ۶۵
- شکل ۴-۶: برازش منحنی توانی از داده‌های دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی ۶۵
- شکل ۴-۷: تابع کرنش میانگین برای دیدگاه کرنش ۶۶
- شکل ۴-۸: نمودار دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی ۶۷
- شکل ۴-۹: کرنش الاستیک، پلاستیک و کلی ۶۹
- شکل ۴-۱۰: تغییرات ضریب پواسون با تنش ۶۹
- شکل ۴-۱۱: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با ضخامت‌های مختلف ۷۴
- شکل ۴-۱۲: نمودار زمان آزمایش و تعداد سیکل بر حسب فرکانس ۷۴

فهرست جداول

۲۶	جدول ۱-۳: خواص مکانیکی پلی استال
۲۸	جدول ۲-۳: مقادیر تنش و فشار داخلی اعمالی در آزمایش های تجربی
۲۹	جدول ۳-۳: نحوه گروه بندی آزمایش های تجربی
۵۶	جدول ۴-۳: کمیت های اعمال شده و اندازه گیری شده در نمونه های آزمایش
۵۶	جدول ۵-۳: کمیت های اعمال شده و اندازه گیری شده در نمونه های آزمایش
۶۷	جدول ۱-۴: مقایسه مقادیر تجربی و پیش بینی عمر خستگی
۷۲	جدول ۲-۴: خلاصه آزمایش های تجربی

فهرست علائم

θ	اتساع
γ	ثابت ماده
κ	ثابت ماده
η	ثابت ماده
n	ثابت ماده
ψ_0	حد خستگی
σ_{eq}	دامنه تنش معادل
$\Delta\sigma_s$	دامنه تنش در هر سیکل
$\Delta\sigma_1$	دامنه تنش در سیکل ابتدایی
$\Delta\varepsilon_s$	دامنه کرنش در هر سیکل
$\Delta\varepsilon_1$	دامنه کرنش در سیکل ابتدایی
$\Delta\varepsilon^p$	دامنه کرنش پلاستیک
$\Delta\varepsilon^e$	دامنه کرنش الاستیک
v	ضریب پواسون
H_e	عامل سخت شوندگی برای آزمایش های کرنش-کنترل
H_s	عامل سخت شوندگی برای آزمایش های کرنش-کنترل
N_f	عمر خستگی
ψ	کمیت آسیب
SR	نسبت کرنش

مقدمه

۱-۱ مقدمه

شروع پیدایش شاخه مقاومت مصالح به نیمه دوم قرن نوزدهم و با ارائه روابطی از سوی لوی^۱ بوده است. اما با توجه به تجربه شکست‌ها و زوال سازه‌ها حتی در بارهایی کمتر از حد تسلیم، شاخه‌ای به نام خستگی در نیمه دوم قرن بیستم پدید آمد. لذا خستگی بحثی بسیار مهم در طراحی یک سازه مهندسی می‌باشد. تحقیقات بسیاری تا بحال و برای انواع مواد، بارگذاری و هندسه‌های مختلف انجام شده است. در نهایت در اواخر قرن بیستم و یا به عبارتی دیگر در دهه ۸۰ میلادی تحقیقات بر روی رفتار رچتینگ شروع شده و ادامه دارد [۱].

یک نگرانی بسیار مهم در تاسیسات نیروگاه‌های هسته‌ای، صنایع شیمیایی و سازه‌های دریایی و اجزای ماشین و ساختمان‌های فلزی و سازه‌های پل‌ها تحت یک زوال خستگی کم چرخه، غیر قابل انتظار و پیش بینی 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 شرایطی سرویس دهی و تنش‌های گرمایی و مکانیکی باشد، ایجاد شود.

سازه‌های مهندسی عموماً تحت بارگذاری سیکلی و تناوبی می‌باشند که این بارگذاری می‌تواند تحت یک تنش میانگین و یا یک کرنش میانگین باشد. می‌دانیم که فرایند خستگی به تنش میانگین کششی چه در خستگی کم چرخه و چه خستگی پرچرخه حساس است. به این ترتیب نیز می‌توان توضیح داد که تنش میانگین مثبت باعث افزایش و رشد بازشدن ترک شده و خرابی خستگی را سرعت می‌بخشد [۲]. از طرفی تصور جهان پیشرفته کنونی بدون وجود مواد پلیمری مشکل می‌باشد. امروزه این مواد جزئی از زندگی ما شده‌اند و در ساخت اشیای مختلف، از وسایل زندگی و مورد مصرف عمومی تا ابزار دقیق و

^۱Levy

پیچیده پزشکی و صنعتی بکار می‌روند. در صنعت مواد پلیمری زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماده پلیمری پلی‌استال با توجه به خواص خستگی و سایشی ویژه و بسیار بالا به عنوان پلیمری صنعتی توانسته است جای خالی بعضی از فلزات را در موارد خاص پر نماید. با توجه به کاربرد این ماده در مواردی با عمر خستگی بالا مطالعه بر روی خواص خستگی آن من جمله رفتار رچتینگ امری لازم می‌نماید.

در ادامه این فصل ضمن آشنایی با پلیمرها و انواع آن، پلی‌استال و کاربردهایش، همچنین مفاهیم اصلی مرتبط با این تحقیق توضیح داده شده است. در فصل دوم به مرور کارهای انجام شده در زمینه رچتینگ و به خصوص برای مواردی که تحت فشار داخلی بوده و یا ماده مورد تحقیق پلیمر بوده است، اختصاص یافته است. دستگاهی به منظور انجام آزمایش‌های فشار داخلی طراحی و ساخته شد که در فصل سوم در مورد آن توضیح داده شده است. با انجام یک مجموعه آزمایش و بدست آوردن نیرو و جابجایی و تبدیل آنها به تنش و کرنش، کمیت‌هایی تعریف شده و نمودارهای مختلفی رسم شده و نتایجی از آنها بدست آمده است که در فصل سوم آمده است. در فصل چهارم داده‌ها مورد بررسی و تحقیق واقع شده است. ابتدا برای آزمایش‌های بدون فشار داخلی با بدست آوردن رابطه‌ای، عمر خستگی پیش‌بینی می‌شود. همچنین با حل تحلیلی رابطه‌ای به منظور محاسبه ضریب پواسون ارائه شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری، جمع بندی و ارائه پیشنهادها به منظور ادامه تحقیق بیان شده است.

۲-۱ رچتینگ

رچتینگ پدیده‌ای است که در آن تجمع افزایشنده و تصاعدی تغییر شکل در حین آنکه ماده تحت بارگذاری سیکلی مخصوصا به صورت تنش-کنترل با مقدار میانگین غیر صفر باشد، وجود دارد. برای مواد فلزی وقتی که تنش از میزان حد تسلیم فراتر رود و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شود، رچتینگ اتفاق می‌افتد [۳].

در طی بارگذاری سیکلی الاستیک، زوال خستگی شامل رشد و انباشتگی تغییر شکل و یا کرنش در منطقه تغییر شکل پلاستیک است که تحت عنوان پدیده رچتینگ شناخته می‌شود. وجود رچتینگ در حین بارگذاری سیکلی معمولاً باعث کاهش زمان شروع ترک شده و در نهایت باعث فروپاشی سازه می‌شود [۲].

در حالت تنش-کنترل، تغییر شکل پلاستیک باعث پدیده کرنش رچتینگ شده و تجمع کرنشها باعث کاهش عمر خستگی می‌شود. رفتار رچتینگ یک پدیده پیچیده است که شامل عوامل مختلفی چون تنش میانگین، دامنه تنش، فرکانس، تاریخچه بارگذاری و ساختار میکروسکوپی ماده می‌باشد. همین نکته باعث پیچیدگی رفتار آن شده است که بطوری که به راحتی نمی‌توان یک مدل رفتاری که دقیقاً رفتار رچتینگ را پیش‌بینی کند، ایجاد کرد [۱]. این نکته خود بسیار مساله ساز است؛ زیرا اگر زوال خستگی رچتینگ قابل پیش‌بینی نباشد، آنگاه زوال خستگی در یک موقعیت نایمن و بدون اخطار قبلی اتفاق می‌افتد. در نتیجه یک چنین اتفاقی می‌تواند یک نیروگاه را از کار بیندازد و یا یک پل شلوغ را دچار حادثه‌ای ناگوار سازد [۲].

۱-۳ پلیمرها

کلمه پلیمر از کلمه یونانی (Poly) به معنی چند و (Meros) به معنای واحد یا قسمت به وجود آمده است. معادل فارسی آن واژه بسپار است که از دو بخش بس (بسیار) و پار (پاره، قطعه) تشکیل شده است. در این میان ساختمان پلیمرها با مولکولهای بسیار دراز زنجیر گونه با ساختمان فلزات کامل متفاوت است. این مولکولهای بلند از اتصال و به هم پیوستن هزاران واحد کوچک مولکولی مرسوم به مونومر تشکیل شده‌اند. مواد طبیعی مانند ابریشم، لاک، قیر طبیعی، کشانها و سلولز ناخن دارای چنین ساختمان مولکولی هستند.

۱-۳-۱ تاریخچه پلیمرها

برای اولین بار بریزیلیوس در سال ۱۸۳۲ واژه پلیمر را به کار برده است. این واژه ۳۴ سال بعد نیز مجدداً با همین مفهوم توسط برتوله^۱ مورد استفاده قرار گرفت. برتوله دریافت که استیلن بر اثر حرارت می‌تواند به پلیمرهای خود یعنی بنزن و استایرن تبدیل شود. هرچند امروزه واژه پلیمر به زنجیری که دارای تعداد زیادی واحد منومری است اطلاق می‌گردد. نخستین لاستیک مصنوعی، سلولوئید است که از نیترو سلولز و کافور توسط پارکر^۲ در سال ۱۸۶۵ تهیه شد. استات سلولز در سال ۱۸۹۴ توسط دکرس^۳ سنتز شد و در سال ۱۹۰۵ توسط میلز^۴ کامل شد. در سال ۱۹۰۰ میلادی رم^۵، پلیمریزاسیون ترکیبات آکریلیک را آغاز کرد و در سال ۱۹۰۱، اسمیت نخستین فتالات گلسیرین (یا فتالات گلسیریل) را تهیه کرد. اولین پلیمر کاملاً مصنوعی تجاری، پلاستیک‌های فنل-فرمالدئید بودند که در سال ۱۹۰۷ بوسیله بیکلند ساخته شدند و باکلیت نام گرفتند که در تهیه قطعات الکتریکی، کلیدها، پریزها و وسایل مصرف زیادی دارد. در سال ۱۹۳۰، عمل پلیمریزاسیونو الکلاسیون کشف شد و در صنعت به کار گرفته شد. در سال ۱۹۳۴، کارخانه (ICI) موفق به تهیه مولکولهای بزرگ پلی اتیلن شد. نئوپرن را شرکت دوپان^۶ در سال ۱۹۳۲ ابداع و به شکل تجاری ابتدا با نام دوپرن و بعدها نئوپرن عرضه کرد. دوپن به طور منظم در زمینه تراکم مواد بررسی‌هایی انجام دارد که در نتیجه، به تهیه پلی آمیدها یعنی الیاف نایلون دست یافت و الیاف پلی-آمید را از کاپرولاکتام تهیه کرد که به الیاف پرلون شهرت یافت [۳-۴].

^۱ Bertulet

^۲ Paeker

^۳ deckres

^۴ Miles

^۵ Rome

^۶ Dupont

۱-۳-۲ تقسیم بندی پلیمرها

پلیمرها را می‌توان با توجه به صنایع، منبع، عبور نور، واکنش حرارتی، واکنش‌های پلیمریزاسیون، ساختمان مولکولی و ساختمان کریستالی، طبقه بندی نمود. از نظر صنایع مادر، به چهار گروه صنایع لاستیک، پلاستیک، الیاف پوششی و چسب تقسیم بندی می‌شوند. صنایع وابسته به پلیمر هم فراوان هستند مانند صنعت پزشکی در اعضای مصنوعی، دندان مصنوعی، پرکننده‌ها و اورتوپدی از پلیمرها به وفور استفاده می‌شود. پلیمرها از لحاظ منبع به سه گروه اصلی تقسیم بندی می‌شوند که عبارتند از: پلیمرهای طبیعی، طبیعی اصلاح شده و مصنوعی. از نظر رفتار، پلیمرها به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: پلاستیک‌های گرمانرم، پلاستیک‌های گرما سخت یا ترموست‌ها، الاستومرها [۵]. در ادامه تقسیم بندی پلیمرها بر اساس رفتار آن شرح داده شده است.

الف) ترموپلاستیک‌ها

ترموپلاستیک‌ها مانند نایلون، با افزایش دما نرم شده و با خنک شدن به سختی اولیه شان بر می‌گردند و بیشتر قابل ذوب هستند، و می‌توان آنها را قالب گیری کرد؛ دارای ساختار دو بعدی اند و در حلال حل می‌شوند. پلاستیک‌های گرما سخت (ترموست‌ها) وقتی گرم می‌شوند، سخت شده و هنگام سرد شدن به سختی اولیه بر می‌گردند. این مواد توسط کاتالیزورها یا گرم شدن، تحت فشار به یک شکل دائمی تبدیل می‌شوند. الاستومرها نظیر لاستیک‌ها می‌توانند بدون پاره شدن و گسستن در برابر تغییر شکل مقاومت کنند. از مواد ترموپلاستیک‌های معروف می‌توان به پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) و پلی‌اتیلن و پلی‌آمیدها (PA) اشاره کرد [۵-۶].

ب) ترموست ها

ترموست‌ها، پلیمرهایی هستند که بر اثر گرما، نرم نمی شوند و قابلیت قالب گیری مجدد ندارند؛ دارای ساختار سه بعدی اند و در حلال حل نمی شوند. پلی اورتان ها (PUR) و رزین‌های اپوکسی (EP) از این قبیل اند [۵-۶].

ج) الاستومرها

الاستومر، پلیمری است که قابلیت ارتجاعی زیادی داشته و می‌توان آنرا تراکم ناپذیر فرض کرد. نام الاستومر از دو قسمت الاستو (برگرفته از الاستیک و به معنای ارتجاعی) و مر (بر گرفته از پلیمر) تشکیل شده است. لاستیک‌ها و الاستومرها عمدتاً به عنوان مواد پوشش برج ها، مخازن، تانک ها، و لوله ها استفاده می شوند. مهمترین کاربرد لاستیک‌های سنتزی، در ساخت انواع تایر اتومبیل سواری، کامیون و هواپیما، ساخت کفش، تسمه و نوارهای نقاله، مصنوعات ابر شکل، روکش کابل و سیم، لوله ها و وسایل لاستیکی است. همچنین از این ماده ارزشمند در صنایع پالایش، شیمیایی، رنگسازی، چرم مصنوعی، پوشش نخ و پارچه، نوارهای لاستیکی، پوشش مخازن و لوله ها، لاستیک های ضربه گیر و صدا گیر، ساخت قطعات مکانیکی، واشرها استفاده می‌گردد. از لاستیک‌های طبیعی و لاستیک‌های مصنوعی می‌توان به ترانس پلی‌ایزوپرن سیس- پلی بوتادین، اشاره کرد. تفاوت لاستیک‌ها و الاستومرها در کاربردهای خاص، مشخص می شود [۵-۶].

۱-۳-۳ پلیمرهای مهندسی

بسپارها یا پلاستیک‌های مهندسی، به گروهی از پلاستیک‌ها که از خواص مکانیکی و حرارتی بالایی برخوردار بوده و به طور کلی در مقابل اعمال بار و حرارت و خوردگی کم و بیش، مقاومت از خود نشان

می‌دهند، گفته می‌شود. برخورداری از استحکام بالا و وزن پایین، داشتن مقاومت بالای شیمیایی، حرارتی و خوردگی به همراه خواص الکتریکی قابل قبول و انعطاف پذیری در طراحی و شکل‌دهی، این دسته از بسپارها را از بسپارهای اساسی متمایز ساخته است؛ به طوری که از آنها به نام بسپارهای مهندسی یاد می‌شود و در برخی کاربردهای خاص جایگزین فلزات نیز شده‌اند. کاربردهای دیگر آن در صنایع پیشرفته هوافضا، اتومبیل‌سازی، الکترونیک و ساختمان، تولید محصولات و لوازم طبی، خانگی، صنعتی و تجاری است. از مهمترین پلیمرهای مهندسی می‌توان پلی کربنات، پلی بوتیلن تر فتالات، پلی آمیدها، پلی متیل متاکریلات، چسب پوشش، پلی‌اورتان و پلی‌استال نام برد [۵].

الف) پلی استال

پلی استال، گرما نرمی محکم، سخت، به شدت کریستاله و مقاوم به مواد شیمیایی مشتمل بر بازها و اسیدها بوده و در برابر سایش و تنش‌های فیزیکی بسیار پایدار است. در بسیاری موارد جایگزین فلزاتی مانند استیل، آلومینیوم، برنج می‌گردد. سرعت رشد و مطلوبیت این پلیمر به دلیل خواص مکانیکی خوب، مقاومت به رطوبت و نیز ماشین کاری آسان به صورت فزاینده در صنعت قابل مشاهده است. پلی‌استال را با اسامی مختلفی چون پلی‌اکسی متیلن^۱، دلرین^۲، استال^۳، سلکون^۴ و الترافوم^۵ نیز می‌شناسند [۷].

مزایای پلی‌استال:

۱. مقاومت به فرسودگی بالا

۲. استحکام ابعادی خوب

^۱ polyoxymethylene

^۲ Delrin

^۳ Acetal

^۴ Celcon

^۵ Ultraform

۳. ضریب سایش پایین

۴. مقاومت به فشردگی و ضربه حتی در دماهای پایین

۵. قابلیت ماشین کاری عالی بخصوص در ماشین آلات اتوماتیک

معایب پلی استال

در مقایسه با PA 6 (پلی آمید) به خصوص در محیط های کثیف و گرد و خاکی دارای مقاومت کمتری در برابر خراشیدگی است.

کاربردهای پلی استال

۱. کاربرد مکانیکی: این پلیمر یکی از پر مصرف ترین پلاستیک های مهندسی قابل استفاده در

کاربردهای مکانیکی است مانند: بوش و یاتاقان، اجزای پمپ عایق ها، گوشواره، جعبه دنده با

گشتاور پایین، چرخ دنده ها، نوارهای نقاله و تجهیزات ماشین آلات دقیق که نیازمند استحکام

ابعادی مناسب و تلورانس محکم و ثابت می باشند.

۲. غذایی: به سبب خاصیت فیزیولوژی بی اثر و امکان استفاده در آب ۸۰ درجه در این صنعت

کاربرد فراوان دارد.

۳. الکتریکی: این پلیمر نمگیر نمی باشد به همین دلیل کاربرد زیادی در عایق ها دارد.

۴. شیمیایی: به سبب مقاومت به قلیا و مواد آلی، مناسب جهت بسیاری از پمپ ها، فلنج ها

و تجهیزات کارخانجات شیمیایی می باشد.



شکل ۱-۱: چند قطعه ساخته شده از پلی استال [۷]

مروری بر

تحقیقات گذشته

در این فصل چندین مقاله را در حد امکان مرور کرده و سعی شده است انتخاب آنها به نحوی باشد تا بیشتر کارهای انجام شده در خصوص رچتینگ پلیمرها و ماده پلی استال را پوشش دهد.

رحمان^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ تست‌های آزمایشگاهی برای لوله‌های استیل مستقیم تحت خمش سیکلی با چرخش متقارن انتهایی آن و فشار داخلی پایا انجام دادند و از طریق هفت مدل پلاستیسیته سیکلی، شبیه سازی رچتینگ یک سازه را محاسبه کردند. مدل‌ها عبارت بودند از: دو خطی (پراگ)، چند خطی (بسلینگ)، چابوچه، اوهنو-وانگ، عبدالکریم اوهنو، چابوچه تصحیح شده (باری و حسن) و اوهنو-وانگ تصحیح شده (چن ژائو) [۲].

تائو^۲ و زیا در سال ۲۰۰۷ رفتار رچتینگ یک اپوکسی رزین و اثرات آن روی عمر خستگی به صورت تست آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار دادند. نشان دادند کرنش رچتینگ و نرخ انباشتگی آن به دامنه تنش و مقدار تنش میانگین حساس است. عمر خستگی این تست‌ها با تست‌های 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. همچنین نشان دادند که در تست‌های با تغییرات دامنه تنش ولی دامنه تنش یکسان و ثابت، تغییرات کرنش در سطح تنش‌های میانگین بالاتر کاهش می‌یابد. هر چند تغییرات کرنش با افزایش تعداد سیکل‌ها تقلیل می‌یابد. همچنین کرنش رچتینگ و اثر آن روی عمر خستگی با مقایسه با عمر خستگی منتج شده از نتایج تست کرنش-کنترل مقایسه شد و نشان دادند که کرنش رچتینگ در این پلیمر بر روی عمر خستگی تاثیر چندانی ندارد. این نتیجه حاصل شد که کرنش رچتینگ در این پلیمر اپوکسی تغییر شکل ویسکوالاستیک غالباً قابل بازیافتی است که خرابی در ماده را نشان نمی‌دهد [۸].

^۱Rahman

^۲Gang Tao

هارتمن^۱ رفتار پلی استال را در سال ۲۰۰۵ مورد مطالعه قرار داد. وی مشاهده کرد این پلیمر دارای رفتاری کششی و فشاری نامتقارن است. رفتار رهاش عدم تقارن کشش و فشار به وسیله تست الاستیک متعادل تنش مدل شده که قسمت هیستریزیس به وسیله معادله تعاملی آرمسترانگ فردریک توصیف می-شود. یک تابع ویسکوزیته جزئی برای توصیف کرنش ویسکوزی که در قسمت‌هایی که تنش بالایی دارند، استفاده شده است [۹].

شن^۲ و هوی^۳ در سال ۲۰۰۵ در طی مقاله‌ای وابستگی نرخ بارگذاری بر روی پاسخ تنش کرنش و رفتار رچتینگ PTFE پلی تترا فلئوراتیل تحت فشار مورد مطالعه قرار داده‌اند. نشان داده شد که PTFE یک ماده‌ای است که به نرخ بارگذاری وابسته است؛ ولی اگر نرخ بیشتر از 40N/s شود، دیگر به نرخ حساس نیست. همچنین نرخ بارگذاری یک اثر کمی روی نرخ کرنش رچتینگ دارد. در یک دامنه تنش ثابت (تنش میانگین ثابت) کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ وقتی که تنش میانگین (دامنه تنش) کاهش یابد، افزایش می‌یابد. وابستگی به نرخ بارگذاری با افزایش نرخ بارگذاری ضعیف‌تر می‌شود. برای نرخ‌های بارگذاری ۲۰۰N/s تا ۴۰۰ N/s منحنی تنش-کرنش در اصل منطبق می‌شود. در پایان با این آزمایشات نتیجه شده است که ماده PTFE در نرخ‌های بیشتر از ۴۰ N/s دیگر به نرخ بارگذاری چندان حساسیتی ندارد. همچنین مشاهده شد کرنش رچتینگ و نرخ کرنش آن با افزایش نرخ بارگذاری کاهش می‌یابد. در یک تنش میانگین ثابت و دامنه‌های تنش مختلف، کرنش رچتینگ با افزایش دامنه افزایش می‌یابد. در یک دامنه تنش ثابت و تنش میانگین متفاوت، کرنش رچتینگ با افزایش تنش میانگین افزایش می‌یابد. تنش میانگین اثر بیشتری نسبت به دامنه تنش بر روی کرنش رچتینگ دارد. کرنش

^۱Stefan Hartmann

^۲Xu Chen

^۳Hui

رچتینگ در سیکل اول از مابقی بیشتر است و افزایش کرنش رچتینگ برای هر سیکل بعدی کوچک و کوچکتر می‌شود. بعد از ۲۰۰ سیکل کرنش رچتینگ به حالت اشباع می‌رسد [۱۰].

ژانگ^۱ و شن^۲ در سال ۲۰۰۹ یک سری آزمایشات بر روی قطعات استوانه‌ای توپر PTFE انجام دادند. تست‌ها به صورت کرنش برشی سیکلی همراه با تنش محوری در دمای اتاق است. اثرات تنش محوری با محدوده تغییرات کرنش برشی و نرخ کرنش برشی و تاریخچه آن بر روی رفتار PTFE مورد مطالعه قرار گرفته است. 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. تحت شرایط بارگذاری چند محوره خاصی با تنش محوری ثابت و بارگذاری پیچشی سیکلی، رفتار رچتینگ بستگی به تنش محوری محدوده کرنش برشی و نرخ کرنش برشی دارد. کرنش رچتینگ وقتی که تنش ثابت و یا محدوده کرنش برشی بزرگتر شود و یا نرخ کرنش برشی کمتر شود، با سرعت افزایش می‌یابد. اثر تنش محوری محدوده کرنش برشی و نرخ کرنش برشی بر روی رفتار رچتینگ در آزمایش‌های چند مرحله‌ای (تاریخچه بارگذاری) مطرح شد. سیکل‌های منحنی با سطح تنش محوری بالاتر محدوده کرنش برشی بالاتر و یا نرخ کرنش برشی کمتر به شدت کرنش رچتینگ مراحل بعدی را در سطح کمتری بازتولید می‌کند. در نهایت اینکه رچتینگ چند محوره نسبت به تاریخچه بارگذاری حساس است [۱۱].

لیو^۳ 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. نتایج نشان داده شد که رشد رچتینگ پایا با دما و بارگذاری اعمال شده تغییر می‌کند. با توجه به بستگی بین کرنش رچتینگ در هر سیکل و انرژی حلقه هیستریزیس یک مدل جدید برای تجمع کرنش رچتینگ توسعه داده شد که اثرات

^۱Zhe Zhang

^۲Xu Chen

^۳Liu

دما، فرکانس بارگذاری و تنش میانگین و دامنه تنش بر روی انباشتگی نرخ کرنش رچتینگ را توضیح می‌دهد. با مقایسه بین مدل ارائه شده و داده های تجربی مشاهده می‌شود که مدل به خوبی و با دقت رفتار انباشتگی کرنش رچتینگ پایا تحت شرایط دلخواه بارگذاری و دمایی را پیش بینی می‌کند. با افزایش دامنه و یا افزایش سطح تنش، میزان کرنش رچتینگ نیز افزایش می‌یابد [۱۲].

در سال ۲۰۰۶ مهان راج^۱ و همکاران به بررسی تغییر شکل پلاستیک پلی استال در شرایط کرنش صفحه‌ای فشاری در دمای ۱۲۰ تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد و کرنش غیر محوری و برش ساده در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد پرداختند. تاثیرات دما و کرنش را بر روی تنش اعمالی مورد بررسی قرار دادند. تمام تست‌ها مراحل تغییر شکلی شبیه رفتار ویسکوالاستیک حول نقطه تسلیم را از خود نشان دادند. در کرنش صفحه‌ای فشاری مقدار کمی افزایش تنش مشاهده شد که در مقابل، در کشش غیر محوری سخت شوندگی کرنش قابل توجهی در کرنش های زیاد مشاهده شد [۱۳].

ژائو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۶ با یک دستگاه خمش سه نقطه ای به صورت آزمایشگاهی یک لوله استیل تحت فشار درونی و خمش برگشتی را آزمایش کردند. شبیه سازی رچتینگ با مدل سازی اجزای محدود نرم افزار ANSYS به صورت الاستوپلاستیک انجام شده است که از مدل اوهنو-وانگ و همچنین مدل اصلاح شده آن استفاده شده است. خمش چند مرحله ای نشان می‌دهد که نرخ رچتینگ با افزایش سطح بارگذاری افزایش می‌یابد. فشار درونی لوله مقادیر ۲۵MPa، ۲۰، ۱۸، ۱۰ بوده است [۱۴].

کولاک^۳ در سال ۲۰۰۸ تست‌هایی به صورت تنش-کنترل غیرمحوری با تنش میانگین غیر صفر و کرنش-کنترل محوری برای لوله ای جدار نازک از فولاد CS 1026 با فشار داخلی انجام دادند. نتایج عددی

^۱Mohanraj

^۲Gao

^۳Coolack

با داده‌های تجربی مقالات حسن و کیریایکدس^۱ مقایسه شده است. قواعد سخت شوندگی سینماتیکی زیر در نظر گرفته شده است: قاعده سخت شوندگی سینماتیکی کلاسیک، قواعد سخت شوندگی سینماتیکی که ارائه شده توسط فردریک^۲ و آرمسترانگ^۳، کایلتاد^۴ و بورلت^۵ و نسخه اصلاح شده آن می‌باشد. مشاهده می‌شود که قواعد سخت شوندگی موجود رفتار رچتینگ را تحت بارگذاری چند محوره به خوبی نشان نمی‌دهد [۱۵].

شریعتی 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 [۱۶]. در سال ۲۰۱۱ شریعتی و همکاران به مطالعه تجربی رفتار پلی‌استال تحت بارگذاری متناوب تک محوره پرداختند. نشان دادند که بزرگی و نرخ کرنش رچتینگ به دامنه تنش و تنش میانگین اعمال شده حساس بوده و ماده از خود رفتار نرم شوندگی نشان می‌دهد. به منظور اعمال اثر تنش میانگین بر عمر خستگی پلی‌استال تابع تنش میانگین در قالب کمیت آسیب معادل معرفی و ثوابت ماده برای تنش، کرنش و انرژی کالیبره نمودند. در انتها مشخص شد که دیدگاه‌های تنش و انرژی نسبت به کرنش توفیق بیشتری در پیش بینی عمر خستگی پلی‌استال دارند [۱۷].

شریعتی و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار نرم شوندگی 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 سخت شوندگی ایزوتروپیک، سخت شوندگی سینماتیکی خطی و مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک غیرخطی انجام شده است [۱۸].

^۱Kyriakides

^۲Fredrich

^۳Fredrick-Armstrong

^۴Burlet-Cailletaud

^۵Borlet

شریعتی و حاتمی در سال ۲۰۱۲ رفتار رچتینگ و نرم‌شوندگی پوسته استوانه‌ای آلیاژ 304L را مورد مطالعه قرار دادند. اثر دامنه تنش و گشودگی بر رچتینگ در آزمایشات تنش-کنترل و رفتار نرم شوندگی در آزمایشات کرنش-کنترل را بررسی کردند و نشان دادند افزایش شعاع گشودگی و دامنه تنش موجب افزایش کرنش رچتینگ می‌شود [۱۹].

در سال ۲۰۰۸ ایسوبی^۱ و همکاران اثر رچتینگ را بر مقاومت خستگی ورق، به منظور توجیه حد کرنش، به عنوان یک معیار طراحی در سیستم‌های رآکتور سریع، بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند هنگامی که کرنش تجمعی با رچتینگ افزایش می‌یابد، عمر خستگی سازه کاهش می‌یابد. همچنین ایشان رفتار رشد میکروتکرک را بر مکانیسم کاهش عمر سازه در شرایط رچتینگ مطالعه کردند [۲۰]. دیت^۲ و همکاران به منظور طراحی رآکتور زاینده سریع^۳ تحت بار حرارتی و تغییر شکل پیش‌رونده با سیکل‌های بارگذاری و خرابی خستگی خزشی، اثر رچتینگ را بر عمر خستگی و خستگی خزشی^۴، ورق‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ 316FR را مورد آزمایش قرار دادند. ایشان دریافتند در محدوده کرنش کوچک، رچتینگ کششی عمر خستگی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، درحالی‌که رچتینگ فشاری چنین کاری نمی‌کند [۲۱]. در سال ۲۰۱۱، چن^۵ و همکاران اثر گشودگی دایروی را بر حد رچتینگ و محدوده کرنش پلاستیک نوک ترک، در ورق‌های با ترک مرکزی که تحت بار کششی سیکلی و ممان خمشی سیکلی می‌باشند، با استفاده از روش المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. ایشان قطر و مکان گشودگی بهینه را برای کاهش محدوده کرنش پلاستیک نوک ترک تعیین کردند. همچنین نشان دادند در

^۱Isobe

^۲Date

^۳fast breeder reactor

^۴creep-fatigue

^۵Chen

هر دو نوع بارگذاری، موقعیت گشودگی بهینه مستقل از اندازه آن می‌باشد [۲۲]. یور^۱ و همکاران یک روش مستقیم جهت یافتن حد مرزی رچتینگ بالا و پایین ارائه دادند و جهت اطمینان از روش ارائه شده، به عنوان نمونه حدود مزبور را برای ورق حاوی گشودگی مرکزی تعیین کرده و نتایج را با نتایج نرم‌افزارالمان محدود آباکوس^۲ مورد مقایسه قرار دادند [۲۳].

بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی استیل‌ها و انواع فلزات و پلیمرهای پرمصرفی چون PTFE انجام شده است. بارگذاری‌ها مختلفی تاکنون بررسی شده است لکن بارگذاری فشار داخلی بسیار محدود انجام شده است و این بارگذاری بر روی نمونه پلیمری تاکنون گزارش نشده است. از طرفی با توجه به خاصیت خستگی و خزشی بسیار بالای پلی‌استال و کاربرد آن به همراه فشار، در این تحقیق سعی شده است مطالعه‌ای در این زمینه انجام شود. آزمایش‌ها به دو قسمت با فشار داخلی و بدون فشار انجام شده است. در آزمایش‌های بدون فشار داخلی رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی عمر خستگی ارائه شده است. در آزمایش‌های با فشار داخلی به بررسی عواملی چون فشار داخلی، تنش میانگین و دامنه تنش پرداخته شده است. کمیت‌های شیب حلقه هیسترزیس، کرنش رچتینگ، محدوده تغییرات کرنش رچتینگ و عامل سخت شوندگی معرفی شده و نتایجی از آن بدست آمده که درباره‌ی آن در فصل سوم بحث شده است. با توجه به آنکه ضریب پواسون برای محدوده‌ی الاستیک معتبر بوده و از طرف دیگر سیکلی بودن بارگذاری در این پژوهش و تغییرات آن در محدوده‌ی الاستیک و پلاستیک و عدم امکان استفاده از ضریب پواسون، رابطه‌ای به منظور محاسبه ضریب پواسون در این بارگذاری ارائه شده است که در فصل چهارم به آن پرداخته شده است.

^۱Ure

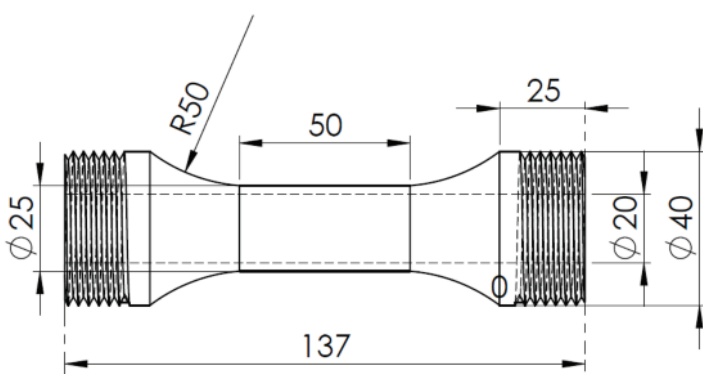
^۲Abaqus

آزمایش‌های تجربی

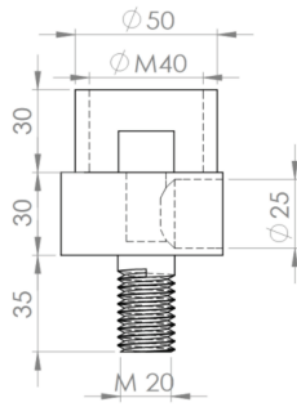
در این فصل ابتدا نحوه آزمایش‌های تجربی و پارامترهای مورد مطالعه معرفی می‌شود، سپس نتایج آن ارائه می‌گردد.

۱-۳ آماده سازی نمونه‌های آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها مطابق استاندارد E 606-92 ساخته شده است. نمونه‌ها از میلگردهای پلی‌استال به قطر ۴۰ mm تهیه شده است. به منظور دقت بیشتر و یکنواختی تراشکاری نمونه‌ها با استفاده از دستگاه CNC بوده است. ابعاد نمونه‌ها - به جز سری آزمایشات مربوط به مطالعه ضخامت که متفاوت‌اند- در شکل (۱-۳) آمده است. جهت آزمایش و استفاده از دستگاه سروهیدرولیک به طراحی و ساخت گیره مناسب به منظور نگهداری در فک‌های دستگاه نیاز می‌باشد. در شکل (۲-۳) گیره‌های مورد استفاده به نمایش در آمده است. در فیکسچرهای نشان داده شده سوراخی محوری در نظر گرفته شده تا بتوان جهت ایجاد فشار داخلی روغن را به داخل نمونه‌ها هدایت کرد. همچنین با توجه به مواجهه با نشتی‌ها، در عمق فیکسچرها از O-ring استفاده شده است.



شکل ۱-۳: هندسه نمونه آزمایش (ابعاد بر حسب میلیمتر)



شکل ۳-۲: نقشه فیکسچر مورد استفاده (ابعاد بر حسب میلیمتر)



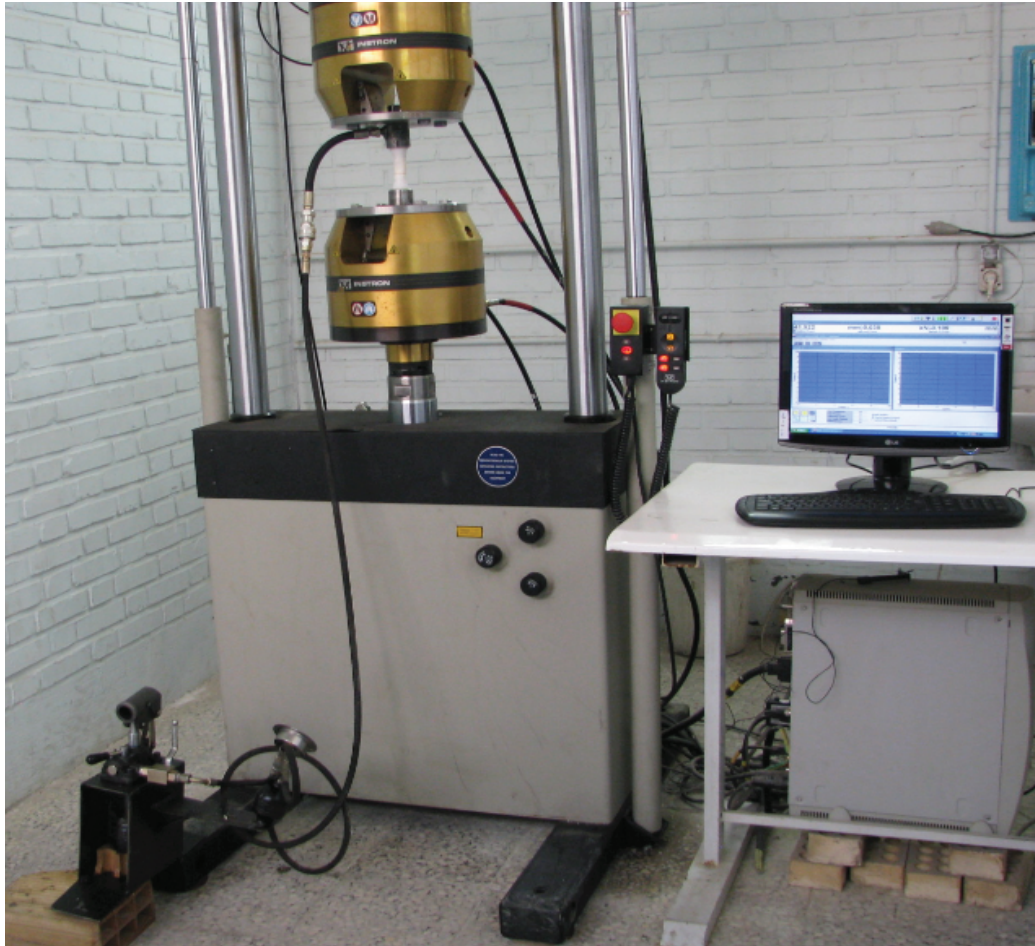
شکل ۳-۳: هندسه فیکسچرها و بخشی از سیستم هیدرولیکی استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

۲-۳ دستگاه آزمایش

تمام آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه سروهیدرولیکی INSTRON 8802 انجام شده است. این دستگاه توانایی اعمال بارگذاری دینامیکی تا ۲۵۰ kN داشته، که در صورت لزوم و برای بهبود دقت اندازه

گیری می‌توان از نیروسنج با ظرفیت ۲۵ kN استفاده کرد. خروجی‌های دستگاه به صورت جابجایی و

نیرو بوده که دقت آن برای نیرو معادل ± 1 N و برای جابجایی معادل ± 0.01 mm می‌باشد.



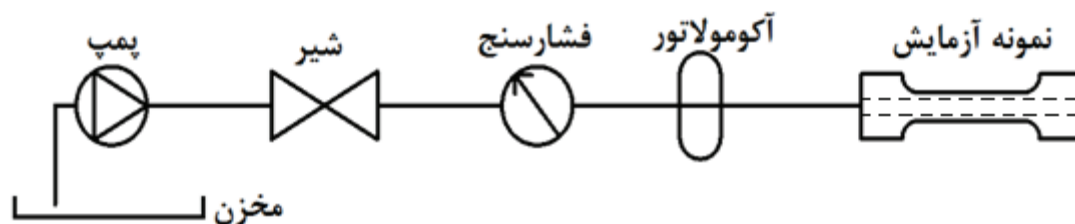
شکل ۳-۴: دستگاه سروهیدرولیک به همراه سیستم ایجاد فشار داخلی

۳-۳- سیستم ایجاد فشار داخلی

با توجه به آنکه مطالعه رفتار رچتینگ لوله پلی‌استال تحت فشار داخلی از اهداف پژوهش بوده ضروری است که ابتدا چنین سیستم ایجاد فشار طراحی و ساخته شود. ابتدا امکان‌سنجی انواع سیستم‌های مربوطه و انتخاب نوع پمپ از مهمترین نکات در طراحی سیستم می‌باشد. در این تحقیق از یک

سیستم بسته هیدرولیکی استفاده شده است. این سیستم شامل یک پمپ دستی بوده که با هر بار تلمبه زدن، معادل ۴۵ cc روغن به داخل سیستم ارسال می‌شود. به منظور تنظیم فشار داخلی از یک فشارسنج و یک شیر استفاده شده است تا با رسیدن به مقدار فشار دلخواه، شیر مسیر را بسته و تا از برگشت روغن به سمت پمپ جلوگیری کرد. با توجه به سیکلی بودن بارگذاری و تغییر متناوب نیرو، تغییر جابجایی و تغییر طول منجر به تغییر شکل پیوسته نمونه می‌شود. این تغییر شکل و تغییر حجم، موجب تغییر و نوسان فشار داخلی می‌شود. جهت غلبه بر این امر از یک آکومولاتور استفاده شده است. آکومولاتور وسیله‌ای است که برای جبران افت فشار لحظه‌ای روغن در سیستم‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود.

در شکل (۳-۵) مدار سیستم هیدرولیکی و در شکل (۳-۶) سیستم فشار داخلی نشان داده شده است.



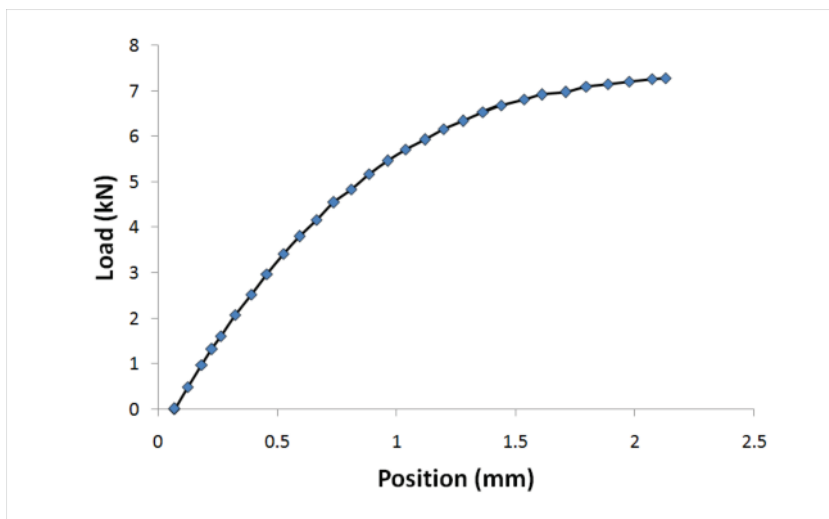
شکل ۳-۵: شماتیک سیستم هیدرولیکی ایجاد فشار داخلی



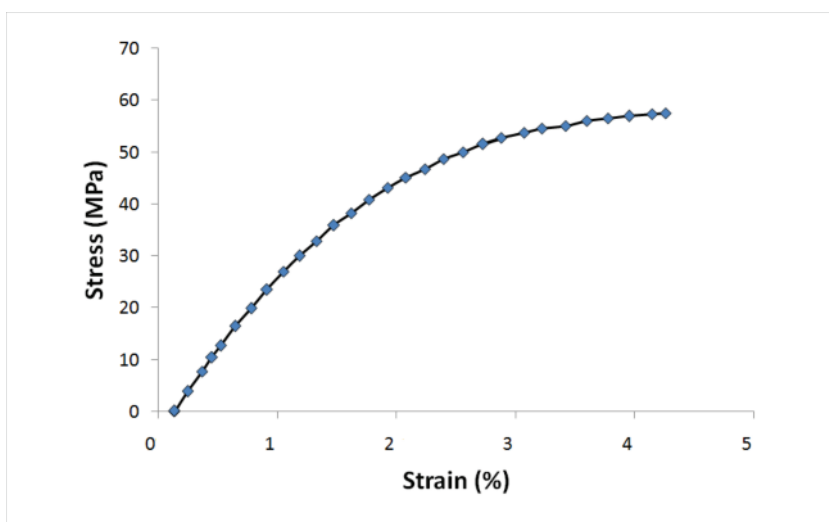
شکل ۳-۶: سیستم هیدرولیکی ایجاد فشار داخلی

۳-۴- آزمایش کشش ساده

با توجه به آنکه ماده مورد استفاده یک نوع پلیمر بوده و تغییرات خواص آن با تغییر کارخانه ساخت به وضوح قابل مشاهده است، اندازه گیری و تعیین خواص مکانیکی آن ضروری است. با انجام آزمایش کشش ساده، طبق استاندارد ASTM E 8-03 مدول یانگ و تنش تسلیم ماده مورد آزمایش محاسبه شده است. شکل (۳-۷) تغییرات نیرو بر حسب جابجایی را نشان می دهد که با استفاده از روابط (۳-۳) (۱) مقادیر تنش و کرنش به دست می آید و تبدیل کردن به تنش و کرنش حقیقی با روابط (۳-۲) امکان پذیر است. در شکل (۳-۸) تغییرات تنش بر حسب کرنش حقیقی نشان داده شده است. سرعت آزمایش کشش ساده برابر $0.33 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ انجام شده است.



شکل ۳-۷: نمودار نیرو جابجایی ماده پلی‌استال



شکل ۳-۸: نمودار تنش کرنش-حقیقی ماده پلی‌استال

$$S = \frac{F}{A_0} \quad , \quad e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1-3)$$

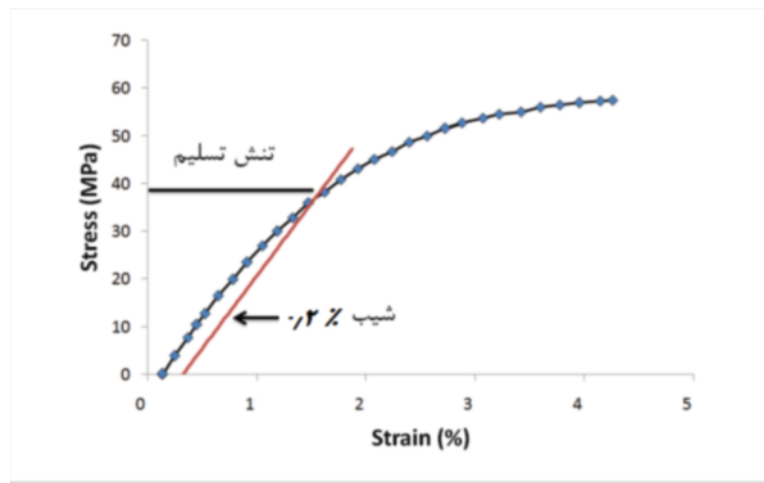
کرنش اسمی است. e تنش اسمی و S که در آن

$$\sigma = S(1 + e) \quad , \quad \varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2-3)$$

که در آن σ تنش حقیقی و ε کرنش حقیقی است.

۳-۴-۱ تعیین مدول یانگ و تنش تسلیم

شیب منطقه خطی نمودار تنش- کرنش معرف مدول یانگ است. برای بدست آوردن تنش تسلیم با رسم یک خط به موازات ناحیه خطی منحنی تنش-کرنش، محل تقاطع معرف تنش تسلیم ماده می- باشد. از شیب 0.2% استفاده می-شود. شکل (۳-۹) نحوه بدست آوردن مدول یانگ و تنش تسلیم را نشان می-دهد. مقادیر محاسبه شده در جدول (۳-۱) آمده است.



شکل ۳-۹: نحوه محاسبه تنش تسلیم و مدول یانگ

جدول ۳-۱: خواص مکانیکی پلی استال

کشش	خواص مکانیکی
3100 MPa	مدول یانگ (E)
38.19 MPa	تنش تسلیم (σ_y)
1.57 %	کرنش تسلیم (ϵ_y)

۳-۵ گروه‌بندی آزمایش‌های تنش - کنترل

تمام آزمایش‌های انجام شده، تحت شرایط تنش-کنترل بوده و در دمای محیط انجام شده است. رفتار رچتینگ به نرخ بارگذاری وابسته است [۸]. از طرف دیگر، نرخ‌های بالای بارگذاری منجر به افزایش دما و تغییرات خواص مکانیکی می‌شود لازم است تا مقدار مناسبی برای نرخ بارگذاری در نظر گرفته شود. مرجع [۸] نرخ بارگذاری کمتر از ۱۰ Mpa/sec را توصیه کرده و در مرجع [۱۰] نشان داده شده است که در نرخ‌های بالاتر از ۴۰ N/sec نرخ بارگذاری اثر ندارد. فلذا با توجه با این محدوده، نرخ بارگذاری مقدار ۸ kN/sec در نظر گرفته شده است تا شرایط مناسب حاکم باشد. برای اعمال مقدار نرخ بارگذاری در آزمایش‌ها، لازم است از رابطه (۳-۳) استفاده کرده و با فرکانس محاسبه شود.

$$\Omega = \frac{\dot{\sigma}}{4F_{amp}} \quad (3-3)$$

که در آن Ω فرکانس، $\dot{\sigma}$ نرخ تنش و F_{amp} دامنه‌ی تنش می‌باشد.

در جدول (۲-۳) وضعیت تنش میانگین، دامنه تنش، فشار داخلی و فرکانس اعمال شده معرفی شده است. سعی شده است تا با انتخاب اعداد مناسب مقایسه تغییرات پارامترهای مختلف امکان‌پذیر باشد. بدین منظور آزمایش‌ها به ۱۶ گروه مختلف تقسیم شده که در هر گروه تنها یک پارامتر متغیر می‌باشد. در گروه‌های GT1 تا GT7 فشار داخلی متغیر بوده، در گروه‌های GT8 تا GT10 دامنه تنش متغیر بوده و در گروه‌های GT11 تا GT16 تنش میانگین متغیر می‌باشد.

جدول ۳-۲: مقادیر نیرو و فشار داخلی اعمالی در آزمایش‌های تجربی

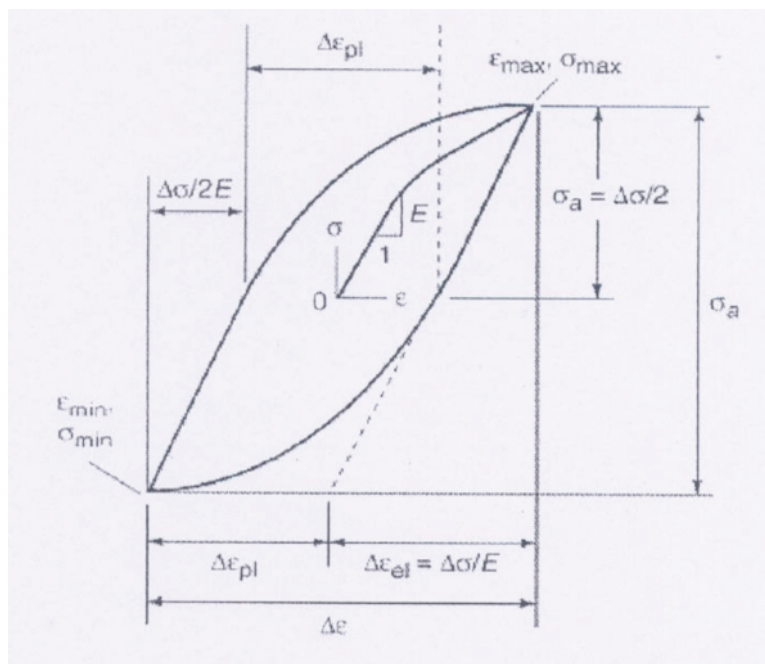
Test	F_m (kN)	F_a (kN)	P(bar)
T1	5.95	5.95	0
T2	5.95	5.95	10
T3	5.95	5.95	30
T4	5.95	5.6	0
T5	5.95	5.6	10
T6	5.95	5.6	30
T7	5.6	5.95	0
T8	5.6	5.95	10
T9	5.6	5.95	30
T10	5.6	5.6	0
T11	5.6	5.6	10
T12	5.6	5.6	30
T13	5.6	5.25	0
T14	5.6	5.25	10
T15	5.6	5.25	30
T16	5.25	5.95	0
T17	5.25	5.95	10
T18	5.25	5.95	30
T19	5.25	5.6	0
T20	5.25	5.6	10
T21	5.25	5.6	30
T22	5.6	5.25	40
T23	5.6	5.25	50
T24	5.6	5.25	20
T25	5.6	5.25	30

جدول ۳-۳: نحوه گروه‌بندی آزمایش‌های تجربی

شماره گروه	تنش میانگین	دامنه تنش	فشار داخلی	شماره آزمایش‌های
GT1	ثابت	ثابت	متغیر	T1, T2, T3
GT2	ثابت	ثابت	متغیر	T4, T5, T6
GT3	ثابت	ثابت	متغیر	T7, T8, T9
GT4	ثابت	ثابت	متغیر	T10, T11, T12
GT5	ثابت	ثابت	متغیر	T13, T14, T15, T22, T23, T24, T25
GT6	ثابت	ثابت	متغیر	T16, T17, T18
GT7	ثابت	ثابت	متغیر	T19, T20, T21
GT8	ثابت	متغیر	ثابت	T7, T10, T13
GT9	ثابت	متغیر	ثابت	T8, T11, T14
GT10	ثابت	متغیر	ثابت	T9, T12, T15
GT11	متغیر	ثابت	ثابت	T1, T7, T16
GT12	متغیر	ثابت	ثابت	T2, T8, T17
GT13	متغیر	ثابت	ثابت	T3, T9, T18
GT14	متغیر	ثابت	ثابت	T4, T10, T19
GT15	متغیر	ثابت	ثابت	T5, T11, T20
GT16	متغیر	ثابت	ثابت	T6, T12, T21

۳-۵-۱ حلقه های هیستریزیس

معمولاً در طی بارگذاری سیکلی بر روی مواد، یک حلقه هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری حاصل می‌شود. هندسه و اندازه حلقه‌ها به نوع بارگذاری تنش-کنترل و یا کرنش-کنترل و پارامترهایی مثل فرکانس و سطح تنش و غیره بستگی دارد. با استفاده از هر حلقه می‌توان اطلاعاتی از جمله کرنش پلاستیک و یا الاستیک را بدست آورد. نحوه بدست آوردن اطلاعات به صورت شماتیک، در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است در آزمایشاتی که کرنش رجتینگ ایجاد می‌شود، حلقه هیستریزیس بسته نمی‌شود. این نکته خود نشان دهنده انباشتگی کرنش با افزایش تعداد سیکل‌هاست که بیانگر مفهوم کرنش رجتینگ است.



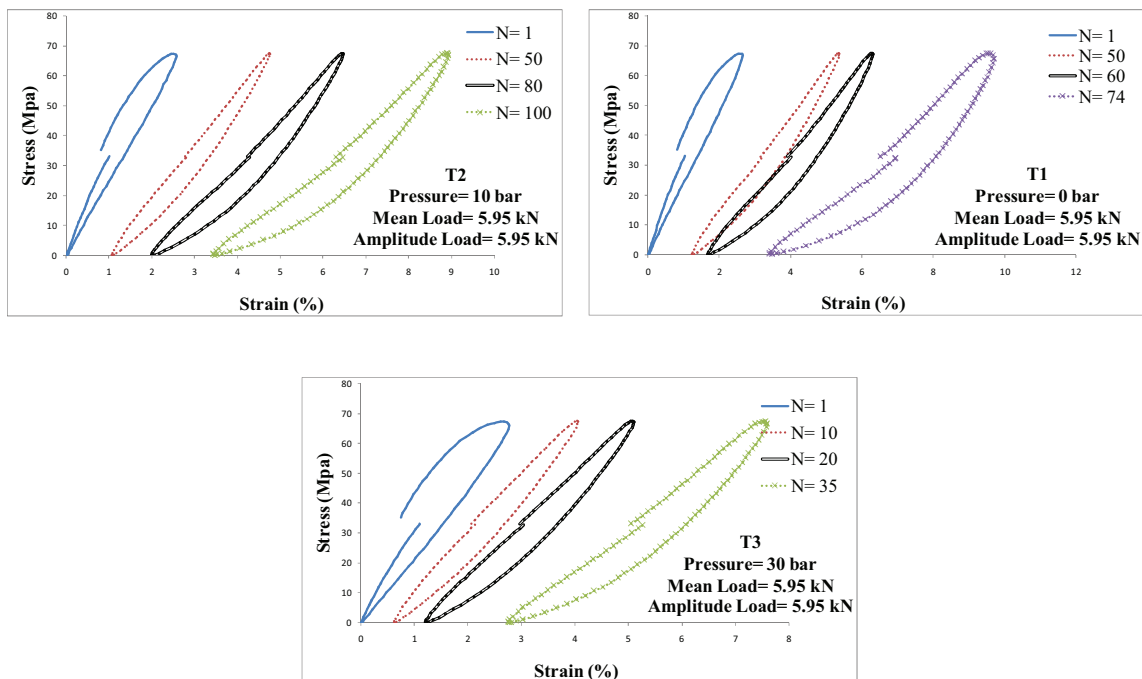
شکل ۳-۱۰: هندسه و مشخصه‌های یک حلقه هیستریزس [۲۵]

با استفاده از داده‌های بدست آمده در روند آزمایش و انجام محاسبات جهت تبدیل جابجایی‌ها و نیروها به کرنش و تنش حقیقی، نمودارهای مربوط به هر نمونه در شکل (۳-۱۱) تا (۳-۱۷) نشان داده شده است.

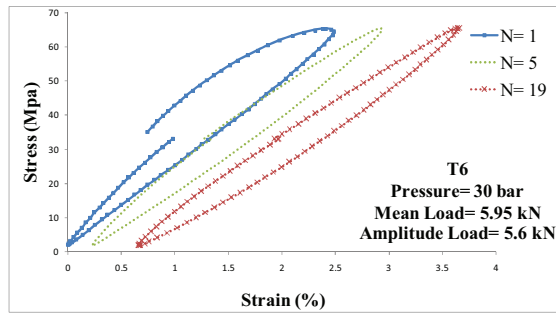
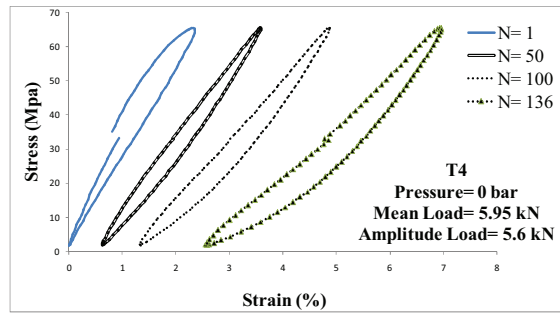
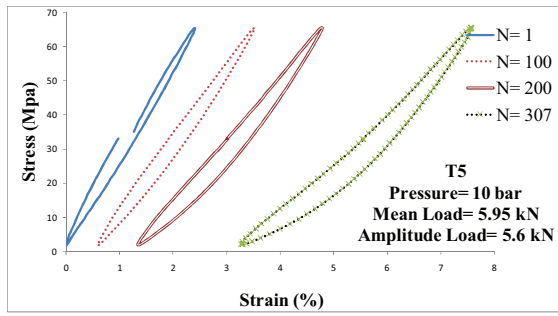
در نمودارهای گروه‌های GT1 تا GT7 تنش میانگین و دامنه تنش ثابت بوده ولی مقادیر فشار داخلی متغیر است. در این گروه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌ها حلقه‌ها نیز چاق‌تر می‌شوند و در نمونه‌ای که فشار بیشتری دارد، اولین حلقه بزرگتر بوده و کرنش رچتینگ بیشتری در همان سیکل اول ایجاد می‌کند. اما در نهایت نمونه‌ای که بیشترین کرنش رچتینگ را دارا می‌باشد عمر خستگی بیشتری دارد. می‌توان نتیجه گرفت افزایش نرخ بیشتر کرنش رچتینگ، باعث کاهش عمر نمونه می‌شود. با افزایش عمر خستگی نمونه، مسیر باربرداری داری انحنای خاصی بوده که نشان دهنده خواص نرم شوندگی ماده است. هرچند با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، خاصیت نرم شوندگی مشاهده می‌شود، لیکن در یک سیکل خاص، خاصیت نرم شوندگی ماده در ناحیه الاستیک بسیار بیشتر از ناحیه پلاستیک است. این امر را می‌توان از کاهش شیب حلقه هیستریزس در قسمت باربرداری مشاهده کرد.

۳-۵-۱-۱ اثر فشار داخلی

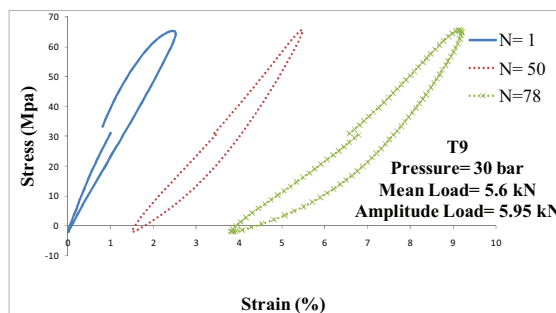
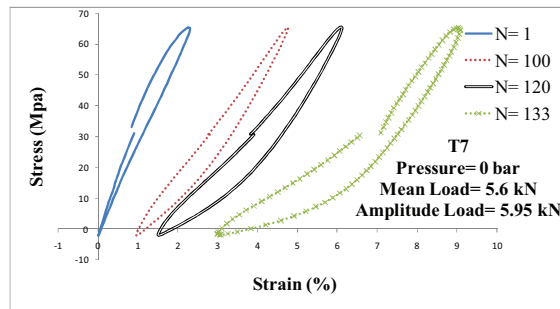
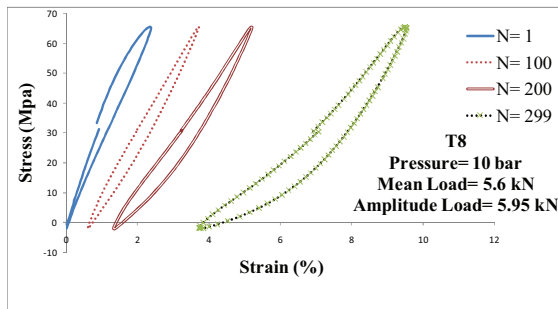
با دقت به آخرین حلقه هیستریزیس، شکل‌های (۳-۱۱) تا (۳-۱۷)، در هر حالت بارگذاری می‌توان دریافت در یک بارگذاری یکسان و در نمونه‌ای با فشار داخلی ۱۰ bar، کرنش رچتینگ بیشتری در هنگام شکست وجود دارد و در نمونه با فشار داخلی ۳۰ bar، کمترین کرنش رچتینگ را در هنگام شکست مشاهده می‌شود. از طرفی در یک بارگذاری یکسان، در فشار داخلی ۱۰ bar، نمونه دارای عمر خستگی بیشتر و در فشار داخلی ۳۰ bar، کمترین عمر خستگی مشاهده می‌شود. لذا می‌توان میزان کرنش رچتینگ ذخیره شده در هنگام شکست را به عمر خستگی نمونه مربوط دانست. در نمونه با فشار داخلی ۳۰ bar، در اولین حلقه، کرنش بیشتری ذخیره شده و موجب تسریع در شکست نمونه می‌شود. با افزایش تعداد سیکل نرم شوندگی ماده قابل مشاهده است. نرم شوندگی در نمونه با فشار داخلی ۱۰ bar به علت عمر خستگی زیادتر، به مقدار بیشتری قابل مشاهده است.



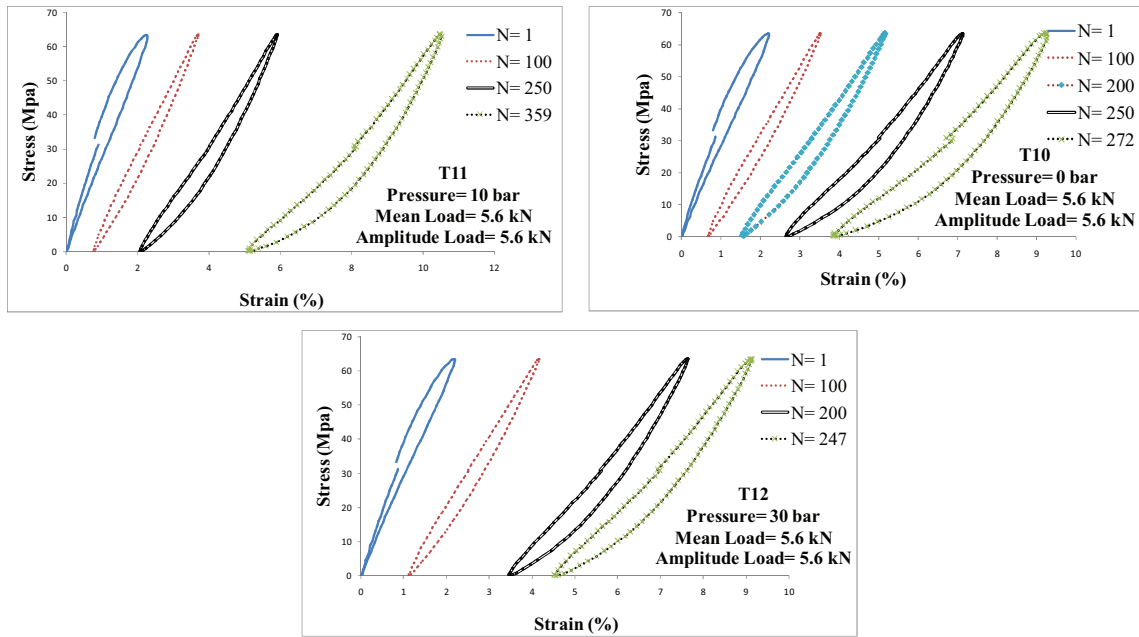
شکل ۳-۱۱: حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT1



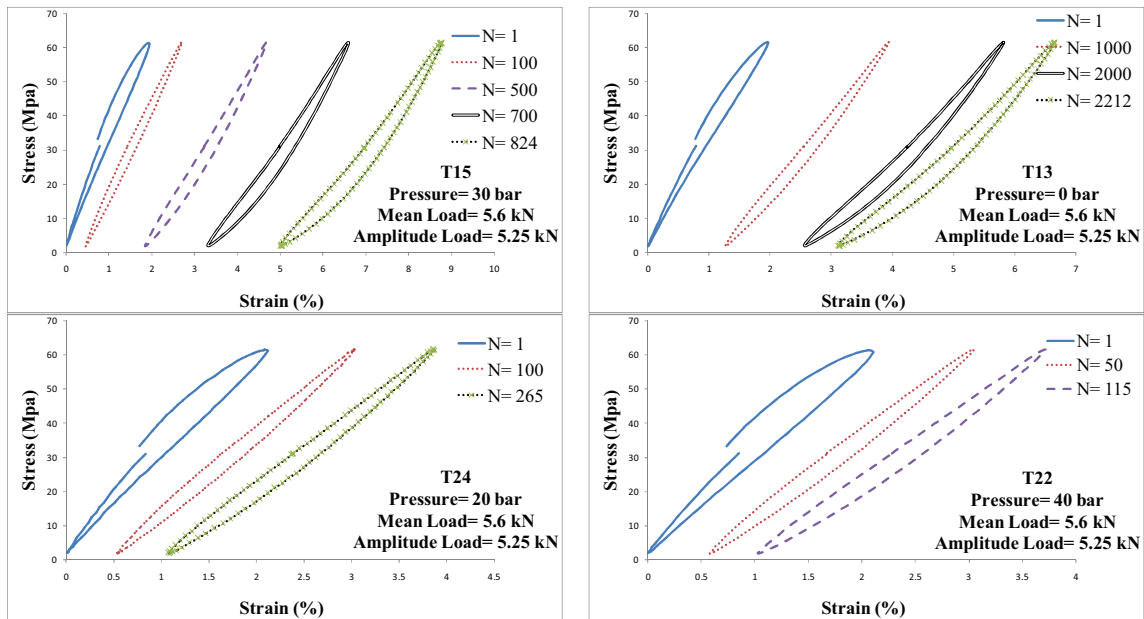
شکل ۳-۱۲: حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT2



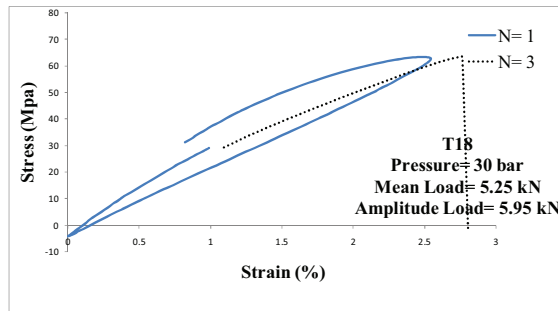
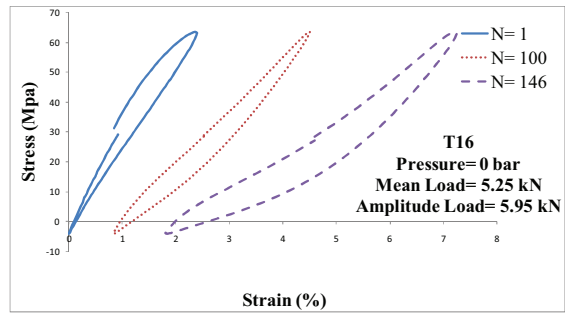
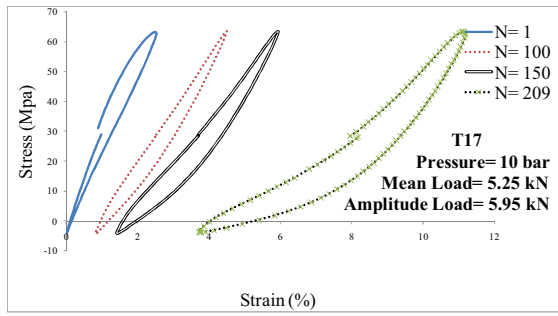
شکل ۳-۱۳: حلقه‌های هیستریزیس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT3



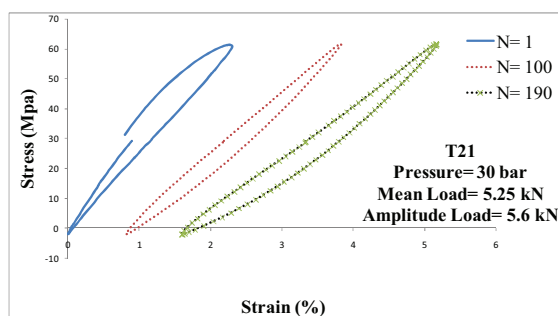
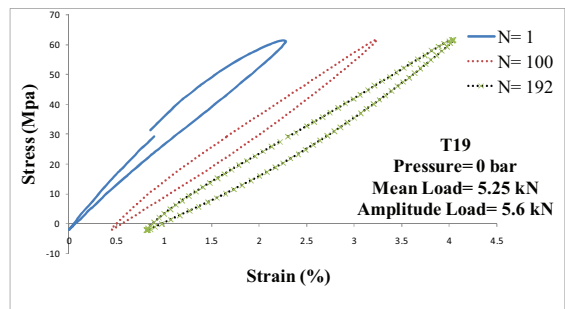
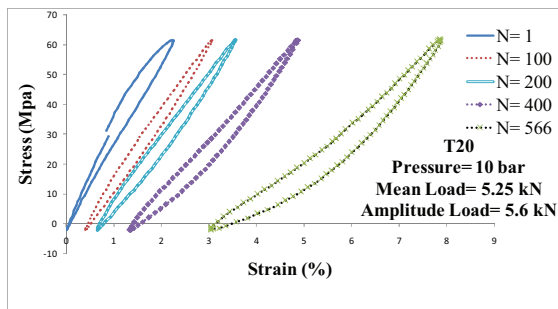
شکل ۳-۱۴: حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT4



شکل ۳-۱۵: حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT5



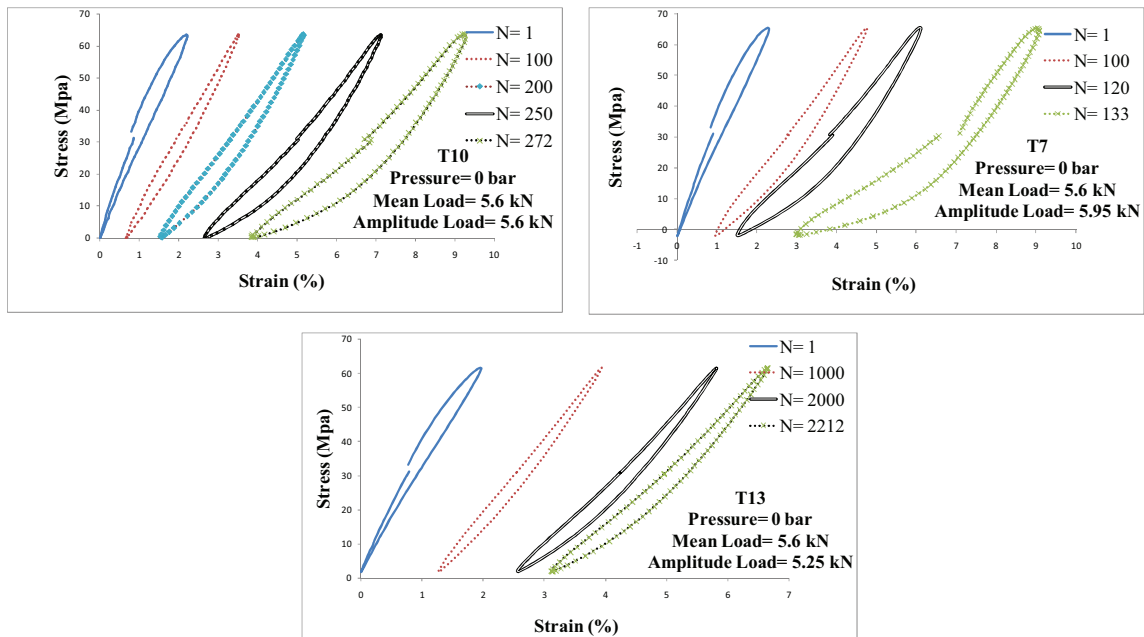
شکل ۳-۱۶: حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT6



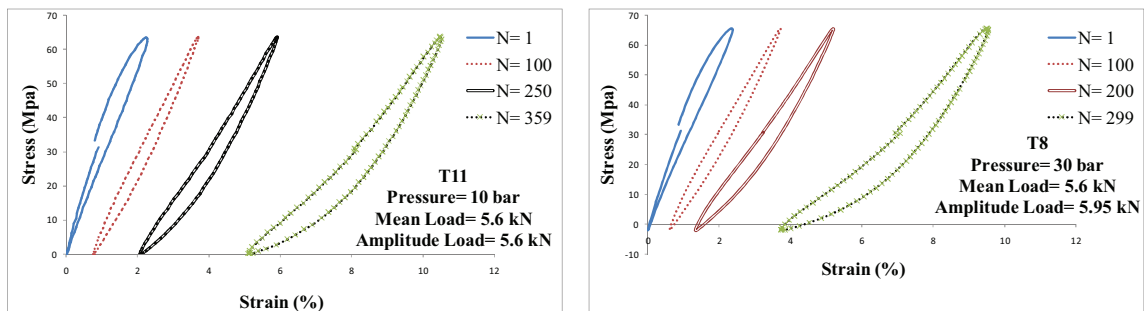
شکل ۳-۱۷: حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT7

۳-۵-۱-۲ اثر دامنه تنش

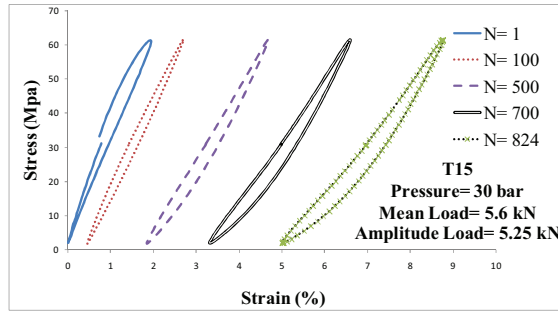
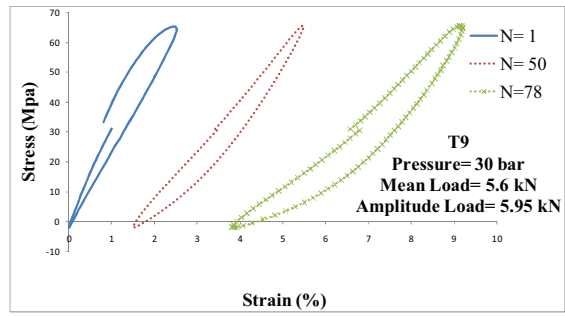
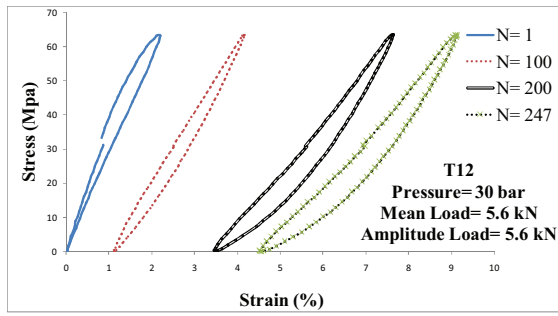
با دقت به آخرین حلقه هیستریزیس در شکل‌های (۳-۱۸) تا (۳-۲۶)، می‌توان دریافت با افزایش دامنه تنش، حلقه لاغرتر شده و محدوده تغییرات کرنش، کمتر می‌شود. از طرفی چون افزایش محدوده تغییرات کرنش، بیانگر نرم شوندگی بیشتر ماده است؛ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دامنه تنش، نرم شوندگی ماده بیشتر می‌شود.



شکل ۳-۱۸: حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT8



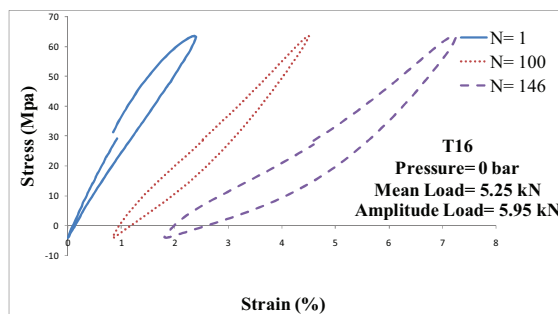
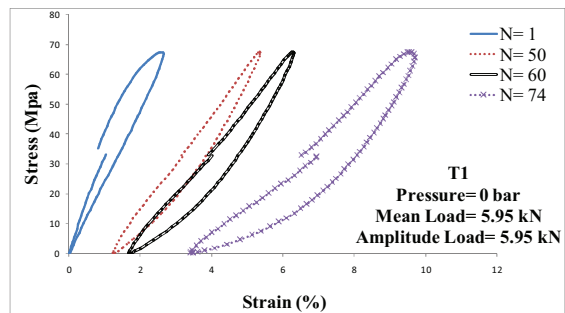
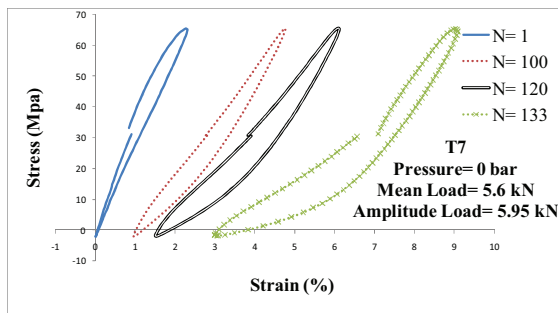
شکل ۳-۱۹: حلقه‌های هیستریزیس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT9



شکل ۳-۲۰: حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT10

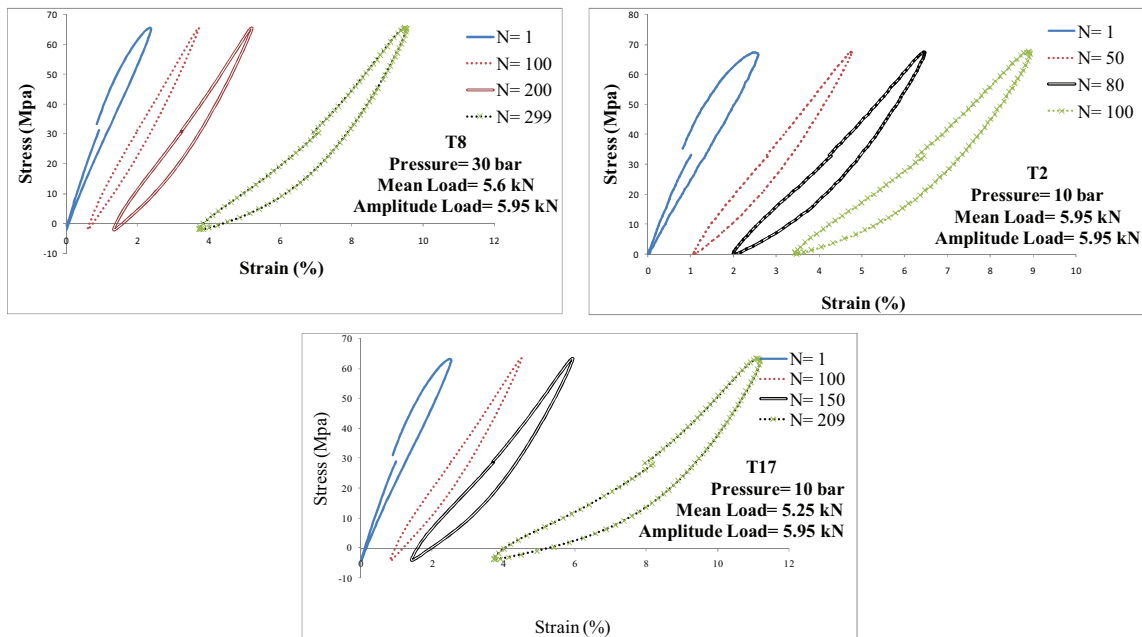
۳-۵-۱-۳ اثر تنش میانگین

با دقت به آخرین حلقه هیستریزس در شکل‌های (۳-۲۰) الی (۳-۲۵)، می‌توان دریافت با افزایش تنش میانگین محدوده تغییرات کرنش کمتر می‌شود.

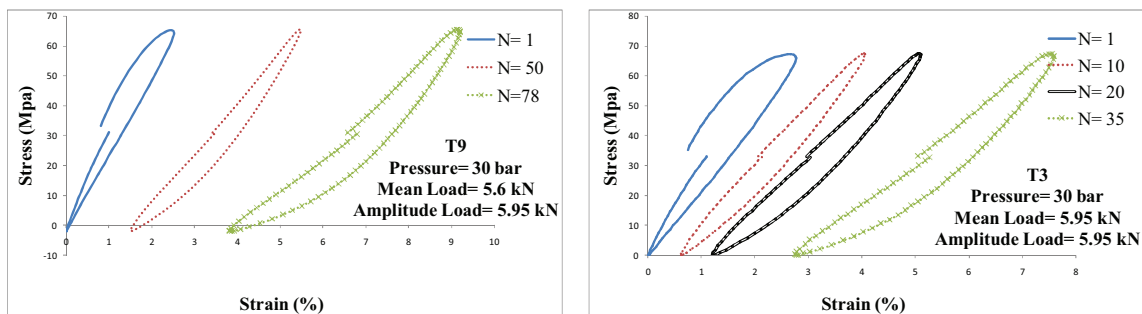


شکل ۳-۲۱: حلقه‌های هیستریزس تنش- کرنش آزمایش‌های گروه GT11

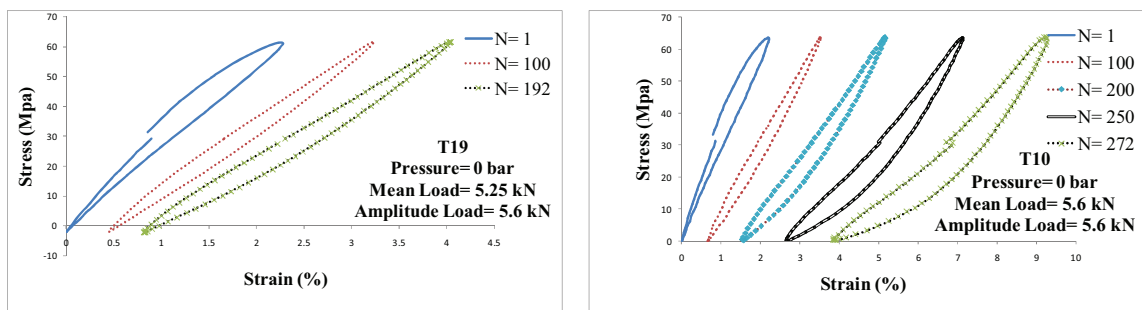
افزایش محدوده تغییرات کرنش بیانگر نرم‌شوندگی بیشتر ماده است. با کاهش دامنه میانگین، نرم‌شوندگی بیشتری مشاهده می‌شود و عمر خستگی افزایش می‌یابد.



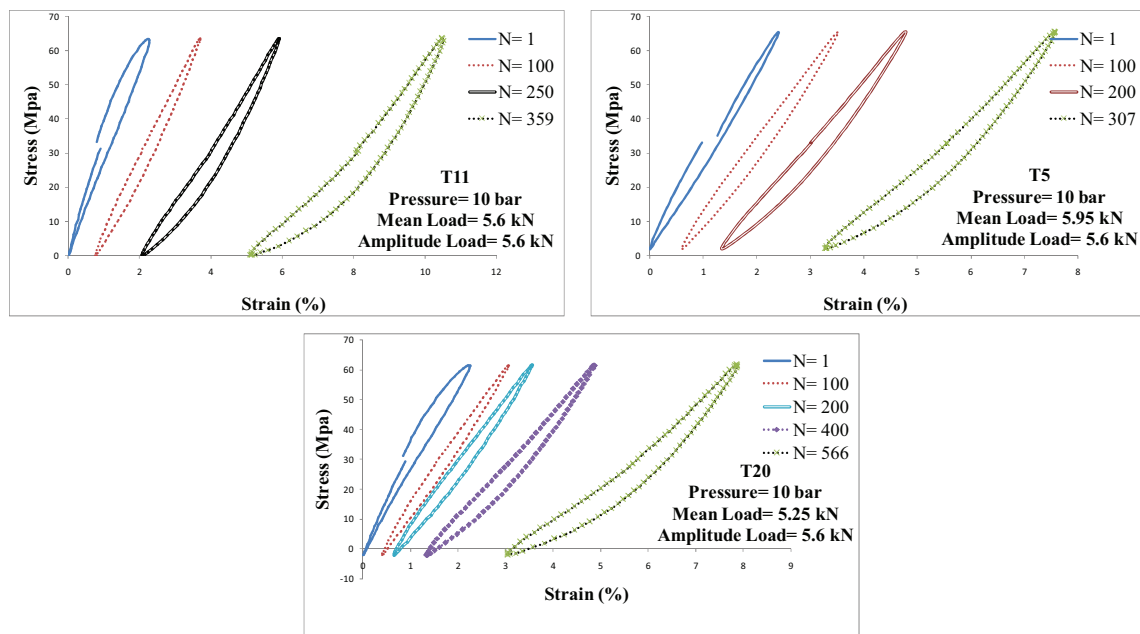
شکل ۳-۲۲: حلقه های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT12



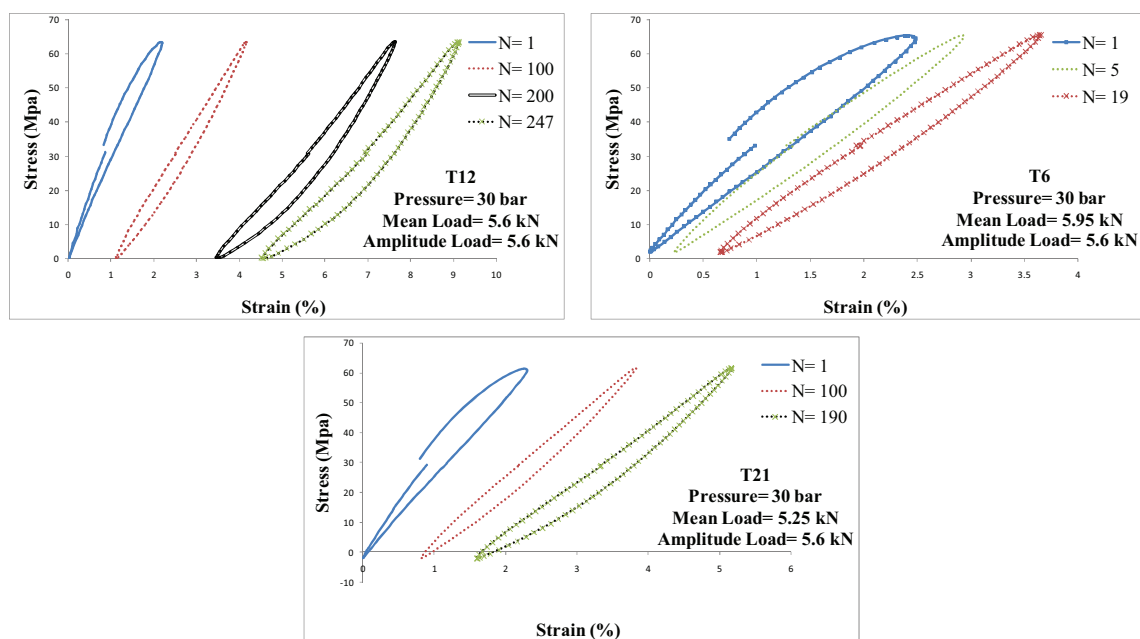
شکل ۳-۲۳: حلقه های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT13



شکل ۳-۲۴: حلقه های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش های گروه GT14



شکل ۳-۲۵: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT15



شکل ۳-۲۶: حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش آزمایش‌های گروه GT16

۳-۵-۲ کرنش رچتینگ

تعریف کرنش رچتینگ در فصل مقدمه آمده است. اما تعبیر آن در حلقه‌های هیستریزس عدم بسته شدن حلقه است که این کرنش ذخیره شده در هر سیکل به مقدار قبلی اضافه می‌شود. به صورت کمی و ریاضی کرنش رچتینگ از رابطه (۳-۴) بدست می‌آید.

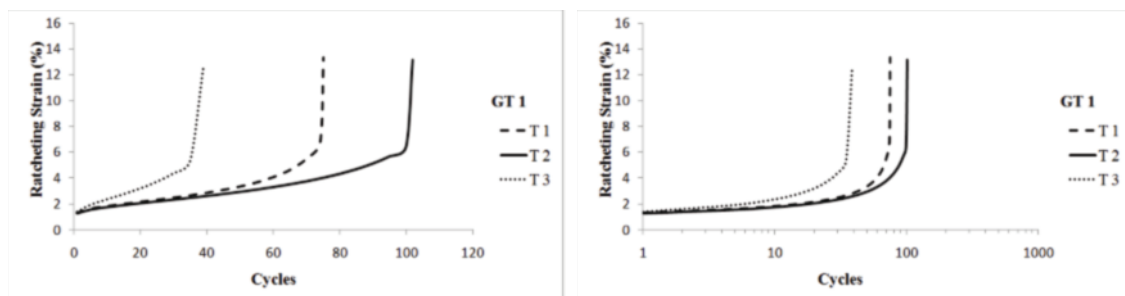
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{2} \quad (4-3)$$

در ادامه، نمودارهای کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل بارگذاری رسم شده است. به منظور مشاهده‌ی بهتر نتایج و رفتارها نمودارها بر دو مقیاس خطی و لگاریتمی به نمایش درآورده شده است. با توجه به آنکه بیشترین تغییرات کرنش رچتینگ در سیکل‌های انتهایی اتفاق می‌افتد، جهت نمایش بهتر، نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل، در مقیاس لگاریتمی نیز ترسیم شده است.

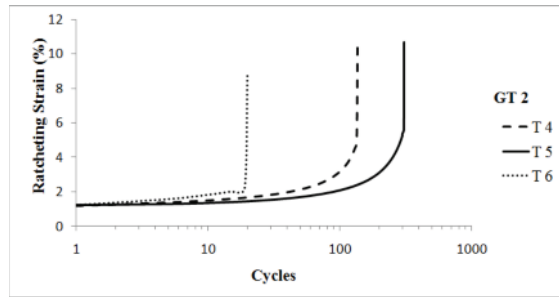
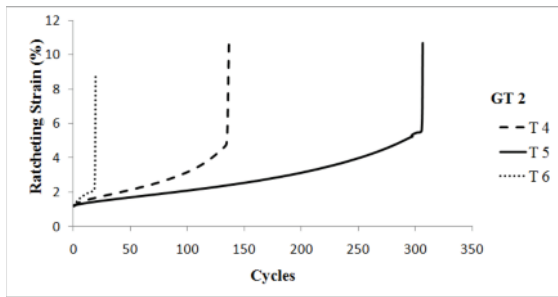
تمام نمودارهای کرنش رچتینگ در شکل‌های (۳-۲۷) تا (۳-۴۱) بر حسب تعداد سیکل بارگذاری شبیه نمودار خزش است. هر نمودار دارای قسمتی بوده که دارای رشد کمی است و در نهایت دارای رشد بسیار سریع کرنش رچتینگ است. به همین دلیل بعضی از پژوهشگران آن را خزش سیکلی نیز نامیده اند [۱].

در گروه‌های GT1 تا GT7 که فشار متغیر می‌باشد، مشاهده می‌شود که در نمونه با فشار ۱۰ bar، علاوه بر عمر خستگی بیشتر، مقدار کرنش رچتینگ قابل تحمل تا در هنگام شکست نیز بیشتر است و در یک سیکل خاص مقدار کرنش رچتینگ کمتری دارد. اما در گروه GT6 به علت زوال در سیکل سوم، تنها با وجود دو داده نمودار رسم شده است و رفتار خطی از خود نشان می‌دهد.

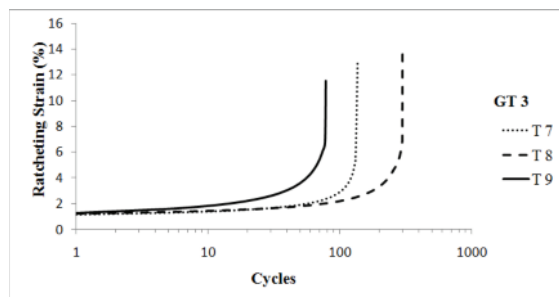
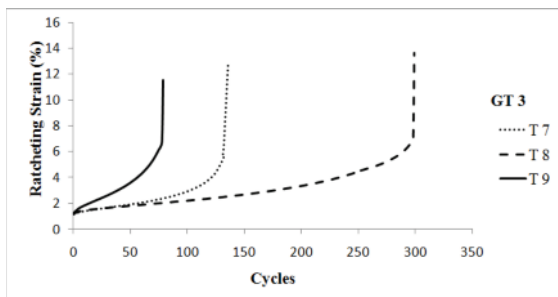
در گروه‌های GT8 تا GT10 که دامنه تنش متغیر است؛ مشاهده می‌شود با کاهش دامنه تنش، عمر خستگی زیاد شده و نمونه کرنش رچتینگ قابل تحمل بیشتری را تا هنگام شکست داراست. همچنین با توجه به گروه‌های GT11 تا GT16 در حالتی که تنش میانگین بیشترین مقدار را دارد، مقدار کرنش رچتینگ قابل تحمل کمتر بوده و عمر خستگی نیز کاهش می‌یابد.



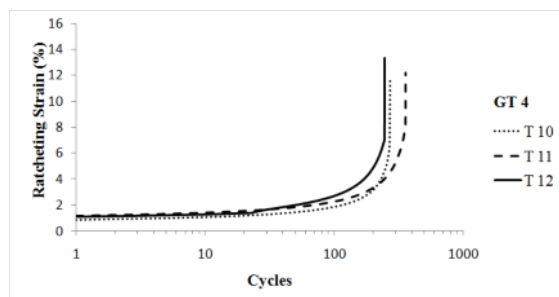
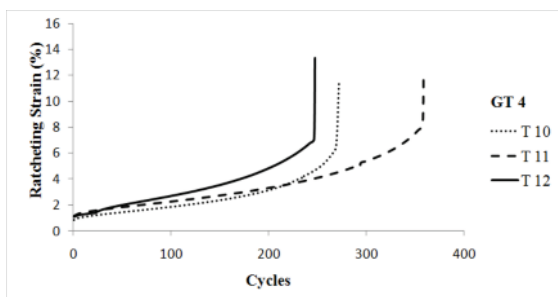
شکل ۳-۲۷: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



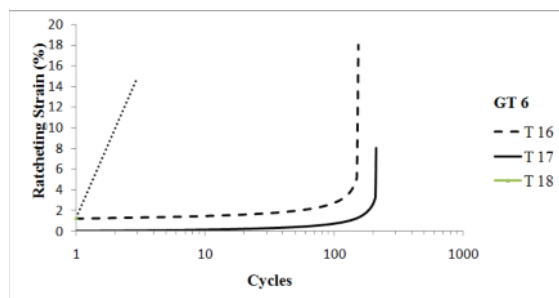
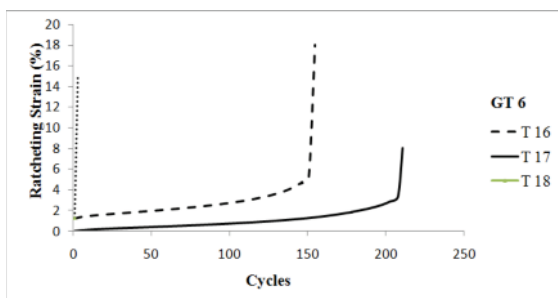
شکل ۳-۲۸: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



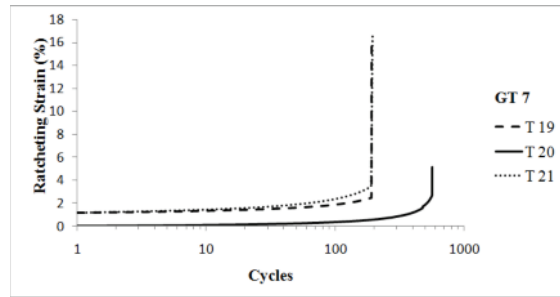
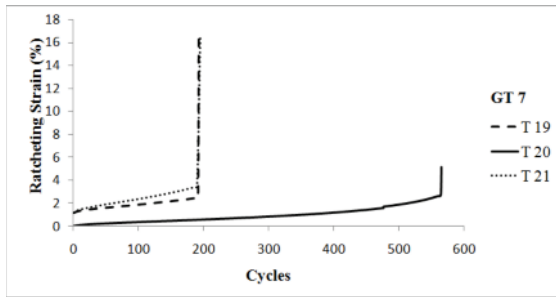
شکل ۳-۲۹: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



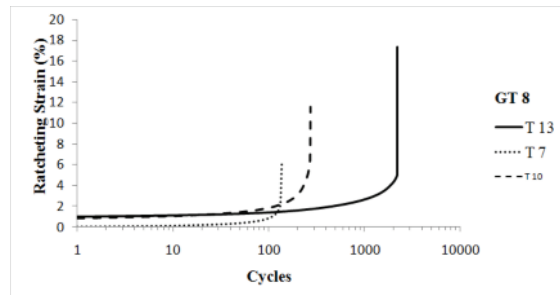
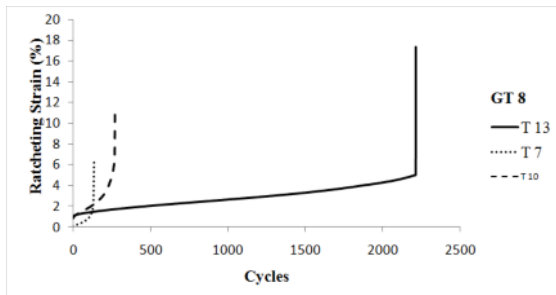
شکل ۳-۳۰: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



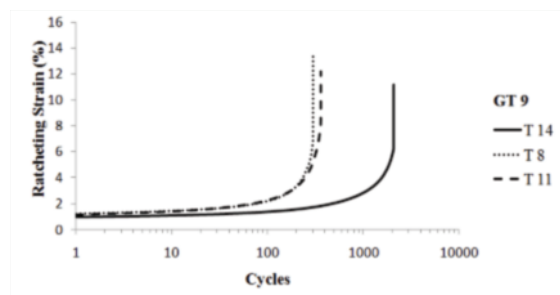
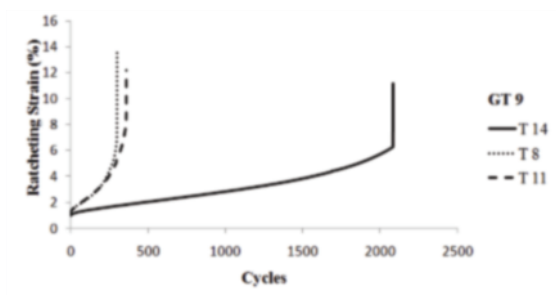
شکل ۳-۳۱: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT6. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



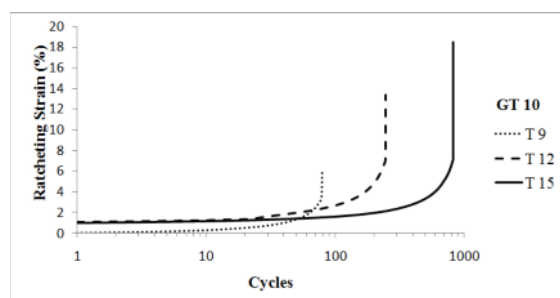
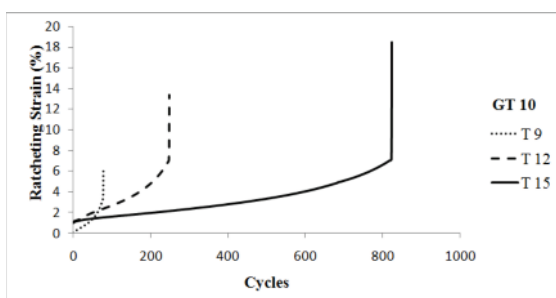
شکل ۳-۳۲: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT7. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



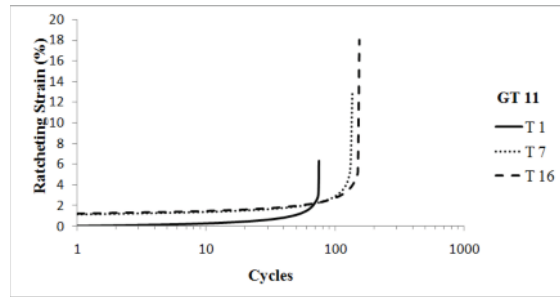
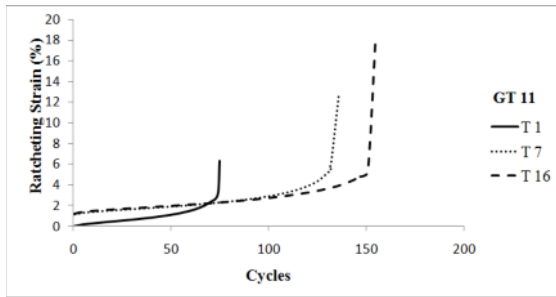
شکل ۳-۳۳: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT8. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



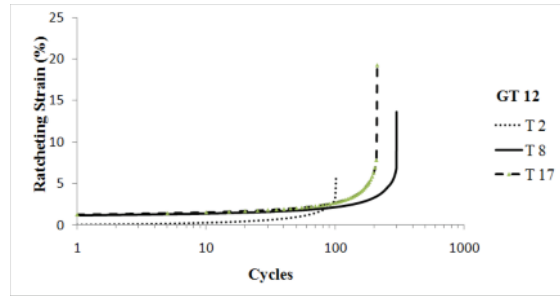
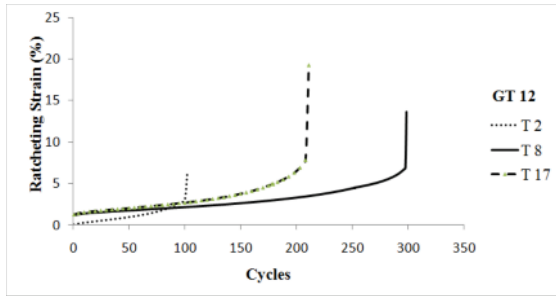
شکل ۳-۳۴: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



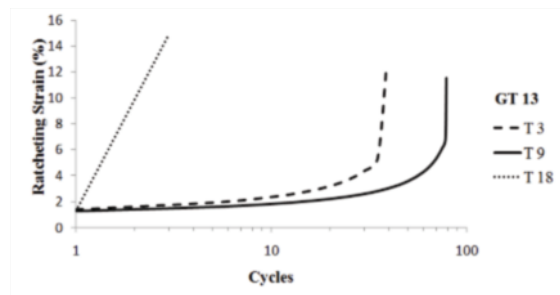
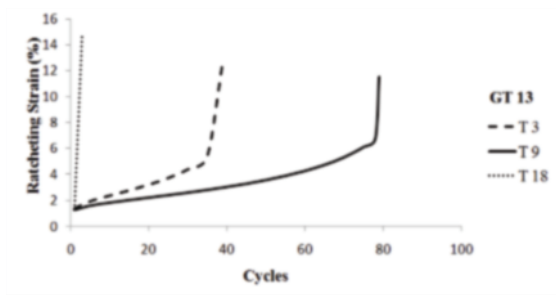
شکل ۳-۳۵: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT10. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



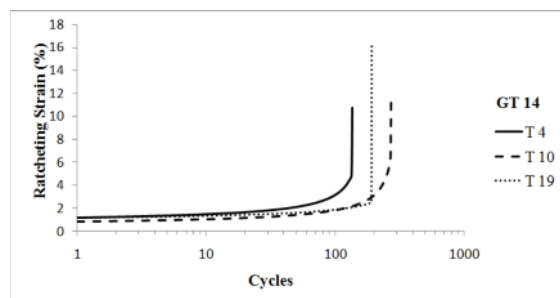
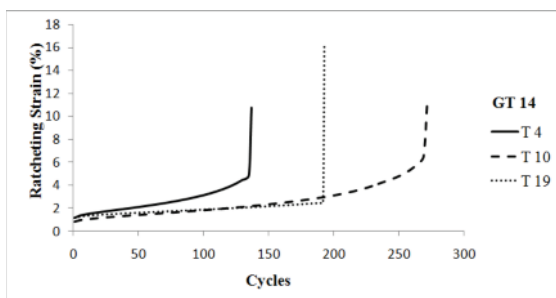
شکل ۳-۳۶: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT11. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



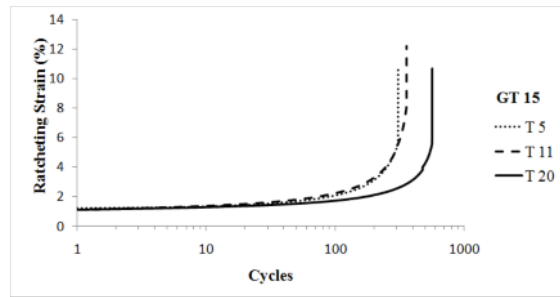
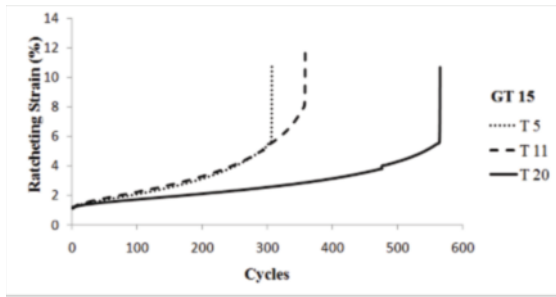
شکل ۳-۳۷: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT12. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



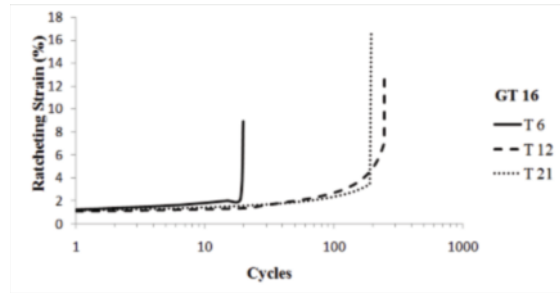
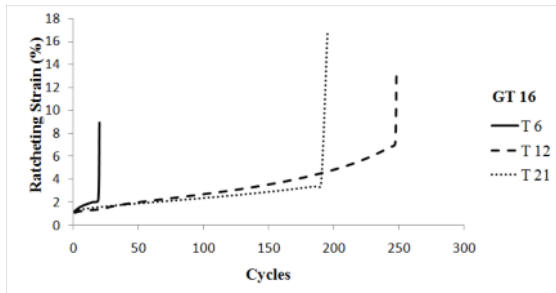
شکل ۳-۳۸: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT13. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۳۹: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT14. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



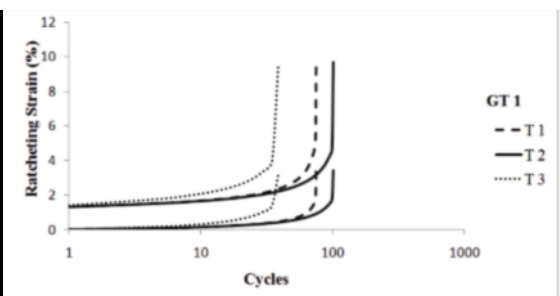
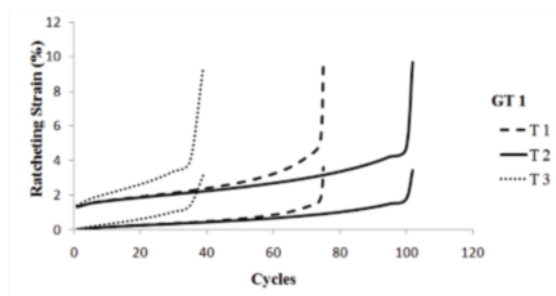
شکل ۳-۴۰: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT15. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۴۱: کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT16. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی

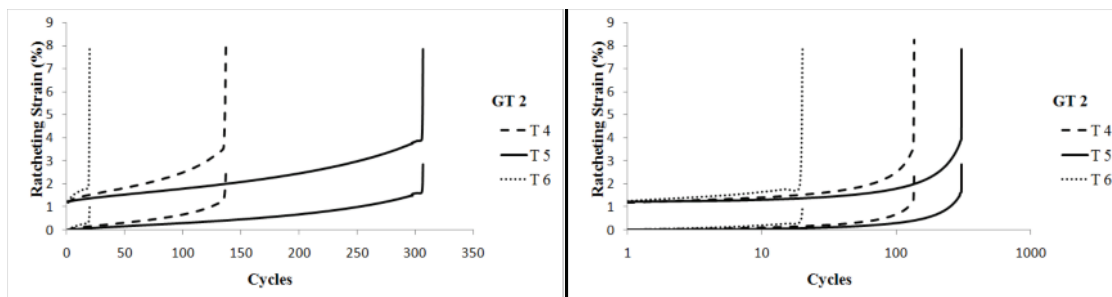
۳-۵-۳ حدود تغییرات کرنش

کرنش رچتینگ از میانگین کمینه و بیشینه مقدار کرنش در هر سیکل بدست می‌آید. حال اگر هر دو مقدار در یک نمودار، رسم شود، حدود تغییرات کرنش قابل مشاهده است. علاوه بر نتایج مشابه به نمودارهای کرنش رچتینگ، نکته اضافه‌ای که قابل مشاهده است، این است که با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، دو نمودار از هم دور می‌شوند. این امر نشان دهنده نرم شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است. نمودارها در دو مقیاس خطی و لگاریتمی در شکل‌های (۳-۴۱) الی (۳-۵۶) به نمایش درآورده شده است.

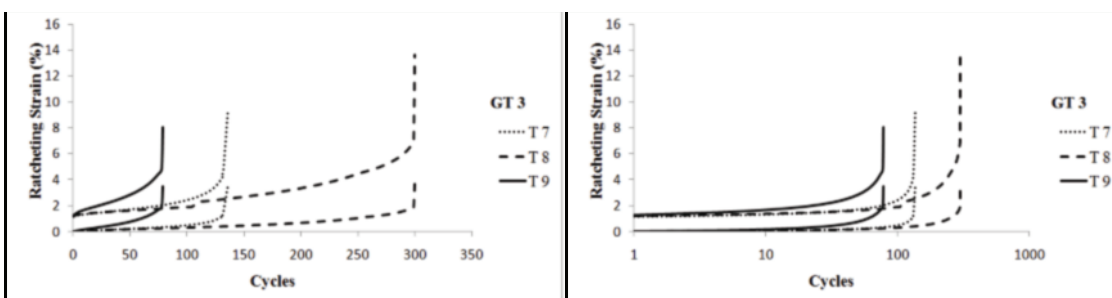


شکل ۳-۴۲: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT1. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی

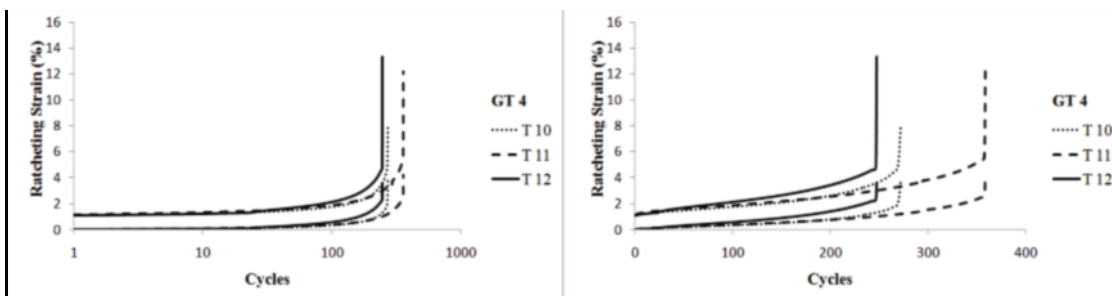
مقیاس خطی



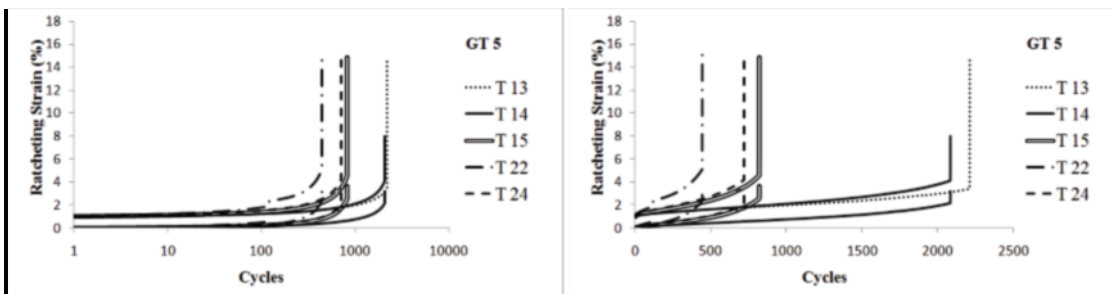
شکل ۳-۴۳: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT2. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



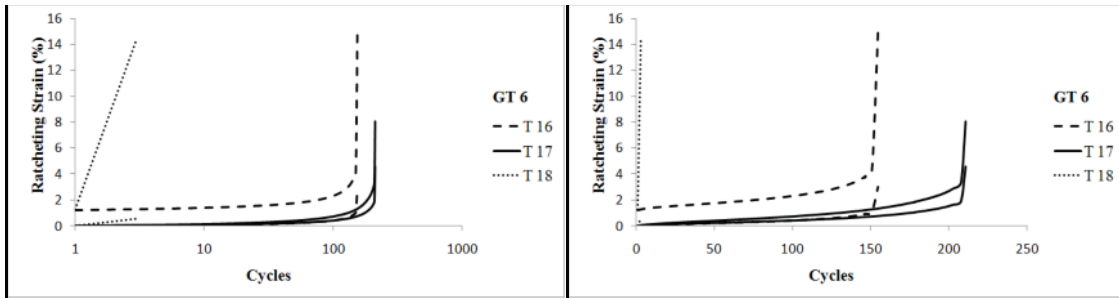
شکل ۳-۴۴: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT3. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



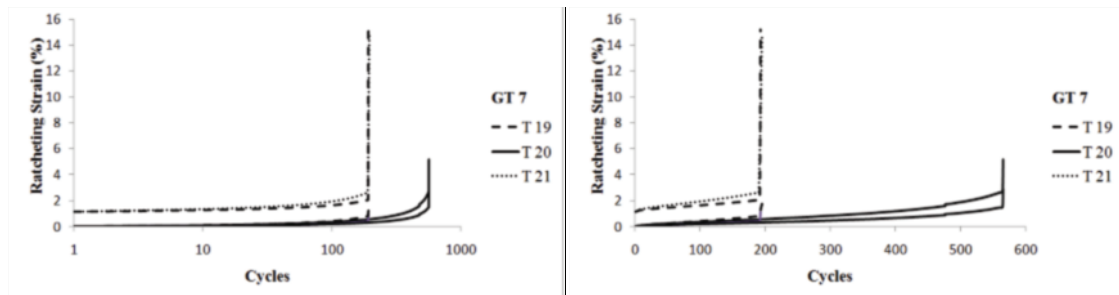
شکل ۳-۴۵: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT4. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



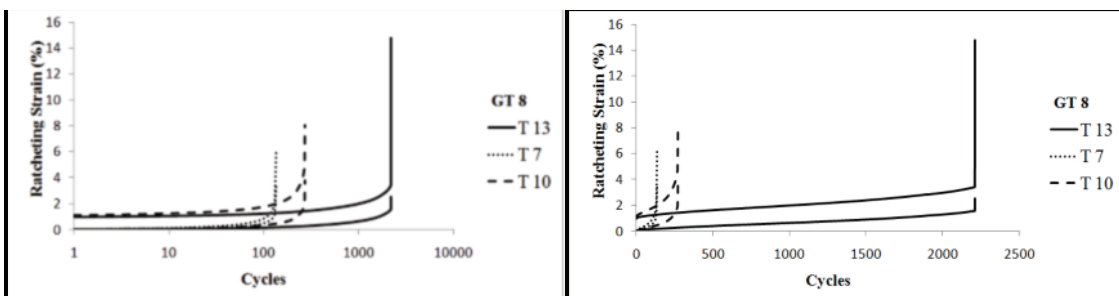
شکل ۳-۴۶: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT5. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



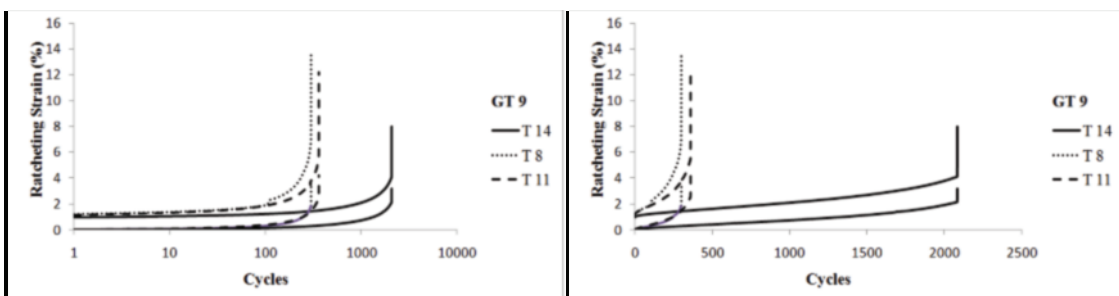
شکل ۳-۴۷: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT6. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



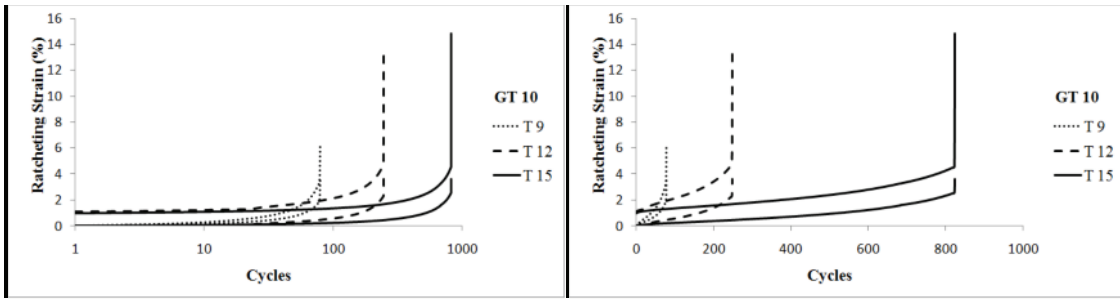
شکل ۳-۴۸: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT7. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



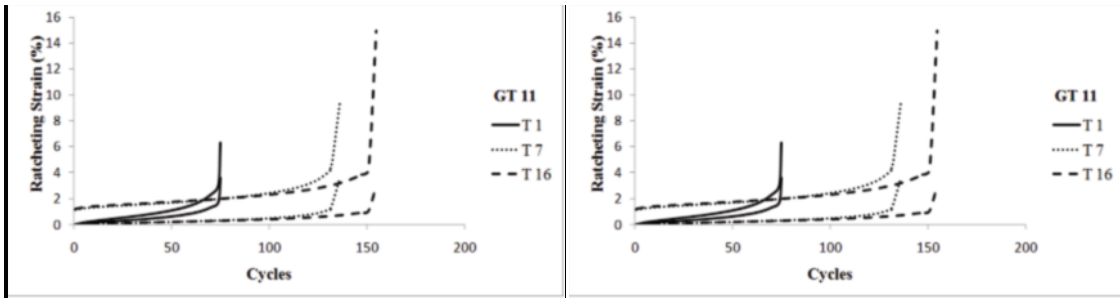
شکل ۳-۴۹: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT8. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



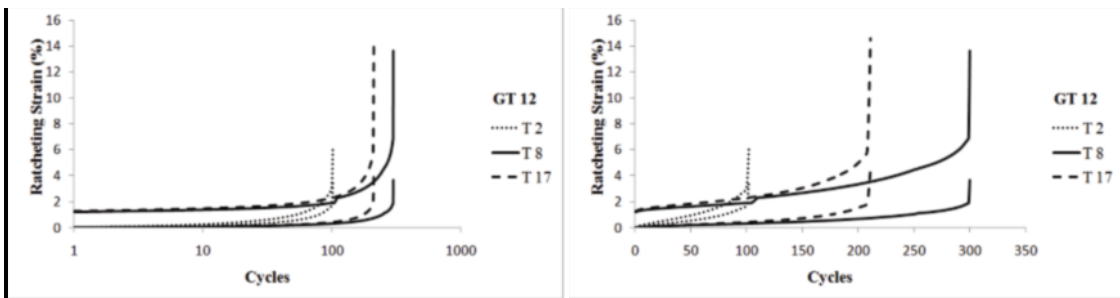
شکل ۳-۵۰: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT9. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



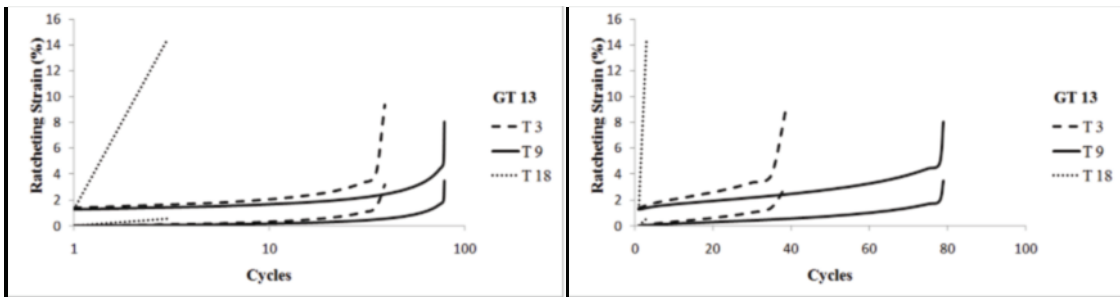
شکل ۳-۵۱: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT10. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



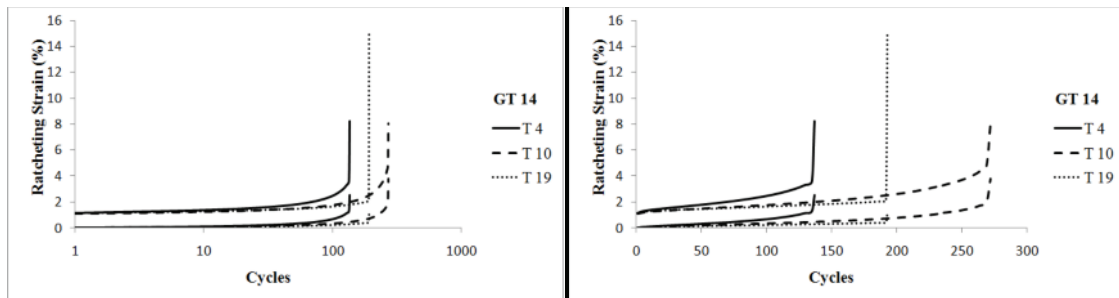
شکل ۳-۵۲: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT11. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



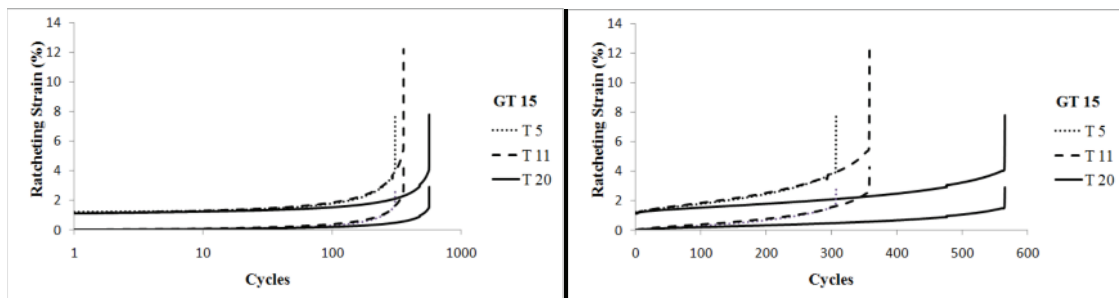
شکل ۳-۵۳: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT12. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



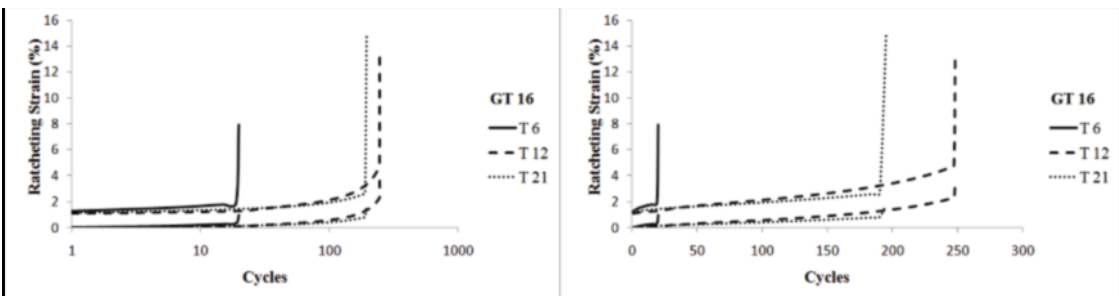
شکل ۳-۵۴: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT13. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۵۵: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT14. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۵۶: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT15. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی

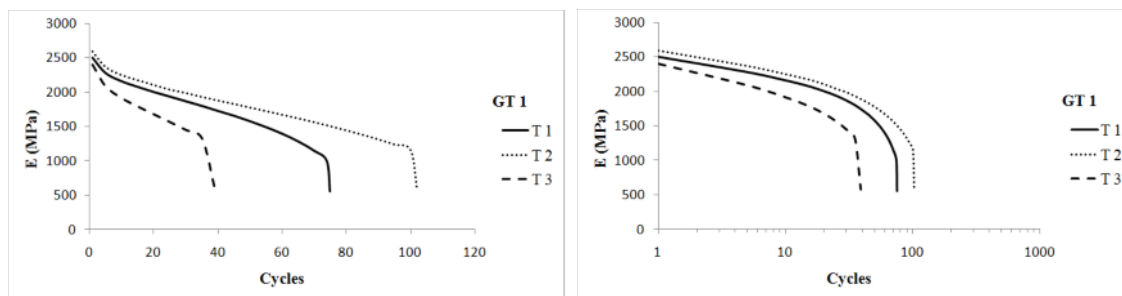


شکل ۳-۵۷: حدود تغییرات کرنش رچتینگ آزمایش‌های گروه GT16. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی

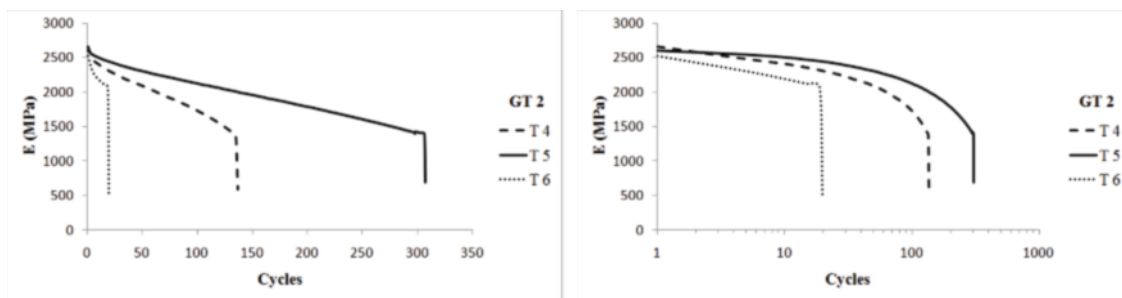
۳-۵-۴- شیب حلقه هیستریزیس

شیب حلقه هیستریزیس را مطابق با تعریف مرجع [۱۲] به صورت شیب خط واصل نقاط بیشینه و کمینه حلقه هیستریزیس تعریف می‌گردد. نمودار آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای ۱۶ گروه آزمایش در شکل‌های (۳-۵۷) تا (۳-۷۱) رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، مقدار شیب کم شده است که بیانگر نرم شوندگی ماده است. با افزایش تعداد سیکل

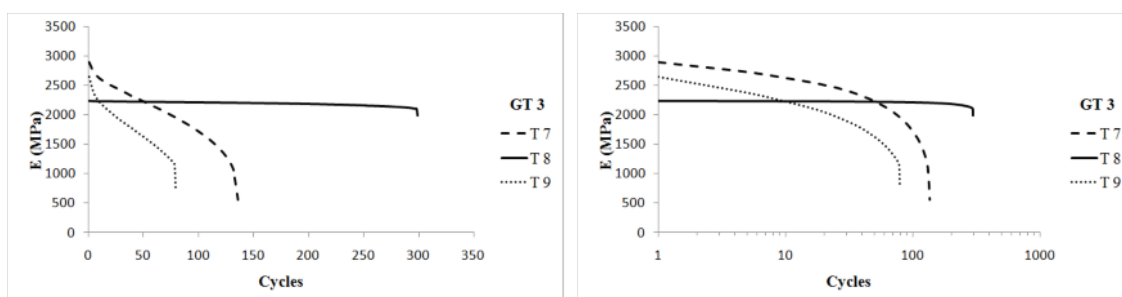
بارگذاری، علاوه بر کاهش شیب، نرخ کاهش شیب افزایش یافته که نشان دهنده بیشتر شدن نرم شوندگی با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است. نمودارها برای ۱۶ گروه آزمایش، در دو مقیاس خطی و لگاریتمی به نمایش گذاشته شده است.



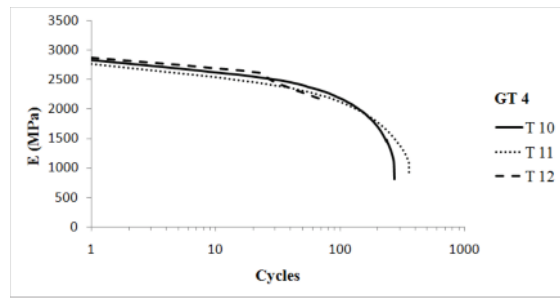
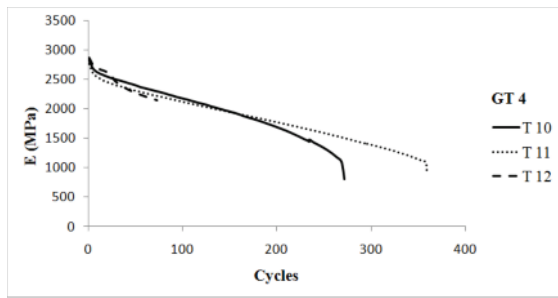
شکل ۳-۵۸: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT1. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



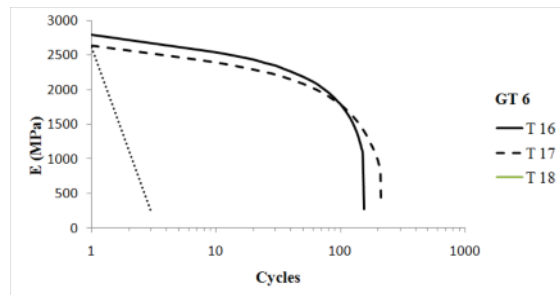
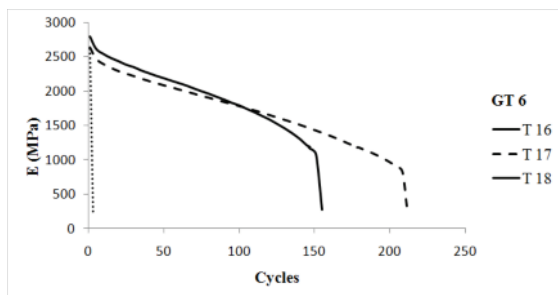
شکل ۳-۵۹: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT2. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



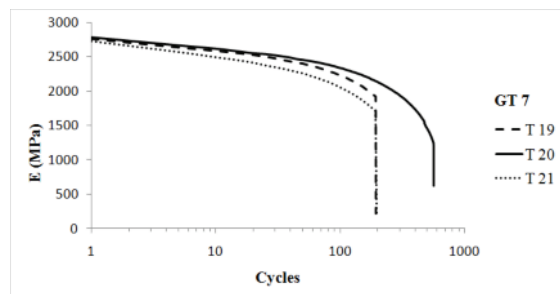
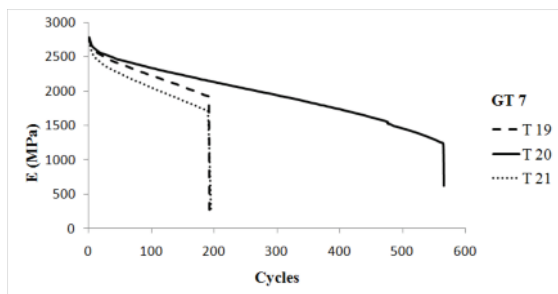
شکل ۳-۶۰: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT3. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



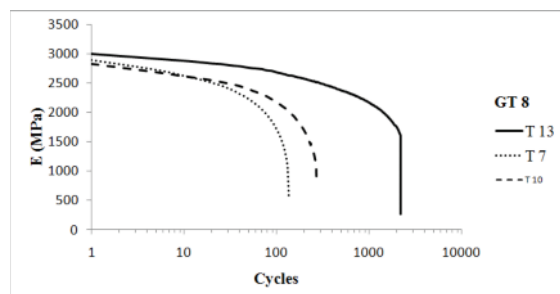
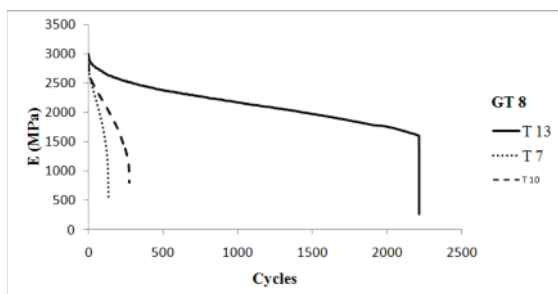
شکل ۳-۶۱: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT4. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



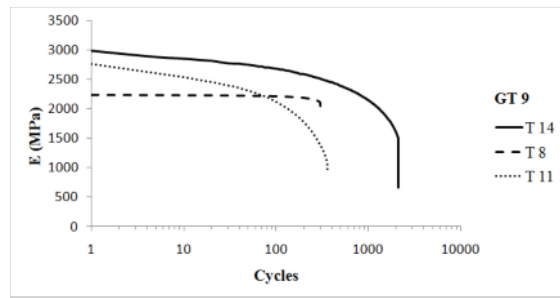
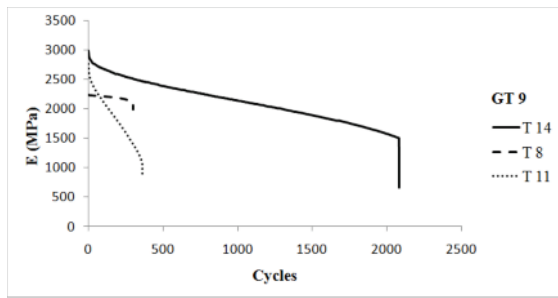
شکل ۳-۶۲: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT6. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



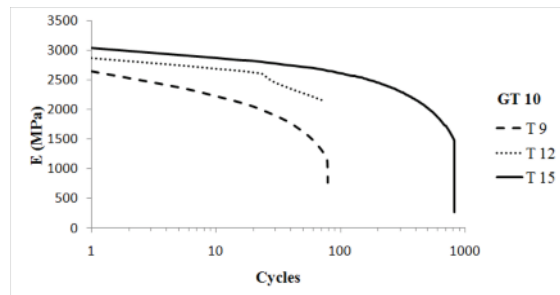
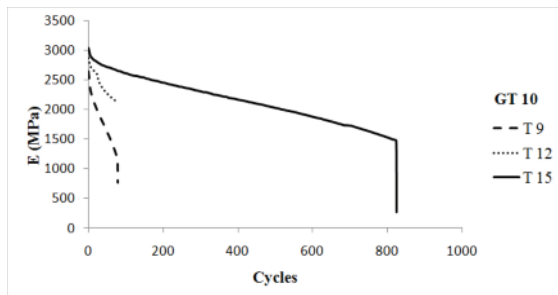
شکل ۳-۶۳: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT7. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



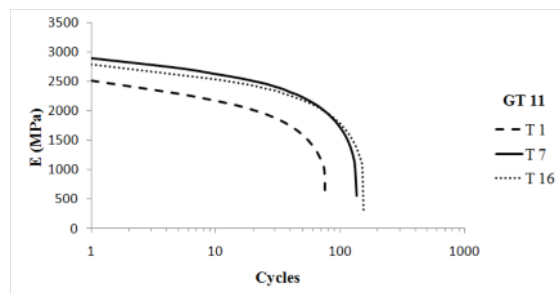
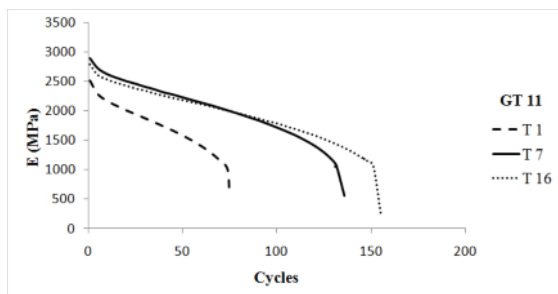
شکل ۳-۶۴: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT8. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



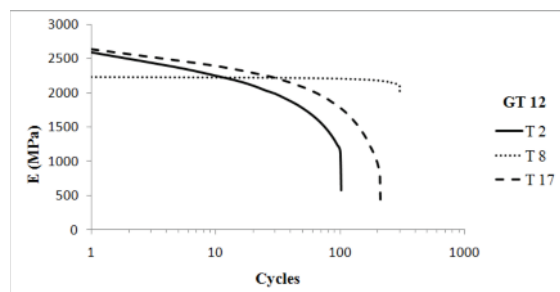
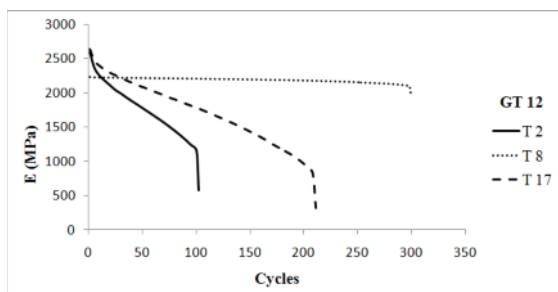
شکل ۳-۶۵: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT9. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



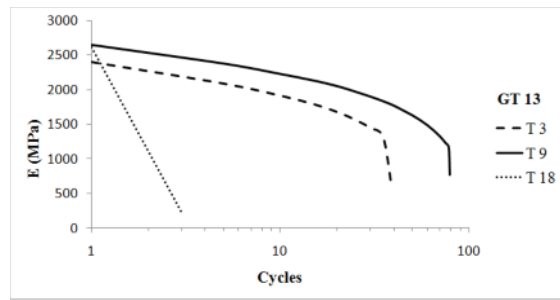
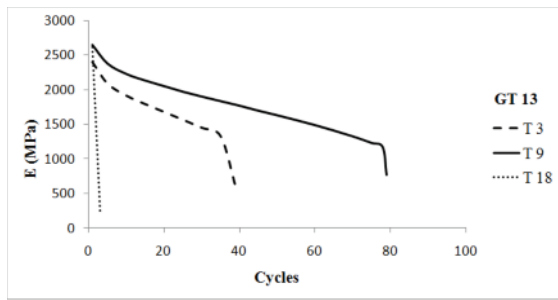
شکل ۳-۶۶: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT10. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



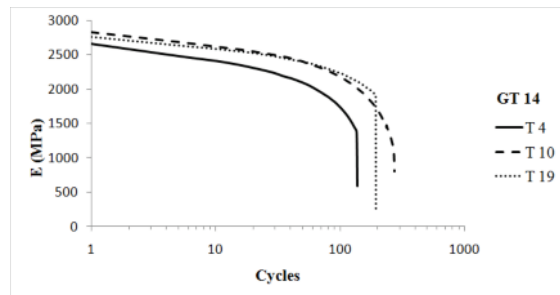
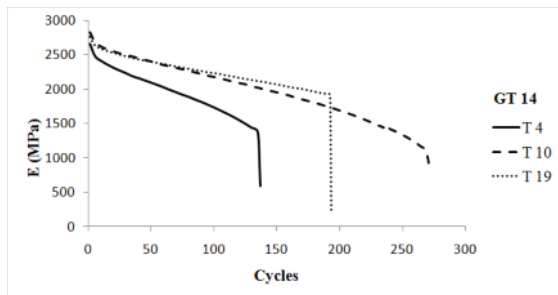
شکل ۳-۶۷: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT11. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



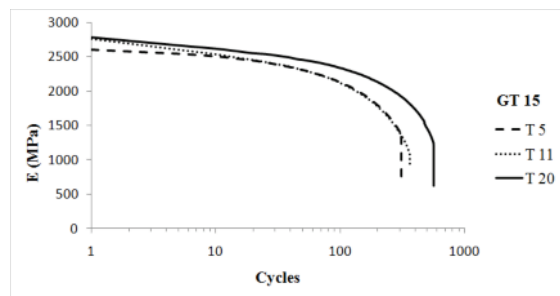
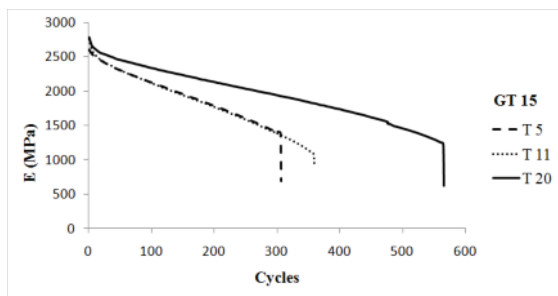
شکل ۳-۶۸: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT12. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



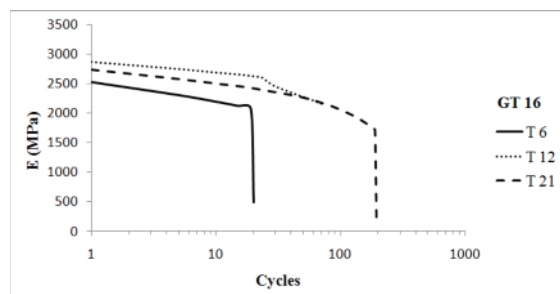
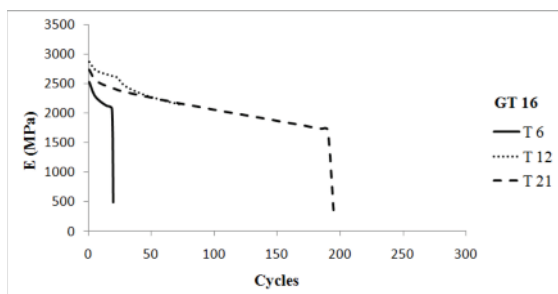
شکل ۳-۶۹: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT13. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۷۰: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT14. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۷۱: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT15. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی



شکل ۳-۷۲: شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GT16. سمت راست: مقیاس لگاریتمی، سمت چپ: مقیاس خطی

۳-۵-۵ عامل سخت شونده

بیشتر مواد مهندسی، معمولاً تحت بارگذاری که منجر به تغییر شکل پلاستیک شود از خود رفتار نرم-شوندگی و یا سخت شونده نشان می‌دهد. پژوهشگرانی مفهوم عامل سخت شونده سیکلی را معرفی کرده‌اند. در اینجا با توجه به تعاریفی که در مرجع [۲۴] ارائه شده عامل سخت شونده معرفی و محاسبه شده و نمودارهای آن بر حسب تعداد سیکل بارگذاری رسم شده است. برای آزمایش‌های کرنش-کنترل، عامل سخت شونده نسبت دامنه تنش در هر سیکل به دامنه تنش در سیکل ابتدایی و برای آزمایش‌های تنش-کنترل، نسبت دامنه کرنش در هر سیکل به دامنه کرنش در سیکل ابتدایی می‌باشد. برای آزمایش‌های کرنش-کنترل عامل سخت شونده با رابطه (۳-۵) معرفی می‌شود.

$$H_e = \frac{\Delta\sigma_s - \Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_s} \quad (۳-۵)$$

که در آن $\Delta\sigma_s$ ، دامنه تنش در هر سیکل و $\Delta\sigma_1$ ، دامنه تنش در سیکل ابتدایی می‌باشد. برای آزمایش‌های تنش-کنترل عامل سخت شونده با رابطه (۳-۶) معرفی می‌شود.

$$H_s = \frac{\Delta\varepsilon_s - \Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_s} \quad (۳-۶)$$

که در آن $\Delta\varepsilon_s$ ، دامنه کرنش در هر سیکل و $\Delta\varepsilon_1$ ، دامنه کرنش در سیکل ابتدایی می‌باشد. واضح است که برای مواد سخت شونده سیکلی، $H_e, H_s > 0$ بوده و برای مواد نرم شونده سیکلی، $H_e, H_s < 0$ می‌باشد. این دو تعریف به صورت جداگانه بوده و امکان مقایسه دو حالت کرنش-کنترل و تنش-کنترل را همزمان نمی‌دهد لذا در ادامه تعریفی برای ارزیابی نرم شونده و سخت شونده مواد ارائه می‌شود که در هر دو حالت آزمایش کارایی دارد.

در طی تغییر شکل پلاستیک، حلقه هیستریزس تنش-کرنش شکل می‌گیرد و پیوسته با توجه به خواص نرم شونده و سخت شونده ماده تغییر می‌کند. هر حلقه هیستریزس یک هندسه معینی دارد که پهنای حلقه دو برابر دامنه کرنش پلاستیک $\Delta\varepsilon^p$ و ارتفاع حلقه دو برابر دامنه تنش $\Delta\sigma$ می‌-

باشد 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 می شود بیان می گردد.

$$SR = \frac{\Delta\varepsilon^p}{\Delta\varepsilon^e} \quad (7-3)$$

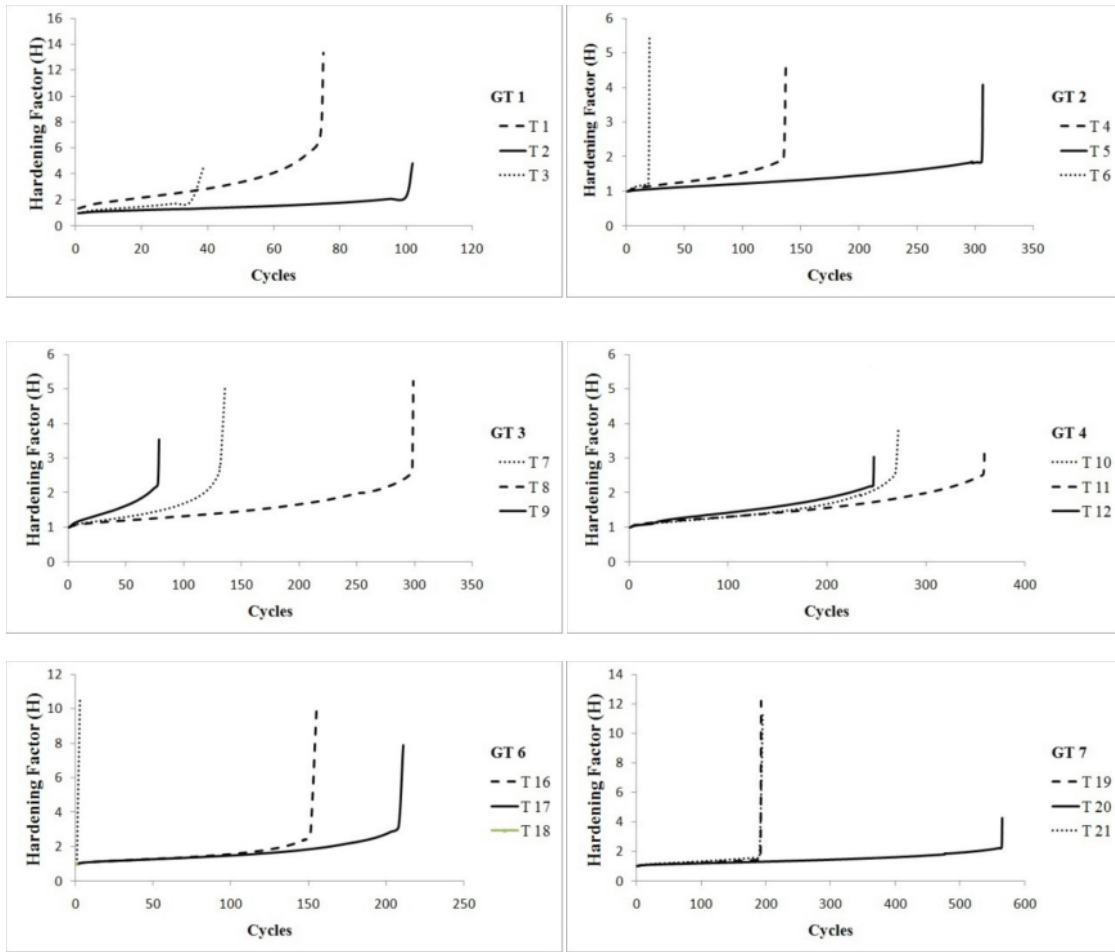
دامنه کرنش کلی $\Delta\varepsilon$ از مجموع دامنه کرنش پلاستیک $\Delta\varepsilon^p$ و دامنه کرنش الاستیک $\Delta\varepsilon^e$ بدست می آید. بنابراین برای یک مدول الاستیسیته معین، دامنه تنش $\Delta\sigma$ و دامنه کرنش کلی $\Delta\varepsilon$ و نسبت کرنش (SR) یک حلقه هیستریزیس، به نحو زیر بیان می گردد:

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^e \quad (8-3)$$

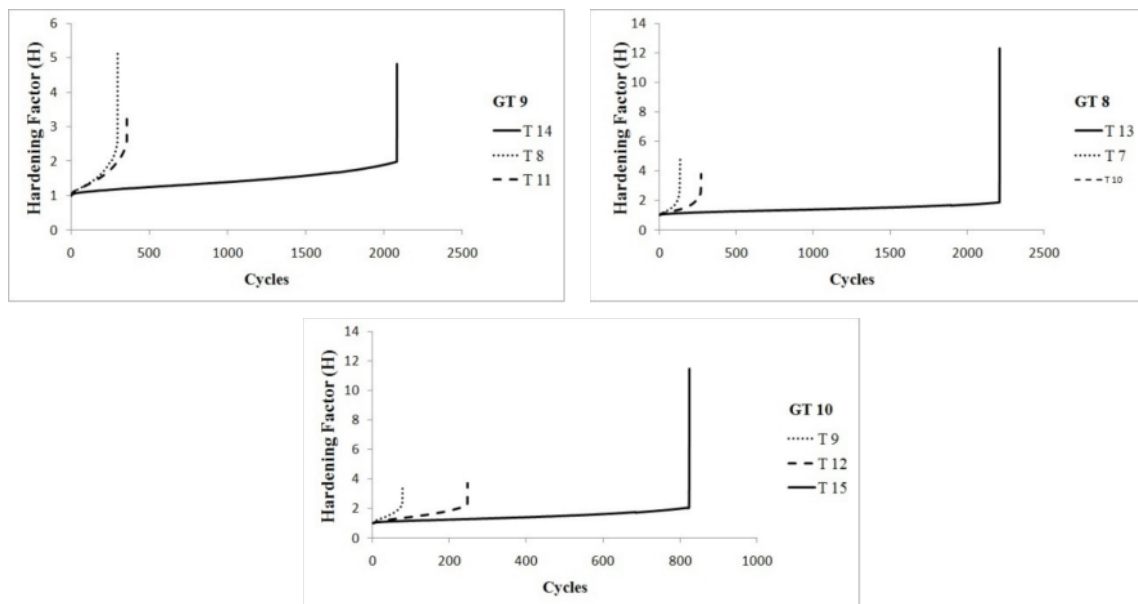
$$SR = \frac{E\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma} - 1 \quad (9-3)$$

عامل سخت شوندگی (H)، نسبت کرنش در سیکل معین SR_s به نسبت کرنش در سیکل اول SR_1 می باشد. با توجه به رابطه (۹-۳)، قابل درک است که برای مواد سخت شونده سیکلی $H < 1$ و برای مواد نرم شونده سیکلی $H > 1$ است.

با توجه به نمودارهای شکل (۷۲-۳) که فشار داخلی متغیر است، ملاحظه می شود در نمونه بدون فشار، مقادیر عامل سخت شوندگی بزرگتر بوده و یا به عبارتی نرم شوندگی بیشتری دیده می شود. با توجه به نمودارهای شکل (۷۲-۴) که دامنه تنش متغیر است، ملاحظه می شود در نمونه با کمترین مقدار دامنه تنش، مقادیر عامل سخت شوندگی بزرگتر بوده و یا به عبارتی نرم شوندگی بیشتری دیده می شود.

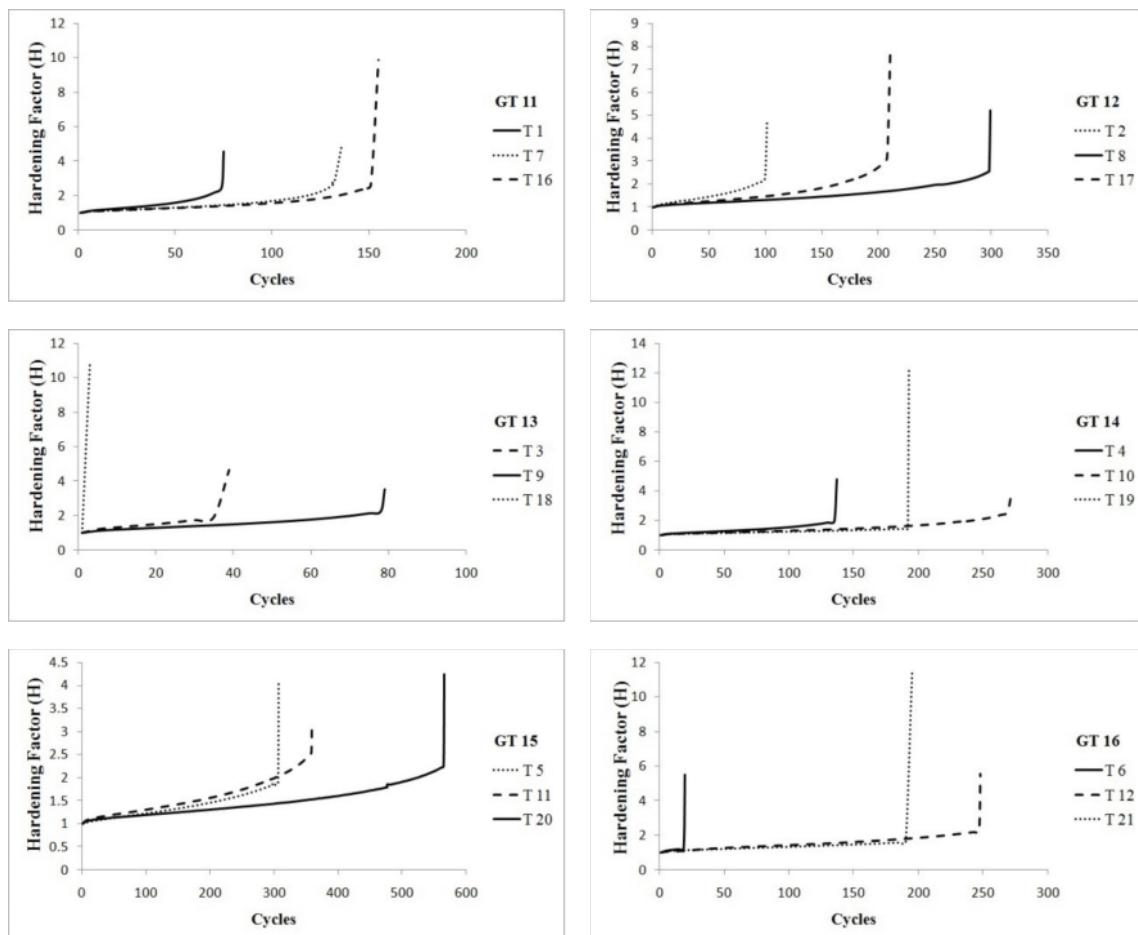


شکل ۳-۷۳: عامل سخت شونده‌گی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT1 تا GT7



شکل ۳-۷۴: عامل سخت شونده‌گی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT8 تا GT10

با توجه به نمودارهای شکل (۳-۷۳) که تنش میانگین متغیر است، ملاحظه می‌شود در نمونه با کمترین مقدار تنش میانگین، مقادیر عامل سخت شوندگی بزرگتر بوده و یا به عبارتی نرم شوندگی بیشتری دیده می‌شود. تمامی نمودارها بدون استثنا مؤید این امرند که مقادیر کمتر بارگذاری، منجر به ایجاد نرم شوندگی بیشتر در نمونه می‌شوند.



شکل ۳-۷۵: عامل سخت شوندگی بر حسب تعداد سیکل آزمایش‌های گروه GT11 تا GT16

۳-۶ اثر ضخامت لوله و فرکانس بارگذاری

۳-۶-۱ نحوه آزمایش

جهت بررسی تأثیر فرکانس و ضخامت لوله بر رفتار رچتینگ، لوله‌های پلی‌استال در ضخامت‌ها و فرکانس‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. مقادیر نیروی متوسط و دامنه نیرو برای نمونه‌های

تحت آزمایش بررسی اثر ضخامت، در جدول (۳-۴) آمده است. در این آزمایش‌ها فرکانس ثابت و برابر $0/4192 \text{ Hz}$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۴: کمیت‌های اعمال شده و اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آزمایش شده به منظور بررسی اثر ضخامت

نمونه	ضخامت	نیروی	دامنه	سیکل نهایی (Nf)
SP1	۲	۳/۹۰۲	۳/۹۰۲	۱
SP2	۲/۵	۴/۷۷	۴/۷۷	۸۹۶
SP3	۵	۸/۴۸	۸/۴۸	۴۷۸
SP4	۷.۵	۱۱/۱۳	۱۱/۱۳	۴۹۳
SP5	توپر	۱۳/۲۵	۱۳/۲۵	۴۷۲

در آزمایش بررسی اثر فرکانس، مقدار متوسط نیرو و دامنه نیرو برابر مقدار ثابت $4/77 \text{ kN}$ انتخاب شده و مقادیر فرکانس در جدول (۳-۵) آمده است.

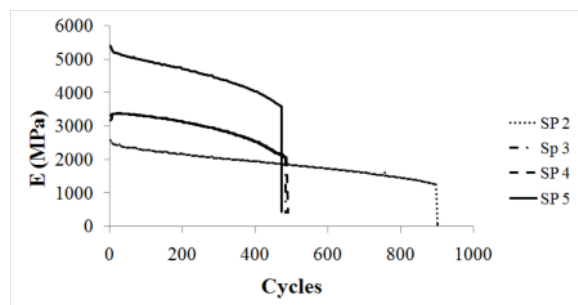
جدول ۳-۵: کمیت‌های اعمال شده و اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آزمایش شده به منظور بررسی اثر فرکانس

نمونه	زمان (S)	فرکانس	سیکل
SP6	۸۱۷۷/۵	۰/۲۰۹۶	۱۷۱۴
SP7	۱۹۲۹/۹	۰/۴۱۹۲	۸۰۹
SP8	۵۳۹/۱	۰/۶۲۸۸	۳۳۹
SP9	۵۵۴/۸	۰/۷۳۳۶	۴۰۷
SP10	۸۱۵/۸	۰/۸۳۸۴	۶۸۴
SP11	۶۳۶/۹	۱/۲۵۷۶	۸۰۱

۳-۶-۲ بررسی شیب حلقه هیستریزیس

نمودار شیب حلقه هیستریزیس بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای گروه آزمایش‌های مربوط به ضخامت‌های مختلف در شکل (۳-۷۴) رسم شده است. مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، مقدار شیب کاهش یافته که بیانگر نرم شوندگی ماده است. با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، علاوه بر کاهش شیب، نرخ کاهش شیب نیز بیشتر شده که نشان دهنده بیشتر شدن نرم شوندگی با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است. در دو نمونه SP3 و SP4 نمودار تغییرات شیب حلقه

هیستریزیس بر هم منطبق است. در نمونه توپر، شیب حلقه هیستریزیس مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. هرچه نمونه شعاع داخلی بیشتری داشته باشد، نرم شوندگی بیشتری را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷۶: شیب حلقه هیستریزیس برای نمونه با ضخامت‌های مختلف

این صفحه سفید گذاشته شده است.

تحليل نتایج

در این فصل سعی شده است تا رفتار رچتینگ پلی‌استال که به صورت تجربی تعیین شده است، تحلیل شود. در ابتدا معیاری برای تعیین عمر خستگی لوله های پلی‌استال ارائه می‌شود. سپس برای نمونه های با فشار داخلی با استفاده از روابط حل تحلیلی، مقادیر جابجایی شعاعی محاسبه شده و نتایج تجربی با آن مقایسه شده است.

۱-۴ معیارهای خستگی

در اینجا طبق دو معیار خستگی بر اساس دیدگاه تنش و کرنش مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در هر کدام از این دیدگاه ها رابطه‌ای همانند رابطه (۱-۴) عمر خستگی را به کمیت آسیب مرتبط می‌سازد [۲۶].

$$\psi = \kappa \cdot (N_f)^\gamma + \psi_0 \quad (1-4)$$

به طوری که ψ کمیت آسیب، N_f عمر خستگی، ψ_0 حد خستگی و γ و κ نیز کمیت هایی مربوط به ماده می‌باشد. بر اساس هر کدام از دو دیدگاه تنش یا کرنش، کمیت آسیب باید تابعی از تنش و یا کرنش انتخاب شود.

۱-۱-۴ خستگی از دیدگاه تنش

در مرجع [۲۷] یک رابطه توانی ساده برای تابع تنش به صورت زیر ارائه شده است:

$$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right) = \left(1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)^n \quad (4-2)$$

که در آن n و η ثابت های ماده می باشند.

σ_a دامنه تنش و σ_m تنش میانگین است. با قرار دادن $\sigma_m = 0$ می‌توان متوجه شد که در آزمایشات متقارن می‌توان به جای مقدار تنش موثر، از دامنه تنش استفاده کرد. لازم به ذکر است که رابطه (۲-۴) به ازای $n = 1$ معنای فیزیکی دارد [۲۶]. بنابراین در این پژوهش نیز $n = 1$ قرار داده شده است. برای آزمایشات با بارگذاری متقارن می‌توان نوشت:

$$\sigma_{eq} = (1 + \eta \frac{\sigma_m}{\sigma_a}) \sigma_a \quad (۳-۴)$$

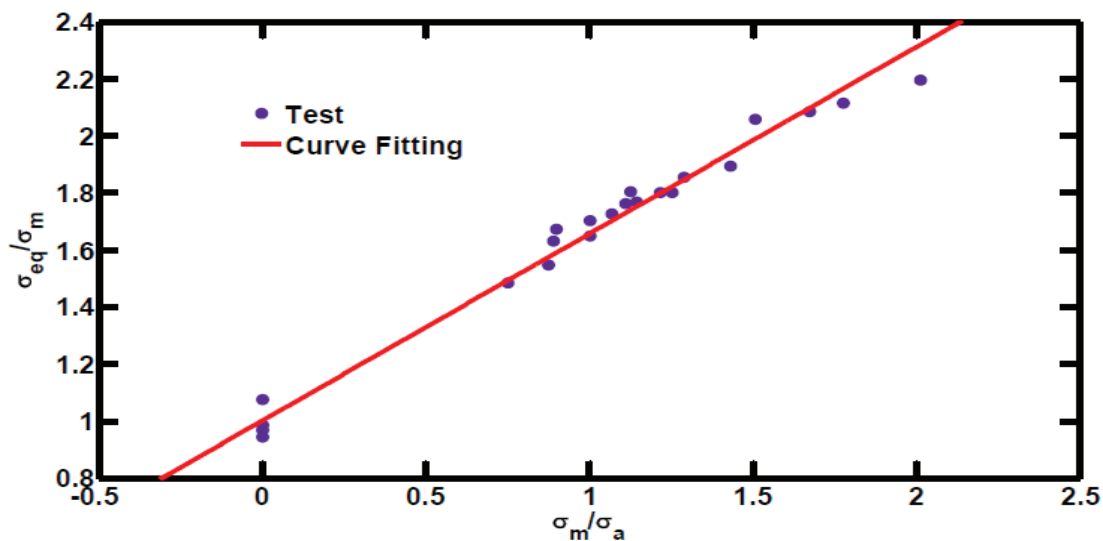
با رسم $\frac{\sigma_a}{\sigma_{eq}}$ بر حسب $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$ ثابت η بدست می‌آید.

در ابتدا برای بدست آوردن رابطه ای برای پیش بینی عمر خستگی ماده لازم است که از رابطه ی (۴-۴) استفاده کرد و ثابتها σ_0 ، γ و κ را بدست آورد.

$$\sigma_{eq} = \kappa \cdot N_f^\gamma + \sigma_0 \quad (۴-۴)$$

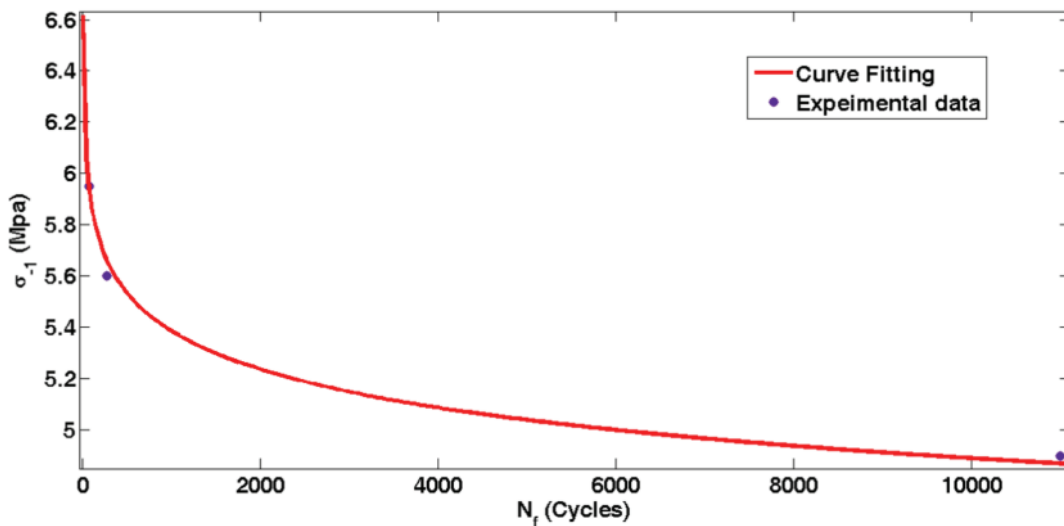
سپس در مرحله بعد با توجه به آنکه رابطه ای برای تنش موثر بدست می‌آید، می‌توان ثابت‌های آن را مشخص نمود. آنگاه مقادیر تنش موثر برای تمام آزمایشات محاسبه شده، سپس با استفاده از رابطه (۳-۴) نمودار $\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_a}$ بر حسب $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$ را رسم کرده و ثابت η بدست خواهد آمد.

در مرحله سوم با ترکیب ثوابت بدست آمده، رابطه (۳-۴) کامل شده و معرف عمر خستگی ماده می‌باشد. در این پژوهش با توجه به آنکه آزمایشات متقارن انجام نشده است، برای ارائه رابطه ای جهت پیش‌بینی عمر خستگی، به جای استفاده آزمایشات متقارن، از رابطه ای ارائه شده توسط شریعتی و همکاران [۱۳] و [۲۱] استفاده شده است و آزمایشاتی که دارای تنش میانگین و دامنه تنش یکسانی بوده است، ملاک قرار گرفته و از داده‌های آن در رابطه ی (۴-۴) استفاده شده است:



شکل ۴-۱: تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش [۱۷]

با توجه به نمودار شکل (۴-۱)، برای داده های با $\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = 1$ مقدار $\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_m}$ حدود $1/6$ در نظر گرفته شده است. بنابراین با رسم نمودار تنش موثر بر حسب عمر خستگی برای سه آزمایشی که دامنه تنش و تنش میانگین یکسانی دارند، شکل (۴-۲) حاصل می گردد.



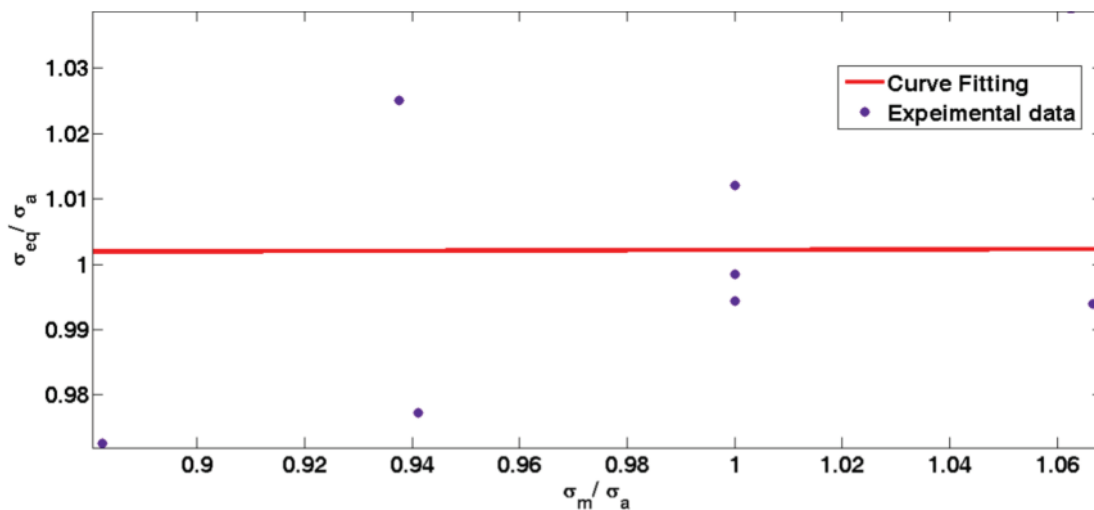
شکل ۴-۲: برازش منحنی توانی از دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی

با برآزش منحنی بر داده‌های تجربی، مقادیر ثابتهای رابطه (۵-۴)، یعنی σ_0 ، γ و κ به ترتیب برابر 62.17 ، 0.003774 و -55.32 خواهد بود.

حال با توجه به دست آمدن ثابت‌ها، جهت تبدیل مقادیر تنش آزمایش‌ها به مقادیر تنش موثر می‌توان از رابطه (۵-۴) استفاده نمود. رابطه مذکور را به نحو زیر است:

$$\sigma_{eq} = -55.32N_f^{0.003774} + 62.17 \quad (5-4)$$

همچنین با رسم نمودار $\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_a}$ بر حسب $\frac{\sigma_m}{\sigma_a}$ مقدار η برابر 0.002165 بدست می‌آید.

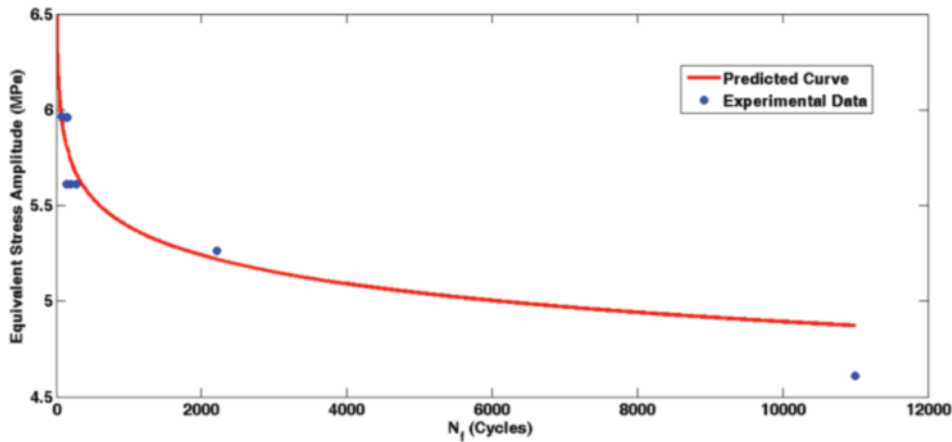


شکل ۴-۳: تابع تنش میانگین برای دیدگاه تنش

بنابراین، جهت پیش بینی عمر خستگی بر اساس دیدگاه تنش، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$(1 + 0.002165 \frac{\sigma_m}{\sigma_a})\sigma_a = -55.32N_f^{0.003774} + 62.17 \quad (6-4)$$

نتایج آزمایش‌های تجربی و رابطه‌ی (۶-۴) در نمودار زیر رسم شده است که مطابقت خوبی را با یکدیگر نشان می‌دهد.



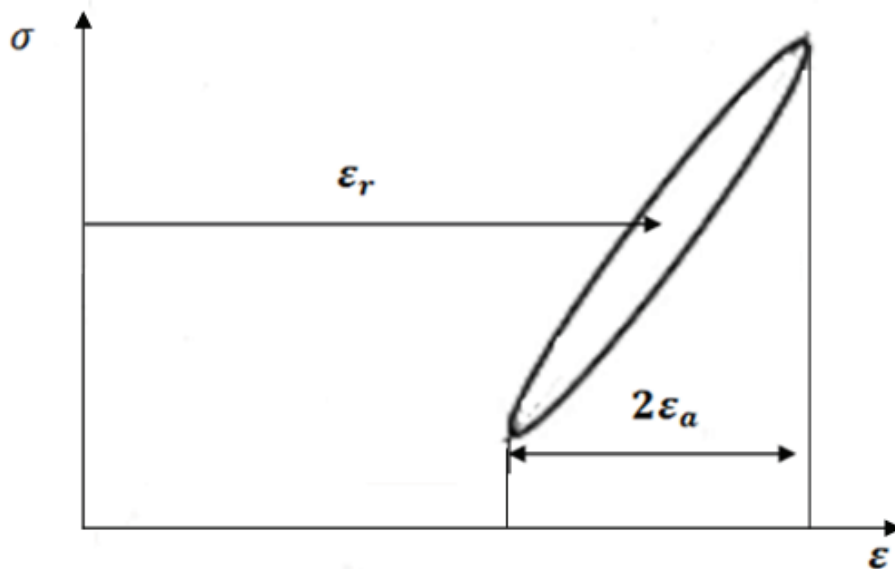
شکل ۴-۴: نمودار دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی

۴-۱-۲ خستگی از دیدگاه کرنش

تحلیل عمر خستگی بر اساس کرنش روش دیگری است که در ادامه به آن پرداخته شده است. در اینجا همانند روش تنش رابطه ای مشابه رابطه (شماره رابطه تنش) معرفی کرده و کرنش معادل مشابه رابطه (۷-۴) تعریف می‌گردد.

$$\varepsilon_{eq} = (1 + \eta \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}) \varepsilon_a \quad (7-4)$$

باتوجه به آنکه آزمایشات به صورت تنش - کنترل انجام شده است، مقادیر کرنش‌های بدست آمده از نتایج آزمایش‌های تنش-کنترل بدست آمده است. بنابراین کرنش میانگین و دامنه کرنش، مقادیر ثابتی نداشته و از مقادیر متوسط آن در طول بارگذاری استفاده شده است. کرنش میانگین و دامنه کرنش در هر سیکل در شکل (۵-۴) معرفی شده است. در هر آزمایش و برای هر سیکل بارگذاری این مقادیر محاسبه شده و در نهایت با میانگین گیری مقادیر متوسط دامنه کرنش و کرنش میانگین بدست می‌آید. روند مراحل نیز مشابه قسمت قبلی (دیدگاه تنش) بوده و نیازی به تکرار آن نیست. در اینجا روابط و مقادیر محاسبه شده ارائه می‌گردد.

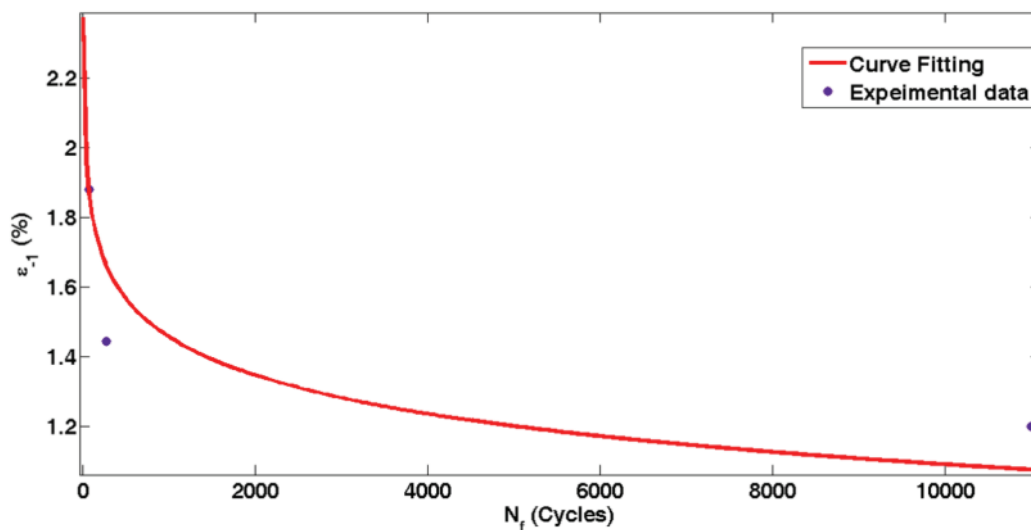


شکل ۴-۵: معرفی دامنه کرنش و کرنش میانگین

با برازش داده‌های گروه مربوطه مقادیر ثوابت در رابطه (۴-۸) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_{eq} = \kappa \cdot N_f^\gamma + \varepsilon_0 \quad (۴-۸)$$

بنابراین مقادیر ε_0 ، γ و κ به ترتیب برابر ۱۹۲/۱، ۰/۰۰۰۸۳۲۹ و ۱۸۹/۶- به دست می‌آید.

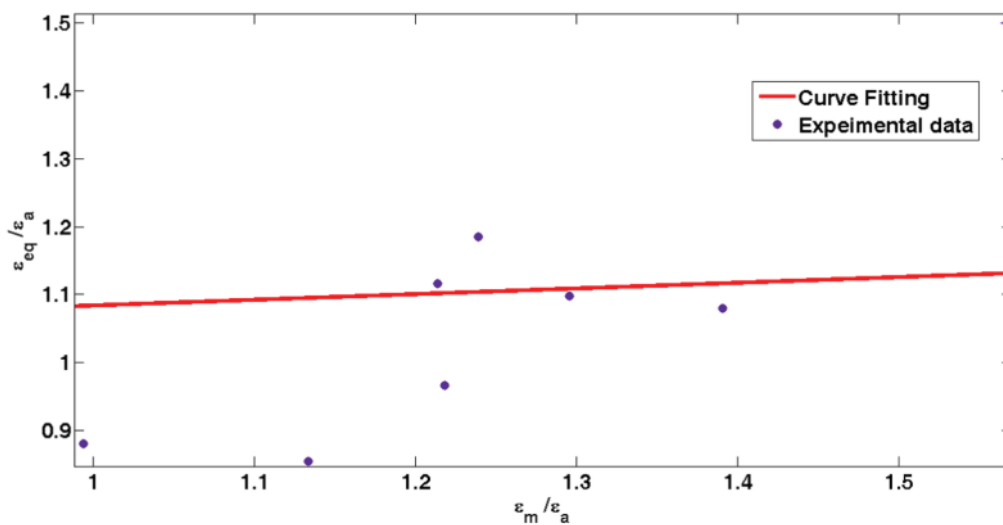


شکل ۴-۶: برازش منحنی توانی از داده‌های دامنه کرنش معادل بر حسب عمر خستگی

حال با استفاده از رابطه (۸-۴) رابطه ای برای محاسبه کرنش موثر بدست آمده که می توان با استفاده از آن مقادیر کرنش موثر هر آزمایش را محاسبه کرد.

$$f\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) = 1 + \eta \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} \quad (9-4)$$

با رسم نمودار $\frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_a}$ بر حسب $\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}$ و برازش خطی آن مشابه رابطه (۹-۴) مقدار ثابت η برابر 0.08371 بدست می آید.

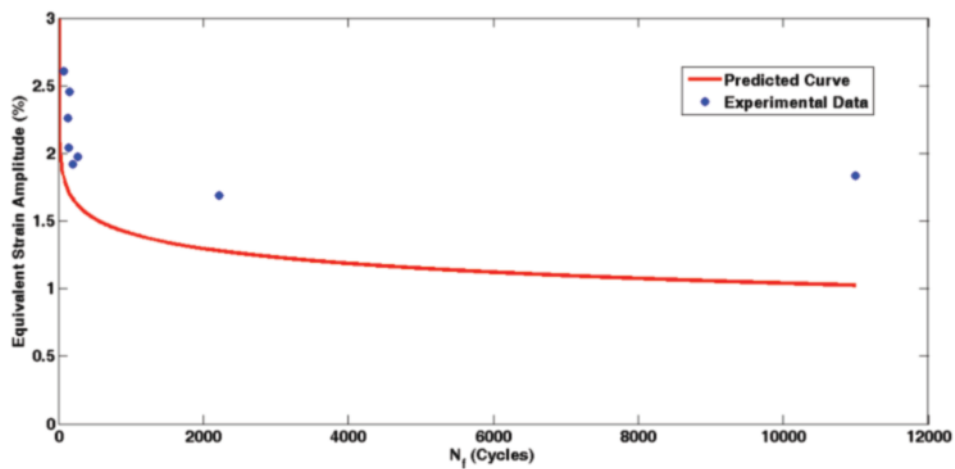


شکل ۴-۷: تابع کرنش میانگین برای دیدگاه کرنش

در نهایت با ترکیب دو رابطه (۷-۴) و (۵-۴) رابطه ای برای تخمین و پیش بینی عمر خستگی مشابه رابطه (۱۰-۴) بدست می آید.

$$-189.6 \cdot N_f^{0.0008329} + 192.1 = \left(1 + 0.08371 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) \varepsilon_a \quad (10-4)$$

نمودار رابطه (۱۰-۴) در شکل (۷-۴) ترسیم شده است.



شکل ۴-۸: نمودار دامنه تنش معادل بر حسب عمر خستگی

در جدول (۱-۴) خطای حاصل از هر دو دیدگاه محاسبه شود و با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴-۱ - مقایسه مقادیر تجربی و پیش بینی عمر خستگی

دیدگاه کرنش			دیدگاه تنش			نمونه
خطا (%)	پیش بینی	داده های تجربی	خطا (%)	پیش بینی	داده های تجربی	
۳۰.۲۷	۱.۸۱۶۹	۲.۶۰۵۸	۰.۳۶	۵.۹۴۱۲	۵.۹۶۲۸	T1
۱۵.۶۹	۱.۷۲۲۶	۲.۰۴۳۴	۳.۴۵	۵.۸۱۳۲	۵.۶۱۲۸	T2
۲۳.۹۲	۱.۷۲۱۴	۲.۲۶۲۹	۲.۵۳	۵.۸۱۴۷	۵.۹۶۲۱	T3
۱۳.۸۵	۱.۷۰۱۸	۱.۹۷۵۵	۰.۹۷	۵.۶۶۷۱	۵.۶۱۲۱	T4
۱.۲۱	۱.۶۶۷۱	۱.۶۸۷۶	۰.۸۳	۵.۲۱۸۴	۵.۲۶۲۱	T5
۳۴.۳۷	۱.۶۱۲۶	۲.۴۵۷۵	۳.۰۱	۵.۷۸۶۹	۵.۹۶۱۳	T6
۳۳.۲۷	۱.۲۷۹۸	۱.۹۱۸۲	۲.۴۵	۵.۷۴۰۲	۵.۶۱۱۳	T7
۴۴.۲۰	۱.۰۲۴۷	۱.۸۳۶۵	۵.۳۸	۴.۸۷۲۶	۴.۶۱۰۶	T8
۲۴.۶			۲.۳۷			میانگین خطا (%)

با مقایسه نتایج پیش بینی‌های خستگی از دیدگاه‌های تنش و کرنش یعنی نمودار شکل‌های (۱۶) و (۱۹) و جدول (۵) پرواضح است که دیدگاه تنش با متوسط خطای ۲/۳۷٪ عملکرد بهتری نسبت به دیدگاه کرنش با خطای ۲۴/۶٪ دارد.

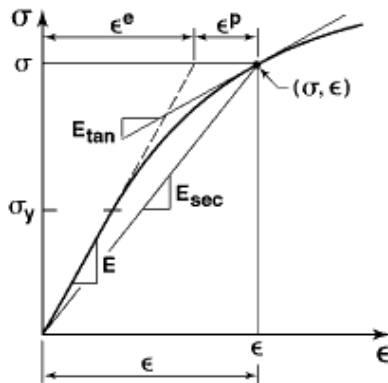
۲-۴ محاسبه تحلیلی کرنش شعاعی

با توجه به بهبود عمر خستگی در فشار داخلی ۱۰ bar، به نظر می‌آید دلیل این امر مربوط به جابجایی و کرنش شعاعی باشد. بدین منظور مقادیر مذکور به صورت تحلیلی محاسبه شده است. این بحث تا حدودی جوابگو بوده لکن در تمامی موارد انطباق کامل ندارد.

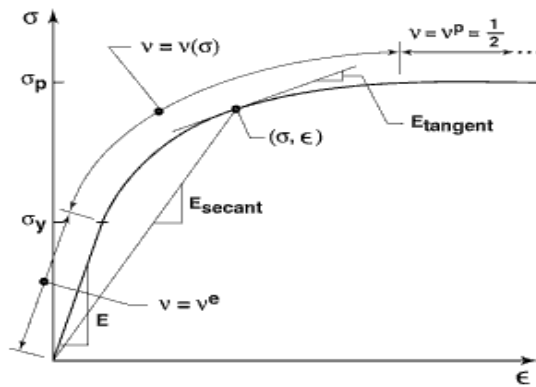
در استوانه ای که تحت بار محوری است، تغییر شکل محوری باعث تغییر شکل شعاعی می‌شود و این تغییرات را می‌توان با استفاده از ضریب پواسون (رابطه (۴-۱۱)) بدست آورد. با توجه به آنکه بارگذاری به نحوی است که نمونه در منطقه پلاستیک نیز وارد می‌شود، لازم است که از مقادیر ضریب پواسون مناسبی استفاده شود. در ادامه نحوه محاسبه ضریب پواسون متناسب با ناحیه تغییر شکل توضیح داده شده است.

$$v = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (۴-۱۱)$$

روابط معرفی شده نشان می‌دهد که ضریب پواسون تابعی از E_{sec} بوده و E_{sec} خود تابعی از سطح تنش است. لذا رابطه ی $v(\sigma)$ ، بیانگر تابع مستقیمی از تنش نیست. این مفاهیم در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) به نمایش در آمده است [۲۸].



شکل ۴-۹: کرنش الاستیک، پلاستیک و کلی [۲۸]



شکل ۴-۱۰: تغییرات ضریب پواسون با تنش [۲۸]

با توجه به نوع بارگذاری سیکلی، در هر سیکل بارگذاری از مقادیر الاستیک تا پلاستیک تغییرات داشته و لذا لازم است مقدار ضریب پواسون محاسبه شود. بدین منظور با توجه به بارگذاری پیوسته در ناحیه پلاستیک، در تمامی نقاطی که داده های آن ذخیره شده بود، مقدار ضریب پواسون پلاستیک محاسبه شده است و در نهایت از این مقادیر میانگین گرفته شده است و با توجه به بارگذاری و سهم هر کدام از مناطق الاستیک و پلاستیک و وزن دهی به آن، با توجه به رابطه (۴-۱۲) مقدار ضریب پواسون محاسبه شده است:

$$v = \frac{v^e \sigma^e}{\sigma^p} + v^p \frac{(\sigma^p - \sigma^e)}{\sigma^p} \quad (4-12)$$

تئوری مربوط به روابط بین تنش و کرنش به صورت کلی دو دسته‌اند :

۱- تئوری کرنش کلی یا تئوری تغییر شکل^۱

۲- تئوری کرنش نموی یا تئوری جریان^۲

در این دو تئوری، کرنش به دو قسمت الاستیک ϵ^e و پلاستیک ϵ^p تقسیم می‌شود. در تئوری تغییر شکل، کرنش کلی مستقیماً به تنش کلی و شیب مدول که تابعی از سطح تنش است مربوط می‌شود. در مقابل در تئوری نموی، هر نموی یا دیفرانسیل کرنش پلاستیک $\Delta \epsilon^p$ یا $d\epsilon^p$ ، به تغییرات و یا دیفرانسیل تنش یعنی $\Delta \sigma^p$ یا $d\sigma^p$ مرتبط می‌شود که مدول مماسی تابعی از تنش است. بدین ترتیب معادلات دیفرانسیلی یا جزئی حاصله در یک مسیر بارگذاری، انتگرال گرفته شده تا جواب حاصل شود. دو تئوری بیان شده در یک نکته مشابه هستند و آن تغییر شکل‌های الاستیک تراکم پذیر و تغییر شکل‌های پلاستیک تغییر ناپذیر (حجم ثابت) است. مقدار ضریب پواسون بین صفر تا ۰/۳۵ در مقادیر الاستیک تغییر می‌کند و در حالت کاملاً پلاستیک مقدار آن به ۰/۵ می‌رسد. لذا می‌توان مطابق شکل (۱۰-۴) تغییرات ضریب پواسون را به صورت زیر بیان کرد.

$$v = v^e \quad \sigma \leq \sigma_y \quad (13-4)$$

$$v = v(\sigma) \quad \sigma > \sigma_y \quad (14-4)$$

$$v = \frac{1}{2} \quad \sigma \gg \sigma_y \quad (15-4)$$

در این جا سعی بر آن است که تابع $v(\sigma)$ به دست آید. برای بدست آوردن ضریب پواسون و تابع آن بر حسب تنش $v(\sigma)$ از اتساع^۳ (θ) استفاده شده است.

^۱ total strain theory or deformation theory

^۲ incremental strain theory or flow theory

^۳ dilatation

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (16-4)$$

از طرفی با توجه به تعریف ضریب پواسون و استفاده از رابطه (11-4) می توان معادله (16-4) را به صورت رابطه (17-4) نوشت.

$$\theta = \varepsilon(1 - 2\nu) \quad (17-4)$$

که در آن ε کرنش کلی تحت بارگذاری محوری تنش σ و ν ضریب پواسون می باشد. اتساع را می توان به صورت جداگانه برای حالت الاستیک و پلاستیک در نظر گرفت.

$$\theta^e = \varepsilon^e (1 - 2\nu^e) \quad (18-4)$$

$$\theta^p = \varepsilon^p (1 - 2\nu^p) \quad (19-4)$$

با ترکیب دو معادله (18-4) و (19-4) می توان نوشت :

$$\varepsilon(1 - 2\nu) = \varepsilon^e (1 - 2\nu^e) + \varepsilon^p (1 - 2\nu^p) \quad (20-4)$$

با تقسیم طرفین بر ε و ساده سازی می توان نوشت :

$$(1 - 2\nu) = \frac{\varepsilon^e (1 - 2\nu^e)}{\varepsilon} + \frac{\varepsilon - \varepsilon^e}{\varepsilon} (1 - 2\nu^p) \quad (21-4)$$

$$-2\nu = \frac{\varepsilon^e (-2\nu^e)}{\varepsilon} - 2\nu^p + \frac{\varepsilon^e}{\varepsilon} 2\nu^p \quad (22-4)$$

$$\nu = \nu^p - \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon} (\nu^p - \nu^e) \quad (23-4)$$

مقدار $\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon}$ را می توان به صورت زیر تعریف کرد :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, E_{scc} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (24-4)$$

$$\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon} = \frac{\frac{\sigma}{E}}{\frac{\sigma}{E_{scc}}} = \frac{E_{scc}}{E} \quad (25-4)$$

در نهایت با جایگذاری $\nu^p = \frac{1}{2}$ می توان رابطه (26-4) را نوشت :

$$v = 1 - \frac{E_{scc}}{E} \left(\frac{1}{2} - v^e \right) \quad (26-4)$$

با استفاده از رابطه (۲۶-۴) مقادیر ضریب پواسون برای تمامی بارگذاری ها و گروه‌ها بدست آورده شده و در جدول (۱-۴) آمده است. با دقت به مقادیر ضریب پواسون و مقایسه این مقادیر، بدیهی است که اختلاف آن‌ها چندان زیاد نبوده، بنابراین مقدار کرنش شعاعی مستقیماً به کرنش محوری وابسته می‌شود. لذا در گروه‌هایی که فشار داخلی ۱۰ bar بوده، اگر کرنش رج‌تینگ مربوطه در مقایسه با نمونه با فشار داخلی ۳۰ bar و بدون فشار داخلی، بیشتر باشد؛ آنگاه مقدار کرنش شعاعی هم بیشتر شده و می‌تواند توجیهی برای رفتار خاص مشاهده شده باشد. لکن در تمامی گروه‌ها این بحث کاملاً منطبق نبوده و قابل تعمیم نیست.

جدول ۴-۲: خلاصه آزمایش‌های تجربی

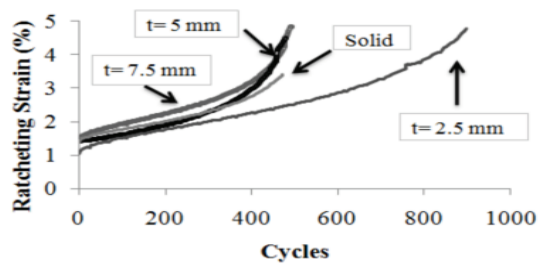
Test	v	Test	v
T1	0.369437	T13	0.364505
T2	0.369412	T14	0.364582
T3	0.3693	T15	0.364689
T4	0.367357	T16	0.365898
T5	0.366993	T17	0.366541
T6	0.36645	T18	0.378749
T7	0.367786	T19	0.362142
T8	0.366863	T20	0.364002
T9	0.368055	T21	0.363014
T10	0.369884	T22	0.364566
T11	0.366892	T24	0.364784
T12	0.366509		

۴-۳ بررسی اثر ضخامت و فرکانس

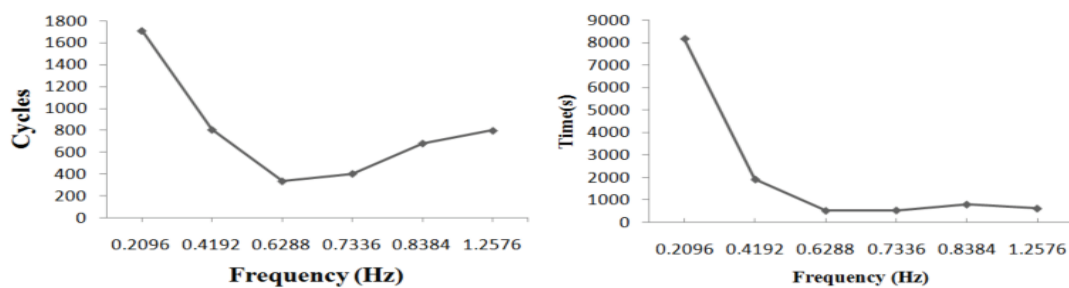
در آزمایشات بررسی اثر ضخامت بر رفتار رج‌تینگ، مشاهده شد که ضخامت ۲ mm در مقابل تغییر شکل پلاستیک مقاومت نداشته و در همان سیکل اول می‌شکند، از طرفی به جز ضخامت ۲/۵ mm، دیگر نمونه‌ها در حدود تعداد سیکل ۴۷۲ الی ۴۹۳ سیکل بارگذاری دچار زوال شده که نشان دهنده عمر

تقریباً یکسان آن‌هاست. این بدان معنی است که اعمال مقدار تنش یکسان، عمر خستگی یکسانی را بدون توجه به ضخامت ایجاد می‌کند. با توجه به شکل (۴-۱۱)، در نمونه توپر کمترین میزان کرنش رچتینگ (۳/۴٪) مشاهده شد و نمونه با ضخامت ۲/۵ mm بیشترین مقدار کرنش رچتینگ (۴/۸٪) را در هنگام شکست تحمل کرد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت، مقدار کرنش رچتینگ کاهش یافته که علت آن را می‌توان وجود توده ماده دانست که در مقابل تغییر شکل پلاستیک مقاومت می‌کند؛ حال آنکه در ضخامت‌های کمتر، نمونه به راحتی می‌تواند تغییر شکل دهد.

بعلاوه وابستگی رفتار رچتینگ به فرکانس بارگذاری بررسی شد و مشخص گردید که اگر فرکانس از مقدار ۰/۶۲۸۸ Hz بیشتر شود، زمان انجام آزمایش در کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه ثابت شده و تغییرات چندانی ندارد که در شکل (۴-۱۲) به نمایش آمده است. با توجه به شکل (۴-۱۲) می‌توان دریافت که در فرکانس‌های پایین نیز، هم تعداد سیکل‌ها و هم زمان انجام آزمایش افزایش می‌یابد. با گذر از مقدار ۰/۶۲۸۸ Hz و با افزایش فرکانس، تعداد سیکل‌ها افزایش یافته و در مقادیر معین فرکانس، تعداد سیکل شکست کمترین مقدار را خواهد داشت. با افزایش مقدار فرکانس، میزان زمان لازم برای انجام آزمایش تا حدودی ثابت مانده و می‌توان بیان داشت که زمان انجام آزمایش مستقل از فرکانس خواهد شد. برای آزمایشات بررسی اثر فرکانس به عنوان مثال نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل نمونه SP6 در شکل (۹) آورده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر کرنش رچتینگ در سیکل‌های انتهایی بوده و به سرعت افزایش می‌یابد تا آنکه نمونه گسیخته شود. با توجه به رفتار نمودارها و تشابه آنها به نمودارهای خزش، به کرنش رچتینگ، خزش سیکلی نیز گفته می‌شود. البته باید اذعان کرد که این بحث و نتایج حاصله صرفاً مربوط آزمایش چند نمونه با شرایط خاص بوده و نمی‌توان از آن یک نتیجه‌گیری کلی دریافت کرد.



شکل ۴-۱: نمودار کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل با ضخامت‌های مختلف



شکل ۴-۲: نمودارهای رفتار زمان آزمایش و تعداد سیکل بر حسب فرکانس

نتیجه گیری و

پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

به منظور استخراج نتایج قطعی تر و عمومی تر ضروری است آزمایشات تجربی با تعداد بسیار بیشتری انجام گردد؛ که البته بدلیل هزینه‌های بالا و مدت زمان محدود از حوصله این پایان‌نامه خارج می‌باشد، لذا نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان با توجه به آزمایشات محدود انجام شده به صورت خلاصه و صرفاً برای این ماده، نمونه و بارگذاری به نحو زیر بیان کرد:

۱- در گروه‌های *GT1* تا *GT7* نمونه‌ای که بیشترین کرنش رچتینگ را می‌تواند تحمل کند، عمر خستگی بیشتری دارد. می‌توان نتیجه گرفت نرخ بیشتر کرنش رچتینگ، باعث کاهش عمر خستگی نمونه می‌شود.

۲- با افزایش عمر خستگی نمونه، مسیر بار برداری داری انحنای خاصی می‌شود که نشان دهنده خواص نرم شوندگی ماده است.

۳- در آزمایشاتی که کرنش رچتینگ ایجاد می‌گردد، حلقه هیستریزیس بسته نمی‌شود. این پدیده نشان دهنده انباشتگی کرنش با افزایش تعداد سیکل‌هاست که بیانگر مفهوم کرنش رچتینگ است.

۴- در گروه‌های *GT1* تا *GT7* با افزایش تعداد سیکل‌ها حلقه‌ها نیز چاق تر می‌شوند و در نمونه‌ای که فشار داخلی بیشتری دارد، اولین حلقه بزرگتر بوده و کرنش رچتینگ بیشتری در همان سیکل اول ایجاد می‌کند.

۵- در هر سیکل، خاصیت نرم شوندگی ماده در ناحیه الاستیک بسیار بیشتر از ناحیه پلاستیک است. این امر را می‌توان از کاهش شیب حلقه هیستریزیس در قسمت باربرداری مشاهده کرد. دلیل این امر را می‌توان تراکم پذیر بودن ناحیه الاستیک و تراکم ناپذیری ناحیه پلاستیک دانست.

۶- عموماً در نمونه با فشار داخلی 10 bar ، نمونه کرنش رچتینگ بیشتری را تا هنگام شکست تحمل میکند و در نمونه با فشار داخلی 30 bar ، کمترین کرنش رچتینگ در هنگام شکست مشاهده می‌گردد؛ زیرا نمونه با فشار داخلی 10 bar ، عمر خستگی بیشتری داشته و فرصت بیشتری برای ذخیره کرنش در هر سیکل را داشته است.

۷- در یک بارگذاری یکسان، در فشار داخلی 10 bar ، نمونه بیشترین عمر خستگی و در فشار داخلی 30 bar ، کمترین عمر خستگی را به نمایش می‌گذارد.

۸- با افزایش تعداد سیکل، نرم شوندگی ماده قابل مشاهده است.

۹- در نمونه با فشار داخلی 10 bar ، به علت عمر خستگی زیادتر، نرم شوندگی بیشتری قابل مشاهده است.

۱۰- با دقت به آخرین حلقه هیستریزیس، شکل‌های (۳-۱۷) تا (۳-۱۹) می‌توان دریافت با کاهش دامنه تنش، حلقه لاغرتر شده و محدوده تغییرات کرنش کمتر می‌شود. از طرفی چون افزایش محدوده تغییرات کرنش بیانگر نرم شوندگی بیشتر ماده است، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دامنه تنش، نرم شوندگی ماده بیشتر می‌شود.

۱۱- با کاهش سطح دامنه میانگین، نرم شوندگی بیشتری مشاهده می‌شود و طول عمر خستگی ماده افزایش می‌یابد.

۱۲- با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، حدود تغییرات کرنش (حد بالا و حد پایین)، از هم دور می‌شوند. این امر نشان دهنده نرم شوندگی ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است.

۱۳- مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری به جز آزمایش $T8$ ، مقدار شیب حلقه هیستریزیس کم شده که بیانگر نرم شوندگی ماده است.

۱۴- با افزایش تعداد سیکل بارگذاری به جز آزمایش $T8$ ، علاوه بر کاهش شیب، نرخ کاهش شیب بیشتر شده که نشان دهنده بیشتر شدن نرم شوندگی با افزایش تعداد سیکل بارگذاری است.

۱۵- در نمونه با مقادیر بارگذاری کمتر، مقادیر عامل سخت شونده بزرگتر بوده و یا به عبارتی رفتار نرم شونده بیشتری دیده می‌شود.

۱۶- با توجه به نمودارهای عامل سخت‌شوندگی، نرم شونده بزرگتر ماده، باعث کاهش عمر خستگی می‌شود.

۱۷- نمودارهای عامل سخت‌شوندگی نشان می‌دهد که نرم شونده بزرگتر ماده با افزایش تعداد سیکل بارگذاری بیشتر می‌شود.

۱۸- می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت، مقدار کرنش رچتینگ کاهش یافته که علت آن را می‌توان وجود توده بزرگتر ماده دانست که در مقابل تغییر شکل پلاستیک، مقاومت می‌کند. حال آنکه در ضخامت‌های کمتر، نمونه به راحتی می‌تواند تغییر شکل دهد و کرنش رچتینگ بیشتری داشته و عمر بیشتری خواهد داشت.

۱۹- با توجه به هندسه و بارگذاری انجام شده اگر فرکانس از مقدار 0.6288 Hz بیشتر شود، زمان انجام آزمایش در کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه ثابت شده و تغییرات چندانی ندارد.

۲۰- با گذر از مقدار 0.6288 Hz و با افزایش فرکانس، تعداد سیکل‌ها افزایش یافته و در مقادیر معین فرکانس، تعداد سیکل شکست کمترین مقدار را خواهد داشت.

۲۱- با افزایش مقدار فرکانس، میزان زمان لازم برای انجام آزمایش تا حدودی ثابت می‌ماند.

۲۲- بر اساس مقادیر خطای بدست آمده از دو دیدگاه، نشان داده شد دیدگاه تنش در مقایسه با دیدگاه کرنش در پیش‌بینی عمر خستگی موفق‌تر است.

۵-۲- پیشنهادها

- ۱- انجام آزمایشات فشار داخلی بر روی دیگر مواد صنعتی به ویژه فلزات
- ۲- انجام آزمایشات مشابه بر روی پلیمرهای پر مصرفی چون *PTFE* و پلی‌آمیدها
- ۳- بررسی حلقه‌های هیستریزیس و مرتبط ساختن آن به انرژی کرنشی و پیش‌بینی رفتار ماده
- ۴- استفاده از مدل‌های پلاستیسیته‌ای که تاکنون ارائه شده و بررسی رفتار رجتینگ ماده پلی‌استال بر اساس آن
- ۵- ارتقای مدل‌های پلاستیسیته موجود بر اساس فشار داخلی
- ۶- بررسی رفتار رجتینگ پلی‌استال تحت انواع بارگذاری و بررسی اثرات دما

مراجع

[1] G. Kang, (2008), "Ratcheting: Recent progresses in phenomenon observation, constitutive modeling and application", **International Journal of Fatigue**, Vol. 30, pp. 1448-1472.

[2] S. M. Rahman, T. Hassan, (2008), "Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure", Edmundo Corona, **International Journal of Plasticity**, Vol. 24, pp. 1756-1791.

[۳] محمد گل محمدی، (۱۳۸۲)، "پلیمرها و فرآیندهای خاص پلیمری"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.

[۴] مجید شیخی نارانی، هربرت موروتز، (۱۳۷۳)، "پلیمرها و پیشرفت یک علم"، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی دفاعی.

[5] T. Osswald, G. Menges, (2003), "**Material science of polymers for engineers**", Hanser, Munich, Germany.

[6] M.E. Tuttle, (2003), "**Structural analysis of polymeric composite material**", Marcel Dekker Inc., New York.

[7] "**Polymer data handbook**", Oxford university press, 1999.

[8] G.Tao, Z. Xia, (2007), "Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life", **Polymer Testing**, Vol. 26, pp. 451-460.

[9] S. Hartmann, (2005), "Modeling and Simulation of Polyoxymethylene", **PAMM · Proc. Appl. Math. Mech.**, Vol. 5, pp. 273–274.

[10] X. Chen, S. Hui, (2005), "Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression", **Polymer Testing**, Vol. 24, pp. 829-833.

[11] Z. Zhang, X. Chen, (2009), "Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature", **Polymer Testing**, Vol. 28, pp. 288-295.

[12] W. Liu, Z. Gao, Z. Yue, (2008), "Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA", **Materials Science and Engineering A**, Vol. 492, pp. 102-109.

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

[14] B. Gao, X. Chen , G. Chen, (2006), "Ratchetting and ratchetting boundary study of pressurized straight lowcarbon steel pipe under reversed bending", **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Vol. 83, pp. 96-106.

[15] O. U. Colak, (2008) "Kinematic hardening rules for modeling uniaxialand multiaxial ratcheting", **Materials and Design**, Vol. 29, pp. 1575-1581.

[۱۶] محمود شریعتی ، حسین حاتمی، حسین یاراحمدی، حمیدرضا ایپک چی، (۱۳۹۰)، "بررسی تجربی و عددی رفتار پلی استال تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری"، اولین کنفرانس تخمین و تمديد عمر سازه‌های هوایی و قطعات صنعتی پیر و فرسوده، صفحه ۲۹، دانشگاه صنعتی شریف.

[17] M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H. Eipakchi, (2012), "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", **Materials & Design**, Vol. 34, , pp. 302-312.

[18] M. Shariati, H. Hatami, H. Eipakchi, H. Yarahmadi, H. Torabi, (2011), "Experimental and numerical investigation on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading", **Polymer-Plastic technology and engineering**, Vol. 50, pp. 1-7,.

[19] M. Shariati, H. Hatami, (2012), "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading", **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, In press.

- [20] N. Isobe, M. Sukekawa, Y. Nakayama, S. Date, T. Ohtani, Y. Takahashi, N. Kasahara, H. Shibamoto, H. Nagashima, and K. Inoue, (2008),“Clarification of strain limits considering the ratcheting fatigue strength of 316FR steel”. **Nuclear Engineering and Design**, Vol. 238, pp. 347–352.
- [21] S. Date, H. Ishikawa, T. Otani, and Y. Takahashi, (2008),“Effect of ratcheting deformation on fatigue and creep-fatigue life of 316FR stainless steel”. **Nuclear Engineering and Design**, Vol. 238, pp. 336–346.
- [22] H. Chen, W. Chen, T. Li, and J. Ure, (2011),“Effect of circular holes on the ratchet limit and crack tip plastic strainrange in a centre cracked plate”. **Engineering Fracture Mechanics**, 78, 2011, pp. 2310–2324.
- [23] J. Ure, H. Chen, T. Li, W. Chen, D. Tipping, and D. Mackenzie, (2011),“A direct method for the evaluation of lower and upper bound ratchet limits”. In 11th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, Lake Como.
- [24] S.K. Paul, S. Sivaprasad, S. Dhar, S. Tarafder, (2010),“Cyclic plastic deformation and cyclic hardening/softening behavior in 304LN stainless steel”, **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Vol. 54, pp. 63–70.
- [25] “**ASM Metals Handbook**”, Fatigue and fracture mechanics, Vol. 19, 10th Ed., 1979.
- [26] G. Tao, Z. Xia, (2007), “Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin”, **Int. J. Fatigue**. Vol. 29, pp. 2180-2190.
- [27] D. Kujawski, F. Ellyin, (1995),“A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions”. **Int J Fatigue**, Vol. 17, pp. 101-106.
- [28] R. M. Jones, (2009), “**Deformation theory of plasticity**”, Bull ridge publishing, USA, pp. 165-167.

Abstract

Ratcheting is one of the fatigue failure modes. Ratcheting is a phenomenon of progressive accumulation of deformation while materials are subjected to cyclic loading, especially under stress-controlled mode with non-zero mean stress. So study of ratcheting and its effective parameters is essential to control it and improve fatigue life. Fatigue is an important parameter to design engineering components. On the other hand, polyacetal is in use as a high fatigue characteristic material. To investigate ratcheting behavior of polyacetal, some experimental tests have been drawn and done. All tests were done by an Instron servo-hydraulic machine. Effects of frequency, thickness, stress amplitude, mean stress and internal pressure on ratcheting of polyacetal tube have been examined. To predict fatigue life stress approach and strain approach were investigated and a relation to forecast fatigue life presented. Result shows stress approach is more successful than strain approach to predict fatigue life. An analytical solution to calculate Poisson's ratio on elastic and plastic region presented. Also result shows if frequency is more than a specific value the time of the test is stable. Effect of thickness was studied and shown that similar axial stress has no effect on fatigue life. Increasing in thickness, results in decreasing the limit strain.

Keywords: polyacetal, ratcheting strain, fatigue, internal pressure, experimental test, stress-controlled test.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanic Engineering

**Ratcheting behavior of a polymer tubular under
axial loading and internal pressure**

Javad Yazdannezhad

**Supervisor:
Dr. Mahmoud Shariati**

June 2012