

مطالعه‌ی تجربی رفتار نرم‌شوندگی پلی‌استال تحت بارگذاری محوری تناوبی جابه‌جایی - کنترل

محمود شریعتی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

حسین یاراحمدی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

کمال کلاسنیانی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مکانیک شریف، (پار ۱۳۹۴)
دربی ۳ - ۳۱، شماری ۱، ص. ۱۲۵-۱۱۷، (یادداشت نمی)

در این نوشتار، رفتار نرم‌شوندگی ماده‌ی پلی‌استال (POM) تحت بارگذاری متناوب تک‌محوره جابه‌جایی - کنترل مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و در چهار گروه با نسبت کرنش کمینه به بیشینه متفاوت انجام شده است. در این آزمایش‌ها، کمیت‌های تنش میانگین، حدود تنش، شیب حلقه‌های هیستریزس، چگالی انرژی کرنشی اتلافی، و دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی - کشسانی بررسی شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که رهايش تنش میانگین در صورت صفر بودن کرنش میانگین مقداری ناچیز است، و کرنش میانگین مثبت باعث افزایش سرعت رهايش تنش میانگین می‌شود. چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده و دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی کشسانی برای انواع بارگذاری با افزایش تعداد سیکل به مقدار پایداری می‌رسند. همچنین چگالی انرژی کرنشی اتلافی در بارگذاری متناوب کششی - فشاری بیشتر از بارگذاری متناوب کششی است.

واژگان کلیدی: پلی‌استال، رفتار نرم‌شوندگی، بارگذاری متناوب تک‌محوره، چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده.

۱. مقدمه

پلی‌استال، یک پلیمر مهندسی با محدوده‌ی وسیعی از کاربردهاست که خواصی شبیه به فلزات دارد. ماده‌ی پلیمری پلی‌استال با توجه به خواص خستگی و سایشی ویژه، به عنوان یک پلیمر صنعتی، توانسته است در موارد خاص جای خالی بعضی از فلزات را پر کند. این پلیمر خواص بسیار خوبی دارد که خلاء بین پلیمرهای معمولی و فلزات را پر می‌کند. از زمان ورود این پلیمر به صنعت (۱۹۶۰) شاهد کاربردهای وسیع آن - نظیر کاربرد در صنایع اتومبیل‌سازی، تجهیزات برقی، ساختمان، سخت‌افزار، الکترونیک و بسیاری از صنایع دیگر - بوده‌ایم. پلی‌استال پلیمری تقریباً کریستالی است که از پلیمر یزاسیون فرمالدئید حاصل می‌شود، و به دلیل قابلیت ریخته‌گری عالی که دارد گزینه‌ی مناسبی برای ساخت قطعات با اشکال پیچیده و یا ابعاد ریز است. برای ارائه‌ی مثال‌هایی از کاربردهای مکانیکی پلی‌استال می‌توان به استفاده‌ی آن در بوش‌ها، یاتاقان‌ها و چرخ‌دنده‌ها اشاره کرد.

با توجه به کاربرد فراوان این مواد (به ویژه پلی‌استال) در مواردی که تحت انواع بارهای تناوبی قرار می‌گیرند، مطالعه‌ی تجربی خواص سیکلی آن - از جمله رفتار

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۹.

mshariati44@um.ac.ir
hossein128@gmail.com
kamal.kolasangiani@stu.um.ac.ir

نرم‌شوندگی - ضروری است. از این رو بررسی پلیمرها تحت بارگذاری تناوبی اهمیت می‌یابد و تحقیقاتی در این زمینه نیز انجام شده است. در سال ۲۰۰۷ رفتار رچتینگ اپوکسی پلیمر و اثر آن بر عمر خستگی بررسی شد که در آن، تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط تنش - کنترل و در دمای اتاق صورت گرفت.^[۱] نتایج کمی این آزمایش‌ها (نظیر کرنش رچتینگ، حدود تغییرات تنش و چگالی انرژی کرنشی) در تنش‌های میانگین و دامنه‌های تنش متفاوت از داده‌های تنش - کرنش نشان داد که مقدار کرنش رچتینگ و نرخ آن متأثر از تنش میانگین و دامنه‌ی تنش است.

در سال ۲۰۰۵ رفتار رچتینگ پلیمر PTFE تحت بارگذاری سیکلی فشاری مورد بررسی قرار گرفت.^[۲] مطالعه‌ی اثرات نرخ بارگذاری، تنش میانگین و دامنه‌ی تنش بر رفتار رچتینگ PTFE در بررسی یادشده نشان داد که این پلیمر ماده‌ی وابسته به نرخ بارگذاری است، اما اگر نرخ بارگذاری بیشتر از ۴۰ N/s باشد حساسیت این ماده به نرخ بارگذاری از بین خواهد رفت. مشاهده شد که کرنش رچتینگ با کاهش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد و وقتی که نرخ بارگذاری بزرگ‌تر از ۴۰ N/s باشد، اثر نرخ بارگذاری بر نرخ کرنش رچتینگ کم می‌شود.

در سال ۲۰۰۸، رفتار رچتینگ چندمحوره PTFE در دمای اتاق مورد مطالعه قرار گرفت.^[۳] و طی آن مجموعه‌ی آزمایش‌های رچتینگ چندمحوره بر نمونه‌های



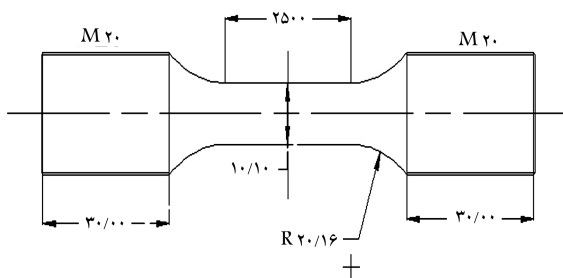
شکل ۱. دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲.

۳. نمونه‌ها و شرایط مرزی

چنان‌که گفته شد ماده‌ی پلیمری مورد استفاده در این پژوهش، پلی استال یا پلی اکسی متیلن (POM) است که در بازار با نام تجاری دلرین نیز شناخته شده است. آزمون‌های خستگی تک‌محوره، با آزمون‌های سیکلی مواد پلیمری اغلب با استفاده از نمونه‌هایی انجام می‌شود که غالباً مبتنی بر استاندارد ASTM D۶۳۸ یا استاندارد معادل آن (یعنی ISO۵۲۷) هستند. [۱۰-۱۲]

از آنجا که ضخامت نمونه‌ها در این حالت در مقایسه با طول آنها خیلی کوچک به‌شمار می‌آید، اعمال بار فشاری بدون خطر کمناش، حتی اگر بار فشاری اعمال شده کوچک باشد، ممکن نیست. به هر حال آزمایش‌های سیکلی روی مواد پلیمری -- در حالتی که هم بار فشاری و هم بار کششی اعمال شود -- با هیچ نمونه‌ی استاندارد خاصی پوشش داده نشده است. برای این نوع بارگذاری‌ها نمونه‌های متفاوتی در مقالات مختلف می‌توان پیدا کرد که هریک هندسه‌ی خاص خود را دارد.

برای تهیه‌ی نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها از میلگردهای پلی استال با قطر ۲۰ mm استفاده شده است. این میلگردها با استفاده از دستگاه تراش CNC به‌منظور به دست آوردن نمونه‌ها تراش داده شده‌اند. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، طول قسمت اندازه‌گیری^۲ نمونه‌ها برابر ۲۵ mm و قطر آن برابر ۱۰/۱ mm است.



شکل ۲. شماتیک نمونه (ابعاد برحسب میلی‌متر).

استوانه‌یی توپر پلی‌تترافلوئید اتیلن انجام گرفت. همه‌ی آزمایش‌ها با اعمال کرنش برشی سیکلی و با تنش محوری ثابت در دمای اتاق انجام شد و اثرات تنش محوری، حدود تغییرات کرنش، نرخ کرنش برشی و تاریخچه‌ی آنها بر رفتار خستگی PTFE مورد مطالعه قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۲ محققین به مطالعه‌ی تجربی پلیمر PA۶۶ تحت بارگذاری برشی سیکلی پرداختند. آنها این آزمایش‌ها را بدون اعمال بار عرضی با اندازه‌گیری دما بر ورق‌هایی از جنس پلی‌آمید انجام دادند. [۴] این آزمایش‌ها با استفاده از گیره‌های ساده‌یی که به دستگاه آزمایش کشش ساده وصل شده بود، انجام گرفت و هدف از انجام‌شان بررسی خواص ترمومکانیکی پلی‌آمید در طول بارگذاری برشی سیکلی بود. آنها کمیت‌هایی همچون خصوصیات تنش، کرنش، مدول برشی و کرنش رچتینگ را مورد مطالعه قرار دادند.

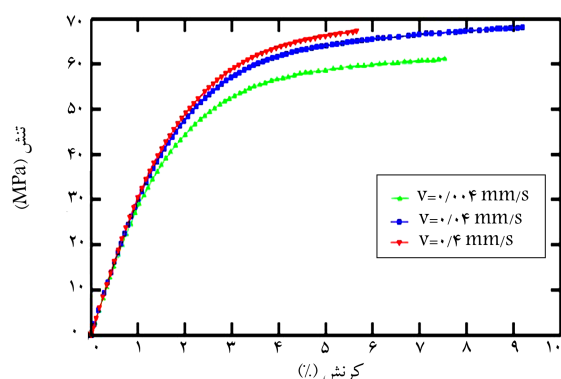
در سال ۲۰۰۷ خصوصیات مکانیکی و مدل‌سازی اجزای محدود رفتار تنش - کرنش سیکلی پلی‌اتیلن با وزن مولکولی فوق سنگین مورد مطالعه قرار گرفت. در بررسی یادشده، با استفاده از آزمایش‌های کرنش - کنترل کاملاً متقارن با/بدون خنک‌کاری و نیز به‌کمک جت هوایی، ثابت‌های ماده به‌منظور تعیین رفتار سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک ماده استخراج شد و در مدل‌سازی حلقه‌های هیستریزس مورد استفاده قرار گرفت. [۵] در سال ۲۰۰۸، رفتار خستگی پلی‌آمید و نانوکامپوزیت پلی‌آمید در دمای اتاق، با هدف مطالعه‌ی اثرات نانو ذرات اضافه شده بر افزایش دما و کاهش مدول در طول بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار گرفت. [۶]

مطالعات انجام شده در خصوص رفتار پلی‌استال در سال ۲۰۰۵ مؤید رفتار نامتقارن این ماده در کشش و فشار است. [۷] همچنین اثر تنش میانگین بر خستگی پلی‌آمید تقویت‌شده با فیبرهای کوتاه (سال ۲۰۰۴) با استفاده از یک معادله‌ی اصلاح‌شده گربر برای تشریح اثر تنش میانگین بر مقاومت خستگی این کامپوزیت مورد مطالعه قرار گرفت. [۸] در سال ۲۰۱۲ نمونه‌های استاندارد پلی‌استال تحت بارگذاری‌های محوری تناوبی قرار گرفتند و تأثیر دامنه‌ی نیرو و نیروی متوسط بر رفتار رچتینگ نمونه‌ها بررسی شد. [۹] افزایش کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه‌ی نیرو و نیروی متوسط از نتایج به دست آمده طی این مطالعه است. همچنین به‌منظور اعمال اثر تنش میانگین بر عمر خستگی پلی‌استال، تابع تنش میانگین در قالب آسیب کمیت معادل معرفی، و ثابت‌های ماده برای تنش، کرنش و انرژی کالیریه شد. [۹]

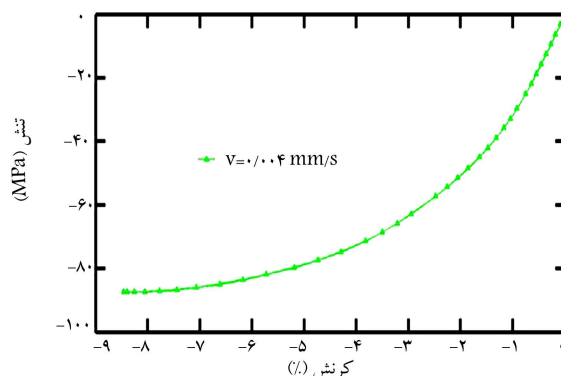
در مطالعه‌ی حاضر، ماده‌ی پلیمری پلی‌استال تحت بارگذاری جابه‌جایی - کنترل قرار گرفته و تأثیر کرنش میانگین و دامنه‌ی کرنش بر نمونه‌های پلی‌استال بررسی شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش کرنش میانگین باعث افزایش سرعت نرم‌شوندگی پلی‌استال می‌شود.

۲. دستگاه آزمایش

همه‌ی آزمایش‌های انجام‌گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. این دستگاه به‌صورت دینامیکی قابلیت اعمال بار تا ۲۵۰ kN را دارد، چرا که بیشینه نیروهای اعمالی در این آزمایش‌ها همگی مقداری کم‌تر از ۱۰ kN دارند و برای داشتن دقت بیشتر در اندازه‌گیری‌ها، از نیروسنج^۱ دوم دستگاه با دقت ۱ N ± (با ظرفیتی معادل ۲۵ kN) استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری کرنش در طول آزمایش‌ها از اکستنسومتر^۲ با طول قسمت اندازه‌گیری ۲۵ mm استفاده شده است که دقتی معادل ۰/۰۰۱ mm ± دارد (شکل ۱).



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش پلی استال تحت کشش ساده.



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش پلی استال تحت فشار ساده.

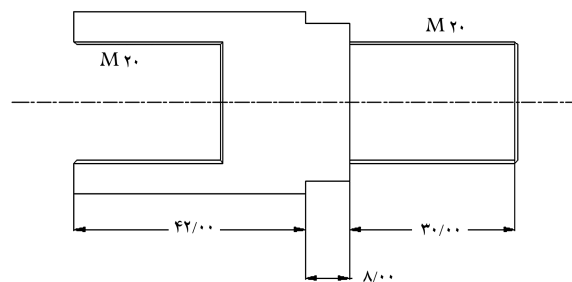
جدول ۱. خواص مکانیکی پلی استال در فشار و کشش.

خواص مکانیکی	کششی	فشاری
مدول یانگ (GPa)	۳۱۰۰	۳۴۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۳۹/۹	-۳۹/۷۸
کرنش تسلیم	٪۱/۴۹	٪-۱/۳۷

۵. نتایج تجربی

همه‌ی آزمایش‌هایی که در این قسمت انجام شده است، تحت شرایط کرنش - کنترل و در دمای محیط آزمایشگاه بوده‌اند. سرعت انجام آزمایش‌ها به‌گونه‌ی بوده است که در خلال انجام آزمایش فرکانس دستگاه کم‌تر از ۱ HZ و نرخ کرنش همواره مقدار ثابت ۰/۰۶ است و تغییر محسوسی در دمای نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود. در فرکانس‌های بارگذاری کم‌تر از ۱ HZ، دمای نمونه‌ی پلیمری تحت بارگذاری سیکنالی تغییر قابل ملاحظه‌ی نمی‌کند و می‌توان از اثر نرخ بارگذاری صرف‌نظر کرد.^[۱۳] برای اطمینان بیشتر، حین انجام آزمایش‌های تجربی، دمای نمونه‌ها با ترمومتر اشعه‌ی اندازه‌گیری شده است که کم‌بودن تغییر دما حاکی از آن است که اثر ویسکوزیته قابل چشم‌پوشی است. در جدول ۲، اطلاعات مربوط به هر آزمایش نشان داده شده است. عمر تعدادی از نمونه‌های آزمایش در شرایط بارگذاری معین بیشتر از مقدار مشخص شده در جدول است که با علامت > نشان داده شده است.

در جدول ۳، آزمایش‌های کرنش - کنترل انجام شده در چهار گروه مختلف که در هریک از این گروه‌ها مقدار نسبت کرنش کمینه به بیشینه ($R = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$) ثابت است تقسیم‌بندی کرده و به این ترتیب می‌توان اثرات نسبت‌های مختلف بارگذاری



شکل ۳. شماتیک فیکسچرهای طراحی شده.

به علت نرمی مواد آزمایش نسبت به فشار اعمالی توسط گیره‌های دستگاه آزمایش برای نگه‌داشتن آن، لهیدگی دوسر نمونه‌ها حتمی است. به همین دلیل برای اجتناب از لهیدگی دو سر نمونه‌ها که درون گیره‌های دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد، دوسر نمونه‌ها را به صورت پیچ M۲۰ تراش داده‌ایم. از آنجا که دوسر نمونه‌ها به صورت پیچ طراحی شده‌اند، برای اتصال نمونه‌ها به فک‌های دستگاه آزمایش فیکسچرهایی طراحی کردیم که در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴. آزمایش کشش و فشار ساده

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش کشش و فشار ساده می‌پردازیم. هدف از انجام این آزمایش‌ها به دست آوردن مدول یانگ و تنش تسلیم ماده‌ی مورد آزمایش بوده است. چنان که در شکل ۴ دیده می‌شود، آزمایش کشش ساده روی پلی استال با سه سرعت متفاوت ۰/۴، ۰/۰۴ و ۰/۰۰۴ mm/s و به صورت موقعیت کنترل انجام شده است. این اعداد نشان‌دهنده‌ی سرعت حرکت فک دستگاه در طول انجام آزمایش است. چنان که در شکل دیده می‌شود هرچه سرعت انجام آزمایش بیشتر باشد، پلی استال در ناحیه‌ی خمیری سفتی بیشتری از خود نشان می‌دهد. این بدان معناست که برای رسیدن به یک کرنش مشخص در ناحیه‌ی خمیری با افزایش سرعت بارگذاری تنش بیشتر می‌بایست اعمال شود. این امر را می‌توان ناشی از خواص ویسکوپلاستیک پلی استال و به‌طور کلی پلیمرها دانست.

برای محاسبه‌ی مدول یانگ ماده با استفاده از منحنی تنش - کرنش، شیب قسمت خطی منحنی محاسبه می‌شود که عدد به دست آمده همان مدول یانگ ماده‌ی تحت آزمایش است. به‌منظور به دست آوردن تنش تسلیم، از نقطه‌ی با مقدار کرنش ۰/۰۰۲ یا ۰/۲ درصد خطی با شیبی معادل مدول یانگ ماده که همان شیب قسمت خطی منحنی است، ترسیم می‌شود. نقطه‌ی تقاطع خط رسم شده با منحنی تنش - کرنش نشان‌دهنده‌ی مقدار تنش تسلیم ماده است.

در شکل ۵ منحنی تنش - کرنش فشاری پلی استال نمایش داده شده است. مدول یانگ و تنش تسلیم در حالت فشار نیز همانند حالت کشش محاسبه شده است. با انجام آزمایش کشش و فشار ساده، خواص مکانیکی پلی استال برای هریک از دو حالت کشش و فشار به دست آمده که در جدول ۱ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، پلی استال در کشش و فشار، رفتار یکسانی از خود نشان نمی‌دهد و این نشان‌دهنده‌ی غیر ایزوتروپیک بودن ماده است.

جدول ۲. آزمایش‌های کرنش - کنترل.

شماره‌ی آزمایش	کرنش میانگین (%)	دامنه‌ی کرنش (%)	عمر (دوره)
S1	۰	۴٫۹	۲۳۴۸
S2	۰	۴٫۷	۲۶۴۲
S3	۰	۴٫۶	۳۱۹۶
S4	۰	۴٫۵	۳۲۷۶
S5	۱٫۳	۳٫۹	> ۴۱۶۲
S6	۱٫۲۵	۳٫۷۵	۳۸۴۰
S7	۱٫۱۸	۳٫۵۳	۶۶۱۶
S8	۱	۳	۷۸۵۰
S9	۲٫۶۵	۲٫۶۵	۱۱۰۴۰
S10	۲٫۵	۲٫۵	> ۳۷۸۶
S11	۲٫۳	۲٫۳	۱۰۰۷۰
S12	۲٫۲	۲٫۲	۱۸۵۷۰
S13	۳٫۱۹	۱٫۹۱	> ۱۶۳۰۰
S14	۲٫۹۴	۱٫۷۶	> ۵۰۰۰
S15	۲٫۶۹	۱٫۶۱	> ۵۰۰۰
S16	۲٫۴۴	۱٫۴۶	> ۵۰۰۰

جدول ۳. گروه بندی آزمایش‌ها.

شماره‌ی آزمایش‌ها	$R = \varepsilon_m / \varepsilon_a$	$R_m = \varepsilon_{min} / \varepsilon_{max}$	شماره‌ی گروه
S1, S2, S3, S4	۰	-۱	GS1
S5, S6, S7, S8	۰٫۳۳	-۰٫۵	GS2
S9, S10, S11, S12	۱	۰	GS3
S13, S14, S15, S16	۱٫۶۷	۰٫۲۵	GS4

را بر نمونه مشاهده کرد. در طول انجام هر آزمایش داده‌های تنش و کرنش ثبت و براساس آنها تحلیل کمی پارامترهای مکانیکی نظیر تنش میانگین، حدود تغییرات تنش، چگالی انرژی کرنشی و شیب حلقه‌های هیستریزیس انجام گرفته است. در ادامه به بحث و بررسی هریک از این پارامترهای مکانیکی خواهیم پرداخت.

۱.۵. حلقه‌های هیستریزیس تنش - کرنش

اطلاعات پایه‌ی رفتار سیکلی یک ماده را می‌توان در شکل حلقه‌ی هیستریزیس تنش - کرنش سیکلی آن ماده جست‌وجو کرد. تغییر شکل سیکلی، باعث به دست آمدن یک حلقه‌ی هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌شود. به‌عنوان نمونه حلقه‌های هیستریزیس تنش - کرنش آزمایش‌های S3، S7، S9 و S13 در شکل ۶ نشان داده شده است. نکته‌ی که به‌روشنی با توجه به این

شکل‌ها مشخص می‌شود همان رفتار نرم‌شوندگی این ماده تحت بارگذاری سیکلی است.

۲.۵. رهايش تنش میانگین

پدیده‌ی که در آزمایش‌های کرنش - کنترل می‌توان آن را متناظر پدیده‌ی رچتینگ در آزمایش‌های تنش - کنترل دانست، «رهايش تنش میانگین» است. کرنش رچتینگ یا همان کرنش خمیری در صورت صفر بودن تنش میانگین، معادل صفر فرض می‌شود. چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، پدیده‌ی رهايش نیز مشابه رچتینگ برای حالتی که در آن کرنش میانگین اعمالی صفر است، تقریباً ناچیز است و تغییرات قابل توجهی ندارد (آزمایش گروه GS1)، اما برای گروه‌های آزمایش GS2، GS3 و GS4 این پدیده روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. بنابراین وجود کرنش میانگین مثبت غیرصفر باعث کاهش شدید تنش میانگین و تسریع در سرعت نرم‌شوندگی می‌شود. همچنین با اعمال کرنش‌های کمینه‌ی غیرمنفی در ناحیه‌ی کششی در مقایسه با اعمال کرنش‌های کمینه‌ی منفی در ناحیه‌ی فشاری، نرخ کاهش تنش میانگین افزایش می‌یابد. علت این رفتارها آن است که با افزایش کرنش میانگین و مثبت‌تر شدن آن، تنش‌های ایجاد شده در ناحیه‌ی مثبت و با مقادیر بزرگ‌تری اعمال می‌شوند و عاملی در تسریع سرعت نرم‌شوندگی است. علاوه بر این چون رفتار ماده در کشش و فشار تا حدودی متغیر است، با افزایش کرنش میانگین، رفتار ماده از فشاری به سمت کششی سوق داده می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بر سرعت نرم‌شوندگی تأثیر داشته باشد.

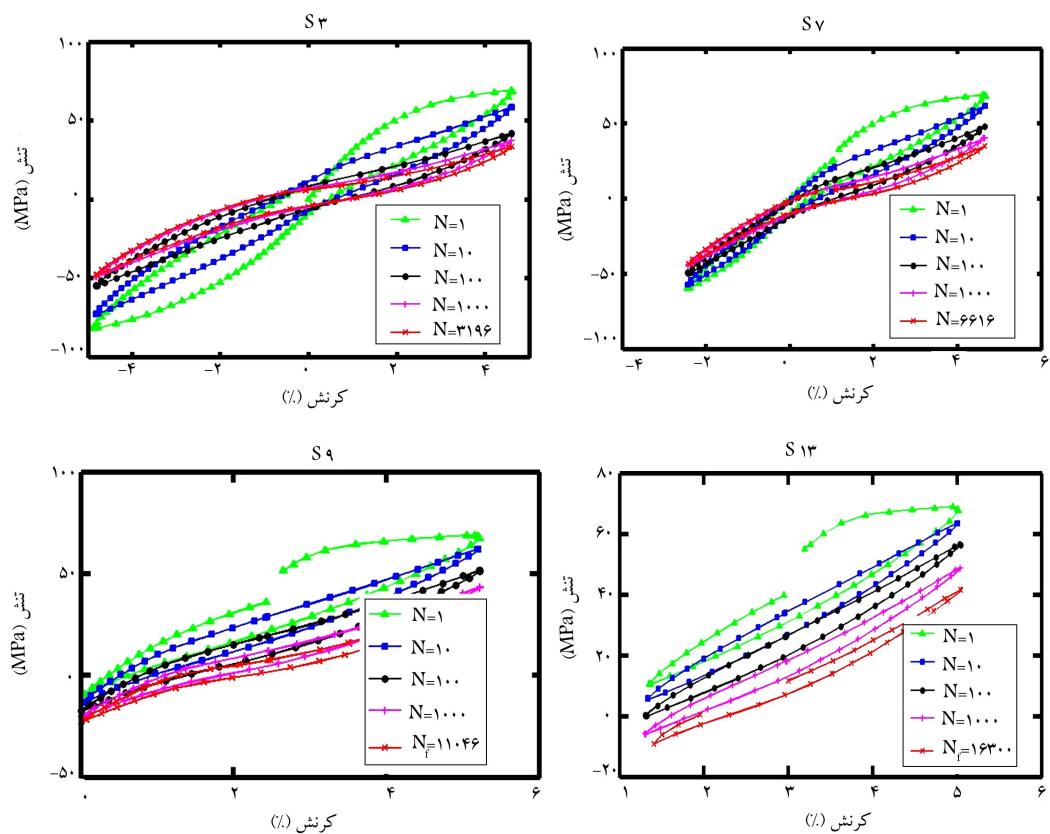
۳.۵. تغییرات حدود تنش

در شکل ۸، تغییرات حدود تنش گروه‌های آزمایش GS1 تا GS4 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌علت تفاوت رفتار پلی‌استال در کشش و فشار، رفتار مقارنی در گروه آزمایش GS1 مشاهده نمی‌شود. برای گروه‌های GS1 و GS2 حدود تنش بعد از ۱۰۰ سیکل به یک مقدار پایدار می‌رسد، اما چنین حالت پایداری را برای گروه‌های GS3 و GS4 نمی‌توان مشاهده کرد و نرخ تغییرات حدود تنش منفی است. پایداری تغییرات حدود تنش در گروه‌های GS1 و GS2 ناشی از کرنش کمینه‌ی فشاری است که موجب صفرشدن میزان نرخ تغییرات حدود تنش می‌شود.

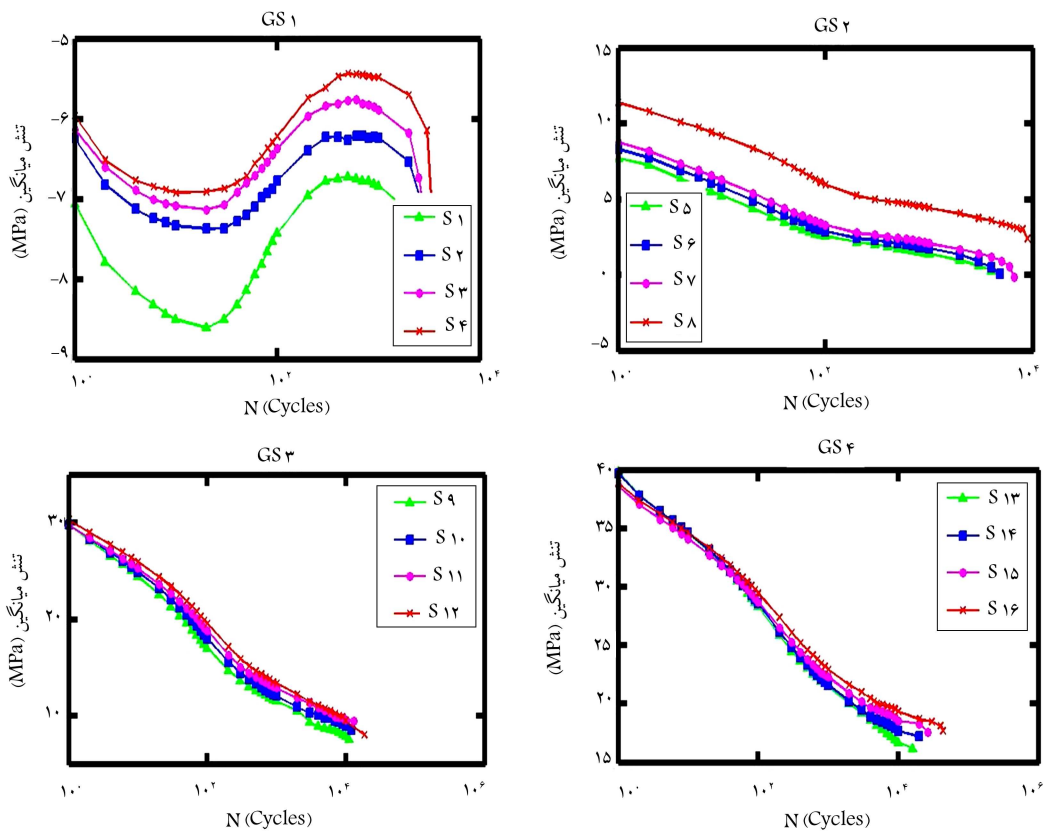
۴.۵. تغییرات انرژی کرنشی

در بحث بارگذاری سیکلی دو نوع چگالی انرژی کرنشی مطرح می‌شود: ۱. چگالی انرژی کرنشی تلف شده که به‌اختصار DSED یا ΔW^d نامیده می‌شود؛ ۲. دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی کشسانی که به‌اختصار ESED یا ΔW^e نامیده می‌شود.^[۱۴] چگالی انرژی کرنشی اتلافی و کشسانی به‌عنوان توابعی با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، با افزایش تعداد سیکل به مقدار پایداری می‌رسند و از این جهت می‌توان به‌عنوان پارامترهای مناسب برای بررسی آسیب‌های ناشی از بارگذاری سیکلی استفاده کرد.

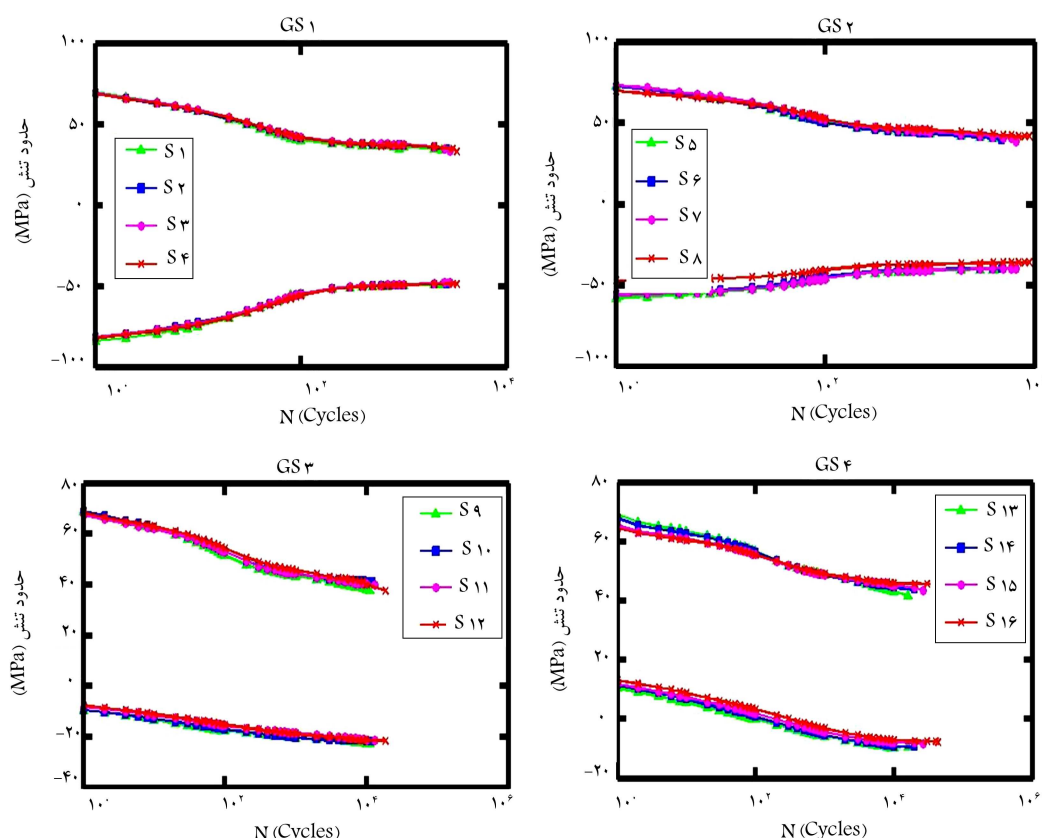
براساس داده‌های تنش - کرنش به دست آمده از آزمایش‌ها و حلقه‌های هیستریزیس ایجاد شده می‌توان مقادیر ΔW^d و ΔW^e را محاسبه کرد. به این صورت که با انتگرال‌گیری از سطح داخلی حلقه‌ی هیستریزیس می‌توان به مقدار ΔW^d ، و با انتگرال‌گیری از سطح زیرحلقه‌ی هیستریزیس و بالای خط تنش میانگین می‌توان به مقدار ΔW^e ، دست یافت. شکل ۹ این مطلب را به‌روشنی نمایش می‌دهد.



شکل ۶. حلقه‌های هیستریزس تنش - کرنش آزمایش‌های S3، S7، S9 و S13.



شکل ۷. رهائش تنش میانگین آزمایش‌های گروه GS1، GS2، GS3 و GS4.



شکل ۸. تغییرات حدود تنش آزمایش‌های گروه GS۱، GS۲، GS۳ و GS۴.

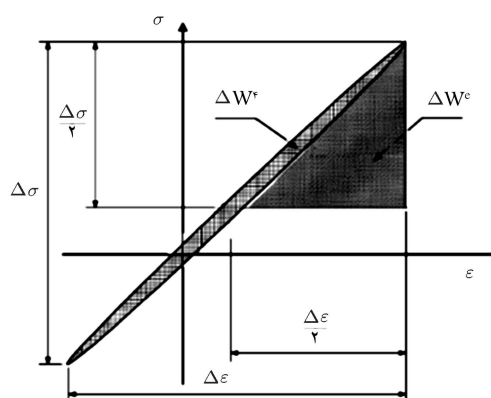
در شکل ۱۱ نیز تغییرات دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی - کشسانی گروه‌های آزمایش GS۱ تا GS۴ آورده شده است. این کمیت رفتار نامنظمی از خود نشان می‌دهد اما، عموماً روندی کاهشی دارد. این روند کاهشی برای گروه آزمایش GS۴ مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که همانند کمیت چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده، دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی - کشسانی نیز در هر گروه آزمایش به سمت مقداری خاص در حال همگرایی است.

۵.۵. تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزس

در این قسمت به بررسی یک کمیت معرفی شده در مطالعات [۱۳] می‌پردازیم. این کمیت «شیب حلقه‌ی هیستریزس» است که بیان‌گر نرم‌شوندگی ماده است. نرخ شیب حلقه‌ی هیستریزس نشان‌گر سرعت نرم‌شوندگی است و عبارت است از شیب خطی که نقاط اکستریم حلقه‌ی هیستریزس را به هم وصل می‌کند:

$$E(N) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

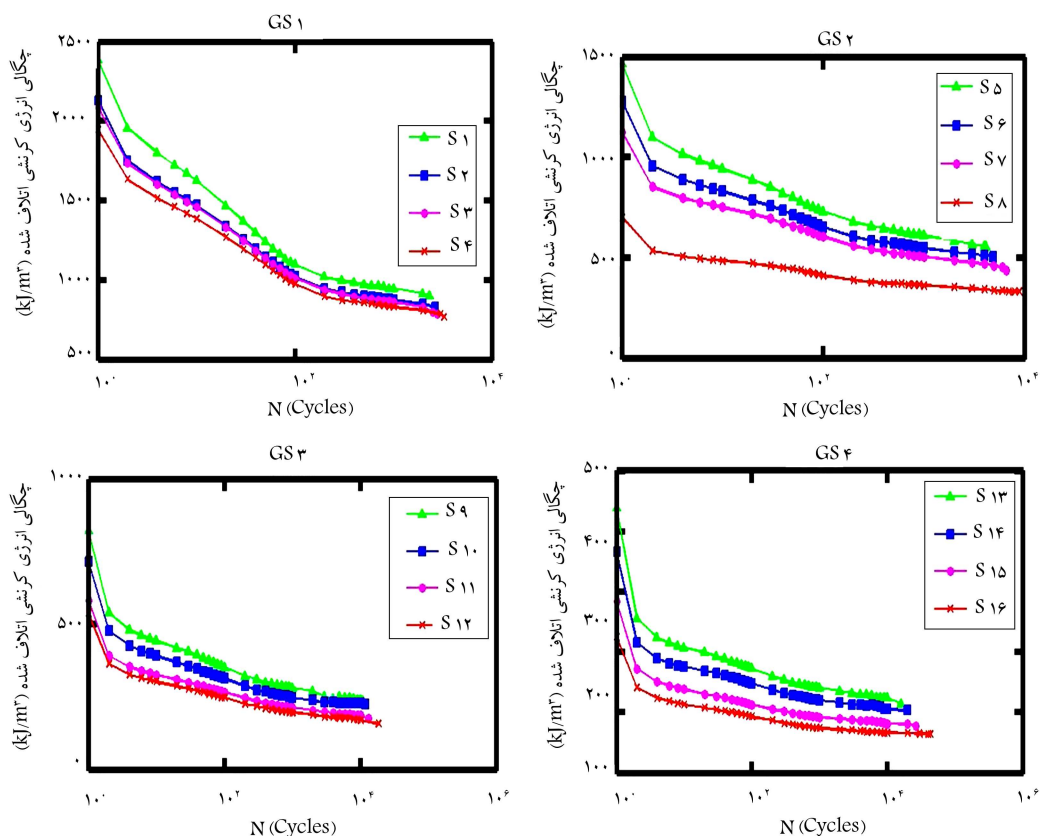
با توجه به شکل ۹، $\Delta\sigma$ و $\Delta\varepsilon$ به ترتیب معرف دامنه‌ی تغییرات تنش و کرنش است، و E نیز شیب حلقه‌ی هیستریزس یا نرم‌شوندگی است و N شماره‌ی سیکل را تعیین می‌کند. چنان که از شکل ۱۲ پیداست، این کمیت برای تمامی آزمایش‌ها، به جز آزمایش‌های S۱۵ و S۱۶ روند کاهشی از خود به نمایش می‌گذارد و به ازای R و R_m یکسان، هرچه دامنه‌ی کرنش و کرنش میانگین بیشتر باشد، شیب حلقه‌های هیستریزس در یک سیکل مشخص کم‌تر است. بیشترین دامنه‌ی تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزس را در گروه آزمایش GS۱ با نسبت $R = -1$ می‌توان مشاهده



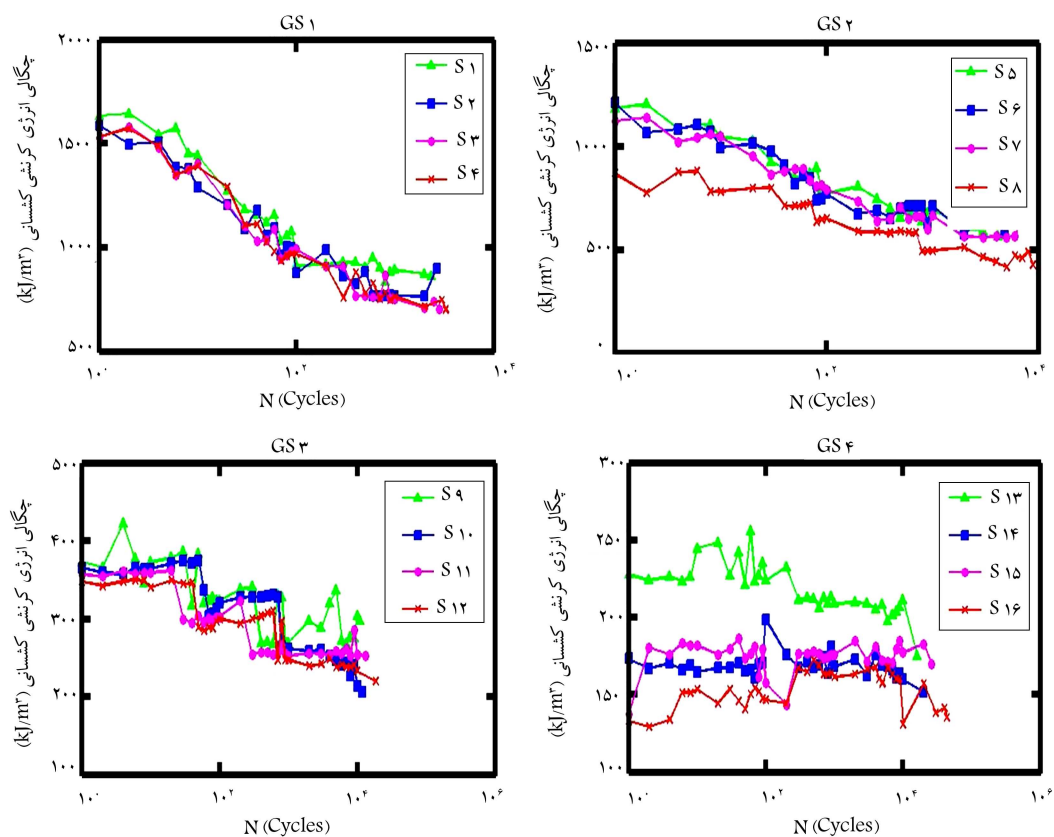
شکل ۹. نمایش اجزای چگالی انرژی کرنشی. [۱۴]

در ادامه، مقادیر هریک از این دو نوع انرژی کرنشی در آزمایش‌های انجام گرفته بیان می‌شود. در شکل ۱۰، تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده‌ی آزمایش گروه‌های GS۱ تا GS۴ ترسیم شده است. چنان که مشاهده می‌شود این کمیت برای همه گروه‌های آزمایش GS۱ تا GS۴ روند کاهشی دارد. نکته‌ی که در این شکل جلب توجه می‌کند، همگرایی مقدار چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده‌ی هریک از گروه‌ها به سمت مقداری خاص است.

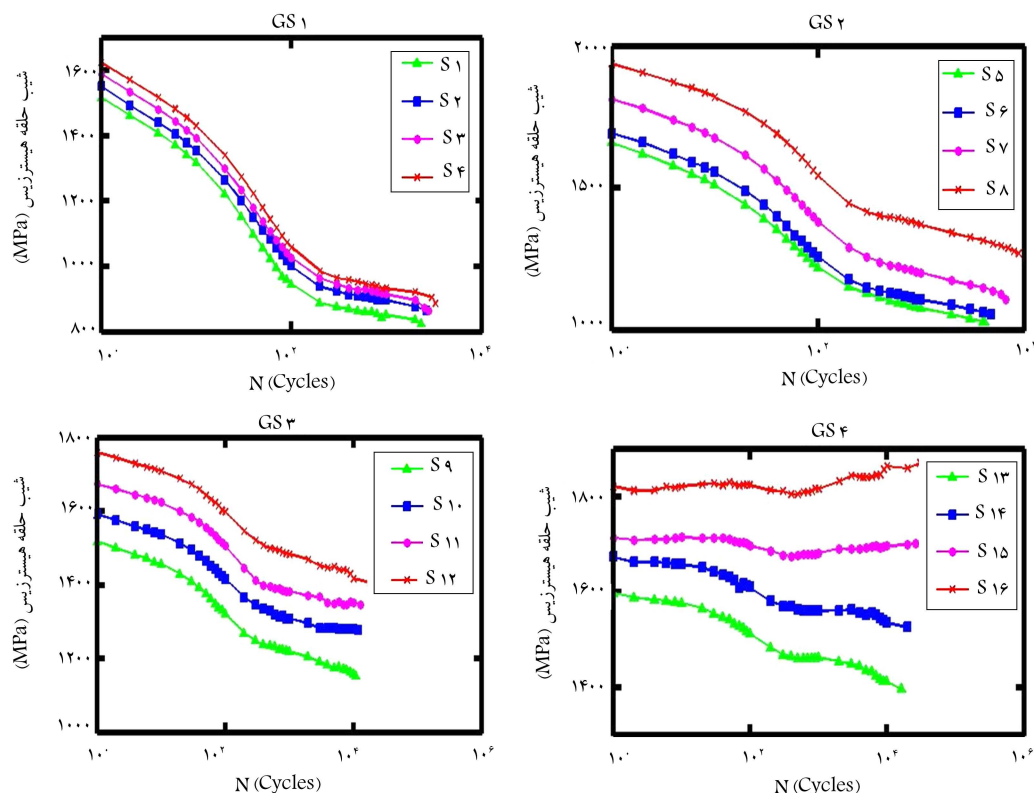
چگالی انرژی کرنشی اتلافی و نرخ منفی آن، در نمونه‌هایی که کرنش‌های کششی و فشاری اعمال می‌شود، بیشتر از نمونه‌هایی است که تحت تأثیر کرنش‌های کششی محض هستند.



شکل ۱۰. تغییرات چگالی انرژی کرنشی اتلاف شده آزمایش‌های گروه GS۱، GS۲، GS۳ و GS۴.



شکل ۱۱. تغییرات دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی - کشسانی آزمایش‌های گروه GS۱، GS۲، GS۳ و GS۴.



شکل ۱۲. تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزس آزمایش‌های گروه GS۱، GS۲، GS۳ و GS۴.

- نرخ کاهش تنش میانگین در بارگذاری‌هایی با کرنش‌های کمینه‌ی غیرمنفی بیشتر از بارگذاری‌هایی با کرنش‌های کمینه‌ی منفی است.
- کرنش‌های کمینه‌ی فشاری باعث پایداری و صفرشدن نرخ تغییرات حدود کرنش می‌شود؛ این رفتار در نمونه‌هایی با بارگذاری کرنش‌های کمینه‌ی کششی قابل مشاهده نیست.
- چگالی انرژی کرنشی اتلافی هر سیکل برای همه‌ی بارگذاری‌های کاهش‌ی و در حال همگرایی به مقدار خاص است. همچنین چگالی انرژی کرنشی اتلافی و نرخ منفی آن در شرایط اعمال کرنش‌های کششی و فشاری بیشتر از شرایط اعمال کرنش‌های کششی تنهاست.
- دامنه‌ی چگالی انرژی کرنشی - کشسانی دارای رفتار نامنظمی است؛ اما به‌طور کلی به عددی خاص همگرا می‌شود.
- شیب حلقه‌های هیستریزس در نمونه‌های تحت بارگذاری متقارن کرنش - کنترل دارای بیشترین مقدار است و با مثبت شدن نسبت کرنش کمینه به بیشینه مقدار آن کاهش می‌یابد؛ اما به‌طور کلی روندی کاهش‌ی دارد.
- کرد و با افزایش R ، نرخ تغییرات شیب حلقه‌های هیستریزس کاهش می‌یابد تا این که در GS۴، در بعضی موارد نرخ تغییرات صفر می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

- در این نوشتار با انجام مطالعات تجربی روی نمونه‌های پلی‌استال، رفتار نرم‌شوندگی آنها بررسی شد. آزمایش‌های جابه‌جایی کنترل در چهار گروه با نسبت تنش کمینه به تنش بیشینه متفاوت انجام شد و تغییرات کمیت‌های تنش میانگین، حدود تغییرات تنش، شیب حلقه‌های هیستریزس و چگالی انرژی کرنشی و اتلافی مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج زیر حاصل این تحلیل است:
- پلی‌استال در کشش و فشار رفتار نامتقارن از خود نشان می‌دهد و ماده‌ی غیرایزوتروپیک است.
 - رهایش تنش میانگین در حالتی که کرنش میانگین صفر است، قابل توجه نیست. همچنین کرنش میانگین مثبت باعث افزایش سرعت نرم‌شوندگی می‌شود.

پانوشته‌ها

1. load cell
2. Extensometer
3. gauge length

منابع (References)

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

2. Chen, X. and Hui, S. "Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression", *Polymer Testing*, **24**, pp. 829-833 (2005).
3. Zhang, Z. and Chen, X. "Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature", *Polymer Testing*, **28**, pp. 288-295 (2009).
4. Bles, G. and et al, "Experimental study of a PA66 solid polymer in the case of cyclic shear loading", *Arch. Mech.*, Warszawa **54**(2), pp. 155-174 (2002).
5. Avanzini, A. "Mechanical characterization and finite element modeling mechanical characterization and finite element modeling molecular weight", *Material and Design*, **29**, pp. 330-343 (2008).
6. Ramkumar, A. and Gnanamorthy, R. "Axial fatigue behavior of polyamide-6 and polyamide-6 nanocomposites at room temperature", *Composites Science and Technology*, **68**, pp. 3401-3405 (2008).
7. Hartmann, S. "Modeling and simulation of polyoxymethylene", *PAMM. Proc. Appl. Math*, **5**, pp. 273-274 (2005).
8. Mallick, P.K. and Zhou, Y. "Effect of mean stress on the stress-controlled fatigue of a short E-glass fiber reinforced polyamide-66", *International Journal of Fatigue*, **26**, pp. 941-946 (2004).
9. Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H. and Epakchi, H.R. "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", *Materials & Design*, **34**, pp. 302-312 (2011).
10. Meyer, R. and Pruitt, L. "The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultrahighmolecular weight polyethylene", *Polymer*, **42**, pp. 5293-306 (2001).
11. Niinomi, M., Wang, L., Enjitsu, T. and Fukunage, K. "Fatigue characteristics of ultra high molecular weight polyethylene with different molecular weight for implant material", *Mater Sci: Mater Med*, **12**, pp. 267-72 (2001).
12. Urries, I., Medel, F., Rios, R., Gomez-Barrena, E. and Puertolas, J. "Comparative cyclic stress-strain and fatigue resistance behavior of electron-beam- and gamma-irradiated ultrahigh molecular weight polyethylene", *J Biomed Mater Res Part B:Appl Biomater*, **70B**, pp. 152-60 (2004).
13. Liu, W., Gao, Z. and Yue, Z. "Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue tests of PMMA", *Materials Science and Engineering: A*, **492**, pp. 102-9 (2008).
14. Tao, G. and Xia, Z. "Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin", *Int. J. Fatigue*, **29**, pp. 2180-90 (2007).