

بررسی تجربی و عددی رفتار پلی استال تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری

محمود شریعتی، دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

Email: mshariati44@gmail.com

حسین حاتمی ، حسین یاراحمدی، حمیدرضا ایپکچی

Email: h64hatami@gmail.com, hossein128@gmail.com, hamidre2000@gmail.com

چکیده

هدف از این پژوهش مطالعه رفتار تنش کرنش سیکلی ماده‌ی پلیمری به نام پلی‌استال (Polyoxymethylene) است، که با نام (POM) نیز شناخته شده است. در این مقاله مدل پلاستیسیته پیشرفته‌ای، با استفاده از روش اجزا محدود به منظور پیش بینی رفتار تنش کرنش سیکلی پلی‌استال مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌هایی را که با استفاده از دستگاه تراش CNC از میلگردهای پلی‌استال تهیه شده بود را با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون (INSTRON8802) تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری قرار داده‌ایم. در این حالت ماده از خود رفتار رهاسازی (Relaxation) و نرم شوندگی نشان می‌دهد. رفتار ماده با استفاده از مدل‌های پلاستیسیته پیشرفته با سخت شوندگی ایزوتروپیک، سینماتیک و سخت شوندگی ترکیبی که از معیار وان-مایسز استفاده می‌کنند توسط نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) مدل گردیده‌اند و نتایج شبیه سازی مطابقت قابل قبولی با نتایج تجربی داشته است.

کلمات کلیدی

پلی‌استال، کرنش کنترلی نامتقارن محوری، مدل‌های سخت شوندگی، مدل المان محدود

۱. مقدمه

پلیمرها به علت ویژگی های منحصر به فردی که دارند مثل وزن بسیار کم آنها نسبت به فلزات و خواص خستگی و سایشی بسیار عالی در صنایع هوافضا جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص داده اند، و رفتار این مواد تحت بارگذاری های تناوبی از اهمیت خاصی برخوردار می باشد، زیرا انجام تست های تناوبی زمان و هزینه بیشتری می برند و هم باید با دقت بسیار بالایی انجام گیرند تا داده های به دست آمده از اعتبار کافی برخوردار باشند. همچنین نتایج حاصل از این نوع بارگذاری ها روی جنس های پلیمری برای ساخت سازه های پلیمری و تخمین شکست این سازه ها مورد استفاده زیادی قرار می گیرند.

تحت این نوع بارگذاری ها روی مواد پلیمری تست های مختلفی صورت گرفته است و تاثیرات پارامترهایی همچون تنش میانگین، کرنش میانگین، دامنه تنش و کرنش متغییر، تعداد سیکلها تا شکست نمونه ها و پارامترهای مختلف دیگری مورد آزمایش قرار گرفته است تا رفتار منحنی های هیستریزیس این نمونه ها تحت بارگذاری های مختلف تنش کنترلی و کرنش کنترلی به دست آیند. در مطالعه ای به بررسی اثر تنش میانگین و کرنش میانگین بر رفتار خستگی نوعی اپوکسی رزین پرداخته شده است و مشاهده شده که سطح تنش میانگین در طول مرحله‌ی اول از عمر خستگی دچار رهاپش شده و سپس در طول مرحله‌ی بعدی به حد اشباع خود می‌رسد و این مقدار در باقیمانده‌ی عمر نمونه ثابت باقی می‌ماند [۱۰]. در یک مطالعه دیگری به بررسی رفتار رچتینگ (Ratcheting) همان اپوکسی پلیمر و اثر آن بر عمر خستگی پرداخته شد و مشخص شد که مقدار کرنش رچتینگ و نرخ آن متأثر از تنش میانگین و دامنه‌ی تنش است. کرنش رچتینگ اثر قابل توجهی بر عمر خستگی این ماده‌ی پلیمری ندارد [۱۱]. لازم به ذکر است که رفتار رچتینگ به معنی انباشت کرنش پلاستیک باقیمانده در سیکل های متوالی در نمونه مورد آزمایش می باشد. در تحقیقی دیگر به بررسی رفتار رچتینگ پلیمر PTFE تحت بارگذاری سیکلی پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که رفتار این پلیمر وابسته به نرخ بارگذاری است و کرنش رچتینگ با کاهش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد [۵]. همچنین مطالعه ای روی خواص مکانیکی و مدل سازی اجزا محدود رفتار تنش کرنش سیکلی پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق سنگین صورت گرفته است. در این مقاله با استفاده از آزمایش های کرنش کنترلی متقارن با و بدون خنک کاری ثابت های ماده جهت استفاده در نرم افزار تجاری آباکوس جهت تعیین رفتار سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک ماده استخراج شده است [۳]. مطالعه ای روی رفتار خستگی پلی آمید ۶ و نانو کامپوزیت پلی آمید ۶ در دمای اتاق صورت گرفته است و هدف این مقاله مطالعه ی اثرات نانو ذرات اضافه شده در افزایش دما و کاهش مدول در طول بارگذاری سیکلی بوده است [۹]. مطالعه ای روی رفتار رچتینگ چند محوره ی نوعی پلیمر به نام پلی تترا فلورئید اتیلن صورت گرفته و اثرات تنش محوری، حدود تغییرات کرنش برشی، نرخ کرنش برشی و تاریخچه بارگذاری بر رفتار نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شد که تاریخچه بارگذاری نقش بسیار مهمی در کرنش رچتینگ دارد [۱۱]. روی نوعی از پلیمر به نام پلی متیل متاکریلیت به بررسی کرنش های رچتینگ در دماهای مختلف و سطوح مختلف تنش پرداخته شد. نتایج آزمایش ها نشان داد که نرخ رشد ناحیه رچتینگ پایدار با دما و بار اعمالی تغییر می کند [۶].

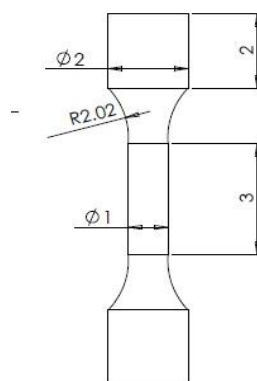
تحقیق روی پلیمرهای جدید روند رو به رشدی به خود گرفته است و در این تحقیق روی پلیمر جدیدی به نام پلی استال بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری انجام گرفته است. مدل های سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک خطی با نتایج تجربی مقایسه گردیده اند و در نهایت مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک با نتایج تجربی مقایسه شده است و مشاهده شده است که این مدل توانایی شبیه سازی رفتار نرم شوندگی ماده را تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری دارد و همچنین مدل شبیه سازی شده همانند نتایج تجربی رفتار

رهاشوندگی از خود نشان می دهد و تنش میانگین ایجاد شده در مدل طی سیکل های متوالی به صفر نزدیک می گردد. تست کشش روی چندین نمونه انجام گرفته تا خواص مکانیکی ماده پلیمری برای شبیه سازی های عددی به دست آورده شود.

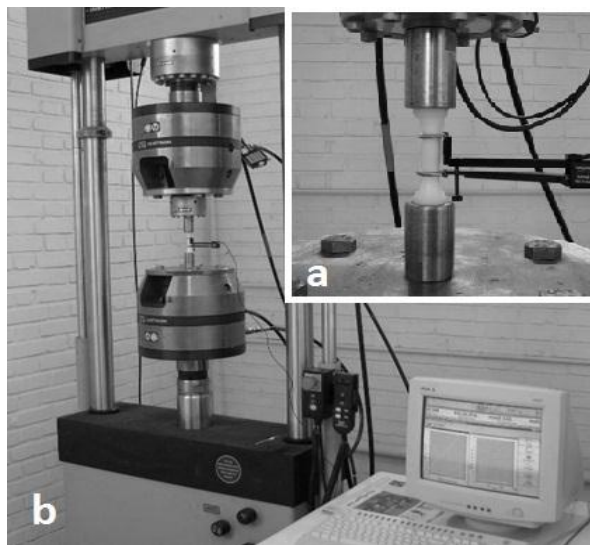
۲. هندسه و خواص مکانیکی نمونه

همانطور که گفته شد ماده ی پلیمری که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است پلی استال یا پلی اکسی متیلن (POM) است که با نام تجاری دلرین (Delrin) نیز شناخته شده است. پلی استال، پلیمر مهندسی است با محدوده ی وسیعی از کاربردها که خواصی شبیه به فلزات دارد. این پلیمر خواص بسیار خوبی دارد که خلا بین پلیمرهای معمولی و فلزات را پر می کند. از زمان ارائه این پلیمر در سال ۱۹۶۰ به صنعت، کاربردهای وسیعی از آن در صنعت مشاهده شده است. پلی استال پلیمری تقریباً کریستالی است که از پلیمراسیون فرمالدئید حاصل می شود. تست های خستگی تک محوره و یا بطور کلی تست های سیکلی که روی مواد پلیمری انجام می شود اغلب با استفاده از نمونه هایی که بر اساس استاندارد ASTM638 و یا استاندارد معادل آن یعنی ISO527 می باشند، انجام می گیرد [۷].

برای تهیه نمونه های مورد استفاده در آزمایش ها از میل گرد های پلی استال با قطر ۲۰mm استفاده شده است. این میل گرد ها با استفاده از دستگاه تراش CNC به منظور به دست آوردن نمونه ها تراش داده شده اند. همانطور که در شکل شماره ۱ مشاهده می گردد طول موثر نمونه ۳cm و قطر ناحیه موثر ۱cm در نظر گرفته شده است. به علت اجتناب از لهیدگی دو سر نمونه ها که درون گیره های دستگاه آزمایش قرار می گیرد دو سر نمونه ها به صورت پیچ M20 تراش داده شده اند و در شکل شماره ۲-a مشاهده می گردد که از فیکسچرهای مخصوصی جهت اتصال نمونه ها به فک های دستگاه استفاده شده است.

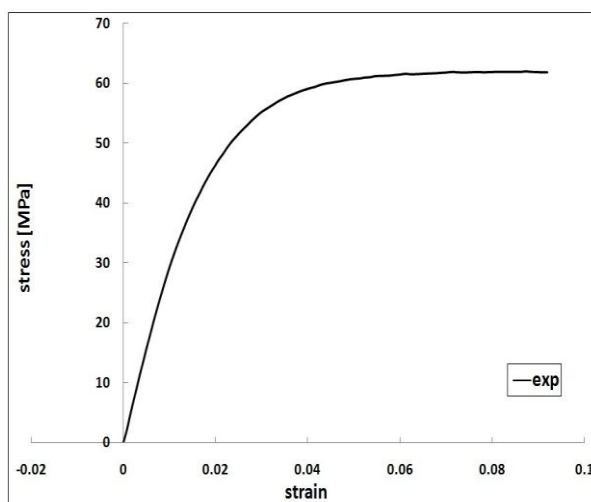


شکل ۱: ابعاد هندسی نمونه بر حسب cm



شکل ۲: a- استفاده از فیکسچرها و اکستنسومتر b- نمای کلی از دستگاه اینسترون (INSTRON) در هنگام بارگذاری روی نمونه

با استفاده از تست کشش ساده مدول یانگ نمونه 3.1 GPa و تنش تسلیم با استفاده از قانون 0.2% مقدار 39.9 MPa به دست آمده است. منحنی تجربی تنش کرنش تست کشش ساده در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.



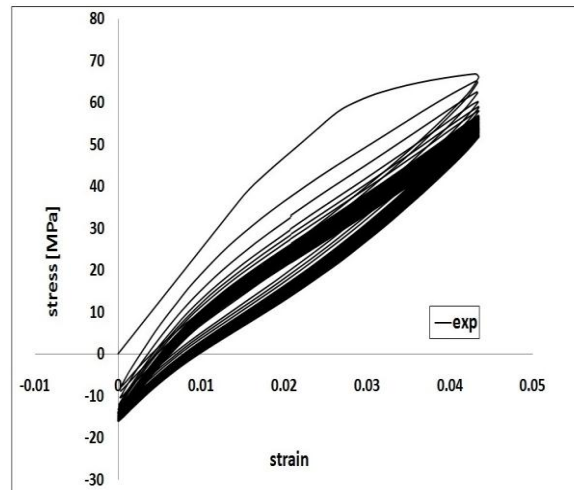
شکل ۳: منحنی تنش کرنش تست کشش ساده

۳. تست تجربی

آزمایش ها توسط دستگاه پیشرفته سرو هیدرولیک INSTRON8802 انجام شده است. این دستگاه به صورت دینامیکی توانایی اعمال بار تا مقدار 250 kN را دارد. برای اندازه گیری دقیق تر منحنی های هیستریزیس از LoadCell 25 kN استفاده شده است (شکل شماره ۲-b) و برای اندازه گیری ازدیاد طول دقیق تر در هنگام آزمایش از اکستنسومتر (Extensometer) استفاده شده است (شکل شماره ۲-a).

تست تجربی نمونه ها به صورت کرنش کنترلی نامتقارن محوری با دامنه کرنش 0.02175 و کرنش متوسط 0.02175 انجام شده است و منحنی های هیستریزیس این بارگذاری به صورت تجربی در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. از منحنی های هیستریزیس به دست آمده مشاهده می شود که نمونه در سیکل های متوالی رفتار نرم

شوندگی از خود نشان می دهد و همچنین با افزایش تعداد سیکل ها تنش متوسط به صفر نزدیک می گردد که همان رفتار رهایش (Relaxation) ایجاد می گردد و در ادامه رفتار نرم شوندگی نمونه به حالت پایداری می رسد. از نتایج تجربی مشاهده می شود که سرعت نرم شوندگی نمونه در سیکل های ابتدایی بسیار بالا می باشد و در ادامه سرعت نرم شوندگی نمونه کاهش می یابد تا ماده به حالت پایداری برسد.



شکل ۴: منحنی آزمایش تجربی کرنش کنترلی نامتقارن محوری

۴. تحلیل عددی به کمک نرم افزار آباکوس

برای تحلیل عددی به روش المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این نرم افزار در تحلیل مدل های پوسته ای بسیار قوی می باشد و همچنین در کنار بسیاری از توانایی های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای نیز می باشد.

برای آنالیز این دسته از مسایل باید از مدل سخت شوندگی سینماتیک استفاده کرد که دارای دو قسمت، یکی سخت شوندگی سینماتیک خطی و دیگری به نام سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک است که کامل ترین و دقیق ترین مدل برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای می باشد [۸، ۲]. در مدل نخست سطح تسلیم متناسب با مقدار α به عنوان تنش زمینه در فضای تسلیم حرکت می کند، اما تغییر شکل نمی دهد. نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی عددی از مدل خطی زیگلر استفاده می کند که به صورت رابطه زیر بیان می شود [۱]

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (1)$$

که در آن C ثابت ماده بوده و c مدول سخت شوندگی سینماتیک می باشد. پارامتر σ^0 تنش تسلیم جاری و ε^{pl} کرنش پلاستیک معادل می باشد. همانگونه که گفته شد در این مدل، اندازه سطح تسلیم ثابت باقی می ماند. به بیان دیگر σ^0 در رابطه (۱) همواره مساوی $\hat{\sigma}_0$ که معادل تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است، باقی می ماند. برای معرفی این مدل به نرم افزار در متن فایل ورودی از دستور پلاستیک به صورت زیر استفاده می شود.

*Plastic

*Plastic, Hardening = Kinematic

$\hat{\sigma}_0, 0$

$\sigma^0, \varepsilon^{pl}$

مدل سخت شونده‌گی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک که بر اساس روابط ارائه شده توسط چابوش (Chaboche) تهیه شده، در برگرفته حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار ε^{pl} به عنوان کرنش پلاستیک می باشد [۴]. برای معرفی چنین مدلی، یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به رابطه (۱) اضافه می شود و معادله زیر نتیجه می شود که در آن γ ثابت ماده می باشد [۱]:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (2)$$

علامت نقطه در بالای هر پارامتر به معنی نرخ پارامتر در نظر گرفته شده است، البته با استفاده از این مدل امکان آنالیز مسایل پلاستیسیته که در آنها تسلیم وابسته به نرخ کرنش است از کاربر گرفته می شود اما برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری چرخه ای ناچار به استفاده از این مدل هستیم. به منظور معرفی این مدل به نرم افزار لازم است بخش ایزوتروپیک (رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (حرکت سطح تسلیم در فضای تنش) به صورت جداگانه برای نرم افزار تعریف شود.

برای تعیین رشد سطح تسلیم از روش معرفی اندازه σ^0 به صورت تابعی نمایی به صورت رابطه ی زیر استفاده شده است و Q_∞ و b نیز ثابت های ماده می باشند.

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty (1 + e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (3)$$

در نرم افزار به کمک دستور زیر از رابطه بالا برای رشد سطح تسلیم استفاده می کنیم.

*Cyclic Hardening, Parameters

$\hat{\sigma}_0, Q_\infty, b$

برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش از آزمون کشش ساده استفاده شده است. داده های ε_i^{pl} و σ_i را از منحنی نیم سیکل کشش ساده به دست آورده و به کمک دستور زیر وارد نرم افزار کرده تا حرکت سطح تسلیم در فضای تنش نیز همزمان شبیه سازی گردد.

*Plastic, Hardening = Combine, Data type= Half Cycle

$\sigma_1, \varepsilon_1^{pl}$

$\sigma_2, \varepsilon_2^{pl}$

...

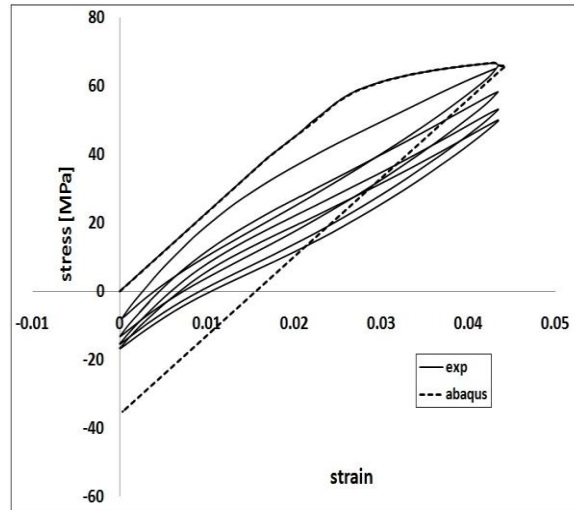
نمونه مدل اجزا محدود هم به صورت نمونه های سیمی شکل با المان های T3D2 و هم به صورت نمونه های متقارن محوری با المان های CAX4R شبیه سازی شده اند که نتایج هر دو تفاوتی با هم نمی کنند.

۵. مقایسه نتایج تجربی با مدل های سخت شونده‌گی

در شکل شماره ۴ مشاهده می شود که ماده تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری دچار رهاش می شود یعنی تنش متوسط ایجاد شده در سیکل های متوالی به صفر نزدیک می گردد و این رفتار به علت وجود کرنش متوسط غیر صفری می باشد که به نمونه اعمال گردیده است. همچنین از نتایج تجربی مشاهده می گردد که پلیمر رفتار نرم شونده‌گی از خود نشان می دهد و نرخ نرم شونده‌گی در چند سیکل ابتدایی بالا می باشد و سپس این نرخ نرم شونده‌گی کاهش می یابد و در نهایت به حالت پایداری می رسد. همچنین مشاهده می شود که در سیکل های متوالی

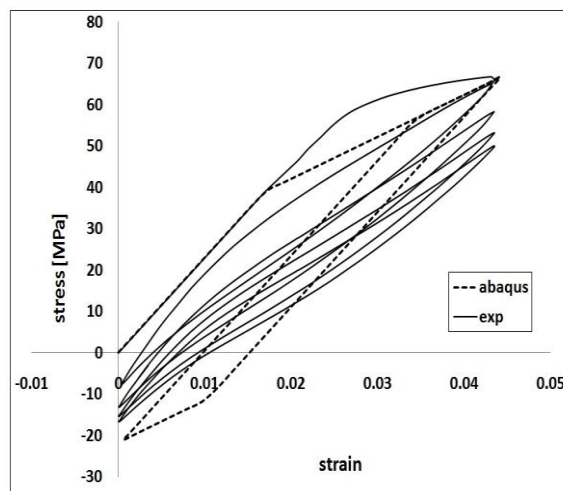
کرنش پلاستیک باقیمانده در ماده افزایش می یابد.

در شکل شماره ۵ مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. طبق این مدل سطح تسلیم در فضای تنش در تمامی جهات تنها رشد می کند اما انتقال نمی یابد لذا مشاهده می شود که مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک رفتار نیم سیکل اول بارگذاری را منطبق بر نتایج تجربی شبیه سازی کرده است اما طی سیکل های متوالی این مدل سخت شوندگی قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی ماده پلیمری نمی باشد و رفتار بارگذاری و باربرداری را در سیکل های متوالی یکسان شبیه سازی کرده است.



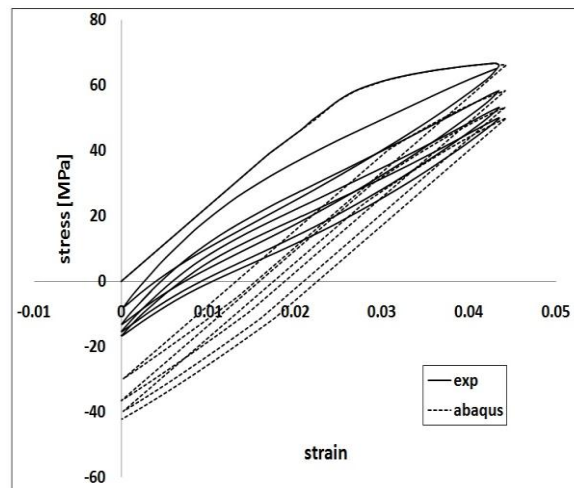
شکل ۵: مقایسه مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک با نتایج تجربی

در شکل شماره ۶ مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. طبق این مدل سطح تسلیم در فضای تنش تنها انتقال می یابد لذا مشاهده می شود که مدل سخت شوندگی سینماتیک خطی نمی تواند رفتار نیم سیکل اول بارگذاری را منطبق بر نتایج تجربی شبیه سازی کند و طی سیکل های متوالی این مدل حلقه های بسته ای از منحنی های هیستریزس تشکیل می دهد و قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی ماده نمی باشد.



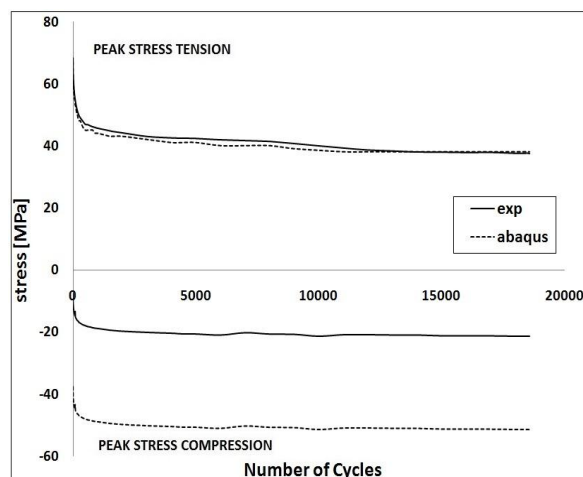
شکل ۶: مقایسه مدل سخت شوندگی سینماتیک با نتایج تجربی

در شکل شماره ۷ مدل نهایی و پیشرفته سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک با نتایج تجربی نشان داده شده است. در این مدل اندازه سطح تسلیم در فضای تنش به طور یکنواخت در همه جهات رشد می کند و همچنین سطح تسلیم انتقال می یابد. لذا مشاهده می شود که این مدل قادر به شبیه سازی رفتار نرم شوندگی ماده مورد آزمایش می باشد. همچنین نرخ نرم شوندگی در چند سیکل ابتدایی بالا می باشد و در سیکل های بعدی کاهش می یابد. مشاهده می گردد که این مدل همانند نتایج تجربی افزایش کرنش پلاستیک باقیمانده طی سیکل های متوالی را به خوبی شبیه سازی کرده است.



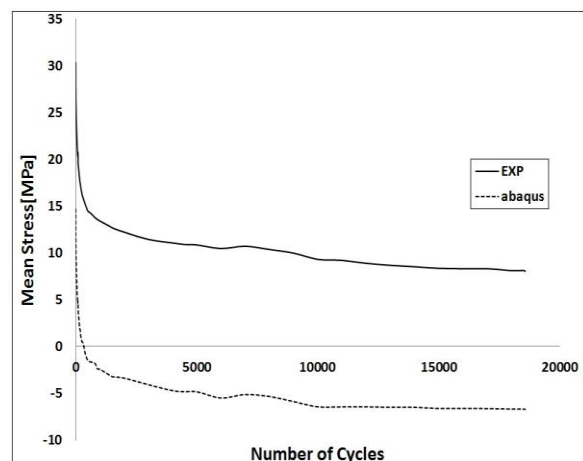
شکل ۷: مقایسه مدل سخت شوندگی غیر خطی ایزوتروپیک/سینماتیک با نتایج تجربی

در شکل شماره ۸ مشاهده می شود که تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری با دامنه کرنش 0.02224 و کرنش متوسط 0.02224 تعداد چرخه ها تا شکست نمونه برابر 18568 چرخه می باشد. رفتار چرخه در کشش و فشار یکسان نیست و این به علت وجود مقدار بالای کرنش متوسط می باشد. در ناحیه فشاری، به علت وجود مقدار بالای کرنش متوسط مثبت، حداکثر تنش فشاری در چرخه های متوالی بیشتر می شود و ماده در ناحیه فشاری رفتار سخت شوندگی دارد و این از رفتار های جالب بوجود آمده در ماده می باشد و به این دلیل که تحت این نوع بارگذاری ماده سعی می کند طی سیکل های متوالی تنش متوسط ایجاد شده در منحنی های هیستریزیس را به صفر تمایل دهد (رفتار رهاسازی). در هر دو ناحیه ماده به سرعت به حالت پایداری می رسد.



شکل ۸: مقایسه تجربی و عددی حداکثر تنش کششی و فشاری تحت بارگذاری کرنش کنترلی با دامنه کرنش ۰.۰۲۲۲۴ و کرنش متوسط ۰.۰۲۲۲۴

در شکل شماره ۹ منحنی تغییرات تنش متوسط برای حلقه های هیستریزس پوسته استوانه ای نسبت به تعداد چرخه ها تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری نشان داده شده است. مشاهده می شود که تنش متوسط داده های تجربی به مقدار صفر نزدیک می گردد و در چرخه های متوالی تنش متوسط ایجاد شده در پوسته استوانه ای رها سازی می شود. افت شدید تنش متوسط در چرخه های ابتدایی بارگذاری به این دلیل می باشد که سرعت نرم شوندگی ناحیه کششی منحنی های هیستریزس بیشتر از ناحیه فشاری می باشد، لذا تنش متوسط به سرعت کاهش می یابد.



شکل ۹- تغییرات تنش متوسط در حلقه های هیستریزس پوسته استوانه ای تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری

۶. جمع بندی

با توجه به انجام تست تجربی تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری و شبیه سازی توسط مدل های سخت شوندگی مختلف و منحنی های به دست آمده می توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- ماده تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری، رفتار رهاش و نرم شوندگی از خود نشان داد.
- مدل های سخت شوندگی نتوانستند کرنش پلاستیک باقیمانده را با دقت بالایی شبیه سازی کنند.
- این مدل ها از معیار وان- مایسز برای شبیه سازی رفتار ماده استفاده می کنند لذا رفتار ماده را در کشش و فشار یکسان شبیه سازی می کنند به همین دلیل در ناحیه فشاری نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی انطباق

خوبی ندارد.

- دو مدل ایزوتروپیک و سینماتیک نمی توانند رفتار نرم شونده را شبیه سازی کنند.
- مدل ترکیبی به خوبی رفتار نرم شونده را شبیه سازی می کند و شکل منحنی های هیستریزس در این مدل مشابه نتایج تجربی می باشد و رفتار غیر خطی ناحیه بی باری ماده را در کشش و فشار به خوبی شبیه سازی می کند. این مدل افزایش کرنش پلاستیک باقیمانده طی سیکل های متوالی را همانند نتایج تجربی به خوبی شبیه سازی کرده است.
- نمونه تحت بارگذاری کرنش کنترلی نامتقارن محوری یک رفتار رهاسازی از خود نشان می دهد و تنش متوسط ایجاد شده در حلقه های هیستریزس با ادامه بارگذاری به مقدار صفر نزدیک می گردد.

۷. منابع و مراجع

- [1] ABAQUS Analysis user's manual, v6.9.1, section 19.2.2, models for metals subjected to cyclic loading, 2009.
- [2] ABAQUS Theory manual, v6.9.1, section 4.3.5, models for metals subjected to cyclic loading, 2009.
- [3] Avanzini, A., Mechanical characterization and finite element modeling of cyclic stress-strain behavior of ultra high molecular weight polyethylene, *Material & design*, Vol. 29, Issue 2, 2008, pp. 330-343.
- [4] Chaboche, J.L. and Lemaitre, J., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990.
- [5] Chen, X. and Hui, S., Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression, *Polymer Testing*, 24, 2005, pp. 829-833.
- [6] Liu, W., Gao, Z. and Yue, Z., Steady ratcheting strains accumulation in varying temperature fatigue test of PMMA, *Materials Science and Engineering A*. Vol. 429, 2008, pp. 102-109.
- [7] Meyer, R.W. and Pruitt, A.L., The effect of Cyclic true Strain on the morphology structure and relaxation behavior of ultrahigh molecular weight polyethylene, *Polymer*, Vol. 42, 2001, pp. 5293-306.
- [8] Owen, D.R.J. and Hinton, F., *Finite elements in plasticity- theory and practice*, Pineridge Press Ltd, 1980.
- [9] Ramkumar A. and Gnanamoorthy R., Axial fatigue behavior of polyamide-6 and polyamide-6 nanocomposites at room temperature, *Composites science Technology*, 68, 2008, pp. 3401-3405.
- [10] Tao G., Xia Z., Mean stress/strain effect on fatigue behavior of an epoxy resin, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, 2007, pp. 2180-2190.
- [11] Tao, G. and Xia, Z., Ratcheting behavior of an epoxy polymer and its effect on fatigue life, *Polymer Testing*, 26, 2007, pp. 451-46.
- [12] Zhang Z. and Chen, X., Multiaxial ratcheting behavior of PTFE at room temperature, *Polymer Testing*, Vol. 28, 2009, pp. 289-295.