

مدل سازی، شبیه سازی و بررسی اثر مولینز در قطعه لاستیکی تحت بارگذاری چرخه ای

سعید جمعه پور هدایت آبادی^۱، علی دشتی^{۲*}، رضا عارفی نیا^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد، ^۲ استادیار گروه مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد، ^۳ استادیار گروه مهندسی شیمی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در قطعات لاستیکی که به طور مکرر تحت فشار و کشش قرار می گیرند، تغییر شکل و آسیب دیدگی ناشی از این بارگذاری دینامیکی سبب از کارافتادگی آن ها می گردد. در این پژوهش، قطعه لاستیکی پر کاربرد اسلیو مورد استفاده در رگلاتورهای جریان محوری به کمک نرم افزار آباکوس مدل سازی و شبیه سازی شد. آزمون تنش- کرنش مطابق با آزمون استاندارد انجام گرفت و نتایج آن با سه مدل رایج در پیش بینی رفتار لاستیک ها مقایسه گردید و مدل "یه او" به دلیل انطباق بهتر با داده های واقعی انتخاب گردید. توزیع فشار وارده بر جداره لاستیک که ناشی از عبور سیال گازی از درون آن می باشد، توسط نرم افزار فلونت مدل سازی شد و نتایج حاصله در ۲۵ لایه مجزا به نرم افزار آباکوس منتقل گردید. میزان آسیب و تغییر شکل قطعه، طی بارگذاری چرخه ای مطابق مدل مولینز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد با افزایش سرعت گاز، میزان آسیب قطعه افزایش می یابد. حداکثر میزان آسیب قطعه در سرعت ۱۴۰ متر بر ثانیه و فشار ۱۴ مگاپاسکال رخ داد. به علاوه، محل اصلی آسیب در منطقه گلوگاهی قطعه لاستیکی می باشد.

کلمات کلیدی: مدل سازی و شبیه سازی، لاستیک، ابر کشسان، اثر مولینز، آسیب دیدگی، آباکوس.

۱- مقدمه

لاستیک ها از خانواده مواد پلیمری بوده و مشابه اکثر پلیمرها به صورت برگشت پذیر دچار تغییر شکل می گردند. هرچند خاصیت کشسانی و انعطاف پذیری لاستیک ها به دلیل ماهیت پلیمری آن ها زیاد می باشد، اما به دلیل مقاومت بالا در برابر تراکم پذیری رفتار مکانیکی منحصر به فردی از خود بروز می دهند. لاستیک ها معمولاً دارای نسبت پواسن کم بوده و در نتیجه نمی توان برای مدل سازی و تحلیل رفتار یک لاستیک از مدل های

* dashti@um.ac.ir

خطی و عمومی استفاده نمود. لذا نیاز به مدل‌هایی می‌باشد که توانایی پیش‌بینی رفتار لاستیک در شرایط متفاوت اعم از فشار و کشش را دارا باشد. بیان ریاضی رفتار مکانیکی لاستیک‌ها توسط مدل‌های ابر کشسان صورت می‌پذیرد. در برخی تحقیقات، به معرفی و تعمیم یک یا چند مدل ابرکشسان و ارتباط آنها، مدل‌سازی و حل عددی و مقایسه نتایج مدل با داده‌های واقعی پرداخته شده است [۷-۱]. زمانی که خاصیت ویسکوالاستیک یک لاستیک مورد توجه قرار گرفته باشد، معادلات ابر کشسان به‌تنهایی قادر به پیش‌بینی کلیه رفتارهای آن نمی‌باشند. زیرا در صورت ایجاد تنش علاوه بر میزان کرنش، نرخ تغییرات کرنش نیز حائز اهمیت می‌باشد. در صورت بارگذاری‌های متعدد بر روی قطعه لاستیکی بعد از اولین بارگذاری با پدیده کرنش دیدگی قبلی مواجه گردیده و در واقع تحت اثر هر یک از کرنش‌های رفت و برگشتی هم دامنه کشش، فشاری و یا برشی، خواص مکانیکی لاستیک از جمله مقاومت سختی و قابلیت‌های استهلاک انرژی نسبت به اولین سیکل کاهش محسوسی یافته و در نهایت پس از گذشت چند سیکل به مقدار ثابتی می‌رسد. این پدیده به نام کاشف آن اثر مولینز نام‌گرفته است. اثر مولینز کمک شایانی به پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از بارگذاری‌های چرخه‌ای بر روی لاستیک می‌نماید [۸ و ۹].

نمونه مورد مطالعه در این پژوهش یک قطعه لاستیکی به نام اسلیو است که نقش اساسی در عملکرد رگلاتورهای جریان محوری ایستگاههای تقلیل فشار گاز بازی می‌کند. جنس استاندارد اسلیو، لاستیک بونا-ان (نیتریل رابر) می‌باشد که مقاومت عالی در برابر هیدروکربنها داشته و خواص فیزیکی آن در محدوده وسیعی از دمای کارکرد حفظ می‌شود [۱۰]. قطعه اسلیو با توجه به فشار گاز ورودی بایستی با انبساط یا انقباض مکرر، کنترل دبی جریان گاز را بر عهده گیرد. بارگذاری مداوم و متغیر قطعه در طی زمان، ممکن است منجر به آسیب دیدگی و در نهایت خرابی آن منجر گردد. مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بررسی عملکرد اسلیو تحت بارگذاری مکرر و دینامیکی تاکنون صورت نگرفته است. در پژوهش حاضر، ابتدا داده‌های منحنی تنش-کرنش برای نمونه استاندارد بدست آمده از قطعه اسلیو با مدل‌های رایج پیش‌بینی رفتار لاستیک‌ها مقایسه گردید و مدل "یه او" به عنوان مدل مناسب انتخاب شد. سپس به کمک اثر مولینز احتمال آسیب‌دیدگی قطعه لاستیکی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- معادلات حاکم

در این پژوهش، از دو مجموعه معادله استفاده شده است: معادلات ابر کشسان و روابط مربوط به اثر مولینز که به صورت مکمل یکدیگر هستند. به دلیل تعدد مدل‌های ابر کشسانی تنها برآزش اطلاعات آزمایشگاهی با سه مدل مطرح و رایج صورت پذیرفته است.

۲-۱- معادلات ابر کشسان

از جمله مدل‌های مطرح ابر کشسان، می‌توان به سه مدل چندجمله‌ای درجه دوم، مدل یه او و مدل آگدن اشاره کرد که در جدول ۱ روابط مربوط به این سه دسته از معادلات آورده شده است.

جدول ۱: معادلات حاکم بر مدل‌های ابر کشسان مورداستفاده

نام مدل	معادله	توضیحات
آگدن [۲]	$W = \sum_{i=1}^n \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$	بر مبنای نسبت‌های کشیدگی
چندجمله‌ای [۱۱]	$W = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$	با فرض حجم لاستیک ثابت
یه او [۱۲]	$W = \sum_{i=0}^n C_{i0} (I_1 - 3)^i$	چگالی انرژی تابعی از متغیر اول

۲-۲- معادلات حاکم بر اثر مولینز

نظر گرفتن اثر مولینز در تحلیل بارگذاری‌های متناوب حائز اهمیت است، زیرا در غیر این صورت بارگذاری‌های قبلی نادیده گرفته می‌شود. بیان ریاضی این مدل‌ها به شکل رابطه میان چگالی انرژی و متغیرهای تنسور کرنش و نسبت‌های اصلی کشش بیان می‌گردد. به صورت مختصر روابط حاکم بر اثر مولینز به شرح ذیل می‌باشد [۱۳]:

$$W(F) = (1-d)W_0 \quad (1)$$



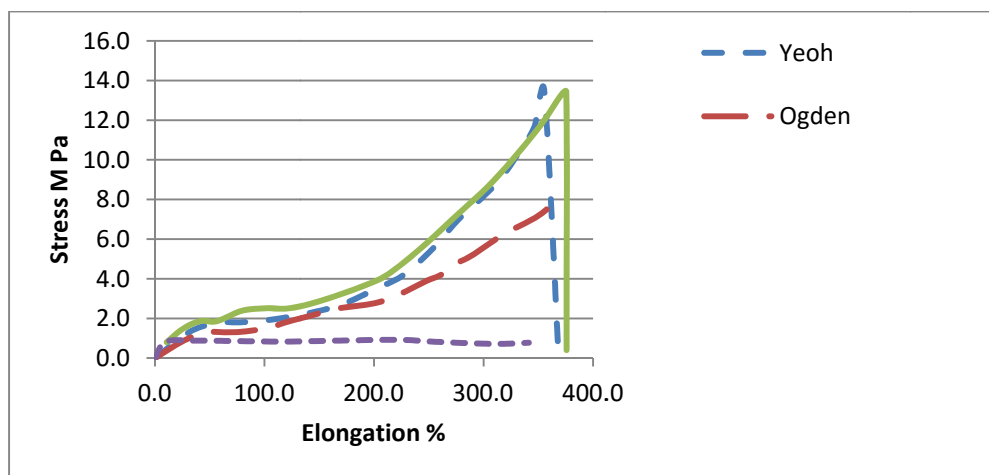
$$d = \begin{cases} d(x) & \text{when } \dot{x} \geq 0 \\ d(\text{Max}_{s \in [-\infty, t]} [x(s)]) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$d = \begin{cases} 0 & \text{when } \dot{x} \geq 0 \\ d(x, \text{Max}_{s \in [-\infty, t]} [x(s)]) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

در معادله ۱، اعمال انرژی W سبب ایجاد گرادیان تغییر شکل F می‌گردد. پارامتر d معرف آسیب احتمالی در قبال بارگذاری‌های متعدد می‌باشد. ماهیت اصلی d نامعلوم بوده و متناسب با کاربری قطعه لاستیکی متغیر است و می‌تواند اثر هرگونه چین‌خوردگی و هر آسیب فیزیکی و مکانیکی باشد. به‌منظور محاسبه پارامتر d یک متغیر به نام x تعریف می‌گردد که d تابعی از آن می‌باشد [۱۲] و مقادیر آن در بارگذاری اول از رابطه ۲ و در بارگذاری‌های بعدی از رابطه ۳ به دست می‌آید. متناسب با نحوه بارگذاری بر روی قطعه موردنظر روابط متفاوتی وجود دارد که در آن‌ها x متغیر بوده که در نهایت با محاسبه آن مقدار d نیز حساب می‌گردد [۱۴].

۳- مدل سازی، شبیه سازی و تحلیل نتایج

ابتدا نمونه‌های آزمون دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM-D412 تهیه و تحت آزمون کشش قرار گرفت. این آزمون با دستگاه کشش STM-20 شرکت طراحی مهندسی سنتام صورت گرفت. نتایج حاصل از آزمون با سه مدل رایج مذکور مقایسه شد تا مدل مناسب انتخاب گردد که نتایج مربوطه در شکل ۱ آورده شده است.



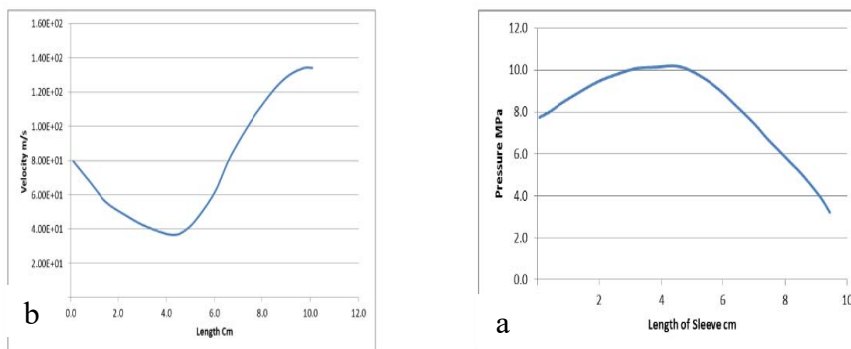
شکل ۱: نمودار تنش بر حسب درصد افزایش طول در حالت تجربی و پیش‌بینی شده با مدل‌های ابر کشسان رایج

همان‌طور که شکل ۱ مشاهده می‌شود مدل یه او با اختلاف کمتری در مقایسه با دو مدل دیگر به نتایج تجربی نزدیک می‌باشد. علاوه بر این در جدول ۲ نتایج پیش‌بینی هر مدل در برابر تنش و کرنش توسط نرم‌افزار آباکوس [۱۵] آورده شده است. بر اساس نتایج حاصله، مدل "یه او" پیش‌بینی پایداری در مقایسه با سایر مدل‌ها دارا می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه پایداری مدل‌های ابر کشسان تحت کشش و فشار در نرم‌افزار آباکوس

پارامتر برآزش شده	چند جمله‌ای درجه دوم	اگدن	یه او
کشش غیرخطی	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
فشار غیرخطی	پایدار	پایدار	پایدار
کشش دو جهته	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
فشار دو جهته	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
نتیجه	مردود	مردود	قابل قبول

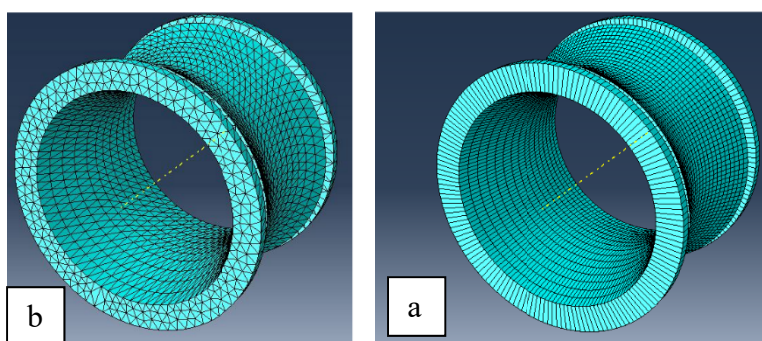
با انتخاب مدل "یه او" نوبت به شبیه‌سازی قطعه لاستیکی اسلیو می‌رسد. از آنجا که فشار اعمالی به جداره داخلی اسلیو ناشی از عبور سیال از درون این قطعه می‌باشد، به‌منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر اثر این فشار، عبور سیال از درون اسلیو و اثر فشار بر دیواره توسط نرم‌افزار فلونت [۱۶] شبیه‌سازی گردیده است و نتیجه آن در ۲۵ لایه به نرم‌افزار آباکوس منتقل گردیده است. در شکل ۲ تغییرات سرعت و فشار در طول اسلیو مشاهده می‌گردد ارتباط لایه‌ای میان دو نرم‌افزار آباکوس و فلونت سبب می‌گردد تا اثرات مکانیکی حرکت سیال توسط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی گردد که این موضوع از جمله کارهای نوین این پژوهش می‌باشد.



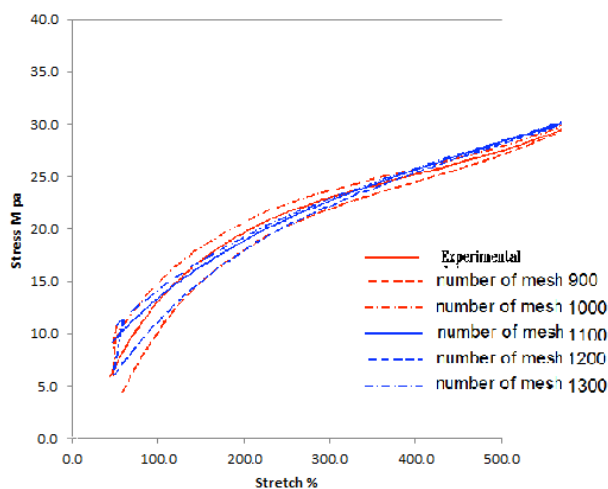
شکل ۲: تغییرات فشار (a) و سرعت (b) در طول قطعه لاستیکی اسلیو، شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار فلوئنت

۱-۳ بررسی استقلال شبکه

قبل از بررسی احتمال آسیب به قطعه مورد مطالعه ابتدا باید شبکه‌بندی هندسه را بررسی نمود. برای محاسبات نهایی از دو مش بندی ۴ و ۶ وجهی مطابق شکل ۳ استفاده شده است. علاوه بر نوع مش بندی، تعداد مش‌ها نیز متغیر در نظر گرفته شده تا استقلال شبکه مش بندی حاصل شود. نتایج حاصل در شکل ۴ ارائه شده است.



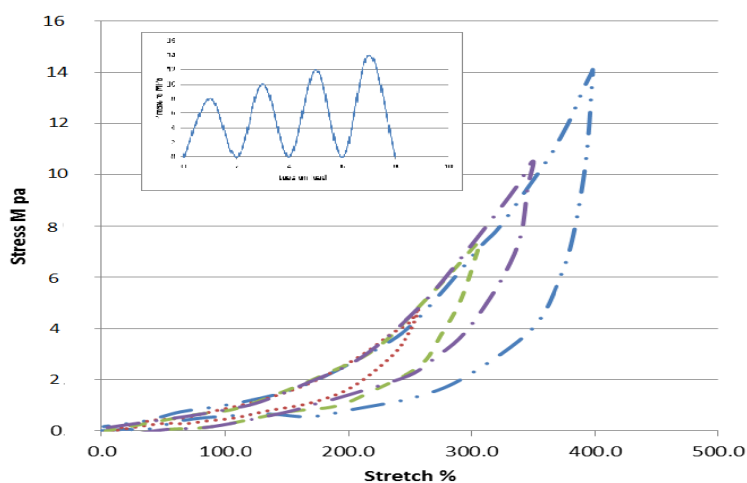
شکل ۳: مش بندی قطعه مورد مطالعه به دو فرم (a) چهاروجهی و (b) شش‌وجهی



شکل ۴: بررسی استقلال شبکه با تغییر تعداد مش

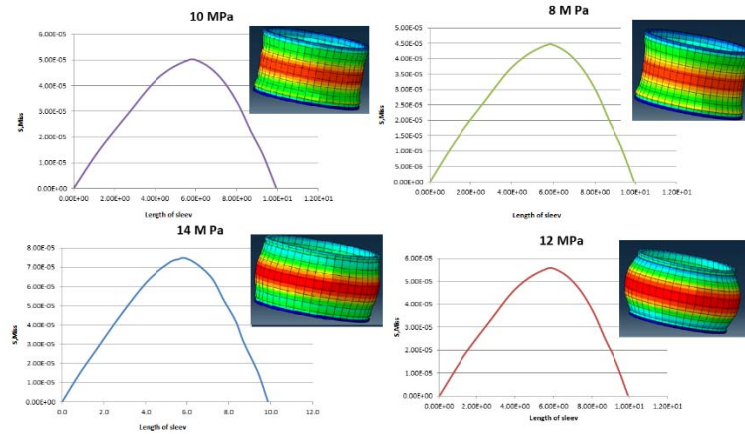
۲-۳ بارگذاری چرخه‌ای قطعه اسلیو و اثر مولینز

به منظور پیش‌بینی نقاط احتمالی آسیب از اثر مولینز استفاده می‌شود. قطعه لاستیکی مورد مطالعه معمولاً از درون به دیواره‌ها فشار اعمال می‌کند که این فشار با یک فشار بیرونی در تعادل می‌باشد اما در صورت از بین رفتن تعادل از دو طرف به قطعه فشار وارد گردیده که باعث آسیب قطعه و تغییر شکل آن می‌شود. به منظور شبیه‌سازی فرایند مذکور در دفعات متعدد بارگذاری بر روی قطعه صورت می‌گیرد که در شکل ۵ نمایش داده شده است.



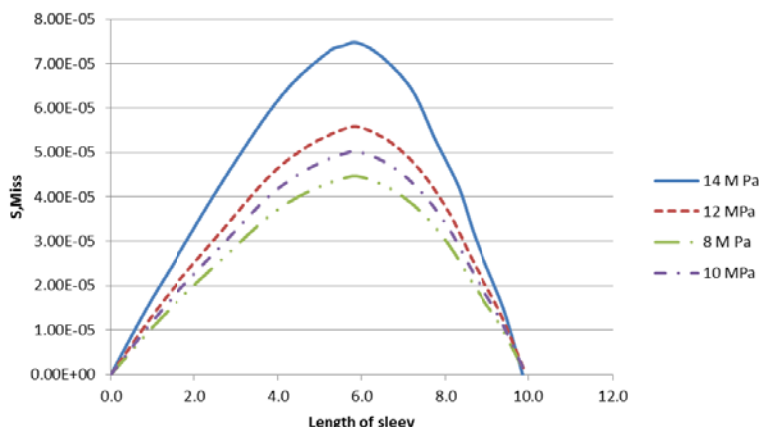
شکل ۵: بارگذاری چرخه‌ای بر روی قطعه و نمایش نمودار کشش در برابر تغییر اندازه

با انجام چند بارگذاری چرخه‌ای بر روی قطعه و برداشتن آن‌ها بعد از اتمام سیکل‌ها می‌توان نقاط آسیب قطعه را مشاهده نمود. در شکل ۶ مراحل اعمال بارگذاری و برداشتن آن برای فشارهای مختلف نمایش داده شده است.



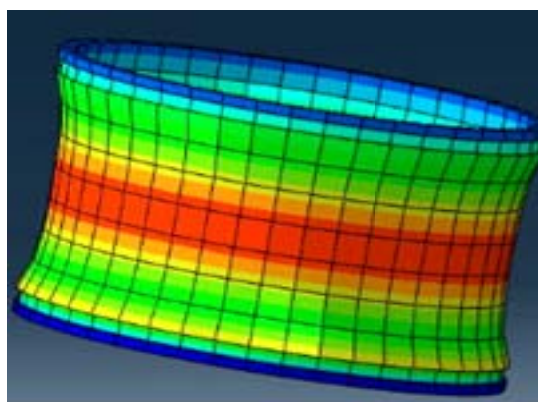
شکل ۶: نمودار تغییرات آسیب دیدگی در شرایط بارگذاری (اعمال و حذف)

شکل ۷ بارگذاری‌های چرخه‌ای را به صورت تجمعی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است چرخه‌های بارگذاری بر روی یکدیگر واقع نشده‌اند. مطابق تصاویر در اولین دفعه بارگذاری سختی بیشتری در مقایسه با سیکل‌های بعدی مشاهده می‌شود. علت این موضوع که مولینز برای اولین بار به تبیین آن پرداخته است که قبل از سیکل اول هیچ کرنشی وجود نداشته و با قرار گرفتن در سیکل اول قرار می‌گیرد و ادامه سیکل‌ها در لاستیک کرنش ایجاد شده و در نتیجه احتمال ایجاد آسیب در آن افزایش می‌یابد.



شکل ۷: بارگذاری‌های چرخه‌ای تجمعی و نمودار تغییرات میزان آسیب‌دیدگی در طول قطعه اسلیو

یکی از علل اصلی وقوع این پدیده را می‌توان باز شدن زنجیره‌های پلیمری در سیکل‌های دوم به بعد دانست زیرا در بارگذاری اولیه بخشی از انرژی صرف باز شدن زنجیره‌ها گشته و در سیکل‌های بعد زنجیره‌ها از لابه‌لای یکدیگر حرکت کرده و آزادتر می‌گردند. در نهایت، شکل ۸ تصویر قطعه مورد بررسی را نشان می‌دهد که نقاط ایجاد آسیب در اثر بارگذاری متعدد بر روی آن نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بر اثر بارگذاری چرخه‌ای بیشترین اثر آسیب و تغییر شکل مربوط به قسمت گلوگاهی قطعه لاستیکی می‌باشد با مقایسه شکل‌های ۲ و ۸ با یکدیگر مشاهده می‌شود که علت این پدیده افزایش ناگهانی سرعت متأثر از کاهش فشار بوده و صحت پیش‌بینی اثر مولینز را تایید می‌کند.



شکل ۸: نواحی ایجاد آسیب در قطعه اسلیو تحت تاثیر بارگذاری مکرر

۴ نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا برای قطعه لاستیکی مورد مطالعه یک مدل پیش‌بینی رفتار انتخاب گردید. همچنین جهت پیش‌بینی نقاط آسیب قطعه با توجه به شرایط کارکرد آن به دفعات تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شد. با ترکیب یک مدل ابر کشسان و اثر مولینز رفتار قطعه لاستیکی بعد از بارگذاری ها بررسی شد. نتایج نشان داد استفاده از اثر مولینز می تواند نقش مهمی در پیش بینی رفتار مکانیکی قطعه لاستیکی داشته باشد.

مراجع

- [1] D.W. Nicholson, W. N. Nelson, "Finite Element Analysis in Design with Rubber", Rubber Chem. Technol., Vol 63, 368-406, (1990).
- [2] R.W. Ogden, "Recent Advances in the Phenomenological Theory of Rubber Elasticity" Rubber Chem. Technol., Vol 59, 361-383, (1986).
- [3] A. Kumar, R.H. Finney, "Development of Material Constants for Nonlinear Finite Element Analysis", Rubber Chem. Technol., Vol 61, 879-891, (1988).
- [4] A. H. Muhr, "Modeling the Stress-Strain Behavior of Rubber", Rubber Chem. Technol, Vol.78, 391-425,(2005).
- [5] E. M. Arruda, M. C. Boyce, "A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials", J. Mech. Phys. Solids, Vol 41, 389-412. (1993).
- [6] T. Beda, "Modeling Hyperelastic Behavior of Rubber", J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys., Vol 45, 1713-1732, (2007).
- [7] A. Vandenbroucke, H. Laurent, N. Ait Hocine, C. Rio, "A Hyperelastic-Visco-Hysteresis Model for an Elastomeric Behaviour: Experimental and Numerical Investigations", Compos. Mater.Sci.,Vol 48, 495-503, (2010).
- [8] L. Mullins, N R.Tobin, "Theoretical model for the elastic behavior of filler reinforced vulcanized rubbers", Rubber Chem Technol,Vol 30,555-571,(1957).
- [9] L. Mullins, "Effect of stretching on the properties of rubber", J Rubber Res, Vol 16, 275-282. (1948).
- [10] Axial Flow Valve Catalog, American Meter Company, (2013).
- [11] M. H. R. Ghoreishy, "An Experimental and Numerical Verification of Different Hyperelastic Material Models for Rubbers under Tension and Compression Loads", J. Polym. Sci. Technol.(In Persian),Vol 23, 273-284,(2009).
- [12] O. H. Yeoh, "Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber", Rubber Chem.Technol.,Vol 66, 754-771, (1993).
- [13] S. Cantournet, R. Desmorat, J. Besson , "Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model", International Journal of Solids and Structures ,Vol 46, 2255-2264,(2009).
- [14] J. Diani, B. Fayolle, P. Gilormini, "A review on the Mullins effect", European Polymer Journal, 601-612, 2009.
- [15] ABAQUS, Version 6.14, 2014
- [16] Fluent ,Version 6.3.26.2014

Modeling, Simulation and Evaluation of Mullins Effect on Rubber Product under Cyclic Loading

Abstract

In the rubber products that are frequently under pressure and stretch, deformation and damage caused by this dynamic loading result in them to failure. In this study, modeling and simulation of a wide application sleeve rubber product used in axial flow regulators were carried out by Abaqus software. The stress-strain test was conducted according to the standard specimen and the results were compared with three common models used for prediction of rubbers behavior and the "Yeoh" model was selected as its better verification with experimental data. Distribution of pressure on the rubber wall, resulting from the internal gas fluid flow was modeled by Fluent software and the obtained results were imported into Abaqus software in 25 defined layers. The damage level and deformation extent of the sleeve during cyclic loading were evaluated using the Mullins effect. The simulation results show that by increasing the gas velocity, the extent of damage increases. The maximum extent of damage has occurred at the velocity of 140 m/s and a pressure of 14 MPa. In addition, the main location of damage is in the bottleneck region of the sleeve.

Keywords: Modeling and simulation, Rubber, Hyperelastic, Mullins effect, Damage, Abaqus.