

بررسی رفتار رئولوژیکی در آمیزه لاستیکی ترد تایرهای رادیال سواری سیمی

محمد کرابی ، حمیدرضا قریشی ، غلامرضا بخشنده

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

تهران ، کیلومتر ۱۵ اتوبان تهران-کرج ، بلوار پژوهش

E-mail: (M.Karabi@proxy.ipi.ac.ir)

چکیده

هدف در این مقاله نحوه بررسی و شناخت رفتار رئولوژیکی یک آمیزه لاستیکی است. برای این منظور ابتدا آمیزه لاستیکی با فرمولاسیون ترد تایر تهیه و رفتار رئولوژیکی آن با استفاده از رئومتر با دو صفحه موازی تحت مطالعه قرار گرفت. آزمایشات رئومتری انجام شده عبارتند از ۱- تعیین ناحیه پایدار و ایمن جهت اندازه گیری پارامترها، توسط آزمون زمان سنجی (Time Sweep Test)، ۲- تعیین تنش بحرانی جهت مشخص نمودن و تمایز دادن ناحیه خطی ویسکوالاستیک از ناحیه غیرخطی، توسط آزمون تنش سنجی (Stress Sweep Test) و ۳- اندازه گیری پارامترهای رئولوژیکی توسط آزمون فرکانس سنجی (Frequency Sweep Test). نهایتاً با استفاده از مقادیر رئولوژیکی اندازه گیری شده و فرض تابعیت رفتار ویسکوالاستیک مذاب از مدل ماکسول، زمان آسایش (Relaxation time) و شاخص ویسکوزیته محاسبه شد و مشخص گردید که با افزایش دما و نیز افزایش فرکانس شاخص ویسکوزیته و زمان آسایش روند کاهشی را نشان می دهند.

واژه‌های کلیدی: رئولوژی- آمیزه لاستیکی- ترد تایر- رئومتر با دو صفحه موازی

مقدمه

فرآیند پذیری آمیزه های لاستیکی در تمام مراحل اختلاط، اکستروژن، قالبگیری و پخت از مسائل مهم و قابل بررسی در صنعت لاستیک و بخصوص تایر بشمار میرود. همچنین رفتار رئولوژیکی یک آمیزه لاستیکی شدیداً ویسکوالاستیک است و تا کنون روابط تئوری که بتواند این گونه رفتار را در مسیر جریان بصورت واقعی پیش بینی نمایند بدست نیامده است. این امر افت کیفیت و ضایعات زیادی را در خط تولید ایجاد می کند چرا که تغییر در هر پارامتر رئولوژیکی که احتمال دارد بدلالی مانند تغییر زمان اختلاط، تغییر دمای فرایند، جایگزینی برخی افزودنیها و... بوجود آید، کل پدیده های فرآیندی را تحت تاثیر قرار میدهد. بهمین خاطر کارشناسان مجبورند مسیر حدس و خطا را تا به کنترل در آوردن فرآیند طی نمایند. نتایج تحقیقات نشان میدهد برای پیشگویی رفتار جریان اینگونه مذابها بهترین راه اندازه گیری پارامترهای رئولوژیکی، انتخاب مدل ویسکوالاستیک مناسب و حل آن به طریق روش المانهای محدود در یک شرایط مرزی معین است [۱-۲] در این مطالعه آمیزه ترد تایر یکی از کارخانجات لاستیکی در نظر گرفته شده است.

فرآیند پذیری آمیزه های لاستیکی در تمام مراحل اختلاط، اکستروژن، قالبگیری و پخت از مسائل مهم و قابل بررسی در صنعت لاستیک و بخصوص تایر بشمار میرود. همچنین رفتار رئولوژیکی یک آمیزه لاستیکی شدیداً ویسکوالاستیک است و تا کنون روابط تئوری که بتواند این گونه رفتار را در مسیر جریان بصورت واقعی پیش بینی نمایند بدست نیامده است. این امر افت کیفیت و ضایعات زیادی را در خط تولید ایجاد می کند چرا که تغییر در هر پارامتر رئولوژیکی که احتمال دارد بدلالی مانند تغییر زمان اختلاط، تغییر دمای فرایند، جایگزینی برخی افزودنیها و... بوجود آید، کل پدیده های

روابط ریاضی

که در آن 2D در واقع تنسور تغییر فرم با مشخصه $\dot{I}J$ بوده و معادل γ میباشد و نیز فرم دیفرانسیلی آنها که بصورت زیر تعریف می شوند:

$$A(\tau) \cdot \tau + \lambda \frac{\delta \tau}{\delta t} = \eta \gamma \quad (5)$$

بنابراین برای ساده ترین حالت یعنی مدل ماکسول رابطه زیر وجود خواهد داشت:

$$\tau + \lambda \frac{d\tau}{dt} = \eta \gamma \quad (6)$$

از طرفی با حل معادلات در حالت مدل ماکسول عمومیت یافته روابط ساده شده ذیل براحتی قابل دستیابی است:

$$\eta'(\omega) = \sum_k \frac{\eta_k}{1 + (\lambda_k \omega)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\eta''(\omega)}{\omega} = \sum_k \frac{\eta_k \lambda_k}{1 + (\lambda_k \omega)^2} \quad (8)$$

-معادلات رفتار رئولوژیکی بین دو صفحه موازی [۴-۵] اگر حرکت سینوسی یک آمیزه لاستیکی مابین دو دیسک موازی در نظر گرفته شود مقدار تنش و کرنش اندازه گیری شده با اختلاف فاز همراه است که این امر قطعاً بدلیل ماهیت ویسکوالاستیک آمیزه است برای این شرایط معادلات ذیل صادقند:

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (9)$$

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (10)$$

همانطور که مشخص است در معادله ۱۰ تنش به دو جزء ویسکوز و الاستیک تجزیه می گردد بنابراین روابط زیر بدست می آیند:

$$\tau = \tau' + \tau'' = \tau'_0 \sin \omega t + \tau''_0 \cos \omega t \quad (11)$$

و برای میزان دمپ:

$$\tan \delta = \frac{\tau''_0}{\tau'_0} = \frac{G''}{G'} \quad (12)$$

-معادلات حاکم بر جریان [۱]

در جریان یک سیال معادلات حاکم بر جریان سه بعدی در دستگاه مختصات کارتزین (X,Y,Z) عبارتند از:
-معادله جرم یا پیوستگی (با فرض تراکم ناپذیری سیال):

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (1)$$

-معادلات حرکت:

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \bar{g} \quad (2)$$

-معادله انرژی:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \bar{\tau} : \nabla \bar{V} \quad (3)$$

که در مراجع پارامترهای این معادلات تعریف شده اند.

-معادلات اساسی (constitutive models) [۳]

با توجه به پیچیدگی در رفتار جریانهای ویسکوالاستیک مدل‌های بسیار متنوعی در توجیه اینگونه رفتار ارائه شده است و تمام این مدلها بدنبال ارتباطی منطقی بین تنش و سرعت برشی هستند تا بتواند رفتار جریان را هرچه نزدیکتر به شرایط واقعی توجیه و تعیین نماید که البته روش حل اینگونه معادلات نیز در جنو متری‌های پیچیده کاری بس دشوار و حائز اهمیت است .
در حالت کلی مدل‌های ویسکوالاستیک را میتوان در دو مدل کلی به دو شکل انتگرالی و دیفرانسیلی تعریف نمود که به ترتیب در معادلات ۴ و ۵ نشان داده شده اند.

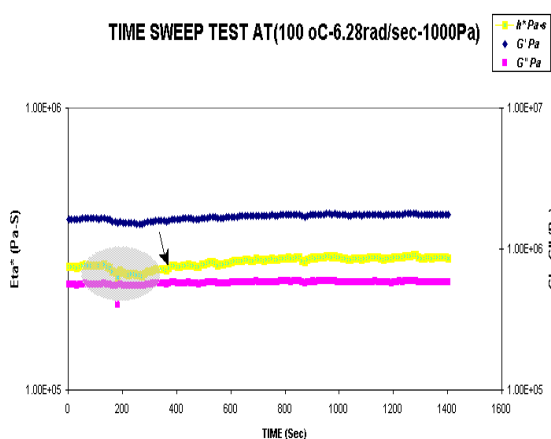
$$\bar{\tau} = \int_{-\infty}^t G(t-t') 2D(t') dt' \quad (4)$$

بوسیله رئومتر با دو صفحه موازی با مارک SR 5000 که ساخت کارخانه TA Instrument میباشد انجام شد.

-آزمون زمان سنجی

هدف از انجام این آزمون یافتن مدت زمانی است که در آن محدوده زمانی، کلیه خواص رئولوژیکی ماده ثابت و تحت شرایط یکسان فرآیندی تغییری نیابد. برای این منظور دما، تنش (یا برش) و فرکانس ثابت نگاه داشته می شود و آزمون انجام می شود. ناحیه پایدار ناحیه ای است که در حین آزمون هر کدام از پارامترهای رئولوژیکی، بعنوان مثال ویسکوزیته ثابت باقی بماند.

در این آزمون مشاهده می شود که ابتدا رفتار آمیزه تحت شرایطی ناپایدار است اما با افزایش زمان این فرصت داده می شود تا آمیزه جهتایی لازم را در حرکت سینوسی جریان پیدا کرده و به ناحیه پایدار خود برسد از طرفی در زمانهای بالا نیز چون آزمون تحت دما انجام می گیرد با افزایش زمان باندهای دو گانه فعال شده و احتمال شکل گیری اتصالات عرضی و هر نوع انفعالات شیمیایی که موجب تغییر در رفتار رئولوژیکی شود وجود خواهد داشت بنابراین با افزایش زمان مسئله ناپایداری در رفتار مجددا مشاهده می گردد. شکل زیر نمونه ای از این رفتار را برای آمیزه لاستیکی ترد نشان می دهد:



شکل ۱- آزمون زمان سنجی در تنش و فرکانس ثابت در دمای ۱۰۰ oC

همچنین ارتباط بین اجزاء ویسکوزیته و اجزاء مدول به شکل زیر تعریف می شوند:

$$\eta' = \frac{\tau_0''}{\gamma_0} = \frac{G''}{\omega} \quad (13)$$

$$\eta'' = \frac{\tau_0'}{\gamma_0} = \frac{G'}{\omega} \quad (14)$$

$$(15)$$

$$\eta^* = (\eta'^2 + \eta''^2)^{1/2} = [(G''/\omega)^2 + (G'/\omega)^2]^{1/2} = \frac{1}{\omega} G^*$$

با توجه به قانون Cox-Merz ارتباطی مستقیم و نزدیک بین فرکانس (rad/sec) و سرعت برشی (1/sec) وجود

دارد که میتوان $\eta(\dot{\gamma}) = \eta^*(\omega)$ را در نظر گرفت [۳].

بر پایه این معادلات کارهای عملی صورت پذیرفته شامل بخش اندازه گیری پارامترهای رئولوژیکی نظیر ویسکوزیته کمپلکس و نیز بخش محاسبه پارامترهای ویسکوالاستیک نظیر زمان آسایش تنش میباشد که در مراحل بعدی بتواند جهت آنالیز جریان آمیزه لاستیکی در قسمت دای بکار گرفته شود.

آزمایشات

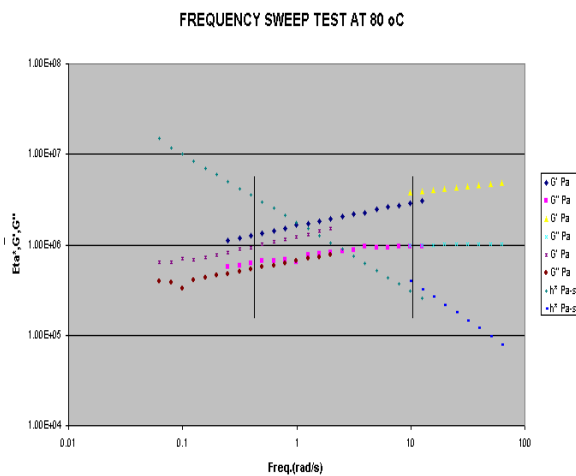
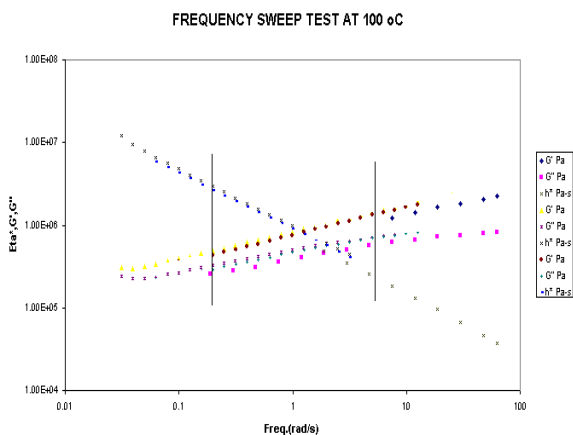
-اندازه گیری پارامترهای ویسکوالاستیک با استفاده

از رئومتر با دو صفحه موازی [۶]

برای این منظور ابتدا آمیزه لاستیکی که قبلا تهیه شده است به شکل دیسک و به اندازه قالب دستگاه رئومتر، قالبگیری شده و حداقل بمدت یک روز باقی می ماند تا آسوده (Relax) شود. این فرصت یک روزه که بطور تجربی تعیین شده به آمیزه قالبگیری شده این اجازه را می دهد تا بتواند دوباره آسایش خود را که بدلیل تغییر فرم در حین شکل گیری و بدلیل تنشهای اعمال شده بدست آورده از دست داده و اصطلاحاً Relax گردد. چنانچه آزمون بلافاصله بعد از قالبگیری انجام شود نتایج قابل استناد نیست و تغییرات زیادی در آن مشاهده می گردد. بعد از تهیه کردن نمونه های لاستیکی آزمونهای زیر برترتیب

در این آزمون باید مقادیری را که در آزمونهای قبل برای زمان پایدار و تنش بحرانی بدست آمده در نظر گرفته و بر اساس آن شرایط تست را انتخاب نمائیم مثلا چنانچه برای فرکانس ۰/۱ هرتر تنش بحرانی σ_c^1 و برای فرکانس ۱ هرتر تنش بحرانی σ_c^2 اندازه گیری شده است باید برای هر فرکانس تنش بحرانی مرتبط در نظر گرفته شود بدیهی است با افزایش فرکانس مقدار تنش بحرانی که در واقع مرحله ورود به حالت غیر خطی است کمتر می گردد.

در شکل ۲ برخی نتایج مربوط به آزمون فرکانس سنجی برای آمیزه مورد نظر آمده است.



با انجام آزمونهای زمان سنجی که در حالات متعدد صورت پذیرفت مدت زمانی را که میتوان برای ناحیه پایدار در نظر گرفت زمانی بین ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ ثانیه را نشان می دهد که در واقع نتایج اندازه گیری شده توسط دستگاه رنومتر در این زمان قابل استناد می باشند. بعبارتی در محدوده زمانهای پایینتر از ۴۰۰ یا بالاتر از ۱۵۰۰ ثانیه تغییرات زیادی در نتایج دیده می شود.

-آزمون تنش سنجی

هدف از انجام این آزمون یافتن مقدار تنش بحرانی σ_c (ویا برش بحرانی γ_c) می باشد. تنش بحرانی در واقع تنشی است که در آن رفتار ویسکوالاستیک از حالت خطی به حالت غیر خطی تغییر می یابد. در این آزمون یک پارامتر رئولوژیکی با افزایش مقدار تنش (σ) (ویا در آزمون STRAIN SWEEP مقدار برش (γ)) در یک دما و فرکانس ثابت اندازه گیری می شود تا مرحله ای که مقدار تنش بحرانی مشخص گردد. بدیهی است با افزایش فرکانس مقدار تنش بحرانی کاهش خواهد یافت.

این آزمون به صورت فرکانس بالا به پایین و بر عکس از فرکانس پایین به بالا انجام می گردد و طبیعتا نتیجه آزمون می بایست یک تنش بحرانی را نشان دهد. نتایج آزمون برای آمیزه لاستیکی مورد نظر در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- تنش بحرانی (Pa) در دما و فرکانس ثابت

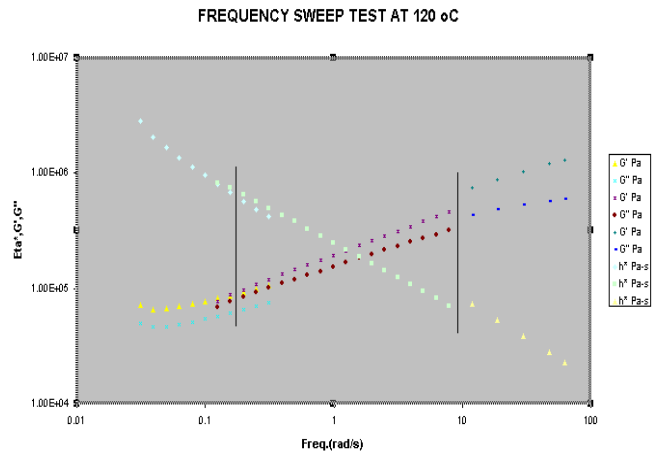
فرکانس (rad/sec)	۶۲/۸	۶/۲۸	۰/۶۲۸
دما (oC)	σ_c^3	σ_c^2	σ_c^1

۸۰	۵۹۱۲	۱۱۱۵۵	۱۴۱۹۶
۱۰۰	۲۲۳۸	۷۹۴۳	۱۰۴۷۱
۱۲۰	—	۴۴۶۷	۷۹۴۳

-آزمون فرکانس سنجی

آزمون نهایی آزمون فرکانس سنجی است که در واقع تعیین کننده پارامترهای رئولوژیک بوده و اهمیت زیادی دارد.

می‌گردد که با افزایش دما و فرکانس، شاخص ویسکوزیته و زمان آسایش کاهش می‌یابد. شاخص ویسکوزیته در واقع معرف مقاومت مذاب در برابر جریان و زمان آسایش معرف زمان لازم برای از دست دادن حافظه الاستیکی است. در ادامه این کار میتوان با استفاده از این نتایج و یک نرم‌افزار که توانایی حل مسئله را بر روش اجزاء محدود داشته باشد جریان آمیزه را در کانالهای مورد نظر تحت آنالیز و تحلیل قرار داد. این مسئله قبلاً برای حالت یک سیال ویسکوز پاورلا حل شده است. [۷]



مراجع:

- 1- Bird R.B., "Transport Phenomena", John Wiley, 1960
- 2- Mitsulis E., "Numerical Simulation of Viscoelastic Fluid" in Encyclopedia of Fluid Mechanics (N.P. Chermisinoff VOL.9), Gulf Pub., 1990
- 3- Macosko Ch. W., "Rheology Principles Measurements and applications", VCH Publishers, 1994
- 4- Agassant/Avenas/Sergent/Carreau, "Polymer Processing Principles and Modeling", Carl Hanser, 1991
- 5- Keunings R., "Simulation of Viscoelastic Fluid Flow" in Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing (C.L. Tucker III ed), Carl Hanser, New York, 1989
- 6- Leblanc J.L., Cartault M., J.App.Polym.Sci., **80**, 2093-2104, 2001
- 7- Karrabi M., Ghoreishy M.H.R., Naderi GH., "Fifth Seminar of polymer Science and Technology", Sept. 2000

شکل ۲- آزمون فرکانس سنجی با در نظر گرفتن تنش بحرانی در دماهای مختلف

نحوه محاسبه شاخص ویسکوزیته و زمان آسایش در مدل ماکسول

نتایج اصلاح شده در گرافهای شکل ۲ مبین آن است که پیوستگی در نتایج از روند قابل قبولی برخوردار می‌باشد. همچنین با فرض تابعیت رفتار از مدل ماکسول یعنی روابط ۷ و ۸ می‌توان زمان آسایش تنش و ویسکوزیته مدل را با ترسیم

$$\frac{1}{\eta'(\omega)} \text{ بر حسب } \omega^2 \text{ مطابق با معادله ۱۶ بدست آورد.}$$

$$\frac{1}{\eta'(\omega)} = \frac{1}{\eta_K} + \frac{\lambda^2 K}{\eta_K} \omega^2 \quad (16)$$

بعد از درونیابی خطی (Linear Interpolation) در دماهای مختلف و دامنه فرکانسهای مشخص نتایج محاسبه شده در جدول ۲ (صفحه بعد) آمده است.

نتیجه گیری

مطالعه رئولوژیکی یک آمیزه لاستیکی بدلیل افزودنی‌های متنوع و ماهیت ویسکوالاستیک پایه لاستیکی از حساسیت بالایی برخوردار بوده و کاری نسبتاً دشوار است بنابراین انجام آزمونهای زمان سنجی و تنش سنجی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از طرفی با مراجعه به نتایج جدول ۲ مشاهده

جدول ۲- شاخص ویسکوزیته η_K و زمان آسایش λ_K از معادلهٔ ماکسول در دما و فرکانس مشخص

Temperature (°C)	80		100		120	
ω (rad/sec)	η_K	λ_K	η_K	λ_K	η_K	λ_K
0.0628 – 0.314	3.333333×10^6	3.6514×10^0	6.666666×10^5	3.3665×10^0	5.00000×10^5	3.1622×10^0
0.314 – 8.16	3.33333×10^5	1.7320×10^{-1}	1.25000×10^5	1.5811×10^{-1}	1.00000×10^5	1.4142×10^{-1}
8.16 – 18.84	1.42857×10^5	6.5465×10^{-2}	1.00000×10^5	5.1961×10^{-2}	5.0000×10^4	4.4721×10^{-2}
18.84 – 37.68	1.00000×10^5	4.4721×10^{-2}	6.66666×10^4	3.6514×10^{-2}	—	—
37.68 – 62.8	5.0000×10^4	2.1213×10^{-2}	3.3333×10^4	2.2360×10^{-2}	2.5000×10^4	2.2360×10^{-2}