AMNC
available online @ amnc.aut.ac.ir
نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین- ۴۰ (۱۴۰۱) ۲۹۷۷-۲۹۶۶

بررسی خواص رئولوژیکی و استحکام برشی پلاستیزول بهبودیافته با نانوسیلیکا و نانوکربنات‌کلسیم با روش تاگوچی

محمد تقوی[۱]، محمدرضا کلائی*[۱و۲]، علیرضا عقیلی[۳]

۱. گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران
۲. مرکز تحقیقات فن آوری نانو، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران
۳. گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران

چکیده

پلاستیزول سوسپانسیونی است که از ذرات ریز پلی(وینیل کلراید)، نرم‌کننده، تثبیت کننده، رنگدانه و پرکننده تشکیل شده است و می‌تواند به عنوان عایق زیر بدنه خودرو مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، مواد افزودنی و پرکننده مؤثر بر خواص رئولوژی و مکانیکی پلاستیزول، با فرض ثابت بودن نوع و میزان رزین پی وی سی و نرم‌کننده، بوسیله روش طراحی آزمایش تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفت. نوع کربنات‌کلسیم و مقادیر نانوسیلیکا، حلال و افزودنی مایع به عنوان متغیرهای آزمون در سه سطح مورد بررسی قرار گرفتند و از آرایه L9 در طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد. ویسکوزیته در سرعت پایین و سرعت بالا و ویسکوزیته بینگهام و حد تسلیم نمونه ها، همچنین نیروی مقاومت برشی (استحکام برشی) برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نانوکربنات‌کلسیم باعث افزایش حد تسلیم، ویسکوزیته بینگهام و بهبود شره پلاستیزول می‌شود. عملکرد افزودنی مایع در بهبود خواص پلاستیزول بهتر از پودر نانوسیلیکا است. حلال باعث کاهش ویسکوزیته بینگهام می‌شود در حالی که تأثیر ناچیزی بر حد تسلیم پلاستیزول دارد. نانوسیلیکا و نانوکربنات‌کلسیم تاثیر زیادی بر استحکام برشی پلاستیزول داشته و باعث افزایش استحکام برشی می‌شوند.

واژگان کلیدی

پلاستیزول، استحکام برشی، تاگوچی، رئولوژی، کربنات‌کلسیم، پوشش زیر بدنه خودرو.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۵/۳۰

عهده دار مکاتبات: *mohammad.kalaee@gmail.com*

AMNC

Evaluation of rheological properties and shear strength of modified plastisol by nano-silica and nano-calcium carbonate using Taguchi method

Mohammad Taghavi[1], Mohammad Reza Kalaee[1,2*], Alireza Aghili[3]

1. Faculty of Polymer Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2.Nano Technology Research Center, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3.Faculty of Polymer Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Abstract Plastisol is a suspension of small poly(vinyl chloride) particles, plasticizer, stabilizer, pigment and filler and can be used as a coating for the underbody insulator of cars. In this study, the influence of additives and fillers on the rheological and mechanical properties of plastisol were evaluated by Taguchi experimental design method, taking into account that the type and amount of PVC resin and plasticizer remained unchanged. The type of calcium carbonate and the amounts of nano-silica, solvent and liquid additive were investigated as the factors at three levels and the L9 array was used in the Taguchi design of experiment. Low and high-speed viscosities, the Bingham viscosity and the yield strength of the samples, as well as their shear resistance (shear strength) were measured. Nano-calcium carbonate increases the yield strength, Bingham viscosity and improves the flow of plastisol. The influence of liquid additive is better than that of nano-silica powder in improving the properties of plastisol. The solvent decreases the Bingham viscosity while having little effect on the yield strength of the plastisol. Nano-silica and nano-calcium carbonate have a great effect on the shear strength of plastisol and increase the shear strength.

Keywords Plastisol, shear strength, Taguchi, rheology, calcium carbonate, undercarriage.

۱-مقدمه

عایق زیر بدنه خودرو، پوششی است بر پایه پلی(وینیل کلراید) (PVC) که به این گروه از مواد پلاستیزول گفته می‌شود. پلاستیزول سوسپانسیونی از ذرات پی وی سی در یک فاز پیوسته مایع است که از نرم‌کننده، مواد کمکی مانند تثبیت کننده ها، رنگدانه ها، عوامل دمنده و گاهی اوقات پرکننده‌های معدنی تشکیل شده است [۱, ۲]. پوشش زیر بدنه خودرو جهت حفاظت زیر بدنه اتومبیل در مقابل عوامل محیطی مانند آب، ذرات شن و ماسه، ضربات سنگریزه و سایش ناشی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین خواص لاستیکی این پوشش باعث شده است که به عنوان عایق صداگیر برای زیر بدنه اتومبیل عمل کند [۳]. همانطور که اشاره شد به علت انتظارات خاصی که از این پوشش می‌رود جزء ضخیم ترین پوشش‌ها محسوب می‌شود. این پوشش با ضخامت‌های مختلف از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرون فیلم خشک و بعضا بیشتر از ۱۰۰۰ میکرون در زیر بدنه خودرو اعمال می‌شود [۳]. پوشش زیر بدنه خودرو به عنوان مواد پلاستیزول از نوع سیالات غیر نیوتنی هستند که دارای تنش تسلیم (حد جریان) می‌باشند که از مدل بینگهام پلاستیک (Bingham Plastic) تبعیت می کنند. بینگهام تنش تسلیم را به صورت قانون خطی با عرض از مبدأ بیان کرد:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta\ \dot{\gamma} & \tau \geq \tau_0 \\ \gamma = 0 & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (۱)$$

سیالات بینگهام برای جاری شدن نیازمند وارد شدن مقدار نیرو و تنش اولیه می‌باشند به محض وارد شدن نیرو و تنش اولیه (تنش تسلیم) سیال شروع به جریان یافتن می کند. همچنین شیب این خط بیانگر ویسکوزیته سیال بینگهام است [۴]. پلاستیزول‌ها با توزیع اندازه ذرات پهن در سرعت‌های برشی پایین ویسکوزیته بیشتر و با افزایش سرعت برشی سرعت افت ویسکوزیته بالایی دارند همچنین دچار شکست در سرعت برشی بالا می‌شوند [۱, ۵]. گرانروی بیشتر پلاستیزول‌ها نشان دهنده برهم‌کنش‌های بیشتر بین رزین و نرم‌کننده است [۳]. ویسکوزیته پلاستیزول پلی(وینیل کلراید) تازه ساخته شده طی انبارداری و با گذشت زمان افزایش پیدا می کند که به این پدیده پیرشدگی پلاستیزول یا پیر شدگی گرانروی می‌گویند [۶]. به طور سنتی، کربنات‌کلسیم با اندازه میکرون به منظور کاهش هزینه فرمولاسیون به پلاستیزول‌ها اضافه می‌شود. کربنات‌کلسیم رسوبی هنگامی که به اندازه نانو مورد استفاده قرار می‌گیرد، اگر بتواند به طور مؤثر در ماتریس پلیمری پراکنده شود، دارای خواص ویژه ای است [۷-۹]. در برخی موارد نانوکربنات‌کلسیم ممکن است تاثیر منفی بر عملکرد پلاستیزول داشته باشد به عنوان مثال اگر نانوکربنات‌کلسیم به طور یکنواخت درپلاستیزول پخش نشود باعث تشکیل لخته می‌شود [۱۰]. پودرنانوسیلیکا از افزودنی‌هایی است که تاثیر زیادی بر خواص رئولوژیکی و خواص مکانیکی پلاستیزول‌ها دارد [۱۱, ۱۲]. استفاده از نانوسیلیکا و نانوکربنات‌کلسیم باعث افزایش نیروی پیوستگی و استحکام پلیمر می‌شود [۲, ۱۳].

در این تحقیق.با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر چهار فاکتور مختلف در فرمولاسیون پلاستیزول شامل مقدار پودر نانوسیلیکا، نوع کربنات‌کلسیم، مقدار حلال مصرفی و مقدار افزودنی مایع بر خواص خواص رئولوژیکی شامل ویسکوزیته با سرعت کم و سرعت زیاد، حد تسلیم، ویسکوزیته بینگهام و استحکام برشی پلاستیزول بهبودیافته مورد بررسی قرار گرفت و مقدار بهینه ترکیب درصد در فرمولاسیون برای هر کدام از خواص ذکر شده به دست آمد.

۲-تجربی

۲-۱- مواد

در این پژوهش، از رزین PVC گرید امولسیون EM۳۰۹۰ ساخت شرکت Hanwha Chemical استفاده شد. ویسکوزیته سیال بینگهام این رزین در دور ۲۰ rpm معادل ۸۷ پاسکال ثانیه است. همچنین درجه پلیمریزاسیون آن ۱۱۵۰ و مقدار K معادل ۶۹ است. نرم‌کننده مورد استفاده دی‌اکتیل‌فتالات (DOP) با گرید تجاری مرغوب ساخت شرکت شکوه شیمی ایران (خلوص ۹۹٪، با دانسیته ۰/۹۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب) مورد استفاده قرارگرفت. در این پلاستیزول کربنات‌کلسیم در سه نوع به عنوان پرکننده به کار گرفته شد. کربنات‌کلسیم معدنی (GCC) با مش ۳۵۰۰ با نام تجاری OMYACARB 1-SW ساخت شرکت OMYA وکربنات‌کلسیم رسوبی (PCC) با مش ۳۵۰۰ با نام تجاری BARIN ۹۰۲۴ ساخت شرکت شیمی معدنی همدان و نانوکربنات‌کلسیم کلوئیدی با نام TSP – DonghoPCC ساخت شرکت Dongho Calcium با اندازه ذره ۸۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین حلال ایزوپارافینیک با نام تجاری ISOPAR H ساخت شرکت ExxonMobil با IBP معادل با ۱۸۱ درجه سانتیگراد استفاده شد. افزودنی فوم سیلیکا پودری با نام تجاری AEROSIL ۲۰۰ ساخت شرکت Evonik Industries AG با اندازه ذره ۱۲ نانومتر و سطح ویژه BET۲۰۰) متر مربع برگرم (به کار گرفته شد. همچنین از افزودنی رئولوژیکی مایع با نام تجاری RHEOBYK-D ۴۱۰ ساخت شرکت BYK آلمان استفاده شد.

۲-۲-طراحی آزمایش

از روش‌های طراحی آزمایش زمانی در تحقیقات استفاده می‌گردد که تعداد آزمایش‌ها درحالت کلی زیاد بوده و نیاز به صرف زمان، مواد اولیه و آزمایش‌های زمانبر و پر هزینه باشد و با این روش‌ها می‌توان تعداد آزمایش‌ها را به حداقل رساند. جهت انجام طراحی آزمایش و

ارزیابی اثر فاکتورهای در نظر گرفته شده و دستیابی به درصدهای بهینه در ساخت پوشش‌های پلاستیزول ساخته شده، از روش تاگوچی استفاده شد. این روش بر اساس آرایه‌های متعامد به محاسبات آماری می‌پردازد. در این مقاله، با توجه به مرور مقالات مرتبط در زمینه تولید پلاستیزول ها، با هدف ارزیابی خواص رئولوژیکی و مکانیکی، پوشش زیر بدنه خودرو، حاوی نانوذرات سیلیکا، افزودنی رئولوژیکی مایع، کربنات‌کلسیم و حلال مصرفی در سه سطح، طبق جدول ۱، در نظر گرفته شد. با استفاده از نرم افزار Qualitek-4 و روش تاگوچی، آرایه متعامد L9 (جدول ۲) بر اساس تعداد فاکتورها و سطوح انتخاب شد. با توجه به آرایه متعامد انتخاب شده، آزمون‌ها مطابق با چیدمان آرایه‌ها انجام و نتایج جمع آوری شد. این آرایه نشان می‌دهد که باید تعداد ۹ آزمون، مطابق با سطوح مشخص شده در جدول‌های ۲ و ۳ انجام شود. سپس تحلیل آماری نتایج بر اساس تحلیل واریانس (ANOVA) انجام شد. انتخاب سه سطح برای هریک از عوامل (فاکتورها) این امکان را می‌دهد تا رفتار غیرخطی در اثرگذاری یک عامل بروی پاسخ به خوبی تعیین و ارزیابی شود.

جدول ۱: متغیرها و سطوح آن‌ها در طراحی آزمون نمونه‌های ساخته شده پوشش زیر بدنه خودرو (پلاستیزول)

ردیف	متغیر	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱	مقدار پودر نانوسیلیکا (٪)	A	۰/۱	۰/۵	۰/۹
۲	نوع کربنات‌کلسیم	B	NPCC	GCC	PCC
۳	مقدار حلال مصرفی (٪)	C	۱/۵	۲/۵	۴/۵
٤	مقدار افزودنی مایع (٪)	D	۰/۱	۰/۲	۰/۳

جدول ۲: جدول طراحی آزمایش تاگوچی با آرایه‌های متعامد L9

شماره آزمایش	فاکتور A	فاکتور B	فاکتور C	فاکتور D
شماره ۱	۱	۱	۱	۱
شماره ۲	۱	۲	۲	۲
شماره ۳	۱	۳	۳	۳
شماره ۴	۲	۱	۲	۳
شماره ۵	۲	۲	۳	۱
شماره ۶	۲	۳	۱	۲
شماره ۷	۳	۱	۳	۲
شماره ۸	۳	۲	۱	۳
شماره ۹	۳	۳	۲	۱

جدول ۳: ثبت متغیرها در جدول طراحی آزمایش تاگوچی با آرایه‌های متعامد L9

شماره آزمایش	مقدار پودر نانوسیلیکا (٪)	نوع کربنات‌کلسیم	مقدار حلال مصرفی (٪)	مقدار افزودنی مایع (٪)
شماره ۱	۰/۱	NPCC	۱/۵	۰/۱
شماره ۲	۰/۱	GCC	۲/۵	۰/۲
شماره ۳	۰/۱	PCC	۴/۵	۰/۳
شماره ۴	۰/۵	NPCC	۲/۵	۰/۳
شماره ۵	۰/۵	GCC	۴/۵	۰/۱
شماره ۶	۰/۵	PCC	۱/۵	۰/۲
شماره ۷	۰/۹	NPCC	۴/۵	۰/۲
شماره ۸	۰/۹	GCC	۱/۵	۰/۳
شماره ۹	۰/۹	PCC	۲/۵	۰/۱

۲-۳-نحوه ساخت نمونه ها

ساخت نمونه‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول نرم‌کننده و افزودنی‌های ثابت فرمولاسیون و افزودنی سیلیکا فوم درون همزن ریخته شد و با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۴۰ دقیقه تحت فرآیند دیسپرسینگ قرار گرفت تا ذرات افزودنی و پرکننده به صورت یکنواخت درون نرم‌کننده پخش شوند. سپس در مرحله بعد دور همزن کم شد (حدود ۴۵۰ دور بر دقیق) و رزین PVC به آن اضافه شد. این مرحله از فرآیند ۲۵ دقیقه زمان برد. پس از اختلاط کامل رزین PVC حلال به همراه افزودنی رئولوژیکی مایع اضافه شد و اجازه داده شد تا به مدت ۲۰ دقیقه فرآیند اختلاط انجام شود. (نکته: چون مقدار حلال یکی از فاکتورهای مورد آزمایش است، مقدار حلال به علاوه نرم‌کننده با مقدار بیشینه حلال برابر می‌باشد یعنی در سطوحی که حلال کم است برای رسیدن به مقدار بیشینه از نرم‌کننده استفاده شد).

پس از این که ذرات به طور کامل پخش شد برای حذف حباب‌های ریز هوا خمیر آماده شده، هواگیری شد تا خمیر پلاستیزول آماده انجام آزمون باشد. آزمون‌ها ۴۸ ساعت پس از ساخت و در دمای ۲۲ تا ۲۸ درجه سانتیگراد انجام شدند.

۲-۴-آزمون‌های مشخصه‌یابی

آزمون مقاومت برشی ورقه‌های ساخته شده در دمای محیط آزمایشگاه بر اساس استاندارد داخلی پژو- سیتروئن به شماره PSA D411108 بوسیله دستگاه کشش یونیورسال Hiwa 200 ساخت شرکت ایرانی Hiwa انجام گرفت. برای تعیین خواص رئولوژیکی، ازدستگاه رئومتر Rheomat RM300 استفاده شد. آزمون‌های رئومتری از روش Flow Test در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و در محدوده سرعت‌های برشی ۰ تا S^{-1} ۲۰۰ انجام شد. رفتار رئولوژیکی با مدل بینگهام مطابقت داده شد و پارامترهای ویسکوزیته بینگهام و تنش تسلیم اندازه گیری شد. ویسکوزیته سرعت پایین برای نمونه‌ها بوسیله ویسکومتر چرخشی بروک فیلد RV-III در سرعت RPM ۱۰ و اسپیندل ۰۶ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت و همچنین ویسکوزیته سرعت بالا بوسیله ویسکومتر Cone & Plate Cup 2000 با سرعت ۵۰۰ RPM ($Shear\ 1667\ s^{-1}$) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد.

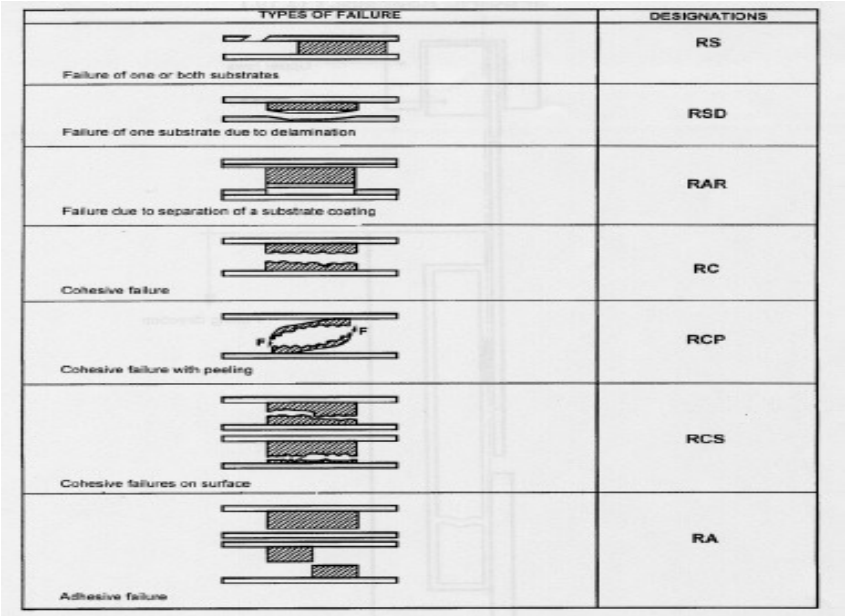
۳-نتایج و بررسی

نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای خواص رئولوژیکی (ویسکوزیته سرعت پایین در سرعت rpm ۱۰- ویسکوزیته سرعت بالا در سرعت rpm ۵۰۰-(ویسکوزیته بینگهام-حد تسلیم) و خواص مکانیکی (نیروی مقاومت برشی) هر یک از نمونه‌های ساخته شده و آزمون‌های انجام شده مطابق جدول شماره ۳ (L9) در جدول شماره ۴ ثبت شده‌اند.

۳-۱-بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته در سرعت RPM ۱۰

بررسی ویسکوزیته در سرعت پایین (به عنوان نمونه RPM ۱۰) از اهمیت بالایی در شره و ته‌نشینی و پایداری و سایر پارامترهای یک پوشش برخوردار است. بر اساس نمونه‌های ساخته شده مطابق با جدول شماره ۳، اثر چهار فاکتور مورد بررسی بر روی ویسکوزیته با سرعت RPM ۱۰ به کمک روش تاگوچی و نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت و تحلیل واریانس نتایج در جدول شماره ۵ نشان داده شده است.

نتایج ثبت شده در این جدول سهم هر یک از فاکتورها را بر روی ویسکوزیته در سرعت پایین (RPM ۱۰) نشان می‌دهد. همانطور که



شکل ۱: شکل برش در آزمون نیروی مقاومت برشی (استحکام برشی) مطابق با استاندارد شرکت پژو (PSA D411108)

جدول ٤: پاسخ‌های هدف و نتایج بدست آمده از آن

شماره آزمایش	ویسکوزیته (cp) ۱۰RPM	ویسکوزیته(P) ۵۰۰RPM	حد تسلیم Pa	ویسکوزیته بینگهام (Pa. s)	نیروی مقاومت برشی Kgf/cm^2	شکل شکست
شماره ۱	۳۳۰۰۰	۱۲/۶	۷۹	۱/۲۹	۱۸/۳	RCS
شماره ۲	۹۱۰۰	۷/۵	۱۶/۹	۰/۶۸	۱۷/۳	RCS
شماره ۳	۱۷۲۰۰	۸/۱	۴۰	۰/۷۳	۱۷/۹	RCS
شماره ۴	۵۳۰۰۰	۱۲/۷	۱۲۰	۱/۳۴	۱۸/۲	RCS
شماره ۵	۹۰۰۰	۶/۳	۱۵/۴	۰/۵۸	۱۷/۶	RCS
شماره ۶	۳۰۵۰۰	۱۱/۳	۷۳/۵	۱/۲۶	۱۸/۱	RCS
شماره ۷	۵۸۰۰۰	۱۱/۱	۱۳۱	۱/۲۵	۱۸/۵	RCS
شماره ۸	۲۷۵۰۰	۱۱/۵	۶۸/۷	۱/۲۸	۱۷/۸	RCS
شماره ۹	۲۳۰۰۰	۱۰/۸	۴۸/۵	۱/۱۹	۱۸/۴	RCS

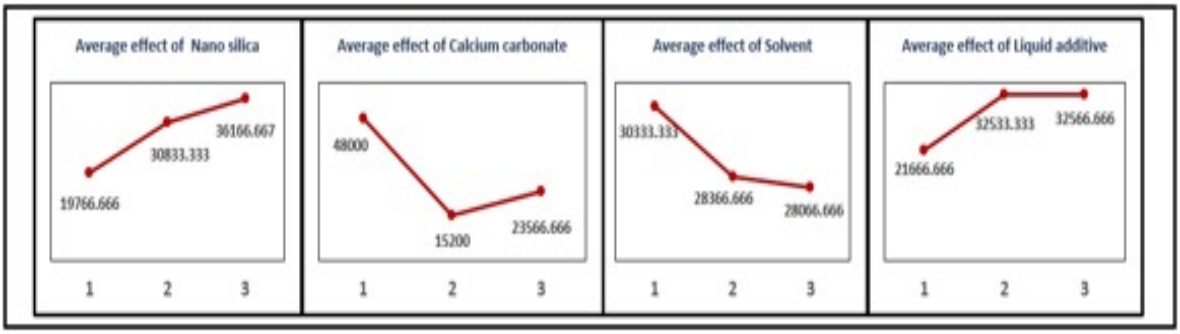
جدول۵: تحلیل واریانس مربوط به اثر متغیرها بر روی ویسکوزیته با سرعت ۱۰ RPM پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	جمع خالص اثر	میزان تاثیر(درصد اثر)
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۲	۴۱۹۸۷۵۸۸۱/۳۳۶	۲۰۹۹۳۷۹۴۰/۶۶۸	۴۱۹۸۷۵۸۸۱/۳۳۶	۱۷/۴۳۱
نوع کربنات‌کلسیم	۲	۴۷۲۸۲۸۷۹۶/۸۳۱	۸۷۱۴۱۴۳۹۸/۴۱۵	۴۷۲۸۲۸۷۹۶/۸۳۱	۷۲/۳۵۵
مقدار حلال مصرفی(٪)	۲	۹۰۹۵۴۵۳/۶۰۲	۴۵۴۷۷۲۶/۸۰۱	۹۰۹۵۴۵۳/۶۰۲	۰/۳۷۷
مقدار افزودنی مایع(٪)	۲	۲۳۶۸۹۵۴۷۰/۷۸۹	۱۱۸۴۴۷۷۳۵/۳۹۴	۲۳۶۸۹۵۴۷۰/۷۸۹	۹/۸۳۵

در این جدول نشان داده شده، بیشترین اثر بر روی ویسکوزیته مربوط به نوع کربنات‌کلسیم است. این در حالی است که مقدار حلال مصرفی کمترین سهم را دارد. سهم مقدار پودر نانوسیلیکا از کربنات‌کلسیم بسیار کمتر می‌باشد اما از سهم افزودنی مایع بیشتر است.

تاثیر هر یک از این فاکتورها در سطوح مختلف به صورت نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است.

در مورد اثر نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوسیلیکا ویسکوزیته مواد پلاستیزول افزایش می‌یابد. اما در مورد نوع کربنات‌کلسیم، تاثیر زیاد نانوکربنات‌کلسیم به خوبی مشاهده می‌شود بیشترین ویسکوزیته مربوط به نانوکربنات‌کلسیم (NPCC) است و کمترین ویسکوزیته مربوط به کربنات‌کلسیم معدنی (GCC) می‌باشد. ویسکوزیته حاصل از کربنات‌کلسیم رسوبی کمی بیشتر از کربنات‌کلسیم معدنی و با اختلاف زیاد، کمتر از نانوکربنات‌کلسیم می‌باشد. در مورد اثر حلال بر ویسکوزیته مشاهده می‌شود که سطح یک، کمترین درصد حلال و بیشترین ویسکوزیته در سرعت پایین برای پلاستیزول را به خود اختصاص می‌دهد. در سطح دو و سه با افزایش مقدار حلال، ویسکوزیته با شیب بسیار کمتری کاهش می‌یابد. در آخرین شکل اثر افزودنی مایع بر ویسکوزیته پلاستیزول قابل مشاهده است. در سطح یک و با کمترین مقدار، افزودنی مایع کمترین اثر را بر ویسکوزیته در سرعت پایین دارد اما در سطح دو و سه با وجود این که این اثر همچنان افزایشی است اما ویسکوزیته‌ها بسیار به هم نزدیک می‌باشد و به میزان قابل توجهی شیب منحنی کم می‌شود و به این معنی است که یک نقطه بهینه در مصرف این ماده وجود دارد و با افزایش بیشتر، تاثیر زیادی در افزایش ویسکوزیته نخواهیم دید. با توجه به این که برای اعمال پوشش زیر بدنه خودرو با ضخامت زیاد باید حد شره بسیار بالایی داشته باشیم (بیش از ۱۰۰۰



شکل ۲: نمودار تاثیر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته ۱۰ RPM پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

جدول٦: شرایط بهینه و عملکرد متغیرهای مختلف و سطوح متناظر مربوط به اثر ویسکوزیته در سرعت پایین (۱۰ RPM)

متغیر	سطح بهینه
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۰/۹
نوع کربنات‌کلسیم	NPCC
مقدار حلال مصرفی(٪)	۱/۵
مقدار افزودنی مایع(٪)	۰/۳

میکرومتر) این مستلزم بالا بودن ویسکوزیته در سرعت پایین است. بر این اساس شرایط بهینه بیشترین ویسکوزیته در سرعت پایین در نظر گرفته می‌شود. شرایط بهینه در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.

۳-۲-بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته سرعت ۵۰۰ RPM

بررسی ویسکوزیته در سرعت بسیار بالا (۵۰۰ RPM) در اسپری شدن پوشش زیر بدنه خودرو دارای اهمیت زیادی است. اثر چهار فاکتور مورد بررسی بر روی ویسکوزیته با سرعت ۵۰۰ RPM و تحلیل واریانس نتایج در جدول شماره ۷ ثبت شده است.

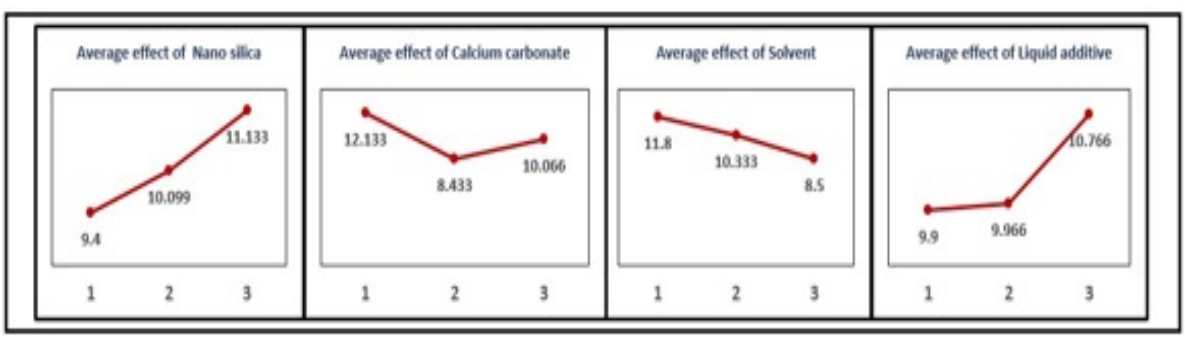
نتایج ثبت شده در این جدول سهم هر یک از فاکتورها را بر روی ویسکوزیته در سرعت بالا (۵۰۰ RPM) نشان می‌دهد. همان طور که در جدول شماره ۷ نشان داده شده است، بیشترین اثر بر روی ویسکوزیته در سرعت بالا مربوط به نوع کربنات‌کلسیم است. این در حالی است که مقدار افزودنی مایع کمترین سهم را دارد. سهم حلال مصرفی از سهم پودر نانوسیلیکا بیشتر است.

تاثیر هر یک از این فاکتورها در سطوح مختلف به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است.

در مورد اثر نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوسیلیکا ویسکوزیته مواد پلاستیزول با شیب زیاد افزایش می‌یابد. در مورد نوع کربنات‌کلسیم، بیشترین ویسکوزیته مربوط به نانوکربنات‌کلسیم (NPCC) است هر چند که در مقایسه با ویسکوزیته در سرعت‌های پایین چندان قابل ملاحظه نیست. کمترین ویسکوزیته مربوط به کربنات‌کلسیم معدنی (GCC) است. ویسکوزیته کربنات‌کلسیم رسوبی بیشتر از کربنات‌کلسیم معدنی و کمتر از نانوکربنات‌کلسیم می‌باشد. در مورد اثر حلال بر ویسکوزیته مشاهده می‌شود که سطح یک بیشترین ویسکوزیته در سرعت بالا برای پلاستیزول را

جدول۷: تحلیل واریانس مربوط به اثر متغیرها بر روی ویسکوزیته با سرعت ۵۰۰ RPM پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	جمع خالص اثر	میزان تاثیر(درصد اثر)
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۲	۴/۵۶۲	۲/۲۸۱	۴/۵۶۲	۱۰/۶۱۲
نوع کربنات‌کلسیم	۲	۲۰/۶۲۸	۱۰/۳۱۴	۲۰/۶۲۸	۴۷/۹۸۶
مقدار حلال مصرفی(٪)	۲	۱۶/۴۰۲	۸/۲۰۱	۱۶/۴۰۲	۳۸/۱۵۴
مقدار افزودنی مایع(٪)	۲	۱/۳۹۵	۰/۶۹۷	۱/۳۹۵	۳/۲۴۶



شکل ۳: نمودار تاثیر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته در ۵۰۰ RPM پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

به خود اختصاص می‌دهد. در سطح دو و سه با افزایش مقدار حلال، ویسکوزیته همچنان کاهش می‌یابد. در آخرین شکل اثر افزودنی مایع بر ویسکوزیته پلاستیزول قابل مشاهده است. در سطح یک و با کمترین مقدار، افزودنی مایع کمترین اثر را بر ویسکوزیته در سرعت بالا دارد اما در سطح دو و سه این اثر همچنان افزایشی است و ویسکوزیته سطح سه بیشترین مقدار را دارا می‌باشد و به میزان قابل توجهی شیب منحنی افزایش می‌یابد و مانند ویسکوزیته در سرعت پایین به این معنی است که نقطه بیشینه در مصرف این ماده به دست آمده و با افزایش بیشتر این افزودنی تاثیر زیادی در افزایش ویسکوزیته خواهیم دید. برای پاشش مواد پلاستیزول تحت تنش‌های بالا مستلزم پایین بودن ویسکوزیته در سرعت بالا می‌باشد بر این اساس شرایط بهینه کمترین ویسکوزیته در سرعت بالادر نظر گرفته می‌شود. شرایط بهینه در جدول شماره ۸ نشان داده شده است.

۳-۳-بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی حد تسلیم

بررسی حد تسلیم مواد پلاستیزول از اهمیت بالایی در کاربری یک پوشش بسیار ضخیم مانند پوشش زیر بدنه خودرو برخوردار است. بر اساس نمونه‌های ساخته شده مطابق با جدول شماره ۳، اثر چهار فاکتور مورد بررسی بر روی حد تسلیم به کمک روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت و تحلیل واریانس حاصل در جدول شماره ۹ ثبت شده است.

نتایج ثبت شده در این جدول سهم هر یک از فاکتورها را بر روی حد تسلیم نشان می‌دهد. همانطور که در جدول شماره ۹ نشان داده شده، بیشترین اثر بر روی حد تسلیم مربوط به نوع کربنات‌کلسیم است این در حالی است که مقدار حلال مصرفی کمترین سهم را دارد. سهم مقدار پودر نانوسیلیکا از کربنات‌کلسیم بسیار کمتر می‌باشد اما از سهم افزودنی مایع بیشتر است.

تاثیر هر یک از این فاکتورها در سطوح مختلف به صورت نمودار در شکل ۴ نشان داده شده است.

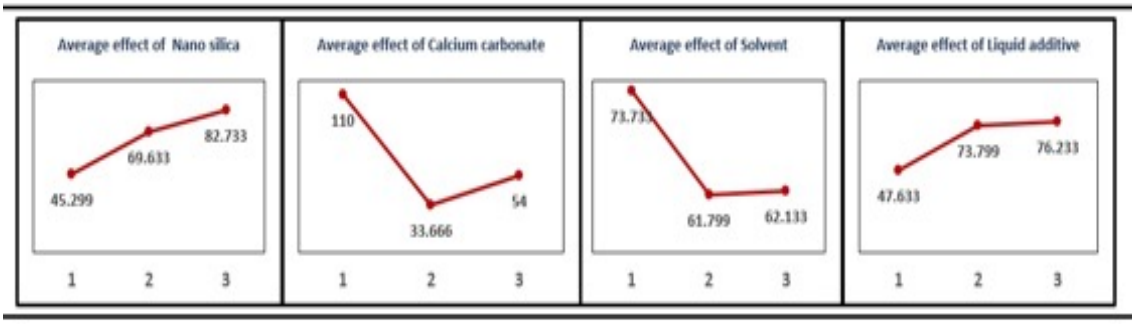
در مورد اثر نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوسیلیکا حد تسلیم مواد پلاستیزول افزایش می‌یابد. اما در مورد نوع کربنات‌کلسیم تاثیر زیاد نانوکربنات‌کلسیم به خوبی مشاهده می‌شود. بیشترین حد تسلیم مربوط به نانوکربنات‌کلسیم (NPCC) و کمترین حدتسلیم تسلیم مربوط به کربنات‌کلسیم معدنی (GCC) است. حد تسلیم حاصل از کربنات‌کلسیم رسوبی کمی بیشتر از کربنات‌کلسیم

جدول۸: شرایط بهینه و عملکرد متغیرهای مختلف و سطوح متناظر مربوط به اثر ویسکوزیته در سرعت بالا (۵۰۰ RPM)

متغیر	سطح بهینه
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۰/۱
نوع کربنات‌کلسیم	GCC
مقدار حلال مصرفی(٪)	۴/۵
مقدار افزودنی مایع(٪)	۰/۱

جدول۹: تحلیل واریانس مربوط به اثر متغیرها بر روی حد تسلیم پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	جمع خالص اثر	میزان تاثیر(درصد اثر)
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۲	۲۱۶۴/۹۷۳	۱۰۸۲/۴۸۶	۲۱۶۴/۹۷۳	۱۶/۲۴۵
نوع کربنات‌کلسیم	۲	۹۳۷۶/۲۲۲	۴۶۸۸/۱۱۱	۹۳۷۶/۲۲۲	۷۰/۳۵۵
مقدار حلال مصرفی(٪)	۲	۲۷۷/۰۷۳	۱۳۸/۵۳۶	۲۷۷/۰۷۳	۲/۰۷۹
مقدار افزودنی مایع(٪)	۲	۱۵۰۸/۵۷۱	۷۵۴/۲۸۵	۱۵۰۸/۵۷۱	۱۱/۳۱۹



شکل ٤: نمودار تاثیر متغیرهای مختلف بر روی حد تسلیم پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

معدنی و کمتر از نانوکربنات‌کلسیم می‌باشد. در مورد اثر حلال بر حد تسلیم مشاهده می‌شود که سطح یک کمترین درصد حلال و بیشترین حد تسلیم برای پلاستیزول را به خود اختصاص می‌دهد و کمترین حد تسلیم مربوط به سطح سه با کمترین مقدار است در سطح دو و سه شیب منحنی کم شده است. در آخرین شکل اثر افزودنی مایع بر حد تسلیم پلاستیزول قابل مشاهده است. در سطح یک و با کمترین مقدار، افزودنی مایع کمترین اثر را بر حد تسلیم دارد اما در سطح دو و سه با وجود این که این اثر همچنان افزایشی است اما حد تسلیم بسیار به هم نزدیک می‌باشد که به میزان قابل توجهی شیب منحنی کم می‌شود و به این معنی است که نقطه بهینه در مصرف این ماده به دست آمده است. با توجه به این که برای اعمال پوشش زیر بدنه خودرو با ضخامت بالا باید حد شره بالایی داشته باشیم (بیش از ۱۰۰۰ میکرومتر) این مستلزم بالا بودن حد تسلیم است. بر این اساس شرایط بهینه بیشترین حد تسلیم در نظر گرفته می‌شود. شرایط بهینه در جدول شماره ۱۰ نشان داده شده است.

۳-٤-بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته بینگهام

بررسی ویسکوزیته بینگهام از اهمیت زیادی در پوشش زیر بدنه خودرو برخوردار است. اثر چهار فاکتور مورد بررسی بر روی ویسکوزیته بینگهام که تحلیل واریانس حاصل در جدول شماره ۱۱ ثبت شده است.

نتایج ثبت شده در این جدول سهم هر یک از فاکتورها را بر روی ویسکوزیته بینگهام نشان می‌دهد. همانطور که در جدول شماره ۱۱ نشان داده شده است، بیشترین اثر بر روی ویسکوزیته بینگهام مربوط به نوع کربنات‌کلسیم است این در حالی است که مقدار افزودنی مایع کمترین سهم را دارد. سهم حلال مصرفی از سهم نانوسیلیکا بیشتر می‌باشد.

تاثیر هر یک از این فاکتورها در سطوح مختلف به صورت نمودار در شکل ۵ نشان داده شده است.

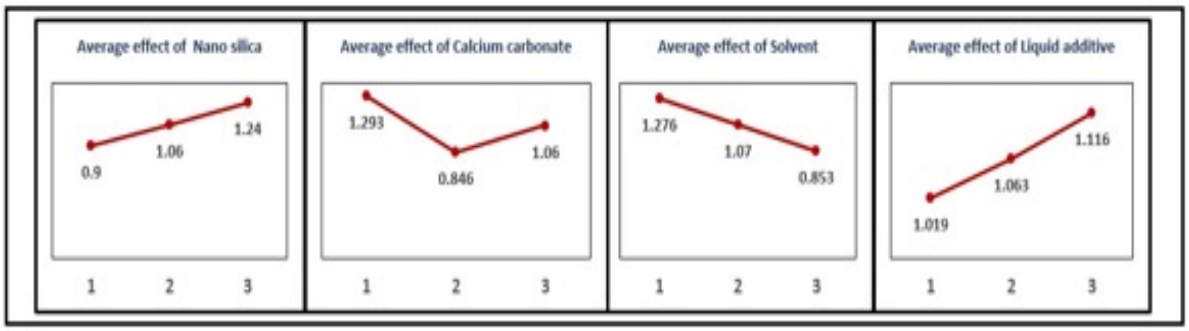
در مورد اثر نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار

جدول ۱۰: شرایط بهینه و عملکرد متغیرهای مختلف و سطوح متناظر مربوط به اثر حد تسلیم

متغیر	سطح بهینه
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۰/۹
نوع کربنات‌کلسیم	NPCC
مقدار حلال مصرفی(٪)	۱/۵
مقدار افزودنی مایع(٪)	۰/۳

جدول۱۱: تحلیل واریانس مربوط به اثر متغیرها بر روی ویسکوزیته بینگهام پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	جمع خالص اثر	میزان تاثیر(درصد اثر)
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۲	۰/۱۷۳	۰/۰۸۶	۰/۱۷۳	۲۲/۹۵۹
نوع کربنات‌کلسیم	۲	۰/۲۹۹	۰/۱۴۹	۰/۲۹۹	۳۹/۶۰۶
مقدار حلال مصرفی(٪)	۲	۰/۲۶۸	۰/۱۳۴	۰/۲۶۸	۳۵/۵۵۹
مقدار افزودنی مایع(٪)	۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۱/۸۶



شکل ۵: نمودار تاثیر متغیرهای مختلف بر روی ویسکوزیته بینگهام پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

نانوسیلیکا ویسکوزیته مواد پلاستیزول با شیب زیاد افزایش می‌یابد. در مورد نوع کربنات‌کلسیم، بیشترین ویسکوزیته بینگهام مربوط به نانوکربنات‌کلسیم (NPCC) و کمترین ویسکوزیته مربوط به کربنات‌کلسیم معدنی (GCC) است. ویسکوزیته کربنات‌کلسیم رسوبی بیشتر از کربنات‌کلسیم معدنی و کمتر از نانوکربنات‌کلسیم است. در مورد اثر حلال بر ویسکوزیته مشاهده می‌شود که سطح یک بیشترین ویسکوزیته بینگهام برای پلاستیزول را به خود اختصاص می‌دهد در سطح دو و سه با افزایش مقدار حلال ویسکوزیته همچنان کاهشی می‌باشد. در آخرین شکل اثر افزودنی مایع بر ویسکوزیته بینگهام پلاستیزول قابل مشاهده است. در سطح یک و با کمترین مقدار افزودنی مایع کمترین اثر را بر ویسکوزیته بینگهام دارد اما در سطح دو و سه این اثر همچنان افزایشی است و ویسکوزیته سطح سه بیشترین مقدار را دارا می‌باشد و به میزان قابل توجهی شیب منحنی افزایش می‌یابد. برای پاشش مواد پلاستیزول تحت تنش که این تنش از پمپاژ شروع و تا اسپری شدن و در نهایت پخت شدن زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد مستلزم پایین بودن ویسکوزیته بینگهام می‌باشد بر این اساس شرایط بهینه کمترین ویسکوزیته بینگهام در نظر گرفته می‌شود. شرایط بهینه در جدول شماره ۱۲ نشان داده شده است.

۳-۵-بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی نیروی مقاومت برشی

در این بخش اثر فاکتورهای مختلف بر روی میزان نیروی مقاومت برشی نمونه‌های پلاستیزول آورده شده است. نیروی مقاومت برشی یک پارامتر مکانیکی بسیار مهم برای پوشش زیر بدنه خودرو است. نتایج مربوط به آنالیز واریانس مربوط به سهم هر یک از پارامترهای مختلف بر روی نیروی مقاومت برشی نمونه‌های پلاستیزول در جدول ۱۳ آورده شده است.

همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نوع کربنات‌کلسیم بالاترین سهم را بر روی نیروی مقاومت برشی پلاستیزول دارد. به فاصله زیاد مقدار حلال مصرفی کمترین سهم را بر روی نیروی مقاومت برشی پلاستیزول دارد. در فاصله ای بسیار نزدیک به آن مقدار افزودنی مایع و در یک سهم بسیار پایین در رتبه سوم قرار دارد. مقدار پودر نانوسیلیکا در رتبه دوم از سهم بر روی نیروی مقاومت برشی قرار دارد.

تاثیر هر یک از فاکتورها در سطوح مختلف بر روی نیروی مقاومت برشی در شکل ۶ نشان داده شده است.

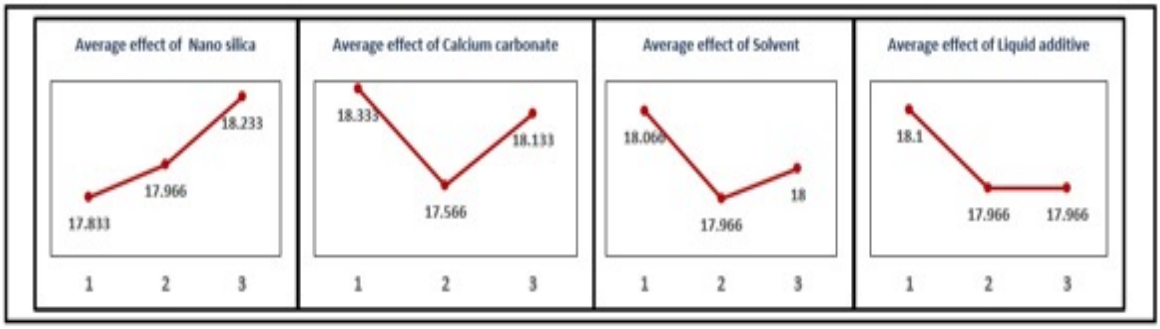
در مورد مقدار پودر نانوسیلیکا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مصرف این پودر شاهد افزایش نیروی مقاومت برشی هستیم. یعنی سطح یک با کمترین مقدار نانوسیلیکا دارای کمترین مقاومت برشی و سطح سه با بیشترین مقدار نانوسیلیکا دارای بیشترین مقاومت برشی می‌باشد. در مورد نوع کربنات‌کلسیم، در سطح یک نانوکربنات‌کلسیم دارای بیشترین نیروی مقاومت برشی و کربنات‌کلسیم معدنی در سطح دو کمترین نیروی مقاومت برشی را دارد و کربنات‌کلسیم رسوبی در رتبه دوم و نزدیک به نانوکربنات‌کلسیم است. اثر مقدار حلال مصرفی بر روی مقاومت برشی همانطور که در شکل ۵ مشخص است در سطح یک دارای بیشترین مقدار و در سطح دو که بسیار نزدیک به سطح سه می‌باشد دارای کمترین مقدار است. درمورد اثر افزودنی مایع بر روی مقاومت برشی همانطور که شکل ۵ مشاهده می‌شود سطح یک با کمترین مقدار دارای بیشترین نیروی مقاومت برشی و در سطح دو و سه با مقدار برابر دارای کمترین نیروی مقاومت برشی است. چسبندگی خوب برای مواد پلاستیزول مستلزم بالا بودن مقاومت برشی است

جدول۱۲: شرایط بهینه و عملکرد متغیرهای مختلف و سطوح متناظر مربوط به اثر ویسکوزیته بینگهام

متغیر	سطح بهینه
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۰/۱
نوع کربنات‌کلسیم	GCC
مقدار حلال مصرفی(٪)	۴/۵
مقدار افزودنی مایع(٪)	۰/۱

جدول۱۳: تحلیل واریانس مربوط به اثر متغیرها بر نیروی مقاومت برشی پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	جمع خالص اثر	میزان تاثیر(درصد اثر)
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۲	۰/۲۴۸	۰/۱۲۴	۰/۲۴۸	۱۹/۹۲
نوع کربنات‌کلسیم	۲	۰/۹۴۹	۰/۴۷۴	۰/۹۴۹	۷۹/۹۶۴
مقدار حلال مصرفی(٪)	۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۱/۲۶۱
مقدار افزودنی مایع(٪)	۲	۰/۰۳۵	۰/۰۱۷	۰/۰۳۵	۲/۸۴۵



شکل ٦: نمودار تاثیر متغیرهای مختلف بر روی نیروی مقاومت برشی پلاستیزول (پوشش زیر بدنه خودرو)

جدول١٤: شرایط بهینه و عملکرد متغیرهای مختلف و سطوح متناظر مربوط به اثر مقاومت برشی

متغیر	سطح بهینه
مقدار پودر نانوسیلیکا(٪)	۰/۹
نوع کربناتکلسیم	NPCC
مقدار حلال مصرفی(٪)	۱/۵
مقدار افزودنی مایع(٪)	۰/۱

پس با توجه به این موضوع بهینه شرایط بالا بودن مقاومت برشی است که در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

در تمامی آزمونهای مقاومت برشی چسبندگی به سطح ۱۰۰٪ بوده و ما شاهد پارگی نمونهها از قسمت مواد پلاستیزول بودیم که مطابق شکل۱ حالت قطع از نوع RCS بوده است. این یعنی این که نمونهها از نظر چسبندگی به سطح قابل قبول میباشند.

٤-نتیجه

در این پروژه اثر چهار فاکتور از مواد سازنده پوشش زیر بدنه خودرو (پلاستیزول) از نظر رئولوژیکی و مقاومت برشی (چسبندگی) مورد ارزیابی قرار گرفت.

۱- نانوکربناتکلسیم به شکل قابل توجهی باعث افزایش شگفتانگیز حد تسلیم و بهبود شره پوشش زیر بدنه خودرو میشود. این در حالی است که افزایش ویسکوزیته بینگهام که قابلیت اتمایز شدن را کنترل میکند به مقدار کمتری افزایش مییابد. کربناتکلسیم رسوبی در مقایسه با کربناتکلسیم معدنی با اندازه ذرات یکسان دارای حد تسلیم بیشتر میباشد.

۲- مصرف افزودنی مایع در مقایسه با نانوسیلیکا یک به سه است در حالی که حد تسلیم هر دو در سطح سه (بیشترین مقدار) اختلاف زیادی ندارد و حتی ویسکوزیته بینگهام افزودنی مایع کمتر از نانوسیلیکا میباشد.

۳- افزایش مصرف حلال باعث کاهش قابل توجهی در ویسکوزیته بینگهام پوشش زیر بدنه پلاستیزول میشود این در حالی است که اثر ناچیزی بر حد تسلیم مواد پلاستیزول دارا میباشد. میتوان گفت حلال جزء جدایی ناپذیر مواد پلاستیزول در تنظیمات رئولوژیکی میباشد.

۴- نتایج بدست آمده برای ویسکوزیته در سرعت پایین (۱۰ RPM) مشابه حد تسلیم و همچنین ویسکوزیته در سرعت بالا (۵۰۰ RPM) مشابه ویسکوزیته بینگهام میباشد.

۵- نانوسیلیکا و نانوکربناتکلسیم تاثیر زیادی بر استحکام برشی مواد پلاستیزول داشته و باعث افزایش استحکام برشی شده است.

۵- مراجع

1. Y. Abdesselam, J.F. Agassant, R. Castellani, R. Valette, Y. Demay, D. GourdinR. Peres, Rheology of plastisol formulations for coating applications. Polymer Engineering & Science. 57(2017), 982-988.
2. G. Rybachuk, I. Kozlova, V. MozzhukhinV. Guzeev, PVC plastisols: Preparation, properties, and application. Polymer Science Series C. 49(2007), 6-12.
3. B. EftekhariM. Pishvaei, A Review on the Poly (Vinyl Chloride) Plastisol Coatings and Its Rheology. Journal of Studies in Color World. 10(2020), 13-28.
4. H.A. Barnes, The yield stress—a review or ‘παντα ρει’—everything flows? Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 81(1999), 133-178.
5. C. LaineP. Cassagnau, Prediction of zero shear viscosity of poly (vinyl chloride) plastisols. Applied Rheology. 16(2006), 136-144.
6. M. RasteiroE. Antunes, Correlating the rheology of PVC-based pastes with particle characteristics. Particulate science and technology. 23(2005), 361-375.
7. Y. Ji, G. Xu, Z. Yang, H. LuoH. Tan, Study on viscosity and aging process of CaCO3 filled poly (vinyl chloride) plastisols. Journal of Vinyl and Additive Technology. 24(2018), E53-E61.
8. I. Bonadies, M. Avella, R. Avolio, C. Carfagna, M.E. ErricoG. Gentile, Poly (vinyl chloride)/CaCO3 nanocomposites: Influence of surface treatments on the properties. Journal of Applied Polymer Science. 122(2011), 3590-3598.
9. Y. Lin, C.-M. Chan, Calcium carbonate nanocomposites, in Advances in polymer nanocomposites, Types and applications, F. Gao, Editor. Woodhead Publishing, Oxford. 2012, 55-90.
10. A. JohansenT. Schæfer, Effects of interactions between powder particle size and binder viscosity on agglomerate growth mechanisms in a high shear mixer. European Journal of Pharmaceutical Sciences. 12(2001), 297-309.
11. M. Fasihi, R. ArabzadehM. Moghbeli, Effect of silica particles on adhesion strength of polyvinyl chloride coatings on metal substrates. Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE). 14(2017), 74-82.
12. ر قاسمی هجران دوست، م.ر. کلائی، د. زارعی، ارزیابی اثر پارامترهای مؤثر بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی پوشش‌های خودروی پلاستیزول تقویت شده با نانوذرات سیلیکا با استفاده از روش تاگوچی. نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته پوششهای نوین27-(1397)،1925-1936
13. D. Wu, X. Wang, Y. SongR. Jin, Nanocomposites of poly (vinyl chloride) and nanometric calcium carbonate particles: Effects of chlorinated polyethylene on mechanical properties, morphology, and rheology. Journal of Applied Polymer Science. 92(2004), 2714-2723.