جلد 11، شماره 1، ص‌ص 2452-2444

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

تأثیر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت‌های بسیار پرشده

علی ریاضتی[1]، مرتضی غفوری[2*]

1- دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

2- استادیار، مهندسی پلیمر، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

* تهران، صندوق پستی 16987-15461، mghafori@ihu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1403/02/06

پذیرش: 1403/05/04

کلیدواژگان

کامپوزیت‌های بسیار پرشده،

رفتار رئولوژیکی،

رفتار شبه‌پلاستیک،

همگنی،

چگالی

چکیده

کامپوزیت‌های بسیار پرشده از دو جزء ماتریس پلیمری و پرکننده‌های مختلف با کسر وزنی بیشتر از 30% تشکیل‌شده است. روش‌های متفاوتی برای بررسی رفتار جریان دوغاب کامپوزیت وجود دارد که در این مقاله تأثیر تاریخچه پیش برش بر گرانروی و همگنی دوغاب و هم‌چنین محصول کامپوزیت نهایی مورد بررسی قرارگرفته است. گرانروی دوغاب کامپوزیت بسیار پرشده با سرعت‌های مختلف برشی در محدوده دمایی 40 °C پس از پایان اختلاط در کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم/آمونیوم پرکلرات» و «بایندر/آلومینیوم/آمونیوم پرکلرات» با عامل شبکه‌کننده) با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد اندازه‌گیری شده است. مشاهده شد که گرانروی و وابستگی آن به سرعت برشی با رفتار سیال شبه‌پلاستیک مطابقت دارد. با استفاده از معادله قانون توان، پارامترهای شاخص گرانروی (K) و شاخص شبه‌پلاستیک (n) سیال تعیین و تجزیه و تحلیل شدند. نشان داده شد که رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده به‌طور قابل‌توجهی به برهمکنش‌های فیزیکی میان مواد پرکننده و ماتریس بستگی دارد. مشاهده شد پس از افزودن عامل شبکه‌کننده، گرانروی کامپوزیت بسیار پرشده به‌سرعت زیاد می‌شود و این افزایش گرانروی به علت ذرات جامد ریزتر و افزایش وزن مولکولی و تشکیل اتصالات عرضی در ساختار پیش‌پلیمر می‌باشد. بررسی اثر مدت‌زمان اختلاط بر همگنی محصول نشان داد که همگن‌ترین محصول در زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه به دست آمد.

Effect of mixing time on rheological behavior and homogeneity of highly filled composites

Ali Riazati[1], Morteza Ghafoori[2*]

1, 2- Department of Chemical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16987-15461, Tehran, Iran, mghafori@ihu.ac.ir

Keywords

Highly Filled Composites, Rheological Behavior, Pseudoplastic Behavior, Homogeneity, Density

Abstract

Highly filled composites consist of two components of polymer matrix and different fillers with a weight fraction of more than 30%. There are different methods for studying the slurry flow behavior. In this article, the effect of pre-shear on the viscosity and homogeneity of the composite slurry and the final product has been investigated. The Viscosity of highly filled composite slurry with different shear rates in the temperature range of 40˚C after mixing in composites binder / aluminum / ammonium perchlorate and (binder / aluminum / ammonium perchlorate with Cross-linking agent) with the use of a Brookfield rotary viscometer was measured. It was observed that the viscosity and its dependence on the shear rate correspond to the behavior of the pseudoplastic fluid. Using the equation of power law, determining and analyzing the parameters of viscosity index (k) and pseudoplastic index (n), it was shown that the rheological behavior of highly filled composite depends significantly on the physical interactions between the filler and the matrix. it was observed that after adding the curing agent, the viscosity of the highly filled composite increases rapidly, and this increase in viscosity is due to smaller solid particles, an increase in molecular weight, and the formation of crosslinks in the prepolymer structure. Investigating the effect of mixing time on product homogeneity showed that the most homogeneous product was obtained during the entire mixing process of 135 minutes.

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها موادی هستند که از دو یا چند جزء تشکیل‌شده‌اند که یک فاز آن ماتریس پیوسته و فاز دیگر متفرق ناپیوسته می‌باشد [1]. در کامپوزیت‌های متداول، فاز ماتریس ماده پلیمری بوده و فاز متفرق که درصد کمتری دارد، معمولاً جامد و به‌عنوان پرکننده استفاده می‌شود. درحالی‌که در کامپوزیت‌های بسیار پرشده، اتصال‌دهنده یا جزء پلیمری به‌عنوان جزء کمتر، و فاز پراکنده که همان بار جامد است، بیشترین درصد کامپوزیت را تشکیل می‌دهد. مفهوم بسیار پرشده اشاره به آن دارد که غلظت مواد جامد به بیشینه کسر پرشدگی

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Riazati, A., Ghafoori, M., "Effect of mixing time on rheological behavior and homogeneity of highly filled composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 1, pp. 2444-2452, 2024. https://doi.org/ 10.22068/JSTC.2024.2026848.1884

مواد جامد نزدیک باشد و این کامپوزیت‌ها محتوایی با بار جامد بسیار بالا هستند. کامپوزیت‌های بسیار پرشده یا سوسپانسیون‌های غلیظ معمولاً پلیمرهایی با کسر حجمی زیادی از پرکننده‌های ذرات (آلی یا غیرآلی) هستند که در غلظت‌های بالای 30% اضافه می‌شوند و می‌توانند ذرات ماکرو، میکرو یا نانو باشند. که این ذرات می‌توانند دارای تنوع گسترده‌ای از ترکیب شیمیایی، شکل، اندازه و توزیع اندازه باشند. افزودنی‌هایی که با پلیمر و پرکننده‌ها مخلوط می‌شوند به‌طور قابل‌توجهی بر رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌ها تأثیر می‌گذارند [2]. کامپوزیت‌های بسیار پرشده مخلوطی متشکل از یک سیستم ناهمگن است که از سه ماده مختلف بایندر یا اتصال‌دهنده پلیمری، اکسیدکننده جامد و افزودنی‌های فلزی می‌باشد که درصد اجزای تشکیل‌دهنده به تناسب کاربرد برای هر کامپوزیت متفاوت است. بنابراین، رفتار رئولوژیکی به این مواد و خواص آن‌ها بستگی دارد [3,4]. پلی‌بوتادی‌ان با گروه انتهایی هیدروکسیل[1]، پلیمری با وزن مولکولی پایین است که در صنایع مختلف و به عنوان پیش‌پلیمر در سامانه‌های بایندر استفاده می‌شود [5-7]. در حال حاضر در سراسر جهان کامپوزیت‌های بسیار پرشده بر پایه پلی‌بوتادی‌ان با گروه انتهایی هیدروکسیل پرمصرف‌ترین ماده برای استفاده در سامانه‌ها و پرتابه‌های هوافضایی هستند [8,9]. فرمولاسیون کامپوزیت‌های بسیارپرشده در این سامانه‌ها عموماً از یک بستر پلیمری چسبناک با بار جامد که شامل 60%-20 پودرهای فلزی و 60%-20 نمک‌های آمونیوم به‌عنوان اکسیدکننده هستند، تشکیل‌شده‌اند که پس از اختلاط کامل، در قالب یا ریخته‌گری تهیه می‌شود [10,11]. کامپوزیت‌های بسیارپرشده بسیار ویسکوز و یک ماده نیمه‌جامد هستند که رفتار رئولوژیکی بسیار پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند که این رفتار در حین انجام عملیات فرآورش نقش حیاتی را ایفا می‌کند. عوامل مختلفی مانند ترکیبات شیمیایی، فرآیندهای ساخت مانند اکستروژن و اختلاط بر رفتار رئولوژیکی تأثیرگذار بوده که به‌نوبه خود بر خواص سوزش سامانه‌های هوافضایی نیز تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، افزودن تولوئن دی ایزوسیانات[2] که به‌عنوان یک عامل شبکه‌کننده عمل می‌کند، یک واکنش شیمیایی را ایجاد کرده و رئولوژی کامپوزیت را پیچیده‌تر می‌کند [12].

رئولوژی مطالعه تغییر شکل و جریان ماده است که چگونگی جریان یک ماده در مواجه با نیروی برشی، دما و زمان‌های مختلف را بیان می‌کند. جریان-پذیری ماده با گرانروی (η) اندازه‌گیری می‌شود. شناخت رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌های بسیار پرشده به فرمولاسیون و فرآورش آن‌ها کمک می‌کند. زمانی که ذرات جامد در بستر یک سیال قرار می‌گیرند، رفتار رئولوژیکی سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند که این امر توسط تغییر در میدان جریان صورت می‌گیرد. خواص رئولوژیکی دوغاب شاخص اصلی عملکرد فرآیند آماده‌سازی کامپوزیت است. دوغاب کامپوزیت‌های بسیار پرشده 10 تا 15% محتویات مایع و 85% محتویات جامد را تشکیل می‌دهد. گرانروی دوغاب کامپوزیت یک پارامتر مهم می‌باشد که نه‌تنها تحت تأثیر ترکیبات فاز مایع کامپوزیت است، بلکه تحت تأثیر اندازه، محتوا، شکل و خواص سطحی پرکننده‌های جامد نیز می‌باشد [13,14]. دو مورد بر رفتار رئولوژیکی کامپوزیت‌های بسیار پرشده نقش اساسی دارند: یکی تأثیر اجزای کامپوزیت‌ها که شامل سیستم اتصال-دهنده و کسر جرمی و توزیع اندازه ذرات اکسنده و پودرهای فلزی است. مورد دیگر تأثیر شرایط فرآیند شامل دمای مخلوط کردن، زمان و ترتیب افزودن اجزاء می‌باشد [15].گرانروی ماتریس یک پارامتر کلیدی است که باید بهینه شود تا بتواند فرآورش مواد و پراکنش ذرات را بهبود بخشد. انواع مختلف برهمکنش‌ها (ذره-ذره و ذره-ماتریس) برای تفسیر بهتر پدیده‌های ناشی از فرآورش توصیف‌شده‌اند. هنگامی‌که ذرات به یک ماتریس اضافه می‌شوند، به‌عنوان عوامل بازدارنده عمل می‌کنند که خطوط جریان فاز پیوسته را تغییر می‌دهند و تحرک زنجیره‌ها را محدود می‌کنند. در کامپوزیت‌های بسیار پرشده ذرات به‌طور نزدیک به هم در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و باعث می‌شوند که برهمکنش ذره-ذره بر برهمکنش‌های ماتریس-ذره غالب شود. اصطکاک ثابت بین ذرات منجر به اتلاف انرژی می‌شود و بنابراین مخلوط گرانروی بیشتری از خود نشان می‌دهد. از این‌رو، ناحیه خاصی از ذرات تأثیر عمده‌ای بر گرانروی مخلوط دارد. از سوی دیگر، نحوه اختلاط برای رسیدن به پراکنش و توزیع باکیفیت ذرات در ماتریس به‌منظور به‌دست آوردن یک مخلوط همگن و خواص مطلوب از اهمیت خاصی برخوردار است [16].

فرآیند اختلاط کامپوزیت‌ها در سه مرحله انجام می‌شود. در فاز پیش اختلاط تمام مواد به جز عامل شبکه‌کننده طی زمان مشخص مخلوط می‌شوند. در مرحله دوم تمام اجزای بار جامد و در مرحله پایانی عامل شبکه‌کننده اضافه می‌شود. از آنجا که واکنش شبکه‌شدگی پس از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده به مخلوط دوغابی آغاز می‌شود، زمان بهینه فرآیند ریخته‌گری پس از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده محدود می‌شود. درنتیجه با پیشرفت واکنش، گرانروی سامانه افزایش می‌یابد. بالا رفتن سرعت افزایش گرانروی می‌تواند باعث کاهش اطمینان‌پذیری و افزایش حباب و عیوب دیگر در دوغاب شود [17]. دوغاب کامپوزیت باید در پایان اختلاط گرانروی مناسبی داشته باشد تا ریخته‌گری به سهولت انجام گیرد. گرانروی پایین دوغاب کامپوزیت جامد باعث همگن‌شدن مواد تشکیل‌دهنده در دوغاب کامپوزیت می‌شود [18]. در سامانه‌های بسیار رقیق، پرکننده‌ها به‌اندازه‌ای از هم فاصله دارند که تعامل بین آن‌ها ناچیز است و رفتار رئولوژیکی آن‌ها به‌شدت تغییر می‌کند. زمانی که غلظت بیش از 15% افزایش می‌یابد، به یک رفتار جامد مانند نزدیک می‌شود که این رفتار نیز تابعی از شکل و اندازه ذرات است [19]. گرانروی یک سامانه سوسپانسیون با غلظت بالا دارای ماهیت سیال غیرنیوتنی است و شامل گرانروی نیوتنی سیستم فاز مایع (η_0) و گرانروی ساختاری (η_s) است. جریان دوغاب بسیار بارگذاری شده با مدل سیال قانون توانی ($\eta = Kx^m$) اندازه‌گیری می‌شود که در آن شاخص شبه‌پلاستیک (m) و شاخص گرانروی (k) است. برای شبه‌پلاستیک‌ها، m حدوداً بین 0 و 1- تغییر می‌کند [20].

یک بحث بسیار مهم در فرآیند تولید مواد مرکب به‌ویژه کامپوزیت‌های بسیار پرشده که در موارد خاص و همین‌طور در سامانه‌های هوافضایی استفاده می‌شوند، موضوع همگن بودن اجزاء کامپوزیت در کل مجموعه کامپوزیت می-باشد. به‌طوری‌که هرگونه ناهمگنی بر خواص مکانیکی و خواص احتراقی و سایر خواص کامپوزیت تأثیر زیادی گذاشته و مانع به‌کارگیری مناسب آن‌ها می‌شود. بر طبق تحقیقات انجام‌شده از بهترین و ساده‌ترین روش‌هایی که می‌تواند ما را از همگن بودن اجزاء کامپوزیت در کل مجموعه کامپوزیت مطمئن نماید، یکسان بودن چگالی کامپوزیت چه به‌صورت دوغاب و چه پس از شبکه‌شدن که محصول به‌صورت کامپوزیت تولید می‌شود در مراحل مختلف یک نمونه کامپوزیتی می‌باشد [21-23]. برخی از عواملی که بر گرانروی و همگنی دوغاب تأثیر می‌گذارند می‌توان به زمان اختلاط، سرعت اختلاط، دمای اختلاط، نوع مواد اولیه، توالی مواد و برخی عوامل دیگر اشاره کرد که نیاز به ارزیابی گرانروی و همگنی دوغاب کامپوزیت دارد. بررسی کیفیت مخلوط برای ارزیابی و اطمینان از اختلاط کامل دوغاب و دستیابی به محصولی همگن، بسیار حائز

[1] HTPB
[2] TDI

اهمیت است. رایج‌ترین روش برای ارزیابی وضعیت مخلوط یا محلول، مقدار غلظت یا انحراف آن از غلظت موردنظر می‌باشد. در مورد دوغاب کامپوزیت زمانی می‌توان آن را همگن اعلام کرد که همه مواد (جامد و مایع) به‌خوبی در محصول پخش‌شده باشند یا در هر قسمت از محصول دارای ترکیب یکسانی باشد. یک نتیجه اختلاط خوب زمانی است که تمام ذرات جامد با یکدیگر مخلوط شده و توسط بایندر پوشانده شوند [23].

در سال 1991 موتیا و همکارانش [24] تأثیر دما بر رفتار رئولوژیکی دوغاب کامپوزیت بسیار پرشده را بررسی کردند. مشخص‌شده است که دوغاب بلافاصله پس از افزودن عامل شبکه‌کننده در دمای مختلف از 40 تا 90 ºC رفتار غیر نیوتنی مستقل از زمان را نشان می‌دهد، اما با ادامه واکنش شبکه‌کننده، جریان بیشتر و بیشتر به زمان وابسته می‌شود.

در سال 1993 موتیا و همکارانش [25] به مطالعه تأثیر سرعت و زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی یک کامپوزیت بسیار پرشده پرداخته‌اند. زمان و سرعت اختلاط مستقیماً بر گرانروی کامپوزیت تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین، بهینه‌سازی این پارامترها بر اساس نیازهای نهایی کامپوزیت از جمله سرعت سوزش، خواص مکانیکی و خواص رئولوژیکی ضروری است. با توجه به پارامترهای رئولوژیکی، زمان اختلاط دوغاب برای فرمولاسیون‌ها می‌تواند 180 دقیقه در سرعت اختلاط 25-18 دوربردقیقه ثابت نگه‌داشته شود و با افزایش زمان اختلاط، واکنش شبکه‌کننده غالب می‌شود.

در سال 2007 ماهانتا و همکارانش [20] رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده را با نرخ بارگذاری 86% و همراه عامل شبکه‌کننده را بررسی کرده‌اند. گرانروی دوغاب کامپوزیت در محدوده دمایی 60-40 ºC در زمان‌های متفاوت تا 5 ساعت پس از پایان اختلاط اندازه‌گیری و شاخص گرانروی مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است. گرانروی نمونه دوغاب کامپوزیت بعد از اضافه کردن عامل شبکه‌کننده تولوئن دی ایزوسیانات هریک در حمام آب گرم به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری گرانروی دوغاب توسط دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با تیغه T-E سری HADV2 با سرعت‌های برشی 1، 2.5، 4 و 6 دوربردقیقه انجام می‌شود. با افزایش سرعت برشی، گرانروی دوغاب کامپوزیت کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده ماهیت شبه‌پلاستیک دوغاب کامپوزیت است. برای سیال غیرنیوتنی، چنین است که اگر گرانروی با سرعت برشی کاهش یابد، میزان کاهش، شاخص شبه‌پلاستیک است. دوغاب در دمای پایین‌تر به رفتار نیوتنی نزدیک می‌شود و در دمای بالاتر رفتار غیر نیوتنی بیشتری دارد. علاوه بر این شاخص گرانروی دوغاب صرف‌نظر از دما باگذشت زمان افزایش می‌یابد. این افزایش گرانروی به دلیل واکنش شبکه‌شدگی و ایجاد اتصالات عرضی در دوغاب کامپوزیت می‌باشد.

در سال 2018 عبدالله و همکارانش [23] به بررسی همگنی یک کامپوزیت بسیار پرشده پرداخته‌اند. بررسی اثر زمان اختلاط بر همگنی دوغاب کامپوزیت با استفاده از نتایج چگالی برای ارزیابی و درجه همگنی در مطالعه آن‌ها انجام‌شده است و زمان اختلاط جامدات به دلیل اطمینان از آن‌که هر ماده جامد بتواند به‌خوبی توسط مواد مایع پوشش داده شود، متغیر اصلی این تحقیق بوده است. نتایج نشان داد که زمان اختلاط بر مقادیر چگالی تأثیر می‌گذارد و همگن‌ترین دوغاب در زمان کل اختلاط 135 دقیقه به دست آمد.

در سال 2020 تقی نژاد و همکارانش [26] اثر دمای ریخته‌گری 60-40 ºC را بر رفتار رئولوژیکی یک کامپوزیت بسیار پرشده بررسی کرده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داده است که افزایش دمای ریخته‌گری به سبب شبکه‌شدگی بیشتر، گرانروی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین کاهش دمای ریخته‌گری، با کنترل فرآیند شبکه‌کننده، عمر کاربری را افزایش می‌دهد و با هر 10 ˚C کاهش دمای ریخته‌گری، عمر کاربری سیستم بایندر بر پایه تولوئن دی ایزوسیانات 10 دقیقه افزایش می‌یابد.

در سال 2023 کنگوئی و همکارانش [27] به بررسی چگالی یک کامپوزیت به‌منظور بررسی همگنی و عاری از تخلل بودن کامپوزیت آلومینیوم – الیاف بازالت ساخته شده به روش اختلاط جریان برشی پرداخته اند. نتایج مطالعه آن ها نشان داد که با افزایش درصد الیاف، اختلاف چگالی تئوری و واقعی روندی افزایش خواهد داشت.

2- اهمیت موضوع

پودر فلزی آلومینیوم یکی از اجزاء مهم در فرمولاسیون کامپوزیت‌های بسیار پرشده است که منجر به افزایش تکانه[1] ویژه و موجب بهبود چگالی کامپوزیت و افزایش عملکرد بالستیکی سامانه‌های هوافضایی می‌شود. وجود ذرات جامد در این نوع از کامپوزیت‌ها خواص ویژه‌ای را در آن‌ها ایجاد کرده است که بر خواص عملکردی، خواص رئولوژیکی، خواص فیزیکی و مکانیکی و خواص احتراقی کامپوزیت بسیار مؤثر می‌باشد. در تولید کامپوزیت‌های بسیار پرشده، پارامترهای رئولوژیکی اثر مستقیمی بر فرآورش محصول به‌ویژه هنگام اختلاط، قبل و بعد از اضافه کردن پودر فلزی و هم‌چنین ریخته‌گری کامپوزیت یا محصول نهایی دارد. با توجه به نیاز به دانش اختلاط کامپوزیت‌های بسیار پرشده، اطلاع از رفتار جریان و اطمینان از همگنی مخلوط، در این مقاله سعی شده است که تأثیر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی و همگنی این کامپوزیت‌ها بررسی شود تا عملکرد مطلوب و بهینه‌ای را در سامانه‌های دفاعی و هوافضایی که بسیار حائز اهمیت است ایفا کند.

3- بخش تجربی

3-1- مواد

در این پژوهش از رزین HTPB با متوسط وزن مولکولی 3090 g/mol، عدد هیدروکسیل 38.2 mg KOH/g و گرانروی 5.256 Pa.s در دمای 40 ºC، از نرم‌کننده دی اکتیل آدیپات با وزن مولکولی 370.6 g/mol، اسیدیته 0.15%، چگالی 0.924 gr/cm^3، از تولوئن دی‌ایزوسیانات رایج‌ترین عامل شبکه‌کننده مورداستفاده در کامپوزیت بسیار پرشده بر پایه HTPB دارای خلوص 98.95%، وزن مخصوص 1.21 g/cc و ضریب شکست 1.567 در دمای 25 ºC، از سورفاکتانت لسیتین جهت مرطوب‌شوندگی، پخش‌کننده و بهبود جریان پذیری و اصلاح گرانروی با وزن مولکولی 311.2 g/mol، اسیدیته 0.30%، گرانروی 8 Pa.s، چگالی 1.03 gr/cm^3 در دمای 20 ºC و مواد جامد شامل پودر آلومینیوم با اندازه 15 µm، اکسیدکننده آمونیوم پرکلرات با سه اندازه 250 µm، 25 µm و 4 µm که توسط صنعت تهیه شدند، مورد استفاده قرار گرفتند.

3-2- فرآیند اختلاط و نحوه ساخت کامپوزیت‌های بسیار پرشده

اختلاط کامپوزیت‌های بسیار پرشده در زمان‌های 5، 10، 15 و 20 دقیقه برای هر ماده جامد با زمان کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه به‌غیر از در نظر گرفتن زمان اختلاط افزودن عامل شبکه‌کننده به‌منظور بررسی رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت در دمای اختلاط 40 ˚C مطابق فرمولاسیون جدول 1 انجام شد.

[1] Impulse

جدول 1 فرمولاسیون کامپوزیت‌های بسیار پرشده با عامل شبکه‌کننده

Table 1 Highly filled composites formulation based on HTPB with curing agent

ردیف	نام ماده	نقش ماده	درصد وزنی فرمولاسیون	مقدار r (NCO/OH)
1	Al	پودر فلزی	50	0.85
2	AP_C	اکسیدکننده درشت	9.2	
3	AP_F	اکسیدکننده ریز	11.5	
4	AP_{UF}	اکسیدکننده فوق‌ریز	13.8	
5	HTPB	پیش‌پلیمر	12.4	
6	DOA	نرم‌کننده	2.02	
7	TDI	عامل شبکه‌کننده	0.77	
8	Lecithin	سورفاکتانت	0.31	

فرآیند اختلاط و نحوه ساخت کامپوزیت‌های بسیار پرشده در چند مرحله انجام شد. در مرحله اول سیستم بایندر متشکل از پیش‌پلیمر، نرم‌کننده و سورفاکتانت لسیتین را در همزن سیاره‌ای دو پره‌ای ریخته و مخلوط به مدت 15 دقیقه با سرعت اختلاط 20 دور بر دقیقه به‌خوبی هم زده شد. در مرحله دوم مخلوط کردن هر یک از مواد جامد در طول زمان مشخص‌شده با پودر آلومینیوم و سپس ذرات ریز تا درشت آمونیوم پرکلرات با سرعت اختلاط 20 دور بر دقیقه بود. درنهایت، عامل شبکه‌کننده به مخلوط اضافه و به مدت 16 دقیقه با سرعت اختلاط 15 دور بر دقیقه هم زده شد، سپس این دوغاب به‌عنوان محصول اختلاط نهایی نامیده شد. شکل 1 شکل ظاهری مخلوط دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) را نشان می‌دهد.

Fig. 1 Composite slurry (HTPB/Al/AP)

شکل 1 دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

3-3- روش آزمایش

در این پژوهش رفتار رئولوژیکی و همگنی در کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم/AP» و «بایندر/آلومینیوم/AP با عامل شبکه‌کننده» در زمان‌های کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه مورد بررسی قرار گرفت.

3-3-1 بررسی رفتار رئولوژیکی

برای تعیین گرانروی کامپوزیت‌های بسیار پرشده از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل DV2THA ساخت کشور ایالات متحده استفاده شده است. با استفاده از این دستگاه، گرانروی و مقدار گشتاور در سرعت‌های مشخص در دمای 40 °C توسط تیغه T-F اندازه‌گیری شد.

3-3-2 تعیین همگنی

شش مکان در همزن برای نمونه‌برداری انتخاب‌شده است؛ در پره، در چهارگوشه همزن و در وسط همزن که به ترتیب با B، SA، SB، SC، SD و T مطابق شکل 2 کدگذاری شده‌اند و تمام نمونه گرفته‌شده قسمت سطحی دوغاب در همزن می‌باشد. برای بررسی همگنی کامپوزیت‌های بسیار پرشده با استفاده از

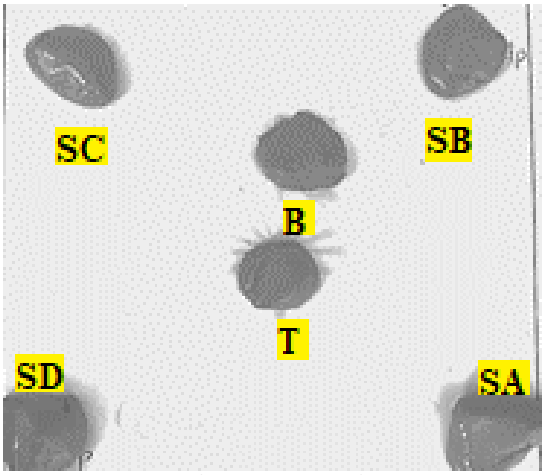


Fig. 2 Sampling locations for measurement of homogeneity in the mixer

شکل 2 مکان‌های نمونه‌برداری اندازه‌گیری همگنی در همزن

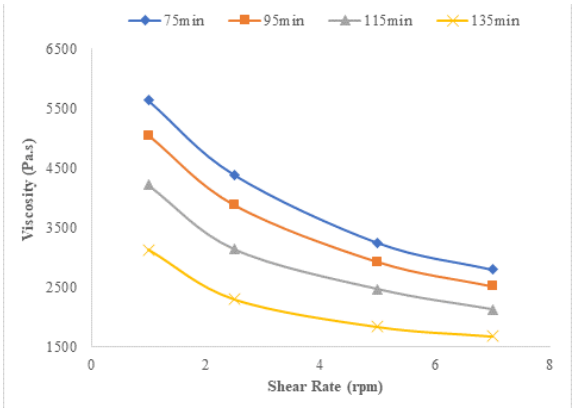
چگالی آن‌ها توسط دستگاه چگالی‌سنج مدل AS220/C/2 ساخت شرکت RADWAG با دقت سه رقم اعشار و استاندارد ASTM D792 انجام پذیرفت که اساس کار این دستگاه اندازه‌گیری حجم آب جابجا شده در اثر وزن کامپوزیت می‌باشد.

4- نتایج و بحث

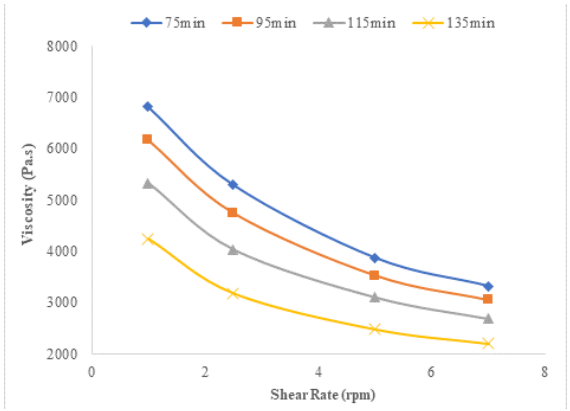
در این بخش به ارائه نتایج آزمایش‌های بررسی تأثیر زمان اختلاط بر گرانروی و همگنی روی نمونه کامپوزیت‌های «بایندر/آلومینیوم AP» در «بایندر/آلومینیوم/AP با عامل شبکه‌کننده» در دمای اختلاط 40 °C پرداخته می‌شود.

4-1- بررسی اثر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی

شکل 3 نمودار تغییرات رفتار جریان نسبت به سرعت برشی را در زمان‌های کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه در کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP + TDI» با دمای اختلاط 40 °C را نشان می‌دهند. شکل‌ها نشان می‌دهد که زمان اختلاط مستقیماً بر گرانروی تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی گرانروی در حال کاهش است که رفتار غیر نیوتنی شبه‌پلاستیک و پدیده رقیق شوندگی برشی دوغاب را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت برشی لخته‌ها که ذرات تجمع شده ناشی از پودر آلومینیوم و آمونیوم پرکلرات با بایندر و هم‌چنین عامل شبکه‌کننده هستند، تجزیه شده و موجب کاهش ویسکوزیته می‌گردد و علت دیگر این رفتار ناشی از ساختار مولکولی بایندر و چگالی فشردگی پرکننده است. از سوی دیگر، با افزایش سرعت برشی، برهمکنش بین مولکول‌ها کاهش یافته و نقطه درهم‌تنیدگی آن‌ها به تدریج باز می‌شود و موجب تضعیف نیروهای بین زنجیره‌های مولکولی و کاهش مقاومت بین آن‌ها می‌گردد و درنتیجه گرانروی کاهش می‌یابد و دوغاب در سرعت برشی‌های بالاتر پیوسته کمتر شبه پلاستیک می‌شود [28]. با توجه به این‌که گرانروی پایین، نتیجه رفتار رئولوژیکی بهتر را به همراه دارد؛ پس با افزایش سرعت برشی می‌توان به نتایج بهتری رسید و به‌عنوان یک مزیت درنظر گرفت.



الف-a



ب-b

Fig. 3 Rheological behavior of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 3 رفتار جریان کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

با توجه به نتایج شکل 3، اگر تغییرات دما مورد بررسی قرار می‌گرفت، انتظار می‌رفت با افزایش دما، گرانروی کمتری را به دلیل افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمر در سرعت‌های برشی مختلف ثبت کرد و بالعکس.

به‌منظور تعیین رفتار رئولوژیکی دوغاب بسیار بارگذاری شده با معادله سیال قانون توان ($\eta = Kx^m$)، با مرتب کردن نمودار و انطباق داده‌ها، مقدار n-1 به‌صورت m منظور شد و معادله به شکل ($\eta = Kx^n$) یافت. نتایج محاسبات و پارامترهای معادله قانون توان در جدول 2 آورده شده است.

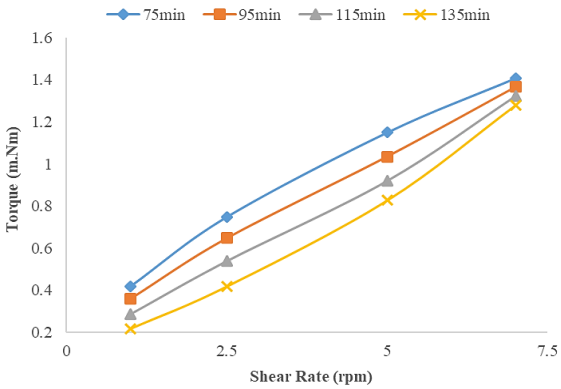
جدول2 پارامترهای معادله سیال قانون توان در کامپوزیت‌های (HTPB/Al/AP) و (HTPB/Al/AP) + TDI با زمان کل فرآیند اختلاط 75، 95، 115 و 135 دقیقه

Table 2 Power law fluid equation parameters in (HTPB/Al/AP) and (HTPB/Al/AP) + TDI composites with total mixing time of 75, 95, 115 and 135 minutes

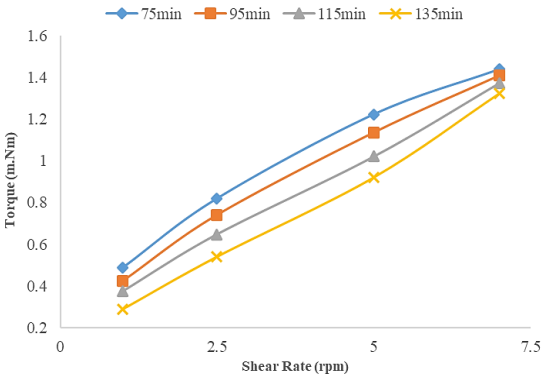
R^2	k	n=m+1	m	زمان (min)	نمونه
0.986	5.790	0.638	-0.362	75	Al/Binder/AP
0.984	7.019	0.629	-0.371	75	Al/Binder/AP/TDI
0.990	5.156	0.643	-0.357	95	Al/Binder/AP
0.989	6.325	0.637	-0.363	95	Al/Binder/AP/TDI
0.997	4.253	0.655	-0.345	115	Al/Binder/AP
0.995	5.405	0.650	-0.350	115	Al/Binder/AP/TDI
0.999	3.107	0.674	-0.326	135	Al/Binder/AP
0.999	4.272	0.662	-0.338	135	Al/Binder/AP/TDI

واکنش شبکه‌شدگی در دوغاب کامپوزیت به دلیل ایجاد اتصالات عرضی باعث افزایش گرانروی می‌شود و شاخص شبه‌پلاستیک را کاهش می‌دهد. زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه کمترین گرانروی را از خود نشان داد. این زمان به دلیل مرطوب شوندگی بهتر ذرات جامد با سیستم بایندر، رفتار رئولوژیکی بهتری به علت شاخص شبه‌پلاستیک کمتر و با توجه به مقدار R^2 بیشتر دارد و تمایل بیشتری به سمت رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد [29].

نیروی گشتاور لازم برای هم زدن کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP» + TDI محاسبه و در شکل 4 نمودارهای گشتاور در زمان‌های اختلاط مختلف کل فرآیند در هر کامپوزیت ترسیم شد. شکل‌ها نشان می‌دهند که گشتاور به‌صورت خطی با افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش تنش برشی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان اختلاط در هر یک از سرعت‌های برشی مشخص؛ گرانروی، تنش برشی و گشتاور کاهش می‌یابد.



الف-a



ب-b

Fig. 4 Changes in torque relative to shear rate composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 4 تغییرات گشتاور نسبت به سرعت برشی کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

شکل 5 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر گرانروی کامپوزیت‌های «HTPB/Al/AP» و «HTPB/Al/AP» + TDI را نشان می‌دهد. شکل‌ها نشان می‌دهند که زمان اختلاط مستقیماً بر گرانروی کامپوزیت بسیار پرشده تأثیر می‌گذارد با افزایش زمان اختلاط به دلیل مرطوب شوندگی بهتر اتصال‌دهنده (بایندر) - پرکننده گرانروی تمایل به کاهش دارد. همچنین، تمایل به افزایش گرانروی از طریق کاهش اندازه ذرات آمونیوم پرکلرات ناشی می‌شود.

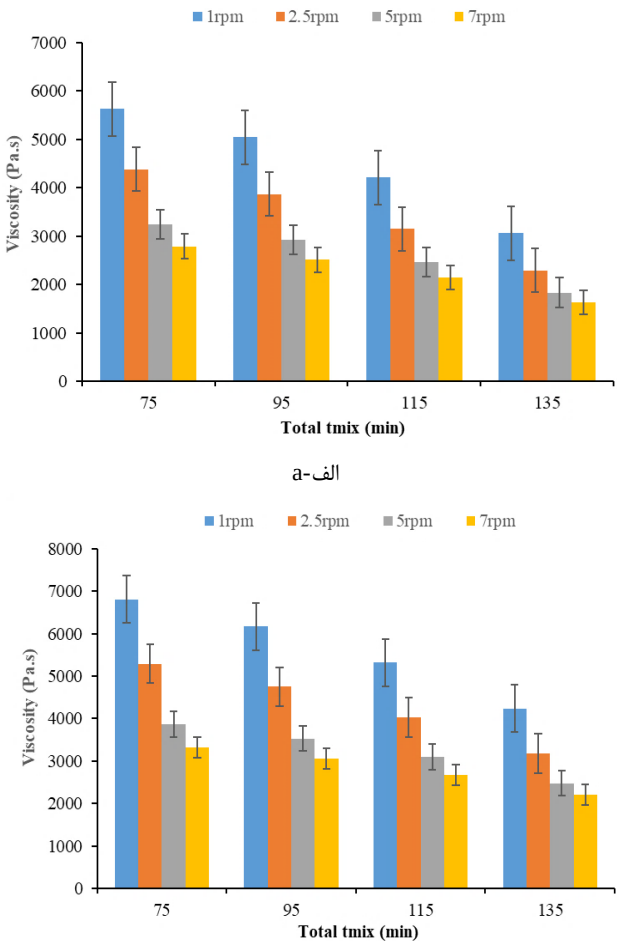


Fig. 5 Effect of total time of mixing process on viscosity of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 5 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر گرانروی کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

شکل 6 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر شاخص شبه‌پلاستیک کامپوزیت‌های (HTPB/Al/AP) و (HTPB/Al/AP) + TDI را نشان می‌دهد. افزایش تدریجی مقدار n با زمان اختلاط به‌وضوح قابل‌مشاهده است. با افزایش زمان اختلاط، دوغاب به‌طور مداوم کمتر شبه‌پلاستیک می‌شود. علت آن یکی اثر خرد شدن آمونیوم پرکلرات است که ذرات را ریزتر می‌کند و دیگری به دلیل مرطوب شدن بهتر ذرات جامد توسط مایع است.

4-2- بررسی اثر زمان اختلاط بر همگنی

بررسی همگنی کامپوزیت‌های بایندر/آلومینیوم/AP (HTPB/Al/AP) و کامپوزیت‌های بایندر/آلومینیوم/AP (HTPB/Al/AP) + TDI قبل و بعد از شبکه‌شدگی کامپوزیت با استفاده از چگالی اندازه‌گیری شده است و در ادامه به تجزیه‌وتحلیل همگنی در دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه شده پرداخته می‌شود. نتایج آزمایشگاهی چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی در کامپوزیت (HTPB/Al/AP) و کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی کامپوزیت در مکان‌های مشخص به ترتیب در جدول 3 و 4 آورده شده است.

نتایج آزمایشگاهی چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده در مکان‌های مشخص در جدول 5 آورده شده است.

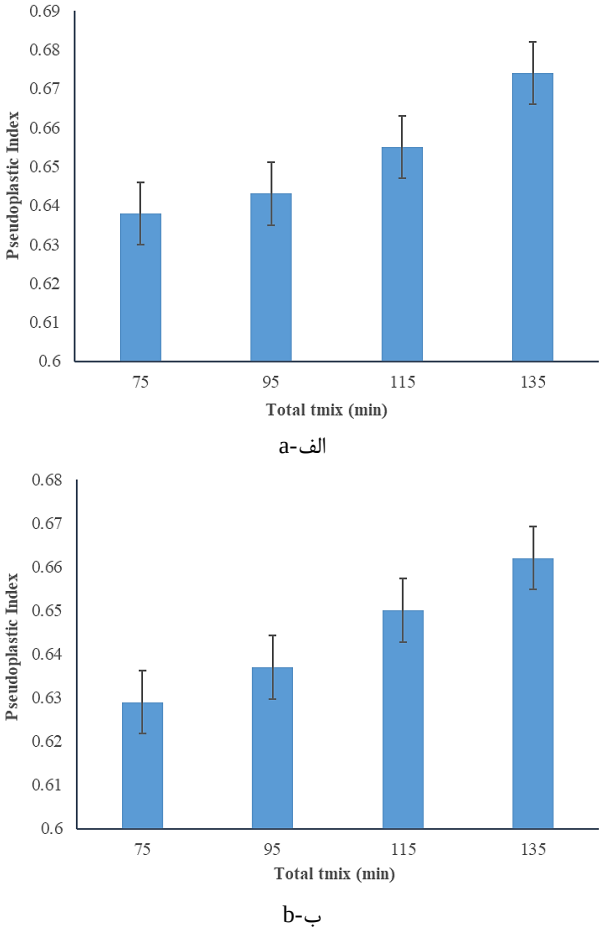


Fig. 6 Effect of total time of mixing process on pseudoplastic index of composites; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite

شکل 6 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر شاخص شبه‌پلاستیک کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI

جدول 3 نتایج چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

Table 3 Composite slurry density results (HTPB/Al/AP)

زمان (min)	چگالی دوغاب کامپوزیت در مکان‌های مشخص (g/ml)					
	B	SA	SB	SC	SD	T
75	1.8898	1.8985	1.8526	1.8744	1.8517	1.8609
95	1.8722	1.8867	1.8673	1.8535	1.8580	1.8616
115	1.8746	1.8994	1.8837	1.8740	1.8881	1.8868
135	1.8924	1.8902	1.8818	1.8907	1.8852	1.8895

جدول 4 نتایج چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی

Table 4 Density results of composite slurry (HTPB/Al/AP) + TDI before composite cross-linking

زمان (min)	چگالی دوغاب کامپوزیت در مکان‌های مشخص (g/ml)					
	B	SA	SB	SC	SD	T
75	1.8745	1.8608	1.8461	1.8694	1.8342	1.8356
95	1.8631	1.84112	1.8449	1.8650	1.8507	1.8788
115	1.8528	1.8592	1.8515	1.8602	1.8644	1.8710
135	1.8657	1.8583	1.8646	1.8591	1.8630	1.8605

جدول 5 نتایج چگالی کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده

Table 5 Composite density results (HTPB/Al/AP) + TDI Cross-linked

زمان (min)	چگالی دوغاب کامپوزیت جامد در مکان‌های مشخص (g/ml)					
	B	SA	SB	SC	SD	T
75	1.8326	1.8032	1.7906	1.8118	1.8283	1.8235
95	1.8203	1.8325	1.8077	1.8084	1.8329	1.8251
115	1.8354	1.8201	1.8229	1.8245	1.8232	1.8270
135	1.8285	1.8279	1.8321	1.8300	1.8287	1.8292

نتایج نشان داد که مقدار میانگین چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه‌شده در هر مکان برای همه متغیرهای زمان اختلاط نسبتاً یکسان و نزدیک به یکدیگر است. میانگین چگالی در هر مکان نسبتاً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارد و از آنجایی که محتوای AP ریز در مخلوط‌های فرآورش شده در راکتورهای کوچک‌تر بیشتر است، انتظار می‌رود که چگالی نیز بیشتر باشد. برای یافتن همگن‌ترین دوغاب باید پردازش داده انجام شود. میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی و کامپوزیت شبکه‌شده به ترتیب در جداول 6 تا 8 آورده شده است.

جدول 6 میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

Table 6 Average, variance and standard deviation of the density of composite slurry (HTPB/Al/AP)

زمان (min)	75	95	115	135
$\bar{x}$	1.87132	1.87155	1.88443	1.88830
s^2	0.00039	0.00023	0.00009	0.00002
s	0.01967	0.01524	0.00948	0.00399

جدول 7 میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)+TDI قبل از شبکه‌شدگی

Table 7 Average, variance and standard deviation of composite slurry density (HTPB/Al/AP) + TDI before cross-linking

زمان (min)	75	95	115	135
$\bar{x}$	1.85344	1.85728	1.85985	1.86037
s^2	0.00030	0.00020	0.00005	0.00001
s	0.01729	0.01426	0.00728	0.00297

جدول 8 میانگین، واریانس و انحراف معیار چگالی کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده

Table 8 Average, variance and standard deviation of composite density (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked

زمان (min)	75	95	115	135
$\bar{x}$	1.81500	1.82116	1.82552	1.82941
s^2	0.00026	0.00013	0.00003	0.000002
s	0.01615	0.01120	0.00534	0.0015

نتایج نشان داد که زمان اختلاط بر مقدار همگنی و چگالی تأثیر می‌گذارد. با افزایش زمان اختلاط مقدار چگالی نسبتاً افزایش یافت. برای بیان تنوع داده‌ها از ضریب واریانس (cv) استفاده می‌شود. cv به‌عنوان میانگین انحراف معیار و یک مقدار بحرانی برای ارزیابی کیفیت فرآیند اختلاط می‌باشد و مقدار آن برحسب درصد بیان می‌شود و نتایج آن در جداول 9 تا 11 آورده شده است.

جدول 9 درجه همگنی (مقدارcv) چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)

Table 9 Degree of homogeneity (cv value) density of composite slurry (HTPB/Al/AP)

زمان (min)	75	95	115	135
cv (%)	1.051	0.814	0.503	0.211
درجه همگنی (%)	98.95	99.18	99.49	99.78

جدول 10 درجه همگنی (مقدارcv) چگالی دوغاب کامپوزیت (HTPB/Al/AP)+TDI قبل از شبکه‌شدگی

Table 10 Homogeneity (cv value) density of composite slurry (HTPB/Al/AP) + TDI before composite cross-linking

زمان (min)	75	95	115	135
cv (%)	0.932	0.765	0.391	0.159
درجه همگنی (%)	99.06	99.23	99.61	99.84

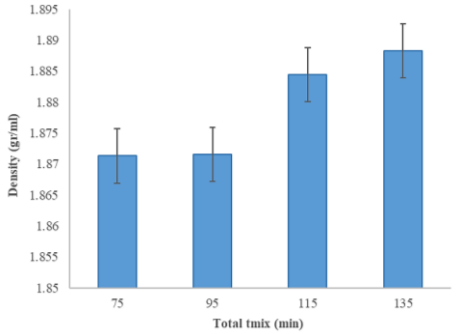
جدول 11 درجه همگنی (مقدارcv) چگالی کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده

Table 11 Degree of homogeneity (cv value) of composite density (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked

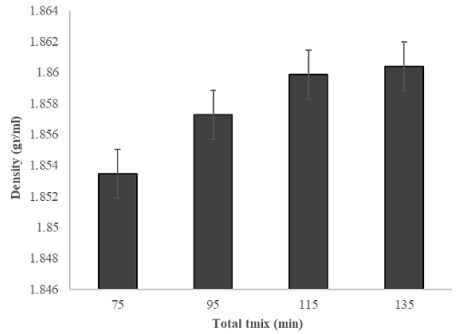
زمان (min)	75	95	115	135
cv (%)	0.890	0.614	0.292	0.081
درجه همگنی (%)	99.11	99.38	99.70	99.92

همان‌طور که مقدار cv تنوع داده‌ها را تعیین می‌کند، یکنواختی داده‌ها را می‌توان با درصد بقیه تعیین کرد. این را می‌توان به‌عنوان درجه همگنی بیان کرد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار cv، مقدار همگنی کاهش می‌یابد. مقدار cv محاسبه‌شده در زمان اختلاط کل فرآیند 135 دقیقه بالاترین مقدار به دست آمد که ناشی از اختلاط کامل ذرات پرکننده با بایندر می‌باشد و درجه همگنی بیشتری نسبت به دیگر نمونه‌ها داشت. نتایج مطالعه سایر محققین این امر را تائید می‌کند و کاملاً مطابقت دارد [22-24]. شکل 7 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی دوغاب مخلوط کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

شکل 8 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدارcv) دوغاب مخلوط کامپوزیتی را نشان می‌دهد.



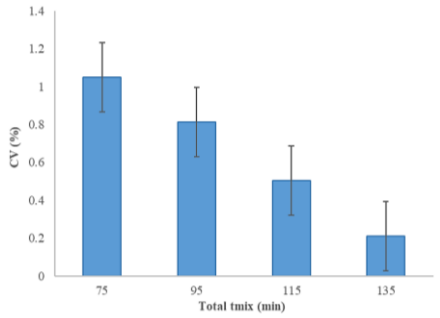
الف-a



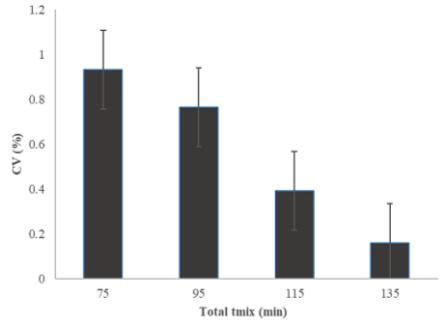
ب-b

Fig. 7 Effect of the total time of the mixing process on the density of the composites slurry; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite before cross-linking

شکل 7 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی دوغاب کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی



الف-a



ب-b

Fig. 8 Effect of the total time of the mixing process on the degree of homogeneity (cv value) of the composites slurry; (a) (HTPB/Al/AP) composite, (b) (HTPB/Al/AP) + TDI composite before cross-linking

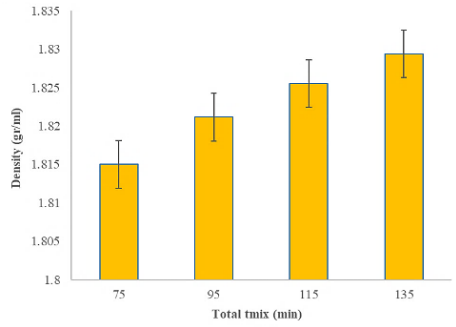
شکل 8 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدار cv) دوغاب کامپوزیت‌ها؛ (الف) کامپوزیت (HTPB/Al/AP)، (ب) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI قبل از شبکه‌شدگی

شکل 9 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر چگالی و درجه همگنی (مقدار cv) کامپوزیت (HTPB/Al/AP) + TDI شبکه‌شده را نشان می‌دهد.

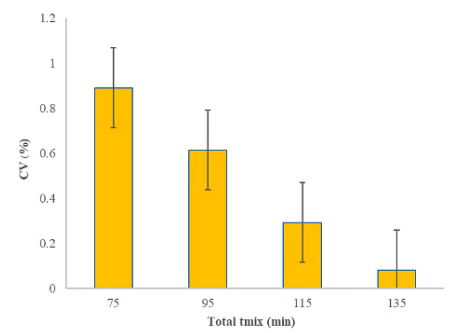
با توجه به نتایج پارامترهای رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت بسیار پرشده و تأثیر آن برخواص فیزیکی و مکانیکی محصول نهایی، انتظار می‌توان داشت که با افزایش زمان اختلاط، نمونه‌ها سختی کمتری را با توجه به چگالی اتصال عرضی، سرعت شبکه‌شدگی، مرطوب‌شوندگی بهتر ذرات پرکننده با بایندر و هم‌چنین افزایش زمان تماس بین مواد جامد و مایع، داشته باشند. زمان اختلاط نیز تأثیر بسزایی بر ازدیاد طول و تنش نمونه‌ها دارد.

برای تمامی نمونه‌ها با افزایش زمان کل فرآیند اختلاط به ترتیب ازدیاد طول بیشتری مشاهده خواهد شد. با افزایش چگالی اتصالات عرضی، مدول روند صعودی به خود می‌گیرد. قابلیت ازدیاد طول بیشتر ناشی از چسبندگی سطحی قوی‌تر بین پرکننده جامد و بایندر است. با توجه به این که در کامپوزیت بسیار پرشده بار جامد فلزی آن‌ها خیلی بیشتر از کامپوزیت‌های متداول است، عمر کاربری آن کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین هرچه گرانروی بیشتر باشد ازدیاد طول کم‌تر می‌شود.

اختلاط کامپوزیت‌های بسیار پرشده در دمای محیط (25 ℃) نیز مورد بررسی قرارگرفته بود و از آنجایی که به دلیل دمای پایین و افزایش بیش‌ازحد گرانروی و رفتار رئولوژیکی نامطلوب کامپوزیت‌ها را به همراه داشت و اختلاط به‌سختی انجام می‌شد و ذرات به‌صورت تجمع و آگلومره درمی‌آمدند، از انجام-دادن اندازه‌گیری رفتار رئولوژیکی و همگنی در دمای محیط صرف‌نظر شد (شکل 10).



الف-a



ب-b

Fig. 9 Effect of the total time of the mixing process on the degree of homogeneity (cv value) and density of the composite (HTPB/Al/AP) + TDI cross-linked; (a) density, (b) degree of homogeneity (cv value)

شکل 9 تأثیر زمان کل فرآیند اختلاط بر درجه همگنی (مقدار cv) و چگالی کامپوزیت (HTPB/Al/AP)+TDI شبکه‌شده؛ (الف) چگالی، (ب) درجه همگنی (مقدار cv)

هم‌چنین از آنجایی که عبدالله و همکارانش [23] تا زمان اختلاط کل فرآیند 135 دقیقه مطالعات خود را انجام داده بودند، برای بررسی و مقایسه نتایج خود با آن‌ها، این تحقیق هم تا این زمان مورد بررسی قرار گرفت.

Fig. 10 Composite agglomeration at 25 ℃

شکل 10 آگلومره شدن کامپوزیت در دمای 25 ℃

5- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی اثر زمان اختلاط بر رفتار رئولوژیکی و همگنی کامپوزیت بسیار پرشده نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل است:

1- مشاهده شد که گرانروی و وابستگی آن به سرعت برشی با رفتار سیال شبه‌پلاستیک مطابقت دارد و عملکرد غلیظ شدگی برشی کامپوزیت بسیار

پرشده با افزایش سرعت برشی به رقیق‌شدگی برشی تغییر می‌کند. افزایش گرانروی به علت ذرات جامد ریزتر و افزایش وزن مولکولی و تشکیل اتصالات عرضی در ساختار پیش‌پلیمر می‌باشد.

2- سیالیت دوغاب کامپوزیت هنگامی‌که با ذرات ریزودرشت آمومیوم پرکلرات ترکیب می‌شوند و تشکیل کامپوزیت بایندر/آلومینیوم/AP (HTPB/Al/AP) را می‌دهند، رفتار غیر نیوتنی بیشتری از خود نشان دادند و هم‌چنین هنگامی‌که عامل شبکه‌کننده به کامپوزیت اضافه گردید کامپوزیت شبه‌پلاستیک‌تر شد.

3- نشان داده شد که رفتار رئولوژیکی کامپوزیت بسیار پرشده به‌طور قابل‌توجهی به برهمکنش‌های فیزیکی میان مواد پرکننده و ماتریس بستگی دارد. علاوه بر این، مشاهده شد که تغییرات اندازه ذرات جامد در طول فرآورش منجر به رفتار رئولوژیکی غیرمنتظره کامپوزیت بسیار پرشده می‌شود.

4- همگن‌ترین دوغاب کامپوزیت در زمان کل فرآیند اختلاط 135 دقیقه به دست آمد که ناشی مرطوب شوندگی بهتر ذرات پرکننده با ماتریس پلیمری و اختلاط کامل ذرات پرکننده با بایندر (اتصال‌دهنده) می‌باشد.

6- مراجع

[1] Rothberg, H.S., Pietsch, S., Schneider, G.A. and Heinrich, S., "Fabrication of Highly Filled Composites with an Innovative Miniaturized Spouted Bed," Processes, Vol. 8, No. 5, pp. 521, 2020.

[2] Bek, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Kukla, C., Pušnik Črešnar, K., Maroh, B. and Slemenik Perše, L., "Rheological Behaviour of Highly Filled Materials for Injection Moulding and Additive Manufacturing: Effect of Particle Material and Loading," Applied Sciences, Vol. 10 No. 22, pp. 7993, 2020.

[3] Muthiah, R.M., Krishnamurthy, V.N. and Gupta, B.R., "Rheology of HTPB Propellant. I. Effect of Solid Loading, Oxidizer Particle Size, and Aluminum Content," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 44, No. 11, pp. 2043-2052, 1992.

[4] Bandgar, B.M., Mukundan, T., Muthiah, R., Sharma, K. and Krishnamurthy, V.N., "Rheological Characterization and Modeling of Composite Propellant Slurry," 2003.

[5] Zhang, Q., Shu, Y., Liu, N., Lu, X., Shu, Y., Wang, X., Mo, H. And Xu, M., "Hydroxyl Terminated Polybutadiene: Chemical Modification and Application of These Modifiers in Propellants and Explosives," Central European Journal of Energetic Materials, Vol. 16, No. 2, pp. 153-183, 2019.

[6] Zhang, P., Tan, W., Zhang, X., Chen, J., Yuan, J. and Deng, J., "Chemical Modification of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene and Its Application in Composite Propellants," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 60, No. 10, pp. 3819-3829, 2021.

[7] Quagliano Amado, J.C., Ross, P.G., Mattos Silva Murakami, L. and Narciso Dutra, J.C., "Properties of Hydroxyl - Terminal Polybutadiene (HTPB) and Its Use as A Liner and Binder for Composite Propellants: A Review of Recent Advances," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 47, No. 5, P.E 202100283, 2022.

[8] Lysien, K., Stolarczyk, A. And Jarosz, T., "Solid Propellant Formulations: A Review of Recent Progress and Utilized Components," Materials, Vol. 14, No. 21, P. 6657, 2021.

[9] Prasad, C.H., Arunachalam, V. and Ranganathan, V., "Effect of the Formulation of Ingredients and the Process Parameters on the Fracture Toughness of HTPB Based Composite Solid Propellant." Journal of Energy and Chemical Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 94-105, 2014.

[10] John, T., "Studies on Burning Rates of Aluminum, Magnesium and Their Alloy Based Fuel Rich Propellants for Integrated Rocket Ramjet Applications," M.Sc. Thesis, Poona University (India), 1988.

[11] Athawale, B.K., "Studies on Fuel Rich Metallized Solid Rocket Propellants," Ph.D. Thesis, Savitribai Phule Pune University (India), 1995.

[12] Lade, R., Wasewar, K., Sangtyani, R., Kumar, A., Peshwe, D. and Shende, "Effect of Aluminium Nanoparticles on Rheology of AP Based Composite Propellant: Experimental Study and Mathematical Modelling," Molecular Simulation, Vol. 47, No. 6, pp.526-535, 2021.

[13] Restasari, A., Budi, R.S. and Hartaya, K., "Pseudoplasticity of Propellant Slurry with Varied Aluminium Content for Castability Development," In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1005, No. 1, P. 012034). Iop Publishing, 2018.

[14] Rueda, M.M., Auscher, M.C., Fulchiron, R., Périé, T., Martin, G., Sonntag, P. and Cassagnau, P., "Rheology and Applications of Highly Filled Polymers: A Review of Current Understanding. Progress in Polymer Science, Vol. 66, pp. 22-53, 2017.

[15] Pang, W., "Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects," CRC Press, 2019.

[16] Barghamadi, M. and Ghasemi, I., "Rheology of Highly Filled Polymers," In Persian, Basparesh, Vol. 10, No. 4, pp. 16-30, 2021.

[17] Esapur, A. and Kebritchi, A., "Chemorheological Investigation on The Effect of Three Polymerization Retardants on Hydroxyl Terminated Poly butadiene-based Polyurethane-Forming Rate," In Persian, Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering, Vol. 7, No. 1, pp.17-31, 2023.

[18] Erişken, C., Göçmez, A., Yilmazer, Ü., Pekel, F. and Özkar, S., "Modeling and Rheology of HTPB Based Composite Solid Propellants," Polymer Composites, Vol. 19, No. 4, pp.463-472, 1998.

[19] Kukla, C., Duretek, I., Gonzalez-Gutierrez, J. and Holzer, C., "Rheology of Highly Filled Polymers," Polymer Rheology, pp.153-173, 2018.

[20] Mahanta, A.K., Dharmsaktu, I. and Pattnayak, P.K., "Rheological Behaviour of HTPB-Based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate," Defence Science Journal, Vol. 57, No. 4, pp.435-442, 2007.

[21] Abdillah, L.H., Winardi, S., Sumarno, S. and Nurtono, T., "Effect of Mixing Time to Homogeneity of Propellant Slurry," IPTEK Journal of *Proceedings Series*, (1), pp.94-98, 2018.

[22] Da Cunha, B.C.C. And Rocco, J.A.F.F., "The Influence of the Type and Size of the Reactor and The Influence of the Heating Interruption During Curing on The Solid Composite Propellant Properties. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 139, No. 6, P.51609, 2022.

[23] Abdillah, L.A., Restasari, A., Hartaya, K. And Budiman, Y., "The Selection of Composite Solid Propellant Process Condition Based on Flow Characteristics of Propellant Slurry," In AIP Conference Proceedings, Vol. 2226, No. 1. AIP Publishing, 2020.

[24] Muthiah, R.M., Manjari, R., Krishnamurthy, V.N. And Gupta, B.R., "Effect of Temperature on the Rheological Behavior of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Propellant Slurry," Polymer Engineering & Science, Vol. 31, No. 2, pp.61-66, 1991.

[25] Muthiah, R., Manjari, R., Krishnamurthy, V.N. And Gupta, B.R., "Rheology of HTPB Propellant: Effect of Mixing Speed and Mixing Time," Defence Science Journal, Vol. 43, No. 2, pp.167-172, 1993.

[26] Mohamad, T.N.H., Kebritchi, A., Niazi, M.R. and Mombini, J., "Effect of Curing Agent, Temperature, and Catalyst on Physical-Mechanical Properties of HTPB-Based Highly-filled Composite," In Persian, IQBQ; Vol. 3, No. 4, pp.25-42, 2020.

[27] Kangooie, M. And Farsani, R, "Investigating The Mechanical Behavior and Microstructure of Basalt Fibers-Aluminum Composite Fabricated by Thixomixing Method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp.2184-2192, 2023.

[28] Wu, Y., Li, Z., Ji, Y.C. and Lu, R., "Experimental Study of Rheological Properties of Solid Propellant Slurry at Low-Shear Rate and Numerical Simulation," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 137, No. 42, P.49287, 2020.

[29] Sapozhnikov, I. and Chernov, V., "Rheological Properties of Composite Polymer Liner Based on Hydroxyl-Terminated Polybutadiene," Journal of Aerospace Technology and Management, Vol. 12, P.E 2220, 2020.