Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iranian Journal of Polymer Science and Technology
Vol. 27, No. 4, 313-324
October-November 2014
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

Effect of Alumina Nanoparticles on the Rheological Behavior of Aluminum-Binder Mixtures for Powder Injection Molding

Hassan Abdoos[1], Hamid Khorsand[1*], and Ali Akbar Yousefi[2]

1. Faculty of Material Science and Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, P.O. Box: 19395-1999, Tehran, Iran
2. Department of Plastics, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received 10 December 2013, accepted 31 May 2014

ABSTRACT

Preparation of appropriate powder-binder mixtures is the crucial step of powder injection molding process. Hence, the rheological properties of powder-binder mixture are important factors in production of sound parts using powder injection molding. Nowadays, the use of nanoparticles in powder injection molding is increasing due to the improved properties and dimensional precision of the final parts. On the other hand, nanoparticles can initiate problems such as agglomeration and loss of rheological properties and homogeneity. In the present study, the rheological behavior of aluminum mixtures containing nanoalumina particles was investigated. Two powder loadings of aluminum powder (54 vol% and 60 vol%), in which 0, 3, 6 and 9 wt% of aluminum was replaced with nanoalumina, were used. The powder systems were blended with the molten binder system in a banbury internal mixer and the rheological properties of the resulting mixtures were evaluated. All feedstocks showed pseudo-plastic behavior. The presence of nanoparticles increased the viscosity of feedstocks. Due to overwhelming particles cohesion by hydrodynamic forces, the viscosity of the mixtures decreased at high shear rates. Tap density results confirmed an improvement in packing compressibility of the mentioned powders. Shear rate sensitivity decreased with incorporation of nanoparticles into the mixtures. This phenomenon improved the injection capability through further reduction in viscosity.

Keywords:
powder injection molding,
feedstock,
polymeric binder,
alumina nanoparticles,
rheology

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hkhorsand@kntu.ac.ir

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

اثر نانوذرات آلومینا بر رفتار رئولوژیکی مخلوط‌های آلومینیم و محمل پلیمری برای قالب‌گیری تزریقی

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و هفتم، شماره ۴،
صفحه ۳۲۴-۳۱۳، ۱۳۹۳
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

حسن عبدوس[۱]، حمید خرسند[۱*]، علی‌اکبر یوسفی[۲]

۱- تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵
۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه پلاستیک، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۹۲/۹/۱۹، پذیرش: ۹۳/۳/۱۰

چکیده

تهیه مخلوط‌های پودر - محمل پلیمری و بررسی عوامل مؤثر بر رفتار رئولوژیکی آنها از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو برای تولید قطعات سالم و بدون نقص به روش قالب‌گیری تزریقی پودر به‌شمار می‌آید. امروزه، استفاده از نانوذرات با هدف بهبود خواص و افزایش دقت ابعادی در قالب‌گیری تزریقی اهمیت شایانی یافته است. از طرفی، ویژگی ذاتی آنها می‌تواند مشکلاتی را از قبیل تشکیل کلوخه، تضعیف خواص رئولوژیکی و کاهش همگنی در مخلوط‌های پودر - پلیمر به همراه داشته باشد. در مطالعه حاضر، رئولوژی این مخلوط‌ها برای پودر آلومینیم با تأکید بر اثر وجود نانوذرات آلومینا بحث و بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا خوراک با بارگذاری کل پودر ۵۴ و ۶۰٪ حجمی محتوی ۰، ۳، ۶ و ۹٪ وزنی نانوذرات آلومینا در سامانه محمل مناسب تهیه شد. بررسی نتایج آزمون‌های رئولوژیکی نشان می‌دهد، همه خوراک‌ها رفتار شبه‌پلاستیک، یعنی کاهش گرانروی به ازای افزایش سرعت برش را دارند. همچنین، وجود نانوذرات در مخلوط‌های پودر - محمل پلیمری، افزایش گرانروی را به همراه دارد. در سرعت‌های برش زیاد، گرانروی مخلوط‌ها، به دلیل غلبه نیروهای هیدرودینامیکی بر نیروی چسبندگی بین ذرات در کلوخه‌ها و افزایش چگالی فشردگی، کاهش می‌یابد. انجام آزمون چگالی‌سنجی ارتعاشی، بهبود قابلیت فشردگی را در مخلوط‌های حاوی نانوذرات تأیید می‌کند. با وجود نانوذرات می‌توان به کاهش عامل حساسیت به سرعت برش اشاره کرد که تزریق‌پذیری را با کاهش بیشتر گرانروی در اثر اعمال تنش برشی بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

قالب‌گیری تزریقی پودر،
خوراک،
محمل پلیمری،
نانوذرات آلومینا،
رئولوژی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
hkhorsand@kntu.ac.ir

مقدمه

موفقیت در تولید قطعات از راه قالب‌گیری تزریقی و ساخت نمونه‌های عاری از عیوب، به ویژگی‌های مخلوط پودر- محمل پلیمری، به عنوان خوراک ماشین تزریق، وابستگی زیادی دارد [۱]. ویژگی سامانه پلیمری، نسبت حجمی بارگذاری پودر جامد (powder loading) و روش اختلاط از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که بر رفتار رئولوژیکی مخلوط‌های پودر - پلیمر اثرگذارند. همچنین، ویژگی‌های خوراک حین قالب‌گیری به‌طور قابل ملاحظه‌ای به وسیله خواص پودر پایه مانند چگالی، اندازه متوسط ذرات، توزیع اندازه و شکل آنها تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲]. انتخاب مناسب عوامل مزبور نکته کلیدی و با اهمیتی در دستیابی به مخلوطی یکنواخت، عاری از ناهمگنی و دارای خواص مناسب است [۳]. از آنجا که عیوب و نواقص ایجاد شده حین فراورش و تهیه خوراک، در هیچ یک از مراحل بعدی جبران‌شدنی نیست، بنابراین این مرحله در تولید قطعات به روش قالب‌گیری تزریقی بسیار حساس و بحرانی است [۴].

امروزه به‌کارگیری نانوذرات در فرایند قالب‌گیری تزریقی به دلیل قابلیت مناسب آنها در تسهیل تف‌جوشی، ایجاد ریزساختارهای ظریف، بهبود رواداری ابعادی و ارتقای خواص بسیار مورد توجه است [۵]. برای مثال، استفاده از نانوذرات در قالب‌گیری تزریقی پودر می‌تواند به‌طور قابل توجهی باعث کاهش دمای تف‌جوشی در اثر ازدیاد نیروی محرکه آن، به‌واسطه افزایش سطح ذرات پودر شود [۶]. از سوی دیگر، ذراتی که قطر کمتر از ۱۰۰ nm دارند، دارای نسبت سطح به حجم بیشتری بوده و از این‌رو خواص ذاتی متفاوتی را بروز می‌دهند. از مهم‌ترین این خواص می‌توان به مساحت سطح و جاذبه سطحی زیاد اشاره کرد [۶،۷]. نانوذرات به‌طور عمومی رفتار فشرده‌شدن ضعیفی را نشان می‌دهند. افزون بر این، تمایل ذرات ریز به کلوخه‌شدن موجب تضعیف خواص رئولوژیکی و نیز کاهش همگنی مخلوط‌های حاوی نانوذرات می‌شود که لزوم مطالعه و تعیین مقدار اثر ذرات مزبور را بر خواص خوراک مدنظر یادآوری می‌کند.

اثر وجود ذرات مختلف با ابعاد میکرومتر و نانومتر بر رفتار رئولوژیکی مخلوط‌های پودر - پلیمر و فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر، توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است [۱۱-۵،۸]. Onbattuvelli و همکاران [۵]، اثر افزودن نانوذرات به مخلوط‌های پودر - پلیمر محتوی SiC و AlN را از لحاظ مقدار فشردگی و رفتار رئولوژیکی بررسی کردند. آنها برای کسر حجمی مشخص پودر، گزارش دادند که مخلوط‌های پودر - پلیمر دوقله‌ای متشکل از ذرات میکرومتری و نانومتری گرانروی کمتری در سرعت‌های برش برابر در مقایسه با مخلوط‌های تک‌قله‌ای حاوی پودرهای میکرومتری دارند. همچنین Khakbiz و همکاران [۹]، اثر ذرات افزودنی تیتانیم کاربید (TiC) را بر رفتار رئولوژی و پایداری خوراک محتوی فولاد ضدزنگ با مطالعه تجربی ارزیابی کردند. Kim و همکاران [۱۰] رفتار رئولوژیکی و تف‌جوشی پودر مولیبدن نانوساختار را ارزیابی و با پودر تجاری میکرومتری مولیبدن مقایسه کردند. در مطالعه مزبور، مقدار بارگذاری پودر برای پودرهای نانومتری و میکرونی با رئومتر گشتاوری (torque rheometer) معین و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد، برای پودر نانوساختار مقدار بارگذاری پودر قابل اعمال در مقایسه با پودر میکرونی کمتر است. همچنین، Olhero و Ferreira [۱۱] نسبت‌های مختلفی از پودر سیلیکای کلوئیدی نانومتری را به پودرهای سیلیکای درشت‌تر افزودند و اثر آنها را بر رفتار رئولوژیکی مخلوط‌های پودر- پلیمر مطالعه کردند. نتایج مؤید این نکته است که خواص رئولوژیکی با توزیع اندازه ذرات تحت تأثیر قرار می‌گیرد و گرانروی مخلوط‌ها با افزایش مقدار ذرات ریز، افزایش می‌یابد. این موضوع از نظر کسر حجمی ذرات ریزی که می‌توانند به مخلوط افزوده شوند، موجب اعمال محدودیت می‌شود.

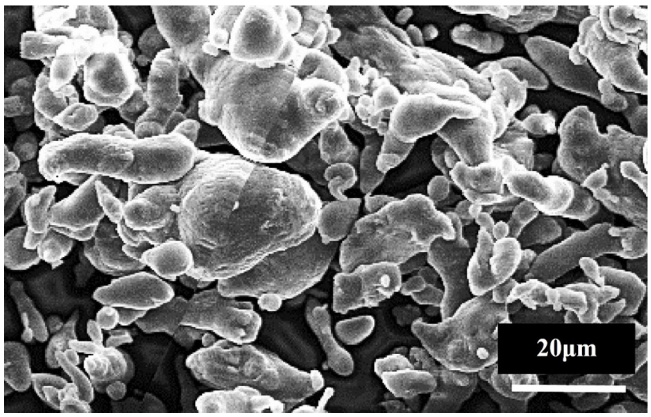
هرچند تولید قطعات از آلومینیم و آلیاژهای آن با قالب‌گیری تزریقی پودر توسط برخی از پژوهشگران [۱۴-۱۲] مطالعه شده است، اما نبود مطالعه کامل درباره خواص رئولوژی خوراک محتوی پودر آلومینیم به‌وضوح احساس می‌شود. بنابراین، در مطالعه حاضر در نظر است تا خواص رئولوژیکی مخلوط پودر آلومینیم و محمل پلیمری مناسب به همراه اثر وجود نانوذرات آلومینا بر این خواص بررسی شود. ارزیابی و مقایسه تغییرات گرانروی، به‌عنوان مهم‌ترین عامل اثرگذار بر خواص رئولوژی از جمله مهم‌ترین موضوع‌های مطالعه حاضر به‌شمار می‌آید.

تجربی

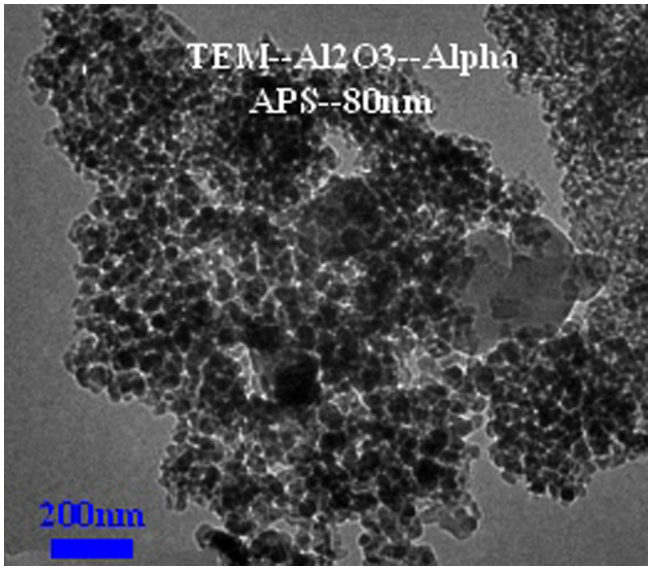
مواد

مخلوطی از پودرها با خلوص تجاری شامل آلومینیم، قلع و منیزیم به شکل از پیش مخلوط شده و با ترکیب Al-2Sn-1Mg (wt٪) به‌عنوان ماده اولیه در پژوهش حاضر استفاده شدند. تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر مزبور در شکل ۱ نشان داده شده است.

پودر آلومینای استفاده شده دارای اندازه متوسط ۸۰ nm (شکل ۲) با خلوص بیش از ۹۹٪ محصول شرکت US Research Nanomaterials Inc. بود.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از پودر استفاده شده.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از پودر نانوآلومینا [۱۵].

دستگاه‌ها

آزمون‌های رئولوژیکی با رئومتر چرخشی Anton Paar MCR 300 انجام شد. داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات با دستگاه Malvern (ZEN3600) به‌دست آمد. مخلوط‌کن Brabender, W50 برای تهیه مخلوط‌ها به کار گرفته شد.

جدول ۲- توزیع اندازه ذرات و عامل شیب توزیع در مخلوط پودر اولیه.

d_{10} (µm)	d_{50} (µm)	d_{90} (µm)	S_w
۱۲	۲۵	۵۲	۴/۰۲

روش‌ها

ترکیب شیمیایی پودر آلومینیم و چگالی‌های پودر اولیه در جدول ۱ آمده است. چگالی ظاهری و چگالی ارتعاشی پودرها به ترتیب مطابق استانداردهای MPIF 04 [۱۶] و MPIF 46 [۱۷] اندازه‌گیری شدند.

داده‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات حاصل از دستگاه Malvern (ZEN3600) در جدول ۲ آمده است. d_{10} و d_{90} نشان‌دهنده گستردگی توزیع اندازه ذرات و d_{50} نمایانگر اندازه متوسط آنهاست. S_w عامل شیب توزیع یا شیب منحنی توزیع تجمعی نرمال لگاریتمی است که از معادله (۱) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$S_W = \frac{2.56}{\log\left(\frac{d_{90}}{d_{10}}\right)} \qquad (۱)$$

مقادیر زیاد شیب توزیع (مثلاً ۷) متناسب با توزیع اندازه ذرات باریک و مقادیر کم آن (مثلاً ۲) متناسب با توزیع اندازه ذرات عریض است. پودرهای استفاده شده در پژوهش حاضر با شیب توزیع در حد متوسط و معادل ۴/۰۲ از نظر چگالی فشردگی برای به‌کارگیری در قالب‌گیری تزریقی، قابل قبول هستند.

اختلاط پودرهای آلومینیم و نانوذرات آلومینا با آسیاب پرانرژی مجهز به محفظه پلی‌اتیلنی انجام شد. در جدول ۳، مشخصات اجزای سامانه محمل آمده است. این سامانه شامل سه جزء پلی‌پروپیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید به‌عنوان پیکره پلیمری، موم پارافین و استئاریک اسید است. ترکیب مزبور به‌طور موفقیت‌آمیزی برای تولید قطعات به روش قالب‌گیری تزریقی توسط سایر پژوهشگران نیز به‌کار گرفته شده است [۵،۱۴،۱۹]. گفتنی است، سامانه‌های پلیمری پایه مومی، به دلیل فراورش و روش چسب‌زدایی آسان از پرکاربردترین ترکیبات

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی پودر آلومینیم.

چگالی ارتعاشی (g/cm^3)	چگالی ظاهری (g/cm^3)	چگالی (g/cm^3)	سایر مواد	آهن	سیلیسیم	آلومینیم
۱/۴۶±۰/۰۱	۰/۹۵±۰/۰۲	۲/۷۳	حداکثر ۰/۲۰	حداکثر ۰/۱۵	حداکثر ۰/۱۵	۹۹/۵

جدول ۳- مشخصات اجزای سامانه محمل استفاده شده در آزمون‌ها.

ماده	علامت اختصاری	تأمین‌کننده	ساختار شیمیایی	چگالی (g/cm^3)	دمای ذوب (°C)
پلی‌پروپیلن	PP	کیمیا جاوید	$(C_3H_6)_n$	۰/۹۳	۱۶۸
موم پارافین	PW	احسان شیمی	C_nH_{2n+2}	۱/۱۹	۶۰
استئاریک اسید	SA	پارس کیمیا	$C_{18}H_{36}O_2$	۰/۹۵	۶۸

استفاده شده در قالب‌گیری تزریقی پودر به‌شمار می‌آیند [۲۲-۲۰]. در پژوهش حاضر برای تعیین ترکیب مناسب، محمل‌هایی با مقادیر متفاوت از پلی‌پروپیلن و موم پارافین، مطابق جدول ۴ تهیه شدند. هریک از اجزا، صرف‌نظر از مقدار آنها، نقش ویژه‌ای را در سامانه محمل ایفا می‌کنند. پلی‌پروپیلن به‌عنوان پلیمر اصلی مطرح است که وظیفه حفظ و نگه‌داری شکل قطعه را حین فرایند چسب‌زدایی و پیش از تف‌جوشی بر عهده دارد و آخرین جزء است که از ساختار قطعه خارج می‌شود. موم پارافین برای روان‌کنندگی افزوده می‌شود که امکان افزایش مقدار بارگذاری پودر را با کاهش گرانروی فراهم می‌سازد. همچنین، استئاریک اسید به‌عنوان ماده سطح‌فعال به سامانه اضافه می‌شود.

پس از تعیین ترکیب سامانه محمل، مخلوط‌های مدنظر با استفاده از پودر آلومینیم، نانوذرات آلومینا و محمل‌های پلیمری به کمک مخلوط‌کن مطابق جدول ۵ در دو بارگذاری پودر ۵۴ و ٪۶۰ حجمی (نسبت حجمی پودر به کل حجم پودر و نیز سامانه محمل) تهیه شدند. دمای ۱۷۵°C تا ۱۸۵°C، سرعت ۳۵ rpm تا ۵۰ rpm و زمان ۱۵ min تا ۴۵ min برای تهیه مخلوط‌های مختلف پس از بهینه‌سازی استفاده شدند. همچنین، تغییرات مقدار گشتاور حین اختلاط برای ترکیبات مختلف ثبت شد. شکل ۳ تصویر پودر استفاده شده و سامانه محمل را پیش و پس از اختلاط نشان می‌دهد. آزمون‌های رئولوژیکی با رئومتر چرخشی انجام شد.

جدول ۴- سامانه‌های محمل تهیه شده با مقادیر مختلف پلیمر.

نام اختصاری	مقدار (٪v)		
	موم پارافین	پلی‌پروپیلن	استئاریک اسید
B1	۵۰	۴۵	۵
B2	۵۵	۴۰	۵
B3	۶۰	۳۵	۵
B4	۶۵	۳۰	۵

نتایج و بحث

تعیین ترکیب مناسب سامانه محمل

رئومتری گشتاوری و آزمون‌های رئولوژیکی برای تعیین نسبت مناسب هر یک از اجزای سامانه محمل به‌کار گرفته شد. نمودار تغییرات گشتاور برحسب زمان، حین اختلاط، رئونگاشت نامیده می‌شود [۳]. در شکل ۴ نمونه‌ای از رئونگاشت حاصل از اختلاط محمل‌های پلیمری آمده است. شرایط پایدار که همراه با عدم تغییر گشتاور با زمان است، همگن‌شدن مخلوط را نشان می‌دهد.

شکل ۵، مقادیر گشتاور حالت پایا را برای ترکیبات مختلف برحسب مقدار پارافین موم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر گشتاور حالت پایا با افزایش مقدار موم پارافین، بر اثر افت گرانروی، کاهش می‌یابد. بررسی‌ها حین آزمون‌های اختلاط نشان می‌دهد، ترکیب حاوی بیشترین مقدار پارافین (B4) گرانروی بسیار کمی دارد، به‌گونه‌ای که این موضوع حتی عملیات اختلاط و همگن‌کردن آن را با مشکل مواجه می‌سازد. رفتاری مشابه برای مخلوط پلی‌اتیلن با چگالی زیاد (HDPE) و مقادیر زیاد موم پارافین گزارش شده است [۲۳].

جدول ۵- مشخصات و علائم اختصاری خوراک مورد آزمون.

علامت اختصاری	ترکیب پودر
Al-54	پودر اولیه[1]
Al-3NP-54	پودر اولیه و ٪۳ وزنی نانوذرات آلومینا
Al-6NP-54	پودر اولیه و ٪۶ وزنی نانوذرات آلومینا
Al-9NP-54	پودر اولیه و ٪۹ وزنی نانوذرات آلومینا
Al-60	پودر اولیه[2]
Al-3NP-60	پودر اولیه و ٪۳ وزنی نانوذرات آلومینا
Al-6NP-60	پودر اولیه و ٪۶ وزنی نانوذرات آلومینا
Al-9NP-60	پودر اولیه و ٪۹ وزنی نانوذرات آلومینا

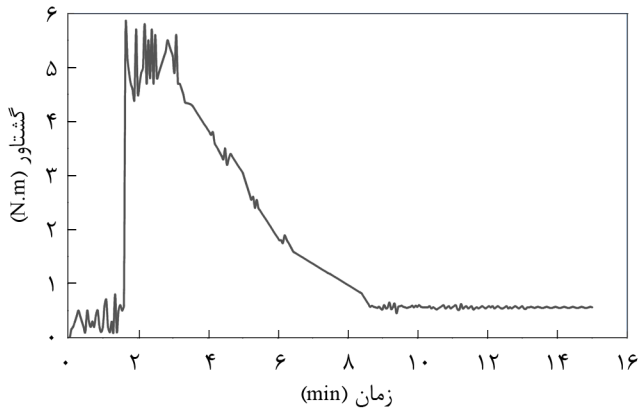
(۱) ٪۵۴ و (۲) ٪۶۰ حجمی بارگذاری پودر.

(الف)

(ب)

(ج)

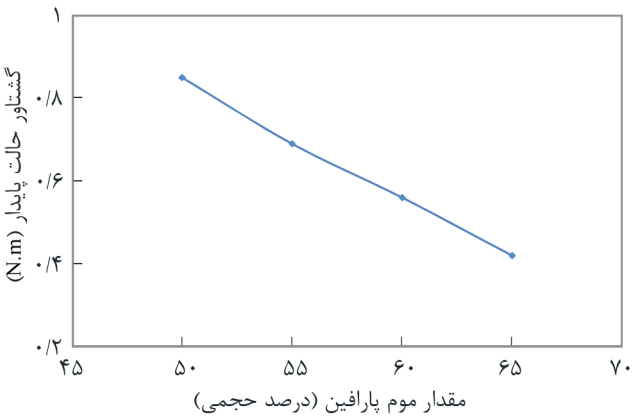
شکل ۳- تصاویر: (الف) مواد اولیه شامل پودر و اجزای سامانه محمل، (ب) سامانه محمل و پودر مخلوط شده و (ج) خوراک پس از اختلاط و خردشدن.



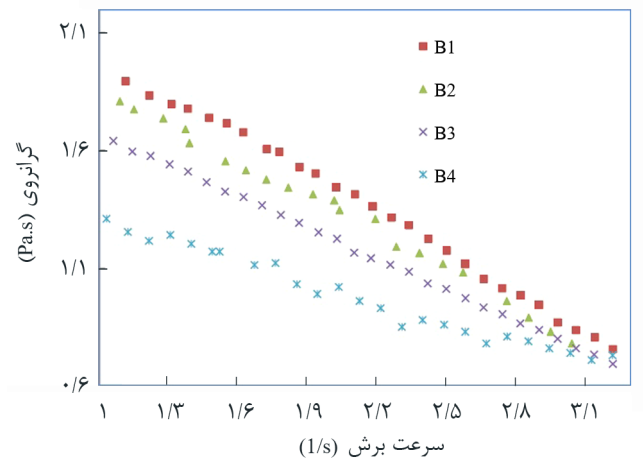
شکل ۴- نمودار گشتاور برحسب زمان برای ترکیب B3.

مقادیر گرانروی برحسب سرعت برش در مقیاس لگاریتمی برای ترکیبات مختلف سامانه محمل در شکل ۶ نشان داده شده است. در همه موارد گرانروی با افزایش سرعت برش، کاهش می‌یابد. این رفتار که رفتار غیرنیوتنی، رقیق‌شدن برشی یا شبه‌پلاستیک نامیده می‌شود، برای تولید قطعات به روش فرایند قالب‌گیری تزریقی مناسب و مطلوب است [۲۳]. افزون بر این، مقدار گرانروی با افزایش مقدار موم پارافین، کاهش می‌یابد. هرچند موم پارافین موجب کاهش گرانروی سامانه محمل، افزایش تکرارپذیری و تسهیل فرایند پرشدن قالب می‌شود، اما مقادیر بیش از حد آن نیز در ترکیب محمل‌ها توصیه نمی‌شود [۱۹،۲۴].

از اصلی‌ترین مشکلات ناشی از این پدیده می‌توان به گرانروی بسیار کم و غیرقابل کنترل حین قالب‌گیری و تغییرشکل قطعه هنگام حذف پلیمرها در مرحله چسب‌زدایی اشاره کرد. کاهش چشمگیر گرانروی برای سامانه پلیمری محتوی پلی‌اتیلن در اثر افزایش موم، پیش از این نیز توسط فیروزی و همکاران [۲۱] گزارش شده



شکل ۵- کاهش مقدار گشتاور حالت پایا به ازای افزایش مقدار موم پارافین برای ترکیبات جدول ۵.

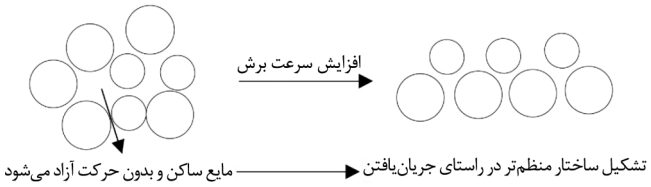


شکل ۶- گرانروی سامانه‌های محمل به ازای سرعت برش.

است. در مطالعه پیش رو، گرانروی کم، غیرقابل کنترل و ناپایدار در ترکیب دارای ٪۶۵ حجمی پارافین موم (B4) مشاهده شد (شکل ۶). بنابراین، ترکیب محمل محتوی ٪۶۰ حجمی موم پارافین (B3) که رفتار یکنواخت‌تر و با ثبات‌تری دارد، برای تهیه خوراک استفاده شد. شایان ذکر است، Kong و همکاران ترکیبی مشابه، شامل ٪۶۰ حجمی موم پارافین و ٪۴۰ حجمی پلی‌پروپیلن را برای قالب‌گیری تزریقی فولاد ضدزنگ 316L استفاده کرده‌اند [۱۹].

اثر نانوذرات بر رفتار رئولوژیکی خوراک

در فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر، مرحله قالب‌گیری برای تولید قطعات سالم بسیار مهم بوده و موفقیت در این مرحله به خواص رئولوژیکی خوراک مرتبط است. جریان‌یافتگی ناهمگن و جدایش پودر از محمل موجب پیدایش عیوبی می‌شود که ترک‌خوردگی و تغییرشکل



شکل ۷- تغییر آرایش ذرات و کاهش گرانروی در اثر اعمال تنش برشی [۱۱].

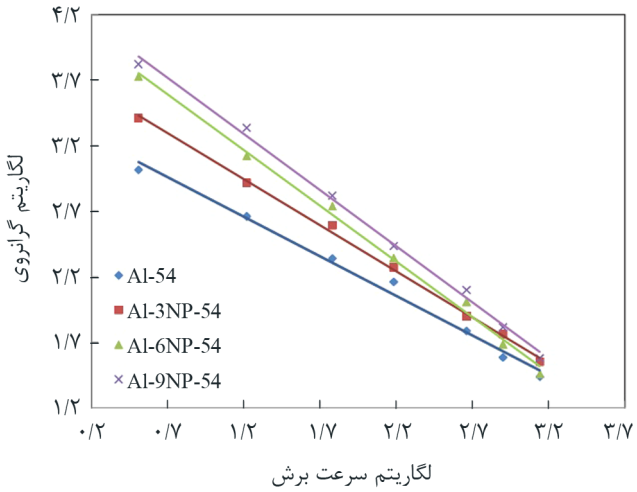
قطعه تولیدی حین چسب‌زدایی و تف‌جوشی را درپی دارد. از سوی دیگر، گرانروی تنها عامل پیش‌بینی‌کننده کیفیت خوراک است که موفقیت در مرحله تزریق و تولید نمونه بدون عیب را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در جدول ۶، نتایج حاصل از اندازه‌گیری گرانروی برای مخلوط‌های مختلف حاوی پودر آلومینیم و پودر نانوذرات آلومینا در بارگذاری‌های ۵۴ و ٪۶۰ حجمی و در سرعت‌های برش متفاوت آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار گرانروی برای ترکیب خاص با افزایش سرعت برش کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش نانوذرات به دلیل فراهم‌آوردن سطح بیشتر و درنتیجه ایجاد اصطکاک بیشتر در مخلوط، موجب افزایش گرانروی در یک بارگذاری پودر معین، می‌شود.

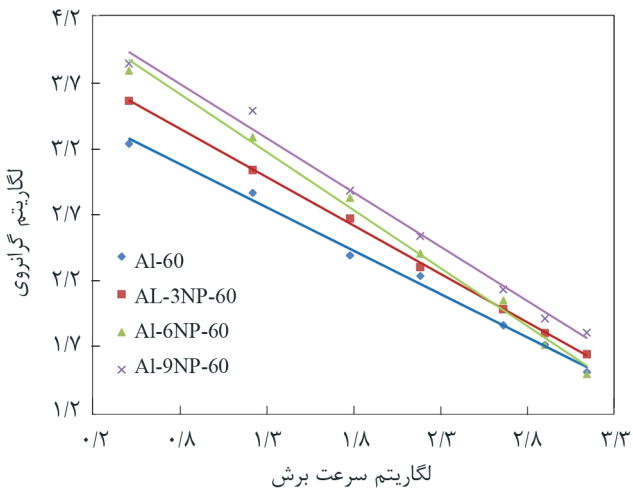
کاهش مقدار گرانروی به ازای افزایش سرعت برش، همان‌طور که درباره سامانه‌های محمل نیز بیان شد، رفتار شبه‌پلاستیک یا رقیق‌شدن برشی نامیده می‌شود [۳،۱۸،۲۳،۲۴]. این خاصیت برای پرشدن کامل قالب با اعمال تنش‌های برشی مطلوب است. بدین معنی که با اعمال تنش برشی و گرما در ماشین تزریق، مقدار گرانروی خوراک کاهش می‌یابد. این موضوع ضمن ایجاد جریان‌یافتگی کافی در محفظه قالب، موجب می‌شود تا مخلوط پودر - پلیمر به‌راحتی به شکل

جدول ۶- گرانروی مخلوط‌های پودر- محمل‌های پلیمری با بارگذاری‌های ۵۴ و ٪۶۰ حجمی.

نام مخلوط	سرعت برش (s^{-1})						
	۳/۲۳	۱۶/۶	۶۰/۴	۱۵۳	۴۶۰	۷۹۸	۱۳۹۰
Al-54	۱۰۴۰/۲	۴۵۷/۸	۲۱۸/۵	۱۴۵/۱	۶۱/۳	۳۸/۵	۲۷/۴۱
Al-60	۱۷۱۸/۳	۷۳۵/۴	۲۴۹/۱	۱۷۴/۵	۷۴/۲	۵۳/۱	۳۳/۰
Al-3NP-54	۲۵۷۱/۶	۸۲۳/۷	۳۹۲/۴	۱۸۷/۳	۷۹/۱	۵۷/۸	۳۵/۶
Al-3NP-60	۳۶۱۰/۸	۱۰۹۰/۳	۴۷۰/۷	۲۰۳/۶	۹۸/۲	۶۴/۷	۴۵/۰
Al-6NP-54	۵۳۲۱/۹	۱۳۲۷/۰	۵۴۸/۱	۲۱۹/۸	۱۰۱/۴	۴۸/۳	۲۸/۷
Al-6NP-60	۶۱۰۰/۸	۱۹۲۰/۱	۶۷۴/۵	۲۵۷/۲	۱۱۴/۰	۵۲/۸	۳۱/۹
Al-9NP-54	۶۶۲۸/۱	۲۱۶۷/۴	۶۵۹/۱	۲۷۱/۳	۱۲۵/۷	۶۵/۲	۳۷/۸
Al-9NP-60	۶۸۹۱/۲	۳۰۴۵/۴	۷۶۳/۱	۳۴۶/۷	۱۳۷/۹	۸۳/۴	۶۵/۳



شکل ۸- لگاریتم گرانروی برحسب سرعت برش برای مخلوط‌ها با بارگذاری ٪۵۴ حجمی.



شکل ۹- لگاریتم گرانروی برحسب سرعت برش برای مخلوط‌ها با بارگذاری ٪۶۰ حجمی.

مدنظر درآید. از سوی دیگر، به محض پرشدن قالب و حذف تنش برشی، گرانروی مجدداً افزایش یافته و با انجماد مخلوط، شکل قطعه به‌خوبی حفظ می‌شود. کاهش گرانروی با افزایش سرعت برش به آرایش مجدد ذرات پودر و پلیمر و ایجاد ساختار منظم‌تر ارتباط می‌یابد که طرح‌وار در شکل ۷ نشان داده شده است.

بررسی داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد، افزایش مقدار بارگذاری پودر که با کاهش مقدار سامانه محمل موجود در ترکیب همراه است، صرف‌نظر از اثر نانوذرات باعث افزایش گرانروی مخلوط‌های پودر - پلیمر می‌شود.

تغییرات گرانروی برحسب سرعت برش در مقیاس لگاریتمی برای مخلوط‌های حاوی پودر آلومینیم و نانوذرات آلومینا برای بارگذاری‌های ۵۴ و ٪۶۰ به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

شکل‌های ۸ و ۹ به‌وضوح نشان می‌دهند، در اثر افزودن نانوذرات، شکل کلی نمودار و رفتار شبه‌پلاستیک آن یعنی کاهش گرانروی به ازای افزایش سرعت برش حفظ می‌شود. همچنین، نمودارهای مزبور مؤید این نکته است که مقدار گرانروی در سرعت برش ثابت با افزودن نانوذرات آلومینا افزایش می‌یابد. این حقیقت در سرعت‌های برش کم کاملاً مشهود است. نکته مهم و قابل توجه دیگر اینکه با افزایش سرعت برش مقدار اختلاف بین گرانروی مخلوط‌های محتوی پودر آلومینیم و مخلوط‌های حاوی نانوذرات کاهش می‌یابد. در مواردی نیز، با افزایش سرعت برش گرانروی ترکیبات دارای نانوذرات از گرانروی مربوط به مخلوط‌هایی که فقط حاوی پودر پایه آلومینیم است، کمتر می‌شود. بنابراین، اثر افزودنی نانوذرات آلومینا بر گرانروی پودرهای مطالعه شده به سرعت برش وابسته است. از دلایل ممکن برای تشریح مشاهدات مزبور می‌توان به اثر افزودنی‌های نانومتری در بهبود قابلیت فشرده‌شدن ذرات اشاره کرد. این موضوع با تهیه مخلوط‌های دوقله‌ای که از ترکیب پودرهای با اندازه متفاوت تهیه شده‌اند، توسط سایر پژوهشگران بررسی و تأیید شده است [۵،۹،۱۱،۲۵].

قرارگرفتن ذرات کوچک آلومینا در فواصل خالی بین پودرهای آلومینیم موجب افزایش قابلیت فشردگی و درنتیجه بهبود خواص رئولوژیکی می‌شود. اثر مقدار چگالی فشردگی پودر بر گرانروی مخلوط‌های پودر - پلیمر را می‌توان از معادله‌های حاکم بر آنها نیز توضیح داد. مقدار بارگذاری پودر، عامل مهمی در تعیین مقدار گرانروی مخلوط‌های حاوی ذرات جامد است. از این‌رو، پژوهشگران چند مدل تجربی را براساس تشریح رابطه بین گرانروی نسبی (η_r) و مقدار کسر حجمی پودر جامد (ϕ) ارائه کرده‌اند. گرانروی نسبی به شکل نسبت گرانروی خوراک (η) به گرانروی سامانه محمل (η_b) تعریف می‌شود. Einstein [۲۶] در سال ۱۹۰۶ نشان داد، گرانروی مخلوط‌ها با افزایش مقدار پودر جامد افزایش می‌یابد:

$$\eta_r = 1 + 2.5\phi \qquad (۲)$$

این معادله فقط برای محلول‌های رقیق شامل ذرات کروی با شعاع مشخص معتبر است. پس از آن، پژوهشگران تلاش‌های بسیاری را برای پیش‌بینی تغییرات گرانروی در مخلوط‌هایی انجام دادند که شامل مقدار زیادی ذرات جامد بودند. برای مثال، می‌توان به مدل Krieger-Dougherty [۲۷] اشاره کرد:

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (۳)$$

در این معادله η_r گرانروی نسبی، ϕ کسر حجمی جامد، ϕ_m حداکثر بارگذاری جامد یا حداکثر ضریب فشردگی و $[\eta]$ گرانروی ذاتی مخلوط است. شکل ساده شده معادله (۳) به مدل Quemada [۲۸] موسوم است که به شکل معادله (۴) بیان می‌شود:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_b}\left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \quad (۴)$$

مطابق معادله (۴)، عواملی که بر نسبت ϕ/ϕ_m اثر دارند، نقش عمده‌ای در تعیین مقدار گرانروی ایفا می‌کنند. برای بارگذاری جامد مشخص، افزایش مقدار قابلیت فشردگی موجب افزایش ϕ_m می‌شود که کاهش نسبت ϕ/ϕ_m را به همراه دارد. در این شرایط کاهش گرانروی انتظار می‌رود، همان‌طور که در سرعت برش زیاد در این مطالعه مشاهده شد. به عبارت دیگر می‌توان گفت، وجود نانوذرات آلومینا در فضاهای خالی بین ذرات آلومینیم موجب افزایش ϕ_m یا همان چگالی فشردگی پودر و کاهش گرانروی در سرعت‌های برش بیشتر می‌شود. به‌طور کلی، استفاده از پودر با توزیع اندازه گسترده‌تر موجب افزایش قابلیت فشردگی و بهبود رفتار خوراک در فرایند قالب‌گیری تزریقی می‌شود. این موضوع تا زمانی برقرار است که وجود ذرات ریز موجب کلوخه‌شدن یا جدایش ذرات پودر از یکدیگر نشود. بنابراین، افزودن نانوذرات آلومینا تا زمانی که خطر کلوخه‌شدن وجود نداشته باشد، باعث افزایش چگالی فشردگی و کاهش گرانروی می‌شود. به همین علت، کاهش گرانروی مخلوط‌ها در سرعت‌های برش بیشتر با وجود نانوذرات در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

نتایج اندازه‌گیری چگالی ارتعاشی برای پودرهای حاوی نانوذرات و مقایسه مقادیر حاصل با پودر پایه، بهبود چگالی فشردگی پودرهای مزبور را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در مطالعه پیش رو، چگالی ارتعاشی از ۱/۴۶ g/cm^3 در پودر اولیه به ۱/۵۲، ۱/۶۱ و ۱/۶۳ g/cm^3 به ترتیب در مخلوط با ۳، ۶ و ۹٪ نانوذرات آلومینا، افزایش یافته است. شایان ذکر است، مقدار افزایش چگالی فشردگی برای مخلوط‌های با ۳ و ۶٪ وزنی نانوذرات آلومینا در مقایسه با مخلوط ۹٪ وزنی بیشتر است.

در سرعت‌های برش کم احتمالاً پدیده جدایش اتفاق می‌افتد و گرانروی به دلیل وجود مناطق ناهمگن غنی از پودر یا همان کلوخه‌ها افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، سرعت برش در این نواحی برای غلبه بر پدیده جدایش، از هم‌گسیختن تجمع ذرات و ایجاد مخلوط پودر – سامانه پلیمری همگن کافی نیست. رابطه‌ای معکوس بین گرانروی و نسبت فشردگی با اندازه کلوخه‌ها وجود دارد. ایجاد تنش هیدرودینامیکی حین فرایند مخلوط‌سازی موضوعی شناخته شده است. با افزایش سرعت برش، تنش هیدرودینامیکی می‌تواند بر استحکام چسبندگی کلوخه‌ها غلبه کرده و با متلاشی‌کردن آنها موجب کاهش مقدار گرانروی شود. هنگامی که سرعت برش به اندازه کافی زیاد باشد و کلوخه‌های ناشی از تجمع ذرات نیز وجود نداشته باشند، گرانروی مخلوط‌های حاوی نانوذرات می‌تواند در اثر افزایش قابلیت فشردگی، کاهش یابد [۵،۹].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاهش مقدار گرانروی برای مخلوط‌های با ۵۴٪ حجمی بارگذاری در مقایسه با مخلوط‌های ۶۰٪ حجمی در سرعت‌های برش زیاد اندکی متفاوت است. می‌توان بیان کرد، در مخلوط با بارگذاری پودر ۶۰٪ حجمی، افزودن نانوذرات از ۶٪ تا ۹٪ وزنی به‌طور قابل توجه منجر به کاهش گرانروی نمی‌شود. این موضوع را می‌توان به افزایش احتمال کلوخه‌شدن و کاهش درهم شکسته‌شدن آنها در سرعت‌های برش زیاد و در مجاورت ماده جامد بیشتر (سامانه محمل کمتر)، هنگامی که مقدار نانوذرات از ۶٪ تا ۹٪ وزنی افزایش می‌یابند، مرتبط دانست.

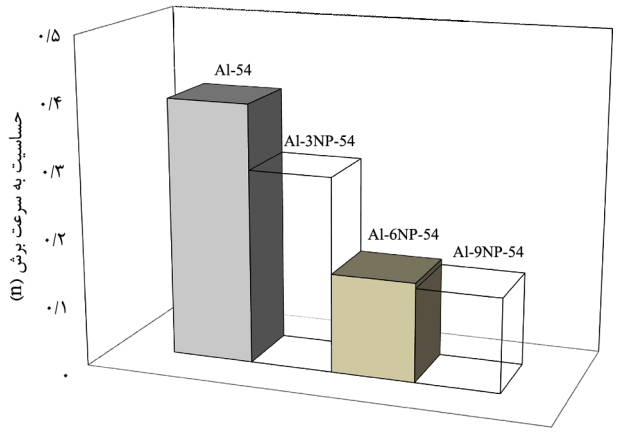
برای سیالات شبه‌پلاستیک مقادیر تنش برشی برحسب سرعت برش در مختصات لگاریتمی می‌تواند با رابطه خطی تخمین زده شود. رابطه بین تنش برشی و سرعت برش در مخلوط‌های پلیمری شبه‌پلاستیک به کمک قانون توانی یا عبارت Ostwald- De Waele به شکل معادله (۵) بیان می‌شود [۲۹]:

$$\tau = K\gamma^n \quad (۵)$$

همچنین، مهم‌ترین عامل معین‌کننده رفتار رئولوژی مخلوط‌های پودر– پلیمر که همان گرانروی است، از معادله (۶) به‌دست می‌آید [۲۹]:

جدول ۷– مقادیر حساسیت به سرعت برش (n) برای مخلوط‌های مختلف پودر– پلیمر.

مشخصه	Al-54	Al-60	Al-3NP-54	Al-3NP-60	Al-6NP-54	Al-6NP-60	Al-9NP-54	Al-9NP-60
n	۰/۳۹۷	۰/۳۴۹	۰/۲۹۸	۰/۲۷۲	۰/۱۵۲	۰/۱۲۸	۰/۱۴۴	۰/۱۸۴
R^2	۰/۹۹۱	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۴	۰/۹۹۶	۰/۹۹۱



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر حساسیت به سرعت برش برای مخلوط‌های مختلف پودر - پلیمر با بارگذاری ٪۵۴ حجمی.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \qquad (۶)$$

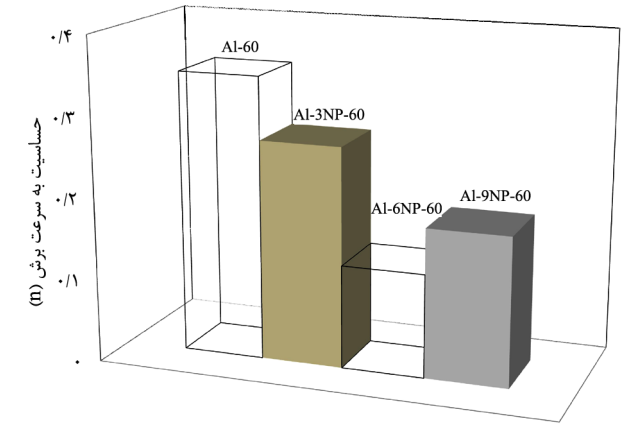
از ترکیب معادله‌های (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$\tau = K\dot{\gamma}^{n-1} \qquad (۷)$$

در این معادله‌ها τ تنش برشی، K ثابت، $\dot{\gamma}$ سرعت برش، n شاخص قانون توانی یا حساسیت به سرعت برش و η گرانروی است. برای سیالات نیوتنی مقدار n معادل یک است. بدین معنی که گرانروی این سیالات ثابت بوده و به سرعت برش بستگی ندارد. سیالات غیرنیوتنی دارای n کمتر از ۱ هستند. مقدار n معین‌کننده مقدار حساسیت به سرعت برش است. هرچه مقدار n کوچک‌تر باشد، تغییر گرانروی به ازای سرعت برش بیشتر بوده یا به عبارت دیگر مقدار حساسیت به سرعت برش زیادتر است. گرانروی خوراک‌های با n کم، سریعاً با سرعت برش کاهش یافته و از این نظر به‌ویژه برای تولید قطعات پیچیده و ظریف مناسب‌تر است [۳۰].

مقادیر n یا همان حساسیت به سرعت برش برای ترکیبات مطالعه شده که از شیب نمودارهای خطی گرانروی برحسب سرعت برش به‌دست آمده‌اند، در جدول ۷ آمده است. همچنین برای مقایسه نحوه تغییرات عامل حساسیت به سرعت برش، نمودارهای مربوط به تفکیک مقدار بارگذاری، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱رسم شده‌اند.

بررسی نتایج حاصل از محاسبه عامل حساسیت به سرعت برش، رفتار شبه‌پلاستیک همه ترکیبات را با مقدار n کمتر از ۱، تأیید می‌کند. مقادیر مزبور نبود رفتار انبساطی (dilatant) و عدم وقوع جدایش پودر - محمل پلیمری را نشان می‌دهد [۵]. همچنین، افزایش مقدار بارگذاری پودر موجب کاهش حساسیت به سرعت برش و افزایش بروز رفتار شبه‌پلاستیک می‌شود. سایر پژوهشگران نیز کاهش حساسیت به



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر حساسیت به سرعت برش برای مخلوط‌های مختلف پودر - پلیمر با بارگذاری ٪۶۰ حجمی.

سرعت برش با افزایش مقدار بارگذاری جامد را برای پودرهای فولاد ضدزنگ، آلومینا و زیرکن ارزیابی و تأیید کردند [۳،۱۸،۱۹،۲۳].

نتایج بررسی انجام شده روی پودر فولاد ضدزنگ 316L توسط Sotomayor و همکاران [۱۸] نشان می‌دهد، با کاهش مقدار ذرات ریز، عامل حساسیت به سرعت برش کاهش می‌یابد. همچنین گزارش Onbattuvelli و همکاران [۵] مؤید کاهش حساسیت به سرعت برش و افزایش رفتار رقیق‌شدن برشی در اثر افزودن نانوذرات به مخلوط‌های پودر - پلیمر AlN و SiC است. در مطالعه حاضر، نیز به‌طور کلی افزودن نانوذرات آلومینا موجب کاهش مقدار حساسیت به سرعت برش می‌شود. مقدار حساسیت به سرعت برش در بارگذاری ثابت ٪۵۴ حجمی با افزودن نانوذرات تا ٪۹ کاهش می‌یابد، در حالی که در بارگذاری ثابت ٪۶۰ حجمی این مقدار تا افزودن ٪۶ نانوذرات کاهش و سپس افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت، حالت بهینه برای مخلوط با ٪۵۴ حجمی پودر، شامل افزودن ٪۹ وزنی و برای مخلوط با ٪۶۰ حجمی پودر، افزودن ٪۶ وزنی نانوذرات آلومیناست. همان‌طور که پیش‌تر تشریح شد، افزایش تشکیل کلوخه و کاهش خردشدن آنها با افزودن نانوذرات تا ٪۹ وزنی در مخلوط با بارگذاری ٪۶۰ حجمی تا حد زیادی عامل ایجاد رفتار مزبور است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار رئولوژیکی خوراک‌های محتوی مخلوط پودر آلومینیم - نانوذرات آلومینا به همراه سامانه پلیمری مناسب، ارزیابی شد. آزمون‌های مربوط به بررسی خواص رئولوژیکی نشان داد، افزایش موم پارافین در سامانه محمل تا ٪۶۵ حجمی، موجب از

دست‌رفتن کنترل رفتار جریان در اثر کاهش زیاد گرانروی می‌شود. از این‌رو، ترکیبی متشکل از ٪۶۰ حجمی موم پارافین، ٪۳۰ حجمی پلی‌پروپیلن و ٪۵ حجمی استئاریک اسید برای تهیه مخلوط‌های پودر – پلیمر استفاده شد.

کاهش گرانروی به ازای افزایش سرعت برش برای تمام مخلوط‌های پودر – سامانه محمل مشاهده شد که نشان‌دهنده حفظ رفتار شبه‌پلاستیک یا رقیق‌شدن برشی با وجود نانوذرات است. افزایش مقدار بارگذاری پودر در سرعت‌های برش ثابت، موجب افزایش مقدار گرانروی صرف‌نظر از وجود نانوذرات می‌شود. افزودن نانوذرات آلومینا به مخلوط‌های حاوی پودر آلومینیم افزایش گرانروی را در سرعت‌های برش کم به همراه دارد. تصور می‌شود، این موضوع به وجود مناطق ناهمگن غنی از پودر یا جدایش پودر – محمل مرتبط است.

غلبه تنش‌های هیدرودینامیکی بر نیروهای چسبندگی کلوخه‌ها، در سرعت‌های برش زیاد موجب ازهم پاشیدگی آنها می‌شود. وجود نانوذرات و قرارگرفتن آنها در فضاهای خالی بین ذرات پودر آلومینیم، موجب بهبود قابلیت فشردگی و درنتیجه کاهش گرانروی در سرعت‌های برش زیاد می‌شود. نتایج آزمون چگالی‌سنجی ارتعاشی افزایش قابلیت فشردگی را در اثر افزودن نانوذرات آلومینا به پودر آلومینیم تأیید می‌کند. افزایش بارگذاری پودر موجب کاهش مقدار حساسیت به سرعت برش می‌شود. مقادیر حساسیت به سرعت برش با وجود نانوذرات در ترکیبات مطالعه شده نیز کاهش می‌یابد که برای قالب‌گیری تزریقی پودر به‌ویژه تولید قطعات پیچیده و حساس مطلوب است. از نظر رفتار رئولوژی، مقدار بهینه نانوذرات آلومینا در مخلوط‌های پودر – پلیمر برای بارگذاری‌های پودر ۵۴ و ٪۶۰ حجمی به ترتیب ۹ و ٪۶ وزنی است.

مراجع

1. Khorsand H., Yousefi A.A., and Abdoos H., Injection Molding of Powder-Polymer Mixture: Advanced Method for Production of Complex and Precise Engineering Parts, *Polymerization (In Persian),* **3**, 4-20, 2013.
2. Firouzi J., Yousefi A.A., and Ershad Langroudi A., Rheological Behaviour of Metal Powder Suspensions under Dynamic Loading, *Iran. Polym. J.*, **15**, 127-134, 2006.
3. Hidalgo J., Morales A.J., and Torralba J.M., Torque Rheology of Zircon Feedstocks for Powder Injection Molding, *J. Eur. Ceramic Soc.*, **32**, 4063-4072, 2012.
4. Supati R., Loh N.H., Khor K.A., and Tor S.B., Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding, *Mater. Lett.*, **46**, 109-114, 2000.
5. Onbattuvelli V.P., Enneti R.K., Park S.J., and Atre S.V., The Effects of Nanoparticle Addition on SiC and AlN Powder Polymer Mixtures: Packing and Flow Behavior, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.,* **36**, 183-190, 2013.
6. Kim K.H., Youn H.C., Choi C.J., and Lee B.T., Fabrication and Material Properties of Powder Injection Molded Fe Sintered Bodies Using Nano Fe Powder, *Mater. Lett.*, **61**, 1218-1222, 2007.
7. Kim K.H., Lee B.T., and Choi C.J., Fabrication and Evaluation of Powder Molded Fe-Ni Sintered Bodies Using Nano Fe-50%Ni Powder, *J. Alloy. Compd.*, **491**, 391-394, 2010.
8. Huang B., Fan J., Liang S., and Qu X., The Rheological and Sintering Behavior of W-Ni-Fe Nano-Structured Crystalline Powder, *J. Mater. Process. Tech.*, **137**, 177-182, 2003.
9. Khakbiz M., Simchi A., and Bagheri R., Analysis of the Rheological Behavior and Stability of 316L Stainless Steel-TiC Powder Injection Molding Feedstock, *Mat. Sci. Eng. A-struct.*, **407**, 105-113, 2005.
10. Kim Y., Lee S., Noh J.W., Lee S.H., Jeong I.D., and Park S.J., Rheological and Sintering Behaviors of Nanostructured Molybdenum Powder, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, **41**, 442-448, 2013.
11. Olhero S.M. and Ferreira J.M.F., Influence of Particle Size Distribution on Rheology and Particle Packing of Silica-based Suspensions, *Powder Techol.*,**139**, 69-75, 2004.
12. Liu Z.Y., Kent D., and Schaffer G.B., Powder Injection Molding of an Al-AlN Metal Matrix Composite, *Mat. Sci. Eng. A-struct.*, **513-514**, 352-356, 2009.
13. Liu Z.Y., Sercombe T.B., and Schaffer G.B., Metal Injection Molding of Aluminum Alloy 6061 with Tin, *Powder Metall.*, **51**, 78-83, 2008.
14. Ahmad F., Control of Defects in Powder Injection Molded Aluminum Matrix Composites, *Int. J. Powder Metall.*, **44**, 69-76, 2008.
15. US Research Nanomaterials, Inc., http://www.us-nano.com,

2014.

16. Standard Test Method for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, Metal Powder Industry Federation (MPIF), 04, Apparent Density of Free-Flowing Metal Powder Using tha Hall Apparatus, 2012.
17. Standard Test Method for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, Metal Powder Industry Federation (MPIF), 46, Determination of Tap Density of Metal Powder, 2012.
18. Sotomayor M.E., Varez A., and Levenfeld B., Influence of Powder Particle Size Distribution on Rheological Properties of 316L Powder Injection Molding Feedstocks, *Powder Techol.,* **200**, 30-36, 2010.
19. Kong X., Barriere T., and Gelin J.C., Determination of Critical and Optimal Powder Loadings for 316L Fine Stainless Steel Feedstocks for Micro-Powder Injection Molding, *J. Mater. Process. Tech*., **212**, 2173-2182, 2012.
20. Moballegh L., Morshedian J., and Esfandeh M., Copper Injection Molding Using a Thermoplastic Binder Based on Paraffin Wax, *Mater. Lett.*, **59**, 2832-2837, 2005.
21. Firouzi J., Yousefi A.A., and Ershad-Langroudi A., Effect of Wax Content on Properties of HDPE, *Iran. J. Polym. Sci. Technol*., *(In Persian)*, **18**, 211-218, 2004.
22. Kiyanpour M., Ahmad Mehrabi A., and Aghajani R., Studying the Effect of Different Ratio of High Density Polyethylen Wax Binder on the Mechanical Strength of Ceramic Cores Made from an Injection Molding Process, *Iran. J. Polym. Sci. Technol*. (*In Persian*), **13**, 233-237, 2001.
23. Thomas-Vielma P., Cervera A., Levenfeld B., and Varez A., Production of Alumina Parts by Powder Injection Molding with a Binder System Based on High Density Polyethylene, *J. Eur. Ceram. Soc*., **28**, 763-771, 2008.
24. Sotomayor M.E., Levenfeld B., and Varez A., Powder Injection Moulding of Premixed Ferritic and Austenitic Stainless Steel Powders, *Mat. Sci. Eng. A-struct.*, **528**, 3480-3488, 2011.
25. Hanemann T., Influence of Particle Properties on the Viscosity of Polymer–Alumina Composites, *Ceram. Int.*, **34**, 2099-2105, 2008.
26. Einstein A., On the Movement of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid Demanded by the Molecular-kinetic Theory of Heat, *Ann. Phys.*, **17**, 549-560, 1906.
27. Krieger I.M. and Dougherty T.J., A Mechanism for Non-Newtonian Flowin Suspensions of Rigid Spheres, *Trans. Soc. Rheol.* , **3**, 137-152, 1959.
28. Quemada D., Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle, *Rheol. Acta*, **16**, 82-94, 1977.
29. Chhabra R.P., *Bubbles Drops and Particles in Non-Newtonian Fluid, Taylor and Francis*, USA, 2nd ed., 18-19, 2007.
30. Agote I., Odriozola A., Gutierrez M., Santamar A., Quintanilla J., Coupelle P., and Soares J., Rheological Study of Waste Porcelain Feedstocks for Injection Moulding, *J. Eu. Ceram. Soc*., **21**, 2843-2853, 2001.