

تحلیل ابعادی و تجربی فرآیند فشار هیدرواستاتیک بالا مطالعه موردی: بکارگیری اعداد بی بعد در آزمون رئولوژیکی نشاسته ارزن

محمد علی حصارى نژاد^۱، سید مهدی میرزابابایی^{۲*}، عمر سعد توکر^۳، سمیرا یگانه زاد^۱

۱- گروه فرآوری مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
۲- گروه طراحی ماشین آلات مواد غذایی، موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
* نویسنده مسئول (m.mirzababae@rifst.ac.ir)
۳- گروه مهندسی مواد غذایی، دانشگاه ییلدیز، استانبول، ترکیه

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸

واژه‌های کلیدی

آنالیز ابعادی
باکینگهام
فشار هیدرواستاتیک بالا
نشاسته
ارزن

اغلب روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را نمی‌توان به شکل صریح از اصول بقاء و معادلاتی نظیر پیوستگی، برنولی، مونتوم یا در حالت کلی معادله ناویر - استوکس بدست آورد. برای رفع این مشکل مؤثرترین روش استفاده از اصول تحلیل ابعادی در تعیین روابط حاکم بر پدیده است. با استفاده از تحلیل ابعادی می‌توان به اعداد و پارامترهای بدون بعد دست یافت که در تعیین معادلات حاکم بر یک پدیده نقش دارند. تحلیل ابعادی، ابزاری ساده اما توانمند در مهندسی است که امکان تجزیه و تحلیل سریع سیستم‌های فیزیکی را فراهم آورده و باعث آسانتر شدن تجزیه و تحلیل مسائل پیچیده و نیز کاهش تعداد قابل ملاحظه‌ای از آزمایش‌ها از طریق دسته‌بندی متغیرها در قالب اعداد بی‌بعد می‌گردد، بالاخص در مواردی که تعداد متغیرها زیاد باشد انجام آنها بدون استفاده از روش آنالیز ابعادی غیر ممکن و بسیار پرهزینه است. به همین دلیل در این تحقیق برای اولین بار از روش تحلیل ابعادی برای بدست آوردن اعداد بی‌بعد حاکم بر فرآیند فشار بالای هیدرواستاتیک استفاده شده است، چرا که متغیرهای دخیل در این فرآیند زیاد بوده و بهترین روش برای پیدا کردن ارتباط بین آنها استفاده از ابزار آنالیز ابعادی می‌باشد. در گام بعدی و پس از شناسایی متغیرهای مؤثر با استفاده از تئوری باکینگهام اعداد بی‌بعد حاکم بر فرآیند فشار بالا بدست آورده شده است. پس از آن کمیات اندازه‌گیری شده حاصل از آزمون‌های فشار بالا، روبش فرکانس و نرخ کرنش برشی در قالب اعداد بی‌بعد که از قبل بدست آمده دسته بندی و به بررسی رفتار ماده مورد آزمایش (نشاسته ارزن) پرداخته شده است. در نتیجه با استفاده از اعداد بی‌بعد بدست آمده علاوه بر اینکه ارتباط بین متغیرها و درجه اهمیت آنها نسبت به یکدیگر مشخص گردید، برخی از ویژه‌گی‌های رفتاری مواد نیز در قالب نمودارهای بی‌بعد نمایش داده شده است که با نمودارهای متداول تفاوت رفتاری دارد. در آزمون فشار بالا مواد مورد آزمایش تحت فشار هیدرواستاتیکی بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال برای مدت زمان ۱۰ تا ۳۰ دقیقه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از آزمون فشار بالا نشان داد که ویژه-گی‌های رئولوژیکی نشاسته ارزن از جمله ویسکوزیته کمپلکس با افزایش فشار و زمان اعمال آن تغییر قابل توجهی دارند.

مقدمه

آنالیز ابعادی

اغلب روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را نمی‌توان به شکل صریح از اصول بقاء و معادلاتی نظیر پیوستگی، برنولی، مومنوم یا در حالت کلی معادلهٔ ناویر - استوکس بدست آورد. در حالت عادی برای تعیین رابطهٔ ریاضی باید روابط را طی دو مرحله و با استفاده از مدل‌سازی در آزمایشگاه تعیین نمود. مرحله نخست: کلیه متغیرهای لازم در به وجود آوردن آن پدیده تعیین گردند، مرحله دوم: برای تعیین متغیرهای حاکم بر یک پدیده و تعیین روابط میان آنها در آزمایشگاه، با تغییر دادن یک متغیر و ثابت نگه داشتن باقی متغیرها، می‌توان نحوهٔ تاثیر هر متغیر بر پدیده مورد مطالعه را سنجید. زیاد بودن تعداد متغیرها و در نتیجه زیاد بودن تعداد آزمایش‌های لازم برای تعیین مقادیر و نحوه تأثیر هر یک از متغیرها بر پدیده مورد مطالعه از مهمترین مشکلات این روش بوده که بعضاً تعداد آزمایش‌ها آنقدر زیاد است که انجام آن از لحاظ صرف وقت و هزینه غیر ممکن است. برای غلبه مشکلات یاد شده، ساده‌ترین و مؤثرترین روش استفاده از تحلیل ابعادی است. با استفاده از تحلیل ابعادی و بی‌بعد سازی می‌توان به تعداد متغیرهای کمتر در قالب اعداد بدون بعد دست یافت که در تعیین معادلات حاکم بر یک پدیده نقش دارند (Agrawal, S. K., 2006).

آنالیز ابعادی و مفاهیم اصلی آن که امروزه از آن استفاده می‌کنیم تقریباً از صد و پنجاه سال قبل منتشر شده ولی مفاهیم ابتدایی آن سابقه بسیار طولانی‌تری دارند، زیرا از زمانی که سیستم اندازه‌گیری مقادیر فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گرفت، برخی از مفاهیم آنالیز ابعادی بطور ضمنی بکار گرفته می‌شدند. اولین بار اوپلر در سال ۱۷۶۵ دربارهٔ نقش ابعاد و واحدها در روابط فیزیکی مقالاتی نوشت. داوید در سال ۱۷۹۹ به این نتیجه رسید که روابط معنی‌داری باید بین واحدهای مختلف اندازه‌گیری برقرار باشد، نتیجه‌ای که سرانجام در قضیه π باکینگهام رسمیت یافت (Martins, R. D. A., 1981). جوزف فوریه در سال ۱۸۲۲ کتاب نظریه تحلیلی انتقال گرما را تالیف و در آن برای اولین بار اصل همگنی ابعادی و بعضی قواعد تشابه ابعادی برای انتقال گرما را مطرح کرد. آنالیز ابعادی همچنین برای به دست آوردن روابط بین کمیت‌های فیزیکی که در یک پدیده خاص دخیل هستند استفاده می‌شود. این

مفهوم برای اولین بار در سال ۱۸۷۲ توسط لرد ریلی عملاً بکار گرفته شد و سپس وی در سال ۱۸۷۷ در کتاب خود تحت عنوان نظریه صوت آنرا منتشر کرد (Strutt, J. W., & Rayleigh, J. W. S. B. 1894). واشی فرانسوی در سال ۱۸۹۲ و ریابوچینسکی روسی در سال ۱۹۱۱ مقالاتی درباره قضیه پی نوشتند. ای. بوکینگهام در سال ۱۹۱۴ قضیه پی را برای توصیف گروه‌های بی‌بعد مطرح کرد و پس از آن به قضیه پی باکینگهام معروف شد. در اوایل دهه ۱۹۲۲ پی دلیو بریجمن نظریه کلی تحلیل ابعادی را مطرح کرد.

آنالیز ابعادی روشی برای بی‌بعد سازی کمیت‌ها به منظور تجزیه، تحلیل و تفسیر داده‌ها است. با استفاده از نمایش داده‌های بی‌بعد شده می‌توان حجم زیادی از جداول خروجی را در یک مجموعه منحنی نمایش داد. همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی قوانین تشابه ابعادی را می‌توان استنتاج کرد. به این صورت که پس از تعیین نتایج آزمایش یک مدل کوچک، با استفاده از قوانین تشابه ابعادی می‌توان نتایج مربوط به نمونه اصلی را پیش بینی کرد (Barenblatt, G. I., 1987). از جمله کاربردهای آنالیز ابعادی در مسائل مهندسی استفاده از آنالیز ابعادی در تیمار فشار بالا مواد زیستی است که تحت تأثیر پارامترهای داخلی و خارجی زیادی قرار می‌گیرد. آنالیز ابعادی امکان کاهش تعداد این پارامترها و همچنین تعمیم دادن مکانیسم‌ها و پدیده‌های فرآیند را فراهم می‌کند. با استفاده از معادلات جبری و یا معادلات دیفرانسیل مربوط می‌توان اعداد یا گروه‌های بدون بعد را که روند فرآیند فشار بالا را توصیف می‌کنند، به دست آورد

(Kowalczyk, W., & Delgado, A. 2007). همچنین (Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G., & Delaplace, G., 2013) نقش چهار پارامتر مستقل فرآیند، یعنی دمای محصول در خروجی مبدل حرارتی، میانگین زمان ماندگاری، افزایش دما بین ورودی و خروجی مبدل حرارتی و اثربخشی گرما را در دانتوراسیون، تجمع و رسوب گذاری کنسانتره بتالاکتوگلوبولین به عنوان یک مایع مدل برای مشتقات شیر را بررسی کردند. (Manjula, P., Kalaichelvi, P., & Dheenathayalan, K., 2010) یک همبستگی برای زمان اختلاط مخلوط کن با استفاده از آنالیز ابعادی ایجاد کردند. سرعت انتقال حرارت در واحد سطح در مبدل حرارتی صفحه‌ای به پارامترهای قطر هیدرولیک، سرعت، دانسیته، گرمای ویژه، انبساط حرارتی،

در قالب اعداد بی بعد نمایش دادند (G. T. Katsurayama, L. R. Sobenko, A. P. de Camargo, T. A. Botrel, J. (K. Lachin, A. Frizzone, and S. N. Duarte., 2020) C. Turchiuli, V. Pistre, G. Cuvelier, S. Mezdoor, F. Ducept. 2020). از تحلیل ابعادی برای مدل سازی فرآیند اتمیزه کردن مایع با استفاده از نازل های فشار بالا استفاده نمودند. آنها با بدست آوردن عدد افت فشار بی بعد توانستند به پیش بینی افت فشار در طی فرآیند اتمیزه بپردازند. در این تحلیل ابعادی پارامترهای موثر عبارت بودند از دبی جریان، ویسکوزیته، چگالی و پارامترهای هندسی نازل که در چند گروه بی بعد و با استفاده از قضیه پی باکینگهام دسته بندی شدند. (Tina Ying Pan, Rajamanickam Gopirajah1, Sugirtha Krishnamurthy, Syed S.H. Rizvi., 2020). همبستگی برای پیش بینی حداکثر دما در فرآیند اکستروژن یک سیال فوق بحرانی با استفاده از تحلیل ابعادی و قضیه پی باکینگهام بدست آوردند. آنها با استفاده از تحلیل ابعادی دو عدد بی بعد که مربوط به نسبت قطر پیچ به طول پیچ و نیز نسبت انرژی اضافه شده به انرژی حذف شده می باشد را برای بررسی مدل ارائه نمودند. همچنین با استفاده از یک سری آزمایشات تجربی صحت نتایج پیش بینی را بررسی نموده که تطابق خوبی را نشان داده است. اغلب کارخانه های فراوری مواد غذایی با استفاده از مواد شیمیایی با دمای بالا و مدت طولانی برای تمیزکاری استفاده می کنند که این امر موجب هزینه های بالا و اثرات زیست محیطی زیانباری را به دنبال خواهد داشت. با توجه به دشواری فرآیند تمیز کاری در صنایع غذایی و پارامترهای متعدد از تحلیل ابعادی کمک گرفته اند. نتایج بی بعد سازی به گونه ای است که در شرایط و موقعیت های مختلف در صنایع غذایی و دیگر موارد مشابه می توان از آن استفاده نمود. اعداد بی بعد بدست آمده عبارت بودند از عدد رینولدز، عدد چگالی که نسبت تراکم خاک به چگالی ماده تمیز کننده را نشان می دهد و عدد خاک که یک عدد بی بعد جدید است و خواص خاک های غذایی را بیان می کند (Hannes Deponte, Alberto Tonda, Nathalie Gottschalk, Laurent Bouvier, Guillaume Delaplace, Wolfgang Augustin, Stephan Scholl., 2020).

فشار بالا و اصلاح ساختار

هدایت حرارتی، شاخص رفتار جریان، شاخص قوام و اختلاف دما بستگی داشته و با روش آنالیز ابعادی وابستگی های این متغیرها را با یکدیگر بدست آوردند. (Muthamizhi, K., & Kalaichelvi, P., 2015). مطالعه ای با استفاده از آنالیز ابعادی به بررسی همبستگی عدد ناسلت از نظر تمام پارامترها برای تعیین ضرایب انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی صفحه ای برای غلظت های مختلف محلول کربوکسی متیل سلولز (CMC) پرداخته و نتایج حاصل را با مدل های موجود مورد مقایسه قرار دادند. در نتیجه ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت CMC از ۰/۱ تا ۰/۶ درصد وزنی افزایش می یابد و همچنین با افزایش غلظت این ماده سرعت جریان مایعات سرد و گرم از ۰/۱۶ تا ۰/۰۹۹ کیلوگرم در ثانیه افزایش یافت. در تحقیقی دیگر از روش پی باکینگهام برای پیش بینی حداکثر دمای فرآیند اکستروژن و توسعه مدل آن استفاده شده است. پارامترهای موثر در این فرآیند قطر پیچ، طول اکسترودر، سرعت جریان ماده خنک کننده، دمای ورودی ماده خنک کننده، گرمای ویژه ماده خنک کننده، دمای ورودی خوراک، سرعت جریان خوراک مرطوب، سرعت پیچ و حداکثر دمای اکسترودر بوده که با توجه به زیاد بودن تعداد متغیرها از قضیه پی باکینگهام برای گروه بندی متغیرها استفاده شده است (Pan, T. Y., Gopirajah, R., Krishnamurthy, S., & Rizvi, S. S., 2020). گروهی از محققین با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای موثر در فرآیند اختلاط پودر توسط میسرک سیاره ای را بدست آورده و نشان دادند که با دو عدد نسبت سرعت چرخش پره و عدد فرود می توان فرآیند جریان پودر را کنترل نمود. همچنین آنها نشان دادند که استفاده از آنالیز ابعادی و اعداد بی بعد بدست آمده برای بیان فرآیند همگن سازی پودرها مناسب می باشد (C. Andre, Jean-François Demeyre, Cendrine Gatamel, Henri Berthiaux, G. Delaplace., 2012). در تحقیقی دیگر با استفاده از آنالیز ابعادی و قضیه پی باکینگهام پارامترهای موثر در میکروتیوپ های آبیاری برای ایجاد شرایط رژیم جریان آرام در داخل لوله های با قطر کم را در قالب اعداد بی بعد بدست آورده شده است. این پارامترها شامل فشار، طول میکروتیوپ، سرعت جریان، قطر داخلی میکروتیوپ، شتاب جاذبه و خواص فیزیکی آب بود که آنها را در گروه های بی بعد دسته بندی نموده و سپس با انجام یک آزمایش نتایج بدست آمده را

(*al.*, 2007; *Stolt et al.*, 2000; *Douzals et al.*, 1998) دانه ارزن حاوی ۷۰ درصد نشاسته است. دانه ارزن علاوه بر ارزش غذایی، پتانسیل بهبود سلامت انسان را دارد و به دلیل وجود مواد مغذی، مواد معدنی و ویتامین‌های مختلف از جمله منیزیم، فسفر، منگنز و سلنیوم در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری پیدا کرده است (*Bhupender et al.*, 2013).

با بررسی منابع مشخص گردید که تا کنون از تحلیل ابعادی برای بدست آوردن روابط حاکم بر فرآیند فشار بالای هیدرواستاتیک و ارتباط بین متغیرهای آن انجام نگرفته است. در این تحقیق برای اولین بار متغیرهای موثر در فرآیند فشار بالای هیدرواستاتیک با تاکید بر متغیرهای مربوط به رفتار جریان در قالب اعداد و گروه‌های بی‌بعد (با استفاده از قضیه باکینگهام) بدست آورده شده است. پس از آن برای مشاهده اعداد بی‌بعد از داده‌های بدست آمده از آزمون رئومتری نشاسته ارزن که قبلاً تحت تیمار فشار بالا قرار گرفته بودند استفاده و سپس نتایج به صورت نمودارهای بی‌بعد نمایش داده شده است.

مواد و روش‌ها

روش π باکینگهام

قضیه باکینگهام (*Streeter et al.*, 1998) ، روشی نظام‌مند برای تعیین مجموعه‌ای از پارامترهای بدون بعد جهت توصیف یک فرآیند فیزیکی است. در این روش ابتدا مجموعه‌ای از n متغیر وابسته $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ که همه متغیرها در فرآیند فیزیکی نقش دارند را نوشته و سپس رابطه میان این متغیرها به صورت زیر تعریف می‌گردد (*Streeter et al.*, 1998):

$$f_1(\square a_1, a_2, a_3, \dots, a_n \square \square) = 0 \quad 1$$

$$a_1 = f_2(\square a_2, a_3, \dots, a_n \square) \quad 2$$

سپس با توجه به اینکه که کلیه متغیرهای مذکور دارای بعد هستند لذا با ترکیب آنها می‌توان به شکل بی‌بعد زیر دست یافت:

$$\pi = a_1^{x_1} \cdot a_2^{x_2} \cdot a_3^{x_3} \cdot \dots \cdot a_n^{x_n} \quad 3$$

در رابطه بالا π عدد بی‌بعد، x_i متغیرهای عددی محض و a_i متغیرهایی هستند که برحسب ابعاد اصلی M ، L و T نوشته می‌شوند. از آنجا که رابطه ۳ رابطه‌ای بدون بعد است، حاصل جمع توان‌های سه بعد اصلی M ، L و T باید برابر صفر باشند. در نهایت از کم کردن تعداد پارامترهای

ظهور و پیشرفت فناوری‌های نوین در صنایع غذایی به دلیل تاثیرات نامطلوب حرارت و در راستای کاهش صدمات وارد شده به مواد غذایی اهمیت خاصی در دهه‌های اخیر پیدا کرده است. در سال ۱۸۹۹، *hite* به طور موفقیت آمیزی از فشارهای هیدرواستاتیک بالا برای بهبود و حفظ کیفیت شیر استفاده نمود. بدین ترتیب کاربرد این فرآیند در کنترل میکروارگانیسم‌ها و نگهداری مواد غذایی تاریخچه طولانی دارد. فرآیند فشار هیدرواستاتیک بالا (HHP) به عنوان یک فناوری جایگزین برای عملیات حرارتی، پتانسیل قابل توجهی از نظر ایمنی و کیفیت در دهه‌های اخیر به اثبات رسانده است و گزارش‌های متعددی در مورد تأثیر این فرآیند بر ژلاتینه شدن نشاسته و تغییر در خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های مختلف ارائه شده است (*Liu et al.*, 2009; *Wang et al.*, 2008; *Rubens & Heremans*, 2000). این تکنولوژی همچنین می‌تواند عملکرد مولکول‌های پروتئین و کربوهیدرات را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تولید و توسعه محصولات جدید و بهینه سازی فرآیندهای تولید مواد غذایی گردد. اصلاح ساختار مواد غذایی با هدف تغییر در رفتار رئولوژیکی این مواد از جمله مهمترین کاربردهای فرآیند فشار بالای هیدرواستاتیک می‌باشد. اغلب روشهای اصلاح ساختار نشاسته توام با آسیب‌هایی برای ماده غذایی است اما یک روش موثر برای اصلاح ساختار و بهبود عملکرد آن استفاده از تکنولوژی فشار هیدرواستاتیک بالا می‌باشد. این تکنولوژی غیر حرارتی بوده و می‌تواند اصلاح ساختار نشاسته را بدون آسیب فیزیکی انجام و فرصت جدیدی را برای استفاده از نشاسته‌های اصلاح شده در محصولات غذایی فراهم نماید (*Wang et al.*, 2008). پدیده ژلاتینه شدن نشاسته شامل هیدراتاسیون، تورم گرانول‌ها و خروج آمیلوز بوده و به عنوان انتقال فاز گرانول‌ها از حالت منظم به حالت نامرتب تعریف می‌شود که منجر به از دست دادن نظم بلورینگی و شکل دانه‌ای می‌گردد. اثر تیمار با فشار هیدرواستاتیک بالا در مقایسه با عملیات رطوبتی و حرارتی بر مکانیسم ژلاتینه شدن ساختار نشاسته و گرانول یکسان نیست. نمونه‌های تیمار شده با فرآیند فشار بالا، تورم گسترده‌ای را نشان نمی‌دهند، بنابراین این فرآیند با تأثیر بر ساختار بی شکل و بلوری، منجر به تورم محدود گرانول‌های نشاسته می‌شود و ضمن حفظ ساختار دانه‌ای، آمیلوز بیشتری در گرانول‌ها باقی می‌ماند (*Buckow et*)

به منظور بررسی پارامترهایی که در فرآیند فشار بالا بر ماده مورد آزمایش تاثیر دارند از آنالیز ابعادی کمک گرفته شده است. طبق آنچه تا کنون گفته شد برای تحلیل ابعادی یک پدیده فیزیکی بایستی تمام کمیت‌هایی که قطعا و یا احتمالا بر آن پدیده موثر می‌باشند را نوشته به طوری که چیزی نادیده گرفته نشود. این بدان معنی است که چنانچه کمیتی موثر نباشد خود به خود در فرآیند بی-بعدسازی حذف می‌شود. بر همین اساس در آزمون‌های رئولوژی مواد گوناگون کمیت‌های زیادی وجود دارند که برای تحلیل رفتار جریان یک سیال به کار گرفته می‌شوند. برخی از این کمیت‌ها در جدول ۱ آورده شده است:

بدون بعد (n) از تعداد ابعاد اصلی (m) تعداد گروه‌های بی-بعد (π_i) به دست می‌آید. یعنی معادلات (۱) و (۲) به شکل زیر در می‌آیند:

$$\emptyset(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0 \quad ۴$$

و یا

$$\pi_1 = \emptyset_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad ۵$$

که در آن \emptyset و \emptyset_1 توابع چند متغیره و π_i ها اعداد بی‌بعد می‌باشند.

تحلیل ابعادی فرآیند فشار بالا

جدول ۱- کمیت‌های مرتبط با پدیده مورد بررسی

عنوان	کمیت	واحد	ابعاد
ویسکوزیته‌ها	$\eta, \eta', \eta'', \eta^*$	Pa-s	$ML^{-1}T^{-1}$
مدول‌های برشی	G, G', G'', G^*	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
مدول‌های نرمی	J, J', J'', J^*	1/ Pa	$M^{-1}LT^2$
کرنش برشی	γ, γ_0	rad	-
نرخ کرنش برشی	$\dot{\gamma}, \dot{\gamma}_0$	1/s	T^{-1}
زاویه فاز	$\delta, \tan(\delta)$	rad	-
تنش برشی	τ, τ_0	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
فشار	P	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
دانسیته	ρ	Kg/m^3	ML^{-3}
دما	θ	$(^{\circ}C)^{\circ}K$	θ
گرمای ویژه	c_p	$KJ / Kg^{\circ}K$	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$
سرعت زاویه‌ای	ω	rad/s	T^{-1}
دمای انتقال شیشه‌ای	T_g	$(^{\circ}C)^{\circ}K$	θ
زمان	t	s	T

از این میان پارامترهایی که مهم هستند و از طرفی امکان اندازه گیری آن وجود دارد در جدول ۲ به همراه ابعاد فیزیکی آن آورده شده است.

جدول ۲- برخی از کمیت‌های مرتبط با پدیده و واحد آنها

n \ m	η	P	ρ	θ	T_g	$\dot{\gamma}$	τ_0	t	c_p
M	1	1	1	0	0	0	1	0	0
L	-1	-1	-3	0	0	0	-1	0	2
T	-1	-2	0	0	0	-1	-2	1	-2
θ	0	0	0	1	1	0	0	0	-1

فرآیند بی بعد سازی

طبق تئوری باکینگهام بایستی ابتدا از میان متغیرهای موجود متغیرهای تکرار شونده را انتخاب نمود. متغیرهای تکرار شونده آن دسته از متغیرهایی هستند که در تمام ترم‌های π مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد این متغیرهای تکرار شونده برابر با تعداد ابعاد مرجع در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه برای اجرای فرآیند بی بعد سازی ابتدا تعداد اعداد بی بعدی که می‌توان بدست آورد را باید مشخص نمود. با توجه به جدول ۲ تعداد متغیرهای انتخاب شده ۹ و تعداد ابعاد مساله ۴ می‌باشد و لذا ۵ عدد بی بعد بدست خواهد آمد. طبق جدول ۱ در این مساله متغیرهایی را که به عنوان متغیر تکرار شونده در نظر گرفته شده است عبارتند از:

$$P, \theta, \rho, \dot{\gamma}$$

و سایر متغیرها عبارتند از:

$$\eta, T_g, \tau_0, t, c_p$$

با استفاده از رابطه ۳ برای بدست آوردن اولین عدد بی بعد خواهیم داشت:

$$\pi_1 = \eta (\rho)^a (P)^b (\dot{\gamma})^c (\theta)^d \quad 6$$

با جایگذاری ابعاد اصلی برای همه متغیرها معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\pi_1 = ML^{-1}T^{-1} [ML^{-3}]^a [ML^{-1}T^{-2}]^b [T^{-1}]^c [\theta]^d \quad 7$$

از برابر قرار دادن توان‌های مجهول با توان‌های متناظر و حل دستگاه چهار معادله و چهار مجهول، توان‌های مجهول محاسبه و اولین عدد بی بعد زیر بدست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 8$$

از حل دستگاه معادله ۸ توان‌های مجهول مطابق زیر بدست می‌آیند:

$$a = 1, b = -1, c = 1, d = 0$$

با جایگذاری در رابطه ۷ خواهیم داشت:

$$\pi_1 = \frac{\eta \dot{\gamma}}{P} \quad 9$$

همانطور که ملاحظه می‌شود متغیر دانسیته و دما در این عدد بی بعد نقشی نداشته و از معادله حذف گردید. برای بدست آوردن چهار عدد بی بعد دیگر فرآیند قبل تکرار شده است.

$$\pi_2 = \frac{\tau_0}{P} \quad 10$$

$$\pi_3 = \frac{T_g}{\theta} \quad 11$$

$$\pi_4 = t\dot{\gamma} \quad 12$$

$$\pi_5 = \frac{\rho \theta c_p}{P} \quad 13$$

یک عدد بی بعد که نیاز به فرآیند بی بعد سازی ندارد عدد بی بعد تانژانت دلتا است.

$$\pi_6 = \tan(\delta) \quad 14$$

تا این مرحله تعداد پنج عدد بی بعد از فرآیند بی بعد سازی و یک عدد بی بعد هم مستقیماً بدست آمد. طبق تئوری- های آنالیز ابعادی نشان داده شده است که با انجام عملیات جبری بر روی اعداد بی بعد، می‌توان اعداد بی بعد جدیدی بدست آورد. بنابراین برخی از این اعداد بی بعد جدید عبارتند از:

$$\pi_7 = \pi_1 \times \pi_2 = \frac{\eta \dot{\gamma} \tau_0}{P^2} \quad 15$$

$$\pi_8 = \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\eta \dot{\gamma}}{\tau_0} \quad 16$$

$$\pi_9 = \frac{\pi_1}{\pi_4} = \frac{\eta}{P t} \quad 17$$

$$\pi_{10} = \pi_3 \times \pi_5 = \frac{\rho c_p T_g}{P^2} \quad 18$$

$$\pi_{11} = \pi_7 \times \pi_8 = \frac{\eta^2 \dot{\gamma}^2}{P^2} \quad 19$$

از طرفی عددهای بی بعد π_8 و π_1 را می‌توان برحسب فرکانس زاویه‌ای و ویسکوزیته کمپلکس نوشت، چرا که دیمانسیون نرخ برشی با فرکانس زاویه‌ای و دیمانسیون ویسکوزیته کمپلکس با ویسکوزیته دینامیکی برابر است با این جایگذاری خواهیم داشت:

$$\pi_{12} = \frac{\eta^* \omega}{P} \quad 20$$

$$\pi_{13} = \frac{\eta^* \dot{\gamma}}{\tau} \quad 21$$

علاوه بر بدست آوردن اعداد بی بعد می‌توان اعداد بی بعد را به صورت تابعی از یک یا چند عدد بی بعد نیز نوشت. به طور مثال می‌توان نوشت:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n) \quad 22$$

و یا در ساده‌ترین حالت:

$$\pi_1 = F(\pi_2) \quad 23$$

این جنبه از اعداد بی بعد که به صورت تابعی از یک عدد بی بعد نوشته شود کاربرد بیشتری دارد. چنانچه رابطه ۲۳ را برحسب عددهای بی بعد بدست آمده بنویسیم خواهیم داشت:

$$\frac{\eta \dot{\gamma}}{P} = F\left(\frac{\tau_0}{P}\right) \quad 24$$

و یا:

$$\eta = \frac{P}{\dot{\gamma}} F\left(\frac{\tau_0}{P}\right) \quad 25$$

Accepted Article

متغیر بایستی 10^4 (۱۰۰۰۰) آزمایش انجام داد که عملاً غیر ممکن و یا بسیار پر هزینه خواهد بود. همانطور که گفته شد برای بدست آوردن مجهولات A و n لازم است تعداد ۱۰ آزمایش انجام گیرد. با انجام این تعداد آزمایش و میانگین گرفتن از A و n که از ۱۰ آزمایش بدست آمده، ضرائب تابع مجهول F بدست آمده و در نتیجه معادله ۳۰ قابل محاسبه است. مراحل انجام محاسبه A و n به این ترتیب است. ابتدا با انجام آزمایش ۱۰ مقدار برای π_1 و ۱۰ مقدار برای π_8 بدست می‌آید. جدول ۳ این مقادیر را نشان می‌دهد. در این آزمایش هر بار یک فشار اعمال و سپس در شرایط نرخ برشی ثابت ویسکوزیته و تنش برشی اندازه‌گیری می‌شود و در نتیجه با داشتن این اطلاعات عددهای بی‌بعد π_1 و π_8 قابل محاسبه می‌باشند. در این پژوهش از چهار سطح فشار برای بدست آوردن اعداد بی‌بعد استفاده شده است.

جدول ۳- برخی از کمیت‌های مرتبط با پدیده و واحد آنها

آزمون	اعمال P	اندازه گیری η	اندازه گیری τ_0	محاسبه π_1	محاسبه π_8
۱	P_1	η_1	τ_{01}	π_{10}	π_{80}
۲	P_2	η_2	τ_{02}	π_{11}	π_{81}
۳	P_3	η_3	τ_{03}	π_{12}	π_{82}
۴	P_4	η_4	τ_{04}	π_{13}	π_{83}
۵	P_5	η_5	τ_{05}	π_{14}	π_{84}
۶	P_6	η_6	τ_{06}	π_{15}	π_{85}
۷	P_7	η_7	τ_{07}	π_{16}	π_{86}
۸	P_8	η_8	τ_{08}	π_{17}	π_{87}
۹	P_9	η_9	τ_{09}	π_{18}	π_{88}
۱۰	P_{10}	η_{10}	τ_{010}	π_{19}	π_{89}

میانگین A و n چنین بدست آمده است:

$$\pi_{10} = A(\pi_{80})^n \quad ۳۱$$

$$\pi_{11} = A(\pi_{81})^n \quad ۳۲$$

.

.

.

$$\pi_{19} = A(\pi_{89})^n \quad ۳۳$$

همانطور که مشاهده می‌شود در این رابطه ویسکوزیته به صورت ضریبی از فشار و نرخ کرنش در یک تابع مجهول که خود وابسته به فشار و تنش برشی است بیان گردیده است. پس از این با انجام چند آزمایش می‌توان تابع F را بدست آورد و به چگونگی تغییرات ویسکوزیته بر حسب سایر متغیرها پی‌برد. و این یکی از مهم‌ترین دستاوردهای آنالیز ابعادی است به گونه‌ای که می‌توان رفتار تمامی کمیت‌های موثر در یک پدیده را بر حسب یکدیگر و در قالب اعداد بی‌بعد که مستقل از سیستم دستگاه انتخابی هستند را مطالعه نمود، بدون آنکه بخواهیم معادلات حاکم بر میدان را که اغلب به صورت دقیق و یا تحلیلی قابل حل نیستند را حل نمود. این روابط را بین هر چند تا از اعداد بی‌بعد می‌توان نوشت. مهمترین نکته این است که امکان انجام آزمایش و اندازه‌گیری آن کمیت‌ها وجود داشته باشد، در غیر این صورت هیچ محدودیتی در نوشتن اعداد بی‌بعد بر حسب یکدیگر وجود ندارد. در ادامه دو عدد بی‌بعد دیگر بر حسب یکدیگر بدست آورده می‌شود. از قبل دو عدد بی‌بعد π_1 و π_8 بدست آمدند. چنانچه این دو عدد بی‌بعد به فرم تابع بیان شود خواهیم داشت:

$$\pi_1 = F(\pi_8) \quad ۲۶$$

و یا برای اینکه شکل تابع مشخص شود داریم:

$$\pi_1 = A(\pi_8)^n \quad ۲۷$$

دو پارامتر A و n با انجام تعدادی آزمایش بدست می‌آید.

$$\frac{\eta \dot{\gamma}}{P} = F\left(\frac{\eta \dot{\gamma}}{\tau_0}\right) \quad ۲۸$$

با جایگذاری اعداد بی‌بعد خواهیم داشت:

$$\frac{\eta \dot{\gamma}}{P} = A\left(\frac{\eta \dot{\gamma}}{\tau_0}\right)^n \quad ۲۹$$

و یا رابطه ویسکوزیته بر حسب متغیرهای فشار، تنش برشی و سرعت برشی مطابق رابطه زیر خواهد بود.

$$\eta = \frac{1-n \sqrt[n]{AP}}{\dot{\gamma}} \tau_0 \left(\frac{n}{n-1}\right) \quad ۳۰$$

همانطور که ملاحظه می‌شود بدون حل معادلات میدان رابطه ویسکوزیته بر حسب تابعی از فشار، تنش برشی و نرخ برش بدست آمد. این رابطه برای اولین بار بدست آمده و در فرآیندهایی که همزمان فشار و ویسکوزیته وجود دارد می‌توان از آن استفاده نمود. از همه مهمتر اینکه با تعداد ۱۰ آزمایش می‌توان رابطه بین ویسکوزیته را با فشار، تنش برشی و نرخ برش تعیین کرد، در حالیکه بدون استفاده از آنالیز ابعادی برای پیدا کردن ارتباط بین چهار

سبوس آن جدا می‌شود. آرد ارزن (با اندازه ذرات 0.25 mm) درون محلول هیدروکسید سدیم ۰/۳ درصد غوطه ور شده (با نسبت وزنی: حجمی ۱ به ۶) و به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد باقی مانده است. نمونه در طول این مدت به طور پیوسته استیر می‌شود. سپس نمونه در ۴۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شده (۱۵ دقیقه) و فاز فوقانی آن جدا شد. لایه زرد رنگی که روی بخش سفید رنگ (نشاسته) است با استفاده از اسپاتول جدا شده و بخش نشاسته‌ای مجدداً درون آب مقطر دیسپرس شده است. این کار چندین مرتبه تکرار می‌شود تا یک رسوب کاملاً سفید بدست آید. سپس pH سوسپانسیون نشاسته روی ۶/۵-۷ تنظیم شده (با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۱ مولار) و در ۵۰ درجه سانتیگراد خشک شده است (Sharma et al., 2015).

برای آماده سازی نمونه‌ها جهت آزمون‌های رئولوژیکی دیسپرسیون‌های ۲۰ درصد از هر کدام نشاسته‌های تیمار شده تهیه شد.

آزمون فشار بالا

برای اعمال فشار بالا به نمونه‌ها از یک دستگاه پرس ایزواستاتیک فشار بالا که قابلیت اعمال فشار تا ۶۰۰ مگاپاسکال (۶۰۰۰ بار) را دارد استفاده شده است. شکل ۱ نمای کلی دستگاه را نشان می‌دهد. حجم محفظه فشار بالا ۱۰۰ میلی لیتر بوده و از آنجائیکه که نمونه‌ها مایع با غلظت‌های مختلف می‌باشد مستقیماً درون محفظه فشار بالا وارد شد. دستگاه قابلیت تنظیم مقدار فشار از طریق یک شیر کنترل فشار به روش دستی با دقت ۰،۱ مگاپاسکال را داشت. مقدار فشار به دو روش آنالوگ و دیجیتال قابل مشاهده بود و میزان فشار مجاز از طریق یک ترانسدیوسر فشار و شیر فشار شکن برقی کنترل می‌گردید.

به طور نمونه مراحل بدست آوردن میانگین n چنین است:

برای بدست آوردن n ابتدا π_{10} بر π_{11} تقسیم شده است.

$$\frac{\pi_{10}}{\pi_{11}} = \left(\frac{\pi_{80}}{\pi_{81}}\right)^n \quad 34$$

سپس از طرفین رابطه لگاریتم گرفته شده است. به این صورت که:

$$\log\left(\frac{\pi_{10}}{\pi_{11}}\right) = \log\left(\frac{\pi_{80}}{\pi_{81}}\right)^n \quad 35$$

$$n = \log\left(\frac{\pi_{10}}{\pi_{11}}\right) - \log\left(\frac{\pi_{80}}{\pi_{81}}\right) \quad 36$$

و به همین ترتیب تا آخر این عمل تکرار شده و ۹ مقدار برای n بدست آمده و سپس میانگین این ۹ مقدار از n به عنوان n_{avg} بدست آمده است. پس از آن با استفاده از مقدار میانگین n_{avg} مقدار A به روش زیر محاسبه شده است:

$$\pi_{10} = A(\pi_{80})^{n_{avg}} \quad 37$$

$$A_1 = \frac{\pi_{10}}{(\pi_{80})^{n_{avg}}} \quad 38$$

$$A_{10} = \frac{\pi_{19}}{(\pi_{89})^{n_{avg}}} \quad 39$$

و در نهایت با استفاده از ۱۰ مقدار برای A ، مقدار میانگین (A_{avg}) محاسبه شده است. در نتیجه رابطه ۳۰ برای محاسبه ویسکوزیته به شکل زیر در آمده است.

$$\eta = \frac{1-n_{avg} \sqrt{A_{avg} P}}{\dot{\gamma}} \tau_0 \left(\frac{n_{avg}}{n_{avg}-1}\right) \quad 40$$

همانطور که گفته شد رابطه ۳۰ دارای چهار متغیر است و چنانچه بخواهیم اثر تغییر هر متغیر را بر دیگر متغیرها بدست آوریم لازم است 10^4 آزمایش انجام پذیرد، در حالی که با استفاده از آنالیز ابعاد و روش ارائه شده با انجام ۱۰ آزمون رابطه تغییرات چهار متغیر به همراه توان هر متغیر بدست آمده است.

استخراج نشاسته و آماده سازی نمونه‌ها

برای استخراج نشاسته از ارزن، ابتدا نمونه ارزن با استفاده از آسیاب غلته‌گری گرانولی شده و با استفاده از الک آرد از

Accepted Article

۰/۰۱ درجه سلسیوس مجهز به سیرکولاتور آب (VT) (Viscotherm) تنظیم شد. نمونه‌های تهیه شده مستقیماً روی صفحه پایینی رئومتر ریخته و به منظور رسیدن به تعادل دمایی، قبل از هر آزمون به مدت ۵ دقیقه به نمونه‌ها استراحت داده شد. با هدف تعیین ناحیه خطی (LVE)، آزمون تنش متغیر در محدوده ۰/۰۱-۱۰۰ پاسکال و در فرکانس زاویه‌ای ثابت ۱Hz انجام شد (حیدری و همکاران، ۲۰۲۱). آزمون فرکانس متغیر در محدوده فرکانس ۰/۱-۱۰۰Hz و تنش ثابت ۰/۱Pa (ناحیه خطی) انجام گردید. سپس خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌ها بر اساس مدول‌های الاستیک و ویسکوز به‌عنوان تابعی از فرکانس بررسی شدند.

نتایج و بحث

بررسی رفتار ماده بوسیله اعداد بی‌بعد

تا اینجا تعدادی اعداد بی‌بعد بدست آمده و ارتباط بین آنها نیز مشخص گردید. قطعاً استفاده از این اعداد بی‌بعد نیاز به شناخت کامل از فیزیک مساله داشته و از سوی دیگر در اختیار داشتن امکانات لازم برای انجام آزمایشات نیز ضروری است، چرا که اساس استفاده از اعداد بی‌بعد مبتنی بر انجام آزمایشات به منظور تعیین ارتباط بین اعداد بی‌بعد و سپس رسم نمودارها و مطالعه رفتار و شناخت فیزیک حاکم بر مساله مورد بررسی است. قطعاً استفاده از اعداد بی‌بعد که هر کدام هم‌زمان چند متغیر را در خود جای می‌دهند کمک زیادی به کاهش تعداد آزمایشات و هزینه‌های مربوطه خواهد نمود.

همانطور که قبلاً گفته شد مهمترین هدف این تحقیق استفاده از مزیت‌های اعداد بی‌بعد در فرآیند اعمال فشار بالا می‌باشد تا ضمن کم کردن تعداد آزمایشات به بررسی اثر اعمال فشار بالا بر ویژگی‌های رئولوژیکی پرداخته شود. مواد مورد آزمایش در این تحقیق نشاسته ارزن می‌باشد. از جمله کمیت‌های مهم در رفتار رئولوژیکی مواد ویسکوزیته آن می‌باشد و چنانچه قبلاً گفته شد هدف اصلی پیدا نمودن اثر اعمال فشار بالا بر ویژگی‌های رئولوژیکی از جمله ویسکوزیته می‌باشد (همچنانکه در رابطه ۳۰ نشان داده شد).

بررسی نمودارها

نمودار شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش عدد بی‌بعد π_1 برحسب تانژانت دلتا برای سه فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه را نمایش می‌دهد. در این



شکل ۱- دستگاه پرس ایزواستاتیک فشار بالا با قابلیت اعمال فشار هیدرواستاتیک ۶۰۰۰ بار

فشارهای اعمال شده به نمونه‌ها عبارتند بودند از ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و نیز نرخ اعمال فشار ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه بوده است. زمان اعمال فشار به نمونه‌ها برای هر سه فشار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه برابر جدول ۴ و دمای آنها قبل از بارگذاری ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است. نمونه‌ها قبل از بارگذاری در یخچال نگهداری شده و در طی فرآیند اعمال فشار تغییر قابل ملاحظه‌ای که موجب آسیب رساندن به نمونه‌ها باشد نداشته است (حداکثر دمایی که برای نمونه ۶۰۰ مگاپاسکال ثبت گردید ۲۳ درجه سانتیگراد بود). پس از اتمام فرآیند فشار بالا مواد جهت انجام آزمون‌های بعدی آماده سازی شدند.

جدول ۴- سطوح فشار و دمای اعمال شده به نمونه‌ها

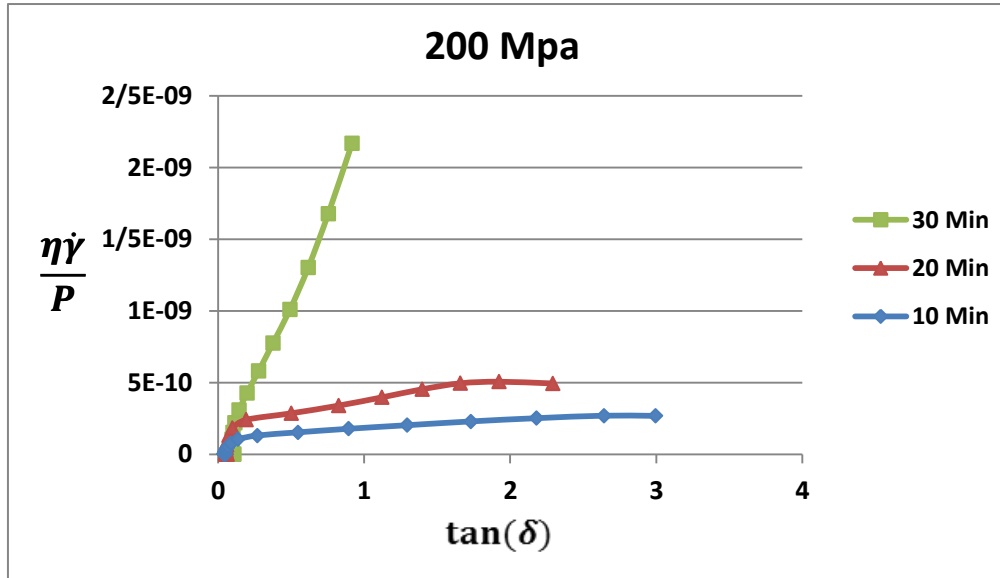
P (Mpa)	t (min)		
	t1	t2	t3
P1=200	10	20	30
P2=400	10	20	30
P3=600	10	20	30

انجام آزمون‌های دینامیکی

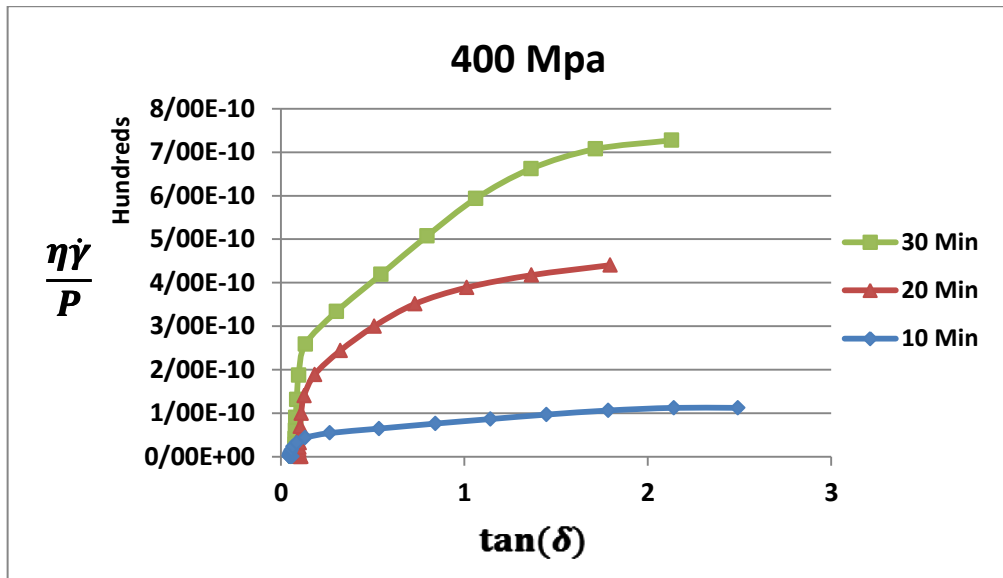
آزمون‌های رئولوژیکی برشی پایا و ناپایا با استفاده از دستگاه رئومتر فیزیکا (مدل MCR 302، استرالیا) انجام شد. در این راستا، از هندسه صفحات موازی با قطر ۵mm و فاصله ۱mm در دمای ۲۵ درجه سلسیوس استفاده گردید. دما توسط سیستم پلتیر صفحه‌ای با حساسیت

و ۶۰۰ برای زمانهای ۱۰ و ۲۰ دقیقه نزدیک به یکدیگر شده و برای فشار ۶۰۰ و زمان ۳۰ دقیقه از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. این تغییرات ناگهانی رفتار قابل تامل است و می‌تواند ناشی از یک پدیده در رفتار جریان باشد. این در حالی است که وقتی نمودارهای مربوط به مدول‌های برشی الاستیک و ویسکوز رسم می‌شود این تفاوت مشاهده نمی‌گردد.

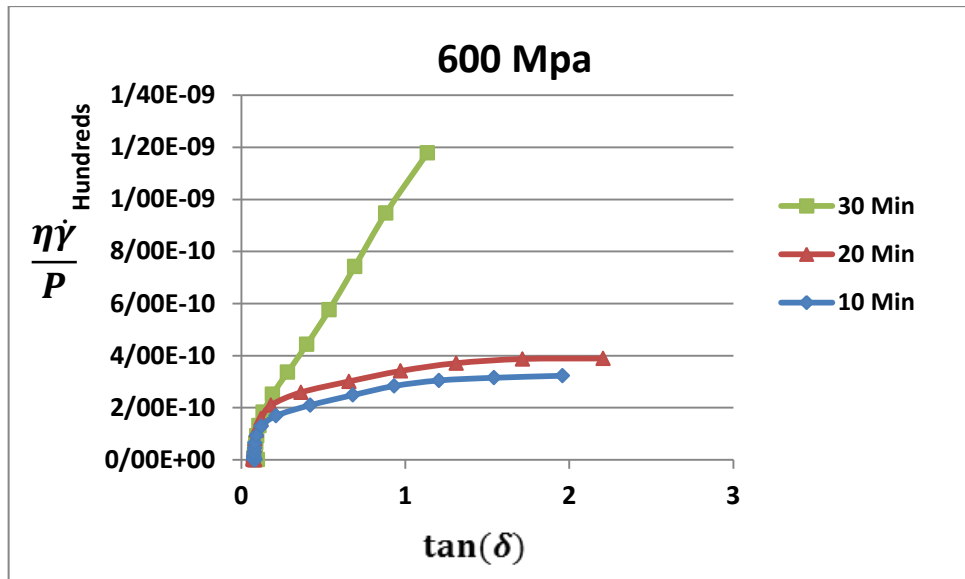
نمودارها به خوبی تفاوت زمان ۳۰ دقیقه با دو زمان ۱۰ و ۲۰ دقیقه قابل مشاهده است و مدت اعمال فشار بالا بر روی عدد بی‌بعد π_1 تفاوت زیادی با دو زمان دیگر دارد. عدد بی‌بعد π_1 با توجه به آنالیز ابعادی نسبت تنش برشی به تنش فشاری را نشان می‌دهد که با توجه به تنش فشاری خیلی بالا، این نسبت عدد خیلی کوچکی شده است. همچنین با افزایش مقدار فشار دو نمودار فشار ۴۰۰



شکل ۲- نمودار تغییرات عدد بی‌بعد π_1 بر حسب تانژانت دلتا در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال



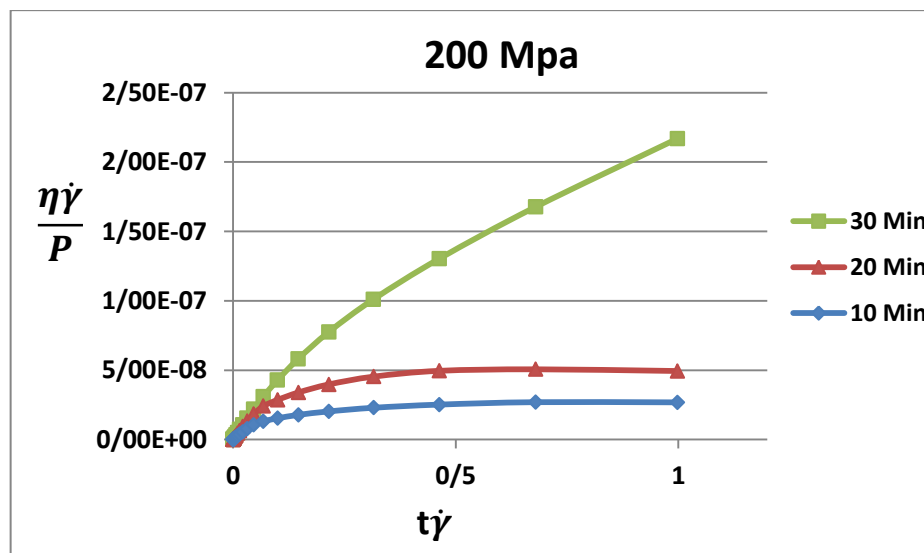
شکل ۳- نمودار تغییرات عدد بی‌بعد π_1 بر حسب تانژانت دلتا در فشار ۴۰۰ مگاپاسکال



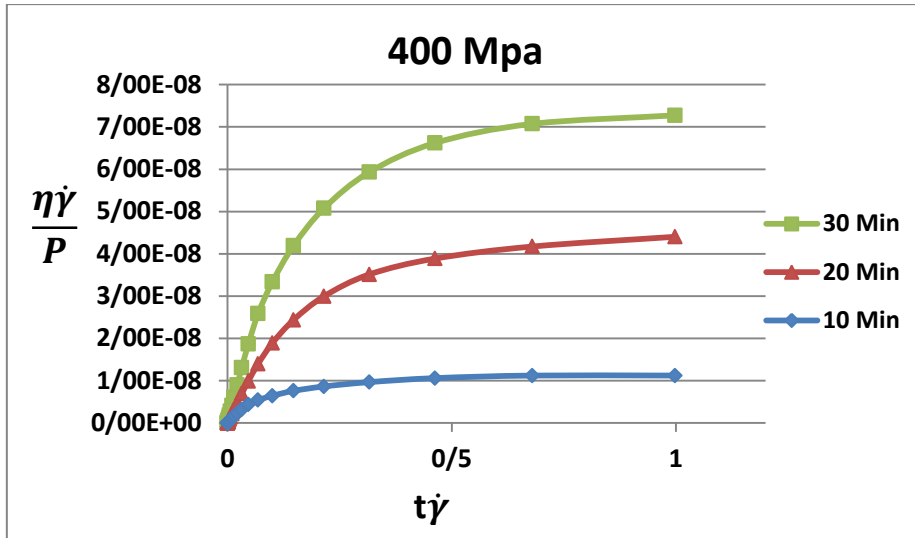
شکل ۴- نمودار تغییرات عدد بی بعد π_1 بر حسب تانژانت دلتا در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال

صورت که در دو فشار ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در زمان ۳۰ دقیقه اختلاف زیادی با زمان‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه داشته و برای عدد بی بعد π_1 تغییرات ناگهانی رخ داده است. همچنین مقدار عدد بی بعد در این دو حالت کمتر از مقدار آن برای فشار ۲۰۰ مگاپاسکال است.

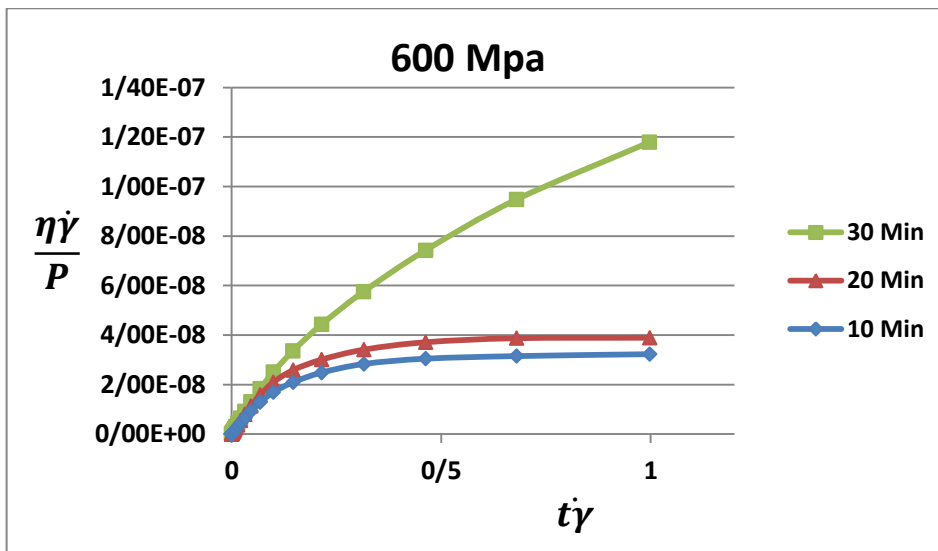
نمودار شکل‌های ۵ تا ۷ نمایش عدد بی بعد π_1 بر حسب عدد بی بعد π_4 برای سه فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه را نمایش می‌دهد. در این نمودارها در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال تفاوت بین زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه زیاد است ولی در فشارهای ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال تغییرات متفاوت می‌باشد به این



شکل ۵- نمودار تغییرات عدد بی بعد π_1 بر حسب عدد بی بعد π_4 در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال



شکل ۶- نمودار تغییرات عدد بی بعد π_1 بر حسب عدد بی بعد π_4 در فشار ۴۰۰ مگاپاسکال

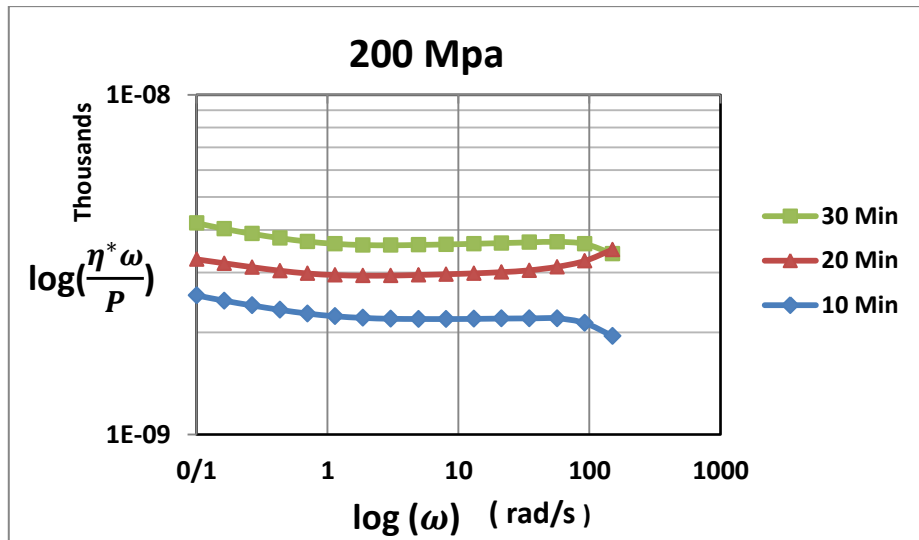


شکل ۷- نمودار تغییرات عدد بی بعد π_1 بر حسب عدد بی بعد π_4 در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال

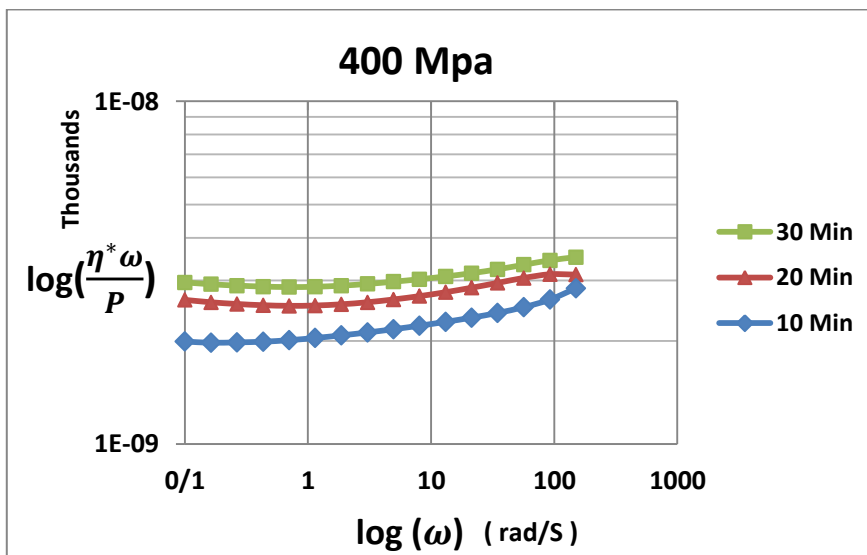
این افزایش و کاهش فقط مربوط به افزایش و یا کاهش صورت کسر در عدد بی بعد π_{12} یعنی مربوط به تغییرات ویسکوزیته کمپلکس می باشد. دلیل افزایش ویسکوزیته کمپلکس در اثر افزایش فشار از ۲۰۰ مگاپاسکال به ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال مربوط به متراکم شدن ماده و افزایش مدول های برشی می باشد (Chaudemanche et al., 2009; Lin, T., & Fernández-Fraguas, C., 2020). در واقع در این تحقیق برای اولین بار موضوع استفاده از اعداد بی بعد در فرآیند فشار بالا مطرح گردیده.

نمودار شکل های ۸ تا ۱۰ تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{12} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه ای در فشارهای ۲۰۰ ، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال را در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه نشان می دهد. روند تغییرات مقدار عدد بی بعد π_{12} برای فشار ۲۰۰ مگاپاسکال با دو فشار ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال متفاوت است، به گونه ای که در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال با افزایش فرکانس زاویه ای شیب تغییرات عدد بی بعد π_{12} کاهشی است در حالیکه برای فشارهای ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال شیب تغییرات افزایشی و مثبت است. از سویی می دانیم که مقدار فشار در طی فرآیند ثابت است و

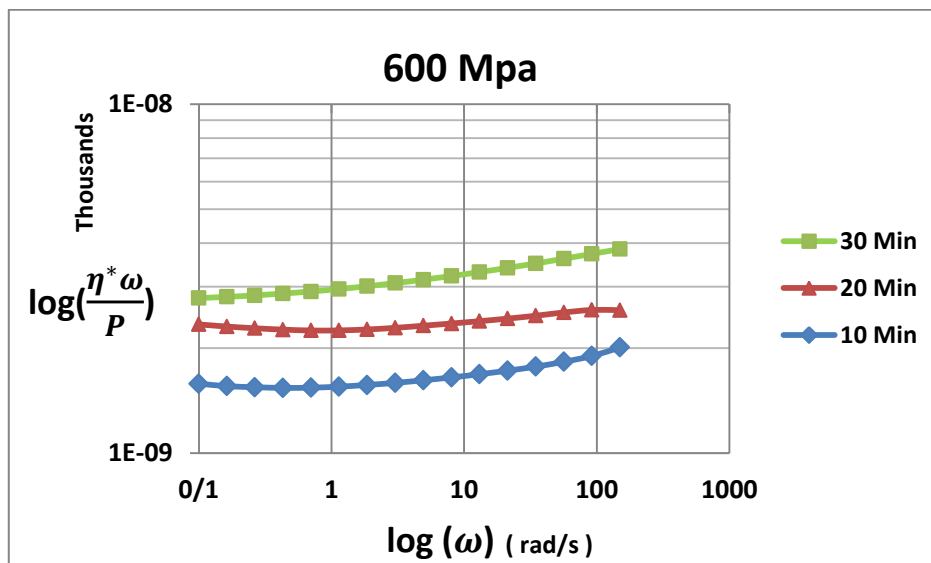
Accepted Article



شکل ۸- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{12} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال



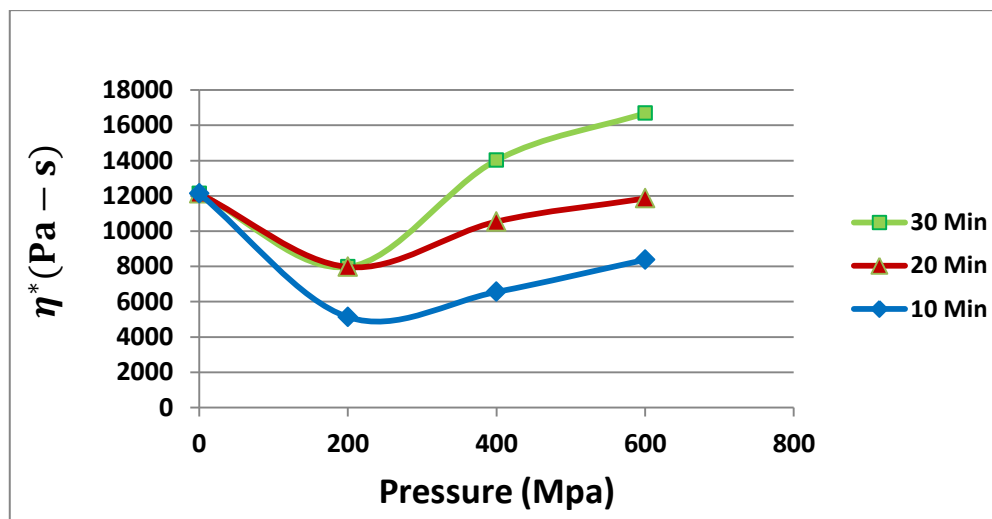
شکل ۹- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{12} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۴۰۰ مگاپاسکال



شکل ۱۰- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{12} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال

ویسکوزیته کمپلکس نیز برای فشارهای بیشتر از ۲۰۰ مگاپاسکال افزایش داشته است. به طوریکه مقدار ویسکوزیته کمپلکس برای فشار ۶۰۰ مگاپاسکال و زمان ۱۰ دقیقه از مقدار حدود ۸۰۰۰ پاسکال ثانیه به مقدار بیش از ۱۶۰۰۰ پاسکال ثانیه برای زمان ۳۰ دقیقه افزایش داشته که بیش از دو برابر است و این مقدار می‌تواند در فرآیندها و عملکردهای ماده غذایی تاثیر بسیار زیادی داشته باشد. به عبارتی دیگر بدون استفاده از حرارت و تنها با استفاده از فشار بالا می‌توان خواص عملکردی و رئولوژیکی مواد غذایی که نسبت به حرارت حساس هستند تغییر را داد.

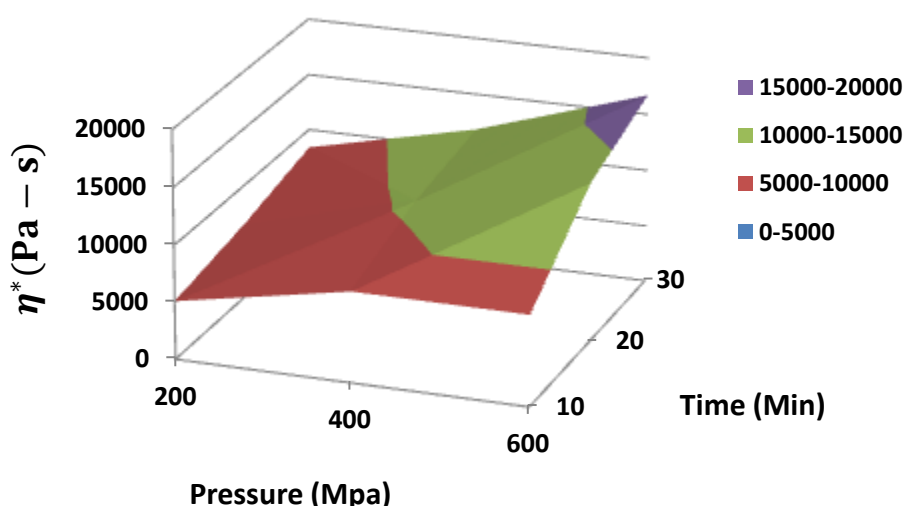
نمودار شکل ۱۱ تغییرات ویسکوزیته کمپلکس بر حسب تغییرات فشار را نشان می‌دهد. مقدار اولیه فشار ۰/۱ مگاپاسکال بوده و مربوط به نمونه شاهد است. همانطور که مشاهده می‌گردد تغییرات ویسکوزیته کمپلکس در محدوده فشار ۰/۱ مگاپاسکال تا ۲۰۰ مگاپاسکال کاهش و پس از آن تا فشار ۶۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌باشد. اما در نگاه کلی این تغییرات رفتار می‌تواند برای کاربردها و فرآیندهای مختلف صنایع غذایی که تحت فشارهای مختلف کار می‌کنند معنادار و قابل استفاده باشد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که فشار و زمان تغییرات همسویی با یکدیگر دارند به گونه‌ای که با افزایش زمان آزمون از ۱۰ دقیقه تا ۳۰ دقیقه مقدار



شکل ۱۱- نمودار تغییرات ویسکوزیته کمپلکس بر حسب فشار در زمانهای مختلف

تقریباً برابر ویسکوزیته کمپلکس در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال و زمان ۳۰ دقیقه است. نمودار شکل ۱۲ تغییرات سه بعدی ویسکوزیته کمپلکس، فشار و زمان را به صورت کانتورهای هم‌تراز نمایش می‌دهد و در واقع تایید کننده همان نمودار ۱۱ است. در این نمودار تاثیر افزایش بودن ویسکوزیته کمپلکس با افزایش فشار و زمان به خوبی قابل مشاهده است.

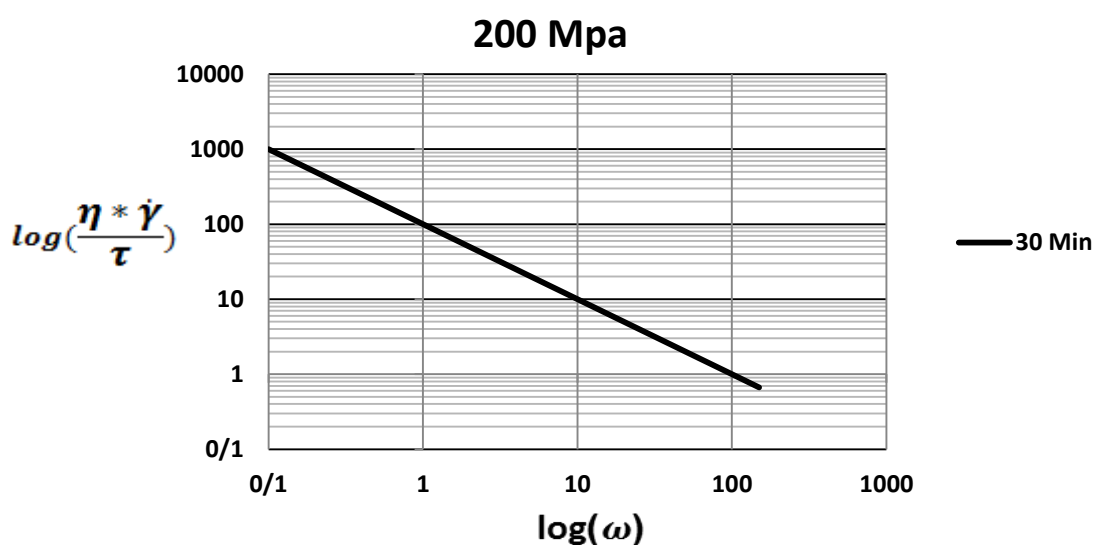
این نمودار نتیجه مهم دیگری را نشان می‌دهد و آن اینکه برای برخی از مواد تاثیر زمان فرآیند اعمال فشار می‌تواند به اندازه خود افزایش فشار نقش داشته باشد و یا به عبارتی دیگر می‌توان به جای افزایش فشار زمان فرآیند را افزایش داد تا ویسکوزیته کمپلکس مقدار مشابه معادل فشار بیشتر را داشته باشد. به طور مثال ویسکوزیته کمپلکس برای فشار ۶۰۰ مگاپاسکال و زمان ۱۰ دقیقه



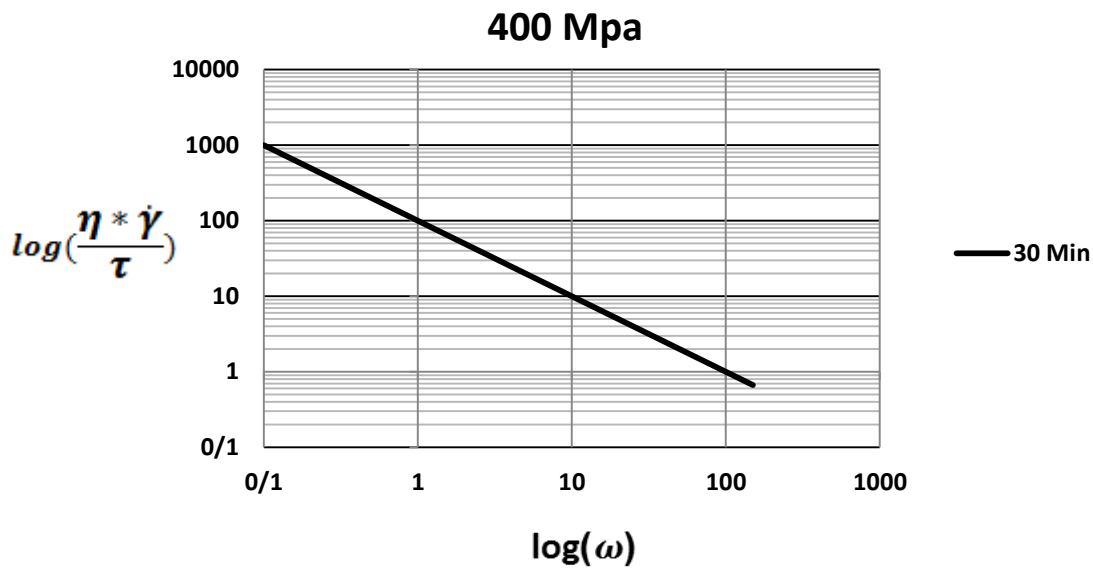
شکل ۱۳- نمودار تغییرات ویسکوزیته کمپلکس بر حسب تغییرات فشار و زمان

است و تنها تفاوت در مخرج دو کسر است، که در گروه اول مخرج کسر فشار و در گروه دوم مخرج کسر تنش برشی که واحد آنهم پاسکال است، ولیکن این گروه نمودارهای ۱۳ تا ۱۵ نمایش متفاوتی از رفتار کمیت‌های بکار رفته از عدد بی‌بعد را به نمایش گذاشته است. در واقع این مطلب این را نشان می‌دهد که به دست آوردن یک عدد بی‌بعد مناسب چقدر مهم بوده و می‌تواند نمایش متفاوت و بعضاً مفیدی از رفتار یک ماده را نشان دهد. مطلب مهم در این عدد بی‌بعد این است که شیب همه نمودارها برای ۳ فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مساوی است.

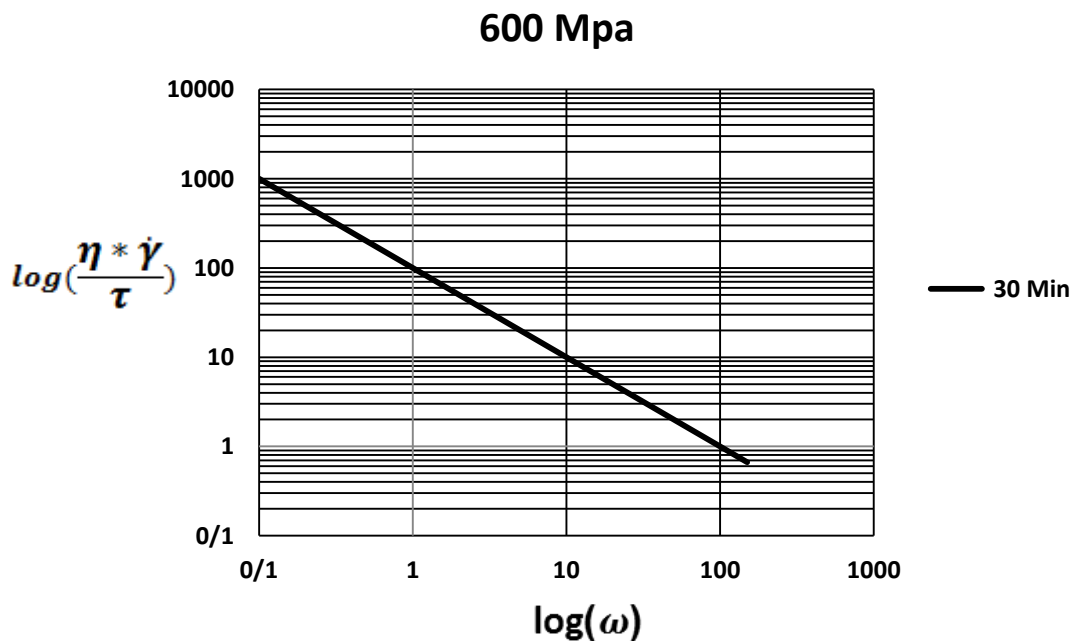
نمودار شکل‌های ۱۴ تا ۱۵ نمایش تغییرات لگاریتم عدد بی‌بعد π_{13} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشارهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال را در زمان ۳۰ دقیقه نمایش می‌دهند. نکته مهم در این گروه نمودار یکسان بودن و منفی بودن شیب تغییرات لگاریتم عدد بی‌بعد π_{13} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای است. اگر به نمودارهای ۸ تا ۱۰ و نمودارهای ۱۴ تا ۱۵ توجه شود مشاهده می‌گردد که محور افقی هر دو یکسان و محور عمودی هم به لحاظ جنس کمیت‌های بکار رفته در صورت و مخرج یکسان و دیمانسیون صورت و مخرج هر کدام پاسکال



شکل ۱۴- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی‌بعد π_{13} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال



شکل ۱۵- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{13} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۴۰۰ مگاپاسکال



شکل ۱۶- نمودار تغییرات لگاریتم عدد بی بعد π_{13} بر حسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال

نتیجه‌گیری

این پژوهش شامل دو بخش اصلی بود. بخش اول مربوط به میانی آنالیز ابعادی و به دست آوردن اعداد بی بعد و بخش دوم مربوط به نمایش اعداد بی بعد با استفاده از نتایج آزمون رئومتری که بر روی نشاسته ارزن انجام گرفته بود. در بخش اول از میان همه پارامترهای مرتبط با آزمون‌های رئومتری و فرآیند فشار بالا، مهمترین پارامترها

انتخاب و اعداد بی بعد مربوطه با استفاده از تئوری باکینگهام برای اولین بار برای فرآیند فشار بالا بدست آمد. مهمترین نتیجه استفاده از فرآیند بی بعد سازی این بود که بدون نوشتن معادلات پیچیده و بعضاً غیر قابل حل نظیر پیوستگی، برنولی، مومنوم یا در حالت کلی معادله ناویر - استوکس، ارتباط بین پارامترهای حاکم بر مساله در قالب چند عدد بی بعد مشخص گردید. نتیجه مهم دیگر اینکه

بود که با استفاده از روش آنالیز ابعادی متغیرهای زائد در طی فرآیند بی‌بعد سازی و با روشی کاملاً ریاضی و مطمئن از معادلات حذف شدند، این در حالی است که در سایر روشها کم و زیاد کردن متغیرها نیاز به تسلط و درک عمیق از آن پدیده و فرآیند دارد.

در بخش دوم به عنوان مطالعه موردی از داده‌های رئومتر نشتی‌ناسته ارزن که تحت فشار بالا قرار گرفته بودند استفاده شد. این داده صرفاً برای نمایش اعداد بی‌بعد به کار گرفته شده است. از آنجا که چنین اعداد بی‌بعدی برای فرآیند فشار بالا برای اولین بار ارائه شده لذا امکان مقایسه نتایج بدست آمده با پژوهش‌های مشابه وجود نداشت. با این وجود بررسی نتایج بدست آمده از اعداد بی‌بعد نشان داده است که اثر اعمال فشار بالا و مدت زمان آن تاثیر معنا داری داشته است. مهمترین نتیجه دیگری که در این بخش وجود دارد اینکه اثر مدت زمان اعمال فشار می‌تواند به اندازه مقدار فشار موثر باشد، این بدان معناست که با فشار کمتر و زمان بیشتر می‌توان به همان نتیجه‌ای رسید که با فشار بیشتر و زمان کمتر می‌توان به آن رسید.

با استفاده از آنالیز ابعادی روابطی به دست آمد که نحوه ارتباط بین متغیرها و درجه اهمیت آنها در طی فرآیند فشار بالا قبل از انجام هر آزمونی مشخص گردید. به این ترتیب با استفاده از این روابط، آزمون‌ها هدفمند شده و می‌توان روی پارامترهای مهم و اثر گذار تمرکز بیشتری نمود و این چیزی است که در سایر روشهای تجربی پیش بینی آن غیر ممکن است. و لذا با این اطلاعات می‌توان آزمون‌ها را بر اساس این پارامترها طرح ریزی نموده و از پرداختن به متغیرهای غیر مهم و یا زائد اجتناب ورزید و از صرف وقت و هزینه اضافی جلوگیری نمود. همانطور که نشان داده شد با استفاده از اعداد بی‌بعد تعداد آزمون‌ها به طور چشم‌گیری کاهش یافت و تنها با انجام ۱۰ آزمون تابع ویسکوزیته بر حسب متغیرهای فشار، تنش برشی و نرخ برشی معلوم گردید. همچنین با در اختیار داشتن توابع بدست آمده در این قسمت نیازی به استفاده از مدل‌های برازش نبوده، ضمن آن که در مدل‌های برازش فقط توابع یک متغیره قابل دستیابی است، در حالیکه توابع بدست آمده در این قسمت چند متغیره هستند. مهمترین نتیجه دیگری که در بخش آنالیز ابعادی وجود داشت این

منابع

- André, C., Demeyre, J.F., Gatumel, C., Berthiaux, H., & Delaplace, G. (2012). Dimensional analysis of a planetary mixer for homogenizing of free flowing powders: Mixing time and power consumption. *Chemical Engineering Journal*, 198, 371-378.
- Agrawal, S. K. (2006). *Fluid Mechanics and Machinery*. 11th Reprint. Tata McGraw-Hill.
- Barenblatt, G. I. (1987). *Dimensional analysis*. CRC Press.
- Bhupender, S. K., Rajneesh, B., & Baljeet, S. Y. (2013). Physicochemical, functional, thermal and pasting properties of starches isolated from pearl millet cultivars. *International Food Research Journal*, 20(4), 1555.
- Błaszczak, W., Valverde, S., & Fornal, J. (2005). Effect of high pressure on the structure of potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 59(3), 377-383.
- Buckow, R., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). High pressure phase transition kinetics of maize starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 469-475.
- Chaudemanche, C., Henaut, I., & Argillier, J. F. (2009). Combined effect of pressure and temperature on rheological properties of water-in-crude oil emulsions. *Applied Rheology*, 19(6), 62210-1.
- Douzals, J. P., Perrier Cornet, J. M., Gervais, P., & Coquille, J. C. (1998). High-pressure gelatinization of wheat starch and properties of pressure-induced gels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(12), 4824-4829.
- Hannes Deponte, Alberto Tonda, Nathalie Gottschalk, Laurent Bouvier, Guillaume Delaplace, Wolfgang Augustin, Stephan Scholl. (2020). Two complementary methods for the computational modeling of cleaning processes in food industry. *Computers and Chemical Engineering*, 135, 106733.

Accepted Article

- Heydari, A., Razavi, S. M. A., Hesarinejad, M. A., & Farahnaky, A. (2021). New Insights into Physical, Morphological, Thermal, and Pasting Properties of HHP-Treated Starches: Effect of Starch Type and Industry-Scale Concentration. *Starch-Stärke*, 73(7-8), 2000179.
- Katsurayama, G.T., Sobenko, L.R., Camargo, A.P., Botrel, T.A., Frizzone, J.A., & Duarte, S.N. (2020). A Mathematical Model for Hydraulic Characterization of Microtube Emitters Using Dimensional Analysis. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22, 1123-1135.
- Kowalczyk, W., & Delgado, A. (2007). Dimensional analysis of thermo-fluid-dynamics of high hydrostatic pressure processes with phase transition. *International journal of heat and mass transfer*, 50(15-16), 3007-3018.
- Lachin, K., Turchiuli, C., Pistre, V., Cuvelier, G., Mezdour, S., & Ducept, F. (2020). Dimensional analysis modeling of spraying operation—Impact of fluid properties and pressure nozzle geometric parameters on the pressure-flow rate relationship. *Chemical Engineering Research and Design*, 163, 36-46.
- Lin, T., & Fernández-Fraguas, C. (2020). Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, 127, 109325.
- Liu, H., Yu, L., Simon, G., Dean, K., & Chen, L. (2009). Effects of annealing on gelatinization and microstructures of corn starches with different amylose/amylopectin ratios. *Carbohydrate Polymers*, 77(3), 662–669.
- Manjula, P., Kalaichelvi, P., & Dheenathayalan, K. (2010). Development of mixing time correlation for a double jet mixer. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(1), 115-120.
- Martins, R. D. A. (1981). The origin of dimensional analysis. *Journal of the Franklin Institute*, 311(5), 331-337.
- Muthamizhi, K., & Kalaichelvi, P. (2015). Development of Nusselt number correlation using dimensional analysis for plate heat exchanger with a carboxymethyl cellulose solution. *Heat and Mass Transfer*, 51(6), 815-823.
- Pan, T. Y., Gopirajah, R., Krishnamurthy, S., & Rizvi, S. S. (2020). Modeling of product temperature in a supercritical fluid extrusion process through dimensional analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13561.
- Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G., & Delaplace, G. (2013). β -lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: pilot-scale experiments and dimensional analysis. *Chemical Engineering Science*, 101, 432-450.
- Rubens, P., & Heremans, K. (2000). Pressure-temperature gelatinization phase diagram of starch: An in situ Fourier transform infrared study. *Biopolymers*, 54(7), 524–530.
- Stolt, M., Oinonen, S., & Autio, K. (2000). Effect of high pressure on the physical properties of barley starch. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1(3), 167-175.
- Streeter, V. L., Wylie E. B. and Bedford, K. W. (1998). *Fluid Mechanics*, 9th ed., McGraw Hill Book Company, New York.
- Strutt, J. W., & Rayleigh, J. W. S. B. (1894). *The theory of sound* (Vol. 1). Macmillan.
- Tina Ying Pan, Rajamanickam Gopirajah1, Sugirtha Krishnamurthy, Syed S.H. Rizvi. (2020). Modeling of product temperature in a supercritical fluid extrusion process through dimensional analysis. *J Food Process Eng*, 43:e13561.
- Wang, B., Li, D., Wang, L. J., Chiu, Y. L., Chen, X. D., & Mao, Z. H. (2008). Effect of high-pressure homogenization on the structure and thermal properties of maize starch. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 436-444.

Dimensional and experimental analysis of high hydrostatic pressure process Case study: Application of dimensionless numbers in millet starch rheological test

Mohammad Ali Hesarinejad¹, Seyyed Mahdi Mirzababae^{2*}, Omer Said TOKER³,
Samira Yeganehzad¹

1- Department of Food Processing, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

2- Department of Food Industry Machinery Design, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

* Corresponding author (m.mirzababae@rifst.ac.ir)

3- Department of Food Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey

Abstract

Most of the relationships governing many physical phenomena cannot be explicitly derived from survival principles and equations such as continuity, Bernoulli, momentum, or the Navier-Stokes equation in general. To solve this problem use the principles of dimensional analysis in determining the relationships governing the phenomenon. Dimensionless numbers and parameters can be obtained that play a role in determining the governing equations of a phenomenon. Dimensional analysis is a simple but powerful tool in engineering that enables rapid analysis of physical systems, making it easier to analyze complex problems, and significantly reducing the number of experiments. As mentioned, the most important reason for using dimensional analysis is reduce the number of experiments. In this research, for the first time, the dimensional analysis method is used to obtain the dimensionless numbers governing the hydrostatic high pressure process. In the next step, using Buckingham theory, dimensionless numbers governing the high pressure process are obtained. The measured quantities obtained from high pressure, frequency scanning and shear strain tests are then categorized in the form of dimensionless numbers obtained in advance and the behavior of the test substance (millet starch) is investigated. As a result, using dimensionless numbers, in addition to determining the relationship between variables and their degree of importance to each other, some behavioral properties of materials are also shown in the form of dimensionless graphs. In the high pressure test, the test material is subjected to a hydrostatic pressure of between 200 and 600 MPa for a period of 30 minutes.

Keywords: Dimensional analysis, Millet, High hydrostatic pressure, Starch

Accepted Article