https://journals.rifst.ac.ir
ISSN: 2252-0937(print), 2538-2357(online)
پژوهش و نوآوری در علوم و صنایع غذایی
سال ۱۴۰۲، جلد ۱۲، شماره ۲، صفحات ۱۳۶-۱۲۱
https://doi.org/10.22101/JRIFST.2022.329733.1328

JRIFST
مقالۀ کامل پژوهشی

تحلیل ابعادی و تجربی فرایند فشار هیدرواستاتیک بالا؛ مطالعهٔ موردی: به‌کارگیری اعداد بی‌بُعد در آزمون رئولوژیکی نشاستهٔ ارزن

محمدعلی حصاری‌نژاد[۱]، سیدمهدی میرزابابائی[۲*]، عمر سعد توکر[۳]، سمیرا یگانه‌زاد[۱]

۱- گروه فرآوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
۲- گروه طراحی ماشین‌آلات مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
* نویسندهٔ مسئول (m.mirzababaee@rifst.ac.ir)
۳- گروه مهندسی مواد غذایی، دانشگاهییلدیز، استانبول، ترکیه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳

واژه‌های کلیدی
ارزن
آنالیز ابعادی
باکینگهام
فشار هیدرواستاتیک بالا
نشاسته

OPEN ACCESS
CC BY

چکیده

اغلب روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را نمی‌توان به شکل صریح از اصول بقاء و معادله‌هایی نظیر پیوستگی، برنولی، مومنتوم یا در حالت کلی معادلهٔ ناویرـاستوکس به‌دست‌آورد. 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 بُعد دست‌یافت که در تعیین معادله‌های حاکم بر یک پدیده نقش دارند در این تحقیق برای اولین‌بار از روش تحلیل ابعادی برای به‌دست‌آوردن اعداد بی‌بُعد حاکم بر فرایند فشار بالای هیدرواستاتیک استفاده شده است، چراکه متغیرهای دخیل در این فرایند زیاد بوده و بهترین روش برای پیداکردن ارتباط بین آنها، استفاده از ابزار آنالیز ابعادی می‌باشد. در گام بعدی و پس از شناسایی متغیرهای مؤثر با استفاده از تئوری باکینگهام اعداد بی‌بُعد حاکم بر فرایند فشار بالا به‌دست‌آمده است. پس از آن کمیات اندازه‌گیری‌شده حاصل از آزمون‌های فشار بالا، روبش فرکانس و نرخ کرنش برشی در قالب اعداد بی‌بُعد که از قبل به‌دست‌آمده دسته‌بندی و به بررسی رفتار مادهٔ موردآزمایش (نشاستهٔ ارزن) پرداخته شده است. درنتیجه با استفاده از اعداد بی‌بُعد به‌دست‌آمده علاوه‌بر اینکه ارتباط بین متغیرها و درجهٔ اهمیت آنها نسبت به یکدیگر مشخص گردید، برخی از ویژگی‌های رفتاری مواد نیز در قالب نمودارهای بی‌بُعد نمایش داده شده است که با نمودارهای متداول تفاوت رفتاری دارد. دراین‌خصوص نمونهٔ تحت فشار هیدرواستاتیکی ۲۰۰ تا ۶۰۰ مگاپاسکال برای ۱۰تا۳۰ دقیقه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ویژگی‌های رئولوژیکی نشاستهٔ ارزن ازجمله ویسکوزیتهٔ کمپلکس با افزایش فشار و زمان اعمال آن تغییر قابل‌توجهی دارند.

مقدمه

آنالیز ابعادی

اغلب روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را نمی‌توان به شکل صریح از اصول بقاء و معادله‌هایی نظیر پیوستگی، برنولی، مومنتوم یا در حالت کلی معادلهٔ ناویرـاستوکس به‌دست‌آورد. در حالت عادی برای تعیین رابطهٔ ریاضی باید روابط را طی دو مرحله و با استفاده از مدل‌سازی در آزمایشگاه تعیین نمود. مرحلهٔ نخست: کلیهٔ متغیرهای لازم در به‌وجودآوردن آن پدیده تعیین گردند، مرحلهٔ دوم: برای تعیین متغیرهای حاکم بر یک پدیده و تعیین روابط میان آنها در آزمایشگاه، با تغییردادن یک متغیر و ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها، می‌توان نحوهٔ تأثیر

هر متغیر بر پدیدۀ موردمطالعه را سنجید. زیادبودن تعداد متغیرها و درنتیجه زیادبودن تعداد آزمایش‌های لازم برای تعیین مقادیر و نحوۀ تأثیر هریک از متغیرها بر پدیدۀ موردمطالعه از مهم‌ترین مشکلات این روش بوده که بعضا تعداد آزمایش‌ها آنقدر زیاد است که انجام آن از لحاظ صرف وقت و هزینه غیرممکن است. برای غلبۀ مشکلات یادشده، ساده‌ترین و مؤثرترین روش استفاده از تحلیل ابعادی است. با استفاده از تحلیل ابعادی و بی‌بُعدسازی می‌توان به تعداد متغیرهای کمتر در قالب اعداد بدون‌بُعد دست‌یافت که در تعیین معادله‌های حاکم بر یک پدیده نقش دارند (Agrawal, 1997). آنالیز ابعادی و مفاهیم اصلی آن که امروزه از آن استفاده می‌شود تقریباً از ۱۵۰ سال قبل منتشرشده ولی مفاهیم ابتدایی آن سابقۀ بسیار طولانی‌تری دارند، زیرا از زمانی که سیستم اندازه‌گیری مقادیر فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است، برخی از مفاهیم آنالیز ابعادی به‌طور ضمنی به‌کارگرفته شده‌اند. اولین‌بار در سال ۱۷۶۵ دربارۀ نقش ابعاد و آحاد در روابط فیزیکی مقاله‌هایی ارائه شد. در سال ۱۷۹۹ نیز به‌این‌نتیجه رسیدند که روابط معنی‌داری باید بین واحدهای مختلف اندازه‌گیری برقرار باشد، نتیجه‌ای که سرانجام در قضیۀ π باکینگهام رسمیت یافت (De A. Martins, 1981). در سال ۱۸۲۲ برای اولین‌بار در کتاب نظریۀ تحلیلی انتقال گرما اصل همگنی ابعادی و بعضی قواعد تشابه ابعادی برای انتقال گرما مطرح شد. آنالیز ابعادی همچنین برای به‌دست‌آوردن روابط بین کمیت‌های فیزیکی که در یک پدیدۀ خاص دخیل هستند، استفاده می‌شود. این مفهوم برای اولین‌بار در سال ۱۸۷۲ به‌کارگرفته شد و سپس در سال ۱۸۷۷ در کتابی تحت عنوان نظریۀ صوت منتشر شد (Rayleigh, 1894). در سال‌های ۱۸۹۲ و ۱۹۱۱ مقاله‌هایی دربارۀ قضیۀ π ارائه شد. بوکینگهام در سال ۱۹۱۴ قضیۀ π را برای توصیف گروه‌های بی‌بُعد مطرح کرد و پس از آن به قضیۀ π باکینگهام معروف شد. در اوایل دهۀ ۱۹۲۲ نیز نظریۀ کلی تحلیل ابعادی مطرح گردید. آنالیز ابعادی روشی برای بی‌بُعدسازی کمیت‌ها به‌منظور تجزیه، تحلیل و تفسیر داده‌هاست. با استفاده از نمایش داده‌های بی‌بُعدشده می‌توان حجم زیادی از جداول خروجی را در یک مجموعۀ منحنی نمایش داد. همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی قوانین تشابه ابعادی را می‌توان استنتاج کرد. به‌این‌صورت‌که پس از تعیین نتایج آزمایش یک مدل کوچک، با استفاده از قوانین تشابه ابعادی می‌توان نتایج مربوط به نمونۀ اصلی را پیش‌بینی کرد (Barenblatt, 1987). ازجمله کاربردهای آنالیز ابعادی در مسائل مهندسی، استفاده از آنالیز ابعادی در تیمار فشار بالای مواد زیستی است که تحت‌تأثیر پارامترهای داخلی و خارجی زیادی قرار می‌گیرد. آنالیز ابعادی امکان کاهش تعداد این پارامترها و همچنین تعمیم‌دادن مکانیسم‌ها و پدیده‌های فرایند را فراهم می‌کند. با استفاده از معادله‌های جبری و یا معادله‌های دیفرانسیل مربوط می‌توان اعداد یا گروه‌های بدون‌بُعد را که روند فرایند فشار بالا را توصیف می‌کنند، به‌دست‌آورد (Kowalczyk & Delgado, 2007). همچنین Petit و همکاران (۲۰۱۳) نقش ۴ پارامتر مستقل فرایند، یعنی دمای محصول در خروجی مبدل حرارتی، میانگین زمان ماندگاری، افزایش دما بین ورودی و خروجی مبدل حرارتی و اثربخشی گرما را در دناتوراسیون، تجمع و رسوب‌گذاری کنسانترۀ بتا-لاکتوگلوبولین به‌عنوان یک مایع مدل برای مشتقات شیر را بررسی کردند. Manjula و همکاران (۲۰۱۰) 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، هدایت حرارتی، شاخص رفتار جریان، شاخص قوام و اختلاف دما بستگی داشته و با روش آنالیز ابعادی وابستگی‌های این متغیرها را با یکدیگر به‌دست‌آوردند. Muthamizhi و Kalaichelvi (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی به بررسی همبستگی عدد ناسلت[1] ازنظر تمام پارامترها برای تعیین ضرایب انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی صفحه‌ای برای غلظت‌های مختلف محلول کربوکسی‌متیل سلولز (CMC[2]) پرداخته و نتایج حاصل را با مدل‌های موجود موردمقایسه قرار دادند. درنتیجه ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت CMC از ۰/۱ تا ۰/۶ درصد وزنی افزایش یافت و همچنین با افزایش غلظت این ماده سرعت جریان مایعات سرد و گرم از ۰/۰۱۶ به ۰/۰۹۹ کیلوگرم در ثانیه افزایش داشت. در تحقیقی دیگر از روش π باکینگهام برای پیش‌بینی

[1] Nusslet

[2] Carboxymethylcellulose

حداکثر دمای فرایند اکستروژن و توسعهٔ مدل آن استفاده شده است. پارامترهای مؤثر در این فرایند قطر پیچ، طول اکسترودر، سرعت جریان مادهٔ خنک‌کننده، دمای ورودی مادهٔ خنک‌کننده، گرمای ویژهٔ مادهٔ خنک‌کننده، دمای ورودی خوراک، سرعت جریان خوراک مرطوب، سرعت پیچ و حداکثر دمای اکسترودر بوده که باتوجه‌به زیادبودن تعداد متغیرها از قضیهٔ π باکینگهام برای گروه‌بندی متغیرها استفاده شده است (Pan *et al.*, 2020). گروهی از محققین با استفاده از آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر در فرایند اختلاط پودر توسط میکسر سیاره‌ای را به‌دست‌آورده و نشان دادند که با دو عدد نسبت سرعت چرخش پره و عدد فرود می‌توان فرایند جریان پودر را کنترل نمود. همچنین آنها نشان دادند که استفاده از آنالیز ابعادی و اعداد بی‌بُعد به‌دست‌آمده برای بیان فرایند همگن‌سازی پودرها مناسب می‌باشد (Andre *et al.*, 2012). در تحقیقی دیگر با استفاده از آنالیز ابعادی و قضیهٔ π باکینگهام پارامترهای مؤثر در میکروتیوپ‌های آبیاری برای ایجاد شرایط رژیم جریان آرام در داخل لوله‌های با قطر کم را در قالب اعداد بی‌بُعد به‌دست‌آورده است. این پارامترها شامل فشار، طول میکروتیوب، سرعت جریان، قطر داخلی میکروتیوب، شتاب جاذبه و خواص فیزیکی آب بود که آنها را در گروه‌های بی‌بُعد دسته‌بندی نموده و سپس با انجام یک آزمایش نتایج به‌دست‌آمده را در قالب اعداد بی‌بُعد نمایش دادند (Katsurayama *et al.*, 2020). همچنین Lachin و همکاران (۲۰۲۰) از تحلیل ابعادی برای مدل‌سازی فرایند اتمیزه‌کردن مایع با استفاده از نازل‌های فشار بالا استفاده نمودند. آنها با به‌دست‌آوردن عدد اُفت فشار بی‌بُعد به پیش‌بینی اُفت فشار طی فرایند اتمیزه پرداختند. در این تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر عبارت بودند از دبی جریان، ویسکوزیته، چگالی و پارامترهای هندسی نازل که در چند گروه بی‌بُعد و با استفاده از قضیهٔ π باکینگهام دسته‌بندی شدند. Pan و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل همبستگی برای پیش‌بینی حداکثر دما در فرایند اکستروژن یک سیال فوق‌بحرانی با استفاده از تحلیل ابعادی و قضیهٔ π باکینگهام به‌دست‌آوردند. آنها با استفاده از تحلیل ابعادی دو عدد بی‌بُعد که مربوط به نسبت قطر پیچ به طول پیچ و نیز نسبت انرژی اضافه‌شده به انرژی حذف‌شده می‌باشد را برای بررسی مدل ارائه نمودند. همچنین با استفاده از یک سری آزمایش‌های تجربی صحت نتایج پیش‌بینی را بررسی نموده که تطابق خوبی را نشان داده است. اغلب کارخانه‌های فراوری مواد غذایی با استفاده از مواد شیمیایی با دمای بالا و مدت طولانی برای تمیزکاری استفاده می‌نمایند که این امر موجب هزینه‌های بالا و اثرات زیست‌محیطی زیان‌باری را به‌دنبال خواهد داشت. باتوجه‌به دشواری فرایند تمیزکاری در صنایع غذایی و پارامترهای متعدد از تحلیل ابعادی کمک گرفته‌اند. نتایج بی‌بُعدسازی به‌گونه‌ای است که در شرایط و موقعیت‌های مختلف در صنایع غذایی و دیگر موارد مشابه می‌توان از آن استفاده نمود. اعداد بی‌بُعد به‌دست‌آمده عبارت بودند از عدد رینولدز، عدد چگالی که نسبت تراکم خاک به چگالی مادهٔ تمیزکننده را نشان می‌دهد و عدد خاک که یک عدد بی‌بُعد جدید است و خواص خاک‌های غذایی را بیان می‌کند (Deponte *et al.*, 2020).

فشار بالا و اصلاح ساختار

ظهور و پیشرفت فناوری‌های نوین در صنایع غذایی به‌دلیل تأثیر نامطلوب حرارت و درراستای کاهش صدمات واردشده به مواد غذایی اهمیت خاصی در دهه‌های اخیر پیدا کرده است. در سال ۱۸۹۹، به‌طور موفقیت‌آمیزی از فشارهای هیدرواستاتیک بالا برای بهبود و حفظ کیفیت شیر استفاده نمود. بدین‌ترتیب کاربرد این فرایند در کنترل میکروارگانیسم‌ها و نگهداری مواد غذایی تاریخچهٔ طولانی دارد. فرایند فشار هیدرواستاتیک بالا (HHP[1]) به‌عنوان یک فناوری جایگزین برای عملیات حرارتی، پتانسیل قابل‌توجهی ازنظر ایمنی و کیفیت در دهه‌های اخیر به اثبات رسانده است و گزارش‌های متعددی درمورد تأثیر این فرایند بر ژلاتینه‌شدن نشاسته و تغییر در خواص فیزیکوشیمیایی نشاسته‌های مختلف ارائه شده است (Liu *et al.*, 2009). این تکنولوژی همچنین می‌تواند عملکرد مولکول‌های پروتئین و کربوهیدرات را تحت‌تأثیر قرارداده و منجربه‌تولید و توسعهٔ محصولات جدید و بهینه‌سازی فرایندهای تولید مواد غذایی گردد. اصلاح ساختار مواد غذایی با هدف تغییر در رفتار رئولوژیکی این مواد ازجمله

[1] High Hydrostatic Pressure

مهم‌ترین کاربردهای فرایند فشار بالای هیدرواستاتیک می‌باشد. اغلب روش‌های اصلاح ساختار نشاسته توام با آسیب‌هایی برای مادهٔ غذایی است اما یک روش مؤثر برای اصلاح ساختار و بهبود عملکرد آن استفاده از تکنولوژی فشار هیدرواستاتیک بالا می‌باشد. این تکنولوژی غیرحرارتی بوده و می‌تواند اصلاح ساختار نشاسته را بدون آسیب فیزیکی انجام و فرصت جدیدی را برای استفاده از نشاسته‌های اصلاح‌شده در محصولات غذایی فراهم نماید (Wang *et al.*, 2008). پدیدهٔ ژلاتینه‌شدن نشاسته شامل هیدراتاسیون، تورم گرانول‌ها و خروج آمیلوز بوده و به‌عنوان انتقال فاز گرانول‌ها از حالت منظم به حالت نامرتب تعریف می‌شود که منجربه ازدست‌دادن نظم بلورینگی و شکل دانه‌ای می‌گردد. اثر تیمار با فشار هیدرواستاتیک بالا در مقایسه با عملیات رطوبتی و حرارتی بر مکانیسم ژلاتینه‌شدن ساختار نشاسته و گرانول یکسان نیست. نمونه‌های تیمارشده با فرایند فشار بالا، تورم گسترده‌ای را نشان نمی‌دهند، بنابراین این فرایند با تأثیر بر ساختار بی‌شکل و بلوری، منجربه تورم محدود گرانول‌های نشاسته می‌شود و ضمن حفظ ساختار دانه‌ای، آمیلوز بیشتری در گرانول‌ها باقی می‌ماند (Buckow *et al.*, 2007; Douzals *et al.*, 1998; Stolt *et al.*, 2000). دانهٔ ارزن حاوی ۷۰ درصد نشاسته است. دانهٔ ارزن علاوه‌بر ارزش غذایی، پتانسیل بهبود سلامت انسان را دارد و به‌دلیل وجود مواد مغذی، مواد معدنی و ویتامین‌های مختلف ازجمله منیزیم، فسفر، منگنز و سلنیوم در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری پیدا کرده است (Bhupender *et al.*, 2013).

هدف از این تحقیق به‌دست‌آوردن متغیرهای مؤثر در فرایند فشار بالای هیدرواستاتیک با تأکید بر متغیرهای مربوط به رفتار جریان در قالب اعداد و گروه‌های بی‌بُعد (با استفاده از قضیهٔ π باکینگهام) برای اولین‌بار است. پس از آن برای مشاهدهٔ اعداد بی‌بُعد از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون رئومتری نشاستهٔ ارزن که قبلا تحت تیمار فشار بالا قرارگرفته بودند، استفاده و سپس نتایج به‌صورت نمودارهای بی‌بُعد نمایش داده شده است. با بررسی منابع مشخص گردید که تاکنون از تحلیل ابعادی برای به‌دست‌آوردن روابط حاکم بر فرایند فشار بالای هیدرواستاتیک و ارتباط بین متغیرهای آن انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

روش π باکینگهام

قضیهٔ باکینگهام (Streeter *et al.*, 1988)، روشی نظام‌مند برای تعیین مجموعه‌ای از پارامترهای بدون‌بُعد جهت توصیف یک فرایند فیزیکی است. در این روش ابتدا مجموعه‌ای از n متغیر وابستهٔ $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ که همهٔ این متغیرها در فرایند فیزیکی نقش دارند را نوشته و سپس رابطهٔ میان این متغیرها به‌صورت رابطهٔ (۱) و (۲) تعریف می‌ گردد (Streeter *et al.*, 1988):

رابطهٔ (۱)

$$f_1(a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n) = 0$$

رابطهٔ (۲)

$$a_2 = f_2(a_2, a_3, \ldots, a_n)$$

سپس باتوجه‌به اینکه کلیهٔ متغیرهای فوق دارای بُعد هستند، لذا با ترکیب آنها می‌توان به شکل بی‌بُعد رابطهٔ (۳) دست یافت:

رابطهٔ (۳)

$$\pi = a_1^{x_1} \times a_2^{x_2} \times a_3^{x_3} \times, \ldots\ a_n^{x_n}$$

در رابطهٔ (۳)، π عدد بی‌بُعد، x_i متغیرهای عددی محض و a_i متغیرهایی برحسب ابعاد اصلی M، L و T می‌باشند. ازآنجاکه رابطهٔ (۳) رابطه‌ای بدون‌بُعد است، حاصل‌جمع توان‌های سه‌بُعد اصلی M، L و T باید برابر صفر باشند. درنهایت از کم‌کردن تعداد پارامترهای بدون‌بُعد (n) از تعداد ابعاد اصلی (m) تعداد گروه‌های بی‌بُعد (π_i) به‌دست می‌آید. یعنی رابطهٔ (۱) و (۲) به شکل رابطهٔ (۴) و (۵) تعریف می‌شوند:

رابطهٔ (۴)

$$\emptyset(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \ldots, \pi_n) = 0$$

رابطهٔ (۵)

$$\pi_1 = \emptyset_1(\pi_2, \pi_3, \ldots, \pi_n)$$

در رابطهٔ (۴) و (۵) $\emptyset$ و $\emptyset_1$ توابع چندمتغیره و π_iها اعداد بی‌بُعد می‌باشند.

جدول ۱- کمیت‌های مرتبط با پدیدهٔ موردبررسی

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

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

c_p	t	τ_0	$\dot{\gamma}$	T_g	θ	ρ	P	η	n / m
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	M
۲	۰	-۱	۰	۰	۰	-۳	-۱	-۱	L
-۲	۱	-۲	-۱	۰	۰	۰	-۲	-۱	T
-۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	θ

تحلیل ابعادی فرایند فشار بالا

به‌منظور بررسی پارامترهایی که در فرایند فشار بالا بر مادهٔ موردآزمایش تأثیر دارند از آنالیز ابعادی کمک گرفته شده است. طبق آنچه تاکنون گفته شد برای تحلیل ابعادی یک پدیدهٔ فیزیکی بایستی تمام کمیت‌هایی که بی‌شک و یا شاید بر آن پدیده مؤثر باشند را به‌طوری‌که چیزی نادیده گرفته نشود، به‌کارگرفت. این بدان معنی است که چنانچه کمیتی مؤثر نباشد خودبه‌خود در فرایند بی‌بُعدسازی حذف می‌شود. برهمین‌اساس در آزمون‌های رئولوژی مواد گوناگون کمیت‌های زیادی وجود دارند که برای تحلیل رفتار جریان یک سیال به‌کارگرفته می‌شوند. برخی از این کمیت‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. از این میان پارامترهایی که مهم هستند و ازطرفی امکان اندازه‌گیری آن وجود دارد در جدول (۲) به‌همراه ابعاد فیزیکی آن نشان داده شده است.

فرایند بی‌بُعدسازی

طبق تئوری باکینگهام بایستی ابتدا از میان متغیرهای موجود متغیرهای تکرارشونده را انتخاب نمود. متغیرهای تکرارشونده آن دسته از متغیرهایی هستند که در تمام ترم‌های π مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد این متغیرهای تکرارشونده برابر با تعداد ابعاد مرجع درنظرگرفته می‌شوند. در ادامه برای اجرای فرایند بی‌بُعدسازی ابتدا تعداد اعداد بی‌بُعدی که می‌توان به‌دست‌آورد را باید مشخص نمود. باتوجه‌به جدول (۲) تعداد متغیرهای انتخاب‌شده ۹ و تعداد ابعاد مسئله ۴ می‌باشد و لذا ۵ عدد بی‌بُعد به‌دست خواهد آمد. طبق جدول (۱) در این مسئله متغیرهایی را که به‌عنوان متغیر تکرارشونده درنظرگرفته‌شده است عبارتند از:

P, θ, ρ, γ

و سایر متغیرها عبارتند از:

η, T_g, τ_o, t, cp

با استفاده از رابطهٔ (۳) برای به‌دست‌آوردن اولین عدد بی‌بُعد به‌صورت رابطهٔ (۶) خواهد بود:

رابطهٔ (۶)

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

با جای‌گذاری ابعاد اصلی برای همهٔ متغیرها، رابطهٔ (۷) به‌دست‌آمد:

رابطهٔ (۷)

$$\pi_1 = \mathrm{M}L^{-1}T^{-1}[\mathrm{M}L^{-3}]^a[\mathrm{M}L^{-1}T^{-2}]^b[T^{-1}]^c[\theta]^d$$

از برابر قراردادن توان‌های مجهول با توان‌های متناظر و حل دستگاه ۴ معادله و ۴ مجهول، توان‌های مجهول محاسبه و اولین عدد بی‌بُعد مطابق رابطهٔ (۸) به‌دست می‌آید:

رابطهٔ (۸)

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

از حل دستگاه رابطهٔ (۸) توان‌های مجهول مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{a} = 1, \mathrm{b} = -1, \mathrm{c} = 1, \mathrm{d} = 0$$

با جای‌گذاری در رابطهٔ (۷)، به‌صورت رابطهٔ (۹) تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۹)

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

همان‌طورکه ملاحظه می‌شود متغیر دانسیته و دما در این عدد بی‌بُعد نقشی نداشته و از معادله حذف گردید. برای به‌دست‌آوردن ۴ عدد بی‌بُعد دیگر فرایند قبل تکرار شده است (رابطهٔ ۱۰ تا ۱۳).

رابطهٔ (۱۰)

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

رابطهٔ (۱۱)

$$\pi_3 = \frac{T_G}{\theta}$$

رابطهٔ (۱۲)

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

رابطهٔ (۱۳)

$$\pi_5 = \frac{\rho\theta c_P}{P}$$

یک عدد بی‌بُعد که نیاز به فرایند بی‌بُعدسازی ندارد، عدد بی‌بُعد تانژانت دلتاست (رابطهٔ ۱۴).

رابطهٔ (۱۴)

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

تا این مرحله تعداد ۵ عدد بی‌بُعد از فرایند بی‌بُعدسازی و ۱ عدد بی‌بُعد نیز به‌صورت مستقیم به‌دست‌آمد. طبق تئوری‌های آنالیز ابعادی نشان داده شده است که با انجام عملیات جبری روی اعداد بی‌بُعد، می‌توان اعداد بی‌بُعد جدیدی به‌دست‌آورد. بنابراین برخی از این اعداد بی‌بُعد جدید مطابق رابطهٔ (۱۵) تا (۱۹) به‌دست‌آمد:

رابطهٔ (۱۵)

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

رابطهٔ (۱۶)

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

رابطهٔ (۱۷)

$$\pi_9 = \frac{\pi_1}{\pi_4} = \frac{\eta}{Pt}$$

رابطهٔ (۱۸)

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

رابطهٔ (۱۹)

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

ازطرفی عددهای بی‌بُعد π_1 و π_8 را می‌توان برحسب فرکانس زاویه‌ای و ویسکوزیتهٔ کمپلکس محاسبه نمود، چراکه دیمانسیون نرخ برشی با فرکانس زاویه‌ای و دیمانسیون ویسکوزیتهٔ کمپلکس با ویسکوزیتهٔ دینامیکی برابر است با این جای‌گذاری، رابطهٔ (۲۰) و (۲۱) به‌دست می‌آیند:

رابطهٔ (۲۰)

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

رابطهٔ (۲۱)

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

علاوه‌بر به‌دست‌آوردن اعداد بی‌بُعد می‌توان اعداد بی‌بُعد را به‌صورت تابعی از یک یا چند عدد بی‌بُعد نیز به‌دست آورد. به‌طورمثال می‌توان رابطهٔ (۲۲) را محاسبه نمود:

رابطهٔ (۲۲)

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

و یا در ساده‌ترین حالت رابطهٔ (۲۳) به‌دست می‌آید:

رابطهٔ (۲۳)

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

این جنبه از اعداد بی‌بُعد که به‌صورت تابعی از یک عدد بی‌بُعد محاسبه می‌شود، کاربرد بیشتری دارد. چنانچه رابطهٔ (۲۳) برحسب عددهای بی‌بُعد به‌دست‌آمده محاسبه شود، رابطهٔ (۲۴) و (۲۵) تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۲۴)

رابطهٔ (۲۵)

$$\frac{\eta\dot{\gamma}}{P} = F(\frac{\tau_0}{P})$$

$$\eta = \frac{P}{\dot{\gamma}}\, F(\frac{\tau_0}{P})$$

همان‌طورکه مشاهده می‌شود دراین‌رابطه ویسکوزیته به‌صورت ضریبی از فشار و نرخ کرنش در یک تابع مجهول که خود وابسته به فشار و تنش برشی می‌باشد، بیان گردیده است. پس از این با انجام چند آزمایش می‌توان تابع F را به‌دست‌آورد و به چگونگی تغییرات ویسکوزیته برحسب سایر متغیرها پی‌برد. این یکی از مهم‌ترین دستاوردهای آنالیز ابعادی است به‌گونه‌ای‌که می‌توان رفتار تمامی کمیت‌های مؤثر در یک پدیده را برحسب یکدیگر و در قالب اعداد بی‌بُعد که مستقل از سیستم دستگاه انتخابی هستند را مطالعه نمود، بدون حل‌نمودن معادله‌های حاکم بر میدان که اغلب به‌صورت دقیق و یا تحلیلی قابل حل نیستند. این روابط را بین هر چند تا از اعداد بی‌بُعد می‌توان تعریف نمود. مهم‌ترین نکته این است که امکان انجام آزمایش و اندازه‌گیری آن کمیت‌ها وجود داشته باشد، درغیراین‌صورت هیچ محدودیتی در نوشتن اعداد بی‌بُعد برحسب یکدیگر وجود ندارد. در ادامه دو عدد بی‌بُعد دیگر برحسب یکدیگر به‌دست‌آورده می‌شود. از قبل دو عدد بی‌بُعد π_1 و π_8 به‌دست‌آمدند. چنانچه این دو عدد بی‌بُعد به فرم تابع بیان گردد؛ رابطهٔ (۲۶) تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۲۶)

$$\pi_1 = F(\pi_8)$$

و یا برای مشخص‌شدن شکل تابع از رابطهٔ (۲۷) تعریف می‌شود:

رابطهٔ (۲۷)

$$\pi_1 = A(\pi_8)^n$$

در رابطهٔ (۲۷)، دو پارامتر A و n با انجام تعدادی آزمایش به‌دست می‌آید. با جای‌گذاری π_1 و π_8 در رابطهٔ (۲۷)، رابطهٔ (۲۸) محاسبه می‌شود:

رابطهٔ (۲۸)

$$\frac{\eta\dot{\gamma}}{P} = F(\frac{\eta\dot{\gamma}}{\tau_0})$$

با جای‌گذاری پارامترهای A و n در رابطهٔ (۲۸)، رابطهٔ (۲۹) به‌دست می‌آید:

رابطهٔ (۲۹)

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

و یا رابطهٔ ویسکوزیته برحسب متغیرهای فشار، تنش برشی و سرعت برشی مطابق رابطهٔ (۳۰) خواهد بود.

رابطهٔ (۳۰)

$$\eta = \frac{\sqrt[1-n]{AP}}{\dot{\gamma}}\,\tau_0^{\,(\frac{n}{n-1})}$$

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

آزمون	اعمال P	اندازه‌گیری η	اندازه‌گیری τO	محاسبهٔ π_1	محاسبهٔ π_8
۱	P_1	η_1	τ_{O1}	π_{10}	π_{80}
۲	P_2	η_2	τ_{O2}	π_{11}	π_{81}
۳	P_3	η_3	τ_{O3}	π_{12}	π_{82}
۴	P_4	η_4	τ_{O4}	π_{13}	π_{83}
۵	P_5	η_5	τ_{O5}	π_{14}	π_{84}
۶	P_6	η_6	τ_{O6}	π_{15}	π_{85}
۷	P_7	η_7	τ_{O7}	π_{16}	π_{86}
۸	P_8	η_8	τ_{O8}	π_{17}	π_{87}
۹	P_9	η_9	τ_{O9}	π_{18}	π_{88}
۱۰	P_{10}	η_{10}	τ_{O10}	π_{19}	π_{89}

همان‌طورکه مشاهده می‌شود بدون حل معادله‌ها، میدان رابطهٔ ویسکوزیته برحسب تابعی از فشار، تنش برشی و نرخ برش به‌دست‌آمد. این رابطه برای اولین‌بار به‌دست‌آمده و در فرایندهایی که هم‌زمان فشار و ویسکوزیته وجود دارد می‌توان از آن استفاده نمود. از همه مهم‌تر اینکه با تعداد ۱۰ آزمایش می‌توان رابطهٔ بین ویسکوزیته را با فشار، تنش برشی و نرخ برش تعیین کرد، درحالی‌که بدون استفاده از آنالیز ابعادی برای پیداکردن ارتباط بین ۴ متغیر بایستی 10^4 (۱۰۰۰۰) آزمایش انجام داد که عملا غیرممکن و یا بسیار پرهزینه خواهد بود. همان‌طورکه گفته شد برای به‌دست‌آوردن مجهولات A و n لازم است تعداد ۱۰ آزمایش انجام گیرد. با انجام این تعداد آزمایش و میانگین‌گرفتن از A و n که از ۱۰ آزمایش به‌دست‌آمده، ضرائب تابع مجهول F به‌دست‌آمده و درنتیجه رابطهٔ (۳۰) قابل محاسبه است. مراحل انجام محاسبهٔ A و n به‌این‌ترتیب است که ابتدا با انجام آزمایش ۱۰ مقدار برای π_1 و ۱۰ مقدار برای π_8 به‌دست می‌آید. مقادیر در جدول (۳) نشان داده شده است. در این آزمایش هر بار یک فشار اعمال و سپس در شرایط نرخ برشی ثابت ویسکوزیته و تنش برشی اندازه‌گیری می‌شود و درنتیجه با داشتن این اطلاعات عددهای بی‌بُعد π_1 و π_8 قابل محاسبه می‌باشند. در

این پژوهش از ۴ سطح فشار برای به‌دست‌آوردن اعداد بی‌بُعد استفاده شده است.

میانگین A و n با استفاده از رابطهٔ (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) به‌دست‌آمده است:

رابطهٔ (۳۱)

$$\pi_{10} = A(\pi_{80})^n$$

رابطهٔ (۳۲)

$$\pi_{11} = A(\pi_{81})^n$$

رابطهٔ (۳۳)

$$\pi_{19} = A(\pi_{89})^n$$

به‌طور نمونه مراحل به‌دست‌آوردن میانگین n در رابطهٔ (۳۴) نشان داده شده است: برای به‌دست‌آوردن n ابتدا π_{10} بر π_{11} تقسیم شده است.

رابطهٔ (۳۴)

$$\frac{\pi_{10}}{\pi_{11}} = (\frac{\pi_{80}}{\pi_{81}})^n$$

سپس از طرفین رابطه لگاریتم گرفته شد. به‌این‌صورت‌که رابطهٔ (۳۵) و (۳۶) حاصل می‌شود:

رابطهٔ (۳۵)

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

رابطهٔ (۳۶)

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

و به‌همین‌ترتیب تا آخر این عمل تکرارشده و ۹ مقدار برای n به‌دست‌آمده و سپس میانگین این ۹ مقدار از n به‌عنوان n_{avg} به‌دست‌آمده است. پس از آن با استفاده از مقدار میانگین n_{avg} مقدار A به روش رابطهٔ (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) محاسبه شده است:

رابطهٔ (۳۷)

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

رابطهٔ (۳۸)

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

رابطهٔ (۳۹)

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

و درنهایت با استفاده از ۱۰ مقدار برای A، مقدار میانگین (A_{avg}) محاسبه شد. درنتیجه رابطهٔ (۳۰) برای محاسبهٔ ویسکوزیته به شکل رابطهٔ (۴۰) تعریف شده است.

رابطهٔ (۴۰)

$$\eta = \frac{\sqrt[1-n_{avg}]{A_{avg}P}}{\dot{\gamma}}\tau_0^{\,(\frac{n_{avg}}{n_{avg}-1})}$$

همان‌طورکه گفته شد رابطهٔ (۳۰) دارای ۴ متغیر است و برای به‌دست‌آوردن اثر تغییر هر متغیر بر دیگر متغیرها، لازم است 10^4 آزمایش انجام پذیرد، درحالی‌که با استفاده از آنالیز ابعاد و روش ارائه‌شده با انجام ۱۰ آزمون رابطهٔ تغییرات ۴ متغیر به‌همراه توان هر متغیر به‌دست‌آمده است.

استخراج نشاسته و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای استخراج نشاسته از ارزن، ابتدا نمونهٔ ارزن با استفاده از آسیاب غلتکی گرانولی‌شده و با استفاده از الک با مش ۴۰ آرد از سبوس آن جدا می‌شود. آرد ارزن (با اندازهٔ ذرات ۰/۲۵ میلی‌متر) درون محلول هیدروکسید سدیم ۰/۳ درصد غوطه‌ور شد (با نسبت وزنی حجمی ۱:۶) و به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد باقی‌ماند. نمونه در طول این مدت به‌طور پیوسته استیرر شد. سپس نمونه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد (Orta alreza، مدل digicen 21، ساخت اسپانیا) و فاز جامد آن جدا شد. لایهٔ زرد رنگی که روی بخش سفید رنگ (نشاسته) است با استفاده از اسپاتول جداشده و بخش نشاسته‌ای مجدد درون آب‌مقطر دیسپرس گردید. این کار چندین مرتبه تکرار شد تا یک رسوب کاملا سفید به‌دست‌آمد. سپس با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۱ مولار، pH سوسپانسیون نشاسته روی ۶/۵ تا ۷ تنظیم شد و در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک شد (Mirzababaee *et al.*, 2022). برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمون‌های رئولوژیکی دیسپرسیون‌های ۲۰ درصد از هر نمونه نشاستهٔ تیمارشده تهیه شد.

آزمون فشار بالا

برای اعمال فشار بالا به نمونه‌ها از یک دستگاه پرس ایزواستاتیک فشار بالا (مدل HHP-LS-6000B-60C، ساخت ایران) که قابلیت اعمال فشار تا ۶۰۰ مگاپاسکال (۶۰۰۰ بار) را داشت، استفاده شد (شکل ۱). حجم محفظهٔ فشار بالا ۱۰۰ میلی‌لیتر بود و نمونه‌های مایع با غلظت‌های مختلف مستقیم درون محفظهٔ فشار بالا وارد شد. دستگاه قابلیت تنظیم مقدار فشار ازطریق 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 ازطریق یک ترانسدیوسر فشار و شیر فشارشکن برقی کنترل گردید. فشارهای اعمال‌شده به نمونه‌ها شامل ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و نیز نرخ اعمال فشار ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه بود.

زمان اعمال فشار به نمونه‌ها برای هر سه فشار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه برابر جدول (۴) و دمای آنها قبل از بارگذاری ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد بود. نمونه‌ها قبل از بارگذاری در یخچال نگهداری‌شده و طی فرایند اعمال فشار تغییر قابل‌ملاحظه‌ای که موجب آسیب رساندن به نمونه‌ها باشد، نداشتند (حداکثر دمایی که برای نمونهٔ ۶۰۰ مگاپاسکال ثبت گردید، دمای ۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد بود). پس از اتمام فرایند فشار بالا مواد جهت انجام آزمون‌های بعدی آماده‌سازی شدند.

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

جدول ۴- سطوح فشار و دمای اعمال‌شده به نمونه‌ها

P (مگاپاسکال)	زمان (دقیقه)		
	t_1	t_2	t_3
P_1=200	۱۰	۲۰	۳۰
P_2=400	۱۰	۲۰	۳۰
P_3=600	۱۰	۲۰	۳۰

انجام آزمون‌های دینامیکی

آزمون‌های رئولوژیکی برشی پایا و ناپایا با استفاده از دستگاه رئومتر فیزیکا (مدل MCR 302، ساخت استرالیا) انجام شد. دراین‌راستا، از هندسهٔ صفحه‌های موازی با قطر ۵ میلی‌متر و فاصلهٔ ۱ میلی‌متر در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده گردید. دما توسط سیستم پلتیر صفحه‌ای با حساسیت ۰/۰۱ درجهٔ سانتی‌گراد مجهز به سیرکولاتور آب (VT Viscotherm) تنظیم شد. نمونه‌های تهیه‌شده مستقیم روی صفحهٔ پایینی رئومتر ریخته و به‌منظور رسیدن به تعادل دمایی، قبل از هر آزمون به مدت ۵ دقیقه به نمونه‌ها استراحت داده شد. با هدف تعیین ناحیهٔ خطی، آزمون تنش متغیر در محدودهٔ ۰/۰۱ تا ۱۰۰ پاسکال و در فرکانس زاویه‌ای ثابت ۱ هرتز انجام شد (Heydari *et al.*, 2021). آزمون فرکانس متغیر در محدودهٔ فرکانس ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز و تنش ثابت ۰/۱ پاسکال (ناحیهٔ خطی) انجام گردید، سپس خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌ها براساس مدول‌های الاستیک و ویسکوز به‌عنوان تابعی از فرکانس بررسی شدند.

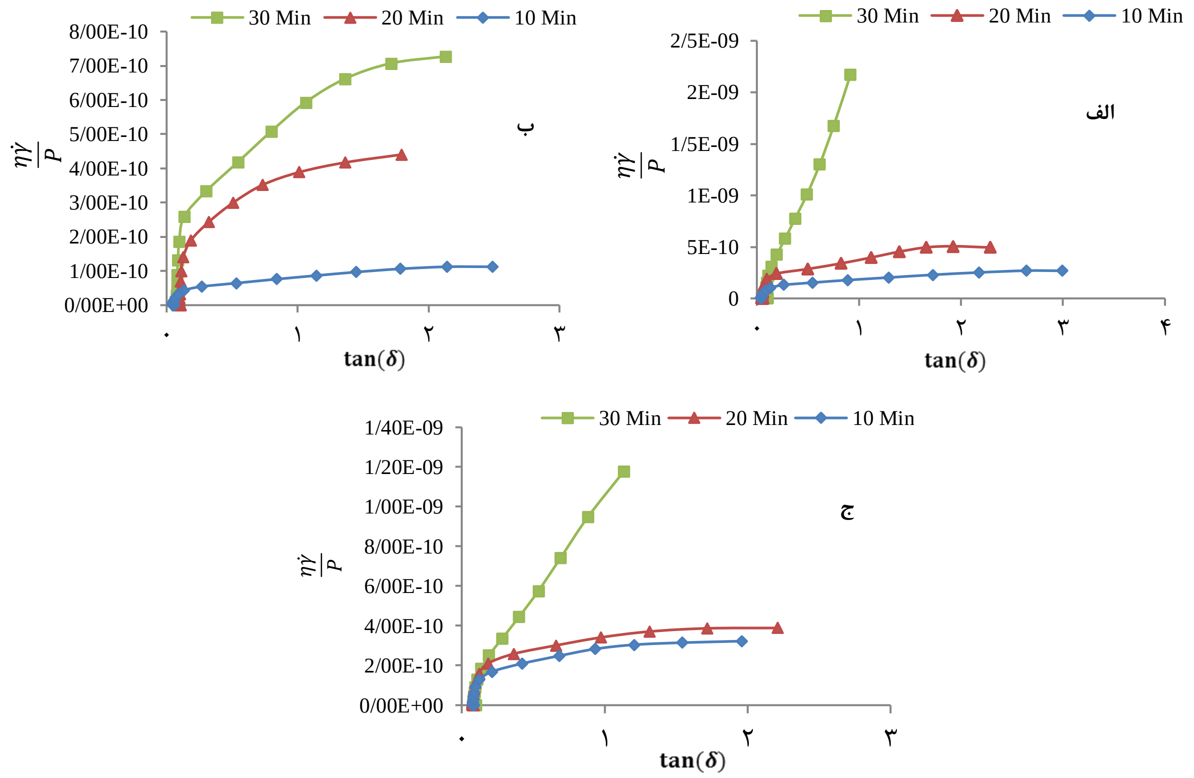
نتایج و بحث

بررسی رفتار ماده به‌وسیلهٔ اعداد بی‌بُعد

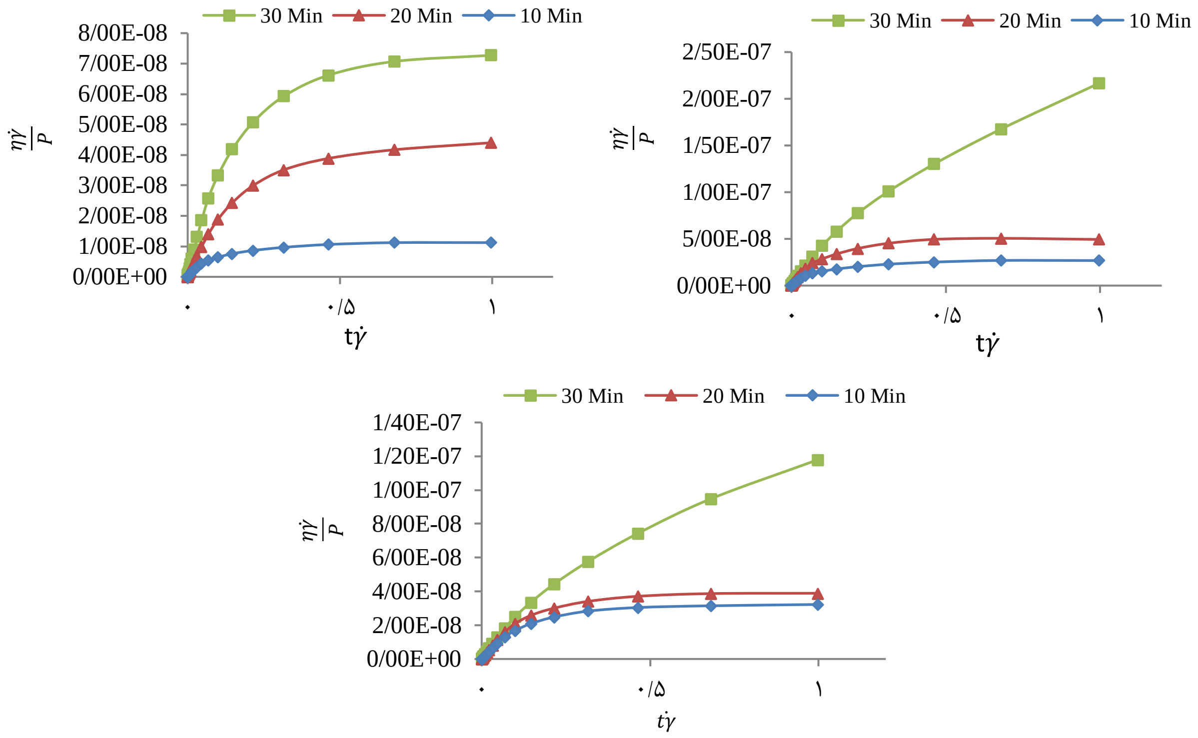
براساس مشخص‌شدن تعداد اعداد بی‌بُعد به‌دست‌آمده و ارتباط بین آنها، بدون شک استفاده از این اعداد بی‌بُعد نیاز به شناخت کامل از فیزیک مسئله داشته و ازسوی‌دیگر در اختیارداشتن امکانات لازم برای انجام آزمایش‌ها نیز ضروری است، چراکه اساس استفاده از اعداد بی‌بُعد مبتنی بر انجام آزمایش‌ها به‌منظور تعیین ارتباط بین اعداد بی‌بُعد و سپس رسم نمودارها و مطالعهٔ رفتار و شناخت فیزیک حاکم بر مسئلهٔ موردبررسی است. در واقع استفاده از اعداد بی‌بُعد که هرکدام هم‌زمان چند متغیر را در خود جای می‌دهند کمک زیادی به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌های مربوطه خواهد نمود. همان‌طورکه قبلا گفته شد مهم‌ترین هدف این تحقیق استفاده از مزیت‌های اعداد بی‌بُعد در فرایند اعمال فشار بالا می‌باشد تا ضمن کم‌کردن تعداد آزمایش‌ها به بررسی اثر اعمال فشار بالا بر ویژگی‌های رئولوژیکی پرداخته شود. مواد موردآزمایش در این تحقیق نشاستهٔ ارزن و ازجمله کمیت‌های مهم در رفتار رئولوژیکی مواد ویسکوزیتهٔ آن می‌باشد. مطابق رابطهٔ (۳۰) و چنانچه بیان شد هدف اصلی پیدانمودن اثر اعمال فشار بالا بر ویژگی‌های رئولوژیکی ازجمله ویسکوزیته می‌باشد.

شکل (۲) عدد بی‌بُعد π_1 برحسب تانژانت دلتا برای سه فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه را نشان داده است و به‌خوبی تفاوت زمان ۳۰ دقیقه با دو زمان ۱۰ و ۲۰ دقیقه برای فشارهای ۲۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال مشاهده می‌شود. عدد بی‌بُعد π_1 نسبت تنش برشی به تنش فشاری را نشان می‌دهد که به علت کوچک‌بودن آن باتوجه‌به تنش فشاری خیلی بالاست. همچنین با افزایش مقدار فشار به ۶۰۰ برای زمان‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه عدد بی‌بُعد π_1 براساس شکل (۲) نزدیک به یکدیگر و برای فشار ۶۰۰ و زمان ۳۰ دقیقه از یکدیگر فاصله گرفته‌اند. این تغییرات ناگهانی رفتار قابل تأمل است و می‌تواند ناشی از یک پدیده در رفتار جریان باشد. درحالی‌که وقتی نمودارهای

مربوط به مدول‌های برشی الاستیک و ویسکوز ترسیم شوند این تفاوت مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۲- تغییرات عدد بی‌بُعد π_1 برحسب تانژانت دلتا در فشار الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۶۰۰ مگاپاسکال

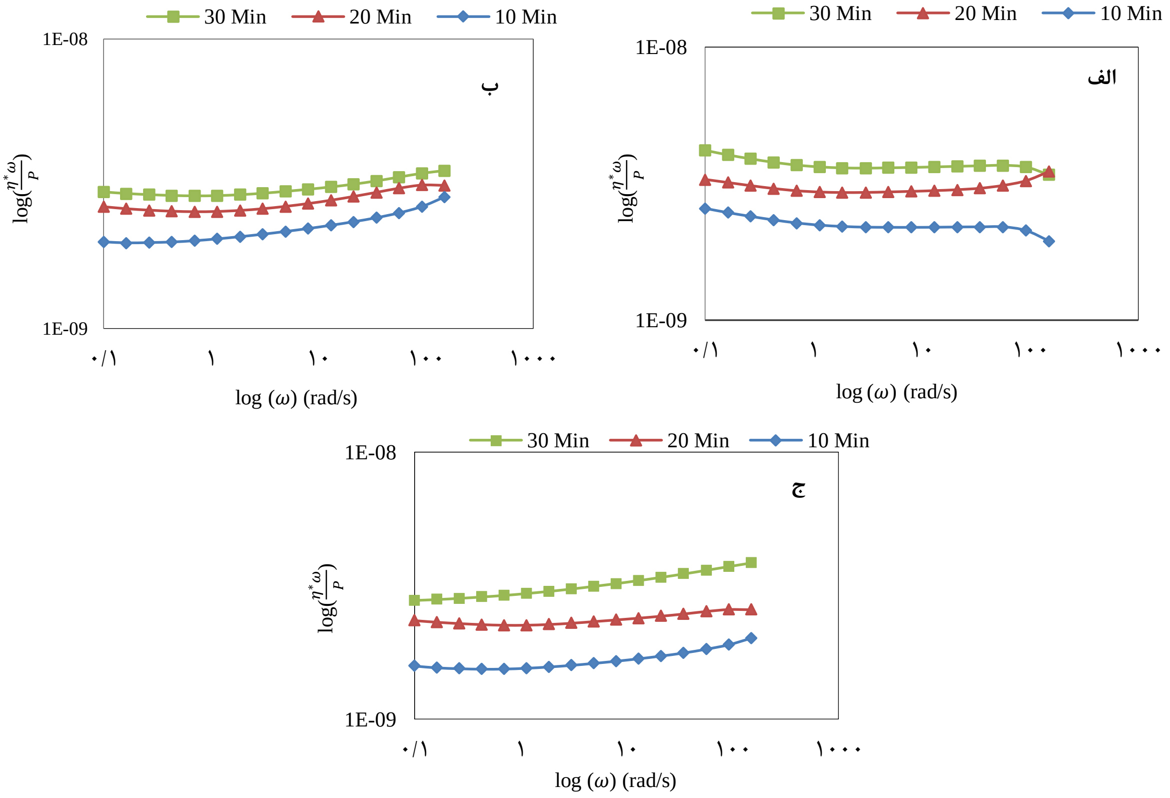


شکل ۳- تغییرات عدد بی‌بُعد π_1 برحسب عدد بی‌بُعد π_4 در فشار الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۶۰۰ مگاپاسکال

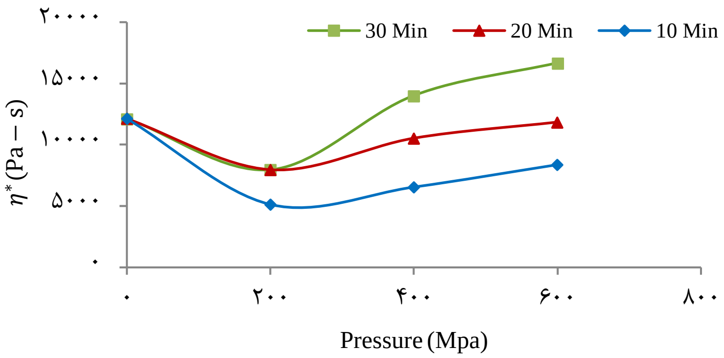
شکل (۳) عدد بی‌بُعد π_1 برحسب عدد بی‌بُعد π_4 برای سه فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه را نشان داده است. مطابق شکل (۳) فشار ۲۰۰ مگاپاسکال دارای بیشترین تفاوت بین زمان‌های ۱۰، ۲۰ و

۳۰ دقیقه بود، ولی در فشارهای ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال تغییرات متفاوت می‌باشد به‌این‌صورت‌که در دو فشار ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در زمان ۳۰ دقیقه اختلاف زیادی با زمان‌های ۱۰ و ۲۰ دقیقه وجود دارد و برای عدد بی‌بُعد π_1 تغییرات ناگهانی رخ داده است. همچنین مقدار عدد بی‌بُعد در این دو حالت کمتر از مقدار آن برای فشار ۲۰۰ مگاپاسکال است. شکل (۴) تغییرات لگاریتم عدد بی‌بُعد π_{12} برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشارهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه را نشان داده است. روند تغییرات مقدار عدد بی‌بُعد π_{12} برای فشار ۲۰۰ مگاپاسکال با دو فشار ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال متفاوت است، به‌گونه‌ای‌که در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال با افزایش فرکانس زاویه‌ای، شیب تغییرات عدد بی‌بُعد π_{12} روند کاهشی داشت، درحالی‌که برای فشارهای ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال شیب تغییرات روند افزایشی و مثبت نشان داده است. ازسویی‌دیگر مقدار فشار طی فرایند ثابت است و این افزایش و کاهش فقط مربوط به افزایش و یا کاهش صورت کسر در عدد بی‌بُعد π_{12} یعنی مربوط به تغییرات ویسکوزیتهٔ کمپلکس می‌باشد. دلیل افزایش ویسکوزیتهٔ کمپلکس در اثر افزایش فشار از ۲۰۰ مگاپاسکال به ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال مربوط به متراکم‌شدن ماده و افزایش مدول‌های برشی می‌باشد (Chaudemanche *et al.*, 2009; Lin & Fernández-Fraguas, 2020). در این تحقیق برای اولین‌بار موضوع استفاده از اعداد بی‌بُعد در فرایند فشار بالا مطرح شده است.

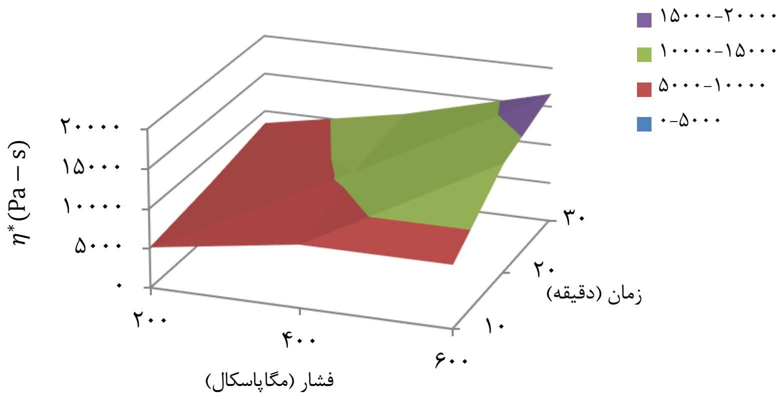
شکل (۵) تغییرات ویسکوزیتهٔ کمپلکس برحسب تغییرات فشار را نشان داده است. مقدار اولیهٔ فشار ۰/۱ مگاپاسکال مربوط به نمونهٔ شاهد است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود تغییرات ویسکوزیتهٔ کمپلکس در محدودهٔ فشار ۰/۱ تا ۲۰۰ مگاپاسکال روند کاهشی و پس از آن تا فشار ۶۰۰ مگاپاسکال روند افزایشی داشت. اما در نگاه کلی تغییرات رفتار می‌تواند برای کاربردها و فرایندهای مختلف صنایع غذایی که تحت فشارهای مختلف به‌کاربرده می‌شوند، معنی و قابل استفاده باشد.



شکل ۴- تغییرات لگاریتم عدد بی‌بُعد π_{12} برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰و ج) ۶۰۰ مگاپاسکال

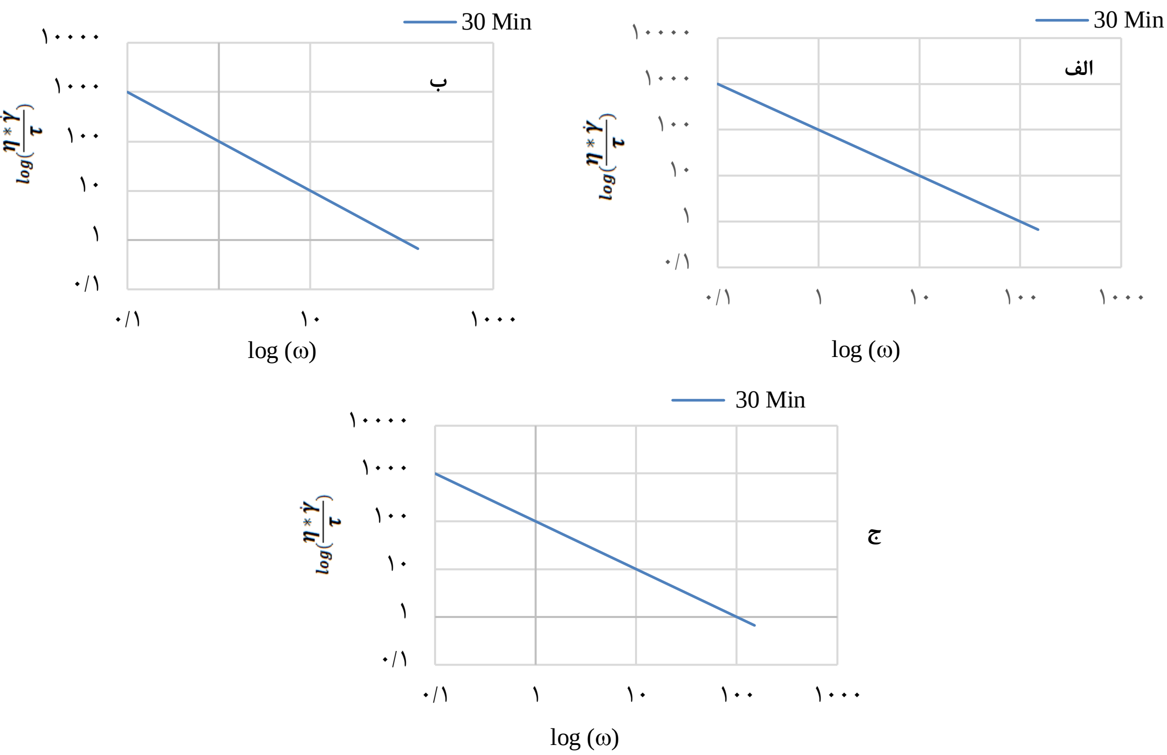


شکل ۵- تغییرات ویسکوزیتهٔ کمپلکس برحسب فشار در زمان‌های مختلف



شکل ۶- نمودار سه‌بُعدی تغییرات ویسکوزیتهٔ کمپلکس برحسب تغییرات فشار و زمان

نکتهٔ قابل‌توجه در شکل (۵)، فشار و زمان تغییرات همسویی با یکدیگر است، به‌گونه‌ای‌که با افزایش زمان آزمون از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه مقدار ویسکوزیتهٔ کمپلکس نیز برای فشارهای بیشتر از ۲۰۰ مگاپاسکال افزایش داشته است. به‌طوری‌که مقدار ویسکوزیتهٔ 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 روند افزایشی داشته که بیش از دو برابر است و این مقدار می‌تواند در فرایندها و عملکردهای مادهٔ غذایی تأثیر بسیار زیادی داشته باشد. به‌عبارتی‌دیگر بدون استفاده از حرارت و تنها با استفاده از فشار بالا می‌توان خواص عملکردی و رئولوژیکی مواد غذایی که نسبت به حرارت حساس هستند را تغییر داد. شکل (۵) نتیجهٔ مهم دیگری را نشان می‌دهد و آن اینکه برای برخی از مواد تأثیر زمان فرایند اعمال فشار می‌تواند به اندازهٔ خود افزایش فشار نقش داشته باشد و یا به‌عبارتی‌دیگر می‌توان به‌جای افزایش فشار، زمان فرایند را افزایش داد تا ویسکوزیتهٔ کمپلکس مقدار مشابه معادل فشار بیشتر را داشته باشد. به‌طورمثال ویسکوزیتهٔ کمپلکس برای فشار ۶۰۰ مگاپاسکال و زمان ۱۰ دقیقه تقریبا برابر ویسکوزیتهٔ کمپلکس در فشار ۲۰۰ مگاپاسکال و زمان ۳۰ دقیقه است. شکل (۶) تغییرات سه‌بُعدی ویسکوزیتهٔ کمپلکس، فشار و زمان را به‌صورت کانتورهای همتراز نشان داده است و در واقع تأییدکنندهٔ نتایج شکل (۵) می‌باشد. در شکل (۶) تأثیر افزایشی‌بودن ویسکوزیتهٔ کمپلکس با افزایش فشار و زمان به‌خوبی قابل مشاهده است. شکل (۷) تغییرات لگاریتم عدد بی‌بُعد π_{13} برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشارهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در زمان ۳۰ دقیقه را نشان داده است. نکتهٔ مهم در شکل (۷) یکسان‌بودن و منفی‌بودن شیب تغییرات لگاریتم عدد بی‌بُعد π_{13} برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای است. براساس نتایج شکل (۴) و (۷)، محور افقی هر دو یکسان و محور عمودی هم به لحاظ جنس کمیت‌های به‌کاررفته در صورت و مخرج یکسان و دیمانسیون صورت و مخرج هر کدام پاسکال است و تنها تفاوت در مخرج دو کسر است، که در شکل (۴) مخرج کسر فشار و در شکل (۷) مخرج کسر تنش برشی که واحد آن نیز پاسکال است.



شکل ۷- تغییرات لگاریتم عدد بی‌بُعد π_{13} برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای در فشار الف) ۲۰۰، ب) ۴۰۰ و ج) ۶۰۰ مگاپاسکال

همچنین در شکل (۷) نمایش متفاوتی از رفتار کمیت‌های به‌کاررفته از عدد بی‌بُعد را نشان داده است و در واقع نشان‌دهندهٔ به‌دست‌آوردن یک عدد بی‌بُعد مناسب و گویای اهمیت آن بوده و می‌تواند نمایش متفاوت و مفیدی از رفتار یک ماده را نشان دهد. مطلب مهم در این عدد بی‌بُعد این است که شیب همهٔ نمودارها برای ۳ فشار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ مساوی است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش شامل دو بخش اصلی که بخش اول آن، مبانی آنالیز ابعادی و به‌دست‌آوردن اعداد بی‌بُعد و بخش دوم، نمایش اعداد بی‌بُعد با استفاده از نتایج آزمون رئومتری که روی نشاستهٔ ارزن انجام گرفته است، بود. در بخش اول از میان همهٔ پارامترهای مرتبط با آزمون‌های رئومتری و فرایند فشار بالا، مهم‌ترین پارامترها انتخاب و اعداد بی‌بُعد مربوطه با استفاده از تئوری باکینگهام برای فرایند فشار بالا، اولین‌بار به‌دست‌آمد. مهم‌ترین نتیجهٔ استفاده از فرایند بی‌بُعدسازی بدون محاسبهٔ معادله‌های پیچیده و گاهی غیرقابل حل نظیر پیوستگی، برنولی، مومنتوم یا در حالت کلی معادلهٔ ناویرـاستوکس، ارتباط بین پارامترهای حاکم بر مسئله در قالب چند عدد بی‌بُعد مشخص گردید. نتیجهٔ مهم دیگر، استفاده از آنالیز ابعادی روابطی به‌دست‌آمد که نحوهٔ ارتباط بین متغیرها و درجهٔ اهمیت آنها طی فرایند فشار بالا قبل از انجام هر آزمونی مشخص گردید. به‌این‌ترتیب با استفاده از این روابط، آزمون‌ها هدفمند شد و می‌توان روی پارامترهای مهم و اثرگذار تمرکز بیشتری نمود که در سایر روش‌های تجربی پیش‌بینی آن غیرممکن است. لذا با استفاده از اطلاعات، می‌توان آزمون‌ها را براساس پارامترهای به‌دست‌آمده در اعداد بی‌بُعد π_1 تا π_{13} طرح‌ریزی نموده و از پرداختن به متغیرهای غیرمهم و یا زائد اجتناب ورزید و از صرف وقت و هزینهٔ اضافی جلوگیری نمود. همان‌طورکه نشان داده شد با استفاده از اعداد بی‌بُعد تعداد آزمون‌ها به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت و تنها با انجام ۱۰ آزمون تابع ویسکوزیته برحسب متغیرهای فشار، تنش برشی و نرخ برش معلوم گردید. همچنین با دراختیارداشتن توابع به‌دست‌آمده در بخش اول نیازی به استفاده از مدل‌های برازش نبوده، ضمن آنکه در مدل‌های برازش فقط توابع یک متغیره قابل دستیابی است، درحالی‌که توابع به‌دست‌آمده در بخش اول چندمتغیره هستند. مهم‌ترین نتیجهٔ دیگری که در بخش آنالیز ابعادی وجود داشت این بود که با استفاده از روش آنالیز ابعادی متغیرهای زائد طی فرایند بی‌بُعدسازی و با روشی کاملا ریاضی و مطمئن از معادله‌ها حذف شدند، این در حالی است که در سایر روش‌ها کم و زیادکردن متغیرها نیاز به تسلط و درک عمیق از آن پدیده و فرایند را

دارد. در بخش دوم به‌عنوان مطالعهٔ موردی از داده‌های رئومتری نشاستهٔ ارزن که تحت فشار بالا قرارگرفته‌بود، استفاده شد. این داده فقط برای نمایش اعداد بی‌بُعد به‌کارگرفته شده است. ازآنجاکه چنین اعداد بی‌بُعدی برای فرایند فشار بالا، اولین‌بار ارائه شده است؛ لذا امکان مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش‌های مشابه وجود نداشت. بااین‌وجود بررسی نتایج به‌دست‌آمده از اعداد بی‌بُعد نشان داده است که اثر اعمال فشار بالا و مدت زمان آن تأثیر معنی‌داری داشته است. مهم‌ترین نتیجهٔ دیگری که در بخش دوم وجود دارد اینکه اثر مدت زمان اعمال فشار می‌تواند به اندازهٔ مقدار فشار مؤثر 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.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در چارچوب توافق علمی مشترک بین موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی (مشهد، ایران) و دانشگاه ییلدیز (استانبول، ترکیه) انجام شده است که توسط این دو مرکز حمایت مالی تحقیقاتی صورت گرفته است.

مشارکت نویسندگان

محمدعلی حصاری‌نژاد: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده، آنالیز داده‌ها، بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخهٔ نهایی؛ **سیدمهدی میرزابابائی**: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده، تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن پیش‌نویس مقاله، آنالیز داده‌ها، بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخهٔ نهایی؛ **عمر سعد توکر**: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده، تأیید نسخهٔ نهایی؛ **سمیرا یگانه‌زاد**: ارائهٔ ایدهٔ پژوهشی و طراحی مطالعه، تأیید نسخهٔ نهایی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

منابع

Agrawal, S. K. (1997). *Fluid mechanics and machinery*. Tata McGraw-Hill New Delhi.

Andre, 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. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.069

Barenblatt, G. I. (1987). *Dimensional analysis*. CRC Press.

Bhupender, S., Rajneesh, B., & Baljeet, S. (2013). Physicochemical, functional, thermal and pasting properties of starches isolated from pearl millet cultivars. *International Food Research Journal*, *20*(4), 1555.

Buckow, R., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). High pressure phase transition kinetics of maize starch. *Journal of Food Engineering*, *81*(2), 469-475. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.11.027

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), 62210-62211-62210-62218.

De A. Martins, R. (1981). The origin of dimensional analysis. *Journal of the Franklin Institute*, *311*(5), 331-337. https://doi.org/10.1016/0016-0032(81)90475-0

Deponte, H., Tonda, A., Gottschalk, N., Bouvier, L., Delaplace, G., Augustin, W., & Scholl, S. (2020). Two complementary methods for the computational modeling of cleaning processes in food industry. *Computers & Chemical Engineering*, *135*, 106733. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106733

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. https://doi.org/10.1021/jf971106p

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. https://doi.org/10.1002/star.202000179

Katsurayama, G., Sobenko, L., De Camargo, A., 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*(4), 1123-1135. http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2020.22.4.15.7

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. https://doi.org/j.ijheatmasstransfer.2006.12.004

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. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.004

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. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325

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. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.02.010

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. https://doi.org/10.1002/jctb.2274

Mirzababaee, S. M., Ozmen, D., Hesarinejad, M. A., Toker, O. S., & Yeganehzad, S. (2022). A study on the structural, physicochemical, rheological and thermal properties of high hydrostatic pressurized pearl millet starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *223*, 511-523. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.044

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*, 815-823. https://doi.org/10.1007/s00231-014-1455-5

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. https://doi.org/10.1111/jfpe.13561

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. https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.06.045

Rayleigh, J. W. S. B. (1894). *The Theory of Sound*. Macmillan. https://books.google.com/books?id=hd8EAAAAYAAJ

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. https://doi.org/10.1016/S1466-8564(00)00017-5

Streeter, V. L., Wylie, E. B., Bedford, K. W., & Saldarriaga, J. G. (1988). *Mecánica de los fluidos* (Vol. 7). McGraw-Hill Colombia.

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. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.027

Dimensional and Experimental Analysis of High Hydrostatic Pressure Process; Case Study: Application of Dimensionless Numbers in Millet Starch Rheological Test

Mohammad Ali Hesarinejad[1], Seyyed Mahdi Mirzababaee[2*], Omer Said TOKER[3], Samira Yeganehzad[1]

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.mirzababaee@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 cohesion, Bernoulli, momentum or, more generally, the Navier-Stokes equation. The most effective way to solve this problem is to use the principles of dimensional analysis to determine the relationships governing the phenomenon. Using dimensional analysis, one can obtain the numbers and non-dimensional parameters that are involved in determining the equations governing a phenomenon. In this study, for the first time, the method of dimensional analysis was used to obtain the non-dimensional numbers governing the hydrostatic high-pressure process, because there are many variables involved in this process, and the best way to find the relationship between them is to use a dimensional analysis tool. In the next step, after identifying the influential variables using Buckingham's theory, the dimensionless numbers governing the high-pressure process are obtained. Then the measured quantities from the high-pressure tests, the frequency response and the stress-strain rate are given in the form of dimensionless numbers, pre-arranged in order, and the test substance behaviour (the millet starch) is examined. As a result, in addition to the relationship between variables and their relative importance, some material behavioural properties are also represented in the form of dimensionless graphs that differ in behaviour from conventional graphs. In the high-pressure test, the test material was subjected to a hydrostatic pressure of 200 to 600 MPa for 10 to 30 min. The results obtained from the high-pressure test showed that the rheological properties of millet starch, including the complex viscosity, can change with increasing pressure and time of application.

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

© 2023, Research Institute of Food Science and Technology. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0). To view a copy of this license, visit (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).