مدلسازی آماری ویسکوزیته و دانسیته تراوه به عنوان تابعی از عوامل مختلف فرآیند اولترافیلتراسیون شیر

سید محمد علی رضوی[1]

تاریخ دریافت : ۸۲/۵/۵

چکیده

ویسکوزیته و دانسیته از جمله مهمترین خواص فیزیکی برای تجزیه و تحلیل کارایی فرآیندهای غشایی و همچنین طراحی یک فرآیند غشایی جدید هستند. بعلاوه انرژی مورد نیاز برای پمپاژ سیال فرآیند نیز تابعی از مقدار این دو خصوصیت فیزیکی است. در این تحقیق ابتدا اثر عوامل مختلف فرآیند نظیر اختلاف فشار در عرض غشاء (۵۱، ۱۰۱، ۱۵۲، ۲۰۳، ۲۵۳ کیلوپاسکال) و درجه حرارت (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و همچنین اثر خصوصیات فیزیکوشیمیایی مانند pH (۶/۶۷، ۶/۴۳، ۶/۲۵ و ۵/۹۷) و درصد چربی (۰/۰۹، ۱/۱۹، ۲/۴، ۳/۲۶ درصد) بر ویسکوزیته و دانسیته تراوه در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر مورد بررسی قرار گرفت. سپس با کمک نرم افزار آماری Sigmastat دو مدل رگرسیون چند متغیره خطی به منظور پیشگویی ویسکوزیته و دانسیته در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر بدست آمد. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش دمای فرآیند و درصد چربی شیر مقدار ویسکوزیته و دانسیته کاهش می‌یابد. تغییرات pH تأثیر چندانی بر ویسکوزیته و دانسیته نداشت. اما با افزایش اختلاف فشار عملیاتی رفتار دو گانه‌ای مشاهده شد، بطوری که تا فشار ۱۵۲ کیلوپاسکال مقدار دانسیته و ویسکوزیته افزایش یافت؛ ولی ادامه افزایش فشار موجب کاهش دانسیته و ویسکوزیته گشت. در ضمن نتایج مدلسازی آماری برای ویسکوزیته و دانسیته نشان داد که ویسکوزیته تنها تابعی از دما است و بین داده های واقعی با مقادیر پیشگویی شده توسط مدل همبستگی عالی (R = ۰/۹۷۶) وجود دارد، در حالی که دانسیته وابسته به درصد چربی و دما بوده و بین داده های تجربی با مقادیر بدست آمده توسط مدل انتخابی همبستگی خوبی(R = ۰/۹۰۴) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی : اولترافیلتراسیون؛ شیر؛ ویسکوزیته؛ دانسیته؛ تراوه و مدلسازی .

۱- مقدمه

در چند دهه گذشته فرآیند اولترافیلتراسیون (UF)[2] کاربرد فزاینده‌ای در صنایع لبنیات به ویژه برای تغلیظ شیر و آب پنیر پیدا کرده است. کارآیی[3] و هزینه یک فرآیند غشایی به شار تراوه(فاز عبوری از درون غشاء)[4] و درصد دفع اجزاء[5] آن بستگی دارد (۳). نوع غشاء؛ پارامترهای عملیاتی و خصوصیات سیال تعیین کننده شار جریان و غلظت اجزاء در ناتراوه[6] (فاز تغلیظ شونده توسط غشاء) و تراوه می‌باشند. از طرف دیگر برای طراحی یک فرآیند غشایی جدید داشتن اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی ومهندسی سیال ضروری است. از اینرو ویسکوزیته و دانسیته از جمله مهمترین خصوصیات فیزیکی برای طراحی یا تجزیه و تحلیل فرآیندهای غشایی هستند. شیر و فرآورده‌های لبنی از لحاظ ترکیب شیمیایی و خصوصیات رئولوژیکی بسیار متنوع می باشند، لذا ویسکوزیته و دانسیته به عنوان شاخص‌های مهم برای بررسی ویژگیهای جریان و همچنین توضیح بسیاری از خواص حسی و کیفی محصول نیز حائز اهمیت‌اند. برای درک بهتر جایگاه این دو خصوصیت فیزیکی ابتدا به تعدادی از معادلات حاکم بر فرآیند اولترافیلتراسیون اشاره می‌شود (۳ و ۶).

---

۱ - عضو هیات علمی گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد . پست الکترونیکی : s.razavi@ um.ac.ir

2 - Ultrafitration
3 – Performance
4 – Permeate flux
5 – Rejection (or retention)
6 - Retentate

الف- مدل فشار اسمزی

$$J_p = \frac{|\Delta p| - |\Delta \pi|}{\mu_p R_m} \quad (۱)$$

ب- مدل پلاریزاسیون غلظت (تئوری فیلم)

$$J_p = k_s \ln \left[\frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} \right] \quad (۲)$$

$$\left(\frac{k_s d_h}{D}\right) = A \left(\frac{\rho_u d_h}{\mu} \right)^{\alpha} \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^{\beta} \left(\frac{d_h}{L} \right)^{\gamma} \quad (۳)$$

$$D = \frac{KT}{\sigma \pi \mu_p r} \quad (۴)$$

ج- مدل مقاومت‌های متوالی

$$R_T = \frac{\Delta P_T}{\mu_p J_p} \quad (۵)$$

$$R_m = \frac{\Delta P_T}{\mu_{eo} J_{eo}} \quad (۶)$$

$$R_{ff} = \frac{\Delta P_f}{\mu_{eof} J_{eof}} - R_m \quad (۷)$$

$$R_{rf} = R_T - (R_{ff} + R_m) \quad (۸)$$

با ملاحظه معادلات فوق به خوبی می‌توان دریافت که ویسکوزیته (μ) و دانسیته (ρ) تا چه اندازه بر کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون تأثیرگذار هستند. پدیده‌هایی همچون گرفتگی و پلاریزاسیون غلظت و نقش آنها بر عملکرد یک فرآیند غشایی تنها با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیال فرآیند قابل تفسیر می‌باشند. عوامل بسیار زیادی بر ویسکوزیته و دانسیته سیالات لبنی اثر می‌گذارند. بعضی از این عوامل توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. عموماً ویسکوزیته فرآورده‌های لبنی مایع نظیر شیر و آب پنیر با افزایش غلظت در طی فرآیندهای غشایی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که دلیل آن عمدتاً ناشی از اثر پروتئین‌های شیر به ویژه کازئین‌ها عنوان شده است. به طوری که با جداسازی کازئین و افزایش غلظت تا بالاتر از ۲۰ درصد مواد جامد رفتار نیوتونی مشاهده شده و ویسکوزیته تقریباً رابطه خطی با غلظت داشته است (٦). افزودن آب موجب کاهش ویسکوزیته شیر می‌شود، اما افزایش غلظت لاکتوز، چربی و به خصوص ماده خشک بدون چربی (SNF) باعث افزایش ویسکوزیته می‌گردد (۱۱). در یک تحقیق نشان داده شد که بین ویسکوزیته و درصد چربی همبستگی مثبت ($r = 0.69$) وجود دارد، اما بین ویسکوزیته و درصد لاکتوز همبستگی معنی داری ($r = -0.03$) یافت نشد (۲). همچنین کاهش و افزایش pH موجب افزایش ویسکوزیته شیر می‌شود (۱۰). به نظر می‌رسد تغییرات pH موجب تغییر ساختار میسل‌های کازئین، پروتئین‌های محلول و توازن املاح شیر می‌شود. گزارش شده است که pH تأثیر چندانی بر ویسکوزیته سیستم‌های آب پنیری ندارد (٤). افزایش pH آب پنیر تا ۱۰، ویسکوزیته آب پنیر چدار و کاتیج را به میزان ۲ برابر افزایش داد، ولی کاهش pH تا زیر ٦ تأثیری بر ویسکوزیته نداشت. در طی عملیات غشایی فرآورده‌های لبنی تغییرات ناچیزی در pH بوجود می‌آید ولی تأثیر چندانی بر ویسکوزیته آنها ندارد (۳). نتایج اثر دما در دامنه ۱۰-۸۰°c بر ویسکوزیته شیر کامل، شیر پس چرخ و آب پنیر نشان داده است که با افزایش دما، ویسکوزیته به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد (۱، ۵ و ۱۱). البته ویسکوزیته شیر در دماهای بالاتر از ٤۰°c به صورت غیر منتظره ای تغییر می کند که محققین علت آن را احتمالاً تغییر حالت چربی شیر

از جامد به مایع عنوان کرده‌اند (۵). گزارش شده است که ویسکوزیته شیر و خامه بسیار تحت تأثیر درصد چربی است، بطوری که با افزایش درصد چربی، ویسکوزیته در دمای ۲۰°c تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (۷).

عوامل گوناگونی نظیر درصد ماده خشک بدون چربی، درصد چربی، درجه هیدراتاسیون پروتئین‌ها و دما موجب تغییر دانسیته فرآورده‌های لبنی می‌شوند (٦، ۷، ۸، ۹ و ۱۰). افزایش غلظت SNF شیر به ویژه پروتئین ها و نمک ها موجب افزایش دانسیته شیر می گردد (۸)، در حالی که افزایش درصد چربی دانسیته را کاهش می دهد(۷). تحقیقات درباره اثر درجه تغلیظ بر دانسیته شیر و آب پنیر نشان داده است که دانسیته تابع خطی از غلظت پروتئین بوده و به میزان ناچیزی افزایش می‌یابد(٦). شایان ذکر است که بعضی از محققین توانسته اند روابط رگرسیون خطی را برای محاسبه ویسکوزیته شیر به عنوان تابعی از درصد چربی و دما (۱ و ۵)، و دما (۹) یا به عنوان تابعی از نوع شیر (خام، تخمیری و هموژنیزه)، لاکتوز، چربی، نسبت چربی به ماده خشک بدون چربی و دما بدست آورند (۱۱).

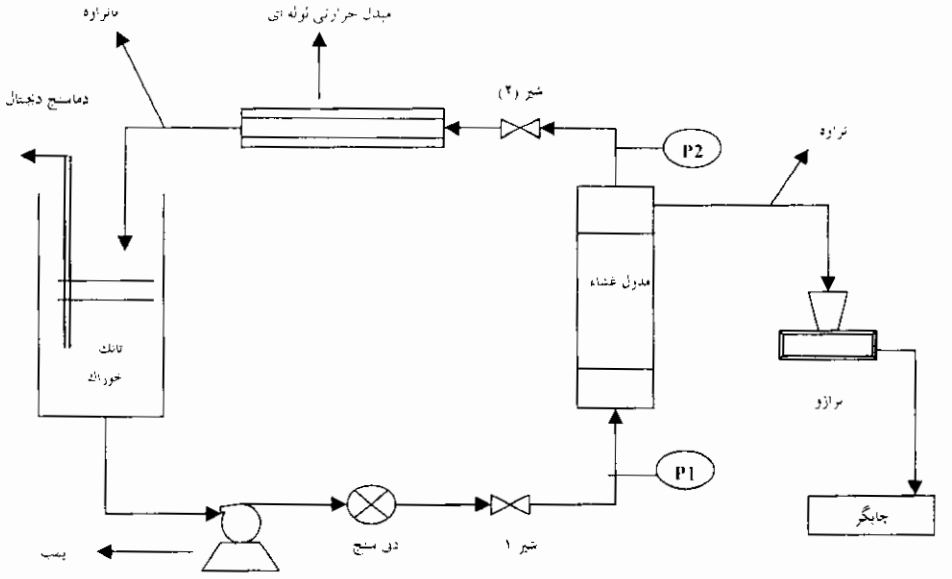
با ملاحظه نتایج انتشار یافته می‌توان دریافت که تاکنون تنها مطالعات محدودی در باره اثر عوامل مختلف بر ویسکوزیته و دانسیته شیر و فرآورده های لبنی صورت گرفته است. هدف از این تحقیق در ابتدا بررسی تأثیر سطوح مختلف فشار عملیاتی، دمای فرآیند، درصد چربی و pH شیر بر ویسکوزیته و دانسیته تراوه در طی اولترافیلتراسیون شیر و تجزیه و تحلیل کارایی فرآیند غشایی با تأکید بر این دو خصوصیت فیزیکی است. سپس با استفاده داده های تجربی دو مدل رگرسیونی برای ویسکوزیته و دانسیته تراوه ارائه می شود تا به کمک آنها بتوان مقادیر این دو خصوصیت فیزیکی را به عنوان تابعی از پارامترهای فرآیند اولترافیلتراسیون شیر تخمین زد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک سیستم پایلوتی غشایی ساخت شرکت بیوکن روسیه[1] مورد استفاده قرار گرفت(شکل ۱). این سیستم شامل یک تانک تغذیه، پمپ سانتریفوژی، دبی سنج، مدول غشاء UF[2]، دو فشار سنج، مبدل حرارتی لوله‌ای، دماسنج دیجیتالی و دو شیرکنترل جریان است. مشخصات فنی این سیستم غشایی در جدول (۱) به صورت خلاصه آورده شده است.

برای انجام هر بار عملیات اولترافیلتراسیون شیر ابتدا با افزودن مقدار معینی شیر خشک بدون چربی به آب گرم (۵۰°c) درون یک همزن آزمایشگاهی ۱۲ لیتر شیر پس چرخ تهیه می‌شد. سپس برای تنظیم شرایط فرآیند، سیستم با آب مقطر تحت شرایط عملیاتی مورد آزمایش برای مدت ۱۰ دقیقه به گردش درآمده تا ضمن گرم کردن سیستم پایلوتی، شار جریان آب مقطر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. سپس تانک تغذیه سیستم غشایی با نمونه شیر پر می‌شد و عملیات اولترافیلتراسیون در شرایط عملیاتی مورد نظر برای مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت. در انتها CIP[3] سیستم مطابق دستورالعمل سازنده دستگاه صورت می گرفت. سیکل شستشو زمانی پایان می‌پذیرفت که اختلاف شار آب در انتهای فرآیند شستشو با شار آب در ابتدای هر بار عملیات بیش از ۵-۳ درصد نباشد، در غیر اینصورت گرفتگی غشاء بر طرف نشده و می‌بایست سیکل شستشو تکرار گردد.

1- Biocon Company, Russia
2 – UF modle
3 – Cleaning In – Place (CIP)



شکل ۱- شماتیک کلی واحد پایلوتی UF

جدول ۱ - مشخصات فنی سیستم پایلوتی اولترافیلتراسیون

جنس غشاء	پلی سولفون آمید
مدول غشاء	مارپیچ حلزونی
سطح مؤثر غشاء	۰/۳۳ متر مربع
*MWCO	۲۰ کیلو دالتون
دامنه فشار قابل تحمل	۳-۰/۵ اتمسفر
دامنه دمای قابل تحمل	۵۵-۵ درجه سانتی‌گراد
دامنه pH قابل تحمل	۲-۱۱

* Molecular weight cut off

در این مقاله اثر عوامل مختلف فرآیند نظیر اختلاف فشار در عرض غشاء (TMP)[1]، دمای عملیات، درصد چربی شیر و pH شیر بر ویسکوزیته و دانسیته تراوه مورد بررسی قرار گرفت. سطوح مختلف این متغیرها به همراه سایر شرایط عملیاتی در جدول (۲) آورده شده است. در مجموع ۱۶ بار عملیات برای بررسی این پارامترها انجام شد و در هر بار عملیات سرعت جریان خوراک و غلظت نمونه‌های شیر ثابت بود. درصد چربی نمونه‌های شیر با استفاده از خامه پاستوریزه و هموژنیزه (۳۰-۲۸ درصد چربی) تنظیم می‌شد. از محلول ۰/۱ نرمال اسید لاکتیک نیز برای تنظیم pH شیر در سطوح مورد آزمایش استفاده گردید. درصد چربی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه لاکتواستار ساخت شرکت فانک ژربر آلمان[2] در دمای ۲۵°c و در ۳ تکرار برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. از pH متر مدل ۳۰۱۰ ساخت شرکت جن وی انگلستان[3] برای اندازه‌گیری pH نمونه‌های شیر و محلول‌های شستشو استفاده گردید. دانسیته نمونه‌های تراوه در انتهای هر بار عملیات با استفاده از روش پیکنومتری[4] (پیکنومتر ۲۵ میلی‌لیتری) بدست آمد (۸). اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌ها در دمای عملیاتی مربوطه برای ۲ تا ۳ تکرار انجام می‌گرفت. ویسکوزیته نمونه‌های تراوه در انتهای هر بار عملیات با استفاده از ویسکومتر لوله مویینه U- شکل استوالد[5] اندازه‌گیری می‌شد (۸). این ویسکومتر مجهز

1- Transmembrane pressure
2 – Lactostar (Funke Gerber Ltd., Germany)
3 – Jenway Ltd., U. K.
4 – Picnometery method
5 – Ostwald U-tube capillary viscometer

به حمام آب گرم برای تنظیم دما بود. اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه‌ها در دمای عملیاتی مربوطه برای ۳ تا ۵ تکرار صورت می‌گرفت. شایان ذکر است که ویسکومتر در ابتدا با استفاده از محلول ۵ درصد ساکارز خالص کالیبره شده و ثابت k آن بدست آمد.

مدلسازی ویسکوزیته و دانسیته تراوه به عنوان تابعی از اختلاف فشار در عرض غشاء، دمای فرآیند، درصد چربی و pH شیر با کمک نرم افزار Sigmastat نسخه ۳/۰ انجام گرفت. برای این منظور چندین مدل رگرسیونی چند متغیره خطی آزمون شد و بهترین مدل بر اساس آزمون آنالیز واریانس رگرسیون، ضریب همبستگی و فاکتور بزرگ شدن واریانس در سطح آماری ۰/۱ درصد خطا انتخاب گردید.

جدول ۲ - سطوح متغیرها و شرایط عملیاتی مورد استفاده در این تحقیق

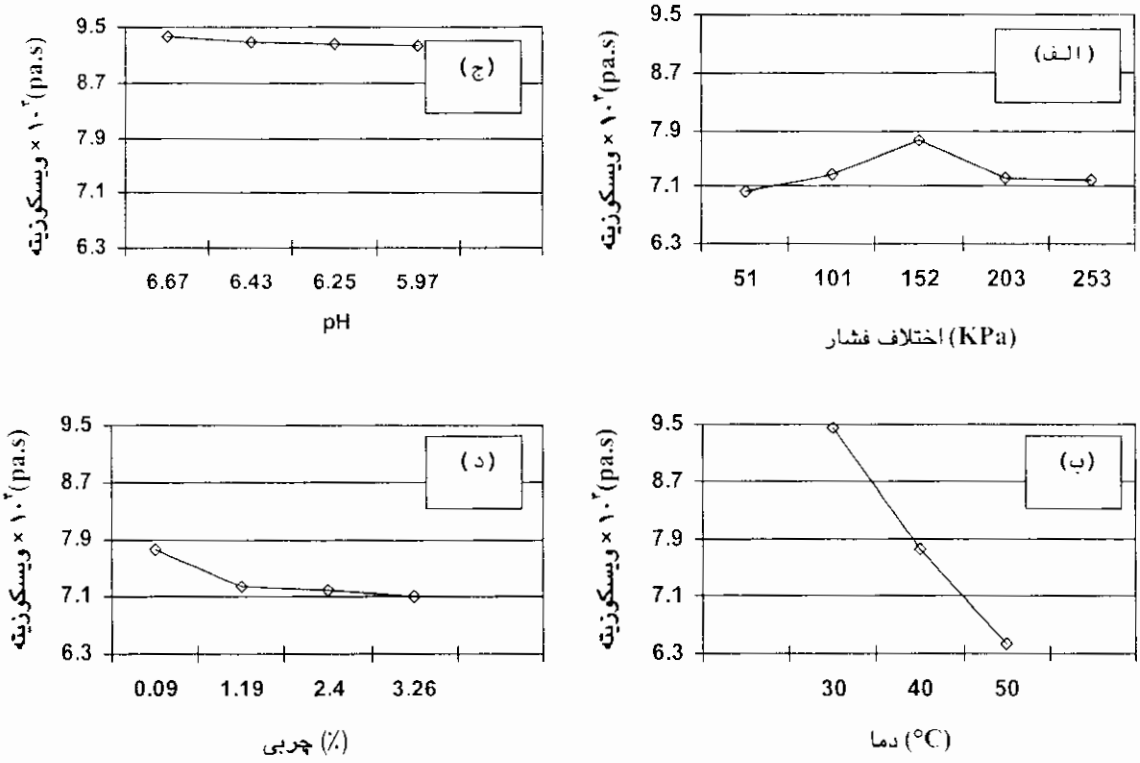
متغیر	شرایط عملیاتی			
	اختلاف فشار (kpa)	دما (°c)	چربی (٪)	pH
اختلاف فشار در عرض غشاء (TMP)	۵۱	۴۰	۰/۰۹۰	۶/۵۴
	۱۰۱/۳۳	۴۰	۰/۰۹۵	۶/۵۵
	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹۰	۶/۵۵
	۲۰۳	۴۰	۰/۰۹۵	۶/۵۴
	۲۵۳	۴۰	۰/۰۸۵	۶/۵۴
درجه حرارت	۱۵۲	۳۰	۰/۱۱	۶/۵۷
	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹	۶/۵۴
	۱۵۲	۵۰	۰/۱۲	۶/۶۲
درصد چربی	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹	۶/۵۴
	۱۵۲	۴۰	۱/۱۹	۶/۵۶
	۱۵۲	۴۰	۲/۴۰	۶/۶۷
	۱۵۲	۴۰	۳/۲۶	۶/۵۴
pH	۱۵۲	۳۰	۲/۴۰	۶/۶۷
	۱۵۲	۳۰	۲/۳۹	۶/۴۳
	۱۵۲	۳۰	۲/۴۶	۶/۲۵
	۱۵۲	۳۰	۲/۴۸	۵/۹۷

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویسکوزیته

نتایج آزمایشگاهی اثر عوامل مختلف بر ویسکوزیته تراوه نشان می‌دهد که دما بیشترین و pH کمترین تأثیر را داشته است، (شکل ۲ : الف- د). افزایش فشار تا ۱۵۲ کیلوپاسکال مقدار ویسکوزیته را تا حدودی افزایش داده است، ولی ادامه افزایش فشار تا ۲۵۳ کیلوپاسکال موجب کاهش ویسکوزیته گشته است (شکل ۲ - الف). تراوه شیر سیالی شبیه آب پنیر و دارای ترکیباتی از قبیل لاکتوز، مواد معدنی، پروتئین‌های محلول (سرم)، ویتامین‌های محلول در چربی، قطرات کوچک چربی و انواع پپتیدها است (۳). از آنجایی که ویسکوزیته یک سیال تابع نیروهای درون مولکولی است، لذا در توضیح رفتار فشار می‌توان گفت که تا فشار ۱۵۲ کیلوپاسکال شار تراوه و به عبارتی درصد عبور ترکیبات محلول افزایش می‌یابد، در نتیجه اصطکاک بین مولکولها و بالطبع ویسکوزیته نیز افزایش خواهد یافت. اما فشارهای بالاتر از ۱۵۲ کیلوپاسکال موجب افزایش گرفتگی[1] حفرات غشاء گردیده و لذا ویسکوزیته مجدداً به دلیل کاهش غلظت ترکیبات در تراوه کاهش یافته است. با ملاحظه شکل (۲-ب) می توان دریافت که با افزایش دما ویسکوزیته تراوه به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. بدیهی است کاهش ویسکوزیته در این حالت متأثر از افزایش حرکت درونی مولکولی ناشی از افزایش دما است(۱ و۶). کاهش pH شیر از ۶/۶۷ تا ۵/۹۷ تأثیر معنی‌داری بر ویسکوزیته نگذاشته است، اگر چه ویسکوزیته به مقدار بسیار ناچیزی کاهش نشان داده است (شکل ۲-ج). اسیدی کردن[2] شیر موجب کاهش حلالیت پروتئین‌های شیر و افزایش تمایل به رسوب آنها بر سطح غشاء می‌گردد، از اینرو به احتمال قوی عبور ترکیبات

1- Fouling
2- Acidification



شکل ۲- تأثیرعوامل مختلف فرآیند بر ویسکوزیته تراوه در طی اولترافیلتراسیون شیر

کوچک محلول از درون غشاء به دلیل گرفتگی بیشتر کاهش می یابد(۳ و٦). از آنجایی که گلبولهای چربی مولکولهای بسیار درشتی هستند، لذا احتمالا با تغییر درصد چربی شیر لایه ژلی روی سطح غشاء ضخیم تر و مستحکم‌تر می گردد(۳ و۷)، بنابراین به نظر می رسد ویسکوزیته تراوه به دلیل کاهش جزئی غلظت اجزاء محلول تا حد کمی کاهش می‌یابد (شکل ۲-د).

برای تعیین چگونگی تابعیت ویسکوزیته با متغیرهای مستقل فشار (TMP)، دما (T)، pH و درصد چربی (Fat) آنالیز رگرسیون چند متغیره خطی انجام گرفت. عموما میزان اعتبار یک مدل بر اساس پارامتر های زیر مورد ارزیابی قرار می گیرد:

۱- بزرگ بودن ضریب همبستگی (R)[1]، ضریب تبیین (R^2)[2] یا ضریب تبیین تصحیح شده (Adj. R^2)[3].

۲- معنی دار بودن آنالیزواریانس رگرسیون توسط آزمون F

۳- استقلال خطا یا باقیمانده ها از متغیرهای مستقل که معمولا توسط شاخص VIF[4] یا فاکتور بزرگ شدن واریانس تعیین می شود. در صورتی که این شاخص برای هر متغیر در محدوده ٤-۰ باشد، استقلال خطا از متغیر مربوطه وجود خواهد داشت.

در این تحقیق به منظور تعیین بهترین مدل رگرسیونی چند متغیره خطی، ابتدا چندین ترکیب از متغیر های مستقل (TMP، T، pH و Fat) برای تعیین چگونگی تابعیت متغیرهای وابسته (μ و ρ) مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس بهترین مدل با توجه به معیار های فوق الذکر (ضرایب همبستگی، آزمون F و شاخص VIF) انتخاب گردید. نتایج مدلسازی نشان داد که مدل زیر به بهترین جواب برای برازش داده های واقعی ویسکوزیته در بین مدل های مورد بررسی دست یافته است:

$$\ln \mu = (30.884\ T) + (7.86\times10^{-5}\ TMP) + (2.68\times10^{-4}\ pH) - (1.18\times10^{-3}\ Fat) - 7.991 \qquad (۹)$$

1 - Correlation coefficient
2 - Coefficient of determination or R square
3 - Adjusted R square
4 - Variance inflation factor

با ملاحظه نتایج آنالیز واریانس رگرسیون مدل انتخابی در جدول (۳) می توان دریافت که تنها اثر دما بر ویسکوزیته معنی دار است و ویسکوزیته مستقل از متغیر های فشار، pH و درصد چربی می باشد. شاخص VIF برای همه متغیر ها بزرگتر از یک بدست آمده است،

یعنی که استقلال خطا از متغیر های مستقل وجود دارد. در ضمن نسبت میانگین مربعات رگرسیون به میانگین مربعات خطا (آزمون F) در سطح ۰/۱ درصد خطا معنی دار شده است. مقادیر ضرایب همبستگی (R، R^2 و Adj. R^2) نیز نشان می دهند که بین مقادیر داده های واقعی ویسکوزیته و مقادیر پیشگویی شده توسط مدل همبستگی عالی وجود دارد (شکل ۳).

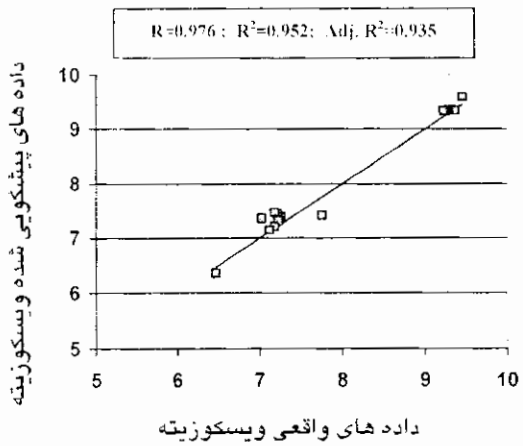
جدول ۳- نتایج آنالیز تابعیت ویسکوزیته تراوه فرآیند اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی از متغیر های دما، فشار، pH و درصد چربی

Ind. Variables	Coefficient	St. Error	t	P	VIF
Constant	-۷ ۹۹۱	۰ ۴۲۹	-۱۸/۶۳۸	<	.
T/T	۳۰ ۸۸۴	۲ ۶۱۵	۱۱ ۸۱۱	۰ ۰۰۱	۱ ۷۴۵
TMP	۰ ۰۰۰۰۷۸	۰ ۰۰۰۲۰۳	۰ ۳۸۸	<	۱ ۰۰۰
pH	۶	۰ ۰۵۹۲	۰ ۰۰۴۵۴	۰ ۰۰۱	۱ ۶۷۷
Fat	۰ ۰۰۰۰۳۶۸	۰ ۰۰۰۸۲۱	۰ ۴۴۴	۰ ۷۰۶	۱ ۴۲۷

A.V.	DF	SS	MS	F	P
Regression	۴	۰ ۹۱۷	۰ ۲۲۹	۲۸۳ ۰۲۸	< ۰ ۰۰۱
Residual	۵۹	۰ ۰۴۷۶	۰ ۰۰۰۸۰۷	-	-
Total	۶۳	۰ ۹۶۲	۰ ۰۱۵۳	-	

۳-۲- دانسیته

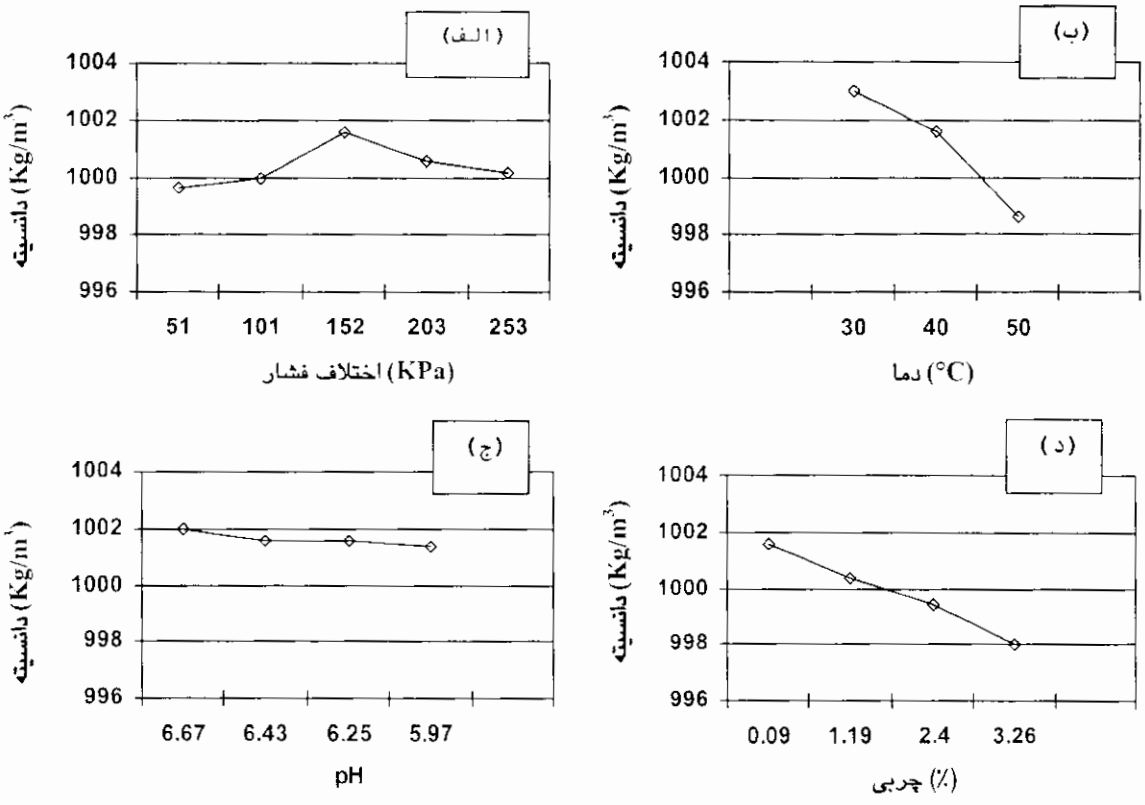
نتایج اثر عوامل مختلف فرآیند بر دانسیته تراوه در طی اولترافیلتراسیون شیر نشان می‌دهند که با افزایش دمای فرآیند، درصد چربی و کاهش pH شیر مقدار دانسیته کاهش می‌یابد، اما با فشار مشابه ویسکوزیته رفتار دو گانه‌ای دیده می‌شود.



شکل ۳- همبستگی بین نتایج تجربی و مقادیر پیشگویی شده توسط مدل رگرسیونی چند متغیره خطی (معادله ۹) برای ویسکوزیته تراوه اولترافیلتراسیون شیر

بطوری که دانسیته در فشارهای ۵۱ تا ۱۵۲ کیلوپاسکال سیر صعودی و در محدوده ۱۵۲ تا ۲۵۳ کیلوپاسکال سیر نزولی دارد (شکل ٤: الف-د). به نظر می‌رسد که کمترین تأثیر را تغییرات pH شیر بر دانسیته تراوه داشته است، در حالیکه دمای فرآیند و درصد چربی شیر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دانسیته تراوه گذاشته‌اند. از میان مواد جامد شیر، چربی کمترین دانسیته را دارد، بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد چربی و درجه حرارت تراوه، دانسیته بطور قابل ملاحظه ای کاهش یابد. در ضمن دانسیته مایعات تا حدودی تحت تاثیر دما است، اما نتایج این تحقیق نشان می دهد که دما تاثیر عمده ای بر دانسیته گذاشته است. در توضیح این رفتار می توان گفت احتمالاً افزایش دما ضریب نفوذ برگشتی اجزاء محلول به طرف توده سیال و کاهش غلظت آنها را در تراوه موجب گشته است. در مورد دانسیته تراوه نیز مشابه ویسکوزیته آن چندین مدل رگرسیونی چند متغیره خطی مورد ارزیابی قرار گرفت و بر اساس نتایج بدست آمده برای معیار های R، آزمون F و شاخص VIF مدل زیر به عنوان بهترین مدل برای پیشگویی دانسیته به عنوان تابعی از عوامل مختلف فرآیند (TMP، T، pH و Fat) انتخاب شد:

$$\rho = 987.851 + (0.00277\ TMP) + (335.912T) + (0.627\ pH) - (0.720\ Fat)$$



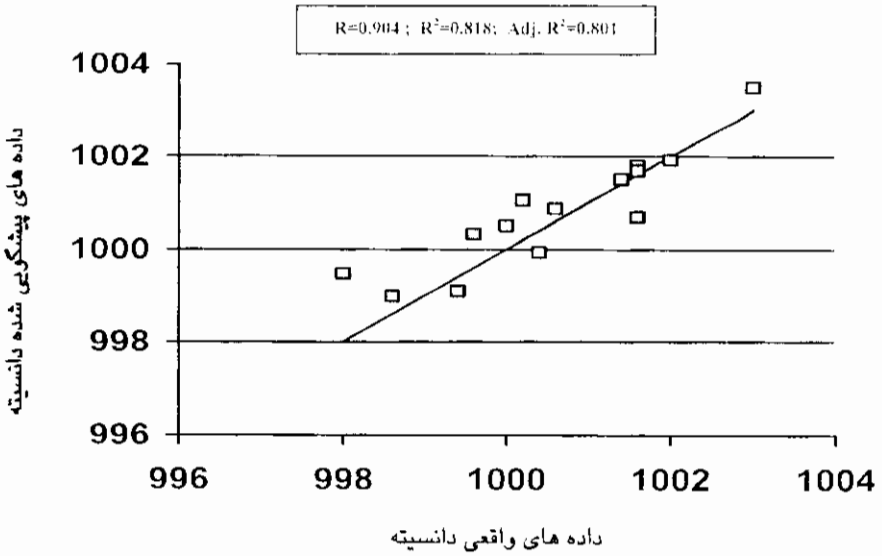
شکل ۴- رفتار دانسیته تراوه به عنوان تابعی از عوامل مختلف فرآیند اولترافیلتراسیون

نتایج آنالیز واریانس رگرسیون مدل انتخابی برای دانسیته در جدول (٤) نشان می دهدکه اثر دما و درصد چربی بر دانسیته معنی دار شده است، اما دانسیته مستقل از متغیر های فشار و pH می باشد. شاخص VIF برای همه متغیر ها بزرگتر از یک بدست آمده است، پس استقلال خطا از کلیه متغیر های مستقل وجود دارد. در ضمن نسبت میانگین مربعات رگرسیون به میانگین مربعات خطا (آزمون F) در سطح ۰/۱ درصد خطا معنی دار شده است. با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی (R، R^2 و $Adj.\ R^2$) در شکل (٥) نیز می توان نتیجه گرفت که بین داده های تجربی دانسیته و مقادیر بدست آمده توسط مدل (معادله ۱۰) همبستگی خوبی وجود دارد.

جدول ۴- نتایج آنالیز تابعیت دانسیته تراوه فرآیند اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی از متغیر های دما، فشار، pH و درصد چربی

Ind. Variables	Coeffici ent	St. Error	t	P	VIF
Constant	۹۸۷.۸۵۱	۳.۲۱۶	۲۳۴.۳۱۸	<۰/۰۰۱	-
T	۳۳۵.۹۱	۲۶.۱۳۸	۱۲.۸۵۱	<۰.۰۰۱	۱.۶۲۰
TMP	۰.۰۰۲۷۷	۰.۰۰۲۱۰	۱.۳۱۴	۰/۱۹۶	۱/۰۰۰
PH	۰.۶۲۷	۰.۵۹۳	۱.۰۵۶	۰.۲۹۷	۱.۳۶۲
Fat	-۰.۷۲۰	۰.۰۸۳۴	-۸/۶۳۰	<۰.۰۰۱	۱.۳۶۹

A.V.	DF	SS	MS	F	P
Regression	۴	۶۵.۴۷۱	۱۶.۳۶۸	۴۸.۱۸۰	<۰.۰۰۱
Residual	۴۳	۱۴.۶۰۸	۰.۳۴۰	-	-
Total	۴۷	۸۰.۰۷۹	۱.۷۰۴	-	-



شکل ۵- همبستگی بین داده های واقعی دانسیته تراوه و مقادیر پیشگویی شده توسط مدل رگرسیونی چند متغیره خطی(معادله ۱۰)

۴ - منابع

1. Bakshi, A. S. and D.E. Smith, 1984. "Effect of fat and temperature on viscosity in relation to pumping requirments of fluid". J. Dairy Sci. 67(6): 1157-1160.
2. Ballmann, H. and D. Ordolff, 1986. " Causes of variation in viscosity of fresh raw milk", Milckwissenchaft. 41(1): 27-29.
3. Cheryan, M., 1998, "Ultrafitration and Microfiltration Handbook". Techomic publishing Ltd., Lancaster, USA.
4. De Laveau, J., 1979, "Effect of pH on viscosity of sweet and acid whey". J. Dairy Sci. 62(9): 1455-1457.
5. Fernandez, M.F., 1972. "Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates; II, Viscosity", J. Dairy Res. 39(1): 75-82.
6. Jelen, P., 1979, "Physico-chemical Properties of milk and whey in membrane processing", J. Dairy Sci, 62(8): 1343-1351.
7. Robinson, R.K., 1994, "Modern Dairy Technology Vol. 1 & 2", Chapman & Hall Publ. Co. UK.
8. Roy, N.K., 1994, "Texbook of Practical Dairy Chemistry", Kalyani Publ. Com., India.
9. Sethu, R.D., P.C. Pantulu, and C.S. Sudheendranath, 1989, "The interreationship of electrical conductivity, relative viscosity and absolute temperature of skim milk", Indian J. Dairy Sci. 43(3): 543-546.
10. Webb, B.H., 1987, "Fundamentals of Dairy Chemistry", AVI Publ. Co. Wsprost. USA.
11. Yu, J.H. and J.H. Hwang, 1981, " Studies on the viscosity variation of milk and milk products. Korean J. of Animal Sci. 23(1): 54-61.

Regression models of viscosity and density of permeate as a function of operation parameters in ultrafiltration of milk

Razavi, S. M. A.[1]

Abstract

Viscosity (μ) and density (ρ) are important physical properties for analysis of membrane processes performance and for designing a new membrane process. In addition, the energy requirement for fluid pumping is depend on these two physical properties magnitiude. In this study, firstly, the effects of different process factors such as transmembrane pressure (51, 101, 152, 203 and 253 kPa), temperature (30,40 and 50°C) and the effects of physico-chemical properties such as milk pH (6.67, 6.43, 6.25 and 5.97), milk fat percent (0.09, 1.19, 2.4, 3.26) on the viscosity and density of permeate have been considered. Two linear multiple regression models were then developed by Sigmastat software for prediction of μ and ρ during milk ultrafiltration. The experimental results showed that μ and ρ decreased as fat percent or temperature increased. pH had no considerable effect on μ and ρ. Furtheremore, increasing transmembrane pressure to 152 kPa led to an increase in both μ and ρ, while further increasing to 253 kPa resulted in a decrease in both μ and ρ. The statistical modeling results showed that the viscosity is only significantly depend on temperature and there was an excellent agreement between actual and predicted data (R=0.976), whereas the density is siginificantly depends on both temperature and fat percent and there was a good agreement between experimental and predicted data (R=0.904).

Keywords: Ultrafiltration, milk, viscosity, density, permeate and modeling.

1- Department of Food Sci. & Technology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, P. O. Box: 91775-1163, Mashhad, Iran. e-mail:s.razavi@um.ac.ir