

# بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ویسکوزیته و دانسیته پرمیت در طی اولترافیلتراسیون شیر

سیدمحمد علی رضوی<sup>۱</sup>، سیدعلی مرتضوی و سید محمود موسوی<sup>۲</sup>

۱- گروه علوم و صنایع غذایی- دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

۲- گروه مهندسی شیمی- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳

## چکیده

ویسکوزیته و دانسیته از جمله مهمترین خواص فیزیکی برای تجزیه و تحلیل کارایی فرایندهای 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 اثر عوامل مختلف فرآیند نظیر اختلاف فشار عملیاتی (۵۱، ۱۰۳، ۱۵۲، ۲۰۳، ۲۵۲ کیلوپاسکال) و درجه حرارت (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد) و همچنین اثر خصوصیات فیزیکوشیمیایی همچون pH (۶/۶۲، ۶/۴۳، ۶/۲۵ و ۵/۹۷) و درصد چربی (۰/۱، ۱/۲، ۲/۴، ۳/۳ درصد) بر ویسکوزیته و دانسیته پرمیت در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش دمای فرآیند و درصد چربی شیر مقدار ویسکوزیته و دانسیته کاهش می‌یابد. تغییرات pH تأثیر معنی‌داری 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.

**واژه‌های کلیدی: اولترافیلتراسیون؛ شیر؛ ویسکوزیته؛ دانسیته؛ پرمیت.**

## ۱- مقدمه

شونده توسط غشاء) و پرمیت می‌باشند. از طرف دیگر برای طراحی یک فرآیند غشایی جدید داشتن اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی و مهندسی سیال ضروری است. از اینرو ویسکوزیته و دانسیته از جمله مهمترین خصوصیات فیزیکی برای طراحی یا تجزیه و تحلیل فرایندهای غشایی هستند. شیر و فرآورده‌های لبنی از لحاظ ترکیب شیمیایی و خصوصیات رئولوژیکی بسیار متنوع می‌باشند، 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 (۱) و (۲).

در چند دهه گذشته فرآیند اولترافیلتراسیون (UF)<sup>۱</sup> کاربرد فزاینده‌ای در صنایع لبنیات به ویژه برای تغلیظ شیر و آب پنیر پیدا کرده است. کارایی<sup>۲</sup> و هزینه یک فرآیند غشایی به شار پرمیت<sup>۳</sup> (فاز عبوری از درون غشاء) و درصد دفع<sup>۴</sup> اجزاء آن بستگی دارد. (۱)

نوع غشاء؛ پارامترهای عملیاتی و خصوصیات سیال تعیین کننده شار جریان و غلظت اجزاء در رتنتیت<sup>۵</sup> (فاز تغلیظ

1 - Ultrafiltration.

2 - Performance.

3 - Permeate flux.

4 - Rejection (or Retention).

5 - Retentate.

الف- مدل فشار اسمزی

$$J_p = \frac{|\Delta p| - |\Delta \pi|}{\mu_p R_m} \quad (1)$$

ب- مدل پلاریزاسیون غلظت (تئوری فیلم)

$$J_p = k_s \ln \left[ \frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} \right] \quad (2)$$

$$\left( \frac{k_s d_h}{D} \right) = A \left( \frac{\rho_u d_h}{\mu} \right)^\alpha \left( \frac{\mu}{\rho D} \right)^\beta \left( \frac{d_h}{L} \right)^\gamma \quad (3)$$

$$D = \frac{KT}{\sigma \pi \mu_p r} \quad (4)$$

ج- مدل مقاومت‌های متوالی

$$R_T = \frac{\Delta P_T}{\mu_p J_p} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{\Delta P_T}{\mu_\omega J_\omega} \quad (6)$$

$$R_{if} = \frac{\Delta P_T}{\mu_{\omega f} J_{\omega f}} - R_m \quad (7)$$

$$R_{rf} = R_T - (R_{if} + R_m) \quad (8)$$

معرفی پارامترها

با ملاحظه معادلات فوق به خوبی می‌توان دریافت که ویسکوزیته ( $\mu$ ) و دانسیته ( $\rho$ ) 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 لینی اثر می‌گذارند. بعضی از این عوامل توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. عموماً ویسکوزیته فرآورده‌های لینی 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 بویژه کازئین‌ها عنوان شده است. بطوری 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 (۲). هم کاهش و هم افزایش pH موجب افزایش ویسکوزیته شیر می‌شود (۳). 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 (۴). افزایش pH آب پنیر تا ۱۰ ویسکوزیته آب پنیر چدار و کاتیج را به میزان ۲ برابر افزایش داد، ولی کاهش pH تا زیر ۶ تأثیری بر ویسکوزیته نداشت. در طی عملیات غشایی فرآورده‌های لینی تغییرات ناچیزی در pH بوجود می‌آید ولی تأثیر چندانی بر ویسکوزیته آنها ندارد (۱). نتایج اثر دما در دامنه ۸۰-۱۰۰ بر ویسکوزیته شیر کامل، شیر پس چرخ و آب پنیر نشان داده است که با افزایش دما ویسکوزیته به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد (۵). البته ویسکوزیته شیر در دماهای بالاتر از ۴۰°C تغییرات غیر منتظره‌ای می‌کند که محققین علت آن را احتمالاً تغییر حالت چربی شیر از جامد به مایع عنوان کرده‌اند. گزارش شده است که ویسکوزیته و دانسیته شیر و خامه بسیار تحت تأثیر درصد چربی است، بطوری که با افزایش درصد چربی، ویسکوزیته در دمای ۲۰°C به حد قابل ملاحظه‌ای افزایش و دانسیته آنها کاهش می‌یابد (۶). 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 (۲).

با ملاحظه نتایج انتشار یافته می‌توان دریافت که احتمالاً تاکنون هیچگونه مطالعه‌ای در باره اثر عوامل مختلف بر ویسکوزیته و دانسیته پرمیت شیر در طی فرآیند اولترافیلتراسیون صورت نگرفته است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر سطوح مختلف فشار عملیاتی، دما، درصد چربی و pH بر ویسکوزیته و دانسیته پرمیت در طی

۲۰ کیلو دالتون	MWCO <sup>۳</sup>
۰/۵-۳ اتمسفر	دامنه فشار قابل تحمل
۵-۵۵ درجه سانتی گراد	دامنه دمای قابل تحمل
۲-۱۱	دامنه pH قابل تحمل

1- Polysulfone amid  
3- Molecular Weight Cut-Off.

2- Spiral wound

در این پروژه اثر عوامل مختلف فرآیند نظیر اختلاف فشار در عرض غشاء (TMP)<sup>۳</sup>، دمای عملیات، درصد چربی شیر و pH شیر بر ویسکوزیته و دانسیته پرمیت مورد بررسی قرار گرفت. سطوح مختلف این متغیرها به همراه سایر شرایط عملیاتی در جدول (۲) آورده شده است. در مجموع ۱۶ آزمایش برای بررسی این پارامترها انجام شد و در هر بار آزمایش 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 شرک فانکو ژربر آلمان<sup>۴</sup> در دمای ۲۵°C و در ۳ تکرار برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. از pH متر مدل ۳۰۱۰ ساخت شرکت جن وی انگلستان<sup>۵</sup> برای اندازه‌گیری pH نمونه‌های شیر و محلول‌های شستشو استفاده گردید. دانسیته نمونه‌های پرمیت در انتهای هر بار عملیات با استفاده از روش پیکنومتری<sup>۶</sup> (پیکنومتر ۲۵ میلی‌لیتری) بدست آمد (۷). اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌ها در دمای عملیاتی مربوطه برای ۲ تا ۳ تکرار انجام می‌گرفت. ویسکوزیته نمونه‌های پرمیت در انتهای هر بار عملیات با استفاده از ویسکومتر لوله موینه U-شکل استوالد<sup>۷</sup> اندازه‌گیری می‌شد (۷). این ویسکومتر مجهز به

3 - Transmembrane pressure.

4 - Lactostar (Funko Gerber Ltd., Germany)

5 - 3010, Jenway. Ltd., U.K.

6 - Picnometer.

7 - Ostwald U-tube capillary viscometer.

اولترافیلتراسیون شیر و تجزیه و تحلیل کارایی فرآیند غشایی با تأکید بر این دو خصوصیت فیزیکی است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق یک سیستم پیلوتی غشایی ساخت شرکت بیوکن روسیه<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم شامل یک تانک تغذیه، پمپ سانتریفوژی، دبی سنج، مدول غشاء، دو فشار سنج، مبدل حرارتی لوله‌ای، دماسنج دیجیتالی و شیرهای کنترل 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 پیلوتی، 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<sup>۲</sup> سیستم مطابق دستورالعمل سازنده دستگاه صورت می‌گرفت. 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.

## جدول ۱ - مشخصات فنی سیستم پیلوتی اولترافیلتراسیون

جنس غشاء	پلی سولفن آمید <sup>۱</sup>
مدول غشاء	مارپیچ حلزونی <sup>۲</sup>
سطح مؤثر غشاء	۰/۳۳ متر مربع

1 - Biocon Company, Russia.

2 - Cleaning - In - Place.

حمام آب گرم برای تنظیم دما بود. اندازه گیری 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.

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

متغیر	شرایط عملیاتی		
	اختلاف فشار (kpa)	دما (°C)	درصد چربی
اختلاف فشار در عرض غشاء (TMP)	۵۱	۴۰	۰/۰۹۰
	۱۰۱/۳۳	۴۰	۰/۰۹۵
دما	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹۰
	۲۰۳	۴۰	۰/۰۹۵
درصد چربی	۲۵۳	۴۰	۰/۰۹۰
	۱۵۲	۳۰	۰/۱۱
pH	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹
	۱۵۲	۵۰	۰/۱۲
pH	۱۵۲	۴۰	۰/۰۹
	۱۵۲	۴۰	۱/۱۹
pH	۱۵۲	۴۰	۲/۴۰
	۱۵۲	۴۰	۳/۲۶
pH	۱۵۲	۳۰	۲/۴۰
	۱۵۲	۳۰	۲/۳۸
pH	۱۵۲	۳۰	۲/۳۹
	۱۵۲	۳۰	۲/۴۲

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ویسکوزیته

نتایج آزمایشگاهی اثر عوامل مختلف بر ویسکوزیته پرمیت نشان می‌دهد که دما بیشترین و pH کمترین تأثیر را داشته است، (شکل (۱) : 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 ۱- الف). پرمیت 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 (۱). از آنجایی که ویسکوزیته یک سیال تابع نیروهای درون مولکولی است، لذا در توضیح رفتار فشار می‌توان گفت که تا فشار ۱۵۲ کیلوپاسکال شار پرمیت 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<sup>۱</sup> حفرات غشاء گردیده و لذا ویسکوزیته مجدداً به دلیل کاهش غلظت ترکیبات در پرمیت کاهش یافته است. با ملاحظه شکل ۱-ب می‌توان دریافت که با افزایش دما ویسکوزیته پرمیت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بدیهی است کاهش ویسکوزیته در این حالت متأثر افزایش حرکت درونی مولکولی ناشی از افزایش دما است (۲، ۵). کاهش pH شیر از ۶/۶۷ تا ۵/۹۷ تأثیر معنی‌داری بر ویسکوزیته نگذاشته است، اگر چه ویسکوزیته به مقدار ناچیزی کاهش نشان داده است (شکل ۱-ج). اسیدی کردن شیر موجب کاهش حلالیت پروتئین‌های شیر و افزایش تمایل به رسوب آنها بر سطح غشاء می‌گردد، لذا عبور ترکیبات کوچک محلول از درون غشاء به دلیل گرفتگی بیشتر کاهش می‌یابد (۱، ۲). با افزایش درصد چربی نیز انسداد حفرات غشاء بیشتر می‌شود. زیرا گلبولهای چربی مولکولهای بسیار درشتی هستند و با تغییر درصد چربی شیر لایه ژلی روی سطح غشاء ضخیم تر و مستحکم تر می‌گردد (۱، ۶). بنابراین ویسکوزیته پرمیت به دلیل کاهش غلظت اجزاء محلول تا حدی کاهش می‌یابد (شکل ۱-د).

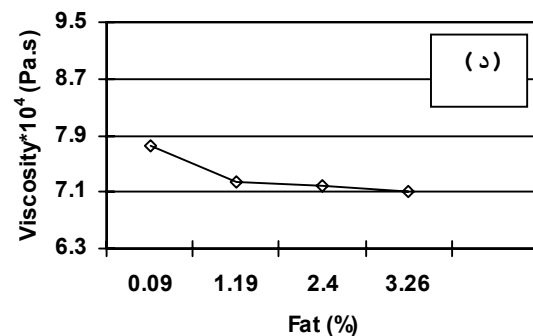
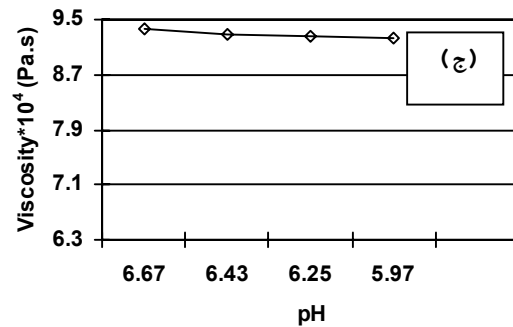
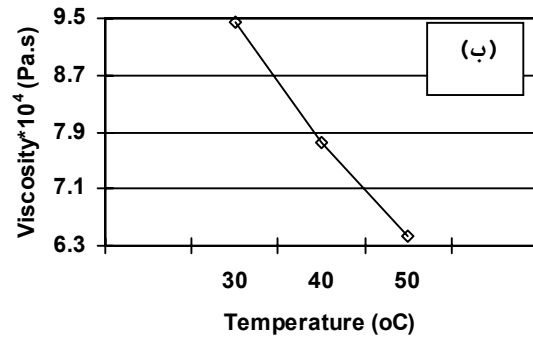
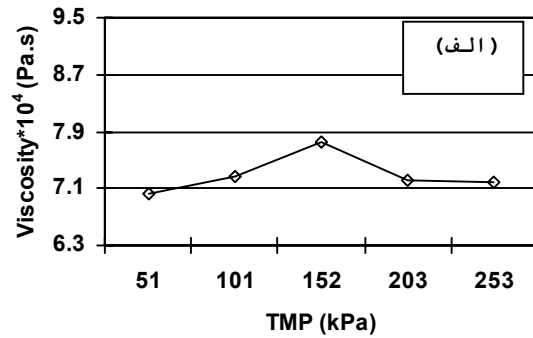
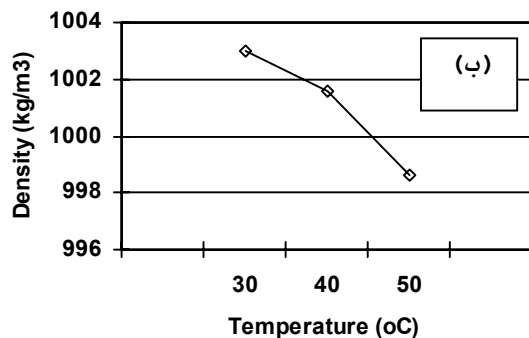
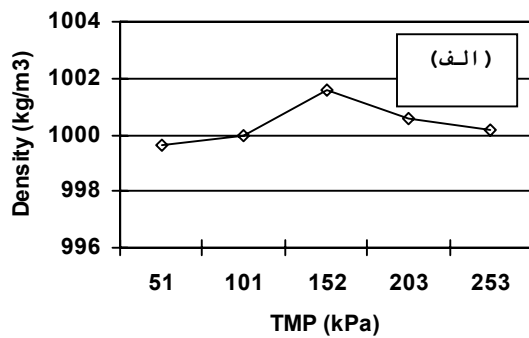
1 - Fouling.

2 - Acidification.

### ۲-۳- دانسیته

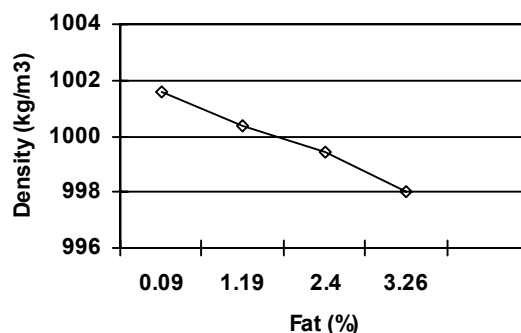
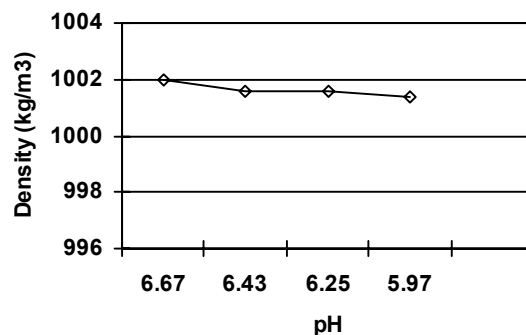
نتایج اثر عوامل مختلف فرآیند بر دانسیته پرمیت در طی اولترافیلتراسیون شیر نشان می‌دهند که با افزایش دما، درصد چربی و کاهش pH مقدار دانسیته کاهش می‌یابد، اما با فشار مشابه ویسکوزیته رفتار دو گانه‌ای دیده می‌شود. بطوری که دانسیته در فشارهای ۵۱ تا ۱۵۲ کیلوپاسکال سیر صعودی و در محدوده ۱۵۲ تا ۲۵۳ کیلوپاسکال سیر نزولی دارد (شکل ۲: الف-د). به نظر می‌رسد که کمترین تأثیر را تغییرات pH شیر بر دانسیته پرمیت داشته است، در حالیکه دمای فرآیند و درصد چربی شیر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر دانسیته پرمیت گذاشته‌اند.

عوامل گوناگونی نظیر درصد ماده خشک بدون چربی، درصد چربی، درجه هیدراسیون پروتئین‌ها و دما موجب تغییر دانسیته فرآورده‌های لبنی می‌شوند (۲، ۳، ۶ و ۷). با توجه به ماهیت فرآیند اولترافیلتراسیون، دانسیته پرمیت عمدتاً تحت تأثیر میزان ماده خشک بدون چربی است، اگر چه اثر دما را نیز نباید از نظر دور نگه داشت.



شکل ۱- تأثیر عوامل مختلف فرآیند بر ویسکوزیته پرمیت در طی اولترافیلتراسیون شیر

- processing", Journal of Dairy Science. 62, 1979.
3. Webb, B.H., "Fundamentals of Dairy Chemistry", AVI Publ. Co. Wsprost, 1987.
  4. De Laveau, J., "Effect of pH on viscosity of sweet and acid whey". Journal of Dairy Science. 63, 1980.
  5. Bakshi, A. S., "Effect of fat and temperature on viscosity in relation to pumping requirements of fluid, Journal of Dairy Science, 67, 1984.
  6. Robinson. R.K., "Modern dairy technology Vol. 1 & 2", Chapman & Hall Publ. Co., 1994.
  7. Roy, N.K., "Textbook of Practical Dairy Chemistry", Kalyani Publ. Com., India, 1994.



شکل ۲- رفتار دانسیته پرمیت به عنوان تابعی از عوامل مختلف فرآیند اولترافیلتراسیون شیر

#### ۴- منابع

1. Cheryan, M., "Ultrafiltration and Microfiltration Handbook". Technomic publishing Ltd., Lancaster. 1998.
2. Jelen, P., "Physico-chemical Properties of milk and whey in membrane