

# تأثیر درصد چربی بر کارایی دینامیکی فرایند اولترافیلتراسیون شیر

سید محمدعلی رضوی\*<sup>+</sup>

مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و صنایع غذایی، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۲۳

سید محمود موسوی

مشهد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

**چکیده:** در این تحقیق اثر تغییرهای درصد چربی شیر در چهار سطح ۰/۱، ۱/۱۹، ۲/۴۰ و ۳/۲۶ بر رفتار دینامیکی شار تراوه، مقاومت هیدرولیکی کل و درصد دفع اجزای محلول شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها از یک سیستم پیلوتی اولترافیلتراسیون مجهز به مدول مارپیچ حلزونی با غشای پلی سولفن آمید استفاده شده است. استراتژی عملی سه مرحله‌ای بر مبنای مدل سه پارامتری مقاومت متوالی (لایه مرزی - جذب سطحی) برای تعیین انواع مقاومت‌های هیدرولیکی به کار گرفته شده است. نتیجه‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در هر یک از سطوح درصد چربی شیر، مقدار شار تراوه با گذشت زمان عملیات به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، اما افزایش درصد چربی تنها باعث کاهش شار اولیه می‌شود و شار کاذب پایدار تحت تاثیر درصد چربی قرار نمی‌گیرد. مقاومت هیدرولیکی کل در همه سطوح درصد چربی با گذشت زمان فرایند افزایش نشان می‌دهد. همچنین با افزایش درصد چربی شیر، مقاومت‌های هیدرولیکی کل، پلاریزه شدن غلظت، جذب سطحی و مقاومت هیدرولیکی غشا به تقریب بدون تغییر باقی می‌ماند. داده‌های درصد دفع ترکیب‌های شیر نیز نشان می‌دهد که درصد دفع پروتئین و چربی در هر سطح از درصد چربی و زمان عملیات به تقریب ثابت است، اما درصد دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل شیر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** شیر، اولترافیلتراسیون، کارایی، درصد چربی، گرفتگی، شار تراوه، دفع اجزاء محلول.

**KEY WORDS:** Milk, Ultrafiltration, Performance, Fat percent, Fouling, Permeate flux, Solutes rejection.

## مقدمه

بیولوژیکی و غیره گسترش یافته است [۱]. کارایی و هزینه یک فرایند غشایی بستگی به شار تراوه<sup>(۱)</sup> (فاز عبوری از درون غشاء)، گرفتگی<sup>(۲)</sup> و درصد دفع اجزای محلول شیر دارد [۲]. نتیجه‌ها نشان داده است محدودیت کاربرد عملی فرایند اولترافیلتراسیون

فرایند اولترافیلتراسیون (UF)<sup>(۱)</sup> نخستین بار در سال ۱۹۶۷ میلادی برای تغلیظ شیر در فرایند تولید پنیر به کار رفت و از آن زمان تاکنون به‌طور فزاینده‌ای در فراوری فرآورده‌های لبنی از جمله تولید انواع پنیر، ماست، اجزای پروتئینی شیر، ترکیب‌های فعال

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: s.razavi@um.ac.ir

(۱) Ultrafiltration

(۲) Fouling

(۲) Permeate

عنوان شاخص قابلیت جداسازی و میزان تغلیظ) در طی فرایند اولترافیلتراسیون شیر است. از آنجایی که به نظر می‌رسد هر یک از ترکیب‌های شیر اثر مهم و قابل توجهی بر الگوی شار و گرفتگی اولترافیلتراسیون داشته باشند، لذا یکی از ویژگی‌های مهم این تحقیق، امکان تفسیر نتیجه‌های به‌دست آمده برای کارایی اولترافیلتراسیون با استفاده از تغییرهای دینامیکی درصد دفع اجزای محلول شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) به عنوان تابعی از درصد چربی شیر و درک مکانیسم‌های کاهش شار و توسعه گرفتگی است، در واقع موضوعی که در تحقیقات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

### مدل مقاومت‌های متوالی

تاکنون مدل‌های متفاوتی برای توصیف رفتار شار و مقاومت‌های هیدرولیکی بر سر راه جریان فرایند اولترافیلتراسیون محلول‌های کلوییدی ارایه شده است [۲]، اما تنها مدل مقاومت متوالی<sup>(۵)</sup> یا جذب لایه مرزی<sup>(۶)</sup> قادر به توصیف کل رفتار شار در محدوده وابسته به فشار و مستقل از فشار بوده است [۳ و ۱۸]. بر اساس فرضیه‌های این مدل، سه مقاومت هیدرولیکی، یعنی مقاومت ذاتی غشاء<sup>(۷)</sup>، مقاومت لایه پلاریزه شدن غلظت (لایه مرزی) و مقاومت لایه جذب شده به سطح و درون حفره‌های غشاء بر مقدار جریان عبوری از درون غشاء تأثیر می‌گذارد، به طوری که اثرهای هر یک از این مقاومت‌ها بر شار تراوه را می‌توان به طور جداگانه به‌وسیله‌ی این مدل به‌دست آورد. انتقال آب تمیز از درون غشاء در اثر جریان ناروان صورت می‌گیرد. مقاومت هیدرولیکی غشاء را می‌توان به کمک قانون دارسی<sup>(۸)</sup> چنین توصیف کرد [۲]:

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \quad (1)$$

که در آن TMP تفاوت فشار در عرض غشاء<sup>(۹)</sup> (kPa)،  $\mu_w$ ، ناروانی آب (Pas)،  $J_w$  شار آب تمیز (m/s) و  $R_m$  مقاومت ذاتی غشاء (m<sup>-۱</sup>) است. TMP در اولترافیلتراسیون جریان عرضی<sup>(۱۰)</sup> از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$TMP = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \quad (2)$$

به‌دلیل کاهش کارایی غشاء به دلیل پدیده گرفتگی (گرفتگی برگشت‌پذیر یا پلاریزه شدن غلظت<sup>(۱)</sup>) و گرفتگی برگشت ناپذیر یا جذب) است، زیرا در چند دقیقه اول فرایند موجب افت شدید شار جریان تراوه، توسعه گرفتگی و تغییر میزان دفع اجزای محلول شیر می‌شود [۲-۴]. گرفتگی، عمر کاری غشاء را کاهش داده و هزینه‌های شستشو را افزایش می‌دهد.

در صنعت به منظور اعاده کارایی فرایند اولترافیلتراسیون می‌بایست گرفتگی غشاء به‌طور کامل برطرف شود. به‌طور معمول چنین عملیاتی روزانه ۲ تا ۳ ساعت از کل زمان ۶ تا ۸ ساعت تولید را به خود اختصاص می‌دهد [۲، ۳، ۵ و ۶]. ویژگی‌های غشاء، پارامترهای هیدرودینامیکی فرایند و ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیال از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده الگوی شار جریان تراوه، میزان و نوع گرفتگی و غلظت اجزاء در فازهای ناتراوه<sup>(۳)</sup> (فاز تغلیظ شونده توسط غشاء) و تراوه هستند [۱-۵ و ۷-۹].

در سیستم‌های کلوییدی مانند شیر، سرعت اولترافیلتراسیون به شدت وابسته به ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیال از جمله درصد ترکیب‌های شیر است. برای مثال، برخی از نتیجه‌های انتشار یافته نشان داده است شار تراوه شیر پس چرخ در تمامی طول فرایند کمی بالاتر از شیر کامل است [۱۰-۱۴]. این موضوع گواه بر این مدعا است که شار و گرفتگی به کمک درصد چربی قابل کنترل هستند. تاکنون اطلاعات محدودی در مورد اثر ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی شیر بر رفتار شار، گرفتگی و ویژگی‌های بازداری در طی فرایند اولترافیلتراسیون شیر انتشار یافته است.

مطالعات قبلی به طور عمده در باره بررسی اثرهای شرایط هیدرودینامیکی فرایند و ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی سیال بر کارایی اولترافیلتراسیون شیر (اغلب شار تراوه به عنوان شاخص سرعت فیلتراسیون) تحت شرایط پایدار<sup>(۳)</sup> متمرکز شده است [۱، ۳، ۵، ۷-۹، ۱۰-۱۲ و ۱۵-۱۷]، در حالی که برای هدف‌های طراحی، مدل‌سازی و یا تجزیه و تحلیل یک فرایند جدید، اطلاعات به‌دست آمده تحت شرایط پایدار مفید و قابل استفاده نیستند، لذا هدف اصلی از این تحقیق بررسی اثر تغییرهای درصد چربی شیر بر رفتار دینامیکی شار تراوه، مقاومت هیدرولیکی کل<sup>(۴)</sup> (به عنوان شاخص گرفتگی) و درصد دفع اجزای محلول (به

(۱) Concentration polarization

(۲) Retentate

(۳) Steady state

(۴) Total hydraulic resistance

(۵) Resistance-in-series model

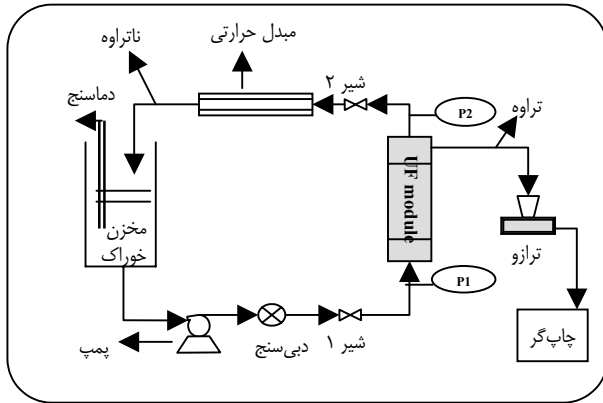
(۶) Adsorption-boundary model

(۷) Intrinsic membrane resistance

(۸) Darcy's law

(۹) Transmembrane pressure

(۱۰) Cross flow



شکل ۱- شمای کلی واحد پایلوتی UF مورد استفاده.

بنابراین، کاهش شار نسبی کل ( $J_{rt}$ ) عبارت است از:

$$J_{rt} = 1 - J_r = \frac{R'}{1 + R'} \quad (10)$$

اگر مقاومت ناشی از پلاریزه شدن غلظت و جذب سطحی وجود نداشته باشد، در این صورت  $J_{rt} = 0$ ، یعنی هیچ گونه کاهش شاری نسبت به آب خالص مشاهده نشده است، اما وقتی که  $J_{rt} \rightarrow 1$ ، یعنی کاهش شار بسیار بزرگ است و گرفتگی به شدت توسعه یافته است.

### مواد و روش‌ها

سیستم غشایی مورد استفاده، پایلوت پلنت UF/MF ساخت مشترک شرکت بیوکن<sup>(۶)</sup> روسیه و شرکت مهندسی میلاد خراسان بوده است. غشاء مورد نظر از جنس پلی سولفون آمید<sup>(۷)</sup> و اندازه‌ی حفره‌های<sup>(۸)</sup> (MWCO) آن ۲۰ کیلو دالتون انتخاب شد. این سیستم غشایی مجهز به یک تانک به حجم ۱۵ لیتر، پمپ سانتریفیوژی، دبی سنج، مدول اولترافیلتراسیون (از نوع ماریچ حلزونی<sup>(۹)</sup>)، مبدل حرارتی لوله‌ای، دو فشارسنج عقربه‌ای، دو شیر جریان، یک دماسنج دیجیتال و یک ترازوی الکترونیکی است (شکل ۱).

در این سیستم، جریان تراوه پس از خروج از غشای درون یک ظرف (که روی ترازوی الکترونیکی قرار دارد) می‌ریزد و تغییرهای دینامیکی شار در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه‌ای به وسیله‌ی ترازوی متصل به کامپیوتر و یا چاپ‌گر قابل ثبت است، درحالی که جریان ناتراوه پس

که در آن  $P_i$  و  $P_o$  به ترتیب فشارهای محلول ورودی به غشاء و خروجی از غشاء و  $P_p$  فشار تراوه است. مقاومت هیدرولیکی کل ( $R_T$ ) نسبت به جریان تراوه با فرض ناچیز بودن فشار اسمزی به وسیله‌ی مدل مقاومت متوالی (یا مدل لایه مرزی - جذب سطحی) این چنین بیان می‌شود [۱-۳ و ۱۸]:

$$R_T = \frac{TMP}{\mu_p J_p} \quad (3)$$

که در آن  $J_p$  شار تراوه ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) و  $\mu_p$  ناروانی تراوه (Pas) است. در حقیقت مقاومت هیدرولیکی کل مجموع مقاومت‌های ذاتی غشاء  $R_m$  و مقاومت گرفتگی کل<sup>(۱)</sup> است، یعنی:

$$R_T = R_m + R_f \quad (4)$$

$$R_f = \frac{TMP}{\mu_p J_p} - R_m \quad (5)$$

مقاومت گرفتگی کل ( $R_f$ ) طبق مدل مقاومت متوالی از دو جزء مقاومت ناشی از پلاریزه شدن غلظت یا گرفتگی برگشت پذیر<sup>(۲)</sup> ( $R_{if}$ ) و مقاومت ناشی از جذب سطحی یا گرفتگی برگشت ناپذیر<sup>(۳)</sup> ( $R_{rf}$ ) تشکیل شده است. مقاومت‌های گرفتگی به وسیله‌ی رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$R_{if} = \frac{TMP}{\mu_{wf} J_{wf}} - R_m \quad (6)$$

$$R_{rf} = R_f - R_{if} \quad (7)$$

که در آن  $J_{wf}$  و  $\mu_{wf}$  به ترتیب ناروانی و شار آب تمیز از درون غشاء گرفته (یا مسدود شده) هستند. براساس معادله‌های بالا می‌توان دریافت که عامل‌هایی مانند تفاوت فشار، ناروانی تراوه، مقاومت‌های گرفتگی در کاهش شار تراوه ( $J_p$ ) نسبت به شار آب تمیز ( $J_w$ ) دخالت دارند. برای بررسی میزان نقش هر یک از مقاومت‌ها در کاهش شار محلول می‌توان شار نسبی<sup>(۴)</sup> ( $J_r$ ) و کاهش شار نسبی کل<sup>(۵)</sup> ( $J_{rt}$ ) را براساس معادله‌های زیر تعریف کرد:

$$J_r = \frac{J_p}{J_w} = \frac{1}{1 + R'} \quad (8)$$

$$R' = \frac{R_{if} + R_{rf}}{R_m} \quad (9)$$

(۱) Overall fouling resistance

(۲) Reversible fouling

(۳) Irreversible fouling

(۴) Relative flux

(۵) Total relative flux decline

(۶) Biocon company

(۷) Polysulfone amide

(۸) Molecular Weight Cut Off

(۹) Spiral wound UF module

پاسکال - ثانیه) و چگالی (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب) به ترتیب به وسیله ویسکومتر لوله موئینه U شکل / استوالد<sup>(۲)</sup> و پیکنومتر<sup>(۳)</sup> ۲۵ میلی لیتری در سه بار تکرار برای آب مقطر مرحله اول، تراوه شیر و آب مقطر مرحله سوم در دمای عملیات مربوط اندازه گیری شد. pH به وسیله pH متر مدل ۳۰۱۰ ساخت شرکت جن وی<sup>(۴)</sup> کشور انگلستان برای نمونه های شیر، تراوه، ناتراوه، آب مقطر و محلول های شستشو در طی هر بار آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به دست آمد [۱۴].

درصد دفع ظاهری ( $R_{obs}$ ) اجزای محلول (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک کل) در طی عملیات از رابطه زیر محاسبه شد [۲]:

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_p}{C_b} \quad (11)$$

که  $C_p$  غلظت جزء محلول در تراوه و  $C_b$  غلظت جزء محلول در خوراک (یا ناتراوه) است.

## نتیجه ها و بحث

### شار تراوه

داده های تجربی شار تراوه به عنوان تابعی از درصد چربی شیر نشان می دهند که با افزایش مقدار چربی از ۰/۱ درصد به ۱/۲ درصد، شار اولیه در حدود ۱۵ درصد کاهش می یابد، اما ادامه افزایش درصد چربی شیر تأثیر معنی داری بر مقدار شار اولیه نمی گذارد (شکل ۲).

بر اساس نتیجه های این تحقیق می توان گفت که شار اولیه به طور متوسط در حدود ۶/۱ درصد به ازای افزایش هر یک درصد چربی، کاهش داشته است. شار در همه سطوح چربی با گذشت زمان عملیات کاهش یافته است، هم چنین می توان دریافت که شار در منحنی ۰/۱ درصد چربی پس از ۵ دقیقه و در بقیه منحنی ها به تقریب پس از ۱۰ دقیقه از شروع فرایند تثبیت شده و شارهای به نسبت پایداری به دست می آید. این شار را که در واقع معیاری مشابه شار در حالت پایدار است، شار به نسبت پایدار<sup>(۵)</sup> یا شار کاذب پایدار<sup>(۶)</sup> می نامند.

در این تحقیق شار تراوه در انتهای هر بار عملیات به عنوان شار کاذب پایدار در نظر گرفته شده است. افزایش درصد چربی اثر

از عبور از مبدل حرارتی قابل برگشت به تانک سیال فرایند است. در این تحقیق، نمونه های شیر پس چرخ به وسیله بازسازی شیر خشک بدون چربی با آب مقطر با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد تهیه شده تا این که غلظت ماده خشک بدون چربی نمونه ها در آزمایش های متفاوت ثابت و به طور میانگین برابر ۸/۵ درصد باشد. همچنین در این طرح تحقیقاتی، اثر درصد چربی شیر در ۴ سطح ۰/۱، ۱/۱۹، ۲/۴۰ و ۳/۲۶ درصد بر رفتار دینامیکی شار تراوه، مقاومت هیدرولیکی کل و درصد دفع اجزای محلول (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک کل) مورد بررسی قرار گرفت.

درصد چربی نمونه های شیر با استفاده از خامه هموژنیزه استریلیزه (۲۸ تا ۳۰ درصد) در سطح مورد نظر تنظیم شد. تمامی آزمایش ها تحت شرایط یکسان عملیاتی از لحاظ تفاوت فشار نسبی (۱۵۲ کیلو پاسکال)، سرعت جریان (۱۵ لیتر بر دقیقه) و دمای ۴۰ درجه سانتی گراد انجام شد و هر بار فرایند اولترا-فیلتراسیون شیر در ۴ مرحله صورت گرفت، صاف کردن آب مقطر از درون غشای تمیز، صاف کردن شیر پس چرخ از درون غشای تمیز، صاف کردن آب مقطر از درون غشای مسدود شده و فرایند شستشو طبق دستورالعمل سازنده سیستم غشایی انجام شد.

هدف از مرحله اول تعیین شار آب خالص ( $J_w$ ) و محاسبه مقاومت ذاتی غشای ( $R_m$ ) بر اساس معادله (۱) بوده است. بر اساس داده های مرحله دوم، شار شیر پس چرخ ( $J_p$ ) به دست آمد و بر اساس معادله (۳) مقاومت کل غشاء  $R_T$  تعیین شد. در مرحله سوم ابتدا آب مقطر با سرعت بالا و فشار پایین وارد مدار شد تا لایه زلی روی سطح غشاء به سرعت برطرف شود و سپس در شرایط عملیاتی مورد نظر شار آب در غشای مسدود شده ( $J_{wf}$ ) ثبت شد. در این مرحله بر اساس معادله های (۴) تا (۷) مقاومت های گرفتگی برگشت پذیر ( $R_{rf}$ ) و گرفتگی برگشت ناپذیر ( $R_{irf}$ ) محاسبه شد.

درصد وزنی ترکیب های نمونه های شیر پس چرخ، تراوه و ناتراوه (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک بدون چربی) در فاصله های زمانی ۳، ۱۵ و ۳۰ دقیقه ای هر بار عملیات با استفاده از دستگاه لاکتواستار ساخت شرکت فانک ژریر<sup>(۱)</sup> کشور آلمان در ۳ تا ۵ بار تکرار اندازه گیری شد. ناروانی (بر حسب

(۱) Lactostar, Funke Gerber Company

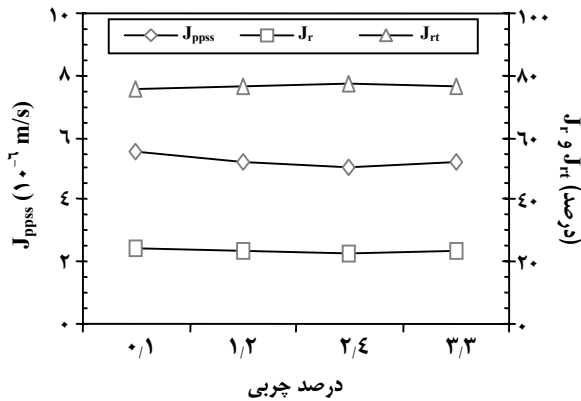
(۲) Ostwald U-tube capillary viscometer

(۳) Picnometer

(۴) Jenway

(۵) Relative steady state flux ( $J_{prss}$ )

(۶) Pseudo-steady state flux ( $J_{ppss}$ )



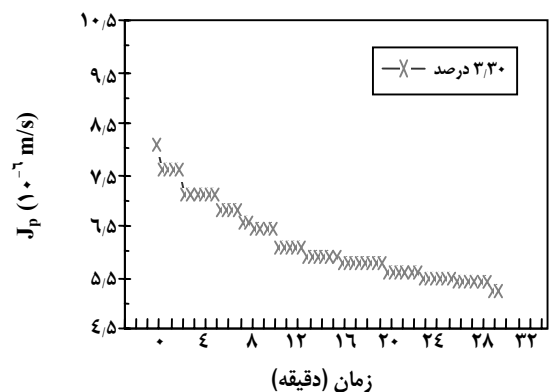
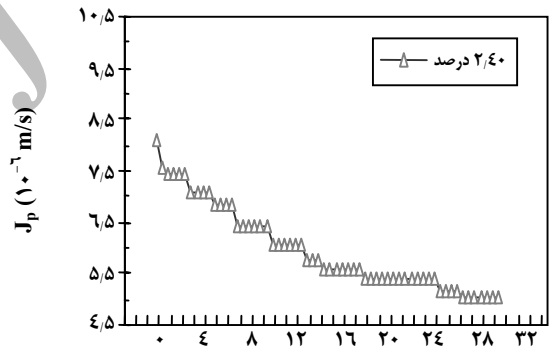
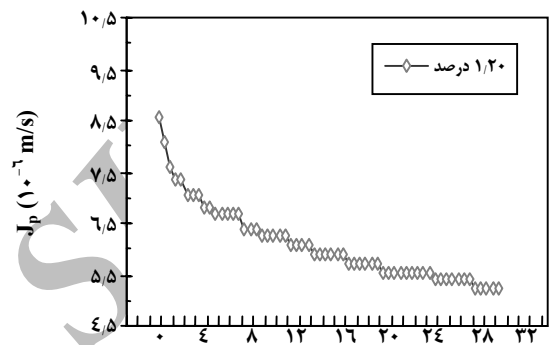
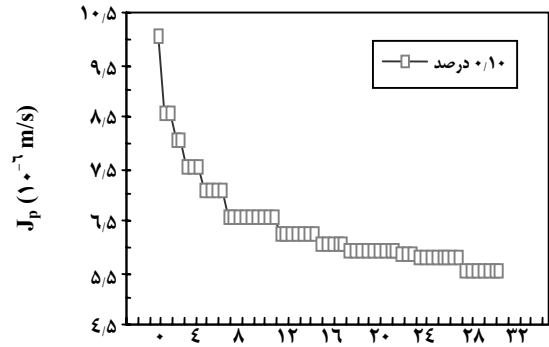
شکل ۳- اثر درصد چربی شیر بر شار کاذب پایدار ( $J_{pss}$ )، شار نسبی ( $J_r$ ) و کاهش شار نسبی کل ( $J_{rt}$ ) فرایند اولترافیلتراسیون شیر.

بسیار ناچیزی بر شار کاذب پایدار دارد (شکل ۳). به طور متوسط شار کاذب پایدار به ازای افزایش هر یک درصد چربی شیر در حدود ۱/۳ درصد کاهش یافته است. شکل ۳ نشان می‌دهد که شار نسبی نیز تحت تأثیر درصد چربی قرار نگرفته است، به طوری که کاهش شار نسبی کل از ۰/۷۵ برای ۰/۱ درصد چربی به ۰/۷۷ برای ۳/۳ درصد چربی افزایش یافته است. یافته‌های این تحقیق با نتیجه‌های انتشار یافته مطابقت دارد.

*Thompson* در سال ۱۹۷۵ میلادی دریافت که افزایش درصد چربی شیر باعث کاهش شار تراوه می‌شود [۹]. *Patel* در سال ۱۹۸۵ میلادی مشاهده کرد که شیر کامل (۳/۵ درصد چربی) نسبت به شیر پس چرخ در تمام طول فرایند شار پایین‌تری دارد، اگر چه تفاوت بین آنها بسیار ناچیز است. در ضمن نرخ کاهش شار در شیر کامل نیز نسبت به شیر پس چرخ کمی بزرگ‌تر به دست آمد [۱۱].

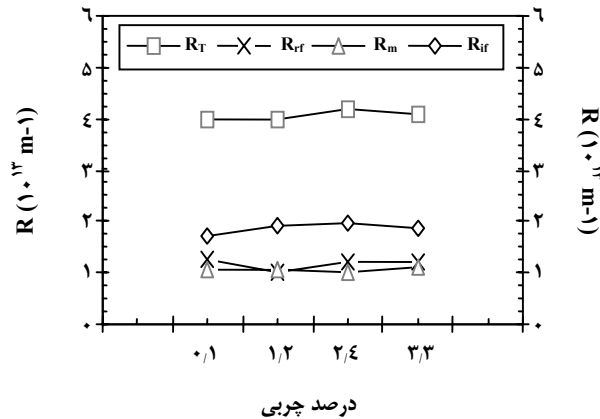
*Kautake* در سال ۱۹۸۶ میلادی نشان داد که شار متوسط شیر پس چرخ (۸۶/۵) بالاتر از شیر کامل (۸۱/۶) است [۱۰]. *Kautake* و همکارانش در سال ۱۹۹۲ میلادی نتیجه گرفتند نوع شیر (شیر پس چرخ بازسازی شده، شیر پس چرخ تازه و شیر کامل) تأثیر معنی داری بر شار اولیه و شار متوسط نمی‌گذارد [۷].

*Ramachandra* در سال ۲۰۰۲ میلادی دریافت که شار اولیه شیر پس چرخ (۰/۰۷ درصد چربی) کمی بالاتر از شیر کامل (۳/۷ درصد چربی) است، اما نرخ کاهش شار برای سیستم‌های شیری (در مقایسه با سیستم های آب پنیری) علیرغم افزایش گرفتگی، بسیار کم و ثابت است (حدود ۵ درصد)، به طوری که شار کاذب پایدار برای سیستم های شیری نسبت به سیستم های آب پنیری سریع‌تر تثبیت شد [۱۲].



TMP=۱۵۲ Kpa, T=۴۰ °C, pH=۶,۵۸, MWCO=۲۰KD

شکل ۲- پروفیل شار نسبت به زمان ( $J_p-t$ ) فرایند اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی از سطح‌های متفاوت درصد چربی شیر.



شکل ۵ - اثر درصد چربی شیر بر مقاومت‌های هیدرولیکی فرایند اولترافیلتراسیون جریان عرضی شیر ( $R_T$ )، مقاومت هیدرولیکی کل؛  $R_{Rf}$ ، مقاومت گرفتگی برگشت پذیر؛  $R_m$ ، مقاومت ذاتی غشاء و  $R_{if}$ ، مقاومت گرفتگی برگشت ناپذیر).

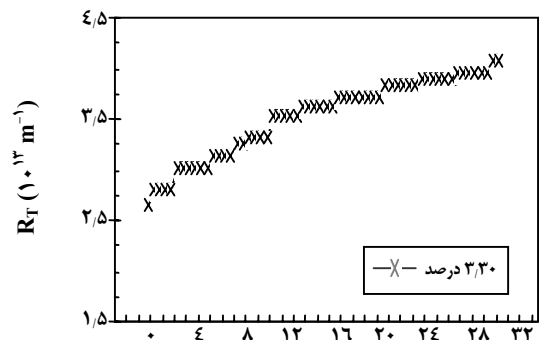
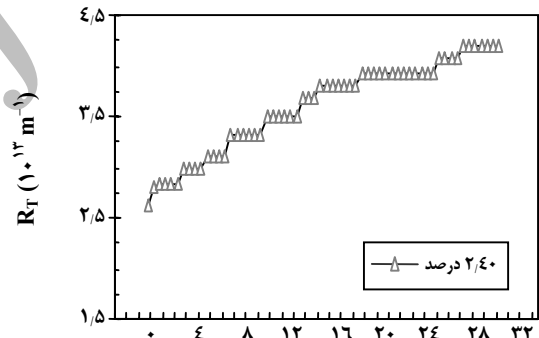
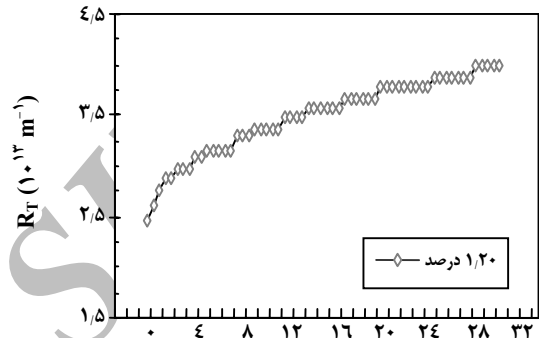
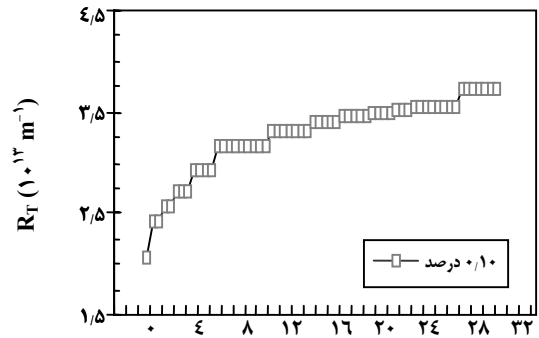
### مقاومت‌های هیدرولیکی

در شکل ۴ پروفیل مقاومت هیدرولیکی کل نسبت به زمان فرایند اولترافیلتراسیون شیر نشان می‌دهد که  $R_T$  در همه سطوح درصد چربی با گذشت زمان فرایند افزایش یافته است، اما افزایش درصد چربی تأثیر بسیار اندکی بر گرفتگی گذاشته است. به طوری که تنها تفاوت ناچیزی بین منحنی ۰/۱ درصد چربی با سایر منحنی‌ها وجود دارد.

*Patel* در سال ۱۹۸۵ میلادی دریافت که وجود چربی تنها سرعت وقوع گرفتگی را بیشتر می‌کند، اما میزان گرفتگی چندان تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. میکروگراف‌های الکترونی نشان داد که رسوب حاصل از شیر پس چرخ و شیر کامل از نظر ظاهری شبیه یکدیگر هستند، بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به احتمال زیاد گلبول‌های چربی نقش کمی در محدودیت شار تراوه دارند [۱۱].

داده‌های مقاومت‌های هیدرولیکی فرایند اولترافیلتراسیون شیر نیز تأیید می‌کند که افزایش درصد چربی شیر تأثیر معنی‌داری بر هر یک از مقاومت‌ها ندارد، اگر چه می‌توان دریافت که در تمامی سطوح چربی، مقاومت برگشت‌ناپذیر سهم عمده گرفتگی کل را تشکیل می‌دهد (شکل ۵) بنابراین، گرفتگی اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی از درصد چربی به‌طور عمده به‌وسیله‌ی  $R_{if}$  کنترل می‌شود و  $R_{Rf}$  اهمیت کمتری بر این موضوع دارد.

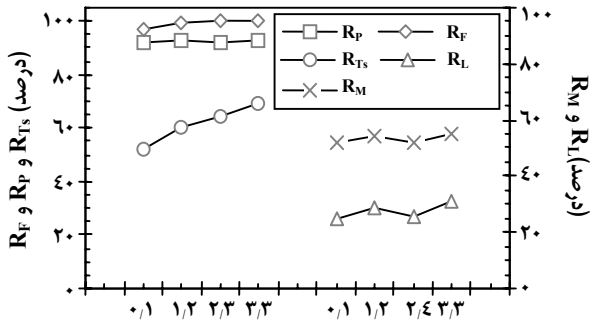
*Ramachandra* در سال ۲۰۰۲ میلادی نشان داد که کاهش شار ناشی از گرفتگی برگشت ناپذیر فرآورده‌های شیری (شیر پس چرخ، شیر کامل و پساب کره) پایین‌تر از سیستم‌های آب پنیری (آب پنیر شیرین و اسیدی) است، اما بین داده‌های شیر پس چرخ



زمان (دقیقه)

TMP=۱۵۲ Kpa , T=۴۰ °C , pH=۶.۵۸, MWCO=۲۰KD

شکل ۴- پروفیل مقاومت کل نسبت به زمان ( $R_T - t$ ) فرایند اولترافیلتراسیون به عنوان تابعی از درصد چربی شیر.



درصد چربی

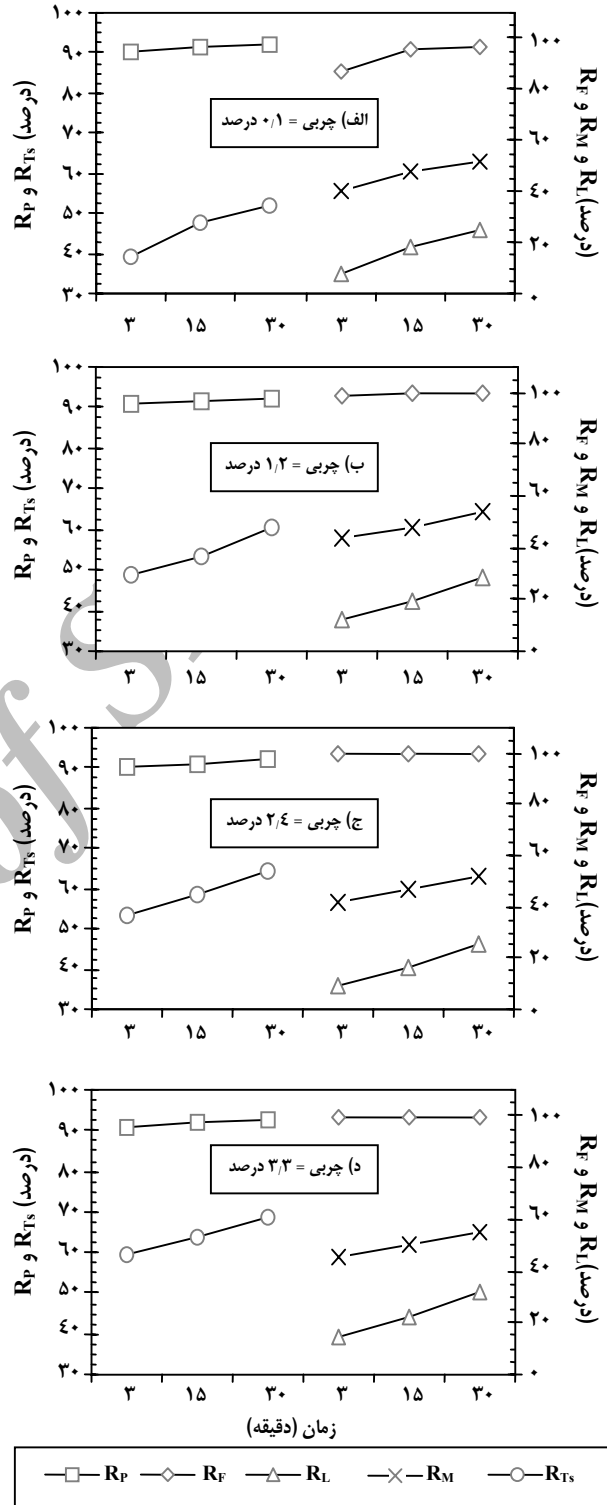
شکل ۷ - تأثیر سطوح متفاوت چربی شیر بر درصد دفع هر یک از اجزاء محلول شیر (R<sub>P</sub>)، درصد دفع پروتئین؛ R<sub>F</sub>، درصد دفع چربی؛ R<sub>TS</sub>، درصد دفع مواد جامد کل؛ R<sub>L</sub>، درصد دفع لاکتوز و R<sub>M</sub>، درصد دفع املاح شیر).

و شیر کامل تفاوت چندانی وجود نداشت. او ضریب گرفتگی (FC)<sup>(۱)</sup> شیر پس چرخ و شیر کامل (۳/۷ درصد چربی) را به ترتیب برابر ۰/۷۰ تا ۰/۷۵ و ۰/۷۰ تا ۰/۷۱ به دست آورد. وی چنین نتیجه گیری کرد که در سیستم‌های شیری، به احتمال قوی پلاریزه شدن غلظت به جای گرفتگی، کنترل کننده نرخ شار است [۱۲].

### درصد دفع ترکیبات شیر

بر اساس نتیجه‌های به دست آمده در دو قسمت قبل، امکان توصیف الگوی شار و رفتار گرفتگی فرایند اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی از درصد چربی شیر فراهم شد، اما توضیح دلایل رفتار پیچیده کارایی فرایند اولترافیلتراسیون شیر امکان پذیر نبود. هدف از این قسمت، تفسیر این نتیجه‌ها با تاکید بر درصد دفع اجزای محلول شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) است.

منحنی‌های درصد دفع نسبت به زمان ترکیب‌های متفاوت شیر نشان می‌دهند که R<sub>P</sub> و R<sub>F</sub> در همه سطوح چربی در طی فرایند اولترافیلتراسیون به تقریب ثابت است، اما درصد دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است (شکل ۶). به نظر می‌رسد که افزایش درصد چربی تأثیری بر نرخ افزایش درصد دفع هر یک از اجزای محلول با زمان نداشته است. شکل‌های ۲ و ۴ نیز به خوبی تأیید می‌کنند که اولاً کاهش ناگهانی شار در ابتدای فرایند، ناشی از دفع ماکرومولکول‌ها (پروتئین‌ها و چربی‌ها) و تشکیل لایه پلاریزه شدن غلظت است، در ثانی کاهش شار یا افزایش گرفتگی با زمان متأثر از کاهش



شکل ۶ - رفتار دینامیکی دفع ترکیب‌های شیر به عنوان تابعی از درصد چربی شیر (R<sub>P</sub>)، درصد دفع پروتئین؛ R<sub>F</sub>، درصد دفع چربی؛ R<sub>TS</sub>، درصد دفع مواد جامد کل؛ R<sub>L</sub>، درصد دفع لاکتوز و R<sub>M</sub>، درصد دفع املاح شیر).

(1) Fouling Coefficient

### نتیجه گیری نهایی

در این مقاله اثر تغییرهای درصد چربی شیر بر رفتار وابسته به زمان شار تراوه، مقاومت های هیدرولیکی و درصد دفع اجزای محلول شیر مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه های تجربی نشان داد که در هر سطح درصد چربی، با گذشت زمان عملیات، شار تراوه کاهش و مقاومت هیدرولیکی کل افزایش می یابد، اما افزایش درصد چربی شیر تاثیر چندانی بر شار کاذب پایدار و انواع مقاومت های هیدرولیکی (پلاریزه شدن غلظت، جذب سطحی و مقاومت هیدرولیکی غشاء) ندارد.

همچنین نتیجه های این تحقیق نشان داد در فرایند اولترافیلتراسیون شیر کامل، مقاومت گرفتگی برگشت ناپذیر، سهم عمده گرفتگی کل را به خود اختصاص می دهد و در نتیجه گرفتگی بیشتر به وسیله ی جذب سطحی کنترل می شود. به تقریب تمام چربی و پروتئین شیر به وسیله ی غشای اولترافیلتراسیون در لحظات اولیه فرایند دفع شده و درصد دفع پروتئین و چربی شیر نیز با تغییر درصد چربی شیر و زمان عملیات به تقریب ثابت است، در حالی که افزایش درصد چربی شیر و زمان فرایند، باعث افزایش درصدهای دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل شیر می شود.

عبور ترکیب های محلول به ویژه املاح و لاکتوز از درون غشاء و جذب آنها به حفره های غشاء است، ثالثاً نرخ کاهش شار یا افزایش گرفتگی با زمان چندان متأثر از افزایش درصد چربی شیر نیست. به طور کلی افزایش درصد چربی باعث افزایش درصد دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل شده است، ولی تأثیر چندانی بر  $R_p$  و  $R_f$  نداشته است (شکل ۷).

Thompson در سال ۱۹۷۵ میلادی نشان داد که افزایش درصد چربی شیر موجب افزایش میزان بازداری لاکتوز می شود [۹]. Kautake در سال ۱۹۸۶ میلادی نتیجه گرفت که نوع شیر (پس چرخ تازه، پس چرخ بازسازی شده و شیر کامل) تأثیر معنی داری بر درصد دفع، چربی، پروتئین و املاح ندارد [۱۰].

نتیجه های این تحقیق نه تنها مطالعات قبلی را تأیید می کند، بلکه بینش گسترده ای را نسبت به ارتباط بین درصد دفع، شار و انواع گرفتگی ها به عنوان تابعی از درصد چربی شیر نشان می دهد. به طوری که با ملاحظه مجدد شکل های ۳ و ۵ می توان دریافت که شار و مقاومت هیدرولیکی کل همانند درصد دفع، تابعی از درصد چربی شیر نبوده و مقاومت هیدرولیکی کل به طور عمده ناشی از گرفتگی برگشت ناپذیر به وجود آمده از جذب اجزای محلول شیر (لاکتوز، املاح و تا حدی چربی) است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۷

### مراجع

- [1] Rosenberg, M., Current and future applications for membrane processes in the dairy industry, *Trends in Food Science & Technology*, **6**, 12 (1995).
- [2] Cheryan, M., "Ultrafiltration and Microfiltration Handbook", 2<sup>nd</sup> edition, Technomic Publishing Company, Lancaster, USA, (1998).
- [3] Grandison, A.S., Youravong, W. and Lewis, M.J., Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk, *Lait*, **80**, 165 (2000).
- [4] Razavi, S.M.A., Mousavi, S.M. and Mortazavi, S.A., Dynamic prediction of milk ultrafiltration performance: A neural network approach, *Chemical Engineering Science*, **58**, 4185 (2003).
- [5] Cheryan, M. and Chiang, B.H., Performance and fouling behavior of hollow fiber and spiral wound ultrafiltration module processing milk, *Engineering and Food*, **1**, 191 (1986).
- [6] Mohammadi, T., Madaeni, S.S. and Moghadam, M.K., Investigation of membrane fouling, *Desalination*, **153**, 155 (2002).
- [7] Kautake, M., Matsuno, I., Nabetani, H. and Nakajima, M., Classification of resistance to permeation caused by fouling during ultrafiltration of whey and skim milk, *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, **56**(5), 697 (1992).



- [8] Setti, D. and Peri, C., Whey and skim milk ultrafiltration, 2. Parameters affecting permeation rate in skimmilk ultrafiltration, *Milchwissenschaft*, **31**(8), 466 (1976).
- [9] Thompson, S.J. and deMan, J.M., Concentration and fractionation of milk by ultrafiltration, *Canadian Journal of Food Science and Technology*, **82**(2), 113 (1975).
- [10] Kautake, M., Nabetani, H. and Matsuno, I., Influence of operation parameters on permeate flux in ultrafiltration of milks, Technical Research Institute, Snow Brand Milk Products Co. Ltd., Report No. 83, 67-81 (1986).
- [11] Patel, R.S. and Reuter, H., Fouling of hollow fiber membrane during ultrafiltration of skim milk, *Milchwissenschaft*, **40**(12), 731 (1985).
- [12] Ramachandar, R.H.G., Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk, *Desalination*, **144**, 319 (2002).
- [13] Razavi, S.M.A., Mortazavi S.A. and Mousavi, S.M., Application of neural networks for crossflow milk ultrafiltration simulation, *International Dairy Journal*, **14**, 69 (2004).
- [14] Roy, N.K. and Sen, D.C., "Textbook of practical dairy chemistry", Kalyani publishers Co., Ludhiana, India (1994).
- [15] Eckner, K.F. and Zottola, E.A., Effects of temperature and pH during membrane concentration of skim milk on fouling and cleaning efficiency, *Milchwissenschaft*, **48**(4), 187 (1993).
- [16] Fenton, M. R. I., Concentration and fractionation of skim milk by reverse osmosis and ultrafiltration, *Journal of Dairy Science*, **55**(11), 1561 (1972).
- [17] Pompei, C., Skim milk protein recovery and purification by ultrafiltration, Influence of temperature on permeation rate and retention, *Journal of Food Science*, **38**(5), 867 (1973).
- [18] Myong, K., Ko. and Pellegrino, J., Determination of osmotic pressure and fouling resistances and their effects on performance of ultrafiltration membrane, *Journal of Membrane Science*, **74**, 141 (1992).