تاثیر درصد چربی بر کارایی دینامیکی فرایند اولترافیلتراسیون شیر

سید محمدعلی رضوی *+

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

سید محمود موسوی

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

چکیده: *در این تحقیق اثر تغییرهای درصد چربی شیر در چهار سطح ۰/۱، ۱/۱۹، ۲/۴۰ و۳/۲۶ 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 پایلوتی اولترافیلتراسیون مجهز به مدول مارپیچ حلزونی با غشای پلی‌سولفن 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 ملاحظه ای کاهش می یابد، اما افزایش درصد چربی تنها باعث کاهش شار اولیه می‌شود و شار کاذب پایدار تحت تاثیر درصد چربی قرار نمی گیرد. 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 به‌تقریب 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 به‌تقریب ثابت است، اما درصد دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل شیر به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.*

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

فرایند اولترافیلتراسیون (UF)[1] 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 فراورده‌های لبنی از جمله تولید انواع پنیر، ماست، اجزای پروتئینی شیر، ترکیب‌های فعال

بیولوژیکی و غیره گسترش یافته است [۱]. کارایی و هزینه یک فرایند غشایی بستگی به شار تراوه[۲] (فاز عبوری از درون غشاء)، گرفتگی[۳] و درصد دفع اجزای محلول شیر دارد [۲]. نتیجه‌ها نشان داده است محدودیت کاربرد عملی فرایند اولترافیلتراسیون

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

(۱) Ultrafiltration
(۲) Permeate
(۳) Fouling

به‌دلیل کاهش کارایی غشاء به دلیل پدیده گرفتگی (گرفتگی برگشت‌پذیر یا پلاریزه شدن غلظت[۱] 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 [۴-۲]. 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 فیزیکو ـ شیمیایی سیال از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده الگوی شار جریان تراوه، میزان و نوع گرفتگی و غلظت اجزاء در فازهای ناتراوه[۲] (فـاز تغلیظ شونـده توسط غشاء) و تـراوه هستند [۵-۱ و ۹-۷].

در سیستم های کلوئیدی مانند شیر، سرعت اولترافیتراسیون به شدت وابسته به ویژگی‌های فیزیکو ـ 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 [۱۴-۱۰]. 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 فیزیکو ـ 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 ویژیگی های فیزیکو ـ شیمیایی سیال بر کارایی اولترافیلتراسیون شیر (اغلب شار تراوه به عنوان شاخص سرعت فیلتراسیون) تحت شرایط پایدار[۳] متمرکز شده است [۱، ۳، ۵، ۹-۷، ۱۲-۱۰ و ۱۷-۱۵] ، 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[۴] (به عنوان شاخص گرفتگی) و درصـد دفع اجزای محلول (بـه عنـوان 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 مکانیسم های کاهش شار و توسعه گرفتگی است، در واقع موضوعی که در تحقیقات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مدل مقاومت های 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[۵] یا جذب لایه مرزی[۶] 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[۷]، 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 تاثیر می گذارد، به طوری که اثرهای هر یک از این مقاومت ها بر شار تراوه را می توان به طور جداگانه به‌وسیله‌ی این مدل به‌دست آورد. انتقال آب تمیز از درون غشاء در اثر جریان ناروان صورت می گیرد. مقاومت هیدرولیکی غشاء را می‌توان به کمک قانون *دارسی*[۸] چنین توصیف کرد [۲]:

$$R_m = \frac{TMP}{\mu_w J_w} \qquad (۱)$$

که در آن TMP تفاوت فشار در عرض غشاء[۹] (kPa)، μ_w ناروانی آب (Pas)، J_w شار آب تمیز (m/s) و R_m مقاومت ذاتی غشاء (m^{-1}) است. TMP در اولترافیلتراسیون جریان عرضی[۱۰] از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$TMP = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \qquad (۲)$$

(۱) Concentration polarization
(۲) Retentate
(۳) Steady state
(٤) Total hydraulic resistance
(٥) Resistance-in-series model
(٦) Adsorption-boundary model
(۷) Intrinsic membrane resistance
(۸) Darcy's law
(۹) Transmembrane pressure
(۱۰) Cross flow

که در آن P_i و P_o به ترتیب فشار های 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 به‌وسیله‌ی مدل مقاومت متوالی (یا مدل لایه مرزی ـ جذب سطحی) این چنین بیان می شود [۳-۱ و ۱۸]:

$$R_T = \frac{TMP}{\mu_P J_P} \qquad (۳)$$

که در آن J_P شار تراوه ($kg/m^2.s$) و μ_P ناروانی تراوه (Pas) است. در حقیقت مقاومت هیدرولیکی کل مجموع مقاومت‌های ذاتی غشاء R_m و مقاومت گرفتگی کل[۱] است، یعنی:

$$R_T = R_m + R_f \qquad (۴)$$

$$R_f = \frac{TMP}{\mu_P J_P} - R_m \qquad (۵)$$

مقاومت گرفتگی کل (R_f) طبق مدل مقاومت متوالی از دو جزء مقاومت ناشی از پلاریزه شدن غلظت یا گرفتگی برگشت‌پذیر[۲] (R_{rf}) و مقاومت ناشی از جذب سطحی یا گرفتگی برگشت ناپذیر[۳] (R_{if}) تشکیل شده است. مقاومت‌های گرفتگی به‌وسیله‌ی رابطه‌های زیر به‌دست می آیند:

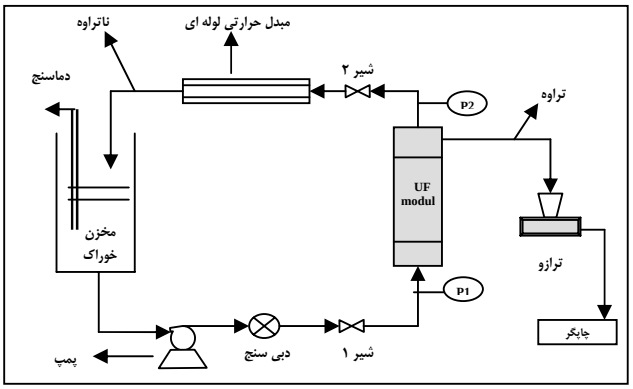
$$R_{if} = \frac{TMP}{\mu_{wf} J_{wf}} - R_m \qquad (۶)$$

$$R_{rf} = R_f - R_{if} \qquad (۷)$$

که در آن μ_{wf} و J_{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[۴] (J_r) و کاهش شار نسبی کل[۵] (J_{rt}) را براساس معادله‌های زیر تعریف کرد:

$$J_r = \frac{J_P}{J_w} = \frac{1}{1+R'} \qquad (۸)$$

$$R' = \frac{R_{if} + R_{rt}}{R_m} \qquad (۹)$$



شکل ۱ـ شماي کلي واحد پایلوتي **UF** مورد استفاده.

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

$$J_{rt} = 1 - J_r = \frac{R'}{1+R'} \qquad (۱۰)$$

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

مواد و روش‌ها

سیستم غشایی مورد استفاده، پایلوت پلنت UF/MF ساخت مشترک شرکت *بیوکن*[۶] روسیه و شرکت مهندسی میلاد خراسان بوده است. غشاء مورد نظر از جنس پلی سولفون آمید[۷] و اندازه‌ی حفره‌های[۸] (MWCO) آن ۲۰ کیلو دالتون انتخاب شد. این سیستم غشایی مجهز به یک تانک به حجم ۱۵ لیتر، پمپ سانتریفوژی، دبی سنج، مدول اولترافیلتراسیون (از نوع مارپیچ حلزونی[۹]) ، مبدل حرارتی لوله‌ای، دو فشارسنج عقربه ای، 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 به‌وسیله‌ی ترازوی متصل به کامپیوتر و یا چاپ‌گر قابل ثبت است، درحالی که جریان ناتراوه پس

(۱) Overall fouling resistance
(۲) Reversible fouling
(۳) Irreversible fouling
(٤) Relative flux
(۵) Total relative flux decline
(٦) Biocon company
(۷) Polysulfone amide
(۸) Molecular Weight Cut Off
(۹) Spiral wound UF module

از عبور از مبدل حرارتی قابل برگشت به تانک سیال فرایند است.

در این تحقیق، نمونه های شیر پس چرخ به‌وسیله‌ی بازسازی شیر خشک بدون چربی با آب مقطر با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شده تا این‌که غلظت ماده خشک بدون چربی نمونه ها در آزمایش‌های 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 نمونه‌های شیر با استفاده از خامه هموژنیزه استریلیزه (۲۸ تا ۳۰ درصد) در سطح مورد نظر تنظیم شد. تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط یکسان عملیاتی از لحاظ تفاوت فشار نسبی (۱۵۲ کیلو پاسکال)، سرعت جریان (۱۵ لیتر بر دقیقه) و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد 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) براساس معادله‌ی (۱) بوده است. براساس داده‌های 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 ژلی 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 معادله‌های (۴) تا (۷) مقاومت‌های گرفتگی برگشت پذیر (R_{rf}) و گرفتگی برگشت ناپذیر (R_{if}) محاسبه شد.

درصد وزنی ترکیب‌های نمونه‌های شیر پس چرخ، تراوه و ناتراوه (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک بدون چربی) در فاصله‌های زمانی ۳، ۱۵ و۳۰ دقیقه‌ای هر بار عملیات با استفاده از دستگاه لاکتواستار ساخت شرکت *فانک ژربر*[۱] کشور آلمان در ۳ تا ۵ بار تکرار اندازه‌گیری شد. ناروانی (بر حسب پاسکال ـ ثانیه) و چگالی (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب) به ترتیب به‌وسیله‌ی ویسکومتر لوله مویینه U شکل *استوالد*[۲] و پیکنومتر[۳] ۲۵ میلی لیتری در سه بار تکرار برای آب مقطر مرحله اول، تراوه شیر و آب مقطر مرحله سوم در دمای عملیات مربوط اندازه‌گیری شد. pH به‌وسیله‌ی pH متر مدل ۳۰۱۰ ساخت شرکت *جن وی*[۴] کشور انگلستان برای نمونه‌های شیر، تراوه، ناتراوه، آب مقطر و محلول‌های شستشو در طی هر بار آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد [۱۴].

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

$$R_{obs} = ۱ - \frac{C_p}{C_b} \qquad (۱۱)$$

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

نتیجه‌ها و بحث

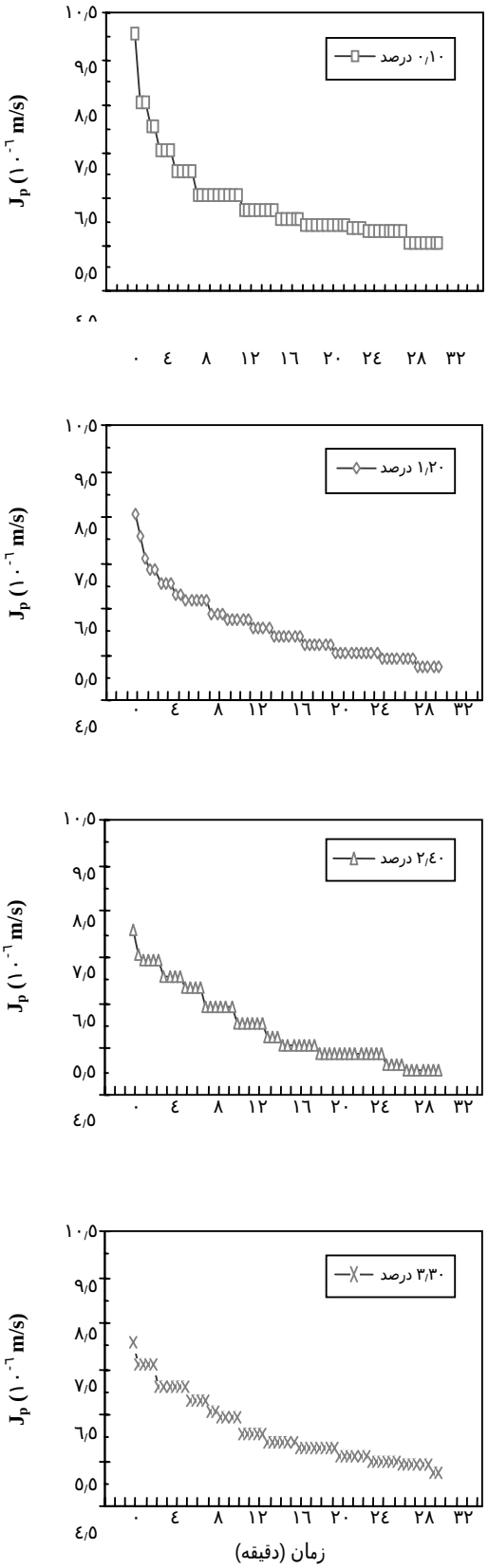
شار تراوه

داده‌های تجربی شار تراوه به عنوان تابعی از درصد چربی شیر نشان می‌دهند که با افزایش مقدار چربی از ۰/۱ درصد به ۱/۲ درصد، شار اولیه در حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد، اما ادامه افزایش درصد چربی شیر تأثیر معنی داری بر مقدار شار اولیه نمی‌گذارد (شکل۲).

براساس نتیجه‌های این تحقیق می‌توان گفت که شار اولیه به‌طور متوسط درحدود 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 می‌توان دریافت که شار در منحنی ۰/۱ درصد چربی پس از ۵ دقیقه و در بقیه منحنی‌ها به تقریب پس از ۱۰ دقیقه از شروع فرایند تثبیت شده و شارهای به‌نسبت پایداری به‌دست می‌آید. این شار را که در واقع معیاری مشابه شار در حالت پایدار است، شار به‌نسبت پایدار[۵] یا شار کاذب پایدار[۶] می‌نامند.

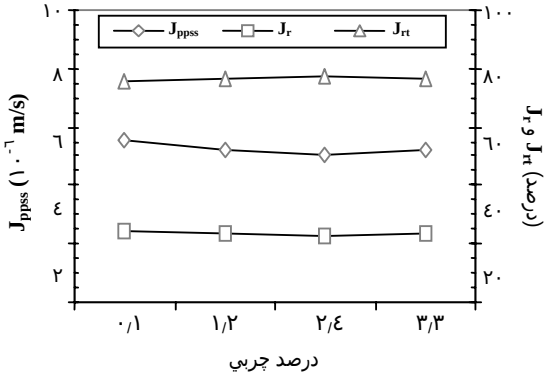
در این تحقیق شار تراوه در انتهای هر بار عملیات به عنوان شار کاذب پایدار در نظر گرفته شده است. افزایش درصد چربی اثر

(۱) Lactostar, Funke Gerber Company
(۲) Ostwald U-tube capillary viscometer
(۳) Picnometer
(٤) Jenway
(۵) Relative steady state flux (Jprss)
(٦) Pseudo-steady state flux (Jppss)



TMP=۱۵۲ Kpa , T=٤۰ °C , pH=٦٫۵۸, MWCO=۲۰KD

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



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

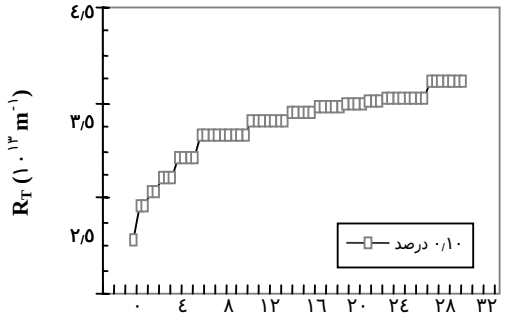
بسیار ناچیزی بر شار کاذب پایدار دارد (شکل ۳). به‌طور متوسط شار کاذب پایدار بـه ازای افزایش هـر یک درصد چربـی شیـر در حدود ۱/۳ درصد کاهش یافته است. شکل ۳ نشان می‌دهد که شار نسبی نیز تحت تأثیر درصد چربی قرار نگرفته است، به طوری که کاهش شار نسبی کل از ۰/۷۵ برای ۰/۱ درصد چربی به ۰/۷۷ برای ۳/۳ درصد چربی افزایش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

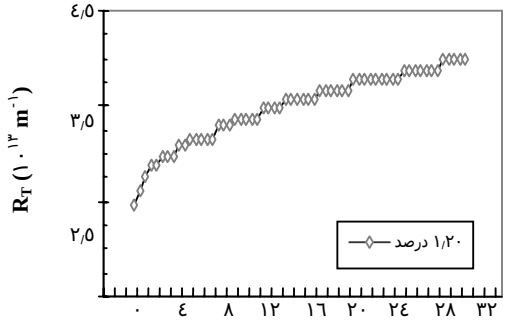
Thompson در سال ۱۹۷۵ میلادی دریافت که افزایش درصد چربی شیر باعث کاهش شار تراوه می‌شود [۹]. *Patel* در سال ۱۹۸۵ میلادی مشاهده کرد که شیر کامل (۳/۵ درصد چربی) نسبت به شیر پس چرخ در تمام طول فرایند شار پایین‌تری دارد، اگر چه تفاوت بین آنها بسیار ناچیز است. در ضمن نرخ کاهش شار در شیر کامل نیز نسبت به شیر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

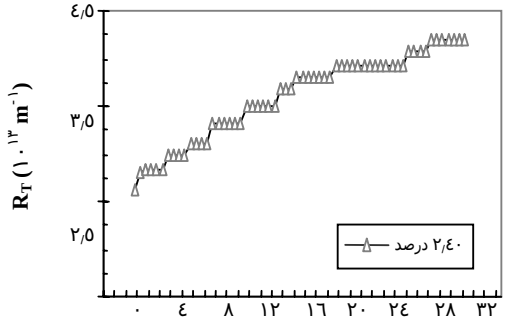
Kautake در سال ۱۹۸۶ میلادی نشان داد که شار متوسط شیر پس چرخ (۸۶/۵) بالاتر از شیر کامل (۸۱/۶) است [۱۰].

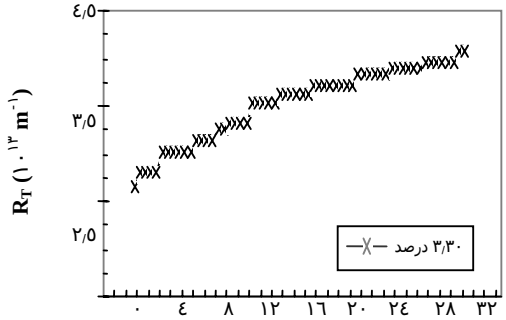
Kautake و همکارانش در سال ۱۹۹۲ میلادی نتیجه گرفتند نوع شیر (شیر پس چرخ بازسازی شده، شیر پس چرخ تازه و شیر کامل) تأثیر معنی داری بر شار اولیه و شار متوسط نمی‌گذارد [۷].

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].





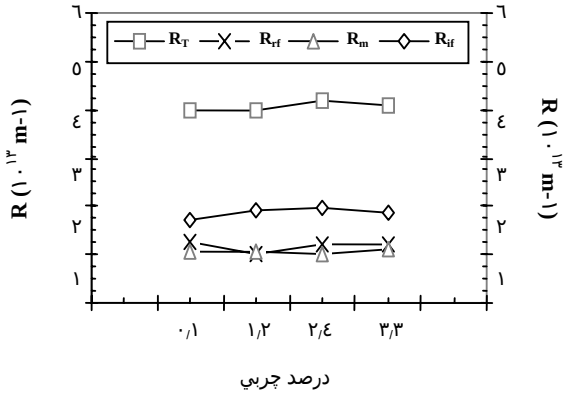




زمان (دقيقه)

TMP=۱۵۲ Kpa , T=۴۰ °C , pH=۶٫۵۸, MWCO=۲۰۰KD

شكل ۴ـ پروفيل مقاومت كل نسبت به زمان **(R_T - t)** فرايند اولترافيلتراسيون به عنوان تابعي از درصد چربي شير.



شكل ۵ ـ اثر درصد چربي شير بر مقاومت‌هاي هيدروليكي فرايند اولترافيلتراسيون جريان عرضي شير (R_T، مقاومت هيدروليكي كل؛ R_{rf}، مقاومت گرفتگي برگشت پذير؛ R_m، مقاومت ذاتي غشاء و R_{if}، مقاومت گرفتگي برگشت ناپذير).

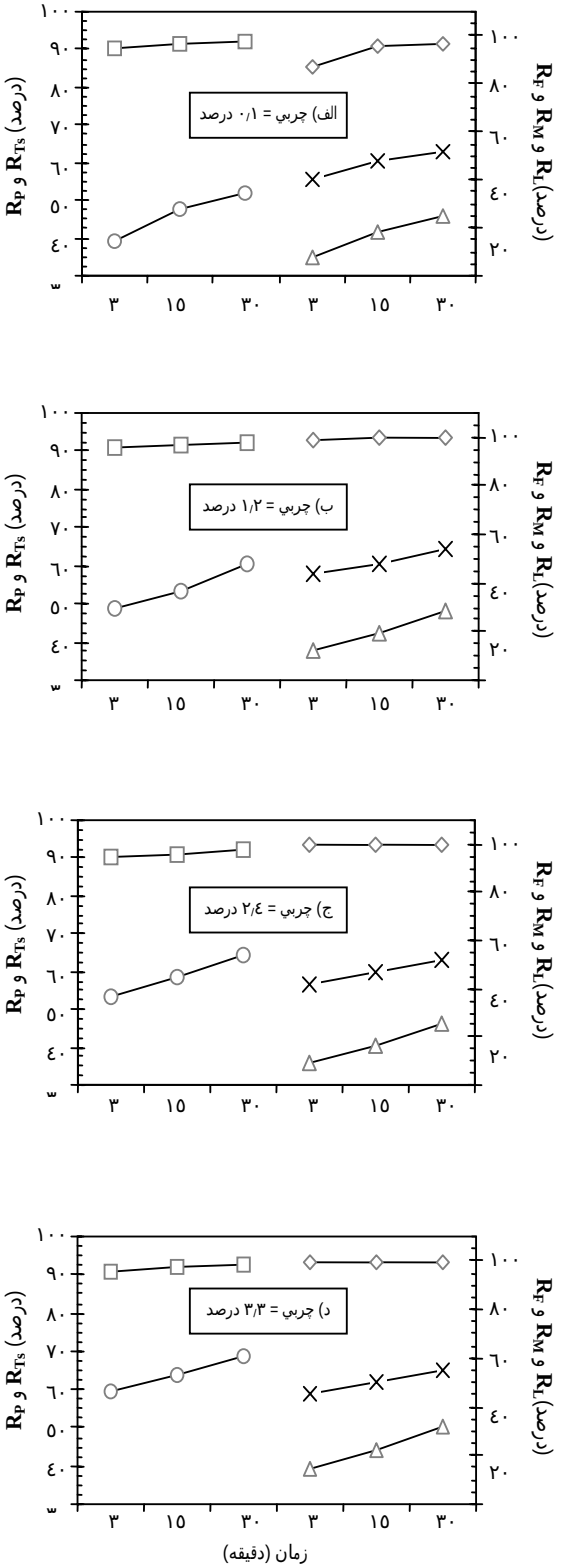
مقاومت‌هاي هيدروليكي

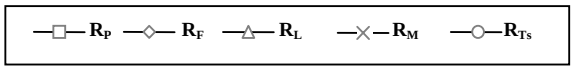
در شكل ۴ پروفيل مقاومت هيدرليكي كل نسبت به زمان (RT-t) فرايند اولترافيلتراسيون شير نشان مي‌دهد كه R_T در همه سطوح درصد چربي با گذشت زمان فرايند افزايش يافته است، اما افزايش درصد چربي تأثير بسيار اندكي بر گرفتگي گذاشته است. به طوري كه تنها تفاوت ناچيزي بين منحني ۰/۱ درصد چربي با ساير منحني‌ها وجود دارد.

Patel در سال ۱۹۸۵ ميلادي دريافت كه وجود چربي تنها سرعت وقوع گرفتگي را بيشتر مي‌كند، اما ميزان گرفتگي چندان تحت تأثير قرار نمي‌گيرد. ميكروگراف‌هاي الكتروني نشان داد كه رسوب حاصل از شير پس چرخ و شير كامل از نظر ظاهري شبيه يكديگر هستند، بنابراين، مي‌توان نتيجه گرفت كه به احتمال زياد گلبول‌هاي چربي نقش كمي در محدوديت شار تراوه دارند [۱۱].

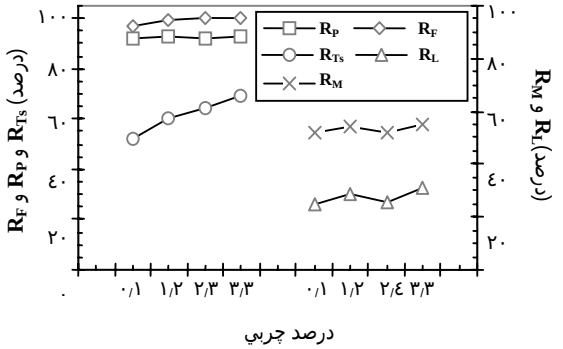
داده‌های مقاومت‌های هیدرولیکی فرایند اولترافیلتراسیون شیر نیز تأیید می‌کند که افزایش درصد چربی شیر تأثیر معنی‌داری بر هر یک از مقاومت‌ها ندارد، اگر چه می‌توان دریافت که در تمامی سطوح چربی، مقاومت برگشت‌ناپذیر سهم عمده گرفتگی کل را تشکیل می‌دهد (شکل۵) بنابراین، گرفتگی اولترافیلتراسیون شیر به عنوان تابعی 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 فراورده‌های شیری (شیر پس چرخ، شیر کامل و پساب کره) پایین‌تر از سیستم‌های آب پنیری (آب پنیر شیرین و اسیدی) است، اما بین داده های شیر پس چرخ





شكل ۶ ـ رفتار ديناميكي دفع تركيب‌هاي شير به عنوان تابعي از درصد چربي شير (R_P، درصد دفع پروتئين؛ R_F، درصد دفع چربي؛ R_{TS}، درصد دفع مواد جامد كل؛ R_L، درصد دفع لاكتوز و R_M، درصد دفع املاح شير).



شكل ۷ ـ تأثير سطوح متفاوت چربي شير بر درصد دفع هر يك از اجزاء محلول شير (R_P، درصد دفع پروتئين؛ R_F، درصد دفع چربي؛ R_{TS}، درصد دفع مواد جامد كل؛ R_L، درصد دفع لاكتوز و R_M، درصد دفع املاح شير).

و شير كامل تفاوت چندانی وجود نداشت. او ضريب گرفتگی[۱] (FC) شير پس چرخ و شير كامل (۳/۷ درصد چربی) را به ترتيب برابر ۰/۷۰ تا ۰/۷۵ و ۰/۷۰ تا ۰/۷۱ به‌دست آورد. وی چنين نتيجه‌گيری كرد كه در سيستم‌های شيری، به احتمال قوی پلاريزه شدن غلظت به جای گرفتگی، كنترل كننده نرخ شار است [۱۲].

درصد دفع تركيبات شير

بر اساس نتيجه‌های به‌دست آمده در دو قسمت قبل، امكان توصيف الگوی شار و رفتار گرفتگی فرايند اولترافيلتراسيون شير به عنوان تابعی از درصد چربی شير فراهم شد، اما توضيح دلايل رفتار پيچيده كارايی فرايند اولترافيلتراسيون شير امكان‌پذير نبود. هدف از اين قسمت، تفسير اين نتيجه‌ها با تاكيد بر درصد دفع اجزای محلول شير(پروتئين، چربی، لاكتوز، املاح و مواد جامد كل) است.

منحنی‌های درصد دفع نسبت به زمان ترکیب‌های متفاوت شیر نشان می‌دهند که R_P و R_F در همه سطوح چربی در طی فرایند اولترافیلتراسیون به‌تقریب 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 یـا افزایش گرفتگی بـا زمان متأثـر از کاهش

(۱) Fouling Coefficient

عبور ترکیب‌های محلول به ویژه املاح و لاکتوز از درون غشاء و جذب آنها به حفره‌های 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 (شکل۷).

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

نتیجه‌های این تحقیق نه تنها مطالعات قبلی را تأیید می‌کند، بلکه بینش گسترده‌ای را نسبت به ارتباط بین درصد دفع، شار و انواع گرفتگی‌ها به عنوان تابعی از درصد چربی شیر نشان می‌دهد. به طوری که با ملاحظه مجدد شکل‌های ۳ و ۵ می‌توان دریافت که شار و مقاومت هیدرولیکی کل همانند درصد دفع، تابعی از درصد چربی شیر نبوده و مقاومت هیدرولیکی کل به‌طور عمده ناشی از گرفتگی برگشت ناپذیر به وجود آمده از جذب اجزای محلول شیر (لاکتوز، املاح و تا حدی چربی) است

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. نتیجه‌های 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 مقاومت‌های هیدرولیکی (پلاریزه شدن غلظت، جذب سطحی و مقاومت هیدرولیکی غشاء) ندارد.

همچنین نتیجه‌های این تحقیق نشان داد در فرایند اولترافیلتراسیون شیر کامل، مقاومت گرفتگی برگشت ناپذیر، سهم عمده گرفتگی کل را به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه گرفتگی بیشتر به‌وسیله‌ی جذب سطحی کنترل می شود. به تقریب تمام چربی و پروتئین شیر به‌وسیله‌ی 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 می‌شود.

تاریخ دریافت: ۸۳/۹/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۴/۵/۱۷

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", 2nd 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).