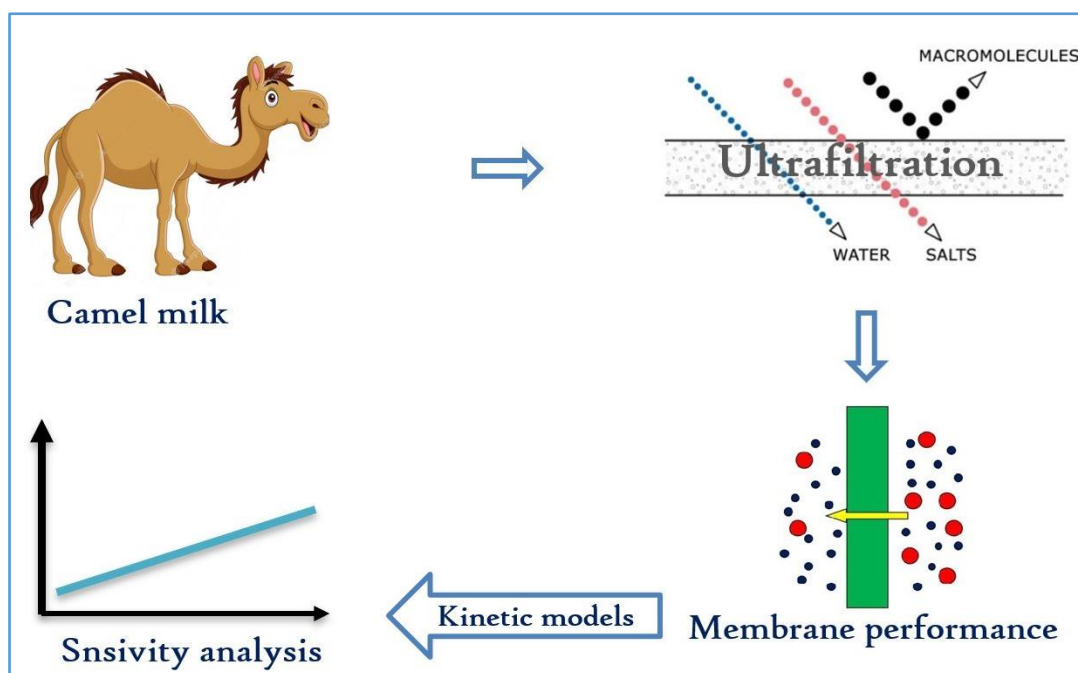


Kinetic Modeling of Permeates Flux and Total Hydraulic Resistance of Camel Milk Ultrafiltration: Effect of Transmembrane Pressure and Temperature

Morteza Kashaninejad¹, Seyed Mohammad Ali Razavi^{1*}

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(Received: Dec. 15, 2020- Revised: Feb. 17, 2021- Accepted: March 14, 2021)



ABSTRACT: In this study, kinetic modeling of permeates flux and total hydraulic resistance of camel milk ultrafiltration in different conditions of transmembrane pressure (TMP, 80-160 kPa) and temperature (T, 20-40 °C) was performed by six kinetic models and finally, the homographic kinetic model for modeling the permeate flux and exponential kinetic model for modeling the total hydraulic resistance considering R^2 and RMSE values have been selected and their parameters were studied. The results of ANOVA of homographic kinetic model illustrated that the linear effect of transmembrane pressure on all model parameters (initial flux (J_0), steady-state flux (J_∞), flux decline time constant (I/b) and flux decline extent (a)) and the interaction effects of transmembrane pressure -temperature at a 95% level on the J_0 and I/b were significant. The results of ANOVA of exponential kinetic model also showed that the linear effect of transmembrane pressure had a significant effect on all exponential kinetic model parameters (initial hydraulic resistance (R_0), steady-state hydraulic resistance (R_∞) and resistance increment rate (k)) at 95% level. Also, the linear effect of temperature and the interaction effects of transmembrane pressure -temperature at a 95% level on the k parameter were significant.

Keywords: Ultrafiltration, Flux, Camel milk, Kinetic modeling, Hydraulic resistance

مدلسازی سینتیکی شار و مقاومت هیدرولیکی کل فرآیند

اولترافیلتراسیون شیرشتر: بررسی اثر دما و اختلاف فشار در عرض غشاء

مرتضی کاشانی نژاد^۱، سید محمد علی رضوی^{۱*}

۱. گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی،

مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴)

چکیده: در این تحقیق، مدلسازی سینتیکی شار و مقاومت هیدرولیکی کل اولترافیلتراسیون شیر شتر در شرایط مختلف اختلاف فشار در عرض غشاء (۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلو پاسکال) و دما (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس) توسط ۶ مدل سینتیکی انجام شد و در نهایت مدل سینتیک هموگرافیک برای مدلسازی سینتیکی شار و مدل سینتیک نمایی برای مقاومت هیدرولیکی کل با توجه به معیارهای R^2 و RMSE انتخاب و پارامترهای آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. نتایج آنالیز واریانس پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک نشان داد که اثر خطی اختلاف فشار بر کلیه پارامترهای مدل (شار اولیه J_0)، شار پایا J_∞)، زمان کاهش شار $(1/b)$ و اندازه کاهش شار (a) و اثر متقابل اختلاف فشار - دما در سطح ۹۵ درصد بر J_0 و $1/b$ نمونه‌ها معنی‌دار بودند. نتایج آنالیز واریانس پارامترهای مدل سینتیک نمایی نیز نشان داد که اثر خطی اختلاف فشار بر کلیه پارامترهای مدل سینتیک نمایی (مقاومت اولیه R_0)، مقاومت پایا (R_∞) و سرعت افزایش مقاومت (k) در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین، اثر خطی دما و اثر متقابل اختلاف فشار - دما در سطح ۹۵ درصد بر k نمونه‌ها معنی‌دار بودند.

واژه‌های کلیدی: اولترافیلتراسیون، شار، شیر شتر، مدلسازی سینتیکی، مقاومت هیدرولیکی

مقدمه

افزایش جمعیت و کاهش تولید سرانه مواد غذایی در کشورهای در حال توسعه، توجه به توسعه منابع حاشیه-ای مانند مراتع خشک و نیمه خشک و بهینه‌سازی موقعیت آن‌ها از طریق گسترش سیستم‌های مناسب تولید دام، به ویژه شتر، را ضروری ساخته است. شتر از جمله دام‌هایی است که می‌تواند به عنوان یک منبع مهم تولید شیر محسوب گردد. روند رو به رشد پژوهش‌های انجام یافته و توجه به شیر شتر و فرآورده‌های آن در سال‌های اخیر بیانگر موقعیت خاص اجتماعی و اقتصادی آن می‌باشد (Benmechene *et al.*, 2014). اولترافیلتراسیون نیز متداولترین فرآیند غشایی در صنایع لبنی به ویژه برای تغلیظ و جداسازی اجزای شیر است. با استفاده از این فرآیند می‌توان محصولات متعددی از جمله شیر مورد استفاده برای پنیر، فرآورده‌های لبنی با لاکتوز پایین، کنسانتره پروتئینی شیر و پروتئین‌های سرمی برای مکمل‌های غذایی تولید نمود (Ng *et al.*, 2017). راندمان و هزینه یک فرآیند غشایی بستگی به شار تراویده^۱ (فاز عبوری از درون غشاء)، میزان گرفتگی^۲ و درصد دفع اجزاء محلول^۳ دارد (Suki *et al.*, 1984). بنابراین استفاده از شیر غلیظ شده توسط اولترافیلتراسیون در تولید فرآورده‌های لبنی متنوع منوط به در نظر گرفتن کارایی غشاء و تغییرات ایجاد شده در ترکیب شیمیایی آن در طول این فرآیند است (Grandison *et al.*, 2000). مهمترین محدودیت کاربرد عملی فرآیندهای اولترافیلتراسیون کاهش کارایی غشاء به دلیل مقاومت‌های هیدرولیکی است، زیرا در چند دقیقه اول فرآیند، موجب کاهش شدید شار جریان تراویده، توسعه گرفتگی و تغییر میزان دفع اجزاء محلول خوراکی می‌شوند. به علاوه گرفتگی عمر کاری غشاء را کاهش داده و هزینه‌های تمیز کردن و شستشو را افزایش می‌دهد (Wang & Chung, 2005). در اکثر منابع معیار

شار شبه پایا^۴ و یا شار تراوه میانگین برای مقایسه شارها در فرآیندهای مختلف استفاده شده است، اگر چه معیار شار شبه پایا نسبت به شار میانگین صحیح‌تر به نظر می‌رسد، زیرا در عمل هر شار تراوه‌ای به شار کاذب پایا خود نزدیک می‌شود و مقدار آن تحت شرایط یکسان فرآیندهای مختلف تقریباً ثابت است، ولی شار میانگین از فرآیندی به فرآیند دیگر تغییر می‌نماید (Razavi *et al.*, 2017). با این وجود برای طراحی فرآیندهای غشایی همواره رفتار دینامیکی شار (شار اولیه، نرخ کاهش شار و شار نهایی) مورد نیاز است و اطلاعاتی نظیر شار متوسط و شار پایا که توسط بعضی مدل‌های فیزیکی قابل استخراج است، کافی برای این موضوع نیست. از طرفی در روش مدل‌سازی تجربی هیچ گونه اطلاعاتی درباره اتفاقات داخل سیستم در اختیار کاربر قرار داده نمی‌شود و مکانیسم‌ها و ارتباطات داخلی بین متغیرهای ورودی و خروجی مورد نظر مشخص نیست. همچنین در محاسبات حجیم و وقت گیر، عدم هم‌گرایی مدل و پیچیدگی آن درحالی که ابعاد داده‌ها بزرگ باشد، سبب انحراف از رفتار طبیعی سیستم و تولید خطای بالا می‌شود (Banks & Tran, 2009). برخی مدل‌های تجربی به دست آمده در تحقیقات مختلف نیز اگر چه بسیار دقیق هستند اما در اکثر موارد قادر به ارائه توضیح قانع کننده درباره مکانیسم‌های کاهش شار و یا مکانیسم‌های مقاومت‌های هیدرولیکی دخیل در فرآیندهای غشایی نیستند، لذا به دلیل پیش بینی نامناسب مدل‌های رایج، همیشه نیاز به روش‌هایی جایگزین و مدل‌هایی که بتواند رفتار دقیق شار و مقاومت هیدرولیکی فرآیند اولترافیلتراسیون را توصیف کند، احساس می‌شود (Vela *et al.*, 2008). در این زمینه در برخی مقالات مدل‌های تجربی سینتیکی مختلفی از جمله مدل‌های سینتیک تجربی، سینتیک مرتبه N و سینتیک هموگرافیک برای بررسی الگوی رفتار شار با زمان و

بحث و بررسی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

انتخاب مواد اولیه

شیر شتر از بازار محلی مشهد خریداری شد و چربی آن در مجتمع آموزشی تحقیقاتی صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد پس از پیش گرم شدن (۳۷ درجه سلسیوس) توسط سپراتور جدا شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها دارای ۰/۶ درصد چربی، ۳/۲۲ درصد پروتئین، ۳/۵۶ درصد لاکتوز، ۰/۹۰ درصد خاکستر و ۸/۲۵ درصد مواد جامد کل و pH برابر ۶/۲ بودند.

مدلسازی سینتیکی

در این پژوهش به منظور درک رفتار دینامیک شار و مقاومت هیدرولیکی اولترافیلتراسیون شیر شتر، از سه مدل سینتیک تجربی، سینتیک مرتبه N و سینتیک هموگرافیک برای بررسی رفتار شار با زمان و از سه مدل سینتیک هموگرافیک، سینتیک نمایی-خطی و سینتیک نمایی برای بررسی الگوی رفتار مقاومت هیدرولیکی کل با زمان استفاده شد. در نهایت مدل‌های مختلف توسط معیارهای ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) با یکدیگر مقایسه و مدل‌هایی انتخاب و تفسیر شدند که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE بودند.

الف: مدل‌های سینتیکی شار با زمان

۱- مدل سینتیک تجربی

مدل سینتیک تجربی (EKM)^۱ که در آن کاهش شار تراوه با زمان فرآیند به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d(J_t - J_\infty)}{dt} + \frac{(J_t - J_\infty)}{t_0} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن J_t شار تراوه بعد از زمان t ، J_∞ شار پایا و t_0 ثابت زمان است. معادله ۱ می‌تواند با استفاده از شرایط مرزی در t برابر صفر، J برابر با J_0 و در t به بینهایت، J_t برابر با J_∞ به صورت زیر حل شود:

مدل‌های سینتیک هموگرافیک، سینتیک نمایی-خطی و سینتیک نمایی برای بررسی رفتار مقاومت هیدرولیکی کل با زمان ارائه شده است (Rajca *et al.*, 2009; Razavi *et al.*, 2017, 2018) که در صورت انطباق داده‌های تجربی با مدل‌های مطرح شده می‌توان به درک بهتری از الگوی رفتار شار و مقاومت هیدرولیکی کل با زمان در شرایط مختلف فرآیند دست یافت که متاسفانه در بیشتر موارد کارایی این مدل‌ها هنوز در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر مورد بررسی قرار نگرفته است.

از طرفی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی شیر شتر با شیر گاو به ویژه از نظر نوع و میزان پروتئین با یکدیگر متفاوت هستند. به عنوان مثال نسبت پروتئین‌های آب پنیر به کازئین در شیر شتر بیشتر از شیر گاو بوده و توزیع میسل‌های کازئین در آن گسترده‌تر و تعداد میسل‌های بزرگ آن نیز بیشتر از شیر گاو است (Farah & Ruegg, 1989). بنابراین از آن جایی که بین ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی شیر شتر و گاو تفاوت‌های قابل توجهی وجود دارد، احتمالاً فرآیند فرآوری و تولید محصولات آن‌ها نیز تفاوت‌هایی با هم خواهد داشت. لذا اگرچه در مورد کارایی غشاء اولترافیلتراسیون شیر گاو تحقیقات مختلف فراوانی شده است، اما در مورد کارایی غشاء اولترافیلتراسیون شیر شتر اطلاعاتی وجود ندارد. لذا از آنجایی که کارایی غشاء اولترافیلتراسیون تحت تاثیر اختلاف فشار و دما قرار می‌گیرد و شار و مقاومت هیدرولیکی کل به کمک این عوامل هیدرودینامیکی قابل کنترل هستند، لذا در این تحقیق مدلسازی سینتیکی شار و مقاومت هیدرولیکی کل اولترافیلتراسیون شیر شتر در شرایط مختلف اختلاف فشار در عرض غشاء و دما توسط ۶ مدل سینتیکی انجام شد و در نهایت مدل‌های دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE انتخاب و پارامترهای آن‌ها مورد

$a=1$ باشد، در نهایت شار تراوه به صفر می‌رسد. برای a بین صفر و ۱، a نشان دهنده مقدار مجانبی شار پایا است، لذا شار پایا می‌تواند توسط معادله زیر محاسبه شود:

$$J_{\infty} = J_0(1 - a) \quad (\text{رابطه ۸})$$

مانند a ثابت، اگر $b = 0$ شود، شار اصلا کاهش پیدا نمی‌کند ($J_t=J_0$). مقادیر پایین b نیز نشان دهنده کاهش آهسته شار است اما مقادیر بالای b نشان دهنده شیب تند در شار تراوه (کاهش سریع شار) در طول اولترافیلتراسیون است. ضمناً معکوس ثابت b ، $(1/b)$ موجب می‌شود که پارامتر جدیدی با مفهوم فیزیکی مهم و با نام ثابت زمان کاهش شار به دست آید. ثابت زمان کاهش شار $(1/b)$ معرف زمان موردنیاز برای رسیدن به ۵۰ درصد از کاهش کل شار است.

ب: مدل‌های سینتیکی مقاومت هیدرولیکی کل با زمان

۱. مدل سینتیک هموگرافیک

در این مدل به منظور بررسی سینتیک مقاومت هیدرولیک کل-زمان، ابتدا داده‌های تجربی مقاومت هیدرولیکی-زمان با استفاده از رابطه زیر استاندارد شد:

$$Y(t) = \frac{(R(t)-R_0)}{R_m} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که $R(t)$ مقاومت هیدرولیکی کل در زمان t ، R_0 مقاومت هیدرولیکی اولیه و R_m مقاومت ذاتی غشا است. به منظور ساده کردن محاسبه ثابت‌های رابطه استاندارد شده فوق رابطه ۱۰ که فرم خطی شده رابطه ۹ است مورد استفاده قرار گرفت:

$$\frac{t}{Y(t)} = k_1 + (k_2 \times t) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن $1/k_1$ و $1/k_2$ به ترتیب سرعت افزایش اولیه مقاومت هیدرولیکی و مقدار مجانب $Y(t)$ را هنگامی که $t \rightarrow \infty$ نشان می‌دهند. بر اساس معادله (۲)، مقاومت هیدرولیکی کل در حالت پایا به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$R_{\infty} = \left(R_m \times \frac{1}{K_2}\right) + R_0 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$J_t = (J_0 - J_{\infty})\exp(-kt) + J_{\infty} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن، k ($1/s$) ثابت نرخ کاهش شار و J_0 شار اولیه تراوه است.

۲. مدل سینتیک مرتبه N

در مدل سینتیک مرتبه N (NKM) ضریب تغییرات نفوذپذیری غشا (δ) با زمان به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d\delta}{dt} = -\alpha(\delta - \delta_{\infty})^n \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن، α ($1/s$) ثابت نرخ کاهش شار، n مرتبه کاهش نفوذپذیری و δ_{∞} نفوذپذیری غشاء در شرایط پایا است. معادله ۳ می‌تواند با استفاده از شرایط مرزی یعنی در $t=0$ ، $\delta=\delta_0$ و $t \rightarrow \infty$ وقتی $\delta=\delta_{\infty}$ به صورت زیر حل شود:

$$(\text{رابطه ۴})$$

$$(\delta - \delta_{\infty})^n = (n - 1)\alpha t + (\delta_0 - \delta_{\infty})^{1-n}$$

که در آن δ_0 ، نفوذپذیری اولیه است. به منظور استفاده از معادله برای داده‌های شار تراوه نیاز به اختصاصی کردن رابطه میان نفوذپذیری غشا و شار تراوه است، لذا پارامتر بدون بعد $\delta(t)$ را به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\delta(t) = \frac{(J-J_{\infty})}{(J_0-J_{\infty})} \quad (\text{رابطه ۵})$$

و با جایگزینی معادله ۵ در معادله ۴ معادله زیر به دست خواهد آمد:

$$\left(\frac{J_t-J_{\infty}}{J_0-J_{\infty}}\right)^{1-n} = (n - 1)\alpha t + 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

۳. مدل سینتیک هموگرافیک

مدل سینتیک هموگرافیک (HKM)^۲ برای مدل‌سازی شار تراوه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J_t = J_0 - J_0 \left(\frac{ab \times t}{1 + b \times t}\right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن، a (بدون بعد) به معنای اندازه کاهش شار در طول فرایند اولترافیلتراسیون و b ($1/s$) نرخ کاهش شار تراوه در طی فرآیند اولترافیلتراسیون است. اگر $a=0$ باشد، شار کاهش پیدا نمی‌کند ($J_t=J_0$) و اگر

۲- مدل سینتیک نمایی- خطی

در این مدل فرض بر این است که دینامیک مقاومت هیدرولیکی کل دارای سه مرحله مجزا است: اول، مرحله مستقل از زمان، دوم، مرحله نمایی وابسته به زمان و سوم، مرحله خطی وابسته به زمان. پس از آن مدل مناسب برای توصیف تمام این مراحل به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

(رابطه ۱۲)

$$R(t) = R_0 + \left[R_1 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \right) \right] + (R_2 \times t)$$

که در آن R_0 مقاومت هیدرولیکی اولیه، R_1 و R_2 مقاومت‌های هیدرولیکی قسمت‌های غیرخطی و خطی منحنی، و $1/\lambda$ نرخ سرعت افزایش اولیه مقاومت هیدرولیکی است. همچنین طبق معادله ۱۲، مقاومت هیدرولیکی حالت پایا به صورت معادله زیر ارائه می‌شود:

(رابطه ۱۳)

$$R_{\infty} = R_0 + R_1$$

۳- مدل سینتیک نمایی

برای بررسی رابطه سرعت واکنش و غلظت سوبسترا در علم سینتیک، معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{dc}{dt} = k \times (c_{\infty} - c)^n \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که برای مدل‌سازی سینتیک‌های مقاومت هیدرولیکی از نظر مقاومت اولیه، مقاومت پایا و سرعت افزایش مقاومت، معادله ۱۴ بصورت معادله دیفرانسیل زیر برای ارتباط عامل مقاومت هیدرولیکی با زمان بازنویسی می‌شود:

$$\frac{d\psi}{dt} = k \times (\psi_{\infty} - \psi)^n \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که در این رابطه ψ_{∞} مقاومت هیدرولیکی غشا هنگامی که $t \rightarrow \infty$ ، k ثابت درجه افزایش عامل مقاومت هیدرولیکی و n درجه سینتیک تغییر مقاومت با زمان است. برای ساده‌سازی، درجه سینتیک برابر یک ($n=1$) فرض شد، بنابراین معادله ۱۵ را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی در زمان $t=0$ ، $\psi(t)=\psi_0$ و در زمان $t=t$ ، $\psi(t)=\psi_t$ بصورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$\ln \frac{(\psi_t - \psi_{\infty})}{(\psi_0 - \psi_{\infty})} = k \times t \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

به منظور بکارگیری معادله ۱۶ برای داده‌های تجربی مقاومت هیدرولیکی-زمان نیاز است تا رابطه‌ای میان ψ و مقاومت هیدرولیکی کل مشخص شود، بنابراین، بدین منظور پارامتر بدون بعد $\psi(t)$ بصورت معادله زیر معرفی می‌شود:

$$\varphi(t) = \frac{(R_t - R_0)}{(R_{\infty} - R_0)} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

در نهایت با جایگزینی معادله ۱۷ در معادله ۱۶ و بازنویسی معادله ۱۶، معادله‌ای زیر به صورت زیر حاصل می‌شود:

(رابطه ۱۸)

$R(t) = (R_0 - R_{\infty}) \times \exp(-k \times t) + R_{\infty}$
که در آن R_0 ، R_{∞} و k به ترتیب مقاومت هیدرولیکی اولیه، مقاومت پایا و نرخ افزایش مقاومت هیدرولیکی هستند.

سیستم غشایی و نحوه عملیات

در این تحقیق، از یک سیستم نیمه صنعتی اولترافیلتراسیون جریان عرضی استفاده شد. غشاء مورد استفاده نیز مدل 3838 HFK-131 و ساخت شرکت کوچ آمریکا^۱ از جنس پلی سولفون آمید^۲ و حد وزن مولکولی غشاء (MWCO) آن ۲۰ کیلو دالتون بود. سیستم اولترافیلتراسیون مجهز به تانک خوراک، پمپ سانتریفوژی، دبی‌سنج، واحد اولترافیلتراسیون^۳ از نوع مارپیچ حلزونی، مبدل حرارتی لوله‌ای، دو فشار سنج عقربه‌ای، دو شیر جریان، یک دماسنج دیجیتالی و یک ترازوی الکترونیکی قابل اتصال به کامپیوتر و چاپگر بود. جریان تراوه پس از خروج از غشاء درون یک ظرف (که روی ترازوی الکترونیکی قرار دارد) ریخته و تغییرات دینامیکی شار در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه از طریق ترازو به چاپگر یا کامپیوتر منتقل می‌شود، در حالی که جریان ناتروایده پس از عبور از مبدل حرارتی به تانک خوراک بر می‌گردد. برای جلوگیری از تغییرات دما در طی

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل طرح مرکب مرکزی فرآیند اولترافیلتراسیون نمونه های شیرشتر

تیمار	اختلاف فشار در عرض غشاء (کیلو پاسکال)	دما (درجه سلسیوس)
۱	۸۰	۴۰
۲	۱۲۰	۳۰
۳	۱۲۰	۲۰
۴	۸۰	۳۰
۵	۱۲۰	۳۰
۶	۱۶۰	۴۰
۷	۱۲۰	۳۰
۸	۱۶۰	۲۰
۹	۱۲۰	۴۰
۱۰	۱۶۰	۳۰
۱۱	۸۰	۲۰
۱۲	۱۲۰	۳۰
۱۳	۱۲۰	۳۰

نتایج و بحث

شار تراوه

شکل ۱ پروفیل شار - زمان فرآیند اولترافیلتراسیون شیرشتر را برای تیمار شماره ۹ (جدول ۲) نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود شار تیمار ۹ با افزایش زمان کاهش می یابد و نرخ کاهش شار پس از حدود ۱۵ دقیقه فرآیند تقریباً ثابت شده و به شار در حالت پایا نزدیک می شود که این رفتار در همه تیمارهای مورد آزمون (تیمار های ۱ تا ۱۳ جدول ۲) مشاهده شد. این شار را که در واقع معیاری مشابه شار پایا است، شار نسبتاً پایا یا شار شبه پایا می نامند (Razavi et al., 2003). از انجایی که برای طراحی فرآیندهای غشایی همواره رفتار دینامیکی شار (شار اولیه، نرخ کاهش شار و شار نهایی) مورد نیاز است و اطلاعاتی نظیر شار متوسط و شار پایا که توسط بعضی مدل های فیزیکی قابل استخراج است، کافی برای این موضوع نیست، لذا در این پژوهش به منظور درک بهتر الگوی تغییرات شار با زمان، مدل های مختلف سینتیکی توسط معیارهای ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین

عملیات، دمای جریان توسط مبدل حرارتی در حد مورد نظر تنظیم می گردید.

مقاومت هیدرولیکی کل

مقاومت هیدرولیکی کل (R_T) نسبت به جریان تراویده با فرض ناچیز بودن فشار اسمزی از طریق مدل مقاومت متوالی (یا مدل لایه مرزی- جذب سطحی) این چنین بیان می شود.

$$R_T = \frac{\Delta P_T}{\mu_P J_P} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

که J_P شار تراویده ($kg/m^2.s$) و μ_P ویسکوزیته تراویده (Pa.s) و R_T مقاومت هیدرولیکی کل (m^{-1}) است.

ΔP_T در اولترافیلتراسیون جریان عرضی نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta P_T = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

که P_o و P_i به ترتیب فشارهای جریان های خوراک و ناتراوه و P_p فشار تراویده است.

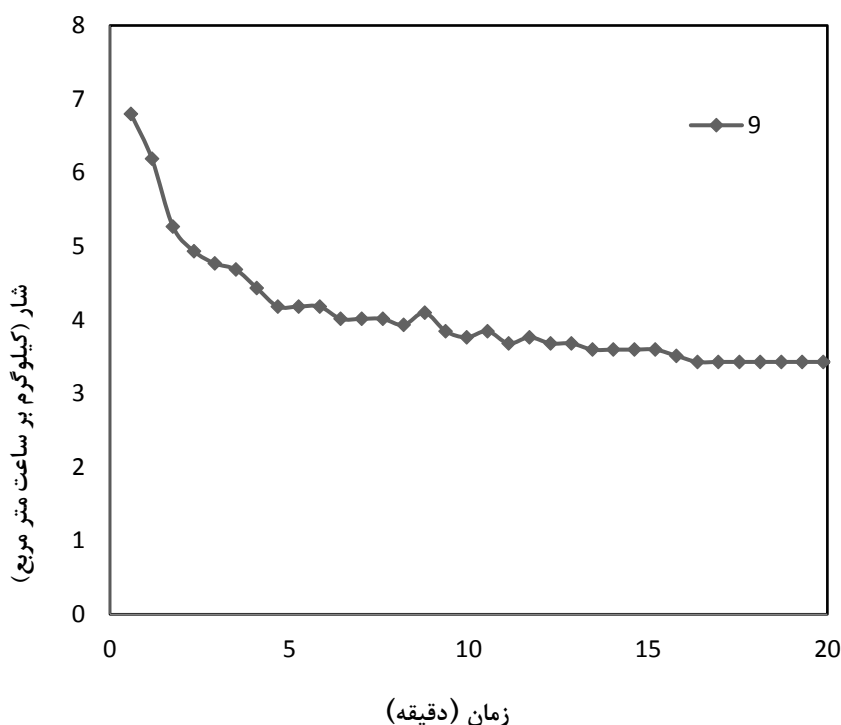
مدلسازی و آنالیز آماری

در این پژوهش، تیمارهای فرآیند به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) (۵ تکرار در نقطه مرکزی) برای دو متغیر مستقل (اختلاف فشار و دما) و در سه سطح انجام شد به صورتی که تعداد کل تیمار مطابق جدول ۱ به دست آمد. نتایج پژوهش با استفاده از نرم افزار آماری (Design-Expert version 10) به روش سطح پاسخ^۱ مدل سازی شد. سپس آنالیز تحلیل حساسیت مدل های به دست آمده توسط نرم افزار اکسل انجام شد. لازم به ذکر است تحلیل حساسیت به مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی های یک مدل آماری به صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش بینی کرد (Saltelli, 2002).

برخوردار بودند، مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. جدول (۲) پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک را برای شرایط مختلف عملیاتی اولترافیلتراسیون شیر شتر را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، میزان شار اولیه، شار پایا، زمان کاهش شار و اندازه کاهش شار نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین ۴/۶۲ تا ۹/۴۱ و ۲/۶۹ تا ۴/۱۶ کیلوگرم بر ساعت متر مربع و ۰/۲۹ تا ۴/۰۲ دقیقه و ۰/۴۲ تا ۰/۷۰ متغیر بودند. همچنین نتایج آنالیز واریانس نیز نشان داد که در میان اثرات خطی و متقابل، اثر خطی اختلاف فشار بر کلیه پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک و اثر متقابل اختلاف فشار-دما در سطح ۹۵ درصد بر شار اولیه و زمان کاهش شار نمونه‌ها معنی‌دار بودند. شکل (۳) نیز نمودار تحلیل حساسیت اختلاف فشار و دما بر اساس درصد تغییر خروجی را برای پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک برای شرایط مختلف اولترافیلتراسیون شیر شتر نشان می‌دهد.

مربعات خطا (RMSE) با یکدیگر مقایسه و در نهایت مدلی انتخاب گردید که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE باشد. با توجه به معیارهای بیان شده برای انتخاب بهترین مدل، در تمام نمونه‌ها از نظر دما و فشار، مدل سینتیک هموگرافیک با مقدار R^2 بالای ۰/۹۰ دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بود. مدل سینتیک هموگرافیک شامل تنها سه ثابت است که به طور مستقیم با ویژگی‌های شکل منحنی ارتباط دارند و این امر موجب می‌شود تا بتوان مقایسه ساده‌ای میان مشخصات شکل منحنی‌های مختلف مدل انجام داد. با توجه به توانایی مدل سینتیک هموگرافیک برای توصیف داده‌های شار-زمان و به منظور بررسی بیشتر اثر اختلاف فشار و دما بر کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون، پارامترهای مدل شامل شار اولیه (J_0)، شار پایا (J_∞)، زمان کاهش شار ($1/b$) و اندازه یا وسعت کاهش شار (a) که از مفاهیم عملی بسیار بالایی در تعیین سینتیک رفتار شار در تمامی شرایط بررسی شده



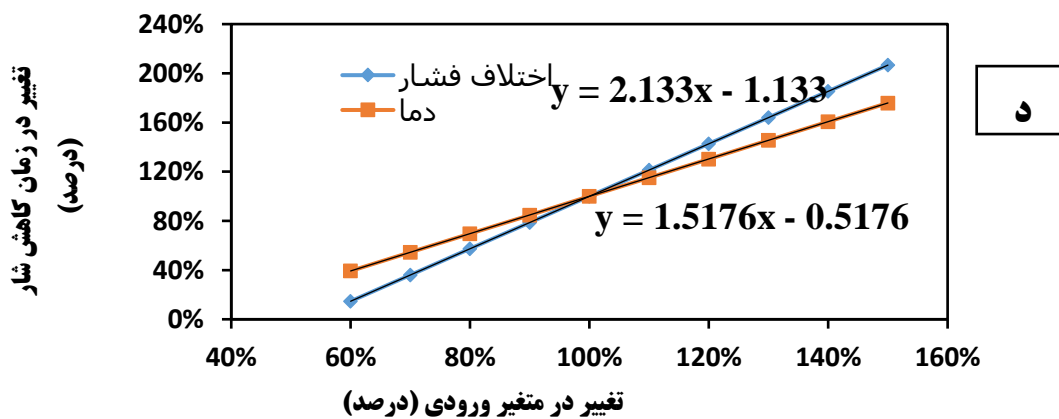
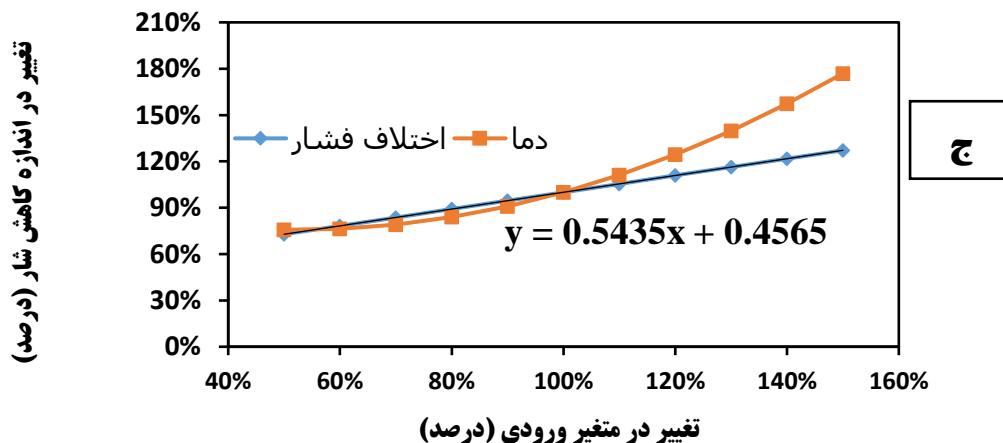
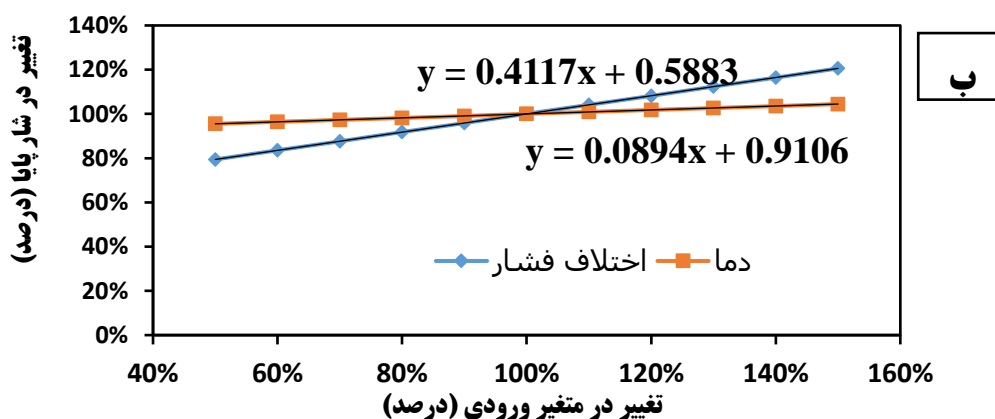
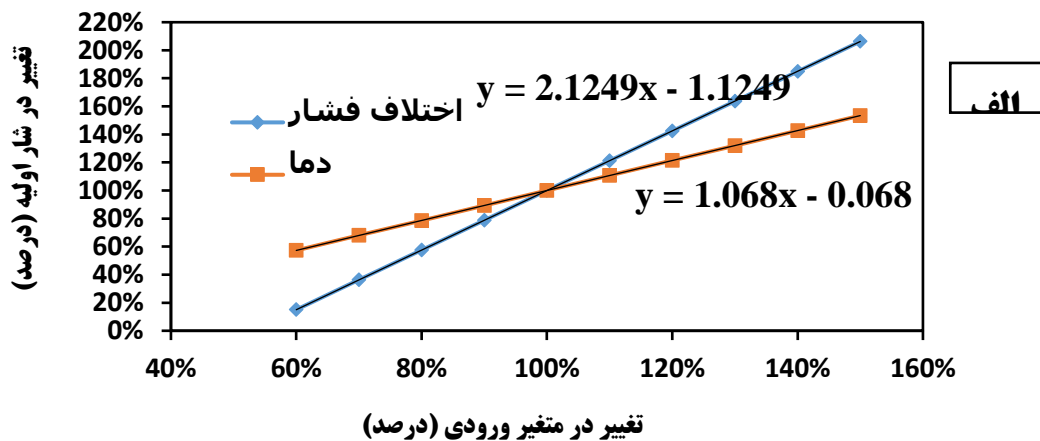
شکل ۱- پروفیل شار - زمان فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر (تیمار ۹، اختلاف فشار ۱۲۰ کیلو پاسکال و دمای ۴۰ درجه سلسیوس)

جدول ۲- پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک برای شرایط مختلف عملیاتی اولترافیلتراسیون شیر شتر

تیمار	اختلاف فشار (کیلوپاسکال)	دما (درجه سلسیوس)	شار اولیه (J ₀) (کیلوگرم بر ساعت متر مربع)	شار پایا (J _∞) (کیلوگرم بر ساعت متر مربع)	زمان کاهش شار (1/b) (دقیقه)	اندازه کاهش شار (a)
۱	۸۰	۴۰	۶/۲۳	۳/۱۲	۱/۸۶	۰/۵۵
۲	۱۲۰	۳۰	۶/۷۰	۳/۶۸	۲/۴۱	۰/۴۹
۳	۱۲۰	۲۰	۶/۸۱	۳/۳۹	۲/۱۶	۰/۵۰
۴	۸۰	۳۰	۴/۶۲	۲/۶۹	۱/۲۳	۰/۴۲
۵	۱۲۰	۳۰	۶/۷۰	۳/۶۷	۲/۴۱	۰/۴۹
۶	۱۶۰	۴۰	۷/۷۱	۴/۰۶	۲/۸۶	۰/۴۷
۷	۱۲۰	۳۰	۶/۷۰	۳/۶۸	۲/۴۱	۰/۴۹
۸	۱۶۰	۲۰	۹/۴۱	۴/۱۵	۴/۰۲	۰/۳۲
۹	۱۲۰	۴۰	۶/۹۷	۳/۸۱	۳/۲۵	۰/۴۵
۱۰	۱۶۰	۳۰	۸/۵۶	۴/۱۶	۳/۵۹	۰/۵۹
۱۱	۸۰	۲۰	۳/۰۱	۲/۸۶	۰/۲۹	۰/۷۰
۱۲	۱۲۰	۳۰	۶/۱۵	۳/۱۲	۲/۴۱	۰/۴۹
۱۳	۱۲۰	۳۰	۶/۷۰	۳/۶۸	۲/۴۱	۰/۴۵

اختلاف فشار، شار جریان تراوه افزایش می‌یابد (Kautake et al., 1986; Thompson & DeMan, 1975). Grandison et al. (2000) مشاهده نمود که افزایش اختلاف فشار در دامنه ۵۰ تا ۳۵۰ کیلوپاسکال هم شار اولیه و هم نرخ کاهش شار را افزایش می‌دهد، یعنی اینکه شار در ناحیه وابسته به اختلاف فشار قرار دارد، اگر چه اثر افزایش اختلاف فشار از ۵۰ تا ۱۵۰ کیلوپاسکال بر شار بزرگتر از اثر اختلاف فشار در محدود ۲۵۰-۳۵۰ کیلوپاسکال بود. افزایش دما نیز در بازه اختلاف فشار مورد آزمون موجب افزایش پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک نمونه‌ها گردید که این امر می‌تواند به دلیل کاهش ویسکوزیته حلال و افزایش ضریب نفوذ حلال در غشاء و تحرک بیشتر زنجیره‌های پلیمری غشاء در دماهای بالاتر باشد (Wang & Chung, 2005). علاوه بر این، افزایش دما می‌تواند شعاع منافذ غشا را نیز افزایش دهد (Razavi et al., 2017). تعدادی از محققین نشان دادند که افزایش دمای فرآیند باعث افزایش شار تراوه می‌شود (Fenton-May et al., 1972; Kautake et al., 1986). Razavi et al. (2018) نیز نشان دادند که با افزایش دمای فرآیند شار شبه پایا بطور متوسط ۱/۸۱ درصد به ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود به ازای افزایش هر ۱۰ کیلوپاسکال، اختلاف فشار حدود ۱۵ درصد به شار اولیه، ۵ درصد به شار پایا، ۱۵ درصد به زمان کاهش شار و ۳ درصد به میزان کاهش شار نمونه‌ها اضافه گردید. همچنین مطابق شکل ۲ به ازای افزایش هر درجه سلسیوس دما نیز حدود ۳/۷ درصد به شار اولیه، ۱ درصد به شار پایا، ۴/۷ درصد به زمان کاهش شار و ۵/۷ درصد به اندازه کاهش شار نمونه‌ها اضافه گردید. شیب بیشتر خط اختلاف فشار نسبت به دما در شکل ۲ الف، ب و د نیز نشان دهنده حساسیت بیشتر اختلاف فشار نسبت به دما بر شار اولیه، شار پایا و زمان کاهش شار نمونه‌ها می‌باشد در حالی که شیب بیشتر خط دما نسبت به اختلاف فشار (شکل ۲ ج) نیز نشان دهنده حساسیت بیشتر دما نسبت به اختلاف فشار بر اندازه کاهش شار نمونه‌ها می‌باشد. در رابطه با اثر اختلاف فشار می‌توان این گونه بیان کرد که اولترافیلتراسیون یک فرآیند غشایی با نیرو محرکه اختلاف فشار عرضی می‌باشد. لذا با افزایش اختلاف فشار، در واقع نیروی محرکه عملیات اولترافیلتراسیون افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود شار اولیه، شار پایا، زمان کاهش شار و اندازه کاهش شار نیز هم‌زمان با آن افزایش یابند. بسیاری از محققین نشان دادند که با افزایش

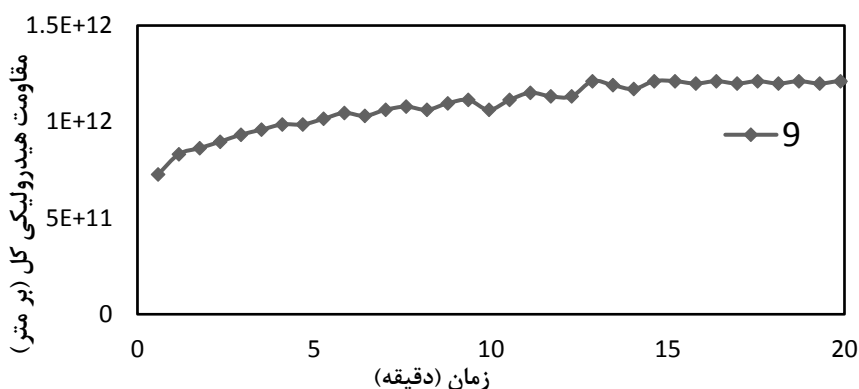


شکل ۲ - نمودار تحلیل حساسیت اختلاف فشار و دما بر اساس درصد تغییر خروجی برای پارامترهای مدل سینتیک هموگرافیک الف: میزان شار اولیه، ب: شار پایا، ج: زمان کاهش شار ود: اندازه کاهش شار برای شرایط مختلف اختلاف فشار و دمای اولترافیلتراسیون شیر شتر

مقاومت هیدرولیکی کل

مقاومت هیدرولیکی کل یکی از مهم‌ترین عواملی است که گسترش استفاده از فرآیندهایی غشایی را در صنایع مختلف محدود می‌کند. از عوامل مهم در ایجاد مقاومت هیدرولیکی کل می‌توان به پلاریزاسیون غلظت، ایجاد واکنش بین غشاء و ذرات، تجمع ذرات، واکنش آن‌ها با یکدیگر و در انتها رسوب بر سطح غشاء اشاره کرد (Razavi et al., 2017). Tong et al. (1988) گزارش نمودند که رسوب روی سطح غشاء دارای دو قسمت می‌باشد، یک لایه شل و نرم که به راحتی با آب شست و شو بر طرف می‌گردد (مقاومت پلاریزاسیون غلظت) و یک لایه سفت که قویاً به سطح غشاء چسبیده و برای جدا کردن آن شوینده خاص مورد نیاز است (مقاومت

ناشی از جذب سطحی یا مقاومت لایه ژل). لایه پلاریزاسیون غلظتی تشکیل شده بر سطح غشاء باعث افزایش مقاومت غشاء می‌شود. پدیده پلاریزاسیون غلظت نه تنها باعث گرفتگی غشاء می‌شود، بلکه با افزایش فشار اسمزی باعث کاهش تراوش پذیری غشاء نیز می‌شود. همچنین لایه‌ای که با جمع شدن ذرات موجود در سیال در سطح غشاء تشکیل می‌شود در صورت متراکم شدن، تشکیل لایه ژل را بر سطح غشاء می‌دهند که مقاومتی در برابر سیال ایجاد می‌کند. شکل ۳ پروفیل مقاومت هیدرولیکی کل - زمان فرآیند اولترافیلتراسیون شیرشتر را برای تیمار شماره ۹ (جدول ۲) نشان می‌دهد.



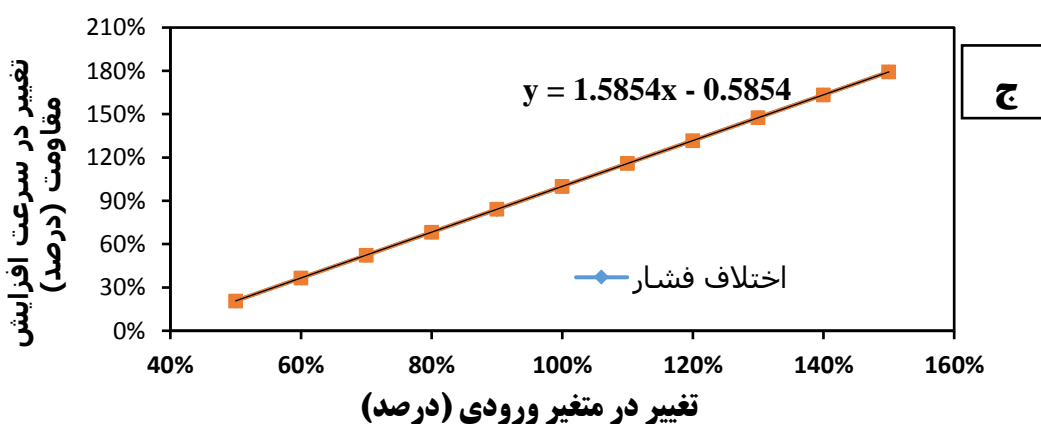
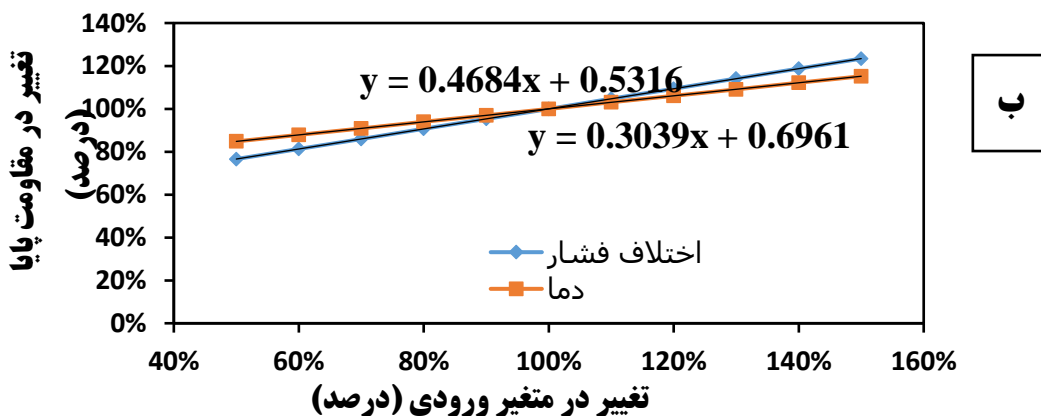
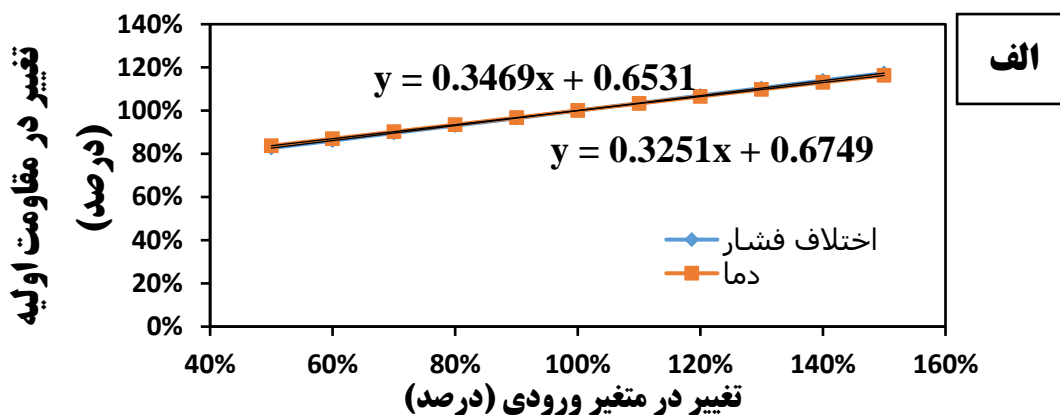
شکل ۳ - پروفیل مقاومت هیدرولیکی کل - زمان فرآیند اولترافیلتراسیون شیرشتر (تیمار ۹، اختلاف فشار ۱۲۰ کیلو پاسکال و دمای ۴۰ درجه سلسیوس)

نمایی شامل سه ثابت است که به طور مستقیم با ویژگی‌های شکل منحنی ارتباط دارند و این امر موجب می‌شود تا بتوان مقایسه ساده‌ای میان مشخصات شکل منحنی‌های مختلف مدل انجام داد. در این پژوهش به منظور بررسی بیشتر اثر اختلاف فشار و دما بر کارایی فرآیند دیافیلتراسیون، پارامترهای مدل سینتیک نمایی (مقاومت اولیه (R_0) ، مقاومت پایا (R_{∞}) ، سرعت افزایش مقاومت (k) مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. با استفاده از این پارامترها، پیش‌بینی مقاومت هیدرولیکی در هر زمان تحت شرایط عملکردی معین امکان‌پذیر است. جدول (۳) پارامترهای مدل سینتیک نمایی را برای شرایط مختلف اختلاف فشار و دما در فرآیند

مطابق شکل ۳ مقاومت هیدرولیکی کل تیمار ۹ با افزایش زمان افزایش می‌یابد و نرخ افزایش مقاومت هیدرولیکی کل پس از حدود ۱۵ دقیقه فرآیند تقریباً ثابت شده که این رفتار در همه تیمارهای مورد آزمون (تیمارهای ۱ تا ۱۳ جدول ۲) در همه سطوح اختلاف فشار و دمای مورد آزمون مشاهده شد. ۳ مدل سینتیک هوموگرافیک، نمایی-خطی و نمایی نیز برای بررسی سینتیک رفتار مقاومت هیدرولیکی کل نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت که در تمامی سطوح اختلاف فشار و دما، مدل سینتیک نمایی با مقدار R^2 بالای ۰/۹۰ و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بود. مدل سینتیک

در سطح ۹۵ درصد و اثر خطی دما و اثر متقابل اختلاف فشار- دما در سطح ۹۵ درصد بر سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها معنی‌دار بودند. شکل ۲ نیز نمودار تحلیل حساسیت اختلاف فشار و دما بر اساس درصد تغییر خروجی را برای پارامترهای مدل سینتیک نمایی الف: مقاومت اولیه، ب: مقاومت پایا و ج: سرعت افزایش مقاومت برای شرایط مختلف اختلاف فشار و دمای اولترافیلتراسیون شیر شتر نشان می‌دهد.

اولترافیلتراسیون شیر شتر را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، اندازه مقاومت اولیه، مقاومت پایا و سرعت افزایش مقاومت نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین $4/74 \times 10^{13}$ تا $8/39 \times 10^{13}$ و $9/13 \times 10^{13}$ تا $16/17 \times 10^{13}$ بر متر و $0/04$ تا $0/17$ بر ثانیه متغیر بودند. همچنین نتایج آنالیز واریانس نیز نشان داد که در میان اثرات خطی و متقابل، اثر خطی اختلاف فشار بر کلیه پارامترهای مدل سینتیک نمایی (مقاومت اولیه، مقاومت پایا و سرعت افزایش مقاومت)



شکل ۴ - نمودار تحلیل حساسیت اختلاف فشار و دما بر اساس درصد تغییر خروجی را برای پارامترهای مدل سینتیک نمایی الف: مقاومت اولیه، ب: مقاومت پایا و ج: سرعت افزایش مقاومت برای شرایط مختلف اختلاف فشار و دمای اولترافیلتراسیون شیر شتر

جدول ۳- پارامترهای مدل سینتیک نمایی برای شرایط مختلف عملیاتی اولترافیلتراسیون شیر شتر

تیمار	اختلاف فشار (کیلوپاسکال)	دما (درجه سلسیوس)	مقاومت اولیه ^(۱۰^{۱۳}) (RO) (بر متر)	مقاومت پایا ^(۱۰^{۱۳}) (R) (بر متر)	سرعت افزایش مقاومت(k) (بر ثانیه)
۱	۸۰	۴۰	۶/۳۸	۱۱/۰۸	۰/۱۶
۲	۱۲۰	۳۰	۶/۷۶	۱۳/۳۸	۰/۰۶
۳	۱۲۰	۲۰	۶/۷۲	۱۱/۹۲	۰/۰۴
۴	۸۰	۳۰	۶/۷۶	۱۱/۲۱	۰/۰۵
۵	۱۲۰	۳۰	۶/۷۶	۱۳/۳۸	۰/۰۶
۶	۱۶۰	۴۰	۸/۳۹	۱۶/۱۷	۰/۰۸
۷	۱۲۰	۳۰	۶/۷۶	۱۳/۳۸	۰/۰۶
۸	۱۶۰	۲۰	۷/۱۷	۱۳/۴۰	۰/۱۷
۹	۱۲۰	۴۰	۷/۵۲	۱۳/۱	۰/۱۷
۱۰	۱۶۰	۳۰	۷/۵۴	۱۲/۲۴	۰/۱۵
۱۱	۸۰	۲۰	۴/۷۴	۹/۱۳	۰/۱۶
۱۲	۱۲۰	۳۰	۷/۵۹	۱۳/۳۸	۰/۰۶
۱۳	۱۲۰	۳۰	۶/۷۶	۱۰/۳۲	۰/۰۸

غلظتی زیاد شود، این لایه ممکن است دارای ویسکوزیته بالایی گردد و سرانجام به صورت ژل در آید. با افزایش اختلاف فشار تجمع ذرات در سطح غشاء افزایش می‌یابد که منجر به افزایش مقاومت گرفتگی غشاء از طریق پلاریزاسیون غلظت می‌گردد (Kaya et al., 2009). پلاریزاسیون غلظتی در تمامی فرآیندهای غشایی که نیروی محرکه آنها اختلاف فشار است، اتفاق می‌افتد. در راستای نتایج بدست آمده از این پژوهش، (2018). Razavi et al در بررسی اولترافیلتراسیون شیر گاو، گزارش کردند که با افزایش فشار در یک غلظت ثابت، مقاومت لایه پلاریزاسیون افزایش می‌یابد. افزایش دما نیز در بازه اختلاف فشار مورد آزمون موجب افزایش پارامترهای مدل سینتیک نمایی نمونه‌ها گردید که در مورد اثر آن بر مقاومت هیدرولیکی کل می‌توان اینگونه بیان کرد که در دماهای پایین، مولکول‌های اجزاء محلول انرژی فعالسازی کمی دارند، بنابراین این مولکول‌ها با پیوندهای ضعیف مانند پیوندهای هیدروژنی روی سطح غشا جذب می‌شوند. در دماهای بالاتر نیز ویسکوزیته خوراک کاهش می‌یابد و انرژی مولکول‌های سیال بیشتر

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود به ازای افزایش هر ۱۰ کیلوپاسکال اختلاف فشار، حدود ۳/۵ درصد به مقاومت اولیه، ۳/۵ درصد به مقاومت پایا و ۱۷/۲ درصد به سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها اضافه گردید. همچنین مطابق شکل ۴ به ازای افزایش هر درجه سلسیوس دما نیز حدود ۱ درصد به مقاومت اولیه، ۱/۳ درصد به مقاومت پایا و ۶/۵ درصد به سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها اضافه گردید. شیب بیشتر خط اختلاف فشار نسبت به دما در شکل ۴ الف و ب نیز نشان دهنده حساسیت بیشتر اختلاف فشار نسبت به دما بر مقاومت اولیه و پایا نمونه‌ها می‌باشد در حالی که شیب برابر خط دما و اختلاف فشار (شکل ۴ د) نیز نشان دهنده حساسیت برابر دما و اختلاف فشار بر سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌باشد. در رابطه با اثر اختلاف فشار می‌توان این‌گونه بیان کرد اختلاف فشار باعث می‌شود که ذرات محلول به طرف غشاء رانده شوند و از آن عبور نمایند ولی چون ذرات به صورت انتخابی از غشاء عبور می‌کنند، غلظت اجزاء محلول در قسمت ورودی غشاء افزایش می‌یابد. در صورتی که غلظت مواد در لایه

دما و فشار، شار تراوه با افزایش این دو متغیر افزایش یافته است.

نتیجه گیری

تولید فرآورده‌های حاصل از فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر به شرط راندمان و هزینه مناسب فرآیند، بازار خوبی را برای تولید کنندگان فراهم خواهد کرد. لذا با توجه به اهمیت محصولات حاصل از فرآیند اولترافیلتراسیون شیر شتر و نبود اطلاعات در مورد رفتار دینامیکی شار تراویده و مقاومت هیدرولیکی، در این تحقیق مدل‌سازی سینتیکی شار و مقاومت هیدرولیکی کل اولترافیلتراسیون شیر شتر در شرایط مختلف اختلاف فشار در عرض غشاء و دما توسط ۶ مدل سینتیکی انجام شد و در نهایت مدل سینتیک هموگرافیک برای مدل‌سازی سینتیکی شار و مدل سینتیک نمایی برای مقاومت هیدرولیکی کل با توجه به معیارهای R^2 و RMSE انتخاب شدند. نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل سینتیک هموگرافیک و سینتیک نمایی از مفاهیم عملی بالایی در تعیین سینتیک رفتار شار و مقاومت هیدرولیکی کل در تمامی شرایط بررسی شده برخوردار بودند و این امر موجب شد تا مقایسه ساده‌ای میان مشخصات شکل منحنی‌ها در شرایط مختلف دما و اختلاف فشار در عرض غشاء انجام شود. همچنین به طور کلی نتایج تحقیق حساسیت بیشتر اختلاف فشار نسبت به دما بر شار اولیه، شار پایا، زمان کاهش شار و مقاومت اولیه نمونه‌ها و حساسیت بیشتر دما نسبت به اختلاف فشار بر اندازه کاهش شار، مقاومت پایا و سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها رانشان داد که از تشابه این نتایج با پژوهش‌های مشابه انجام شده بر روی شیر گاو می‌توان نتیجه گرفت که اگر چه شیر شتر از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی تفاوت‌های بسیاری با شیر گاو دارد اما روند کلی رفتار دینامیکی شار تراویده و مقاومت هیدرولیکی آن در فرآیند اولترافیلتراسیون با شیر گاو مشابه است.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

است، بنابراین امکان تشکیل پیوندهای قوی تر مولکول‌ها با یکدیگر و با غشاء در لایه مجاور سطح غشاء فراهم می‌گردد (Eckner & Zottola, 1992). با این حال در دمای بالاتر نیز واکنش‌های شیمیایی بر تعامل بین املاح و غشا موثر است (Alghooneh *et al.*, 2016) که منجر به افزایش مقاومت اولیه، مقاومت پایا و سرعت افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. (Gautam (1994) نیز بیان کرد افزایش دمای اولترافیلتراسیون می‌تواند رسوب غشاء ناشی از دناتوراسیون پروتئین‌ها را تسریع کند. St- Gelais *et al.* (1992) بیان کردند که افزایش دما منجر به افزایش حلالیت املاح معدنی از جمله کلسیم می‌گردد. لذا خروج کلسیم محلول به تراوه منجر به خروج بیشتر فسفات کلسیم کلوئیدی موجود در میسل کازئین می‌گردد که این تغییرات منجر به تغییرات اندازه مسیل کازئین‌های شیر شده و می‌تواند بر گرفتگی موثر باشد. Luo *et al.* (2015) نیز با بررسی تصاویر SEM غشاء-های حاصل از عملیات اولترافیلتراسیون در دماهای ۱۰ و ۵۰ درجه سلسیوس نشان دادند که سطح غشاء فرآیند شده در دمای ۵۰ درجه سلسیوس دارای لایه سفید چسبنده (گرفتگی) بیشتری نسبت به غشاء حاصل از عملیات اولترافیلتراسیون در دمای ۱۰ درجه سلسیوس بود. همچنین آنها با آنالیز ترکیبات چسبیده به غشاء بیان کرد که بخش عمده آن ترکیبات پروتئینی و کلسیم بودند. (Nourbakhsh *et al.* (2014) بیان کردند که افزایش در ضریب انتشار پروتئین‌ها با افزایش دما منجر به نفوذ بیشتر به داخل منافذ غشاء اولترافیلتراسیون و رسوب گذاری بیشتر در دیواره‌های منافذ می‌شود. همچنین اگرچه نتایج حاکی از آن است که با افزایش اختلاف فشار و دما، مقاومت هیدرولیکی کل بیشتر می‌شود اما باید توجه داشت که با توجه به داده‌های تجربی، نسبت کاهش شار ناشی از افزایش مقاومت در این حالت به افزایش شار در نتیجه افزایش فشار و دما کم بوده و در حالت کلی علیرغم بیشتر شدن مقاومت با افزایش

REFERENCES

- Alghooneh, A., Razavi, S. M. & Mousavi, S. M. (2016). Nanofiltration treatment of tomato paste processing wastewater: process modeling and optimization using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment*, 57(21), 9609-9621.
- Banks, H. T. & Tran, H. T. (2009). Mathematical and experimental modeling of physical and biological processes. Boca Raton: CRC Press.
- Benmechernene, Z., Fernández-No, I., Quintela-Baluja, M., Böhme, K., Kihal, M., Calo-Mata, P. & Barros-Velázquez, J. (2014). Genomic and Proteomic Characterization of Bacteriocin-Producing *Leuconostoc mesenteroides* Strains Isolated from Raw Camel Milk in Two Southwest Algerian Arid Zones. *BioMed research international*, 20, 14-24.
- Eckner, K. & Zottola, E. (1992). Partitioning of skim milk components as a function of pH, acidulant, and temperature during membrane processing. *Journal of dairy science*, 75(8), 2092-2097.
- Farah, Z. & Ruegg, M. W. (1989). The size distribution of casein micelles in camel milk. *Food Microstructure*, 8, 211-216.
- Fenton-May, R., Hill Jr, C., Amundson, C., Lopez, M. & Auclair, P. (1972). Concentration and fractionation of skimmilk by reverse osmosis and ultrafiltration. *Journal of dairy science*, 55(11), 1561-1566.
- Gautam, A. (1994). *Ultrafiltration of salted acid whey*. Department of Agricultural, Food and Nutritional Sciences, MSc thesis, University of Alberta, Canada.
- Grandison, A. S., Youravong, W. & Lewis, M. J. (2000). Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk. *Le Lait*, 80(1), 165-174.
- Kautake, M., Nabetani, H. & Matsuno, I. (1986). *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.
- Kaya, Y., Barlas, H. & Arayıcı, S. (2009). Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) wastewater in a detergent plant: effects of pH, temperature and transmembrane pressure on flux behavior. *Separation and Purification Technology*, 65(2), 117-129.
- Luo, X., Ramchandran, L. & Vasiljevic, T. (2015). Lower ultrafiltration temperature improves membrane performance and emulsifying properties of milk protein concentrates. *Dairy science & technology*, 95(1), 15-31.
- Ng, K. S., Haribabu, M., Harvie, D. J., Dunstan, D. E. & Martin, G. J. (2017). Mechanisms of flux decline in skim milk ultrafiltration: A review. *Journal of Membrane Science*, 523, 144-162.
- Nourbakhsh, H., Emam-Djomeh, Z., Mirsaedghazi, H., Omid, M. & Moieni, S. (2014). Study of different fouling mechanisms during membrane clarification of red plum juice. *International journal of food science & technology*, 49(1), 58-64.
- Rajca, M., Bodzek, M. & Konieczny, K. (2009). Application of mathematical models to the calculation of ultrafiltration flux in water treatment. *Desalination*, 239(1-3), 100-110.
- Razavi, S. M., Alghooneh, A. & Behrouzian, F. (2017). Kinetic Modelling of Hydraulic Resistance in Colloidal System Ultrafiltration: Effect of Physiochemical and Hydrodynamic Parameters. *Journal of Membrane Science and Research*, 3(4), 296-302.
- Razavi, S. M., Alghooneh, A. & Behrouzian, F. (2018). Kinetic of permeate flux decline and fouling mechanism characterization of colloidal system ultrafiltration: Experimental and modeling study. *Desalination and Water Treatment*, 102, 38-48.
- Razavi, S. M. A., Mousavi, S. M. & Mortazavi, S. A. (2003). Dynamic prediction of milk ultrafiltration performance: A neural network approach. *Chemical Engineering Science*, 58(18), 4185-4195.
- Saltelli, A. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk analysis*, 22(3), 579-590.
- St-Gelais, D., Haché, S. & Gros-Louis, M.

- (1992). Combined effects of temperature, acidification, and diafiltration on composition of skim milk retentate and permeate. *Journal of dairy science*, 75(5), 1167-1172.
- Suki, A., Fane, A. & Fell, C. (1984). Flux decline in protein ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 21(3), 269-283.
- Thompson, S. J. & DeMan, J. (1975). Concentration and fractionation of milk by ultrafiltration. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 8(2), 113-116.
- Tong, P., Barbano, D. & Rudan, M. (1988). Characterization of proteinaceous membrane foulants and flux decline during the early stages of whole milk ultrafiltration. *Journal of dairy science*, 71(3), 604-612.
- Vela, M. C. V., Blanco, S. Á., García, J. L. & Rodríguez, E. B. (2008). Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG. *Separation and Purification Technology*, 62(3), 489-498.
- Wang, K. Y. & Chung, T.-S. (2005). The characterization of flat composite nanofiltration membranes and their applications in the separation of Cephalexin. *Journal of Membrane Science*, 247(1-2), 37-50.