

*Research Article***Evaluation of the Mechanism of Membrane Fouling in the Clarification of Date Syrup by the Ultrafiltration Process**

Parnian Motaghian¹, Hossein Mirsaeedghazi^{2*}, Mostafa Soltani³, Ahmad Kalbasi-Ashtari^{4*}, Mohammad Dehghani⁵

1, 3. Department of Food Science and Technology, Faculty of Pharmacy, Medical Sciences Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2, 5. Department of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Tehran, Iran.

4. Biological and Agricultural Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.

(Received 18 August 2023, Received in revised form 5 June 2023, Accepted 8 October 2023)

Introduction: High cost, energy, and water consumption, waste discharge, and environmental pollution of conventional clarification and decolorization methods of fruit syrups such as using lime, resin, and activated carbon affected greatly their efficiency and effectiveness. Therefore, membrane-based process has gradually become an efficient separation technique for the purification, clarification, and concentration of various fruit syrups due to its unique separation capabilities, high output, and low energy consumption. The main problem associated with the membrane-based separation process is the reduction of permeate flux during operation due to concentration polarization and membrane fouling. Cake or gel layer formation on the surface of the membrane, increasing the osmotic pressure at the interface between the membrane and the solution and or reducing the effective driving force are the results of concentration polarization. The membrane fouling causes membrane destruction, reducing productivity, and increases operating costs for washing and replacing the membrane. On the other hand, the use of membrane purification and clarification of date liquid sugar is of great importance because it excludes the use of chemicals in the clarification of this product and produces an added value and superior quality product. The aim of this study is to prepare clarified date liquid sugar from depectinized date syrup. In addition, the effects of different ultrafiltration feed parameters (pressure, flow rate and temperature) on the permeate flux and fouling mechanisms were investigated. Hermia models were used to interpret the membrane pore blocking conditions in order to investigate the details of the fouling mechanism.

Materials and Methods: Polysulfone membrane with effective surface area (0.0096 m^2), pore sizes (30-40 nm), MWCO (3 -3.5 kDa), and initial flux ($3\text{-}20 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$), pure water at $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 bar) was used for ultrafiltration of depectinized date juice (DDJ). DDJ was purchased from Pars Minoos Industrial Company, Tehran, Iran. The feed solution for the ultrafiltration clarification was prepared by adjusting the DDJ concentration to 11.5 wt% using deionized water. The different operating conditions include two temperature levels (27 and $40 \text{ }^\circ\text{C}$) and three pressure levels (1, 1.5 and 2 bar) and three flow rate levels (10, 15 and 20 ml/s), were performed. The mass of permeate flux as the main output parameter of UF was determined by measuring its weight change over UF time Δt . Hermia models, including standard pore blocking, complete pore blocking, intermediate pore blocking and cake filtration are used to predict the fouling mechanism of membrane due to purification and clarification processes.

Results and discussion: Clarification of date syrup in different operating conditions in 16 different modes were done with ultrafiltration process. The results revealed that the temperature, pressure and flow rate have a significant effect on the permeate flux and the final achieved transparency. Therefore, the effectiveness of the operating conditions on ultrafiltration membrane fouling mechanism based on Hermia models were investigated in the plot form to specify the different parameters of the models. The results showed that the change in the operating conditions will cause a change in the membrane fouling mechanism. Cake filtration, intermediate pore blocking, and standard pore blocking were the evaluated

*Corresponding authors: mirsaeed@ut.ac.ir & akalbasia@tamu.edu

membrane fouling mechanism in the considered operating conditions in this study. In the most examined conditions, the cake filtration mechanism was identified as the dominant mechanism of membrane fouling in the ultrafiltration clarification process of date syrup. The comparison of the physicochemical properties of clarified date syrup under the selected conditions (pressure 1.5 bar, temperature 40°C and flow rate 10 ml/s with the highest permeated flux) shows the reduction of TPC, TSS, turbidity and pectin in the final product. Compared to the feed, they were 32.06%, 8.3%, 83.4% and 99.5%, respectively. As well, L^* parameter value increased from 28.77 to 48.11 during the ultrafiltration process, and a^* and b^* parameters decreased from 3.49 to 0.87 and 36.1 to 29.58, respectively. According to the results of this research, the use of ultrafiltration membrane process in optimal operating conditions is suggested as a suitable method for clarifying date syrup.

Conclusion: In this study, Hermia pore blocking models were used to evaluate membrane deposition in the clarification of date syrup with the ultrafiltration process. The results showed that by adjusting the operating conditions (including temperature, pressure and feed flow rate) ultrafiltration clarification of date syrup, it is possible to achieve proper clarity while maximizing the permeated flux, despite achieving the appropriate physicochemical properties of the product. Although the maximum permeated flux during the ultrafiltration process by choosing the optimal conditions of feed temperature and pressure affects the transparency of the final product, but the high clarification of date syrup are achieved at very low permeated flux, which it is not a cost-effective process. However, the performance of ultrafiltration process is significantly better than conventional thermal and chemical purification and clarification methods. Fouling analysis was performed for all clarification experiments using four Hermia's models to identify the appropriate fouling mechanism. Among these four models, the cake filtration mechanism was determined as the dominant membrane blocking mechanism during the clarification process of date syrup.

Keywords: *Date syrup, Electric field, Ultrafiltration, Color removal, Clarification, Fouling mechanism*

How to cite this article:

Motaghian, P., Mirsaeedghazi, H., Soltani, M., Kalbasi-Ashtari, A., & Dehghani, M., (2024). Evaluation of the Mechanism of Membrane Fouling in the Clarification of Date Syrup by the Ultrafiltration Process. *Innov. Food Technol.*, 11(2), 98-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2023.6436.2151>

مقاله پژوهشی

ارزیابی مکانیسم انسداد غشا در شفاف‌سازی شربت خرما توسط فرایند فراپالایش

پرنیان متقیان^۱، حسین میرسعیدقاضی^{۲*}، مصطفی سلطانی^۳، احمد کلباسی اشتری^{۴*}، محمد دهقانی^۵

۱،۳. گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده داروسازی، واحد علوم پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲، ۵. گروه فناوری صنایع غذایی، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. گروه مهندسی بیولوژیکی و کشاورزی، دانشگاه A&M تگزاس، ایستگاه کالج، تگزاس، ایالات متحده آمریکا.

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۵/۲۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶)

چکیده

استفاده از تکنولوژی غشایی در شفاف‌سازی شربت خرما می‌تواند موجب بهبود کیفیت محصول نهایی شود. همچنین کاهش مصرف عوامل شیمیایی شفاف‌کننده و صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی از مزایای این تکنولوژی است. این تحقیق به منظور بررسی کارایی فرایند غشایی در شفاف‌سازی شربت خرما و ارزیابی مکانیسم انسداد غشایی حاصل از مواد آلی و غیر آلی موجود در شربت خرما انجام شد. در این مطالعه به بررسی اثر دما، دبی جریان و فشار خوراک بر شار تراوش یافته در فرایند فراپالایش شربت خرما پرداخته شد و مکانیسم انسداد غشایی در شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل انسداد با استفاده از مدل‌های هرمیا انجام شد. نتایج نشان داد مکانیسم اصلی انسداد در فرایند غشایی شفاف‌سازی شربت خرما مکانیسم تشکیل لایه کیک است. همچنین مقایسه خصوصیات فیزیکوشیمیایی خوراک و شربت خرما شفاف‌سازی شده در شرایط فشار ۱/۵ bar، دمای ۴۰°C و دبی ۱۰ ml/s به عنوان شرایط منتخب با بیشترین شار تراوش یافته، نشان‌دهنده کاهش ترکیبات فنلی کل، مقدار مواد جامد محلول، کدورت و پکتین در محصول نهایی به ترتیب به مقدار ۳۲/۰۶، ۸/۳، ۸۳/۴ و ۹۹/۵٪ نسبت به خوراک بود. همچنین مقدار پارامتر L^* طی فرایند فراپالایش از ۲۸/۷۷ به ۴۸/۱۱ افزایش و پارامتری a^* از ۳/۴۹ به ۰/۸۷ و پارامتر b^* از ۳۶/۱ به ۲۹/۵۸ کاهش یافتند. با توجه به نتایج این تحقیق استفاده از فرایند غشایی فراپالایش در شرایط بهینه عملیاتی به عنوان روشی مناسب برای شفاف‌سازی شربت خرما پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شربت خرما، میدان الکتریکی، فراپالایش، رنگبری، شفاف‌سازی، مکانیسم رسوب‌گذاری.

۱. مقدمه

املاح در نزدیکی سطح غشا است، در نتیجه، با تشکیل کیک یا لایه ژل بر روی سطح غشا و یا افزایش فشار اسمزی در سطح مشترک غشا و محلول، موجب کاهش نیروی محرکه مؤثر می شود [۴۱]. همچنین بروز پدیده انسداد در غشاهای مصرفی توسط ترکیبات موجود در شربت میوه ها، علاوه بر کاهش بهره وری سبب تخریب غشا و افزایش هزینه های عملیاتی جهت شستشوی و تعویض غشا می شود [۱۵].

متأسفانه، قطبش غلظتی از مهم ترین دلایل انسداد غشایی برگشت پذیر و یا برگشت ناپذیر ناشی از رسوب سوسپانسیون های بیولوژیکی یا ماکرومولکول ها / کلوئیدها / ذرات بر روی سطح غشا یا منافذ غشا است که ممکن است به دلیل مسدود شدن جزئی یا کامل منافذ، منجر به از دست دادن دائمی نفوذپذیری غشا شود. لذا این پدیده یکی از مهم ترین دلایل محدودکننده کاربرد گسترده فرایند جداسازی غشایی در صنایع فرآوری مواد غذایی است [۱۰، ۳۹]. رسوب غشایی منجر به کاهش قابل توجه شار و افزایش هزینه های نگهداری و عملیاتی کارخانه، از جمله نیاز به پیش تصفیه، تمیز کردن غشا، بازیابی محدود و تلفات آب خوراک، و طول عمر کوتاه غشاها می شود. تاکنون از روش های مختلفی شامل تغییر هیدرودینامیک در کانال جریان نظیر ایجاد جریان آشفته در محفظه جریان [۲۱]، جریان ضربانی [۲۵]، اختلاط گردابی [۴۲]، تغییر محیط فیزیکی و شیمیایی محلول نظیر pH و قدرت یونی [۲۴]، اصلاح سطح غشا [۴۳] و اعمال نیروهای خارجی مانند میدان الکتریکی [۱۶، ۳۷] جهت کاهش اثرات مخرب رسوب غشایی در فرایندهای پالایش غشایی استفاده شده است.

از طرفی استفاده از پالایش غشایی در رنگبری و شفاف سازی قند مایع خرما از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا کاربرد مواد شیمیایی در شفاف سازی این محصول را منتفی نموده و محصولی با ارزش افزوده و کیفیتی برتر تولید می کند. با این حال، برخی از مشکلات فنی، مانند عملکرد ناکافی، رسوب شدید بر روی غشا و روش های تمیز کردن ناقص غشا کاربردهای صنعتی این روش را محدود

خرما یکی از قدیمی ترین محصولات کشاورزی است. این میوه به دلیل دارا بودن قندها، فیبرها، مواد معدنی، پروتئین ها، ویتامین ها و ترکیبات فنلی دارای خواص تغذیه ای فراوانی است [۴]. علاوه بر بازار میوه خرما، شربت خرما، کنسانتره خرما و شکر مایع خرما در صنایع غذایی برای تولید کیک، بیسکویت، مربا، نوشیدنی و همچنین به عنوان شیرین کننده استفاده می شود [۱۳]. مراحل اصلی برای به دست آوردن محصولات مایع مبتنی بر خرما، استخراج شیره خرما، شفاف سازی و تغلیظ آن است پژوهشگران فراوانی بر تولید شکر مایع از خرما متمرکز شده اند [۶، ۸، ۹، ۱۴]. از طرفی گروه های رنگی، محصولات تجزیه کننده قندهای احیاکننده، ملانوییدین ها و کمپلکس های پلی فنلی آهن در رنگ و تیرگی شربت خرما سهیم می باشند. بر این اساس تاکنون از روش های مرسوم شفاف سازی و رنگبری مانند آهک، رزین، کربن فعال برای شفاف سازی شربت خرما استفاده شده است که با مشکلات نظیر هزینه بالا و انرژی بر بودن، مصرف بالای آب، تخلیه پسماند و آلودگی زیست محیطی مواجه اند که بر کارآمدی و راندمان آنها بسیار تأثیرگذار است [۲]. امروزه تحقیقات گسترده ای در زمینه به کارگیری فرایندهای غشایی به عنوان روش مناسب با نیاز سرمایه گذاری پایین و انرژی مصرفی نسبتاً کم در تغلیظ شربت میوه ها صورت پذیرفته است [۲۹]. بر این اساس فرایند غشایی فرآپالایش به دلیل قابلیت های جداسازی منحصربه فرد، توان عملیاتی بالا، مصرف انرژی کم، به تدریج به تکنیک جداسازی کارآمد برای خالص سازی، تصفیه و تغلیظ شربت های مختلف از قبیل عصاره چغندر قند خام نیمه شفاف شده، عصاره نیشکر و شربت خرما و جداسازی درشت مولکول های زیستی مانند پروتئین ها، پلی ساکاریدها و غیره تبدیل شده اند [۵، ۲۳].

با این حال، مشکل اصلی مرتبط با فرآیند جداسازی مبتنی بر غشا، کاهش شار تراوش یافته در طول عملیات به دلیل قطبش غلظتی و رسوب غشا است. قطبش غلظتی، تجمع

سرعت جریان و دما خوراک در فرایند شفاف‌سازی غشایی فراپالایش با استفاده از غشا صفحه‌ای پلی سولفونی شربت خرما بر شار تراوش یافته و تشخیص مکانیسم غالب انسداد منافذ غشا با به‌کارگیری مدل‌های هرمیا در تفسیر حالات انسداد مورد بررسی قرار نگرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ مواد

شربت خرما به‌عنوان خوراک از کارخانه شهید خرما، شرکت مینو در شیراز تهیه شد. محلول خوراک از جریان شربت خرما، آنزیم زنی شده (آنزیم پکتیناز) نمونه‌برداری شد. برای شستشوی غشا، از سود (NaOH) و اسید هیدروکلریک با درجه آزمایشگاهی (تهیه شده از شرکت مرک آلمان) استفاده شد. همچنین برای تهیه محلول اسیدی و قلیایی از آب مقطر استفاده شد.

۲.۲ غشا فراپالایش

غشای صفحه‌ای پلی سولفونی دارای حد وزن مولکولی (cut-off) ۳۵۰۰-۳۰۰۰ دالتون از مرکز فناوری غشایی دانشگاه شریف تهیه شد. مشخصات غشای مورد استفاده در این پژوهش در ذیل ارائه شده است.

می‌کند. Eslami و همکاران در سال ۲۰۱۸ در بهینه‌سازی رنگ بری و شفاف‌سازی شیره خرما طی فرایند فراپالایش طی فرایند جریان متقاطع با به‌کارگیری غشا پلی اتر سولفون (MWCO = ۵ kD) نشان دادند سطوح بهینه بریکس خوراک، فشار انتقال غشایی (TMP) و زمان عملیات به ترتیب ۴۷/۱۳، ۸۲/۱۱ psi و ۳۰ دقیقه تعیین شد. در چنین شرایطی، ۸۰/۹۴٪ رنگ‌زدایی و ۹۷/۷۸٪ کاهش کدورت به دست آمد، در حالی که افت گلوکز و فروکتوز به ترتیب تنها ۳/۴۹٪ و ۹/۶۲٪ برآورد شد [۱۷]. Makhoulouf-Gafsi و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند فرایند فراپالایش بر محصولات واکنش مایلارد و خواص بیولوژیکی (فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و سیتوتوکسیک) نمونه‌های مختلف شربت‌های خرما تأثیرگذار است [۲۸]. فتحی و همکاران در سال ۲۰۱۳ در بررسی فشار انتقال غشایی و اندازه منافذ غشا پلی اتر سولفون به‌عنوان دو پارامتر مستقل در رنگ‌زدایی دو غلظت متفاوت از شربت خرما نشان دادند که اندازه منافذ غشایی ۱۵-۲۰ kD منجر به رنگ‌زدایی متوسط ۵۶٪ و کاهش کدورت ۹۰٪ شد و افزایش TMP از ۴۰ به ۱۵۰ منجر به کاهش ۴۸ و ۸۲٪ به ترتیب در رنگ‌زدایی و کدورت شد [۱۸].

تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه شفاف‌سازی و رنگ‌بری شربت خرما انجام شده است، اما در هیچ یک از تحقیقات انجام‌شده اثر شرایط عملیاتی شامل فشار،

جدول (۱) مشخصات غشا بکار رفته در پژوهش

Table 1. Specifications of the membrane used for this study

	Unit	Quantity
MWCO	kDa	3 - 3.5
Membrane pore size	nm	30-40
Initial flux*	L/h	3-20
Operating pressure	bar	1-6
Maximum temperature	°C	50
* With pure water at 25 °C, 1-6 bar		

۳.۲ سیستم آزمایشگاهی

در ۱۸ تیمار (مطابق جدول ۲ در دو سطح دما (۲۷ و ۴۰°C) و سه سطح فشار (۱، ۱/۵ و ۲ bar) و سه سطح دبی جریان خوراک (۱۰، ۱۵ و ۲۰ ml/s) از معادله (۱) محاسبه شد.

$$J_p = \frac{\Delta m}{\rho \times A \times t} \quad (1)$$

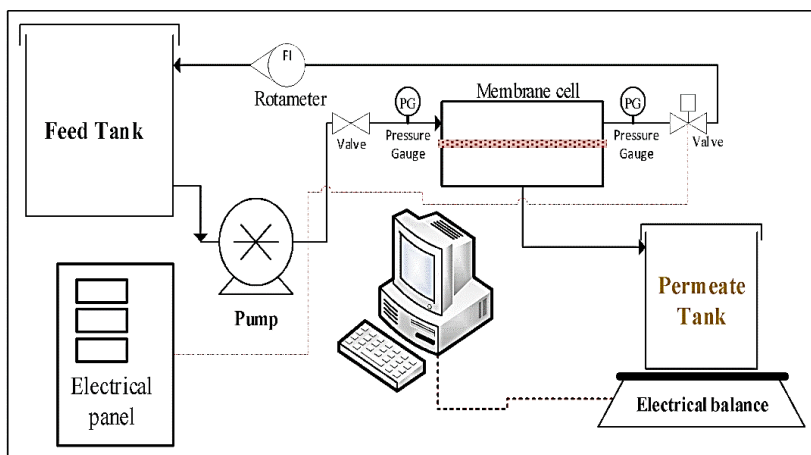
که در آن Δm (kg) تغییرات وزن در بازه زمانی معین است، ρ (kg/m³) دانسیته محلول تراوش یافته، A (m²) سطح مقطع مؤثر غشا مورد استفاده و t (s) بازه زمانی اندازه‌گیری و ثبت تغییرات وزن محلول تراوش یافته می‌باشد.

شماتیک دستگاه الترافیلتراسیون جریان متقاطع برای انجام آزمایشات در شکل (۱) نشان داده شده است. محلول خوراک از مخزن خوراک به وسیله یک پمپ جابجایی مثبت در سل غشایی با دو کانال مستطیلی (طول mm ۱۴۰، عرض mm ۶۹، عمق mm ۱۵) از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ به صورت مماس بر روی سطح غشاء با سطح مؤثر غشا ۰/۰۰۹۶۲۱ m² جریان یافت. سرعت جریان توسط یک روتامتر اندازه‌گیری شد. فشار داخل سل غشایی با استفاده از شیر برقی تنظیم و با فشارسنج اندازه‌گیری شد. محلول تراوش یافته از پایین سل غشایی جمع‌آوری و توسط ترازو توزین شد. بر این اساس شار تراوش یافته

جدول (۲) آزمون‌های طراحی شده در این تحقیق

Table 2. The designed tests in this study

Run	Pressure (bar)	Flow rate (mL/s)	Temp. (°C)
1	1	10	27
2	1	15	27
3	1	20	27
4	1.5	10	27
5	1.5	15	27
6	1.5	20	27
7	2	10	27
8	2	15	27
9	2	20	27
10	1	10	40
11	1	15	40
12	1	20	40
13	1.5	10	40
14	1.5	15	40
15	1.5	20	40
16	2	10	40
17	2	15	40
18	2	20	40



شکل (۱) شماتیک سامانه آزمایشگاهی فرایالایش مورد استفاده
Fig 1. Schematic diagram of the Lab-scale ultrafiltration setup used for this study

شربت خرما شامل مدل انسداد استاندارد، انسداد کامل، انسداد منافذ میانی و فیلتراسیون کیک استفاده شد. که معادلات مربوط به این چهار مدل هر میا در جدول (۳) ارائه شد [۱].

۴.۲ آنالیز مکانیسم غالب انسداد

در این پژوهش از چهار مدل هر میا جهت تفسیر پدیده انسداد غشا و پیش‌بینی رفتار انسداد در فیلتراسیون جریان متقاطع

جدول (۳) چهار مدل انسداد غشایی پیشنهادی هر میا.

Table 3. Four models of membrane fouling proposed by Hermia [1, 26]

State no.	Hermia's Model	Concerning equation	Schematic diagram
(A)	Standard pore blocking	$J^{-0.5} = J_0^{-0.5} + k_s t$	 Standard blocking
(B)	Complete pore blocking	$\ln J^{-1} = \ln J_0^{-1} + k_b t$	 Complete (pore plugging)
(C)	Intermediate pore blocking	$J^{-1} = J_0^{-1} + k_i t$	 Intermediate
(D)	Cake filtration	$J^{-2} = J_0^{-2} + k_c t$	 Cake filtration

۲۷ و ۴۰ °C و سه سطح فشار ۱، ۱/۵ و ۲ bar و دبی جریان در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mL/s انجام شد. نتایج شار تراوش یافته در نمودارهای شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در هر یک از نمودارهای ارائه شده در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش دما از ۲۷°C به ۴۰°C شار حجمی تراوش یافته در دبی و فشار ثابت خوراک به شدت افزایش یافته است. همچنین نتایج بیانگر تأثیر قابل ملاحظه افزایش فشار خوراک از ۱ به ۱/۵ bar بر شار تراوش یافته در شرایط مختلف دبی و دمای خوراک بوده است. در حالی که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در شار تراوش یافته با افزایش فشار خوراک از ۱/۵ به ۲ bar مشاهده نمی‌شود. با مقایسه شکل (۲- a, b, c) در هر یک از شرایط مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت قابل ملاحظه‌ای در شار تراوش یافته در دبی خوراک ۱۵ و ۲۰ mL/s وجود ندارد. در حالی که شار تراوش یافته در دبی خوراک ۱۰ mL/s در زمان‌های ابتدایی فرایند شفاف‌سازی غشایی نسبت به دو دبی دیگر خوراک بیشتر بوده است و پس از پایدار شدن جریان تفاوت قابل ملاحظه‌ای در شار تراوش یافته در دبی‌های مختلف خوراک مشاهده نمی‌شود. روند متفاوت تغییرات شار تراوش یافته در زمان‌های ابتدایی شروع فرایند فرآپالایش غشایی در دبی خوراک ۱۰ mL/s با ۱۵ و ۲۰ mL/s را می‌توان به تشکیل یک لایه کیک روی سطح غشاء در دبی‌های زیاد خوراک نسبت داد. بنابراین لایه کیک در دبی‌های زیاد خوراک بلافاصله در ابتدای فرآیند فرآپالایش غشایی تشکیل می‌شود که منجر به کاهش شار ابتدایی نفوذ می‌شود [۱۷].

از بین عوامل مورد بررسی دما بیشترین تأثیر و دبی جریان کمترین تأثیر را بر شار تراوش یافته در فرایند غشایی داشتند. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد، در فرایند غشایی در رنگبری و شفاف‌سازی قند مایع خرما زمانی که فشار و دبی ثابت بود و دمای محلول خوراک از ۲۷°C به ۴۰°C افزایش یافته است، شار تراوش یافته افزایش یافته است. این امر به احتمال زیاد به دلیل کاهش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش ضریب نفوذپذیری محلول خوراک رخ داده است [۳۲]. لازم به ذکر است که افزایش دما تأثیر بیشتری بر

۵.۲ خواص فیزیکوشیمیایی شربت خرما قبل و بعد از شفاف‌سازی

محتوای مواد جامد محلول برحسب درجه بریکس با استفاده از دستگاه رفراکتومتر (ATAGO, PAL-BX/RI, Japan) و کدورت برحسب واحد NTU توسط کدورت‌سنج دیجیتالی در دمای ۲۵°C اندازه‌گیری شد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی برحسب (IC50) با به‌کارگیری رادیکال آزاد ۲،۲-دی‌فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) مطابق روش [۳۸،۴۰] محاسبه شد. ترکیبات فنلی کل توسط روش Folin-Ciocalteu مطابق روش [۲۷، ۳۶] با اندازه‌گیری جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۶۵ نانومتر در دمای محیط با استفاده از طیف‌سنج (UV-Vis (Perkin-Elmer lambda) 25 ارزیابی شد. منحنی کالیبراسیون اسید گالیک به‌عنوان استاندارد مرجع رسم و نتایج به‌صورت میلی‌گرم معادل اسید گالیک (mg GAE) بر گرم وزن خشک نمونه‌ها بیان شد. پارامترهای رنگ‌سنجی شامل $L^*a^*b^*$ با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج (Hunter Lab مدل DP-9000 D25) اندازه‌گیری شد [۳۴]. محتوای پکتین هر نمونه با استخراج اتانول و سپس تبدیل آن به نمک کلسیم مطابق با [۳۳] اندازه‌گیری شد. سپس میزان پکتین هر نمونه برحسب درصد پکتینات کلسیم محاسبه شد.

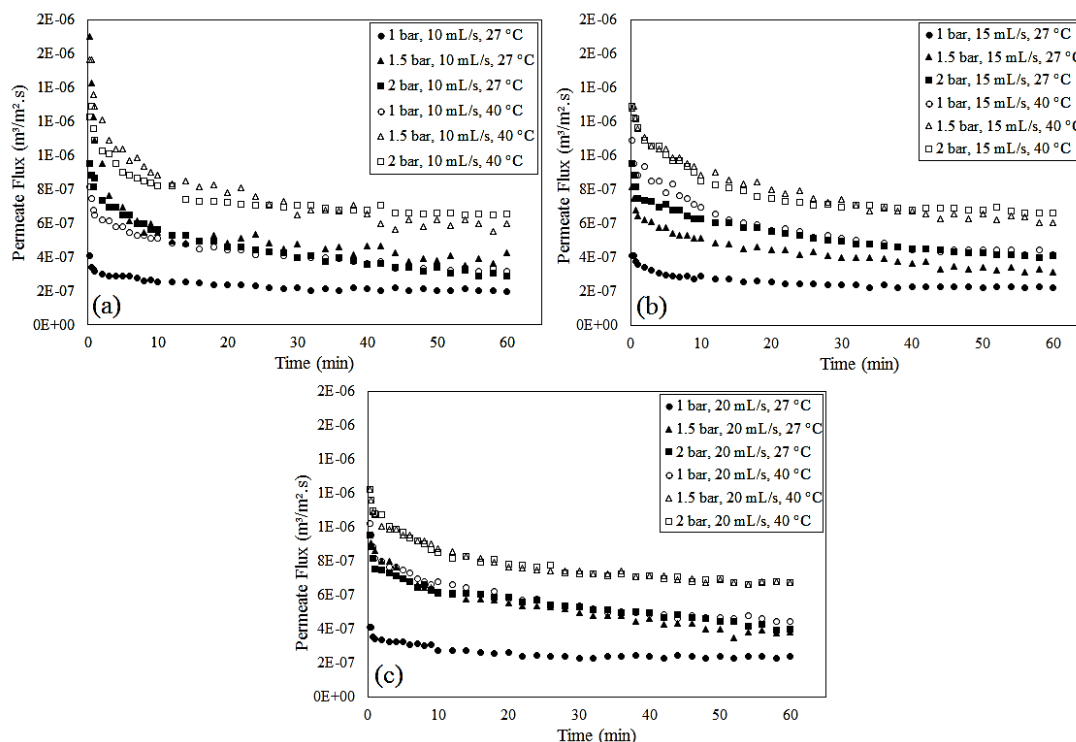
۳. نتایج و بحث

۱.۳ اثر شرایط عملیاتی بر شار تراوش یافته شیره خرما

پس از شفاف‌سازی شربت خرما در شرایط عملیاتی مختلف با فرایند فرآپالایش، با توجه به اینکه شرایط عملیاتی دما، فشار و دبی جریان می‌تواند از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر شار تراوش یافته و نیز میزان شفافیت حاصل شده باشد، لذا تأثیرپذیری مکانیسم انسداد غشا فرآپالایش بر اساس مدل‌های هرمیا نسبت به شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. تعداد ۱۸ حالت برای دو سطح دمای

درواقع افزایش دمای محلول خوراک در سیستم فرایزایش باعث کاهش قطبش غلظت و در نتیجه بهبود سطح شفافیت در شار نفوذی حاصل می‌شود [۲۲، ۳۰، ۳۱].

کاهش ویسکوزیته نسبت به افزایش حلالیت دارد، زیرا این رفتار باعث افزایش شفافیت ماده تراوش یافته همراه با افزایش شار آن می‌شود. این رفتار توسط محققین دیگر در بررسی حذف ترکیبات آلی از آب با اسمز معکوس تأیید شد.



شکل (۲) اثر فشار، دبی و دما خوراک بر شار تراوش یافته

Fig 2. Effect of feed pressure, flow rate, and temperature on the permeate flux

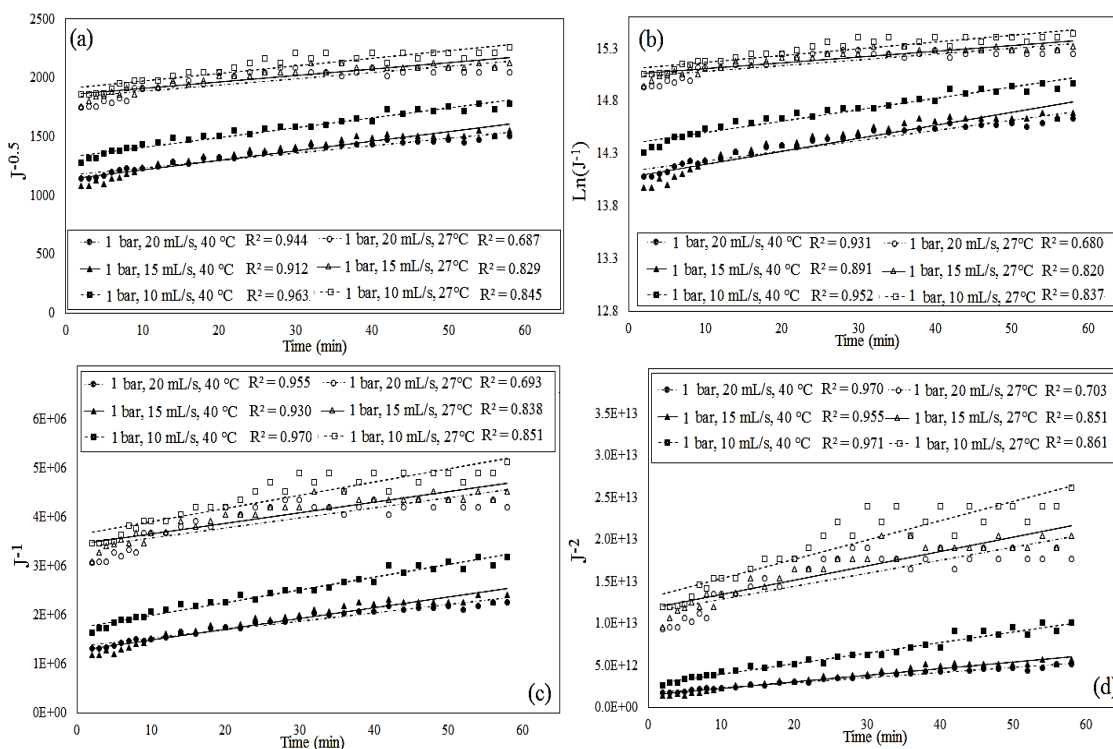
انسداد حالت استاندارد افزایش می‌یابد. در مورد انسداد کامل منافذ، ذرات املاح به‌طور قابل توجهی بزرگتر از اندازه منافذ غشا بوده و در نتیجه نهایتاً سطح غشا را مسدود می‌کنند. با این حال، در این مکانیسم انسداد ذرات املاح داخل منافذ را مسدود نمی‌کنند. برای حالت انسداد میانی منافذ، ذرات املاح و منافذ غشا دارای اندازه تقریباً مساوی هستند. در نتیجه، ذرات املاح به‌طور قابل توجهی منافذ را در این نوع مسدود نمی‌کنند و بر یکدیگر مستقر خواهند شد. بنابراین، سطح فعال غشا به تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در مدل فیلتراسیون کیک فرض می‌شود ذرات املاح اغلب نسبتاً بزرگتر از

۲.۳ مکانیسم غالب انسداد غشا فرایزایش در شفاف‌سازی شیر خرم

مکانیسم غالب انسداد در هر یک از شرایط مورد بررسی با به‌کارگیری نتایج حاصل از بررسی شار تراوش یافته در مدل‌های مختلف هرمیا (ارائه شده در جدول ۳) استفاده شد. در حالت انسداد استاندارد منافذ، ذرات املاحی که دارای اندازه کوچکتر از اندازه منافذ هستند در مسیر پیچشی منافذ گیر می‌کنند، در نتیجه با کاهش حجم منافذ منجر به کاهش حجم نفوذی و تراوش می‌شود که با افزایش پیچش منافذ غشا

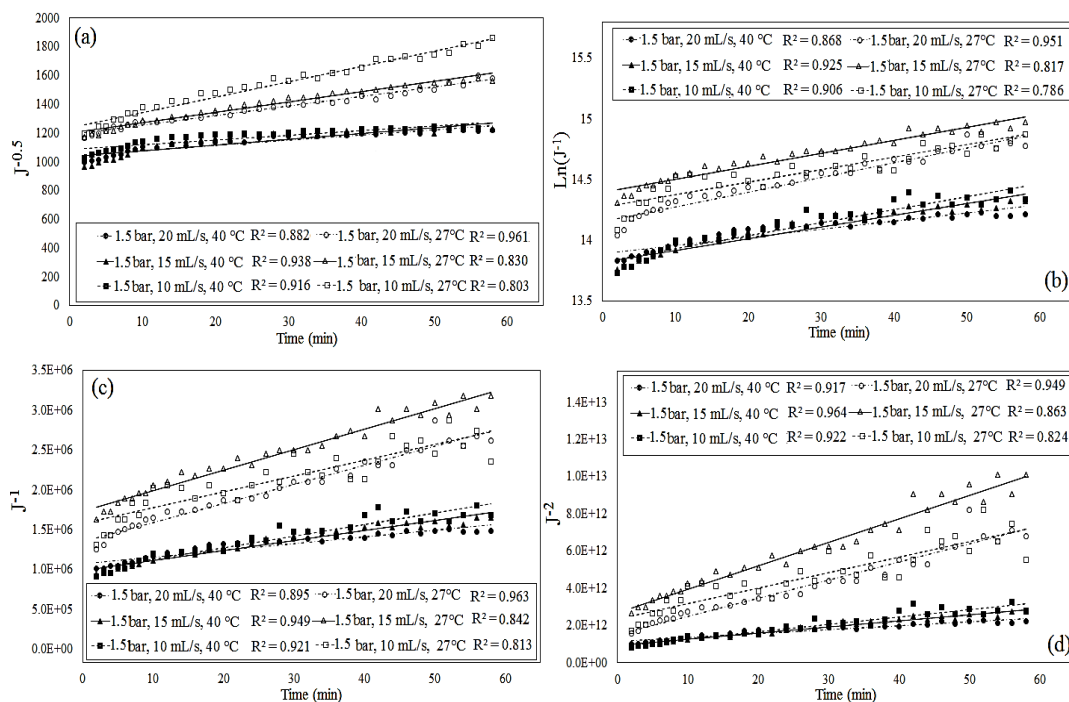
بدرین ضریب همبستگی (R^2) در هر یک از شرایط مورد ارزیابی به عدد یک نشان‌دهنده برازش بهتر انجام گرفته است. با توجه ضرایب همبستگی ارائه‌شده در شکل‌های (۳) و (۴) در شرایط مختلف دبی خوراک و دما و در فشار خوراک ۱ و ۱/۵ bar مکانیسم غالب انسداد فیلتراسیون کیک است. همچنین با توجه به ضرایب همبستگی در شرایط فشار خوراک ۱ و ۱/۵ bar، دبی خوراک ۱۰ mL/s و دمای ۴۰°C در نمودارهای J^{-1} و J^{-2} بر حسب زمان (شکل ۳ و ۴-c,d)، مکانیسم انسداد منافذ میانی و فیلتراسیون کیک با شدت مشابه به‌عنوان مکانیسم انسداد مشخص شد. این پدیده را می‌توان به کاهش ویسکوزیته خوراک در دمای ۴۰°C و ورود ذرات املاح به داخل منافذ غشا در دقایق اولیه شفاف‌سازی قبل از تشکیل لایه کیک با توجه به دبی ۱۰ mL/s و کاهش تدریجی سطح فعال غشا نسبت داد که در دبی‌های بیشتر خوراک با توجه به تشکیل سریع‌تر لایه کیک روی سطح غشا مشاهده نشده است.

منافذ هستند و یک لایه کیک روی سطح غشا تشکیل می‌شود. لایه کیک تشکیل‌شده به‌طور کلی متخلخل بوده و با گذشت زمان فرایند، ضخامت آن افزایش می‌یابد. بنابراین، شار تراوش یافته به دلیل مقاومت اضافه کاهش می‌یابد. بر اساس بهترین برازش با تفسیر مقدار ضریب همبستگی (R^2)، نمودار $J^{-0.5}$ بر حسب زمان (t)، منحنی با شیب خط k_s و عرض از مبدأ $J_0^{-0.5}$ بیانگر غالب بودن مدل انسداد استاندارد، نمودار $\ln J^{-1}$ بر حسب زمان با شیب خط k_b و عرض از مبدأ $\ln J_0^{-1}$ نشان‌دهنده مکانیسم غالب مدل انسداد کامل منافذ و نمودارهای J^{-1} و J^{-2} بر حسب زمان به ترتیب بیانگر غالب بودن مکانیسم مدل انسداد منافذ میانی و فیلتراسیون کیک با شیب‌های منحنی k_c و k_i و عرض از مبدأ J_0^{-1} و J_0^{-2} هستند. لذا مقادیر ضریب همبستگی (R^2) در هر یک از نمودارهای خطی برازش شده بر نتایج حاصل از شار تراوش یافته در سه فشار مورد ارزیابی در نمودار شکل‌های (۳، ۴، ۵) برای تعیین مکانیسم غالب انسداد مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است نزدیک‌تر



شکل (۳) نمودارهای انسداد بر طبق نظریه هریمیا در فشار ۱ bar

Fig 3. Fouling mechanism according to Hermia's theory at 1 bar

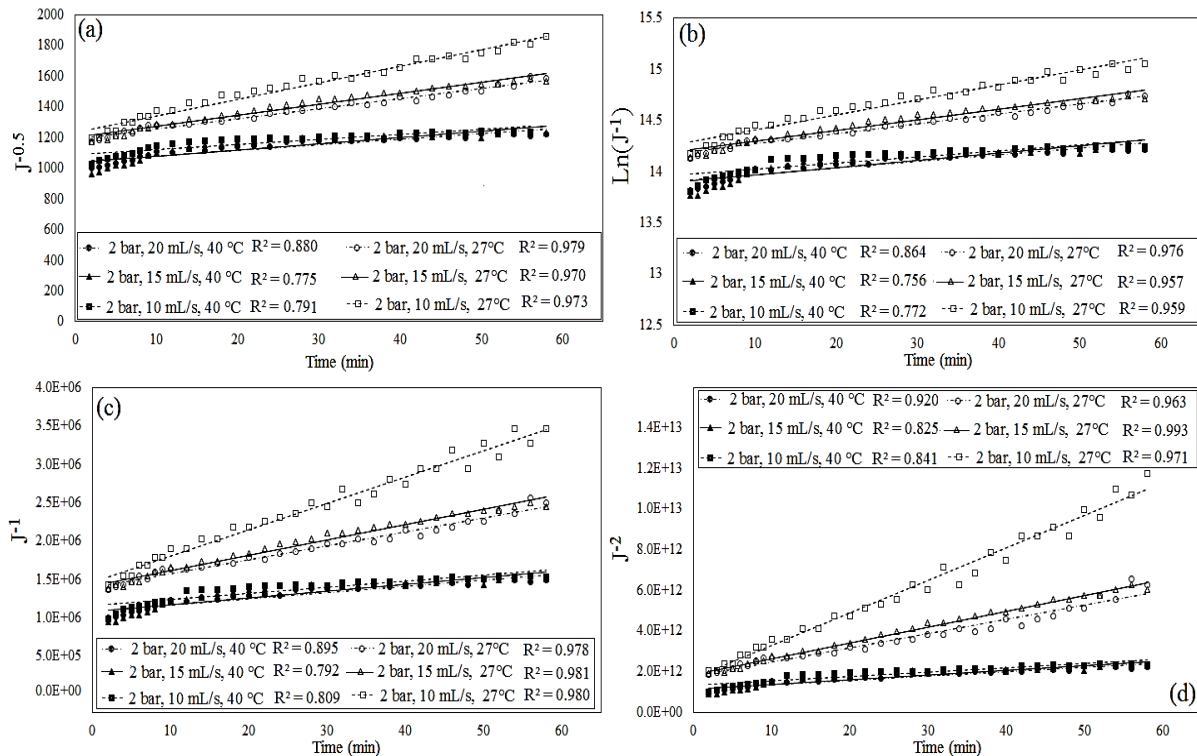


شکل (۴) نمودارهای انسداد بر طبق نظریه هرمتیا در فشار ۱/۵ bar

Fig 4. Fouling mechanism according to Hermia's theory at 1.5 bar

موجود در خوراک به داخل منافذ غشا و کاهش حجم منافذ در اثر تجمع ذرات در منافذ در نهایت انسداد کامل منافذ قبل از تشکیل لایه کیک بر روی سطح غشا را ایجاد کند. عدم ایجاد این مکانیسم در شرایط مشابه و دمای ۴۰°C را می‌توان به کاهش گرانیوی خوراک در دمای ۴۰°C نسبت داد. Sharma و همکاران (۲۰۱۲) در شفاف‌سازی عصاره استویا طی فرایند فراپالایش مقاومت غالب را مکانیسم تشکیل لایه کیک و کاهش شار تراوش یافته با افزایش فشار عملیاتی گزارش دادند [۳۵]. Yang و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی شفاف‌سازی ملاس با استفاده از فرایند غشایی فراپالایش مکانیسم تشکیل کیک را به‌عنوان مکانیسم غالب انسداد در فرایند غشایی معرفی کرده است [۴۴]. Firmán و همکاران (۲۰۱۵) در شفاف‌سازی آب لیمو با استفاده از سامانه غشایی فراپالایش مکانیسم اصلی انسداد غشا را مکانیسم تشکیل لایه کیک گزارش کردند [۱۹].

با توجه ضرایب همبستگی نمودار J^{-2} بر حسب زمان (شکل ۵-d) نسبت به سایر نمودارهای ارائه‌شده در شکل (۵) در شرایط مختلف دبی خوراک و دما و در فشار خوراک ۲ bar، مکانیسم غالب انسداد در کلیه حالات به جز حالت فشار خوراک ۲ bar، دبی خوراک ۲۰ mL/s و دمای ۲۷°C، فیلتراسیون کیک است. همچنین با توجه به نزدیک بودن ضرایب همبستگی در شرایط فشار خوراک ۲ bar، دبی خوراک ۲۰ mL/s و دمای ۲۷°C، در نمودارهای $J^{-0.5}$ ، J^{-1} و $\ln J^{-1}$ بر حسب زمان (شکل ۵-a,b,c)، مکانیسم انسداد غالب ترکیبی از انسداد منافذ میانی، کامل و استاندارد با شدت مشابه مشخص شد. این پدیده را می‌توان به ویسکوزیته بیشتر خوراک در دمای ۲۷°C نسبت به ۴۰°C و دبی و فشار بالا خوراک (۲ bar و ۲۰ mL/s) نسبت داد که می‌تواند طی اثرات هم‌افزایی ایجاد شده نیرو محرکه لازم برای انتقال ذرات دارای اندازه کوچک‌تر از اندازه منافذ



شکل (۵) نمودارهای انسداد بر طبق نظریه هریمیا در فشار ۲ bar

Fig 5. Fouling mechanism according to Hermia's theory at 2 bar

۳.۳ اثر فرایند فراپالایش بر خواص فیزیکوشیمیایی شربت خرما

فنل‌های دارای وزن مولکولی بالا موجود در خوراک در طی فرایند فراپالایش نسبت داد [۷]. کاهش مقدار ترکیبات فنلی کل شربت خرما طی فرایند غشایی فراپالایش توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است [۲۸]. حداکثر غلظت بازدارنده (IC50) معرف پتانسیل ماده برای مهار یک عملکرد بیوشیمیایی خاص (مانند اکسیداسیون) یا فعالیت بیولوژیکی (غیرفعال کردن، کند کردن یا تخریب میکروارگانیسم‌ها) است. با توجه به نتایج تفاوت معنی‌داری از نظر آماری در مقدار IC50 تراوش یافته و خوراک مشاهده نشد ($P>0.05$). کاهش اندک TSS (در خوراک و تراوه) پس از فرایند فراپالایش نشان می‌دهد که برخی از مواد جامد محلول خوراک با سایر ترکیبات

با توجه به نتایج بررسی شار تراوش یافته در شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی در این تحقیق، فشار ۱/۵ bar، دمای ۴۰°C و دبی ۱۰ ml/s به عنوان شرایط منتخب با بیشترین شار تراوش یافته فرایند فراپالایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از خواص فیزیکوشیمیایی تراوش یافته با خوراک مقایسه شد. نتایج حاصل از بررسی خواص فیزیکوشیمیایی شیره خرما قبل و پس از شفاف‌سازی با فرایند فراپالایش در جدول (۴) ارائه شده است. ترکیبات فنلی کل در فرایند غشایی شفاف‌سازی قند مایع خرما از ۵۷۱ (در محلول خوراک) به ۳۸۷ اسید گالیک در ۱۰۰ ml نمونه طی فرآیندهای فراپالایش کاهش یافت. این کاهش را می‌توان به حذف پلی

a* (قرمزی/ سبزی)، و b* (زرردی/ آبی) است. Gulec و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی شفاف‌سازی آب سیب با استفاده از غشاهای فرایالایش پلیمری افزایش پارامتر روشنایی L*، کاهش پارامتر قرمزی a* و زرردی b* را در طی فرایند فرایالایش گزارش کردند [۲۰]. بررسی مقدار پکتین در نمونه فرایالایش شده و نمونه خوراک نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار مقدار پکتین طی فرایند فرایالایش است. پکتین عامل ایجادکننده بیشترین کدورت در عصاره خرما است که بسته به نوع خرما مورد استفاده حاوی ۲ تا ۶٪ پکتین است [۳]. با توجه به اینکه کدورت رابطه مستقیمی با میزان پکتین موجود در شربت خرما دارد، مقایسه کدورت شربت خرما قبل و پس از شفاف‌سازی با فرایند فرایالایش می‌توان نتیجه گرفت که این فرایند تأثیر مثبتی بر شفافیت قند مایع خرما شفاف‌سازی شده و محتوای پکتین در تراوش یافته داشته است.

ترکیب شده و در ناتراوه باقی مانده‌اند. زیرا مواد جامدات محلول کل در تراوه کمتر از محلول خوراک بود. تحقیقات نشان داده است که بیش از ۹۰٪ از سطح مواد جامدات محلول کل اولیه آب میوه‌های تازه در شرایط فرایالایش مناسب به تراوش یافته منتقل می‌شود [۱۱]. Condi و همکاران (۲۰۱۷) در شفاف‌سازی آب انار با استفاده از غشاهای فرایالایش ۱۵٪ کاهش محتوای مواد جامد محلول آب انار شفاف شده طی فرایند فرایالایش گزارش کردند [۱۲]. مقایسه کدورت نمونه‌های تراوش یافته و خوراک نشان‌دهنده کاهش شدید کدورت شربت خرما طی فرایند شفاف‌سازی با به‌کارگیری فرایند فرایالایش بوده است. در تحقیقی مشابه در بررسی رنگ‌زدایی شیره خرما با فرایالایش، ۹۷/۷۸٪ کاهش کدورت گزارش شده است [۱۷]. نتایج بررسی پارامترهای رنگی نمونه شربت خرما قبل و پس از شفاف‌سازی با فرایند فرایالایش نشان‌دهنده افزایش پارامتر روشنایی L* و کاهش پارامترهای

جدول (۴) اثر شفاف‌سازی با فرایند فرایالایش بر خواص فیزیکی‌وشیمیایی شربت خرما

Table 4. Effect of clarification by ultrarefining process on the physicochemical properties of date syrup

Physicochemical & Microbiological Properties		Date syrup (Control)	Permeate of date syrup after UF	
1	TPC (mg GA/g)	571.10±15.32 ^a	387.96±9.74 ^b	
2	IC50	1.88±0.10 ^a	1.68±0.12 ^a	
3	TSS (°Brix)	11.55±0.18 ^a	10.59±0.18 ^b	
4	Turbidity (NTU)	259.50±16.31 ^a	42.95±3.31 ^b	
5	Color Parameters	L* (lightness)	28.77±2.66 ^b	48.11±2.47 ^a
		a* (red/green)	3.49±0.21 ^c	0.87±0.22 ^d
		b* (yellow/blue)	36.10±5.47 ^a	29.58±4.53 ^a
6	Pectin (%)	4.39±0.23 ^a	0.02±0.01 ^b	

*Different superscript letters in each row shows significant difference between the P< 0.05.

۴. نتیجه‌گیری

قابل ملاحظه این است که شفافیت‌های بالا در شار تراوش یافته بسیار پایین حاصل می‌شود که در فرایندهای صنعتی مقرون به صرفه نیست. با این وجود عملکرد فرایند فراپالایش نسبت به روش‌های معمولی تصفیه حرارتی و شیمیایی در شفاف‌سازی به‌طور قابل توجهی بهتر است. تجزیه و تحلیل رسوب برای همه آزمایش‌های شفاف‌سازی با استفاده از چهار مدل هرمیا برای شناسایی مکانیسم رسوب‌گیری مناسب انجام شد. در میان این چهار مدل، مکانیسم فیلتراسیون کیک به‌عنوان مکانیسم غالب انسداد غشا در طی فرایند شفاف‌سازی شربت خرما تعیین شد.

در این تحقیق، مدل‌های انسداد منافذ هرمیا برای ارزیابی رسوب‌گذاری غشایی در شفاف‌سازی شربت خرما با فرایند فراپالایش به کار گرفته شد. نتایج این بررسی نشان داد با تنظیم شرایط عملیاتی (شامل دما، فشار و دبی خوراک) در فرایند شفاف‌سازی شربت خرما با به‌کارگیری فراپالایش می‌توان علی‌رغم رسیدن به خواص فیزیکوشیمیایی مناسب محصول، به شفافیت مناسب همزمان با بیشینه کردن شار تراوش یافته دست یافت. اگر چه رسیدن به بیشینه شار تراوش یافته در طی فرایند شفاف‌سازی فراپالایش با انتخاب شرایط بهینه دما و فشار خوراک بر شفافیت محصول نهایی تأثیرگذار است، اما نکته

منابع

- doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.05.009>
- [8] Barakat, H. and Alfheaid, H.A. (2023). Date Palm Fruit (*Phoenix dactylifera*) and Its Promising Potential in Developing Functional Energy Bars: Review of Chemical, Nutritional, Functional, and Sensory Attributes. *Nutrients*, 15(9), p. 2134. doi: <https://doi.org/10.3390/nu15092134>
- [9] Castro-Muñoz, R., Correa-Delgado, M., Córdova-Almeida, R., Lara-Nava, D., Chávez-Muñoz, M., Velásquez-Chávez, V.F., Hernández-Torres, C.E., Gontarek-Castro, E., and Ahmad, M.Z. (2022). Natural sweeteners: Sources, extraction and current uses in foods and food industries. *Food Chem.*, 370, p. 130991. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130991>
- [10] Castro-Muñoz, R., Díaz-Montes, E., Cassano, A., and Gontarek, E. (2021). Membrane separation processes for the extraction and purification of steviol glycosides: an overview. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 61(13), p. 2152-2174. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1772717>
- [11] Castro-Muñoz, R., Fíla, V., Barragán-Huerta, B.E., Yáñez-Fernández, J., Piña-Rosas, J.A., and Arboleda-Mejía, J. (2018). Processing of Xocostle fruit (*Opuntia joconostle*) juice for improving its commercialization using membrane filtration. *J. Food Process. Preserv.*, 42(1), p. e13394. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.13394>
- [12] Conidi, C., Cassano, A., Caiazzo, F., and Drioli, E. (2017). Separation and purification of phenolic compounds from pomegranate juice by
- [1] Aghdam, M.A., Mirsaedghazi, H., Aboonajmi, M., and Kianmehr, M. (2015). Effect of ultrasound on different mechanisms of fouling during membrane clarification of pomegranate juice. *IFSET*, 30, p. 127-131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.05.008>
- [2] Ahdno, H. and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2017). Development of a sequenced enzymatically pre-treatment and filter pre-coating process to clarify date syrup. *FBP*, 101, p. 193-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.11.008>
- [3] Aleid, S.M., Date fruit processing and processed products. Dates: postharvest science, processing technology and health benefits, (2013): p. 171-202. doi: <https://doi.org/10.9755/ejfa.v26i11.18990>
- [4] Aleid, S.M. (2023). Date Food Products, in *Date Palm*, CABI GB, p. 486-519. doi: <https://doi.org/10.1079/9781800620209.0015>
- [5] Alsobh, A., Zin, M.M., Vatai, G., and Bánvölgyi, S. (2022). The Application of Membrane Technology in the Concentration and Purification of Plant Extracts: A Review. *Polytech., Chem. Eng.*, 66(3), p. 394-408. doi: <https://doi.org/10.3311/PPch.19487>
- [6] Ashraf, Z. and Hamidi-Esfahani, Z. (2011). Date and date processing: a review. *Food Rev. Int.*, 27(2), p. 101-133. doi: <https://doi.org/10.1080/87559129.2010.535231>
- [7] Bagci, P.O. (2014). Effective clarification of pomegranate juice: A comparative study of pretreatment methods and their influence on ultrafiltration flux. *J. Food Eng.*, 141, p. 58-64.

- ultrafiltration and nanofiltration membranes. *J. Food Eng.*, 195, p. 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.09.017>
- [13] Criscuoli, A. and Drioli, E. (2020). Date juice concentration by vacuum membrane distillation. *Sep. Purif. Technol.*, 251: p. 117301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117301>
- [14] Echeagaray, N., Gullón, B., Pateiro, M., Amarowicz, R., Misihairabgwi, J.M., and Lorenzo, J.M. (2023). Date fruit and its by-products as promising source of bioactive components: *Food Rev. Int.*, 39(3), p. 1411-1432. doi: <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1934003>
- [15] El Batouti, M., Alharby, N.F., and Elewa, M.M. (2021). Review of new approaches for fouling mitigation in membrane separation processes in water treatment applications. *Separations*, 9(1), p. 1. doi: <https://doi.org/10.3390/separations9010001>
- [16] Enevoldsen, A.D., Hansen, E.B., and Jonsson, G. (2007). Electro-ultrafiltration of industrial enzyme solutions. *J. Membr. Sci.*, 299(1-2), p. 28-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.04.021>
- [17] Eslami, B., Labbafi, M., and Khodaiyan, F. (2018). Date juice decolorized by ultra-filtration and its use with stevioside sweetener in beverage formulation. *J. Food Process Eng.*, 1(1), p. 39-46.
- [18] Fathi, G., Rezaei, K., Emam-Djomeh, Z., and Hamed, M. (2013). Decolorization of Iranian Date Syrup by Ultrafiltration. *J. Agric. Sci. Technol.*, 15: p. 1361-1371. URI: <http://hdl.handle.net/123456789/4180>
- [19] Firmán, L.R., Pagliero, C., Ochoa, N.A., and Marchese, J. (2015). PVDF/PMMA membranes for lemon juice clarification: fouling analysis. *Desalin. Water Treat.*, 55(5), p. 1167-1176. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.925836>
- [20] Gulec, H.A., Bagci, P.O., and Bagci, U. (2017). Clarification of apple juice using polymeric ultrafiltration membranes: A comparative evaluation of membrane fouling and juice quality. *Food Bioprocess Technol.*, 10, p. 875-885. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1871-x>
- [21] Jaffrin, M.Y. (2008). Dynamic shear-enhanced membrane filtration: a review of rotating disks, rotating membranes and vibrating systems. *J. Membr. Sci.*, 324(1-2), p. 7-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.06.050>
- [22] Jin, X., Jawor, A., Kim, S., and Hoek, E.M. (2009). Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes. *Desalination*, 239(1-3), p. 346-359. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.026>
- [23] Katibi, K.K., Mohd Nor, M.Z., Yunus, K.F.M., Jaafar, J., and Show, P.L. (2023). Strategies to Enhance the Membrane-Based Processing Performance for Fruit Juice Production: A Review. *Membranes*, 13(7), p. 679. doi: <https://doi.org/10.3390/membranes13070679>
- [24] Kim, Y., Lee, S., and Hong, S. (2012). Influence of solution chemistry on the surface heterogeneity of reverse osmosis membrane. *Desalin. Water Treat.*, 43(1-3), p. 308-313. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.672212>
- [25] Kürzl, C. and Kulozik, U. (2023). Comparison of the efficiency of pulsed flow membrane cleaning in hollow fibre (HFM) and spiral-wound microfiltration membranes (SWM). *FBP*, 139, p. 166-177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.03.012>
- [26] Ladewig, B.A.S. (2018) Fundamentals of membrane bioreactors: Materials, Systems and Membrane Fouling. Springer Singapore. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2014-8>
- [27] Lotfi, L., Kalbasi-Ashtari, A., Hamed, M., and Ghorbani, F. (2015). Effects of sulfur water extraction on anthocyanins properties of tepals in flower of saffron (*Crocus sativus* L.). *JFST*, 52(2), p. 813-821. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1058-z>
- [28] Makhlof-Gafsi, I., Krichen, F., Mansour, R.B., Mokni, A., Sila, A., Bougateg, A., Blecker, C., Attia, H., and Besbes, S. (2018). Ultrafiltration and thermal processing effects on Maillard reaction products and biological properties of date palm sap syrups (*Phoenix dactylifera* L.). *Food Chem.*, 256, p. 397-404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.145>
- [29] Mirsaeedghazi, H., Mousavi, S.M., Emam-jomeh, Z., Rezaei, K., Aroujalian, A., and Navidbakhsh, M. (2012). Comparison between ultrafiltration and microfiltration in the clarification of pomegranate juice. *J. Food Process Eng.*, 35(3), p. 424-436. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00598.x>
- [30] Nematzadeh, M., Samimi, A., Mohebbi-Kalhari, D., Shokrollahzadeh, S., and Bide, Y. (2022). Forward osmosis dewatering of seawater and pesticide contaminated effluents using the commercial fertilizers and zinc-nitrate blend draw solutions. *Sci. Total Environ.*, 820, p. 153376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153376>
- [31] Nematzadeh, M., Samimi, A., and Shokrollahzadeh, S. (2016). Application of

- sodium bicarbonate as draw solution in forward osmosis desalination: influence of temperature and linear flow velocity. *Desalin. Water Treat.*, 57(44), p. 20784-20791. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1111816>
- [32]Nematzadeh, M., Shokrollahzadeh, S., Samimi, A., and Mohebbi-Kalhari, D. (2020). Synergistic effect of amino-acids and metal salts as draw solutions to enhance the performance of fertilizer-drawn forward osmosis. *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 6(11), p. 3121-3131. doi: <https://doi.org/10.1039/D0EW00599A>
- [33]Ridley, B.L., O'Neill, M.A., and Mohnen, D. (2001). Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling. *Phytochemistry*, 57(6), p. 929-967. doi: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(01\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00113-3)
- [34]Seguí, L., Calabuig-Jiménez, L., Betoret, N., and Fito, P. (2015). Physicochemical and antioxidant properties of non-refined sugarcane alternatives to white sugar. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 50(12), p. 2579-2588. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12926>
- [35]Sharma, C., Mondal, S., Majumdar, G., and De, S. (2012). Clarification of Stevia extract by ultrafiltration: selection criteria of the membrane and effects of operating conditions. *FBP*, 90(3), p. 525-532. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.10.002>
- [36]Shavandi, M., Taghdir, M., Abbaszadeh, S., Sepandi, M., and Parastouei, K. (2020). Modeling the inactivation of *Bacillus cereus* by infrared radiation in paprika powder (*Capsicum annum*). *J. Food Saf.*, 40(4), p. e12797. doi: <https://doi.org/10.1111/jfs.12797>
- [37]Shen, Y. and Badireddy, A.R. (2021). A Critical Review on Electric Field-Assisted Membrane Processes: Implications for Fouling Control, Water Recovery, and Future Prospects. *Membranes*, 11(11), p. 820. doi: <https://doi.org/10.3390/membranes11110820>
- [38]Sridhar, K. and Charles, A.L. (2019). In vitro antioxidant activity of Kyoho grape extracts in DPPH and ABTS assays: Estimation methods for EC50 using advanced statistical programs. *Food Chem.*, 275, p. 41-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.040>
- [39]Tanudjaja, H.J., Anantharaman, A., Ng, A.Q.Q., Ma, Y., Tanis-Kanbur, M.B., Zydney, A.L., and Chew, J.W. (2022). A review of membrane fouling by proteins in ultrafiltration and microfiltration. *JWPE*, 50, p. 103294. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103294>
- [40]Tavakolipour, H., Kalbasi-Ashtari, A., and Mokhtarian, M. (2020). Effects of coating pistachio kernels with mixtures of whey protein and selected herbal plant extracts on growth inhibition of *Aspergillus flavus* and prevention of aflatoxin during storage. *J. Food Saf.*, 40(1), p. e12711. doi: <https://doi.org/10.1111/jfs.12711>
- [41]Uppu, A., Chaudhuri, A., and Das, S.P. (2019). Numerical modeling of particulate fouling and cake-enhanced concentration polarization in roto-dynamic reverse osmosis filtration systems. *Desalination*, 468, p. 114053. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.019>
- [42]Wang, Z., Dong, W., Hu, X., Sun, T., Wang, T., and Sun, Y. (2017). Low energy consumption vortex wave flow membrane bioreactor. *Water Sci. Technol.*, 76(9), p. 2465-2472. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.400>
- [43]Wavhal, D.S. and Fisher, E.R. (2005). Modification of polysulfone ultrafiltration membranes by CO₂ plasma treatment. *Desalination*, 172(2), p. 189-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.201>
- [44]Yang, Q., Luo, J., Guo, S., Hang, X., Chen, X., and Wan, Y. (2019). Threshold flux in concentration mode: Fouling control during clarification of molasses by ultrafiltration. *J. Membr. Sci.*, 586, p. 130-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.05.063>