

# Numerical Analysis of Transmembrane Pressure Changes in UF Systems by Changing the Geometry of the Inner Surface of Hollow Fibers

**B. Pirzadeh<sup>1</sup>, D. Mohebbi-Kalhari<sup>2</sup>, S. Ghotbi<sup>3</sup>, A. Abdollahi<sup>4</sup>**

1. Assist. Prof., Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran  
(Corresponding Author) [b\\_pirzadeh@eng.usb.ac.ir](mailto:b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir)
2. Assist. Prof., Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
3. MSc Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
4. PhD Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

(Received Apr. 22, 2017 Accepted Nov. 3, 2017)

#### To cite this article :

Pirzadeh, B., Mohebbi-Kalhari, D., Ghotbi, S., Abdollahi, A. 2018, "Numerical analysis of transmembrane pressure changes in UF systems by changing the geometry of the inner surface of hollow fibers" *Journal of Water and Wastewater*, 29 (5), 51-60. Doi: 10.22093/wwj. 2017.82805.2387. (In Persian)

## Abstract

Membrane processes are one of the most important separation methods in water and wastewater treatment processes. Hollow fiber membranes are used in many separation processes due to their high surface area to volume ratio. Since porosity and permeability of porous media depend on its geometric features, a change in the geometry leads to changes in these value and the performance of the system. In this study, a mathematical modeling was made for three fiber geometry categories; including circular, square and elliptical and the geometric features were calculated based on three strategies. In order to investigate the effect of geometry, a double porosity media was considered. Results showed that the ratio of surface area to volume of hollow fiber membranes and the axial permeability in square and elliptic geometries are usually higher than circular fibers and are increased to a maximum value of 27% and 63%, respectively. Also, in a strategy, equivalence of the radius of the inspirational circle of the new geometry with the inner radius of ordinary fibers was less than the circular fiber, which was a desired result and caused a decrease in energy consumption and operation cost of the system.

**Keywords:** Hollow Fibers, Inner Geometry, Surface Area, Filtration, Transmembrane Pressure.



## بررسی عددی تغییرات فشار انتقال غشایی در سیستم‌های اولترافیلتراسیون با تغییر در هندسه سطح داخلی ایاف توخالی

بهاره پیرزاده<sup>۱</sup>، داود محبی کلهری<sup>۲</sup>، سمیرا قطبی<sup>۳</sup>، اعظم عبدالهی<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
(نویسنده مسئول) b\_pirzadeh@eng.usb.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت ۹۶۲/۲ پذیرش ۹۶۸/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

پیرزاده، ب.، محبی کلهری، د.، قطبی، س. عبدالهی، ا.، ۱۳۹۷، "بررسی عددی تغییرات فشار انتقال غشایی در سیستم‌های اولترافیلتراسیون با تغییر در هندسه سطح داخلی ایاف توخالی" مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۵)، ۶۰-۵۱. Doi: 10.22093/wwj.2017.82805.2387

### چکیده

فرایندهای غشایی از جمله مهم‌ترین روش‌های جداسازی هستند که در تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. غشاهای ایاف توخالی به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بالا در بسیاری از فرایندهای جداسازی استفاده می‌شوند. با توجه به این که تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل به مشخصات هندسی آن بستگی دارد، تغییر در هندسه محیط، باعث تغییر در مقدار و عملکرد تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. در این پژوهش، مدل‌سازی ریاضی بر اساس هندسه ایاف، به سه دسته دایروی، مربعی و بیضوی تقسیم‌بندی شد و مشخصات هندسی آنها بر اساس سه استراتژی محاسبه شد. به منظور بررسی اثر مورد نظر، محیط شامل ایاف توخالی، به صورت یک محیط دومتخلخله در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که نسبت سطح به حجم غشای ایاف توخالی و نفوذپذیری محوری در هندسه‌های مربعی و بیضوی، از ایاف دایروی معمول بزرگ‌تر بوده و به ترتیب تا حداکثر ۲۷ و ۶۳ درصد افزایش یافته است. همچنین هم ارزی شعاع دایره محاطی هندسه جدید با شعاع داخلی ایاف معمولی برای همه ایاف، از دایره کمتر بود که نتیجه مطلوبی است و باعث کاهش انرژی مصرفی و هزینه بهره‌برداری از سیستم می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** ایاف توخالی، هندسه داخلی، سطح مقطع، فیلتراسیون، فشار انتقال غشایی

### ۱- مقدمه

ایران بر اساس طبقه‌بندی‌های موجود بر مبنای شاخص سرانه آب در جهان، در مرز شرایط تنش و کم‌آبی است. در شرایط کمبود آب، سه رویکرد اصلی در نظر گرفته می‌شوند: حفاظت منابع آب، بازیابی آب و نمک‌زدایی. با توجه به محدودیت‌هایی که در روش حفاظت از منابع آب وجود دارد، توجه به بازیابی آب و نمک‌زدایی بیشتر شده است. هدف از بازیابی آب استفاده مستقیم از فاضلاب است.

به منظور مواجهه با چالش‌های کمبود و زوال منابع آب طبیعی، نمک‌زدایی آب دریا به عنوان روشی جایگزین برای تأمین آب آشامیدنی مطرح شده است (Shahmirzadi and Hosseini, 2015). در این راستا استفاده از غشاها بهترین راه حل است. غشاهای پلیمری به دلیل مزایای بسیاری که دارند، برای مصارف و روش‌های مختلف از جمله میکرو و اولترافیلتراسیون به کار برده می‌شوند.

ایران بر اساس طبقه‌بندی‌های موجود بر مبنای شاخص سرانه آب در جهان، در مرز شرایط تنش و کم‌آبی است. در شرایط کمبود آب، سه رویکرد اصلی در نظر گرفته می‌شوند: حفاظت منابع آب، بازیابی آب و نمک‌زدایی. با توجه به محدودیت‌هایی که در روش حفاظت از منابع آب وجود دارد، توجه به بازیابی آب و نمک‌زدایی بیشتر شده است. هدف از بازیابی آب استفاده مستقیم از فاضلاب است.



با توجه به استفاده از سیستم‌های غشا الیاف توخالی در مصارف مختلف صنعتی از جمله تصفیه آب و فاضلاب، فهم دقیق‌تر عملکرد آن‌ها مورد توجه است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد یک سیستم غشا الیاف توخالی با دو شکل سطح داخلی غیردایروی بود. به منظور بررسی رفتار الیاف با هندسه‌های نام برده شده در طی فرایند جداسازی، در ابتدا پارامترهای هندسی مربوطه و سپس روابط فیزیکی تخلخل و نفوذپذیری با استفاده از سه استراتژی محاسبه و اثر آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

## ۲- روش کار

### ۲-۱- ساختارهای هندسی و مدل‌سازی

غشا مورد نظر، پلیمر پلی سولفون بود. سیال جریان یافته نیوتنی و غیرقابل تراکم با دانسیته و ویسکوزیته ثابت در نظر گرفته شد. دسته‌های غشا الیاف توخالی به صورت یک انتها بسته (U شکل) با حفره‌هایی به اندازه  $1/10$  تا  $1$  میکرومتر در روی سطح به کار گرفته شدند. از آنجایی که این سیستم مجموعه‌ای از هزاران الیاف است که همزمان در فرایند جداسازی نقش دارند، به منظور بررسی عملکرد سیستم، با استفاده از نرم‌افزار کامسول و متلب، از روش محیط دو متخلخله استفاده شد. در این روش فرض شده است که ماژول غشا الیاف توخالی از دو محیط متخلخل تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها دارای تخلخل و نفوذپذیری مختص خود می‌باشد (Khademi et al., 2012, Moradi, 2014). در جدول ۱ پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی ارائه شده است. برای مقایسه عملکرد الیاف، از پارامتر فشار انتقال غشایی (TMP) استفاده و رفتار این الیاف در فرایند جداسازی تحت تغییرات دبی ورودی به ماژول مورد بررسی قرار گرفت.

### جدول ۱- پارامترهای اولیه استفاده شده در مدل‌سازی

(Borsi and Lorain, 2012)

**Table 1.** Primary parameters used in modeling (Borsi and Lorain, 2012)

| Parameter                                     | Value |
|-----------------------------------------------|-------|
| Inner radius of the hollow fibers, $r_i$ (mm) | 0.15  |
| Length, L (mm)                                | 907.5 |
| Inflow, $Q_{in}$ (l/h)                        | 160   |
| Outer radius of the hollow fibers, $r_o$ (mm) | 0.35  |
| Number of fibers, N                           | 3000  |

(Wan et al., 2017). در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی بر روی سیستم‌های میکرو و اولترافیلتراسیون نشان داده شد که ترکیب این دو غشا می‌تواند به عنوان روشی کارآمد واقع شود (Shirzad et al., 2014).

مزیت غشا‌های الیاف توخالی نسبت به سایر غشاها این است که دارای نسبت سطح به حجم بزرگ‌تری هستند. در همه کاربردهایی که با این غشاها انجام می‌شوند، شکل الیاف، دایره‌ای استوانه‌ای است؛ اما این هندسه نه به دلیل بیشترین مقدار سطح در واحد حجم غشا، بلکه به دلیل روش ساخت موجود انتخاب شده است. می‌توان شکل خارجی یا داخلی دایروی فیبر را به یک شکل با مساحت سطح بهبود یافته تبدیل کرد (Nijdam et al., 2005).

همچنین یکی از راه‌های بهبود عملکرد غشا، کاهش انتخاب‌پذیری آن است که موجب کاهش مقاومت مکانیکی الیاف می‌شود که با تغییر در هندسه و افزایش سطح مؤثر غشا، می‌توان به این مهم دست یافت (Peters et al., 2008).

در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ مکانیسم جدیدی در رابطه با شکل سطح مقطع الیاف توخالی ارائه شد و چندین هندسه غیردایره‌ای (ستاره‌ای و غیره) با مکانیسم پیشنهادی تولید شد (Bonyadi et al., 2007). پژوهشی در سال ۲۰۱۱ در بررسی آزمایشگاهی نوعی از غشا با سطح بیرونی شیاردار انجام شد و الیافی با ۸۹ درصد افزایش در سطح تولید شد (Culfaz et al., 2014).

نتایج نشان داد که جریان عبوری از این الیاف در مقایسه با الیاف دایروی معمولی، افزایش یافته است. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ نوعی از الیاف چند سوراخه با هندسه بیرونی مثلی را تولید کردند که نسبت سطح ناحیه داخلی به مساحت سطح مقطع آن، از دایره بیشتر بود و نفوذپذیری آب خالص آن نسبت به الیاف دایره‌ای ۹۲ درصد افزایش و فشار عملی کاهش یافت (Wang et al., 2014).

ژو و همکاران در سال ۲۰۱۷، به منظور تقطیر آب دریا یک غشا الیاف توخالی دو لایه‌ای ساختند که مشخصات انتقال آب و خواص مکانیکی و فلاکس تراوشی آن نسبت به الیاف تک لایه بهتر بود (Zuo et al., 2017).

در بسیاری از صنایع، بخش اعظم قیمت تمام شده یک محصول، مربوط به هزینه‌های جداسازی و خالص‌سازی آن است.



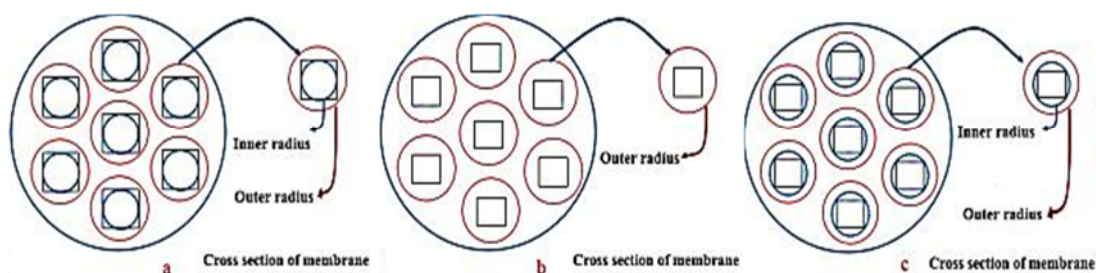


Fig. 1. Cross section of the hollow fiber membrane with square inner surface in s1, s2, s3

شکل ۱- سطح مقطع غشاء الیاف توخالی با هندسه سطح داخلی مربعی در s1, s2, s3

عدد رینولدز در فرایند جداسازی محاسبه شده و مقدار آن برابر با  $1/53$  به دست آمد. با توجه به عدد رینولدز محاسبه شده، می توان از معادله داری در محیط متخلخل استفاده کرد. قانون داری و معادله بقای جرم (Borsi and Lorain, 2012)، معادلات حاکم بر محیط متخلخل می باشند. برای مدل سازی فرایند گرفتگی غشا نیاز به تعریف آلودگی می باشد. معادلات استفاده شده در زیر آمده است. بقای جرم (Borsi and Lorain, 2012)

$$\nabla \cdot q_l = \Gamma, \nabla \cdot q_s = -\Gamma \quad (2)$$

داری

$$q_s = -\left(\frac{k_{s,x} P_s}{\mu X} e_x + \frac{k_{s,r} P_s}{\mu r} e_r\right), q_l = -\frac{k_l P_l}{\mu X} \quad (3)$$

نفوذپذیری در ناحیه داخلی الیاف (Bear and Braester, 1972, Happel, 1959)

$$K_l = \frac{Nr_1^4}{8R^2} \quad (4)$$

نفوذپذیری در ناحیه بیرونی الیاف (Bear and Braester, 1972, Happel, 1959)

$$K_{s,r} = K_{s,x} = \frac{r_0^2}{4\phi} \left(-\log\phi - \frac{3}{2} + 2\phi - \frac{1}{2}\phi^2\right) + \frac{r_0^2}{4\phi} \left(-\log\phi + \frac{\phi^2-1}{\phi^2+1}\right) \quad (5)$$

چشمه/چاهک، نرخ خروج جریان از ناحیه بیرونی به داخلی (Borsi and Lorain, 2012)

$$\Gamma = \frac{A_v}{\mu(R_m + R_c)} (P_s - P_l) \quad (6)$$

## ۲-۲- استراتژی ها و تعیین مشخصات هندسی الیاف

به منظور تعیین مشخصات هندسی سطح مقطع های مورد نظر، از سه استراتژی زیر استفاده شد

۱- هم ارزی شعاع دایره محیطی هندسه جدید با شعاع سطح داخلی الیاف معمولی با مقطع دایروی (s1)؛

۲- هم ارزی محیط هندسه جدید با محیط ناحیه داخلی الیاف معمولی با مقطع دایروی (s2)؛

۳- هم ارزی شعاع دایره محاطی هندسه جدید با شعاع سطح داخلی الیاف معمولی با مقطع دایروی (s3)؛

مطابق شکل ۱ a, b و c در استراتژی های ۱، ۲ و ۳ مربوط به هندسه مربعی است که سطح داخلی الیاف به هندسه های مورد نظر تغییر شکل یافته و شکل بیرونی الیاف به صورت دایروی باقی مانده است. در همه هندسه ها، جریان خوراک در ناحیه بیرونی و جریان نفوذکننده در ناحیه داخلی الیاف برقرار است. همچنین فرض شده که هر دو هندسه معرفی شده در هر سه استراتژی، دارای مشخصات غشایی مشابه (تخلخل، سایز و توزیع حفره) با الیاف دایروی معمول هستند. به منظور بررسی اثر مورد نظر، در ابتدا تخلخل و نفوذپذیری مربوط به هر یک از هندسه ها در هر استراتژی محاسبه و وارد مدل شد. برای محاسبه تخلخل از تعریف عمومی آن استفاده شد

$$\varepsilon = \frac{\text{Pore volume}}{\text{Total volume}} \quad (1)$$

برای محاسبه نفوذپذیری در ناحیه داخلی الیاف، از قانون جریان های Hagen-Poiseuille در محیط های لوله ای استفاده شد که معادلات مربوطه در جدول ۳ بیان شده است (Mortensen et al., 2005, Azzouz, 2004, Costa, 2006)



## ۳-۲- هندسه و شرایط مرزی

به منظور مدل سازی فرایند، از تقارن محوری حول محور طولی ماژول استفاده شده است. در شکل ۲ هندسه و مش محاسباتی میدان حل نشان داده شده است. حداکثر بعد المان ها ۴ میلی متر و حداقل بعد آنها ۰/۱۸ میلی متر است. مش محاسباتی به کار برده شده، از نوع مثلثی است.

به منظور حل مسئله، برای هر کدام از نواحی متخلخل، شرایط مرزی جداگانه ای در نظر گرفته شد. ورود و خروج جریان و خوراک تنها از طریق ورودی و خروجی ماژول انجام می شود. فرض شده که غلظت خوراک به ماژول ثابت است.

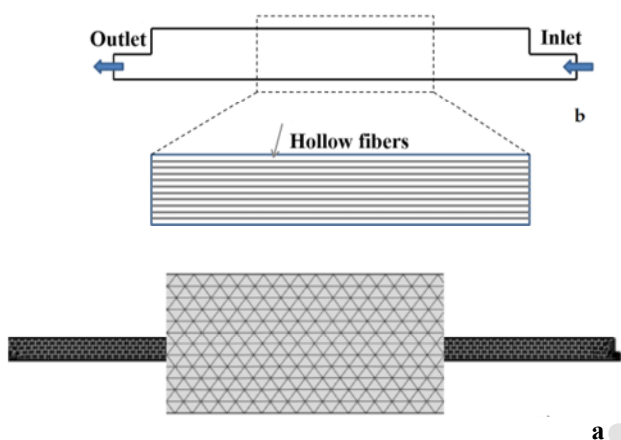


Fig. 2. a) Computing mesh, b) Module geometry  
شکل ۲- (a) مش محاسباتی، (b) هندسه ماژول

$$q_{in} \cdot n = -J \quad q_{s} \cdot n = J, \quad J = \frac{Q}{A}, \quad A = \pi R^2, \quad c = c_{in}$$

در جدول ۲ نسبت های سطح به حجم غشا (a) برای الیاف توخالی بر اساس ناحیه داخلی، در مقایسه با الیاف دایروی معمول آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود در استراتژی شماره ۳، همه هندسه ها دارای نسبت سطح به حجم بزرگ تری نسبت به دایره هستند و بیشترین مقدار این نسبت مربوط به مربع است. در واقع سطح داخلی ایجاد شده در این هندسه حدود ۲۷ درصد بزرگ تر از سطح دایره است و دارای نفوذپذیری بزرگ تری نسبت به دایره است. در جدول ۳، a و b به ترتیب ضلع مربع و قطر کوچک بیضی و قطر بزرگ بیضی است. شکل ۳ میزان نفوذپذیری محوری در ناحیه داخلی الیاف توخالی برای کلیه هندسه ها و هر سه استراتژی را

انتقال جرم (Borsi and Lorain, 2012, Bear and Braester 1972, Happel, 1959, Mayer and Hassanizadeh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s c) + \nabla \cdot (c q_s) = \nabla \cdot (\varepsilon_s D \nabla c) - \alpha \Gamma (\varepsilon_s c) \quad (7)$$

نرخ جرم یک انباشته شده در سیستم

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} = \alpha \Gamma (\varepsilon_s c) \quad (8)$$

مقاومت یک

$$R_c(c_m) = \frac{r_i}{\gamma_c} \log \left( 1 + \frac{1}{r_o} \left( \frac{R}{\sqrt{3} \rho_c N} \sqrt{c_m} \right) \right) \quad (9)$$

مقاومت غشا

$$R_m(c_p) = (r_o - r_i) \frac{4A_{filt}}{N_p \pi \left( \left( \frac{c_p}{\eta} \right) - d_0^2 \right)^2} \quad (10)$$

فشار انتقال غشایی

$$TMP = P_{in} - P_{out} \quad (11)$$

q دبی مخصوص (سرعت ظاهری) با واحد متر بر ثانیه،  $P_1$  و  $P_s$  به ترتیب فشار در ناحیه بیرونی و داخلی الیاف بر حسب پاسکال است. تخلخل و نفوذپذیری در این دو ناحیه در حین فرایند ثابت فرض شده است.

همچنین در ناحیه داخلی الیاف نفوذپذیری فقط در راستای طولی وجود دارد. در این روابط  $\Phi = 1 - \varepsilon$  است.  $R_m$  مقاومت غشاء و  $R_c$  مقاومت جرم انباشته شده روی سطح غشاء بر حسب یک بر متر است.  $A_v$  نسبت بین سطح فیلتر کننده و حجم فیلتر کننده است و به آن سطح مخصوص فیلتر کننده گفته می شود. N تعداد الیاف توخالی موجود در ماژول و R شعاع ماژول (m)،  $r_o$  شعاع خارجی الیاف توخالی (m) و  $r_i$  شعاع داخلی الیاف توخالی (m) می باشد. برای مدل سازی فرایند گرفتگی غشا نیاز به تعریف آلودگی می باشد. در اینجا برای این منظور فرض شده است که تنها یک نوع آلودگی با غلظت  $[c] = ML^{-3}$  در حجم آب، وجود دارد. جرم آلودگی انباشته شده (کیک) با نماد  $[c_m] = ML^{-3}$  و جرم آلودگی چسبیده در داخل ماتریس غشا و بدون واحد است. D ضریب انتشار هیدرودینامیکی و  $\alpha$  ضریب چسبندگی می باشد.



که طبق رابطه داری در محیط‌های متخلخل، انتظار می‌رود اختلاف فشار به‌طور معکوس افزایش یابد.

### ۳- نتایج و بحث

ابتدا، مدل با مشخصات ارائه شده در جدول ۱، کالیبره و صحت‌سنجی شد (شکل ۴). قسمت ابتدای منحنی مربوط به کالیبراسیون است که حدود ۱۵۰۰۰ ثانیه از صحت‌سنجی را به خود اختصاص داده است. از این زمان به بعد که مربوط به صحت‌سنجی است، تطابق مناسبی بین مدل و منحنی ارائه شده توسط Borsi & Lorain در سال ۲۰۱۲ برقرار است. به‌منظور بررسی تأثیر هندسه‌های غیردایروی بر روی عملکرد سیستم‌های اولترافیلتراسیون، و با توجه به اینکه اثر هندسه سطح داخلی بر روی تغییرات TMP به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است، مشخصات دو هندسه غیردایروی بر اساس سه استراتژی ارائه شده و نتایج حاصل از مقایسه TMP آن‌ها در طی فرایند با یکدیگر در شکل ۵ ارائه شده است.

در صنعت، افزایش TMP باعث افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری از این سیستم‌ها می‌شود (Howell et al., 2012, Zhu et al., 2009, News GE UF, 2016, Pearce 2008). بنابراین یافتن هندسه‌ای که بتواند میزان TMP کمتری را ایجاد کند در این پژوهش مورد توجه قرار گرفت.

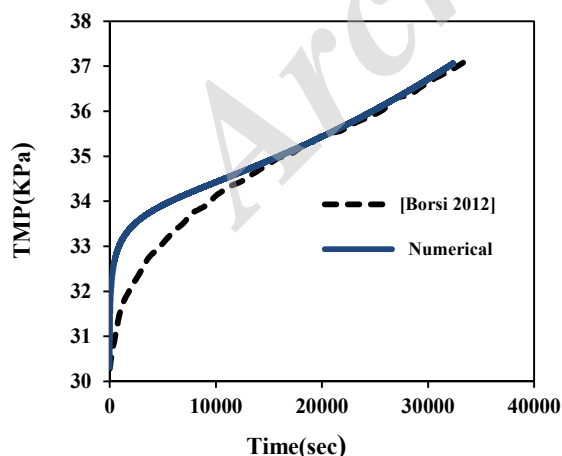


Fig. 4. Validation of numerical model  
شکل ۴- صحت‌سنجی مدل عددی

جدول ۲- نسبت سطح به حجم الیاف جدید نسبت به دایره

Table 2. Surface to volume ratio of hollow fibers

| Geometry | S3   | S2 | S1   |
|----------|------|----|------|
| Square   | 1.27 | 1  | 0.9  |
| Ellipse  | 1.16 | 1  | 0.79 |
| Circle   | 1    | 1  | 1    |

جدول ۳- روابط مربوط به تخلخل و نفوذپذیری

Tab. 3. Porosity and permeability equations

| Geometry | Porosity                               | Permeability                                      |
|----------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Square   | $\epsilon_1 = \frac{Na^2}{\pi R^2}$    | $K_1 = \frac{N(\pi^5 - 192.324)a^4}{12\pi^6 R^2}$ |
| Ellipse  | $\epsilon_1 = \frac{N\pi ab}{\pi R^2}$ | $K_1 = \frac{(ab)^2}{4(\frac{a}{b} + b/a)R^2}$    |
| Circle   | $\epsilon_1 = N(\frac{r_1}{R})^2$      | $K_1 = \frac{Nr_1^4}{8R^2}$                       |

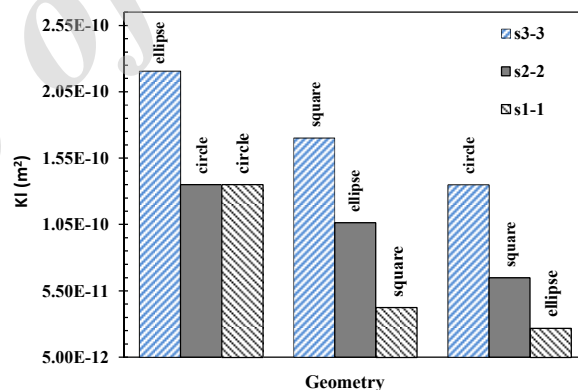


Fig. 3. Comparing permeability of the inner region hollow fiber in different strategies

شکل ۳- مقایسه نفوذپذیری محوری ناحیه داخلی الیاف توخالی در استراتژی‌های مختلف

نشان می‌دهد. بیشترین میزان این پارامتر مربوط به استراتژی شماره ۳ و کمترین میزان آن مربوط به استراتژی شماره ۱ می‌باشد. بیشترین میزان نفوذپذیری محوری به ترتیب مربوط به بیضی و در استراتژی شماره ۱ و کمترین میزان آن مربوط به بیضی و در استراتژی شماره ۳ می‌باشد. همچنین در هر هندسه، نفوذپذیری ناحیه داخلی الیاف به ترتیب از استراتژی ۳ به ۱ کاهش یافته است



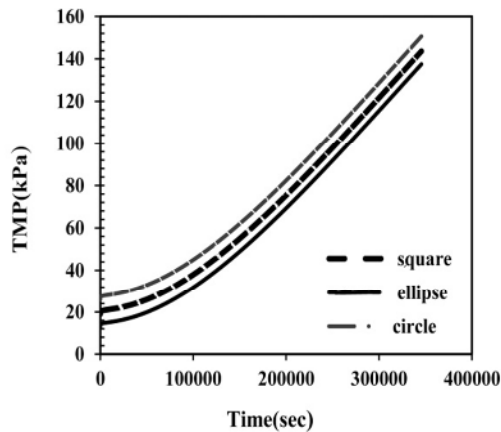


Fig. 7. TMP changes compared to circle in s3  
شکل ۷- تغییرات TMP در s3 در مقایسه با دایره

اختلاف فشار ایجاد شده در این الیاف از دایره کمتر باشد. شکل ۷ روند تغییرات TMP بر حسب زمان را برای استراتژی شماره ۳ برای تمام هندسه‌ها نشان می‌دهد که در همه هندسه‌ها مشابه می‌باشد. بیشترین مقدار این پارامتر مربوط به دایره و کمترین مقدار مربوط به بیضی می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت همه هندسه‌هایی که در این استراتژی قرار گرفته‌اند عملکرد مناسب‌تری نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، از بین این سه استراتژی، کمترین مقادیر TMP مربوط به استراتژی شماره ۳ و نسبت به دایره داشته‌اند. استفاده از این استراتژی باعث کاهش میزان اختلاف فشار در ماژول در طی فرایند شده و در نتیجه در مقایسه با دو استراتژی دیگر، می‌تواند کاهش هزینه بهره‌برداری از سیستم را به دنبال داشته باشد. بیشترین مقادیر مربوط به استراتژی

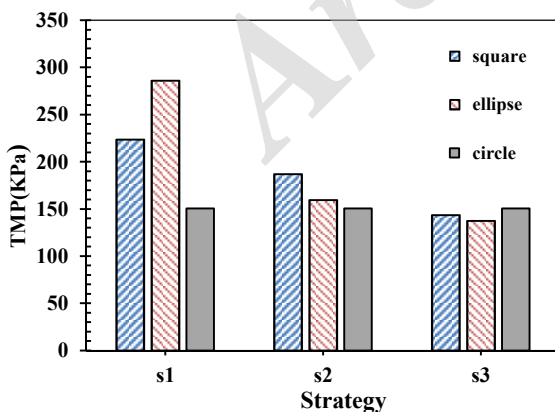


Fig. 8. Comparison of maximum TMP in all geometries in three strategies  
شکل ۸- مقایسه ماکسیمم TMP هندسه‌ها در سه استراتژی

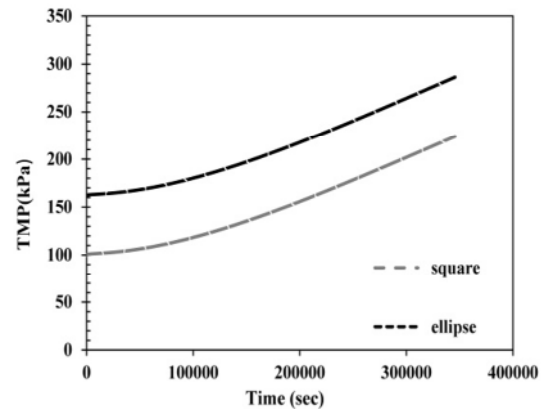


Fig. 5. TMP changes compared to circle in s1  
شکل ۵- تغییرات TMP در s1 در مقایسه با دایره

همانطور که در شکل ۵ مربوط به استراتژی شماره ۱ و شکل ۶ مربوط به استراتژی شماره ۲، مشاهده می‌شود بیشترین مقدار پارامتر TMP مربوط به بیضی در استراتژی ۱ و مربوط به مربع در استراتژی ۲ و کمترین مقدار مربوط به دایره (الیاف معمولی) در هر دو استراتژی می‌باشد؛ که به این دلیل است که میزان نفوذپذیری محوری در این هندسه‌ها در هر دو استراتژی از دایره کمتر بوده و لذا طبق رابطه داری در محیط متخلخل و طبق انتظار، مقدار اختلاف فشار ایجاد شده بیشتر است. بنابراین در این استراتژی، هزینه بهره‌برداری از سیستم‌هایی که از این الیاف استفاده کنند بیشتر خواهد بود. در صورتی که استفاده از الیاف با مقطع دایره هزینه انرژی کمتری را صرف می‌کند. نسبت سطح به حجم و نفوذپذیری محوری الیاف با هندسه مربعی و بیضی از دایره بزرگ‌تر است و طبق قانون داری در محیط متخلخل، انتظار می‌رود که مقدار

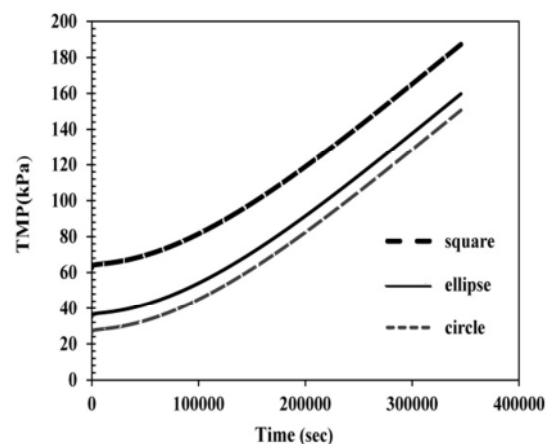


Fig. 6. TMP changes compared to circle in s2  
شکل ۶- تغییرات TMP در s2 در مقایسه با دایره

درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان دریافت که در شرایط یکسان، کاهش ۵۰ درصد دبی ورودی، لزوماً باعث کاهش یکسان مقدار TMP در هندسه‌های مختلف نمی‌شود.

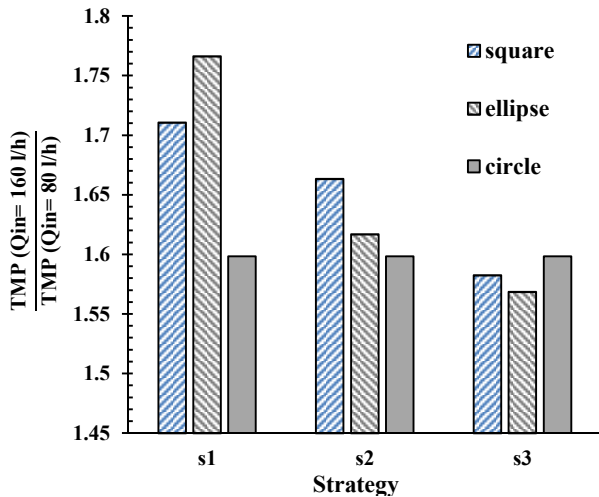


Fig. 10. TMP changes at 50% reduced inlet

شکل ۱۰- تغییرات TMP در اثر کاهش دبی ورودی به میزان ۵۰ درصد

#### ۴- نتیجه‌گیری

از آنجایی که تغییر در هندسه سطح داخلی الیاف تو خالی و اثر آن بر تغییرات TMP به ندرت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، در این پژوهش مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی مزایای تغییر در هندسه سطح داخلی الیاف تو خالی که در روش اولترافیلتراسیون برای تصفیه آب و فاضلاب به کار می‌روند، انجام شده است. استفاده از استراتژی‌های مختلف، به منظور محاسبه پارامترهای هندسی الیاف جدید نشان داد که نسبت سطح به حجم در همه موارد در مقایسه با الیاف معمولی با سطح مقطع دایروی در استراتژی شماره ۱ و ۲ کمتر و در استراتژی شماره ۳ بیشتر از آن می‌باشند و بیشترین مقدار این نسبت مربوط به الیاف با هندسه مربعی و با ۲۷ درصد افزایش و بیضی با ۱۶ درصد افزایش است. نفوذپذیری محوری در ناحیه داخلی الیاف تو خالی با هندسه بیضوی از هندسه مربعی و دایروی بیشتر است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای محاسبه پارامتر TMP با استفاده از استراتژی‌های مختلف در زیر بیان شده است

$$TMP_{\text{ellipse}} > TMP_{\text{square}} > TMP_{\text{circle}} \quad \text{استراتژی شماره ۱}$$

شماره ۱ می‌باشد. در بین همه مقادیر نشان داده شده، هندسه با مقطع بیضی در استراتژی شماره ۱ دارای بیشترین مقدار TMP و در استراتژی شماره ۳ دارای کمترین مقدار می‌باشد. شکل ۹ نسبت سطح به حجم غشا (a) را در برابر اختلاف TMP با دایره را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف، مربوط به بیضی است. بنابراین افزایش نسبت سطح داخلی به حجم، باعث کاهش TMP در هر هندسه نسبت به حالت دایروی شده است.

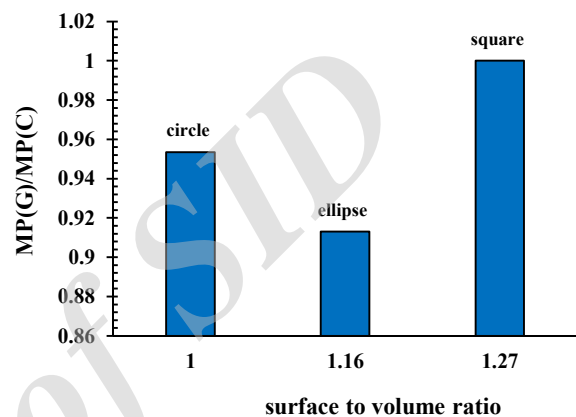


Fig. 9. TMP and surface to volume ratio compared to circle in s3

شکل ۹- مقایسه TMP و نسبت سطح به حجم الیاف نسبت به دایره در s3

#### ۳-۱- بررسی تأثیر تغییرات دبی بر روی TMP برای الیاف با هندسه‌های مختلف

از آنجایی که دبی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد ماژول‌های غشای الیاف تو خالی می‌باشند، در این پژوهش به بررسی اثر آن پرداخته شد. به منظور بررسی اثر این پارامتر، مقدار دبی به نصف کاهش یافته و TMP متناظر با آن محاسبه شد. با توجه به شکل ۱۰ کاهش دبی به دلیل کاهش سرعت ورودی (فلاکس ورودی)، باعث کاهش TMP در همه استراتژی‌ها و در همه هندسه‌ها می‌شود. بر خلاف آنچه که انتظار می‌رفت، تغییرات مشاهده شده برای همه هندسه‌ها به یک میزان نبوده و همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، بیشترین کاهش نسبت TMP در اثر کاهش نسبت دبی ورودی به میزان ۵۰ درصد در شرایط یکسان، مربوط به بیضی در استراتژی شماره ۱ به میزان ۷۷ درصد و کمترین کاهش مربوط به بیضی در استراتژی شماره ۳ و به میزان حدود ۵۷





آن‌ها است. با توجه به قانون جریان داریسی در محیط متخلخل، افزایش نفوذپذیری، باید باعث کاهش افت فشار در محیط شود که در نتایج این پژوهش مشاهده شد. یکی از مهم‌ترین مزایای کاهش TMP در صنعت، کاهش مصرف انرژی و هزینه بهره‌برداری از ماژول است که امر بسیار مطلوبی است. نتایج نشان داد که استفاده از استراتژی شماره ۳ برای تولید لیافی با هندسه‌های معرفی شده باعث بهبود در روند جداسازی با کاهش در مقدار پارامتر TMP و افزایش در نسبت سطح به حجم غشا شده است و بنابراین در مقایسه با لیاف با سطح مقطع داخلی دایروی، عملکرد بهتری را نشان داده‌اند.

استراتژی شماره ۲  $TMP_{\text{square}} > TMP_{\text{ellipse}} > TMP_{\text{circle}}$

استراتژی شماره ۳  $TMP_{\text{circle}} > TMP_{\text{square}} > TMP_{\text{ellipse}}$

کاهش در دبی ورودی به ماژول با لیافی با هندسه‌های سطح مقطع معرفی شده، باعث تغییرات غیریکسان در TMP آن‌ها می‌شود به طوری که بیشترین کاهش مربوط به لیاف با هندسه سطح داخلی بیضوی در استراتژی شماره ۱ و به میزان ۷۷ درصد می‌باشد. تغییرات مربوط به TMP در هندسه‌های مختلف در استراتژی‌ها به علت تغییر در نسبت سطح به حجم لیاف و نفوذپذیری محوری

## References

- Azzouz, H. 2004. *The dependence of the cross-sectional shape on the hydraulic resistance of microchannels*, 3-Weeks Course Report, Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Denmark.
- Bear, J. & Braester, C. 1972. On the flow of two immiscible fluids in fractured porous media. *Developments in: Soil Science*, 2, 177-202.
- Bonyadi, S., Chung, T.S. & Krantz, W.B. 2007. Investigation of corrugation phenomenon in the inner contour of hollow fibers during the non-solvent induced phase-separation process. *Journal of Membrane Science*, 299(1), 200-210.
- Borsi, I. & Lorain, O. 2012. A space-averaged model for hollow fibre membranes filters. *Computers and Chemical Engineering*, 39, 65-74.
- Costa, A. 2006. Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption. *Geophysical Research Letters*, 33(2), doi: 10.1029/2005GL025134.
- Culfaz, P.Z., Wessling, M. & Lammertink, R.G.H. 2011. Fouling behavior of microstructured hollow fiber membranes in submerged and aerated filtrations. *Water Research*, 45(4), 1865-1871.
- Culfaz, P.Z., Wessling, M. & Lammertink, R.G.H. 2011. Hollow fiber ultrafiltration membranes with microstructured inner skin. *Journal of Membrane Science*, 369(1), 221-227.
- Happel, J. 1959. Viscous flow relative to arrays of cylinders. *AIChE Journal*, 5(2), 174-177.
- Howell, J., Sanchez, V. & Field, R.W. 2012. *Membranes in bioprocessing: Theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Khademi, R., Mirian, S. S. & Mohebbi-Kalhari, D. 2012. Investigation of effect of different parameters on caffeine separation from aqueous solution by hollow membrane fibers using computational fluid dynamics. *3<sup>rd</sup> Conference Separation Science and Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.* (In Persian)
- Mayer, A. & Hassanizadeh, S.M. 2005. *Soil and groundwater contamination: Nonaqueous phase liquids, principles and observations*, (Vol. 17), American Geophysical Union.
- Moradi, E. 2014. Numerical simulation of natural gas sweetening in a hollow-fiber membrane contactor. MSc Thesis, University of Sistan and Baluchestan, Iran. (In Persian)



- Mortensen, N.A., Okkels, F. & Bruus, H. 2005. Reexamination of Hagen-Poiseuille flow: Shape dependence of the hydraulic resistance in microchannels. *Physical Review E*, 71(5), 057301.
- News. 2016. GE UF modules reduce operating costs and increase energy efficiency. *Membrane Technology*, 9, 2-3.
- Nijdam, W., De Jong, J., Van Rijn, C.J.M., Visser, T., Versteeg, L., Kapantaidakis, G., et al. 2005. High performance micro-engineered hollow fiber membranes by smart spinneret design. *Journal of Membrane Science*, 256 (1), 209-215.
- Pearce, G.K. 2008. A cost optimization study of flux and fouling rate for UF in the water industry. *Water Science and Technology: Water Supply*, 8(1), 113-120.
- Peng, N., Widjojo, N., Sukitpaneenit, P., Teoh, M.M., Lipscomb, G.G., Chung, T.S. et al. 2012. Evolution of polymeric hollow fibers as sustainable technologies: Past, present, and future. *Progress in: Polymer Science*, 37(10), 1401-1424.
- Peters, A.M., Lammertink, R.G. & Wessling, M. 2008. Comparing flat and micro-patterned surfaces: Gas permeation and tensile stress measurements. *Journal of Membrane Science*, 320(1), 173-178.
- Shahmirzadi, M. & Hossini, S. 2015. Technical note: Environmental aspects of brine management in seawater desalination. *Journal of Water Research*, 10(3), 104-112. (In Persian)
- Shirzadi, N., Hassani, A.H., Torabian, A. & Javid, A. H. 2014. Evaluation of the MF/UF performance for the reuse of sand filter backwash water from drinking water treatment plants. *Journal of Water and Wastewater*, 26(2), 95-103. (In Persian)
- Wan, C.F., Yang, T., Lipscomb, G.G., Stookey, D.J. & Chung, T.S. 2017. Design and fabrication of hollow fiber membrane modules. *Journal of Membrane Science*, 538, 96-107.
- Wang, P., Luo, L. & Chung, T.S. 2014. Tri-bore ultra-filtration hollow fiber membranes with a novel triangle-shape outer geometry. *Journal of Membrane Science*, 452, 212-218.
- Zuo, J., Chung, T.S., O'Brien, G.S. & Kosar, W. 2017. Hydrophobic/hydrophilic PVDF/Ultem® dual-layer hollow fiber membranes with enhanced mechanical properties for vacuum membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 523, 103-110.
- Zhu, A., Christofides, P.D. & Cohen, Y. 2009. Energy consumption optimization of reverse osmosis membrane water desalination subject to feed salinity fluctuation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(21), 9581-9589.

