



## تحلیل هیدرودینامیک و انتقال جرم در کانال تغذیه پرشده با جداکننده ماژول اسمز معکوس

نعمت‌الله منصوری، مهدی مقیمی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۷-۰۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۱۸

### کلمات کلیدی:

اسمز معکوس  
جداکننده کانال تغذیه  
بهینه‌سازی  
هیدرودینامیک جریان  
انتقال جرم

**خلاصه:** جداکننده‌های کانال تغذیه باعث افزایش انتقال جرم و در نتیجه افزایش شار نفوذ حلال از دیواره غشا می‌گردند؛ اما از سوی مقابل باعث افزایش افت فشار در سیستم می‌شود. در این مطالعه هیدرودینامیک و انتقال جرم در یک کانال تغذیه پرشده با جداکننده در ماژول اسمز معکوس بررسی شده است. به این منظور از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی همراه با روش سطح پاسخ استفاده شده است. پارامترهای ورودی شامل متوسط سرعت ورودی جریان، زاویه حمله و زاویه بین‌رشته‌ای و پارامترهای خروجی شامل افت فشار در طول کانال و شار نفوذ آب از دیواره غشا می‌باشد. از فرآیند طراحی آزمایش‌ها و روش طراحی مکعب چندبعدی لاتین برای نمونه‌برداری و از مدل کریگینگ برای فرآیند پاسخ سطحی استفاده گردید. همچنین از الگوریتم ژنتیک و روش غربالگری برای پیدا کردن نقاط بهینه استفاده شد. نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی بر روی افت فشار و شار نفوذ آب نشان می‌دهد که سرعت ورودی تأثیرگذارترین پارامتر و زاویه حمله کمترین میزان تأثیرگذاری را دارا می‌باشد. هندسه بهینه با در نظر گرفتن مقادیر هر دو پارامتر خروجی (ساختار هندسی که منتج به کمترین میزان افت فشار و بیشترین مقدار شار نفوذ می‌گردد) به صورت زاویه حمله ۷۲/۷۴ درجه، زاویه بین‌رشته‌ای ۸۵/۱۹ درجه و متوسط سرعت ورودی ۰/۱۳ می‌باشد.

### ۱- مقدمه

مقاومت جریان و افزایش انتقال جرم پرداخته شده است. این پژوهش‌ها ابتدا بر شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک جریان [۱] و [۲] و انتقال جرم [۳] متمرکز بودند. در شبیه‌سازی دوبعدی به تأثیر پارامترهای طراحی در جداکننده‌های کانال تغذیه در پیکربندی‌های هندسی حفره، زیگزاگ و نردبانی مورد مطالعه قرار گرفته است [۴] و [۵]. به‌طور مثال جرادس و همکاران [۴] نشان دادند تنها افزایش عدد رینولدز برای کاهش قطبش غلظت در سراسر غشا موثر نیست بلکه کنترل ساختار جریان از طریق ساختار هندسی رشته‌ها نیز ضروری می‌باشد. همچنین آموکران و همکاران [۵] مشاهده کردند که مدل با پیکربندی زیگزاگ دارای افت فشار کمتر و متوسط ضریب انتقال جرم بیشتری است. اما با این حال شبیه‌سازی‌های دوبعدی به علت ناتوانی در مدل کردن ویژگی‌های کامل جداکننده‌ها مانند نقاط اتصال

از میان تمامی روش‌های شیرین‌سازی آب، روش اسمز معکوس با ماژول غشا ماریچی به صورت گسترده‌ای در حال حاضر استفاده می‌شود. نکته دارای اهمیت در این سیستم‌ها کاهش مصرف انرژی و افزایش میزان آب شیرین تولیدی است. در ماژول غشا ماریچی، جداکننده‌های کانال تغذیه باعث جدایی صفحات غشا می‌شود. این رشته‌ها باعث افزایش افت فشار جریان در کانال و در مقابل باعث بهبود فرآیند انتقال جرم در کانال می‌گردند.

مطالعات عددی بسیار زیادی برای شبیه‌سازی کانال‌های پرشده از جداکننده وجود دارند. در این مطالعات (شبیه‌سازی‌ها) بیشتر به مسئله طراحی مناسب ساختار هندسی جداکننده برای کاهش

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghimi@iust.ac.ir



رشته‌ها کارایی لازم را ندارند.

با افزایش قدرت محاسباتی، شبیه‌سازی‌های کانال‌های پرشده از جداکننده به‌صورت سه‌بعدی گسترش یافته است. کرودو و کومار [۶] به شبیه‌سازی سه‌بعدی کانال تغذیه پرشده از جداکننده‌های صنعتی برای محاسبه افت فشار و نرخ برش پرداختند و نشان دادند جداکننده‌هایی که قطر شعاعی برابر دارند در مقایسه با جداکننده‌های نامتقارن افت فشار بیشتری ایجاد می‌کنند. همچنین استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی در ابتدا بر شناخت رفتار سیال، شرایط مرزی و مقایسه حالت‌های مختلف هندسی جداکننده‌ها در کانال‌های پرشده از جداکننده مورد استفاده قرار می‌گرفت [۷ و ۸]. لی و همکاران [۹] با بررسی چهار پارامتر طراحی (نسبت فاصله دو رشته جداکننده، زاویه حمله، زاویه بین رشته‌ها و ضخامت رشته‌ها) و یک روند محاسباتی برای پیدا کردن نقطه بهینه با توجه به مقادیر انتقال جرم و مصرف انرژی مطالعه‌ای انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد زاویه حمله و زاویه بین‌رشته‌ای در افزایش جرم نقش مهمی دارند. تاثیر انحنا غشا بر عملکرد هیدرودینامیکی کانال‌های پرشده با جداکننده با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی توسط لی و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت؛ و نشان دادند تغییر قطر رشته‌های درونی و بیرونی برای متعادل‌سازی تنش برشی بین دیواره غشا درونی و بیرونی مناسب است. کاتسو و کارابلس [۱۱] با استفاده از یک مدل هندسی جدید که با اضافه کردن یک گوی در نقاط برخورد رشته‌ها به بررسی انتقال جرم و جریان در کانال تغذیه پرداختند. ویژگی کلیدی این پیکربندی، ایجاد نقاط تماس (یا کوچک‌ترین مناطق تماس) گره‌ها با غشا به‌صورت محدود به‌جای خطوط تماس ناشی از رشته‌ها است که باعث به حداقل رسیدن مناطق راکد جریان می‌شود. همانند این مدل اما با اتصال رشته‌ها به یک غلاف استوانه‌ای یک مدل هندسی جدید توسط سیرواتسان [۱۲] ایجاد شد. انقی و همکاران [۱۳] به مطالعه جریان در کانال تغذیه دارای جداکننده‌های با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ در رینولدزهای ۱۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ پرداختند. آن‌ها نشان دادند مناطق با قطبش غلظت زیاد منطبق با مناطق با سرعت پایین جریان و همچنین شار نفوذ پایین است. ژو و همکاران [۱۴] بیست مدل مختلف هندسی را با تغییر زاویه حمله و زاویه بین رشته‌ها در چهار نوع پیکربندی مختلف به وجود آوردند و هیدرودینامیک جریان و

میزان نفوذ از دیواره غشا را مورد ارزیابی قرار دادند.

لی و همکاران [۱۵] به مطالعه هیدرودینامیک جریان و انتقال جرم در کانال تغذیه همراه با جداکننده و بدون جداکننده پرداختند. آن‌ها در این شبیه‌سازی از دیواره غشا نفوذپذیر با پنج سلول برای بررسی بهتر رفتار جریان استفاده کردند و روابط بین سرعت جریان و افت فشار و همچنین بین عدد رینولدز و عدد شروود را در کانال‌های پرشده از جداکننده بیان کرده‌اند. الگوی هندسی آن‌ها از مقاله بوکس و همکاران [۱۶] گرفته‌شده است که به مدل‌سازی دقیق هندسه جداکننده پرداخته‌اند. آن‌ها به مطالعه پدیده رسوب‌گذاری در کانال تغذیه پرداخته‌اند. از این مدل هندسی جداکننده‌ها در این مطالعه نیز استفاده شده است. با توجه به موارد بررسی‌شده در مطالعات گذشته به مواردی از جمله در نظر نگرفتن شرایط فیزیکی دقیق‌تر (استفاده نکردن از هندسه، ضرایب فیزیکی و ... به‌طوری‌که نتایج خروجی در یک مورد کاملا مشهود باشد و همچنین برای مقایسه حالت‌های مختلف قابل اعتماد) به مسئله در حالت واقعی، بررسی نکردن پارامترهای تاثیرگذار در یک فضای پیوسته (تمامی مطالعات صورت گرفته در یک فضای گسسته بوده است) و نهایتاً اعلام شرایط بهینه اشاره کرد.

با توجه به مطالعات انجام شده پیرامون فیزیک حاکم در کانال تغذیه پرشده از جداکننده، نیاز به مطالعات بیشتر در این حوزه با در نظر گرفتن پارامترهای فضای طراحی احساس می‌شود. استفاده از فرآیند مدل‌سازی بر اساس جانشینی می‌تواند به کاهش هزینه‌های مربوط به شبیه‌سازی عددی بیانجامد. همچنین استفاده از مدل‌سازی بر اساس جانشینی در شناخت تاثیر پارامترها و آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی سیستم نیز می‌تواند راهگشا باشد [۱۷ و ۱۸]. باکس و هانتز [۱۹] یک ابزار آماری را ارائه دادند که به روش پاسخ سطحی معروف است که به ارزیابی چند پارامتر طراحی در یک فضای طراحی می‌پردازد. به‌طور مثال بلاری و همکاران [۲۰] به ارزیابی روش‌های جانشینی پرداختند و دو روش مدل‌سازی چندجمله‌ای مرتبه دو و کریگینگ را در مسائل بهینه‌سازی توربوماشین‌ها مقایسه کردند. همچنین سوفوتاسیو و همکاران [۲۱] با ترکیب شبیه‌سازی عددی و استفاده از روش سطح پاسخ توانستند پاسخ بهینه (مقدار طول و عرض یک پنجره) را در یک مسئله تهویه ساختمانی پیدا کنند. در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش

جدول ۱. مشخصات هندسی رشته‌های جداکننده در حالت پایه (A) رشته‌های نازک و (B) رشته ضخیم

Table 1. Geometry of spacer filaments in base case (A) Thin filaments and (B) Thick filaments

| نمونه ۲             |                     | نمونه ۱             |                     |                             |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| B ( $\mu\text{m}$ ) | A ( $\mu\text{m}$ ) | B ( $\mu\text{m}$ ) | A ( $\mu\text{m}$ ) |                             |
| ۲۹۹                 | ۹۸۳                 | ۸۷۷                 | ۸۶۲                 | $L_1$                       |
| ۱۳۲                 | ۵۵۷                 | ۷۴۰                 | ۵۹۵                 | $L_2$                       |
| ۴۱۷                 | ۳۵۸                 | ۵۹۵                 | ۷۶۷                 | $L_3$                       |
| ۱۰۳۶                | ۳۴۰                 | ۲۵۲                 | ۱۷۸                 | $L_4$                       |
| ۸۹۶                 | ۵۴۲                 | ۳۲۴                 | ۳۸۶                 | $L_5$                       |
| ۴۴۶                 | ۴۴۷                 | ۴۴۹                 | ۳۵۴                 | $D_1$                       |
| ۲۷۲                 | ۲۶۳                 | ۲۸۹                 | ۲۲۱                 | $D_2$                       |
| ۲۷۸۰                | ۲۷۸۰                | ۲۷۸۸                | ۲۷۸۸                | $L_{tot}$                   |
|                     | ۷۸۷                 |                     | ۷۱۱                 | $D_{tot}$ (ارتفاع کانال)    |
|                     | ۰/۸۹                |                     | ۰/۹                 | $\epsilon$ (تخلخل در کانال) |

کانال و جداکننده‌های استفاده شده در این کار همان‌طور که در شکل ۱ (الف) مشاهده می‌شود مبتنی بر بدلیو ۳۰-۱۴۰۰ است که به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود [۲۲]. هر سلول واحد از جداکننده در نمونه ۱ دارای ابعاد  $2/78 \times 2/78$  میلی‌متر و در نمونه ۲ دارای ابعاد  $2/788 \times 2/788$  میلی‌متر می‌باشند (جدول ۱) و همان‌طور که در شکل ۱ (ب) مشاهده می‌شود شامل دو رشته نازک و دو رشته ضخیم است. رشته‌ها با توجه به شکل ۱ (ج) از استوانه‌ها و مخروط ناقص‌هایی تشکیل شده که باعث کاهش مقاومت در برابر جریان می‌شود. مشخصات هندسی از مقاله بوکس و همکاران [۱۶] آورده شده است که با استفاده از استریو میکروسکوپ کالیبراسیون<sup>۲</sup> به‌دست آمده است.

برای محاسبه تخلخل ( $\epsilon$ ) و قطر هیدرولیکی ( $d_h$ ) از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود [۲۳ و ۲۴]:

$$\epsilon = \frac{V_{tot} - V_{sp}}{V_{tot}} \quad (1)$$

$$d_h = \frac{4 \times \text{volume occupied by fluid}}{\text{surface area of wetted walls}} \quad (2)$$

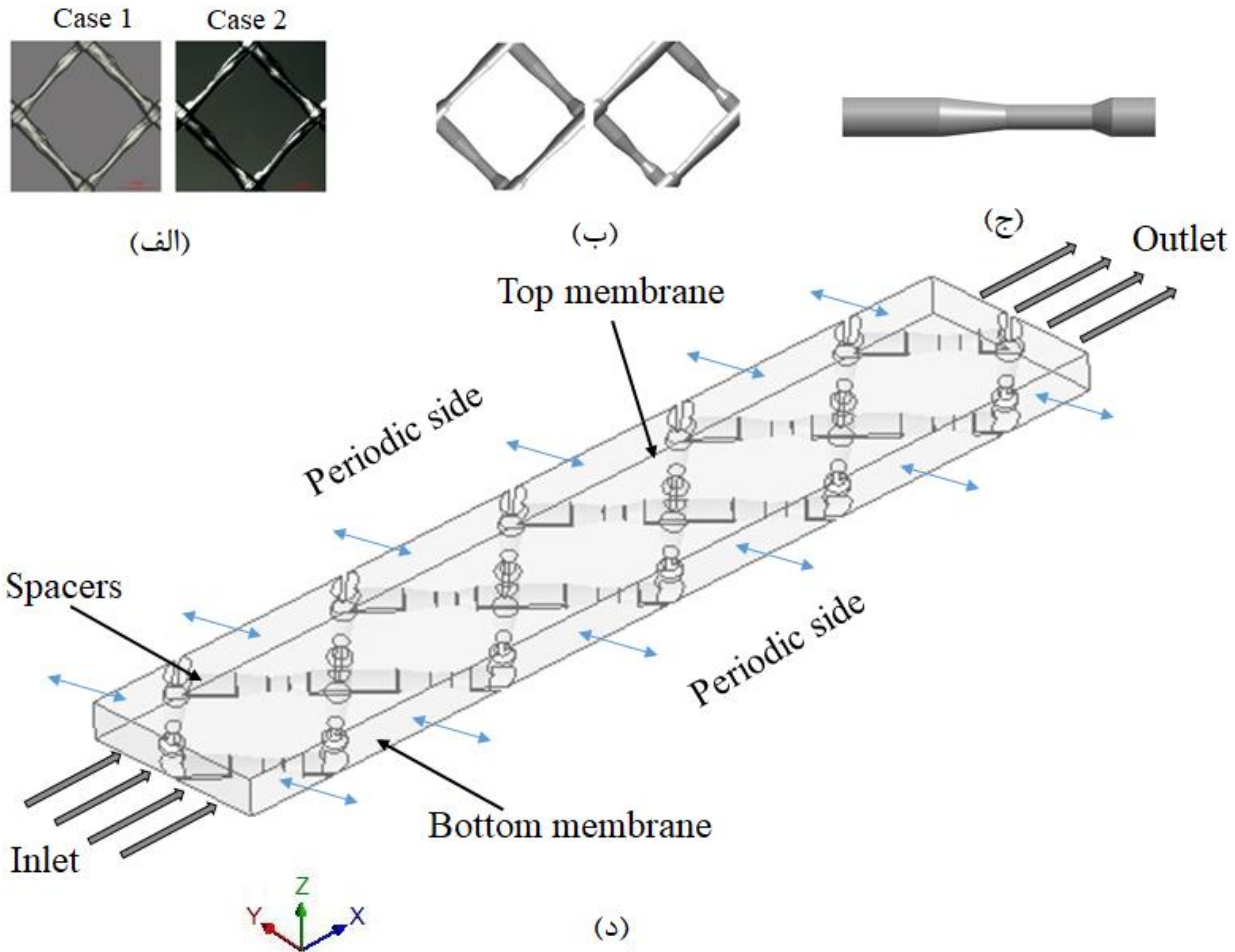
سطح پاسخ به بررسی تاثیر پارامترهای زاویه بین رشته‌ها، زاویه حمله جریان و سرعت ورودی جریان بر روی پدیده‌های انتقال جرم و جریان در یک فضای طراحی پیوسته پرداخته شد. همچنین از مدل هندسی شامل چند سلول واحد جداکننده استفاده شده است که این عمل باعث واضح بودن تغییرات فرآیندهای فیزیکی می‌گردد. در این کار با استفاده از غشا نفوذپذیر سعی بر واقعی‌تر شدن شرایط موجود در کانال تغذیه ماژول اسمز معکوس شد و همچنین می‌توان تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی را بر میزان نفوذپذیری دیواره غشا مشاهده کرد. در نهایت مقادیر پارامترهای خروجی در تمام فضای طراحی مشخص گردید و نقاط بهینه با توجه به مقدار نتایج خروجی در فضای طراحی و نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی بر روی پارامترهای خروجی معرفی گردید.

## ۲- روش‌شناسی

### ۲-۱- هندسه

در یک ماژول مارپیچی اسمز معکوس لایه‌های شامل کانال تغذیه، غشا و کانال نفوذ پشت سر یکدیگر قرار گرفته و تکرار می‌شوند. جریان در کانال تغذیه به‌صورت طولی وارد می‌شود و آب تصفیه‌شده از طریق کانال نفوذ وارد لوله مرکزی می‌شود. هندسه

1 BW30-400  
2 Calibrated Stereomicroscope



شکل ۱. نمای از بالای سلول جداکننده صنعتی، (الف) تصویر میکروسکوپی از جداکننده واقعی [۱۶]، (ب) هندسه مدل شده، (ج) هندسه بخشی از جداکننده و (د) محدوده محاسباتی

Fig. 1. Top view from the industrial cell spacer, (a) microscope picture of the real spacer [16], (b) the geometry of the model, (c) The part geometry of the spacer and (d) Computational domain

### ۲-۲- روند حل عددی و شرایط مرزی

در این شبیه‌سازی، سیال به صورت نیوتنی و جریان آرام و در حالت پایا در نظر گرفته می‌شود. فیزیک جریان با استفاده از معادلات حاکم پیوستگی، ناویر-استوکس و همچنین انتقال جرم (تحت روابط نفوذ-جابجایی) با استفاده از معادلات پیش‌رو بیان می‌گردد:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -PI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (D \nabla C) = u \cdot \nabla C \quad (6)$$

که  $u = (u, v, w)$  و  $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y, \partial / \partial z)$

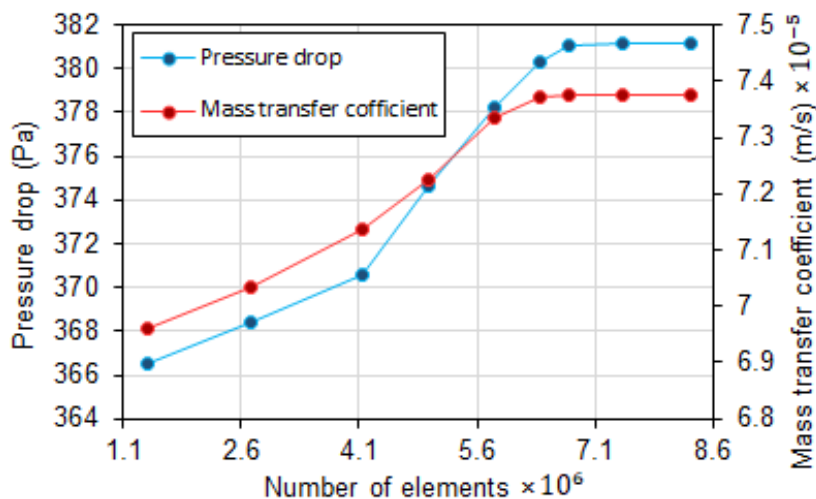
که  $V_{tot}$  بیانگر حجم کل کانال و  $V_{sp}$  بیانگر حجم جداکننده‌های موجود در کانال است. برای کانال‌های دارای جداکننده با توجه به این که حجم دربردارنده سیال شامل حجم کانال منتهی حجم رشته‌های موجود در کانال و همچنین مساحت سطوح خیس برابر مساحت سطح غشا به اضافه سطح رشته‌ها است. رابطه قطر هیدرولیکی به صورت زیر درمی‌آید:

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{2/h + (1-\varepsilon)S_{sp}/V_{sp}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $S_{sp}$  بیانگر سطح جداکننده موجود در کانال و  $h$  بیانگر ارتفاع کانال است.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی و شرایط مرزی  
Table 2. Parameters used in the simulation and boundary conditions

| منبع | مقدار                 | پارامتر                                     | علامت اختصاری |
|------|-----------------------|---|---------------|
| [۲۵] | $76/1 \times 10^{-6}$ | نفوذپذیری هیدرولیکی، <b>m/s/Pa</b>          | $L_p$         |
| [۲۵] | ۴۹۵۵                  | ضریب ونت هوف، <b>Pa/(mol/m<sup>3</sup>)</b> | $f_{os}$      |
| ---  | $14 \times 10^5$      | فشار ورودی، <b>Pa</b>                       | $P_0$         |
| [۲۶] | ۰/۰۴۱ - ۰/۱۶۳         | متوسط سرعت ورودی، <b>m/s</b>                | $u_0$         |
| ---  | ۲۷                    | غلظت نمک ورودی، <b>mol/m<sup>3</sup></b>    | $c_0$         |
| [۲۵] | $1/1 \times 10^5$     | فشار کانال نفوذ، <b>Pa</b>                  | $P_p$         |
| ---  | ۱۰۰۰                  | چگالی، <b>kg/m<sup>3</sup></b>              | $\rho$        |
| ---  | ۰/۰۰۱                 | لزجت، <b>Pa.s</b>                           | $\mu$         |



شکل ۲. تغییرات افت فشار و ضریب انتقال جرم بر حسب تعداد سلول

Fig. 2. Pressure drop and mass transfer coefficient versus the number of elements

جریان ورودی به صورت یک جریان توسعه یافته در نظر گرفته می شود. رابطه جریان توسعه یافته برای کانال های بسته به صورت رابطه (۷) می باشد:

$$u(z) = \frac{3}{2} u_0 \left[ 1 - \left( \frac{2z}{h} \right)^2 \right] \quad (7)$$

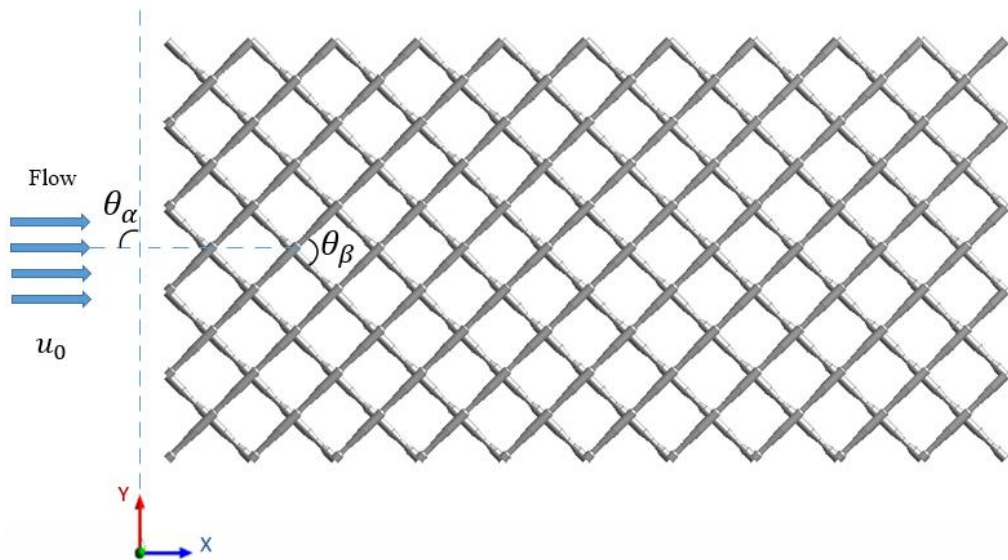
$u_0$  مقدار متوسط سرعت ورودی جریان،  $z$  ارتفاع از مرکز کانال و  $h$  ارتفاع کانال است. فشار تغذیه در ورودی دامنه محاسباتی برابر ۱۴ بار است و غلظت نمک ورودی<sup>۵</sup> برابر ۲۷ مول بر مترمکعب می باشد.

نشان دهنده بردار سرعت در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  است. و در رابطه (۶)  $D$ ، نفوذپذیری<sup>۱</sup> و  $C$  غلظت نمک است. برای نمک<sup>۲</sup> حل شده در آب، نفوذپذیری برابر  $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  است [۱۶]. فرآیند شبیه سازی به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار انسیس سی اف اکس<sup>۳</sup> انجام گرفته است.

شرایط مرزی با توجه به شرایط موجود در یک ماژول بدلیو ۳۰-۴۰۰ انتخاب می گردد. برای ورودی دامنه محاسباتی

- 1 Salt Diffusivity
- 2 NaCl
- 3 Ansys CFX 16.1
- 4 BW30-400

5 Salt Molar Concentration



شکل ۳. پارامترهای ورودی از نما از بالا رشته‌های جداکننده

Fig. 3. The input parameters in the view from the top of the spacer filaments

با استفاده از معادله داری شار نفوذ از غشا حدوداً برابر  $8/65 \times 10^5$  دست می‌آید. جداکننده‌های موجود در کانال نیز به صورت دیوار با شرط مرزی عدم لغزش در نظر گرفته می‌شود. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روابط بالا در جدول ۲ آورده شده است.

### ۳-۲- استقلال از شبکه

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در فرآیند استقلال از شبکه دو متغیر وابسته افت فشار در طول کانال تغذیه (رابطه (۱۰)) و ضریب انتقال جرم در طول صفحه غشا بالا برای جریان با سرعت ورودی  $0/163$  متر بر ثانیه برای نمونه ۱ مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به پیچیده بودن محدوده محاسباتی از شبکه‌بندی بدون سازمان استفاده گردید. همچنین در اطراف دیواره غشا بالا و پایین از هشت لایه مش لایه مرزی استفاده گردید.

بنابراین تعداد سلول مورد نظر ما در نمونه اولیه  $6/74$  میلیون سلول می‌باشد و برای هر نقطه طراحی در فرآیند مدل‌سازی بر اساس جانشینی تعداد سلول‌ها از  $7/8$  میلیون تا  $3/2$  میلیون متغیر بوده است. معیار همگرایی، تغییرات در هر دو پارامتر افت فشار و ضریب نفوذ جرمی به مقدار ۵ درصد بوده است.

### ۳- روش سطح پاسخ

با توجه به هزینه محاسباتی بالا، زمان‌بر بودن استفاده از روش‌های

برای خروجی دامنه محاسباتی از فشار استاتیکی صفر استفاده گردید. دیواره‌های کناری هم همان‌طور که در شکل ۱(د) آورده شده از لحاظ انتقال جریان و هم از لحاظ انتقال جرم به صورت پریودیک<sup>۱</sup> می‌باشد. دیواره‌های غشا بالا و پایین با شرط مرزی عدم لغزش و به‌عنوان دیواره‌های غشا دارای نفوذپذیری در نظر گرفته شده است و مقدار شار نفوذ آب از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$J_w = A(\Delta P_{memb} - \Delta \pi_{memb}) \quad (8)$$

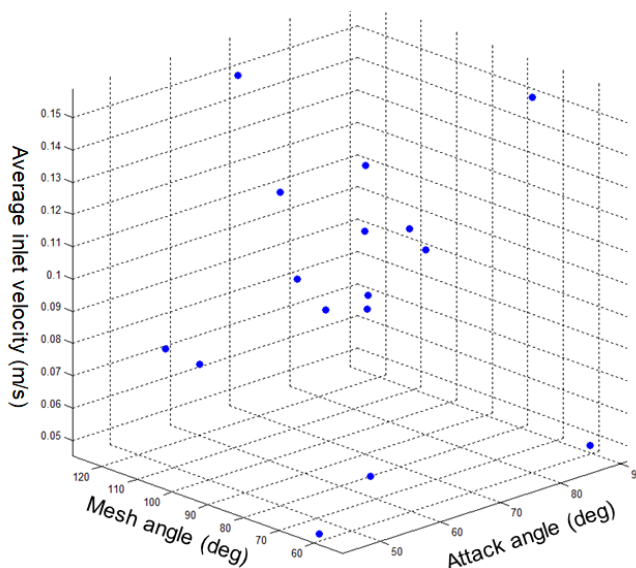
$\Delta P_{memb}$  اختلاف فشار بین کانال تغذیه و کانال نفوذ است و  $\Delta \pi_{memb}$  اختلاف فشار اسمزی بین سطح غشا و سمت نفوذ است. می‌توان رابطه (۸) را به صورت ساده شده زیر نوشت:

$$J_w = L_p(P - P_p - f_{os}C) \quad (9)$$

که در رابطه (۹)،  $L_p$  نفوذپذیری هیدرولیکی،  $P$  فشار هیدرولیکی بر روی سطح غشا،  $P_p$  فشار هیدرولیکی در کانال نفوذ،  $f_{os}$  ونت هوف<sup>۲</sup> که برای ارتباط غلظت به فشار اسمزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و  $C$  نشان‌دهنده غلظت نمک است. فشار هیدرولیکی در کانال نفوذ برابر  $1/1$  بار در نظر گرفته می‌شود و همچنین پس‌زنی نمک<sup>۳</sup> در این محاسبات برابر ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.

1 Periodic  
2 Van't Hoff  
3 Salt Rejection





شکل ۴. توزیع نمونه‌ها در فضای طراحی به روش روش مکعب چندبعدی لاتین برای سه پارامتر طراحی  
 Fig. 4. Distribution of design points in LHS design space for three design parameters

ما افت فشار در طول دامنه محاسباتی است. افت فشار به صورت اختلاف بین متوسط فشار ورودی و متوسط فشار خروجی محاسبه می‌شود.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (10)$$

افت فشار در کانال می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله سرعت جریان، هندسه رشته‌ها، سطح در تماس با جریان و ... بستگی داشته باشد. ساختار هندسی رشته‌های جداکننده درون کانال تغذیه به علت تغییر در درگ شکلی<sup>۱</sup> می‌تواند تاثیرگذار باشد. دومین پارامتر خروجی، شار نفوذ آب از دیواره غشا است. افزایش شار نفوذ آب از دیواره غشا بسیار دارای اهمیت است. این پارامتر همان‌طور که در رابطه (۹) مشاهده می‌شود به دو عامل اصلی وابسته است: اختلاف فشار بین کانال تغذیه<sup>۲</sup> و کانال نفوذ<sup>۳</sup> که هر چه بیشتر باشد باعث افزایش شار نفوذ می‌گردد و غلظت نمک در نزدیکی غشا که هر چقدر قطبش غلظت<sup>۴</sup> در کانال تغذیه کاهش یابد و به همان نسبت غلظت نمک در کنار دیواره غشا کمتر گردد، شار نفوذ افزایش می‌یابد.

برای پیدا کردن مقدار این پارامتر، میانگین شار نفوذ در دیواره بالایی و پایینی غشا به‌طور جداگانه حساب شده و متوسط آن‌ها همان‌طور که در رابطه (۱۱) آمده است به‌عنوان شار نفوذ متوسط

عددی مثل دینامیک سیالات محاسباتی در بررسی تاثیر پارامترهای مختلف (مخصوصاً زمانی که چند پارامتر به‌طور همزمان بررسی می‌گردد) و گسترده بودن فضای طراحی در این تحقیق از روش سطح پاسخ به منظور تعیین نقاط طراحی بهینه استفاده گردید.

### ۳-۱- پارامترهای ورودی و خروجی

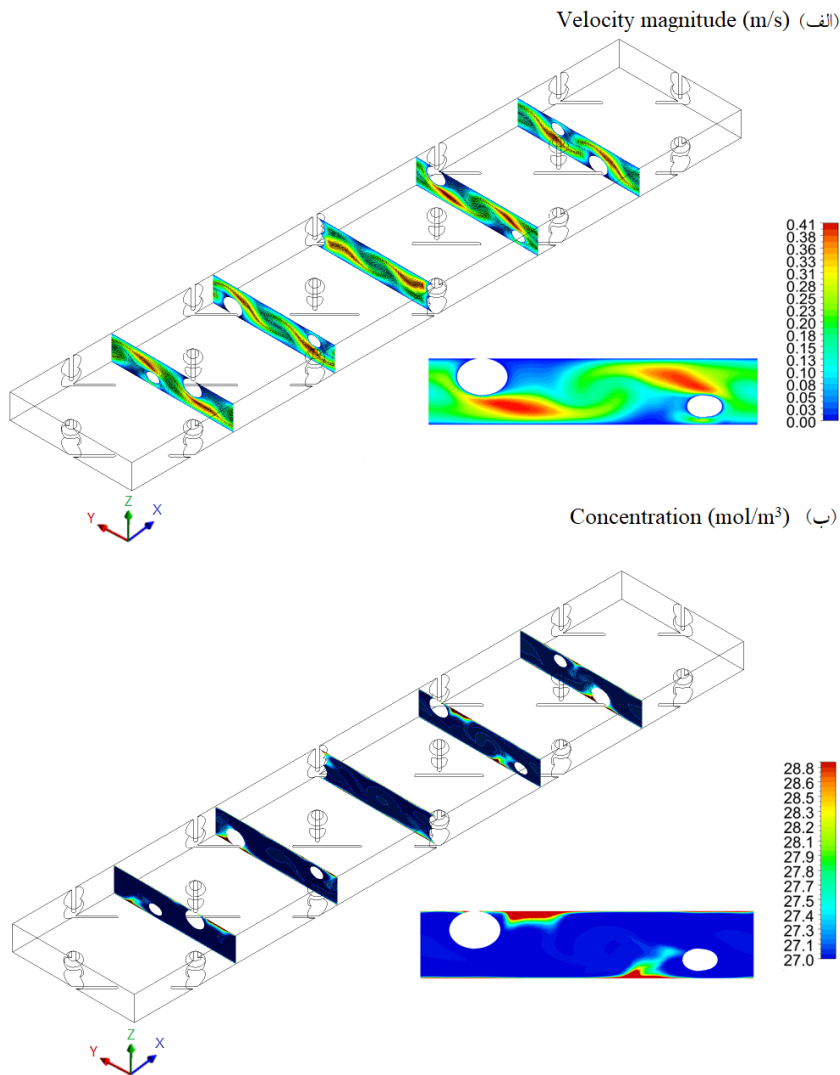
در این مطالعه با تغییر پارامترهای ورودی در بازه‌ای مشخص، یک فضای طراحی ایجاد می‌گردد که در آن به بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر پارامترهای خروجی و پیدا کردن نقاط بهینه با توجه به نتایج خروجی پرداخته شده است.

پارامترهای ورودی که مطالعه بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود شامل سه متغیر اصلی متوسط سرعت ورودی ( $u_0$ )، زاویه بین رشته‌ها (زاویه مش ( $\theta_\beta$ )) یا زاویه بین دو رشته که در ابتدا عمود بر هم هستند (زاویه بین رشته بالایی و پایینی) و زاویه حمله یا زاویه بین جهت جریان و محور  $Y$  مختصات به‌صورتی که جهت جریان در جهت عقربه‌های ساعت تغییر می‌کند ( $\theta_\alpha$ ) است.

بازه تغییرات مورد نظر برای مطالعه پارامترهای ورودی به‌صورت زیر است:

بررسی پارامترهای خروجی می‌تواند در طراحی یک سیستم با عملکرد بهتر و مصرف انرژی پایین‌تر موثر باشد. اولین پارامتر خروجی

1 Form Drag  
 2 Feed Channel  
 3 Permeate Channel  
 4 Concentration Polarization



شکل ۵. کانتورهای (الف) سرعت و (ب) غلظت نمک در سیال در پنج برش در صفحه yz  
 Fig. 5. Contours of (a) velocity and (b) salt concentration in a fluid in five yz-sections

انتخاب نمونه‌ها به صورتی است که مقادیری که برای پارامترهای طراحی انتخاب می‌گردد تنها یک‌بار استفاده گردد و تمام فضای طراحی را شامل شود. بدین صورت که تعداد تقسیم‌بندی برای هر بخش برابر تعداد نمونه انتخاب‌شده برای کل فضای طراحی است. تعداد نمونه‌های انتخاب شده برای ۳ پارامتر ورودی، ۱۵ عدد می‌باشد که توزیع نمونه‌ها در فضای طراحی را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد.

### ۳-۳- فرآیند سطح پاسخ

هدف این بخش استفاده از یک روش برای به‌دست آوردن یک تابع است که متغیرهای مستقل آن پارامترهای طراحی و متغیرهای

مورد استفاده قرار می‌گیرد.

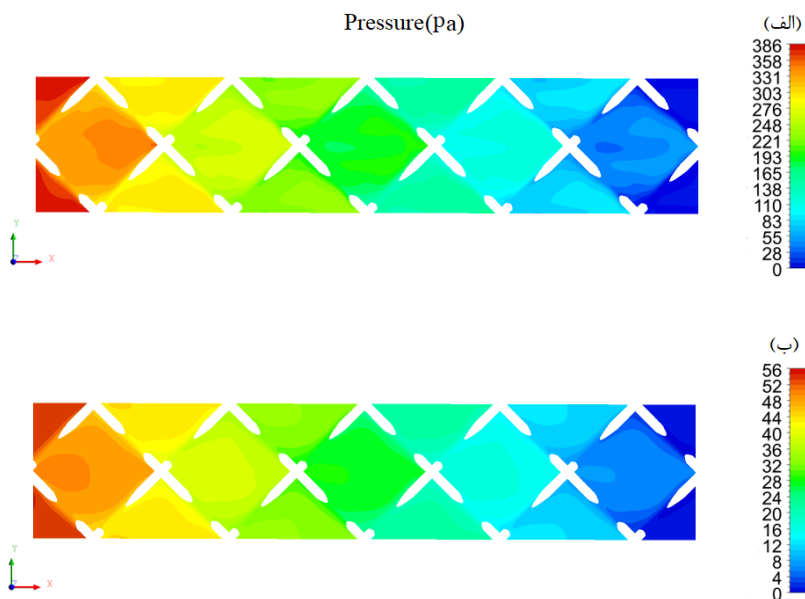
$$J_{w,ave} = \frac{(J_{w,up} + J_{w,down})}{2} \quad (11)$$

### ۳-۲- طراحی آزمایش‌ها

انتخاب نمونه‌ها یا همان طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup> تاثیر بسزایی در بازدهی محاسبات دارد و باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که تمام ناحیه محاسباتی را شامل شود. در این مطالعه از روش مکعب چندبعدی لاتین<sup>۲</sup> برای انتخاب نمونه‌ها استفاده گردید. این روش به‌عنوان یک حالت پیشرفته از روش نمونه‌گیری مونت کارلو است و از کارآمدترین روش‌های انتخاب نمونه‌ها است [۱۷]. مبنای این روش

1 Design of Experiments  
 2 Latin Hypercube Sampling (LHS)





شکل ۶. کانتورهای اختلاف فشار در سرعت ورودی (الف) ۰/۱۶۳ (m/s) (ب) ۰/۰۴۱ (m/s) در صفحه  $xy$  در  $z=2/1$  از ارتفاع دامنه محاسباتی  
**Fig. 6. Differential pressure contours in the average inlet velocity (a) 0.163 (m / s) (b) 0.041 (m / s) on the xy plan at  $z = 2/1$  of the height of the computational domain**

### ۳-۴- بهینه‌سازی

برای رسیدن به پاسخ بهینه از روش‌های بهینه‌سازی غربالگری و تکاملی (به‌طور خاص الگوریتم ژنتیک) استفاده گردید. ابتدا برای هر کدام از پارامترهای خروجی (توابع هدف) به‌طور جداگانه با استفاده از روش بهینه‌سازی غربالگری<sup>۶</sup> نقاط بهینه مشخص می‌گردد. اصل کار روش غربالگری نمونه‌گیری مستقیم توسط یک تولیدکننده شبه‌تصادفی و سپس مرتب‌سازی نمونه‌ها بر اساس اهداف می‌باشد. توابع هدف در این بخش شامل کمترین مقدار افت فشار و بیشترین مقدار شار نفوذ آب می‌باشد. تعداد نمونه‌ها در این روش برابر ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شد.

همچنین نقطه بهینه با در نظر گرفتن شرایطی که هر سه پارامتر خروجی به‌طور هم‌زمان در حالت بهینه خود باشند با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه [۲۷] به‌دست آمد. این روش برای زمانی که قصد پیدا کردن پاسخ بهینه زمانی که چند عامل خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرند مناسب است. تعداد نمونه‌های اولیه و تعداد نمونه‌ها در هر مرحله در این روش برابر ۲۰۰۰ عدد در نظر گرفته شد.

### ۴- نتایج

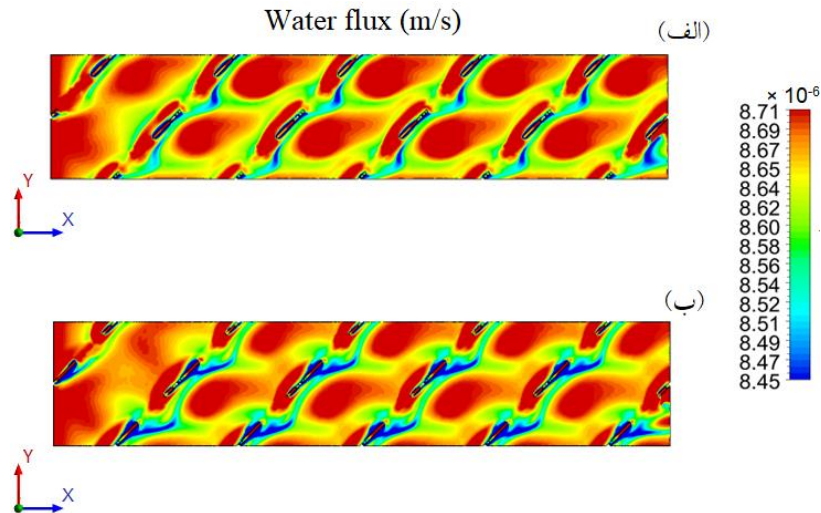
در این بخش ابتدا به بررسی مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی

وابسته آن خروجی‌های مسئله می‌باشد. باید تلاش شود تا بهترین روش مدل‌سازی با بهترین تابع انتخاب شود تا بتواند تمام فضای حل را به‌درستی پوشش دهد. روش استفاده شده در این تحقیق روش کریگینگ<sup>۱</sup> اصلاح‌شده می‌باشد. مدل کریگینگ در واقع از دو بخش درون‌یابی<sup>۲</sup> و رگرسیون<sup>۳</sup> تشکیل شده است. روش کریگینگ ترکیبی از یک مدل چندجمله‌ای<sup>۴</sup> به همراه نوسانات<sup>۵</sup> در اطراف روند کلی است [۱۷]:

$$L(\lambda) = f(\lambda) + g(\lambda) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)  $L(\lambda)$ ، تابع ناشناخته‌ای (پاسخ نهایی) از متغیر طراحی  $\lambda$  می‌باشد،  $f(\lambda)$  یک تابع چندجمله‌ای از  $\lambda$  است و  $g(\lambda)$  یک فرآیند گاوسی توزیع نرمال شده با میانگین صفر، واریانس  $\sigma^2$  و کواریانس غیر صفر است. برای بهبود فرآیند سطح پاسخ، در نقاط حساس (بیشینه و کمینه) شبیه‌سازی عددی دوباره صورت پذیرفت و نتایج به‌دست آمده دوباره در فرآیند سطح پاسخ استفاده شد و این فرآیند دو بار تکرار گردید.

- 1 Kriging
- 2 Interpolation
- 3 Regression
- 4 Polynomial
- 5 Fluctuations



شکل ۷. شار نفوذ آب در (الف) صفحه غشا بالا و (ب) صفحه غشا پایین  
 Fig. 7. Water flux in (a) top membrane plate and (b) bottom membrane plate

جریان کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۵ (ب) می‌توان مشاهده کرد در نواحی که سرعت جریان پایین است (جریان به سمت راکد شدن پیش می‌رود)، غلظت نمک افزایش می‌یابد و نواحی مساعدی برای ایجاد رسوب<sup>۱</sup> به وجود می‌آید؛ بنابراین ایجاد ساختار فیزیکی که بتواند از افزایش قطبش غلظت در بعضی مناطق نوک‌تیز و اطراف صفحه غشا جلوگیری کند قابل اهمیت می‌باشد.

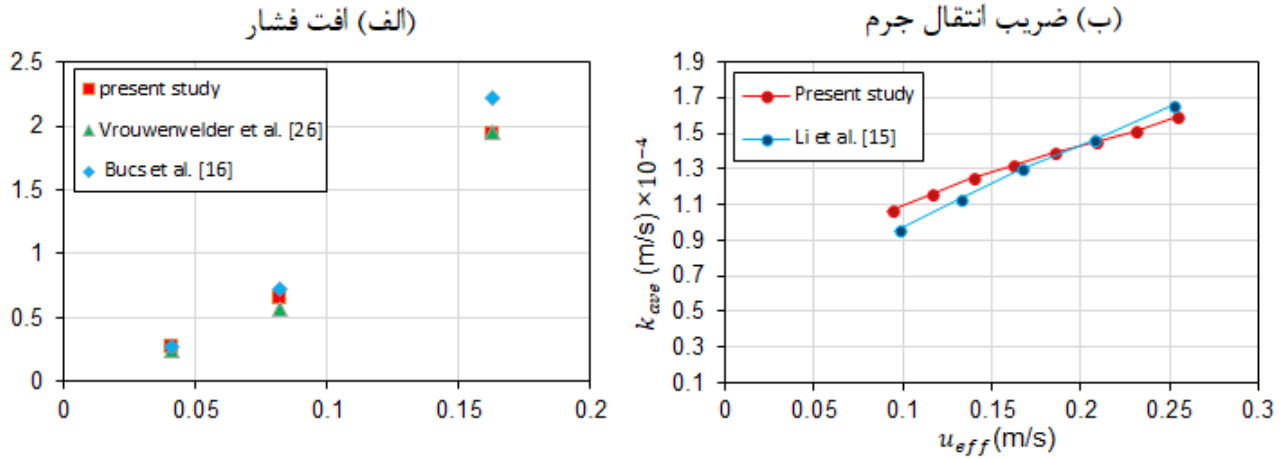
در شکل ۶ کانتورهای مربوط به اختلاف فشار (فشار نسبی) در دو سرعت ورودی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تغییر سرعت ورودی بر میزان افت فشار بسیار موثر است. همچنین افت فشار به‌طور عمده پس از برخورد جریان با رشته‌های جداکننده افزایش قابل توجهی می‌یابد و بنابراین ساختار هندسی و موقعیت رشته‌ها بر روی افت فشار بسیار مهم است. همچنین با توجه به ساختار پلکانی افت فشار می‌توان نتیجه گرفت تاثیر افت فشار اصطکاکی ایجاد شده بین سیال و دیواره غشا بسیار کمتر از افت فشار ناشی از وجود جداکننده‌ها و ساختار آن‌ها است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با توجه به ساختار پیچیده ایجاد شده به علت وجود جداکننده‌ها، شار نفوذ آب از دیواره غشا به‌صورت غیریکنواخت توزیع شده است. شار نفوذ درجایی بین دو رشته متوالی بالایی و یا پایینی به بیشترین میزان خود می‌رسد و در نزدیکی رشته‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. از آنجایی که اختلاف

صورت گرفته بر روی مدل‌های اولیه پرداخته شد و نتایج به‌دست آمده با مطالعات گذشته مقایسه گردید. در مرحله بعد نتایج حاصل از روش سطح پاسخ برای هرکدام از متغیرهای خروجی آورده شد و نقاط طراحی بهینه معرفی گردید.

#### ۴-۱- مطالعه موردی و اعتبارسنجی

ابتدا به مطالعه نتایج مربوط به نمونه اولیه پرداخته می‌شود. در اینجا از دو مورد مطالعه‌ای (نمونه ۱ و نمونه ۲) برای نشان دادن فیزیک جریان و نیز صحت‌سنجی حل دینامیک سیالات محاسباتی که قسمت مهمی از متدولوژی حل مسئله می‌باشد استفاده شده است. ابتدا نتایج حاصل شده برای هیدرودینامیک جریان و انتقال جرم در کانال تغذیه پر شده با جداکننده برای نمونه ۱ به‌دست آمده و مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر سرعت ورودی جریان و هندسه رشته‌های جداکننده بر انتقال جریان و جرم را می‌توان با مقایسه نتایج مربوط به افت فشار، سرعت، غلظت ارزیابی کرد. شکل ۵ (الف) کانتور سرعت را در ۵ برش در صفحه  $YZ$  در راستای عمود بر جهت اصلی جریان با سرعت متوسط ورودی جریان  $0.163$  متر بر ثانیه در کانال پر شده با جداکننده نشان می‌دهد. در بخش‌هایی از صفحات کانتورهای سرعت، سرعت‌های بالایی در بالا و پایین رشته‌ها (جایی که جریان از روی یک رشته عبور کرده و با صفحه غشا مقابل فاصله مناسب دارد) دیده می‌شود و همچنین در نزدیکی رشته‌ها سرعت



شکل ۸. مقایسه (الف) افت فشار در طول کانال برای نمونه ۱ با مطالعات تجربی [۲۶] و عددی [۱۶]، (ب) ضریب انتقال جرم در طول کانال در تقاطع بین صفحه  $b/4 = y$  از عرض دامنه محاسباتی و صفحه غشا بالا برای نمونه ۲ با مطالعه عددی لی و همکاران [۱۵]

Fig. 8. Comparison of the pressure drop across the channel for case 1 with experimental studies [26] and numerical [16], (b) the mass transfer coefficient during the computational domain at the intersection between the plane  $y = b / 4$  of the computational domain width and the upper membrane plate for case 2 by numerical study of Li et al. [15]

جدول ۳. پارامترهای ورودی و بازه تغییرات آن‌ها

Table 3. The range of input parameters changes

| بازه تغییرات                    | نام پارامتر                        |
|---------------------------------|------------------------------------|
| $45 \leq \theta_\alpha \leq 90$ | زاویه حمله، درجه (deg)             |
| $50 \leq \theta_\beta \leq 130$ | زاویه مش (بین‌رشته‌ای)، درجه (deg) |
| $0.41 \leq u_0 \leq 0.163$      | متوسط سرعت ورودی، m/s              |

فشار در طول کانال نسبت به فشار هیدرولیکی و اسمزی بسیار ناچیز است می‌توان عامل اصلی در به وجود آمدن این غیریکنواختی را قطبش غلظت دانست (عدم همخوانی در وسط کانال سمت راست بعد از رشته جداکننده احتمالاً از اثرات خروج می‌باشد)؛ که این نتیجه با مشاهدات مربوط به افزایش غلظت نمک در نزدیکی رشته‌های جداکننده همخوانی دارد. تغییرات شار نفوذ آب بین بیشترین مقدار شار نفوذ در منطقه‌ای دور از رشته‌ها و همچنین ناحیه کوچک ایجادشده بین رشته‌ها و صفحه غشا به ۱۱ درصد هم می‌رسد.

برای تایید محاسبات فعلی به مقایسه آن‌ها با داده‌های مطالعات گذشته پرداخته شده است. به همین منظور با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای نمونه اول و نمونه دوم و نتایج مقالات [۱۵، ۱۶، ۲۶] پرداخته شده است. ابتدا افت فشار محاسبه شده

برای نمونه اول با نتایج باکس و همکاران [۱۶] که به صورت عددی محاسبه شده و وروندر و همکاران [۲۶] که به صورت تجربی محاسبه شده مقایسه گردید. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است نتایج در توافقی خوبی با نتایج گذشته هستند (حداکثر خطا ۷ درصد). ضریب انتقال جرم و نفوذ آب از دیواره غشا به دست آمده نیز با مقاله لی و همکاران [۱۵] در شکل ۸ (ب) مقایسه شده است. برای مقایسه، ضریب انتقال جرم در طول ۵ سلول در صفحه غشا بالا محاسبه گردید.

با توجه به رابطه بین ضریب انتقال جرم و عدد شرود (  $Sh = \frac{k_{ave} d_h}{D}$  )، همچنین با توجه به رابطه عدد رینولدز (  $Re_{d_h} = d_h u_{eff} \rho / \mu$  ) لی و همکاران [۱۵] رابطه  $Sh \propto Re_{d_h}^{0.4}$  را ارائه دادند که این رابطه برای همان مدل هندسی برابر  $Sh \propto Re_{d_h}^{0.57}$

جدول ۴. مقادیر پارامتر ورودی به دست آمده از روش روش مکعب چندبعدی لاتین و نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی

Table 4. Input parameter values obtained from LHS method and CFD simulation results

| نقاط طراحی | $\theta_\alpha$ (deg) | $\theta_\beta$ (deg) | $u_0$ (m/s) | $\Delta P$ (Pa) | $JW_{ave}(m/s) \times 10^6$ |
|------------|-----------------------|----------------------|-------------|-----------------|-----------------------------|
| ۱          | ۵۵/۵                  | ۸۴/۶۶۶               | ۰/۱۱۰       | ۲۱۱/۷           | ۸/۵۷                        |
| ۲          | ۶۷/۵                  | ۶۸/۶۶۶               | ۰/۱۱۸       | ۱۵۹/۰۳          | ۸/۵۷                        |
| ۳          | ۶۴/۵                  | ۱۲۷/۳۳۴              | ۰/۰۶۱       | ۹۰/۹۱           | ۸/۴۶                        |
| ۴          | ۸۸/۵                  | ۷۴                   | ۰/۱۵        | ۲۴۶/۷           | ۸/۶۲                        |
| ۵          | ۸۲/۵                  | ۱۲۲                  | ۰/۰۶۹       | ۲۰۳/۷۳          | ۸/۵۷                        |
| ۶          | ۸۵/۵                  | ۵۲/۶۶۷               | ۰/۰۵۳       | ۵۳/۸۴           | ۸/۴۷                        |
| ۷          | ۴۹/۵                  | ۷۹/۳۳۴               | ۰/۱۴۳       | ۳۵۶/۸۶          | ۸/۵۹                        |
| ۸          | ۵۸/۵                  | ۵۸                   | ۰/۱۳۵       | ۲۲۴/۶           | ۸/۵۹                        |
| ۹          | ۷۹/۵                  | ۱۰۶                  | ۰/۱۰۲       | ۲۳۷/۲۱          | ۸/۶۱                        |
| ۱۰         | ۶۱/۵                  | ۱۱۱/۳۳۴              | ۰/۱۵۹       | ۳۹۸/۶۹          | ۸/۶۵                        |
| ۱۱         | ۷۳/۵                  | ۹۵/۳۳۴               | ۰/۰۸۶       | ۱۵۲/۳۶          | ۸/۵۸                        |
| ۱۲         | ۵۲/۵                  | ۱۱۶/۶۶۶              | ۰/۰۷۸       | ۱۱۳/۱۴          | ۸/۵۲                        |
| ۱۳         | ۷۰/۵                  | ۹۰                   | ۰/۰۹۴       | ۱۵۵/۹۵          | ۸/۵۷                        |
| ۱۴         | ۴۶/۵                  | ۶۳/۳۳۴               | ۰/۰۴۵       | ۶۹,۸۹           | ۸/۴۲                        |
| ۱۵         | ۷۶/۵                  | ۱۰۰/۶۶۶              | ۰/۱۲۶       | ۲۸۸,۰۶          | ۸/۶۳                        |

محاسباتی و زمان انجام فرآیند مربوط به به دست آوردن خروجی برای هر کدام از نقاط طراحی می باشد. نتایج حاصل شده از شبیه سازی به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی در جدول ۴ مشاهده می شود.

#### ۴-۳- نتایج سطح پاسخ

با استفاده از نتایج حاصل شده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل جانشین ساخته می شود. پس از ساخت مدل جانشین و به دست آوردن مقادیر خروجی های مشخص شده (افت فشار و شار نفوذ آب) در تمام فضای طراحی به صورت توابع پیوسته، در این بخش به بررسی نتایج و تاثیر پارامترهای ورودی (زاویه حمله، زاویه بین رشته های و سرعت ورودی) بر روی مقادیر خروجی و نقاط بهینه مقادیر پارامترهای خروجی در فضای طراحی پرداخته می شود.

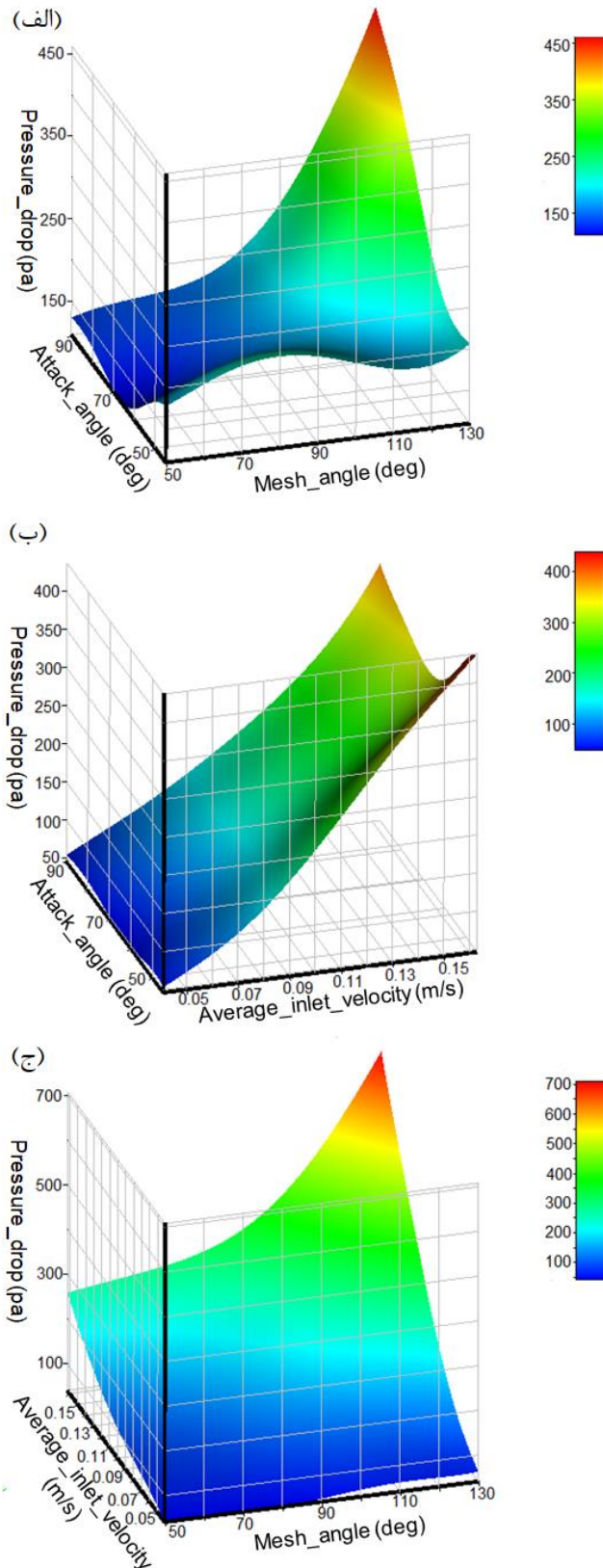
#### ۴-۳-۱- افت فشار

اولین پارامتر خروجی مورد بررسی در این مطالعه تغییرات افت فشار در طول کانال است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده

می باشد. همچنین اسچوک و مایکل [۲۳] رابطه را به صورت  $Sh = 0.065 Re_{d_h}^{0.875} Sc^{0.25}$  و کروودو و همکاران [۲۸] رابطه را به صورت  $Sh = 0.664 Re_{d_h}^{0.5} Sc^{0.33} (d_h / L)^{0.33}$  برای رشته های ساده استوانه ای ارائه دادند. با توجه به اینکه عدد اشمیت حدوداً دارای مقدار ثابتی است ( $Sc = (\mu / \rho) / D \approx 1000$ )؛ رابطه به دست آمده در این مطالعه حدوداً در میانه نتایج مطالعات قبلی می باشد. همچنین واندربرگ و همکاران [۲۹] با مقایسه ضرایب استفاده شده در مطالعات مختلف نشان دادند که پیدا کردن رابطه ای که بتواند سیستم اسمز معکوس را به صورت دقیق توصیف کند بسیار دشوار است.

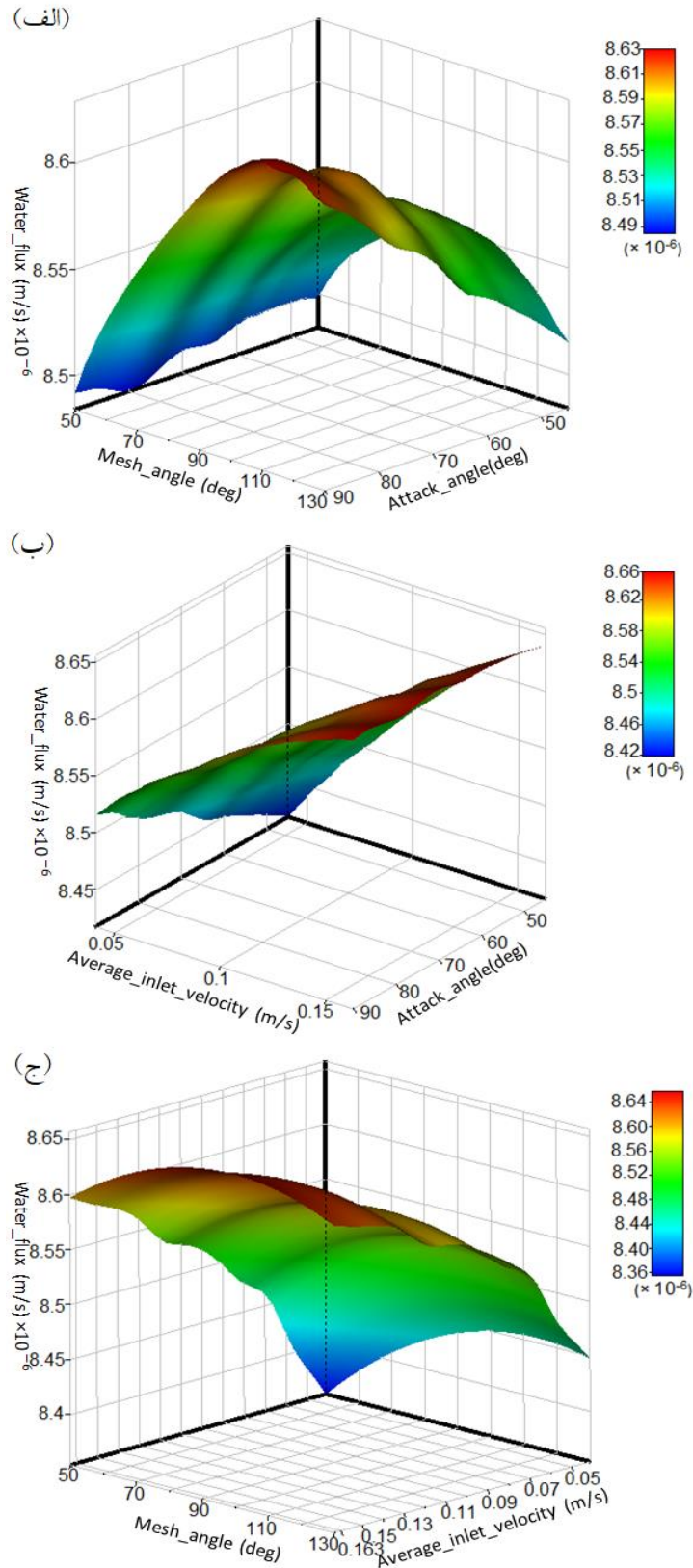
#### ۴-۲- نقاط طراحی انتخاب شده و نتایج شبیه سازی برای آن ها

مقادیر مربوط به هر پارامتر ورودی در نقاط طراحی ایجاد شده با استفاده از روش روش مکعب چندبعدی لاتین در جدول ۴ مشاهده می شود. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مقادیر پارامترهای خروجی مربوط در نقاط طراحی مختلف به دست آمد. بیشترین هزینه



شکل ۹. نمودارهای مربوط به تغییرات افت فشار برحسب پارامترهای ورودی. (الف) افت فشار برحسب زاویه حمله و زاویه بین‌رشته‌ای (زاویه مش) (ب) افت فشار برحسب زاویه حمله و متوسط سرعت ورودی (ج) افت فشار برحسب سرعت ورودی و زاویه بین‌رشته‌ای (زاویه مش)

Fig. 9. Response surface method results for pressure drop variations in design space for input parameters (a) Attack angles and mesh angles (b) Attack angles and average inlet velocity (c) Mesh angles and average inlet velocities



شکل ۱۰. نمودارهای مربوط به تغییرات شار نفوذ آب بر حسب پارامترهای ورودی. (الف) شار نفوذ آب بر حسب زاویه حمله و زاویه بین‌رشته‌ای (زاویه مش) (ب) شار نفوذ آب بر حسب زاویه حمله و متوسط سرعت ورودی (ج) شار نفوذ آب بر حسب سرعت ورودی و زاویه بین‌رشته‌ای (زاویه مش)

Fig. 10. Response surface for water flux variations in design space for input parameters (a) Attack angle and mesh angle (b) Attack angles and average inlet velocity (c) Mesh angles and average inlet velocity



جدول ۵. مشخصات پارامترهای ورودی-خروجی در نقاط بهینه طراحی

Table 5. Specifications of input-output parameters of the optimum points in the design space

| شماره | زاویه حمله (درجه) | زاویه بین‌رشته‌ای (درجه) | متوسط سرعت ورودی (m/s) | افت فشار (Pa) | $Jw_{ave}(m/s) \times 10^6$ | نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی | اختلاف بین نتایج |
|-------|-------------------|--------------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| ۱     | ۷۳/۳۲             | ۵۳/۴۴                    | ۰/۰۴۱                  | ۳۹/۲۹         | -                           | ۳۹/۰۷                                 | ۰/۵۶             |
| ۲     | ۸۶/۳              | ۱۱۴                      | ۰/۱۶۳                  | -             | ۸/۶۸                        | ۸/۶۷۶                                 | ۰/۰۸             |
| ۳     | ۷۲/۷۴             | ۸۵/۱۹                    | ۰/۱۳                   | ۲۳۶/۶۵        | ۸/۶۴۵                       | ۲۳۵/۲۱؛ ۸/۶۳۳                         | ۰/۶؛ ۰/۱۴        |

با مطالعه اثر تداخلی پارامترها رابطه (۱۴) به عنوان تابع پیش‌بینی مقدار افت فشار، به دست می‌آید که در این محاسبات از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است.

$$\Delta P = 335 - 4.13\theta_\alpha - 6.98\theta_\beta + 2233u_0 + 0.0834\theta_\alpha \times \theta_\beta - 31.5\theta_\alpha \times u_0 + 27.53\theta_\beta \times u_0 \quad (14)$$

#### ۲-۳-۴- شار نفوذ آب از غشا

میانگین شار نفوذ در هر کدام از دیواره‌های بالا و پایین به‌طور جداگانه محاسبه گردید و متوسط آن‌ها همان‌طور که در رابطه (۱۱) آمده است به‌عنوان شار نفوذ در هر نمونه مورد استفاده قرار گرفت. بازه تغییرات شار نفوذ آب مربوط به ۱۵ نمونه اولیه شبیه‌سازی شده بین  $(m/s) \times 10^{-6}$   $-1/65$  تا  $8/42 \times 10^{-6}$  است که بسیار نزدیک است و درصد تغییرات بین بیشترین و کمترین میزان نفوذ آب ۲/۶۵ درصد است.

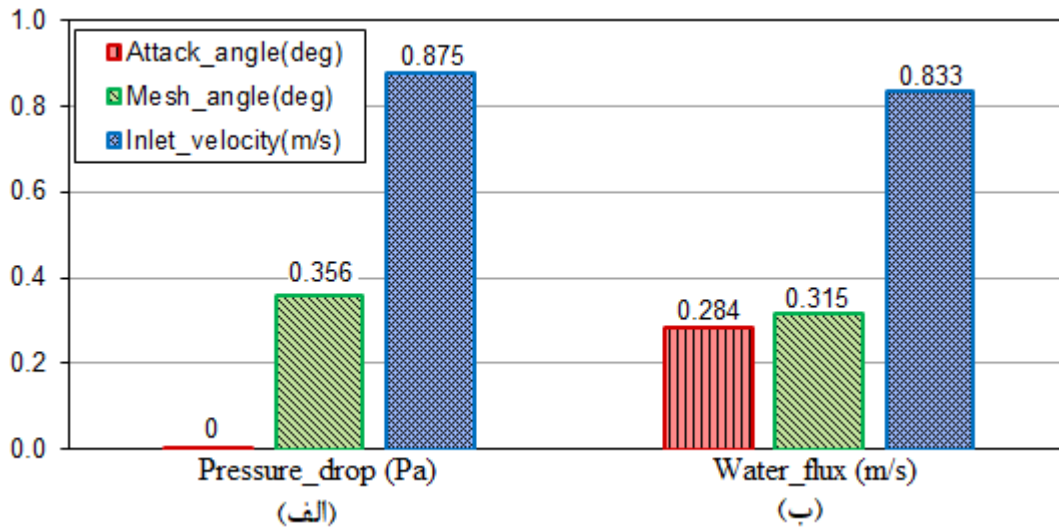
با افزایش زاویه مش (زاویه بین‌رشته‌ای) به حدود ۱۱۵ درجه همان‌طور که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌گردد شار نفوذ آب افزایش می‌یابد و سپس به مقدار کمی کاهش می‌یابد. در زاویه بین‌رشته‌ای، افزایش زاویه حمله تأثیری بر افزایش شار جریان آب ندارد، اما در زاویه بین‌رشته‌ای زیاد، افزایش زاویه حمله، شار نفوذ آب را افزایش می‌دهد. در شکل ۱۰ (ب) مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله و متوسط سرعت ورودی، میزان شار نفوذ آب افزایش می‌یابد که در سرعت جریان‌های کم، تأثیر زاویه حمله بیشتر است. در شکل ۱۰ (ج) جایی که زاویه حمله ثابت است، افزایش زاویه مش و متوسط سرعت ورودی باعث افزایش شار نفوذ آب می‌گردد، به‌طوری‌که تأثیر متوسط سرعت ورودی در تغییرات شار نفوذ آب بیشتر است.

می‌شود رابطه بین افت فشار و پارامترهای طراحی به‌صورت سه‌بعدی آورده شده است. لازم به ذکر است که مقدار پارامتری که در هر شکل به‌عنوان متغیر ورودی مورد بررسی نیست در میانه‌ی بازه‌ی طراحی‌اش قرار دارد.

در شکل ۹ (الف) تغییرات افت فشار برحسب زاویه حمله و زاویه بین‌رشته‌ای، در سرعت ثابت مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زاویه بین‌رشته‌ای‌های کم (نزدیک ۵۰ درجه) با افزایش زاویه حمله، افت فشار کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش زاویه حمله تعداد رشته‌های کمتری به‌صورت عمود در مقابل جریان قرار می‌گیرند؛ اما در زاویه مش‌های بالا (نزدیک ۱۳۰ درجه) این روند معکوس می‌گردد؛ زیرا در این حالت با افزایش زاویه حمله رشته‌های بیشتری تقریباً به‌صورت عمود و همچنین متراکم (افزایش مقاومت شکلی) در مقابل جریان قرار می‌گیرند. با افزایش زاویه بین‌رشته‌ای افت فشار به‌طور کلی افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش تراکم رشته‌ها در مقابل جریان در بازه تغییرات زاویه حمله می‌باشد؛ بنابراین تأثیر زاویه بین‌رشته‌ای بر روی افت فشار بیشتر از زاویه حمله جریان می‌باشد. در شکل ۹ (ب) تغییرات افت فشار برحسب زاویه حمله و سرعت ورودی مشاهده می‌شود. تأثیر سرعت جریان بر افت فشار بسیار بیشتر از زاویه حمله می‌باشد. علت این امر را می‌توان در رابطه ذاتی بین افت فشار و سرعت در کانال‌ها دانست. در شکل ۹ (ج) تغییرات افت فشار بر حسب زاویه بین‌رشته‌ای و سرعت ورودی می‌باشد. با افزایش زاویه بین‌رشته‌ای و سرعت ورودی، افت فشار نیز افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان، تأثیر زاویه بین‌رشته‌ای بر روی افت فشار افزایش می‌یابد.

رگرسیون سه پارامتری افت فشار رابطه (۱۳) را بدست می‌دهد:

$$\Delta P = -127.6 - 0.359\theta_\alpha + 1.089\theta_\beta + 2466u_0 \quad (13)$$



شکل ۱۱. آنالیز حساسیت کلی (الف) افت فشار (ب) شار نفوذ آب؛ بر حسب پارامترهای ورودی  
 Fig. 11. Global sensitivity analysis (a) Pressure drop (b) Water flux (c) SCE; according to input parameters

پرداخته شد. برای این کار نتایج مربوط به نقاط بهینه شماره‌های ۲، ۱ و ۳ مقایسه شدند. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و روش سطح پاسخ برای افت فشار و شار نفوذ آب موجود است.

#### ۴-۶- آنالیز حساسیت کلی

نتایج حاصل برای آنالیز حساسیت کلی<sup>۱</sup> به‌دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی، کمک می‌کند تا حساسیت پارامترهای خروجی به پارامترهای ورودی مشخص گردد. مقادیر مثبت بیانگر رابطه مستقیم بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی می‌باشند. به‌طور مثال با افزایش پارامتر ورودی پارامتر خروجی نیز افزایش می‌یابد. هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر شود رابطه بین پارامترها کمتر است. مقادیر منفی بیانگر رابطه معکوس بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود متوسط سرعت ورودی جریان موثرترین پارامتر در تغییرات افت فشار می‌باشد. بعد از آن، زاویه بین‌رشته‌ای و در انتها زاویه حمله جریان که در مقابل پارامترهای ورودی دیگر تاثیر بسیار کمی بر افت فشار دارد. افزایش تمام پارامترهای ورودی تاثیر مثبتی بر افزایش شار نفوذ آب در فضای طراحی دارند که مقدار تاثیرگذاری متوسط سرعت ورودی از همه بیشتر است.

رگرسیون سه پارامتری شار نفوذ آب رابطه (۱۵) را به‌دست می‌دهد:

$$J_w = 8.2466 + 0.001381\theta_\alpha + 0.000646\theta_\beta + 1.602u_0 \quad (15)$$

با مطالعه اثر تداخلی پارامترها رابطه (۱۶) به عنوان تابع پیش‌بینی مقدار شار نفوذ به‌دست می‌آید که در این محاسبات از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است.

$$J_w = 8.438 - 0.00072\theta_\alpha - 0.00264\theta_\beta + 1.88u_0 + 0.000040\theta_\alpha \times \theta_\beta - 0.0122\theta_\alpha \times u_0 + 0.00631\theta_\beta \times u_0 \quad (16)$$

#### ۴-۵- بهینه‌سازی

پس از ساخت مدل و پیش‌بینی مقادیر خروجی در تمام فضای طراحی، حال با صرف هزینه محاسباتی بسیار پایین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نقاط بهینه در فضای طراحی مشخص گردید. در جدول ۵ نقاط بهینه پیداشده با استفاده از روش نمونه‌برداری مکعب چندبعدی لاتین و روش ساخت مدل جانشین کریگینگ اصلاح‌شده آورده شده است. برای به‌دست آوردن نقاط بهینه بر اساس نتایج، کمترین میزان افت فشار، بیشترین میزان شار نفوذ آب و حالت چند هدفه به‌عنوان نقاط بهینه انتخاب می‌گردند.

برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده در انتها به مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش سطح پاسخ و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی

## ۵- نتیجه گیری

- Engineering Research and Design 1116-1107 (2008) (10)86.
- [3] L. Song, S. Ma, Numerical studies of the impact of spacer geometry on concentration polarization in spiral wound membrane modules, *Journal of Industrial engineering chemistry research*, 7645-7638 (2005) (20)44.
- [4] V. Geraldes, V. Semião, M.N. Pinho, Hydrodynamics and concentration polarization in NF/RO spiral-wound modules with ladder-type spacers, *Journal of Desalination*, 402-395 (2003) (3-1)157.
- [5] M. Amokrane, D. Sadaoui, C. Koutsou, A. Karabelas, M. Dudeck, A study of flow field and concentration polarization evolution in membrane channels with two-dimensional spacers during water desalination, *Journal of Membrane Science*, 150-139 (2015) 477.
- [6] S.K. Karode, A. Kumar, Flow visualization through spacer filled channels by computational fluid dynamics I.: Pressure drop and shear rate calculations for flat sheet geometry, *Journal of Membrane science*, (2001) (1)193 84-69.
- [7] Y.-L. Li, K.-L. Tung, CFD simulation of fluid flow through spacer-filled membrane module: selecting suitable cell types for periodic boundary conditions, *Journal of Desalination*, 358-351 (2008) (3-1)233.
- [8] M. Shakaib, S. Hasani, M. Mahmood, Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling, *Journal of Membrane Science*, 89-74 (2007) (2-1)297.
- [9] F. Li, W. Meindersma, A. De Haan, T. Reith, Optimization of commercial net spacers in spiral wound membrane modules, *Journal of Membrane Science*, (2002) (2-1)208 302-289.
- [10] Y.-L. Li, K.-L. Tung, M.-Y. Lu, S.-H. Huang, Mitigating the curvature effect of the spacer-filled channel in a spiral-wound membrane module, *Journal of Membrane Science*, 118-106 (2009) (2-1)329.
- [11] C.P. Koutsou, A.J. Karabelas, A novel retentate spacer geometry for improved spiral wound membrane (SWM) module performance, *Journal of Membrane Science*, 488 142-129 (2015).
- [12] G. Srivathsan, Modeling of fluid flow in spiral wound

استفاده از فرآیند مدل سازی بر اساس جانشینی کمک شایانی در کاهش هزینه های محاسباتی شبیه سازی عددی در شناخت بهتر رفتار دینامیک سیالات و انتقال جرم در کانال های تغذیه دارای جداکننده کرد. در این مقاله با ایجاد یک فضای طراحی شامل سه پارامتر ورودی زاویه حمله، زاویه بین رشته های و سرعت جریان ورودی سعی بر نزدیک شدن به مدل مناسب جداکننده در کانال تغذیه گردید. ابتدا شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی بر روی ۱۵ نقطه طراحی اولیه انجام گرفت و با استفاده از نتایج آن به وسیله فرآیند روش سطح پاسخ در تمام فضای طراحی پاسخ های پارامترهای خروجی مشخص گردید؛ و نقاط بهینه محلی و همچنین میزان تاثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی (افت فشار، شار نفوذ آب) مشخص گردید. با مطالعه اثر تداخلی پارامترها روابطی به عنوان تابع پیش بینی مقدار پارامترهای خروجی به دست می آید. با توجه به نتایج به دست آمده از فرآیند مدل سازی بر اساس جانشینی می توان نتیجه گرفت:

- ۱- سرعت ورودی جریان بیشترین تاثیر را بر روی پارامترهای خروجی در فضای طراحی دارد.
- ۲- شار نفوذ آب بیشترین اثرپذیری را از پارامترهای ورودی دارد؛ اما میزان تغییراتش در فضای طراحی کم می باشد، از سوی دیگر به علت بزرگی سطح صفحات غشا تغییرات شار نفوذ آب در حالت واقعی می تواند چشمگیر باشد.
- ۳- نقطه ی بهینه طراحی با توجه به در نظر گرفتن هر دو پارامتر خروجی عبارت از  $\theta_{\alpha}=72/74$ ،  $\theta_{\beta}=85/19$  و  $u_0=0/13$  می باشد.
- ۴- در مطالعه رگرسیون و اثر تداخلی هر دو پارامتر خروجی، ضریب تاثیرگذاری سرعت ورودی جریان بیشتر است.

## مراجع

- [1] J. Schwinge, D. Wiley, D. Fletcher, A CFD study of unsteady flow in narrow spacer-filled channels for spiral-wound membrane modules, *Journal of Desalination*, (3-1)146 201-195 (2002).
- [2] S. Wardeh, H. Morvan, CFD simulations of flow and concentration polarization in spacer-filled channels for application to water desalination, *Journal of Chemical*

- Towards an integrated computational method to determine internal spaces for optimum environmental conditions, *Journal of Computers and Fluids*, (2016) 127 160-146.
- [22] D.W. Solutions, FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes, *Journal of Technical Manual, Form*, (-609 180-1 (2010) (00071).
- [23] G. Schock, A. Miquel, Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules, *Journal of Desalination*, (1987) 64 352-339.
- [24] A. Saeed, Effect of feed channel spacer geometry on hydrodynamics and mass transport in membrane modules, Curtin University, 2012.
- [25] M. Li, Optimal plant operation of brackish water reverse osmosis (BWRO) desalination, *Journal of Desalination*, 68-61 (2012) 293.
- [26] J. Vrouwenvelder, C. Hinrichs, W. Van der Meer, M. Van Loosdrecht, J. Kruithof, Pressure drop increase by biofilm accumulation in spiral wound RO and NF membrane systems: role of substrate concentration, flow velocity, substrate load and flow direction, *Journal of Biofouling*, 555-543 (2009) (6)25.
- [27] X. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, Elsevier, (87-77 ,(2014.
- [28] O. Kuroda, S. Takahashi, M. Nomura, Characteristics of flow and mass transfer rate in an electro dialyzer compartment including spacer, *Journal of Desalination*, 232-225 (1983) (3-1)46.
- [29] G. Van den Berg, I. Racz, C. Smolders, Mass transfer coefficients in cross-flow ultrafiltration, *Journal of Membrane Science*, 51-25 (1989) (2-1)47.
- reverse osmosis membranes, (2013).
- [13] A.E. Anqi, N. Alkhamis, A. Oztekin, Computational study of desalination by reverse osmosis—Three-dimensional analyses, *Journal of Desalination*, 49-38 (2016) 388.
- [14] B. Gu, C.S. Adjiman, X.Y. Xu, The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations, *Journal of Membrane Science*, 91-78 (2017) 527.
- [15] M. Li, T. Bui, S. Chao, Three-dimensional CFD analysis of hydrodynamics and concentration polarization in an industrial RO feed channel, *Journal of Desalination*, 397 204-194 (2016).
- [16] S.S. Bucs, A.I. Radu, V. Lavric, J.S. Vrouwenvelder, C. Piciooreanu, Effect of different commercial feed spacers on biofouling of reverse osmosis membrane systems: a numerical study, *J Desalination*, 37-26 (2014) 343.
- [17] N.V. Queipo, R.T. Haftka, W. Shyy, T. Goel, R. Vaidyanathan, P.K. Tucker, Surrogate-based analysis and optimization, *Journal of Progress in aerospace sciences*, 28-1 (2005) (1)41.
- [18] S. Razavi, B.A. Tolson, D.H. Burn, Review of surrogate modeling in water resources, *Journal of Water Resources Research*, (2012) (7)48).
- [19] G.E. Box, J.S. Hunter, Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces, *Journal of The Annals of Mathematical Statistics*, 241-195 (1957) (1)28.
- [20] S.A.I. Bellary, A. Husain, A. Samad, Effectiveness of meta-models for multi-objective optimization of centrifugal impeller, *Journal of mechanical science technology*, (12)28 4957-4947 (2014).
- [21] P. Sofotasiou, J.K. Calautit, B.R. Hughes, D. O'Connor,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Moghimi, N. Mansouri, Investigate of hydrodynamic and mass transfer in the spacer-filled channel of reverse osmosis module, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1) (2021) 393-410.

DOI: 10.22060/mej.2020.15917.6238

