

# بررسی رسوب آب میوه در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به کار رفته در صنایع غذایی

نرگس نانوکناری<sup>۱</sup>، محمدرضا جعفری نصر<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۳۰

پیام‌نگار: nasrmrj@ripi.ir

## چکیده

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در صنایع غذایی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. از عوامل موثر بر کارایی این مبدل‌ها می‌توان فرایند رسوب‌گذاری را برشمرد. در این مطالعه، رسوب بلوری کلسیم سولفات از آب نیشکر بر سطح این مبدل‌ها شبیه‌سازی شده است. به منظور اعتباربخشی برنامه، میزان مقاومت رسوب به دست آمده از این پژوهش با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شده است. تأثیر رسوب بر عوامل سرعت، دما و میزان انتقال حرارت نیز بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بر اثر رسوب‌گذاری میزان سرعت افزایش ولی میزان انتقال حرارت و دما در طول زمان فرایند کاهش می‌یابند. در این پژوهش از روش الگوریتم طراحی سریع<sup>۱</sup> به منظور طراحی مبدل حرارتی برای محاسبه سطح انتقال حرارت مورد نیاز برای دو حالت (با رسوب و بدون رسوب) استفاده شده است. به عنوان یک مورد مطالعه صنعتی از شیر نارگیل در این طراحی استفاده شده است و ملاحظه می‌شود که در دبی  $0/08 (kg/s)$  بدون رسوب مقدار سطح انتقال حرارت لازم معادل  $0/065 (m^2)$ ، در حالی که با رسوب این مقدار به  $0/12 (m^2)$  افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** مبدل‌های صفحه‌ای، شبیه‌سازی، رسوب کلسیم سولفات، آب نیشکر، شیر نارگیل، لگاریتم (روش) طراحی سریع، فلوننت.

## ۱. مقدمه

گرفته و مزایای متعددشان سبب شده است در اکثر کاربردها جایگزین مناسبی برای مبدل‌های پوسته و لوله به شمار آیند [۱]. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به چند دلیل مشروح در زیر به طور وسیع در فرایندهای شیمیایی و بویژه در صنایع غذایی استفاده می‌شوند:

• به علت رضایت از مسائل بهداشتی چون به آسانی تمیز می‌شوند،

امروزه نیاز به تبادل حرارت برای انجام فرایندهای صنعتی سبب شده است مبدل‌های حرارتی به طور چشمگیری در صنایع گوناگون به کار گرفته می‌شوند. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای<sup>۲</sup> نسل جدیدی از مبدل‌ها هستند که استفاده از آنها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار

\* تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

1. Rapid Design Algorithm (RDA)
2. Plate Heat Exchanger

## ۲. طراحی مبدل‌های حرارتی به روش الگوریتم طراحی سریع

از نکات حائز اهمیت در مبدل‌های حرارتی، تعیین افت فشار مجاز جریان است. با تعیین افت فشار مجاز جریان، هزینه و میزان لازم برای راه‌اندازی پمپ و کمپرسور در فرایند و نیز سرمایه لازم برای سطح انتقال حرارت، همیشه این احتمال وجود دارد که میزان تعیین شده، بهینه نباشد. افت فشار مجاز بهینه برای جریانها از یک سیستم به سیستم دیگر در حال تغییر است که به دلیل وابستگی افت فشار برهم‌کنش جریانها با یکدیگر است.

### ۱-۲ روابط کلی افت فشار

در کلیه مبدل‌های حرارتی رابطه بین افت فشار و سرعت سیال از این قرار است:

$$\Delta P = K_{p1} \cdot L \cdot V^{2-n} \quad (1)$$

که در آن:

$$L = K_{p2} \cdot V \cdot \frac{Av}{v_o} \quad (2)$$

سرانجام، بین ضریب انتقال حرارت و سرعت سیال می‌تواند رابطه برقرار شود:

$$L = K_{p3} \cdot v^m \quad (3)$$

مجموع سه معادله بالا، به رابطه کلی افت فشار منجر می‌شود که رابطه‌ای بین افت فشار جریان، سطح مبدل و ضریب انتقال حرارت جریان برقرار می‌کند:

$$\Delta P = \frac{K_{p4}}{v_o} \cdot A \cdot h^{\frac{s-n}{m}} \quad (4)$$

مقادیر ثابتهای  $K_p$ ، توابعی از خواص سیالات و سیستم مبدل حرارتی تحت بررسی است. این روابط برای سیستم‌هایی خاص که ضریب رینولدز و مقادیر  $K_p$  در آنها معلوم باشند، در هر مبدل حرارتی قابل تعمیم است. رابطه‌های مربوط به مبدل‌های صفحه‌ای نیز در مرجع [۵] دسترس پذیر است و با استفاده از این روابط به نتایج زیر می‌رسیم.

• کنترل دمای مورد نیاز برای فرایندهای پاستوریزه و استریزه (گندزدایی) کردن،

• انتقال حرارت خیلی مطلوب به علت طراحی کم حجم آن نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله،

• برخورداری از سطح بزرگ که در یک حجم کوچک فشرده شده و می‌تواند بر حسب نیاز با کم یا زیاد کردن صفحات اصلاح شوند [۲].

در مدت عملکرد یک مبدل حرارتی، کارایی حرارتی آن با تشکیل تدریجی رسوب کاهش می‌یابد. رسوب، ته‌نشین شدن مواد نامطلوب بر سطح یک مبدل حرارتی است که نسبت به انتقال گرما مقاومت می‌کند.

مبدل حرارتی باید تغییری مطلوب در شرایط گرمایی جریان‌های فرایندی در محدوده مجازات فشارها ایجاد کند و برای دوره زمانی مشخصی، این عملکرد ادامه یابد. در طی کارکرد، سطح انتقال حرارت، رسوب می‌گیرد و به افزایش مقاومت گرمایی و افزایش افت فشار و نیز نیاز به مصرف توان بالاتر تلمبه کردن می‌انجامد.

این هر دو اثر، مکمل یکدیگر و در کاهش کارایی مبدل حرارتی مؤثرند. کارایی در مبدل حرارتی ممکن است تا آنجا کاهش یابد که برای تعویض یا تمیز کردن، آن را از مدار کار خارج کنند [۳].

فرایند حرارت‌دهی مداوم به مواد غذایی مایع یکی از کارهای معمول در صنایع غذایی است. فرایندهای گرمایی شامل پاستوریزه‌سازی و تغلیظ آب میوه و سبزیجات در صنایع غذایی است تا از کیفیت و سلامت آن اطمینان حاصل شود. این کار از طریق غیر فعال کردن ریزاندامگانها و آنزیم‌ها در دمای بالا در یک لوله نگهدارنده صورت می‌پذیرد.

در خلال حرارت‌دهی تغییر در ساختار مواد غذایی از نظر فیزیکی، شیمیایی، و زیست‌شیمیایی رخ می‌دهد، که باعث چسبیدن و ته‌نشینی آنها بر روی سطح مبدل می‌شود. این موضوع به تمیز کردن دستگاه‌های صنایع غذایی به طور روزانه منجر می‌شود تا از کیفیت و امنیت مواد غذایی اطمینان حاصل شود. در حالی که در صنایع پتروشیمی معمولاً سالی یک بار و یا با فاصله توالی کمتر دستگاه‌ها تمیز می‌شوند، که البته میزان چسبندگی و وسعت رسوب در تعداد دفعات تمیز کردن و زمان آن مؤثر است. حضور رسوب در تجهیزات مبدل‌های حرارتی نمایانگر افزایش ظرفیت، انرژی مصرفی، آب مصرفی و هزینه‌های کارگر در صنایع است، که به تناوب آن با افزایش هزینه‌ها بستگی دارد [۴].

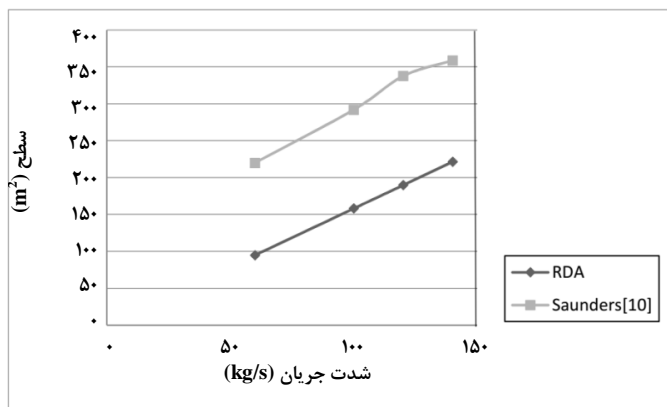
## ۲-۲ مقایسه روش الگوریتم طراحی سریع با روش‌های دیگر طراحی

## ۳-۲ روبه (الگوریتم) طراحی سریع مبدل حرارتی برای سیال شیر نارگیل

با افزایش شدت جریان، مساحت سطح افزایش می‌یابد. همان‌طور که می‌دانیم در شرایط طراحی مبدل، از آنجا که بخشی از سطح انتقال حرارت را رسوب فرا گرفته، بنابراین عملاً به میزان سطح انتقال حرارت بیشتری نیاز است (شکل (۲)).

با افزایش دما، میزان رسوب کم و در نتیجه میزان انتقال حرارت زیادتر می‌شود (جدول (۱)). در این ماده، عامل اصلی رسوب‌کننده چربی است و با توجه به این که شیر نارگیل یک سیال سودو پلاستیک است، بنابراین با زیاد شدن دما، گرانش کاهش و سیال رقیق‌تر و آسان‌تر حرکت می‌کند، از این‌رو، میزان رسوب آن در دماهای بالاتر کمتر می‌شود (شکل (۳)). هرچه شدت جریان زیادتر شود، میزان رسوب کمتر می‌شود، (شکل (۲)) و جدول (۱) و با کم شدن رسوب به مساحت کمتری نیاز است (شکل (۴)).

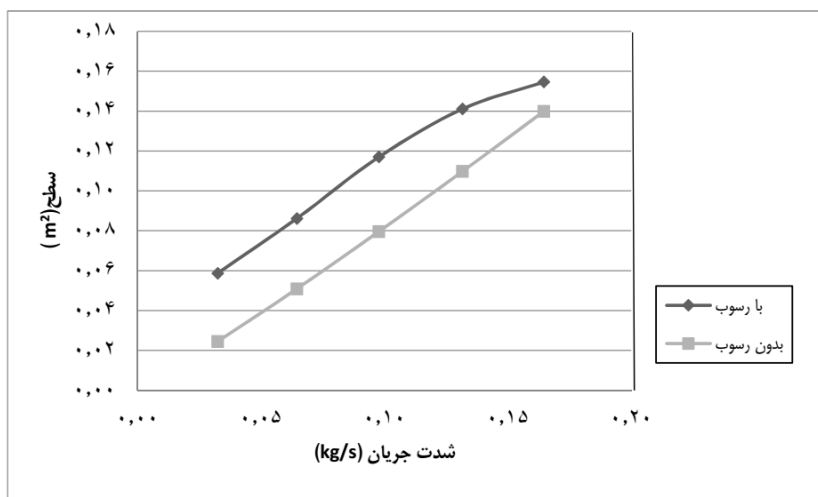
در ابتدا، به منظور اعتباربخشی روش و برنامه به‌کار گرفته شده، مقایسه‌ای بین سطح انتقال حرارت به‌دست آمده از روش طراحی الگوریتم سریع و روش‌های دیگر طراحی [۶] به‌عمل آمده است (شکل (۱)). چون در روش طراحی الگوریتم سریع از افت فشار حداکثر مجاز استفاده می‌شود، بدیهی است بالاترین ضرایب انتقال حرارت برای دو جریان گرم و سرد به‌دست می‌آید و در نتیجه مقدار سطح به‌دست آمده از این روش کمینه خواهد بود. استفاده از الگوریتم طراحی سریع، ما را از جستجو از سایر شکل‌های هندسی طراحی‌های متفاوت بی‌نیاز می‌کند و در عین حال، استفاده کامل با توجه به افت فشار مجاز را نیز تأمین می‌کند.



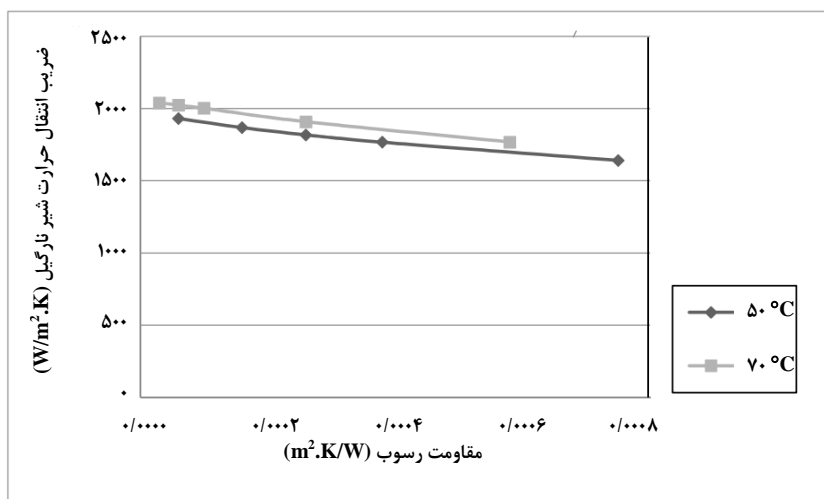
شکل ۱. مقایسه RDA و روش‌های دیگر طراحی [۶].

جدول ۱. داده‌های آزمایشگاهی سیال شیر نارگیل در دماها و سرعت‌های متفاوت [۷].

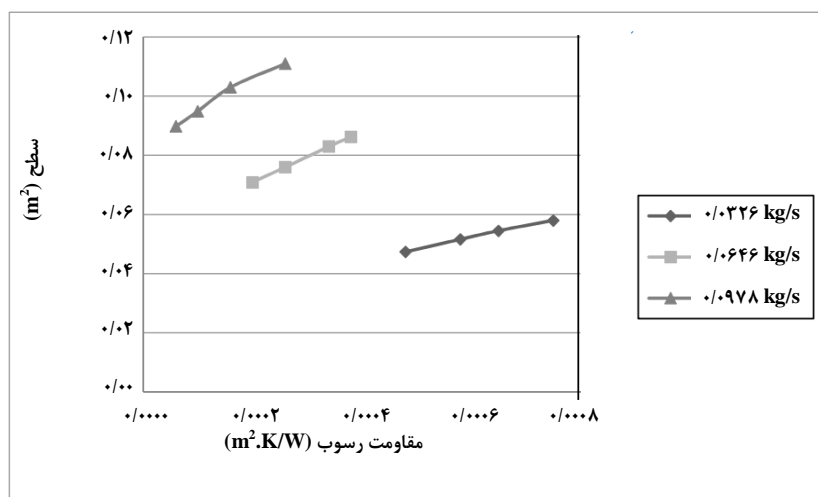
$U_{t=0 \text{ min}}$ ( $W/m^2K$ )	$U_{t=6h}$ ( $W/m^2K$ )	$R_{f,t=6h}$ ( $m^2K/W$ )	$\Delta Bi = \Delta t$ ( $t = 4 - 6h$ ) ( $1/min$ )	دمای شیر نارگیل ( $^{\circ}C$ )	شدت جریان شیر نارگیل ( $L/min$ )	تعداد آزمایشات
۱۰۱۶/۱	۵۷۸/۱	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۱۶۹	۵۴/۵-۵۰	۲	۱
۹۹۰/۸	۶۰۱/۴	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۱۵۴	۶۴/۴-۶۰	۲	۲
۱۰۳۵/۳	۶۴۳/۸	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۶۳	۷۴/۶-۷۰	۲	۳
۱۶۵۳/۱	۱۰۱۶/۰	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۱۳۹	۵۴/۴-۵۰	۴	۴
۱۶۷۵/۲	۱۰۶۸/۱	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۱۳۸	۶۴/۵-۶۰	۴	۵
۱۷۰۰/۹	۱۱۷۳/۶	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۶۲	۷۴/۶-۷۰	۴	۶
۲۳۳۲/۳	۱۴۰۷/۵	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۷۹	۵۴/۴-۵۰	۶	۷
۲۳۳۳/۹	۱۷۰۶/۱	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۷۱	۶۴/۵-۶۰	۶	۸
۲۳۶۷/۷	۱۹۰۸/۹	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۶۵	۷۴/۶-۷۰	۶	۹



شکل ۲. تغییرات سطح انتقال حرارت لازم در شدت جریان‌های مختلف (در حالت با رسوب و بدون رسوب).



شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت در جریان با رسوب برای دماهای مختلف.



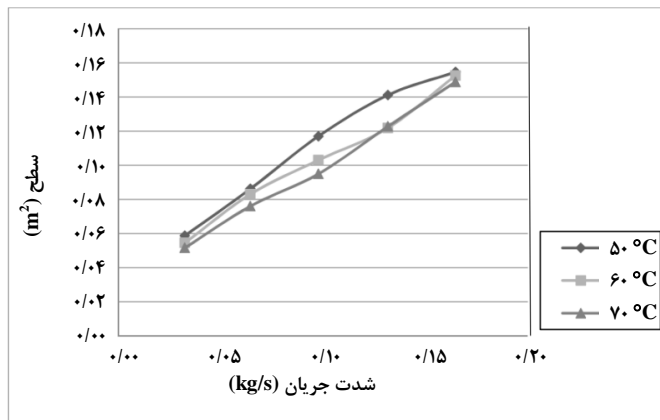
شکل ۴. تاثیر میزان رسوب در میزان سطح انتقال حرارت مورد نیاز به ازای دبی‌های مختلف.

ذکر خواهد شد که در آن تغییرات یاد شده بر اثر رسوب سولفات کلسیم بررسی شده است.

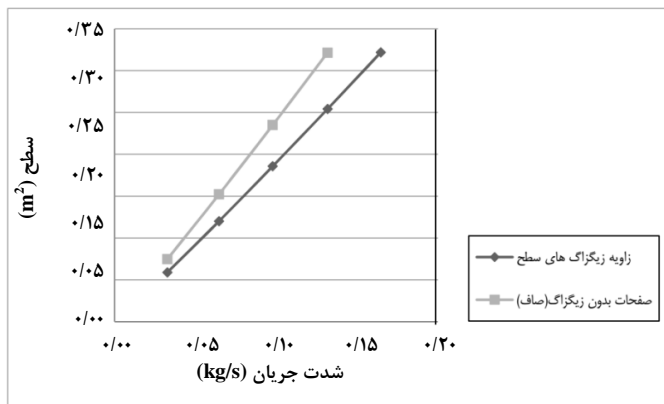
### ۳. مدل‌سازی تشکیل رسوب بلوری در مبدل‌های حرارتی

در طول دوره کارکرد مبدل‌های حرارتی، پدیده تشکیل رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت یکی از مشکلات اساسی و عملیاتی به‌شمار می‌آید. رسوبات از نوع بلوری وقتی رخ می‌دهد که حلالیت معکوس نمک‌های محلول در سیال اتفاق می‌افتد. حلالیت این نمک‌ها با افزایش دما کم می‌شود و سپس رسوب می‌کنند. نمونه‌ای از این رسوب کلسیم سولفات، فسفیت و کلسیم است. کلسیم سولفات یکی از متداول‌ترین رسوبات در نانوفناوری صافش (لی<sup>۲</sup> (۱۹۹۹))، تقطیر آب یا اسمز معکوس است [۸].

با افزایش شدت جریان و دما در شیر نارگیل، رسوب کم می‌شود، بنابراین مساحت لازم برای انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد (شکل (۵)). مساحت با افزایش دبی جریان، زیاد می‌شود (شکل (۶)). ولی مقدار مساحت کل انتقال حرارت برای صفحات چورون<sup>۱</sup> کمتر و این امر به علت وجود شیر بر روی این صفحات و ایجاد آشفستگی بیشتر در جریان است. این شیرها میزان انتقال حرارت را بیشتر (شکل (۶)) و در نتیجه مقدار سطح لازم برای انتقال حرارت معین را کاهش می‌دهند. یکی از مشکلات ناشی از تشکیل رسوب، نیاز به سطح مازاد برای انتقال حرارت است که به تناسب آن میزان هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد. در مطلب بالا به این موضوع پرداخته شد اما از دیگر مشکلات ناشی از رسوب کاهش انتقال حرارت، دمای سطح و افزایش سرعت ناشی از تغییر در هندسه‌ی جریان است. در ادامه، شبیه‌سازی صورت گرفته با استفاده از سیال آب نیشکر



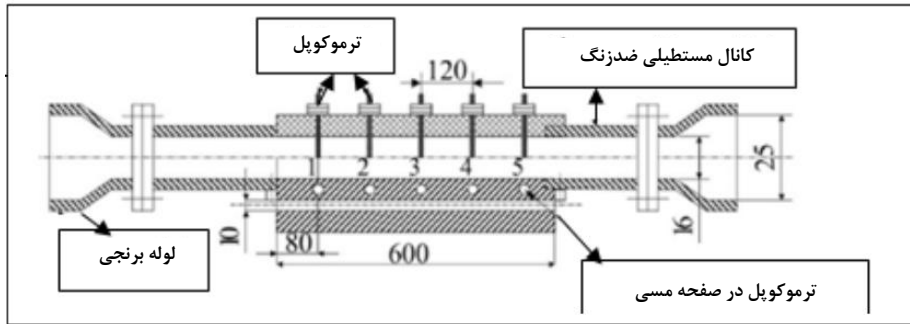
شکل ۵. نسب مساحت مبدل به شدت جریان در دماهای مختلف.



شکل ۶. نسبت مساحت مبدل به شدت جریان در صفحات زاویه‌دار و مسطح.

1. Chevron Plate

2. Lee



شکل ۷. نمودار تصویری از مسیر عبور جریان (ابعاد بر حسب میلی‌متر) [۸].

ساده‌سازی به معادله زیر برای سرعت تشکیل جرم بر واحد سطح می‌رسند، که بوهنت<sup>۲</sup> (۱۹۸۵) آن را به دست آورده است [۸]:

$$\frac{dm}{dt} = \beta \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\beta}{k_r} \right) + (C_b - C_s) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\beta}{k_r} \right)^2 + (C_b - C_s)} \right] \quad (۸)$$

$$\Delta \dot{m} = \frac{dm}{dt} \cdot \Delta t \quad (۹)$$

مقدار  $k_r$  با توجه به آزمایش‌های انجام شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_r = 2175 \exp\left(\frac{-6710}{T_s}\right) \quad (۱۰)$$

به منظور مدل‌سازی تعیین غلظت اشباع، تعیین ضخامت و مقاومت، تعیین غلظت توده، مقدار چگالی و ضریب رسانش حرارتی رسوب از رابطه‌های مرجع [۸] استفاده شده است.

### ۳-۱ ضریب انتقال جرم

مقدار ضریب انتقال جرم از این رابطه به دست می‌آید:

$$\beta = \frac{Sh.D}{d_h} \quad (۱۱)$$

مقدار عدد شروود طبق معادله زیر حاصل می‌شود:

$$Sh_x = 0.023 Re^{0.8} Sc^{0.33} \left(1 + \frac{6d_h}{x}\right) \quad (۱۲)$$

$$Sc = \frac{\eta}{\rho.D} \quad Re = \frac{W.\rho.d_h}{\eta} \quad (۱۳)$$

2. Bohnet

در مدت تشکیل هسته، ذرات بلوری به صورت جزئی تشکیل می‌شوند و در ادامه بلورها در اندازه‌های بزرگ‌تر رشد می‌کنند. در پدیده رشد بلور یک رشته فرایند اتفاق می‌افتد. مولین<sup>۱</sup> و همکارانش، شش مرحله برای این فرایند تعیین کردند. در محلول‌های آبی این شش مرحله می‌توانند ترکیب و به دو سازوکار اصلی تبدیل شوند: انتقال یون‌ها از توده به سطح مایع-بلور، که در سطح یون به بلور می‌چسبند. انتقال یون‌ها از این فرمول پیروی می‌کند [۸]:

$$\frac{dm'}{dt} = \beta(C_b - C_i) \quad (۵)$$

در این مورد کلسیم سولفیت به سطح منتقل می‌شود و در آنجا یون‌های کلسیم سولفیت به شکل بلور می‌چسبند. تجمع جرم از این رابطه پیروی می‌کند:

$$\frac{dm}{dt} = k_r(C_i - C_s)^n \quad (۶)$$

$n$ : توان و برای کلسیم سولفات دی‌هیدرات ۲ است.

$K_r$  از رابطه آرنیوس به دست می‌آید. مقادیر  $K_{r0}$  و  $\Delta E$  توسط افراد مختلف مقادیر متفاوتی به دست داده است.

$$k_r = k_{r0} \exp\left(\frac{-\Delta E}{R_g T_i}\right) \quad (۷)$$

از طریق آزمایش، دستیابی به مقدار  $C_i$  امکان‌پذیر نیست. بنابراین معادلات (۲۶) و (۲۷) را به ازای  $n=2$  مساوی قرار می‌دهند و پس از

1. Mullin

مقدار ضریب انتقال جرم در سرعت‌های مختلف مطابق جدول (۲) است:

جدول ۲. مقدار ضریب انتقال جرم در سرعت‌های مختلف [۸].

$\beta \times 10^{+5}$ (m/s)	Sc	Sh	Re
۱/۹	۵۸۶	۴۲۶	۱۱۰۰۰
۳/۴	۵۸۶	۷۶۹	۲۳۰۰۰
۴/۷	۵۸۶	۱۰۵۱	۳۴۰۰۰

برای به دست آوردن ضریب انتقال جرم به اطلاعات محلول سولفات کلسیم، به شرح زیر، نیاز داریم:

$$D_f = 1.057 \times 10^{-5}$$

$$\rho_l = 991 \quad \eta_l = 614 \times 10^{-6}$$

### ۲-۳ محاسبه دمای سطح در بخش محلول - رسوب

در اینجا محاسبه دمای دیوار مهم است و باید به آن توجه ویژه مبذول داشت. در این مدل سازی برای به دست آوردن دمای بخش محلول - رسوب از رابطه زیر استفاده شده است [۹]:

$$T_f = T_w - R_f \dot{q} = T_w - \frac{\Delta \dot{m}}{\rho_f \lambda_f} \dot{q} \quad (14)$$

### ۴. شبیه سازی رسوب بلوری

محلول با دمای ۴۰°C و سرعت ۰/۶ m/s وارد کانال می شود. غلظت

کلسیم سولفات ورودی ۵/۲۵ kg/m<sup>3</sup> است. برای ساده شدن مسئله یک رشته فرض به عمل آمده است: ۱. برای ساده سازی صفحه مورد نظر نرم در نظر گرفته شده است؛ ۲. ته نشینی رسوب شرایط را تغییر نمی دهد؛ ۳. فاز تشکیل هسته ناچیز است؛ ۴. فاز تشکیل هسته از کلسیم سولفات دو آبه (گیپسون) است؛ ۵. فرض شده رسوب چسبندگی قوی به سطح دارد و برگشت فاز خیلی کم است. روند شبیه سازی رسوب از قرار زیر است:

در این بخش از مقاله تلاش شده تا با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent V.15 و رمز نویسی به زبان ++C و با استفاده از توابع UDF و UDS این شبیه سازی صورت گیرد (جدول (۳)).

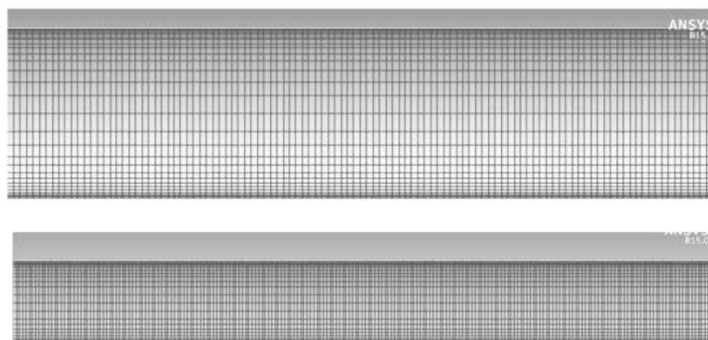
شبکه بندی میدان به کمک نرم افزار گمبیت ۲/۴ انجام پذیرفته و شبیه سازی در فضای دو بعدی و از شبکه بندی چهاروجهی منتظم بهره برده شده است (شکل (۸)). شبکه بندی در کنار دیوارها به علت تنش بیشتر و حساسیت مقادیر، کوچک تر در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله از حالت ناپایا، حل مبتنی بر فشار، استفاده شده است. برای شرایط متلاطم، از مدل k-ε و استاندارد بهره گرفته شده است، زیرا متداول ترین مدل تلاطم برای کاربردهای صنعتی است و دقیق تر و آسان تر همگرا می شود. دقت تمامی معادلات از مرتبه اول اختیار شده است. مدل چند فازي اویلرین - اویلرین و مدل انرژی در این نرم افزار فعال شده است. مشخصه های فیزیکی محلول کلسیم سولفات و کلسیم سولفات جامد و صفحه به کار رفته در نرم افزار انسیس فلونت وارد شد. به منظور تشخیص درستی روش حل، نمودار مقاومت در حالت تجربی [۸] و داده های برنامه با هم مقایسه شدند.

جدول ۳. مشخصه های به کار رفته در نرم افزار [۸].

ضریب انتقال جرم (m/s)	ضریب رسانایی (W/mK)	غلظت سولفات کلسیم (kg/m <sup>3</sup> )	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سرعت (m/s)	دما (°C)	مشخصه ها ماده
۱/۹ × ۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۶۱۴	۵/۲۵	۹۹۱	۰/۶	۴۰	کلسیم سولفات محلول
-	۲/۱۳	-	۲۰۳۰	-	-	کلسیم سولفات جامد (گیپسون)
-	۴۰۰	-	۸۹۲۳	-	۸۰	صفحه مسی

روی دیوار تشکیل می‌شود (شکل (۱۱)). در این پژوهش به منظور اعتباربخشی نتایج، مقدار مقاومت رسوب به‌دست آمده از برنامه نوشته شده با مقدار آن در حالت آزمایشگاهی [۸] مقایسه شده است. طبق این مقایسه این دو نتیجه تطابق مطلوبی را نشان می‌دهند (شکل (۱۲)).

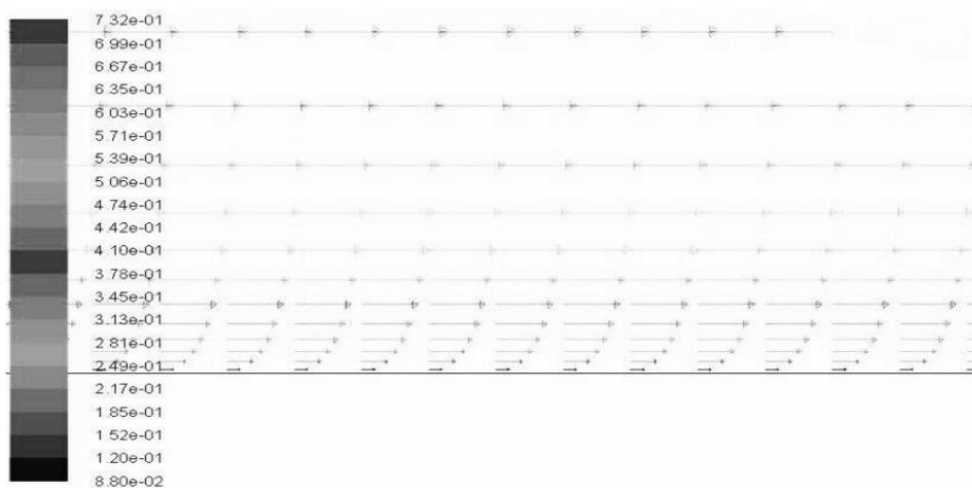
در مبدل‌های حرارتی سیال در طول مبدل بر اثر تماس با سطح به مرور زمان گرم خواهد شد که در شبیه‌سازی و مدل‌سازی تحقیق حاضر به خوبی قابل مشاهده است. (شکل (۹)) مطابق شکل‌ها، هرچه به انتهای صفحه نزدیک می‌شویم، دما بالاتر می‌رود و بنابراین رسوب نیز بیشتر خواهد شد. مطابق شکل (۱۰) سرعت سیال در کناره‌های دیوار کم می‌شود و به این دلیل هم رسوب بیشتری بر



شکل ۸. شبکه‌بندی انجام شده در این پژوهش.



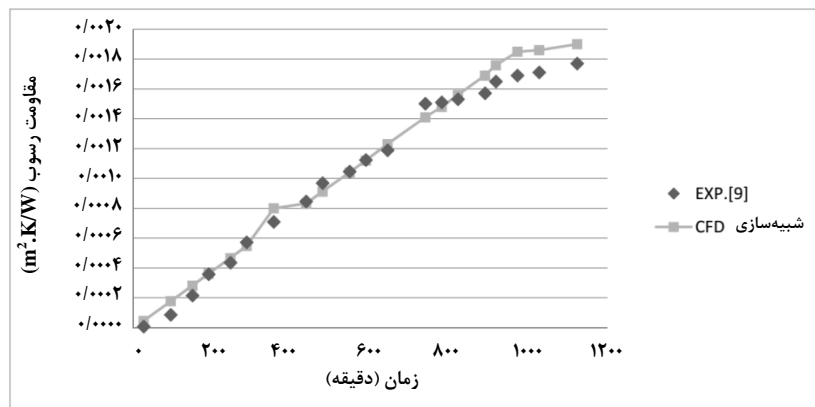
شکل ۹. تغییرات دمای سیال در طول فرایند تا زمان ۷۰۰۰۰ ثانیه.



شکل ۱۰. نیم رخ بردارهای سرعت در بخشی از مبدل برای سیال آب نیشکر.



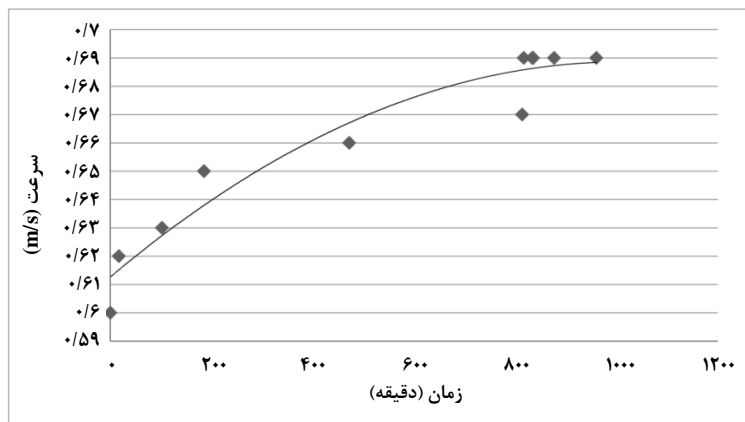
شکل ۱۱. تشکیل رسوب بر روی سطح مبدل صفحه‌ای.



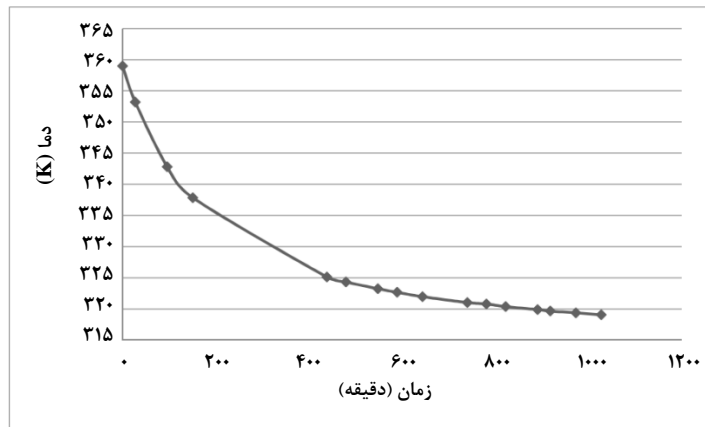
شکل ۱۲. مقایسه مقاومت رسوب در آزمایشگاه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک CFD.

به علت تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی در خلال زمان کار، تغییراتی در میزان سرعت، دما و دیگر عوامل روی خواهد داد. این تغییرات با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت نت قابل مشاهده است. سرعت و دما نیز از کمیت‌هایی‌اند که در شرایط رسوب‌گذاری تغییر می‌کنند (شکل‌های (۱۳) و (۱۴)). به علت تشکیل رسوب بر روی صفحه، فضای مسیر عبور جریان برای سیال کاهش می‌یابد و این امر

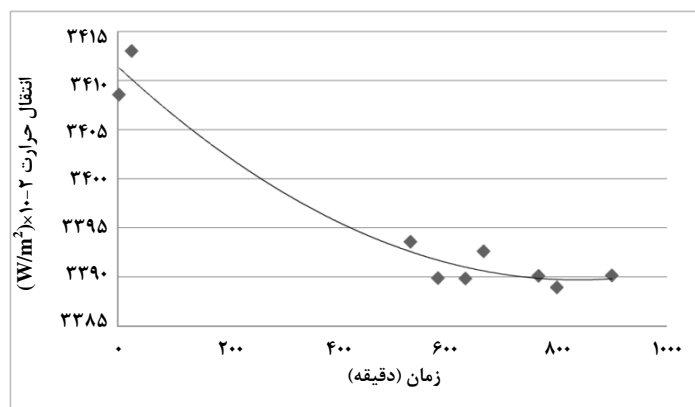
به افزایش سرعت منجر می‌شود. ایجاد رسوب باعث پدید آمدن مقاومت نسبت به انتقال حرارت می‌شود؛ بنابراین میزان انتقال حرارت و دما کاهش می‌یابد. با تشکیل رسوب، به دلیل ایجاد مقاومت رسوب نسبت میزان انتقال حرارت نیز به تناسب زمان تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد که با افزایش رسوب نسبت به زمان میزان انتقال حرارت نیز کم خواهد شد (شکل (۱۵)).



شکل ۱۳. تغییرات سرعت سیال ناشی از تشکیل رسوب.



شکل ۱۴. تغییرات دما در مکان تماس رسوب با سیال.



شکل ۱۵. تغییرات میزان ضریب انتقال حرارت با زمان.

نیز شبیه‌سازی رسوب با نرم‌افزار فلوئنت، مطالعه شد. در این شبیه‌سازی پس از اعتبار‌سازی و اطمینان از نزدیکی مقادیر مقاومت رسوب حاصل از آزمایشها که در منابع ذکر شده، با میزان محاسبه شده از شبیه‌سازی، نمودارهای سرعت، انتقال حرارت، و دما گویای آن است که با تشکیل رسوب، سرعت جریان به علت مسدود شدن سطح مقطع جریان افزایش می‌یابد. از آن‌جا که ضریب رسانایی رسوب بسیار کم است، ضریب انتقال حرارت و دمای سطح مبدل در خلال زمان کاهش می‌یابد.

#### نمادها و نشانه‌ها

A: مساحت سطح مورد نیاز برای مبدل ( $m^2$ )

$C_h$ : ثابت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

$d_e$ : قطر معادل کانال (m)

$f_{ch}$ : ضریب اصطکاک

#### ۵. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله با روش الگوریتم طراحی سریع، یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، که در آن سیال شیر نارگیل بکار گرفته شده، طراحی شده است. بخوبی نشان داده شده که چگونه با بهره‌گیری از این روش به دلیل استفاده از افت فشار بیشینه، نسبت به سایر روش‌های متداول طراحی، سطح انتقال حرارت کمتری مورد نیاز است. این میزان سطح در شرایطی که سیال رسوب تشکیل دهد به مراتب بیشتر می‌شود. در سیال شیر نارگیل، چون با افزایش دما و افزایش شدت جریان میزان رسوب کاهش می‌یابد، بنابراین سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت هم کمتر است. در صورتی که از صفحات مبدل حرارتی شیاردار بهره گرفته شود، به علت ایجاد جریان آشفته و ضرایب انتقال حرارت بیشتر در این صفحات، مقدار سطح انتقال حرارت کمتری مورد نیاز است.

همچنین، برای رسوب بلوری سولفات کلسیم موجود در آب‌نیشکر

$D_f$ : سرعت نفوذ جرم ( $m^2/s$ )

$\rho$ : چگالی ( $kg/m^3$ )

$\lambda$ : رسانایی حرارتی سیال ( $W/m.K$ )

$\varphi$ : ضریب تصحیح گرانی

$\eta$ : گرانیروی ( $kg/m.s$ )

$\Delta T_{lm}$ : اختلاف دمای متوسط لگاریتمی

$\Delta P$ : افت فشار (Pa)

$m$ : نمای عدد رینولدز در معادله انتقال حرارت

$n$ : نمای عدد رینولدز در معادله ضریب اصطکاک

$\Gamma_{fc}$ : مقاومت رسوب در سمت سیال سرد ( $m^2.K/W$ )

$\Gamma_{fh}$ : مقاومت رسوب در سمت سیال گرم ( $m^2.K/W$ )

$R_f$ : مقاومت رسوب ( $m^2.K/W$ )

$K_p$ : ثابت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

$L$ : طول ویژه

$L_{ch}$ : طول کانال (m)

$L_p$ : طول یک جریان (m)

$\dot{m}_{ch}$ : سرعت سیال در کانال ( $m/s$ )

$\dot{M}_{ch}$ : دبی جرمی ( $kg/s$ )

$N_e$ : تعداد کانال‌ها

$N_p$ : تعداد گذرها

$Pr$ : عدد پرنتل

$Q$ : بار حرارتی ( $W/m^2$ )

$Re$ : عدد رینولدز

$T$ : دما ( $^{\circ}C$ )

$T_i$ : دمای سطح رسوب- سیال ( $^{\circ}C$ )

$U$ : ضریب کلی انتقال حرارت ( $W/m^2.K$ )

$v$ : سرعت سیال ( $m/s$ )

$v_o$ : دبی حجمی

$w$ : عرض صفحه‌های مبدل (m)

$y$ : ثابت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

$z$ : ثابت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

$m$ : تعداد مسیر در مبدل صفحه‌ای

$h$ : ضریب انتقال حرارت سیال ( $W/m^2.K$ )

$\alpha$ : ضریب انتقال حرارت ( $W/m^2.K$ )

$d_h$ : قطر هیدرولیکی (m)

$Sh$ : عدد شروود

$\beta$ : ضریب انتقال جرم ( $m/s$ )

$C_b$ : غلظت در توده ( $kg/m^3$ )

$C_s$ : غلظت اشباع ( $kg/m^3$ )

$C_i$ : غلظت در سطح رسوب - سیال

$R$ : ثابت گازها

$V$ : سرعت سیال ( $m/s$ )

$\varepsilon$ : ضریب تخلخل

$\lambda_f$ : ضریب انتقال حرارت در رسوب ( $W/m.K$ )

$K_f$ : ثابت واکنش سرعت ( $m^2/kg.s$ )

$\dot{m}$ : جرم رسوب (kg)

$t$ : زمان (s)

## مراجع

- [1] فرشیدان‌فر، ا.؛ کاربرد مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای در صنعت، مهندسی مکانیک، ۸۴: (۱۳۹۱).
- [2] Goode, K. R, Asteriadou Konstantia, Robbins and Peter P. T., Fryer J., "Fouling and cleaning studies in the Food and Beverayer Indestry classified by cleaning Type", Comprehensive Reviews in food Science and food safety Vol12, p. 121-143, (2013) .
- [3] جعفری نصر، م؛ "رسوب گذاری در مبدل‌های حرارتی"، چاپ دوم تهران: پژوهشگاه صنعت نفت، ص. ۱۳-۱۴ (۱۳۹۲).
- [4] Chol, W., Jun, S., Nguyen, L.T., Rungraeng, N., YI H., Balasubramanian, S., Puri and J. Lee V. M., "3-D Milk fouling modelling of plate heat exchangers with different surface finishes using computational fluid dynamics codes", Journal of food process Engineering ISSN 36, p. 439-449, (2012).
- [5] جعفری نصر، محمدرضا؛ "طراحی بهینه و مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی قاب و صفحه"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴)۲۷: ۷۹ تا ۹۲ (۱۳۸۷).
- [6] Saunders, E. A. D., B. Sc., Eng, C., M. I. Mech, E., "Heat exchangers selection, design & construction", Longmen Group UK Limited, p. 454-457, (1988).
- [7] Narataruksa, P., Pichitvittayakarn, W., Heggs, P. J., Tia, S., "fouling behaviour of coconut milk at pasteurization temperature", Applied Thermal Engineering 30, 1387-1395, (2010).
- [8] Mwaba, M. G., "Analysis of Heat exchanger fouling in case sugar Industry", Technische University Eindhoven, p. 33-84, (2003).
- [9] Brahim, F., Augustin, W., Bohnet, M., "Numerical simulation of the fouling process", International Journal of Thermal Sciences 42, p. 323-334, (2003).