

# اندازه‌گیری آزمایشگاهی رسوب آب خنک‌کننده در مبدل حرارتی با جریان حلقوی

میثاق مهتابی<sup>۱</sup>، شیماء عزیزی<sup>۲\*</sup>، سید محسن پیغمبرزاده<sup>۳</sup>

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۳- گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۰۴

پیام‌نگار: s.azizi.chem@gmail.com

## چکیده

آب در حکم یکی از پرکاربردترین سیالات انتقال گرما در واحدهای صنعتی، برای تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی از پتانسیل زیادی برخوردار است. در این تحقیق، تعداد زیادی آزمایش به منظور اندازه‌گیری رسوب آب خنک‌کننده در یک مبدل حرارتی با جریان حلقوی به قطر هیدرولیکی ۴۰ mm، تحت جریان انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری انجام شده است. این آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر پارامترهایی چون سرعت سیال (۰/۰۱۹ m/s، ۰/۰۳۷، ۰/۰۵۸) و شار گرمایی ( $24631 \text{ W/m}^2$ ، ۱۸۵۲۰، ۱۶۱۸۰) بر مقدار دمای سطح، ضریب انتقال گرما و مقاومت رسوب صورت گرفته است. در این تحقیق، از افزایش دمای سطح انتقال گرما با گذشت زمان به عنوان شاهدهی برای تشکیل رسوب در روی سطح استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت سیال، دمای سطح انتقال حرارت کاهش، ضریب انتقال حرارت افزایش و مقاومت رسوب کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش شار گرمایی، دمای سطح انتقال حرارت افزایش، ضریب انتقال حرارت کاهش و مقاومت رسوب افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: رسوب مبدل حرارتی، مقاومت رسوب، آب خنک‌کننده، مقاومت گرمایی.

## ۱. مقدمه

معمولاً با مقاومت رسوب بیان می‌کنند که باید به همراه سایر مقاومت‌های حرارتی، در تعیین ضریب کلی انتقال حرارت به حساب آید. از آنجا که تشکیل رسوب در تجهیزات گرمایی هزینه‌های زیادی را برای یک واحد صنعتی به وجود می‌آورد، اندازه‌گیری و تلاش برای کنترل آن از اهمیت بسیاری برخوردار خواهد بود [۱]. حضور این رسوبات موجب پیدایش مقاومت در برابر انتقال حرارت می‌شود، بنابراین مواد ته‌نشین‌شده به واسطه ضریب رسانش کم، ضریب کلی

سطوح انتقال گرما پس از مدتی عملیات، ممکن است با رسوب‌های مختلف پوشانده و یا در نتیجه برهم‌کنش میان سیالات و مواد مورد استفاده در ساخت مبدل گرمایی، دچار خوردگی شوند. در هر حال، این پوشش، مقاومت اضافی در مقابل جریان حرارت ایجاد می‌کند و بنابراین از کارایی آن می‌کاهد. اثر کلی این پدیده را

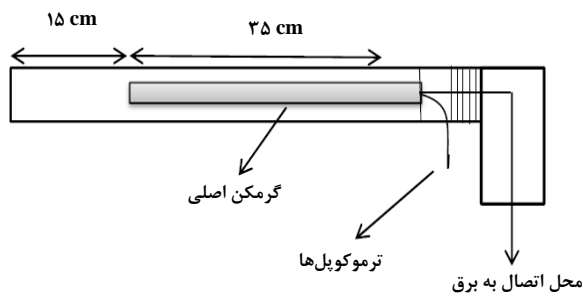
\* ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، گروه مهندسی شیمی

اندازه ذرات رسوبی که روی سطح انتقال حرارت تولید می‌شود، تأثیر می‌گذارد. افزایش سرعت سبب افزایش تولید رسوب می‌شود. غلظت ذرات نیز در تولید رسوب بیشتر، تأثیر زیادی دارد. کیم و وب [۱۰] در آزمایش‌های انجام شده برای جلوگیری از رشد رسوب زیستی، مقداری کلر و تولیترازول به فاضلاب اضافه کردند. لی و چو [۱۱] در مطالعات خود از حباب‌های هوا برای کنترل رسوب مواد معدنی در مبدل‌های حرارتی بهره گرفتند. آنان مشاهده کردند که حباب‌های چسبیده به سطح، سبب می‌شوند رسوب در همان محل تولید شود. قسمت‌هایی از سطح که حباب به آنها نچسبیده باشد، حتی در مدت زمان طولانی هم رسوب چشمگیری تولید نمی‌کند. هسون و همکاران [۱۲] نشان دادند سرعت تولید رسوب به شرایط فوق اشباعی سیال بستگی چشمگیری دارد. اگر فوق اشباعی کم باشد، سرعت تولید رسوب نیز کم است اما در فوق اشباعی بالا، سرعت تولید رسوب زیاد است. اگر فوق اشباعی در حد چشمگیری زیاد باشد، سرعت تولید رسوب ثابت می‌شود. در شرایط فوق اشباعی سیال، طبق نتایج به‌دست آمده، به علت بالا بودن غلظت سیال، جرم رسوب تولید شده نسبت به زمان با افزایش سرعت سیال، به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. در آزمایش‌های آنان، سرعت جریان سیال ثابت فرض شده بود. کارابلاس [۱۳] اظهار کرد که این امری بدیهی است که تولید رسوب بیشتر، به توزیع ذرات بستگی دارد. افزایش ذرات در سیال ممکن است سبب تولید بلورهای رسوب بیشتری بر روی سطح انتقال گرما شود. وب و لی [۱۴] نشان دادند امکان بالقوه آب واحد برج‌های خنک‌کننده نیز برای تولید رسوب زیاد است. آب خنک‌کننده به علت داشتن افزودنی‌های شیمیایی و ممانعت‌کننده‌های خوردگی می‌تواند چندین نوع رسوب مختلف ایجاد کند. آب داغ سبب ته‌نشین شدن نمک‌های  $\text{CaCO}_3$  و  $\text{MgCO}_3$  می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که مقاومت رسوب به مرور زمان به میزان کمی افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر، تغییر عواملی چون سختی آب، سرعت جریان آب و دمای سطح جملگی می‌توانند تولید رسوب را کنترل کنند. در این تحقیق، میزان مقاومت رسوب تشکیل شده آب پایه مورد استفاده در برج‌های خنک‌کننده صنعتی، به دقت اندازه‌گیری و تحلیل شده است. در این روش، از افزایش دمای سطح با گذشت زمان می‌توان مقدار رسوب تشکیل شده روی سطح را با بهره‌گیری

انتقال حرارت را کاهش می‌دهند و به دلیل مسدود کردن مسیر عبور جریان، باعث کاهش شدت جریان و افزایش افت فشار می‌شوند و به این ترتیب بازدهی مبدل حرارتی کاهش می‌یابد. مواد رسوب‌دهنده ممکن است به صورت بلور، مواد زیستی و نیز محصولات واکنش‌های شیمیایی شامل محصولات خوردگی یا مواد معلق باشند [۲]. به خاطر تنوع انواع رسوب، دسته‌بندی‌های متفاوتی از آنها ارائه شده است که یکی از این تقسیم‌بندی‌ها عبارت است از تشکیل رسوب بارشی، تشکیل رسوب ناشی از حضور ذرات معلق، رسوب ناشی از واکنش شیمیایی، رسوب زیستی و تشکیل رسوب انجمادی [۳].

تاکنون مطالعات بسیاری برای اندازه‌گیری رسوب در تجهیزات حرارتی مختلف انجام شده است. پیغمبرزاده و همکاران [۴] رسوب ذرات بلوری محلول آبی  $\text{CaSO}_4$  و نیز محلول حاوی ذرات معلق  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در نرمال هپتان بر روی سطح انتقال حرارت را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بنابر مشاهدات آنان، با افزایش سرعت جریان سیال، مقاومت رسوب به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. هلالی‌زاده و همکاران [۵] نشان دادند که سرعت تشکیل رسوب به دمای سطح انتقال حرارت بستگی زیادی دارد. این موضوع در مورد رسوب مخلوطی از نمک‌ها بر روی سطح انتقال گرما نمود بیشتری دارد. هسون و ژاوی [۶] نشان دادند در ناحیه‌ای از سطح انتقال گرما که تحت تأثیر حباب‌های جوشش قرار می‌گیرد، تشکیل رسوب سریع‌تر و بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابرین، در حالت جوشش، مقاومت رسوب ( $R_d$ ) افزایش و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $h$ ) کاهش می‌یابد. هج [۷] نشان داد که اگر فرایند تشکیل رسوب از طریق انتقال جرم کنترل نشود، سرعت تشکیل رسوب مستقل از سرعت جریان سیال خواهد شد. واکنش‌های شیمیایی روی سطح انتقال گرما نیز بر تشکیل رسوب اثرگذارند. افزایش عدد رینولدز نیز سبب افزایش تولید رسوب می‌شود. پیغمبرزاده و بهرامی [۸] در بررسی‌های خود نشان دادند که افزایش مقاومت رسوب نسبت به زمان خطی است. هر چند در ابتدای مراحل تشکیل رسوب، گاهی مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان کاهش نسبی دارد. علت این امر آن است که در ابتدا تشکیل هسته‌های اولیه رسوب نقش زبری سطح را برای سطح انتقال گرما ایفا می‌کند. بنسال و همکاران [۹] به این نتیجه رسیدند که سرعت سیال، بر

مبدل حرارتی ساخته شده برای این تحقیق، مبدلی حرارتی با جریان حلقوی است که از سطح لوله داخلی، شار حرارتی ثابتی به سیال مجاور پوسته اعمال می شود. لوله داخلی چنان ساخته شده است که یک عنصر حرارتی در مرکز آن تعبیه شده و سیال کنار پوسته نمی تواند وارد لوله شود. جنس لوله داخلی مبدل آهن کربن دار و جنس پوسته مبدل، فولاد ضد زنگ است. در شکل (۳) لوله داخلی مبدل، حاوی گرمکن اصلی دستگاه، را مشاهده می کنید. این عنصر حرارتی، شار حرارتی ثابتی را به سطح لوله داخلی منتقل می کند. عنصر حرارتی به طول ۳۵ سانتی متر، قطر ۱۲ میلی متر و توان ۲۵۰۰ W در این تحقیق به کار گرفته شده است. عنصر حرارتی از یک منبع تغذیه ولتاژ (اتو ترانس) و از طریق جریان برق تغذیه می شود. منبع تغذیه ولتاژ از طریق تغییر ولتاژ، شارهای حرارتی مختلفی را در عنصر برقرار می کند. شار حرارتی در طول هر آزمایش ثابت می ماند. با گرم شدن المنت، لوله داخلی مبدل حرارتی نیز داغ می شود. سیال مورد آزمایش نیز از درون پوسته مبدل به حرکت درمی آید. با گردش سیال در یک حلقه بسته و عبور آن از روی سطح انتقال حرارت، فرایند تولید رسوب با گذشت زمان اتفاق می افتد.



شکل ۳. نمایی از گرمکن آزمایشگاهی به کار گرفته شده در مبدل حرارتی.

## ۲-۲ تصحیح دما

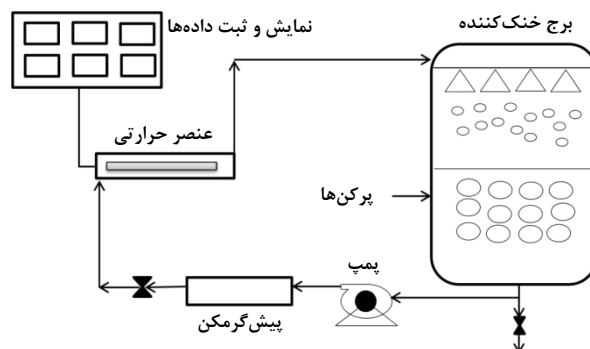
چهار دستگاه ترموکوپل، دمای سطح انتقال حرارت را در طول فرایند تشکیل رسوب، اندازه گیری می کنند. ترموکوپلها از نوع K (K-type) هستند که از یک طرف درون ضخامت لوله داخلی مبدل حرارتی قرار گرفته اند و از طرف دیگر به چهار نمایشگر دیجیتال متصل اند. دقت این نمایشگرها  $1 \pm ^\circ\text{C}$  است. در شکل (۴) محل قرارگیری این ترموکوپلها در داخل ضخامت لوله داخلی را

از موازنه انرژی محاسبه کرد. با وجود این که فرایند تشکیل رسوب فرایندی زمان بر است و در همه طرح های آزمایشی خنک سازی نصب شده در شرکت های صنعتی، بررسی این مسئله چندین روز طول می کشد، اما مطابق این روش، هر آزمایش بعد از حدود یک روز جریان متوالی سیال، نتیجه لازم را ارائه می کند. لذا روش به کار رفته در این مقاله، علاوه بر دقت بیشتر، بررسی سریع تر عوامل موثر بر تشکیل رسوب را ممکن می کند.

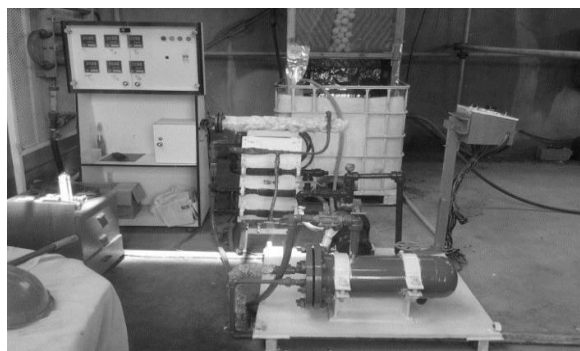
## ۲. آزمایش

### ۲-۱ سامانه آزمایشگاهی

در شکل (۱)، طرحواره دستگاه آزمایش ساخته شده در این تحقیق را مشاهده می کنید. این مجموعه شامل سه بخش اساسی است: بخش اول مبدل حرارتی، بخش دوم برج خنک کننده، و بخش سوم مجموعه کنترلی و ابزار دقیقی سامانه. شکل (۲) تصویر واقعی سامانه آزمایشگاهی ساخته شده برای این تحقیق را مشاهده می کنید.



شکل ۱. طرحواره سامانه آزمایشگاهی.



شکل ۲. نمای واقعی سامانه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در تحقیق حاضر.

این دماها به کمک رابطه زیر تصحیح و به دمای سطح  $T_w$  تبدیل می‌شوند [۲]:

$$T_w = T_{th} - \frac{q \cdot s}{\lambda} \quad (1)$$

شیوه کار از این قرار است که تعدادی آزمایش برای تعیین ضریب انتقال حرارت موضعی به ازای در چند شدت جریان مختلف انجام می‌شود. در این تحقیق سه شدت جریان مختلف انتخاب شده است. سرعت حرکت سیال درون مبدل حرارتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

در این رابطه  $A$ ، سطح حلقوی عبور جریان و معادل  $0.695 \text{ m}^2$  است. باید گفت که قطر خارجی لوله داخلی مبدل  $0.22 \text{ m}$  و طول آن  $0.5 \text{ m}$  است.  $Q$ ، شدت جریان سیال عبوری از روی سطح انتقال حرارت یعنی از درون مبدل حرارتی است.

به منظور ترسیم نمودار تصحیح دما، ضریب انتقال حرارت نیز باید محاسبه شود. به ازای هر شدت جریان انتخابی، یک شار حرارتی ثابت به عنصر حرارتی اعمال می‌شود. این شار حرارتی ثابت برای محاسبه ضریب انتقال حرارت موضعی بر اساس رابطه (۳) به‌کار می‌رود:

$$h = \frac{q}{(T_{th} - T_b)} \quad (3)$$

برای ترسیم نمودار تصحیح دما، به معکوس ضریب انتقال حرارت و یک تابع توانی از سرعت نیاز داریم [۱۵]:

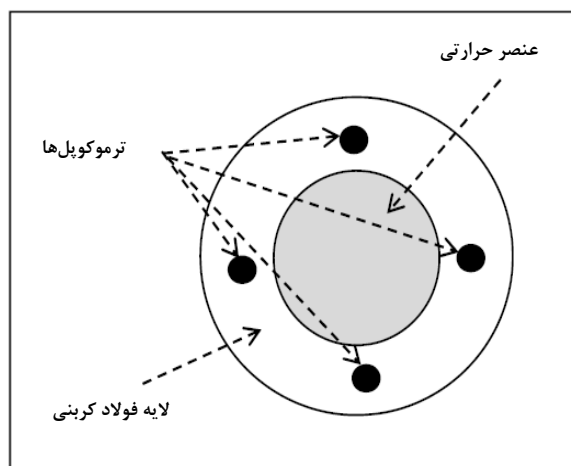
$$Q = U(T_{th} - T_b) = h(T_w - T_b) = \frac{\lambda}{s}(T_{th} - T_w) \quad (4)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{s}{\lambda} \quad (5)$$

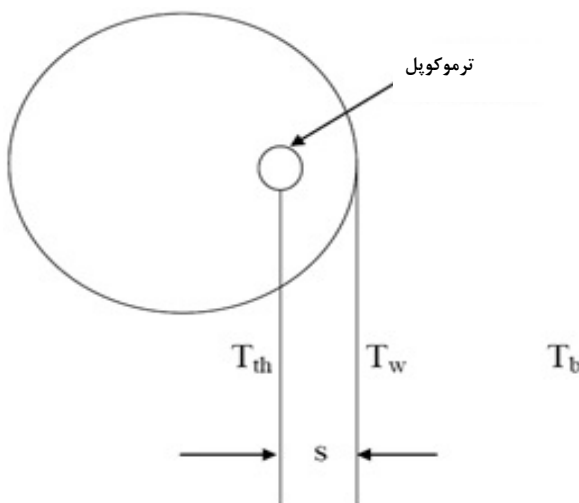
چنانچه بتوان ضریب انتقال حرارت را به کمک پارامتری چون سرعت سیال و به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری کرد، در این صورت عبارت  $s/\lambda$  طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود. برای این منظور باید رابطه‌ای بین سرعت سیال و ضریب انتقال حرارت برقرار شود.

مشاهده می‌کنید. به این ترتیب، دمای سطح لوله داخلی اندازه‌گیری می‌شود. باید گفت که دمای سطح انتقال حرارت از اهمیت بسیاری در محاسبه مقاومت رسوب و ضخامت رسوب برخوردار است.

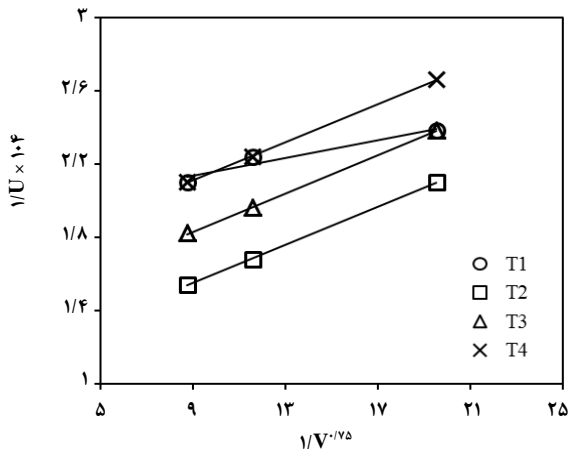
متوسط عددی این چهار دما را دمای ترموکوپل  $T_{th}$  می‌گویند، با توجه به شکل (۵)، ترموکوپل‌ها دمای درون سطح انتقال حرارت را که مربوط به عمقی از ضخامت سطح است، اندازه‌گیری می‌کنند. این فاصله از سطح، به ایجاد خطا در مقدار دقیق دمای سطح انجامید. به همین دلیل، باید دمای واقعی سطح انتقال گرما که سیال از روی آن جریان دارد و رسوب روی آن تشکیل می‌شود، تصحیح شود. برای تصحیح دما جمله  $\frac{s}{\lambda}$  در رابطه (۱) باید به نحوی محاسبه شود.



شکل ۴. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها.



شکل ۵. فاصله محل قرارگیری ترموکوپل‌ها تا سطح انتقال حرارت.



شکل ۶. محاسبه ضریب  $s/\lambda$ .

### ۳-۲ محاسبات

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و مقاومت رسوب، محاسبات زیر انجام می‌شوند. ابتدا مقدار شار حرارتی سیال به قرار زیر با بهره‌گیری از دمای دیواره تصحیح شده (که در قسمت قبل توضیح داده شد) به دست می‌آید:

$$q_w = h_i(T_w - T_b) \quad (10)$$

دمای توده سیال،  $T_b$ ، از رابطه (۱۱) به دست می‌آید که با در نظر گرفتن خواص فیزیکی ثابت برای توده سیال این رابطه به رابطه (۱۲) تبدیل می‌شود [۱۶]:

$$T_b = \frac{\int \rho w C_p T dA}{\int \rho w C_p dA} \quad (11)$$

$$T_b = \frac{\int w T dA}{\int w dA} \quad (12)$$

موازنه انرژی برای توده سیال روی سطح انتقال حرارت بر اساس رابطه (۱۳) نوشته می‌شود [۱۵]:

$$\int r w C_p T dA - \int r w C_p T dA + \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int r w C_p T dA + q_w \pi d w dz = 0$$

اما

می‌دانیم ضریب انتقال حرارت طبق رابطه (۶)، با عدد رینولدز و ضریب اصطکاک متناسب است [۱۵].

$$h \propto f \cdot N_{Re} \quad (6)$$

از سوی دیگر، ضریب اصطکاک درون لوله، بنابر رابطه بلازیوس، از این قرار با عدد رینولدز متناسب است [۱۵].

$$f \propto \frac{1}{N_{Re}^{0.25}} \quad (7)$$

با ترکیب روابط (۶) و (۷)، رابطه زیر به دست می‌آید که بین ضریب انتقال حرارت، به عدد رینولدز و به تبع آن با سرعت سیال رابطه برقرار می‌کند [۱۵]:

$$h \propto N_{Re}^{0.75} \quad (8)$$

از آنجایی که دمای توده سیال در هر آزمایش ثابت است، بنابراین عدد رینولدز با سرعت سیال متناسب خواهد شد. همه ثابت‌های عدد رینولدز به صورت پارامتر  $\beta$  نشان داده شده‌اند [۱۵]:

$$\frac{1}{U} = \frac{\beta}{V^{0.75}} + \frac{s}{\lambda} \quad (9)$$

در شکل (۶) نمودار ناشی از معادله (۹) را مشاهده می‌کنید. از امتداد دادن هر یک از چهار نمودار که متعلق به چهار ترموکوپل‌اند، عرض از مبدأ نمودار برون‌یابی می‌شود. عرض از مبدأ هر نمودار مقدار جمله  $s/\lambda$  برای هر ترموکوپل است. این مقادیر در جدول (۱)، برای هر ترموکوپل درج شده است. میانگین چهار داده جدول (۱) به عنوان ضریب  $s/\lambda$  گزارش می‌شود. در این تحقیق، این مقدار معادل  $0.00014455 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$  است.

جدول ۱. مقادیر  $s/\lambda$  برای هر ترموکوپل.

$(s/\lambda)_{T_1}$	$(s/\lambda)_{T_2}$	$(s/\lambda)_{T_3}$	$(s/\lambda)_{T_4}$
۰/۰۰۰۱۶۹۳	۰/۰۰۰۱۰۹۹	۰/۰۰۰۱۳۹۶	۰/۰۰۰۱۵۹۴

آزمایش‌ها به کار رفته است، آب پایه قبل از افزودن هیچ‌گونه ماده شیمیایی است. خواص آب مورد استفاده در جدول (۲) درج شده است. باید گفت که در این آزمایش‌ها، هیچ نوع افزودنی‌ای به آب اضافه نشده است تا از تداخل آثار مواد شیمیایی مختلف بر فرایند تشکیل رسوب اجتناب شود.

جدول ۲. خواص آب برج خنک‌کننده در این تحقیق.

واحد	مقدار	خواص
-	۶	pH
μs/cm	۵۶	هدایت
ppm	۲/۱۴	Cl <sup>-</sup>
ppm	۰/۴	Ca
ppm	۰/۲۴	Mg

### ۲-۵ معرفی شرایط آزمایش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر از این قرار بوده است که ابتدا در یک شار حرارتی ثابت، سیال با سرعت‌های متفاوت به مبدل حرارتی وارد شد. در هر سرعت سیال، دمای ترموکوپل‌ها که درون ضخامت لوله داخلی مبدل کار گذاشته شده‌اند، ثبت شد. با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از آزمایش‌ها نمودارهایی ترسیم شد که روند تغییرات دمای سطح انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت و مقاومت رسوب را در طول مدت فرایند آزمایش نشان دادند. دمای سطح انتقال حرارت متغیری است که در کل مدت زمان آزمایش مورد توجه قرار می‌گرفت و در زمان‌های مشخصی مقادیر آن ثبت می‌شد. در جدول (۳) متغیرهای آزمایش و محدوده تغییرات آنها را درج کرده‌ایم.

جدول ۳- معرفی متغیرهای آزمایش

محدوده تغییرات	واحد	متغیرها
۱۶۰۰۰-۲۵۰۰۰	W/m <sup>2</sup>	شار حرارتی
۵۰-۱۵۰	l/h	دبی
۲۵-۴۲	°C	دمای سطح
۲۸-۴۰	°C	دمای توده سیال
۰/۰۱۹ - ۰/۰۵۸	m/s	سرعت سیال

$$\int rwdA = m^{\circ} \quad (14)$$

بنابراین

$$\frac{\partial T_b}{\partial z} = \frac{q_w \pi d_w}{c_p m^{\circ}} \quad (15)$$

از آنجا که همه پارامترهای سمت راست معادله (۱۵) مقادیر ثابتی‌اند، پس به نظر می‌رسد بین دمای توده سیال با طول رابطه خطی برقرار باشد [۱۶].

$$\frac{\partial T_b}{\partial z} = \text{const} \quad (16)$$

سپس، رابطه (۱۷) به دست می‌آید. بنابراین، دمای توده سیال نیز به قرار زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$T_b = \frac{V \cdot L \cdot x}{L \cdot Q \cdot C \cdot \rho} + T_{in} \quad (17)$$

حالا، با بهره‌گیری از دو دمای محاسبه شده ( $T_w, T_b$ )، می‌توان ضریب انتقال حرارت سیال برای مبدل رسوب گرفته را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$h_d = \frac{q_c}{T_w - T_b} \quad (18)$$

پس از این مرحله، با بهره‌گیری از رابطه زیر می‌توان مقاومت رسوب را محاسبه کرد [۱۸]:

$$R_d = h_d^{-1} - h_c^{-1} \quad (19)$$

در این رابطه،  $h_c$  ضریب انتقال حرارت سیال برای مبدل تمیز (بدون رسوب) است. به این ترتیب، با گذشت زمان می‌توان مقدار رسوب تشکیل شده بر روی سطح انتقال حرارت را از طریق تغییرات دمای سطح انتقال حرارت اندازه‌گیری کرد.

### ۲-۴ معرفی خواص آب مورد استفاده در این تحقیق

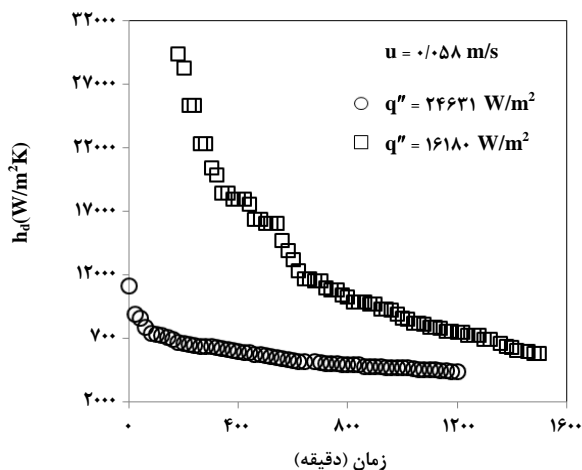
آبی که به عنوان خنک‌کننده در حوضچه برج خنک‌کننده در این

## ۳. نتایج و بحث

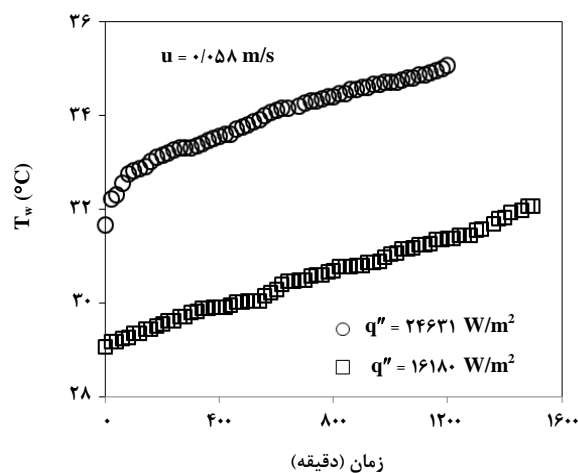
## ۳-۱ اثر شار حرارتی

در شکل (۷) تغییرات دمای سطح انتقال حرارت بر حسب زمان را در سرعت ثابت سیال و در دو شار حرارتی مختلف مشاهده می‌کنید. مطابق شکل (۷)، نشان می‌دهد با افزایش شار حرارتی در سرعت ثابت سیال، دمای سطح انتقال حرارت افزایش می‌یابد که این امر نتیجه گرم‌تر شدن سطح بر اثر بالاتر رفتن دمای گرمکن است. با گذشت زمان و با اعمال شار حرارتی ثابت، دما روند افزایشی دارد که نمایانگر تشکیل لایه‌های رسوب روی سطح انتقال حرارت است. در پایان آزمایش، دمای سطح در شار حرارتی بالاتر به حدود  $35/2^{\circ}\text{C}$  و در شار حرارتی پایین‌تر به حدود  $32/1^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. ملاحظه می‌شود که داده‌های دمای سطح انتقال حرارت پس از حدود ۲۴ ساعت یا کمی بیشتر به صورت خطی در حال افزایش است.

مانعی در برابر انتقال حرارت عمل می‌کند و باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود. این کاهش تا جایی ادامه می‌یابد که نمودارها به حالت مجانبی خود برسند و دیگر تغییر چشمگیری در مقدار ضریب انتقال حرارت رخ ندهد. این مسئله نشان می‌دهد که پس از این مدت زمان، سرعت نشست و کنده شدن لایه‌های رسوب با هم برابر می‌شوند و سیستم به تعادل نزدیک می‌شود.



شکل ۸. اثر شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت در سرعت ثابت  $0.058\text{ m/s}$ .



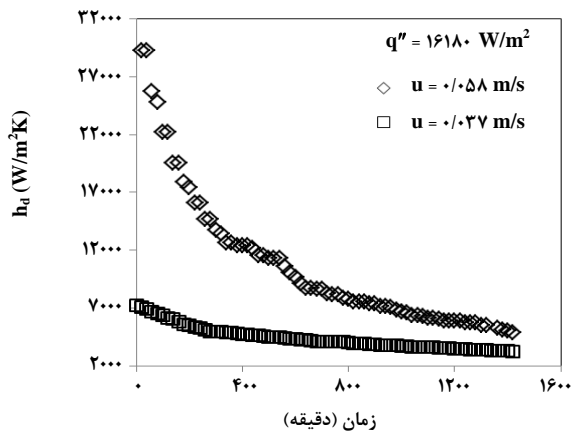
شکل ۷. اثر شار حرارتی بر دمای سطح در سرعت ثابت  $0.058\text{ m/s}$ .

در شکل (۹) مقدار مقاومت رسوب بر حسب زمان را در دو شار حرارتی مختلف مشاهده می‌کنید. این مقادیر با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه شده‌اند. مطابق شکل (۹)، با افزایش شار حرارتی در سرعت ثابت سیال، مقاومت رسوب تولید شده افزایش می‌یابد. در شار حرارتی بالاتر، نشست رسوب بیشتر اتفاق می‌افتد، زیرا سیال هنگام عبور از روی سطح داغ‌تر، هسته تشکیل رسوب خود را سریع‌تر شکل می‌دهد و از سوی دیگر نیز خوردگی شیمیایی سطح در محل داغ‌تر، بیشتر صورت می‌پذیرد.

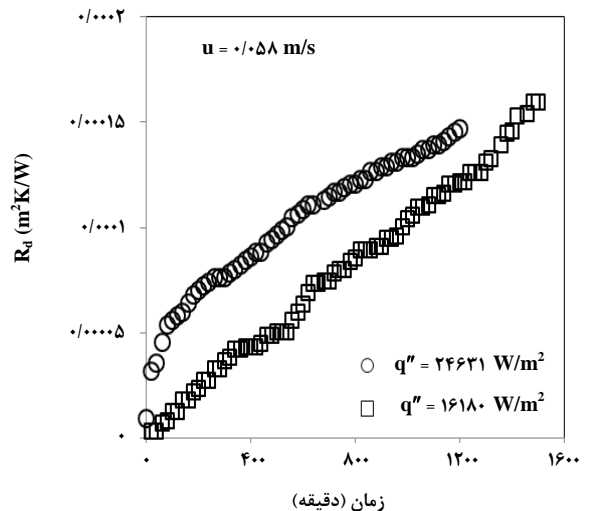
## ۳-۲ اثر سرعت سیال

در شکل (۱۰) تأثیر سرعت سیال بر دمای سطح انتقال حرارت و در شکل (۱۱) تأثیر سرعت سیال بر ضریب انتقال حرارت را مشاهده می‌کنید. مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، با افزایش سرعت سیال در شار حرارتی ثابت، دمای سطح انتقال حرارت کاهش و ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. این موضوع در مطالعات گذشته نیز خاطر نشان شده است که افزایش سرعت اثر کاهش

در شکل (۸) مقادیر ضریب انتقال حرارت را نسبت به گذشت زمان مشاهده می‌کنید که بنابر رابطه (۱۸) محاسبه شده است. ضریب انتقال حرارت بر اساس قانون سرمایش نیوتن، با شار حرارتی نسبت مستقیم و با اختلاف دمای سطح و توده سیال نسبت معکوس دارد. مطابق شکل (۸)، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، مقادیر ضریب انتقال حرارت در هر دو شار حرارتی ثابت، روند کاهشی بروز می‌دهد که این اتفاق به علت نشست لایه‌های رسوب روی سطح پیش می‌آید که مانند



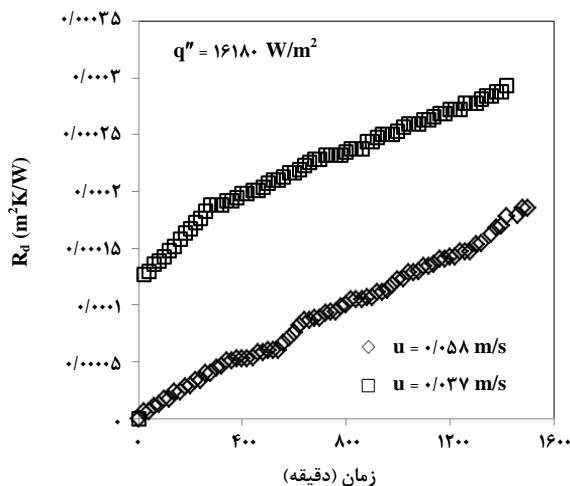
شکل ۱۱. اثر سرعت سیال بر ضریب انتقال حرارت در شار حرارتی ثابت  $16180 \text{ W/m}^2$ .



شکل ۹. اثر شار حرارتی بر مقاومت رسوب در سرعت ثابت  $0.058 \text{ m/s}$ .

در شکل (۱۲) اثر سرعت سیال را بر مقاومت رسوب به عنوان تابعی از زمان مشاهده می‌کنید. مطابق شکل (۱۲)، افزایش سرعت سیال سبب کاهش مقاومت رسوب می‌شود. افزایش سرعت جریان سیال موجب می‌شود که تنش برشی وارد بر لایه‌های رسوب تشکیل شده روی سطح بیشتر شود و احتمال کنده‌شدن و جلوگیری از تشکیل آنها افزایش یابد.

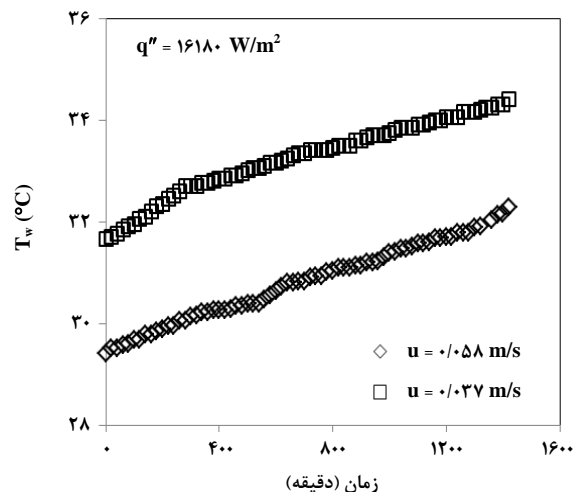
بر دمای سطح دارد [۱۸]. افزایش سرعت، تلاطم و نیز تنش برشی سیال را افزایش می‌دهد [۱۹] که این خود سبب افزایش انتقال حرارت از سطح به سیال می‌شود و بنابراین دمای سطح در سرعت‌های بالاتر، کمتر است [۲۰]. در سرعت‌های بالاتر، تکانه بزرگتری به وجود می‌آید و بنابراین حرارت بیشتری به واسطه حرکت مولکول‌های سیال عبوری از روی سطح، انتقال می‌یابد. افزایش تکانه، در واقع سبب افزایش تنش برشی لایه‌های بین سیال می‌شود که این خود با افزایش سرعت سیال افزایش پیدا می‌کند [۲۱].



شکل ۱۲. اثر سرعت سیال بر مقاومت رسوب در شار حرارتی ثابت  $16180 \text{ W/m}^2$ .

#### ۴. بررسی ماهیت رسوب تشکیل شده

در شکل (۱۳) تصویر سطح انتقال حرارت بعد از حدود یک روز گردش آب روی آن را مشاهده می‌کنید. همانطور که ملاحظه می‌شود رسوب پراکنده و نارنجی رنگی روی سطح را پوشانده است



شکل ۱۰. اثر سرعت سیال بر دمای سطح در شار حرارتی ثابت  $16180 \text{ W/m}^2$ .

مقاومت رسوب تشکیل شده، افزایش می‌یابد.

- مشاهده شد که رسوب تشکیل شده روی سطح انتقال حرارت از نوع زنگ آهن است که به واسطه محصولات ناشی از خوردگی در سیستم به وجود آمده است.

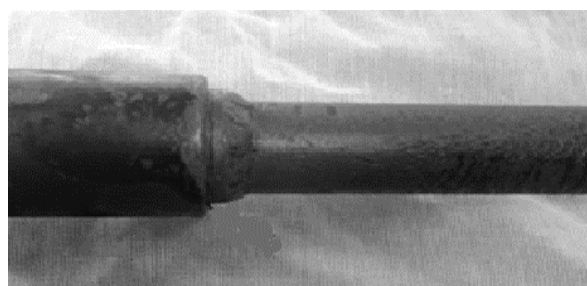
### ۶. تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از حمایت مالی این تحقیق از جانب شرکت پتروشیمی امیرکبیر مطابق قرارداد شماره 994031064، AKOLIN، بسیار سپاسگزارند.

### مراجع

- [1] Muller-Steinhagen, H. M., "Heat Transfer Fouling: 50 Years After the Kern and Seaton Model", Heat Transfer Engineering, 32(1), 1-13, (2011).
- [2] Bott, T. R., Fouling of Heat exchangers, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0444821864, 121-132, (1995).
- [3] Epstein, N., Fouling of heat exchangers, Heat exchanger sourcebook, Hemisphere Publishing Corporation, Chapter 32, 677-697, (1986).
- [4] Peyghambarzadeh, S. M., Vatani, A., Jamialahmadi, M., "Influences of bubble formation on different types of heat exchanger fouling", Applied Thermal Engineering, 50, 848-856, (2013).
- [5] Helalizadeh, A., Müllere Steinhagen, H., Jamialahmadi, M., "Mixed salt crystallisation fouling", Chemical Engineering and Processing, 39, 29-43, (2000).
- [6] Hasson, D., Zahavi, J., "Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat transfer surfaces", Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 9, 1-10, (1970).
- [7] Hatch, G. B., "Evaluation of scaling tendencies", Materials Protection and Performance, 12, 49-55, (1973).
- [8] Peyghambarzadeh, S. M., Bahrami, N., "Statistical analysis of calcium sulfate scaling", Applied Thermal Engineering, 53, 108-113, (2013).
- [9] Bansal, B., Müller Steinhagen, H., Chen, X. D., "Comparison of crystallization fouling in plate and double pipe heat exchangers", Heat Transfer Engineering, 22, 13-25, (2001).
- [10] Kim, N. H., Webb, R. L., "Particulate fouling of water in tubes having a two-dimensional roughness geometry", International Journal of Heat and Mass Transfer, 34(11), 2721-2727, (1991).
- [11] Lee, S. H., Cho, Y. I., "Study of the performance of physical water treatment with a solenoid coil to prevent mineral fouling, Part 2: Effect of air bubbles", International Communications in Heat and Mass Transfer, 29(2), 157-463, (2012).
- [12] Hasson, D., Avriel, M., Resnick, W., Rozenman, T., Winderich, S., "Mechanism of calcium carbonate scale deposition on heat transfer surfaces", Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 7, 59-65, (1968).
- [13] Karabelas, A. J., "Scale formation in tubular heat exchangers—research priorities", International Journal of Thermal Sciences, 41, 682-692, (2002).

که نتیجه آنالیزهای شیمیایی نشان می‌دهد که جنس رسوب تشکیل شده عمدتاً اکسیدهای آهن از نوع  $FeO$  و  $Fe_2O_3$  است. با توجه به این که این مواد در آغاز در ترکیب شیمیایی آب وجود نداشته‌اند، این ایده به ذهن می‌آید که با توجه به ماهیت کمی اسیدی آب بدون املاح ورودی ( $pH = 6$ )، خوردگی در این سیستم باعث تشکیل زنگ آهن می‌شود و این مواد به صورت ذرات معلق در سیال پراکنده و در محل‌هایی که برای تشکیل رسوب مساعد بوده ته‌نشین شده‌اند.



شکل ۱۳. تصویری از سطح رسوب گرفته مبدل حرارتی.

### ۵. نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تلاش شده است پتانسیل تشکیل رسوب از طریق نمونه آب خنک‌ساز در یک طرح آزمایشی تحقیقاتی، با استفاده از یک روش آزمایشگاهی نو اندازه‌گیری شود. روش کار در این مطالعه به این صورت است که با تغییر شار حرارتی در محدوده  $16-25 \text{ kW/m}^2$  و نیز تغییر سرعت سیال در محدوده  $0.19 \text{ m/s}$  تا  $0.58 \text{ m/s}$  در آزمایش‌های جداگانه، روند تغییرات دما پیگیری و ثبت شده است. تغییرات دمای سطح با تغییرات شار حرارتی و سرعت سیال، گواهی بر تشکیل رسوب روی سطح انتقال حرارت است. به این ترتیب که با استفاده از تغییرات دما، تغییرات ضریب انتقال حرارت و مقاومت رسوب قابل محاسبه است. نتایج زیر از تحقیق حاضر به دست آمده است:

- مشاهده شد که با افزایش سرعت سیال، دمای سطح انتقال حرارت کمتر می‌شود و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش و مقاومت رسوب تشکیل شده، کاهش می‌یابد.
- مشاهده شد که با افزایش شار حرارتی، دمای سطح انتقال حرارت افزایش، و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کاهش و

- [14] Webb, R. L., Li, W., "Fouling in enhanced tubes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3567-3578, (2000).
- [15] Shen, C., Cirone, C., Yang, L., Jiang, Y., Wang, X., "Characteristics of fouling development in shell-and-tube heat exchanger: Effects of velocity and installation location", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 439-448, (2014).
- [16] Peyghambarzadeh, S. M., "Forced convection heat transfer in the entrance region of horizontal tube under constant heat flux", *World Applied Sciences Journal*, 15(3), 331-338, (2011).
- [17] Wilson, E. E., "A basis of rational design of heat transfer apparatus", *ASME Journal of Heat Transfer*, 37, 47-70, (1915).
- [18] Bansal, B., Chen, X. D., Muller-Steinhagen, H., "Analysis of 'classical' deposition rate law for crystallisation fouling", *Chemical Engineering and Processing*, 47, 1201-1210, (2008).
- [19] Butterworth, D., "Design of shell-and-tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, 22, 789-801, (2002).
- [20] Ebert, W., Panchal, C. B., "Analysis of Exxon crude-oil, slip-stream coking data", *Engineering Foundation Conference on Fouling Mitigation of Heat Exchangers*, California, 18-23 June (1995).
- [21] Peyghambarzadeh, S. M., Vatani, A., Jamialahmadi, M., "Application of asymptotic model for the prediction of fouling rate of calcium sulfate under subcooled flow boiling", *Applied Thermal Engineering*, 39, 105-113, (2012).