

تأثیر پارامترهای عملیاتی بر تشکیل رسوب تبلوری کلسیم سولفات بر روی سطوح انتقال گرما

عاطفه زارعی، محمدرضا ملایری*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: تشکیل رسوب بر روی سطوح انتقال گرما در تبادلهای گرمایی، یکی از مشکل‌های جدی در صنایع گوناگون است که موجب توزیع نامناسب جریان، افزایش افت فشار و سوخت مصرفی، و به طور کلی کاهش بازده گرمایی تبادله می‌شود. بررسی چگونگی تشکیل رسوب و تأثیر پارامترهای عملیاتی گوناگون بر آن، برای انجام هرگونه اقدامی با هدف کنترل و کاهش رسوب، ضروری است. آب به دلیل ظرفیت گرمایی بالا، در دسترس و ارزان بودن، کاربردی‌ترین سیال واسطه در تبادلهای گرمایی است. با این وجود، حضور یون‌های گوناگون مانند کلسیم، کربنات و سولفات در آب، موجب تشکیل لایه‌ای از رسوب تبلوری کلسیم سولفات و یا کلسیم کربنات در تبادلهای گرمایی می‌شود. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل سرعت سیال، غلظت کلسیم سولفات و شار گرمایی سطح انتقال گرما، بر تشکیل رسوب تبلوری کلسیم سولفات پرداخته شده است. برای درک بهتر نتیجه‌ها، ابتدا اثر این پارامترها بر آب خالص بررسی شد. نتیجه‌های آزمایش‌های رسوب نشان می‌دهد که افزایش شار گرمایی و غلظت کلسیم سولفات، فرایند تشکیل رسوب را تشدید کرده، موجب افزایش دمای سطح و مقاومت گرمایی و کاهش ضریب انتقال گرما می‌شود. با دو برابر شدن غلظت کلسیم سولفات در محلول، ضریب انتقال گرمایی نهایی بیش از ۵۰٪ کاهش یافت و برای دو برابر شدن شار گرمایی سطح، ضریب انتقال گرما تنها ۱۰٪ کم شد. در مقابل، افزایش سرعت باعث کاهش چشمگیر رسوب، دمای سطح و مقاومت گرمایی می‌شود به طوری که افزایش دو برابری سرعت سیال، ضریب انتقال گرما را تقریباً ۵۰٪ افزایش داده است.

واژگان کلیدی: رسوب، شرایط عملیاتی، مبدل گرمایی، تبادلهای گرمایی، کلسیم سولفات، انتقال گرما.

KEYWORDS: Fouling, Crystallization fouling, Deposition, Heat exchanger, Calcium sulfate, Heat transfer.

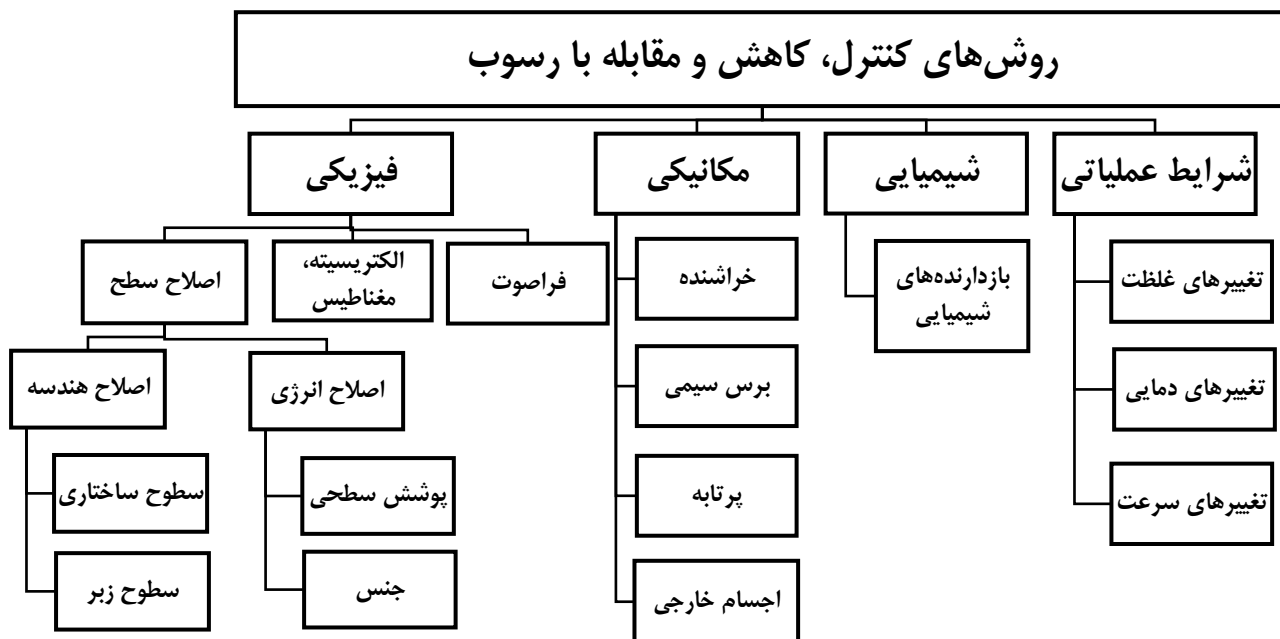
مقدمه

سیال در مبدل، افزایش افت فشار و سوخت مصرفی و به طور کلی کاهش بازده گرمایی تبادله می‌شود [۱،۲]. برای نمونه در بحث رسوب در صنایع نفتی، در ایران سالانه ۴ میلیون بشکه نفت خام برای جبران هزینه‌هایی که به علت رسوب‌های هیدروکربنی در واحد پیش گرم کن پالایشگاه‌های نفت ایجاد می‌شود، هدر می‌رود [۳].

توانایی و بازده انتقال انرژی گرمایی یکی از ویژگی‌های شاخص هر فرایند صنعتی به شمار می‌رود و به همین دلیل شناختن سازوکارهای انتقال گرما، توسعه روابط و روش‌های طراحی تبادلهای گرمایی اهمیت زیادی دارد. امروزه یکی از مشکل‌های حل نشده صنعتی، تشکیل رسوب در تبادلهای است که موجب توزیع نامناسب جریان

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: Malayeri@shirazu.ac.ir



شکل ۱ - روش‌های کنترل، کاهش و مقابله با رسوب در تبادلهای گرمایی [۶]

به دلیل ایجاد مشکل‌های جدی تشکیل رسوب در تبادلهای از نظر عملیاتی، اقتصادی و فنی، تاکنون مطالعه‌های متعددی برای بررسی همه‌جانبه این پدیده انجام شده است. جدول ۱ به صورت خلاصه به بیان برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر رسوب سامانه‌های آبی می‌پردازد. در بررسی تأثیر غلظت نمک رسوب‌دهنده در آب، نتیجه‌ها پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که با افزایش غلظت، به دلیل بالا رفتن درجه فوق اشباعیت محلول، مقدار رسوب تشکیل شده بیشتر می‌شود، این امر در ابتدای فرایند و در سرعت‌های بالای جریان سیال بیشتر بوده است [۷،۸]. در بررسی تأثیر سرعت جریان سیال در پژوهش‌های گوناگون نتیجه‌ها متناقضی بیان شده است. در برخی از آن‌ها ضخامت لایه رسوب با افزایش سرعت جریان سیال، افزایش داشته [۷،۹] و در بعضی دیگر خلاف آن مشاهده شده است [۱۰-۱۲، ۸]. نتیجه‌های مطالعه‌های گوناگون بر روی تغییرهای دمایی سطح انتقال گرما یا شارگرمایی سطح، بیان می‌کند که افزایش دمایی سطح انتقال گرما موجب بالا رفتن درجه فوق اشباعیت محلول شده که خود نقش به‌سزایی در افزایش مقدار رسوب تشکیل شده دارد. شناختن فرایند تشکیل رسوب، یکی از الزامات برای پیدا کردن راه کارهای ساده و ارزان برای کنترل یا مقابله با رسوب است. برای نمونه، برخی از پژوهش‌های گذشته نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش سرعت سیال در کاهش رسوب کلسیم سولفات است، در چنین مواردی

سوزاندن سوخت بیش‌تر در قسمت گرمایشی تبادلهای به دلیل رسوب در آن‌ها، موجب افزایش نشر کربن‌دی‌اکسید می‌شود، که تأثیر چشمگیری بر آلودگی محیط زیست و گرمایش جهانی دارد [۴]. در بسیاری از تبادلهای گرمایی، به دلیل دسترسی و ارزان بودن و همچنین ظرفیت گرمایی بالای آب، از آن به عنوان سیال واسطه انتقال گرما استفاده می‌شود. یکی از رایج‌ترین مشکل‌های استفاده از آب، تشکیل رسوب مواد نامطلوب روی سطوح انتقال گرما است [۲]. رسوب‌های تشکیل شده در میدلهای گرمایی دارای آب، از نوع رسوب‌های متبلور نمکی هستند. انحلال‌پذیری نمک‌هایی مانند کلسیم سولفات با دما رابطه عکس داشته و با افزایش دما در تبادلهای، انحلال‌پذیری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند و بر روی سطوح انتقال گرما که گرم‌ترین نقطه تبادلهای می‌باشد، رسوب‌های تبلوری ایجاد می‌شود [۵]. برای کاهش مشکل‌ها به علت رسوب یا جلوگیری از تشکیل آن در تبادلهای گرمایی، کارهایی انجام می‌شود که در شکل ۱ به طور مختصر به دسته‌بندی آن‌ها پرداخته شده است. برخی از روش‌های مقابله با رسوب مانند روش‌های مکانیکی، شامل خراشنده‌ها، برس‌های سیمی و پرتابه‌ها، متمرکز بر از بین بردن رسوب‌های تشکیل شده از روی سطح است و دسته‌ای دیگر به کمک تغییر در ویژگی‌های سامانه گرمایی از جمله شرایط عملیاتی این هدف را دنبال می‌کنند، مانند ایجاد شوک در تبادلهای به کمک تغییرهای ناگهانی سرعت و شار گرمایی [۶].

جدول ۱ - مطالعه‌های انجام شده بر تأثیر غلظت، سرعت و شار گرمایی یا دمای سطح بر فرایند تشکیل رسوب

نام پژوهشگر (سال)	سامانه رسوب مورد مطالعه	سامانه گرمایی مورد مطالعه	نتیجه‌های تأثیر غلظت	نتیجه‌های تأثیر سرعت	نتیجه‌های تأثیر شار گرمایی یا دمای سطح
نجیبی ^۱ و همکاران [۷] (۱۹۹۷)	محلول کلسیم سولفات	جوشش جریان مایع زیر نقطه جوش	با افزایش غلظت مخصوصاً در سرعت‌های بالا، مقاومت رسوب افزایش می‌یابد.	مقاومت رسوب در اثر افزایش سرعت جریان، افزایش می‌یابد.	با افزایش دمای سطح مخصوصاً در سرعت‌های بالا، زمان القا کاهش و مقاومت رسوب افزایش می‌یابد.
بانسال و مولر اشتاینهاگن ^۲ [۸] (۱۹۹۳)	محلول کلسیم سولفات	تبادلگرهای گرمایی صفحه‌ای	با افزایش غلظت نیرومحرکه واکنش سطح و نرخ نشست افزایش پیدا می‌کند و این تأثیر در ابتدای فرایند برجسته‌تر است.	نرخ ابتدایی رسوب و مقاوت آن با افزایش سرعت کاهش می‌یابد.	با افزایش دمای سطح، رشد نشست ذره‌ها افزایش و زمان القای رسوب کاهش پیدا می‌کند.
هلالی زاده ^۳ و همکاران [۹] (۲۰۰۰)	محلول دارای کلسیم سولفات و کلسیم کربنات	سامانه انتقال گرما جابه‌جایی اجباری در چرخه پیوسته	غلظت نقش مهمی در رسوب دارد و محلول دارای غلظت‌های ترکیبی گوناگون از کلسیم سولفات و کلسیم کربنات رفتار رسوبی متفاوتی دارند.	مقاومت رسوب در اثر افزایش سرعت جریان، افزایش پیدا می‌کند.	با افزایش دمای سطح، نرخ رسوب و مقاوت آن افزایش پیدا می‌کند و انتظار می‌رود برای سرعت‌های بالاتر این افزایش بیشتر باشد.
بوهنت ^۴ [۱۰] (۱۹۸۷)	محلول کلسیم سولفات	سامانه انتقال گرما جابه‌جایی اجباری در چرخه پیوسته	-	با افزایش سرعت سیال، ضریب انتقال گرما افزایش و مقاوت رسوب کاهش پیدا می‌کند.	-
حسن و زهاوی ^۵ [۱۱] (۱۹۷۰)	محلول کلسیم سولفات	تبادلگرهای گرمایی دو لوله	-	با افزایش سرعت سیال، ضخامت رسوب کاهش و فاصله اولین نقطه هسته‌زایی از ابتدای مبدل افزایش می‌یابد.	با افزایش دمای سطح، ضخامت رسوب افزایش و فاصله اولین نقطه هسته‌زایی از ابتدای مبدل کاهش می‌یابد.
کوکولکا و دیواگن ^۶ [۱۲] (۲۰۰۷)	آب رودخانه دارای کلسیم کربنات	تبادلگرهای گرمایی صفحه‌ای	-	افزایش سرعت موجب کاهش جرم رسوب می‌شود.	افزایش دمای سطح باعث افزایش جرم رسوب می‌شود.
خو ^۷ و همکاران [۱۳] (۱۹۹۷)	محلول کلسیم سولفات	تبادلگرهای گرمایی صفحه‌ای	افزایش غلظت کلسیم سولفات موجب افزایش درجه فوق اشباعیت و در نتیجه افزایش رسوب می‌شود.	افزایش سرعت سیال باعث کاهش مقاوت گرمایی رسوب می‌شود.	-

تبخیر مقدار چشمگیری از آن، غلظت نمک‌های رسوب‌دهنده، افزایش پیدا می‌کند. در این حالت شناختن حساسیت رسوب‌دهندگی سامانه آبی به تغییرهای غلظت برای برآورد طراحی سامانه چرخش آب و تبادلگر، از دیگر نمونه‌های اهمیت بررسی پارامترهای عملیاتی بر رفتار سامانه رسوب‌دهنده است.

در صورت امکان با پیدا کردن سرعت بهینه، می‌توان از شدت تشکیل رسوب، کم نمود. این در حالی است که دسته دیگری از مطالعه‌ها، افزایش سرعت سیال را به نفع تشکیل رسوب کلسیم سولفات دانسته‌اند. در موضوع دیگری، به دلیل دفعات بالای استفاده از یک میزان آب و اضافه کردن میزان کم آب تازه در صنایع گوناگون و

(۱) Najibi

(۳) Helalizade

(۵) Hasson and Zahavi

(۷) Kho

(۲) Bansal and Müller-Steinhagen

(۹) Bohnet

(۶) Kukulka and Devagun

داده شده‌اند. برای ارزیابی بهتر نتیجه‌ها، ابتدا اثر این پارامترها بر آب خالص، در حالتی که سطح انتقال گرما تمیز می‌ماند، بررسی می‌شود.

بخش نظری

محاسبه ضریب انتقال گرما و مقاومت رسوب

شکل ۲ سطح یک تبادله گرما را که از طرف درون و بیرون رسوب گرفته است، نشان می‌دهد.

برای سطح انتقال گرما صفحه‌ای، میزان گرما منتقل شده از دیواره مبدل برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= A h_i (T_{Fi} - T_{fi}) = A \frac{k_{fi}}{x_{fi}} (T_{fi} - T_{wi}) = \\ A \frac{k}{x} (T_{wi} - T_{wa}) &= A \frac{k_{fa}}{x_{fa}} (T_{wa} - T_{fa}) = A h_a (T_{fa} - \\ T_{Fa}) &= A U_f (T_{Fi} - T_{Fa}) \end{aligned} \quad (1)$$

مقاومت گرمایی برای سطح انتقال گرما بدون رسوب با معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_a} \quad (2)$$

و همچنین مقاومت انتقال گرما در سطح انتقال گرما رسوب گرفته از دو سوی درونی و بیرونی برابر است با:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_i} + \frac{x_{fi}}{k_{fi}} + \frac{x}{k} + \frac{x_{fa}}{k_{fa}} + \frac{1}{h_a} \quad (3)$$

در بیش تر موارد تنها یک طرف سطح مبدل گرمایی رسوب می‌گیرد پس مقاومت گرمایی در این حالت به معادله (۴) ساده می‌شود:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{x_f}{k_f} + \frac{1}{h_a} \quad (4)$$

و به کمک معادله (۴) می‌توان مقاومت رسوب را با معادله (۵) تعریف کرد [۱۰]:

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_0} = \frac{x_f}{k_f} \quad (5)$$

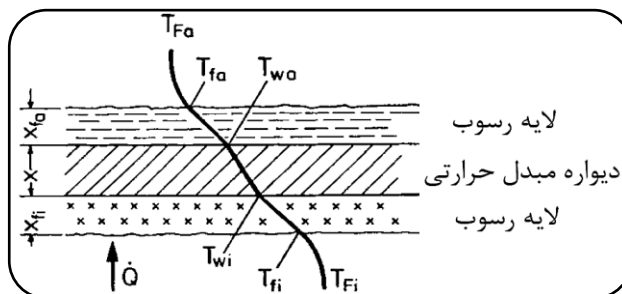
مقاومت رسوب یک پارامتر بسیار مهم برای بررسی رفتار سامانه‌های رسوبی است که مقاومت لایه رسوب تشکیل شده را بیان می‌کند و طبق معادله (۶) به کمک جرم ویژه رسوب، می‌توان جرم رسوب تشکیل شده به ازای واحد سطح را به آن مرتبط کرد:

$$m_f = \rho_f k_f R_f \quad (6)$$

پس مقاومت رسوب به صورت مستقیم با جرم رسوب یا ضخامت لایه رسوب معادله دارد. برای بررسی و درک بهتر رفتار یک سامانه رسوب از نمودار مقاومت رسوب بر حسب زمان استفاده می‌کنیم.

جدول ۲ - گستره تغییرهای پارامترهای عملیاتی

پارامترهای عملیاتی	واحد پارامتر	گستره تغییرهای پارامتر
سرعت جریان سیال	cm/s	۳۴-۱۷
غلظت محلول کلسیم سولفات	g/L	۵-۲
شار گرمایی	kW/m ²	۳۱ و ۶۳



شکل ۲ - تغییرهای دما در دیواره تبادله گرما گرمایی رسوب گرفته [۱۰]

در پژوهش‌های پیشین برای بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر تشکیل رسوب نمکی، پارامترهای موثر دیگر ثابت نگه داشته شده‌اند و پارامتر مورد بررسی در یک بازه خاص، تغییر داده شده است. برای اطمینان از اثر یک پارامتر در مقادیر ثابت سایر پارامترها، گاهی آزمایش‌های مورد نظر در چند مقدار ثابت از پارامترهایی که تأثیر بیشتری دارند، نیز صورت گرفته است. با بررسی مطالعه‌های گذشته پارامترهای تأثیرگذار بر تشکیل رسوب و گستره تغییرهای آن‌ها، شناسایی شد. نتیجه‌های بررسی‌ها بیان می‌کند که دما یا شار سطح انتقال گرما، غلظت ماده رسوب دهنده، سرعت سیال و مشخصه‌های سطح انتقال گرما، مهم‌ترین پارامترهای موثر در تشکیل رسوب‌های نمکی در تبادله‌گرهای گرمایی هستند. برای اولین بار دستگاهی کوچک و پرتابل ساخته شده که با اطمینان می‌توان تحت شرایط عملیاتی گوناگون، تشکیل رسوب را بررسی نمود. در این مطالعه به بررسی تأثیر شرایط عملیاتی بر نشست کلسیم سولفات روی سطوح انتقال گرما در شرایط انتقال گرما جابه‌جایی اجباری، پرداخته می‌شود. سپس طراحی آزمایشی بر اساس پارامترهای مهم عملیاتی و گستره تغییرهای آن‌ها، انجام شد و بر اساس نتیجه‌های آن آزمایش‌هایی برای به‌دست آوردن تأثیر سرعت جریان، شار گرمایی سطح انتقال گرما و غلظت محلول کلسیم سولفات انجام شده است و این پارامترها به صورت قاعده‌مند تغییر داده شده‌اند. در جدول ۲ پارامترهای عملیاتی بررسی شده در این پژوهش و گستره تغییرهای آن آمده است. سرعت جریان از ۱۷ تا ۳۴ cm/s، غلظت محلول کلسیم سولفات از ۲ تا ۵ g/L و شار گرمایی در مقادیرهای ۳۱ و ۶۳ kW/m² تغییر

ثابت نگه‌داشتن دما وجود دارد که با خطای $0/2$ درجه سلسیوس، دمای مخزن را کنترل می‌کند. برای ثبت اطلاعات در حین آزمایش، سامانه‌ای برای گرفتن اطلاعات و ذخیره‌سازی آن‌ها وجود دارد. عکس قسمت‌های گوناگون دستگاه در شکل ۴ آمده است.

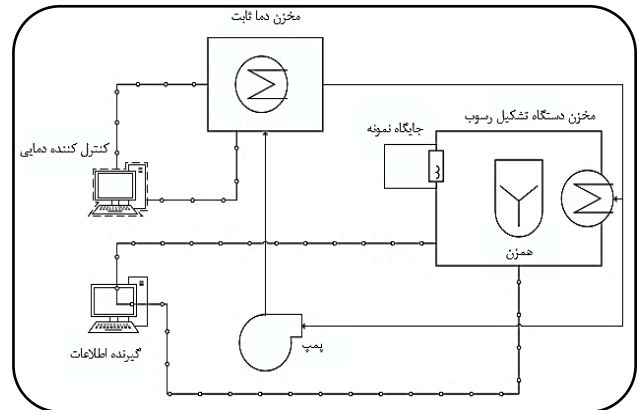
شرح کار دستگاه تشکیل رسوب

پیش از هر آزمایش رسوب، آزمایشی با آب خالص (بدون کلسیم سولفات) انجام می‌شود. هدف از انجام این کار، یافتن دمای پایدار سطح انتقال گرما و اطمینان از پایداری دستگاه آزمایشگاهی است. برای انجام آزمایش پایداری، آب خالص در مخزن ریخته شده و در شار گرمایی، سرعت همزن و دمای توده سیال ثابت، سامانه راه‌اندازی می‌شود. با اعمال شار گرمایی ثابت به نمونه سطح انتقال گرما، این سطح با سیال دما ثابت مخزن، انتقال گرما جابه‌جایی اجباری می‌کند. به علت پایین‌تر بودن دمای توده‌ی سیال از نمونه سطح و از سویی کنترل شار گرمایی گرمکن داده شده به سطح، پس از مدت زمانی، دمای سطح انتقال گرما به مقدار ثابتی می‌رسد.

بی‌درنگ پس از پایان آزمایش پایداری، آزمایش رسوب آغاز می‌شود. محلول رسوب‌دهنده مورد نظر در دمای ثابت تعیین شده برای سامانه دما ثابت، وارد مخزن رسوب می‌شود. پس از مدت زمانی که زمان القا نام دارد، به دلیل کاهش انحلال‌پذیری محلول در اثر افزایش دما، انحلال‌پذیری آن به زیر حالت اشباع رسیده، در نتیجه رسوب تبلوری کلسیم سولفات روی نمونه سطح ایجاد می‌شود. رسانایی گرمایی لایه‌ی رسوب تشکیل شده پایین است و به همین دلیل با همان شار گرمایی ثابتی که پیش‌تر به سطح وارد می‌شد، دمای سطح انتقال گرما بالاتر می‌رود. افزایش دمای سطح به دلیل تشکیل رسوب‌های کلسیم سولفات روی سطح و در پی آن، افزایش مقاومت گرمایی رخ می‌دهد. در نتیجه توانایی سطح برای انتقال گرما کاهش می‌یابد.

آماده‌سازی محلول

آب کاربردی‌ترین سیال برای انتقال گرما است، ولی به دلیل وجود یون‌هایی مانند کلسیم، سولفات و کربنات، قابلیت تشکیل رسوب بالایی دارد. برای بررسی رفتار سامانه رسوبی آب، از محلول‌های دارای کلسیم سولفات یا کلسیم کربنات استفاده می‌شود. در این پژوهش از محلول آبی کلسیم سولفات به عنوان سامانه رسوب‌دهنده استفاده شده است. به دلیل انحلال‌پذیری بسیار اندک این نمک در آب،



شکل ۳ - طرحواره دستگاه آزمایشگاهی تشکیل رسوب



شکل ۴ - دستگاه آزمایشگاهی تشکیل رسوب

بخش تجربی

دستگاه‌های آزمایشگاهی

برای بررسی تشکیل رسوب تحت شرایط انتقال گرما جابه‌جایی بر روی نمونه سطح انتقال گرما، دستگاه تشکیل رسوب طراحی و ساخته شد که در شکل ۳ طرحواره این دستگاه دیده می‌شود. این دستگاه از دو قسمت مجزا شامل سامانه دما ثابت و سامانه رسوب تشکیل شده است. در سامانه رسوب، مخزنی برای بررسی تشکیل رسوب قرار دارد که در قسمتی از دیواره آن، محلی برای قرارگیری نمونه سطح انتقال گرما تعبیه شده است و قطعه‌ای به نام بلوک از جنس آلومینیوم در آن قرار می‌گیرد. در دو قسمت مشخص از این بلوک، ترموکوپل‌هایی قرار گرفته است که از روش میزان شار گرمایی عبوری از این دو نقطه، شار گرمایی وارد شده به نمونه سطح انتقال گرما، کنترل می‌شود. در مخزن رسوب، کویل‌های گرمایی برای ثابت نگه‌داشتن دمای توده سیال در نظر گرفته شده است. مسیر سیال درون کویل، اتصال بین سامانه رسوب و دما ثابت می‌باشد. در سامانه دما ثابت، سازوکار گرمایی و سرمایشی برای

(۱) Induction Time

برای مقاومت رسوب در ابتدای آزمایش، بیشینه عدم قطعیت با مقدار ۱۵ تا ۲۰ درصد به دلیل اختلاف بالای دمای سطح انتقال گرما و دمای توده سیال، محاسبه شد که این عدم قطعیت برای ابتدای آزمایش برابر ۵ تا ۱۰ درصد است. نتیجه‌ها عدم قطعیت، میزان مطلوبی از دقت را برای این مطالعه نشان می‌دهد.

آزمایش‌های آب خالص (بدون رسوب‌دهنده)

برای بررسی منطقی بودن رفتار گرمایی سامانه در برابر تغییر پارامترهای عملیاتی، پیش از انجام هر آزمایش رسوب، حالت پایدار به کمک گردش آب دی‌یونیزه در سامانه به دست می‌آید. در دو بخش آینده تأثیر تغییرهای سرعت جریان سیال و نیز شار گرمایی اعمالی بر سطح انتقال گرما، بر پارامترهای سامانه گرمایی بررسی می‌شود.

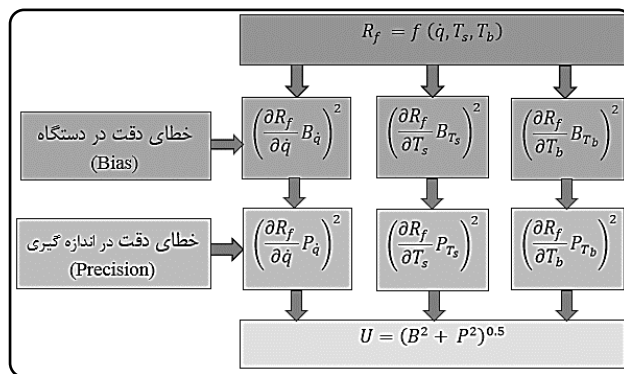
اثر سرعت جریان در انتقال گرما جابه‌جایی

در شکل ۶ تغییرهای ضریب انتقال گرما و دمای پایدار سطح در سرعت‌های ۱۷، ۲۵ و ۳۴ cm/s نشان داده شده است.

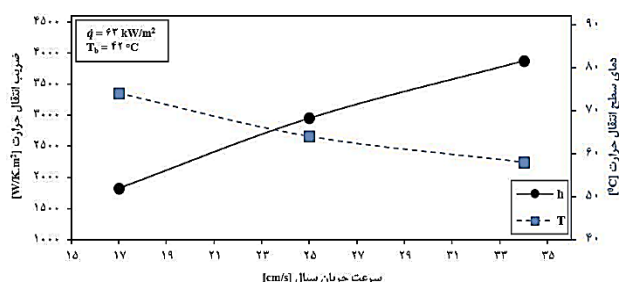
طبق نمودار شکل ۶، افزایش سرعت آب، موجب افزایش ضریب انتقال گرما و بهبود فرایند انتقال گرما از سطح به توده آب شده است. در نتیجه با ثابت ماندن شار گرمایی داده شده به سطح، دمای سطح کاهش پیدا می‌کند. این نتیجه‌ها با دانش انتقال گرما، با بیان این که در حرکت سیال بر روی یک سطح انتقال گرما، با افزایش سرعت جریان، به دلیل ایجاد آشفتگی‌های بیشتر و کاهش ضخامت لایه مرزی، ضریب انتقال گرما جابه‌جایی افزایش پیدا کرده و در پی آن دمای سطح کاهش می‌یابد، تصدیق می‌شود.

اثر شار گرمایی در انتقال گرما جابه‌جایی

تغییرهای ضریب انتقال گرما و دمای سطح برای برای شارهای گرمایی ۳۱ و ۶۳ kW/m² در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش شار گرمایی اعمالی بر سطح انتقال گرما، دمای سطح بالا می‌رود و به دلیل افزایش اختلاف دمای سطح و توده سیال، نیرو محرکه انتقال گرما جابه‌جایی افزایش یافته، در نتیجه ضریب انتقال گرما جابه‌جایی افزایش می‌یابد. نتیجه‌ها این شکل رفتار منطقی گرمایی را تصدیق می‌کند، زیرا با افزایش شار گرمایی از ۳۱ به ۶۳ kW/m²، دمای پایدار سطح انتقال گرما و ضریب انتقال گرما پایدار، افزایش پیدا می‌کند. در هر آزمایش با ثابت نگه‌داشتن شرایط موثر، پس از مدتی، دمای سطح و ضریب انتقال گرما به مدت بیشتر از یک ساعت به پایداری رسیده است و در محاسبه‌های آزمایش‌های

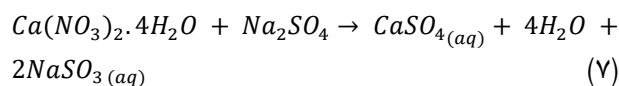


شکل ۵ - مرحله‌های محاسبه عدم قطعیت برای مقاومت رسوب [۵]



شکل ۶ - اثر سرعت جریان در آزمایش آب خالص

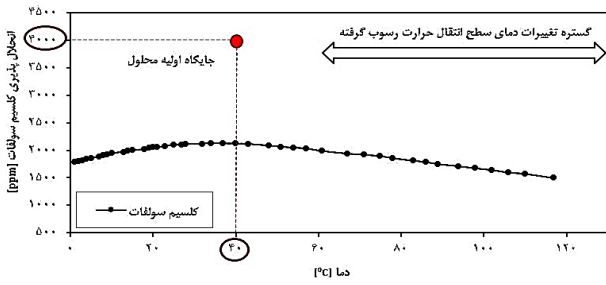
محللول شامل نمک‌های سدیم سولفات و کلسیم نترات ۴ آبه به کار گرفته شده است. به این منظور طبق واکنش زیر به مقدار مساوی از محللول‌های این دو نمک را با هم مخلوط کرده و برای دستیابی به غلظت مورد نظر از استوکیومتری مواد استفاده می‌کنیم [۴].



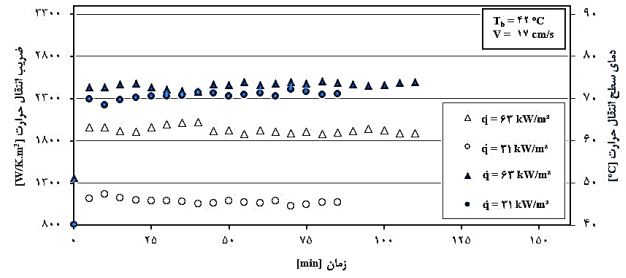
نتیجه‌ها و بحث

عدم قطعیت نتیجه‌ها

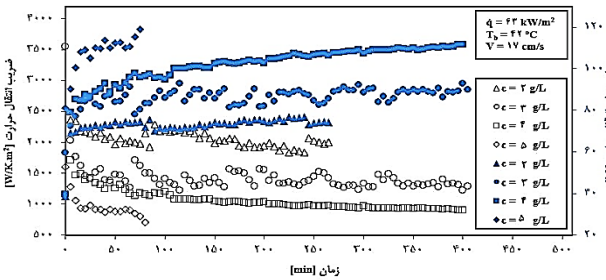
برای محاسبه عدم قطعیت متغیرهای مقاومت رسوب و ضریب انتقال گرما، دو منشا خطای Bias (خطای مربوط به وسایل اندازه‌گیری پارامترها) و خطای Precision (خطای مربوط به دقت در اندازه‌گیری پارامترها) وجود دارد که مطابق شکل ۵ تعیین می‌شود [۵]. برای هر دو متغیر هدف، پارامترهای دمای سطح انتقال گرما و دمای توده سیال با خطای ۰/۲ درجه سلسیوس و شار گرمایی سطح با بیشینه ۵ درصد خطا مربوط به اندازه‌گیری‌های الکترونیکی آن، به عنوان خطای Bias این پارامترها وجود دارد. میزان عدم قطعیت با استفاده از مرحله‌های شکل ۵، برای ضریب انتقال گرما در طی آزمایش، در ابتدا و انتهای آزمایش با بیشینه میزان ۵-۱۰ درصد محاسبه شد.



شکل ۸ - منحنی انحلال پذیری کلسیم سولفات بر حسب دما [۱۱]



شکل ۷ - اثر شار گرمایی در آزمایش آب خالص



شکل ۹ - اثر غلظت کلسیم سولفات بر ضریب انتقال گرما و دمای سطح

کلسیم سولفات، موجب افزایش فوق اشباعیت محلول اولیه می شود که نیرو محرکه تشکیل رسوب تشدید شده و رسوب های بیشتری بر روی سطح تشکیل می شود. برای محاسبه ضریب انتقال گرما سطح تمیز و رسوب گرفته در کل پژوهش، از معادله (۱) و دمای پایدار سطح به دست آمده از آزمایش پایداری با شرایط مشابه آزمایش رسوب، استفاده می شود. شکل ۹ تغییرهای ضریب انتقال گرما و دمای سطح رسوب گرفته را برای غلظت های گوناگون، با زمان نشان می دهد.

در غلظت ۲ g/L دمای سطح در کل مدت آزمایش، در بیشینه ترین حالت به اندازه ۵ °C نسبت به مقدار اولیه خود، افزایش داشته که در دو نوبت با کاهش ناگهانی همراه بوده است. علت این رفتار، جدا شدن قطعات بلور تشکیل شده از سطح است. در نتیجه این جدایش، سطح از نظر انتقال گرمایی اندکی بهبود پیدا کرده اما کمی بعد، دوباره بلورهای تشکیل می شود که افزایش دمای سطح را در پی دارد. مشابه این رفتار، برای این غلظت در کاهش ضریب انتقال گرما نیز دیده می شود که بیشترین کاهش ضریب انتقال گرما به میزان ۲۰٪ مقدار اولیه آن است. از معادله (۵) برای به دست آوردن مقاومت گرمایی رسوب در کل پژوهش استفاده شده است. شکل ۱۰ تغییرهای مقاومت گرمایی با زمان برای غلظت های گوناگون کلسیم سولفات را نشان می دهد. در ابتدای آزمایش، پس از زمان القای رسوب، اولین بلورها روی سطح، رسوب می کند و زبری هایی را ایجاد می کند که با افزایش آشفستگی در زیر لایه آرام در نزدیکی سطح، انتقال گرما را

رسوب در شرایط مشابه، از این اطلاعات برای محاسبه ضریب انتقال گرما و مقاومت گرمایی رسوب استفاده می شود [۵].

آزمایش های تشکیل رسوب کلسیم سولفات

برای بررسی تغییرهای شرایط عملیاتی آزمایش هایی طراحی شد که با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای موثر، تغییرهای یک پارامتر عملیاتی را در بازه ای از آن، بر تشکیل رسوب کلسیم سولفات نشان می دهد.

اثر غلظت کلسیم سولفات در آزمایش رسوب

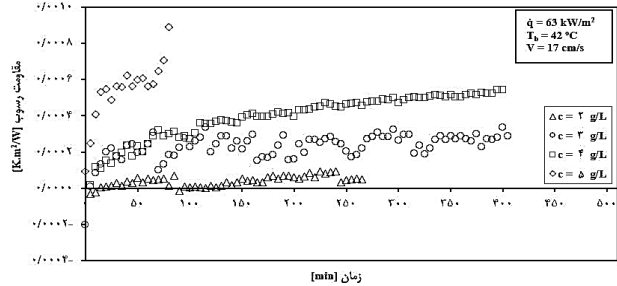
طبق شکل ۸ کلسیم سولفات برای دماهای بالاتر از ۳۵-۳۰ درجه سلسیوس، انحلال پذیری معکوس دارد و با افزایش دما، انحلال پذیری آن کاهش پیدا می کند. در ابتدا محلولی از کلسیم سولفات به صورت فوق اشباع در مخزن رسوب قرار می گیرد که جایگاه آن در منحنی انحلال پذیری قابل مشاهده است. پس از گرم شدن سطح انتقال گرما در دمای حدود ۶۰ درجه سلسیوس، محلول کلسیم سولفات در مجاورت سطح انتقال گرما، گرم می شود، اگر دمای محلول در نزدیکی سطح انتقال گرما و غلظت آن به مقداری باشد که جایگاه این محلول را به زیر منحنی اشباع کلسیم سولفات در نمودار انحلال پذیری آن برساند، کلسیم سولفات روی نمونه سطحی به صورت بلورهای رسوب می کند. رسوب های این نمک روی سطح را می پوشاند که موجب افزایش مقاومت گرمایی سطح و بالا رفتن بیشتر دمای سطح می شود. با افزایش دمای سطح، که در آزمایش های گوناگون این پژوهش در گستره ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس است، انحلال پذیری کلسیم سولفات کاهش بیشتری پیدا می کند و نرخ تولید رسوب ها افزایش می یابد.

نکته مهم در تشکیل رسوب تبلوری، درجه فوق اشباعیت محلول در نزدیکی سطح است که این پارامتر به غلظت کلسیم سولفات در محلول و دمای محلول در نزدیکی سطح وابسته می باشد. افزایش غلظت

در شکل ۱۰ دیده می‌شود، مشابه ضریب انتقال گرما است و این غلظت بالاترین مقدار مقاومت رسوب را به خود اختصاص داده است. برای غلظت‌های میانی ۳ و ۴ g/L رفتار ی بین حد پایین و بالا دیده می‌شود. در غلظت ۳ g/L رفتار رسوبی نوسان‌های زیادی دارد. علت این نوسان‌ها، نزدیکی این غلظت به غلظت اشباع کلسیم سولفات در دمای محلول است. در غلظت ۲ g/L که پایین‌تر از آن بود، اختلاف غلظت محلول با محلول اشباع آنقدر کم است که سامانه رسوب اندکی دارد اما برای غلظت ۳ g/L این اختلاف به قدری است که رسوب توانایی تشکیل دارد، اما آنقدر بالا نیست که لایه بلورها به صورت همگن تشکیل شود. ابتدا بلورهایی روی سطح تشکیل می‌شود اما چون نیرو محرکه اندک است، بلورهایی بعدی با فاصله زمانی بیشتر شکل می‌گیرند که این امر موجب می‌شود برخی از بلورهای ایجاد شده ابتدایی به دلیل نیروی تنش برشی حرکت سیال، از سطح جدا شوند. در مطالعه نجیبی و همکاران^۳ در سال ۱۹۹۷ میلادی، برای غلظت‌های ۱/۸، ۲ و ۲/۵ g/L در سایر شرایط ثابت، در دو سرعت ۶۰ و ۱۲۰ cm/s، آزمایش‌هایی انجام شد که نتیجه‌ها، نوسان‌های بیشتری را برای روند تشکیل رسوب در سرعت پایین به نسبت سرعت بالا، نشان می‌داد [۷]. همچنین در پژوهش ملایری و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۵ میلادی، در غلظت ۰/۸ g/L به نسبت غلظت بالاتر ۱/۶، نوسان‌های شدیدی در رفتار سامانه دیده شده است [۱۵].

اثر سرعت جریان بر تشکیل رسوب

در مطالعه‌های گذشته اثر سرعت به صورت تشدید یا تضعیف کننده بر تشکیل رسوب تبلوری، گزارش شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. تأثیر سرعت بر فرایند رسوب به دو عامل ضخامت زیرلایه آرام و نوع سازوکار کنترل کننده رسوب بستگی دارد [۶]. کندترین مرحله در هر فرایند، کنترل کننده سرعت و چگونگی پیشروی آن فرایند است. اگر رسیدن ذره‌های کلسیم سولفات در محلول، به سطح انتقال گرما و گذر آن‌ها از زیرلایه آرام، مرحله کند باشد، انتقال جرم کنترل کننده فرایند است، پس با افزایش سرعت سیال و اختلاط آن، ضخامت زیرلایه آرام کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ذره‌ها از این زیرلایه پیش‌تر و زودتر به سطح می‌رسند و تشکیل رسوب شدت می‌گیرد. در حالت دوم اگر تشکیل بلورها روی سطح فرایند کندتر باشد، پس ذره‌های کلسیم سولفات به اندازه کافی به سطح می‌رسد ولی فرایند تشکیل رسوب روی سطح،



شکل ۱۰ - تأثیر غلظت کلسیم سولفات بر مقاومت رسوب

در این ناحیه افزایش می‌دهند. در نتیجه ضریب انتقال گرما در ابتدای آزمایش با سطحی که اندکی رسوب گرفته است، از مقدار مشابه خود برای سطح تمیز بیشتر شده، در نتیجه مقاومت گرمایی مقدار کمی کوچک‌تر از صفر می‌شود [۱۴]. در فرایند تشکیل رسوب در مدت زمانی که با نام‌های زمان تاخیر زبری^۱ یا انتقال^۲ نام‌گذاری می‌شود، رسوب‌هایی تشکیل نشده است و یا بلورها بسیار کوچک هستند که مقاومت گرمایی سطح انتقال گرما را تغییر نمی‌دهند، اما به دلیل بلورهای اندک تشکیل شده روی سطح، جریان زیر لایه آرام سیال در نزدیکی سطح، آشفته‌گی‌های اندکی ایجاد می‌کند که موجب افزایش ضریب انتقال گرما به نسبت سطح تمیز شده و در نتیجه طبق معادله (۵) مقاومت رسوب کمی کوچک‌تر از صفر می‌شود که در مطالعه‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۵،۸،۱۰].

مقاومت انتقال گرما رسوب، برای غلظت ۲ g/L، که غلظت پایین و نزدیک به اشباع است، طبق شکل ۱۰، به تقریب برابر صفر خواهد ماند و با توجه به معادله (۶) که بیانگر معادله مستقیم مقاومت گرمایی و جرم رسوب است، در این غلظت رسوب بسیار اندکی تشکیل شده است.

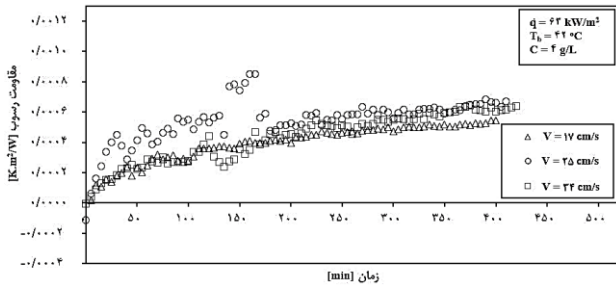
برای غلظت ۵ g/L که بالاترین غلظت مورد بررسی در این پژوهش است، دمای سطح از ابتدا با روند افزایشی شدیدی بالا رفته و پس از به تقریب ۸۰ دقیقه به حد بالای دمای مجاز دستگاه رسیده و سامانه خاموش می‌شود. برای این غلظت، در ابتدا ضریب انتقال گرما کاهش شدیدی داشته که علت آن تشکیل سریع بلورها روی سطح است و پس از مدتی روند کاهش ملایمی به دلیل پوشیده شدن کامل سطح با بلورها و تلاش برای تشکیل بلورهای جدید، دارد. پس از آن، به دلیل فوق اشباعیت بالای کلسیم سولفات لایه بعدی بلور روی لایه اولیه، تشکیل می‌شود و ضریب انتقال گرما کاهش شدیدی می‌یابد. روند افزایشی مقاومت رسوب، همان گونه که

(۱) Roughness Delay Time

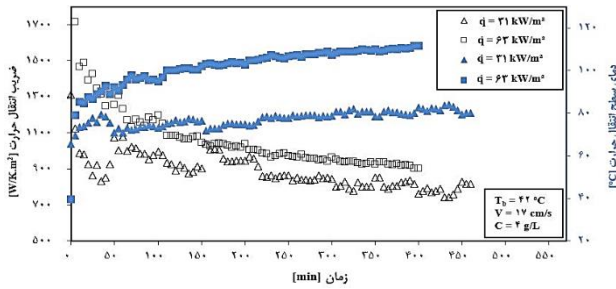
(۳) Najibi

(۲) Transition

(۴) Malayeri



شکل ۱۲ - تأثیر سرعت جریان سیال بر مقاومت رسوب



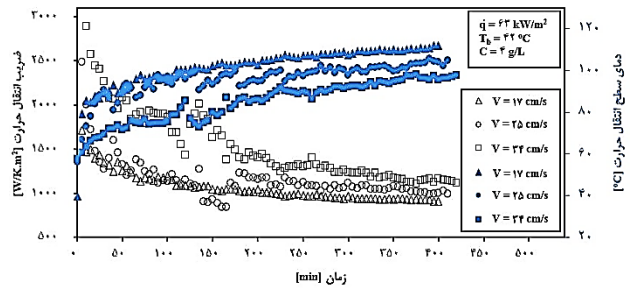
شکل ۱۳ - اثر شار گرمایی بر دمای سطح در آزمایش رسوب

این به معنی تشکیل رسوب‌های بیشتر است. مقاومت رسوب برای این سرعت‌ها، با توجه به شکل ۱۲ به یکدیگر نزدیک است. با توجه به ظرفیت‌های دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، سرعت‌های استفاده شده در گستره پایین سرعتی و در مقیاس آزمایشگاهی و مشابه برخی مطالعه‌های پیشین، انتخاب شده است [۵]. این امر موجب کاهش اختلاف بین مقاومت رسوب در سرعت‌های گوناگون شده است، زیرا این پارامتر به اختلاف‌های اندک ضریب انتقال جرم، حساسیت بالایی ندارد.

اثر شار گرمایی بر تغییرهای دمای سطح، ضریب انتقال حرما و مقاومت رسوب

همان‌گونه که پیشتر بیان شد، مهم‌ترین نکته در شکل‌گیری رسوب تبلوری، فوق اشباعیت محلول در نزدیکی سطح انتقال حرما است. با افزایش شار گرمایی اعمالی بر سطح انتقال حرما، دمای سطح و به تبع آن فوق اشباعیت محلول کلسیم سولفات در مجاورت سطح انتقال حرما افزایش پیدا می‌کند که موجب شدت گرفتن فرایند شکل‌گیری رسوب می‌شود [۷، ۹، ۱۱، ۱۲]. شکل ۱۳ برای دو شار گرمایی ۳۱ و ۶۳ kW/m² تغییرهای ضریب انتقال حرما و دمای سطح رسوب‌گرفته را با زمان نشان می‌دهد.

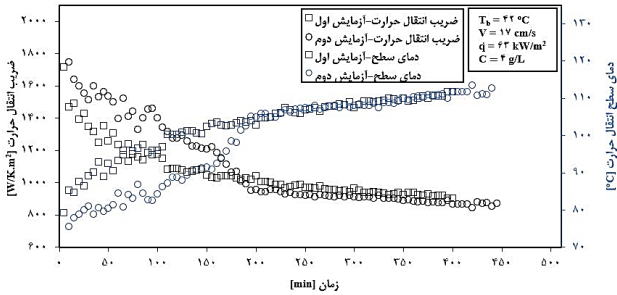
در حالتی که شار گرمایی کم‌تری به سطح وارد می‌شود، ضریب انتقال حرما کاهش به مراتب کم‌تری پیدا کرده و توانایی بیشتری برای انتقال حرما از سطح به توده سیال دارد. در نتیجه افزایش دمای



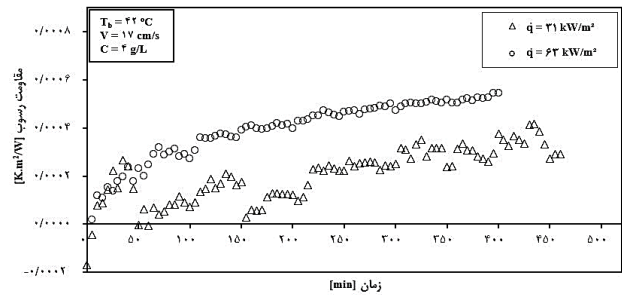
شکل ۱۱ - تأثیر سرعت جریان سیال بر دمای سطح و ضریب انتقال حرما

کنترل‌کننده است. در نتیجه افزایش سرعت سیال تنها موجب رسیدن بیشتر ذره‌های کلسیم سولفات به سطح می‌شود که نتیجه‌ای در افزایش رسوب نخواهد داشت. مطالعه‌های زیادی برای به‌دست آوردن تأثیر سرعت جریان بر تشکیل رسوب در حالت انتقال حرما جابه‌جایی بوده‌اند. برخی از آن‌ها کاهش رسوب را نتیجه افزایش سرعت سیال می‌دانند و گروهی دیگر افزایش شدت رسوب را حاصل این امر بیان کرده‌اند. تشکیل رسوب به وسیله نفوذ مولکولی در زیرلایه یا واکنش سطحی بر روی سطح انتقال حرما یا هر دو سازوکار کنترل می‌شود. در بیشتر مطالعه‌های پیشین انتقال جرم یا نفوذ مولکولی کنترل‌کننده است [۸، ۱۰-۱۲] و در نتیجه افزایش جریان موجب تشدید فرایند رسوب شده و در گروه دیگری سرعت جریان موجب کاهش فرایند رسوب شده است [۷، ۹]. در شکل ۱۱ نمودار دمای سطح انتقال حرما و ضریب انتقال حرما جابه‌جایی با زمان، برای سرعت‌های گوناگون سیال دیده می‌شود.

طبق شکل ۱۱ برای کم‌ترین سرعت ۱۷ cm/s دما به صورت پیوسته و بدون نوسان افزایش یافته و مشابه این رفتار برای مقاومت رسوب آن نیز در شکل ۱۲ دیده می‌شود. ضریب انتقال حرما این سرعت نیز روند کاهشی پیوسته‌ای دارد. برای سرعت‌های بیشتر از این مقدار، نوسان‌هایی در رفتار رسوبی دیده می‌شود. دلیل این رفتار نوسانی این است که با تشکیل بلورها روی سطح یا روی بلورهای پیشین، وقتی که سرعت بالا باشد، به علت تنش‌های برشی اعمال شده به این بلورها، گاهی برخی از آن‌ها از جایشان کنده شده و این جدایش، موجب کاهش ضخامت بلور بر سطح و در نتیجه موجب کاهش دمای سطح و مقاومت رسوب و افزایش ضریب انتقال حرما، به صورت ناگهانی می‌شود. با مقایسه ضریب انتقال حرما نهایی در زمان انتهایی آزمایش، ضریب انتقال حرما برای حداقل سرعت، کم‌ترین مقدار است و این امر نشان‌دهنده این است که سازوکار کنترل‌کننده در این پژوهش، انتقال جرم است، زیرا با افزایش سرعت، روند کاهشی ضریب انتقال حرما افزایش بیش‌تری داشته



شکل ۱۵ - بررسی تکرارپذیری ضریب انتقال گرما و دمای سطح برای سطح الف در دو آزمایش مشابه



شکل ۱۴ - اثر شار گرمایی سیال بر مقاومت رسوب در آزمایش رسوب

رفتار سامانه رسوب را از نظر تکرارپذیری مقایسه کردند [۱۶]. الجنبایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ میلادی در پژوهشی رفتار رسوبی یک پوشش دهنده سطحی را بررسی کردند. برای افزایش اطمینان از بازدهی این پوشش جدید، آزمایش رسوب آن در شرایط یکسان عملیاتی تکرار شد. در این بررسی سطح با پوشش ابتدا در آزمایش اول استفاده شد و بعد به کمک هیدروکلریک اسید رسوب زدایی شده و برای آزمایش دوم آماده شد. در این پژوهش نتیجه‌های تکرارپذیری از لحاظ رفتاری، افزایش بازدهی استفاده از این پوشش را نشان می‌داد اما به دلیل تغییرهای انرژی سطح به علت تغییرهای زبری به دلیل سابقه رسوب سطح، شیب نمودار رسوب و مدت زمان القا متفاوت بود [۵].

برای افزایش اطمینان از نتیجه‌های به دست آمده در این پژوهش، برخی از آزمایش‌های این مطالعه تکرار شده است. برای انجام آزمایش‌های تکرارپذیری از دو نوع سطح الف و ب به صورت تمیز استفاده شده است. میزان زبری این سطوح به کمک دستگاه زبری سنج اندازه‌گیری شده و از این نظر از انطباق خوبی برخوردارند. شرایط عملیاتی در هر یک از زوج آزمایش‌های تکرارپذیری کاملاً بر هم منطبق بوده و برای افزایش اطمینان از کاهش اثر شرایط محیطی، آزمایش‌ها در روزهای پشت سر هم انجام شده و دمای محیط تقریباً در زمان‌های مشابه در هر دو آزمایش، یکسان بوده است. مطابق شکل ۱۵ برای سطح انتقال گرما نوع الف، ضریب انتقال گرما و دمای سطح، از ابتدای آزمایش‌ها تا زمان ۴۰۰ دقیقه، برای آزمایش اول و دوم کاملاً بر هم منطبق است. این مشابهت عددی و همچنین رفتاری تا حدود بسیار زیادی تاییدی برای تکرارپذیری نتیجه‌های این پژوهش می‌باشد، زیرا تمام آزمایش‌های انجام شده با این نمونه سطح تا زمان زیر ۴۵۰ دقیقه بوده است. پس از این مدت زمان، انحراف کمی در رفتار برای حدود ۱۵۰ دقیقه رخ می‌دهد که به علت‌های گوناگونی از جمله تغییرهای دمایی محیط، ضربه، وجود مواد خارجی و سایر عامل‌ها تصادفی ممکن است

سطح در این حالت کم‌تر است. رفتار سامانه رسوب در برابر شار گرمایی اعمالی بر سطح، در شکل ۱۴ به وسیله پارامتر مقاومت رسوب بررسی شده است. سطح با شار گرمایی کم‌تر، مقاومت رسوب کم‌تری داشته و به صورت حدی مقدار آن در انتهای آزمایش تقریباً نصف مقدار مقاومت رسوب سطح با شار گرمایی بالاتر است. تجیبی و همکاران در سال ۱۹۹۷ میلادی با بررسی اثر دمای سطح در جوشش جریان‌های محلول کلسیم سولفات در سرعت ۹۰ cm/s، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای سطح، مقاومت رسوب افزایش پیدا می‌کند و این آزمایش‌ها را برای سرعت ۱۴۰ cm/s نیز تکرار کردند و این بار روند افزایشی مقاومت رسوب با دمای سطح، شدت بیشتری پیدا کرد. همچنین دیدند که نوسان‌های ایجاد شده برای یک شار گرمایی، با افزایش سرعت سیال از ۹۰ به ۱۴۰ cm/s در آزمایش‌های همانند، تعدیل می‌شود. آن‌ها همچنین با رسم نمودار نرخ مقاومت رسوب بر حسب دمای سطح برای دو سرعت ذکر شده به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شار گرمایی سطح، به صورت کلی نرخ مقاومت رسوب افزایش پیدا می‌کند و با افزایش سرعت، این روند تشدید می‌شود [۷].

بررسی تکرارپذیری نتیجه‌ها

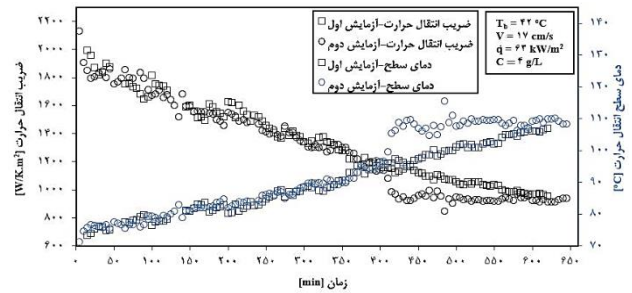
با توجه به ماهیت تصادفی بودن پدیده رسوب، نتیجه‌های گوناگون در این حوزه به صورت کیفی و رفتاری بررسی می‌شود. مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهد که در بازه زمان القای رسوب، کوچک‌ترین عامل‌های بر زمان تشکیل بلورهای ابتدایی موثر است و چگونگی شروع فرایند رسوب در این بازه، تا حدودی رفتار در زمان تشکیل رسوب را نیز جهت‌دهی می‌کند [۵]. در پژوهش‌های پیشین، برای اطمینان از تکرارپذیری نتیجه‌ها، تست‌های تکرارپذیری از نظر رفتاری و کیفی و نه مقدار عددی در هر نقطه، بررسی شده‌اند. جامع‌الاحمدی و همکارانشان در سال ۱۹۸۹ میلادی با بررسی تکرارپذیری تست رسوب در شرایط یکسان عملیاتی در دو آزمون گوناگون،

رسوب موثر نیست. پس با شناختن مکانیزم کنترل کننده سامانه رسوب، با تغییر سرعت می توان موجب کاهش تشکیل رسوب شد. افزایش شار گرمایی و دمای سطح، همواره موجب افزایش تشکیل رسوب بر سطح می شود که در طراحی مبدل ها می توان از این نکته برای کاهش رسوب استفاده کرد. در زیر به تحلیل های کمی مهم نتیجه ها پژوهش پرداخته می شود:

غلظت کلسیم سولفات پارامتر بسیار موثری بر مقدار تشکیل رسوب است. در غلظت های ۲، ۳، ۴ g/L ضریب انتقال گرما نهایی به نسبت ضریب انتقال گرما اولیه، به ترتیب، ۲۰، ۴۴ و ۶۰٪ کاهش پیدا کرده است. برای غلظت ۵ g/L، در حدود یک پنجم زمان آزمایش رسوب برای سایر غلظت ها، ضریب انتقال گرما بیش از ۸۰٪ درصد مقدار اولیه خود کاهش پیدا کرده است و این نتیجه به علت سطح بالای فوق اشباعیت در این آزمایش دیده شده است. سرعت جریان سیال به دلیل تغییر در میزان آشفتگی محلول در نزدیکی سطح، بسیار مهم است، با دو برابر شدن سرعت جریان، ضریب انتقال گرما نهایی ۵۵٪ بیشتر بوده که نشانگر تأثیر چشمگیر استفاده از روش های ایجاد آشفتگی در کاهش رسوب های ایجاد شده دارد. شار گرمایی اعمالی بر سطح انتقال گرما به نسبت غلظت کلسیم سولفات و سرعت سیال، تأثیر کمتری داشته است. افزایش ۲ برابری شار گرمایی، تنها ۱۰٪ ضریب انتقال گرما را بالا برده است.

نمادها

A	سطح انتقال گرما [m ²]
C	غلظت [g/L]
h	ضریب انتقال گرما [W/m ² K]
U	ضریب انتقال گرما کلی [W/m ² K]
k	ضریب هدایت گرمایی [W/m K]
q̇	شار گرمایی [W/m ²]
R	مقاومت گرمایی [m ² K/W]
t	زمان [min]
T	دما [°C]
x	ضخامت [mm]
m	جرم [g]
ρ	جرم ویژه [kg/m ³]
Q̇	نرخ گرما [W]
V	سرعت سیال [cm/s]
i	درونی



شکل ۱۶ - بررسی تکرارپذیری ضریب انتقال گرما و دمای سطح برای سطح ب در دو آزمایش مشابه

رخ داده باشد. پس از این مدت زمان کوتاه، سامانه دوباره به رفتار پیشین خود برگشته و سرانجام به مقدار حدی می رسد. برای سطح ب، نتیجه ها تکرارپذیری در شکل ۱۶ آمده است که برای این سطح نیز، روند همانند سطح الف تکرار می شود، با این تفاوت که انحراف رفتاری در آغاز آزمایش رخ می دهد که پس از گذشت از این مدت زمان، رفتار و حتی مقدار پارامترها برای آزمایش ابتدایی و تکرار آن تا پایان آزمایش مطابق یکدیگر عمل می کند. لازم به ذکر است که تکرارپذیری آزمایش ها در موارد دیگر مربوط به قسمت های دیگر پژوهش، نیز انجام شده است و تکرارپذیری با چندین آزمایش بررسی شده است، به صورت کلی پژوهش از نظر تکرارپذیری، با توجه به نتیجه ها پژوهش های پیشین، روند مطلوبی را از خود نشان داده است.

نتیجه گیری

شناختن بیشتر سامانه های رسوب دهنده، موجب افزایش آگاهی در مورد راه های کاهش شدت رسوب و مقابله با آن می شود. یکی از ویژگی های سامانه رسوب، تأثیر پارامترهای عملیاتی بر رفتار و تشکیل رسوب است. افزایش غلظت ماده رسوب دهنده همواره موجب افزایش و شدت فرایند رسوب می شود. این نکته می تواند در صورت امکان با رقیق سازی سامانه رسوب دهنده و یا به نحوی کاهش غلظت، برای کاهش رسوب کمک کند. غلظت های نزدیک اشباع با رسوب بسیار کم و نزدیک صفر همراه هستند و غلظت های کمی بیش تر از اشباع به علت اختلاف غلظت با غلظت اشباع کم، رفتاری نوسانی در تشکیل رسوب دارند. پارامتر سرعت در سامانه های رسوب دهنده وابسته به مکانیزم کنترل کننده سامانه می تواند موجب تشدید یا کاهش تشکیل رسوب شود. اگر انتقال جرم ذره ها به سطح، کنترل کننده باشد، افزایش سرعت موجب افزایش رسوب می شود و اگر تشکیل ذره ها روی سطح محدود کننده باشد، سرعت بر فرایند

Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	Calcium nitrate tetra hydrate	a	بیرونی
Na ₂ SO ₄	Sodium sulfate	w	دیواره
CaSO ₄	Calcium sulfate	f	رسوب
NaNO ₃	Sodium nitrate	F	سیال
H ₂ O	Water	o	تمیز (بدون رسوب)
		aq	محلول آبی
		b	توده سیال

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۱

مراجع

- [۱] سرمستی امامی م.ر.، غلامی ع.ر.، بررسی تحلیلی اثر رسوبات و کیفیت آب ورودی بر خوردگی لوله‌های تبادلگر دیگی. تشریح شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴): ۳۹-۲۲۵-۲۳۵ (۱۳۹۸).
- [2] Malayeri M.R., Al-Janabi A., Müller-Steinhagen H., [Application of Nano-Modified Surfaces for Fouling Mitigation](#), *International Journal of Energy Research*, **33(13)**: 1101-1113 (2009).
- [3] Nategh M., Malayeri M.R., Mahdiyar, H., [A Review on Crude Oil Fouling and Mitigation Methods in Pre-Heat Trains of Iranian Oil Refineries](#), *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Technology*, **4(1)**: 1-17 (2017).
- [4] Al-Janabi A., Malayeri M.R., [Innovative Non-Metal Heat Transfer Surfaces to Mitigate Crystallization Fouling](#). *International Journal of Thermal Sciences*, **138**: 384-392 (2019).
- [5] Al-Janabi A.K.A., [Convective Heat Transfer Fouling of Aqueous Solutions on Modified Surfaces](#), Ph.D. Thesis, The University of Stuttgart, Germany (2011).
- [6] Nikoo A.H., Malayeri M.R., [Incorporation of Surface Energy Properties into General Crystallization Fouling Model for Heat Transfer Surfaces](#), *Chemical Engineering Science*, **215**: 115461 (2020).
- [7] Najibi S.H., Müller-Steinhagen H., Jamialahmadi M., [Calcium Sulphate Scale Formation during Subcooled Flow Boiling](#), *Chemical Engineering Science*, **52(8)**: 1265-1284 (1997).
- [8] Bansal B., Müller-Steinhagen H., [Crystallization Fouling in Plate Heat Exchangers](#), *Journal of Heat Transfer*, **115(3)**: 584-591 (1993).
- [9] Helalizadeh A., Müller-Steinhagen H., Jamialahmadi M., [Mixed Salt Crystallisation Fouling](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **39(1)**: 29-43 (2000).
- [10] Bohnet M., [Fouling of Heat Transfer Surfaces](#). *Chemical Engineering & Technology*, **10(1)**: 113-125 (1987).
- [11] Hasson D., Zahavi J., [Mechanism of Calcium Sulphate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces](#). *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, **9(1)**: 1-10 (1970).
- [12] Kukulka D.J., Devgun M., [Fluid Temperature and Velocity Effect on Fouling](#), *Applied Thermal Engineering*, **27(16)**: 2732-2744 (2007).

- [13] Kho T., Zettler H.U., Müller-Steinhagen H., Hughes D., [Effect of Flow Distribution on Scale Formation in Plate and Frame Heat Exchangers](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **75(7)**: 635-640 (1997).
- [14] Bott T.R., [Fouling of Heat Exchangers](#), Elsevier (1995).
- [15] Malayeri M.R., Müller-Steinhagen H., Bartlett T.H., [Fouling of Tube Bundles under Pool Boiling Conditions](#), *Chemical Engineering Science*, **60(6)**: 1503-1513 (2005).
- [16] Jamialahmadi M., Blöchl R., Müller-Steinhagen H., [Bubble Dynamics and Scale Formation during Boiling of Aqueous Calcium Sulphate Solutions](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **26(1)**: 15-26 (1989).