

اصلاح سطوح انتقال حرارت در جهت کاهش مقدار رسوب تبلوری براساس مؤلفه قطبی انرژی سطح

امیرحسین نیکو^۱، محمدرضا ملایری^{۲*}، عبدالله الجنابی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه سلطان قابوس عمان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۰۳

پیام‌نگار: malayeri@shirazu.ac.ir

چکیده

از مشکلات عمده تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی، می‌توان افزایش افت فشار، توزیع نامناسب جریان، افت انرژی و کاهش بازده حرارتی را برشمرد. امروزه، اصلاح سطوح به عنوان یک روش جدید، مؤثر و سازگار با محیط زیست برای کم کردن میزان رسوب تشکیل شده روی مبدل‌های حرارتی مورد توجه فراوان است. در این روش، انرژی سطح و مؤلفه‌های آن از طریق روکش کردن سطوح در جهت کاهش رسوب اصلاح می‌شوند. در این مقاله، انرژی سطح و دو مؤلفه پخشی و قطبی آن با روش‌های Wu و OWRK محاسبه شده است. محاسبه مقادیر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن برای رسوب تبلوری بر روی سطوح مختلف نشان می‌دهد که مقدار رسوب تشکیل شده بر روی سطوح انتقال حرارت با افزایش مؤلفه قطبی کاهش می‌یابد. مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعه بر روی رسوب کلسیم سولفات نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مبدل حرارتی، رسوب، انرژی سطح، مؤلفه قطبی انرژی سطح

۱. مقدمه

گریبان‌گیر این دستگاه‌هاست. این پدیده سبب بروز مشکل در شرایط عملیاتی و بازده مبدل‌های حرارتی می‌شود. پیامد تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی، و به طور کلی روی سطوح انتقال حرارت، تحمیل هزینه‌های گزاف بر صنایع و افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای است [۱]. هزینه عملیاتی جلوگیری از تشکیل رسوب در صنعت، به تنهایی، در سال بالغ بر ۶۰ میلیارد دلار آمریکاست [۲]. از زیانهای تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی می‌توان به مشکلات عملیاتی چون افزایش افت فشار ناشی از کاهش

مبدل‌های حرارتی در بسیاری از فرایندهای صنعتی از جمله دستگاه‌های مهم به‌شمار می‌آیند. صنایع شیمیایی، پتروشیمی، صنایع غذایی، نیروگاه‌ها و واحدهای نمک‌زدایی از جمله صنایعی‌اند که در آنها مبدل‌های حرارتی به‌کار می‌روند. پدیده ناخواسته و زیانبار تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی یکی از مشکلات

* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، بخش مهندسی شیمی

حرارتی مورد توجه فراوان است. در این روش، اصلاح برهم کنش‌های بین رسوب و سطح انتقال حرارت به منظور کم کردن نیرو و قدرت چسبندگی رسوب به سطح، از طریق روکش کردن سطح انجام می‌شود [۵]. با توجه به شرایط عملیاتی و نیز خصوصیات سیال در تماس با سطح، نوع روکش و طریقه روکش کردن سطح انتخاب می‌شود. در روکش کردن سطح، ویژگی‌های سطح انتقال حرارت در جهت کم کردن مقدار رسوب تشکیل شده اصلاح می‌شوند. در این مقاله، به منظور بررسی تغییر ویژگی‌های سطح انتقال حرارت بر اثر روکش کردن، سطح اصلاح نشده فولادی با پوشش‌های خارجی متنوعی روکش و اصلاح می‌شود و طی فرایند آزمایشگاهی تشکیل رسوب متبلور کلسیم سولفات بر روی سطوح، اثر انرژی سطح و دو مؤلفه پخشی و قطبی آن به عنوان مهم‌ترین خصوصیت سطح انتقال حرارت در کاهش رسوب تشکیل شده بر روی سطوح بررسی می‌شود.

۲. پیش زمینه

۲-۱ مفهوم انرژی سطح

در شکل (۱) انرژی آزاد سطح جامد، انرژی بر هم کنش سطحی بین مایع و بخار و جامد و مایع و نیز زاویه تماس قطره مایع روی سطح جامد را مشاهده می‌کنید. اولین بار، یانگ^۱ در سال ۱۸۰۵ میلادی رابطه‌ای به صورت زیر بین کمیت‌های یادشده را برقرار کرد:

$$\gamma_2 = \gamma_{12} + \gamma_3 \cos \theta \quad (1)$$

در رابطه (۱)، γ_2 ، γ_3 و γ_{12} به ترتیب، بیانگر انرژی آزاد سطح جامد، انرژی بر هم کنش بین (مایع و بخار) و (جامد و مایع) هستند. θ نیز زاویه تماس مایع روی سطح جامد است که معیاری از خیس شوندگی سطح جامد به‌شمار می‌آید. مولکول‌های تشکیل‌دهنده یک جسم را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد:

- سطحی: مولکول‌های سطحی جسم
- درونی: مولکول‌های درونی جسم

سطح مقطع جریان و توزیع نامناسب جریان، کاهش آهنگ انتقال حرارت ناشی از اضافه شدن مقاومت حرارتی رسوب، کاهش بازده حرارتی، افزایش هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های مربوط به تعمیر و تمیز کردن مبدل حرارتی از رسوب اشاره کرد [۲].

انواع خاص مبدل‌های حرارتی به سبب طراحی هندسی خاص از مشکل رسوب کمتر آسیب می‌بینند. مثلاً، استفاده از مبدل‌های حرارتی تیغه‌ای برای انتقال حرارت جابه‌جایی می‌تواند در بسیاری موارد (نه الزاماً همیشه) به دلایل افزایش میزان آشفستگی، کاهش دمای سطح انتقال حرارت و توزیع یکنواخت جریان، به کاهش رسوب انجامد [۳]. همچنین، مبدل‌های حرارتی تیغه‌ای می‌توانند با استفاده از صفحات چین‌دار و یا موجی شکل تحت شرایط کاملاً آشفته در سرعت‌های جریان نسبتاً پایین عمل کنند که این خود باعث افزایش تنش برشی در سطح انتقال حرارت و به تبع آن، کاهش مقدار رسوب تشکیل شده می‌شود [۴]. با انتخاب طراحی هندسی مناسب برای مبدل‌های حرارتی، می‌توان مقدار رسوب تشکیل شده را کاهش داد، ولی کافی نخواهد بود و ضرورت به‌کارگیری روش‌هایی برای مقابله و مبارزه با این پدیده نامطلوب احساس می‌شود. تلاش‌های صورت گرفته در مبارزه با معضل تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی به طور کلی در دو بخش صورت می‌گیرد:

• تلاش برای کاهش تشکیل رسوب

• تلاش برای زدودن رسوب از روی سطوح

برای جلوگیری از پدیده تشکیل رسوب باید در هر دو زمینه اقدامات لازم انجام شود و هر دو روش را در کنار هم به پیش برد. روش‌های متعددی برای کاهش مقدار رسوب تشکیل شده بر روی مبدل‌های حرارتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مکانیکی، شیمیایی، صافش خوراک و تغییر شرایط عملیاتی اشاره کرد [۲]. در تغییر شرایط عملیاتی برای کاهش مقدار رسوب تشکیل شده، از روش‌های شوک حرارتی، رقیق‌سازی خوراک، و افزایش تنش برشی استفاده می‌شود. در روش‌های شیمیایی، برای جلوگیری از تشکیل رسوب از بازدارنده‌های شیمیایی بهره می‌گیرند که ایراد این روش مخاطرات زیست محیطی آن است.

امروزه، اصلاح سطوح انتقال حرارت به عنوان روشی جدید، مؤثر و سازگار با محیط زیست برای کاهش تشکیل رسوب روی مبدل‌های

1. Young

دی یدو متان و اتیلن گلیکول استفاده می‌شود. در جدول (۱)، مقادیر کشش سطحی و مؤلفه‌های آن را برای آب و دی یدو متان درج شده است. همچنین، زوایای تماس آب و دی یدو متان روی سطوح مختلف در جدول (۲) درج شده است. نظریه‌های مختلفی نیز برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن پرداخته شده‌اند که از هر کدام، بسته به شرایط، ممکن است استفاده شود که ازجمله آن شرایط می‌توان به قطبی بودن و یا قطبی نبودن و یا میزان سطح انرژی سیستم یاد کرد [۳].



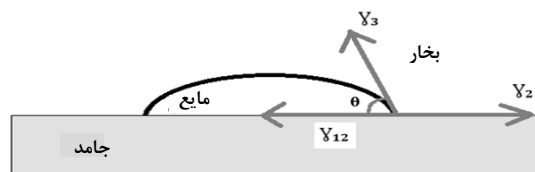
شکل ۲. لوازم مورد نیاز برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن.

جدول ۱. مقادیر کشش سطحی و مؤلفه‌های آن.

کشش سطحی و مؤلفه‌های آن $m.N.m^{-1}$			
γ_3	γ_3^p	γ_3^d	مایع آزمون
۷۲/۸۰	۵۱/۰۰	۲۱/۸۰	آب
۵۰/۸۰	۲/۳۰	۴۸/۵۰	دی یدو متان

جدول ۲. زوایای تماس مایعات آزمون بر روی سطوح مختلف.

زوایای تماس مایعات آزمون (درجه)		
سطح	θ آب	θ دی یدو متان
AISI 304 BA	۸۷/۵۹	۴۸/۴۹
SB1	۸۷/۴۰	۶۸/۴۷
SB2	۸۵/۷۹	۷۷/۹۲
SB3	۸۴/۶۶	۶۲/۱۱
SB4	۸۶/۵۷	۶۷/۴۶
WB	۷۵/۴۹	۶۱/۴۳
Ni-P	۵۹/۲۶	۳۷/۸۳
Ni-P-BN	۴۸/۹۶	۲۶/۶۴
K-S1	۸۰/۵۱	۷۲/۷۳
K-S2	۸۴/۷۲	۶۹/۴۷



شکل ۱. زاویه تماس و انرژی‌های برهم کنش بین سطح جامد، قطره مایع و بخار.

مولکول‌های درونی جسم به علت وجود برهم کنش‌های قوی که با دیگر مولکول‌های مشابه درونی جسم در همه جهات برقرار می‌کنند، انرژی و آزادی عمل کمتری دارند، در حالی که مولکول‌های سطحی به دلیل جذب شدن کمتر از جانب مولکول‌های مشابه، نسبت به مولکول‌های داخلی انرژی بیشتری دارند. بنابراین، به مجموع همه انرژی‌های اضافی مولکول‌های سطحی یک جسم، انرژی آزاد سطح گفته می‌شود [۳].

در رابطه (۲)، انرژی آزاد سطح بر اساس انرژی آزاد گیبس تعریف می‌شود:

$$\gamma_{ij} = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,P} \quad (2)$$

در این رابطه، G انرژی آزاد گیبس سیستم، T دما و P فشار است. اگر فاز مجاور j ، بخار یا خلاء باشد، γ_{iz} بیانگر انرژی آزاد سطح فاز i خواهد بود [۶].

مولکول‌های سطح جسم برای رسیدن به پایداری بیشتر با مولکول‌های لایه مجاور برهم کنش برقرار می‌کنند. زائو^۱ و همکاران [۷] در گزارشی دیگر، انرژی سطح انتقال حرارت را معیاری مستقیم از نیروهای کششی سطحی برشمردند.

۳. محاسبه انرژی سطح

انرژی آزاد سطح در فرایندهایی که در سطح مشترک جامد-مایع و جامد-گاز اتفاق می‌افتد، نقش تعیین‌کننده و مؤثری دارد [۸]. در شکل (۲)، لوازم مورد نیاز برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن را مشاهده می‌کنید.

برای محاسبه انرژی سطح سطوح انتقال حرارت و مؤلفه‌های آن به استفاده از اطلاعات کشش سطحی و زوایای تماس مایعات آزمون^۲ بر روی سطوح نیاز است. غالباً از اطلاعات مایعات آب،

1. Zhao

2. Test Liquids

۳-۱ روش وو^۱

وو، در اوایل دهه ۱۹۷۰ با در نظر گرفتن دو مؤلفه پخش و قطبی برای انرژی سطح انتقال حرارت، نظریه خود را برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن ارائه کرد. رابطه (۳)، نظریه وو را بیان می‌کند:

$$\gamma_3 (1 + \cos \theta) = \frac{4\gamma_2^d \gamma_3^d}{\gamma_2^d + \gamma_3^d} + \frac{4\gamma_2^p \gamma_3^p}{\gamma_2^p + \gamma_3^p} \quad (3)$$

در روش وو، برای محاسبه انرژی سطح، میانگین همساز بین مؤلفه پخش و قطبی انرژی سطح گرفته می‌شود. برای محاسبه مؤلفه‌های پخش و قطبی انرژی سطح از نظریه وو به اطلاعات دو مایع آزمون نیاز است. سپس دو مؤلفه مورد نظر از حل دستگاه دو معادله دو مجهولی به دست می‌آید و در نهایت انرژی سطح انتقال حرارت نیز از رابطه (۴) محاسبه خواهد شد:

$$\gamma_2 = \gamma_2^d + \gamma_2^p \quad (4)$$

این نظریه برای سیستم‌های با سطح انرژی پایین، مانند محلول‌های آلی و بسپارها مناسب است [۳].

۳-۲ روش OWRK

Owens, Rabel, و Kaelble با در نظر گرفتن دو مؤلفه پخش و قطبی برای انرژی سطح انتقال حرارت، نظریه خود را برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن ارائه کردند. این نظریه به اختصار OWRK نامیده می‌شود. رابطه (۵)، روش OWRK را نشان می‌دهد:

$$\gamma_3 (1 + \cos \theta) = 2 \sqrt{\gamma_2^d \gamma_3^d} + 2 \sqrt{\gamma_2^p \gamma_3^p} \quad (5)$$

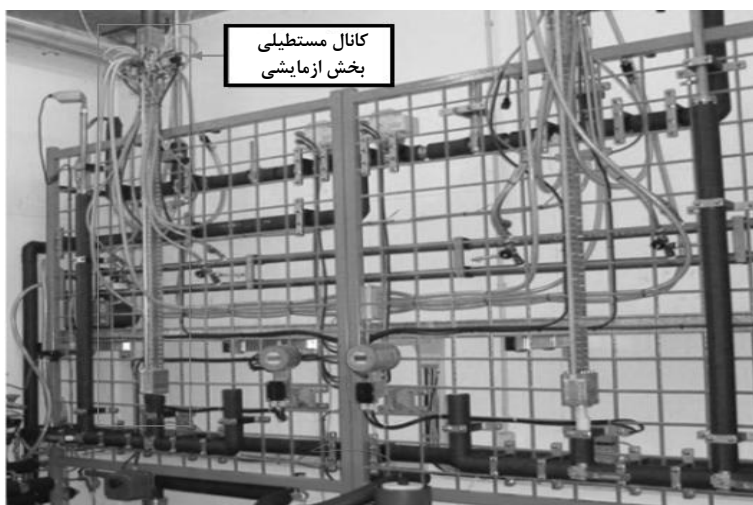
در این نظریه، محاسبات بر مبنای میانگین هندسی بین مؤلفه پخش و قطبی انرژی سطح صورت می‌گیرد. مانند نظریه وو، برای محاسبات به اطلاعات دو مایع آزمون نیاز است و در صورتی که یکی از مایعات قطبی و دیگری ناقطبی باشد، محاسبات آسان‌تر می‌شود. انرژی کل سطح انتقال حرارت نیز از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

۴. شرح دستگاه آزمایشی

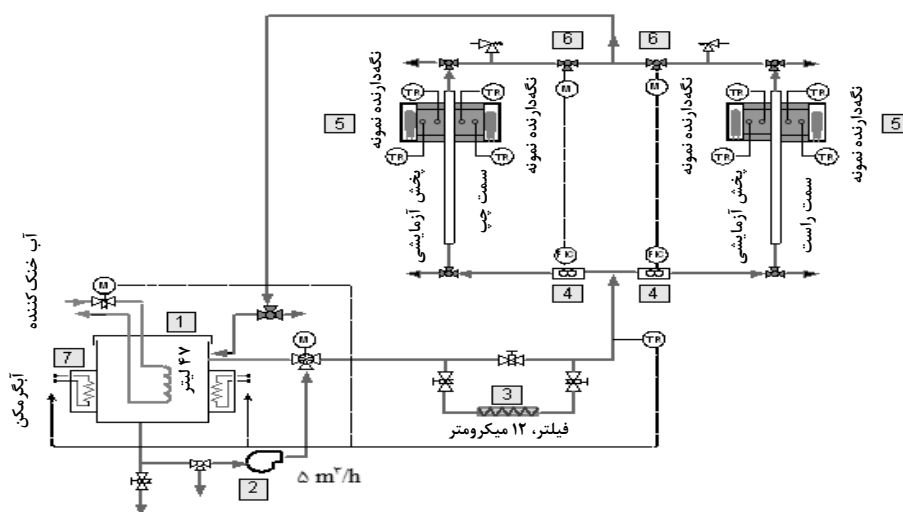
دستگاه آزمایشی، مجموعه بسته‌ای با دو بخش آزمایشی کاملاً یکسان است که به صورت موازی با یکدیگر کار می‌کنند. تصویر دستگاه آزمایشی و همچنین طرحواره آن را در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌کنید. هر بخش یک مجرای عمودی مستطیلی شکل است. سیستم حرارتی دستگاه آزمایشی در فاصله ۱/۵ متری از جریان رو به بالای ورودی به این بخش‌های آزمایشی قرار دارد. در هر بخش آزمایشی نمونه‌هایی از سطوح اصلاح شده قرار داده می‌شود. سطح اصلاح نشده فولادی AISI 304 BA با پوشش‌های خارجی متنوعی اصلاح می‌شود. روکش‌های SB1، SB2، SB3 و SB4 پوشش‌های پایه حلال، WB پوششی پایه آب، Ni-P و Ni-P-BN پوشش‌های الکترولس^۲ و K-S1 و K-S2 پوشش‌هایی نانوساختارند که برای اصلاح کردن سطح فولاد ضد زنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. این سطوح به کمک تجهیزات حرارتی تعبیه شده در این سیستم گرم می‌شوند. محلول کلسیم سولفات به عنوان سیال عامل از مخزن ذخیره فولادی ۴۷ لیتری به وسیله پمپ مرکزگریز پس از عبور از یک صافی ۱۲ میکرومتری، مطابق شکل (۴)، به دو قسمت مساوی تقسیم و به روی نمونه‌ها پمپ می‌شود. در صورت عدم استفاده از صافش، ذرات ناخالصی احتمالی می‌توانند مانند مکان‌های هسته‌زایی ناهمگن عمل کنند و در نتیجه آزمایش اثرگذار باشند. کلیه مراحل کار کنترل رایانه‌ای می‌شود و همه اطلاعات، از جمله شار حرارتی اعمال شده، آهنگ جریان، دمای محلول و دمای سطح انتقال حرارت جمع‌آوری می‌شوند. داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها بیانگر تغییر پارامترهای کمی تشکیل رسوب، همچون زمان القای ابتدایی و آهنگ اولیه رسوب ناشی از اصلاح سطح انتقال حرارت هستند. مدت زمانی که سپری می‌شود تا افزایش چشمگیری در مقاومت رسوب تشکیل شده رخ دهد، زمان القای ابتدایی نامیده می‌شود. آهنگ اولیه رسوب عبارت است از شیب منحنی رسوب، در ابتدای مسیری که مقاومت رسوب پیوسته با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در جدول (۳) داده‌های مربوط به زمان القای ابتدایی رسوب و آهنگ اولیه رسوب را نشان می‌دهد. برای جزئیات بیشتر در این زمینه به مرجع [۳] مراجعه شود.

2. Electroless

1. Wu



شکل ۳. دستگاه آزمایش مستقر در دانشگاه اشتوتگارت آلمان.



شکل ۴. طرحواره دستگاه آزمایشی.

جدول ۳. زمان القای ابتدایی رسوب و آهنگ اولیه رسوب برای سطوح مختلف.

سطح	زمان القای ابتدایی رسوب (دقیقه)	$\times 10^{-6}$ آهنگ اولیه رسوب ($m^2.K/W.min$)
AISI 304 BA	۴۳	۴/۳۱
SB1	۸۹	۴/۱
SB2	۱۸۱	۱/۱۷۱
SB3	۵۸	۳/۹
SB4	۷۲	۳/۹۳
WB	۸۵	۴/۲۲
Ni-P	۱۰۵	۴/۳۱
Ni-P-BN	۵۸۰	۰/۹۶۱
K-S1	۱۳۰	۲/۹۶
K-S2	۴۵۰	۲/۶۶

۵. محاسبات

برای محاسبه مؤلفه قطبی انرژی سطح، از اطلاعات آب و برای محاسبه مؤلفه پخشی انرژی سطح، از اطلاعات دی یدو متان استفاده می‌شود. با استفاده از مندرجات جدول‌های (۱) و (۲) و نیز رابطه‌های (۳)، (۴) و (۵)، مقادیر انرژی سطح و دو مؤلفه پخشی و قطبی آن به دست می‌آیند. نتایج برای دو روش وو و OWRK در جدول‌های (۴) و (۵) درج شده‌اند.

جدول ۴. مقادیر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن محاسبه شده با روش وو.

انرژی سطح و مؤلفه‌های آن $m.N.m^{-1}$			
سطح	γ_2	γ_2^p	γ_2^d
AISI 304 BA	۳۹/۰۷	۶/۷۳	۳۲/۳۴
SB1	۳۲/۱۴	۹/۳۲	۲۲/۸۲
SB2	۳۰/۲۶	۱۱/۶۸	۱۸/۵۸
SB3	۳۵/۴۶	۹/۶۴	۲۵/۶۵
SB4	۳۲/۷۹	۹/۵۴	۲۳/۲۵
WB	۳۹/۶۷	۱۳/۹۷	۲۵/۷۰
Ni-P	۵۵/۱۹	۱۹/۱۴	۳۶/۰۵
Ni-P-BN	۶۳/۴۹	۲۳/۳۷	۴۰/۱۲
K-S1	۳۴/۰۵	۱۳/۳۵	۲۰/۷۰
K-S2	۳۲/۹۹	۱۰/۷۲	۲۲/۲۷

جدول ۵. انرژی سطح و مؤلفه‌های آن محاسبه شده با روش OWRK.

انرژی سطح و مؤلفه‌های آن $m.N.m^{-1}$			
سطح	γ_2	γ_2^p	γ_2^d
AISI 304 BA	۳۵/۲۱	۲/۴۶	۳۲/۷۵
SB1	۲۵/۷۲	۵/۸۲	۱۹/۹۰
SB2	۲۳/۱۹	۹/۱۰	۱۴/۰۹
SB3	۲۹/۲۴	۶/۰۲	۲۳/۲۲
SB4	۲۶/۳۶	۶/۰۱	۲۰/۳۵
WB	۳۲/۸۲	۱۱/۰۴	۲۱/۷۹
Ni-P	۴۸/۰۳	۱۶/۰۴	۳۱/۹۹
Ni-P-BN	۵۵/۹۰	۲۰/۹۷	۳۴/۹۳
K-S1	۲۷/۰۶	۱۱/۰۰	۱۶/۰۶
K-S2	۲۶/۲۴	۷/۴۸	۱۸/۷۶

۶. مقایسه

براساس داده‌های جدول (۴)، در روش وو:

- مؤلفه پخشی انرژی سطح برای همه سطوح روکش شده، جز دو سطح Ni-P و Ni-P-BN به میزان (۲۱ تا ۴۳) درصد برای سطوح مختلف، در مقایسه با سطح اصلاح نشده، کاهش می‌یابد.
- مؤلفه قطبی انرژی سطح برای همه سطوح روکش شده در مقایسه با سطح اصلاح نشده افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد برخی سطوح روکش شده مانند Ni-P، WB و Ni-P-BN تا ۳/۵ برابر سطح اصلاح نشده است.
- مقادیر انرژی سطح نیز برای بیشتر سطوح اصلاح شده در مقایسه با سطح AISI 304 BA، بین (۹ تا ۲۳) درصد کاهش یافته است.

براساس داده‌های جدول (۵)، در روش OWRK:

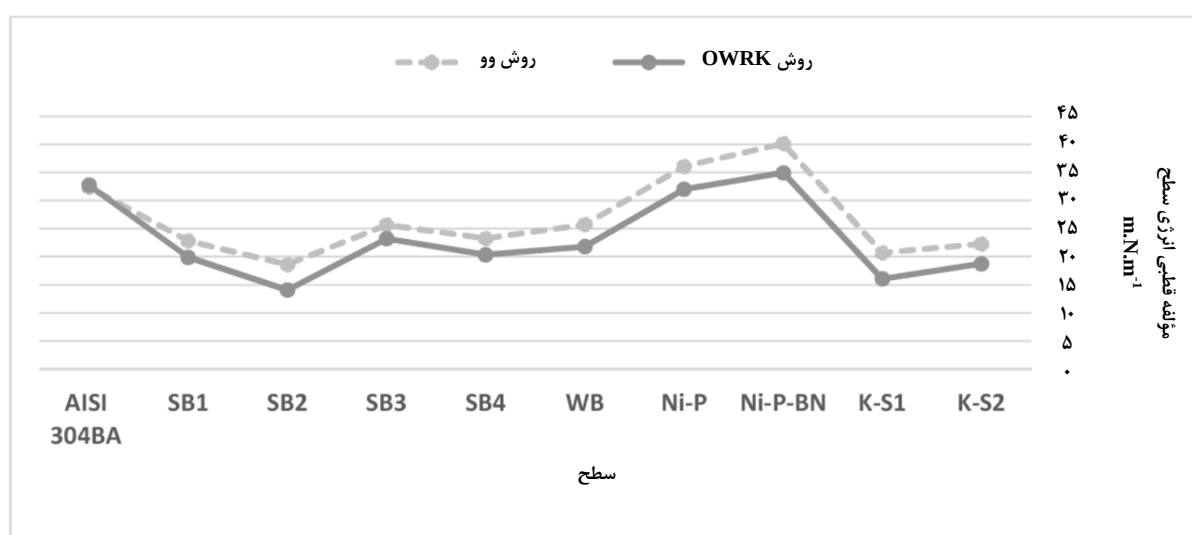
- مؤلفه پخشی انرژی سطح برای همه سطوح روکش شده، جز سطح Ni-P-BN، به میزان (۲ تا ۵۷) درصد برای سطوح مختلف در مقایسه با سطح اصلاح نشده کاهش می‌یابد.
- در حالی که مؤلفه قطبی انرژی سطح برای همه سطوح روکش شده در مقایسه با سطح اصلاح نشده افزایش می‌یابد. این افزایش در مورد برخی سطوح روکش شده مانند Ni-P، WB و Ni-P-BN، بین ۴/۵ تا ۸/۵ برابر سطح اصلاح نشده است.
- مقادیر انرژی سطح نیز برای بیشتر سطوح اصلاح شده در مقایسه با سطح AISI 304 BA، بین (۷ تا ۳۴) درصد کاهش یافته است.

علی‌رغم افزایش انرژی سطح برای سطوح اصلاح شده Ni-P و Ni-P-BN نسبت به سطح اصلاح نشده فولادی، طبق داده‌های تجربی جدول (۳)، دو سطح یادشده، زمان القای ابتدایی رسوب بالایی دارند و به بیان دیگر، بر اثر اصلاح کردن سطح فولاد ضد زنگ از طریق پوشش خارجی الکترولس، سطوح یادشده خاصیت ضد رسوب پیدا کرده‌اند. بنابراین، پارامتری جز انرژی سطح در کم شدن مقدار رسوب متبلور کلسیم سولفات تشکیل شده روی این سطوح تأثیر می‌گذارد.

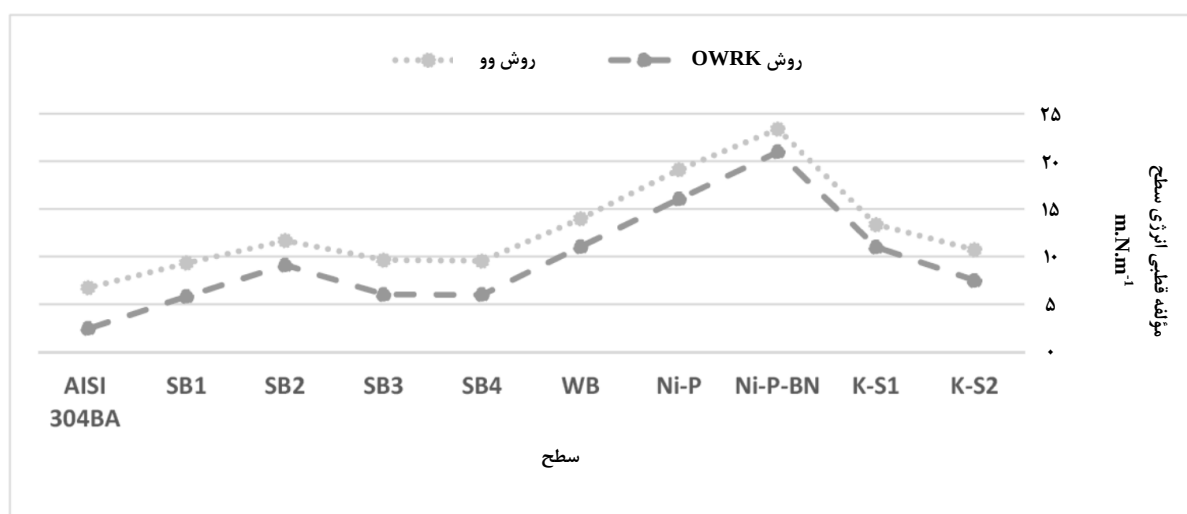
در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷)، روند تغییرات انرژی سطح و مؤلفه‌های آن با سطوح در دو روش وو و OWRK را مشاهده می‌کنید.

مشاهده می‌شود که اصلاح سطح به کاهش مؤلفه پخشی انرژی سطح نسبت به سطح اصلاح نشده می‌انجامد. مطابق شکل (۶)، اصلاح سطح موجب افزایش مؤلفه قطبی نسبت به سطح اصلاح نشده می‌شود. در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود که اصلاح سطح موجب کاهش انرژی سطوح اصلاح شده نسبت به سطح فولاد ضد زنگ خواهد شد. البته در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) استثنائاتی برای سطوح Ni-P-BN، Ni-P و WB وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

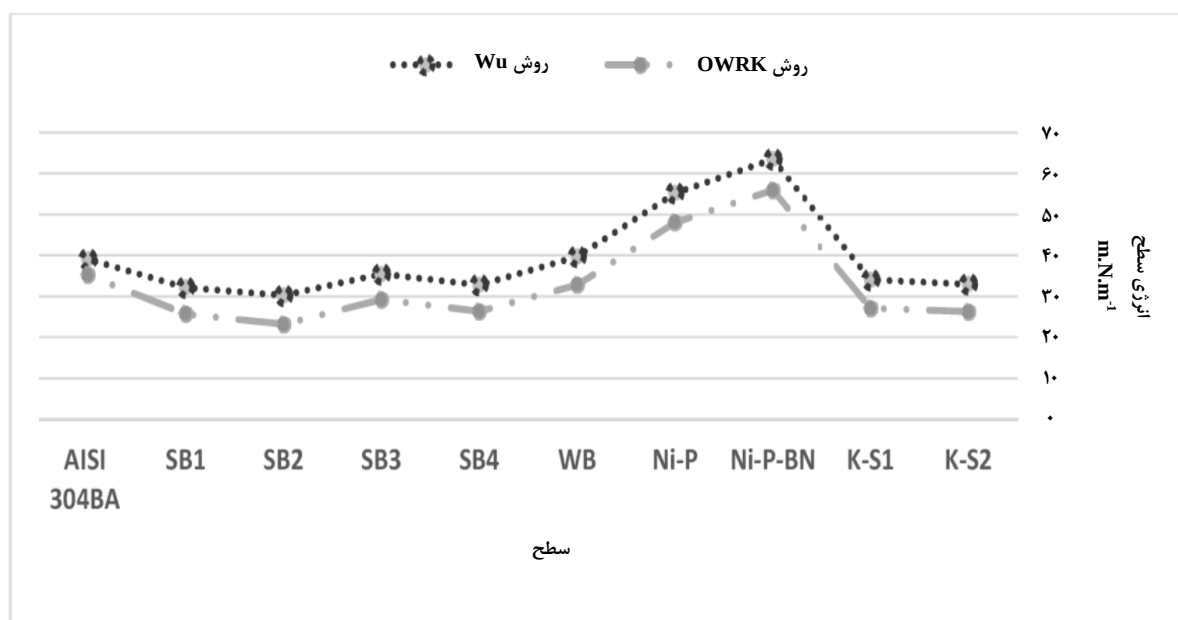
همان‌طور که پیداست، الگوی تغییرات انرژی سطح برای سطوح مختلف در روش وو، با روش OWRK یکسان است. باید گفت که روش OWRK مقادیر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن را برای کلیه سطوح از روش وو کمتر محاسبه می‌کند، که علت این امر بهره‌گیری از میانگین هندسی برای محاسبه خواص سطحی است. در حالی که روش وو از میانگین همساز برای محاسبه مقادیر مشابه بهره می‌برد. تأثیر اصلاح سطوح انتقال حرارت از طریق روکش کردن، خود را در تغییر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن نشان می‌دهد. در شکل (۵)



شکل ۵. مقایسه روند تغییرات مؤلفه پخشی انرژی سطح با سطوح در روش‌های وو و OWRK.



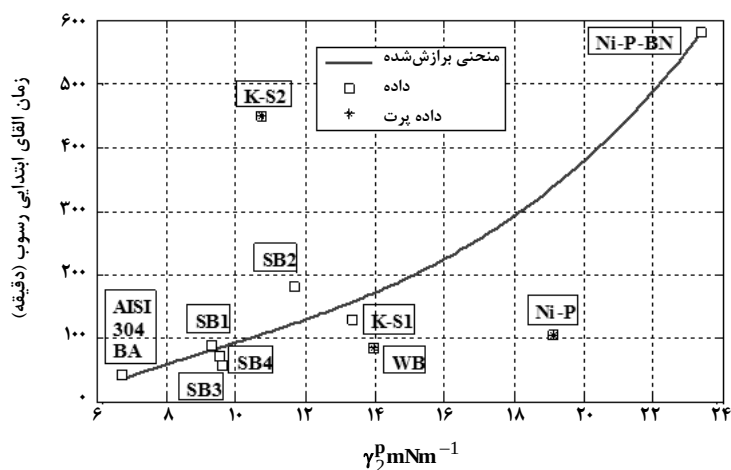
شکل ۶. مقایسه روند تغییرات مؤلفه قطبی انرژی سطح با سطوح در روش‌های وو و OWRK.



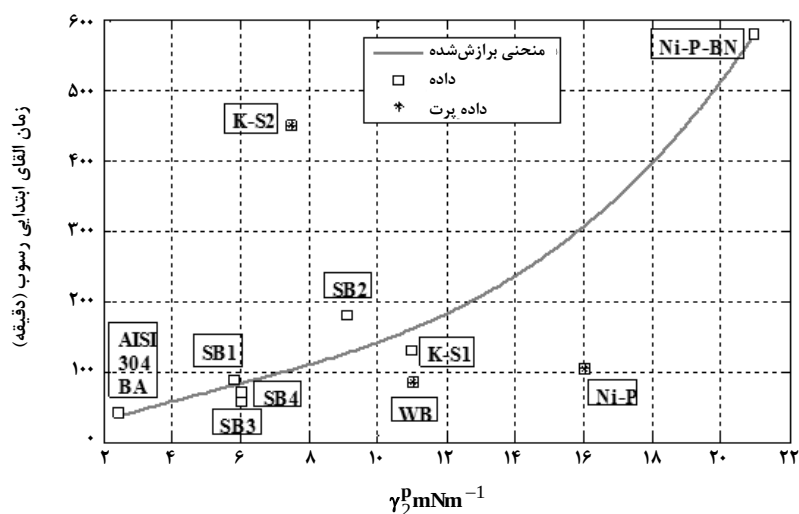
شکل ۷. مقایسه روند تغییرات انرژی سطح با سطوح در روش‌های وو و OWRK.

این عدم تطابق برای سطح اصلاح شده WB ناشی از کم بودن مقاومت این پوشش در برابر تنشهای مکانیکی و شیمیایی اعمال شده از محلول کلسیم سولفات است. از این قرار که پس از مدت زمان کوتاهی بخشی از پوشش از سطح کنده می‌شود و به این ترتیب قسمت کنده‌شده پوشش پایه آب از سطح، تبدیل به مکان هسته‌زایی شده و زمان القای ابتدایی و آهنگ اولیه رسوب را، به ترتیب، به نسبت روند ترسیمی در شکل‌های (۸) تا (۱۱) کاهش و افزایش می‌دهد. سطح اصلاح شده Ni-P با توجه به این که مؤلفه قطبی آن چند برابر سطح اصلاح نشده است اما عملکرد خوبی ندارد. سطوح اصلاح شده K-S2 و SB2 عملکرد بسیار خوبی بر خلاف سطح Ni-P از خود نشان می‌دهند. سطح اصلاح شده K-S2، زمان القای ابتدایی رسوب را به نسبت سطح اصلاح نشده ۱۰/۵ برابر می‌کند. سطوح K-S2 و SB2 آهنگ اولیه رسوب را، به ترتیب، ۳۸ و ۷۳ درصد به نسبت سطح اصلاح نشده کاهش می‌دهند در حالی که سطح Ni-P آهنگ اولیه رسوب را اصلاً پایین نمی‌آورد.

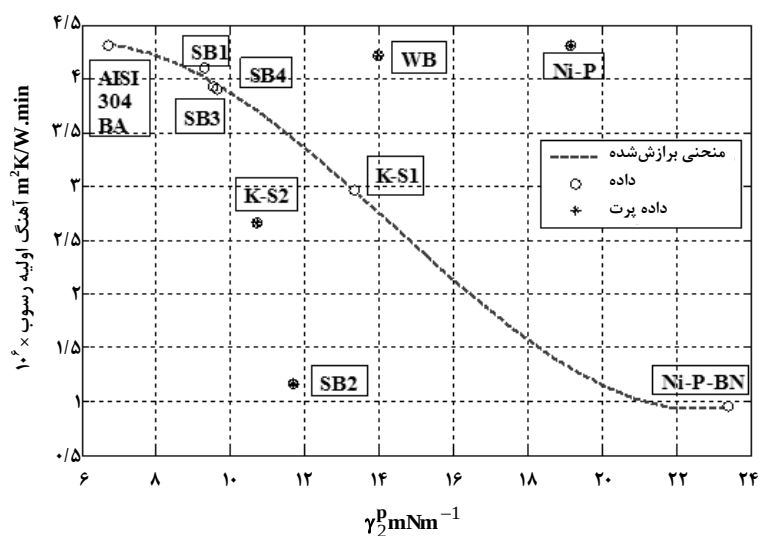
در شکل‌های (۸) و (۹)، اثر مؤلفه قطبی انرژی سطح بر زمان القای ابتدایی رسوب را مشاهده می‌کنید. در شکل (۸)، مؤلفه قطبی انرژی سطح از روش وو، و در شکل (۹)، این مؤلفه با روش OWRK محاسبه شده است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، اثر مؤلفه قطبی انرژی سطح انتقال حرارت بر آهنگ اولیه رسوب نشان داده شده است. در شکل (۱۰)، مؤلفه قطبی انرژی سطح از روش وو، و در شکل (۱۱)، این مؤلفه با روش OWRK محاسبه شده است. مطابق شکل‌های (۸) و (۹)، با افزایش مؤلفه قطبی انرژی سطح، زمان القای ابتدایی رسوب افزایش می‌یابد و مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آهنگ اولیه رسوب با افزایش این مؤلفه، کاهش می‌یابد. علت این موضوع تغییر در خواص سطحی همچون انرژی سطح و مؤلفه‌های آن است که بر اثر اصلاح سطوح پدید می‌آید. در حقیقت با افزایش مؤلفه قطبی انرژی سطح، سطح انتقال حرارت در برابر تشکیل رسوب متبلور کلسیم سولفات مقاوم تر می‌شود. داده‌های پرت که در شکل‌های (۸) تا (۱۱) با نمادهای تو پر مشخص شده‌اند، سطوحی مشاهده می‌شوند که ویژگی‌های رسوب تشکیل شده روی آنها از روند ترسیمی در شکل‌های یادشده پیروی نمی‌کنند.



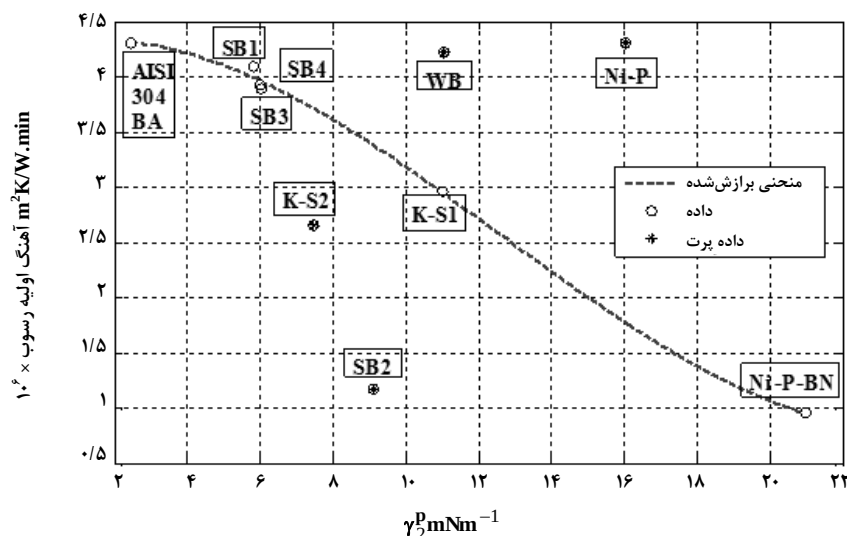
شکل ۸. زمان القای ابتدایی رسوب بر حسب مؤلفه قطبی انرژی سطح در روش وو.



شکل ۹. زمان القای ابتدایی رسوب بر حسب مؤلفه قطبی انرژی سطح در روش OWRK.



شکل ۱۰. آهنگ اولیه رسوب بر حسب مؤلفه قطبی انرژی سطح در روش وو.



شکل ۱۱. آهنک اولیه رسوب بر حسب مؤلفه قطبی انرژی سطح در روش OWRK.

۷. نتیجه گیری کلی

۱. با اصلاح سطوح انتقال حرارت از طریق روکش کردن آن‌ها سطوحی به دست می‌آیند که تمایل آن‌ها به تشکیل رسوب کمتر است. در این سطوح خواص سطحی همچون انرژی سطح و مؤلفه‌های آن در جهت کاهش مقدار رسوب تشکیل شده تغییر یافته است.

۲. با افزایش مؤلفه قطبی انرژی سطح، زمان القای ابتدایی رسوب و آهنک اولیه رسوب، به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابند. بنابراین با افزایش این مؤلفه انرژی سطح مقدار رسوب متبلور تشکیل شده روی سطوح انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

۳. پارامتر تأثیرگذار روی کم کردن رسوب تشکیل شده روی سطوح انتقال حرارت، نه انرژی سطح که مؤلفه قطبی آن است.

فهرست علائم

G انرژی آزاد گیبس

P فشار

T دما

نمادهای یونانی

θ زاویه تماس

γ_{12} انرژی بر هم کنش جامد-مایع

γ_2 انرژی آزاد سطح	$m.N.m^{-1}$
γ_2^d مؤلفه پخشی انرژی سطح	$m.N.m^{-1}$
γ_2^p مؤلفه قطبی انرژی سطح	$m.N.m^{-1}$
γ_3 انرژی بر هم کنش مایع-بخار (کشش سطحی مایع)	$m.N.m^{-1}$
γ_3^d مؤلفه پخشی کشش سطحی	$m.N.m^{-1}$
γ_3^p مؤلفه قطبی کشش سطحی	$m.N.m^{-1}$

روکش‌های مورد استفاده برای اصلاح کردن سطوح

روکش‌های حلال پایه	Solvent Based coatings (SB)
روکش‌های آب پایه	Water Based coatings (WB)
	Nickel-Phosphorous coating (Ni-P)
روکش الکترولس نیکل-فسفر	Nickel-Phosphorous Boron Nitride coating (Ni-P-BN)
روکش الکترولس نیکل-فسفر-نیتريد بور	
روکش نانو ساختار	Nano - Structure coating (K-S)

مراجع

- [1] Malayeri, M. R., Al-Janabi, A., Müller-Steinhagen, H., "Application of nano-modified surfaces for fouling mitigation", International journal of energy research, 33, 1101-1113, (2009).
- [2] Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., "Heat exchanger fouling-mitigation and cleaning strategies", Heat transfer engineering, 32, 189-196, (2011).

- [3] Al-Janabi, A., "Convective heat transfer fouling of aqueous solutions on modified surfaces", PhD Dissertation, university of Stuttgart, Germany, (2011).
- [4] Zettler, H. U., Wei, M., Zhao, Q., Müller-Steinhagen, H., "Influence of surface properties and characteristics on fouling in plate heat exchangers", Heat transfer engineering, 26, 3-17, (2005).
- [5] Al-Janabi, A., Malayeri, M. R., "A criterion for the characterization of modified surfaces during crystallization fouling based on electron donor component of surface energy", Chemical engineering research and design, 100, 212-227, (2015).
- [6] Förster, M., Bohnet, M., "Modification of molecular interactions at the interface crystal/heat transfer surface to minimize heat exchanger fouling", International journal of thermal science, 39, 697-708, (2000).
- [7] Zhao, Q., Wang, C., Liu, Y., Wang, S., "Bacterial adhesion on the metal-polymer composite coatings", International Journal of Adhesion & Adhesives, 27, 85-91, (2007).
- [8] Jańczuk, B., Bia-opotrowicz, T., Wojcik, W., "The components of surface tension of liquids and their usefulness in determinations of surface free energy of solids", Journal of colloid and interface science, 127, 59-66, (1989).