

# مطالعه اثر خواص سطحی بر شدت تشکیل رسوب روی سطوح اصلاح شده

امیرحسین نیکو<sup>۱</sup>، محمدرضا ملایری<sup>\*۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۳

پیام‌نگار: malayeri@shirazu.ac.ir

## چکیده

در میان روش‌های مختلف کاهش رسوب، اصلاح سطح یکی از روش‌های نو، سازگار با محیط زیست و کارآمد به‌شمار می‌رود. در این روش، با بهره‌گیری از پوشش‌های مختلف، سطح انتقال حرارت روکش می‌شود که در نتیجه این کار، بر هم‌کنش‌های بین رسوب و سطح اصلاح و قدرت چسبندگی رسوب به سطح کاهش می‌یابد. بنابراین سطح با رسوب خیس نمی‌شود و به این ترتیب از شدت تشکیل رسوب کاسته می‌شود. در مطالعات مختلفی به بررسی اثر خواص سطحی بر پارامترهای کمی رسوب پرداخته شده است. در این مقاله به مروری جامع درباره‌ی اثر پارامترهای انرژی سطح بر سازوکارهای رسوب در مطالعات مختلف می‌پردازیم. پژوهش‌های گوناگون انجام شده در گذشته در خصوص اثر انرژی و خواص سطح بر تشکیل رسوب، گاه به گزارش نتایج متناقضی انجامیده‌اند که در این مطالعه به تحلیل آنها پرداخته‌ایم. در پایان، مطالعات این مقاله نشان می‌دهد که فقدان یک پارامتر کلی و مؤثر، تابع خواص انرژی سطح که بتواند بر کاهش رسوب تأثیر بگذارد، به شدت حس می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** اصلاح سطح، خواص سطحی، انرژی سطح، انرژی‌های بر هم‌کنش بین مولکولی، پارامترهای کمی رسوب.

## ۱. مقدمه

به کار گرفته می‌شوند. به علت خواص سیالات مختلف در تماس با سطوح مبدل‌های حرارتی، این تجهیزات همواره در معرض رسوب گرفتگی‌اند [۱].

تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی سبب بروز مشکلاتی در شرایط عملیاتی و بازده این دستگاه‌ها می‌شود. با تشکیل رسوب بر روی سطوح، انتقال حرارت به دلیل کاهش سطح مقطع جریان، و افت فشار، افزایش می‌یابد [۲]. افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای، کاهش

رسوب، به طور کلی، به انباشت و چسبیدن مواد ناخواسته بر سطح تجهیزات فرایندی گفته می‌شود که این خود می‌تواند قابلیت سطح را برای انتقال حرارت تحت شرایط دمایی طراحی شده، دستخوش تغییرات جدی کند. مبدل‌های حرارتی در صنایع شیمیایی متنوع به منظور تبادل حرارت بین سیالات مختلف به طور گسترده

\* شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی

روش‌های کاهش رسوب امکان پذیر نیست [۳]. البته، مخاطرات زیست محیطی مصرف مواد شیمیایی مختلف از چالش‌های پیش روی این روش است. در ادامه، روش‌های روز دنیا در مقابله با کاهش رسوب به صورت اجمالی بررسی می‌شوند.

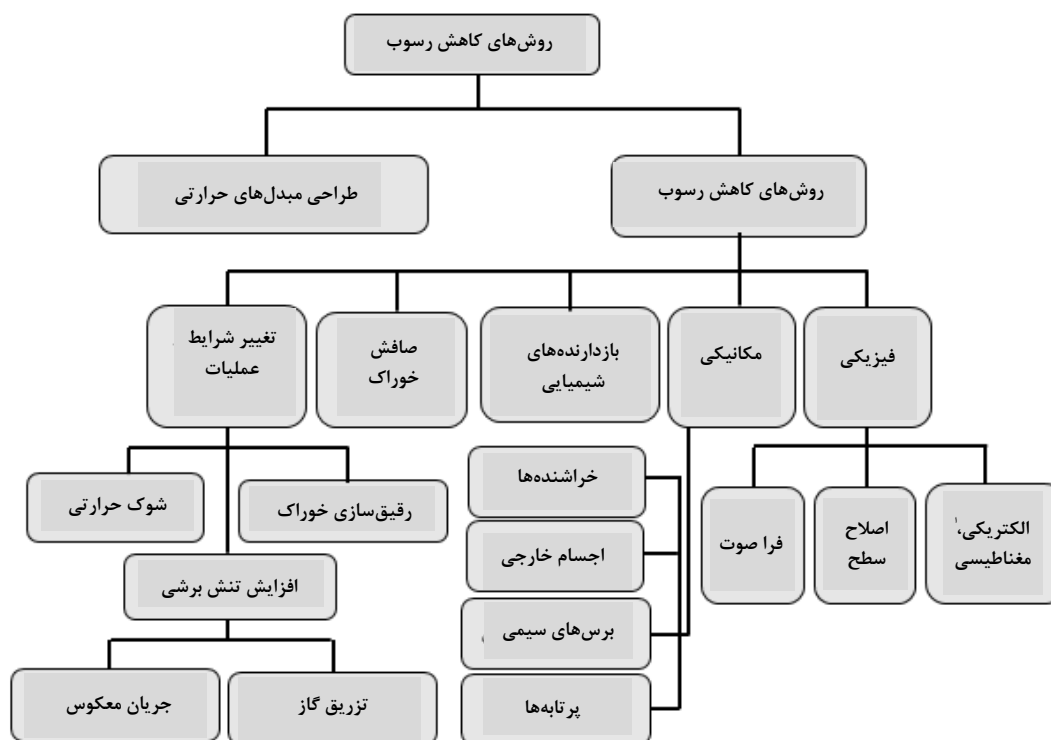
یکی دیگر از روش‌های کاهش رسوب، روش مکانیکی است. تمرکز روش‌های مکانیکی کاهش رسوب، بیشتر بر زدودن رسوب از سطح انتقال حرارت است. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از پرتابه‌ها<sup>۱</sup>، خراشنده‌ها<sup>۲</sup>، کاربرد اجسام خارجی مانند فنرها<sup>۳</sup> و یا برس‌های سیمی<sup>۴</sup> اشاره کرد [۳]. از دیگر روش‌های کاهش رسوب، صافش خوراک به منظور جمع‌آوری هر گونه ذرات معلق موجود در سیال در تماس با سطح است، زیرا این ذرات قابلیت نشست بر روی سطح انتقال حرارت و تشکیل سازوکار رسوب ذره‌ای را دارند. همچنین، تغییر شرایط عملیاتی، یکی دیگر از روش‌های کاهش رسوب به‌شمار می‌آید که در این روش برای کاهش میزان رسوب تشکیل شده از روش‌های اعمال شوک حرارتی، افزایش تنش برشی و رقیق‌سازی خوراک استفاده می‌شود.

بازده حرارتی ناشی از افت ضریب کلی انتقال حرارت، و در پی آن پایین آمدن تعداد واحدهای انتقال، و نیز توزیع نامناسب جریان در مبدل‌های حرارتی، از دیگر آثار تشکیل رسوب به‌شمار می‌روند [۱].

از دیگر آثار ناشی از تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی می‌توان افزایش دمای سیال گرم، کاهش دمای سیال سرد و افزایش مصرف آب خنک‌کننده را برشمرد. از منظر اقتصادی، پیامد تشکیل رسوب، تحمیل هزینه‌های گزاف بر صنایع است. هزینه عملیاتی مبارزه با تشکیل رسوب در صنعت، به تنهایی، سالیانه بالغ بر ۶۰ میلیارد دلار آمریکاست [۳]. به همین جهت روش‌های گوناگونی برای مقابله با رسوب تشکیل شده روی سطوح و کاهش شدت آن به سرعت گسترش یافته‌اند.

در شکل (۱) در نمایی کلی روش‌های کاهش تشکیل رسوب را مشاهده می‌کنید.

استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی یکی از روش‌های سنتی کاهش رسوب به‌شمار می‌رود. این روش، بخصوص برای مبدل‌هایی حرارتی مفید است که دسترسی به نقاط مختلف آن برای اعمال سایر



شکل ۱. روش‌های کلی کاهش رسوب.

سایر روش‌ها در اختیار می‌گذارد، برتر است و از این رو در محاسبات بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از جمله دیگر خواص سطحی مهم در چسبندگی رسوب به سطح انتقال حرارت، انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی‌اند. در نظریه توسعه یافته (دی ال وی ا<sup>۱</sup>)، چهار انرژی برهم‌کنش بین مولکولی  $\Delta E_{132}^{LW}$ ،  $\Delta E_{132}^{AB}$ ،  $\Delta E_{132}^{EL}$  و  $\Delta E^{Br}$  در نظر گرفته شده است. در ادامه، انرژی‌های برهم‌کنش  $\Delta E_{132}^{EL}$ ،  $\Delta E_{132}^{AB}$  و  $\Delta E^{Br}$  به این دلیل که کمتر شناخته شده‌اند، به اختصار توضیح داده می‌شوند.

انرژی الکتروستاتیکی دو لایه‌ای ( $\Delta E_{132}^{EL}$ ): وقتی سطح جامدی در تماس با محلول الکترولیت قرار می‌گیرد، به واسطه یونش<sup>۲</sup>، تفکیک گروه‌های سطحی و یا جذب سطحی یون‌ها از محلول، به کسب بار الکتریکی سطحی گرایش دارد [۶]. این موضوع یک ابر یونی ایجاد می‌کند که تا درون محلول امتداد می‌یابد و به آن لایه الکتریکی دوگانه<sup>۳</sup> گفته می‌شود. لایه الکتریکی دوگانه را می‌توان به دو لایه تقسیم کرد.

۱. یک لایه ساکن که به آن لایه اشترن<sup>۴</sup> یا هلمهولتز<sup>۵</sup> گفته می‌شود. یون‌های این لایه با سطح پیوند محکمی برقرار می‌کنند.

۲. یک لایه نفوذ، شامل یون‌های آزاد که می‌توانند تحت تأثیر اختلاف پتانسیل الکتریکی بین توده سیال و سطح جامد حرکت کنند [۷].

از برهم‌کنش بین این ابرهای یونی، بر هم کنش‌های الکتروستاتیکی بلند- دامنه<sup>۶</sup> برقرار می‌شوند که بسته به مشابهت یا عدم مشابهت بار سطوح برهم‌کنش‌کننده، می‌توانند ربایشی یا رانشی باشند.

انرژی برهم‌کنش اسید- باز لوویس ( $\Delta E_{132}^{AB}$ ): هنگامی که یک سطح دارای ظرفیت تبادل الکترون در آب قرار می‌گیرد (آب ظرفیت بالایی برای تبادل الکترون دارد) یک برهم‌کنش اسید- باز قوی رخ می‌دهد [۸]. بنابراین، انرژی برهم‌کنش اسید- باز لوویس خاصیتی قطبی دارد و می‌تواند نیروی ربایشی یا رانشی داشته باشد [۹].

حرکت براونی ( $\Delta E^{Br}$ ): این حرکت نوعی حرکت تصادفی ذرات معلق درون سیال است. حرکت براونی از برخورد سریع اتم‌ها و

یکی از روش‌های فیزیکی کاهش رسوب، عبارت است از اصلاح سطوح انتقال حرارت. امروزه اصلاح سطوح انتقال حرارت به عنوان روشی جدید، به روز، مؤثر و سازگار با محیط زیست برای کاهش تشکیل رسوب بر روی مبدل‌های حرارتی مورد توجه فراوان است. در روش اصلاح سطح، برخلاف روش‌های شیمیایی، میزان مصرف مواد شیمیایی خطرناک برای محیط زیست به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. در این روش، اصلاح بر هم کنش‌های بین رسوب و سطح انتقال حرارت به منظور کم کردن نیرو و قدرت چسبندگی رسوب به سطح به کمک روکش کردن سطح انجام می‌شود [۴]. گزینه نخست برای مقابله با تشکیل رسوب در ایران، استفاده از مواد شیمیایی ضد رسوب است که متأسفانه به دلیل فقدان قوانین سخت‌گیرانه زیست محیطی، استفاده از آنها بسیار گسترده است. در ادامه روش اصلاح سطح به طور جامع بررسی می‌شود.

## ۲. مفهوم اصلاح سطح

منظور از اصلاح سطح، در واقع عبارت است از تغییر خواص و مشخصه‌های سطحی به گونه‌ای که به کاهش مقدار رسوب تشکیل شده انجامد. به بیان دیگر، خواص سطحی سطوح انتقال حرارت نقش مهمی در چسبندگی رسوب به سطح بازی می‌کنند و در تشکیل شدن و یا نشدن رسوب روی سطح تأثیر بسزایی دارند. خصوصیات سطحی تأثیرگذار بر شدت تشکیل رسوب در روش اصلاح سطح به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- انرژی آزاد سطح و مؤلفه‌های آن

- انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی

انرژی بیشتر مولکول‌های سطحی سطح انتقال حرارت در مقایسه با مولکول‌های درونی، به سبب جذب شدن کمتر که از آن با عنوان انرژی آزاد سطح تعبیر می‌شود، به دلیل این که تمایل به جذب رسوب را افزایش می‌دهد، عاملی اساسی در تشکیل رسوب است [۵]. برای محاسبه این خصوصیت سطحی مهم، نظریه‌های گوناگونی پرداخته شده که در هر یک از آنها برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن به اطلاعات کشش سطحی و زوایای تماس مایعات آزمون بر روی سطوح نیاز است. در جدول (۱) شرح نظریه‌های مختلف محاسبه انرژی سطح درج شده است. از میان نظریه‌های مندرج در جدول (۱)، نظریه اسید- باز لوویس، به این علت که اطلاعات بیشتری در زمینه مؤلفه‌های انرژی سطح در مقایسه با

1. DLVO  
2. Ionization  
3. Electric Double Layer  
4. Stern  
5. Helmholtz Layer  
6. Long- Range

مولکولها در سیال ناشی می‌شود. در رسوب، این حرکت می‌تواند ذرات رسوب را در تماس با سطح قرار دهد و به این ترتیب بر هم کنشی بین رسوب و سطح ایجاد شود.

در جدول (۲)، روابط محاسبه انرژی‌های برهم‌کنش را به اختصار درج کرده‌ایم.

جدول ۱. نظریه‌های محاسبه مقادیر انرژی سطح.

انرژی آزاد سطح $\gamma_2$			
$\gamma_2 = \gamma_2^d + \gamma_2^p + \gamma_2^{LW} + \gamma_2^{AB}$ $\gamma_2^{AB} = 2\sqrt{\gamma_2^+ \gamma_2^-}$			
نظریه‌های محاسبه (سال)	رابطه ریاضی	توضیح	مؤلفه‌های انرژی سطح
زیسمن <sup>۱</sup> ، (۱۹۵۰-۱۹۶۴) [۱۰]	---	تخمین نموداری	---
فوکس <sup>۲</sup> ، (۱۹۶۴) [۱۱]	$\cos \theta = 2 \frac{\sqrt{\gamma_2^d \gamma_3^d}}{\gamma_3} - 1$	تنها مؤلفه پخشی برای انرژی سطح لحاظ می‌شود.	$\gamma_2^d$
(اُ دلبلیو آر ک) <sup>۳</sup> ، (۱۹۶۹) [۱۲]	$\gamma_3(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_2^d \gamma_3^d} + 2\sqrt{\gamma_2^p \gamma_3^p}$	محاسبات بر مبنای میانگین هندسی صورت می‌گیرد.	$\gamma_2^p$ و $\gamma_2^d$
وو <sup>۴</sup> ، (۱۹۷۳ و ۱۹۷۱) [۱۳ و ۱۴]	$\gamma_3(1 + \cos \theta) = \frac{4\gamma_2^d \gamma_3^d}{\gamma_2^d + \gamma_3^d} + \frac{4\gamma_2^p \gamma_3^p}{\gamma_2^p + \gamma_3^p}$	محاسبات بر مبنای میانگین همساز صورت می‌گیرد.	$\gamma_2^p$ و $\gamma_2^d$
معادله حالت، (۱۹۷۴) [۱۵]	$\gamma_3(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_2 \gamma_3} \left( e^{-C_0(\gamma_3 - \gamma_2)^2} \right)$	هیچ گونه مؤلفه‌ای برای انرژی سطح لحاظ نمی‌شود.	---
اسید- باز لوویس، (۱۹۸۸ و ۱۹۸۷) [۱۶ و ۱۷]	$\gamma_3(1 + \cos \theta) = 2 \left( \sqrt{\gamma_2^{LW} \gamma_3^{LW}} + \sqrt{\gamma_2^- \gamma_3^+} + \sqrt{\gamma_2^+ \gamma_3^-} \right)$	بهترین روش برای محاسبه انرژی سطح است چون اطلاعات زیادتری از مؤلفه‌های انرژی سطح در مقایسه با $\gamma_2^-$ دیگر روش‌ها در اختیار می‌گذارد.	$\gamma_2^+$ و $\gamma_2^{LW}$ و $\gamma_2^-$

1. Zisman
2. Fowkes
3. OWRK
4. Wu

جدول ۲. انرژی برهم‌کنش بین مولکولی کل،  $\Delta E_{132}^{Tot}$ .

درژاگوین <sup>۱</sup> و لاندو <sup>۲</sup> [۱۸] و روی <sup>۳</sup> و اوربیک <sup>۴</sup> [۱۹]	نظریه (دی ال وی اُ) $\Delta E_{132}^{Tot} = \Delta E_{132}^{LW} + \Delta E_{132}^{EL}$
ون اس <sup>۵</sup> [۹] نظریه یادشده را با در نظر گرفتن انرژی‌های برهم‌کنش $\Delta E_{132}^{AB}$ و $\Delta E^{Br}$ بسط داد.	نظریه تعمیم یافته (دی ال وی اُ) $\Delta E_{132}^{Tot} = \Delta E_{132}^{LW} + \Delta E_{132}^{EL} + \Delta E_{132}^{AB} + \Delta E^{Br}$
رابطه ریاضی	انرژی برهم‌کنش بین مولکولی
$\Delta E_{132}^{LW} = \frac{-4\pi H_o^2 R}{H} \left( \sqrt{\gamma_1^{LW}} - \sqrt{\gamma_3^{LW}} \right) \left( \sqrt{\gamma_2^{LW}} - \sqrt{\gamma_3^{LW}} \right)$	انرژی برهم‌کنش لیفشیتز- وندروالس <sup>۶</sup> ( $\Delta E_{132}^{LW}$ )
$\Delta E_{132}^{EL} = \pi \epsilon R (\zeta_1^2 + \zeta_2^2) \times \left[ \frac{2\zeta_1 \zeta_2}{\zeta_1^2 + \zeta_2^2} \ln \frac{1 + \exp(-\kappa H)}{1 - \exp(-\kappa H)} + \ln \{1 - \exp(-2\kappa H)\} \right]$	انرژی برهم‌کنش الکتروستاتیکی دو لایه‌ای ( $\Delta E_{132}^{EL}$ )
$\Delta E_{132}^{AB} = 2\pi R \lambda \Delta E_{132(H_o)}^{AB} \exp\left(\frac{H_o - H}{\lambda}\right)$ $\Delta E_{132(H_o)}^{AB} = 2 \left( \begin{array}{l} \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_3^-} + \sqrt{\gamma_2^+ \gamma_3^-} - \sqrt{\gamma_3^+ \gamma_3^-} + \\ \sqrt{\gamma_1^- \gamma_3^+} + \sqrt{\gamma_2^- \gamma_3^+} - \sqrt{\gamma_3^- \gamma_3^+} - \\ \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+} \end{array} \right)$	انرژی برهم‌کنش اسید- باز لوویس ( $\Delta E_{132}^{AB}$ )
$\Delta E^{Br} = 1k_B T_b$	حرکت براونی ( $\Delta E^{Br}$ )

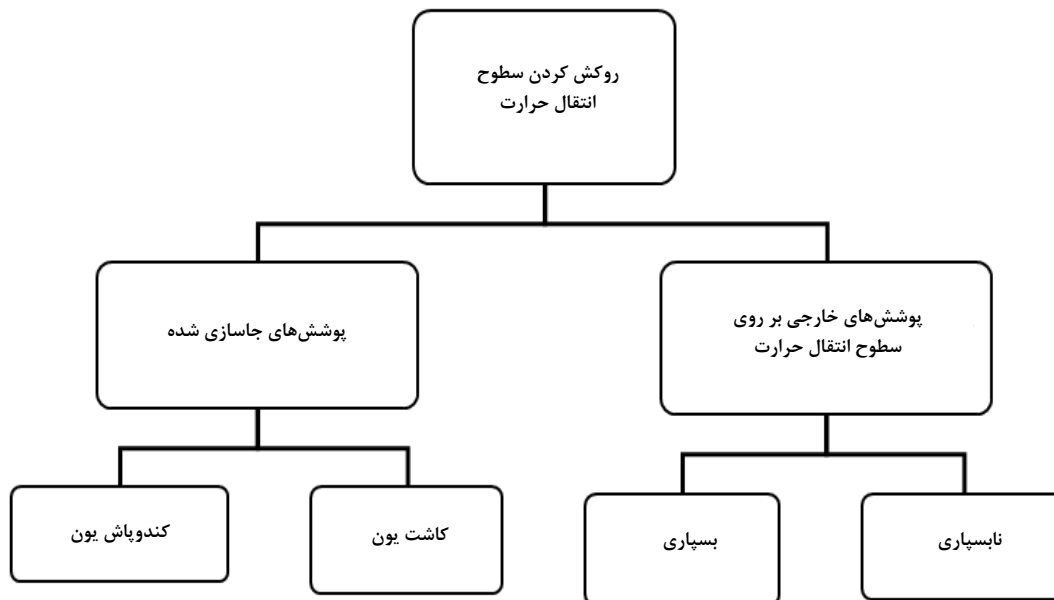
## ۲-۱ اصلاح سطح بر مبنای تغییر انرژی سطح

ژائو<sup>۷</sup> و همکاران [۲۰] انرژی سطح را یکی از معیارهای مستقیم نیروهای ربایشی سطحی دانسته‌اند. از این رو، اصلاح خواص سطحی همچون انرژی سطح و مؤلفه‌های آن می‌تواند انرژی مولکول‌های سطحی را کاهش دهد و به این ترتیب از تمایل سطح انتقال حرارت به ربایش رسوب بکاهد. البته باید گفت که روش اصلاح سطح، اصلاح هندسه و بافت سطح انتقال حرارت را نیز شامل می‌شود که این موضوع از حوصله این بحث خارج است.

## ۲-۱-۱ تغییر انرژی سطح از طریق روکش کردن

پیشتر گفتیم که در روش اصلاح سطح انتقال گرما به منظور کم کردن نیرو و قدرت چسبندگی رسوب به سطح و در پی آن کاستن از شدت تشکیل رسوب، خصوصیات سطحی همچون انرژی سطح، مؤلفه‌های آن و نیز انرژی‌های برهم‌کنش اصلاح می‌شوند. روکش کردن سطوح انتقال حرارت که یکی از روش‌های فیزیکی کاهش رسوب به‌شمار می‌رود، به عنوان روشی مؤثر برای اصلاح خواص این سطوح به‌شمار می‌آید. در شکل (۲) روش‌های کلی روکش کردن سطوح انتقال حرارت را مشاهده می‌کنید.

1. Derjaguin
2. Landau
3. Verwey
4. Overbeek
5. Van Oss
6. Lifshitz- Van Der Waals
7. Zhao



شکل ۲. روش‌های کلی روکش کردن سطوح.

پرداخته می‌شود. در شکل (۳) روند طی شده در مطالعات مختلف برای بررسی اثر خواص سطحی بر مقادیر کمی رسوب مشاهده می‌شود. باید گفت که در سازوکار رسوب تبلوری، آهنگ اولیه رسوب، مدت زمان القای ابتدایی رسوب و آهنگ رشد بلور و در رسوب زیستی، تعداد باکتری‌های چسبیده به سطح انتقال حرارت، پارامترهای کمی رسوب به‌شمار می‌آیند.

مطابق شکل (۳)، روند کلی طی شده در مطالعات مختلف برای بررسی اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب از این قرار است.

ابتدا، سطح انتقال حرارت پایه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات عموماً این سطح از جنس فولاد ضد زنگ است. سپس، سطح یادشده با روش‌های مختلفی که در شکل (۲) کلیات آن نشان داده شد، روکش و در حقیقت اصلاح می‌شود. بعد از این مرحله، مقادیر انرژی سطح و مؤلفه‌های آن و نیز مقادیر انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی به عنوان خصوصیات مهم و مؤثر در روش اصلاح سطح انتقال حرارت، به کمک نظریه‌های توضیح داده شده در بخش‌های قبل برای سطوح اصلاح شده و نیز سطح اصلاح نشده محاسبه می‌شوند. سپس سطوح یادشده یک به یک در دستگاه آزمایشگاهی

در روش استفاده از پوشش‌های خارجی از لایه‌ای بر روی سطح به عنوان روکش استفاده می‌کنند. پوشش‌های خارجی را می‌توان به دو دسته کلی بسیاری و نابسیاری تقسیم کرد. روکش‌های نابسیاری خود به انواع مختلفی مانند آب پایه، الکترولس و نانوساختار تقسیم می‌شوند [۲۱]. گاهی نیز به منظور بالا بردن رسانایی گرمایی روکش و بهبود شرایط انتقال حرارت، فلز در ماتریس روکش اضافه می‌شود. در روش پوشش‌های جاسازی شده<sup>۱</sup>، روکش به صورت ذره (یون) روی سطح انتقال حرارت نشانده می‌شود. در این روش، یون‌های مختلفی مانند  $H^+$ ،  $F^+$ ،  $Si^+$  و  $F^+Si^+$  یا ترکیب آنها برای روکش کردن سطح انتقال حرارت به کار گرفته می‌شوند [۲۲]. در روش پوشش‌های جاسازی شده، یون‌های مورد نظر برای روکش کردن سطح را با دستگاه‌های خاصی چون وان دو گراف به سمت سطح انتقال حرارت پرتاب می‌کنند [۲۳].

### ۳. اثر پارامترهای انرژی سطحی بر سازوکارهای رسوب

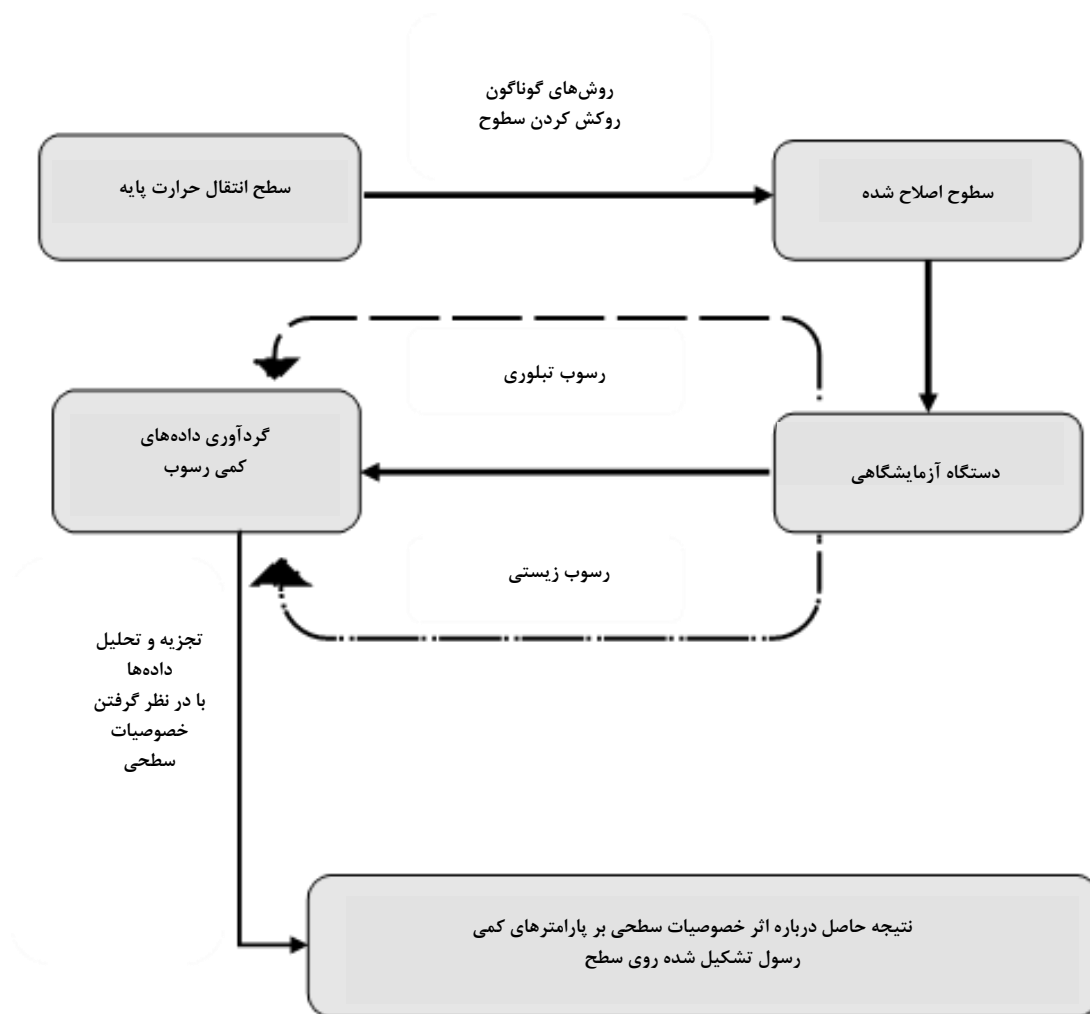
در این بخش، به مطالعات انجام شده درباره رسوب تشکیل شده روی سطوح اصلاح شده در سازوکارهای مختلف رسوب به اختصار

1. Embedded Coatings

## ۳-۱ تحلیل نظری نتایج مطالعات

در نتایج جدول (۳)، گاه نتایج متناقضی درباره اثر پارامترهای انرژی سطح بر مقادیر کمی رسوب مشاهده می‌شود. در شکل (۴) عوامل تأثیرگذار بر تناقض به وجود آمده در نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای انرژی سطح بر داده‌های کمی رسوب را مشاهده می‌کنید.

ساخته شده به منظور بررسی رسوب تشکیل شده روی سطوح مختلف، قرار داده می‌شوند. در این مرحله آزمایش تشکیل رسوب در سازوکارهای مختلف رسوب، همچون رسوب تبلوری کلسیم سولفات، کلسیم کربنات، آلومینیم سیلیکات و رسوب زیستی انواع باکتری‌ها و ریزاندامگان‌ها انجام می‌شود. با گردآوری داده‌های کمی رسوب و تجزیه و تحلیل اثر خصوصیات سطحی محاسبه شده بر آن‌ها، نتایج اثر انرژی سطح و انرژی‌های برهم‌کنش بر مقادیر پارامترهای رسوب حاصل می‌شود. در جدول (۳) خلاصه مطالعات انجام شده در این زمینه را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳. روند کلی طی شده در مطالعات برای بررسی اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

جدول ۳. خلاصه مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

مطالعه	محلول	روش انتقال حرارت	سطح	نتایج
مولر اشتاین هاگن و ژائو <sup>۱</sup> (۱۹۹۷) [۲۳]	CaSO <sub>4</sub>	جوشش استخری	سطوح ایمپلنت با یون SiF <sub>3</sub> <sup>+</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ضریب نهایی انتقال حرارت حدود ۱/۵ تا ۳ برابر همین مقدار برای سطح اصلاح‌نشده فولاد ضد زنگ است.</li> <li>رسوب تشکیل شده روی سطح اصلاح شده متخلخل، در حالی که رسوب تشکیل شده روی سطح اصلاح نشده منسجم و متراکم است.</li> </ul>
وو و نانکولاس <sup>۲</sup> (۱۹۹۸) [۲۴]	کلسیم فسفات	انتقال حرارت همرفتی	TiO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>انرژی برهم‌کنش اسید-باز لوویس، <math>\Delta E_{132}^{AB}</math>، نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در هسته‌زایی محللول کلسیم فسفات بازی می‌کند.</li> </ul>
بورنهورست <sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۹) [۲۵]	CaSO <sub>4</sub>	جوشش استخری	سطوح جاسازی شده با F, H, Si; ta-C و ta-C:F	<ul style="list-style-type: none"> <li>ضریب نهایی انتقال حرارت حدود ۲ تا ۳ برابر همین مقدار برای سطح اصلاح نشده فولاد ضد زنگ است.</li> <li>رسوب به راحتی از روی سطح اصلاح شده تمیز و کنده می‌شود.</li> </ul>
بوهنت و فورستر <sup>۴</sup> (۲۰۰۰) [۲۶]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	DLC, PTFE, Al, Cu, SS	<ul style="list-style-type: none"> <li>سطوح بسیاری برای مبدل‌های حرارتی در تماس با محللول نمک‌های آبی دارای حلالیت معکوس، مناسب نیستند.</li> </ul>
فورستر <sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۹۹) [۲۷]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	SS, DLC, PTFE, FEP, PFA, Cu, Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، و شدت رسوب از نقطه نظر مدت زمان القای ابتدایی رابطه مستقیمی برقرار نیست.</li> </ul>
فورستر (۲۰۰۱) [۲۸]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	DLC, PTFE, FEP, PFA, Al, Cu, SS	<ul style="list-style-type: none"> <li>سطوح بسیاری برای مبدل‌های حرارتی، معرض محللول‌های آبی نمکی با حلالیت معکوس، مناسب نیستند.</li> <li>بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، و رفتار رسوب از نقطه نظر مدت زمان القای ابتدایی رسوب رابطه‌ای برقرار نیست.</li> </ul>
ویسر <sup>۶</sup> (۲۰۰۱) [۲۹]	پروتئین آب پنیر و کلسیم فسفات	انتقال حرارت همرفتی	سطوح ایمپلنت، DLC, PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>انرژی برهم‌کنش اسید-باز لوویس، <math>\Delta E_{132}^{AB}</math>، سهم عمده‌ای در انرژی برهم‌کنش کل، <math>\Delta E_{132}^{Tot}</math>، دارد.</li> <li>افزایش <math>\gamma_2^-</math> سطح فولادی پارامتر مهمی در کاهش شدت رسوب به‌شمار می‌آید.</li> </ul>
ژائو و همکاران (۲۰۰۲) [۳۰]	CaSO <sub>4</sub>	جوشش جریان‌ی	Ni-P-PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>سطوح با سطح انرژی پایین این قابلیت را دارند که از شدت رسوب معدنی بکاهند.</li> </ul>

1. Müller-Steinhagen and Zhao  
 2. Wu and Nancollas  
 3. Bornhorst  
 4. Böhnet and Förster  
 5. Förster  
 6. Visser



(ادامه) جدول ۳. خلاصه مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

مطالعه	محلول	مدت انتقال حرارت	سطح	نتایج
سانتوس <sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۳) [۳۱]	پروتئین آب پنیر	انتقال حرارت همرفتی	سطوح جاسازی شده با $SiF_3^+$ , SS, $MoS_2^{2+}$ ; پوشش های DLC	<ul style="list-style-type: none"> <li>هیچ رابطه ساده‌ای بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، و میزان جذب سطحی پروتئین برقرار نیست.</li> <li>عملکرد سطوح بسپاری DLC در کاهش میزان جذب پروتئین از بقیه سطوح اصلاح شده مناسب تر است.</li> </ul>
آگوستین <sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۵) [۳۲]	$CaSO_4$	انتقال حرارت همرفتی	SS, DLC, SICAN, SICON, CrN, sol-gel	<ul style="list-style-type: none"> <li>رابطه مشخصی بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، و مدت زمان القای ابتدایی رسوب برقرار نیست.</li> <li>مدت زمان القای ابتدایی رسوب با در هم آمیختن روکش DLC با سیلیس می‌تواند تا 4 برابر افزایش یابد.</li> </ul>
رسمانینهو <sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۵) [۳۳]	کلسیم فسفات	انتقال حرارت همرفتی	$MoS_2^{2+}$ , $SiF_3^+$ , $SiO_x$ , DLC-Si-O, Ni-P-PTFE, سطوح پوشش داده شده با سیلیس	<ul style="list-style-type: none"> <li>سطوح با <math>\gamma_2^-</math> بالاتر نسبت به تشکیل رسوب کلسیم فسفات مستعدترند.</li> </ul>
لی یو و زائو <sup>۴</sup> (۲۰۰۵) [۳۴]	باکتری	انتقال حرارت همرفتی	Ni-P-PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>با کاهش مقدار انرژی سطح <math>\gamma_2</math>، انرژی برهم‌کنش کل، <math>\Delta E_{132}^{Tot}</math>، افزایش می‌یابد.</li> </ul>
زتلا <sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۵) [۲۲]	$CaSO_4$	انتقال حرارت همرفتی	سطوح جاسازی شده با: F, H, Si; DLC, PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، و رفتار رسوب رابطه‌ای برقرار نیست.</li> </ul>
زائو و همکاران (۲۰۰۵) [۳۵]	$CaSO_4$	جوشش استخری	Ni-Cu-P-PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>رسوب تشکیل شده روی فولاد ضد زنگ با انرژی سطح بالا (۳۹/۲ mN/m) یک ساختار متراکم را نشان می‌دهد در حالی که رسوب تشکیل شده روی سطح اصلاح شده Ni-Cu-P-PTFE با انرژی سطح (۲۶ mN/m) ساختار متخلخل و غیر متراکم دارد.</li> <li>انرژی سطح انتقال حرارت تأثیر قابل توجهی روی چسبندگی رسوب <math>CaSO_4</math> دارد.</li> <li>هنگامی که انرژی سطح سطوح روکش شده در بازه (۲۶-۳۰) mN/m باشد، کمترین مقدار چسبندگی اتفاق می‌افتد.</li> </ul>
آگوستین و همکاران (۲۰۰۷) [۳۶]	پروتئین آب پنیر	انتقال حرارت همرفتی	DLC (a-C:H), (a-C:H:F), (b-C:H:Si:O), Cu, Al	<ul style="list-style-type: none"> <li>با افزایش <math>\gamma_2^p</math> زمان القای ابتدایی رسوب افزایش می‌یابد.</li> </ul>

- Santos
- Augustin
- Rosmaninho
- Liu and Zhao
- Zettler

(ادامه) جدول ۳. خلاصه مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

مطالعه	محلول	مدت انتقال حرارت	سطح	نتایج
رسمانینهو (۲۰۰۷) [۳۷]	کلسیم فسفات	انتقال حرارت همرفتی	پوشش‌های جاسازی شده با TiN	<ul style="list-style-type: none"> <li>سطوح با <math>\gamma_2^-</math> بالا نسبت به واکنش کنترل یونی تمایل کمتری دارند.</li> <li>سطوح با <math>\gamma_2^-</math> بالا نسبت به چسبندگی رسوب به سطح انتقال حرارت مستعدترند.</li> </ul>
ریزو <sup>۱</sup> (۲۰۰۸) [۳۸]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	سطوح ایمپلنت با F, H, O و نئون	<ul style="list-style-type: none"> <li>بین انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، اصلاح شده و زمان القای ابتدایی رسوب هیچ گونه رابطه‌ای وجود ندارد.</li> </ul>
گیدرت <sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) [۳۹]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	SS, DLC, SICAN, SICON, CrN	<ul style="list-style-type: none"> <li>هیچ رابطه مشخصی بین مؤلفه‌های انرژی سطح و رفتار رسوب از نقطه نظر زمان القای ابتدایی رسوب برقرار نیست.</li> <li>از مقایسه مؤلفه‌های قطبی، <math>\gamma_2^p</math>، و پخشی، <math>\gamma_2^d</math>، انرژی سطح با رسوب هیچ گونه رابطه‌ای به دست نمی‌آید.</li> </ul>
ملایری <sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۹) [۱]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	سطوح نانوساختار و سطوح بدون ساختار <sup>۴</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش انرژی‌های برهم‌کنش سطحی منجر به وارد آمدن نیروی چسبندگی ضعیف بین سطح اصلاح شده و بلورهای رسوب خواهد انجامید و در نتیجه این امر موجب کمتر شدن مقدار رسوب تبلوری روی سطح و کنده شدن رسوب از روی آن می‌شود.</li> </ul>
الجنابی <sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۰) [۴۰]	CaSO <sub>4</sub>	انتقال حرارت همرفتی	Ni-P, Ni-P-BN	<ul style="list-style-type: none"> <li>با تغییر خصوصیات سطحی و به‌ویژه افزایش <math>\gamma_2^-</math>، میزان رسوب کلسیم سولفات به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد.</li> </ul>
کای و لی یو <sup>۶</sup> (۲۰۱۱) [۴۱]	CaCO <sub>3</sub>	جوشش استخری	TiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> -FPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>روکش نازک‌تر ضریب انتقال حرارت جوشش استخری را افزایش می‌دهد اما روکش‌های ضخیم‌تر این مقدار را بویژه در شارهای حرارتی بالا کاهش می‌دهند.</li> <li>روکش‌های ترکیبی آب‌گریز TiO<sub>2</sub>-FPS هم از دیدگاه انتقال حرارت جوشش استخری و هم از نقطه نظر کاهش رسوب مناسب هستند.</li> </ul>
لی یو و زائو (۲۰۱۱) [۴۲]	باکتری	انتقال حرارت همرفتی	سطوح روکش شده با Ni-P-PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>اگر مقدار مؤلفه <math>\gamma_1^{LW}</math> از مقدار مشابه برای آب، <math>\gamma_3^{LW}</math>، بیشتر باشد (این حالت برای اکثر باکتری‌ها وجود دارد) با کاهش نسبت <math>\frac{\gamma_2^{LW}}{\gamma_2^-}</math> تعداد باکتری‌های چسبیده به سطح و آهنگ زدودن باکتری از سطح به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند.</li> </ul>

1. Rizzo  
 2. Gedert  
 3. Malayeri  
 4. Non-Structured  
 5. Al-Janabi  
 6. Cai and Liu

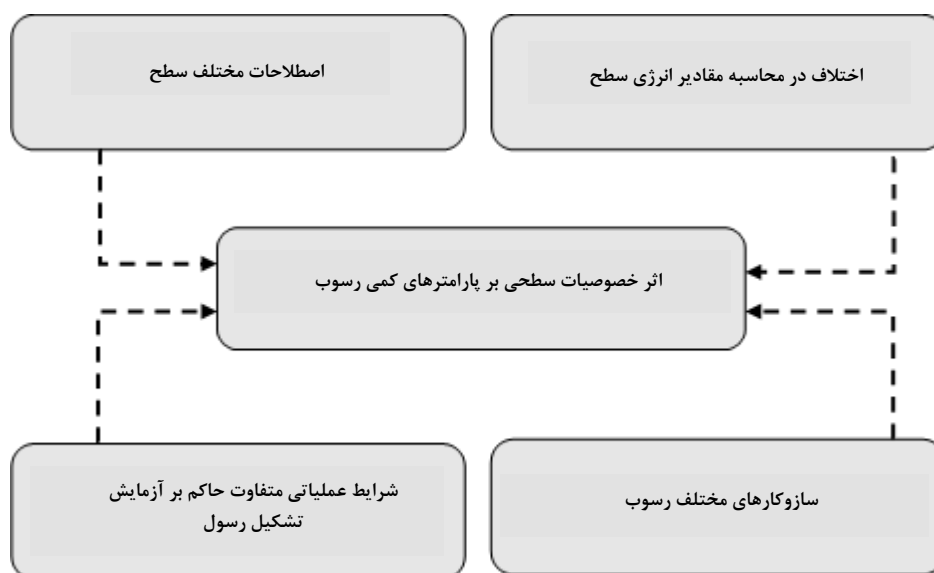
(ادامه) جدول ۳. خلاصه مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

مطالعه	محللول	مدت انتقال حرارت	سطح	نتایج
میر <sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) [۴۳]	$CaCO_3$	انتقال حرارت همرفتی	SS, SS-EP, DLC, SICAN, SICON, و مینا <sup>۲</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>بیشترین مقدار نیروی چسبندگی بلورهای رسوب کلسیم کربنات بر روی سطوح اصلاح شده DLC و SS-EP اتفاق می افتد.</li> </ul>
دریسر <sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) [۲]	$CaSO_4$ و $CaCO_3$	انتقال حرارت همرفتی	SS, PEEK, PSU	<ul style="list-style-type: none"> <li>میزان رسوب تبلوری کم تشکیل شده روی سطوح بسپاری به نسبت فولاد ضد زنگ اصلاح نشده، به خصوصیات ضد رسوب سطح بسپاری اصلاح شده مربوط می شود.</li> </ul>
اولدانی <sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۳) [۴۴]	آب	انتقال حرارت همرفتی	مشتملات PFPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>با روکش کردن سطح فولاد ضد زنگ انرژی سطح حدود ۸۰٪ کاهش یافته است.</li> <li>آزمون زاویه تماس آب برای سطح اصلاح شده بیشترین حد آب گریزی (۱۴۰-۱۰۰)° را نشان می دهد. این مقدار برای سطح اصلاح نشده حدود ۷۶° است.</li> </ul>
نواب پور <sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۳) [۴۵]	باکتری <i>Pseudomonas Fluorescens</i>	---	روکش های سیلوکسان (PACVD) و روکش های هیبریدی	<ul style="list-style-type: none"> <li>انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، نقش مهم و تأثیرگذاری را بر مقاومت حرارتی رسوب تشکیل شده روی سطوح روکش شده دارد.</li> </ul>
پوهاکا و لیکوک <sup>۶</sup> (۲۰۱۳) [۴۶]	$CaCO_3$	انتقال حرارت همرفتی	Organo silicon (SiOC), روکش های $TiO_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>خصوصیات سطحی روکش ها، مدل سازی مولکولی تشکیل رسوب تبلوری و مقایسه آزمایشگاهی عملیات رسوب بر روی سطوح اصلاح شده و سطح فولاد ضد زنگ نشان می دهد روکش های SiOC و <math>TiO_2</math> برای کاهش رسوب کلسیم کربنات مناسب اند.</li> </ul>
الجنابی و ملایری <sup>۷</sup> و (۲۰۱۵) [۴]	$CaSO_4$	انتقال حرارت همرفتی	Ni-P, Ni-P-BN	<ul style="list-style-type: none"> <li>رسوب تبلوری کلسیم سولفات با تغییر خصوصیات سطح به شدت تحت تأثیر قرار می گیرد و تغییر می کند.</li> <li>انرژی سطح، <math>\gamma_2</math>، پارامتر تأثیرگذار روی مقدار رسوب تبلوری نیست.</li> <li>مؤلفه دهنده الکترون انرژی سطح، <math>\gamma_2^-</math>، پارامتر کلیدی است و با افزایش آن، مقدار رسوب تبلوری کاهش می یابد.</li> </ul>

1. Mayer
2. Enamel
3. Dreiser
4. Oldani
5. Navabpour
6. Puhakka and Lecoq
7. Al-Janabi and Malayeri

(ادامه) جدول ۳. خلاصه مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب.

مطالعه	محلول	مدت انتقال حرارت	سطح	نتایج
زیبنک <sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) [۴۷]	$CaSO_4$	انتقال حرارت همرفتی	سطوح DLC, SICON	<ul style="list-style-type: none"> <li>اصلاحات شیمیایی و حرارتی صورت گرفته روی روکش‌ها به افزایش <math>\gamma_2^-</math> می‌انجامد که در این بین افزایش <math>\gamma_2^-</math> غالب است.</li> <li>در مورد روکش‌های SICON با افزایش <math>\gamma_2^-</math> شرایط خیس شدگی سطح با رسوب، بهبود می‌یابد و از آهنگ رشد بلور کاسته می‌شود.</li> </ul>
ماتجی <sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) [۴۸]	$Al_2SiO_5$	انتقال حرارت همرفتی	Ni-P-PTFE روکش‌های DLC	<ul style="list-style-type: none"> <li>چسبندگی رسوب تشکیل شده روی سطوح اصلاح شده به نسبت سطح فولاد ضد زنگ، ۹۷٪ کاهش می‌یابد.</li> <li>انرژی سطح روکش‌ها اثر چشمگیری بر چسبندگی رسوب آلومینیم سیلیکات دارد.</li> <li>به ازای <math>\gamma_2 = 35 \text{ mN/m}</math>، کمترین مقدار چسبندگی رسوب اتفاق می‌افتد.</li> </ul>



شکل ۴. عوامل تأثیرگذار بر داده‌های پارامترهای کمی رسوب.

1. Siebeneck  
2. Matjie

### • اثر اصلاحات مختلف سطح

مطابق شکل (۲)، دو روش کلی استفاده از پوشش‌های خارجی و جاسازی شده برای روکش کردن سطوح انتقال حرارت وجود دارد. در هر کدام از این روش‌ها، پوشش‌های بسیار متنوعی برای سطح انتقال حرارت به کار می‌گیرند. نمونه‌ای از این تنوع در ستون چهارم جدول (۳) درج شده است. همان طور که در بخش‌های قبلی نیز بیان شد، با روکش کردن سطوح انتقال حرارت، خصوصیات سطحی و از جمله انرژی سطح و مؤلفه‌های آن که در این مطالعه مد نظر است، تغییر می‌یابند. به دلیل تنوع موجود در روکش‌های مورد استفاده در مطالعات و تفاوت آن‌ها از یک تحقیق به دیگری و متعاقباً عوض شدن مقادیر خصوصیات سطحی وابسته به پوشش‌های سطح، کاملاً بدیهی به نظر می‌رسد که نتایج گاه متناقضی درباره اثر پارامترهای انرژی سطح بر داده‌های کمی رسوب مشاهده شود.

### • تأثیر تفاوت در محاسبه مقادیر انرژی سطح

مطابق مندرجات جدول (۱) برای محاسبه انرژی سطح و مؤلفه‌های آن نظریه‌های مختلفی پرداخته شده است. در همه این نظریه‌ها به مقادیر زوایای تماس مایعات آزمون بر روی سطوح نیاز است. به طور کلی، برای اندازه‌گیری زاویه تماس یک سطح دو روش وجود دارد.

۱. روش هندسی: در این روش زاویه تماس از بررسی شکل

هندسی قطره مایع آزمون روی سطح به دست می‌آید.

۲. روش اندازه‌گیری نیروی کششی: در این روش با اندازه‌گیری نیروهای برهم‌کنش بین قطره مایع آزمون و سطح، زاویه تماس به دست می‌آید [۹].

بنابراین، با توجه به متفاوت بودن روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مایع آزمون بر روی سطح که لازمه محاسبه مقادیر انرژی سطح است، احتمال وجود دارد این که در دو مطالعه یکسان از هر نظر، انرژی سطح برای دو سطح کاملاً مشابه مقادیر مختلفی شوند. از آنجا که این خصوصیات بر مقادیر پارامترهای کمی رسوب تأثیر می‌گذارد، می‌توان یکی از دلایل متناقض شدن برخی از نتایج جدول (۳) به همین عامل مرتبط دانست.

### • اثر شرایط عملیاتی حاکم بر آزمایش تشکیل رسوب

عوامل مهم زیر بر آزمایش تشکیل رسوب تبلوری روی سطوح اصلاح

شده تأثیر می‌گذارند.

۱. غلظت محلول ( $C_b$ ): کاملاً بدیهی است هر چه غلظت

محلول عملیاتی در تماس با سطح انتقال حرارت بیشتر باشد، به دلیل افزایش هسته‌زایی، در پی آن پارامترهای کمی رسوب در جهت تشدید رسوب تشکیل شده تغییر می‌کنند.

۲. سرعت جریان ( $v$ ): نقش سرعت جریان در شرایط عملیاتی بر تشکیل رسوب تبلوری از این قرار است که با افزایش سرعت جریان، به دلیل تنش سطحی برای نشست رسوب روی سطح، مقادیر پارامترهای کمی رسوب در جهت کاهش شدت رسوب تغییر کنند [۱].

۳. دمای سطح انتقال حرارت ( $T_s$ ) و محلول عملیاتی ( $T_b$ ):

در مورد سازوکار رسوب تبلوری، فوق اشباع شدن محلول عملیاتی بسیار مهم و ضروری است. با توجه به اثر دما بر فوق اشباع شدن محلول عملیاتی دماهای سطح انتقال حرارت و محلول عواملی بسیار مهم‌اند که می‌توانند شدت رسوب تبلوری را به طور چشمگیری دستخوش تغییر کنند [۵].

۴. شار حرارتی اعمال شده بر سطح ( $q$ ): برای رساندن محلول عملیاتی به حالت فوق اشباعی رسوب تبلوری، اعمال حرارت به سطح لازم است. و کاملاً واضح است که مقدار حرارت اعمال شده بر شدت فوق اشباعی و به تبع آن بر شدت رسوب تأثیر قابل ملاحظه می‌گذارد.

از آنجا که در مطالعات مختلف شرایط عملیاتی متفاوت است، بنابراین مقادیر پارامترهای کمی رسوب نیز که متأثر از این شرایطاند، متفاوت است و این امر می‌تواند موجبات نتایج مختلف و گاه متناقض درباره اثر خصوصیات سطحی بر داده‌های کمی رسوب را فراهم کند.

### • اثر سازوکارهای مختلف رسوب

مطابق آن چه در بخش قبلی بیان شد، در این مقاله اثر خصوصیات سطحی بر داده‌های کمی رسوب در سازوکارهای تبلوری و زیستی بررسی می‌شود. رسوب تبلوری خود شامل تشکیل رسوب محلول‌های نمک مختلفی چون کلسیم کربنات، کلسیم سولفات، کلسیم فسفات و جز آنها می‌شود. رسوب زیستی نیز تشکیل رسوب انواع ریزاندامگان‌ها را در بر می‌گیرد. پر واضح است که در صورت مساوی بودن همه شرایط، مقادیر پارامترهای کمی رسوب با تغییر

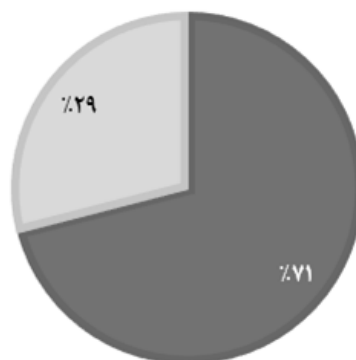
مطابق شکل (۵)، کاملاً مشخص است، بیشتر نتایج حاصل از مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که میان خصوصیات سطحی و پارامترهای کمی رسوب رابطه‌ای برقرار است. در حدود ۳۰٪ موارد، بین خصوصیات سطحی و پارامترهای کمی رسوب رابطه‌ای دیده نشده است. این موضوع، صحت آمار ۷۱٪ درباره اثر خصوصیات انرژی سطح را زیر سؤال نمی‌برد بلکه این فقدان ارتباط احتمالاً مربوط به انتخاب نادرست خصوصیت انرژی سطحی، از جمله مؤلفه انرژی سطح و انرژی برهم‌کنش بین مولکولی و بررسی تأثیر آن بر داده‌های کمی و کیفی حاصل از رسوب است. در شکل (۶) میزان درصد اثر خصوصیات سطحی را بر پارامترهای کمی رسوب به تفکیک مشاهده می‌کنید.

ماده رسوب‌کننده عوض می‌شود.

در جمع‌بندی مطالب بیان شده می‌توان گفت که مجموع عوامل نشان داده شده در شکل (۴) باعث می‌شوند که گاه نتایج ضد و نقیضی درباره اثر خصوصیات سطحی بر مقادیر پارامترهای کمی رسوب مشاهده شود.

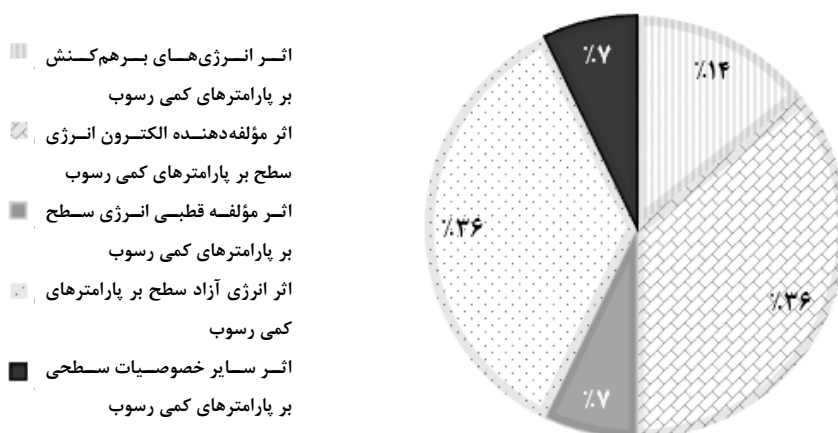
### ۲-۳ تحلیل آماری نتایج مطالعات

مطالعات انجام شده درباره تأثیر خصوصیات انرژی سطح بر داده‌های کمی رسوب را می‌توان از دیدگاه وجود و یا فقدان ارتباط بین خصوصیات سطحی و شدت رسوب به دو دسته تقسیم کرد. در شکل (۵) مقایسه‌ای آماری از این حیث را مشاهده می‌کنید.



■ وجود ارتباط بین خصوصیات سطحی و پارامترهای کمی رسوب  
 ■ فقدان ارتباط بین خصوصیات سطحی و پارامترهای کمی رسوب

شکل ۵. مقایسه درصدی بین وجود و یا فقدان ارتباط بین خصوصیات سطحی و شدت رسوب در مطالعات انجام شده.



شکل ۶. بررسی تفکیکی اثر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب در مطالعات انجام شده.

در شکل (۶) مشاهده می‌کنید که در مطالعات انجام شده، انرژی آزاد سطح و مؤلفه الکترون‌دهنده آن بیشترین اثر را بر پارامترهای کمی رسوب نهاده‌اند. عبارت اثر سایر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب در شکل (۶)، برای مواردی که در تقسیم بندی‌های دیگر شکل یادشده جای نمی‌گرفته‌اند، به کار رفته است. قبلاً بیان شد که انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی نقش مهمی در چسبندگی رسوب به سطح انتقال حرارت ایفا می‌کنند. در شکل (۶)، برای اثر انرژی‌های برهم‌کنش بر پارامترهای کمی رسوب، سهم ۱۴ درصدی لحاظ شده است که این مطلب بیانگر تأثیر چشمگیر این انرژی‌ها بر چسبندگی رسوب به سطح انتقال حرارت است. در تقریباً ۱۴ درصد از ۳۶ درصد تأثیر انرژی سطح بر پارامترهای کمی رسوب، روند صعودی و یا نزولی خاصی برای تغییر پارامترهای کمی رسوب با این خصوصیت سطحی دیده نمی‌شود. به بیان دقیق‌تر، در حدود ۴۰٪ موارد مطالعه تأثیر انرژی سطح بر شدت رسوب حالتی سهمی شکل به چشم می‌خورد که در این حالات به منظور حداقل شدن شدت رسوب بازه‌ای برای انرژی سطح بیان می‌شود.

در جدول (۴) معیارهای ارائه شده در مطالعات برای بررسی اثر خصوصیات سطحی بر مقادیر کمی رسوب درج شده‌اند. در این جدول سه معیار ذکر شده، عبارت‌اند از مؤلفه الکترون‌دهنده انرژی سطح،  $\gamma_2^-$ ، مؤلفه قطبی انرژی سطح،  $\gamma_2^P$ ، و نسبت CQ. معیارهای  $\gamma_2^-$  و  $\gamma_2^P$  برای رسوب تبلوری و نسبت CQ

برای رسوب زیستی هستند.

در مورد تأثیر معیار  $\gamma_2^-$  بر شدت رسوب تبلوری در مطالعات مختلفی که معیار یادشده را ارائه داده‌اند، تناقض وجود دارد، به طوری که مطابق جدول (۳)، برخی مطالعات برای کاهش رسوب تبلوری افزایش معیار یادشده و برخی دیگر از مطالعات برای کاهش شدت رسوب، کاهش آن را ضروری دانسته‌اند. حالت مشابه برای مؤلفه قطبی انرژی سطح نیز وجود دارد. اما در مورد نسبت CQ شرایط متفاوت است. برای این نسبت هیچ تناقضی در نتایج مطالعات مختلف مشاهده نمی‌شود و این مسئله نکته مثبتی است، ولی نسبت CQ کلی نیست و سازوکار رسوب و نوع سطوح اصلاح شده آن را به شدت محدود می‌کنند و به این ترتیب از جامعیت معیار یادشده کاسته می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

بررسی نتایج حاصل از مطالعات انجام شده درباره اثر خصوصیات سطحی بر داده‌های کمی رسوب نشان می‌دهد که معیارهای اندک بیان شده درباره تأثیر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب، تنها برای شرایطی خاص از دیدگاه سازوکار رسوب و نوع سطح اصلاح شده کاربرد دارند و فقدان یک پارامتر کلی و مؤثر، تابع خصوصیات انرژی سطح به شدت حس می‌شود که بتواند بر کاهش رسوب اثر بگذارد.

جدول ۴. معیارهای ارائه شده در مطالعات مختلف درباره تأثیر خواص سطح بر پارامترهای کمی رسوب.

معیار ارائه شده در مطالعات	زمینه کاربردی سازوکار رسوب / سطح	وجود تناقض درباره اثر معیار بر پارامترهای کمی رسوب	روند تغییر معیار برای کاهش شدت رسوب
$\gamma_2^-$	رسوب تبلوری / سطوح بسپاری و الکترولس	وجود دارد	روند ثابتی وجود ندارد
$\gamma_2^P$	رسوب تبلوری / سطوح بسپاری و فلزی	وجود دارد	روند ثابتی وجود ندارد
$CQ = \frac{\gamma_2^{LW}}{\gamma_2^-}$	رسوب زیستی / سطوح بسپاری- فلزی	وجود ندارد	کاهشی

(J)	انرژی برهم‌کنش الکتروستاتیکی دو لایه‌ای	$\Delta E_{132}^{EL}$
(J)	انرژی برهم‌کنش لیف شیتز- واندروالس	$\Delta E_{132}^{LW}$
(J)	انرژی برهم‌کنش کل	$\Delta E_{132}^{Tot}$
(m)	حداقل فاصله تعادلی بین اجسام برهم‌کنشی	$H_0$
(m)	فاصله بین اجسام برهم‌کنشی	$H$
(J/K)	ثابت بولتزمن	$k_B$
(W/m <sup>2</sup> )	شار حرارتی	$\dot{q}$
(m)	شعاع ذره	$R$
(°C)	دما	$T$

#### بالانویس‌ها

اسید- باز لوویس	$AB$
پخشی	$d$
لیف شیتز- واندروالس	$LW$
قطبی	$P$

#### اندیس‌ها

رسوب/ قطره مایع	1
سطح انتقال حرارت	2
محیط/ آب	3
بالک	$b$
سطح	$s$

#### حروف یونانی

(J/m <sup>2</sup> )	مؤلفه پذیرنده الکترون انرژی سطح	$\gamma^+$
(J/m <sup>2</sup> )	مؤلفه‌دهنده الکترون انرژی سطح	$\gamma^-$
(J/m <sup>2</sup> )	مؤلفه پخشی انرژی سطح	$\gamma^d$
(J/m <sup>2</sup> )	مؤلفه لیف شیتز- واندروالس انرژی سطح	$\gamma^{LW}$
(J/m <sup>2</sup> )	مؤلفه قطبی انرژی سطح	$\gamma^p$
	انرژی سطح فصل مشترک جامد/ بخار، انرژی آزاد سطح	$\gamma_2$
(J/m <sup>2</sup> )	جامد	(g/l)
	انرژی سطح فصل مشترک مایع/ بخار، کشش سطحی	$\gamma_3$
(J/m <sup>2</sup> )	مایع	

در پایان، براساس ارزیابی‌های حاصل از بررسی نظری و آماری نتایج مطالعات انجام شده درباره تأثیر خصوصیات انرژی سطح و انرژی‌های برهم‌کنش بر پارامترهای کمی رسوب، پیشنهاد می‌شود که برای رسیدن به معیاری جامع، تابع خصوصیات انرژی سطح که بر شدت رسوب اثرگذار باشد، نکات زیر لحاظ شوند.

۱. مؤلفه الکترون‌دهنده انرژی سطح،  $\gamma_2^-$ ، و مؤلفه  $\gamma_2^{LW}$ ، به ترتیب، تأثیر بیشتر و کمتری بر معیار تابع خصوصیات سطحی داشته باشند که بر پارامترهای کمی رسوب اثرگذار باشد.

۲. براساس نتایج حاصل از اثر انرژی آزاد سطح،  $\gamma_2$ ، بر پارامترهای کمی رسوب در مطالعات مختلف و با توجه به این که روند غالب خاصی در مورد اثر خصوصیت سطحی یادشده بر شدت رسوب مشاهده نمی‌شود، از این رو به نظر می‌رسد که اثر انرژی آزاد سطح نباید در معیار کلی تابع خصوصیات سطحی لحاظ شود.

۳. همچنین، مطابق تحلیل آماری انجام شده، به نظر می‌رسد که برای رسیدن به معیاری جامع و مؤثر بر پارامترهای کمی رسوب، ابتدا باید سعی بر اثر دادن انرژی سطح و مؤلفه‌های آن در اختیار داشت و انرژی‌های برهم‌کنش بین مولکولی در درجه دوم اهمیت قرار گیرند.

با توجه به سهم حداکثری مؤلفه‌های انرژی سطح مربوط به نظریه اسید- باز لوویس و سهم حداقلی مؤلفه‌های انرژی سطح مربوط به روش‌های وو و آدلبیو آر ک، مطابق شکل (۶)، در مطالعات تأثیر خصوصیات سطحی بر پارامترهای کمی رسوب، به نظر می‌رسد که برای رسیدن به معیاری جامع و مؤثر بر شدت رسوب باید محاسبات خصوصیات سطحی از نظریه اسید- باز لوویس انجام و سپس تأثیر خصوصیات سطحی محاسبه شده با این روش بر پارامترهای کمی رسوب ارزیابی شود.

#### نمادها

$C_0$	عدد ثابت	(m <sup>2</sup> /N <sup>2</sup> )
$c$	غلظت	(g/l)
$\Delta E_{132}^{AB}$	انرژی برهم‌کنش اسید- باز لوویس	(J)
$\Delta E^{Br}$	انرژی براونی	(J)



	ثابت گذردهی الکتریکی محلول	$\epsilon$
	پتانسیل زنا	$\zeta$
	زاویه تماس	$\theta$
	طول شدت جریان	$K^{-1}$
	طول تصحیح مربوط به مولکول‌های آب (m)	$\lambda$
		<b>اختصارات</b>
	Aluminum	(Al)
	Aluminum silicate	( $Al_2SiO_5$ )
	Calcium Carbonate	( $CaCO_3$ )
	Calcium Sulphate	( $CaSO_4$ )
	Charge Coupled Device	(CCD)
	Chrome Nitride	(CrN)
	Copper	(Cu)
	Diamond Like Carbon	(DLC)
	Drop Shape Analysis	(DSA)
	Fluorine	(F)
	Fluorinated Ethylene Propylene	(FEP)
	Hydrogen	(H)
	Molybdenum Disulfide Ion	( $MoS_2^+$ )
	Nickel	(Ni)
	Nickel-Phosphor	(Ni-P)
	Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition	(PACVD)
	Polyether Ether Ketone	(PEEK)
	Perfluoroalkoxy	(PFA)
	Polytetrafluoro Ethylene	(PTFE)
	Silicon	(Si)
	Si-DLC	(SICAN)
	Si-O-DLC	(SICON)
	Silicon Fluoride Ions	( $SiF_3^+$ )
	Stainless Steel	(SS)
	Titanium Nitride	(TiN)
	Titanium Dioxide	( $TiO_2$ )
<b>مراجع</b>	(C/V.m)	
[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).	(mV)	
[2] Dreiser, C., Kärtz, L. J., Bart, H. -J., "Kinetics and quantity of crystallization fouling on polymer surfaces: impact of surface characteristics and process conditions", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P. (Eds.), International conference on heat exchanger fouling and cleaning, Budapest, Hungary, 715-720, (2013).	(درجه)	
[3] Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., "Heat exchanger fouling-mitigation and cleaning strategies", Heat Transfer Engineering, 32, 189-196, (2011).	(m)	
[4] 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).		
[5] Al-Janabi, A., "Convective heat transfer fouling of aqueous solutions on modified surfaces", Doctoral dissertation, University of Stuttgart, (2011).		
[6] Oliveira, R., "Understanding adhesion: a means for preventing fouling", Experimental Thermal and Fluid Science, 14, 316-322, (1997).		
[7] Dukhin, S. S., Derjaguin, B. V., "Electrokinetic Phenomena", J. Wiley and Sons, (1974).		
[8] Van Oss, C. J., Good, R. J., Chaundhury, M. K., "The role of van der Waals forces and hydrogen bonds in 'hydrophobic interactions' between biopolymers and low energy surfaces", Journal of Colloid Interface Science, 111, 378-390, (1986).		
[9] Van Oss, C. J., "Interfacial Forces in Aqueous Media", New York: Marcel Dekker, (1994).		
[10] Zisman, W. A., "Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution", Advances in Chemistry, 43, 1-51, (1964).		
[11] Fowkes, F. M., "Attractive forces at interfaces", Industrial and Engineering Chemistry, 56, 40-52, (1964).		
[12] Owens, D. K., Wendt, R. C., "Estimation of surface free energy of polymers", Journal of Applied Polymer Science, 13, 1741-1747, (1969).		
[13] Wu, S., "Calculation of interfacial tension in polymer systems", Journal of Polymer Science Part C-Polymer Symposium, 34, 19-30, (1971).		
[14] Wu, S., "Polar and nonpolar interactions in adhesion", Journal of Adhesion, 5, 39-55, (1973).		
[15] Neumann, A. W., Good, R. J., Hope, C. J., Sejpal, M., "An equation-of-state approach to determine surface tensions of low-energy solids from contact angles", Journal of Colloid and Interface Science, 49, 291-304, (1974).		

- [16] Van Oss, C. J., Good, R. J., Chaundhury, M. K., "Determination of the hydrophobic interaction energy-application to separation processes", *Separation Science and Technology*, 22, 1-24, (1987).
- [17] Van Oss, C. J., Good, R. J., Chaundhury, M. K., "Additive and non additive surface tension components and the interpretation of contact angles", *Langmuir* 4, 884-891, (1988).
- [18] Derjaguin, B. V., Landau, L., "Acta physicochem", *URSS*, 14, 633-662, (1941).
- [19] Verwey, E. J. W., Overbeek, J. Th. G., "Theory of the Stability of Lyophobic Colloids", Elsevier Pub. Co. Inc, (1948).
- [20] 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).
- [21] Al-Janabi, A., Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., "Minimization of CaSO<sub>4</sub> deposition through surface modification", *Heat Transfer Engineering*, 32, 291-299, (2011).
- [22] 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).
- [23] Müller-Steinhagen, H., Zhao, Q., "Investigation of low fouling surface alloys made by ion implantation technology", *Chemical Engineering Science*, 52, 3321-3332, (1997).
- [24] Wu, W., Nancollas, G. H., "Kinetics of Heterogeneous Nucleation of Calcium Phosphates on Anatase and Rutile Surfaces", *Journal of Colloid and Interface Science*, 199, 206-211, (1998).
- [25] Bornhorst, A., Müller-Steinhagen, H., Zhao, Q., "Reduction of scale formation under pool boiling conditions by ion implantation and magnetron sputtering on heat transfer surfaces", *Heat Transfer Engineering*, 20, 6-14, (1999).
- [26] 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).
- [27] Förster, M., Augustin, W., Bohnet, M., "Influence of the adhesion force crystal/heat exchanger surface on fouling mitigation", *Chemical Engineering and Processing*, 38, 449-461, (1999).
- [28] Förster, M., "Reduction of crystallization fouling selective influencing between crystals and heat transfer areas", *Doctoral dissertation, University of Braunschweig*, (2001).
- [29] Visser, H., "Improvement of construction materials used in the food industry to lengthen processing time-a new European project (MODSTEEL)", *Proceeding of Heat Exchanger Fouling: Fundamental Approaches and Technical Solutions*, Davos, Switzerland, 3-10, (2001).
- [30] Zhao, Q., Liu, Y., Müller-Steinhagen, H., Liu, G., "Graded Ni-P-PTFE coatings and their potential applications", *Surface and Coating Technology*, 155, 279-284, (2002).
- [31] Santos, O., Nylander, T., Rizzo, G., Müller-Steinhagen, H., Trägårdh, C., Paulsson, M., "Study of whey protein adsorption under turbulent flow", *Proceeding of Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, Santa Fe, New Mexico, USA, 175-183, (2003).
- [32] Augustin, W., Zhang, J., Bialuch, I., Gedert, T., Scholl, S., "Modified DLC-coatings for the mitigation of scaling on heat transfer surfaces", *International conference on enhanced, compact and ultra-compact heat exchangers: science, engineering and technology*, Whistler, British Columbia, Canada, 394-402, (2005).
- [33] Rosmaninho, R., Rizzo, G., Müller-Steinhagen, H., Melo, L. F., "Anti-fouling stainless steel based surfaces for milk heating processes", *Proceeding of Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Challenges and Opportunities*, Kloster Irsee, Germany, 97-102, (2005).
- [34] Liu, Y., Zhao, Q., "Influence of surface energy of modified surfaces on bacterial Adhesion", *Biophysical Chemistry*, 117, 39-45, (2005).
- [35] Zhao, Q., Liu, Y., Wang, C., Wang, S., Müller-Steinhagen, H., "Effect of surface free energy on the adhesion of biofouling and crystalline fouling", *Chemical Engineering Science*, 60, 4858-4865, (2005).
- [36] Augustin, W., Gedert, T., Scholl, S., "Surface treatment for the mitigation of whey protein fouling", In Müller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., Watkinson, A. P., (Eds.), *Proceeding of Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Challenges and Opportunities*, Tomar, Portugal: The Berkeley Electronic Press, 206-214, (2007).
- [37] Rosmaninho, R., "Fouling caused by milk components on modified surfaces during Heat treatment processes", *Doctoral dissertation, Portugal, University of Porto*, (2007).
- [38] Rizzo, G., "Induktionszeit beim Kristallisationsfouling an ionenimplantierten Wärmeübertragerflächen", *Doctoral dissertation, Stuttgart University*, (2008).
- [39] Gedert, T., Bialuch, I., Augustin, W., Scholl, S., "Extending the induction period of crystallization fouling through surface coating", *Heat Transfer Engineering*, 30, 868-875, (2009).
- [40] Al-Janabi, A., Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., "Experimental fouling investigation with electroless Ni-P coatings", *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 1063-1071, (2010).
- [41] Cai, Y. W., Liu, M. Y., "Crystallization fouling on coatings of titania and titania-fluoroalkylsilane during nucleate boiling", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), *Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning*, Crete Island, Greece, 264-271, (2011).
- [42] Liu, C., Zhao, Q., "The CQ ratio of surface energy components influences adhesion and removal of fouling bacteria", *Biofouling*, 27 (3), 275-285, (2011).

- [43] Mayer, M., Augustin, W., Scholl, S., "Experimental study on the adhesion of single crystals on modified surfaces in crystallization fouling", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning, Crete Island, Greece, 235-242, (2011).
- [44] Oldani, V., Bianchi, C. L., Biella, S., Pirola, C., Cattaneo, G., "Use of perfluoropolyether coatings to mitigate fouling on heat exchanger metal surfaces", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning, Budapest, Hungary, 316-323, (2013).
- [45] Navabpour, P., Zhang, X., Cooke K., "Nanostructured coatings for resistance to aquatic biofouling", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning, Budapest, Hungary, 302-307, (2013).
- [46] Puhakka, E., Lecoq, E., "Organo silicon and titanium oxide coatings for mitigation of CaCO<sub>3</sub> depositions", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), International conference on heat exchanger fouling and cleaning, Budapest, Hungary, 715-720, (2013).
- [47] Siebeneck, K., Lüken, J., Lu, Y., Augustin, W., Scholl S., "Aging and thermal conditioning of modified heat exchanger surfaces-impact on crystallization fouling", In Malayeri, M. R., Müller-Steinhagen, H., Watkinson, A. P., (Eds.), Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning, Enfield(Dublin), Ireland, 358-366, (2015).
- [48] Matjie, R., Zhang, S., Zhao, Q., Mabuza, N., Bunt, J. R., "Tailored surface energy of stainless steel plate coupons to reduce the adhesion of aluminum silicate deposit", Fuel, 181, 573-578, (2016).