



## Comparison of Threshold Models of Hydrocarbon Fouling Formation in Preheaters of Distillation Columns

Mohammad Javad Barbastegan<sup>1</sup>, Amir Hossein Nikoo<sup>2</sup>, M. Reza Malayeri<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Graduate, School of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz

<sup>2</sup> Post-doctoral fellow, School of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz

<sup>3</sup> Faculty member, School of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz

Received: 22 Jun 2023      Accepted: 2 Nov 2023

### Abstract

Hydrocarbon fouling of preheat exchangers causes several detrimental impacts on operation, environment, safety, as well as economy of oil refineries. To investigate threshold fouling models, a variety of hydrocarbon fouling data, such as temperature, oil flow, fluid properties, and geometries of such exchangers, has been gathered from the literature. The most accurate models for predicting the fouling rate are the Polley, Ebert, and Panchal models, with slopes of 0.352, 0.108, and 0.022, respectively, based on fitted curves on the computational fouling rates in terms of comparable experimental values. The sensitivity analysis indicates that the two factors that profoundly affect the fouling rate are the surface temperature and Reynolds number. Using the Polley's equation, the fouling rate in preheat exchangers may be predicted with the highest degree of accuracy, mean sensitivity analysis of 0.29, based on the consistency of calculated and experimental data.

**Keyword:** Crude Oil, Heat Exchanger, Hydrocarbon Fouling, Sensitivity Analysis, Threshold Equations.

\* malayeri@shiraz.ac.ir

## مقایسه روابط آستانه‌ای تشکیل رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های پیشگرمکن برج‌های تقطیر

محمد جواد بر بستگان<sup>1</sup>، امیر حسین نیکو<sup>2</sup>، محمدرضا ملایری<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> فارغ التحصیل کارشناسی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

<sup>2</sup> محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

<sup>3</sup> عضو هیئت علمی مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

دریافت: 1402/04/01 پذیرش: 1402/08/12

### چکیده

تشکیل رسوبات هیدروکربنی در مبدل‌های پیشگرمکن با انواع چالش‌های عملیاتی، زیست محیطی، ایمنی و اقتصادی همراه خواهد بود. پژوهش حاضر به مطالعه و مقایسه پارامتری معادلات آستانه‌ای تشکیل رسوبات می‌پردازد. برای این منظور، گستره وسیعی از داده‌های تشکیل رسوب هیدروکربنی شامل خصوصیات جریان و سیال نفتی، شرایط دمایی و مشخصات مبدل‌ها ناظر به قطر معادل از منابع مختلف جمع‌آوری گردید. براساس خطوط برازش شده روی داده‌های نرخ رسوب محاسباتی بر حسب مقادیر تجربی مشابه، معادلات پالی، ابرت و پانچال به ترتیب با شیب‌های 0/352، 0/108 و 0/022 بیشترین دقت را در پیش‌بینی نرخ رسوب دارند. همچنین براساس آنالیز حساسیت، موثرترین پارامترها بر پیش‌بینی نرخ تشکیل رسوب عدد رینولدز و دمای سطح مبدل هستند. در نهایت می‌توان گفت که بهترین معادله برای پیش‌بینی نرخ رسوبگذاری بر مبنای نزدیکی مقادیر محاسباتی و تجربی در مبدل‌های پیشگرمکن برج‌های تقطیر، معادله‌ی پالی با کمترین حساسیت نسبی متوسط برابر با 0/29 خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** مبدل حرارتی، نفت خام، رسوب هیدروکربنی، معادلات آستانه‌ای، آنالیز حساسیت.

\* malayeri@shiraz.ac.ir



## 1- مقدمه

رسوب در واقع به معنای انباشته شدن مواد با ضریب رسانش گرمایی پایین روی سطوح تجهیزات فرآیندی نظیر مبدل‌های حرارتی تعبیر می‌شود. از نقطه نظر گسترده‌گی، رسوب به طور کلی به دو دسته‌ی آلی و معدنی تقسیم می‌شود. رسوبات معدنی شامل انواع کربنات‌ها، سولفات‌ها و اکسیدها هستند [1]. رسوبات هیدروکربنی حاصل از نفت خام همچون آسفالتین<sup>1</sup> و واکس<sup>2</sup> در دسته رسوبات آلی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که تمرکز پژوهش حاضر بر تشکیل رسوبات هیدروکربنی حاصل از نفت خام است. از آنجایی که انتظار می‌رود تا سال 2030 میلادی حدود 70 درصد تقاضای جهانی انرژی از طریق سوخت‌های فسیلی و به خصوص بخش نفت تامین شود، لذا تشکیل رسوبات هیدروکربنی ناشی از نفت خام یکی از مشکلات جدی صنعت به شمار خواهد رفت [2]. در پالایشگاه‌ها، به طور معمول نفت خام در برج‌های تقطیر تا یک دمای مشخص گرم می‌شود. بنابراین برای کاهش انرژی مصرفی، با مبدل‌های حرارتی پیشگرمکن نفت خام به وسیله بخار داغ گرم می‌شود. این انرژی معادل حدود 60% میزان انرژی حرارتی برج تقطیر اتمسفری است [3]. رسوب هیدروکربنی حاصل از نفت خام در مبدل‌های حرارتی همواره یکی از مشکلات گریبانگیر در بخش‌های بالادستی و پایین دستی صنایع نفت است [4]. تشکیل رسوبات هیدروکربنی سبب ایجاد مشکلات عملیاتی مختلفی مانند بسته شدن مجرای عبور نفت خام، افزایش مقاومت گرمایی کل و به تبع آن افزایش بار حرارتی و کاهش توان پمپ‌های موجود در فرآیند می‌شود [5-6]. از منظر اقتصادی، هزینه‌های تحمیل شده به کشورهای صنعتی که ناشی از ایجاد رسوب در مبدل‌های حرارتی پیشگرمکن نیز می‌باشند، معادل 0/25٪ از تولید ناخالص داخلی تخمین زده می‌شود [7] که شامل طراحی بیش از حد، تصفیه سیالات عملیاتی، نگهداری، خاموشی‌ها و تمیز کردن است. همچنین لازم به ذکر است که کل هزینه‌های مربوط به رسوب برای کشورهای بزرگ صنعتی بیش از 4/4 میلیارد دلار در سال تخمین زده می‌شود. بنابر تخمین‌های موجود، تنها هزینه‌ی سوخت اضافی مصرف شده ناشی از رسوبگذاری در پالایشگاه‌های ایران حدود 7/5 میلیون دلار در سال می‌باشد. همچنین هزینه کاهش محصول خروجی حدود 180 میلیون دلار در سال برآورد می‌شود [8]. از منظر زیست محیطی نیز، با افزایش نرخ رسوبگذاری در مبدل‌های حرارتی خطرات ایمنی در طی عملیات و همچنین حین رسوب زدایی افزایش می‌یابد. تولید اکسیدهای نیتروژن و گوگرد و خطرات بالقوه استفاده از بازدارنده‌های شیمیایی نیز به طور قطع هزینه‌های سلامتی را افزایش می‌دهد [9]. اخیراً عمده توجهات در خصوص تشکیل رسوبات هیدروکربنی در مبدل‌های پیشگرمکن به برداشت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، مد عملیاتی، آنالیز داده‌های کمی رسوب و مشخصه‌یابی نوع رسوبات هیدروکربنی همان‌طور که به تفصیل در جدول 1 اشاره شده، معطوف شده است.

جدول 1 - خلاصه پژوهش‌های نوین در ارتباط با تشکیل رسوبات هیدروکربنی در مبدل‌های پیشگرمکن

| مطالعه                             | نکته کلیدی                     | توضیح تفصیلی                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ایشی‌یاما و همکاران<br>– 2022 [10] | برداشت اقتصادی<br>و زیست‌محیطی | رویکرد رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی در دهه‌های اخیر به سمت بهبود ابزارهای مانیتورینگ، استفاده از تجهیزات کاهش رسوب، بهینه‌سازی استفاده از مواد ضد رسوب، بهینه‌سازی شرایط فرآیند، اختلاط بهتر نفت‌های خام، طراحی بهتر مبدل‌های حرارتی و انتخاب جنس مبدل‌ها تغییر یافته است. |

<sup>1</sup> Asphaltene

<sup>2</sup> Wax

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                          |                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| لذا نیاز به بازنگری پیشگرمکن‌های پالایشگاهی از منظر اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                          |                                  |
| تغییر مد عملیاتی از حالت یک بار عبور به حالت گردشی در دبی جریان ثابت، دو اثر متقابل بر رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی خواهد داشت: الف) با افزایش تنش حرارتی بر شدت تشکیل رسوب افزوده خواهد شد و ب) با کاهش میزان پیش‌ماده تشکیل رسوب، از شدت تشکیل آن در مقایسه با حالت یک بار عبور کاسته می‌شود.                                                                                                                                                                      | مد عملیاتی               | سی‌بوتی و همکاران<br>– 2022 [11] |
| یکی از چالش‌های اساسی در تفسیر داده‌های رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی، تفکیک سهم مقاومت‌های جابجایی و هدایتی در مقاومت کلی انتقال حرارت است. در دستگاه‌های آزمایشگاهی رسوب، تغییر مقاومت جابجایی اثر قابل توجهی روی مقاومت رسوب دارد اما در شرایط میدانی این اثر، اهمیت کمتری خواهد داشت. برای در نظر گرفتن چنین اثراتی، با استفاده از داده‌های ضخامت و زبری لایه رسوب در انتهای فرآیند، مجدداً هدایت حرارتی که در طول مدت تست ثابت لحاظ شده بود، اندازه‌گیری می‌شود. | آنالیز داده‌های کمی رسوب | اسمیت و هیتی‌مانا<br>– 2022 [12] |
| ترکیب رسوب نفت خام در فرآیندهای صنعتی کاملاً پیچیده است در حالی که در اکثر موارد، پرسنل عملیاتی تشکیل کک در مبدل‌های حرارتی و خطوط فرآیندی را مفروض می‌دارند. بر مبنای مشخصه‌یابی رسوبات هیدروکربنی ناشی از نفت خام توسط روش‌های تحلیلی و طیف سنجی، طیف رسوب کک معرفی شده است. بر این مبنای رسوب کک می‌تواند به دسته‌بندی‌های آسفالتی، گوگردی، سیلیکات، کربن‌دار و یا ترکیبی از این‌ها تقسیم‌بندی شود.                                                                     | مشخصه‌یابی رسوب          | شانک و مک‌کارتنی<br>– 2019 [13]  |

براساس موارد مزبور، اتخاذ راهکارهای موثر جهت مقابله با تشکیل رسوب به طور کلی و رسوبات هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی پیشگرمکن به طور ویژه ضروری به نظر می‌رسد. از این روی، پیش‌بینی شدت و میزان رسوب هیدروکربنی تشکیل شده در مبدل حرارتی پیشگرمکن بخش مهمی از روش‌های مقابله با رسوب را تشکیل می‌دهد. از این منظر، شناخت بهتر و مقایسه پارامتری معادلاتی که به پیش‌بینی میزان تشکیل رسوبات هیدروکربنی مبدل‌های پیشگرمکن می‌پردازند، از اهمیتی دوچندان برخوردار خواهد بود چرا که امکان تعیین دقیق‌ترین معادله نرخ رسوبگذاری و موثرترین پارامتر (ها)ی عملیاتی را برای اولاً کاهش میزان خسارات ناشی از تشکیل رسوب و ثانیاً طراحی بهینه و ضدرسوب مبدل‌های پیشگرمکن فراهم می‌آورد.

برای پیش‌بینی نرخ تشکیل رسوبات هیدروکربنی، روابط مختلفی ارائه شده‌اند که به دو دسته‌ی کلی معادلات آستانه‌ای<sup>3</sup> و هوش مصنوعی تقسیم می‌شوند. وجه تسمیه نام‌گذاری معادلات آستانه‌ای بدین سبب است که این معادلات می‌توانند فرمولاسیون مشخصی از دمای دمای سطح، دمای توده و سرعت جریان سیال را ارایه کنند که با استفاده از آن‌ها نرخ رسوبگذاری به صفر و یا بسیار نزدیک به صفر برسد [14]. لازم به ذکر است که نرخ رسوبگذاری به صورت تغییرات مقاومت حرارتی رسوب نسبت به زمان تعریف می‌شود.

<sup>3</sup> Threshold

در این جا بایستی اشاره کرد که تمرکز مطالعه حاضر بر بررسی و ارزیابی معادلات آستانه‌ای استوار است. در سال‌های اخیر علی‌رغم توسعه کمی و کیفی معادلات پیش‌بینی تشکیل رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمکن، مقایسه جامعی بین معادلات موجود صورت نگرفته است و لذا نقاط قوت و ضعف آنها به درستی مبرهن نشده است. بر این مبنا، پژوهش حاضر براساس بررسی‌های صورت گرفته، با استفاده از جامع‌ترین بانک داده آزمایشگاهی مرتبط با تشکیل رسوبات هیدروکربنی در مبدل‌های پیش‌گرمکن برج‌های تقطیر که در منابع مختلف به چاپ رسیده است، به مطالعه و مقایسه پارامتری معادلات آستانه‌ای پیش‌بینی تشکیل رسوب می‌پردازد تا دقیق‌ترین معادله آستانه‌ای برای پیش‌بینی نرخ رسوبگذاری در مبدل‌های مذکور مشخص شود. همچنین، دیگر هدف این مطالعه بررسی حساسیت معادلات آستانه‌ای تشکیل رسوب هیدروکربنی نسبت به پارامترهای مختلف است که این موضوع می‌تواند از نقطه نظر طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمکن کاربردی باشد.

## 2- پیش‌بینی تشکیل رسوب هیدروکربنی

### 2-1- معادلات آستانه‌ای

معادلات آستانه‌ای برای پیش‌بینی نرخ رسوبگذاری با استفاده از پارامترهای عملیاتی قابل اندازه‌گیری نظیر سرعت متوسط جریان و دما عموماً بر اساس ترکیب دو شار نشست<sup>4</sup> رسوب (که به سرعت سیال هیدروکربنی، دمای توده سیال و دمای سطح مبدل بستگی دارد) و حذف<sup>5</sup> رسوب (که به سرعت سیال هیدروکربنی و هندسه سطح بستگی دارد) تعریف می‌شوند. علاوه بر موارد فوق، اخیراً مشاهدات میدانی رسوبات نفت خام مبدل‌های حرارتی نشان داده است که زبری سطح مبدل نیز می‌تواند به صورت قابل توجهی بر شدت تشکیل رسوب هیدروکربنی موثر باشد [15]. بر این اساس، نرخ رسوبگذاری را می‌توان به صورت تفاضل شارهای نشست و حذف رسوب به طور کلی براساس رابطه 1 نوشت.

$$\rho_f k_f \frac{dR_f}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (1)$$

در معادله فوق،  $\rho_f$  چگالی رسوب،  $k_f$  هدایت حرارتی رسوب،  $R_f$  مقاومت حرارتی رسوب و  $\phi_d$  و  $\phi_r$  به ترتیب شارهای نشست و دفع رسوب هستند. معادلات آستانه‌ای در واقع معادلاتی نیمه تجربی هستند که از طریق اعمال برازش بر روی داده‌های آزمایشگاهی حاصل می‌شوند و از این روی محدودیت‌های جدی دارند. جدول 2 روابط ریاضی معادلات آستانه‌ای تشکیل رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمکن را ارائه می‌کند.

جدول 2- معادلات آستانه‌ای پیش‌بینی تشکیل رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمکن

| ردیف | محققین (منبع)       | مدل                                                                           | ملاحظات |
|------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1    | کرن و سیتون<br>[16] | $\frac{dM}{dt} = \phi_d - \phi_r, \quad \frac{dx}{dt} = K_1 C W - K_2 \tau x$ | -       |
| 2    | واتکینسون<br>[17]   | $\frac{dx}{dt} = K_3 JS - K_4 \tau x$                                         | -       |

<sup>4</sup> Deposition

<sup>5</sup> Removal



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                            |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----|
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $\frac{dR_f}{dt} = \frac{1}{\rho_f k_f} \left[ \frac{C_b}{\left(\frac{1}{K_r} + \frac{1}{K_m}\right)} - K_i C_{Di} \right]$                                                        | کریتنندن و همکاران<br>[17] | 3  |
| $\alpha = 30.2 \times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1};$<br>$\beta = -0.88;$<br>$E = 68 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 1.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$                                                                                                                                                                                        | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w$                                                                                               | ابرت و پانچال<br>[18]      | 4  |
| $\alpha = 50.3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1};$<br>$\beta = -0.66;$<br>$E = 48 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 1.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$                                                                                                                                                                                                    | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w$                                                                                    | پانچال و همکاران<br>[19]   | 5  |
| $\alpha = 1 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1};$<br>$\beta = -0.8;$<br>$E = 48 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 1.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$                                                                                                                                                                                                                 | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.8}$                                                                                  | پالی و همکاران<br>[20]     | 6  |
| $\alpha = 9.46 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kJ}^{-1};$<br>$m = 0.18;$<br>$n = -1.43;$<br>$E = 28.5-42 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha P^m U^n \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right)$                                                                                                                | صالح و همکاران<br>[21]     | 7  |
| $\alpha = 0.01098 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1};$<br>$\beta = -1.547;$<br>$E = 22.618 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 0.96 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                                        | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4}$                                                                                  | نصر و گیوی<br>[22]         | 8  |
| -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $\frac{dR_f}{dt} = \left[ \frac{K_5 C_i U T_s^{2/3} \rho^{2/3} \mu^{-4/3}}{K_6 U^3 C_i^2 \rho^{-1/3} \mu^{-1/3} T_s^{2/3} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right)} \right] - K_4 U^{0.8}$ | یپ و همکاران<br>[23]       | 9  |
| $\alpha = 0.744688 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}; E = 28.5$<br>$\text{kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$                                                                                                                                                                                                                                         | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-0.35} Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.35}$                                                                               | ما<br>[24]                 | 10 |
| $\alpha = 1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1};$<br>$E = 51.07 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$\gamma = 7.799 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$                                                                                                                                                                                                                           | $\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-0.35} Pr^{-0.33} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.8}$                                                                                | وانگ<br>[25]               | 11 |
| این رابطه اصلاح شده معادله آستانه‌ای ارائه شده<br>در ردیف 5 است.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\frac{dR_f}{dt} = \frac{K_8}{h_f} \exp\left(-\frac{E}{RT_f}\right) - K_9 \tau_w$                                                                                                  | پالی و همکاران<br>[26]     | 12 |
| $E = 51.3 \text{ kJ mol}^{-1};$<br>$K_{10} = 8.98 \times 10^{-10} \text{ kg}^{2/3} \cdot \text{K}^{1/3} \cdot \text{m}^{5/3} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/3} \cdot \text{h}^{-1}$<br>$K_{11} = 3.81 \times 10^{-5} \text{ m}^{13/3} \cdot \text{kg}^{2/3} \cdot \text{s}^{8/3} \cdot \text{K}^{-2/3}$<br>$K_{12} = 1.09 \times 10^{-4} \text{ m}^{6/5} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{4/5} \cdot \text{K}^{-2/3} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ | $\frac{dR_f}{dt} = \frac{K_{10} f U T_s^{2/3} \rho^{2/3} \mu^{-4/3}}{1 + K_{11} U^3 f^2 \rho^{-1/3} \mu^{-1/3} T_s^{2/3} \exp\left(\frac{E}{RT_s}\right)} - K_{12} \tau_w$         | یانگ و کریتنندن<br>[27]    | 13 |

## 2-2- بانک اطلاعاتی مورد استفاده

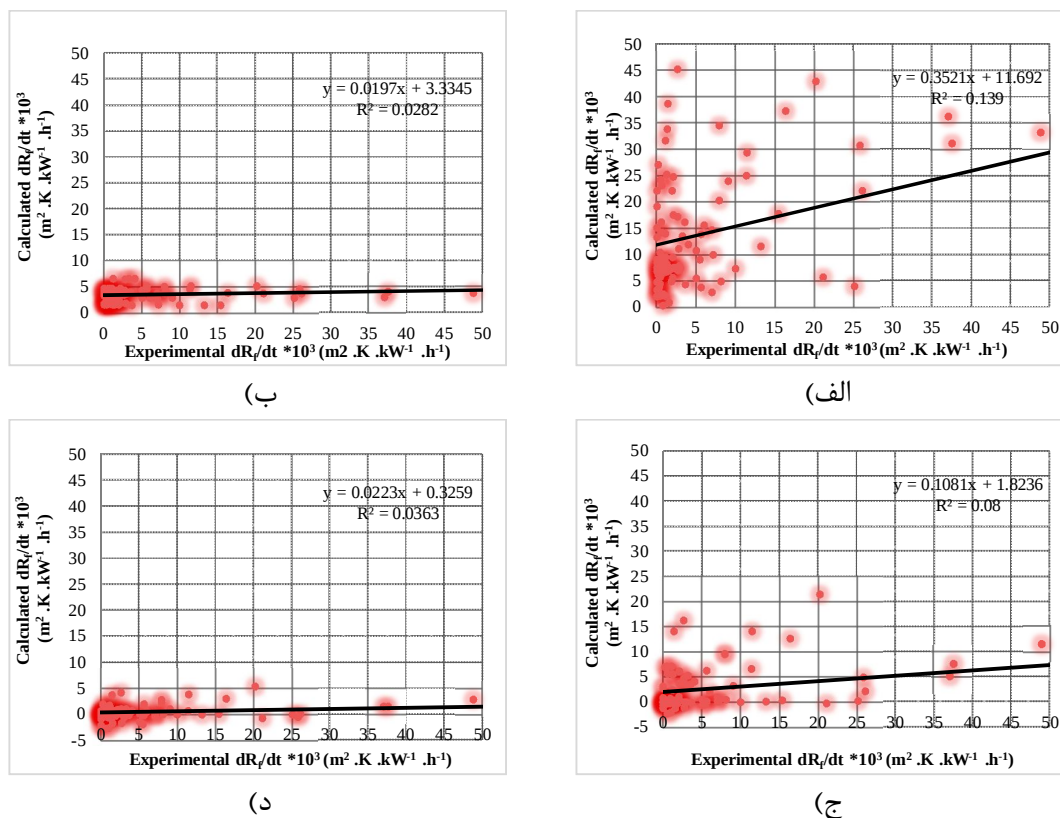
مطالعه حاضر به دنبال مقایسه معادلات آستانه‌ای تشکیل رسوب هیدروکربنی است تا از این طریق بتوان مناسب‌ترین معادله‌ای که نرخ رسوبگذاری را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند تعیین کرد. بدین منظور کامل‌ترین مجموعه داده موجود در منابع جهت اعمال بر معادلات آستانه‌ای ردیف‌های 4، 5، 6 و 10 جدول 2 جمع‌آوری شده است. لازم به ذکر است که به سبب موجود نبودن برخی از پارامترهای معادلات آستانه‌ای در مجموعه داده گردآوری شده، امکان ارزیابی برخی از معادلات فراهم نشد. به عنوان مثال، می‌توان به پارامتر فشار در معادله ردیف 7، ضریب اصطکاک در

معادلات ردیف‌های 9 و 13 و همچنین ضریب انتقال حرارت در معادلات ردیف‌های 12 و 14 جدول 2 اشاره کرد. مجموعه داده مذکور شامل متغیرهایی از جمله سرعت جریان نفت خام، قطر معادل مبدل، دمای سطح و دمای توده سیال هستند و از واحدهای پالایشگاهی مختلف در سراسر دنیا همچون استرالیا، ویتنام، گینه و غیره جمع‌آوری شده‌اند. لازم به ذکر است که بانک اطلاعاتی مورد استفاده عمدتاً برای مبدل‌های پوسته و لوله و یا دولوله ای ثبت و ضبط شده است [20, 28, 30].

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- مقایسه مدل‌های آستانه‌ای تشکیل رسوب

جهت مقایسه معادلات آستانه‌ای و انتخاب بهترین معادله، در شکل 1 نرخ رسوب محاسبه شده از هر معادله در مقابل نرخ رسوب تجربی رسم شده است تا دقت پیش‌بینی معادلات مشخص شود.



شکل 1- نرخ رسوب محاسبه شده بر حسب مقادیر تجربی برای معادلات (الف) پالی، (ب) ما، (ج) ابرت و (د) پانچال

همان‌طور که در شکل 1-الف تا 1-د قابل مشاهده است، به ترتیب معادلات پالی، ابرت، پانچال و ما نرخ‌های رسوب محاسباتی نزدیک‌تر به نرخ رسوب تجربی داشته‌اند. شیب تمام خط‌ها مثبت است و این یعنی روند کلی همه معادلات درست است اما دقت هر معادله با معادله دیگر تفاوت می‌کند. از آنجا که محدوده مقادیر محورهای عمودی و افقی شکل 1-الف تا 1-د یکسان است پس هرچه شیب خط‌های برازش داده شده روی این شکل‌ها به شیب خط  $y = x$  نزدیک‌تر باشد، معادلات دارای دقت بیشتری بوده‌اند. بنابراین آنگونه که مشخص است خط برازش شده روی شکل 1-ب با شیب 0/352 دارای نزدیک‌ترین شیب به خط  $y = x$  بوده است که نشان می‌دهد مقادیر نرخ رسوب محاسباتی

معادله پالی به مقادیر تجربی نزدیک‌تر بوده است. در نتیجه، معادله پالی بهترین معادله برای پیش‌بینی نرخ رسوب در این مجموعه داده است.

پس از بدست آمدن نرخ رسوب محاسباتی برای معادلات مختلف می‌توان انواع خطاها را برای هر معادله محاسبه کرد. خطای جذر میانگین مربعات<sup>6</sup>، خطای میانگین مربعات<sup>7</sup>، خطای انحراف مطلق میانه<sup>8</sup> و خطای درصد مطلق میانگین<sup>9</sup> مهم‌ترین خطاهای شناخته شده هستند که فرمول ریاضی آن‌ها در جدول 3 ارائه شده است. در ادامه، جدول 4 نتایج حاصل از اعمال این خطاها را برای معادلات مختلف ارائه می‌کند.

جدول 3- فرمول خطاهای محاسبه شده

| نوع خطا | MAPE                                 | MAD                            | RMSE                                                    | MSE                              | R <sup>2</sup>                                                                      |
|---------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| فرمول   | $\frac{(\sum  y_c - y_e  / y_e)}{n}$ | $\frac{(\sum  y_c - y_e )}{n}$ | $\left\{ \frac{[\sum (y_c - y_e)^2]}{n} \right\}^{0.5}$ | $\frac{[\sum (y_c - y_e)^2]}{n}$ | $1 - \frac{\sum (y_c - y_e)^2}{\sum (y_c - \bar{y})^2}$<br>$\bar{y} = \sum y_c / n$ |

جدول 4- انواع خطای معادلات آستانه‌ای

| خطا %  | MAPE    | MAD     | RMSE    | MSE      | R <sup>2</sup> | معادله |
|--------|---------|---------|---------|----------|----------------|--------|
| پالی   | 932.74  | 10.0015 | 13.7603 | 189.3452 | 0.139          |        |
| ابرت   | 175.58  | 5.262   | 11.3147 | 128.0224 | 0.08           |        |
| پانچال | 111.605 | 5.67    | 12.2723 | 150.6094 | 0.0363         |        |
| ما     | 225.86  | 5.5218  | 11.3057 | 127.8196 | 0.0282         |        |

در مورد خطاهای محاسبه شده، با توجه به اطلاعات مندرج در جدول 4، اگر خطای درصد مطلق میانگین در نظر گرفته شود معادلات نصر و وانگ دارای کمترین خطا و معادلات پالی و ابرت دارای بیشترین خطا خواهند بود. اما اگر معیار R<sup>2</sup> در نظر گرفته شود معادلات پالی و ابرت دارای کمترین خطا و معادلات نصر و ما دارای بیشترین خطا خواهند بود. اما علت خطای نسبی MAPE زیاد برخی از معادلات آستانه‌ای به خصوص معادله پالی علی‌رغم نزدیکی مقادیر تجربی و محاسباتی نرخ رسوب، مربوط به نرخ‌های رسوبگذاری پایین است چرا که به دلیل ماهیت فرمول خطای نسبی (حضور مقدار تجربی در مخرج کسردر جدول 3)، در جایی که نرخ رسوب تجربی دارای مقادیر کم باشد، حتی اگر بزرگی تفاوت نرخ رسوبگذاری محاسبه شده با نرخ رسوبگذاری تجربی بسیار کم باشد، خطای نسبی بسیار زیاد خواهد شد به طوری که در جایی که نرخ رسوبگذاری تجربی برابر با صفر است، این خطا بی‌نهایت خواهد شد. در نتیجه می‌توان گفت که بهترین معیار جهت تشخیص مناسب‌ترین و با دقت‌ترین معادله، خطوط برازش داده شده بر روی شکل 1-الف تا 1-د می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، معادلات پالی و ابرت که خطوط برازش داده شده روی آنها به ترتیب دارای شیب‌های 0/352 و 0/108 می‌باشند، بهترین معادلات آستانه‌ای جهت تخمین میزان نرخ رسوبگذاری در مبدل‌های حرارتی پیشگرمکن به شمار می‌روند. در پایان لازم به ذکر است که معادلات آستانه‌ای بر

<sup>6</sup> Root mean squared absolute error (RMSE)

<sup>7</sup> Mean squared error (MSE)

<sup>8</sup> Median absolute deviation (MAD)

<sup>9</sup> Mean absolute percentage error (MAPE)

مبنای استفاده از یک مجموعه داده آزمایشگاهی به جهت تعیین پارامترهای حاصل از برازش معادلات بر داده‌ها به دست می‌آیند. لذا دقت چنین معادلاتی به محدوده‌ی داده‌های آزمایشگاهی که بر مبنای آن توسعه یافته‌اند، محدود خواهد بود. در مطالعه حاضر گسترده‌ترین مجموعه داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده از منابع مختلف جهت ارزیابی معادلات آستانه‌ای به کار گرفته شد. بر همین مبنا چون معادلات مذکور عمدتاً در بازه خارج از محدوده‌ی آزمایشگاهی که بر مبنای آن توسعه پیدا کرده‌اند، ارزیابی می‌شوند لذا انحراف قابل توجهی در شکل 1 مشاهده می‌شود. لذا انحراف قابل توجهی در شکل 1 مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های آستانه‌ای تشکیل رسوب نشان می‌دهد که اگر این معادلات در بازه خارج از محدوده آزمایشگاهی که بر مبنای آن توسعه یافته‌اند استفاده شوند دقت مناسبی در پیش‌بینی نرخ تشکیل رسوب نخواهند داشت و این از جمله نقاط ضعف چنین معادلاتی به شمار می‌رود.

### 3-2- آنالیز حساسیت

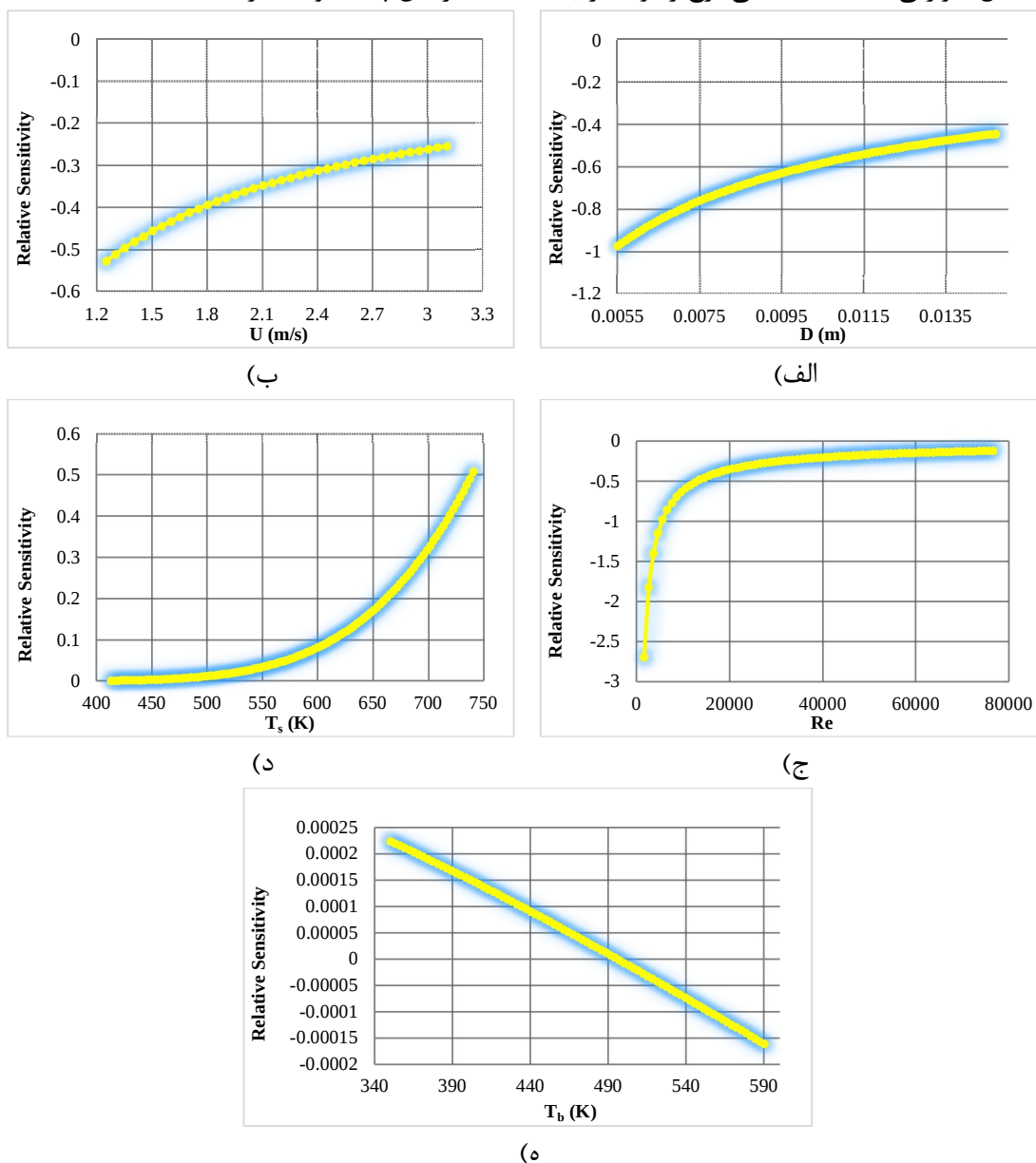
به منظور بررسی تاثیر هر یک از متغیرها بر روی هریک از معادلات، آنالیز حساسیت انجام می‌شود تا مشخص گردد که تغییر کدام یک از متغیرها بیشترین تاثیر را بر خروجی معادلات دارد. در این پژوهش برای بررسی میزان وابستگی نرخ رسوبگذاری نسبت به هر یک از پارامترها، از حساسیت نسبی که عبارتست از مشتق جزئی خروجی تابع نسبت به متغیر مورد نظر، استفاده شده است. معادله (2) فرمول ریاضی حساسیت نسبی را نشان می‌دهد [31].

$$S_k = \frac{\delta(dR_f / dt)}{\delta k} \bigg|_y \frac{k}{dR_f / dt} \quad (2)$$

در این معادله  $S_k$  حساسیت نسبی نرخ رسوب نسبت به پارامتر  $k$  است و اندیس  $y$  نشان می‌دهد که بقیه پارامترها ثابت هستند. در اینجا به این دلیل که هدف، نه استفاده از تک تک داده‌ها به صورت جداگانه بلکه به دست آوردن یک منحنی برای حساسیت نسبی بوده است، بعد از به دست آوردن مشتق جزئی نرخ رسوب نسبت به هر پارامتر، برای مابقی پارامترها به عنوان مقادیر ثابت، میانگین مقادیر آنها در تمام نقاط استفاده شده است. در خصوص محاسبه حساسیت نسبی نرخ رسوب در معادله (2) لازم به ذکر است که متغیر مستقل، پارامتر  $k$  و متغیر وابسته نرخ رسوب می‌باشد. لذا برای ارزیابی حساسیت نسبی نرخ رسوب نسبت به این پارامتر، با توجه به اینکه مابقی پارامترها به عنوان مقادیر ثابت در آنالیز حساسیت بازه تغییر گسترده‌ای نداشته‌اند لذا از میانگین مقادیرشان در تمامی نقاط استفاده شده است. تمام نمودارهای حاصل از این معادله برای هر متغیر در بازه کمترین تا بیشترین مقدار آن متغیر در داده‌های موجود رسم شده‌اند. از فرمول حساسیت نسبی می‌توان متوجه شد که هر چه قدر مطلق حساسیت نسبی برای یک متغیر بزرگتر باشد، نرخ رسوبگذاری نسبت به آن متغیر حساس‌تر است.

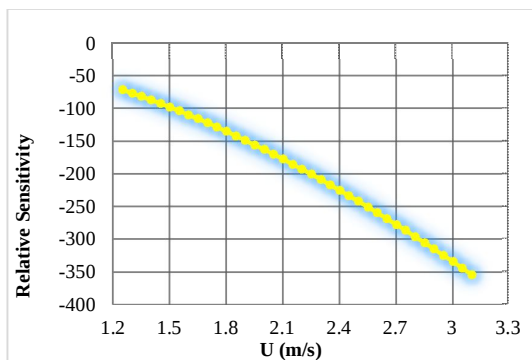
در شکل 2-الف تا 2-ه نمودارهای حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری نسبت به متغیرهای مختلف برای معادله پالی نشان داده شده است. بر این مبنا، بیشترین مقادیر قدرمطلق حساسیت نسبی به ترتیب مربوط به عدد رینولدز، قطر معادل، سرعت سیال و دمای سطح است. بنابراین بیشترین تاثیر بر معادله پالی را عدد رینولدز، قطر معادل و سرعت سیال دارند. همچنین مطابق با آنچه که در شکل 2 رسم شده است، می‌توان دریافت که نرخ رسوبگذاری در مبدل‌های حرارتی پیشگرمکن بر مبنای معادله آستانه‌ای پالی با افزایش قطر معادل مبدل، سرعت جریان سیال هیدروکربنی و دمای سطح افزایش و با افزایش دمای توده سیال هیدروکربنی کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین، نتایج حاصل در

شکل 2 مویید آن است که حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری نسبت به عدد رینولدز و دمای سطح مبدل در بازه‌های مختلف متفاوت است. بر این مبنا، در مقادیر پایین عدد رینولدز (پایین بودن سرعت جریان سیال)، نرخ رسوبگذاری معادله پالی نسبت به سرعت جریان و قطر معادل مبدل به شدت بالا می‌باشد و این در حالی است که با افزایش سرعت جریان سیال یا قطر معادل مبدل و به تبع آن افزایش عدد رینولدز رفتار مجانبی برای حساسیت نسبی مشاهده می‌شود. بدین معنی که حساسیت نسبی معادله پالی نسبت به عدد رینولدز در مقادیر بالای این عدد ناچیز می‌باشد. برای حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری در معادله پالی نسبت به دمای سطح مبدل می‌توان گفت که با افزایش دمای سطح مبدل حرارتی حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری به شدت افزایش پیدا خواهد کرد.

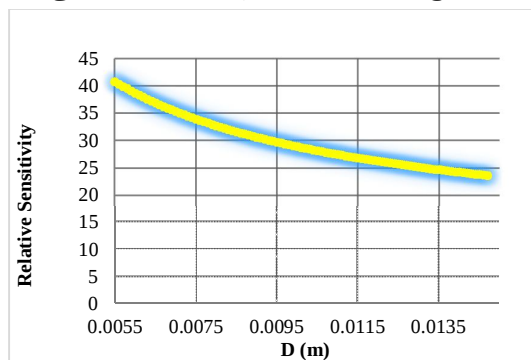


شکل 2- حساسیت نسبی نرخ رسوب در معادله ی پالی نسبت به متغیرهای الف) قطر معادل، ب) سرعت متوسط جریان، ج) عدد رینولدز، د) دمای سطح و ه) دمای توده سیال

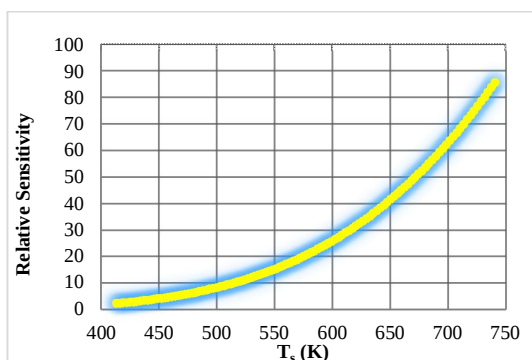
در شکل 3-الف تا 3-و نمودارهای حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری نسبت به متغیرهای مختلف برای معادله پانچال رسم شده است. با توجه به شکل‌های مذکور می‌توان گفت که به ترتیب عدد رینولدز، سرعت جریان سیال، دمای سطح، قطر معادل، تنش برشی و دمای توده سیال بیشترین تاثیر را بر نرخ رسوبگذاری در معادله پانچال خواهند داشت. بر مبنای آنچه که در شکل 3 رسم شده است، می‌توان دریافت که نرخ رسوبگذاری بر مبنای معادله آستانه‌ای پانچال با افزایش قطر معادل مبدل و سرعت جریان سیال (عدد رینولدز) و نیز تنش برشی جریان سیال روی دیواره مبدل کاهش پیدا خواهد کرد. این مسئله برای دمای سطح و دمای توده سیال متفاوت می‌باشد به طوری که با افزایش درجه حرارت توده سیال و نیز سطح مبدل نرخ رسوبگذاری بر مبنای معادله پانچال افزایش پیدا خواهد کرد. بعلاوه مطابق شکل 3-ج، حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری معادله پانچال در بازه‌های مختلف عدد رینولدز متفاوت است به نحوی که برای مقادیر پایین عدد رینولدز حساسیت نسبی به شدت بالا می‌باشد و با افزایش عدد رینولدز حساسیت نسبی کاهش پیدا خواهد کرد لذا رفتار مجانبی برای حساسیت نسبی نرخ رسوبگذاری معادله پانچال بر حسب عدد رینولدز در مقادیر بالای این عدد قابل مشاهده است. در رابطه با اثر تنش برشی و حساسیت نسبی در شکل 3-و مشاهده می‌شود که پس از یک ناحیه انتقالی کوچک رفتار حساسیت نسبی بر حسب تنش برشی رفتاری مجانبی خواهد داشت. علت افزایش و کاهش ناگهانی حساسیت نسبی یا به عبارت دیگر نرخ رسوبگذاری بر حسب تنش برشی می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد. دفع احتمالی رسوب هیدروکربنی تشکیل شده روی سطح داخلی مبدل از طریق اعمال تنش برشی ناشی از جریان سیال می‌تواند منجر به کاهش نرخ رسوبگذاری گردد اما از طرف دیگر بخشی از ذرات کنده شده از سطح مبدل ممکن است در اثر مکانیسم‌های نشست مجدداً روی سطح مبدل نشست پیدا کنند و از این طریق نرخ رسوبگذاری را دچار افزایش ناگهانی کنند.



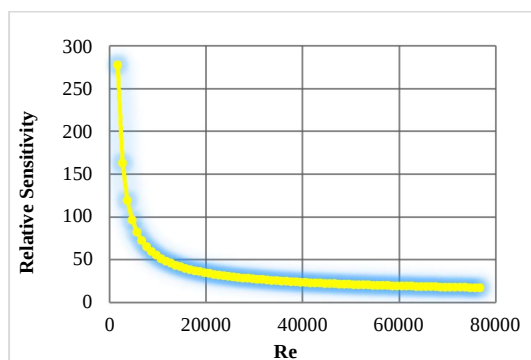
(ب)



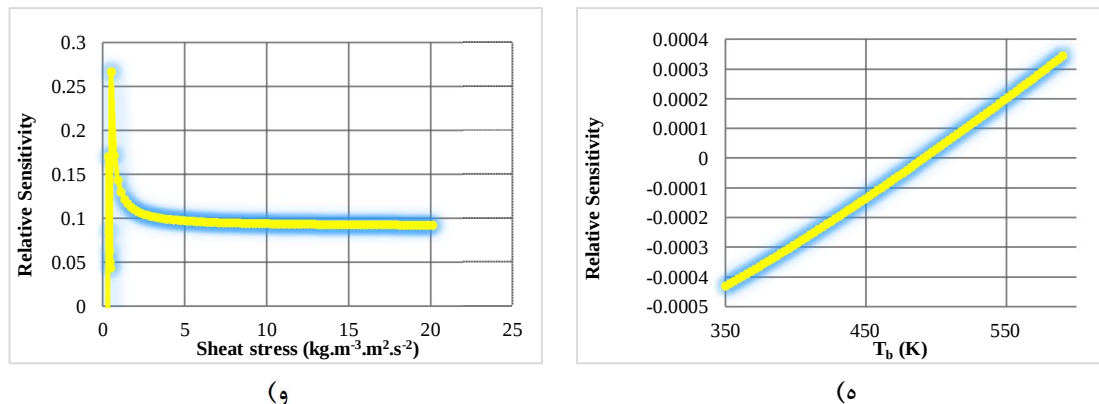
(الف)



(د)



(ج)



شکل 3- حساسیت نسبی نرخ رسوب در معادله ی پانچال نسبت به متغیرهای الف) قطر معادل، ب) سرعت متوسط جریان، ج) عدد رینولدز، د) دمای سطح، ه) دمای توده سیال و و) تنش برشی

بر مبنای بررسی آنالیز حساسیت، جدول 5 مؤثرترین پارامترهای هر یک از معادلات آستانه‌ای را ارائه می‌کند. در مورد آنالیز حساسیت نسبی باید گفت که اگر معادله‌ای دارای مقادیر بسیار زیاد حساسیت نسبی نسبت به یک یا چند پارامتر باشد، با یک تغییر کوچک در این متغیرها نتایج بسیار تغییر خواهند. از طرف دیگر اگر نرخ رسوب محاسباتی یک معادله دارای حساسیت نسبی با مقادیر بسیار کم نسبت به تمام متغیرهای موجود در آن معادله باشد، به هر میزان که متغیرها افزایش یا کاهش یابند، تاثیر چندانی بر نرخ رسوبگذاری محاسباتی نخواهند داشت.

جدول 5- مؤثرترین پارامترهای معادلات آستانه‌ای

| نام معادله    | مؤثرترین پارامترها (به ترتیب بیشترین اثرگذاری از راست به چپ) |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| معادله پالی   | عدد رینولدز - قطر معادل - سرعت جریان سیال                    |
| معادله ابرت   | دمای سطح - سرعت جریان سیال - تنش برشی                        |
| معادله پانچال | عدد رینولدز - دمای سطح - سرعت جریان سیال                     |
| معادله ما     | دمای توده - عدد رینولدز                                      |

#### 4- نتیجه‌گیری

عمده نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه به شرح زیر است:

- براساس شیب خطوط برازش شده روی داده‌های نرخ رسوب محاسباتی بر حسب مقادیر مشابه تجربی، معادله پالی با شیب 0/352 بیشترین دقت را در پیش‌بینی نرخ رسوب دارد. پس از آن به ترتیب معادله‌ی ابرت با شیب 0/108، معادله‌ی پانچال با شیب 0/022 و معادله‌ی ما با شیب 0/019 قرار دارد.
- با بررسی جامع آنالیزهای حساسیت صورت گرفته، به عنوان یک تخمین کلی، اگر تعداد داده‌های برابر برای همه‌ی پارامترها در نظر گرفته شود، می‌توان گفت که معادلات پانچال، ابرت، ما و پالی به ترتیب با مقادیر حساسیت نسبی متوسط 48/57، 39/98، 1/27 و 0/29 دارای بیشترین حساسیت نسبی هستند.
- به طور کلی مؤثرترین پارامترها بر پیش‌بینی نرخ رسوب براساس آنالیزهای حساسیت جامع صورت گرفته، عدد رینولدز و دمای سطح می‌باشند. بنابراین، اگر فقط معیار حساسیت نسبی در نظر گرفته شود بهترین معادلات برای پیش‌بینی نرخ رسوب به ترتیب معادلات پانچال، ابرت، ما و پالی خواهند بود. با توجه به اینکه

معیار حساسیت نسبی یک معیار جامع و کامل نیست و تنها معیار موجود برای آنالیز حساسیت نمی‌باشد، می‌توان جهت انتخاب بهترین معادلات، معیار قبلی یعنی نزدیکی مقادیر محاسباتی و تجربی را به عنوان معیار اصلی و معیار آنالیز حساسیت را به عنوان معیار فرعی در نظر گرفت. بر این مبنا، بهترین معادلات برای پیش‌بینی نرخ رسوب‌گذاری به ترتیب معادلات پالی، ابرت و پانچال هستند.

- در پایان لازم به ذکر است که در مطالعات گذشته که بر مبنای آن‌ها کامل‌ترین مجموعه بانک داده جمع‌آوری و متداول‌ترین معادلات آستانه‌ای تشکیل رسوبات هیدروکربنی بررسی شدند، اثر چرخه دما و نیز غلظت رسوب در خوراک لحاظ نشده است و بنابراین می‌بایست در پژوهش‌های آتی در دستور کار قرار بگیرد. لازم به ذکر است که اکثر مطالعات آزمایشگاهی پیشین برای بررسی تشکیل رسوب هیدروکربنی در مبدل‌های حرارتی از ستاپ‌های آزمایشگاهی با سیستم بازچرخانی استفاده کرده‌اند. در این روش، خوراک در سیستم به صورت مرتب گردش می‌کند و بنابراین مشخصات و ترکیب خوراک برای آزمایشات پیاپی عوض خواهد شد و دیگر مشابهتی با نوع اولیه ندارد. این در حالی است که سطوح مبدل‌های حرارتی عملیاتی در پالایشگاه‌ها همواره در معرض جریان نفت خام تازه قرار دارند و هر جریان مشخص از سیال فقط یکبار در مبدل حرکت دارد و مجدداً به سیستم برگشت نمی‌کند. تغییر مشخصات خوراک در معرض انتقال حرارت و نیز تغییر ترکیب خوراک به سبب ترسیب و نشست رسوبات هیدروکربنی روی سطوح مبدل‌های پیشگرمکن از مواردی به شمار می‌روند که در آزمایشات مغفول می‌مانند.

## 5- فهرست علائم

علائم انگلیسی

|                      |                                                              |
|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| $C'$                 | غلظت رسوب، $\text{kg/m}^3$                                   |
| $C_b$                | غلظت توده، $\text{kg/m}^3$                                   |
| $C_{Di}$             | غلظت رسوب در سطح مشترک سیال/رسوب، $\text{kmol/m}^3$          |
| $C_f$                | ضریب اصطکاک، -                                               |
| $D$                  | قطر معادل مبدل، m                                            |
| $d_o$                | قطر خارجی لوله مبدل، m                                       |
| $d_i$                | قطر داخلی لوله مبدل، m                                       |
| $E$                  | انرژی فعال‌سازی، J/mol                                       |
| $f$                  | ضریب اصطکاک داریسی، -                                        |
| $h_f$                | ضریب انتقال حرارت بر مبنای دمای فیلم، $\text{W/m}^2\text{K}$ |
| $J$                  | شار جرمی رسوب، $\text{kg/m}^2\text{s}$                       |
| $K_1 \square K_{16}$ | ثوابت معادلات آستانه‌ای                                      |



|              |                                           |
|--------------|-------------------------------------------|
| $K_m$        | ضریب انتقال جرم حل شونده، m/s             |
| $K_r$        | نرخ واکنش، m/s                            |
| $K_t$        | ضریب انتقال جرم، m/s                      |
| $k$          | هدایت حرارتی، W/m.K                       |
| $M$          | جرم رسوب، kg/m <sup>2</sup>               |
| $m$          | ثابت معادله آستانه‌ای                     |
| $n$          | ثابت معادله آستانه‌ای، تعداد داده         |
| $P$          | فشار مطلق، kPa                            |
| $Pr$         | عدد پراتل، -                              |
| $q$          | شار حرارتی، kJ/m <sup>2</sup> s           |
| $R$          | ثابت جهانی گازها، J/mol.K                 |
| $Re$         | عدد رینولدز، -                            |
| $R_f$        | مقاومت رسوب، m <sup>2</sup> K/W           |
| $R'_f$       | مقاومت مجانی رسوب، m <sup>2</sup> K/W     |
| $S_k$        | حساسیت نسبی، -                            |
| $S$          | احتمال چسبندگی، -                         |
| $T_b$        | دمای توده سیال، K                         |
| $T_f$        | دمای فیلم، K                              |
| $T_s$        | دمای سطح، K                               |
| $t$          | زمان، s                                   |
| $U$          | سرعت، m/s                                 |
| $W$          | نرخ جرمی، kg/s                            |
| $x$          | ضخامت، m                                  |
| $y_c$        | نرخ رسوب محاسبه شده، m <sup>2</sup> K/W.s |
| $y_e$        | نرخ رسوب تجربی، m <sup>2</sup> K/W.s      |
| علائم یونانی |                                           |
| $\alpha$     | ثابت معادله آستانه‌ای                     |



|                |                                         |
|----------------|-----------------------------------------|
| $\beta$        | ثابت معادله آستانه‌ای                   |
| $\gamma$       | ثابت معادله آستانه‌ای                   |
| $\theta$       | کسری از سطح که توسط رسوب پوشانده شده، - |
| $\rho$         | چگالی، $\text{kg/m}^3$                  |
| $\phi$         | شار، $\text{kg/m}^2\text{s}$            |
| $\tau, \tau_w$ | تنش برشی، $\text{N/m}^2$                |
| زیر نویس       |                                         |
| $d$            | نشست                                    |
| $f$            | رسوب                                    |
| $r$            | دفع                                     |

## 6- منابع

- [1] A. A. Olajire, "A review of oilfield scale management technology for oil and gas production", *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 135, no. 135, pp. 723–737, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.petrol.2015.09.011.
- [2] S. Alimohammadi, S. Zendehboudi, and L. James, "A comprehensive review of asphaltene deposition in petroleum reservoirs: Theory, challenges, and tips", *Fuel*, vol. 252, pp. 753–791, Sep. 2019.
- [3] H. Müller-Steinhagen, M. R. Malayeri, A. P. Watkinson, "Heat exchanger fouling: environmental impacts", *Heat Transf. Eng.*, vol. 30, no. 10–11, pp. 773–776, Sep. 2010.
- [4] S. Fakher, M. Ahdaya, M. Elturki, A. Imqam, "Critical review of asphaltene properties and factors impacting its stability in crude oil", *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 1183–1200, Mar. 2020.
- [5] U. Farooq, S. Lædre, and K. Gawel, "Review of asphaltenes in an electric field", *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 9, pp. 7285–7304, 2021.
- [6] L. Mahmoodi, A. H. Nikoo, M. R. Malayeri, M. Riazi, "Characterization of asphaltene removal mechanisms from well columns using surface energy", *Geoenergy Sci. Eng.*, vol. 225, p. 211679, Jun. 2023.
- [7] H. Müller-Steinhagen, M. R. Malayeri, A. P. Watkinson, "Fouling of heat exchangers-new approaches to solve an old problem", *Heat Transf. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2006.
- [8] M. Nategh, M. R. Malayeri, H. Mahdiyar, "A review on crude oil fouling and mitigation methods in pre-heat trains of Iranian oil refineries", *J. Oil, Gas Petrochemical Technol.*, vol. 4, no. Number 1, pp. 1–17, Dec. 2017.
- [9] A. Al-Hosani, S. Ravichandran, N. Daraboina, "Review of asphaltene deposition modeling in oil and gas production", *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 2, pp. 965–986, Jan. 2021.
- [10] E. M. Ishiyama, S. J. Pugh, H. U. Zettler, Economic and environmental implications of fouling in crude preheat trains, 2022.
- [11] F. Cibotti, E. Rogel, E. Forbes, L. Jackowski, Comparison of heat exchanger fouling test results for once-through and recirculating modes of operation at constant flowrate, 2022.
- [12] A. D. Smith, E. Hitimana, Incorporation of fouling deposit measurements in crude oil fouling testing and data analysis, 2022.
- [13] R. A. Shank, T. R. McCartney, Characterization of crude oil fouling: Defining the coke spectrum, 2019.
- [14] E. M. Ishiyama, S. J. Pugh, W. R. Paterson, G. T. Polley, D. I. Wilson, "Management of crude



- preheat trains subject to", Proceeding of international conference on heat exchanger fouling and cleaning, 2011.
- [15] H. M. Joshi, Crude heat exchanger fouling-field observations, 2022.
- [16] D. Kern, R. Seaton, "A theoretical analysis of thermal surface fouling", *Br. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 5, pp. 258–262, Apr. 1959.
- [17] B. Crittenden, S. Kolaczowski, S. Hout, "Modelling hydrocarbon fouling", *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 65, pp. 171–179, 1987.
- [18] W. Ebert, C. B. Panchal, "Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data", *Fouling mitigation of industrial heat exchange Equipment*, 1997, pp. 451–460.
- [19] C. B. Panchal, W. C. Kuru, C. F. Liao, W. A. Ebert, J. W. Palen, "Threshold conditions for crude oil fouling", *Understanding Heat Exchanger Fouling and its Mitigation*, 1999, pp. 273–279.
- [20] G. T. Polley, D. I. Wilson, B. L. Yeap, S. J. Pugh, "Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, no. 7, pp. 777–788, May 2002.
- [21] Z. Saleh, R. Sheikholeslami, A. P. Watkinson, "Fouling characteristics of a light Australian crude oil", *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications*, 2003, pp. 226–233.
- [22] M. R. Jafari Nasr, M. Majidi Givi, "Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1572–1577, Oct. 2006.
- [23] B. L. Yeap, D. I. Wilson, G. T. Polley, S. J. Pugh, "Mitigation of crude oil refinery heat exchanger fouling through retrofits based on thermo-hydraulic fouling models", *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 82, no. 1, pp. 53–71, Jan. 2004.
- [24] Y. Ma, *Experimental study on the fouling of heat exchanger in the crude distillation unit*, China University of Petroleum (East China), 2009.
- [25] Y. Wang, *Experiment study on the characteristic of crude oil fouling*, China University of Petroleum (East China), 2010.
- [26] G. T. Polley, E. Tamakloe, P.-N. M., *Models for chemical reaction fouling*, 2011.
- [27] M. Yang, B. Crittenden, "Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts", *Appl. Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 67–73, Jan. 2012.
- [28] Y. Wang, Z. Yuan, Y. Liang, Y. Xie, X. Chen, X. Li, "A review of experimental measurement and prediction models of crude oil fouling rate in crude refinery preheat trains", *Asia-Pacific J. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 607–625, Jul. 2015.
- [29] S. Saleh, *Fouling of organics in Australian crude oil refining*, University of New South Wales, 2005.
- [30] J. Aminian, S. Shahhosseini, "Neuro-based formulation to predict fouling threshold in crude preheaters", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 36, no. 5, pp. 525–531, May 2009.
- [31] R. H. McCuen, *Modeling hydrologic change :statistical methods*, 1st ed. CRC Press, 2003.