



بررسی پدیده‌های تأثیرگذار بر رسوب ذرات آسفالتین با استفاده از دیدگاه اوایلر-لاگرانژ در پیش گرم کن‌های نفت خام

امیرحسین نظری¹، محمد مهدی هیهات^{2*}، اشکان ترابی فارسانی¹، رضا مداحیان²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* mmheyhat@modares.ac.ir، 14115-143 صندوق پستی

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1396

پذیرش: 11 بهمن 1396

ارائه در سایت: 10 اسفند 1396

کلید واژگان:

رسوب

آسفالتین

اوایلر-لاگرانژ

سرعت بحرانی نشست

چکیده

یکی از مشکلات جدی موجود در صنعت نفت و پتروشیمی، رسوبگذاری نفت خام در لوله‌های پیش گرمکن واحد تقطیر است. رسوبگذاری باعث افزایش مقاومت حرارتی و افزایش افت فشار در لوله‌های پیش گرمکن شده که منجر به افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان کلی سیستم می‌شود. عامل اصلی رسوب در لوله‌های پیش گرمکن ماده‌ای به نام آسفالتین است که ترکیب مولکولی مشخصی ندارد. به طور کلی رسوبگذاری شامل دو مرحله انتقال ذرات نامحلول به نزدیکی سطح و اتصال ذرات به سطح است. مشکل عمده‌ی موجود در روند شبیه‌سازی‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده است، عدم توجه کافی به پدیده‌های موجود در نزدیکی سطح و عدم موفقیت در مدل‌سازی درست مرحله‌ی اتصال است. در این پژوهش با تمرکز بر جریان نزدیک مرز، موسوم به لایه‌ی مرزی، سعی شده تا پدیده‌هایی که در نزدیک سطح بر روند رسوب ذرات اثرگذار است بررسی شود. جهت رسیدن به این هدف مسیر حرکت ذرات با استفاده از دیدگاه اوایلر-لاگرانژ دنبال شده و مرحله‌ی اتصال با استفاده از مفهوم سرعت بحرانی نشست مدل شده است. حل گر عددی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود برای ذرات معلق در هوا اعتبارسنجی شده و نتایج حاصل با نتایجی که از مشاهده به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی به دست آمده، مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نیروی غالب وارد بر ذرات در لایه‌ی مرزی که موجب نشست می‌شود، نیروی بروانی است. سرعت نشست برای قطره‌های مختلف محاسبه شده و نشان داده شد که با کاهش قطر ذرات، سرعت نشست افزایش می‌یابد.

Investigating the Effecting Phenomena on the Asphaltene Particle Deposition in Crude Oil Preheaters Using the Eulerian-Lagrangian approach

Amir Hossein Nazari, Mohammad Mahdi Heyhat*, Ashkan Torabi Farsani, Reza Maddahian

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, mmheyhat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 January 2018

Accepted 31 January 2018

Available Online 01 March 2018

Keywords:

Deposition

Asphaltene

Eulerian-Lagrangian

Deposition Velocity

ABSTRACT

One of the serious problems in the oil and petrochemical industry is the deposition of crude oil in the preheaters of the distillation unit. Deposition increases the thermal resistance and increases the pressure drop in preheaters, which leads to increase of energy consumption and decrease of overall system efficiency. The main source of deposit in preheaters is a substance called asphaltene, which does not have a definite molecular composition. Generally, deposition involves two stages; one is the transport of insoluble particles to the surface and the other is to stick particles to the surface. So far, a major problem in the simulations is the lack of attention to phenomena that can play an important role near the surface and failure in modeling of particle stacking correctly. In this study, focusing on the boundary layer flow, phenomena that affect the particle deposition process near the surface were investigated. In this regard, the path of motion of particles is followed by Euler-Lagrangian approach, and the bonding stage is modeled using the concept of deposition critical velocity. Numerical solver is validated using available experimental data for aerosol and also with the scanning electron microscopy data. Obtained results show that the dominant force that affects the particle motion in the boundary layer is Brownian force. The deposition velocity is calculated for different diameters and it is shown that with the decrease in the diameter of the particles, the deposition velocity increases.

1- مقدمه

سیستم می‌شود. از طرف دیگر خارج کردن بخشی از سیستم برای عملیات رسوب‌زدایی و هزینه‌های ناشی از آن بر هزینه‌های تعمیر و نگهداری یک واحد صنعتی می‌افزاید. صنعت نفت و پتروشیمی از صنایعی است که به شدت با پدیده‌ی رسوب و مشکلات ناشی از آن درگیر است. نفت خام مخلوطی از ترکیبات مختلف آلی با نقاط جوش متفاوت است. در طول فرآیند به‌دست آوردن نفت خام، از استخراج تا فرآوری، شرایط هیدرودینامیکی و نیز

یکی از چالش‌های مهم و قدیمی در صنایع، مشکلات ناشی از رسوب است. با تشکیل رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت، ضریب کلی انتقال حرارت و سطح مقطع عبوری جریان کاهش می‌یابد. بنابراین برای انتقال حرارت مورد نیاز سیستم و همچنین غلبه بر افت فشار ناشی از کاهش سطح مقطع عبوری جریان، نیاز به مصرف انرژی بیشتری است که منجر به کاهش راندمان

Please cite this article using:

A. H. Nazari, M. M. Heyhat, A. Torabi Farsani, R. Maddahian, Investigating the Effecting Phenomena on the Asphaltene Particle Deposition in Crude Oil Preheaters Using the Eulerian-Lagrangian approach, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 208-218, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با پیشرفت فناوری در زمینه‌ی علوم کامپیوتر و به وجود آمدن توانایی انجام محاسبات سنگین، شبیه‌سازی پدیده‌های سیالاتی به‌صورت عددی بسیار رایج شده است. شبیه‌سازی عددی فرآیند رسوب در نفت خام به دو شیوه‌ی لاگرانژی و اویلری انجام می‌شود.

پژوهش‌های سوزا و همکاران [8]، بیات و همکاران [9] و حق‌شناس‌فرد و هومن [10] از جمله تلاش‌های صورت گرفته جهت مدل‌سازی رسوب در نفت با استفاده از دیدگاه اویلر-اویلر است. با استفاده از دیدگاه اویلری می‌توان تشکیل فاز نامحلول در جریان و مرحله‌ی انتقال فاز نامحلول به نزدیکی سطح جامد را با دقت خوبی مدل کرد. اما دیدگاه اویلری کمبودهای آشکاری جهت مدل‌سازی مرحله‌ی اتصال دارد. در برخی تحقیقات سعی شده که این خلأ با استفاده از ضریبی به نام احتمال چسبندگی³ که وابسته به سرعت جریان است جبران شود. احتمال چسبندگی متناسب با نسبت نیروهای چسبندگی بین سطوح به نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذره است [11]. اگرچه استفاده از این ضریب نتایج حاصل از مدل‌سازی را بهبود می‌بخشد اما استفاده از این ضریب نه تنها دقت کافی را ندارد بلکه به‌طور کامل منطبق بر فیزیک مسئله نیست. بنابراین جهت مدل‌سازی پدیده‌های نزدیک مرز جامد از جمله برخورد ذرات با سطح و چگونگی اتصال ذرات با سطح نیازمند استفاده از دیدگاه اویلر-لاگرانژ هستیم.

اکثر کارهایی که تاکنون در زمینه نشست ذرات با استفاده از دیدگاه اویلر لاگرانژ انجام شده است در مورد نشست ذرات معلق در هوا⁴ بوده است. از این دسته از تحقیقات می‌توان به مقالات مک لافمن [12]، فان و احمدی [13] و هی و احمدی [14] اشاره کرد.

مطالعاتی در زمینه نشست ذرات در مایع نیز انجام شده است. به‌عنوان مثال، مانیرو و کانو مدلی برای نشست ذرات جامد در سیالی با فاز مایع، ارائه دادند [15]. آن‌ها دیواره‌ی لوله را به‌طور کامل صاف فرض کرده و از تأثیرات ناهمواری سطح صرف نظر کردند. آن‌ها همچنین مرحله‌ی جدایش ذرات نشست کرده و بازگشت آن‌ها به جریان اصلی را نادیده گرفتند. مانیرو و کانو، با مدل‌سازی نیروهای وارد بر ذره از جمله نیروهای درگ⁵، لیفت⁶ و نیروهای بخشی و فرض اثرگذاری یک طرفه‌ی ذرات و سیال موفق به دنبال کردن مسیر ذرات در جریان شدند. مانیرو و کانو با استفاده از تئوری نیروهای چسبندگی در زمینه‌ی اتصال ذرات به دیواره مدل خود را کامل کردند [16]. همان‌طور که گفته شد علت انتخاب دیدگاه اویلر-لاگرانژ در این پژوهش، بررسی پدیده‌های نزدیک سطح جامد و مدل‌سازی مرحله‌ی اتصال است. میهل و همکاران مسائل مربوط به مدل‌های پراکندگی تصادفی در رابطه با رسوب ذرات میکرو و نانو را در جریان‌های آشفته در نزدیکی دیواره مورد بررسی قرار داده‌اند [17]. آن‌ها برای در نظر گرفتن تأثیرات اغتشاشات جریان بر مسیر حرکت ذرات، سرعت لحظه‌ای سیال حامل را با توجه به ناهمسانگردی آشفتگی مدل کرده و تأثیرات آن را بررسی کردند.

هی و وانگ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ⁷ جهت مدل‌سازی فاز پیوسته و با بهره‌مندی از دیدگاه اویلر-لاگرانژ جهت تعیین مسیر حرکت ذرات فاز گسسته، به مدل‌سازی پخش و رسوب ذرات در نزدیکی دیواره پرداختند [18]. آن‌ها از تأثیر برخورد ذرات با یکدیگر و تأثیرات ذره بر میدان جریان صرف‌نظر کردند و خواص اغتشاشی جریان و

ترمودینامیکی تغییر می‌کند. این تغییرات در مواردی باعث بروز مشکلاتی در بخش‌های مختلف صنایع نفتی می‌گردد. یکی از شناخته شده‌ترین و مهم‌ترین این مشکلات، رسوب آسفالتین است که باعث تحمیل هزینه‌های فراوان در طول فرآیند استحصال نفت خام می‌گردد [1].

در تمام فرایندهای پالایش نفت خام امکان رسوب‌گذاری وجود دارد. اما بیش از 50 درصد کل رسوب‌گذاری در پیش‌گرم‌کن‌های¹ واحد تقطیر نفت خام² اتفاق می‌افتد [2]. پیش‌گرم‌کن‌های نفت خام شبکه‌ای از مبدل‌های بازیاب حرارتی هستند که توسط گرمای بالای ناشی از محصولات خروجی برج تقطیر، دمای نفت خام را تا دمای مورد نیاز برای ورود به کوره‌ی واحد تقطیر بالا می‌برند. عامل اصلی رسوب در پیش‌گرم‌کن‌های نفت خام ماده‌ای به نام آسفالتین است [3]. آسفالتین معمولاً به عنوان سنگین‌ترین و قطبی‌ترین ترکیب نفت معرفی می‌شود. آسفالتین یک مولکول پیچیده است که فرمول شیمیایی مشخصی ندارد. این مولکول درشت که می‌تواند از نفت یا ذغال‌سنگ مشتق شود در نرمال آلکان‌ها حل نمی‌شود اما قابل حل در بنزن است. ساختار مولکولی آسفالتین هنوز هم به طور کامل حتی برای یک نفت خاص، شناخته نشده است و از یک چاه به چاه دیگر تغییر می‌کند. مولکول‌های آسفالتین می‌توانند تحت تأثیر تغییر در شرایط ترمودینامیکی جریان رسوب کنند [4].

پژوهش‌های فراوانی در زمینه‌ی رسوب به صورت کلی و رسوب در نفت به صورت خاص انجام شده است. نداشتن درک کامل از چگونگی تشکیل رسوب در نفت خام و عدم توانایی در مدل‌سازی تمام شرایط فیزیکی تأثیرگذار بر مسئله، باعث شده تمامی تلاش‌ها در جهت کاهش نرخ رسوب بازدهی موردنظر را نداشته باشند. از جمله اولین تلاش‌های انجام شده در زمینه‌ی مدل‌سازی رسوب در جریان نفت، رابطه‌ی نیمه‌تجربی ارائه شده توسط پانچال است [5]. او بیان کرد که با برون‌یابی داده‌های تجربی رسوب‌گذاری به سمت صفر، می‌توان به شرایطی از سرعت و دما رسید که در آن شرایط رسوب نفت خام تشکیل نشود. پانچال پیشنهاد کرد که رسوب‌گذاری در نفت خام توسط دو مکانیزم رقابتی کنترل می‌شود. اولین عامل که مربوط به واکنش شیمیایی است سبب تقویت رسوب‌گذاری می‌شود، در حالی که عامل دوم که مربوط به تنش برشی در سطح لوله است، منجر به تعدیل فرآیند و کاهش نرخ رسوب‌گذاری می‌گردد. اگر مکانیسم اول بر مکانیسم دوم غالب شود، رسوب‌گذاری بر روی سطح انتقال حرارت رخ می‌دهد. پلی و همکاران جمله مربوط به برداشت رسوب را وابسته به رینولدز جریان فرض کردند [6]. آن‌ها همچنین دمای دیواره را جایگزین دمای فیلم در رابطه‌ی ارائه شده توسط پانچال کردند و موفق شدند نتایج دقیق‌تری برای نفت خام حوزه‌ی آلاسکا به دست آورند. مزیت مهم مدل پلی نسبت به مدل پانچال این است که جمله مربوط به لایه بردار رسوب در این مدل وابسته به عدد رینولدز است. از این‌رو دیگر نیازی به محاسبه‌ی جمله تنش برشی در سطح رسوب وجود ندارد. نصر و گیوی مدلی دیگر برای رسوب‌گذاری ارائه دادند [7]. استفاده از این مدل به‌دلیل حذف عدد پرانتل از محاسبات و عدم نیاز به محاسبه‌ی آن راحت‌تر است. مزیت دسته مدل‌های آستانه رسوب‌گذاری، سهولت کاربرد است. اما از جمله مشکلات این مدل‌ها می‌توان به فراگیر نبودن این مدل‌ها اشاره نمود. در واقع این مدل‌ها عموماً برای نوع خاصی از نفت خام نتایج قابل قبول در پی دارد و امکان استفاده از آن‌ها به صورت گسترده و در شرایط کارکرد متنوع وجود ندارد.

³ Sticking Probability⁴ Aerosol⁵ Drag⁶ Lift⁷ Large eddy simulation (LES)¹ Preheat Train (PHT)² Crude Distillation Unit (CDU)

تأثیر گردابه‌ها بر انتقال ذرات را مورد بررسی قرار داده‌اند.

مقالاتی که تاکنون بررسی شد، مقالاتی کلی در مورد چگونگی نشست فاز گسسته در یک جریان بود. از تحقیقاتی که با استفاده از دیدگاه اولیو-لاگرانژ در مورد رسوب آسفالتین در جریان نفت انجام شده است می‌توان به پژوهش‌های کرو و خراط [19]، سیدباقری و میرزایی [20] و امانی و همکاران [21] اشاره کرد.

کرو و خراط دو مکانیسم پخش و اینرسی را جهت نشست ذرات آسفالتین در جریان نفت در نظر گرفتند. آن‌ها تأثیرات اندازه‌ی ذرات، سرعت جریان و لزجت سیال را بر مرتبه‌ی نرخ رسوب ذرات آسفالتین بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش لزجت سیال، نیروی درگ وارد بر ذرات را در سطح داخلی لوله افزایش می‌دهد و ذرات تمایل دارند که از سطح دور شوند و در نتیجه نرخ کلی رسوب با افزایش لزجت سیال کاهش می‌یابد [19]. سید باقری و میرزایی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ جهت مدل‌سازی اغتشاش جریان و ردیابی لاگرانژی ذرات در یک محیط سه‌بعدی، فرآیند رسوب آسفالتین در یک لوله‌ی عمودی را مدل‌سازی کردند. اثرات سرعت جریان و زبری سطح بر سرعت نشست نیز مورد بررسی قرار گرفته است [20]. امانی و همکاران با استفاده از ردیابی لاگرانژی ذرات آسفالتین و فرض کوپلینگ یک طرفه میان فاز گسسته و پیوسته، موفق به مدل‌سازی رسوب آسفالتین در سمت پوسته در مبدل‌های لوله پوسته شدند. آن‌ها با فرض یک محیط سه‌بعدی تأثیرات تنش برشی بر روی دیواره را بر رسوب آسفالتین بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش تنش برشی، میزان رسوب آسفالتین تا حد مشخصی کاهش یافته و پس از آن در حد تقریباً ثابتی باقی خواهد ماند [21].

از تمامی پژوهش‌های انجام شده در زمینه رسوب این گونه برمی‌آید که رسوب‌گذاری شامل دو مرحله‌ی کلی انتقال و اتصال است. در واقع هنگامی که موادی که باعث رسوب می‌شوند، به هر دلیلی به صورت نامحلول در سیال حامل درآیند، پس از آن جهت تشکیل رسوب باید به سطح انتقال حرارت منتقل و سپس به آن متصل شوند. در تمامی فرآیندهای رسوب‌گذاری، فاز نامحلول باید توسط مکانیزم‌هایی از جریان اصلی سیال به سمت منطقه‌ای که در آن شرایط برای نشست و اتصال به سطح انتقال حرارت و تبدیل آن به رسوب آماده است، منتقل شوند. اگر نرخ کلی رسوب‌گذاری وابستگی شدیدی به فرآیند انتقال داشته باشد، نرخ رسوب تنها باید یک تابع ضعیف از درجه حرارت جریان باشد، همچنین نرخ رسوب باید با افزایش سرعت، به صورت خطی در جریان آشفته و ضعیف‌تر در جریان آرام افزایش یابد [22]. هنگامی که انتقال فاز نامحلول انجام شد، مرحله‌ی نشست و اتصال رسوب به سطوح انتقال حرارت آغاز می‌گردد. عوامل موثر بر چسبندگی شامل انرژی سطحی، دمای سطح، نیروهای برشی موثر در سطح و همچنین ماهیت و ترکیب رسوبات قبلی موجود بر سطح است. اگر مرحله‌ی اتصال، نرخ رسوب‌گذاری کلی را کنترل کند، نرخ رسوب‌گذاری کلی باید به شدت با درجه حرارت سطح افزایش یابد زیرا مرحله‌ی اتصال بسیار حساس به دما است [23]. مکانیزم غالب در روند رسوب‌گذاری نفت خام، مرحله‌ی اتصال است. به همین دلیل مدل‌سازی درست این قسمت می‌تواند گامی مهم در جهت مدل‌سازی درست پدیده‌ی رسوب در نفت باشد. در مدل‌سازی‌هایی که تاکنون در زمینه رسوب نفت خام انجام شده است، نکته‌ای که جلب توجه می‌کند اختلاف زیاد نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از داده‌های تجربی است. علت عمده‌ی این اختلاف را می‌توان متوجه عدم مدل‌سازی درست مرحله‌ی

اتصال و نشست ذرات روی سطح دانست. در واقع مدل‌سازی انتقال ذرات آسفالتین تا نزدیکی مرز جامد با دقت قابل قبولی انجام می‌شود، اما از تأثیرات دیواره بر روی جریان در نزدیکی سطح، برهم‌کنش‌های سطح و ذره و تغییر مرتبه‌ی نیروهای تأثیرگذار چشم‌پوشی می‌شود. از بررسی مقالاتی که در زمینه‌ی رسوب آسفالتین در نفت به روش لاگرانژی انجام شده است این گونه برمی‌آید که در این تحقیقات عموماً از مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح جامد و برخورد ذرات با سطح چشم‌پوشی شده است. در این پژوهش سعی شده با تمرکز بر جریان نزدیک دیواره علت اختلافات موجود در نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی مشخص شود. آشفتگی‌های جریان در نزدیک مرز با استفاده از روابط تحلیلی در هر جهت به صورت جداگانه مدل شده و به سرعت متوسط جریان اضافه خواهد شد. مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح به وسیله‌ی مفهوم سرعت بحرانی برخورد مدل شده و تأثیرات برخورد دیواره با سطح جامد و برگشت ذرات به جریان مدل شده است. از آنجایی که مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح در مدل‌سازی نشست ذرات آسفالتین نقش مهمی دارد، تمرکز اصلی این پژوهش بر روی مدل‌سازی چگونگی نشست و اتصال ذرات روی سطح است. به دلیل کمبود اطلاعات تجربی مناسب، نحوه‌ی عملکرد نیروهای وارد بر ذرات به وسیله‌ی نتایج تجربی موجود برای ذرات معلق در هوا اعتبارسنجی شد. اگرچه تفاوت‌هایی میان نشست ذرات آسفالتین و ذرات معلق در هوا وجود دارد، اما استفاده از نتایج تجربی موجود در زمینه‌ی رسوب ذرات معلق در هوا می‌تواند اعتبار کد عددی را تا حد قابل قبولی تأیید کند. اطلاعات تجربی موجود در زمینه‌ی رسوب آسفالتین که با استفاده از مشاهده به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی به‌دست می‌آید محدود به تعیین قطر ذراتی است که می‌توانند روی سطح رسوب کنند. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی رسوب ذرات آسفالتین با این نتایج مقایسه شده و تطابق خوبی به دست آمده است. سایر نتایج تجربی ارائه شده در این زمینه عموماً مربوط به چگونگی افزایش مقاومت حرارتی ناشی از رسوب در لوله‌های پیش‌گرم‌کن است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان شرط مرزی جهت شبیه‌سازی‌هایی که کل لوله را مدل می‌کنند استفاده شود. در واقع هدف اصلی این پژوهش بررسی فیزیک جریان در نزدیکی مرز و بررسی تأثیر برهم‌کنش‌های سطح و ذره در نشست ذرات آسفالتین و به دست آوردن یک شرط مرزی مناسب جهت نشست ذرات آسفالتین است.

2- فیزیک مسئله

همان‌طور که بیان شد در این پژوهش تمرکز بر جریان نزدیک دیواره است، از این‌رو میدان حل، لایه‌ی مرزی توسعه یافته است. در واقع جریان در کل لوله بررسی نخواهد شد و فرض بر این است که ذرات به نزدیکی مرز جامد رسیده‌اند و رفتار ذرات در نزدیکی سطح جامد بررسی خواهد شد. شبیه‌سازی در لوله‌های افقی پیش‌گرم‌کن و به صورت دو بعدی انجام شده و تأثیر گرانش در حرکت ذرات در نظر گرفته شده است. لوله‌های پیش‌گرم‌کن تحت تأثیر شار حرارتی ثابت فرض شده است. شرایط لوله‌ی پیش‌گرم‌کن که جهت شبیه‌سازی انتخاب شده در جدول 1 آورده شده است. با توجه به عدد رینولدز، جریان داخل لوله آشفته است.

ذرات از فاصله‌ی $y^+ = 50$ به داخل میدان حل تزریق می‌شوند. مرز بالایی میدان حل در فاصله‌ی $y^+ = 100$ از دیواره قرار می‌گیرد و اگر ذرات از مرز بالایی عبور کنند از میدان حل خارج می‌شوند. توضیحات لازم جهت شرایط مرزی نشست ذرات روی دیواره در قسمت برهم‌کنش ذرات و سطح

جدول 1 ویژگی‌های لوله پیش‌گرم‌کن

Table 1 Characteristics of the Preheater Pipe

ویژگی فیزیکی	واحد	نماد	مقدار
قطر لوله	mm	D	25
سرعت متوسط	m/s	$\bar{U}$	1
سرعت اصطکاکی	m/s	u^*	0.0343
عدد رینولدز	---	Re	18125
شار حرارتی وارد بر دیواره	kW/m ²	$\dot{q}$	50

در نزدیکی دیواره، فرض همسانگردی نوسانات سرعت برقرار نخواهد بود. بنابراین نمی‌توان از روابطی مانند $k - \omega$ و $k - \epsilon$ که فرض همسانگردی نوسانات را دارند، جهت به‌دست آوردن نوسانات سرعت در نزدیکی مرز استفاده کرد. نوسانات سرعت در نزدیکی مرز برحسب فاصله بدون بعد از دیواره محاسبه می‌شود. برای مدل‌سازی ناهمسانگردی نوسانات سرعت در جریان نزدیک دیواره برای $y^+ < 100$ می‌توان از رابطه‌ی (2) استفاده کرد [27].

$$f_u = \frac{\sqrt{u'^2_{rms}}}{u^*} = \frac{0.4y^+}{(1 + 0.0239(y^+)^{1.496})}$$

$$f_v = \frac{\sqrt{v'^2_{rms}}}{u^*} = \frac{0.0116(y^+)^2}{(1 + 0.2039y^+ + 0.0014(y^+)^{2.421})} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (2) نشان‌دهنده‌ی سرعت اصطکاکی است. نتیجه این روابط حداکثر اندازه نوسانات سرعت در یک فاصله مشخص از دیواره است. این مقدار در یک عدد اتفاقی بین -1 تا 1 ضرب شده و به مقدار متوسط سرعت اضافه می‌شود.

در واقع سرعت کلی جریان در هر نقطه با استفاده از روابط (3) و (4) به دست می‌آید [27].

$$u = \bar{u} + u' \quad (3)$$

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$

در رابطه‌ی (3)، ζ یک عدد تصادفی بین -1 و 1 است. "شکل 2" نشان‌دهنده‌ی حداکثر اندازه‌ی نوسانات سرعت در نزدیکی مرز است که به وسیله‌ی سرعت اصطکاکی بدون بعد شده است.

برای افزایش راندمان کوره، نفت در لوله‌های پیش‌گرم‌کن تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد تا دمای آن تا حد مشخصی افزایش یابد. به همین دلیل دمای نفت در لوله‌های پیش‌گرم‌کن به صورت پیوسته در حال افزایش است. ناحیه‌ی نزدیک دیواره مکانی است که به شدت تحت تأثیر گرادیان دما است و از آنجایی که دمای سیال و گرادیان دما بر روی حرکت ذرات تأثیرگذار است، مشخص شدن چگونگی توزیع دما در نزدیکی مرز جامد امری ضروری

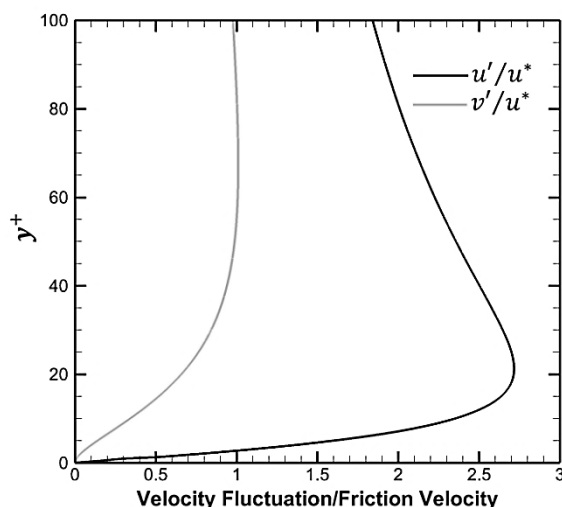


Fig. 2 Root mean square of the fluctuations of the current in relation to the frictional velocity near the solid surface

شکل 2 نسبت اندازه‌ی نوسانات جریان به سرعت اصطکاکی در نزدیکی سطح جامد

ارائه شده است. از آنجایی که تغییر شکل لحظه‌ای ذرات در هنگام برخورد با سطح تأثیر چندانی بر اتصال و یا سرعت جدایش ذرات از سطح جامد ندارند، ذرات به صورت کره‌هایی سخت بدون تغییر شکل در طول زمان حل در نظر گرفته می‌شوند [24]. کسر جرمی ذرات آسفالتین در جریان نفت در حدود 2.87×10^{-3} تا 6.32×10^{-3} است [25]. بنابراین می‌توان جریان نفت و آسفالتین را یک جریان رقیق در نظر گرفت و از برهم کنش ذرات با یکدیگر و ذرات بر جریان صرف‌نظر کرد (فرض کوپلینگ یک طرفه).

تغییرات سرعت و دمای سیال در ناحیه‌ی نزدیک مرز تنها در جهت عمود بر دیواره خواهد بود و در طول زمان ثابت است. جهت مدل‌سازی جریان سیال در نزدیکی سطح جامد از روابط توزیع لگاریتمی سرعت در نزدیکی مرز جامد استفاده می‌شود. توزیع لگاریتمی سرعت با استفاده از روابط تجربی تأیید می‌شود تا جایی که به آن قانون طبیعی یا قانون دیواره گفته می‌شود [26]. بنابراین تغییرات سرعت متوسط جریان تنها در جهت عمود بر دیواره و به صورت پیوسته در تمامی نقاط محاسبه خواهد شد.

در ادامه به بررسی جریان حامل در نزدیکی مرز خواهیم پرداخت و سپس عوامل موثر بر حرکت ذرات در نزدیکی مرز را معرفی خواهیم کرد. "شکل 1" نمایی از زیرلایه‌های لایه‌ی مرزی و چگونگی توزیع سرعت در این زیرلایه‌ها نشان داده شده است.

رابطه‌ی (1) تغییر سرعت جریان را برحسب فاصله بدون بعد از دیواره نشان می‌دهد [26].

$$\begin{aligned} u^+ &= y^+ & y^+ < 5 \\ u^+ &= 5 \ln(y^+) - 3.05 & 5 < y^+ < 30 \\ u^+ &= 2.5 \ln(y^+) - 5.5 & 30 < y^+ < 200 \end{aligned} \quad (1)$$

از آنجایی که نوسانات سرعت در نزدیکی مرز جامد می‌توانند نقش مؤثری در نشست ذرات ایفا کنند، لذا مدل‌سازی درست این نوسانات در این ناحیه گامی مهم در جهت شبیه‌سازی نشست ذرات خواهد بود.

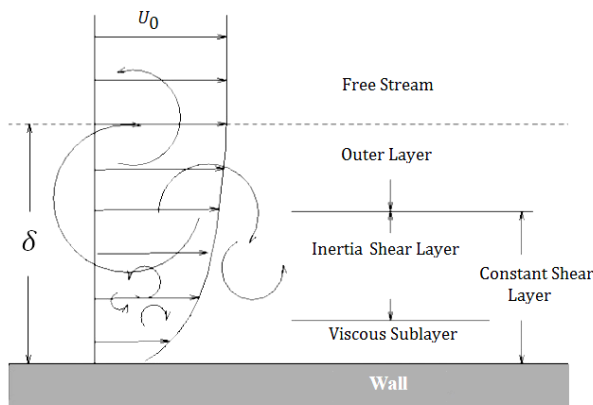


Fig. 1 A view of the sub layers of fluid flow near the solid surface

شکل 1 نمایی از زیرلایه‌های جریان در نزدیکی سطح جامد

باست^۵ بر روند حرکتی ذرات آسفالتین تأثیر چندانی ندارند و از مدل‌سازی آن‌ها صرف‌نظر شده است [20].

یکی از مهم‌ترین نیروهای وارد بر فاز گسسته در جریان‌های حاوی ذرات نیروی درگ است. نیروی درگ تقریباً در تمامی نواحی جریان از جمله نیروهای تأثیرگذار بر حرکت ذره است. این نیرو با استفاده از رابطه‌ی (11) تعریف می‌شود [24].

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_c (u_c - u_p) |u_c - u_p| \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (11)$$

که در آن u_c سرعت فاز پیوسته و C_D ضریب درگ است که به عدد رینولدز ذره بستگی دارد. در این پژوهش ضریب درگ با توجه به روابط (12) تعیین می‌شود [30].

$$\begin{aligned} \text{Re}_p &= \frac{\rho_c d_p |u_c - u_p|}{\mu_c} \\ \text{Re}_p < 1 &\rightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \\ \text{Re}_p > 1 &\rightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) \end{aligned} \quad (12)$$

از آنجایی که چگالی فاز گسسته و پیوسته در جریان نفت و آسفالتین به هم نزدیک است، نیروی جرم مجازی از دیگر نیروهای تأثیرگذار بر مسیر حرکت ذرات است. از آنجایی که ذره جامد و سیال نمی‌توانند به‌صورت همزمان فضای فیزیکی یکسانی را اشغال کنند، ذره باید سیال هم حجم خود را نیز در هنگام حرکت جابجا کند. این نیرو ناشی از عکس‌العمل نیرویی است که ذره برای جابجایی سیال هم‌حجم خود به سیال وارد می‌کند. در واقع زمانی که یک ذره شتاب‌دار در یک سیال حرکت کند، به‌واسطه کار انجام شده توسط ذره، سیال نیز شتاب می‌گیرد. این مقدار کار اضافی، به اثر جرم مجازی معروف است. نیروی جرم مجازی از رابطه‌ی (13) محاسبه می‌شود [31].

$$F_{vm,i} = \frac{\rho_c V_p}{2} \left(\frac{Du_{c,i}}{Dt} - \frac{du_{p,i}}{dt} \right) \quad (13)$$

در رابطه‌ی (13) نشان‌دهنده‌ی حجم ذره و $(Du_{c,i}/Dt)$ مشتق مادی سرعت سیال است.

یکی از نیروهای تأثیرگذار بر مسیر حرکت ذرات کوچک، نیروی براونی است. این نیرو حاصل حرکت مولکول‌های سیال حامل است که بر حرکت ذرات اثر می‌گذارد. مومنتم لحظه‌ای که بر اثر برخورد میان مولکول‌های سیال حامل و ذرات معلق به ذره وارد می‌شود، موجب یک حرکت کاتوره‌ای و غیرقابل پیش‌بینی می‌شود. این حرکت با نام حرکت براونی شناخته می‌شود. برای مدل‌سازی نیروی براونی وارد بر ذره در راستای i از رابطه‌ی (14) استفاده شده است [32].

$$F_{Br,i} = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_{nn}}{\Delta t}} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (14) Δt گام زمانی، ζ_i یک عدد تصادفی به‌دست آمده از فرآیند اغتشاش سفید^۶ و مقدار S_{nn} از رابطه‌ی (15) به دست می‌آید.

$$S_{nn} = \frac{2k_B T \beta}{\pi m_p} \quad (15)$$

در رابطه‌ی (15) k_B ثابت بولتزمن^۷، T دمای سیال، m_p جرم ذره و β پویایی^۸ ذره نام دارد که برابر با عکس زمان ماند ذره است.

به علت وجود گرادیان دما در نزدیکی سطح جامد، یکی دیگر از نیروهایی که اثر آن بر حرکت ذرات مورد بررسی قرار گرفته است، نیروی ترموفورسیس

به نظر می‌رسد. از این‌رو از روابط مربوط به توزیع دمای بدون بعد در اطراف دیواره برحسب فاصله بدون بعد شده از دیواره استفاده شده است. دمای سیال با استفاده از رابطه‌ی (5) به صورت بدون بعد معرفی می‌شود [28].

$$T^+ = \frac{T_w - T}{T^*} \quad (5)$$

که در آن T_w دمای دیواره، T دمای سیال و T^* مقیاس دما در نزدیکی مرز است که در رابطه‌ی (6) تعریف می‌شود [28].

$$T^* = \frac{\alpha q_w}{ku^*} \quad (6)$$

که در آن α ضریب نفوذ گرمایی، q_w شار حرارتی وارد بر دیواره و k ضریب هدایت حرارتی سیال است. رابطه‌ی (7) توزیع دمای بدون بعد در نزدیکی دیواره را نشان می‌دهد [28].

$$\begin{aligned} T^+ &= \text{Pr} y^+ & y^+ < 5 \\ T^+ &= C_0 + C_1 y^+ + C_2 y^{+2} + C_3 y^{+3} & 5 < y^+ < 30 \\ T^+ &= 1.8 \ln(y^+) + 3.8 & 30 < y^+ < 200 \end{aligned} \quad (7)$$

C_0 ، C_1 ، C_2 و C_3 ضرایب موجود در رابطه‌ی (7) به شکل زیر تعریف می‌شود [28].

$$\begin{aligned} C_0 &= 1.28 - 2.88 \text{Pr} \\ C_1 &= -0.54 + 2.21 \text{Pr} \\ C_2 &= 0.0628 - 0.138 \text{Pr} \\ C_3 &= -0.00117 + 0.00224 \text{Pr} \end{aligned} \quad (8)$$

جهت پیش‌بینی دقیق مسیر حرکت ذرات، می‌بایست تمامی عوامل موثر بر حرکت ذرات در نظر گرفته شود. از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حرکت ذرات در نزدیکی دیواره می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1) تأثیر آشفتگی جریان حامل بر حرکت و پراکندگی ذرات

2) نیروهای هیدرودینامیکی و وزن ذرات

3) برخورد ذرات با مرز جامد

در قسمت قبلی توضیحات مربوط به میدان جریان سیال و چگونگی مدل‌سازی آشفتگی در نزدیکی مرز جامد بیان شد. در ادامه به دیگر عوامل تأثیرگذار بر حرکت ذرات خواهیم پرداخت.

2-1- نیروهای وارد بر ذرات

در روش اولیو-لاگرانژ مسیر حرکت هر ذره به‌طور جداگانه و با استفاده از روابط (9) و (10) محاسبه می‌شود [29].

$$d\vec{x}_p = \vec{u}_p(t) dt \quad (9)$$

$$d\vec{u}_p = \Sigma \vec{F} dt \quad (10)$$

در روابط (9) و (10) بردار مکان ذره، $\vec{u}_p$ بردار سرعت ذره و $\Sigma \vec{F}$ مجموع نیروهای وارد بر ذره است. در این پژوهش سرعت هر ذره با توجه به نیروهای وارد شده در هر گام زمانی با استفاده از روش رانج-کوتا^۱ مرتبه چهارم به دست می‌آید. سپس مکان هر ذره، با توجه به سرعت به دست آمده در آن گام زمانی و با استفاده از روش رانج-کوتا مرتبه چهارم محاسبه می‌شود. گام زمانی جهت ردیابی ذرات به‌وسیله انتخاب مقدار کمینه میان زمان ماند ذرات و مشخصه‌ی زمانی آشفتگی جریان مشخص می‌شود. استفاده از گام زمانی کوچک و بهره‌مندی از روش رانج-کوتا مرتبه چهارم در حل هر دو معادله‌ی سرعت و مکان، دقت حل را تا حد قابل قبولی افزایش می‌دهد.

مهم‌ترین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ذرات آسفالتین که بررسی آن‌ها در این مطالعه لازم است، عبارتند از: نیروی درگ، نیروی لیفت، نیروی جرم مجازی^۲، نیروی ترموفورسیس^۳ و نیروی براونی^۴. سایر نیروها از جمله نیروی

⁴ Brownian Force

⁵ Bassett Force

⁶ White noise process

⁷ Boltzmann constant

⁸ mobility

¹ Range-Kutta

² Virtual mass

³ Thermophoresis

شده می‌شوند. اما با افزایش سرعت ذرات در هنگام برخورد، احتمال برگشت ذرات پس از برخورد با دیواره نیز بالا می‌رود [36]. برگشت ذرات از سطح زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی جنبشی ذره به اندازه‌ای باشد که بر نیروی جاذبه‌ای وارد از طرف دیواره غلبه کند. اگر $u_y^{(0)}$ و $u_y^{(2)}$ به‌عنوان سرعت عمود بر سطح ذره پیش و پس از برخورد باشد و E انرژی پتانسیل برهم‌کنش سطح و ذره باشد، انرژی ذره در نزدیکی سطح پیش و پس از برخورد با سطح، به ترتیب برابر با $\frac{m}{2}u_y^{(0)2} + E^{(0)}$ و $\frac{m}{2}u_y^{(2)2} + E^{(2)}$ خواهد شد. با صرف‌نظر کردن از مقدار انرژی که به‌واسطه اثرات لزجت تلف می‌شود خواهیم داشت [36].

$$\frac{u_y^{(2)}}{u_y^{(0)}} = \left(e^2 - \frac{E^{(2)} - e^2 E^{(0)}}{\frac{m}{2} u_y^{(0)2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

هنگامی که $u_y^{(2)} = 0$ باشد ذره نمی‌تواند از سطح برگردد، در واقع شرط اتصال ذره روی سطح این است که سرعت برگشت ذره برابر صفر باشد. با این فرض و فرض $E^{(0)} = E^{(2)} = E$ می‌توان عبارتی برای سرعت بحرانی برخورد ذره با دیواره محاسبه کرد. منظور از سرعت بحرانی، سرعتی است که اگر ذره با سرعت عمودی کمتر از این مقدار با دیواره برخورد کرد، به دیواره متصل می‌شود و اگر سرعتی بالاتر داشته باشد پس از برخورد با دیواره به جریان برمی‌گردد. سرعت بحرانی برخورد با استفاده از رابطه‌ی (20) محاسبه می‌شود [36].

$$u_{y,c}^{(0)} = \left(\frac{2E}{m} \left(\frac{1 - e^2}{e^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

مقدار انرژی پتانسیل سطح با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [37].

$$E = \frac{A d_p}{12 y_0} \quad (21)$$
 در رابطه‌ی (21) ثابت هاماکر بین ذره و سطح، d_p قطر ذره و y_0 فاصله تعادلی میان ذره و سطح است که مقدار آن عموماً برابر با $4 \text{ \AA}$ فرض می‌شود. e نیز نشان‌دهنده‌ی ضریب الاستیسیته است که با فرض ذره‌ها به صورت کره‌هایی سخت، مطابق با رابطه‌ی (22) تعریف می‌شود [24].

$$e = -\frac{u_y^{(2)}}{u_y^{(0)}} \quad (22)$$

تغییر مومنتوم ایجاد شده در هنگام برخورد ذره با دیواره برابر با نیروی دافعه وارد بر ذره در مدت زمان برخورد ذره با دیواره است. در صورتی که سرعت ذره پیش از برخورد بیشتر از سرعت بحرانی باشد، جهت مشخص کردن سرعت ذره پس از برخورد، از جدول 3 استفاده می‌شود [24].

در جدول 3، f ضریب اصطکاک کلمبی و ϵ_x نشان‌دهنده‌ی نسبت سرعت در جهات مختلف است. رابطه‌ی بین این ضرائب در جهات مختلف به صورت زیر است [24].

$$\epsilon_x^2 + \epsilon_z^2 = 1 \quad (23)$$

جدول 3 سرعت ذره پس از برخورد با سطح [24]

شرایط	چگونگی تغییرات سرعت
$\frac{u_y^{(0)}}{ u } < -\frac{2}{7f(e+1)}$	$u_x^{(2)} = \left(\frac{5}{7}\right)(u_x^{(0)} - \frac{d_p}{5}\omega_z^{(0)})$ $u_y^{(2)} = -eu_y^{(0)}$
$-\frac{2}{7f(e+1)} < \frac{u_y^{(0)}}{ u } < 0$	$u_x^{(2)} = u_x^{(0)} - \epsilon_x f(e+1)u_y^{(0)}$ $u_y^{(2)} = -eu_y^{(0)}$

است. دمای یک ماده را می‌توان معیاری از جنبش مولکولی در آن ماده دانست. هنگامی که بخشی از سیال حامل دمای بیشتری دارد، جنبش مولکولی در آن بخش بیشتر است. در واقع اگر ذره در یک سیال با تغییرات دما قرار گیرد، مقدار نیروی ناشی از جنبش مولکولی سیال که به ذره وارد می‌شود در بخش گرم‌تر بیشتر است. این عدم تعادل در جنبش مولکولی که به واسطه گرادیان دما در دو طرف ذره به وجود می‌آید باعث وارد شدن یک نیرو در جهت خلاف گرادیان دما بر ذره می‌شود. این نیرو با استفاده از رابطه‌ی (16) محاسبه می‌شود [33].

$$F_{Th} = -D_{T,p} \frac{\nabla T}{T} \quad (16)$$

مقدار $D_{T,p}$ ضریب نیروی ترموفورسیس است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [33].

$$D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s \left(\frac{k}{k_p} \right) + C_t Kn}{\rho (1 + 3C_m Kn) (1 + 2 \left(\frac{k}{k_p} \right) + 2C_t Kn)} \quad (17)$$

در رابطه‌ی (17) مقادیر k و k_p به ترتیب، رسانایی حرارتی سیال و ذره است. $C_m = 1.14$ و $C_t = 2.28$ ، $C_s = 1.17$ ، همچنین Kn نشان دهنده‌ی عدد نودسن¹ است.

نیروی بعدی که اثر آن در این پژوهش بررسی شده است نیروی لیفت است. این نیرو به علت اختلاف فشار اطراف ذره که ناشی از وجود گرادیان سرعت سیال در لایه‌ی برشی است به وجود می‌آید. در واقع اختلاف سرعت در سطوح بالایی و پایینی ذره باعث وارد شدن این نیرو به ذره می‌شود. سفمن در سال 1956 رابطه‌ی زیر را برای نیروی لیفت ارائه داد [34].

$$\vec{F}_{Saff} = 1.61 d_p^2 \sqrt{\mu_c \rho_c} \frac{(\vec{u}_c - \vec{u}_p) \times \vec{\omega}_c}{|\vec{\omega}_c|} \quad (18)$$

در رابطه‌ی (18) مقدار ω_c برابر با کرل سرعت نسبی سیال نسبت به ذره است.

ویژگی‌های فیزیکی سیال و ذرات آسفالتین در جدول 2 آورده شده است [35].

2-2- مدل سازی برخورد ذره با سطح

دو مدل کلی برای مدل سازی برخورد ذره و دیواره وجود دارد. در مدل اول، ذرات به صورت کره‌هایی سخت در نظر گرفته می‌شوند که از تغییر شکل لحظه‌ای ذره صرف‌نظر می‌شود. در مدل دوم که به مدل ذره نرم موسوم است، تأثیر تغییر شکل ذرات در هنگام برخورد نیز در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که پیش از این اشاره شد در این پژوهش جهت مدل سازی برخورد ذرات به دیواره از مدل ذرات سخت استفاده شده است. سرعت ذره در هنگام برخورد با دیواره پارامتری تأثیرگذار در مسیر حرکت ذره پس از برخورد با دیواره است. در سرعت‌های پایین ذرات پس از برخورد با دیواره به دیواره متصل

جدول 2 ویژگی‌های فیزیکی نفت خام و آسفالتین [35]

ویژگی فیزیکی	نماد	واحد	نفت خام	آسفالتین
چگالی	ρ	kg/m^3	860	1200
گرمای ویژه	c_p	J/kg K	213	920
هدایت حرارتی	k	W/kg K	0.120	0.75
لزجت دینامیکی	μ	Pa.s	0.0018	---
ضریب نفوذ حرارتی	α	m^2/s	6.55×10^{-4}	6.79×10^{-7}

¹ Knudsen number

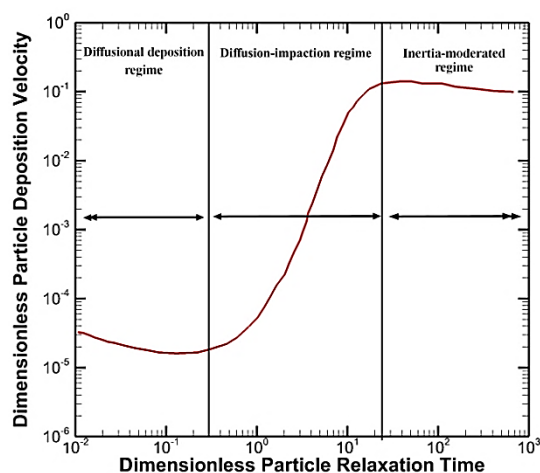


Fig. 3 Different particles deposition regimes

شکل 3 رژیم‌های مختلف نشست ذرات

بالا جهت رسیدن به دیواره دارند که بایستی این مومنوم را از گردابه‌های بزرگ جریان بگیرند. با افزایش اندازه‌ی ذرات میزان تأثیرپذیری ذرات از گردابه‌های جریان کمتر می‌شود و میزان نشست ذرات کاهش می‌یابد.

3- نتایج مدل‌سازی

به دلیل کمبود اطلاعات آزمایشگاهی در زمینه رسوب آسفالتین، جهت اعتبارسنجی مدل انتقال ذرات از اطلاعات موجود برای ذرات معلق در هوا استفاده می‌کنیم. از طرف دیگر عملکرد نیروها جهت انتقال ذرات معلق در هوا و ذرات آسفالتین تقریباً یکسان است. اما ممکن است اثرگذاری نیروها با توجه به فیزیک جریان متفاوت باشد. از طرف دیگر در کارهای مشابه از جمله پژوهش انجام شده توسط سیدباقری [20] نیز جهت اعتبارسنجی از داده‌های تجربی مربوط به ذرات معلق در هوا استفاده شده است. هر چند این کار ممکن است از دقت بالایی بهره‌مند نباشد اما می‌تواند تا حد خوبی اعتبار نحوه‌ی مدل‌سازی نیروها را تأیید کند. همچنین نتایج مربوط به کد عددی با استفاده از مشخصات ذرات معلق در هوا با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط لو³ و همکاران مقایسه شده است [42]. لو جهت اندازه‌گیری سرعت نشست ذرات معلق در هوا، یک لوله‌ی شیشه‌ای با قطر داخلی 1.27 سانتی‌متر و طول 102 سانتی‌متر در نظر گرفت. نتایج ارائه شده توسط لو در دو رینولدز مختلف و برای نشست ذرات در طول 50.8 سانتی‌متر از لوله در "شکل 4" ارائه شده و این نتایج با نتایج حاصل از کد عددی مقایسه شده است.

در قسمت (الف) "شکل 4" جریان رینولدز کمتری دارد و زمان ماند بدون بعد ذرات، اکثراً در ناحیه‌ی گذار نشست قرار می‌گیرند اما در قسمت (ب) با افزایش سرعت جریان که موجب افزایش سرعت اصطکاکی و در نتیجه افزایش زمان ماند بدون بعد ذرات می‌شود، ذرات در ناحیه‌ی اینرسی قرار گرفته و سرعت نشست تقریباً ثابت است.

از آنجایی که ذرات در روند شبیه‌سازی در لایه‌ی مرزی به جریان وارد می‌شوند، انتظار می‌رفت که سرعت نشست حاصل از شبیه‌سازی بیشتر از داده‌های تجربی باشد. زیرا برخی از مکانیزم‌های فعال در توده‌ی سیال که در روند شبیه‌سازی وارد نشده‌اند، نسبت تعداد ذرات نشست کرده به کل ذرات را کاهش می‌دهند. اما نکته‌ی مهم دنبال کردن روند نشست ذرات برحسب زمان ماند است که در نتایج حاصل از شبیه‌سازی به خوبی دیده می‌شود.

2-3- سرعت نشست

سرعت نشست ذرات، کمیتی تأثیرگذار به منظور بیان میزان نشست ذرات است. سرعت نشست ذرات معلق در یک سیال به صورت زیر تعریف می‌شود [38].

$$V_d = \frac{J}{C_{\infty}} = \frac{\bar{U}S}{PL} \ln\left(\frac{N_{in}}{N_{out}}\right) \quad (24)$$

در رابطه‌ی (24) J شار جرمی نشست ذرات، C_{∞} غلظت ذرات در توده‌ی سیال، $\bar{U}$ سرعت متوسط سیال در لوله، S و P و L به ترتیب مساحت سطح مقطع، محیط و طول لوله است. N_{in} و N_{out} نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد ذرات وارد شده به میدان حل و تعداد ذرات خارج شده از میدان حل است. سرعت نشست به صورت بدون بعد و با استفاده از رابطه‌ی (25) محاسبه می‌شود [38].

$$V_d^+ = \frac{V_d}{u^*} \quad (25)$$

سرعت بدون بعد ذرات عموماً برحسب زمان ماند بدون بعد بیان می‌شود که با استفاده از رابطه‌ی (26) محاسبه می‌گردد [38].

$$\tau_v^+ = \frac{\tau_v u^{*2}}{v_c} = \frac{\rho_p d_p^2 u^{*2}}{18\mu_c v_c} \quad (26)$$

از پژوهش‌های آزمایشگاهی که تاکنون در زمینه اندازه‌گیری سرعت نشست ذرات انجام شده است می‌توان به کارهای مک‌کوی و هانارتی [39] و همچنین ولز و چمبرلین [40] اشاره کرد. "شکل 3" نتایج سرعت نشست بدون بعد ذرات برحسب زمان ماند بدون بعد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نشست ذرات به سه رژیم مختلف تقسیم می‌شود. در رژیم اول که به رژیم پخش¹ ذرات موسوم است، با افزایش زمان ماند ذرات سرعت نشست کاهش می‌یابد. به بیان دیگر هر چه ذره بزرگتر باشد میزان نشست آن کمتر می‌شود. از آنجایی که در این بازه، مکانیزم غالب انتقال ذرات به سطح مکانیزم پخش است، بدیهی است که در این شرایط سرعت نشست ذرات کوچکتر بیشتر باشد، چرا که ذرات کوچکتر بیشتر تحت تأثیر پخش مولکولی قرار می‌گیرند. در این رژیم انتقال ذرات در هسته مرکزی لوله در اثر پخش ناشی از آشفتگی جریان و در ناحیه‌ی نزدیک به دیواره تحت تأثیر پخش ناشی از نیروی براونی است [41]. ناحیه‌ی بعدی در نمودار نشست ذرات با نام ناحیه‌ی گذار از پخش به اینرسی شناخته می‌شود. در این ناحیه با افزایش زمان ماند ذره سرعت نشست در حدود سه یا چهار مرتبه افزایش می‌یابد.

بیشینه‌ی سرعت نشست ذرات در حدود $\tau_v^+ = 30$ اتفاق می‌افتد که البته مقدار دقیقی نیست و با توجه به شرایط جریان می‌تواند تغییر کند. در این رژیم عامل انتقال ذرات به نزدیکی سطح جامد تأثیر گردابه‌های جریان بر مسیر حرکت ذرات است. برای توجیه این افزایش قابل توجه سرعت نشست در این بازه از مفهوم مسافت توقف² استفاده می‌شود. مسافت توقف به حداکثر مسافتی گفته می‌شود که یک ذره با سرعت اولیه‌ی V_0 در یک سیال ساکن می‌پیماید تا متوقف شود. در واقع در این رژیم اگر ذره به فاصله‌ی یک مسافت توقف از سطح جامد برسد، اینرسی لازم برای عبور از زیر لایه‌ی لُرج و رسیدن به دیواره را دارد. از آنجایی که مسافت توقف ذرات با افزایش اندازه‌ی قطر ذرات رابطه‌ی مستقیم دارد، بنابراین در این ناحیه افزایش اندازه‌ی ذرات باعث افزایش سرعت نشست ذرات می‌شود.

رژیم سوم در نمودار رژیم اینرسی غالب نام دارد. در این رژیم پخش ذرات تأثیر چندانی در نشست ذرات ندارد. ذرات بزرگ نیاز به یک مومنوم

¹ Diffusional deposition regime

² Stopping distance

³ Liu

خواهد بود. از طرف دیگر برای ذرات کوچکتر که نیروی براونی در مرتبه‌ی نیروهای تأثیرگذار قرار می‌گیرد، مسیر حرکت ذرات به گونه‌ای خواهد بود که ممکن است چندین بار از یک فاصله‌ی مشخص از دیواره عبور کند. در هر نوبت که ذره از یک فاصله‌ی مشخص عبور می‌کند به دلیل تغییر در جهت و اندازه‌ی سرعت ذره، میزان نیروهای وارد بر ذره تغییر می‌کند. از این رو برای به‌دست آوردن مقدار هر یک از نیروهای وارد بر ذره در فاصله‌ی مشخص از دیواره باید از روش متوسط‌گیری استفاده کرد. جهت متوسط‌گیری و به دست آوردن نتایج می‌بایست تعداد ذرات تزریق شده به میدان حل را تا حدی افزایش دهیم که نتایج به‌دست آمده از تعداد ذرات تزریق شده به سیستم مستقل شود.

3-1- بررسی نیروهای وارد بر ذرات در نزدیکی سطح

در جدول 4 مقدار زمان ماند بدون بعد برای مقادیر بیشینه و کمینه‌ی بازه‌ی قطر در نظر گرفته شده برای ذرات آسفالتین در رینولدز 18125 محاسبه شده است. با توجه به اطلاعات موجود در جدول 4 و رژیم‌های نشست معرفی شده در "شکل 3"، همه‌ی ذرات آسفالتین در رژیم پخشی قرار می‌گیرند. بنابراین مکانیزم پخش براونی اصلی‌ترین مکانیزم انتقال ذرات در لایه‌ی مرزی است. بنابراین انتظار می‌رود که نیروی غالب وارد بر ذرات در این ناحیه نیروی براونی باشد.

مطابق با نتایج به‌دست آمده نیروهای لیفت و ترموفورسیس تأثیر چندانی در مسیر حرکت ذرات ندارند و سه نیروی درگ، براونی و جرم مجازی سه نیروی غالب وارد بر ذرات در نزدیک مرز جامد است. "شکل 5 و 6" مقایسه‌ی نیروهای وارد بر ذرات 50 میکرومتری و یک میکرومتری که از فاصله‌ی $y^+ = 50$ به میدان حل تزریق شده‌اند، را نشان می‌دهد. سرعت اولیه‌ی ذرات برابر با سرعت سیال در آن نقطه فرض شده است که با توجه به کوچک بودن زمان ماند ذرات فرض قابل قبولی به نظر می‌رسد.

جدول 4 زمان ماند بدون بعد ذرات آسفالتین

Table 4 Dimensionless Relaxation Time of Asphaltene particles

زمان ماند بدون بعد	قطر ذره μm
4.34×10^{-5}	1
1.18×10^{-1}	50

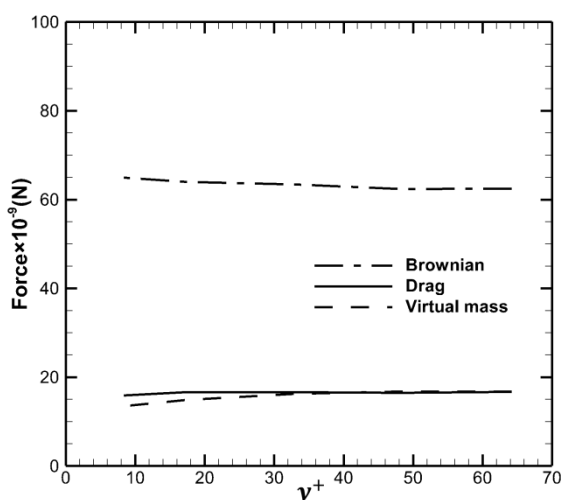
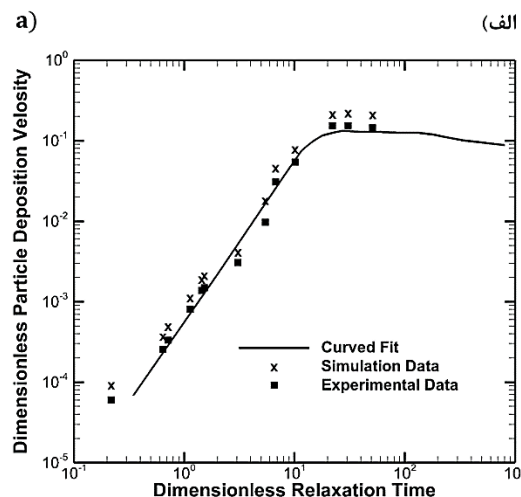
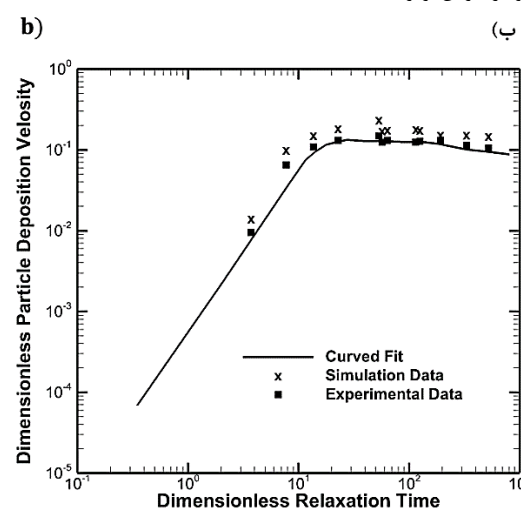


Fig. 5 Forces on a 50 micrometer particle in boundary layer

شکل 5 نیروهای وارد بر ذره 50 میکرومتری در لایه‌ی مرزی



a) Reynolds No. = 9894 (الف) رینولدز جریان برابر با 9894



b) Reynolds No. = 50000 (ب) رینولدز جریان برابر با 50000

Fig. 4 Compare the results of simulation with experimental data in two different Reynolds number [41]

شکل 4 مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی در دو رینولدز مختلف [41]

در ادامه به بررسی نشست ذرات آسفالتین در جریان نفت می‌پردازیم. بازه‌ی قطر ذرات آسفالتین از یک میکرومتر تا 50 میکرومتر در نظر گرفته شده است [35]. امکان تشکیل ذرات آسفالتین بزرگتر در جریان نفت وجود دارد اما به دلیل وجود تنش برشی و تقسیم ذرات به اندازه‌های کوچکتر نسبت ذرات موجود در اندازه‌های بزرگتر از 50 میکرومتر کم و قابل صرف‌نظر است. از طرف دیگر با افزایش قطر ذرات سرعت بحرانی نشست افزایش یافته و مرحله‌ی اتصال ذرات برای ذرات بزرگتر به سختی انجام می‌شود. با تمام این تفاسیر حتی اگر ذره‌ی بزرگتر از 50 میکرومتر هم در جریان نفت نشست کند، امکان ماندگاری آن روی سطح به علت وارد شدن ممان و نیروهای موجود در جهت جدایش، بسیار ناچیز است. از طرف دیگر اندازه‌گیری‌های انجام شده در زمینه‌ی اندازه‌ی ذرات آسفالتین نشست کرده روی سطح، درستی فرض بالا را تأیید می‌کند [35].

از آنجایی که نوسانات میدان سرعت و نیروی براونی به صورت تصادفی بر ذرات اعمال می‌شود، مسیر حرکت یک ذره با ذره‌ی مشابه و همچنین اندازه و جهت نیروهای وارد بر ذره در یک فاصله مشخص از دیواره متفاوت

معلق در هوا است. در زمینه‌ی نشست ذرات معلق در هوا، مکانیزم کنترل کننده‌ی نشست، انتقال ذرات به سطح است. اما در فرآیند رسوب‌گذاری در نفت، مکانیزم کنترل کننده‌ی فرآیند رسوب مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح است.

بنابراین صفر بودن سرعت نشست برای یک دسته از ذرات آسفالتین به این معنی نیست که هیچکدام از این ذرات به سطح نمی‌رسند، بلکه ممکن است قسمتی از ذرات به سطح رسیده اما به آن متصل نشده و به جریان سیال برگردند. نکته‌ی دیگر افزایش چشمگیر سرعت نشست با کاهش قطر ذرات به 5 میکرومتر است. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است که عمده‌ی ذرات آسفالتین که در جریان نفت رسوب می‌کنند، قطری کوچکتر از 10 میکرون دارند [35].

با توجه به نتایج به دست آمده به این نتیجه می‌رسیم که می‌توان با فرض یک توزیع قطر مناسب برای ذرات آسفالتین و بدون نیاز به افزایش چشم‌گیر هزینه‌ی محاسباتی، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های قبلی در زمینه رسوب آسفالتین را به‌وسیله‌ی مدل‌سازی درست جریان نزدیک مرز و ایجاد یک شرط مرزی مناسب جهت نشست اصلاح نمود. در واقع می‌توان مرحله‌ی انتقال فاز نامحلول به نزدیکی سطح جامد را با روش اولیری مدل نمود و سپس با استفاده از روش لاگرانژی مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح و برهم‌کنش ذرات و سطح را مدل نمود.

4- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از یک مدل دوبعدی و با استفاده از دیدگاه اولیو-لاگرانژ چگونگی رفتار ذرات آسفالتین در نزدیک سطح جامد و چگونگی نشست و اتصال ذرات روی سطح بررسی شده است. سرعت متوسط و اغتشاشات جریان در هر مکان با استفاده از روابط حاکم بر میدان سرعت در نزدیکی مرز محاسبه شده و نیروهای وارد بر ذره در هر نقطه محاسبه می‌شود. مدل‌سازی درست آشفته‌گی‌های نزدیک جریان در فرآیند نشست ذرات تأثیر بسزایی دارد چرا که نوسانات نزدیک سطح می‌تواند ذرات را به سطح برساند. از این رو مدل‌سازی آشفته‌گی‌های جریان در جهات مختلف با استفاده از روابط مربوط به لایه‌ی مرزی انجام شد. مشخص شد که نیروی غالب وارد بر ذرات آسفالتین در نزدیک سطح جامد نیروی براونی است. در واقع در پدیده‌ی نشست ذرات آسفالتین مکانیزمی که ذرات را به سطح می‌رساند، مکانیزم پخش براونی است. علاوه‌بر مکانیزم غالب انتقال، تفاوت اصلی میان نشست ذرات آسفالتین و نشست ذرات معلق در هوا، مرحله‌ی کنترل‌کننده‌ی فرآیند نشست است. برخلاف ذرات معلق در هوا که مرحله‌ی انتقال، فرآیند رسوب را کنترل می‌کند، مرحله‌ی تعیین‌کننده در نشست ذرات آسفالتین مرحله‌ی اتصال ذرات به سطح است. از این‌رو در گام بعدی اتصال ذرات به سطح با استفاده از مفهوم سرعت بحرانی نشست مدل شده است و در نهایت سرعت نشست برای قطرهای مختلف محاسبه شده است. از سرعت نشست به‌دست آمده برای قطرهای مختلف ذرات آسفالتین می‌توان به عنوان شرط مرزی نشست جهت شبیه‌سازی‌هایی که به روش اولیری انجام می‌شود، استفاده نمود.

5- فهرست علائم

A	ثابت هاماکر (J)
C_D	ضریب درگ
d	قطر ذره (m)

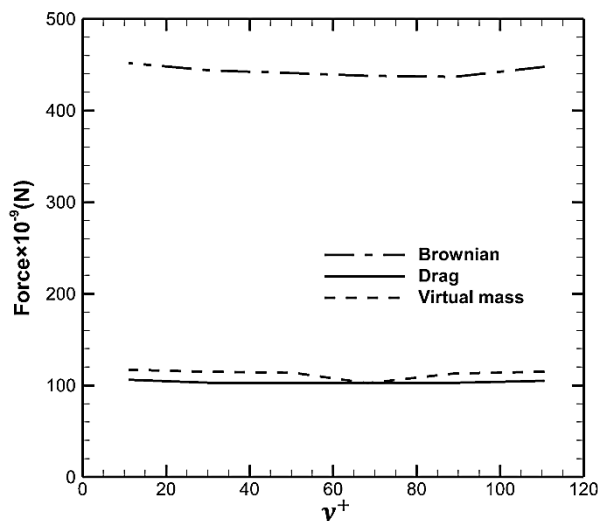


Fig. 6 Forces on a 1 micrometer particle in boundary layer

شکل 6 نیروهای وارد بر ذره یک میکرومتری در لایه‌ی مرزی

همان‌طور که مشخص است در بیشینه و کمینه‌ی بازه‌ی قطر ذرات آسفالتین، نیروی براونی نیروی غالب است. از طرف دیگر با کاهش قطر ذرات اندازه‌ی نیروی براونی افزایش می‌یابد و از آنجایی که ذرات آسفالتین در ناحیه‌ی پخشی نشست قرار دارند انتظار می‌رود سرعت نشست ذرات با کاهش قطر افزایش یابد.

3-2- محاسبه‌ی سرعت نشست آسفالتین

در ادامه با توجه به رابطه‌ی (24) و نتایج حاصل از کد عددی، سرعت نشست برای قطرهای مختلف محاسبه شده است. در "شکل 7" نتایج سرعت نشست بدون بعد برحسب زمان بدون بعد ذرات ارائه شده است. ذرات آسفالتین در شش دسته با قطرهای 1، 5، 10، 20، 30 و 50 میکرومتری به داخل جریان تزریق و سرعت نشست برای هر دسته از قطر ذرات محاسبه شده است.

نکته حائز اهمیت در نتایج، عدم نشست ذرات با زمان ماند بدون بعد بیشتر از 4.26×10^{-2} است. این موضوع تناقضی با نمودار کلی نشست که در "شکل 3" ارائه شده بود ندارد. زیرا که "شکل 3" مربوط به نشست ذرات

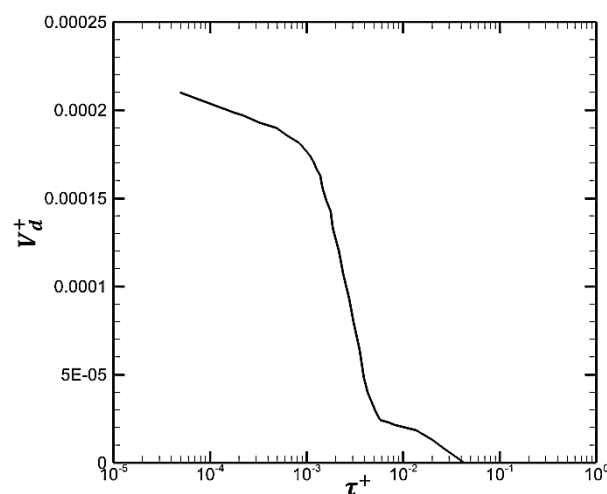


Fig. 7 Dimensionless Deposition Velocity of Asphaltene particles

شکل 7 سرعت نشست بدون بعد ذرات آسفالتین

- Thermal Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 777-788, 2002.
- [7] M. R. J. Nasr, M. M. Givi, Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 14, pp. 1572-1577, 2006.
- [8] B. Souza, E. Matos, R. Guirardello, J. Nunhez, Predicting coke formation due to thermal cracking inside tubes of petrochemical fired heaters using a fast CFD formulation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 51, No. 1, pp. 138-148, 2006.
- [9] M. Bayat, J. Aminian, M. Bazmi, S. Shahhosseini, K. Sharifi, CFD modeling of fouling in crude oil pre-heaters, *Energy Conversion and Management*, Vol. 64, pp. 344-350, 2012.
- [10] M. Haghsheenasfard, K. Hooman, CFD modeling of asphaltene deposition rate from crude oil, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 24-32, 2015.
- [11] A. P. Watkinson, *Particulate Fouling of Sensible Heat Exchangers*, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 1968.
- [12] J. B. McLaughlin, Aerosol particle deposition in numerically simulated channel flow, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, Vol. 1, No. 7, pp. 1211-1224, 1989.
- [13] F. G. Fan, G. Ahmadi, A sublayer model for turbulent deposition of particles in vertical ducts with smooth and rough surfaces, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 45-64, 1993.
- [14] C. He, G. Ahmadi, Particle deposition in a nearly developed turbulent duct flow with electrophoresis, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, No. 6, pp. 739-758, 1999.
- [15] R. Maniero, P. Canu, A model of fine particles deposition on smooth surfaces: I—theoretical basis and model development, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 23, pp. 7626-7635, 2006.
- [16] R. Maniero, P. Canu, A model of fine particles deposition on smooth surfaces: II—Comparison with experimental data and simplified models, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 10, pp. 2821-2832, 2007.
- [17] A. Mehel, A. Tanière, B. Oesterlé, J. R. Fontaine, The influence of an anisotropic Langevin dispersion model on the prediction of micro-and nanoparticle deposition in wall-bounded turbulent flows, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 41, No. 8, pp. 729-744, 2010.
- [18] S. D. He, B. Wang, Dispersion of particles in wall-bounded particle-laden turbulent flows with high wall permeability, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 77, pp. 104-119, 2015.
- [19] P. Kor, R. Kharat, Modeling of asphaltene particle deposition from turbulent oil flow in tubing: Model validation and a parametric study, *Petroleum*, Vol. 2, No. 4, pp. 393-398, 2016.
- [20] H. Seyyedbagheri, B. Mirzayi, CFD modeling of high inertia asphaltene aggregates deposition in 3D turbulent oil production wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 150, pp. 257-264, 2017.
- [21] S. Emani, M. Ramasamy, K. Z. K. Shaari, CFD modelling of shell-side asphaltenes deposition in a shell and tube heat exchanger, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1859, pp. 20118:1-7, 2017.
- [22] C.B. Panchal, A.P. Watkinson, *Development of an Analytical Model for Organic-Fluid Fouling*, Technical report. Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy, 1994.
- [23] J. Visser, *Adhesion and Removal of Particles II*, in: *Fouling Science and Technology*, Eds., pp. 105-123: Springer, 1988.
- [24] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji, *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, 2nd Edition, pp. 139-151, New York: CRC press, 2011.
- [25] M. Jamialahmadi, B. Soltani, H. Müller-Steinhagen, D. Rashtchian, Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 19, pp. 4624-4634, 2009.
- [26] G. Heidarinejad, *An Introduction to Turbulence*, pp. 97-114, Tehran: Tarbiat Modares University, 2009. (In Persian)
- [27] A. Dehbi, A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary layer flows, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No. 3, pp. 707-715, 2008.
- [28] B. Kader, Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 9, pp. 1541-1544, 1981.
- [29] C. Henry, J. P. Minier, G. Lefèvre, Towards a description of particulate fouling: From single particle deposition to clogging, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 185-186, pp. 34-76, 12/1, 2012.
- [30] V. L. Schiller, Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung, *Z. Vereines Ingenieure*, Vol. 77, No. 12, pp. 318-320, 1933.
- [31] T. Auton, J. Hunt, M. Prud'Homme, The force exerted on a body in inviscid unsteady non-uniform rotational flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 197, pp. 241-257, 1988.
- [32] A. Li, G. Ahmadi, Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 209-226, 1992.
- [33] L. Talbot, R. Cheng, R. Schefer, D. Willis, Thermophoresis of particles in a heated boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 101, No. 4, pp. 737-758, 1980.
- [34] P. Saffman, The lift on a small sphere in a slow shear flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 22, No. 02, pp. 385-400, 1965.
- [35] C. A. Bennett, R. S. Kistler, K. Nangia, W. Al-Ghawas, N. Al-Hajji, A. Al-Jemaz, Observation of an isokinetic temperature and compensation effect for high-temperature crude oil fouling, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 30, No.

E	انرژی پتانسیل سطح (J)
e	ضریب الاستیسیته
F	نیرو (N)
k	رسانایی حرارتی (W/mK)
k_B	ثابت بولتزمن
Kn	عدد نودسن
L	طول لوله (m)
m	جرم (kg)
P	محیط لوله (m)
Pr	عدد پرانتل
q_w	شار حرارتی وارد بر دیواره لوله (W/m^2)
Re	عدد رینولدز
S	مساحت سطح مقطع لوله (m^2)
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)
u^*	سرعت اصطکاکی (m/s)
$\bar{u}$	سرعت متوسط (m/s)
$\dot{u}$	نوسانات سرعت (m/s)
V	حجم (m^3)
V_d	سرعت نشست (m/s)
γ	فاصله از دیواره (m/s)

علامه یونانی

μ	لزجت دینامیکی (Pa s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
α	ضریب پخش حرارتی
τ	زمان ماند (s)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2/s)
Δt	گام زمانی (s)
ξ	عدد تصادفی
ϵ	نسبت سرعت ذره پیش از برخورد با دیواره به سرعت پس از برخورد

بالانویس‌ها

+ متغیر بدون بعد

زیرنویس‌ها

p ذره

c سیال

6- مراجع

- [1] A. Hirschberg, L. DeJong, B. Schipper, J. Meijer, Influence of temperature and pressure on asphaltene flocculation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 24, No. 03, pp. 283-293, 1984.
- [2] W. Van Nostrand, S. Leach, J. Haluska, *Economic Penalties Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment*, pp. 619-643, New York, Hemisphere Publishing Co, 1981.
- [3] G. Dickakian, S. Seay, Asphaltene precipitation primary crude exchanger fouling mechanism, *Oil Gas J. (United States)*, Vol. 86, No. 10, 1988.
- [4] K. A. Ferworn, A. K. Mehrotra, W. Y. Svrcek, Measurement of asphaltene agglomeration from cold lake bitumen diluted with n-alkanes, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 71, No. 5, pp. 699-703, 1993.
- [5] 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*, Vol. 273, pp. 273-279, 1999.
- [6] G. T. Polley, D. Wilson, B. Yeap, S. Pugh, Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery pre-heat trains, *Applied*

- flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 3, No. 4, pp. 319-331, 1977.
- [40] A. Wells, A. Chamberlain, Transport of small particles to vertical surfaces, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 18, No. 12, pp. 1793, 1967.
- [41] J. Young, A. Leeming, A theory of particle deposition in turbulent pipe flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 340, pp. 129-159, 1997.
- [42] B. Y. Liu, J. K. Agarwal, Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 145IN1149-148IN2155, 1974.
- 10-11, pp. 794-804, 2009.
- [36] S. F. Smoke, *Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior*, 2nd Edition, pp. 95-116, New York, John Wiley & Sons, 1977.
- [37] B. Dahneke, The capture of aerosol particles by surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 342-353, 1971.
- [38] N. Gao, J. Niu, Q. He, T. Zhu, J. Wu, Using RANS turbulence models and Lagrangian approach to predict particle deposition in turbulent channel flows, *Building and Environment*, Vol. 48, pp. 206-214, 2012.
- [39] D. McCoy, T. Hanratty, Rate of deposition of droplets in annular two-phase