



فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور



تارنمای فصلنامه: www.engineersearch.ir

بررسی رسوب ذره‌ای خنک‌کننده‌های بازچرخانی گاز خروجی در موتورهای دیزلی

علیرضا رزم‌آور^۱، محمدرضا ملایری^{۲*}

^۱ دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، alireza.razmavar@gmail.com

^۲ دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، malayeri@shirazu.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۷۱ - ۳۶۱۳۳۷۴۷

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳۱ خرداد ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۲ مرداد ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

رسوب ذره‌ای

بازچرخانی گاز خروجی (EGR)

خنک‌کننده EGR

دوده

مقاومت حرارتی رسوب

در موتورهای دیزلی انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx)، مونو اکسید کربن و ریز ذرات تهدید جدی برای محیط زیست و سلامتی انسان به شمار می‌روند. روشی که به طور گسترده برای کاهش انتشار این آلاینده‌ها استفاده می‌شود شامل بازگرداندن قسمتی از گازهای خروجی موتور به محفظه احتراق پس از خنک کردن آن‌ها در یک مبدل حرارتی به نام خنک‌کننده بازچرخانی گاز خروجی (EGR) است. با این وجود، خنک‌کننده‌های EGR در معرض رسوب گرفتگی شدید قرار دارند که به علت رسوب ریز ذرات روی سطوح انتقال حرارت است که منجر به افت قابل توجه بازده حرارتی می‌شود. در این مطالعه، سازوکارهایی که در رسوب و زدودن ریز ذرات نقش دارند بررسی شدند. همچنین بر اساس این سازوکارها و استفاده از معادلات انرژی به همراه بقای جرم ذره، الگویی یک بعدی ارائه می‌شود که رفتار رسوب ذره‌ای را در خنک‌کننده‌های EGR پیش‌بینی می‌کند. سپس نتایج مطالعه تحلیلی با داده‌های آزمایشگاه مقایسه می‌شوند که سازگاری بین آن‌ها نشان دهنده اعتبار الگو است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

امروزه موتورهای دیزلی نسبت به موتورهای بنزین سوز به علت قیمت سوخت، هزینه نگهداری ارزانتر و بازده حرارتی بزرگتر محبوبیت زیادی یافته‌اند. با این حال، انتشار اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، مونو اکسید کربن، دی اکسید کربن و ریز ذرات (PM) از این موتورها تهدیدی جدی برای محیط زیست به شمار می‌روند [۱]. بنابراین، مقررات محیط زیستی شدیدی در بسیاری از نقاط دنیا وضع شده‌اند تا مقدار انتشار این آلاینده‌ها به محیط را محدود نمایند.

سامانه بازچرخانی گاز خروجی (EGR) روشی مؤثر در کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن است. در این فرآیند بازگرداندن قسمتی از گاز خروجی به ورودی موتور باعث می‌شود تا مقدار اکسیژن و در نتیجه دمای شعله در محفظه احتراق کاهش یابد که در نهایت کاهش سرعت تشکیل اکسیدهای نیتروژن را به همراه خواهد داشت.

اگر گاز خروجی مستقیماً به ورودی موتور بازگردانده شود، به این عملیات EGR داغ گفته می‌شود و اگر گاز خروجی قبل از ورود به محفظه احتراق خنک گردد، آنگاه EGR خنک نامیده می‌شود [۲].

اگرچه رایج‌ترین دلیل به کارگیری EGR در موتورهای دیزلی کنونی توانایی آن در کاهش NO_x است، کاربردهای آن در مقاصد دیگر قابل گسترش است. برای مثال در احتراق دمای پایین (LTC)، از سرعت‌های EGR بالا برای پایش انتشار آلاینده‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که کاربرد LTC در قسمتی از نقشه عملیاتی موتور تجاری شود، آنگاه افزایش تقاضا برای سامانه‌های EGR مورد انتظار است [۳].

عمده‌ترین مشکلی که در پیاده‌سازی سامانه‌های EGR وجود دارد رسوب گرفتگی شدید خنک‌کننده EGR است. رسوب ریز ذرات بر دیواره‌های خنک‌کننده EGR منجر به کاهش بازده حرارتی می‌شود که افت فشار در طول لوله را افزایش خواهد داد.

از آنجا که اختلاف فشار بین مجرای خروجی گاز و چند راهه^۳ سازوکار محرک برای جریان EGR است، افزایش افت فشار در طول خنک‌کننده بر پایش نرخ مطلوب EGR تاثیر می‌گذارد و منجر به کاهش بازده سوخت به علت زیاد شدن کار تلمبه‌ای می‌شود [۴].

ریز ذرات موجود در گازهای دیزل حاوی یک جزء جامد، یک جزء آلی قابل حل (SOF) و سولفات‌ها اند. جزء جامد که عمده آن را کربن تشکیل می‌دهد به عنوان دوده^۵ شناخته می‌شود و از لحاظ شکل شناسی به صورت ذرات تقریباً کروی است که از به هم چسبیدن آن‌ها توده‌های زنجیره‌ای مانند به وجود می‌آیند [۵].

پدیده تشکیل رسوب در خنک‌کننده‌های EGR با سازوکارهای مختلفی از جمله ذره‌ای، چگالشی^۶ و یا تبلوری^۷ صورت می‌پذیرد. از میان این سازوکارها، رسوب ذره‌ای بیشترین سهم را در تشکیل رسوب به عهده دارد [۶].

گازهای خروجی دیزل علاوه بر ریز ذرات، بازه وسیعی از هیدروکربن‌ها را شامل می‌شوند. در صورتی که دمای سطح خنک‌کننده پایین‌تر از نقطه شبنم^۸ این ترکیبات باشد، آنگاه هیدروکربن‌های سنگین و هم‌چنین سولفوریک اسید روی سطح چگالش می‌یابند. در خنک‌کننده‌های EGR اگر دمای سیال خنک‌کن نسبتاً گرم باشد، یعنی 85°C ، رسوب عمدتاً شامل ریز ذرات می‌شود، در حالی که در دماهای سرد خنک‌کن، یعنی 40°C ، رسوب مخلوطی از ریز ذرات و هیدروکربن‌ها است [۷].

با وجود اینکه در دماهای خنک سیال خنک‌کن، فرآیند رسوب گرفتگی خنک‌کننده‌های EGR ترکیبی از ریز ذرات و هیدروکربن‌ها است، هر چه که لایه رسوب رشد می‌کند، دمای سطح خارجی آن نزدیک به جریان گاز افزایش می‌یابد به نحوی که چگالش هیدروکربن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و محتوای رسوب را اساساً ریز ذرات تشکیل می‌دهند [۶].

علاوه بر فرآیند رسوب، زدودن ریز ذرات نیز می‌تواند به طور همزمان اتفاق بیفتد. کرن و سیتون^۹ اولین کسانی بودند که نرخ تشکیل رسوب را در مبدل‌های حرارتی مطرح کردند [۸]. آنها فرض کردند که نرخ رسوب گرفتگی تفاوت بین نرخ رسوب و نرخ زدودن است و هنگامی که تعادل بین این دو نرخ برقرار شود ممکن است منجر به مقاومت رسوب مجانی گردد.

عبد الهادی و ملایری^{۱۰} [۶] رسوب ذره‌ای را در خنک‌کننده‌های EGR بررسی کردند و نشان دادند که بعد از زمان مشخصی مقاومت رسوب به یک مقدار مجانب می‌ل می‌کند.

پاز^{۱۱} و همکاران [۹] یک طرح شبیه سازی عددی را با تمرکز بر تکامل تدریجی ضخامت لایه رسوب گرفته برای بررسی رسوب ذرات دوده در سامانه‌های دیزلی ارائه کردند. آن‌ها الگوی عددی را بر اساس این فرضیه ارائه کردند که فرآیند رسوب گرفتگی اختلاف بین نرخ رسوب و نرخ زدودن است که نرخ رسوب ثابت و نرخ زدودن متناسب با ضخامت لایه رسوب گرفته در نظر گرفته شد.

وری^{۱۲} و همکاران [۱۰] الگویی یک بعدی برای شبیه سازی رسوب و زدودن دوده و چگالش هیدروکربن‌های مختلف در لوله دایروی

⁶ Condensation

⁷ Crystallization

⁸ Dew point

⁹ Kern & Seaton

¹⁰ Abd-Elhady & Malayeri

¹¹ Paz

¹² Warey

¹ Particulate Matter

² Exhaust Gas Recirculation

³ Manifold

⁴ Soluble Organic Fraction

⁵ Soot

به منظور ارزیابی دمای گاز و نیز اختلاف دما در طول خنک کننده EGR، لوله به چندین بخش تقسیم بندی می‌شود که در شکل ۲ نمایش داده شده است. معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت برای هر بخش (x) در یک گام زمانی (t) معین حل می‌شوند. فرض می‌شود که در هر گام زمانی شرایط حالت پایا برقرار است. در نتیجه، حل حالت پایا در هر گام زمانی که برابر با ۱ ثانیه در نظر گرفته می‌شود به دست می‌آید و از اثرات گذرا در معادلات صرف نظر می‌گردد. سایر فرضیه‌هایی که به کار گرفته می‌شوند عبارتند از [۱۰]:

- ۱- تغییرات شعاعی دما و غلظت ذره در معادلات اصلی در مقایسه با تغییرات محوری ناچیز است.
- ۲- جریان متلاطم کاملاً توسعه یافته در لوله فرض می‌شود هم چنین از اثرات ورودی صرف نظر می‌گردد.
- ۳- خواص فیزیکی گازهای دیزل خروجی مستقل از مکان و زمان هستند و ثابت در نظر گرفته می‌شوند.
- ۴- اگر تغییرات متغیری نسبت به زمان بررسی شود، فرض می‌شود که لایه رسوب در طول لوله یکنواخت باشد.
- ۵- هم‌چنین فرض می‌شود که چگالی گازهای خروجی نسبت به دور و بار موتور ثابت باشد.

۲-۱- معادلات بقای انرژی

با نادیده گرفتن رسانایی حرارتی محوری در فاز گاز، انتقال حرارت جابه‌جایی در طول محور لوله با مقدار حرارت منتقل شده به دیواره‌های لوله برابر خواهد بود. معادله حاکم برای دمای متوسط گاز (T_m) در هر گام زمانی از معادله بقای انرژی به دست می‌آید که توسط سایر محققان انجام شده است و بدین صورت بیان می‌شود [۱۰، ۱۲ و ۱۳]:

$$\frac{dT_m}{T_m - T_w} = \frac{-4h}{\rho_g U_m C_p D} dx \quad (1)$$

شرایط مرزی در معادله (۱) شامل $T_{x=0} = T_i$ و $T_{m_{x=x}} = T_m$ است. در صورتی که T_w با دمای سطح لایه رسوب (T_s) جایگزین شود، با حل معادله فوق خواهیم داشت:

$$T_m = T_s + (T_i - T_s) \times \exp\left(\frac{-4xNu}{D_h RePr}\right) \quad (2)$$

یک خنک کننده EGR ارائه دادند. آن‌ها سازوکارهای مختلف رسوب دوده شامل مهاجرت گرمایی ذرات^۱، نفوذ، برخورد متلاطم و حرکت گرانشی را در نظر گرفتند که مهاجرت گرمایی سازوکار غالب تشخیص داده شد. به علاوه آن‌ها با در نظر گرفتن موازنه نیرو بین نیروهای پسا و وان در والس^۲ زدودن ذرات دوده را شبیه‌سازی کردند.

آبارهام^۳ و همکاران [۱۱] سازوکارهای گوناگون رسوب و زدودن ذرات دوده را در خنک‌کننده‌های EGR بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که هر چه رسوب گرفتگی در لوله‌های خنک‌کننده تقویت شود، دمای سطح لایه رسوب افزایش می‌یابد که باعث بیشتر شدن انرژی جنبشی ذرات دوده در سطح گاز-رسوب می‌گردد، به طوری که نیروهای گرمایی عمل‌کننده بر ذرات ممکن است بر نیروهای وان در والسی بین آن‌ها غلبه نماید و منجر به زدودن ذرات شود.

هدف از این مطالعه ارائه الگویی یک بعدی است که بتواند رفتار رسوب ذره‌ای را در خنک‌کننده‌های EGR پیش بینی نماید. به این منظور معادلات بقای انرژی برای گازهای دیزل خروجی و معادله بقای جرم برای ذرات دوده نوشته می‌شوند که با ادغام کردن آن‌ها روش حلی تحلیلی به دست می‌آید. سپس نتایج مطالعه تحلیلی با داده‌های آزمایشگاه مقایسه می‌شوند که سازگاری بین آن‌ها حاکی از اعتبار الگو است.

در این مطالعه سعی می‌شود تا معادله‌ای نظری برای چسبیدن ذرات دوده به سطح لوله‌های خنک‌کننده ارائه شود که در معادله شار رسوب ذره وارد می‌شود. هم‌چنین معادله‌ای جدید برای تعیین شار زدودن ذره در نظر گرفته شده است که برای به دست آوردن مقاومت حرارتی رسوب استفاده می‌شود.

۲-۲- مطالعه تحلیلی

در این قسمت شیوه‌ای تحلیلی برای رسوب و زدودن ذرات دوده در جریان لوله متلاطم و گذرا توصیف می‌گردد. گازهای داغ خروجی موتور از درون لوله‌های خنک‌کننده عبور می‌کنند و آب به عنوان سیال خنک‌کن در قسمت پوسته از روی لوله‌ها جریان دارد. از آنجا که ظرفیت گرمایی آب و شار آن (در این مطالعه) بزرگ است، افزایش دمای آن کمتر از ۲ °C است. در نتیجه فرض می‌شود که دمای دیواره (T_w) در حین عملیات ثابت بماند. طرحی از جریان در لوله خنک‌کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل طول لوله (L)، قطر داخلی لوله تمیز (D_i)، قطر لوله در حالت رسوب گرفته (D)، غلظت ورودی ذرات (C_i)، دمای سطح مشترک گاز-رسوب (T_s)، دمای ورودی گاز (T_i)، و دمای دیواره (T_w) مشخص شده‌اند.

¹ Thermophoresis

² Van der Waals force

³ Abarham

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

که عدد رینولدز به صورت $Re = U_m D / \nu_g$ تعریف می‌شود. عدد رینولدز در لوله‌های خنک‌کننده از ۵۰۰ برای سرعت‌های پایین EGR تا بیش از ۳۵۰۰ برای سرعت‌های بالای EGR تغییر می‌کند، در نتیجه جریان می‌تواند آرام یا متلاطم باشد [۴].

برای سرعت‌های مورد بررسی در این مطالعه، عدد رینولدز در محدوده ۳۱۰۰۰-۷۸۰۰۰ متغیر است، بنابراین جریان متلاطم در لوله‌های خنک‌کننده وجود دارد. ضریب اصطکاک داری با استفاده از معادله ارائه شده توسط پتوخو^۲ محاسبه می‌شود که برای بازه وسیعی از عدد رینولدز، $3000 < Re < 5 \times 10^6$ ، معتبر است [۱۲]:

$$f = [0.79 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad (5)$$

۲-۲- احتمال چسبندگی ذره

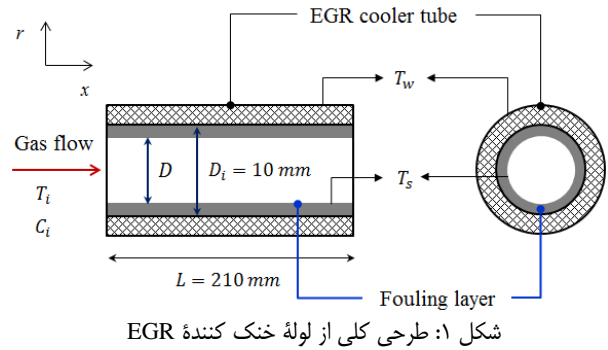
تمام ذراتی که به طرف سطح حرکت می‌کنند به آن نمی‌چسبند. در حین برخورد یک ذره با سطح صاف، انرژی جنبشی از ذره در حال برخورد به سطح منتقل می‌شود. اگر مقدار انرژی جنبشی منتقل شده به سطح به اندازه کافی بزرگ باشد تا بر نیروی چسبندگی بین ذره دوده و سطح غلبه کند، ذره از روی سطح جهش خواهد کرد، در غیر این صورت به آن می‌چسبند [۱۴].

طبق نظریه JKR برای کره‌های کشسان چسبنده که توسط جانسون^۳ و همکاران [۱۵] گسترش یافت، هنگامی که دو جسم در حال برخورد با یکدیگر تماس می‌یابند، نیروی عمود بین آن‌ها بلافاصله به مقدار ثابتی افت خواهد کرد که به دلیل نیروهای چسبندگی وان در والس است. سپس سرعت جسم کند شده و قسمتی از انرژی جنبشی اولیه در قالب امواج کشسان به ماده منتقل می‌شود.

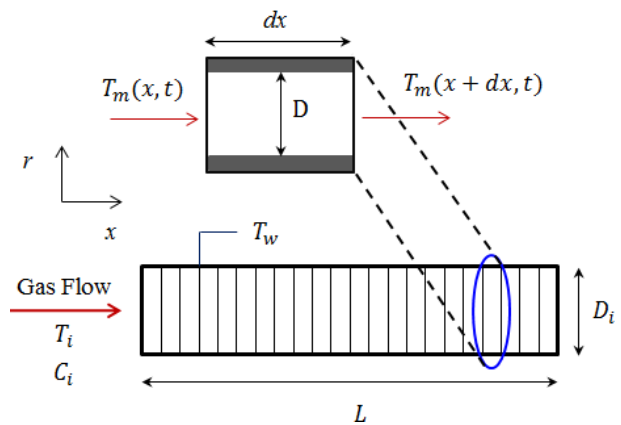
وقتی که نیروی تماسی به مقدار بیشینه می‌رسد، سرعت ذره به صفر کاهش یافته است. در مرحله بازگشت، انرژی کشسان ذخیره شده آزاد و به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و ذره در جهت مخالف حرکت می‌کند. مقدار انرژی مورد نیاز برای شکستن تماس بین ذره و سطح که توسط جانسون و پولوک^۴ [۱۶] محاسبه شده برابر است با:

$$Q'_A = 7.09 \left(\frac{\Gamma^5 R^{*4}}{E^{*2}} \right)^{1/3} \quad (6)$$

در معادله Q'_A ضریب کشسانی یانگ مؤثر (E^*) بدین صورت تعریف می‌شود:



شکل ۱: طرحی کلی از لوله خنک‌کننده EGR



شکل ۲: تقسیم بندی لوله به چندین بخش و بزرگ نمایی یک قسمت آن

از آنجا که جریان گاز درون لوله تبادل حرارت با سیال خنک‌کن دارد، بنابراین می‌توان معادله‌ای نوشت که تابعی از ضخامت لایه رسوب است:

$$h\pi D dx [T_m(x, t) - T_s(x, t)] = \frac{\pi [T_s(x, t) - T_w] dx}{\frac{\ln(D_i/D)}{2k_f}} \quad (3)$$

با حل توأم معادلات (۲) و (۳) T_m و T_s به دست می‌آیند.

به منظور یافتن دمای متوسط گاز درون لوله، لازم است تا ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شود. عدد ناسلت نشان دهنده نسبت مقاومت حرارتی جابجایی به هدایت است و به صورت $Nu = \frac{hD}{k}$ تعریف می‌شود.

روابط تجربی بسیاری برای محاسبه Nu در جریان متلاطم درون لوله وجود دارد که در می‌ان آن‌ها از معادله نلینسکی^۱ استفاده می‌شود [۱۲]:

² Petukhov

³ Johnson

⁴ Pollock

¹ Gnielinski

که R_p شعاع ذره است و F نشان دهنده نیروی اعمالی بر ذره کروی است و برابر است با:

$$F = \frac{3}{2} \pi \Gamma R_p \quad (12)$$

در صورتی که نیروی اعمالی صفر باشد، آنگاه شعاع تماس به صورت زیر خواهد بود:

$$a^3 = \frac{6\pi\Gamma R_p^2}{2(E^*)^{-1}} \quad (13)$$

با معلوم بودن خواص مکانیکی ذره و سطح، احتمال چسبندگی ذره محاسبه خواهد شد. از آنجا که جنس لوله‌های خنک‌کننده فولاد ضدزنگ است، بنابراین خواص مکانیکی این ماده برای سطح در نظر گرفته می‌شود. ضریب کشسانی یانگ و نسبت پواسون برای فولاد ضد زنگ به ترتیب ۲۱۰ و ۰٫۲۹ GPa توسط ریکس و هال [۲۰] گزارش شدند. هم‌چنین انرژی آزاد سطح فولاد ضد زنگ $1,37 \text{ J/m}^2$ توسط سو^۴ و همکاران [۲۱] بیان شد.

اطلاعاتی از این خواص برای ذرات دوده در دسترس نیست. ذرات دوده عمدتاً از کربن تشکیل شده‌اند، پس می‌توان انتظار داشت که ساختار دوده مشابه با گرافیت باشد [۲۲]. لذا خواص مکانیکی گرافیت برای ذرات دوده استفاده می‌شود. ضریب کشسانی یانگ و نسبت پواسون برای گرافیت به ترتیب ۳۵ و ۰٫۱۲۶ GPa است [۲۳] و مقدار انرژی آزاد سطح گرافیت، $0,15 \text{ J/m}^2$ گزارش شد. به طور خلاصه، خواص مکانیکی سطح و ذره در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

تغییرات احتمال چسبندگی در مقابل سرعت ورودی جریان گاز برای قطرهای متفاوت ذرات دوده با توجه به معادله (۹) محاسبه می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش قطر ذره و نیز افزایش سرعت جریان گاز، احتمال چسبندگی ذره کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که اگر در محاسبات مقدار عددی احتمال چسبندگی بزرگتر از یک شد، این احتمال برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- فرآیند رسوب و زدودن ذره

عمده‌ترین سازوکارهای انتقال ذرات با قطر در حدود می‌کرومتر که منجر به رسوب می‌گردند، مهاجرت گرمایی، نفوذ گردابه‌ای، برخورد متلاطم و نشست گرانشی اند [۲۴ و ۲۵]. از آنجایی که ذرات دوده در اندازه نانومتری هستند در نتیجه می‌توان این سازوکارهای را در رسوب ریز ذرات درون لوله‌های خنک‌کننده EGR بررسی کرد.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (7)$$

که E_i و ν_i به ترتیب نشان دهنده ضریب کشسانی یانگ و نسبت پواسون ذره یا سطح است. متغیر دیگر کار چسبندگی (Γ) یا انرژی چسبندگی^۱ نام دارد که به صورت $\Gamma = 2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}$ تعریف می‌شود، که در آن γ_i بیانگر انرژی آزاد سطح دو ماده است.

در معادله (۶)، R^* شعاع مؤثر است که برای یک ذره کروی در حال برخورد با یک سطح صاف برابر با شعاع ذره است. با نادیده گرفتن اتلاف انرژی به علت انتشار امواج کشسان، تنها انرژی آزاد شده در حین برخورد، انرژی لازم برای شکستن تماس بین ذره و سطح است [۱۷]. بنابراین، برای جسمی کروی با جرم مؤثر m^* که با سرعت U_{imp} به سطح برخورد می‌کند، می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} m^* U_{imp}^2 - \frac{1}{2} m^* U_r^2 = Q'_A \quad (8)$$

که سرعت جهش، U_r ، از معادله فوق به دست می‌آید. باید توجه داشت که در برخورد یک ذره کروی با سطح صاف، m^* برابر با جرم ذره است.

قبلاً اشاره شد که عامل جدا شدن ذره از سطح غلبه انرژی جنبشی ذره هنگام جهش بر نیروی چسبندگی بین ذره و سطح است. با تعریف نسبت انرژی چسبندگی ذره-سطح به انرژی جنبشی ذره در حال جهش به عنوان احتمال چسبندگی ذره دوده (S)، همان طور که لی^۲ و همکاران [۱۸] چنین رابطه‌ای را برای ذرات خاکستر در دیگ‌های زغال سنگ سوز ارائه دادند، معادله‌ای را بدین صورت می‌توان نوشت:

$$S = \frac{Q_A}{\frac{1}{2} m_p U_r^2} \quad (9)$$

که انرژی چسبندگی ذره-سطح (Q_A) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$Q_A = 2\Gamma\pi a^2 \quad (10)$$

در معادله ۱۰، a شعاع تماس ذره است. طبق نظریه JKR، که اثر نیروی چسبندگی را بر تغییر شکل یک کره کشسان در تماس با سطح به حساب می‌آورد، شعاع تماس برابر است با:

$$a^3 = \frac{3R_p}{4(E^*)^{-1}} \left[F + 3\pi\Gamma R_p + \sqrt{6\pi\Gamma R_p F + (3\pi\Gamma R_p)^2} \right] \quad (11)$$

³ Reeks & Hall

⁴ Su

¹ Adhesive energy

² Lee

δ در لایه مرزی متلاطم ارائه شده‌اند. در زیر لایه چسبنده، توزیع دما خطی است و ضخامت زیر لایه را می‌توان توسط معادله زیر بیان کرد [۲۵]:

$$\delta = \frac{\nu_g(U_m - 5u^*)}{u^{*2}} \quad (17)$$

در معادله فوق، سرعت اصطکاکی (u^*) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho_g} \quad (18)$$

که τ_w تنش برشی روی دیواره است و توسط معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_w = \frac{1}{8} f \rho_g U_m^2 \quad (19)$$

در حضور اختلاف دما، مولکول‌هایی که در ناحیه گرم حرکت می‌کنند انرژی جنبشی بیشتری نسبت به مولکول‌های ناحیه سرد دارند و نیروی خالصی حاصل می‌گردد که نیروی مهاجرت گرمایی نامیده می‌شود [۲۷].

هنگامی که ذرات از جریان گاز به طرف لایه مرزی نزدیک سطح انتقال می‌یابند، وارد ناحیه‌ای می‌شوند که اختلاف دما وجود دارد. این ذرات که به سطح رسیده‌اند به دلیل وجود نیروهای وان دروالس به دیواره می‌چسبند و رسوب می‌کنند [۱۱].

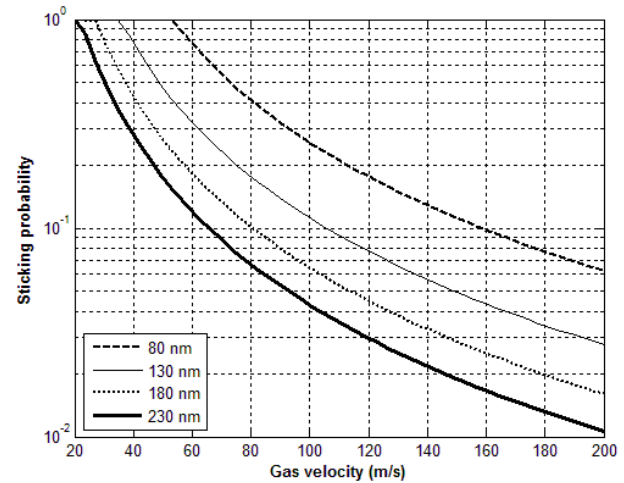
بسیاری از محققان رسوب ریز ذرات در اثر مهاجرت گرمایی را در سامانه‌های بازچرخانی گاز خروجی خنک بررسی کردند [۱۱ و ۲۸]. آبراهام و همکاران [۱۱] ثابت کردند که مهاجرت گرمایی به عنوان سازوکار غالب در رسوب ریز ذرات تحت شرایط غیر هم‌دما است. ملایری و همکاران [۲۸] بر مبنای نتایج آزمایشگاه نشان دادند که رسوب ذرات دوده تحت شرایط هم‌دما در مقایسه با مهاجرت گرمایی برای خنک‌کننده EGR با هر هندسه‌ای ناچیز است.

ذرات در حد میکرومتر می‌توانند به راحتی توسط حرکت گردابه‌ای به طرف سطح حرکت کنند. مهاجرت ذرات از ناحیه غلیظ به ناحیه‌ای با غلظت کم نفوذ نامیده می‌شود که می‌تواند توسط قانون شناخته شده فیزیک توصیف شود.

رسوب ذره می‌تواند به صورت تکانه وار نیز رخ دهد در صورتی که ذره قادر نباشد مسیر جریان سیال را دنبال کند و به زمان آسایش ذره بستگی دارد. ذرات کوچکتر زمان آسایش کوتاهتری دارند و می‌توانند مسیر جریان سیال را دنبال کنند، در حالی که ذرات بزرگتر نمی‌توانند به راحتی از تغییرات سریع جریان تبعیت کنند. اگر ذرات به اندازه کافی بزرگ باشند به طوری که گرانش فرآیند رسوب را پیش کند، آنگاه رسوب به صورت نشست گرانشی نیز اتفاق می‌افتد [۲۴].

جدول ۱: خواص مکانیکی ذره و سطح [۲۰]

ذره دوده	ضریب یانگ (GPa)	نسبت پواسون	انرژی آزاد سطح (J/m^2)
	۳۵	۰,۱۲۶	۰,۱۵
فولاد ضدزنگ	۲۱۰	۰,۲۹	۱,۳۷



شکل ۳: احتمال چسبیدگی در مقابل سرعت ورودی گاز برای ذرات دوده با قطرهای متفاوت

پدیده‌ای که در آن حرکت یک ذره به واسطه اختلاف دما ایجاد می‌شود مهاجرت گرمایی نام دارد. حرکت یک ذره در این پدیده توسط معادله زیر توصیف می‌شود [۲۶]:

$$V_{th} = -K_{th} \frac{v}{T} \nabla T \quad (14)$$

که V_{th} و K_{th} به ترتیب سرعت و ضریب مهاجرت گرمایی هستند و ∇T بیانگر اختلاف دما است. ضریب K_{th} از معادله زیر به دست می‌آید:

$$K_{th} = \frac{2C_s C_c}{(1 + 3C_m Kn)} \times \frac{(k_g/k_p) + C_t Kn}{1 + 2(k_g/k_p) + 2C_t Kn} \quad (15)$$

در معادله فوق، C_c ضریب تصحیح کانینگهام^۱ نامیده می‌شود و برابر است با:

$$C_c = 1 + Kn(A + Be^{-C/Kn}) \quad (16)$$

ثابت‌های A, B, C, C_m, C_s, C_t در معادلات (۱۵) و (۱۶) بترتیب ۱,۲۵۷, ۰,۴, ۱, ۱, ۱,۱۷, ۱,۱۴, ۱,۱۸, ۲, اند.

تفاوت دما در معادله (۱۴) می‌تواند از معادله $\nabla T = \frac{T_m - T_w}{\delta}$ محاسبه شود که δ ضخامت زیر لایه چسبنده است. عبارتهای مختلفی برای

¹ Cunningham

سازوکارها، شار رسوب ذرات روی سطح لوله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\phi_d = SC_m V_{th} \quad (20)$$

که C_m غلظت متوسط ذره است. معادله زیر نشان دهنده غلظت خروجی ذره بر حسب غلظت ورودی ذره و بازده رسوب (η_d) است:

$$C_o = C_i(1 - \eta_d) \quad (21)$$

معادله‌ای توسط رومی^۳ و همکاران [۳۰] برای بازده رسوب مهاجرت گرمایی بدین صورت ارائه شد:

$$\eta_d = 1 - \left[\frac{T_w + (T_i - T_w) \exp\left(\frac{-4hL}{\rho_g D U_m C_p}\right)}{T_i} \right]^{PrK_{th}} \quad (22)$$

لذا غلظت متوسط ذره بدین صورت نوشته می‌شود:

$$C_m = \frac{C_i + C_o}{2} = \frac{2C_i - C_i\eta_d}{2} \quad (23)$$

اطلاعات در مورد رسوب ذره‌ای خنک‌کننده‌های EGR غالباً از داده‌های آزمایشگاه به دست می‌آیند، بنابراین هر ابزار پیش‌گویانه می‌تواند پیشرفت قابل توجهی را در طراحی این سامانه‌ها فراهم آورد.

نقطه آغازین شبیه‌سازی فرآیندهای رسوب گرفتگی، روش شناخته شده کرن و سیتون است که فرض می‌کند رشد خالص لایه رسوب به مشارکت دو فرآیند همزمان، یعنی رسوب و زدودن، بستگی دارد [۸]. معادله‌ای که برای شار زدودن ریز ذرات در نظر گرفته می‌شود

بدین صورت است:

$$\phi_r = KU_m \rho_f k_f R_f \quad (24)$$

که K ثابت تناسب، ρ_f چگالی لایه رسوب و k_f رسانای گرمایی لایه رسوب هستند. طبق معادله کرن-سیتون، تغییرات جرم کل رسوب بر واحد مساحت سطح (m_f) نسبت به زمان برابر با اختلاف شار رسوب و شار زدودن است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dm_f}{dt} = \rho_f k_f \frac{dR_f}{dt} = \phi_d - \phi_r \quad (25)$$

با جایگزین کردن ϕ_d و ϕ_r از معادلات (۲۰) و (۲۴) در معادله فوق، معادله ۲۶، برای مقاومت حرارتی رسوب (R_f) به دست می‌آید:

$$R_f(t) = \frac{SC_m V_{th}}{KU_m \rho_f k_f} [1 - \exp(KU_m t)] \quad (26)$$

به منظور محاسبه مقاومت حرارتی رسوب در معادله فوق، ثابت تناسب^۴ (K) باید معلوم باشد. با استفاده از داده‌های مقاومت حرارتی رسوب بر مبنای آزمایشات انجام شده توسط عبد الهادی و همکاران

علاوه بر فرآیند رسوب در مبدل‌های حرارتی، فرآیند زدودن نیز رخ می‌دهد. به منظور طراحی بهتر خنک‌کننده‌های EGR، لازم است تا سازوکارهایی که در زدودن ریز ذرات نقش دارند مطالعه شوند. این سازوکارها شامل نیروهای برشی جریان سیال، ضربه ناگهانی ذره و غلتش ذره اند. سازوکارهای دیگری نیز ممکن است در فرآیند زدودن ذرات دوده تأثیرگذار باشند، اما در پژوهش‌های علمی به این سازوکارها بیشتر توجه شده است. با این وجود، نمی‌توان به روشنی اظهار کرد که کدام سازوکار عامل اصلی در فرآیند زدودن است.

ذرات می‌توانند توسط تنش‌های برشی از روی سطح زدوده شوند اگر نیروی پسا^۱ بزرگتر از نیروی چسبندگی^۲ باشد [۲۰]. آبرهام و همکاران [۱۱] تنش برشی مورد نیاز را برای زدودن ذرات زیر می‌کرون محاسبه کردند و نتیجه گرفتند که برای ذراتی با قطر بیشتر از ۴۰۰ nm، نیروی پسا بر نیروی چسبندگی وان دروالس غلبه می‌کند. آن‌ها بیان کردند که برای ذرات دوده در خنک‌کننده‌های EGR، نیروی برشی عامل چندان مؤثری در زدودن نیست به دلیل اینکه اندازه ذرات دوده عموماً کمتر از ۳۰۰ nm است.

سازوکار احتمالی دیگر که می‌تواند به زدودن ذرات کمک کند برخورد یک ذره در جریان گاز با ذرات از پیش رسوب کرده، یا به عبارت دیگر بستری از ذرات است. هنگامی که ذره با بستری از ذرات برخورد می‌کند، اگر انرژی جنبشی در حال انتقال به ذره بستر به اندازه کافی بزرگ باشد تا بر نیروی چسبندگی بین ذره بستر و ذرات مجاور آن غلبه کند، آنگاه ذره از روی سطح جهش می‌یابد [۱۴].

ذرات می‌توانند روی سطح لغزش یا غلتش داشته باشند و به این طریق از روی سطح برداشته شوند. عبد الهادی و همکاران [۲۹] بیان کردند که اگر سرعت جریان بالاتر از سرعتی باشد که غلتش ذرات رخ دهد، آنگاه رسوب ذره‌ای کاهش می‌یابد. آن‌ها گشتاور غلتش هیدرودینامی کی را به عنوان تابعی از نیروی پسا و وان دروالس تعریف کردند و بیان نمودند که در یک سرعت معین، گشتاور غلتش بزرگتر از گشتاور سکون خواهد شد و ذره شروع به حرکت می‌کند.

۲-۴- بقای جرم ذره

در قسمت‌های قبل معادلات حاکم بر جریان توده سیال و انتقال حرارت، هم‌چنین سازوکارهای رسوب و زدودن ریز ذرات توصیف شدند. در این قسمت با نوشتن بقای جرم ذره و ادغام آن با معادلات پیشین می‌توان به حل تحلیلی کامل دست یافت.

همان طور که پیش‌تر اشاره شد، مهاجرت گرمایی سازوکار غالب در رسوب ذرات دوده است. با نادیده گرفتن نفوذ گردابه‌ای و سایر

³ Romay

⁴ Proportionality constant

¹ Drag force

² Adhesion force

نشده است، در نتیجه $D_i = D$ و سطح مقطع لوله محاسبه می‌شود که با مشخص بودن شدت جریان گاز ورودی (\dot{m}_g)، سرعت متوسط در لوله به صورت زیر به دست می‌آید:

$$U_m = \frac{\dot{m}_g}{\frac{\pi}{4} D^2 \rho_g} \quad (۳۲)$$

سپس عدد رینولدز، ضریب اصطکاک لوله و عدد ناسلت محاسبه می‌شوند و ضریب انتقال حرارت جابجایی تعیین می‌گردد که موجب می‌شود تا دمای متوسط گاز و دمای سطح رسوب به دست آیند. در مرحله بعد، تنش برشی روی دیواره، سرعت اصطکاک و ضخامت زیر لایه چسبیده محاسبه می‌شوند که با معلوم بودن اختلاف دما، سرعت مهاجرت گرمایی تعیین می‌شود. سپس غلظت متوسط ذره و احتمال چسبیدگی ذره باید حساب شوند تا شار رسوب به دست آید. لازم است تا ابتدا بازده رسوب مهاجرت گرمایی مشخص گردد تا بتوان غلظت متوسط ذره را حساب کرد. احتمال چسبیدگی ذره نیز از شکل ۳ حاصل می‌شود. علاوه بر شار رسوب، شار زدودن نیز باید معلوم باشد.

در معادله شار زدودن، یک ثابت تناسب وجود دارد که می‌توان از رابطه‌ای تجربی برای محاسبه آن استفاده کرد. با قرار دادن عبارتهای رسوب و زدودن در رابطه کرن-سیتون، مقاومت حرارتی رسوب تعیین می‌شود. برای اینکه بتوان محاسبات را تکرار کرد، باید قطر لوله رسوب گرفته حساب شود. باید توجه داشت که برای محاسبه متغیرهای مختلف مانند سرعت مهاجرت گرمایی و غلظت متوسط ذره، قطر لوله در حالت رسوب گرفته محاسبه شود. مقدار رسوب تشکیل شده در کل لوله از معادله ۳۳ محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$m = \frac{\pi}{4} \rho_f L (D_i^2 - D^2) \quad (۳۳)$$

از طرفی جرم کل رسوب بر واحد مساحت سطح لوله برابر با $m_f = \rho_f k_f R_f$ است، در نتیجه می‌توان نوشت:

$$m = \rho_f k_f R_f (\pi D_i L) \quad (۳۴)$$

با مساوی قرار دادن معادلات (۳۳) و (۳۴)، قطر لوله رسوب گرفته بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$D = \sqrt{D_i^2 - 4k_f R_f D_i} \quad (۳۵)$$

اختلاف قطر لوله تمیز و قطر لوله رسوب گرفته، نشان دهنده ضخامت لایه رسوب است. این محاسبات تا هر زمانی که مد نظر باشد ادامه خواهند یافت. لازم به ذکر است که پیاده‌سازی روش حل و محاسبات مربوط به معادلات بقای انرژی و بقای جرم توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

[۲۹] همچنین ملایری و همکاران [۲۸] این ثابت به دست خواهد آمد. در نتیجه معادله‌ای را بدین صورت بر حسب سرعت ورودی جریان گاز (U_i) به خنک کننده EGR می‌توان نوشت:

$$K = 1.5 \times 10^{-6} [1 - \exp(-0.03U_i)] \quad (۲۷)$$

۲-۵- محاسبات و روش حل

خواص فیزیکی گاز خروجی در دمای می‌انگین جریان سیال ورودی و دیواره لوله محاسبه می‌شوند که شامل بیش از ۹۵٪ مخلوط گازهای در حال جریان است [۲۹]. خواص فیزیکی هوا شامل چگالی (ρ_g)، چسبندگی (μ_g)، رسانایی گرمایی (k_g)، و ظرفیت گرمایی (C_p) برای گازهای دیزل در نظر گرفته می‌شوند. به طور خلاصه، معادلات خواص گاز بدین صورت ارائه شده‌اند [۳۱]:

$$\rho_g = \frac{PMW_g}{RT_{avg}}, \quad MW_g = 28.89 \frac{g}{mol} \quad (۲۸)$$

$$\mu_g = 3.07 \times 10^{-7} T_{avg}^{0.7126} \quad (۲۹)$$

$$C_p = 0.2168 T_{avg} + 960.49 \quad (۳۰)$$

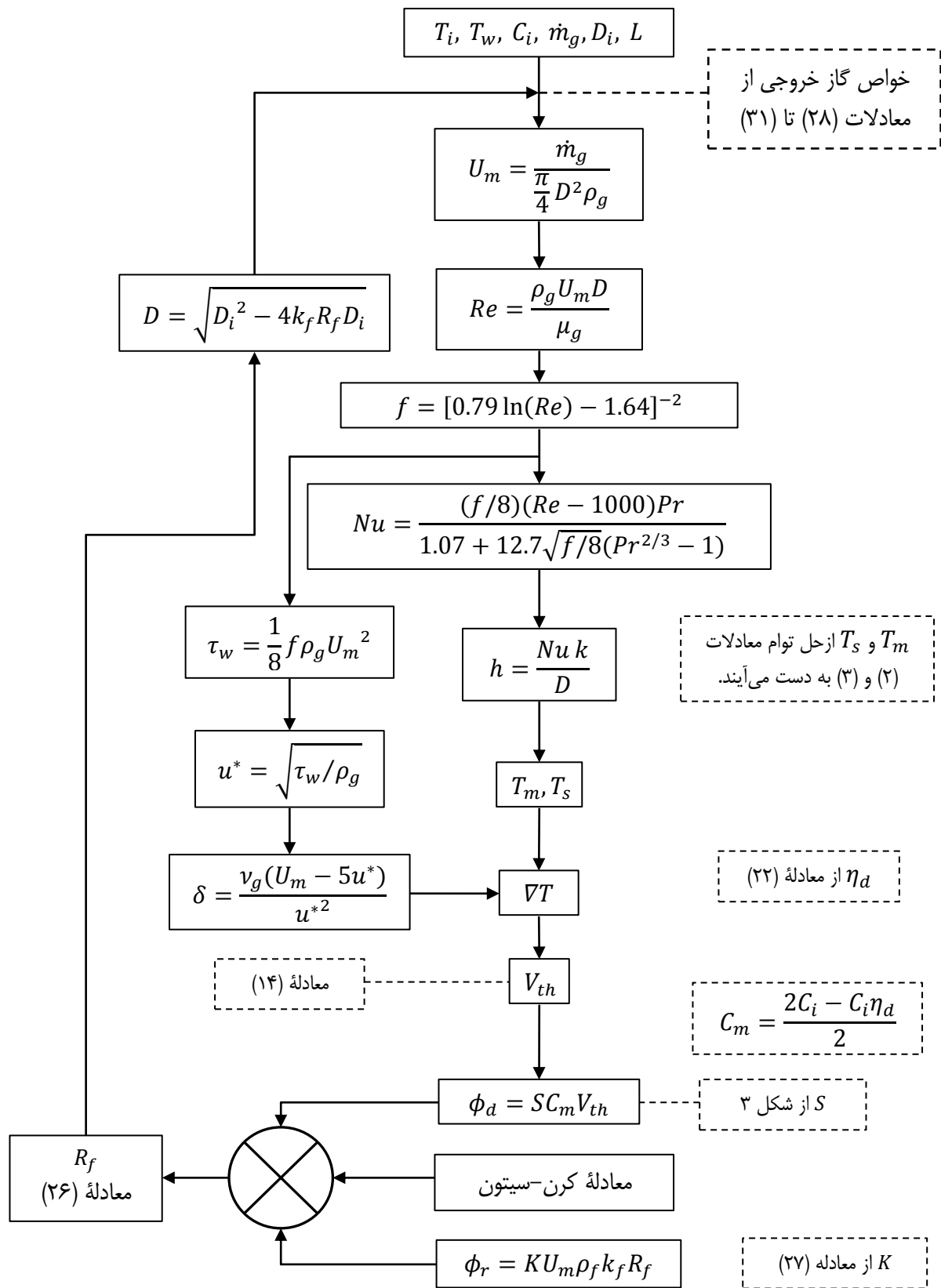
$$k_g = 5.43 \times 10^{-5} T_{avg} + 0.01084 \quad (۳۱)$$

چگالی و رسانایی گرمایی ذرات دوده که در جریان گاز وجود دارند به ترتیب 1770 kg/m^3 و 0.5 W/mK توسط لنس و همکاران [۳۲] گزارش شد. این ذرات با رسوب بر سطح، لایه‌ای متخلخل ایجاد می‌کنند که دارای چگالی 35 kg/m^3 و رسانایی گرمایی 0.1 W/mK است که تخمیناً ۹۸٪ اندازه‌گیری شده است [۳۲]. خواص فیزیکی ذره دوده و لایه رسوب در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

جدول ۲: خواص فیزیکی ذره دوده و لایه رسوب [۳۲]

چگالی (kg/m^3)	رسانایی گرمایی (W/mK)	
۱۷۷۰	۰٫۵	ذره دوده
۳۵	۰٫۱	لایه رسوب

شکل ۴ نشان دهنده روش حل مساله است. همان طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، گام زمانی در محاسبات ۱ ثانیه فرض می‌شود. باید توجه داشت که تعداد تقسیمات طول لوله در محاسبات ۵۰ در نظر گرفته شده است. متغیرهای معلوم شامل دما و شدت جریان گاز ورودی، دمای سیال خنک کن، غلظت ورودی ذره، قطر داخلی و طول لوله اند. در لحظه $t = 0$ ، هیچ رسوبی روی سطح لوله تشکیل



شکل ۴: روش حل مسأله

$$D = \sqrt{D_i^2 - 4k_f R_f D_i} \quad (35)$$

اختلاف قطر لوله تمیز و قطر لوله رسوب گرفته، نشان دهنده ضخامت لایه رسوب است. این محاسبات تا هر زمانی که مد نظر باشد ادامه خواهند یافت. لازم به ذکر است که پیاده سازی روش حل و محاسبات مربوط به معادلات بقای انرژی و بقای جرم توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۳- اعتبارسنجی مطالعه تحلیلی

به منظور سنجش اعتبار مطالعه تحلیلی، نتایج به دست آمده از آن با داده های آزمایشگاه مقایسه می شوند. دستگاه آزمایشگاه به طور کامل توسط [۷ و ۲۸] شرح داده شده است که در این جا به توصیف مختصری از آن پرداخته می شود.

طرح راه ای از دستگاه آزمایشگاه در شکل ۵ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک مولد دوده، لوله اختلاط، گرم کن جریان گاز، و سامانه خنک کننده EGR است. ذرات دوده در فشار محیط با اندازه می انگین ۱۳۰ nm با انحراف استاندارد ۵۵ nm تولید می شوند.

غلظت جرمی ذرات دوده ۱۰۰ mg/m³ است که در محدوده مشابه با غلظت جرمی دوده در گازهای خروجی از موتورهای دیزلی است. مخلوط گازهای داغ و ذرات دوده سپس از خنک کننده EGR عبور داده می شوند، که یک مبدل حرارتی پوسته و لوله است و شکل ۶ آن را نمایش می دهد. لوله های صاف خنک کننده از جنس فولاد ضد زنگ بوده و قطر داخلی آنها ۱۰ mm و طول آن ۲۱۰ mm است. مخلوط گازهای داغ و ذرات دوده توسط خنک کننده EGR خنک می شوند، که از آب به عنوان سیال خنک کن استفاده می شود.

زمانی که مخلوط گاز-ذرات دوده از درون خنک کننده عبور می کنند، رسوب ذره ای رخ می دهد. سه دسته آزمایش هر کدام به مدت ۵ ساعت انجام شدند که شرایط عملیاتی در جدول ۳ داده شده است. شکل های ۷ تا ۹ مقایسه ای را بین پیش بینی های طرح و داده های آزمایشگاه نشان می دهند. در این شکل ها، نتایج طرح تا دو برابر زمان آزمایش ارزیابی شده اند.

همان طور که از شکل ها دیده می شود، سازگاری خوبی بین نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاه وجود دارد.

ناپیوستگی هایی که در مقاومت حرارتی رسوب آزمایشی برای سرعت گاز ۷۰ و ۱۲۰ m/s مشاهده می شود ممکن است به علت جدا شدن قسمتی از لایه رسوب و رشد مجدد آن باشد. بر اساس معادله (۲۴)، عبارت زدودن رسوب (ϕ_r) با افزایش سرعت گاز ورودی ارتباط مستقیم دارد. نوسانات شدید در شکل ۹ به دلیل کنده شدن بخشی از رسوب تشکیل شده در سرعت بالای گاز (۱۲۰ m/s) است.

شکل ۴ نشان دهنده روش حل مساله است. همان طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، گام زمانی در محاسبات ۱ ثانیه فرض می شود. باید توجه داشت که تعداد تقسیمات طول لوله در محاسبات ۵۰ در نظر گرفته شده است.

متغیرهای معلوم شامل دما و شدت جریان گاز ورودی، دمای سیال خنک کن، غلظت ورودی ذره، قطر داخلی و طول لوله اند. در لحظه $t = 0$ ، هیچ رسوبی روی سطح لوله تشکیل نشده است، در نتیجه $D_i = D$ و سطح مقطع لوله محاسبه می شود که با مشخص بودن شدت جریان گاز ورودی (\dot{m}_g)، سرعت متوسط در لوله به صورت زیر به دست می آید:

$$U_m = \frac{\dot{m}_g}{\frac{\pi}{4} D^2 \rho_g} \quad (32)$$

سپس عدد رینولدز، ضریب اصطکاک لوله و عدد ناسلت محاسبه می شوند و ضریب انتقال حرارت جابجایی تعیین می گردد که موجب می شود تا دمای متوسط گاز و دمای سطح رسوب به دست آیند.

در مرحله بعد، تنش برشی روی دیواره، سرعت اصطکاک و ضخامت زیر لایه چسبنده محاسبه می شوند که با معلوم بودن اختلاف دما، سرعت مهاجرت گرمایی تعیین می شود. سپس غلظت متوسط ذره و احتمال چسبیدگی ذره باید حساب شوند تا شار رسوب به دست آید. لازم است تا ابتدا بازده رسوب مهاجرت گرمایی مشخص گردد تا بتوان غلظت متوسط ذره را حساب کرد. احتمال چسبیدگی ذره نیز از شکل ۳ حاصل می شود. علاوه بر شار رسوب، شار زدودن نیز باید معلوم باشد.

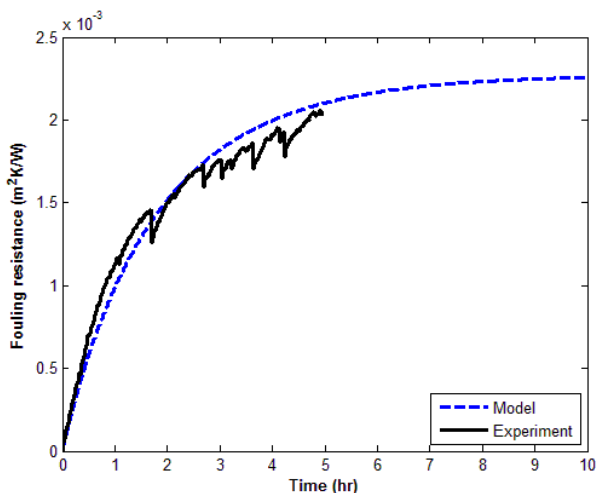
در معادله شار زدودن، یک ثابت تناسب وجود دارد که می توان از رابطه ای تجربی برای محاسبه آن استفاده کرد. با قرار دادن عبارتهای رسوب و زدودن در رابطه کرن-سیتون، مقاومت حرارتی رسوب تعیین می شود. برای اینکه بتوان محاسبات را تکرار کرد، باید قطر لوله رسوب گرفته حساب شود. باید توجه داشت که برای محاسبه متغیرهای مختلف مانند سرعت مهاجرت گرمایی و غلظت متوسط ذره، قطر لوله در حالت رسوب گرفته محاسبه شود. مقدار رسوب تشکیل شده در کل لوله از معادله ۳۳ محاسبه می شود [۳۱]:

$$m = \frac{\pi}{4} \rho_f L (D_i^2 - D^2) \quad (33)$$

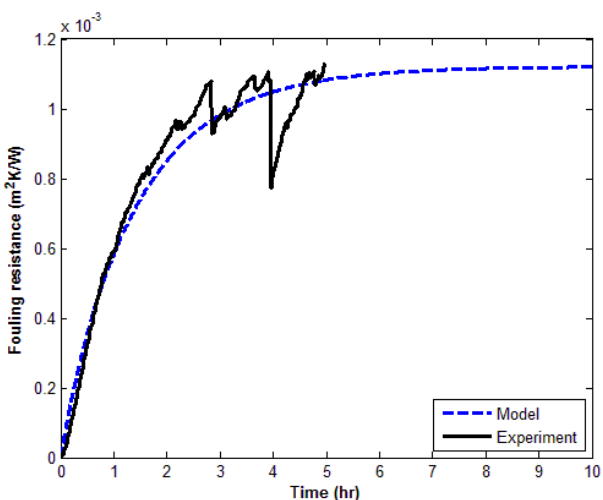
از طرفی جرم کل رسوب بر واحد مساحت سطح لوله برابر با $m_f = \rho_f k_f R_f$ است، در نتیجه می توان نوشت:

$$m = \rho_f k_f R_f (\pi D_i L) \quad (34)$$

با مساوی قرار دادن معادلات (۳۳) و (۳۴)، قطر لوله رسوب گرفته بدین صورت محاسبه می شود:



شکل ۸: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش برای سرعت گاز ورودی ۱۲۰ m/s



شکل ۹: مقایسه شبیه‌سازی و آزمایش برای سرعت گاز ورودی ۱۲۰ m/s

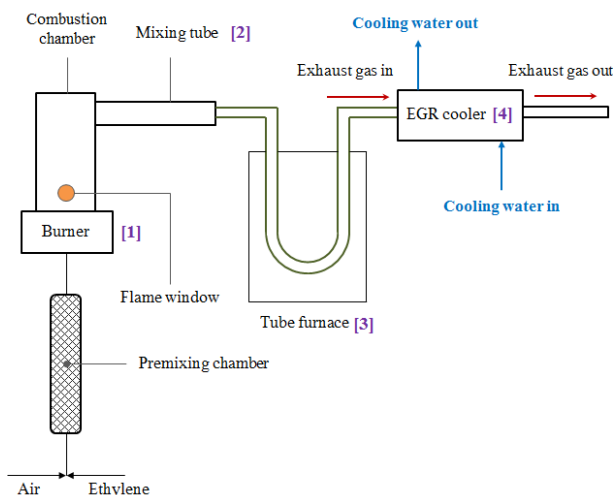
۴- بحث بر نتایج

شکل‌های ۷ تا ۹ بیان می‌کنند که هر چه سرعت ورودی جریان گاز افزایش یابد، مقاومت حرارتی لایه رسوب کاهش می‌یابد. هنگامی که سرعت جریان گاز تندتر می‌شود، احتمال چسبیدن ذرات دوده به سطح کاهش یافته و همچنین زدوده شدن ذرات از پیش رسوب کرده توسط نیروهای برشی جریان، ضربه ناگهانی ذرات یا غلتش ذره افزایش می‌یابد بنابراین، لایه نازک‌تری از رسوب روی سطح لوله تشکیل می‌شود که مطابق با نتایج وری و همکاران [۱۰] هم چنین آبراهام و همکاران [۱۳] است.

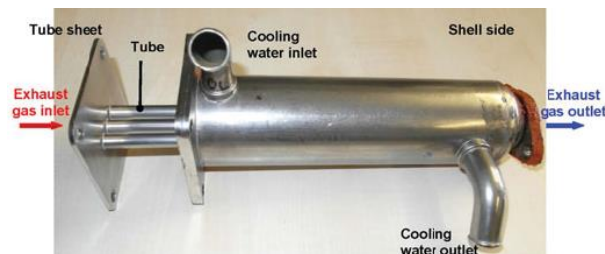
رسوب مهاجرت گرمایی ذرات دوده موجود در جریان گاز روی سطح لوله، منجر به تشکیل لایه‌ای می‌شود که تبادل حرارت بین جریان توده سیال و دیواره لوله‌های خنک‌کننده را کاهش می‌دهد. شکل ۱۰ تغییرات ضخامت لایه رسوب با زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی که سرعت گاز پایین باشد لایه رسوب

جدول ۳: شرایط عملیاتی در آزمایشات

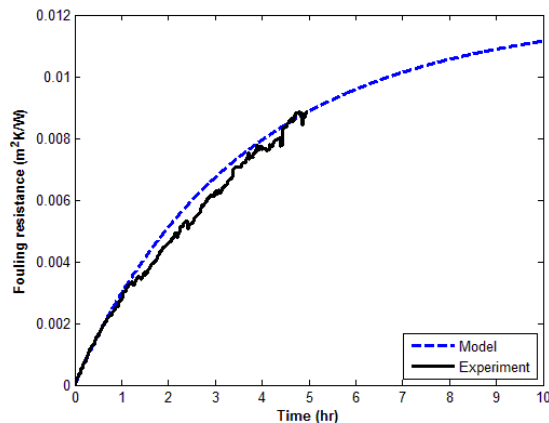
۴۰۰°C	دمای گاز ورودی
۸۰°C	دمای خنک کن
۲۳,۲ kg/hr و ۱۳,۵، ۵,۸	شدت جریان گاز ورودی
۱۲۰ m/s و ۷۰، ۳۰	سرعت گاز ورودی
۱۰۱ kPa	فشار می‌انگین
۱۰۰ mg/m³	غلظت جرمی دوده



شکل ۵: طرح‌واره‌ای از دستگاه آزمایشگاه [۷]



شکل ۶: خنک‌کننده EGR مورد استفاده در آزمایشات



شکل ۷: مقایسه شبیه‌سازی و آزمایش برای سرعت گاز ورودی ۳۰ m/s

الگوی ارائه شده تغییرات دما شامل دمای گاز، دمای سطح رسوب و نیز اختلاف دما را در طول لوله پیش‌بینی می‌کند. شکل ۱۲ نشان دهنده تغییرات دمای گاز نسبت به زمان در خروجی لوله برای سه سرعت مورد مطالعه است.

همان طور که دیده می‌شود، دمای گاز خروجی برای سرعت گاز ۳۰ m/s در ابتدا کمتر از دو سرعت دیگر است و پس از گذشت زمان افزایش می‌یابد به طوری که مقدار آن در انتها بیشتر از سرعت‌های دیگر می‌شود. این رفتار می‌تواند به دلیل پایین بودن سرعت جریان در آغاز عملیات باشد که باعث می‌شود دمای خروجی از خنک‌کننده دارای مقدار کمتری شود.

به تدریج که لایه رسوب روی سطح تشکیل می‌شود و مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد، تبادل حرارت بین جریان سیال و دیواره خنک کاهش یافته است و دمای خروجی روندی افزایشی پیدا می‌کند. برای سرعت جریان گاز ۷۰ و ۱۲۰ m/s، دمای خروجی از لوله‌های خنک‌کننده تغییرات چندانی در ابتدا و انتهای زمان عملیات ندارند که ممکن است به علت کاهش زمان تبادل انتقال حرارت بین جریان گاز و سیال خنک‌کن باشد.

تغییرات دمای سطح لایه رسوب به عنوان تابعی از زمان در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، نقطه آغازین دمای سطح لایه رسوب دمای دیواره لوله است و به تدریج که لایه رسوب رشد می‌کند به علت مقاومت حرارتی که در لایه ایجاد می‌گردد، دمای آن افزایش می‌یابد.

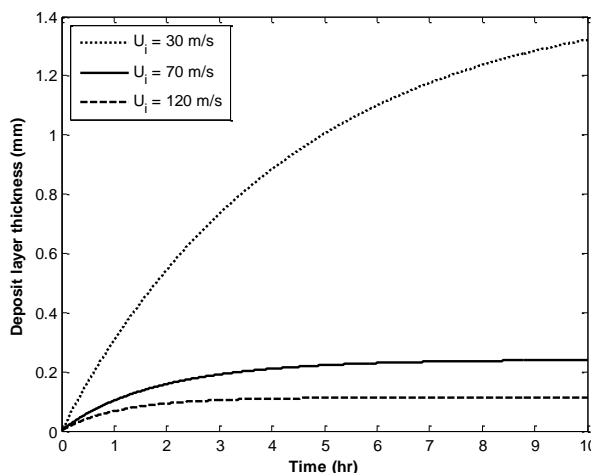
افزایش دمای سطح لایه رسوب برای سرعت گاز ورودی ۳۰ m/s سریع‌تر از افزایش آن برای دو سرعت دیگر است و به این دلیل است که مقاومت حرارتی رسوب برای سرعت گاز ورودی ۳۰ m/s، همان طور که در قسمت قبل نشان داده شد، بیشتر از سرعت‌های دیگر است. نکته قابل توجه در این شکل آن است که پس از مدت زمان معینی، دمای سطح رسوب به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود. این مقدار ثابت نشان دهنده رفتار مجانبی لایه رسوب است.

جدول ۴: مقایسه مقدار کل رسوب در لوله برای دو زمان مختلف

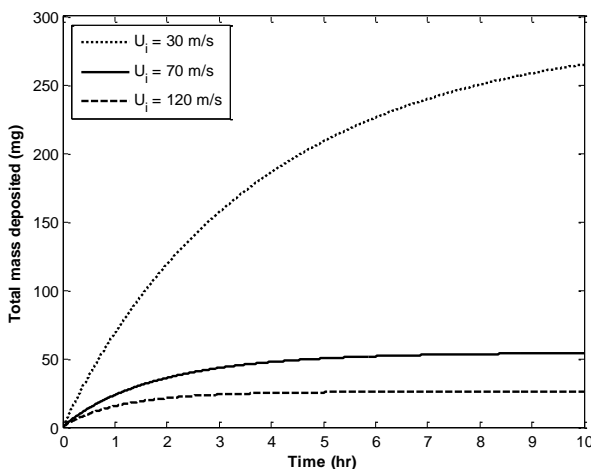
سرعت گاز ورودی (m/s)	جرم رسوب پس از ۱۰ ساعت (mg)		جرم رسوب پس از ۵ ساعت (mg)	
	اختلاف %	مقدار	اختلاف %	مقدار
۳۰	—	۲۵۹,۷	—	۲۰۵,۸
۷۰	۷۹,۵	۵۳,۴	۷۵,۶	۵۰,۲
۱۲۰	۹۰,۰	۲۵,۹	۸۷,۷	۲۵,۴

سریع‌تر رشد می‌کند. هر چه سرعت جریان گاز کندتر باشد، احتمال چسبیدن ذرات به سطح بیشتر می‌شود و شار زدودن ذرات توسط تنش برشی، ضربه ناگهانی ذره یا غلتش ذره کاهش می‌یابد. در نتیجه، لایه‌ای ضخیم‌تر روی سطح ایجاد شده و باعث می‌شود که مقدار رسوب تشکیل یافته روی سطح لوله افزایش یابد.

تغییرات جرم کل رسوب در لوله‌های خنک‌کننده بر حسب زمان برای سرعت‌های گاز مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است و جدول ۴ مقدار کل رسوب تشکیل یافته در طول لوله را بعد از ۵ و ۱۰ ساعت عملیات خلاصه می‌کند. همان طور که دیده می‌شود، جرم کل رسوب برای سرعت گاز ۳۰ m/s بیشترین مقدار را دارد و درصد اختلاف آن با دو سرعت دیگر محاسبه شده است. برای سرعت‌های گاز ۷۰ و ۱۲۰ m/s، اختلاف جرم رسوب پس از ۵ ساعت و ۱۰ ساعت تفاوت چندانی ندارد که بیان می‌کند رسوب ذره‌ای به حالت مجانبی رسیده است و تعادل بین شار رسوب و شار زدودن برقرار شده است.



شکل ۱۰: تغییرات ضخامت لایه رسوب با زمان برای سه سرعت گاز ورودی متفاوت



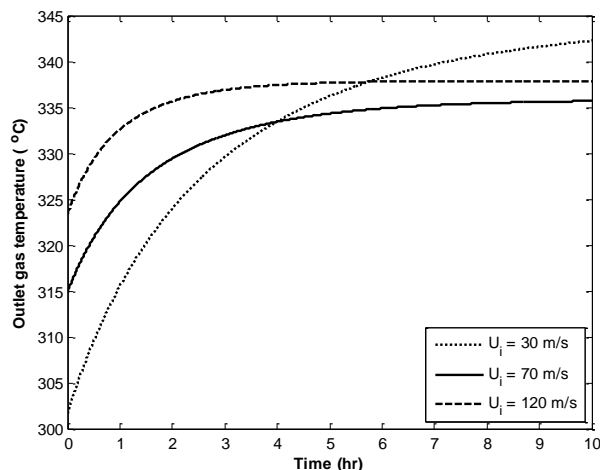
شکل ۱۱: تغییرات جرم کل رسوب در لوله خنک‌کننده نسبت به زمان

هر چه دمای گازهای ورودی به لوله‌های خنک‌کننده گرم‌تر باشد، با فرض اینکه دمای دیواره لوله ثابت بماند، اختلاف دمای گاز ورودی و محیط خنک بیشتر شده که منجر به افزایش شار رسوب می‌گردد. تغییرات مقاومت حرارتی رسوب نسبت به زمان برای سه دمای گاز ورودی متفاوت در شکل ۱۴ نشان داده شده است که بیان می‌کند دمای گاز ورودی کمتر منجر به افزایش مقاومت حرارتی رسوب می‌گردد. لازم به ذکر است که در شکل ۱۴ سرعت ورودی گاز m/s ۳۰، دمای سیال خنک‌کن $80^{\circ}C$ و اندازه ذره 80 nm در نظر گرفته شده است.

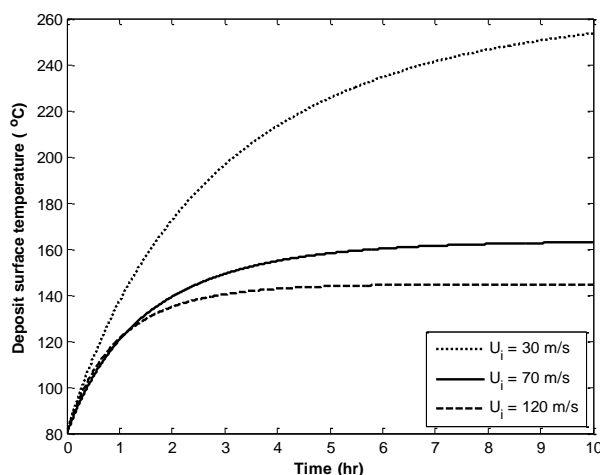
۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، الگویی یک بعدی برای بررسی رفتار رسوب ذره‌ای در لوله‌های خنک‌کننده EGR ارائه شد که با تقسیم لوله به چندین قسمت و در نظر گرفتن شرایط حالت پایا در هر یک، از اثرات گذرا در معادلات صرف نظر شد. نتیجه‌گیری‌های حاصل از این مطالعه در زیر خلاصه شده‌اند:

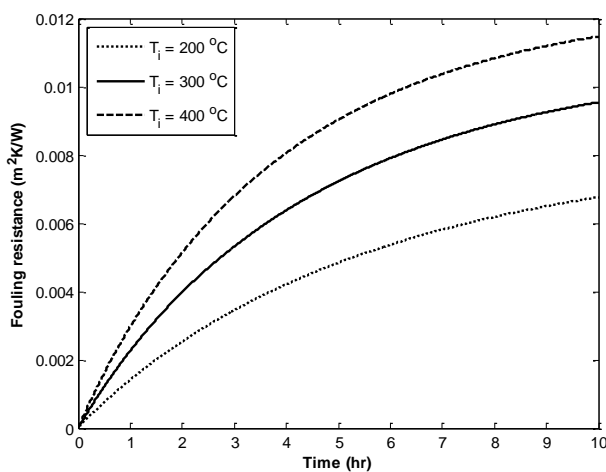
۱. هر چه ذرات دوده کوچکتر باشند، احتمال چسبیدن آنها به سطح افزایش می‌یابد که منجر به رسوب بیشتر آنها می‌شود.
۲. با تندتر شدن سرعت گاز ورودی به لوله‌های خنک‌کننده، احتمال چسبیدگی ذرات به سطح کاهش و شار زدودن افزایش می‌یابد که باعث می‌شود از ضخامت و جرم لایه رسوب کاسته شود.
۳. رسوب مهاجرت گرمایی ذرات دوده موجود در جریان گاز روی سطح لوله، منجر به تشکیل لایه‌ای می‌شود که تبادل حرارت بین جریان توده سیال و دیواره لوله‌های خنک‌کننده را کاهش می‌دهد و هر چه لایه رسوب ضخیم‌تر گردد، مقاومت در برابر نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود و دمای سطح رسوب افزایش می‌یابد.
۴. پس از مدت زمان معینی تعادل بین شار رسوب و شار زدودن برقرار می‌گردد به طوری که مقدار آنها به یکدیگر نزدیک می‌شود. این حالت بیان‌کننده رفتار مجانبی رسوب ذره‌ای است.



شکل ۱۲: تغییرات دمای گاز با زمان در خروجی لوله برای سه سرعت گاز ورودی متفاوت



شکل ۱۳: دمای سطح لایه رسوب به عنوان تابعی از زمان در سرعت‌های گاز متفاوت



شکل ۱۴: تغییرات مقاومت حرارتی رسوب با زمان برای دماهای گاز ورودی متفاوت در سرعت 30 m/s

فهرست علائم

حروف یونانی

Γ	انرژی چسبندگی، (J)	C_c	ضریب تصحیح کانینگهام
δ	ضخامت زیر لایه چسبنده، (m)	C_m	غلظت متوسط ذره، (kg/m^3)
η_d	بازده رسوب مهاجرت گرمایی	C_p	ظرفیت گرمایی گاز، (J/kgK)
μ_g	چسبندگی گاز، (kg/ms)	d_p	قطر ذره، (m)
ν_g	چسبندگی سیتماتیکی گاز، (m^2/s)	D	قطر لوله در حالت رسوب گرفته، (m)
ρ_f	چگالی لایه رسوب، (kg/m^3)	D_i	قطر داخلی لوله تمیز، (m)
ρ_g	چگالی گاز، (kg/m^3)	E_p	ضریب کشسانی یانگ برای ذره، (Pa)
ρ_p	چگالی ذره، (kg/m^3)	E_s	ضریب کشسانی یانگ برای سطح، (Pa)
τ_w	تنش برشی روی دیواره، (N/m^2)	f	ضریب اصطکاک داریسی
φ_d	شار رسوب، ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، ($\text{W/m}^2\text{K}$)
φ_r	شار زدودن، ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	k_f	رسانایی گرمایی لایه رسوب، (W/mK)
		k_g	رسانایی گرمایی گاز، (W/mK)
		K_{th}	ضریب مهاجرت گرمایی
		L	طول لوله، (m)
		m	جرم کل رسوب، (kg)
		m_f	جرم رسوب بر واحد مساحت سطح، (kg/m^2)
		m_p	جرم ذره، (kg)
		\dot{m}_g	شدت جریان جرمی گاز، (kg/s)
		m^*	جرم مؤثر ذره، (kg)
		MW_g	وزن مولکولی گاز، (kg/mol)
		Nu	عدد ناسلت
		P_{avg}	فشار می‌انگین، (Pa)
		Pr	عدد پراتل
		Q_A	انرژی چسبندگی ذره-سطح، (J)
		R_f	مقاومت حرارتی رسوب، ($\text{m}^2\text{K/W}$)
		R_p	شعاع ذره، (m)
		Re	عدد رینولدز
		R^*	شعاع مؤثر ذره، (m)
		S	احتمال چسبندگی ذره
		t	زمان، (s)
		T_m	دمای متوسط گاز، (K)
		T_s	دمای سطح لایه رسوب، (K)
		T_w	دمای دیواره لوله، (K)
		u^*	سرعت اصطکاک، (m/s)
		U_i	سرعت گاز ورودی، (m/s)
		U_m	سرعت متوسط گاز، (m/s)
		V_{th}	سرعت رسوب مهاجرت گرمایی، (m/s)

مراجع

- [1] D. Agarwal, S. K. Singh, A. K. Agarwal, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine, Applied Energy, Vol. 88, pp. 2900-2907, 2011
- [2] M. Zheng, G. T. Reader, J. G. Hawley, Diesel engine exhaust gas recirculation-a review on advanced and novel concepts, Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 883-900, 2004
- [3] K. K. Srinivasan, P. J. Mago, S. R. Krishnan, Analysis of Exhaust Waste Heat Recovery From a Dual Fuel Low Temperature Combustion Engine Using an Organic Rankine Cycle, Energy, vol. 35, pp. 2387-2399, 2010
- [4] J. Hoard, M. Abarham, D. Styles, J.M. Giuliano, C. S. Sluder, J. M. Storey, Diesel EGR cooler fouling, SAE International, Paper No. 2008-01-2475, 2008
- [5] M. Lapureta, R. Ballesteros, F. J. Martos, A method to determine the fractal dimension of diesel soot agglomerates, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 303, pp. 149-158, 2006
- [6] M. S. Abd-Elhady, M. R. Malayeri, Asymptotic characteristics of particulate deposit formation in exhaust gas recirculation cooler, Applied Thermal Engineering, Vol. 60, pp. 96-104, 2013
- [7] C. S. Sluder, J. M. Storey, S. A. Lewis, D. Styles, J. Giuliano, J. W. Hoard, Hydrocarbons and particulate matter in EGR cooler deposits: effects of gas flow rate, coolant temperature, and oxidation catalyst, SAE International, Paper No. 2008-01-2467, 2008
- [8] D. Q. kern, R. E. Seaton, A theoretical analysis on thermal surface fouling, British chemical engineering, Vol. 4, pp. 258-262, 1959
- [9] M. C. Paz, E. Suárez, A. Eiris, J. Porteiro, A. Sánchez, Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust systems, Heat Transfer Engineering, Vol. 34, pp. 674-682, 2013

- [22] M. Mehravaran, G. Brereton, Modeling of thermophoretic soot deposition and stabilization on cooled surfaces, SAE International, Paper No. 2011-01-2183, 2011
- [23] S. K. Pradhan, B. B. Nayak, S. S. Sahay, B. K. Mishara, Mechanical properties of graphite flakes and spherulites measured by nanoindentation, Carbon, Vol. 47, pp. 2290-2292, 2009
- [24] N. Epstein, Elements of particle deposition onto nonporous solid surfaces parallel to suspension flows, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, pp. 323-334, 1997
- [25] C. He, G. Ahmadi, Particle deposition with thermophoresis in laminar and turbulent duct flows, Aerosol Science and Technology, Vol. 29, pp. 525-546, 1998
- [26] A. Messerer, R. Niessner, U. Poschl, Thermophoretic deposition of soot aerosol particles under experimental conditions relevant for modern diesel engines exhaust gas systems, Journal of Aerosol Science, Vol. 34, pp. 1009-1021, 2003
- [27] F. Zheng, Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiments, Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 97, pp. 255-278, 2002
- [28] M. R. Malayeri, T. Zornek, A. Balestrino, A. Warey, P. G. Szymkowicz, Deposition of nano-sized soot particles in various EGR coolers under thermophoretic and isothermal conditions, Heat Transfer Engineering, Vol. 34, pp. 665-673, 2013
- [29] M. S. Abd-Elhady, T. Zornek, M. R. Malayeri, S. Balestrino, P. G. Szymkowicz, H. Müller-Steinhagen, Influence of gas-speed on particulate fouling of exhaust gas recirculation coolers, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 838-846, 2011
- [30] F. J. Romay, S. S. Takagaki, B. Liu, B. Y. Liu, Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow, Journal of Aerosol Science, Vol. 29, pp. 943-959, 1998
- [31] M. Abarham, J. Hoard, D. Assanis, D. Styles, C. S. Sluder, J. M. E. Storey, An Analytical Study of Thermophoretic Particulate Deposition in Turbulent Pipe Flows, Aerosol Science and Technology, Vol. 44, pp. 785-795, 2010
- [32] M. J. Lance, C. S. Sluder, H. Wang, J. M. Storey, Direct measurement of EGR cooler deposit thermal properties for improved understanding of cooler fouling, SAE International, Paper No. 2009-01-1461, 2009
- [10] A. Warey, S. Balestrino, P. G. Szymkowicz, M. R. Malayeri, A one-dimensional model for particulate deposition and hydrocarbon condensation in exhaust gas recirculation coolers, Aerosol Science and Technology, Vol. 46, pp. 198-213, 2012
- [11] M. Abarham, J. Hoard, D. Assanis, D. Styles, E. W. Curtis, N. Ramesh, Review of Soot Deposition and Removal Mechanisms in EGR Coolers, SAE International, Paper No. 2010-01-1211, 2010
- [12] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition), New York: John Wiley and Sons, 2007
- [13] M. Abarham, J. Hoard, D. Assanis, D. Styles, E. W. Curtis, N. Ramesh, Numerical modeling and experimental investigations of EGR cooler fouling in a diesel engine, SAE International, Paper No. 2009-01-1506, 2009
- [14] D. E. Rogers, J. Reed, The adhesion of particles undergoing an elastic-plastic impact with a surface, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 17, pp. 677-689, 1984
- [15] K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, Surface energy and the contact of elastic solids, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 324, pp. 301-313, 1971
- [16] K. L. Johnson, H. M. Pollock, The role of adhesion in the impact of elastic spheres, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 8, pp. 1323-1332, 1994
- [17] C. Thornton, Z. Ning, A theoretical model for the stick/bounce behavior of adhesive, elastic-plastic spheres, Powder Technology, Vol. 99, pp. 154-162, 1998
- [18] B. E. Lee, C. A. Fletcher, S. H. Shin, S. B. Kwon, Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilers, Fuel, Vol. 81, pp. 2001-2008, 2002
- [19] Y. Pan, F. Si, Z. Xu, C. Romero, An integrated theoretical fouling model for convective heating surfaces in coal-fired boilers, Powder Technology, Vol. 210, pp. 150-156, 2011
- [20] M. W. Reeks, D. Hall, Kinetic models for particle re-suspension in turbulent flows: theory and measurement, Journal of Aerosol science, Vol. 32, pp. 1-31, 2001
- [21] Y. T. Su, T.C. Hung, C. C. Ou, A preliminary analysis on tool wear rate of polishing process: adhesion effects, Wear, Vol. 260, pp. 50-61, 2006



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Investigation of particulate fouling in exhaust gas recirculation coolers of diesel engines

A. R. Razmavar¹, M. R. Malayeri^{2*}

¹ Shiraz University, Shiraz, Iran, alireza.razmavar@gmail.com

² Shiraz University, Shiraz, Iran, malayeri@shirazu.ac.ir

*Corresponding Author, Telephone Number: +98-071-36133747

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 June 2015

Accepted: 3 August 2015

Keywords:

Particulate fouling

Exhaust gas recirculation (EGR)

EGR cooler

Soot

Fouling resistance

ABSTRACT

Emissions from diesel engines, such as nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide and particulate matter (PM) impose a major threat to the environment and human health. As for the reduction of NO_x emission though, the widely used technique is to return a portion of the exhaust gases to the intake of the engine after cooling them in a heat exchanger known as exhaust gas recirculation (EGR) cooler. However, EGR coolers are prone to severe fouling dominantly due to deposition of particulate matter, i.e. soot on heat transfer surfaces that result in profound deterioration of thermal efficiency. In this study, deposition and removal mechanisms of particulate matter are investigated. Also a one-dimensional model is developed which predicts the behavior of particulate fouling in EGR coolers taking into account the underlying deposition and removal mechanisms and energy equations associated with the particle mass conservation. The theoretical results are then compared with those of experiments of which the agreement between them shows the validity of the proposed model.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.

