

مطالعه تئوری تاثیر افزودن اکسیژن، بخار آب و EGR بر تبخیر قطره دیزل

رسول شاهسون مارکده

دکتری- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه علم و صنعت ایران
rshahsavan@mecheng.iust.ac.ir

حجت قاسمی*

دانشیار- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه علم و صنعت ایران
h_ghassemi@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدلی برای تبخیر قطره چندجزئی در محیط با جابجایی توسعه داده شده است. به منظور ارضای قانون بقای جرم کلی در فاز گاز، سرعت استفان اصلاح شده به کار گرفته شده است. جذب تشعشع در سطح قطره، انتالپی دیفیوژن در فاز گاز و معادله حالت گاز واقعی در نظر گرفته شده‌اند. در فاز مایع مدل ضریب دیفیوژن موثر و ضریب هدایت حرارتی موثر اعمال شده‌اند. با مطالعه تبخیر قطره دیزل در فشار و دمای مختلف محیط مشاهده شده که تاثیر فشار بر تبخیر قطره در دماهای مختلف تفاوت دارد. در دمای کم افزایش فشار به افزایش عمر قطره و در دمای زیاد به کاهش عمر می‌انجامد. هم‌چنین مشاهده شد که افزودن اکسیژن به هوا منجر به کاهش و سپس افزایش عمر قطره می‌شود. افزودن بخار آب نیز کمی نرخ تبخیر را افزایش می‌دهد. اما EGR تاثیر زیادی بر مشخصه‌های تبخیر قطره دیزل ندارد.

کلمات کلیدی: مدل سازی تبخیر، قطره چندجزئی، غنی سازی با اکسیژن، تزریق بخار، EGR

مقدمه

موتورهای دیزل در کاربردهای بسیاری استفاده می‌شوند و تحقیقات زیادی بر روی بهبود عملکرد آن‌ها از نظر بازده و انتشار آلاینده‌ها انجام گرفته است. بازده و انتشار آلاینده‌ها در موتور دیزل تحت تاثیر کیفیت احتراق است که بستگی به تشکیل مخلوط قابل احتراق دارد [۱]. هر چند از نظر نسبت هوا به سوخت کلی احتراق در موتور دیزل با هوای اضافه است، اما مخلوط شکل گرفته ناهمگن بوده و از نظر میکروسکوپی احتراق استوکومتری است. بنابراین دمای شعله بالا بوده و انتشار NOx در این موتورها مشکل ساز است. به همین دلیل چندین تکنیک برای کاهش انتشار NOx و دیگر آلاینده‌ها توسعه یافته‌اند.

از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به غنی کردن با اکسیژن، تزریق بخار آب و بازچرخش گاز خروجی (EGR) اشاره نمود. این روش‌ها ترکیب محیط موتور را تغییر داده و بنابراین بر تبخیر و احتراق قطرات دیزل تاثیر می‌گذارد. غنی کردن با اکسیژن بازده موتور و توان خروجی آن را افزایش داده و آلاینده‌های آن را کاهش می‌دهد [۲]. ژانگ و همکاران نیز نشان داده‌اند که احتراق دیزل با هوای غنی شده با اکسیژن تعداد ذرات دوده کمتر شده و ترکیب مناسب آن با EGR می‌تواند به کاهش انتشار NO منجر شود [۳]. کولونانک و همکاران با مطالعه‌ای تجربی و تئوری نشان دادند که تزریق بخار می‌تواند به افزایش توان موثر و بازده موتور دیزل و کاهش انتشار NO و CO₂ بیانجامد [۴]. گزارش شده که تزریق بخار همرا با EGR با کمی افزایش در مصرف ویژه سوخت NO را کاهش می‌دهد [۵]. دیوکار و همکاران نتیجه گرفته‌اند که EGR به کاهش تولید NOx می‌انجامد و کاهش ناشی از EGR در بازده حرارتی را می‌توان با تنظیم زمان پاشش جبران نمود [۶]. از آن جایی که این روش‌ها منجر به تغییر محیط موتور می‌شوند، می‌توانند تاثیر زیادی بر تبخیر قطره بگذارند. در موتور

دیزل تبخیر قطره سوخت نقش مهمی در تشکیل و توزیع مخلوط قابل احتراق دارد [۷]. از این رو درک فرایند تبخیر قطره و تئوری آن برای طراحی و تحلیل موتور ضروری می‌باشد.

تبخیر قطره مساله انتقال حرارت و جرم بوده و به دلیل کاربردهای فراوان آن موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. آبرامزون و سیرینگانو مدلی برای تبخیر قطره در یک محیط با جابجایی توسعه داده و چهار مدل مختلف برای تبخیر قطره را مقایسه نموده‌اند [۸]. مدل ضریب هدایت موثر ارائه شده توسط ایشان به خوبی می‌تواند دمای سطح قطره را که پارامتر مهمی در مدل‌های تبخیر قطره است پیش‌بینی کند. از این رو این مدل و مدل متناظر آن برای حل معادله انتقال گونه‌های شیمیایی، یعنی ضریب دیفیوژن موثر، در مدل‌های زیادی به کار گرفته شده‌اند. به منظور ساده سازی معادلات فاز گاز فرض شده است که ضریب دیفیوژن تمام گونه‌ها در فاز بخار با هم برابر می‌باشند [۹]. رنکسیزبولوت و همکاران از این فرض صرف نظر کرده و مدلی نیمه تحلیلی برای تبخیر قطره چند جزئی در محیط با جابجایی توسعه دادند [۱۰]. بیشتر مدل‌های تبخیر قطره از اثر انتالپی دیفیوژن، یعنی شار حرارتی به دلیل دیفیوژن گونه‌های شیمیایی، صرف نظر کرده‌اند. با این وجود نشان داده شده است که در نظر گرفتن این اثر از عدم ارضا شرط انتروپی موضعی جلوگیری می‌کند [۱۱]. برخی محققان این ترم را در مدل‌های تبخیر قطره در نظر گرفته‌اند و اهمیت آن را گزارش کرده‌اند [۱۲]. علی رغم صرف نظر از تشعشع در بسیاری از مدل‌ها، اثر آن می‌تواند بسته به شرایط تبخیر مهم باشد [۱۳]. هم‌چنین استفاده از معادله حالت گاز کامل برای تعیین دقیق نرخ تبخیر در دما و فشار بالا اهمیت دارد [۱۴].

مدل‌های متعددی برای تبخیر قطره دیزل استفاده شده است. هر چند دیزل یک سوخت چندجزئی است، برخی از محققین از رهیافت تک‌جزئی برای تبخیر قطره دیزل استفاده نموده‌اند [۱۵]. با این وجود نرخ تبخیر متفاوت برای هر کدام از اجزا، توزیع و سینتیک شیمیایی مختلف اجزای مختلف باعث می‌شود رهیافت تک‌جزئی همواره مناسب نباشد [۱۶]. بنابراین مدل‌های مختلفی برای تبخیر قطره چندجزئی توسعه یافته‌اند که می‌توان به مدل‌های چندجزئی گسسته (DMC)، مدل‌های پیوسته و مدل‌های هیبرید اشاره نمود. هر چند حل معادله انتقال گونه‌ها برای تک تک اجزا در مدل‌های گسسته زمان محاسبات را افزایش می‌دهد، به دلیل پیشرفت‌ها در ظرفیت محاسباتی و هم‌چنین قابلیت کوپل کردن این مدل‌ها با سینتیک شیمیایی دقیق به منظور بررسی احتراق، مدل‌های گسسته به صورت گسترده‌ای برای تبخیر قطرات چندجزئی استفاده شده‌اند. را و ریتز از این مدل برای تبخیر اسپری بنزین و دیزل [۱۶]، صمیمی ایبانه و چن برای تبخیر قطره اتانول-بنزین تحت تاثیر اغتشاش در فاز مایع [۱۷] و ما و همکاران برای تبخیر قطره دیزل ترکیب شده با استون-بوتانول-اتانول [۱۸] استفاده نموده‌اند.

هر چند مطالعات بسیاری بر روی تبخیر قطره انجام شده است، اما تعداد محدودی از آن‌ها به بررسی اثر ترکیب شیمیایی محیط بر تبخیر پرداخته-

های شیمیایی i و استفاده از $m\dot{\kappa} = 4\pi r_s^2 \rho_g u$ رابطه‌ی زیر برای نرخ تبخیر کلی به دست می‌آید:

$$m\dot{\kappa} = \frac{4\pi r_s^2 \rho_g \sum_{i=1}^{N_F} \left(V_i Y_{i,g}^s - Y_{i,g}^s \sum_{j=1}^N V_j Y_{j,g}^s \right)}{\left(1 - \sum_{i=1}^{N_F} Y_{i,g}^s \right)} \quad (3)$$

که N_F تعداد گونه‌های شیمیایی تبخیرشونده از قطره می‌باشد. انتقال حرارت از فاز گاز به مایع در سطح قطره می‌تواند ناشی از چند مکانیزم مختلف باشد. در این مطالعه انتقال حرارت از طریق هدایت، Q_{ent} ، انتقالی دیفیوژن، Q_{rad} ، و انتقال حرارت تشعشی، Q_{cond} ، در نظر گرفته شده‌اند. تعادل انرژی بر روی سطح قطره به صورت زیر خواهد بود:

$$Q_{cond} + Q_{rad} - Q_{ent} - Q_L = m\dot{\kappa} \sum_{i=1}^{N_F} \varepsilon_i L_i \quad (4)$$

که در آن L_i گرمای نهان تبخیر گونه شیمیایی i و $\varepsilon_i = m\dot{\kappa}_i / m\dot{\kappa}$ می‌باشد. Q_L حرارتی است که به درون قطره نفوذ کرده و صرف گرمایش آن می‌شود. مؤلفه‌های انتقال حرارت را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q_{cond} = 2\pi r_s \lambda_g Nu^* (T_\infty - T_{L,s}) \quad (5)$$

$$Q_{rad} = 4\pi r_s^2 \sigma \alpha_a (T_\infty^4 - T_{L,s}^4) \quad (6)$$

$$Q_{ent} = 4\pi r_s^2 \rho_g \sum_{i=1}^N V_i Y_{i,g} h_{i,g} \quad (7)$$

λ_g ، σ و α_a ضریب هدایت حرارتی فاز گاز، ثابت استفان بولتزمن و ضریب جذب تشعشی است. ضریب جذب تشعشی در قطره تابعی از قطر قطره، دمای محیط و ترکیب شیمیایی سوخت می‌باشد. از آنجایی که وابستگی ضریب جذب قطره نفت کوره به این پارامترها مشخص نمی‌باشد، در این مطالعه از مقدار ثابت ۰٫۸ استفاده شده است. $h_{i,g}$ انتقالی گونه شیمیایی i در مخلوط گاز است. در محاسبه انتقال حرارت تشعشی فرض شده است که دمای منبع تشعشع حرارتی خارجی با دمای گاز یکسان است. Nu^* عدد ناسلت قطره در حال تبخیر است که به منظور در نظر گرفتن اثرات تبخیر و جریان استفان و لایه مرزی شکل گرفته حول قطره اصلاح شده است و برای آن روابط تجربی ارائه شده است. اصلاح عدد ناسلت معمولاً با استفاده از عدد انتقال حرارت اسپالدینگ انجام می‌گیرد.

$$B_T = \frac{C_{pg} (T_\infty - T_{g,s})}{\sum_{i=1}^{N_F} \varepsilon_i L_i + Q_L / m\dot{\kappa}} \quad (8)$$

روابط فوق شکل کلی معادلات تعادل جرم و حرارت در فاز گاز است. در قانون فیک سرعت دیفیوژن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_i Y_i = -D_{i,g} \nabla Y_i \quad (9)$$

که $D_{i,g}$ ضریب دیفیوژن موثر گونه شیمیایی i در مخلوط گاز است و به صورت زیر از ضرایب دیفیوژن دوتایی جزء i در j ، D_{ij} محاسبه می‌شود:

$$D_{i,g} = \frac{1 - X_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N X_j / D_{ij}} \quad (10)$$

اند که اکثر آن‌ها اثر رطوبت نسبی بر تبخیر را بررسی کرده‌اند [۱۹، ۲۰]. تنها مطالعه‌ی و همکاران بر روی تاثیر EGR و غنی کردن هوا با اکسیژن بر تبخیر قطره دیزل انجام گرفته است [۲۱]. از این رو به نظر می‌رسد که نیاز به مطالعات بیشتر در زمینه تاثیر تکنیک‌های کاهش انتشار NOx مانند غنی کردن هوا با اکسیژن، تزریق بخار و EGR بر تبخیر قطره دیزل نیاز می‌باشد.

در این مقاله مدلی گسسته با در نظر گرفتن آثار انتقالی دیفیوژن، تشعشع و معادله حالت گاز واقعی، به منظور بررسی اثر ترکیب محیط بر تبخیر قطره توسعه یافته است. پس از مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی و اعتبار سنجی مدل، تاثیر افزودن اکسیژن به هوا، تزریق بخار و EGR بر تبخیر قطره دیزل بررسی می‌شود.

مدل

قطره چندجزئی با ترکیب اولیه $Y_{i,L}^0$ ، دمای اولیه T_L^0 و سرعت اولیه U_L^0 وارد محیط با دما، فشار و ترکیب T_∞ ، P_∞ و $Y_{i,\infty}$ و سرعت U_∞ می‌شود. فرضیات اصلی مدل حاضر عبارتند از:

- قطره کروی بوده و شکل کروی خود را در طول فرایند حفظ می‌کند.
- فشار محیط ثابت می‌باشد.
- قطره متقارن کروی فرض می‌شود که برای قطرات با عدد رینولدز کوچک و متوسط معتبر است.
- به دلیل سریع تر بودن فرایندهای انتقال در فاز گاز نسبت به فاز مایع، فاز گاز شبه‌پایا فرض می‌شود.
- جریان گاز یک‌بعدی در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که سرعت اولیه قطره موازی جریان گاز باشد.
- گاز در مایع حل نمی‌شود.
- از اثراتی هم چون سورت و دوفور و هم‌چنین دیفیوژن فشاری صرف‌نظر می‌شود.
- در سطح قطره فاز مایع و گاز در تعادل ترمودینامیکی می‌باشند.

بالانس جرم و حرارت در فاز گاز

از تعادل جرم بر روی سطح قطره در فاز گاز نرخ تبخیر کلی، $m\dot{\kappa}$ ، و نرخ تبخیر هر گونه‌ی شیمیایی، $m\dot{\kappa}_i$ ، تعیین خواهد شد. با فرض فاز گاز شبه-پایا نرخ تبخیر گونه‌ی شیمیایی i را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$m\dot{\kappa}_i = 4\pi r_s^2 \rho_g (u + u^c + V_i) Y_{i,g}^s \quad (1)$$

که در آن u سرعت استفان و V_i سرعت دیفیوژنی گونه شیمیایی i و r_s شعاع قطره هستند. ρ و Y چگالی و کسر جرمی بوده و زیرنویس‌های g و s به ترتیب نشان‌دهنده فاز گاز و شرایط در سطح قطره می‌باشند. u^c سرعت اصلاحی است که به منظور ارضای قانون بقای جرم کلی به سرعت استفان اضافه می‌گردد [۲۲].

$$u^c = -\sum_{i=1}^N V_i Y_{i,g} \quad (2)$$

که در آن N تعداد کل گونه‌های شیمیایی موجود در فاز گاز است. با انتخاب مدلی مناسب برای تعیین سرعت دیفیوژنی نرخ تبخیر به دست خواهد آمد. با جایگذاری معادله (۲) در (۱)، جمع‌بستن بر روی تمام گونه-

که X کسر مولی می باشد. با جایگذاری سرعت دیفیوژن از قانون فیک، نرخ تبخیر جزء و کلی به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$\begin{aligned} \dot{m}_i^* &= \dot{m}_{i,g}^s \\ &+ 2\pi r_s \rho_g [D_{i,g} \text{Sh}_i^* (Y_{i,g}^s - Y_{i,g}^\infty) \\ &- Y_{i,g}^s \sum_{j=1}^N D_{j,g} \text{Sh}_j^* (Y_{j,g}^s - Y_{j,g}^\infty)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_i^* &= 2\pi r_s \rho_g \sum_{i=1}^{N_f} (D_{i,g} \text{Sh}_i^* B_{M,i} \\ &- Y_{i,g}^s \sum_{j=1}^N D_{j,g} \text{Sh}_j^* B_{M,j}) \end{aligned} \quad (12)$$

$B_{M,i}$ عدد انتقال جرم گونه شیمیایی i بوده و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$B_{M,i} = \frac{Y_{i,g}^s - Y_{i,g}^\infty}{1 - \sum_{i=1}^N Y_{i,g}^s} \quad (13)$$

Sh^* عدد شروود اصلاح شده قطره است که اثر تبخیر و لایه مرزی حول قطره را در نظر می گیرد و از روابط تجربی محاسبه می شود. روابط ارائه شده برای اصلاح عدد شروود معمولاً بر حسب عدد انتقال جرم کلی می باشد:

$$B_M = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} Y_{i,g}^s - \sum_{i=1}^{N_f} Y_{i,g}^\infty}{1 - \sum_{i=1}^N Y_{i,g}^s} \quad (14)$$

با جایگذاری سرعت دیفیوژن در رابطه (۷) و سپس جایگذاری ترم های مختلف انتقال حرارت در معادله (۴)، حرارت نفوذ کرده به قطره به دست می آید. از معادله حاصل رابطه های برای \dot{m}_i^* بدست آورده و با برابر قرار دادن آن با نرخ تبخیر به دست آمده از رابطه (۱۲)، عدد انتقال حرارت اسپالدینگ به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} B_T &= \sum_{i=1}^{N_f} \left[\frac{\text{Sh}_i^*}{\text{Le}_i} B_{M,i} - Y_{i,g}^s \sum_{j=1}^N \frac{\text{Sh}_j^*}{\text{Le}_j} B_{M,j} \right] / \\ &[\text{Nu}^* - \sum_{i=1}^N \frac{\text{Sh}_i^* C_{pg,i}}{\text{Le}_i C_{pg}} (Y_{i,g}^s - Y_{i,g}^\infty) \\ &+ \frac{2r_s \sigma_a}{\lambda_g} (T_{g,\infty} + T_{L,s}) (T_{g,\infty}^2 + T_{L,s}^2)] \end{aligned} \quad (15)$$

که عدد لوئیس هر جزء به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{Le}_i = \frac{\rho_g C_{pg} D_{i,g}}{\lambda_g} \quad (16)$$

در این مطالعه از روابط ارائه شده توسط رنکسیزبولوت و همکاران [۱۰] برای عدد شروود و ناسلت حول یک قطره در حال تبخیر استفاده شده است:

$$\text{Nu}^* = (2 + 0.57 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}) (1 + B_T)^{-0.7} \quad (17)$$

$$\text{Sh}^* = (2 + 0.87 \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3}) (1 + B_M)^{-0.7} \quad (18)$$

این روابط برای تبخیر قطره در محیط با جابجایی اجباری ارائه شده اند و در آن ها اثر جابجایی طبیعی در نظر گرفته نشده است. یک رهیافت به منظور در نظر گرفتن اثرات جابجایی طبیعی، که در این مطالعه از آن استفاده شده است، جایگذاری $\text{Re} + \text{Gr}^{1/2}$ می باشد [۲۳].

بقای جرم و انرژی در فاز مایع

با فرض تقارن کروی، معادلات بقای جرم و انرژی در فاز مایع به شکل یک بعدی خود در مختصات کروی کاهش می یابند. از مدل ضریب هدایت مؤثر و ضریب دیفیوژن مؤثر به ترتیب برای معادله انرژی و معادلات انتقال گونه های شیمیایی استفاده می شود. این مدل ها به منظور در نظر گرفتن افزایش انتقال حرارت و جرم به واسطه حرکات چرخشی درون قطره ارائه شده اند. معادله انتقال گونه های شیمیایی درون فاز مایع به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial Y_{i,L}}{\partial t} = \frac{D_{L,eff}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial Y_{i,L}}{\partial r} \right) \quad (19)$$

با شرایط اولیه و مرزی

$$Y_{i,L}(r,0) = Y_{i,L}^0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial Y_{i,L}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial Y_{i,L}}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = \frac{\dot{m}_i^*}{4\pi r_s^2 \rho_L D_{L,eff}} (\varepsilon_i - Y_{i,L}^s) \quad (22)$$

که در آن چگالی مایع و $D_{L,eff} = \chi_M D_L$ ضریب دیفیوژن مؤثر در فاز مایع است که فاکتور χ_M به صورت زیر محاسبه می شود [۲۴]:

$$\begin{aligned} \chi_M &= 1.86 \\ &+ 0.86 \tanh [2.225 \log_{10} (\text{Re}_L \text{Sc}_L / 30)] \end{aligned} \quad (23)$$

که در آن Sc_L عدد اشمیت و Re_L عدد رینولدز مایع می باشند. عدد رینولدز فاز مایع بر حسب سرعت بیشینه مایع بر روی سطح قطره، U_s ، تعریف می شود. سرعت بیشینه از ضریب درگ اصطکاکی قابل محاسبه است:

$$U_s = \frac{1}{32} |U_\infty - U_L| \left(\frac{\mu_g}{\mu_L} \right) \text{Re}_g C_F \quad (24)$$

برای ضریب درگ اصطکاکی یک قطره در حال تبخیر رابطه ی زیر ارائه شده است که اثر تبخیر را بر ضریب درگ با به کارگیری عدد انتقال جرم به حساب می آورد [۸]:

$$C_F = \frac{12.69}{\text{Re}_g^{2/3} (1 + B_M)} \quad (25)$$

معادله بقای انرژی برای قطره به صورت زیر است:

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = \frac{\alpha_{L,eff}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_L}{\partial r} \right) \quad (26)$$

با شرایط مرزی و اولیه

$$T_L(r,0) = T_L^0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial T_L}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial T_L}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = \frac{Q_L}{4\pi r_s^2 \lambda_{L,eff}} \quad (29)$$

که $\lambda_{L,eff} = \chi_T \lambda_L$ ضریب هدایت مؤثر می باشد که فاکتور χ_T به صورت زیر محاسبه می شود:

k_{ij} ضریب اندرکنش دوتایی بوده و از داده‌های تجربی تعیین می‌شود و در صورت نبود داده‌های تجربی مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. Z فاکتور تراکم‌پذیری می‌باشد که از حل معادله درجه سوم زیر تعیین می‌گردد:

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (41)$$

معادله فوق می‌تواند سه ریشه داشته باشد که بزرگترین ریشه آن تراکم-پذیری فاز گاز و کوچکترین ریشه مثبت آن تراکم‌پذیری مایع را نشان می‌دهد [۲۵].

محاسبه خواص

تعیین دقیق خواص ترموفیزیکی و انتقالی در هر دو فاز اهمیت زیادی در به دست آوردن نتایج دقیق دارند. چگالی گاز از معادله حالت پنگ-راینسون محاسبه شده است. از چندجمله‌ای ارائه شده توسط ناسا برای محاسبه گرمای ویژه [۲۶] و لزجت و ضریب هدایت حرارتی [۲۷] اجزای شیمیایی در گاز محیط استفاده شده است. برای تعیین گرمای ویژه بخار هیدروکربن‌ها چندجمله‌ای ارائه شده در [۲۵] به کار گرفته شده است. لزجت و ضریب هدایت حرارتی بخار هیدروکربن‌ها از روش چانگ محاسبه می‌گردد [۲۵]. تئوری چاپمن-انسکگ به منظور تعیین ضریب دیفیوژن دوتایی در فاز گاز به کار گرفته شده است [۲۸]. گرمای ویژه اجزا در فاز مایع با روش لی-کسلر [۲۹]، انتالپی تبخیر آن‌ها با رابطه ارائه شده در [۳۰] تعیین می‌شوند. روابط به کار گرفته شده برای لزجت و ضریب هدایت حرارتی در فاز مایع از [۳۱] استخراج شده و روش ویلک-چانگ [۲۵] برای ضریب دیفیوژن در فاز مایع به کار گرفته شده است.

الگوریتم حل

معادلات انرژی و انتقال گونه‌ها در فاز مایع به صورت عددی و با گسسته-سازی تفاضل محدود در ۱۰۰ نقطه شبکه با فواصل یکنواخت حل شده‌اند. گام زمانی با توجه به فراریت سوخت و قطر قطره بین ۰.۰۰۱ تا ۰.۰۱ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. خواص ترموفیزیکی و انتقال فاز مایع با استفاده از ترکیب و دمای متوسط در هر گام زمانی محاسبه می‌شوند. به منظور حل معادلات فاز مایع نرخ تبخیر و حرارت نفوذ کرده به درون مایع به عنوان شرط مرزی باید معلوم باشند که مقدار آن‌ها از طریق زیر به دست می‌آید:

- ۱- محاسبه‌ی کسر جرمی گونه‌های شیمیایی در فاز گاز و در سطح قطره از تعادل ترمودینامیکی و دما و ترکیب سطح از گام زمانی قبل (یا مقدار اولیه آن‌ها برای اولین گام زمانی).
- ۲- محاسبه خواص مخلوط گاز در فیلم گاز اطراف قطره با قاعده یک‌سوم.
- ۳- محاسبه عدد اسپالدینگ جرم کلی و جزئی.
- ۴- محاسبه Sh ، Nu و Sh^* با استفاده از یکی از روابط تجربی.
- ۵- محاسبه نرخ تبخیر کلی و جزئی.
- ۶- تعیین عدد انتقال حرارت اسپالدینگ با تکرار. ابتدا فرض می‌شود که $B_T = B_M$ و سپس با عدد انتقال حرارت بدست آمده و یکی از مدل‌ها عدد Nu^* تعیین می‌گردد. سپس مقدار عدد انتقال حرارت اصلاح می‌شود. این روند تا رسیدن به معیار همگرایی $|B_T - B_T^{old}| / B_T < 10^{-4}$ تکرار می‌شود.
- ۷- محاسبه حرارت نفوذ کرده به درون مایع، Q_L .

$$\chi_T = 1.86 + 0.86 \tanh \left[2.225 \log_{10} (\text{Re}_L \text{Pr}_L / 30) \right] \quad (30)$$

که Pr_L عدد پرانتل مایع می‌باشد. دینامیک قطره

با فرض جریان گاز یک‌بعدی موازی با سرعت اولیه قطره، سرعت قطره در هر زمان با استفاده از ضریب درگ قابل محاسبه خواهد بود:

$$\frac{dU_L}{dt} = -\frac{3C_D}{8r_s} \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_L} \right) |U_L - U_\infty| (U_L - U_\infty) \quad (31)$$

ضریب درگ، C_D ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن اثر تبخیر نیز با در نظر گرفتن عدد انتقال حرارت اسپالدینگ به حساب آورده شده است [۱۰]:

$$C_D = \frac{24(1 + 0.2\text{Re}^{0.63})}{\text{Re}(1 + B_T)^{0.2}} \quad (32)$$

شعاع قطره در هر لحظه تحت تاثیر نرخ تبخیر و انبساط حرارتی مایع تغییر می‌کند و به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\frac{dr_s}{dt} = -\left(\frac{m\dot{x}}{4\pi\rho_L r_s^2} + \frac{r_s}{3\rho_L} \frac{d\rho_L}{dt} \right) \quad (33)$$

سطح مشترک مایع-گاز

در سطح مشترک تعادل ترمودینامیکی بین دو فاز برقرار است. در تعادل ترمودینامیکی فوگاسیتی هر گونه‌ی شیمیایی در فاز گاز با فوگاسیتی همان گونه در فاز مایع برابر می‌باشد:

$$\varphi_{i,g} X_{i,g} = \varphi_{i,L} X_{i,L} \quad (34)$$

φ ضریب فوگاسیتی می‌باشد که با استفاده از معادله حالت پنگ-راینسون به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\ln \varphi_i = \frac{B_i}{B} (Z - 1) - \ln(Z - B) + \frac{A}{2\sqrt{2}B} \left[\frac{B_i}{B} - \frac{2}{A} \sum_{j=1}^N X_j A_{ij} \right] \ln \left[\frac{Z + (2 + \sqrt{2})B}{Z + (2 - \sqrt{2})B} \right] \quad (35)$$

که

$$A_i = 0.4572 \frac{\alpha_i P_{r,i}}{T_{r,i}^2} \quad (36)$$

$$B_i = 0.0778 \frac{P_{r,i}}{T_{r,i}} \quad (37)$$

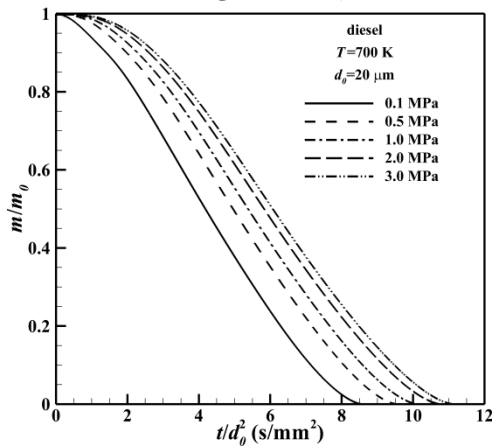
$$\alpha_i = \left[1 + \left(0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2 \right) \times \left(1 - T_{r,i}^{1/2} \right) \right]^2 \quad (38)$$

P_r ، T_r و ω به ترتیب فشار کاهش‌یافته، دمای کاهش‌یافته و فاکتور خارج از مرکزی می‌باشند. $A_{ij} = \sqrt{A_i A_j}$ می‌باشد و ضرایب A و B برای مخلوط با استفاده از قواعد اختلاط ون‌دروالس تعیین می‌شوند:

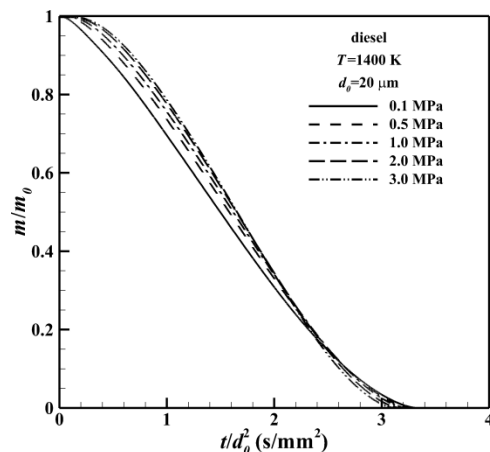
$$A = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_i X_j (1 - k_{ij}) \sqrt{A_i A_j} \quad (39)$$

$$B = \sum_{i=1}^N X_i B_i \quad (40)$$

تأثیر فشار بر مشخصه‌های انتقال حرارت توضیح داد. با افزایش فشار، دمای قطره افزایش می‌یابد. از آن جایی که انتالپی نهان تبخیر با افزایش دما (ناشی از افزایش فشار) کاهش می‌یابد، نرخ تبخیر قطره با بیشتر شدن فشار افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در فشار بالاتر عدد انتقال جرم کاهش یافته و در نتیجه نرخ تبخیر نیز کاهش می‌یابد [۳۳]. به عبارت دیگر فشار بیشتر از منظر انتقال حرارت منجر به افزایش نرخ تبخیر و از منظر انتقال جرم منجر به کاهش نرخ تبخیر می‌شود. این دو اثر متضاد منجر به رفتار متفاوت تبخیر قطره تحت تأثیر افزایش فشار در دماهای مختلف می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که در دماهای پایین انتقال جرم عامل غالب و در دماهای زیاد انتقال جرم عامل غالب می‌باشد.



الف



ب

شکل ۲ تغییرات نسبی جرم قطره در حال تبخیر دیزل در هوا با فشار متفاوت (الف) ۷۰۰ کلوین (ب) ۱۴۰۰ کلوین

تأثیر افزودن اکسیژن به محیط به منظور بررسی اثر افزودن اکسیژن، عمر قطره، t_{95} ، در فشارهای مختلف محیط بر حسب نسبت جرم اکسیژن افزوده شده به جرم هوا، OER، در شکل ۳ ترسیم شده است. t_{95} مدت زمانی است که قطر قطره به ۰٫۰۵ مقدار اولیه خود می‌رسد و از آن به عنوان معیاری از عمر قطره استفاده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزودن اکسیژن به هوا ابتدا منجر به کاهش عمر قطره و سپس افزایش آن می‌گردد. دلیل تغییر ایجاد شده در عمر قطره ناشی از خواص ترموفیزیکی و انتقال متفاوت اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. خواصی مانند گرمای ویژه و ضریب هدایت بیشتر بر انتقال حرارت تأثیر دارند و ضریب دیفیوژن بر انتقال جرم موثر است. ضریب دیفیوژن حرارتی نسبت توانایی انتقال حرارت یک ماده به

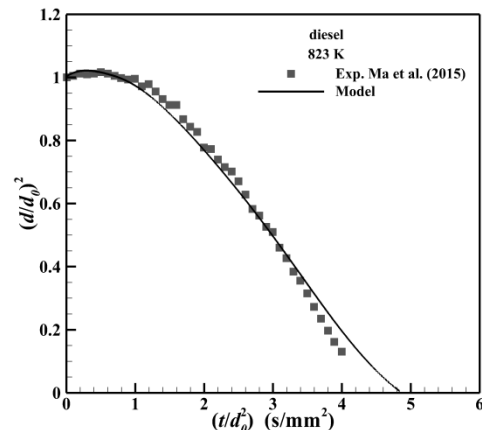
۸- حل معادلات انرژی و انتقال گونه‌ها درون فاز مایع به منظور تعیین دمای سطح و ترکیب مایع روی سطح.

۹- محاسبه سرعت و شعاع قطره.

۱۰- کنترل معیار همگرایی $|T_s - T_s^{old}|/T_s < 10^{-4}$ در صورت ارضا نشدن این معیار روند فوق با مقادیر جدید به دست آمده تکرار خواهد شد. در صورت ارضا شدن معیار همگرایی محاسبات برای گام زمانی بعدی انجام می‌گیرد. روند فوق تا رسیدن قطر قطره به ۰٫۰۵ مقدار اولیه خود تکرار می‌شود.

نتایج

به منظور بررسی اعتبارسنجی مدل حاضر، ابتدا نتایج آن با داده‌های تجربی تبخیر قطره دیزل ارائه شده توسط ما و همکاران [۳۲] مقایسه می‌شود. ایشان تبخیر قطره ۹۰۰ میکرونی معلق بر سر فیبر ۱۲۰ میکرونی در نیتروژن با دمای ۸۲۳ K را به صورت تجربی بررسی نموده‌اند. به منظور مدل‌سازی تبخیر قطره دیزل از ترکیب معادل دیزل ارائه شده توسط ما و ریتز [۱۶] استفاده شده است. این سوخت معادل ترکیبی شش جزئی از تولوئن، دکان، دودکان، تترادکان، هگزادکان و اکتادکان به ترتیب با درصد مولی ۱۵٫۷۲، ۱۳٫۹۶، ۲۲٫۰۸، ۲۳٫۶۸، ۱۳٫۲۵ و ۱۱٫۳۱ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود نتایج مدل حاضر تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد.



شکل ۱ مقایسه نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی تبخیر قطره دیزل [۳۲]

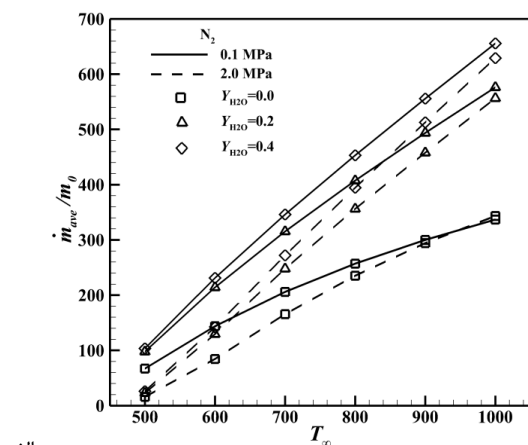
تأثیر دما و فشار بر تبخیر قطره دیزل

به منظور بررسی اثر دما و فشار، تبخیر قطره دیزل با قطر اولیه ۲۰ میکرون و دمای اولیه ۳۰۰ کلوین در هوا با دمای ۷۰۰ و ۱۴۰۰ کلوین و فشارهای ۰٫۱، ۰٫۵، ۱، ۲ و ۳ مگا پاسکال بررسی شده است. در شکل ۲ تغییرات جرم نسبی قطره در فرایند تبخیر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در دمای ۷۰۰ کلوین، افزایش فشار به طولانی‌تر شدن عمر قطره می‌انجامد در حالی که در ۱۴۰۰ کلوین افزایش فشار منجر به کاهش عمر قطره می‌شود. شایان ذکر است که این رفتار متفاوت تبخیر قطره تحت تأثیر فشار در دماهای مختلف در صورت استفاده از رهیافت تعادل فاز بخار-مایع ایده‌آل قابل مشاهده نبود [۱۴]. هم‌چنین باید توجه داشت که تأثیر فشار بر عمر قطره در دماهای کمتر محیط بیشتر می‌باشد. این رفتار متفاوت را می‌توان با تأثیر فشار بر تعادل بخار-مایع و در نتیجه بر کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره و عدد انتقال جرم و هم‌چنین

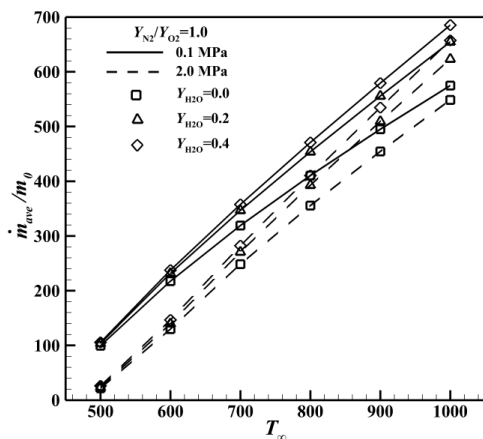
در شکل ۴ ترسیم شده است. به منظور بررسی اثر همزمان تزریق بخار و غنی کردن با اکسیژن، این مطالعه یک بار با افزودن بخار به نیتروژن و یک بار با افزودن آن به محیط ۵۰-۵۰ جرمی نیتروژن-اکسیژن انجام گرفته است. نرخ تبخیر متوسط به صورت زیر تعریف شده است:

$$\dot{m}_{ave} = \frac{\int_0^{t_{95}} \dot{m} dt}{t_{95}}$$

می توان دید که افزودن بخار آب به محیط نرخ تبخیر را افزایش می دهد. این بیشتر شدن، با افزایش کسر جرمی بخار از صفر تا ۰٫۲ قابل توجه تر از افزایش آن با تغییر کسر جرمی بخار از ۰٫۲ تا ۰٫۴ می باشد. افزودن بخار منجر به افزایش ضریب دیفیوژن حرارتی گاز محیط می شود. در نتیجه انتقال حرارت از محیط به قطره افزایش می یابد. هم چنین مشاهده می شود که افزودن بخار آب به مخلوط اکسیژن-نیتروژن تاثیر کمتری از افزودن آن به نیتروژن خالص دارد. افزایش نرخ تبخیر به واسطه افزودن بخار آب در دمای زیادتر محسوس تر است. افزایش فشار نرخ تبخیر را کاهش می دهد به جز در ۱۰۰۰ کلوبین و در نیتروژن خالص که کمی نرخ تبخیر را افزایش می دهد



الف



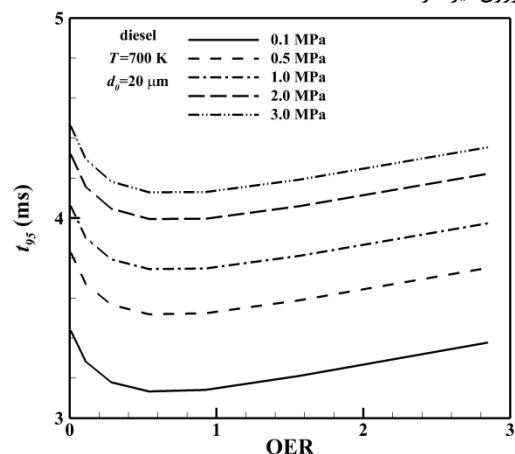
ب

شکل ۴ تغییرات نرخ تبخیر متوسط در اثر تزریق بخار (الف) در نیتروژن خالص (ب) در محیط نیتروژن-اکسیژن

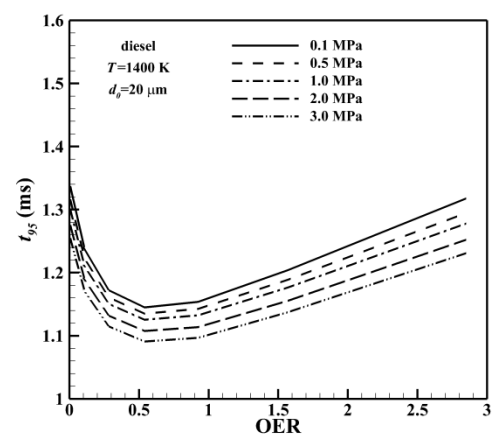
تاثیر EGR

برای ارزیابی اثر EGR بر تبخیر قطره دیزل، ترکیب EGR با فرض احتراق کامل سوخت معادل در نظر گرفته شده به دست آمده است. نرخ EGR به صورت کسر جرمی گاز خروجی در محیط تعریف شده است. عمر قطره نرمال شده، t_{95} / d_0^2 ، برای نرخ EGR مختلف در دما و فشار متفاوت در

توانایی آن در ذخیره انرژی می باشد. با افزایش درصد اکسیژن ضریب دیفیوژن حرارتی افزایش می یابد. در نتیجه هنگامی که غلظت اکسیژن بیشتر باشد، حرارت بیشتری از محیط به گاز نزدیک به قطره و متعاقباً به قطره منتقل می شود که منجر به افزایش نرخ تبخیر می شود. ضریب دیفیوژن جرم تمام گونه های شیمیایی دیزل در نیتروژن بیشتر از ضریب دیفیوژن آن ها در اکسیژن است. بنابراین هنگامی که غلظت نیتروژن در محیط بیشتر است، بخار سوخت تشکیل شده بر سطح قطره راحت تر و با نرخ بیشتری به محیط نفوذ می کند. می توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت اکسیژن از نظر انتقال حرارت به نفع تبخیر بوده ولی از منظر انتقال جرم اثری منفی بر نرخ تبخیر دارد. این اثرات متضاد باعث می شود که با افزایش غلظت اکسیژن ابتدا عمر قطره کاهش و سپس افزایش یابد. این رفتار در دماها و فشارهای محیط بررسی شده یکسان می باشد. هم چنین همان گونه که در بخش قبل نیز مشاهده شد، افزایش فشار در دمای زیادتر منجر به کاهش عمر قطره می شود و تغییر در ترکیب شیمیایی محیط تاثیری بر این رفتار نمی گذارد. از این بحث می توان نتیجه گرفت با غنی کردن هوا با اکسیژن تا نرخ حدود ۰٫۵ عمر قطره و در نتیجه بخش فیزیکی تاخیر اشتعال را کاهش می دهد. با این وجود انتخاب مقداری برای غلظت اکسیژن در شرایط کاربردی نیاز به دانستن تاثیر آن بر انتشار اکسیدهای نیتروژن نیز دارد.



الف



ب

شکل ۳ تاثیر نرخ افزودن اکسیژن به هوا بر عمر قطره دیزل در فشارهای مختلف (الف) ۷۰۰ کلوبین (ب) ۱۴۰۰ کلوبین

تاثیر تزریق بخار

به منظور نشان دادن تاثیر تزریق بخار بر تبخیر قطره دیزل، نرخ تبخیر متوسط برای سه کسر جرمی مختلف بخار آب در دما و فشار محیط مختلف

diesel engine NO-Smoke emission and combustion characteristic", *Applied Energy*, **107**, 304-314.

4- G. Kökkülünk, G. Gonca, V. Ayhan, I. Cesur, A. Parlak, 2013, "Theoretical and experimental investigation of diesel engine with steam injection system on performance and emission parameters", *Applied Thermal Engineering*, **54**, 161-170.

5-G. Kökkülünk, A. Parlak, V. Ayhan, İ. Cesur, G. Gonca, B. Boru, 2014, "Theoretical and experimental investigation of steam injected diesel engine with EGR", *Energy*, **74**, 331-339.

6- P.S. Divekar, X. Chen, J. Tjong, M. Zheng, 2016, "Energy efficiency impact of EGR on organizing clean combustion in diesel engines", *Energy Conversion and Management*, **112**, 369-381.

7- C. Baumgarten, 2006, Mixture formation in internal combustion engines, Springer Science & Business Media.

8- B. Abramzon, W.A. Sirignano, 1989, "Droplet vaporization model for spray combustion calculation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **32**, 1605-1618.

9- W.A. Sirignano, 2012, Fluid dynamics and transport of droplets and sprays, 2nd ed., Cambridge University Press.

10- M. Rensizbulut, M. Bussmann, X. Li, 1992, "A droplet vaporization model for spray calculations", *Particle & particle systems characterization*, **9**, 59-65.

11- A.W. Cook, 2009, "Enthalpy diffusion in multicomponent flows", *Physics of Fluids (1994-present)*, **21**, 055109.

12- V. Ebrahimiyan, C. Habchi, 2011, "Towards a predictive evaporation model for multi-component hydrocarbon droplets at all pressure conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 3552-3565.

13- C. Tseng, R. Viskanta, 2005, "Effect of radiation absorption on fuel droplet evaporation", *Combustion Science and Technology*, **177**, 1511-1542.

14- W. Long, P. Yi, M. Jia, L. Feng, J. Cui, 2015, "An enhanced multi-component vaporization model for high temperature and pressure conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **90**, 857-871.

15- S. Sazhin, P. Krutitskii, W. Abdelghaffar, E. Sazhina, S. Mikhalovsky, S. Meikle, M. Heikal, 2004, "Transient heating of diesel fuel droplets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 3327-3340.

16- Y. Ra, R.D. Reitz, 2009, "A vaporization model for discrete multi-component fuel sprays", *International Journal of Multiphase Flow*, **35**, 101-117.

17- O.S. Abianeh, C. Chen, 2012, "A discrete multicomponent fuel evaporation model with liquid turbulence effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 6897-6907.

18- X. Ma, F. Zhang, K. Han, G. Song, 2016, "Numerical modeling of acetone-butanol-ethanol and diesel blends droplet evaporation process", *Fuel*, **174**, 206-215.

جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تاثیر EGR بر تبخیر قطره محسوس نمی‌باشد و کمی عمر قطره را کاهش می‌دهد. در محیط با دما و فشار زیاد EGR عملاً هیچ تاثیری بر عمر قطره ندارد. تاثیر کم نرخ EGR بر تبخیر ناشی از تغییرات کم در ترکیب محیط است. بخش بزرگی از هوا و متعاقباً EGR نیتروژن می‌باشد. با افزایش نرخ EGR از صفر تا ۰.۵، کسر جرمی نیتروژن از ۰.۷۷ تا ۰.۷۴ تغییر می‌کند. از این رو استفاده از تکنیک EGR تاثیری بر نرخ تبخیر و در نتیجه بر تاخیر فیزیکی اشتعال نخواهد داشت.

جدول ۱ عمر قطره نرمال شده در نرخ EGR مختلف

۱۰۰۰ K		۷۰۰ K		کسر EGR
۲ MPa	۰.۱ MPa	۲ MPa	۰.۱ MPa	
۲.۱۱	۴.۸۹	۱۰.۸۲	۸.۵۵	۰.۰
۲.۰۹	۴.۸۶	۱۰.۷۳	۸.۵۳	۰.۱
۲.۰۹	۴.۸۳	۱۰.۷۲	۸.۵۱	۰.۲
۲.۰۸	۴.۸۰	۱۰.۷۰	۸.۴۹	۰.۳
۲.۰۸	۴.۷۷	۱۰.۶۹	۸.۴۸	۰.۴
۲.۰۸	۴.۷۴	۱۰.۶۸	۸.۴۶	۰.۵

جمع‌بندی

در این مقاله مدلی گسسته برای تبخیر قطره چندجزئی در محیط با جابجایی توسعه داده شد. به منظور ارضای قانون بقای جرم کلی از سرعت استغنان اصلاح شده استفاده گردید. جذب تشعشع در سطح قطره و انتالپی دیفیوژن در فاز گاز در نظر گرفته شدند. تعادل فاز با کمک معادله حالت پنگ-رابینسون محاسبه شد. تاثیر افزودن اکسیژن، بخار آب و گاز حاصل از احتراق به محیط بر روی تبخیر قطره دیزل بررسی شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- فشار محیط تاثیری متفاوت در دمای محیط متفاوت دارد. در دمای کم افزایش فشار به طولانی شدن عمر قطره و در دمای زیاد به کاهش عمر قطره می‌انجامد.
- افزودن اکسیژن به هوا ابتدا عمر قطره را کاهش و سپس افزایش می‌دهد.
- افزودن بخار به محیط نرخ تبخیر را افزایش می‌دهد و تاثیر آن هنگام افزوده شدن به نیتروژن خالص بیشتر از هنگام افزوده شدن به محیط نیتروژن-اکسیژن است.
- EGR به دلیل تغییرات اندک در ترکیب شیمیایی گاز محیط، تاثیر زیادی بر عمر قطره ندارد.

مراجع

- 1- Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Diesel Engines, 2009, Elsevier.
- 2- Y. Liang, G. Shu, H. Wei, W. Zhang, 2013, "Effect of oxygen enriched combustion and water-diesel emulsion on the performance and emissions of turbocharged diesel engine", *Energy Conversion and Management*, **73**, 69-77.
- 3- W. Zhang, Z. Chen, W. Li, G. Shu, B. Xu, Y. Shen, 2013, "Influence of EGR and oxygen-enriched air on

- 19- R. Banerjee, 2013, "Numerical investigation of evaporation of a single ethanol/iso-octane droplet", *Fuel*, **107**, 724-739.
- 20- S. Gavhane, S. Pati, S. Som, 2016, "Evaporation of multicomponent liquid fuel droplets: Influences of component composition in droplet and vapor concentration in free stream ambience", *International Journal of Thermal Sciences*, **105**, 83-95.
- 21- P. Yi, L. Feng, M. Jia, W. Long, J. Tian, 2014, "Development of an improved multi-component vaporization model for application in oxygen-enriched and EGR conditions", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, **66**, 904-927.
- 22- T. Poinsot, D. Veynante, 2005, Theoretical and numerical combustion, RT Edwards, Inc..
- 23- T. Kitano, J. Nishio, R. Kurose, S. Komori, 2014, "Effects of ambient pressure, gas temperature and combustion reaction on droplet evaporation", *Combustion and Flame*, **161**, 551-564.
- 24- K. Saha, E. Abu-Ramadan, X. Li, 2012, "Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment", *Applied Energy*, **93**, 71-79.
- 25- B.E. Poling, J.M. Prausnitz, J.P. O'Connell, 2001, The properties of gases and liquids, Fifth ed., McGRAW-HILL.
- 26- B.J. McBride, M.J. Zehe, S. Gordon, 2002, NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species, National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center at Lewis Field.
- 27- R.A. Svehla, 1995, Transport coefficients for the NASA Lewis chemical equilibrium program, in: NASA Technical Memorandum 4647.
- 28- K.K. Kuo, 2005, Principles of combustion, 2nd ed., Wiley.
- 29- M.R. Riazi, 2005, Characterization and properties of petroleum fractions, ASTM.
- 30- C.L. Yaws, 2008, Thermophysical properties of chemicals and hydrocarbons, William Andrew.
- 31- T.E. Daubert, R.P. Danner, 1997, API technical data book-petroleum refining, American Petroleum Institute (API), Washington DC.
- 32- X. Ma, F. Zhang, K. Han, B. Yang, G. Song, 2015, "Evaporation characteristics of acetone-butanol-ethanol and diesel blends droplets at high ambient temperatures", *Fuel*, **60**, 43-49.
- 33- L. Zhang, S.-C. Kong, 2011, "High-pressure vaporization modeling of multi-component petroleum-biofuel mixtures under engine conditions", *Combustion and Flame*, **158**, 1705-1717.