

## تحقیق شبیه سازی سه بعدی زمانبندی پاشش سوخت و مقدار نسبت چرخش بر شاخص همگنی مخلوط، احتراق، و آلاینده‌گی موتور

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

هادی تقوی فر\*

### چکیده

یکی از روش‌های بهبود کارکرد موتور دیزل بهبود ویژگی‌های پاششی سوخت و اتخاذ تدابیری برای ایجاد مخلوط همگن تر و یکنواخت تر از سوخت تزریق شده با هوای داخل محفظه است. برای ایجاد شرایط مطلوب منجر به برقراری مخلوط استوکیومتری، عوامل زمانبندی پاشش سوخت و شدت چرخش هوا در حالت ترکیبی در این پروژه آنالیز شده‌اند و جواب بهینه منجر به ایجاد حداکثر احتراق و حداقل آلاینده‌گی معرفی می‌شوند. نتایج عددی به دست آمده با نرم افزار AVL FIRE برای حالت پایه با نتایج تجربی در توافق خوبی هستند و حاکی از قابلیت اطمینان به مدل ایجاد شده می‌باشد. برطبق نتایج برگرفته از این مطالعه، پاشش زودهنگام 712 CA باعث ایجاد شاخص همگنی بزرگتری می‌شود و اثر شدت چرخش بر شاخص همگنی ERUI در پاشش‌های زودهنگام محسوس تر و بارزتر از پاشش دیرهنگام و متأخر است. از نقطه نظر آلاینده‌گی نیز پاشش دیرهنگام توصیه می‌شود چرا که قادر به کاستن توأمان هر دو آلاینده دوده و NO<sub>x</sub> می‌باشد. در حالت کلی می‌توان بیان کرد که حالت ترکیبی 712 CA- 1200 1/min حالت بهینه برای احتراق و 723 CA- 1500 1/min ایده‌آل برای کاستن از آلاینده‌گی است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به صورت عملی اقدام به تنظیم برنامه کامپیوتری ECU در موتور جهت تنظیم نحوه پاشش و شدت چرخش هوای دورانی داخل موتور نمود تا به نتایج دلخواه از خروجی موتور دیزل نائل آمد.

واژه‌های کلیدی: موتور دیزل پرسرعت، زمانبندی پاشش سوخت، شاخص همگنی نسبت هم ارزی، شدت چرخش اولیه

## Investigation of 3D simulation of fuel injection timing and swirl ratio on mixture uniformity index, combustion, and emissions of diesel engine

H. Taghavifar

Mechanical Engineering Department, Malayer University, Malayer, Iran

### Abstract

One of the methods to improve the performance of diesel engine is the upgrade in the injection features and adopting some schemes in order to create a more homogenous and uniform mixture of the sprayed fuel with accessible air within combustion chamber. As to form a desirable condition conducive to stoichiometric mixture, factors such as the injection timing and air swirl ratio in combination were analyzed in this project and the optimum solution leading to maximum combustion and minimum emissions were introduced. The obtained numerical results by AVL FIRE for the base case have been compared with experimental ones showing a good agreement and indicative of reliability to modeling procedure. According to obtained results, the advanced injection mode of 712 CA results in greater uniformity index and the effect of swirl ratio is more sensible on ERUI at advanced injections rather than retarded injections. From the pollutant emissions aspect, the late injection policies are recommended since it is capable of simultaneous reduction of soot and NO<sub>x</sub>. In general, the compound cases of 712 CA- 1200 1/min and 723 CA- 1500 1/min are ideal for combustion and emission control strategies, respectively. The results can be programmed for electronic injection regulation through ECU system of engines while an appropriate swirl amount applied to achieve the results of interest.

**Keywords :** High-speed diesel engine, Fuel injection timing, ERUI, Initial swirl ratio

### ۱- مقدمه

پالس‌های پاششی تقسیم شود که منجر به افزایش تأخیر در اشتعال در مقایسه با پالس پاشش سوخت تک‌گانه اولیه شود. این امر موجب آزادسازی سهم گرمای بیشتر در کورس انبساط می‌شود و از سهم آزادسازی گرمای پیش آمیخته می‌کاهد و باعث پایین آمدن NO<sub>x</sub> می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که پاشش جداگانه باعث بهبود تشکیل مخلوط و در نتیجه کاهش میزان دوده می‌شود [۴]. در پژوهش یونوزی و همکاران [۵] رفتار مخلوط سوختی دیزل/بنزین با دیزل/بوتانول با تمهیدات پاششی سوخت بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل سبک بررسی گردید و نتایج نشان می‌دهند که برای کاهش آلاینده‌ها (PM و NO<sub>x</sub>) پاشش تک‌گانه با مخلوط سوختی بهتر است. مباحثی [۶] با استفاده از مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD تمهیدات پاششی پیشرفته را در موتورهای دیزل سنگین مورد بررسی قرار دادند و در مطالعه اول ترکیب پاشش چندگانه و بازخورانی گازهای خروجی (EGR) را بر خروجی موتور از دیدگاه آلاینده‌گی مورد تأکید

تکنولوژی‌های جدید موتور دیزل نه تنها مستلزم بهبود ادغام رانشگر به آنها از قبیل تکنولوژی‌های هیبرید دیزل می‌باشد بلکه نیازمند ابتکار و نوآوری در احتراق داخل سیلندر نیز می‌باشد. مدت زمان طولانی است که مشخص شده است کیفیت احتراق موتور دیزل بشدت به فرآیند اختلاط سوخت و هوا بستگی دارد [۱]. فرآیندهای تزریق فشار بالا و تزریق‌های چندگانه بطور معمول در موتورهای دیزل اتخاذ شده است تا بدین ترتیب بتوان فروپاشی جت سوخت را بهبود بخشیده و به اختلاط بهتری از سوخت و هوا دست یافت. در سالهای اخیر استراتژی پاشش سوخت چندگانه در ارتباط با قابلیت آن در بهبود عملکرد موتور مورد مطالعه قرار گرفته است [۲و۳]. این مطالعات متمرکز بر کنترل آلاینده‌گی برای رعایت مقررات سختگیرانه هستند. پاشش سوخت تک‌گانه می‌تواند به دو یا تعداد بیشتر

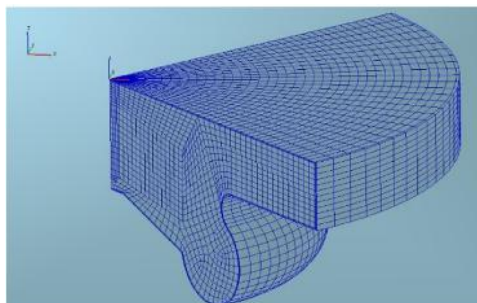
\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: haditaghavifar@yahoo.com

- ایجاد هندسه در ESE diesel
- شبکه بندی هندسه و طرح کلی ایجاد شده
- ایجاد تغییر در شدت چرخش هوا قسمت Initialization که امکان تغییر در جهت و اندازه حرکت دورانی می دهد
- تغییر زمان شروع پاشش و مدت پاشش یکسان برای تمام حالات در قسمت مدول افشانه
- تعریف مدل مورد نظر برای کد و اجرای آن
- دریافت نتایج و بررسی و تحلیل آن ها

## ۱-۲ - شبکه بندی هندسه

برای حل معادلات گسسته سازی شده، باید دامنه حل شبکه بندی گرد و از طریق روش حجم محدود سلول های محاسباتی ایجاد می شوند. در ابتدا الگوی شکل کلی تعیین می گردد و بلوک بندی بر روی این خطوط مرزی تعیین می گردد که مهمترین آنها بلوک افشانه و بلوک انژکتور است. در مرحله بعدی مش های دو بعدی ایجاد می گردند که براساس اندازه سلول ها می توان کیفیت سلول ها و مش بندی را کنترل کرد. به جهت اینکه پیستون در حال حرکت رفت و برگشتی است باید از شبکه بندی متحرک استفاده کرد یعنی به هنگامی که پیستون پایین می آید و حجم محفظه زیاد می شود، سلول ها دچار تغییر شکل یا کشیدگی شده می شوند.

از آنجایی که موتور مورد نظر برای شبیه سازی دارای ۴ انژکتور است و هر انژکتور برای ربع کل هندسه می باشد و همچنین شکل موتور دارای تقارن است و جریان ایجاد شده در هر یک از ربع هندسه دارای تقارن است برای صرفه جویی در زمان محاسباتی تنها ۱/۴ کل شکل برای مطالعه موتور در نظر گرفته می شود. هندسه مش زنی شده در موقعیت ۳۰ درجه بعد از نقطه مرگ بالا (30 °CA ATDC) در شکل ۱ نشان داده شده است و اطلاعات مورد نیاز در رابطه با انواع سلول ها و شبکه های ایجاد شده در جدول ۱ گردآوری شده است.



شکل ۱- هندسه مش زنی شده از محفظه احتراق در موقعیت 30 °CA ATDC

قرار دادند. در مطالعه ی مذکور سه فاکتور مد نظر قرار گرفت: EGR، جدایی بین پاشش اصلی و پسا تزریق، مقدار سوخت پاششی در پالس ها. نتایج حاکی از کاهش آلاینده های دوده و NOx با بکارگیری پاشش جداگانه می باشد. سپس فینسو و اسپسا [۸] اثر پاشش چندگانه را به همراه مقدار پاشش کنترل شده در موتور دیزل بکار گرفتند که مقدار سوخت تزریقی براساس فشار صورت می گیرد. روش بکار گرفته شده شاخصه های خوبی از قبیل کاهش زمان محاسباتی دارد. نهایتاً لی و همکاران [۹] تأثیر استراتژی سوخت دیزل را بر احتراق و آلاینده گی موتور دوگانه سوز دیزل/پروپان بررسی کردند. بر طبق یافته های این تحقیق پاشش چندگانه با پاشش اصلی زود هنگام برای احتراق پروپان مناسب بوده و پاشش اولیه ی دیزل با پاشش بعدی پروپان به اندازه ۳۰٪ از جرم کلی سوخت برای کاهش NOx مناسب تر می باشد. کیم و همکاران [۱۰] اثر زوایای پاشش سوخت و زمان بندی پاشش را بر احتراق و آلاینده گی موتور دیزل بر سرعت بررسی کردند. نتیجه مطالعه حاکی از آن است که انژکتور با زاویه باریک می تواند آلاینده های CO و HC را کاهش دهد. همچنین نشان داده شده است که مقدار اوج فشار احتراق با زمان بندی پاشش ۳۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا کاهش می یابد. در مطالعه ای دیگر، وی و همکاران [۱۱]، اثر زمان بندی پاشش بر احتراق و آلاینده گی در یک موتور دیزل با سوخت ترکیبی دی متیل اتر-دیزل=۲/۵ بررسی شد. با استفاده از این سوخت ترکیبی می توان به مصالحه بین دو آلاینده ناگس و دوده دست یافت.

همانگونه که ملاحظه می شود با توجه به مطالعات نمونه ای انجام یافته اثر ترکیبی زمان بندی پیش پاشش و پس پاشش با نسبت چرخشی مختلف مورد بررسی و تحقیق جامع قرار نگرفته است و می توان استراتژی زمان بندی و نسبت چرخشی معینی را برای حالت بهینه موتور از حیث آلاینده گی و راندمان تعریف کرد.

## ۲- عملیاتی کردن شبیه سازی

در کار حاضر از یک موتور دیزل فورد ۱/۸ لیتر از نوع پر سرعت (HSDI) برای تحلیل ترکیب انواع زمان بندی متقدم و متأخر با شدت حرکت چرخشی استفاده می شود. در انجام این پروژه سرعت موتور ثابت و برابر ۲۰۰۰ دور/دقیقه برای تمامی حالات مطالعاتی است در حالیکه مشخصه های هندسی موتور از جمله نسبت تراکم بدون تغییر خواهند بود. در ارتباط با بحث چرخش هوا که از طریق درگاه های خاص ورود هوا به داخل محفظه ایجاد می شود، باید ذکر کرد که این نوع حرکت هوا می تواند به دو شکل عمود بر محور افقی (غلتش) باشد و یا این حرکت دورانی هوا می تواند عمود بر محور قائم (چرخش) باشد. شدت این چرخش دورانی هوا مورد بحث و بررسی این مطالعه خواهد بود که در قالب سرعت دورانی بر حسب دور در دقیقه منظور می شود. این هوای چرخشی که قاعدتاً با کورس تراکم پدید می آید اثر چشمگیری بر توزیع و پخش قطرات افشانه تزریقی و در نتیجه تهیه مخلوط سوخت-هوا خواهد داشت. در نتیجه تنظیم زمان شروع پاشش به شدت حرکت چرخشی هوا مرتبط است و برهم اثرگذار هستند. در شکل های نشان داده شده هر یک از منحنی ها، عدد اول منطبق با زمان شروع پاشش بر حسب زاویه میل لنگ (CA) است و عدد دوم شدت چرخش هوای لحاظ شده در محاسبات را نشان می دهد.

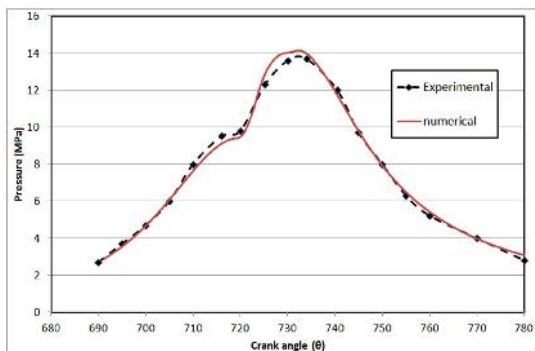
این پروژه با استفاده از نرم افزار با کد تجاری AVL-FIRE صورت گرفته و این فرآیند شامل مراحل زیر می باشد:

جدول ۳- شرایط عملیاتی موتور Ford 1.8L

|                   |                               |
|-------------------|-------------------------------|
| کالیبر × کورس     | 82.5 × 82 mm                  |
| حجم جایجایی       | 438 cm <sup>3</sup> /cylinder |
| نسبت تراکم        | 19.5:1                        |
| نسبت چرخش اولیه   | 3                             |
| فشار در ریل مشترک | 540-1255 bar                  |

### ۳-۲- صحنه‌گذاری بر نتایج

برای اعتباردهی به نتایج بدست آمده عددی از شبیه‌سازی موتور دیزل پایه، از منحنی فشاری مطابق با شکل ۲ استفاده شده است و منحنی‌های فشاری مربوط به نتایج تجربی بر گرفته از کار آزمایشگاهی هاوولی و همکاران [۱۲] و شبیه‌سازی موتور در سرعت ۲۰۰۰ rpm با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از قابل اطمینان بودن مدل‌سازی موتور می‌باشد چرا که بیشترین انحراف از نتایج تجربی در نقطه اوج کمتر از ۳٪ می‌باشد.



شکل ۲- فشار داخل سیلندر بر حسب درجه میل لنگ برای نتایج عددی مدل حاضر و نتایج شبیه‌سازی شده [۱۲]

با اطمینان یافتن از صحت و دقت نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و مدل‌سازی موتور با اتخاذ مدل‌های آشفستگی، احتراقی و افشانه ایجاد شده می‌توان به تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از تغییر زمان‌بندی و شدت چرخش هوای داخل محفظه پرداخت.

### ۳- مدل‌سازی عددی و محاسباتی موتور دیزل

شکل‌ها و تغییرات غلظت آلانده NO با زمان (در اینجا بر حسب زاویه میل‌لنگ) با رابطه Extended Zeldowicz مدل شده است که طبق معادله (۱) ارائه شده است و در آن  $k_f$  و  $k_b$  معرف نرخ واکنش رفت و برگشت هستند:

$$\frac{\partial c_{NO}}{\partial t} = k_{f1}c_Oc_{N2} + k_{f2}c_Nc_{O2} + k_{f3}c_Nc_{OH} - k_{b1}c_{NO}c_N - k_{b2}c_{NO}c_O - k_{b3}c_{NO}c_H \quad (1)$$

از سوی دیگر با توجه به اینکه یکی از شاخصه‌های مهم برای اندازه‌گیری میزان همگنی مخلوط به صورت کمی شاخص همگنی است راه لازم برای این پارامتر باید مشخص شود:

$$UI = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - w)^2}}{w} \quad (2)$$

جدول ۱- اطلاعات در رابطه با نوع سلول در شبکه‌بندی

| مقدار    | اطلاعات شبکه                |
|----------|-----------------------------|
| ۳۳۶۷۰    | تعداد گره                   |
| ۶۲۳۶     | تعداد رویه سطحی             |
| ۳۰۴۵۰    | تعداد سلول شش گوشه          |
| ۰        | تعداد سلول های ۴ گوشه و ... |
| ۳۰۴۵۰    | تعداد کل سلولها             |
| ۰/۰۰۵۰۳۷ | مساحت سطحی (متر مربع)       |

### ۲-۲- تعریف مدل (مسأله) به همراه شرایط اولیه و شرایط مرزی

در صورت وضعیت قرار گیری سیلندرها بصورت خطی یا in-line است و تعداد کل سیلندرها برابر ۴ می‌باشد. شعاع میل لنگ و طول دسته شاتون برای تنظیم نسبت تراکم و طول جایجایی پیستون 0.082 m باید بترتیب 0.04 m و 0.094 m در نظر گرفته شود. فاصله ترخیص پیستون برای کلیه طرح‌ها با استناد به مدل تجربی در حدود 0.00086 m می‌باشد. سرعت موتور در حالت کارکردی برای مطالعه طرح پایه با  $717^\circ CA = SOI$  و Swirl = 1500 1/min برابر 2000 rpm است.

شرایط مرزی و شرایط اولیه برای مدل‌سازی موتورهای دیزل در جدول ۲ لیست شده اند علاوه بر این زیر مدل‌های لازم جهت شبیه‌سازی آشفستگی نیز در این جدول مورد اشاره قرار گرفته اند. محاسبات معادلات غیریکنواخت سیستم بسته از بسته شدن دریچه تزریق (۵۲ درجه بعد از نقطه مکث پایین) تا باز شدن دریچه خروجی دوده (۱۱۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا) انجام می‌گیرد. مدل احتراق EBU<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی پدیده احتراق داخل محفظه بکار می‌رود که بر اساس اختلاط آشفته می‌باشد.

جدول ۲- شرایط مرزی و اولیه به همراه زیرمدل‌های بکار گرفته شده

|                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| دمای سرسیلندر       | 550.15 K        |
| دمای پیستون         | 575.15 K        |
| دمای سیلندر         | 475.15 K        |
| فروپاشی افشانه      | KH-RT اصلاح شده |
| مدل احتراقی         | ECFM-3Z         |
| مدل آشفستگی         | k-ε             |
| مقدار سوخت پاششی    | 31.3 mg/cycle   |
| نسبت گاز باقیمانده  | 0.5             |
| باز شدن سوپاپ خروجی | 110 CA ATDC     |

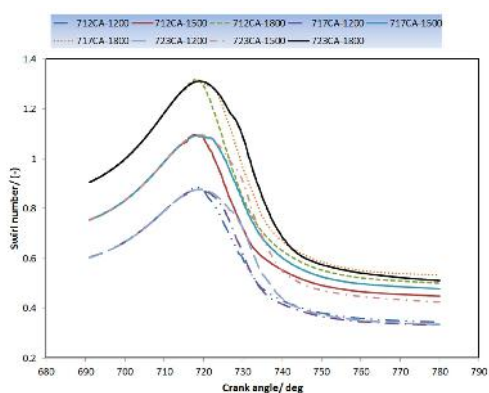
مشخصات کارکردی موتور پایه دیزل پاشش مستقیم Ford که از روی آن شبیه‌سازی در نرم‌افزار انجام گرفته است که شامل مشخصات هندسی و مشخصات پاششی و انژکتور می‌باشد در جدول ۳ اشاره شده است.

<sup>۱</sup> Eddy Breakup

چرخش مربوط به 1500 1/min است زیرا شدت چرخش بیشتر باعث برخورد قطرات افشانه به دیواره شده و از کیفیت اختلاط می‌کاهد.

ایجاد چرخش در پاشش‌های قبل از نقطه مرگ بالا اثر چندانی بر شاخص همگنی ندارد زیرا همانطور که ذکر شد به هنگام پاشش زودهنگام چرخش هوای چندانی وجود ندارد ولی وقتی که افشانه بعد از نقطه مرگ بالا پاشش می‌شود، چرخش هوا باعث اختلاط می‌شود.

نسبت چرخش که پارامتر بی بعد شده از شدت چرخش است (شدت چرخش با سرعت دورانی موتور بی‌بعد می‌شود) در شکل ۴ نمایش داده شده است که بر حسب زاویه میل‌لنگ در طول زمان می‌باشد. شکل ارائه شده مطالب برگرفته از شکل ۵ را تأیید می‌کند که چرخش مربوط به پاشش 723 CA از چرخش 717 CA و 712 CA قدرتمندتر است. نسبت چرخش یا عدد چرخش برای شدت چرخش 1800 1/min از سایر شدت‌های چرخش بزرگتر است.



شکل ۴- نسبت چرخشی (SN) در برابر زاویه میل‌لنگ CA برای حالات مطالعاتی شروع پاشش SOI و شدت چرخش

آهنگ آزادسازی گرما برای پاشش 712 CA، 717 CA و 723 CA به ترتیب در شکل‌های ۵ (الف)، (ب) و (پ) نشان داده شده است. مقدار اوج HRR برای پاشش 712 CA برابر 39.84 J/deg مطابق با چرخش 1200 1/min، برای پاشش 717 CA برابر با 30.91 J/deg مطابق با چرخش 1500 1/min و برای پاشش 723 CA برابر با 37.62 J/deg مطابق با چرخش 1500 1/min است. ملاحظه می‌گردد که اوج پاشش متعلق به پاشش زودهنگام 712 CA است زیرا همانطور که قبلاً اشاره شد پاشش زودهنگام فرصت کافی برای اختلاط مؤثر بین سوخت/هوا را می‌دهد و اوج احتراق فاز پیش‌آمیخته بیشتر شده و گرمای بیشتری در این لحظه آزاد می‌کند. همین‌طور شکل‌ها تأیید می‌کنند که مقدار چرخش بالا برای ایجاد تولید گرمای بالا مشکل‌ساز هستند و چرخش‌های هوای 1200 1/min و 1500 1/min از این نقطه نظر عملکرد بهتری دارند زیرا چرخش با سرعت بالا یکی از عوامل برخورد قطرات افشانه به دیواره و نسوختن مقداری از پتانسیل سوخت می‌باشد.

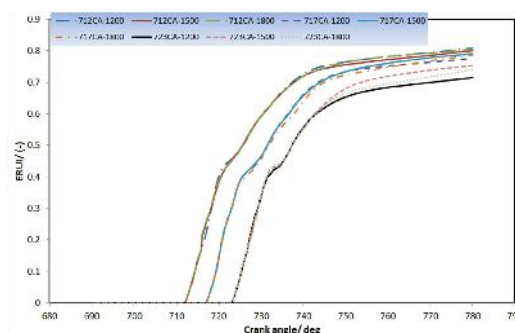
در رابطه بالا  $w_i$  و  $w$  نسبت هم‌ارزی در سلول  $i$  و نسبت هم‌ارزی متوسط روی دامنه حل محاسباتی است. شاخص  $UI$  بین صفر و یک متغیر است و مقدار متناظر با ۱ نشان دهنده مخلوط کامل و ۰.۱۰۰ همگن است. همچنین پارامتر نسبت چرخش که در واقع نقش هم‌زدن سوخت و هوا را با به چرخش در آوردن هوای ورودی با سوپاپ از طریق ماریپچ‌های تعبیه شده در سوپاپ ورودی دارد باید به خوبی تبیین شود که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$SR_x = \frac{\omega_{sx}}{N} \quad (3)$$

که در آن  $\omega_{sx}$  سرعت زاویه‌ای است،  $N$  سرعت موتور و  $SR_x$  نشان‌دهنده نسبت چرخش حول محور  $x$  است.

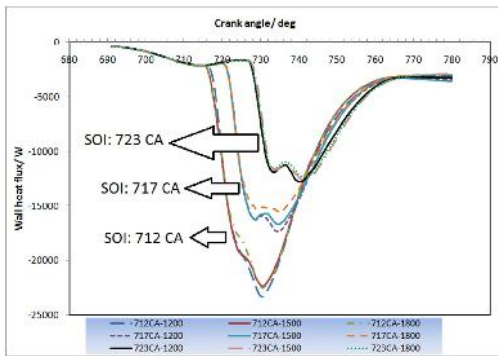
#### ۴- نتایج و بحث

با اتخاذ زمان شروع پاشش مختلف متأخر و متقدم که با به پیش انداختن یا به تعویق انداختن تزریق افشانه انجام می‌گیرد موقعیت حرکتی پیستون نیز فرق می‌کند و هر چه به نقطه مرگ بالا نزدیک می‌شویم احتمال ورود افشانه به کاسه پیستون بیشتر می‌شود که باعث ایجاد ورتکس جریان می‌شود. تشکیل مخلوط سوخت هوا در فاز احتراقی پیش‌آمیخته (Premixed Combustion = PMC) اثر زیادی دارد و این اختلاط یکنواخت بر کیفیت سوختن مخلوط تهیه شده اثر فراوانی دارد. شاخص جدیدی از یکنواختی مخلوط سوخت-هوا معرفی شده است که در محدوده ۰-۱ است و به نام شاخص همگنی نسبت هم‌ارزی (Equivalence Ratio Uniformity Index = ERUI) شناخته می‌شود و در کد نرم‌افزاری ادغام می‌گردد. در این شاخص عدد صفر معرف عدم اختلاط و جدا بودن سوخت و هوا است و عدد ۱ به منزله اختلاط و همگنی کامل بین سوخت و هوا می‌باشد. شکل ۳ این شاخص مهم را بر حسب زاویه میل‌لنگ برای انواع استراتژی‌های ترکیبی زمان‌بندی و شدت چرخش نشان می‌دهد.



شکل ۳- شاخص ERUI در برابر زاویه میل‌لنگ CA برای حالات مطالعاتی شروع پاشش SOI و شدت چرخش

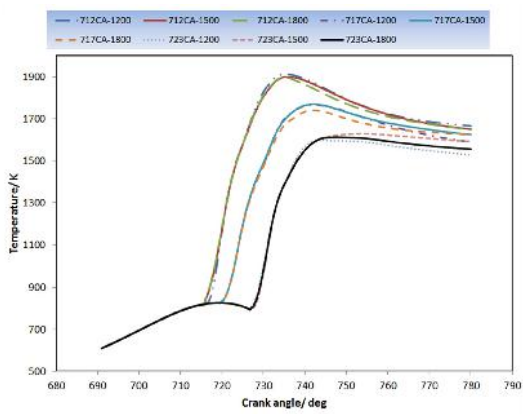
همانطوری که از شکل پیداست، به جلو انداختن زاویه پاشش باعث بهبود تهیه مخلوط می‌شود چرا که فرصت بیشتری برای نفوذ افشانه در بین مولکول‌های اکسید کننده یا هوا پدید می‌آورد و هرچه قدر زمان شروع پاشش به تعویق می‌افتد این فرآیند یکنواختی دچار مشکل می‌شود. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که بیشترین تأثیر چرخش هوا در زمان‌بندی معوق 723 CA اتفاق می‌افتد. این بدان دلیل است که مقدار اوج چرخش در اطراف نقطه مرگ بالا اتفاق می‌افتد. در زمان‌بندی پاشش 723 CA، بهترین



شکل ۶- شار گرمایی دیواره (WHF) در برابر زاویه میل‌لنگ CA برای حالات مطالعاتی شروع پاشش SOI و شدت چرخش

کمترین شار گرمایی دیواره برای حالت شروع پاشش 723 CA است، زیرا کمترین فرصت ایجاد احتراق در این حالت وجود دارد و اشتعال دیر هنگام و تولید گرمای دیر هنگام فرصت عبور گرما از مرزهای دیواره به محیط را نمی‌دهد و به همین دلیل با پیش انداختن شروع پاشش احتراق زودتر آغاز شده و گرمای تولید شده زمان لازم برای خروج را دارد در حالیکه برای پاشش 723 CA احتراق دیر هنگام با شروع کورس تخلیه همزمان شده و گرما بیشتر از طریق سوپاپ تخلیه خارج می‌شود تا از طریق انتقال گرما از دیواره سیلندر.

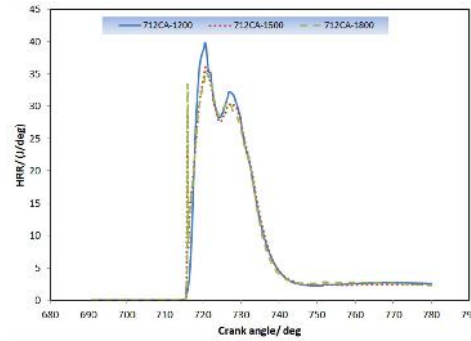
شکل ۷ منحنی دمای داخل سیلندر را برای موارد تحت مطالعه در این کار را بر حسب زاویه میل‌لنگ نشان می‌دهد. دمای محفظه به گرمای حاصل از احتراق سوخت، گرمای خارج شده از محفظه، نرخ تبخیر و سوختن سوخت، نسبت تراکم و دمای هوای ورودی و سایر عوامل دیگر بستگی دارد. از سوی دیگر کیفیت مخلوط تهیه شده قبل از اشتعال نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.



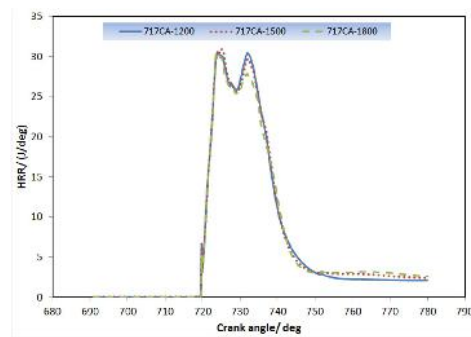
شکل ۷- دمای متوسط داخل سیلندر در برابر زاویه میل‌لنگ CA برای حالات مطالعاتی شروع پاشش SOI و شدت چرخش

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که دمای داخل محفظه برای پاشش معوق 723 CA کمترین و برای پاشش 712 CA متقدم (advanced) بیشتر است. می‌توان تأیید کرد که دو شکل ۳ (شاخص همگنی) و ۷ (دمای داخل سیلندر) از الگوی یکسانی تبعیت می‌کنند. بیشترین دما برای شروع پاشش 717 CA, 723 CA متعلق به شدت چرخش 1500 rpm است

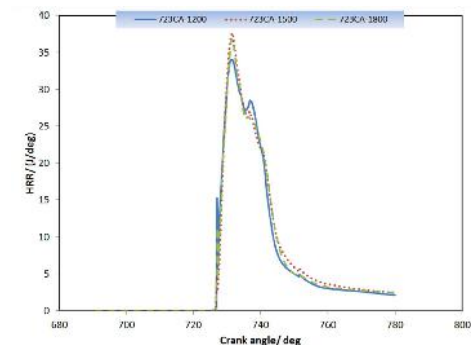
(الف)



(ب)



(پ)



شکل ۵- آهنگ آزادسازی گرما بر حسب CA (الف) 712CA، (ب) 717 CA، و (پ) 723 CA

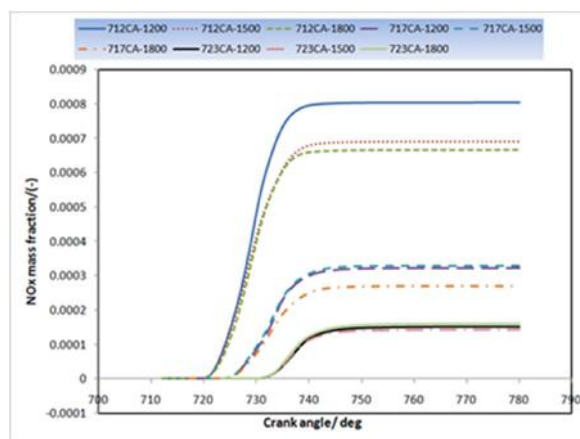
در ادامه، شار گرمایی دیواره برای حالات مطالعاتی مختلف بررسی خواهد شد که اثر زمان‌بندی شروع پاشش را تحت اثر شدت چرخش اتخاذ شده نشان خواهد داد (شکل ۶ مشاهده شود). مقدار حرارت انتقال یافته از جداره‌های خارجی محفظه احتراق دارای اهمیت زیادی است چرا که این شارش گرمایی بر راندمان و اگزورژی حرارتی موتور مرتبط است و با استفاده بهتر از این حرارت می‌توان استفاده مطلوب‌تری در جهت تبدیل به کار مفید کرد.



شروع پاشش زود هنگام 712 CA باعث ایجاد مخلوط کامل تر، احتراق کامل تر و ایجاد دمای بالا شده و این دمای بالا زمینه ساز ایجاد غلظت بالا از آلاینده NOx می شود. برعکس بحث ایجاد مخلوط، در این قسمت بیشترین اثر شدت چرخش بر آلاینده NOx در پاشش های متقدم تر 712 CA و 717 CA مشاهده می شود. در یک نتیجه گیری عمومی می توان بیان کرد که در پاشش های قبل از نقطه مرگ بالا، شدت چرخش بالای 1800 rpm میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن را به صورت مؤثر کاهش می دهد ولی در شروع پاشش بعد از نقطه مرگ بالا اگرچه شدت چرخش هوا اثر محسوسی بر این آلاینده ندارد ولی یک شدت چرخش متوسط دارای قابلیت بیشتری برای کاهش NOx است. شکل ۹ کنتورهای توزیع مکانی دوده را در دو موقعیت 740 و 750 CA را نشان می دهد.

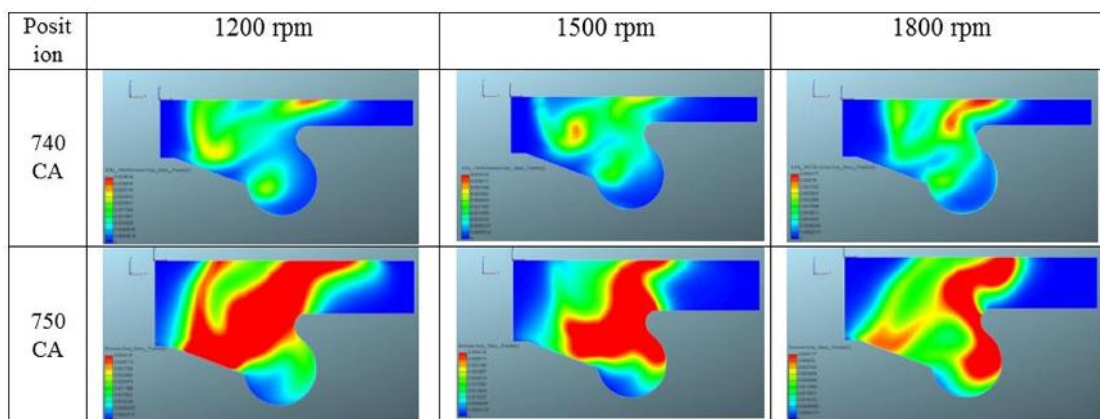
که بیشترین یکنواختی سوخت را دارند. هر چقدر مخلوط تهیه شده یکنواخت تر و نزدیک استوکیومتری باشد، گرمای بیشتری تولید شده و در نتیجه دمای بیشتری در داخل موتور حفظ می شود. آلاینده NOx یکی از مهمترین محصولات احتراق است که نقش بالایی در آلاینده گی موتورهای دیزل دارد چرا که موتورهای دیزل به دلیل مکانیزم احتراقی اشتعال تراکمی در نسبت تراکم بسیار بالاتری نسبت به موتورهای جرقه ای کار می کند و این امر منجر به ایجاد دمای احتراقی بالا شده و منجر به تجزیه نیتروژن غیرفعال شده و این آلاینده اکسید نیتروژن را آزاد می کند. در نتیجه مهمترین عامل در غلظت این آلاینده فاکتور دمایی است و یکی دیگر از فاکتورها حضور یا تراکم اکسیژن در محفظه است. روند تغییر آلاینده NOx بر حسب زمان یا زاویه میل لنگ برای موارد پاششی و چرخشی مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

تاریخ: تهیه سازی به بعدی زمان بندی پاشش و ...

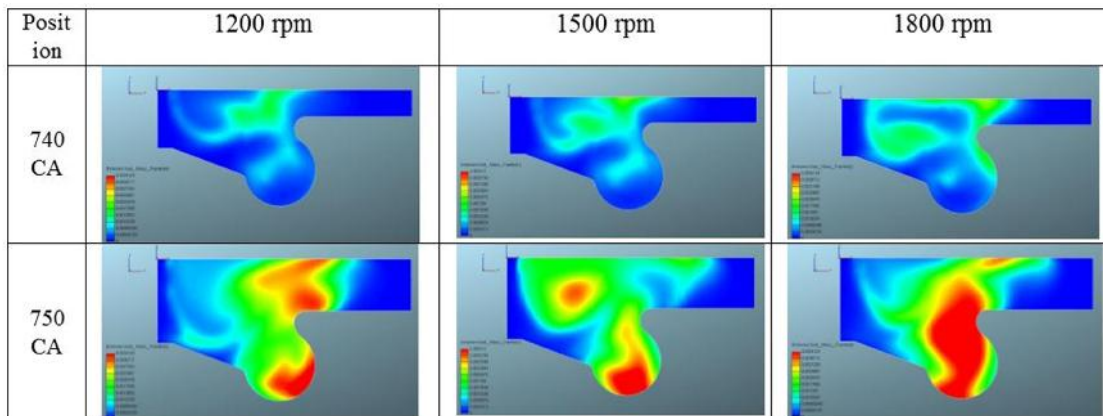


شکل ۸- تغییرات NOx در برابر زاویه میل لنگ CA برای حالات مطالعاتی شروع پاشش و SOI و شدت چرخش

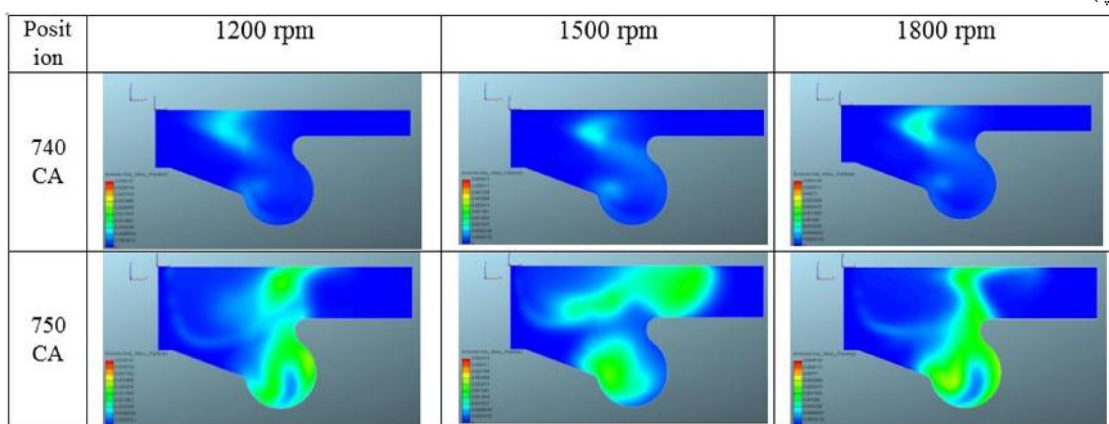
(الف)



(ب)



(پ)



شکل ۹- کنشور توزیع مکانی آلاینده دوده تحت شدت چرخش (الف)  $SOI=712$  CA، (ب)  $SOI=717$  CA و (پ)  $SOI=723$  CA

• است. زیرا در این حالت زمان زیادی برای نفوذ سوخت در هوا و ایجاد مخلوط همگن تر وجود خواهد داشت. اثر شدت چرخش در پاشش‌های زود هنگام بهتر تأثیر خود را نشان می‌دهد به طوریکه ERUI از 0.7144 مرتبط با 723CA-1200 به 0.7519 مرتبط با 1500-723CA می‌رسد.

• نسبت چرخشی (Swirl number or Swirl ratio) برای پاشش‌های متأخر 723 CA مقدار بیشتری دارد زیرا سوخت پاشش شده دیر هنگام با هوا چگالی بیشتری گرفته و قدرت دوران بیشتری دارد.

• در کل پاشش دیر هنگام 723 CA نسبت به سایر زمان‌بندی‌های پاشش هم آلاینده NOx و هم آلاینده دوده را به خوبی کاهش می‌دهد و در این بین شدت چرخش در پاشش متأخر اثر چندانی در تغییر یا کاهش آلاینده NOx ندارد ولی می‌تواند آلاینده دوده را به مقدار کمی کاهش دهد. قابل ذکر است که شدت چرخش بیشترین اثر خود در کاهش آلاینده‌گی را در پاشش زود هنگام نشان می‌دهد و با اعمال شدت چرخش بالاتر می‌توان هر دو آلاینده را به خوبی کاهش داد.

• بیشترین نرخ یا آهنگ تولید گرما مربوط به 712 CA، سپس 723 CA و در نهایت مربوط به 717 CA می‌باشد ولی

نکته جالب توجه در شکل‌های بالا این است که به طرز قابل توجهی با به تأخیر انداختن پاشش سوخت، توزیع و غلظت دوده (soot) کاهش می‌یابد. همانطور که قبلاً اشاره شد در پاشش نزدیک نقطه مرگ بالا (717 و 723) افزایش به دیواره سیلندر برخورد نمی‌کند بلکه وارد کاسه پیستون می‌شود و با ایجاد گردابه به پخش قطرات درون هوا کمک می‌کند و از تشکیل دوده جلوگیری می‌کند. پاشش 723 CA کمترین میزان تولید دوده را دارد. در مورد اثر شدت چرخش می‌توان گفت با افزایش شدت چرخش در پاشش زود هنگام، میزان آلاینده‌گی دوده کاهش پیدا می‌کند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی CFD و بهره‌گیری از کد نرم‌افزاری AVL-FIRE اثر عوامل مختلف مانند پاشش پایه، متقدم (advanced)، متأخر (retarded) تحت اعمال شدت چرخش‌های مختلف در یک موتور دیزل پر سرعت HSDI از نوع 1.8L Ford بررسی گردید. برای بررسی بهتر و دقیق نتایج در خصوص گونه‌های احتراقی از مدل احتراقی شکست گردابه‌ای EBU استفاده شده است. مهم نکات برگرفته شده از این مطالعه بصورت ذیل جمع‌بندی می‌شود:

- پاشش زود هنگام و متقدم 712 CA بهترین حالت برای ایجاد یک مخلوط یکنواخت با بالاترین شاخص همگنی

- [10] Kim, Hyung Jun, Su Han Park, and Chang Sik Lee. "Impact of fuel spray angles and injection timing on the combustion and emission characteristics of a high-speed diesel engine." *Energy* 107 (2016): 572-579.
- [11] Wei, Mingrui, Song Li, Jinping Liu, Guanlun Guo, Zhiyong Sun, and Helin Xiao. "Effects of injection timing on combustion and emissions in a diesel engine fueled with 2, 5-dimethylfuran-diesel blends." *Fuel* 192 (2017): 208-217.
- [12] Hawley, J. G., F. J. Wallace, A. Cox, B. Cumming, and G. Capon. "An experimental study of the application of variable-geometry turbocharging and high-pressure common rail to an automotive diesel engine." *Journal of the Institute of Energy* 74, no. 501 (2001): 124-133.

بیشترین شار گرمایی از دیواره هم مربوط به پاشش متقدم 712 CA می‌باشد. اعمال شدت چرخش بالای 1800 rpm می‌تواند از انتقال گرما یا شار گرمایی دیواره در تمامی زمان‌بندی‌های چرخشی 712CA، 717 CA و 723 CA کم کند.

در کل از نقطه نظر گرمایی و احتراق مورد 712CA-1200 و از نقطه نظر آلاینده‌گی مورد 723CA-1500 ارجحیت دارند.

## ۶- نمادها

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| <i>CFD</i> | دینامیک سیالات محاسباتی    |
| <i>CA</i>  | زاویه میل‌لنگ              |
| <i>k</i>   | ثابت واکنش                 |
| <i>SR</i>  | نسبت چرخش                  |
| <i>UI</i>  | شاخص همگنی                 |
| <i>w</i>   | نسبت هم‌ارزی               |
| <i>WHF</i> | شار گرمایی دیواره، $W/m^2$ |
|            | <b>علائم یونانی</b>        |
| $\omega$   | سرعت زاویه‌ای              |
|            | <b>زیرنویس‌ها</b>          |
| <i>b</i>   | واکنش برگشت                |
| <i>f</i>   | واکنش رفت                  |

## ۷- مراجع

- [1] Husberg, Tobias, Ingemar Denbratt, and Anders Karlsson. *Analysis of advanced multiple injection strategies in a heavy-duty diesel engine using optical measurements and CFD-simulations*. No. 2008-01-1328. SAE Technical paper, 2008.
- [2] Mendez, Sylvain, and Benoist Thirouard. "Using multiple injection strategies in diesel combustion: potential to improve emissions, noise and fuel economy trade-off in low CR engines." *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 1, no. 1 (2009): 662-674.
- [3] Badami, Marco, F. Mallamo, F. Mollo, and E. E. Rossi. "Influence of multiple injection strategies on emissions, combustion noise and BSFC of a DI common rail diesel engine." *SAE Transactions* (2002): 1118-1129.
- [4] Gao, Z., and W. Schreiber. "The effects of EGR and split fuel injection on diesel engine emission." *International Journal of Automotive Technology* 2, no. 4 (2001): 123-133.
- [5] Iannuzzi, Stefano E., and Gerardo Valentino. "Comparative behavior of gasoline-diesel/butanol-diesel blends and injection strategy management on performance and emissions of a light duty diesel engine." *Energy* 71 (2014): 321-331.
- [6] Mobasheri, Raouf, and Zhijun Peng. "CFD investigation into diesel fuel injection schemes with aid of Homogeneity Factor." *Computers & Fluids* 77 (2013): 12-23.
- [7] Mobasheri, Raouf, Zhijun Peng, and Seyed Mostafa Mirsalim. "Analysis the effect of advanced injection strategies on engine performance and pollutant emissions in a heavy duty DI-diesel engine by CFD modeling." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 33, no. 1 (2012): 59-69.
- [8] Finesso, Roberto, and Ezio Spessa. "A control-oriented approach to estimate the injected fuel mass on the basis of the measured in-cylinder pressure in multiple injection diesel engines." *Energy conversion and management* 105 (2015): 54-70.
- [9] Lee, Jeongwoo, Sanghyun Chu, Jaehyuk Cha, Hoimyoung Choi, and Kyoungdoug Min. "Effect of the diesel injection strategy on the combustion and emissions of propane/diesel dual fuel premixed charge compression ignition engines." *Energy* 93 (2015): 1041-1052.