انجمن احتراق ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

گواهی شرکت در کنفرانس

بدین وسیله گواهی می شود مقاله ی:

شبیه سازی عددی سه بعدی اسپری غیر تبخیری ایزواکتان به روش پالایش شبکه و ارائه یک مدل ترکیبی جامع

نگاشته شده توسط:

مصلحی پور علی، جواد ابوالفضلی اصفهانی

در ششمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران در تاریخ ۲۷ لغایت ۲۹ بهمن ماه ۱۳۹۴ در دانشگاه فردوسی مشهد برای ارائه مورد پذیرش قرار گرفته و توسط نویسندگان در محل کنفرانس ارائه شده است.

دکتر جواد ابوالفضلی اصفهانی
دبیر کنفرانس

دکتر محمد باقر آیانی
دبیر علمی کنفرانس

FCCI 2016
ششمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

ششمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
مشهد - دانشگاه فردوسی مشهد - بهمن ماه ۱۳۹۴

شبیه‌سازی عددی سه بعدی اسپری غیرتبخیری ایزواکتان به روش پالایش شبکه و ارائه یک مدل ترکیبی جامع

مصطفی پورعلی[1*]، جواد ابوالفضلی اصفهانی[2]
گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
(* نویسنده مخاطب: **mostafa_poorali@yahoo.com**)

چکیده

در این پژوهش پاشش سوخت ایزواکتان توسط افشانک چرخشی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور حل مشکل وابستگی به مش رویکرد اویلری – لاگرانژی، از روش پالایش شبکه بندی در کد اپن فوم (OpenFoam) استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های سه بعدی زمان نسبتاً زیادی صرف حل مسئله و استخراج نتایج می‌شود به همین خاطر بهبود دادن سرعت و دقت کدهای عددی موجود کاری ارزشمند می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، دست‌یابی و معرفی یک کد عددی می‌باشد که در حین دقت از سرعت بالاتری در مقایسه با کدهای رایج برخوردار باشد. مدل ترکیبی پیشنهاد شده در این تحقیق علاوه بر سرعت و دقت، جامعیت خوبی در شبیه‌سازی شرایط مختلف آزمایشگاهی دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: افشانک چرخشی- پالایش شبکه- اپن فوم (OpenFoam)- رویکرد اویلری-لاگرانژی

۱- مقدمه

امروزه اهمیت پدیده احتراق بر کسی پوشیده نیست. هر چه در جهت ارتقا و بهبود این مسئله تلاش شود، محیط زیست پاک‌تر و جامعه بشری به دلیل کاهش آلاینده‌ها سالم‌تر خواهند بود. به طور ویژه و خاص، پدیده احتراق در موتورهای احتراق داخلی کاربرد گسترده‌ای دارد و از چنان اهمیتی برخوردار است که پژوهشگران زیادی را جهت مطالعه و بهبود همه جانبه مجذوب خود کرده است. یکی از ارکان مهم و اصلی پدیده احتراق در این موتورها ، فرآیند پاشش سوخت می‌باشد که تا کنون تلاش‌های گسترده‌ای جهت درک و شناخت زیرفرآیندهای آن انجام شده و هنوز ناشناخته‌های زیادی در این زمینه وجود دارد.

جهت بهبود سازی مورتورهای احتراق داخلی، محققین در دو بخش عمده فعالیت می‌کنند. این دو بخش، شامل پژوهش-های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی می‌شود. برای نتیجه گرفتن هر چه بهتر از تحقیقات، باید بین این دو بخش، تعامل خوبی بوجود آید. امروزه، شبیه‌سازی عددی پاشش سوخت، از اهمیت زیادی برخوردار شده است. یکی از مزایای استفاده از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با کارهای آزمایشگاهی، این است که نتایج، خیلی سریع‌تر و ارزان‌تر بدست می‌آیند. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، این امکان به وجود می‌آید که تغییرات زمانی هر متغیر دلخواهی قابل گزارش باشد که این امر باعث می‌شود اطلاعات دقیق و جزئی از فرآیند پاشش و احتراق سوخت، بدست آید. این اطلاعات جزئی بدست آمده، مبنایی برای بهبود و بهینه‌سازی فرآیند پاشش سوخت، خواهد بود.

۱- کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد، دانشگاه فردوسی مشهد

ونمینگ یانگ (Wenming Yang) و همکارانش [۱] مطالعات عددی خود را به وسیله کد کیوا (KIVA4) پیرامون تاثیرات نرخ و نحوه پاشش سوخت بیودیزل (Biodiesel) روی مشخصات آلاینده‌های موتورهای اشتعال تراکمی انجام و نشان داده‌اند که شکل پروفیل پاشش تاثیر بسزایی در میزان آلاینده‌ها دارد.

شنگلی‌وی (Shengli Wei) و همکارانش [۲] شبیه‌سازی عددی پاشش سوخت دیزل در موتور پاشش مستقیم را به وسیله کد فایر (AVL-FIRE) انجام و تاثیر زاویه پاشش در محفظه چرخان را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که به منظور بهبود آلاینده‌ها، زاویه پاشش ۱۵۰ درجه زاویه نسبتاً بهتری است.

ونگ (Wang) و همکارانش [۳] مطالعه عددی خود راروی تاثیر نوسانات فشار داخل نازل بر پارامترهای اسپری تبخیری دیزل انجام داده‌اند. آنها اظهار داشته‌اند که نوسانات فشار داخل نازل باعث افزایش عمق نفوذ فاز مایع می‌گردد و نوسانات شدید فشار موجب بهبود اختلاط سوخت و هوا می‌شود. آنها به تاثیر پدیده کاویتاسیون داخل نازل علاوه بر نوسانات فشار نیز اذعان داشته‌اند.

البداوی (Elbadawy) و همکارانش [۴] تاثیر اغتشاشات محفظه را بر پارامترهای اسپری مورد مطالعه عددی قرار داده‌اند. آنها بیان داشته‌اند که هرچه اغتشاشات محفظه بیشتر باشد فرآیند اتمیزه شدن سوخت، تبخیر و اختلاط آن با هوا بهتر صورت می‌پذیرد. کاهش عمق نفوذ بخار و قطر قطرات سوخت نیز از پیامدهای افزایش اغتشاشات محفظه می‌باشد.

گارگ (Garg) و همکارانش [۵]، همگرایی رویکرد اویلری- لاگرانژی را در شبیه‌سازی یک جریان دوفازی، مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها بیان داشته‌اند که استفاده از این رویکرد، محدودیت وابستگی به مش‌بندی را دارد. آنها در تحقیق خود، برای رفع این مشکل، از یک سری توابع وزنی آماری استفاده کرده‌اند. لاچینی (Lucchini) و همکارانش [۶] نیز از رویکرد اویلری- لاگرانژی برای شبیه‌سازی اسپری تبخیری استفاده نموده‌اند. آنها برای کم کردن زمان محاسباتی و کم کردن وابستگی به مش، در ابتدا از یک مش‌بندی نسبتاً درشت استفاده کرده و در هر گام زمانی در جایی که تراکنش بین قطرات و گاز پیرامونش زیاد است، مش را پالایش و فقط در آن مناطق، مش را ریز نموده‌اند.

در کنار تمام روشهای موجود برای شبیه‌سازی اسپری، شبیه‌سازی به روش اویلرین- لاگرانژین به دلیل بازدهی بالای محاسبات و همچنین دقت بالای روش در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی همچنان بعد از گذشت دو دهه یکی از روشهای رایج در شبیه‌سازی‌های اسپری می‌باشد. در این روش فاز پیوسته با استفاده از دیدگاه اویلری و فاز پراکنده با استفاده از دیدگاه لاگرانژی حل می‌شوند و معادلات از طریق ترم‌های منبع از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند، اما این روش به هرحال دارای مشکلاتی، از جمله وابستگی به شبکه بندی می‌باشد. یکی از اهداف این تحقیق، بررسی میزان این وابستگی و رفع آن به کمک پالایش شبکه بندی در هر گام زمانی می‌باشد. برای انجام این تحقیق از کد منبع باز اپن فوم استفاده شده است تا امکان دسترسی به منبع کد وجود داشته باشد. در نهایت، پیاده‌سازی یک مدل ترکیبی در کد که تاکنون در پژوهش‌های مشابه مورد استفاده واقع نشده و بررسی سرعت و دقت آن، هدف اصلی این پژوهش می‌باشد.

۲- معادلات حاکم

در این قسمت معادلات حاکم به روش اویلری-لاگرانژی بیان می شوند. در حل جریان اسپری با استفاده از روند اویلری- لاگرانژی، هوای ساکن با فشار بالا در داخل محفظه حجم ثابت با استفاده از مختصات اویلری تعریف می شود، اما جت اسپری مایع به بسته های محاسباتی از قطرات با سرعت، دما و اندازه یکسان تجزیه می‌شود که با استفاده از مختصات لاگرانژی دنبال می شوند. در مرجع [۷] به طور کامل به این معادلات اشاره شده است.

۱-۲- مدل شکست اولیه فیلم مایع با استفاده از ناپایداری خطی[1]

جریان خروجی از نازل انژکتور چرخشی فشار بالا به صورت یک فیلم مایع می‌باشد. در این انژکتور حرکت گریز از مرکز سوخت در داخل محفظه چرخش، هسته هوای توخالی را در میان آن ایجاد می‌کند که با ورود سوخت به داخل نازل، به دلیل کاهش سطح محفظه چرخش به سطح نازل، این حرکت چرخشی افزایش می یابد و با خروج سوخت از نازل، فیلم مخروطی شکلی را پدید می‌آورد. به دلیل بقاء جرم، با دور شدن از نازل، ضخامت فیلم مایع کاهش می یابد و پس از تبدیل به حلقه‌های اولیه نهایتا بصورت قطرات سوخت متلاشی می شود[۸].

برای شکست فیلم مایع از مدل اتمیزه شدن فیلم مایع با استفاده از ناپایداری خطی [۹] استفاده شده که در آن اثرات گاز محفظه، ویسکوزیته مایع ν_l و کشش سطحی σ بر روی شکست فیلم سوخت در نظر گرفته شده است. نرخ رشد سریعترین موج رشد کننده، Ω بر روی فیلم مایع که منجر به شکست آن می شود از حل عددی رابطه زیر بر حسب طول موج k حاصل می شود:

$$\omega = -2\nu_l k^2 + \sqrt{4\nu_l^2 k^4 + QU^2 k^2 - \frac{\sigma k^3}{\rho_l}} \quad (۱)$$

زمان وطول اتمیزه شدن فیلم مایع از عبارات زیر بدست می آیند:

$$\tau = \frac{1}{\Omega}\ln\frac{\eta_b}{\eta_0} \quad (۲)$$

$$L = \frac{U}{\Omega}\ln\frac{\eta_b}{\eta_0} \quad (۳)$$

که η_b حداکثر دامنه اغتشاشات در لحظه شکست و η_0 دامنه اولیه اغتشاشات می باشد. اندازه قطر حلقه‌های اولیه ایجاد شده از فیلم مایع مطابق با رابطه زیر تعریف می شود:

$$d_L = \sqrt{\frac{16h}{K_s}} \quad (۴)$$

که K_s، عدد موج سریعترین موج رشدکننده بر روی فیلم مایع می باشد که از رابطه (۱) به ازاء Ω بدست خواهد آمد. مقدار h، نصف ضخامت فیلم مایع تشکیل شده در لحظه شکست، از بقاء جرم در لحظه $t-\tau$ بدست می آید:

$$\dot{m}_{inj_{(t-\tau)}} = 4\pi\rho_l r U h \quad (۵)$$

r فاصله نقطه شکست فیلم مایع تا محور انژکتور، ρ_l چگالی سوخت مایع و u سرعت پاشش سوخت می باشد.

قطر قطرات حاصل شده از شکست حلقه‌های اولیه از یک آنالیز ناپایداری و با اعمال بقاء جرم از رابطه زیر بدست می آید.

$$d_D^3 = \frac{3\pi d_L^2}{K_L} \quad (۶)$$

K_L عدد موج سریعترین موج رشد کننده بر روی حلقه های اولیه می باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_L d_L = \left[\frac{1}{2} + \frac{3\mu_l}{2(\rho_l \sigma d_L)^2}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

بنابراین عبارت نهایی برای قطر قطره پس از شکست اولیه بصورت زیر قابل بیان است:

$$d_{LISA} = 1.88\sqrt{\frac{16h}{K_s}}(1+3Oh)^{\frac{1}{6}} \quad (۸)$$

1- LISA (Linearized Instability Sheet Atomization)

که Oh عدد آنسورج[1] بوده و بیان‌گر نسبت نیروهای لزج به نیروهای کشش سطحی می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

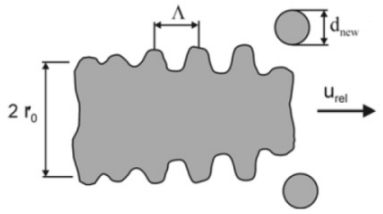
$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d_P}} \quad (۹)$$

۲-۲- مدل شکست ثانویه

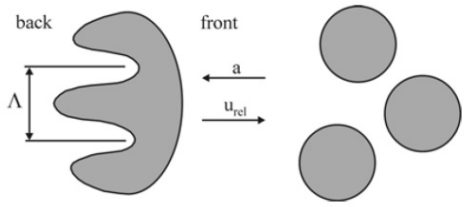
بسته‌های اسپری پس از تزریق به دلیل سرعت‌های بالا دچار تغییر شکل و شکست می شوند. هدف مدل شکست ثانویه کاهش اندازه مشخصه بسته‌های اسپری در اثر نیروهای آیرودینامیکی و معرفی مشخصات بسته‌های جدیدی که از بسته های والد بدست می‌آیند می‌باشد. مدل های متعددی برای این کار پیشنهاد شده‌اند. در این پژوهش از دو مدل شکست کلوین هلمهولتز-ریلی تیلور(KHRT معرف این مدل است) و مدل شکست آبشاری (که به اختصار CAB نامیده می‌شود) استفاده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است.

۲-۲-۱ مدل KHRT

مدلKHRT به دو روش کلوین هلمهولتز KH و ریلی تیلور RT پدیده شکست قطرات را پیش بینی می‌کند. شکل(الف.۱) تصویر شمایی فرآیند تشکیل ناپایداری KH را نمایش می‌دهد. این مدل به طور کامل در مرجع [۱۰] ارائه شده است. چون این مدل، بسیار رایج است و در اکثر مقالات از آن استفاده می‌شود لذا جزئیات این مدل ارائه نمی‌گردد.



شکل (الف.۱). تصویر شمایی فرآیند تشکیل ناپایداری KH



شکل (ب.۱). تصویر شمایی فرآیند تشکیل ناپایداری RT بر روی قطره

بطور کلی در تجزیه یک قطره، نیروهای اصلی شامل نیروی ناشی از فشار دینامیکی ، نیروی ناشی از ویسکوزیته و نیروی کشش سطحی می‌باشد. تغییر شکل قطره بطور اساسی با نسبت دو نیروی آیرودینامیکی و کشش سطحی بدست می‌آید که در نهایت عدد بی بعد وبر را بوجود می‌آورند. این عدد در حقیقت نسبت نیروهای آیرودینامیکی به نیروی کشش سطحی[2] را بیان می کند. لذا عدد وبر بزرگ نشان می‌دهد که فشار خارجی در مقایسه با نیروی کشش سطحی، بزرگتر است.

زیرمدل ریلی تیلورRT که بر اساس شتاب عمود بر سطح قطره (ب.۱) عمل می‌کند، به صورتی کاملاً متفاوت از زیر مدلKH پدیده شکست را پیش بینی می‌کند. همچنان که دیده می‌شود، با رشد امواج RT بر روی قطره والد، برخلاف زیر مدل KH که در آن قطرات کوچکتر به صورت تدریجی از قطره والد جدا می‌شوند، شکست قطره والد به صورت ناگهانی بوده و مطابق شکل، قطره والد به قطرات کوچکتر شکسته خواهد شد.

۲-۲-۲ مدل CAB

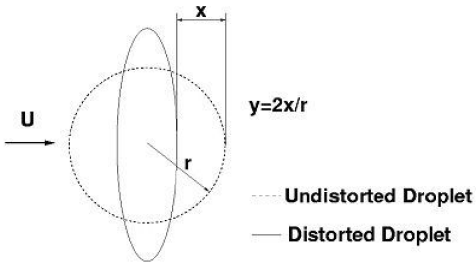
مدل CAB در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است [۱۱] و نسبت به مدل KHRT که در سال ۱۹۹۷ ارائه گردیده، جدیدتر و ساده‌تر می‌باشد. به همین دلیل سعی شد تا این مدل به کد منبع باز اپن‌فوم اضافه شود. اساس این مدل، تشابه نوسانات قطره و

1-Ohnesorge number
2-Surface tension

سیستم جرم و فنر می‌باشد. هر سیستم جرم و فنر شامل سه نیرو می‌باشد. نیروی خارجی، نیروی دمپر و نیروی بازگردان. این سه نیرو در حرکت قطرات و تغییر شکل آنها، با نیروهای آیرودینامیکی، لزجی و کشش سطحی مشابهت داده شده‌اند. دامنه‌ی تغییر شکل و نوسانات قطره از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$y = \frac{2x}{r} \tag{۱۰}$$

x بیشترین دامنه تغییر شکل شعاعی یک قطره کروی شکل را نشان می‌دهد. شکل (۲) گویای این مقدار می‌باشد.



شکل (۲). شمایی از نوسانات قطره

با توجه به مطالب بیان شده معادله‌ی ارتعاشات قطره به صورت زیر خواهد بود:

$$\ddot{y} + \frac{5\mu_d}{\rho_d r^2}\dot{y} + \frac{8\sigma}{\rho_d r^3} y = \frac{2\rho_g \|v_r\|^2}{3\rho_d r^2} \tag{۱۱}$$

در رابطه فوق، v_r بیانگر سرعت نسبی بین قطره و گاز می‌باشد. برای تشخیص این که آیا زمان شکست ثانویه فرا رسیده است یا نه، عدد وبر گاز مبنا قرار می‌گیرد. هرگاه این عدد به مقدار بحرانی ۱۲ رسید، شکست ثانویه در این مدل آغاز می‌شود. فرکانس ارتعاشات قطره، ω، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega^2 = \frac{8\sigma}{\rho_d r^3} - \frac{25\mu_d^2}{4\rho_d^2 r^4} \tag{۱۲}$$

شعاع قطرات پس از شکست، r_{bu}، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{r_{bu}}{r} = e^{-k_{bu} t_{bu}} \tag{۱۳}$$

rدر رابطه فوق، شعاع قطره والد می‌باشد. t_{bu} نیز زمان مشخصه شکست می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{bu} = 5.5 * \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho_g}\frac{d_p}{v_p}} \tag{۱۴}$$

که در آن d_p و v_p قطر و سرعت قطره والد می‌باشد. k_{bu} ثابت شکست است و با توجه به عدد وبر گاز، مقداری متفاوت خواهد داشت. رابطه (۱۵) مقادیر این ثابت را نشان می‌دهد.

$$K_{bu} = \begin{cases} k_1\omega & if \quad We_{crit} < We \le We_{b,s} \\ k_2\omega\sqrt{We} & if \quad We_{b,s} < We \le We_{s,c} \\ k_3\omega We^{3/4} & if \quad We_{s,c} < We \end{cases} \tag{۱۵}$$

جدول (۱) ثابت‌های این مدل را نشان می‌دهد.

جدول (۱). ثوابت مدل CAB

k_1	k_2	k_3	We_{crit}	$We_{b,s}$	$We_{s,c}$
0.05	0.04809	0.01112	12	80	350

۳-۲-۲ مدل درگ

برای مدل کردن نیروی درگ اعمال شده به قطره، اکثر کدهای عددی موجود، قطره را به صورت کره درنظر می‌گیرند. اما در واقعیت قطره بین شکل کره و دیسک دائماً در نوسان می‌باشد. مدل درگ اسمل[1] [۱۲] که این نوسانات را در نظر می‌گیرد به صورت زیر است:

$$C_{d,droplet} = f\, C_{d,disc} + (1-f) C_{d,sphere} \quad (۱۶)$$

$$C_{d,sphere} = 0.36 + 5.48 Re_d^{-0.573} + \frac{24}{Re_d} \quad (۱۷)$$

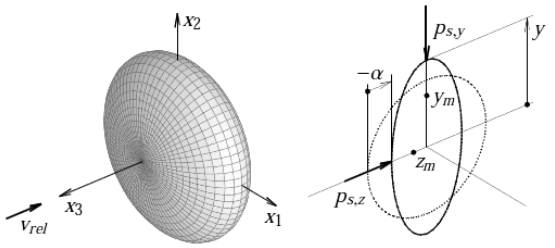
$$C_{d,disc} = 1.1 + \frac{64}{\pi\, Re_d} \quad (۱۸)$$

$$f = 1 - E^2 \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹)، E نسبت وضعیت[2] قطره است و با میزان تغییر شکل قطره، y، طبق زیر رابطه دارد:

$$E = \frac{1}{y^3} \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق، E=1 حالت کروی و E=0 حالت دیسکی را نشان می‌دهند. معیاری برای y در شکل زیر به نمایش گذاشته شده است.



شکل (۳). تغییر شکل قطره از کره به دیسک و معرفی معیار y

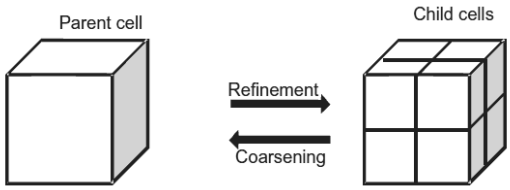
۳- پالایش شبکه‌بندی در هر گام زمانی

همان گونه که در مقدمه اشاره شد، رویکرد اویلری – لاگرانژی به شبکه‌بندی وابسته است. این وابستگی به مش، نقش مهمی در صحت شبیه‌سازی اسپری دارد، چرا که شبکه‌بندی درشت توانایی محاسبه‌ی دقیق تراکنش و تعامل بین قطرات و فاز گاز را ندارد. شبکه بندی درشت باعث می‌شود تا عمق نفوذ اسپری، در مقایسه با مقدار حقیقی، کمتر پیش‌بینی شود [۱۳]. شبکه‌بندی خیلی ریز نیز باعث می‌شود تا نفوذ مومنتوم از قطرات به گاز، به طور غیر واقعی و با سرعت زیادی انجام گیرد. نیجه این می‌شود که سرعت گاز زیاد شده و عمق نفوذ اسپری بیش از مقدار واقعی شود. با توجه به مطالب بیان شده، دست‌یابی به یک شبکه‌بندی با اندازه مناسب، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از روش‌های مرسوم برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب، پالایش شبکه در هر گام زمانی می‌باشد. در این روش، در ابتدا از یک شبکه‌بندی درشت استفاده شده و در نقاطی که تعامل بین قطرات و فاز گاز وجود دارد، با توجه به محدودیت‌هایی، شبکه موجود ریزتر می‌شود. پالایش شبکه‌های مکعبی در مقایسه

[1] Schmehl drag model
[2] Aspect ratio

با انواع دیگر شبکه، ساده‌تر است لذا در این پژوهش از شبکه‌بندی مکعبی استفاده شده است. ضمناً شبکه مکعبی نتایج بهتری در مقایسه با سایر انواع شبکه ارائه می‌دهد.

روش پالایش بدین گونه است که هرگاه شروطی که توسط کاربر تعریف شده در یک سلول به‌وجود آید، گره‌هایی در وسط هریک از اضلاع سلول والد تشکیل می‌شود و سلول والد به هشت سلول کوچک‌تر تبدیل می‌شود. یعنی در هر مرحله از پالایش، سلولی که شرایط پالایش را دارد به هشت سلول تبدیل می‌شود. اینکه هر سلول چندبار به سلول‌های کوچک‌تر بشکند، توسط کاربر تعیین می‌شود. شکل (۴) شمایی از پالایش یک مرحله‌ای شبکه را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل (۴) پالایش مش و تبدیل سلول والد به هشت سلول فرزند و برعکس آن

شرط اینکه یک سلول پالایش شود یا نه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y_{l+g} = \frac{m_{f,l} + \rho Y_{tf} V_{cell}}{\rho V_{cell}} \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق Y_{l+g} کسر جرمی کلی (مایع و بخار) سوخت در سلول، $m_{f,l}$ جرم مایع سوخت در سلول، Y_{tf} کسر جرمی بخار سوخت در سلول، ρ چگالی گاز محفظه و V_{cell} حجم سلول می‌باشد. حد پیشنهاد شده برای Y_{l+g} به منظور رسیدن به اندازه مناسب شبکه، $0.01 < Y_{l+g} < 1$ می‌باشد [۱۳]. اگر Y_{l+g} در سلولی به مقدار حدی ۰/۰۱ برسد، آن سلول پالایش می‌شود و اگر به مقدار حدی ۱ برسد، عمل عکس پالایش انجام می‌گیرد.

۴- نتایج.

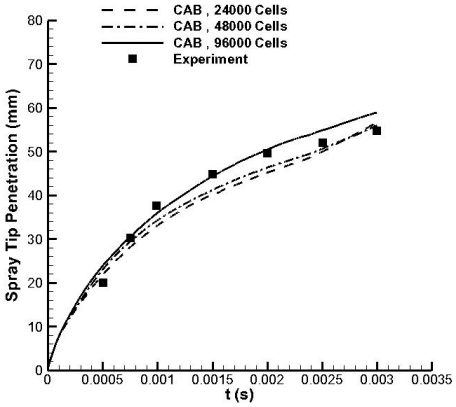
برای ارزیابی صحت کد عددی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط ویتا (Vita)[۱۴] مقایسه شده‌اند. پارامتر ارزیابی شده در این بخش، عمق نفوذ اسپری به ازاءپس‌فشارها و فشارهای تزریق مختلف می‌باشد. شرایط آزمایش در جدول (۲) نمایش داده شده است.

شبیه‌سازی پاشش سوخت از طریق افشانک چرخشی فشار بالا در حالت سه بعدی در داخل یک محفظه حجم ثابت مکعبی شکل به ابعاد ۸۰×۸۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام شده است. همان گونه که اشاره شد روش اویلری- لاگرانژی وابسته به شبکه‌بندی است. برای نشان دادن این میزان وابستگی، از سه شبکه‌بندی مختلف استفاده شده است. در نهایت برای برطرف کردن این عیب، از روش پالایش شبکه در هر گام زمانی استفاده شده است. خلاصه‌ای از مشخصات کد عددی در جدول (۳) ارائه شده است.

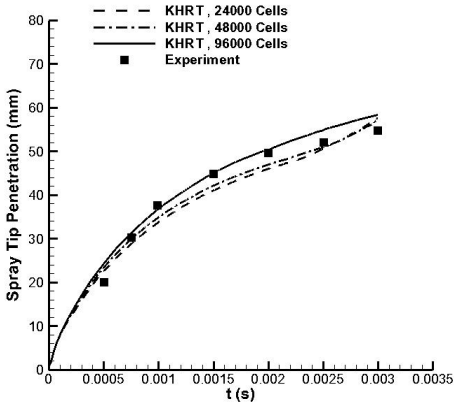
جدول (۲) مشخصات تست آزمایشگاهی[۱۸]	
فشار تزریق	7 and 9 MPa
مدت زمان تزریق	3 ms
جرم سوخت تزریقی	21.6 mg
قطر اوریفیس نازل	0.55 mm
زاویه مخروط افشانک	60°
پس فشار	0.1 and 1.2 MPa
سوخت	IC_8H_{18}

جدول (۳) خلاصه‌ای از مشخصات کد عددی	
ابعاد محفظه	80mm*100mm*80mm
شبکه بندی ۱	24000 cells
شبکه بندی ۲	48000 cells
شبکه بندی ۳	96000 cells
مدل شکست اولیه	*LISA*
مدل شکست ثانویه	*KHRT* , **CAB**
مدل درگ	*Standard drag model* , **Schmehl**

در ابتدا برای اینکه مبنایی جهت مقایسه مدل ارائه شده در این پژوهش وجود داشته باشد، از مدل‌های رایج و مرسوم که در کد اپن‌فوم وجود دارد استفاده شده و نهایتاً تغییرات لازم جهت بهبود سازی در کد انجام می‌شود. مدل‌های موجود در اپن-فوم در جدول فوق به صورت مورب و مدل‌های اضافه شده به صورت ضخیم نشان داده شده‌اند. شکل (۵) عمق نفوذ اسپری را به ازاء زمان نشان می¬دهد.



شکل ب

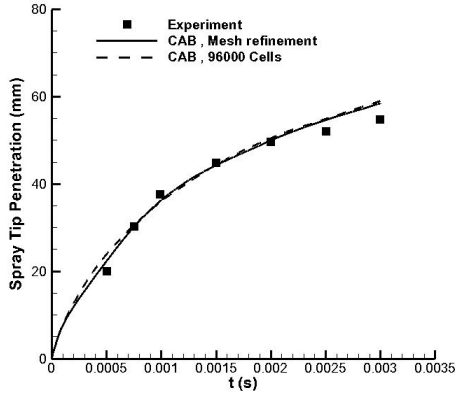


شکل الف

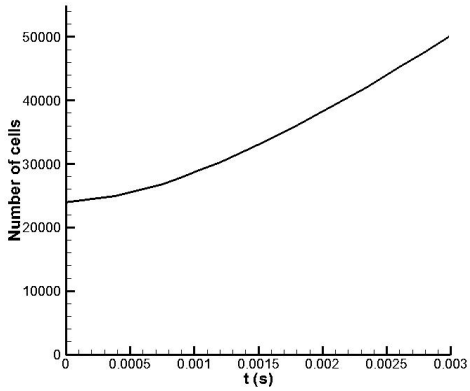
شکل (۵) عمق نفوذ اسپری و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ازاء فشار پاشش 7MPa، پس‌فشار 0.1MPa، $\Delta t = 1\mu s$

با توجه به شکل فوق، نتایج عددی همخوانی نسبتاً خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند ولی همان گونه که انتظار می-رفت، وابستگی به شبکه در نتایج دیده می‌شود اما این وابستگی خیلی شدید نیست. دو ویژگی اساسی در کدهای عددی مطرح است، سرعت حل و دقت نتایج. از اینرو سعی بر این است که هر یک از این دو ویژگی بهبود داده شوند. در گام اول بهبود سازی، مدل شکست ثانویه CAB که نسبت به مدل KHRT جدیدتر است در کد وارد شده است. شکل (ب.۵) نتایج حاصل از این مدل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (الف.۵) و (ب.۵) نتایج مدل‌های KHRT و CAB از نظر دقت، تفاوت چندانی باهم ندارند اما سرعت حل مسئله با مدل CAB حدود ۱۵٪ افزایش یافت و این دور از انتظار نبود چراکه معادلات این مدل در مقایسه با مدل KHRT ساده‌تر می‌باشند.

گام دوم در جهت بهبودسازی کد، پیاده‌سازی و اجرای پالایش شبکه در هر گام زمانی می‌باشد. برای اینکه نتایج رویکرد اویلری – لاگرانژی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شود باید از یک شبکه بندی با اندازه مناسب استفاده شود. نحوه دست‌یابی به این اندازه مناسب، در بخش قبلی شرح داده شد. همان طور که عنوان شد، برای استفاده از روش پالایش شبکه، در ابتدا از یک شبکه‌بندی نسبتاً درشت استفاده می‌شود. بدین منظور، تعداد سلول‌ها در شروع، ۲۴۰۰۰ سلول تعریف شده‌است و سپس در هر گام زمانی این تعداد با توجه به شرایط تعریف شده، افزایش می‌یابد، شکل (الف.۶) نتایج حاصل از پالایش شبکه و مقایسه آن با شبکه‌بندی ۹۶۰۰۰ سلولی و شکل (ب.۶) روند افزایش سلول‌ها نسبت به زمان را نشان می‌دهد.



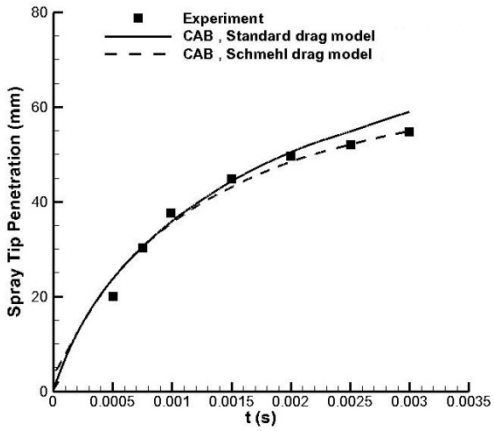
شکل (الف.۶) عمق نفوذ اسپری و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای پالایش شبکه و بدون پالایش شبکه به ازاء فشار پاشش 7MPa، پس‌فشار 0.1MPa، $\Delta t = 1\mu s$



شکل (ب.۶) روند افزایش سلول‌ها نسبت به زمان در روش پالایش شبکه

با توجه به شکل فوق، با پیاده سازی پالایش شبکه، نتایج در نقاط ابتدایی اندکی بهبود یافت. اثر اصلی این کار در سرعت حل مسئله است که تا حدود ۳۵٪ افزایش را موجب می‌شود. با توجه به شکل (ب.۶) تعداد نهایی سلول‌ها در انتهای حل، حدود ۵۰۰۰۰ می‌باشد که در مقایسه با ۹۶۰۰۰ سلول، حدود ۹۲٪ کاهش یافته است، اما هم دقت نتایج تاحدودی بهبود، و هم سرعت حل به میزان چشم‌گیری افزایش یافته است. افزایش ۳۵ درصدی سرعت، در شبیه‌سازی‌های سه بعدی اسپری که برخی اوقات ۳ الی ۴ روز به طول می‌انجامد، پیشرفت بزرگی محسوب می‌شود.

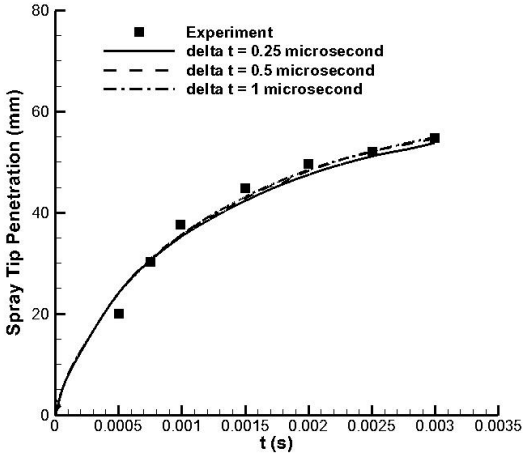
با توجه به شکل (الف.۶) در بازه‌های زمانی انتهایی، مقداری خطا دیده می‌شود که نیاز به بهبود دارد. مدل درگی که تاکنون استفاده می‌شد، مدل درگ موجود در اپن فوم بود که البته مدلی رایج در شبیه‌سازی اسپری می‌باشد و در پژوهش‌های زیادی از آن استفاده شده است، این مدل قطرات را به صورت کروی فرض می‌نماید. در سومین گام بهبود سازی کد، مدل درگ اسمل پیاده‌سازی و همراه با پالایش شبکه اجرا شد. همان گونه که اشاره شد، این مدل ضریب درگ را با توجه به نوسان قطره بین دو حالت کروی و دیسکی محاسبه می‌کند. شکل (۷) نتایج حاصل از این بهبودسازی را نشان می‌دهد.



شکل (۷) مقایسه دو مدل Standard drag و Schmehl drag با نتایج آزمایشگاهی به ازاء فشار پاشش 7MPa، پس‌فشار 0.1MPa و $\Delta t = 1\mu s$

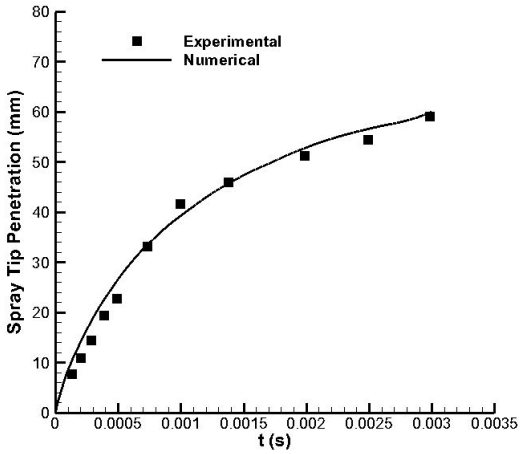
با توجه به شکل (۷) اگر تأثیر دیسکی شدن شکل قطرات را در نظر بگیریم، نتایج کد عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر می‌شود و چون ضریب درگ دیسک از کره بیشتر است لذا عمق نفوذ اسپری با در نظر گرفتن شکل دیسکی قطرات، کاهش می‌یابد.

در آخرین مرحله از مراحل ارزیابی و اعتبارسنجی، بررسی وابستگی نتایج کد به گام زمانی انجام می‌گیرد که نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به این شکل، کد عددی هیچ وابستگی به گام زمانی ندارد چرا که گام زمانی از کوچکترین زمان مشخصه مسئله، کوچکتر انتخاب شده است.



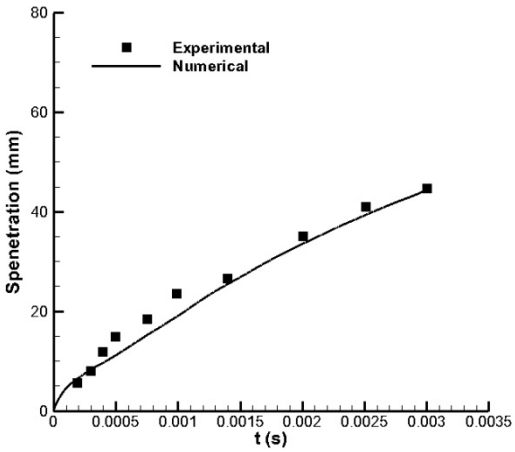
شکل (۸) عمق نفوذ اسپری و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ازاء فشار پاشش 7MPa، پس‌فشار 0.1MPa و گام‌های زمانی مختلف

در این قسمت، کد عددی در فشار پاشش و فشار محفظه متفاوتی اجرا و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. هدف از انجام این کار، بررسی جامعیت کد عددی در شرایط مختلف می‌باشد. در گام اول، فشار پاشش را از ۷مگاپاسکال به ۹مگاپاسکال تغییر داده و نتیجه برای عمق نفوذ اسپری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مابقی شرایط بدون تغییر باقی مانده است. سپس فشار محفظه (پس‌فشار) را از ۰/۱مگاپاسکال به ۱/۲ مگاپاسکال تغییر داده و اعتبار کد در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد سنجش قرار می‌گیرد. شکل (۹) نتیجه این تغییرات را نشان می‌دهد.



شکل الف

شکل (الف.۹) عمق نفوذ اسپری و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ازاء فشار پاشش 9MPa و پس‌فشار 0.1Mpa

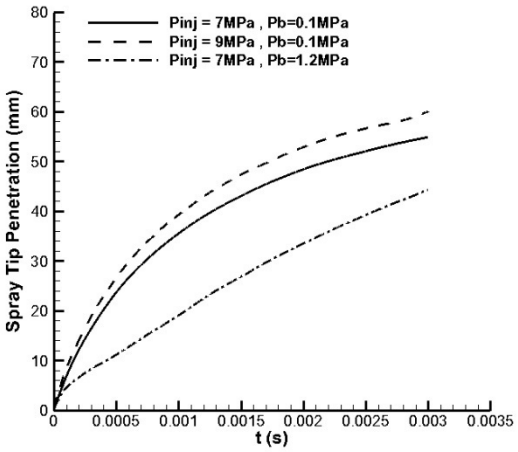


شکل ب

شکل (ب.۹) عمق نفوذ اسپری و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به ازاء فشار پاشش 7MPa و پس‌فشار 1.2MPa

همان طور که از شکل (۹) پیداست، با افزایش فشار پاشش و فشار محفظه، کد عددی اعتبار خود را از دست نداده و نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است.

اکنون، تأثیر تغییرات در فشار پاشش و فشار محفظه بر عمق نفوذ اسپری، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) تغییر در عمق نفوذ اسپری را به ازاء فشار پاشش و فشار محفظه متفاوت، نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) تغییر در عمق نفوذ اسپری به ازاء تغییر در شرایط پاشش

با توجه به شکل فوق با افزایش حدود ۲۸٪ در فشار پاشش، حدود ۹٪ به عمق نفوذ اسپری در لحظات انتهایی افزوده شد. همچنین با افزایش ۱۱۰۰٪ در پس‌فشار، حدود ۱۹٪ عمق نفوذ اسپری در لحظات انتهایی کاهش یافته است. اگر تغییرات متغیر وابسته در اثر تغییر یک درصدی متغیر مستقل، میزان حساسیت متغیر وابسته به مستقل نام‌گذاری شود، میزان حساسیت عمق نفوذ اسپری به افزایش فشار پاشش حدود ۰/۳۲درصد، و برای افزایش پس‌فشار حدود ۰/۰۲- درصد خواهد بود.

۵- جمع‌بندی

از ویژگی‌های مهم کدهای عددی، سرعت و دقت آنها می‌باشد. اگر هریک از این دو ویژگی بهبود داده شوند، کد ایده‌آل‌تری حاصل می‌شود. هدف از این پژوهش، بهبود دادن کد منبع باز اپن‌فوم و معرفی یک مدل مناسب‌تر بوده است.

- در گام اول بهبودسازی کد، مدل شکست ثانویه CAB که نسبت به مدلKHRT (مدل موجود در اپن‌فوم) جدیدتر است، در کد پیاده‌سازی و اجرا شد. با این کار، در دقت نتایج تفاوتی حاصل نشد اما سرعت حل مسئله حدودا ۱۵٪ افزایش یافت. به همین خاطر توصیه می‌شود در مدل‌سازی، برای شکست ثانویه قطرات از این مدل استفاده شود.

- به جهت از بین بردن حساسیت به مش رویکرد اویلری – لاگرانژی، روش پالایش شبکه در هر گام زمانی، پیاده‌سازی و اجرا شد. با این بهبودسازی، دقت نتایج نسبت به شبکه‌بندی ریز اندکی بهتر شد اما حدود ۳۵٪ به سرعت حل افزوده گردید. این افزایش سرعت، با توجه به این که معمولاً حل سه بعدی برای شبیه‌سازی اسپری استفاده می‌شود و زمان حل این مدل‌سازی‌ها طولانی هستند، بسیار سودمند خواهد بود.

- یکی از عوامل مؤثر در پیش‌بینی درست عمق نفوذ اسپری، محاسبه‌ی درست نیروی درگ وارد شده به قطرات می‌باشد. همان طور که بیان شد، به دلیل وجود نیروهای کشش سطحی و درگ، قطره دائماً بین حالت کروی و دیسکی نوسان دارد. در نظر گرفتن این نوسانات، در پیش‌بینی درست عمق نفوذ اسپری حائز اهمیت است. بدین منظور، مدل درگ اسمل که این تغییر شکل‌ها را لحاظ می‌کند در کد پیاده‌سازی گردید. با این بهبودسازی، عمق نفوذ اسپری در لحظات انتهایی پاشش به

نتایج آزمایشگاهی خیلی نزدیک شده و در نتیجه دقت کد افزایش یافته است. نکته مهم و جالب این که چون مبناهـای نظـری مدل‌های CAB و درگ اسمل شبیه هم است لذا ترکیب مناسبی در پیش‌بینی درست نتایج به وجود آورده است.

- جامعیت کد عددی نیز با توجه به تغییر در فشار پاشش و پس‌فشار، به وسیله نتایج آزمایشگاهی، مورد تأیید قرار گرفت. لذا ترکیب مدل‌های LISA ، CAB و درگ دینامیکی اسمل با روش پالایش شبکه، مدلی دقیق، سریع و جامع در شبیه‌سازی سه بعدی اسپری پاشش شده از افشانک چرخشی می‌باشد.

- به عنوان یک نتیجه کاربردی در طراحی اسپری، مشخص گردید که عمق نفوذ اسپری به فشار پاشش حساسیت بیشتری در مقایسه با فشار محفظه دارد.

مراجع

1- Balaji, M., Wenming, Y., Wenbin, Y., Kun, L.T., and Siaw, K.C., "*Numerical investigation on the effects of injection rate shaping on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled CI engine*", Applied Energy, Vol 160, pp. 737–745, 2015.
2- Shengli, W., Kunpeng, J., Xianyin, L., Feihu, W., and Xin, L., "*Numerical simulation on effects of spray angle in a swirl chamber combustion system of DI (direct injection) diesel engines*", Energy, Vol 75, pp. 289-294, 2014
3- Xiang,W., Zhiqiang, H., and Wanhua,S., "*A umerical study of th effects of pressure fluctuations inside injection nozzle on high-pressure and evaporating diesel spray characteristics*", Applied Mathematical Modeling, Vol 000, pp. 1–12, 2015
4- Elbadawy, I., Gaskell, P.,H., Malcolm, L., and Harvey, M., T., "*Numerical investigation of the effect of ambient turbulence on pressure swirl spray characteristics*", International Journal of Multiphase Flow, Vol 77, pp. 271–284, 2015.
5- Garg, R., Narayanan, C., Subramaniam, S., "*A numerically convergent Lagrangian-Eulerian simulation method for dispersed two-phase flows*", International Journal of Multiphase Flow, Vol 35, pp. 376-388, 2009
6- Lucchini, T., D'Errico, G., Ettorre, D., "*Numerical investigation of the spray-mesh-turbulence interactions for high-pressure, evaporating sprays at engine conditions*", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol 32, pp. 285-297, 2011
7- Karrholm, F.P., "*Numerical Modelling of Diesel Spray Injection, Turbulence Interaction and Combustion*", PH.D dissertation, university of Chalmers University, 2008
8- Schmidt, D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, C.J., Martin, J.K., Reitz, R.D., "*Pressure-swirl atomization in the near field*", SAE Technical Paper, 1999-01-0496, 1999
9- Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D., Corradini, M.L., "*Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization*", International Journal of Multiphase Flow, Vol 25, pp.1073-1097, 1999
10- Tanner, F.X., "*Liquid jet atomization and droplet breakup modeling of non-evaporating diesel fuel sprays*", SAE Technical Paper Series, 970050, 1997
11- Tanner, F.X., "*Development and validation of a cascade atomization and drop breakup model for high-velocity dense sprays*", Atomization and Sprays, Vol 14, pp.211-242, 2004
12- Schmehl, R., "*Advanced modeling of droplet deformation and breakup for CFD analysis of mixture preparation*", 18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS-Europe), Zaragoza, September 2002.
13- Lucchini, T., D'Errico, G., Ettorre, D., "*Numerical investigation of the spray–mesh–turbulence interactions for high-pressure, evaporating sprays at engine conditions*", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 32,pp. 285–297, 2011
14- Vita A.D., Allocca L., "*Experimental Analysis and CFD Simulation of GDI Sprays*", SAE paper, 2003-01-0004, 2003