

## مقایسه‌ی اسپری سرد دیزل خالص و مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل با استفاده از شبیه‌سازی عددی

محسن دوازده‌امامی<sup>\*</sup>، سعید خردمند<sup>\*\*۱</sup> و مسعود حکیم‌داوود<sup>\*\*\*۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- شرکت نفت سپاهان

(دریافت: ۱۳۸۶/۹/۴، پذیرش: ۱۳۸۷/۷/۲۰)

در کار حاضر شبیه‌سازی اسپری سرد دیزل و مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل با استفاده از نرم افزار این فوم (OpenFoam) انجام و رفتار دو سوخت مطالعه و مقایسه شده است. این اسپری به داخل یک محفظه‌ی حجم ثابت که درون آن با هوای در ابتدا ساکن و پر فشار پر شده، تزریق می‌شود. برای مدلسازی از یک روش اویلری-لاگرانژی به همراه شکل اصلاح شده معادلات  $k - \epsilon$  استفاده شده است. شبیه‌سازی اسپری در کار حاضر شامل مدل‌های مختلف: اتمیزه‌شدن، شکست (متلاشی شدن) قطرات، نیروی پسا و نیروی ثقل است. به منظور تعیین دقت شبیه‌سازی، ابتدا چهار اسپری شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی و عددی موجود مقایسه شده است. سپس مقایسه‌ی دو اسپری سرد دیزل و مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل مورد توجه قرار گرفته است. خواص مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی اسپری‌های فوق به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. کشش سطحی با استفاده از یک سلول کشش سطحی و ویسکوزیته با استفاده از یک ویسکومتر سی‌بولت (ASTM D445) اندازه‌گیری شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها برای دو سوخت در دو فشار محفظه‌ی ۱۰ و ۵۰ بار انجام شده است. عمق نفوذ نوک اسپری، شکل اسپری، SMD و توزیع اندازه‌ی قطرات دو اسپری گزارش و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که SMD مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل کوچکتر از دیزل خالص است، که مزیتی برای این امولسیون است. نتایج همچنین نشان داده که علی‌رغم وجود تفاوت زیاد در خواص دو سوخت، ساختار کلی دو اسپری تا حدود زیادی مشابه بوده و می‌توان مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل را در موتور دیزل بدون نیاز به تغییر در انژکتور به کار گرفت.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی اسپری سرد، سوخت دیزل، مخلوط دیزل - ایزوپروپیل الکل، شکست قطرات

### علائم اختصاری

$C_D$	ضریب پسا	$u$	سرعت گاز (m/s)
$D$	قطر قطره (m)	$u_d$	سرعت قطره (m/s)
$F$	نیروی اعمالی بر قطره (N)	$We$	عدد وبر (Weber)
$g$	شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )	$\rho$	چگالی گاز ( $kg/m^3$ )

\* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: mohsen@cc.iut.ac.ir)

\*\* دانشجوی دکتری (ایمیل: p8030568@sepahan.iut.ac.ir)

\*\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: hakimdavood@sepahanoil.com)

$k$	انرژی جنبشی مغشوش (J/kg)	$\rho_d$	چگالی قطره ( $kg / m^3$ )
$m_d$	جرم قطره (kg)	$\mu$	ویسکوزیته موثر گاز (Pa.s)
$Oh$	عدد اهنزرج (Ohnesorge)	$\sigma$	کشش سطحی (N/m)
$p$	فشار (kPa)	$\Omega$	فرکانس سریع‌ترین موج رشدکننده روی قطره‌های والد (1/s)
$Re_d$	عدد رینولدز قطره	$A$	طول موج سریع‌ترین موج رشدکننده روی قطره‌های والد (m)

## مقدمه

شناسایی و تخمین صحیح ساختار اسپری سوخت حائز اهمیت کاربردی زیادی است. برای مثال در یک موتور دیزل که اسپری سوخت به داخل یک محفظه محتوی هوا با فشار بالا تزریق می‌شود، شکل اسپری و طریقه نفوذ آن می‌تواند کارایی موتور و تولید آلاینده‌ها را متاثر کند. به دلیل اینکه تولید آلاینده‌ها و کارایی موتور دیزل در رابطه‌ی تنگاتنگ با فرایندهای مربوط به اسپری سوخت است، توجه به درک ساختار اسپری از اهمیت زیادی برخوردار است. تحقیقات زیادی در زمینه ساختار اسپری دیزل [۱] و پدیده‌های موثر در اسپری دیزل پرسرعت [۲]، به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. از سوی دیگر در دهه‌های اخیر و با گسترش توانایی کدهای دینامیک سیالات محاسباتی در کنار افزایش سرعت محاسبات رایانه‌ای، امکان شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده‌ای چون اسپری تا حدودی فراهم شده است [۳ و ۴]. لازم به توضیح است دقت محاسبات عددی در زمینه اسپری به دقت مدلسازی اسپری بستگی دارد و تلاش محققان برای بهبود دقت این شبیه‌سازی‌های عددی ادامه دارد.

شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته در زمینه اسپری را می‌توان به دو دسته‌ی اساسی تقسیم بندی کرد: اسپری به داخل یک محیط کم فشار واسپری به داخل یک محیط پرفشار. در مورد اول، مدل‌های زیادی در دسترس است [۵] و نتایج تجربی معمولاً مناسبی نیز وجود دارد [۶ و ۷]. اما در مورد مطالعه‌ی اسپری به داخل یک محیط پرفشار مانند آنچه در سیستم تزریق یک موتور دیزل اتفاق می‌افتد چالش‌های زیادی وجود دارد [۸].

یکی از روش‌های رایج مطالعه‌ی اسپری، مطالعه‌ی اسپری در حالت سرد و غیر تبخیری است [۹ و ۱۰]. در این شرایط تمرکز مدلسازی بر تمیزه شدن، متلاشی شدن و نیروهای موثر بر قطرات است. در واقع حتی با ساده‌سازی مسئله به حالت سرد، هنوز مشکلات زیادی در شبیه‌سازی وجود دارد که می‌توان به مشکلات مدل‌ها در فشارهای بالا اشاره کرد.

تمرکز کار حاضر بر مطالعه‌ی اسپری سرد سوخت دیزل خالص و مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل است. ایزوپروپیل الکل حاوی مقداری اکسیژن است. استفاده از ترکیبات اکسیژنه به عنوان سوخت دیزل، ساخت سوخت‌های ترکیبی یا به عنوان افزودنی به سوخت دیزل مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این سوخت‌های اکسیژنه برای کاهش دوده و اکسید نیتروژن می‌توانند مفید باشند [۱۱]. انواع مختلفی از این سوخت‌ها برای استفاده در موتورهای دیزل موجود است. عملکرد این سوخت‌ها در موتورهای دیزل مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. اکسیژن موجود در ترکیبات اکسیژنه باعث اکسید شدن کربن و کم شدن تشکیل دوده می‌شود. از جهت دیگر این ترکیبات معمولاً ارزش گرمایی کمتری نسبت به دیزل خالص دارند و باعث کاهش دمای شعله و کاهش تولید اکسید نیتروژن گرمایی می‌شوند. به علت حل نشدن این ترکیبات اکسیژنه در دیزل، این سوخت‌ها به طور عمده به شکل امولسیون‌اند که حاوی دیزل، یک یا چند ترکیب اکسیژنه و امولسیفایرند. این امولسیفایرها ترکیبات گران‌قیمتی هستند و اگرچه به میزان کمی (معمولاً زیر ۵ درصد حجمی) به سوخت اضافه می‌شوند در خلال فرایند احتراق، خود منشا تولید آلاینده‌هایند.

وجود مشکلات مذکور ایده اصلی استفاده از ایزوپروپیل الکل به عنوان اکسیژنه است. ایزوپروپیل الکل قابلیت حل شدن در دیزل را دارد و برای به دست آوردن محلول پایدار نیازی به استفاده از امولسیفایرها نیست [۱۳]. کار حاضر قسمتی از امکان‌سنجی استفاده از مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل به عنوان سوخت دیزل است.

در واقع هدف پاسخ به این سوال است: آیا امکان استفاده از سوخت مخلوط دیزل- ایزوپروپیل الکل به عنوان سوخت دیزل در موتورها وجود دارد؟ برای پاسخ به این سوال اندازه‌گیری خواص سوخت و مقایسه آن با محدوده‌های مجاز مشخص شده توسط استانداردها و شبیه‌سازی اسپری سرد لازم است.

در این مقاله ابتدا معادلات حاکم برای شبیه‌سازی اسپری سرد ارائه شده سپس به منظور تعیین دقت شبیه‌سازی، چهار اسپری مختلف با استفاده از نرم‌افزار این فوم شبیه‌سازی و نتایج با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود [۱۴] مقایسه شده است. در ادامه و به منظور مقایسه رفتار سوخت ترکیبی با سوخت دیزل خالص، خواص اندازه‌گیری شده‌ی سوخت دیزل خالص و ترکیب دیزل- ایزوپروپیل الکل با درصدهای مختلف ارائه شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای سوخت‌ها ارائه شده و در انتها نتیجه‌گیری کلی آورده شده است.

### معادلات حاکم

در این قسمت معادلات در حالت دوبعدی برای جریان گاز حاوی قطرات مایع ارائه می‌شود [۱۴]. معادلات حاکم از روش اویلری لاگرانژی فرمول‌بندی شده‌اند. در این روش، گاز درون محفظه احتراق در مختصات اویلری و قطرات سوخت در مختصات لاگرانژی در نظر گرفته شده است. اثر وجود قطرات سوخت به صورت عبارات چشمه در معادلات اویلری (جرم و مومنتوم) مدلسازی شده‌اند.

### معادلات فاز گاز

به علت سرعت بالای سوخت تزریقی در محفظه، جریان سیال درون محفظه مغشوش است [۱۵]. معادلات پیوستگی و مومنتوم متوسط‌گیری شده فاز گاز را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{C_p}{Q} + C \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + C \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -Cp + C \cdot (2\mu \mathbf{S}) + \mathbf{F}^S + \rho \mathbf{g} - \frac{2}{3}C(\rho k) \quad (2)$$

که  $\rho$  و  $\mu$  چگالی و ویسکوزیته موثر گاز داخل محفظه،  $p$  فشار گاز،  $\mathbf{u}$  سرعت گاز،  $\mathbf{S}$  قسمت متقارن تانسور گرادیان سرعت،  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $\mathbf{F}^S$  نرخ تولید یا مصرف مومنتوم به واسطه‌ی حضور اسپری و  $\mathbf{g}$  نیروی حجمی مخصوص است. برای مدلسازی اغتشاش از شکل اصلاح شده‌ی معادله  $k - \varepsilon$  به شکل زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} + \bar{\sigma} : \nabla \mathbf{u} + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + W^S \quad (3)$$

و

$$\frac{\alpha \rho \varepsilon}{Q} + C \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon C \cdot \mathbf{u} + C \cdot \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \quad (4)$$

$$\frac{\varepsilon}{k} \left[ C_{\varepsilon 1} \sigma : \nabla \mathbf{u} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_S W^S \right]$$

در این معادله  $W^S$  عبارت چشمه در معادله انرژی جنبشی اغتشاشی در اثر حضور قطرات بوده،  $Pr_k$  عدد پرانتل متلاطم،  $\varepsilon$  نرخ استهلاك انرژی جنبشی اغتشاشی،  $Pr_\varepsilon$  عدد پرانتل نرخ استهلاك انرژی جنبشی اغتشاشی و ثابت‌های مدل در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- ثابت‌های مدل  $k - \varepsilon$

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$Pr_k$	$Pr_\varepsilon$	$C_s$
0.09	1.44	1.92	-1.0	1.	1.3	1.5

مقدار ویسکوزیته موثر در معادلات فوق از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\mu = \mu_{molecular} + C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$\mu_{molecular}$  ویسکوزیته ملکولی است.

### معادلات فاز مایع

معادله مومنوم برای قطرات (شکل ساده قانون دوم نیوتن) در نگرش لاگرانژی به شکل زیر است [۱۵]:

$$m_d \frac{d\mathbf{u}_d}{dt} = \mathbf{F} \quad (6)$$

$m_d$  جرم قطره،  $\mathbf{u}_d$  سرعت قطره و  $\mathbf{F}$  برآیند نیروهای عمل کننده بر قطره‌اند. در حالتی که نسبت چگالی دو فاز  $10^2$  یا بیشتر باشد، نیروهای جرم اضافه شده، بست<sup>۱</sup>، مگنوس<sup>۲</sup>، سافمن<sup>۳</sup>، فشار و نیروهای شناوری قابل اغماض‌اند. با این شرایط، تنها نیروهای پسا و ثقل مورد توجه خواهند بود و برآیند نیروهای اعمالی را می‌توان چنین نوشت:

$$\mathbf{F} = \frac{\pi D^2}{8} \rho C_D |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| (\mathbf{u}_d - \mathbf{u}) + m_d \mathbf{g} \quad (7)$$

که  $C_D$  ضریب پسا است. از معادلات متعددی که برای ضریب پسا ارائه شده‌اند [۱۶]، معادله زیر در کار حاضر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6} Re_d \left(\frac{2}{3}\right)\right) & Re < 1000 \\ 0.424 & Re > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

که در آن عدد  $Re_d$  چنین تعریف شده است:

$$Re_d = \frac{\rho |\mathbf{u}_d - \mathbf{u}| D}{\mu} \quad (9)$$

از آنجا که هدف اصلی ایده لاگرانژی این است که شبکه محاسباتی در حد نازل تزریق سوخت ریز نشود، شرایط اولیه برای قطرات اسپری باید مشخص شود. این کار را می‌توان به دو روش انجام داد: اول استفاده از یک مدل اتمیزه‌شدن و دوم مشخص کردن اندازه قطرات و زاویه اولیه برای قطرات اسپری. لازم به ذکر است هر دو مدل فوق برای کارکرد بهینه، نیازمند تنظیمات‌اند. به لحاظ سادگی، سرعت در انجام محاسبات و سهولت به کارگیری در محاسبات، در کار حاضر از روش دوم استفاده شده است.

<sup>1</sup> Basset  
<sup>2</sup> Magnus  
<sup>3</sup> Saffman

عدد وبر<sup>۱</sup> گاز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$We = \frac{\rho |\mathbf{u} - \mathbf{u}_d|^2 r}{\sigma} \quad (10)$$

در صورتی که عدد وبر زیاد باشد که البته در موتورهای دیزل چنین است [۱۵]، قطرات تغییر شکل داده و نهایتاً متلاشی<sup>۲</sup> می‌شوند. برای این پدیده مدل‌هایی پیشنهاد شده است [۱۶]. در کار حاضر از مدل کلونین-هلمهولتز-ریلی-تیلور (KHRT) استفاده شده است.

مدل KHRT شامل دو زیرمدل است. در زیرمدل KH، فرض می‌شود که قطرات کوچک با اندازه  $r_c = B_0 \Lambda$  از قطرات بزرگتر (قطرات اولیه یا قطرات والد<sup>۳</sup>) جدا شوند و شعاع قطرات اولیه مطابق معادله زیر کاهش یابد:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r - r_c}{\tau_{kh}}, \quad \tau_{kh} = \frac{3.788 B_1 D}{\Omega \Lambda} \quad (11)$$

در این معادله  $B_0 = 0.61$ ,  $B_1 = 40$  ثابت‌های مدل هستند و:

$$\Omega = \frac{0.34 + 0.38 We^{1.5}}{(1 + Oh)(1 + T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_d r^3}} \quad (12)$$

$$\Lambda = 9.02 r \frac{(1 + 0.45 \sqrt{Oh})(1 + 0.4 T^{0.7})}{(1 + 0.865 We^{1.67})^{0.6}} \quad (13)$$

$\Lambda$  طول موج موجی است که سریع‌ترین نرخ رشد را دارد و  $\Omega$  فرکانس سریع‌ترین موج رشدکننده روی سطح قطره است. اندازه این طول موج در شکل (۱) نشان داده شده است. اعداد اهنزورج<sup>۴</sup> و تیلور به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T = Oh \sqrt{We} \quad Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (14)$$

$We_l$  عدد وبر مایع است که مطابق عدد  $We$  در معادله (۱۰) تعریف می‌شود، با این تفاوت که به جای دانسیته گاز باید دانسیته مایع را قرار داد. عدد رینولدز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Re_l = \frac{\rho_l |\mathbf{u} - \mathbf{u}_d| r}{\mu_l} \quad (15)$$

در زیرمدل RT که برای متلاشی شدن قطره است، طول موج  $\Lambda_f = \pi / K$  با اندازه قطره مقایسه می‌شود و اگر  $\Lambda_f < r$  باشد، فرض می‌شود که امواج رایلی-تیلور بر روی سطح قطره رشد می‌کنند. از این زمان مدت حضور قطره محاسبه می‌شود و وقتی زمان به اندازه زمان مشخصه رایلی-تیلور  $\tau_f = 1 / \Omega_f$  رسید، متلاشی شدن قطره اتفاق می‌افتد. پارامترهای  $K$  و  $\Omega_f$  از معادلات زیر قابل محاسبه‌اند:

$$K = \sqrt{\frac{|\mathbf{g}_t (\rho_l - \rho)|}{3\sigma}}, \quad \mathbf{g}_t = \left( \mathbf{g} + \frac{d\mathbf{u}_d}{dt} \right) \cdot \frac{\mathbf{u}_d}{|\mathbf{u}_d|} \quad (16)$$

<sup>1</sup> Weber

<sup>2</sup> Break-up

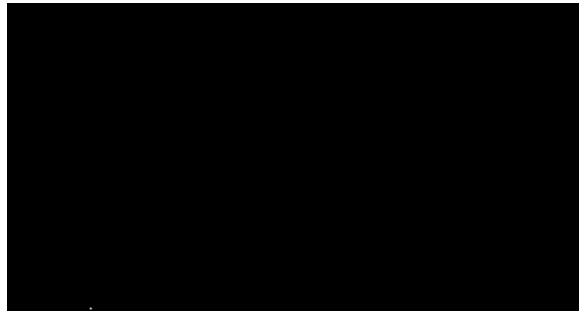
<sup>3</sup> Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor

<sup>4</sup> Parent

<sup>5</sup> Ohnesorge

$$\Omega_t = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{27\sigma}} \frac{|g_t(\rho_l - \rho)|^{3/2}}{\rho_l + \rho}} \quad (17)$$

در اثر متلاشی شدن قطره، قطرات ریزتر پدید می‌آیند. تعداد قطرات در این مدل چنان است که تعداد قطرات پس از متلاشی شدن به اندازه فاکتور  $r/\Lambda_f$  افزایش می‌یابد و اندازه قطرات چنان تنظیم می‌شود که بقای جرم ارضا شود.



شکل ۱-  $\Lambda$  طول موج موجی است که سریع‌ترین نرخ رشد را دارد

### نتایج

در قسمت اول نتایج، به منظور حصول اطمینان از دقت مناسب نرم‌افزار و دقت مدل‌های اسپری، شبیه‌سازی برای چهار اسپری سرد که به داخل یک محفظه‌ی حاوی هوا تزریق می‌شوند به کمک نرم‌افزار این‌فوم انجام شده است. برای این چهار اسپری نتایج تجربی و عددی وجود دارد که برای مقایسه به کار گرفته شده است [۱۴]. دمای سوخت اسپری شده و گاز محفظه یکسان و برابر دمای محیط است. در این شرایط تبخیر قابل توجهی اتفاق نخواهد افتاد. مشخصات کلی و مشترک برای چهار اسپری در جدول (۲) آورده شده است. مشخصات مربوط به هر یک از چهار اسپری در جدول (۳) نمایش داده شده است. این چهار اسپری برای بررسی اسپری در دو فشار محفظه و دو سرعت تزریق مختلف مطالعه شده‌اند.

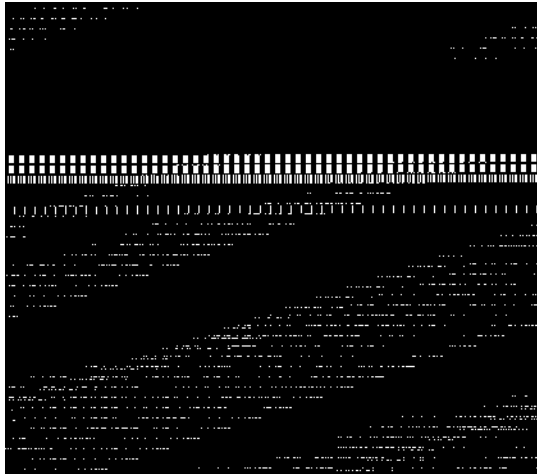
جدول ۲- مشخصات مشترک چهار اسپری مدل‌سازی شده

۰/۵۱۶	mm	قطر اریفیس
۲۹۵	K	دمای سوخت
۸۴۰	kg/m <sup>3</sup>	چگالی سوخت
۰/۰۰۰۰۰۰۳۵	m <sup>2</sup> /s	ویسکوزیته سوخت
۰/۰۲۸	N/m	کشش سطحی سوخت
۲۹۵	K	دمای گاز

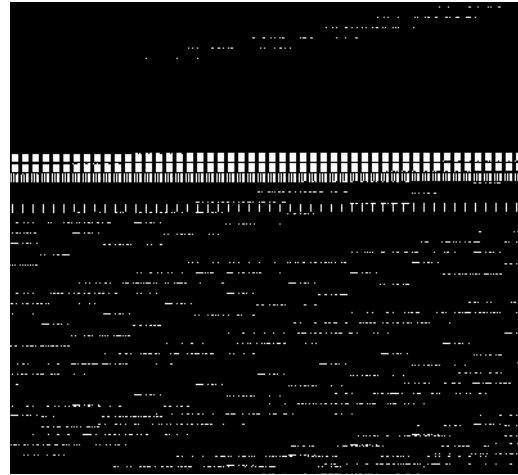
جدول ۳- مشخصات چهار اسپری مدل‌سازی شده

اسپری ۴	اسپری ۳	اسپری ۲	اسپری ۱	واحد	
۱۱	۱	۱۱	۱	*10 <sup>5</sup> pa	فشار گاز محفظه
۱/۴۸	۱۵/۶	۱/۴۸	۱۵/۶	*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	ویسکوزیته گاز
۱۲/۹	۱/۱۷	۱۲/۹	۱/۱۷	Kg/m <sup>3</sup>	چگالی گاز
۲۴/۷	۲۴/۷	۱۷/۷	۱۷/۷	*10 <sup>-6</sup> kg	جرم تزریق شده
۰/۹	۰/۹	۱/۰۵	۱/۰۵	*10 <sup>-3</sup> s	زمان تزریق

برای مطالعه‌ی تعداد سلول‌های مناسب برای این شبیه‌سازی، دو اسپری یک و دو با سه شبکه محاسباتی با تعداد سلول‌های مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج تعداد سلول ۱۲۰ در طول و ۸۰ سلول در راستای شعاعی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.



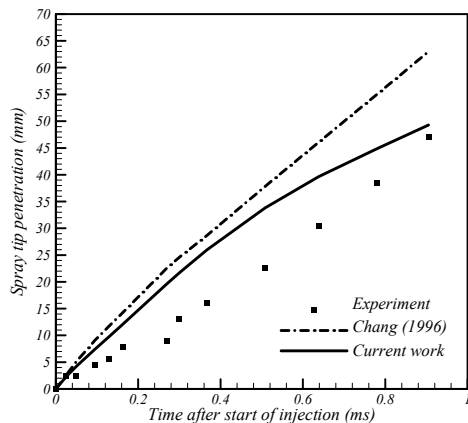
شکل ۳- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان  
(اسپری ۲)  
با تعداد سلول‌های مختلف



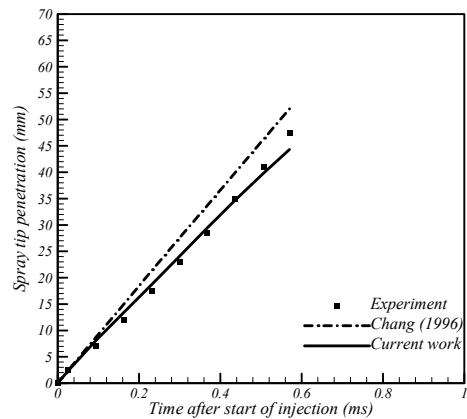
شکل ۲- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان  
(اسپری ۱)  
با تعداد سلول‌های مختلف

شکل‌های (۴) تا (۷) عمق نفوذ نوک اسپری برای چهار اسپری را نمایش می‌دهند. مربع‌های توپر نشان دهنده نتایج تجربی، خط چین‌ها نتایج عددی چانگ [۱۴] و خطوط پر نتایج کار حاضرند. مدل‌سازی استفاده شده در کد اپن‌فوم<sup>۱</sup> در پیش‌بینی روند عمق نفوذ موفق عمل کرده است. نتایج عددی کار حاضر برای هر چهار اسپری در مقایسه با نتایج عددی موجود، بهتر توانسته روند نفوذ اسپری را تخمین بزند. البته با دقت در شکل‌های (۴) تا (۷) مشخص است در زمان‌های بزرگتر نتایج عددی کار حاضر نسبت به حل عددی چانگ از برتری نسبی برخوردار است، حال آنکه در شروع تزریق، نتایج عددی بسیار نزدیک به یکدیگرند. این برتری نسبی را می‌توان به مدل متلاشی شدن قطره در کد اپن‌فوم در مقایسه با مدل استفاده شده چانگ مربوط دانست. اختلاف بین نتایج تجربی و عددی با گذشت زمان افزایش می‌یابد. این اختلاف ممکن است به علت ایجاد ساختارهای ناهمگن ناشی از اثر اغتشاشات در جریان گاز محفظه با گذشت زمان باشد. وجود ساختارهای ناهمگن مغشوش یک منبع خطا برای شبیه‌سازی حاضر است، زیرا همان‌طور که در قسمت معادلات تشریح شد از یک مدل ساده برای مدل‌سازی اغتشاش استفاده شده است که این مدل قادر به پیش‌بینی مناسب رفتار ساختارهای بزرگ مغشوش نیست. مطابق انتظار، عمق نفوذ با افزایش فشار کاهش می‌یابد (اسپری‌های دو و چهار). در توجیه این رفتار در مدل‌سازی می‌توان به افزایش چگالی و ویسکوزیته هوای محفظه در اثر افزایش فشار اشاره کرد که نهایتاً منجر به نیروی مقاوم بزرگتر اعمالی به قطرات می‌شود. از آنجاکه چگالی سوخت تزریقی برای چهار اسپری یکسان است، سرعت تزریق فقط متأثر از دبی سوخت تزریقی و زمان تزریق است. به هر حال دبی بیشتر و زمان کمتر به معنی سرعت اسپری بیشتر است. این سرعت بیشتر باعث نفوذ بیشتر خواهد شد، شکل‌های (۴) را با (۶) یا (۵) را با (۷) مقایسه کنید. در توجیه این نفوذ بیشتر با استفاده از مدل‌های به کار گرفته شده باید به اینرسی بیشتر اسپری‌های (۳) و (۴) به علت سرعت بالایشان اشاره کرد.

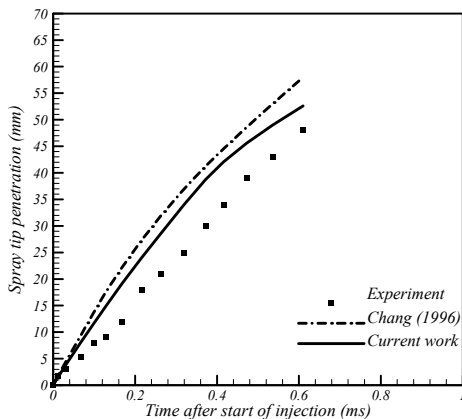
<sup>۱</sup> نرم افزار اپن‌فوم (OpenFoam) یک نرم افزار با امکان دسترسی به کد (Open Source) می‌باشد. این نرم‌افزار قابلیت‌های خوبی در انجام شبیه‌سازی طیف گسترده‌ای از مسائل محیط‌های پیوسته دارد. در مسائل مکانیک سیالات، با استفاده از یک روش حجم محدود مسائل را مورد تحلیل قرار می‌دهد. امکان استفاده از مدل‌های متنوع پدیده‌ها (توربولانس، احتراق، جریان‌های دوفازی) در این نرم‌افزار وجود دارد.



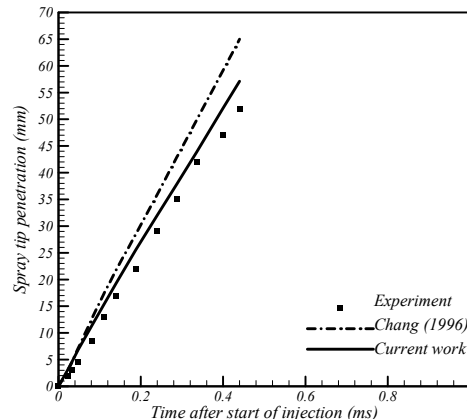
شکل ۵- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان (اسپری ۲)



شکل ۴- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان (اسپری ۱)



شکل ۷- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان (اسپری ۴)



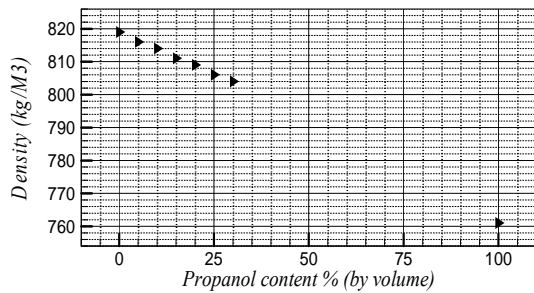
شکل ۶- عمق نفوذ نوک اسپری بر حسب زمان (اسپری ۳)

در قسمت دوم نتایج، شبیه‌سازی اسپری سرد غیر تبخیری برای مقایسه رفتار دو سوخت دیزل خالص و مخلوط دیزل- ایزوپروپیل الکل انجام شده است. برای انجام شبیه‌سازی اسپری سرد غیر تبخیری خواص سوخت‌ها شامل چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی مورد نیاز است. برای رسیدن به شرایط نزدیک به واقعیت، این خواص به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده‌اند. کشش سطحی با یک سلول کشش سطحی، ویسکوزیته با یک ویسکومتر سی‌بولت<sup>۱</sup> (ASTM D445) و چگالی با اندازه‌گیری دقیق جرم یک حجم بخصوص اندازه‌گیری شده‌اند. برای حصول اطمینان از صحت آزمایشات، کلیه آزمایش‌ها برای آزمون تکرار پذیری، سه مرتبه تکرار شده‌اند. ماکزیمم انحراف از متوسط برای اندازه‌گیری کشش سطحی یک و نیم درصد و در مورد چگالی و ویسکوزیته هر سه آزمایش نتایج یکسانی در پی داشته‌اند.

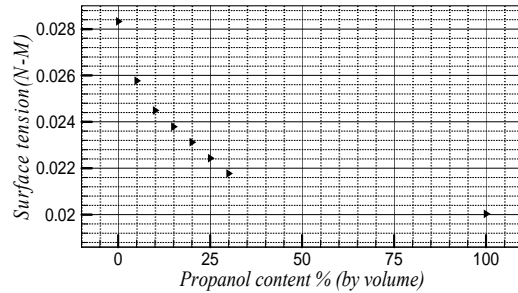
نتایج اندازه‌گیری خواص دیزل خالص و مخلوط دیزل- ایزوپروپیل الکل در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که اختلاف خواص قابل توجه است. برای مثال مخلوط دیزل- ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد دارای کشش سطحی ۱۵ درصد کمتر از دیزل خالص، ویسکوزیته ۲۶ درصد کمتر و چگالی ۵ درصد کمتر است. این اختلافات در خواص، منجر به اختلافات بزرگتر در پارامترهای بی‌بعد اثرگذاری چون اعداد رینولدز، وبر و اهنرج می‌شود. این اختلاف در اعداد بدون بعد برای تمام قطرات بدون توجه به اندازه قطره و سرعت آن وجود خواهد داشت. وجود این اختلافات در اندازه اعداد بدون بعدی که ساختار اسپری به آنها بستگی دارد، لزوم مطالعه‌ی اسپری را مشخص می‌سازد.

<sup>۱</sup> Saybolt

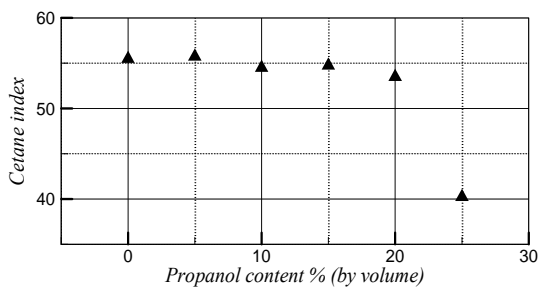




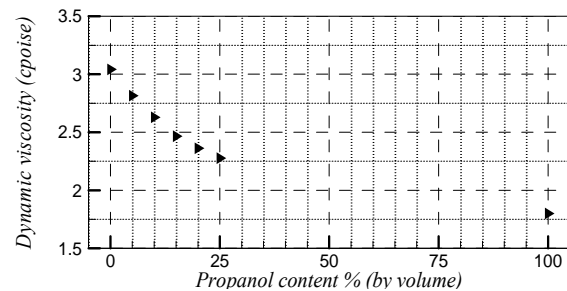
شکل ۹- چگالی برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل



شکل ۸- کشش سطحی برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل



شکل ۱۱- اندیس ستان برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل

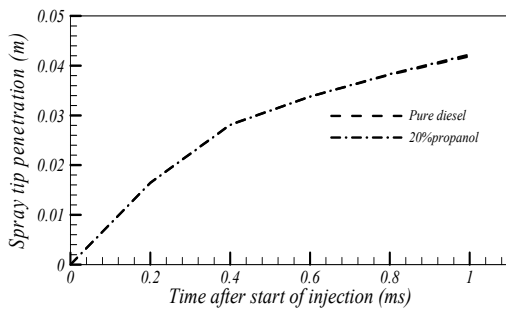


شکل ۱۰- ویسکوزیته دینامیکی برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل

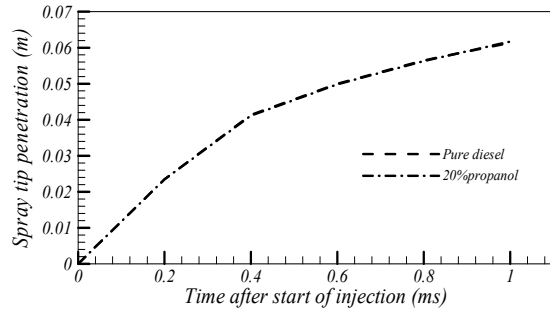
هدف این تحلیل عمدتاً مقایسه رفتار اسپری سرد دیزل خالص و مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل با توجه به وجود اختلاف در خواص مشاهده شده و امکان‌سنجی استفاده از مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل به عنوان سوخت است. برای تعیین نسبت (درصد حجمی) مناسب مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل مطالعه در جریان است، اما برای این قسمت تحقیق مقایسه به دو حالت دیزل خالص و مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد محدود شده است. علت اصلی این انتخاب این است که مشاهدات تجربی مولفان در به‌کارگیری مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل به عنوان سوخت حاکی از عدم کارایی مناسب موتور در مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل با بیش از ۲۰ درصد مخلوط ایزوپروپیل الکل است. برای تحقیق صحت مشاهده فوق، اندیس ستان دیزل خالص و مخلوط‌های مختلف دیزل-ایزوپروپیل الکل با درصدهای مختلف ایزوپروپیل الکل اندازه‌گیری شد که نتایج در شکل (۱۱) آورده شده است. نتایج مبین افت اندیس ستان در درصدهای بالاتر از ۲۰ درصد است که همین موضوع باعث بدسوزی در موتور می‌شود. دومین دلیل در انتخاب مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد به علت خواص است. با توجه به خواص مشخص می‌شود که در محدوده ۵ تا ۲۰ درصد بزرگترین اختلاف در خواص با دیزل خالص مربوط به حالت مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد است. در واقع با این انتخاب دو سوختی که بیشترین اختلاف در خواص را دارند مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

برای مقایسه رفتار دو سوخت دیزل خالص و مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد، برای هر سوخت دو حالت در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) عمق نفوذ نوک اسپری برای دو سوخت بر حسب زمان را نشان می‌دهد. دو سوخت به داخل یک محفظه حجم ثابت (به طول ۱۵ سانتیمتر و شعاع ۳ سانتیمتر) که در ابتدای تزریق، حاوی هوای ساکن است، تزریق می‌شوند. فشار محفظه ۱۰ بار و دمای آن ۳۰۰ کلوین است. نتایج مشابهی در شکل (۱۳) در حالتی که فشار محفظه حجم ثابت برابر ۵۰ بار است، گزارش شده است. با توجه به دو سری نتایج مذکور مشاهده می‌شود که عمق نفوذ نوک اسپری مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد اندکی بیش از دیزل خالص است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی عددی، ورودی انژکتورها به نحوی تنظیم شده که سرعت خروجی سوخت از انژکتورها یکسان باشد. در واقع چگالی مخلوط دیزل-ایزوپروپیل

الکل ۲۰ درصد، کوچکتر از دیزل خالص است. پس در هر تزریق جرم کمتری مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد به محفظه تزریق می‌شود تا سرعت ورودی دو اسپری به محفظه یکسان باشد. به بیان دیگر دبی حجمی دو اسپری یکسان در نظر گرفته شده است. البته با توجه به ساختار پمپهای انژکتور در موتورهای دیزل که عمدتاً از نوع جابه‌جایی مثبت است، در نظر گرفتن یک دبی حجمی ثابت برای دو سوخت منطبق بر واقعیت عملکردی سیستم‌های موتور دیزل خواهد بود.



شکل ۱۳- عمق نفوذ نوک اسپری برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل بر حسب زمان فشار محفظه ۵۰ بار



شکل ۱۲- عمق نفوذ نوک اسپری برای دیزل و مخلوط‌های دیزل-ایزوپروپیل الکل بر حسب زمان فشار محفظه ۱۰ بار

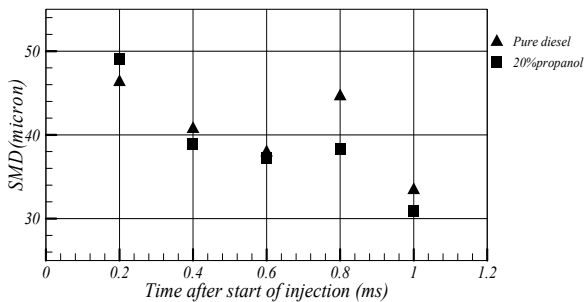
شکل (۱۴) ساختار اسپری را در زمان ۱ میلی ثانیه پس از شروع تزریق نشان می‌دهد. اندازه قطرات در این شکل به اندازه ده برابر اندازه واقعی بزرگتر نمایش داده شده‌اند. نیمه بالایی شکل مربوط به ساختار اسپری مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد و نیمه پایینی مربوط به دیزل خالص است. در واقع باید گفت که تفاوت زیادی بین دو سوخت مشاهده نمی‌شود. اسپری مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد به مقدار کمی نفوذ بیشتری داشته و اندکی کمتر پخش شده است. برای توجیه رفتار اسپری این دو سوخت لازم است اطلاعاتی در مورد اندازه قطرات در دست باشد. البته با توجه به شکل (۱۴) قضاوتی در مورد اندازه قطرات نمی‌توان انجام داد.



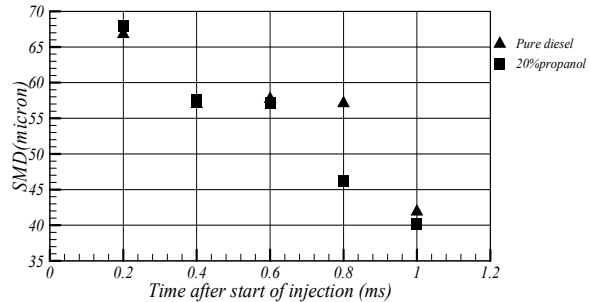
شکل ۱۴- ساختار اسپری در زمان ۱ میلی ثانیه پس از شروع تزریق نیمه بالایی برای دیزل و نیمه پایینی برای مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد

توزیع اندازه قطرات در عملکرد اسپری حائز اهمیت است زیرا قطره ریزتر به لحاظ داشتن نسبت سطح به حجم بیشتر راحت‌تر تبخیر شده و برای عملکرد موتور دیزل مناسب‌تر است. البته معمولاً قضاوت در مورد این موضوع فقط با توزیع قطرات انجام نمی‌شود، بلکه نسبت مجموع کل سطوح به مجموع کل احجام برای تمام قطرات نیز که قطر میانگین ساوتر نامیده می‌شود باید مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به تعریف قطر میانگین ساوتر، اگر تمام قطرات دارای یک قطر باشند این قطر برابر قطر میانگین ساوتر است.

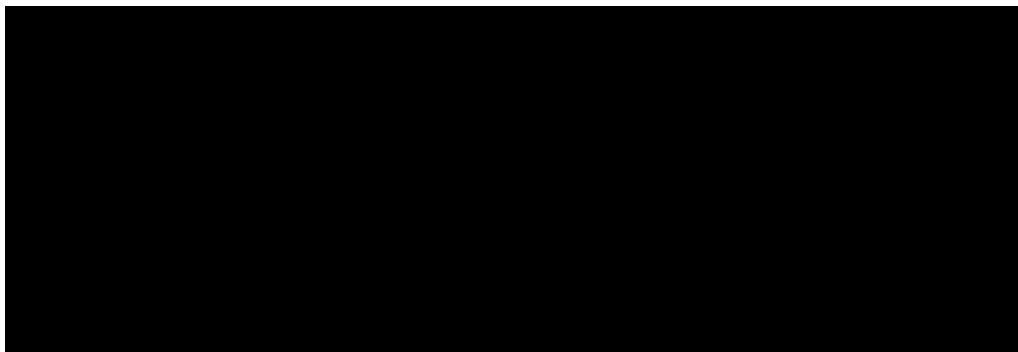
قطر میانگین ساوتر برای دو سوخت و برای دو محفظه با فشارهای ۱۰ و ۵۰ بار تا زمان یک میلی ثانیه پس از شروع تزریق به ترتیب در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است برای هر دو حالت، قطر میانگین ساوتر در زمان‌های ابتدایی پس از شروع تزریق مشابه است، در حدود ۰/۶ میلی ثانیه و بعد از آن شاهد کم‌تر بودن قطر میانگین ساوتر برای مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد، نسبت به دیزل خالص هستیم. با توجه به اختلاف در خواص دو سوخت به نظر می‌رسد زمان لازم برای تشکیل قطرات ریز در سوخت مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد، نسبت به دیزل خالص کوتاه‌تر است. این مسئله باعث شده در زمان ۰/۸ میلی ثانیه قطرات ریز مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد، نسبت به دیزل خالص بیشتر بوده و قطر میانگین ساوتر در این زمان اختلاف بیشتری داشته باشد. ساختار دو اسپری در زمان ۰/۸ میلی ثانیه در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. در این شکل اندازه بزرگتر قطرات برای دیزل در دهانه انژکتور نسبت به سوخت جدید قابل رویت است. در واقع در این زمان، ۰/۸ میلی ثانیه پس از شروع تزریق، متلاشی شدن قطرات در سوخت مخلوط بیشتر از دیزل خالص اتفاق افتاده است. با استفاده از خواص دو سوخت می‌توان با کمک روابط تقریبی نیز این روند را به طور کیفی پیش‌بینی کرد [۱۵]. به هر حال کاهش قطر میانگین ساوتر می‌تواند باعث تسهیل تبخیر در نتیجه اختلاط بهتر و در نهایت کاهش زمان تاخیر جرعه و کار کردن مطلوب‌تر موتور شود.



شکل ۱۶- SMD بر حسب زمان فشار محفظه ۵۰ بار



شکل ۱۵- SMD بر حسب زمان فشار محفظه ۱۰ بار



شکل ۱۷- ساختار در زمان ۰/۸ میلی ثانیه پس از شروع تزریق نیمه بالایی برای دیزل و نیمه پایینی برای مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل ۲۰ درصد

### نتیجه‌گیری

نتایج عددی ساختار اسپری سرد برای شرایط مختلف فشار محفظه و شرایط مختلف تزریق با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم نشان‌دهنده دقت قابل قبول این نرم‌افزار در شبیه‌سازی پدیده متلاشی شدن قطرات سوخت در جریان سیال است. شبیه‌سازی اسپری سرد به منظور مطالعه رفتار اسپری دو سوخت دیزل خالص و مخلوط دیزل-ایزوپروپیل، با استفاده از خواص

اندازه‌گیری شده این سوخت‌ها، نشان دهنده ساختار مشابه برای هر دو اسپری با وجود اختلافات قابل ملاحظه در مقادیر خواص دو سوخت و اعداد بدون بعد رینولدز، وبر و اهنزورج است. علاوه بر آن، مزایایی برای مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل در مقابل دیزل خالص مشاهده شد که می‌توان به قطرات ریزتر، و قطر میانگین ساوتر کوچکتر اشاره کرد. چنین به نظر می‌رسد که با توجه به ساختار مشابه دو اسپری، می‌توان مخلوط دیزل-ایزوپروپیل الکل را با انژکتورهای متعارف موتور دیزل بدون نیاز به تغییر در انژکتور تزریق کرد و انتظار رفتار مشابه دیزل را داشت.

## مراجع

- Powell, C. F., Wang, J., and Ciatti, S., "Light-Duty Diesel Spray Research Using X-Ray Radiography," Argonne National Laboratory (ANL), 9700 S. Cass Ave. Argonne, IL 60439, 2005.
- Powell, C. F., and Wang, J., "X-Ray Studies of Heavy-Duty Injector Spray Characteristics," Argonne National Laboratory (ANL), 9700 S. Cass Ave. Argonne, IL 60439, 2005.
- Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D., "KIVA II-A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory LA-11560-MS, 1989.
- Amsden, A. A., "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos National Laboratory LA-13313-MS, 1997.
- Chryssakis, C., "A Unified Fuel Spray Breakup Model for Internal Combustion Engine Applications," PhD Thesis, University of Michigan, 2005.
- Papageorgakis, G. C., and Assanis, N., "A Spray Breakup Model for Low Injection Pressures," Int. comm.. Heat Mass Transfer, Vol. 23, 1996.
- Park, S. W., and Lee, C. S., "Macroscopic Structure and Atomization Characteristics of High-Speed Diesel Spray," International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 4, pp. 157-164, 2003.
- Chryssakis, C., and Assanis, D. N., "Development and Validation of a Comprehensive CFD Model of Diesel Spray Atomization Accounting for High Weber Numbers," Society of Automotive Engineers, 2006-01-1546
- Kimura, S., Kosaka, H., Himeno, R., and Matsui, Y., "A Numerical Simulation of Diesel Fuel Spray by LES," The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001), Nagoya, July, 2001.
- Trinh, H. P., Chen, C. P., and Balasubramanyam, M. S., "Numerical Simulation of Liquid Jet Atomization Including Turbulence Effects," 41<sup>st</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion, Tucson, Arizona, July, 2005.
- Feng Tao, Valeri, I. Golovitchev and Jerzy Chomiak, "Numerical Modeling of Auto-Ignition, Combustion, and Soot Formation for n-Heptane Sprays in a High Pressure Constant-Volume Chamber," In Proceedings of 4th International Conference, ICE99 Internal Combustion Engines: Experiments and Modeling, pp. 505-513, Capri, Italy, September, 1999.
- Rong-Horng, Chen, "Diesel-Diesel and Diesel-Ethanol Drop Collisions," Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 604-610, 2007
- Handbook of Chemistry and Physics, 71st edition, CRC Press, Ann Arbor, Michigan, 1990.
- Chang, C. S., Zhang, Y., Bray, K. N. C., and Rogg, B., "Modeling and Simulation of Auto ignition Under Simulated Diesel-Engine Conditions," Combust. Sci. Tech., Vols. 113-114, pp. 205-219, 1996.
- Carsten Baumgarten, Mixture Formation in Internal Combustion Engines, Springer, 2006.
- Liu, A. B., Mather, D., and Reitz, R. D., "Modelling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays," SAE paper 930072, 1993.

## English Abstract

### A Comparison of Cold Sprays of DIPA (Diesel-IsoPropyl Alcohol blended fuel) and Pure Diesel Using Numerical Simulation

M.D. Emami<sup>1</sup>, S. Kheradmand<sup>1</sup> and M. Hakimdavood<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

2- Sepahan Oil Company, Isfahan, Iran

*In the present work, numerical simulations of the pure diesel and diesel-isopropyl alcohol cold sprays are performed using OpenFoam software. These sprays are formed through injecting liquid fuel into an initially quiescent air in a constant volume high pressure chamber. The hybrid, Eulerian-Lagrangian formulation, along with a compressible version of k- $\epsilon$  model, is used. The numerical simulation consists of various sub-models for atomization, droplets breakup, drag and gravitational forces. The ability of the OpenFOAM software to predict spray tip penetration is validated against four cases by comparing the predictions against the available experimental data. In order to complete the input data for the simulations, physical properties of DIPA and Diesel (needed for cold spray simulation) are measured experimentally. Simulations are done in two chamber pressures (10 bar and 50 bar). Spray tip penetration, SMD, droplet size distribution and spray structure for DIPA and Diesel are presented and compared. The results show that the SMD of DIPA20 is smaller than that of pure Diesel. They also indicate that the spray tip penetrations for the two fuels are nearly the same regardless of the properties of the two fuels. It is concluded that DIPA20 could be used in traditional Diesel injection systems without any modifications to the engine geometry.*

**Key Words:** cold spray simulation, diesel fuel, diesel-isopropyl mixture, break up