

## پخش سوخت مایع در محفظه احتراق از طریق برخورد جت با موانع استوانه‌ای کوچک

سعید کاظمی سرشت<sup>۱\*</sup> و آرش محمدی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، kazemi.saeed@sru.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، amohamadi@sru.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۱۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۵/۱۲، پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۹)

**چکیده:** همگن‌سازی یک مخلوط رقیق از سوخت و هوا باعث می‌شود دمای جبهه شعله کاهش پیدا کرده و به‌طور هم‌زمان باعث کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق می‌شود. کارهای تجربی نشان داده است که سطح بالایی از پراکندگی برای رسیدن به مخلوط همگن را می‌توان با برخورد جت دیزل بر روی یک سری از موانع استوانه‌ای، به‌عنوان ساختار نزدیک به محیط متخلخل، به‌دست آورد. سوخت تزریق شده با اولین مانع استوانه‌ای برخورد می‌کند و به دو جت کوچک‌تر تقسیم می‌شود. سپس، با برخورد با موانع بعدی جت چندتایی به‌وجود آمده که باعث پخش سوخت می‌شود. کارهای تجربی قبلی نشان داده‌اند که ساختار هندسی و قطر موانع از عوامل اصلی در شکل‌گیری چند جت و توزیع فضایی سوخت‌اند. در این مقاله، مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، که با دقت رفتار شکل‌گیری چند جت گذرا را پیش‌بینی می‌کنند، توسعه می‌یابد و پس از اعتبارسنجی ساختارهای جدیدی از موانع با افزایش فاصله بین آن‌ها و یک ساختار بهبودیافته ارائه شده است. مدل‌سازی جدید نشان می‌دهد که این ساختارها، نسبت به ساختارهایی که قبلاً مورد بررسی قرار گرفته‌اند، دارای ویژگی‌های همگن‌سازی بهتر بوده و توزیع فضای در آن‌ها کارآمدتر است.

**کلیدواژگان:** پاشش دیزل، تشکیل مخلوط، استوانه‌های کوچک

### مقدمه

قوانین سخت‌گیرانه‌ای که امروزه برای کاهش آلاینده‌ها وضع می‌شود موجب شده که تحقیقات بیشتری در زمینه کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق موتورهای و افزایش بازده آن صورت پذیرد. با همگن‌کردن سوخت و هوا در محفظه احتراق قبل از اشتعال، میزان انتشار آلاینده‌ها و بازده احتراق بسیار بهبود می‌یابد. در همین زمینه موضوع نسبتاً جدیدی که در طی سه دهه اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان فن قرار گرفته است استفاده از مواد متخلخل در سیستم‌های احتراقی است که از آن جمله می‌توان به استفاده در موتورهای احتراق داخلی اشاره کرد. بزرگ‌ترین مشکل موتورهای احتراق داخلی در حال حاضر وجود ناهمگنی مخلوط سوخت و هوا درون محفظه احتراق است که باعث آزاد شدن ناهمگن انرژی حرارتی و گرادیان شدید دما در داخل محفظه احتراق و در نتیجه تولید آلاینده‌هایی مثل اکسیدهای نیتروژن<sup>۱</sup>، هیدروکربن نسوخته<sup>۲</sup>، مونوکسید کربن<sup>۳</sup>، دوده<sup>۴</sup> و ذرات معلق می‌شود [۱]. راهکار کلیدی ممکن برای کاهش آلاینده‌های موتور استفاده از احتراق همگن<sup>۵</sup> است. از این رو، روش‌هایی جست‌وجو می‌شود که بتواند این هدف را ممکن سازد. در چند دهه اخیر، ایده استفاده از محیط متخلخل<sup>۶</sup> برای

1. NOx

2. HC

3. CO

4. Soot

5. Homogenize Combustion

6. Porous medium

همگن کردن مخلوط سوخت و هوا و همچنین بهبود فرایند احتراق و کاهش تولید آلاینده‌ها مطرح شده است. یکی از ویژگی‌های خاص ماده متخلخل، افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و بازدهی حرارتی بوده که در مشعل‌های با سوخت مایع و گازی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اولیه استفاده از محیط متخلخل افزایش پخش جت سوخت<sup>۱</sup> و بهبود فرایند تبخیر برای رسیدن به مخلوط همگن است [۲].

ایده استفاده از محیط متخلخل در موتورهای احتراق داخلی اولین بار، در سال ۲۰۰۱، توسط درست و وکلاس [۴،۳] ارائه شده است. آن‌ها عملکرد محیط متخلخل را روی یک موتور دیزل تک‌استوانه‌ای هواخنک و بدون استفاده از واکنشگر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که دمای میانگین سیلندر به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده و در حین احتراق نیز تغییر قابل توجهی نمی‌کرد. همچنین، مقدار آلاینده‌های موتور نزدیک به صفر بوده است. در سال ۲۰۰۳، وکلاس، آتس و ولاچویچ [۵] جنبه‌های اساسی تعامل بین یک جت دیزل سرعت‌بالا و محیط بسیار متخلخل را مورد بررسی قرار دادند. همچنین، اثر تقسیم به چند جت و زاویه پخش سوخت در یک مدل دوبعدی برای تعامل جت سوخت با موانع استوانه‌ای (محیط متخلخل) در فشار پاشش ۳۰۰ و ۹۰۰ بار بررسی شده است. در سال ۲۰۰۶، وکلاس [۶] به تحلیل برخورد جت دیزل ریل مشترک<sup>۲</sup> با سرعت بالا بر روی ساختار متخلخل و استفاده از آن برای همگن‌سازی مخلوط در موتورهای احتراق داخلی پرداخت. او نتیجه گرفت که ساختار محیط متخلخل به‌تنهایی یک محفظه احتراق را درون خودش تشکیل می‌دهد و تمام فرایندهای پاشش سوخت، تشکیل مخلوط، احتراق و احتراق همگن به‌تنهایی در حجم متوسط محیط متخلخل (به اصطلاح مفهوم موتور PM<sup>۳</sup>) وجود دارد. در نهایت، نشان داد که برخورد جت دیزل به استوانه کوچک ممکن است اثر همگن‌سازی مشابهی را نسبت به آنچه در ساختارهای متخلخل سه‌بعدی دیده می‌شود، به‌وجود آورد. در سال ۲۰۰۶، مازاهو و زیگو [۷] بررسی عددی در تعاملات بین پاشش سوخت و محیط متخلخل داغ را انجام دادند. آن‌ها برای شبیه‌سازی محیط متخلخل از مکعب مستطیل‌های کوچک استفاده کردند و چیدمان آن‌ها الگوی خاصی نداشت. از جمله نتایج این بررسی این بود که تعامل می‌تواند منجر به توزیع همگن قطرات سوخت و بخار در محیط متخلخل شود و برای تشکیل یک مخلوط همگن، سودمند باشد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فشار محیط، نفوذ پاشش سوخت و احتمال عبور قطرات سوخت از محیط متخلخل کاهش می‌یابد. فاصله بین نازل پاشش و محیط متخلخل بر توسعه پاشش سوخت در خارج و داخل محیط متخلخل تأثیر می‌گذارد. در سال ۲۰۰۷، وکلاس و فالترمیر [۸] پاشش سوخت مایع به درون یک محیط متخلخل (که به‌صورت چیدمان شبکه‌ای از استوانه‌ها که روی یک صفحه نصب شده بود) را بررسی کردند. در این مطالعه، تغییر ساختار و قطر استوانه‌ها و همچنین اثر تغییر مکان نازل روی مقدار نفوذ سوخت مایع درون محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که برای برخورد جت دیزل با بیش از یک مانع توزیع جت بستگی به ساختار هندسی موانع داشته و به تعداد موانع وابسته نیست. در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸، وکلاس [۹،۲] برخورد جت دیزل با سرعت بالا روی موانع استوانه‌ای کوچک را مورد بررسی قرار داد. او نتیجه گرفت که قطر موانع، فاصله از خروجی نازل و فشار تزریق نقش مهمی در مشخص کردن توزیع جت در فضا دارند. ساختار چندجت امکان افزایش توزیع فضایی نسبت به ساختار تک‌جت را فراهم می‌کند. تمام این اثرات باعث تسریع در توزیع فضایی جت دیزل شده و در شرایط داغ، سوخت سریع‌تر تبخیر شده و بهتر با هوا مخلوط می‌شود. در سال ۲۰۱۰، وکلاس [۱۰] پتانسیل محیط متخلخل در تکنولوژی احتراق به‌عنوان موتورهای احتراق داخلی را بررسی کرد. وکلاس از یک ماده متخلخل به‌شکل حلقه استفاده کرد و نشان داد که می‌توان با موانع استوانه‌ای به نتایج مشابه به آنچه حلقه متخلخل نشان می‌دهد رسید. در سال ۲۰۱۲، وکلاس، سایپریس و مکزود [۱۱]، برای شبیه‌سازی محیط متخلخل و بررسی پخش سوخت، از موانع استوانه‌ای کوچک استفاده کردند. در سال ۲۰۱۴، وکلاس و همکاران [۱۲] برای همگن‌سازی مخلوط از محیط متخلخل استفاده کردند و دریافتند که توزیع

1. Distribution Fuel jet  
2. Common-rail  
3. Porous medium

مشابه و رفتار شکل‌گیری چندجت را می‌توان به‌سادگی با استفاده از برخورد سوخت با موانع کوچک به‌دست آورد. در سال ۲۰۱۷، ماهر و همکاران [۱۳] پاشش سوخت در موتورهای دیزل را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی کردند. برای تست مدل تشخیص پاشش، قبل از اعمال آن در مدل موتور، یک شبیه‌سازی پاشش دیزلی در یک محفظه حجم ثابت انجام شده است. در سال ۲۰۱۷، رالف فالگنهور و همکاران [۱۴] به بررسی کاربرد سازه‌های سلولی (محیط متخلخل) از جنس سیلیکن کاربرد<sup>۱</sup> سه‌بعدی با استفاده از گرمایش الکتریکی برای اشتعال و احتراق پرداختند. در سال ۲۰۱۸، مگلتون و همکاران [۱۵] شبیه‌سازی عددی همگن‌سازی مخلوط از طریق برخورد جت سوخت با موانع استوانه‌ای را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با همگن‌کردن بار در سیلندر قبل از احتراق، بازده و کاهش آلاینده‌های موتور دیزل بسیار بهبود می‌یابد. در این تحقیق، پاشش سوخت دیزل در موانع استوانه‌ای کوچک با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی محیط متخلخل موانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر به کار رفته است. در مطالعه حاضر، ابتدا شکل مخروط پاشش، زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و سپس اثر تغییر در قطر موانع، فشار پاشش، فاصله بین نازل و اولین مانع و ساختار هندسی موانع بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، ساختارهای جدیدی از موانع با افزایش فاصله بین آن‌ها و یک ساختار بهینه توسط چیدمان جدید از موانع استوانه‌ای به‌عنوان نوآوری مطالعه حاضر ارائه شده است.

## معادلات حاکم

در شبیه‌سازی عددی پاشش لازم است که معادلات جریان، انرژی و قطرات سوخت [۱۶] به‌صورت هم‌زمان حل شوند تا اثر برهمکنش آن‌ها به‌صورت دقیق مدل‌سازی شود. معادله پیوستگی جریان به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\rho$  چگالی کلی گاز،  $\vec{v}$  بردار سرعت گاز و  $t$  زمان است. همچنین، فرم کلی معادله تکانه برای نازل به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + F \quad (2)$$

در معادله بالا،  $p$  فشار استاتیکی و  $\vec{\tau}$  نماد تانسور تنشی و  $F$  یک نیروی تماسی به‌منظور ارتباط تغییر فاز با فاز پیوسته است. در این حالت معادله انرژی سیال به‌صورت رابطه (۳) بیان خواهد شد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + p)] = \nabla \cdot [(k_{eff}) \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})] + S_e \quad (3)$$

عبارت بین کروشه‌ها در سمت راست معادله شامل انتقال حرارت ناشی از هدایت، پخش گونه‌ها و تلفات لزجی است. همچنین،  $T$  دما،  $k_{eff}$  ضریب هدایت گرمایی مؤثر،  $E$  انرژی داخلی،  $h$  آنتالپی و  $S_e$  ترم چشمه مربوط به انتقال حرارت از فاز مایع است. در معادلات انتقال ذرات برای پاشش حداقل دو جزء متفاوت وجود دارد. یک جزء در بخش گازی و دیگری در بخش سوخت به‌صورت مایع است که بعد از تبخیر به فاز گازی منتقل می‌شود، درجایی که اختلاط رخ می‌دهد. معادله پیوستگی گونه‌های شیمیایی برای جزء  $i$ ام به‌صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \quad (4)$$

$Y_i$  کسر جرمی سوخت در هر نقطه از فاز گاز،  $S_i$  ترم چشمه و مربوط به تبخیر سوخت و  $\vec{J}_i$  شار پخش است. در اینجا مدل استاندارد  $k-\epsilon$  به‌همراه تابع دیوار سرعت استفاده شده است. در روابط (۵) و (۶) به‌ترتیب رابطه استاندارد انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آورده شده است.

1. Silicon Carbide (SiC)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

از آنجایی که بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروها در مقایسه با نیروهای پسا<sup>۱</sup> و گرانشی قابل چشمپوشی است، فقط نیروی پسا روی قطره پاشش (شامل مؤلفه‌های فشار و لزجت) برای فروپاشی اولیه و ثانویه پاشش سوخت مایع لحاظ شده است [۱۷]. معادله حرکت قطرات به صورت رابطه (۷) است:

$$\frac{1}{6} \rho_p \pi d^3 \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{2} (u_g - u_p) |u_g - u_p| \rho_g C_D \frac{\pi d^2}{4} \quad (7)$$

$u_g$  و  $u_p$  به ترتیب بیانگر سرعت قطرات و سرعت گازند.  $C_D$  ضریب پسای قطرات است که تابعی از عدد رینولدز جریان پاشش بوده و همچنین با سطح مقطع قطره مرتبط است و به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{1}{6} Re_p^{\frac{2}{3}} \right), & Re_p < 1000 \\ 0.424, & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (8)$$

در معادله بالا، عدد رینولدز قطرات به صورت  $Re_p = |u_g - u_p| \rho_g d / \mu_g$  تعریف می‌شود.

### پخش جت سوخت در تعامل با موانع استوانه‌ای کوچک

یکی از محدودیت‌های مهم در بهینه‌سازی تشکیل مخلوط دیزل اشتراک فراوان بین فرایندهای تزریق و احتراق است. احتراق را نمی‌توان از تزریق جدا کرد، زیرا کنترل کیفیت دقیق مخلوط (قبل از اشتعال) توسط احتراق انجام می‌شود. یک روش ممکن برای بهبود این فرایند تسریع در توزیع اسپری در فضا، تبخیر و مخلوط کردن آن با هوای اطراف در مدت تأخیر اشتعال (دوره بین شروع تزریق سوخت و شروع احتراق) است. یک راه برای همگن کردن این مخلوط، مسدود کردن سوخت دیزل فشارقوی با موانع مختلف است. در اصل ایجاد یک سری از جت جدید برای پر کردن سیلندر است. در این حالت، طی یک مدت تأخیر کوتاه برای اشتعال، همگن‌سازی مخلوط به‌طور قابل توجهی تسریع می‌یابد. این ایده با انجام چندین آزمایش در مورد تخریب جت‌های دیزل با سرعت بالا در اثر برخورد به موانع استوانه‌ای کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک اثر مشابه برای برخورد سوخت با محیط متخلخل را می‌توان با تعامل جت دیزل با موانع استوانه‌ای کوچک به دست آورد. در این مورد موانع کوچک برای شبیه‌سازی ساختار متخلخل سه‌بعدی به کار گرفته شده‌اند [۲].

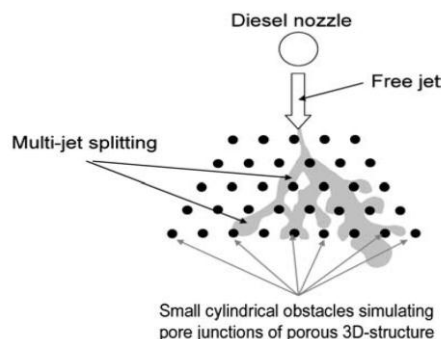


Figure 1- Simulating a 3D porous structure using small cylindrical obstacles

شکل ۱- شبیه‌سازی سه‌بعدی محیط متخلخل به کمک موانع استوانه‌ای [۸]

ساختار هندسی و موقعیت موانع برای دستیابی به الگوی توزیع مناسب بسیار مهم است. مانع اول نقش مهمی در این فرایند ایفا می‌کند. قطر آن، فاصله از خروجی نازل و فشار پاشش (سرعت نفوذ) عوامل عمده پخش جت در فضای محفظه‌اند. برای جت‌های دیزل بر روی بیش از یک مانع، توزیع جت بستگی به ساختار هندسی (شکل ۲) موانع داشته و لزوماً به تعداد موانع وابسته نیست. برای هر ساختار کدی مانند 3d1 تعیین شده که نشان‌دهنده ۳ مانع با قطر ۱ میلی‌متر و یا 1d2 که بیانگر ۱ مانع با قطر ۲ میلی‌متر است. همان سیستم کدگذاری در این مطالعه استفاده خواهد شد.

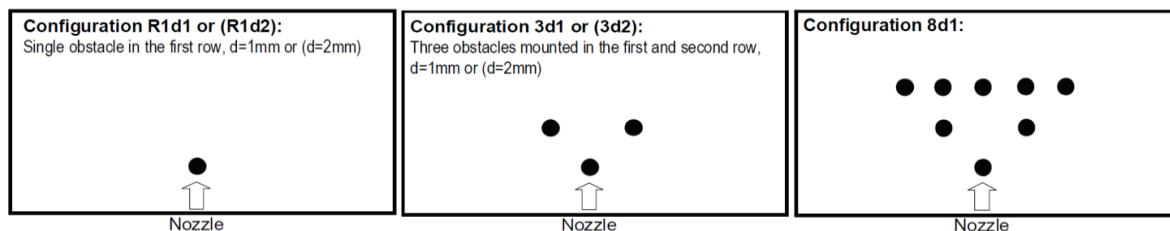


Figure 2- Geometrical configuration of cylindrical obstacles [9]

شکل ۲- پیکربندی هندسی موانع استوانه‌ای [۹]

بعد از برخورد جت سوخت با موانع استوانه‌ای، جت سوخت به چندین جت تقسیم می‌شود. طول جت به‌عنوان فاصله بین خروجی نازل و بیشترین نفوذ جت سوخت و عرض جت به‌عنوان بیشترین فاصله عرضی بین دو جت بعد از برخورد با موانع تعریف می‌شود (شکل ۳)، درحالی‌که زاویه پخش سوخت به زاویه‌ای اطلاق می‌شود که جت‌های مربوط به این زاویه خارج از محیط متخلخل با هم ایجاد زاویه کرده باشند. زوایای پخش سوخت برای ساختارهای مختلفی از موانع به‌صورت شکل ۴ قابل محاسبه است.

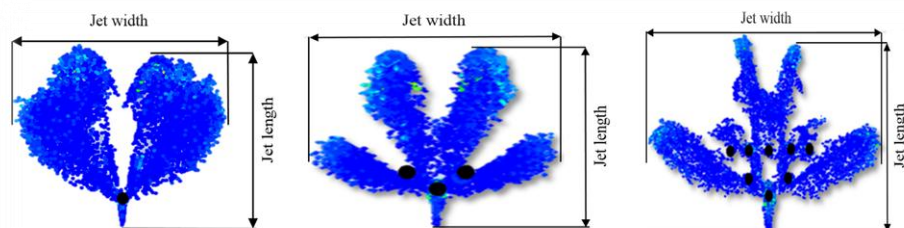


Figure 3- Definition of jet length and jet width in impingement with one, three and eight cylindrical obstacles with diameter of 1 mm

شکل ۳- تعریف طول و عرض جت در برخورد با یک، سه و هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر

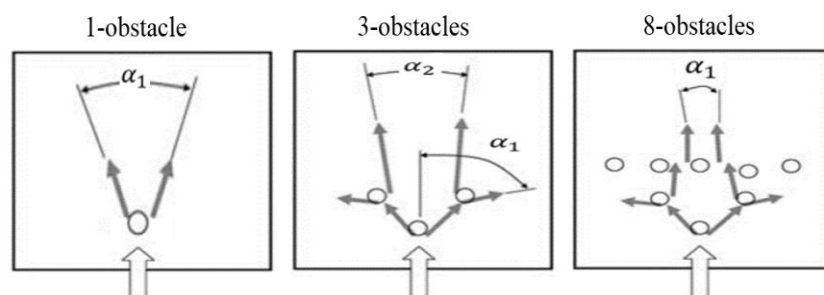


Figure 4 - Fuel distribution angle for different structures of cylindrical obstacles with diameter of 1 mm [9]

شکل ۴- زاویه پخش سوخت برای ساختارهای مختلفی از موانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر [۹]

## بررسی استقلال نتایج از گام زمانی و شبکه محاسباتی

در مسائلی که میدان جریان ناپایا و وابسته به زمان است، باید صحت نتایج به دست آمده تحت تأثیر گام زمانی و شبکه محاسباتی انتخاب شده مورد آزمایش قرار گیرد. در این مطالعه، به منظور بررسی استقلال حل عددی از گام زمانی و شبکه محاسباتی به ترتیب، ۳ گام زمانی  $1 \times 10^{-5}$ ،  $3 \times 10^{-5}$  و  $1 \times 10^{-4}$  و ۳ شبکه محاسباتی با تعداد ۵۹۰۸۰۰، ۹۲۶۸۰۵ و ۱۳۶۷۱۶۰ سلول برای یک مانع استوانه‌ای و فشار پاشش ۸۰۰ بار در نظر گرفته شده است و تمامی تحلیل‌ها برای انتخاب مناسب‌ترین گام زمانی و شبکه محاسباتی انجام یافته و باهم مقایسه شده است. مقایسه طول جت برای گام‌های زمانی و شبکه‌های محاسباتی مختلف در شکل‌های ۵ و ۶ به نمایش درآمده است. با توجه به نتایج شکل‌های ۵ و ۶، گام زمانی  $1 \times 10^{-5}$  و شبکه محاسباتی با تعداد ۱۳۶۷۱۶۰ سلول برای بررسی نتایج مربوط به یک مانع استوانه‌ای انتخاب شده است. ذکر این نکته لازم است که برای تمامی شبیه‌سازی‌های مربوط به محیط متخلخل با بیش از یک مانع نیز استقلال از شبکه محاسباتی صورت گرفته است.

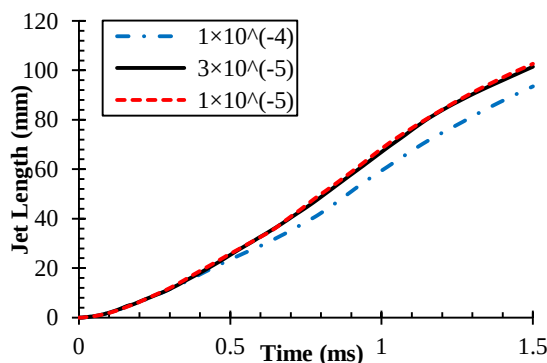


Figure 5 - Comparison of jet length for different time steps  
شکل ۵- مقایسه طول جت برای گام‌های زمانی مختلف

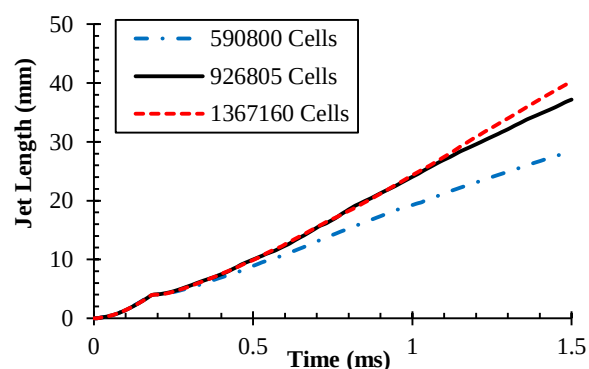


Figure 6- independent review of the computational grid for 1 obstacle  
شکل ۶- بررسی استقلال از شبکه محاسباتی برای یک مانع

## مشخصات انژکتور و محفظه احتراق

در این مطالعه، پاشش سوخت دیزل توسط یک انژکتور تک‌سوراخ با قطر ۱۴۱ میکرومتر به داخل محفظه فشار ثابت با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت شبیه‌سازی شده است. محفظه پاشش حاوی موانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر از جنس سیلیکن کاربید است. ابعاد محفظه  $200 \times 200 \times 100$  میلی‌متر و برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار ANSYS ICEM CFD استفاده شده است (شکل ۷). میدان جریان ناپایا و وابسته به زمان بوده و مدل استاندارد  $k-\epsilon$  به کار رفته است. برای شبیه‌سازی جریان پاشش از مدل فاز گسسته (DPM)<sup>۱</sup> استفاده شده و شرط مرزی برای برخورد سوخت با موانع، فیلم دیواری<sup>۲</sup> لحاظ شده است. مدت زمان کل برای باز شدن سوزن انژکتور ۱/۵ میلی‌ثانیه لحاظ شده است. دمای محفظه ۳۰۰ کلوین، فشار آن ۱ بار و سیال مورد استفاده برای محفظه، هوا (گاز ایدئال) انتخاب شده است. نیروی وارد به قطرات از نوع پسای دینامیکی و مدل استفاده شده برای تجزیه قطرات مدل KHRT<sup>۳</sup> است. در زیر مدل انتشار آشفته‌گی<sup>۴</sup> برای پیگیری قطرات از مدل ردیابی تصادفی مجزا<sup>۵</sup> و ثابت مقیاس زمانی ۰/۱۵ استفاده شده است. طرح‌های<sup>۶</sup> گسسته‌سازی برای تکانه، آشفته‌گی، انرژی و کسر حجمی از نوع بالادست<sup>۷</sup> و برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی<sup>۸</sup> هستند. برای محاسبه مقادیر مرزی از روش برون‌یابی و برای

1. Discrete Phase Model
2. Wall film
3. Kelvin Helmholtz-Rayleigh Taylor
4. Turbulent Dispersion
5. Discrete random walk model
4. Scheme
5. Upwind
6. Central differencing

محاسبه ترم‌های مشتق موجود در معادلات از روش حداقل مربعات استفاده شده است. همچنین، برای کوپل فشار-تکانه از الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> استفاده شده است.

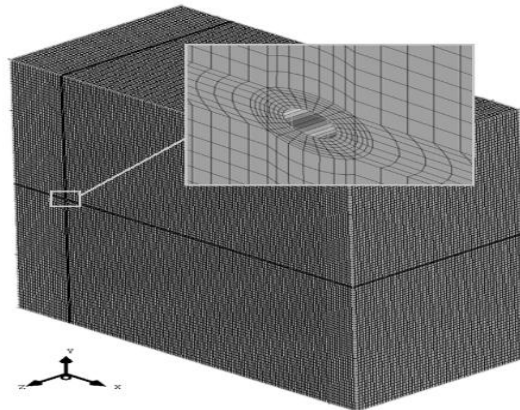


Figure 7- Schematic of mesh injection fuel chamber in the presence of a cylindrical obstacle with diameter of 1 mm  
شکل ۷- طرحواره شبکه‌بندی محفظه پاشش سوخت در حضور یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر

## مقایسه نتایج و صحنه‌گذاری

### اعتبارسنجی برای طول و عرض جت سوخت

برای دستیابی به دقت نتایج به‌دست‌آمده، داده‌های عددی برای طول و عرض جت سوخت با نتایج تجربی [۹] برای یک، سه و هشت مانع به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار مقایسه شده است. در شکل‌های ۸ و ۹، نتایج طول و عرض جت حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نتایج تجربی، بعد از برخورد روی اولین مانع در فشار پاشش ۸۰۰ بار، برای یک، سه و هشت مانع بررسی شده است. با توجه به این نمودارها، تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج تجربی وجود دارد. بیشترین درصد خطا و اختلاف عددی در گزارش طول و عرض جت بین مقادیر عددی و تجربی در فشار پاشش ۸۰۰ بار، برای ساختارهای مختلف هندسی از موانع، طبق جدول ۱ گزارش شده است.

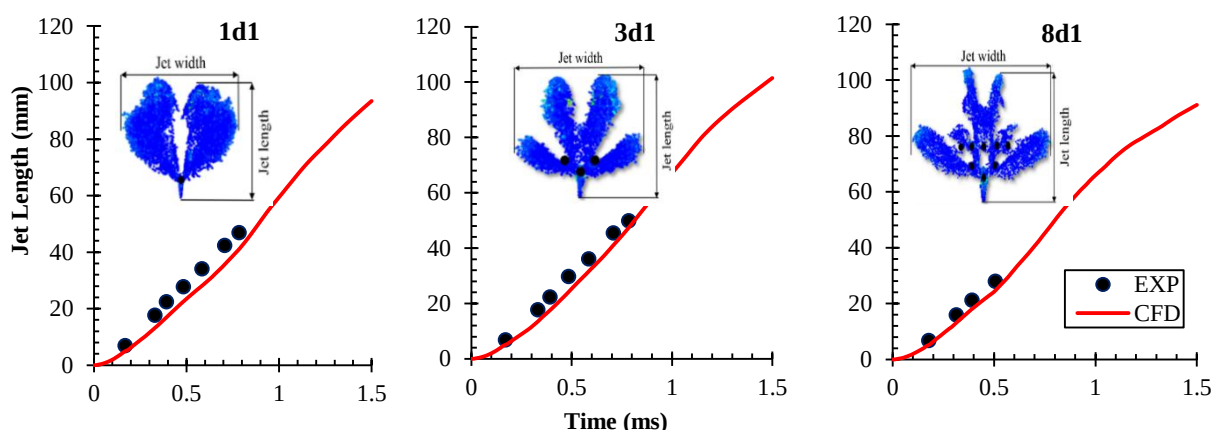


Figure 8 - Comparison of numerical and experimental results of fuel jet length for different geometric structures at injection pressure 800 bar [9]

شکل ۸- مقایسه نتایج عددی و تجربی طول جت سوخت برای ساختار هندسی مختلف در فشار پاشش ۸۰۰ بار [۹]

1. Simple

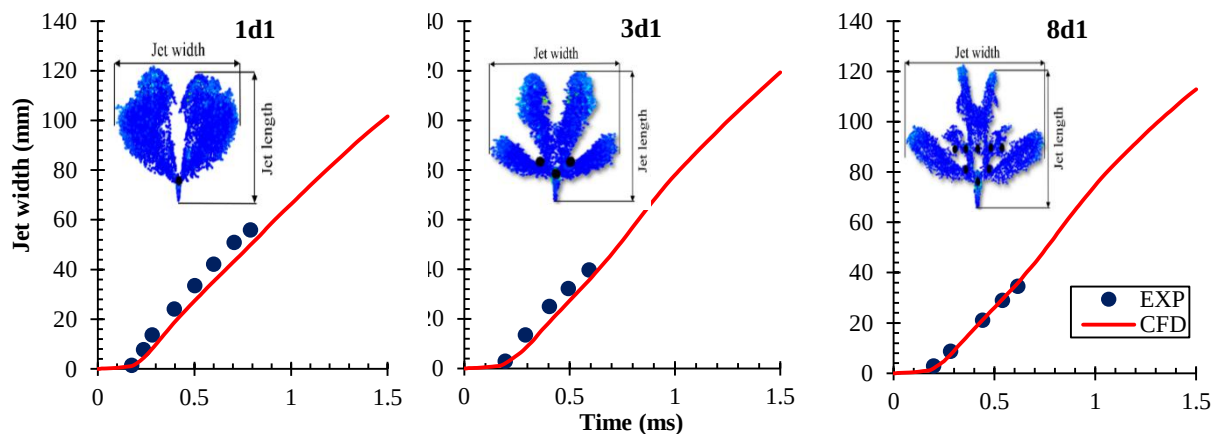


Figure 9 - Comparison of numerical and experimental results of fuel jet width for different geometric structures at injection pressure 800 bar [9]

شکل ۹- مقایسه نتایج عددی و تجربی عرض جت سوخت برای ساختار هندسی مختلف در فشار پاشش ۸۰۰ بار [۹]

جدول ۱- بیشترین درصد خطا و اختلاف عددی در گزارش طول و عرض جت بین مقادیر عددی و تجربی در فشار پاشش ۸۰۰ بار برای ساختارهای مختلف هندسی

Table 1- The highest percentage of error and numerical difference in jet length and jet width report between numerical and experimental values at injection pressure 800 bar for different geometric structures

|                                       | One obstacle to a diameter of 1 mm (R1d1) |           | Three obstacle to a diameter of 1 mm (3d1) |           | Eight obstacle to a diameter of 1 mm (8d1) |           |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|-----------|
|                                       | Jet Length                                | Jet Width | Jet Length                                 | Jet Width | Jet Length                                 | Jet Width |
| The highest numerical difference (mm) | 5.44                                      | 4.47      | 5.02                                       | 4.8       | 2.53                                       | 0.82      |
| The highest percentage of error (%)   | 14                                        | 12        | 13                                         | 12        | 12                                         | 10        |

### اعتبارسنجی برای شکل مخروط پاشش

در شکل ۱۰ می‌توان مقایسه شکل برخورد جت سوخت به ترتیب با سه و هشت مانع در هوا را مشاهده کرد. تصاویر بالا مربوط به آزمایشگاه و تصاویر پایین مربوط به شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت برای فشار پاشش ۴۰۰ و ۸۰۰ بار و مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه و ۰/۴ میلی‌ثانیه بعد از برخورد روی اولین مانع است [۹].

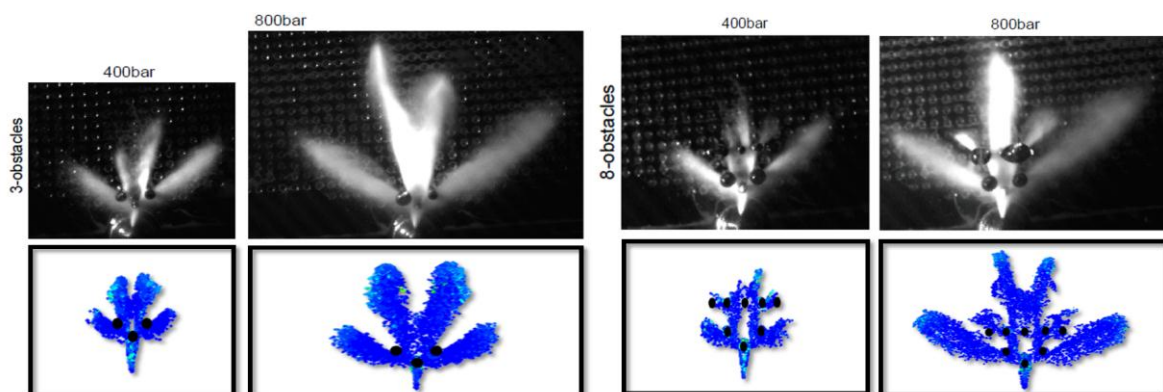


Figure 10 - Comparison of injection form for numerical simulation and photography in the laboratory to impingement with three and eight obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 400 and 800 bar and time of 0.4 ms after impingement on the first obstacle [9]

شکل ۱۰- مقایسه شکل پاشش مربوط به شبیه‌سازی عددی و عکس برداری در آزمایشگاه برای برخورد با سه و هشت مانع به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۴۰۰ و ۸۰۰ بار و زمان ۰/۴ میلی‌ثانیه بعد از برخورد روی اولین مانع [۹]



## اعتبارسنجی برای زاویه پخش

همان‌طور که از شکل ۱۱ برای نتایج تجربی پیداست، زاویه پخش  $\alpha_1$  با افزایش فشار پاشش، برای ساختار 1d1 کاهش، 3d1 افزایش و 8d1 ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. همچنین، زاویه پخش  $\alpha_2$  برای ساختار 3d1 با افزایش فشار پاشش، افزایش یافته است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نتایج عددی و آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردارند.

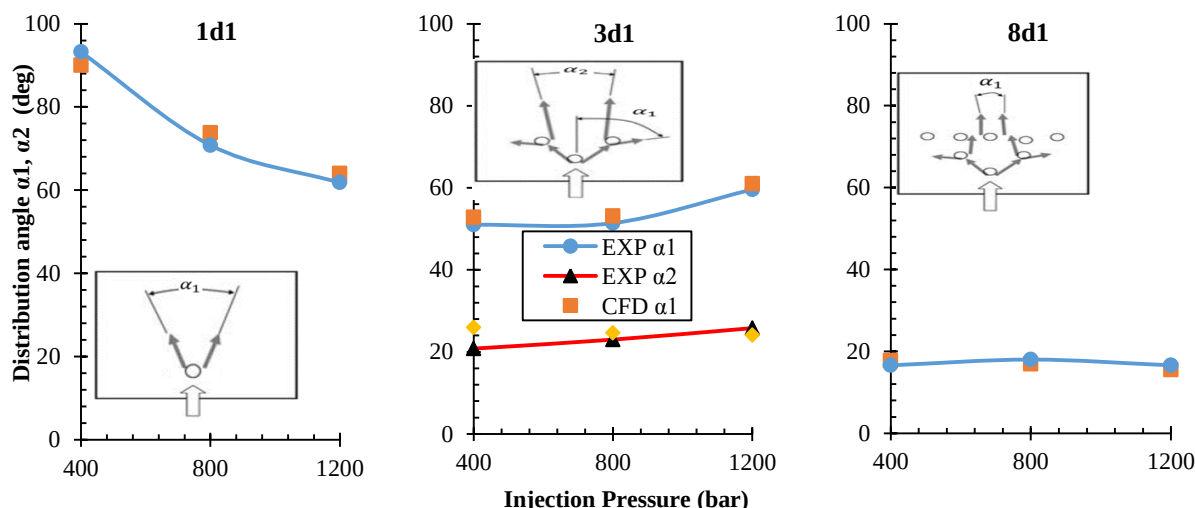


Figure 11 - Comparison of numerical and experimental results of fuel distribution angle for different geometric structures [9]

شکل ۱۱- مقایسه نتایج عددی و تجربی زاویه پخش سوخت برای ساختارهای هندسی مختلف [۹]

## نتایج و بحث

### بررسی تأثیر قطر موانع بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت

در این بخش، تأثیر قطر موانع با اندازه ۱ و ۲ میلی‌متر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت برای برخی از ساختارهای هندسی موجود بررسی شده است. انتظار می‌رود با افزایش قطر موانع، زاویه پخش و عرض جت سوخت افزایش و طول جت سوخت کاهش یابد. شکل ۱۲ اثر تغییر اندازه قطر یک و سه مانع استوانه‌ای بر روی طول جت سوخت را در فشار پاشش ۸۰۰ بار نشان می‌دهد. از این شکل مشخص می‌شود که با بزرگ‌تر شدن قطر موانع، طول جت کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که عرض جت سوخت با بزرگ‌تر شدن قطر موانع افزایش یافته است. همچنین، می‌توان در شکل ۱۴ اثر افزایش قطر موانع را بر روی زاویه پخش سوخت در فشار پاشش ۸۰۰ بار مشاهده کرد. از شکل ۱۴ پیداست که در یک فشار پاشش برابر، مانع با قطر بزرگ‌تر زاویه پخش سوخت بزرگ‌تری دارد. همچنین، در این فشار پاشش زاویه پخش  $\alpha_1$  برای سه مانع با قطر بزرگ‌تر افزایش و زاویه پخش  $\alpha_2$  کاهش یافته است.

### بررسی تأثیر فشار پاشش بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت

در این قسمت اثر فشارهای مختلف پاشش بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت برای ساختارهای هندسی مختلفی از موانع استوانه‌ای بررسی شده است. انتظار می‌رود طبق نتایج آزمایشگاهی با افزایش فشار پاشش، طول و عرض جت سوخت افزایش یافته و در یک فاصله مشخص بین نازل و اولین مانع [۹] برای ساختار هندسی یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش سوخت کاهش و برای ساختار هندسی با سه مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش سوخت افزایش یابد.

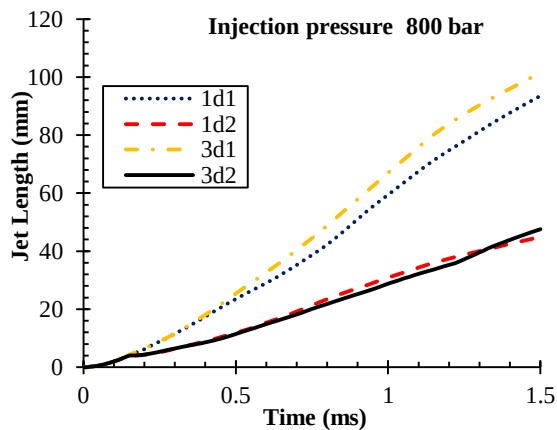


Figure 12 - Investigation of the effect of increasing the diameter for one and three cylindrical obstacles on the fuel jet length at injection pressure 800 bar

شکل ۱۲- بررسی اثر افزایش قطر برای یک و سه مانع استوانه‌ای روی طول جت سوخت در فشار پاشش ۸۰۰ بار

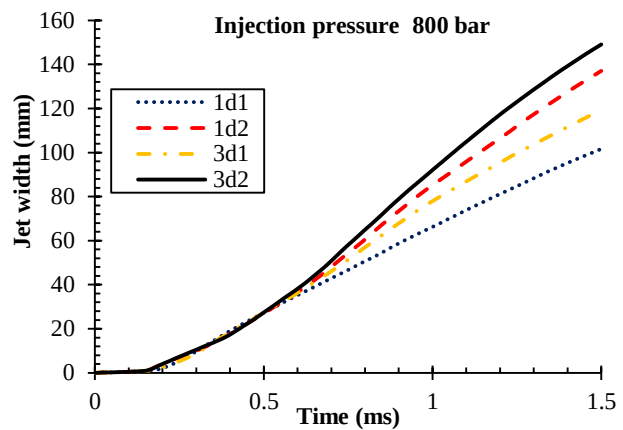


Figure 13 - Investigation of the effect of increasing the diameter for one and three cylindrical obstacles on the fuel jet width at injection pressure 800 bar

شکل ۱۳- بررسی اثر افزایش قطر برای یک و سه مانع استوانه‌ای روی عرض جت سوخت در فشار پاشش ۸۰۰ بار

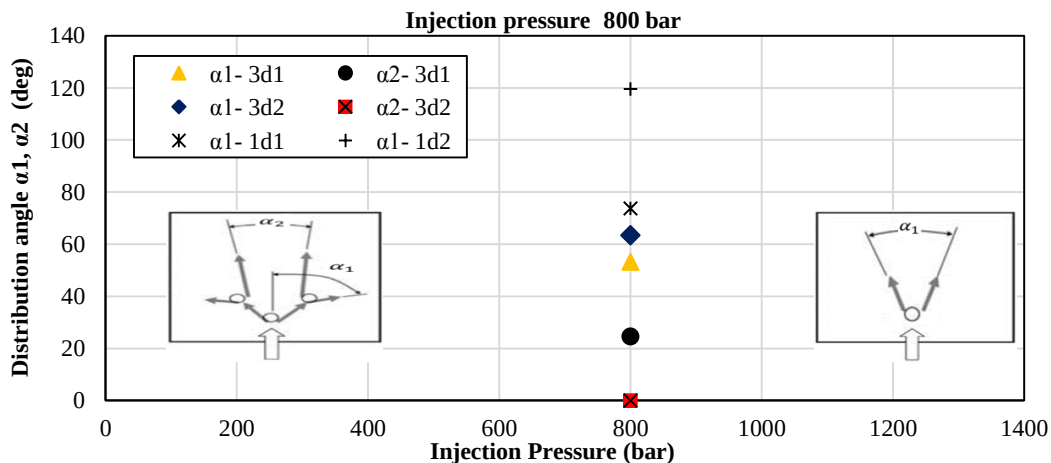


Figure 14 - Investigating the effect of increasing the diameter of the obstacles on the fuel distribution angle for different geometric structures

شکل ۱۴- بررسی اثر افزایش قطر موانع بر روی زاویه پخش سوخت برای ساختارهای هندسی مختلف

### یک مانع استوانه‌ای

شکل ۱۵ نمایی از برخورد سوخت با یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر برای سه فشار پاشش مختلف در زمان ۰/۶ میلی‌ثانیه را به تصویر می‌کشد. این شکل گویای افزایش طول و عرض جت در اثر افزایش پاشش است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ اثر فشار پاشش مختلف بر روی طول و عرض جت سوخت در برخورد با یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر را در مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، با افزایش فشار پاشش، طول و عرض جت سوخت افزایش یافته است. شکل ۱۸ اثر افزایش فشار پاشش بر روی زاویه پخش سوخت در برخورد با یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر را به تصویر می‌کشد. این شکل مشخص می‌کند که برای هر دو قطر مربوط به یک مانع استوانه‌ای، با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش سوخت کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۱۵ پیداست، با افزایش فشار پاشش، طول جت نسبت به عرض جت افزایش بیشتری داشته است. بنابراین، زاویه پخش کاهش یافته است.

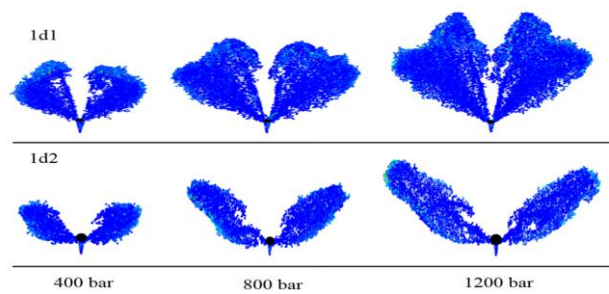


Figure 15- Comparison of fuel injection shape due to impingement with one obstacle with diameter of 1 and 2 mm in three different injection pressures at time of 0.6 ms

شکل ۱۵- مقایسه شکل پاشش سوخت در اثر برخورد با یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر در سه فشار پاشش مختلف در زمان ۰/۶ میلی‌ثانیه

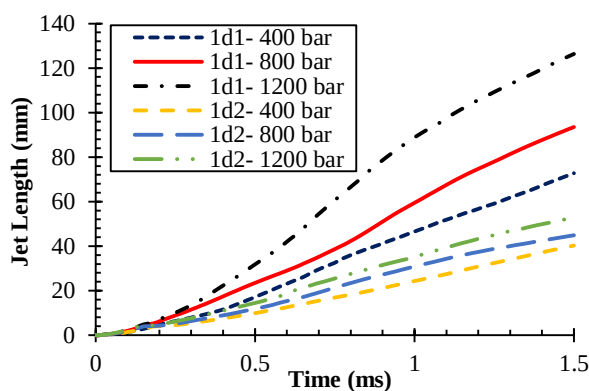


Figure 16 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel jet length for one cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

شکل ۱۶- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی طول جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

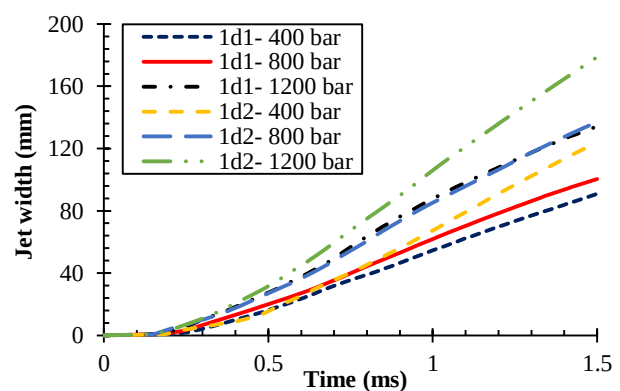


Figure 17 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel jet width for one cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

شکل ۱۷- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی عرض جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

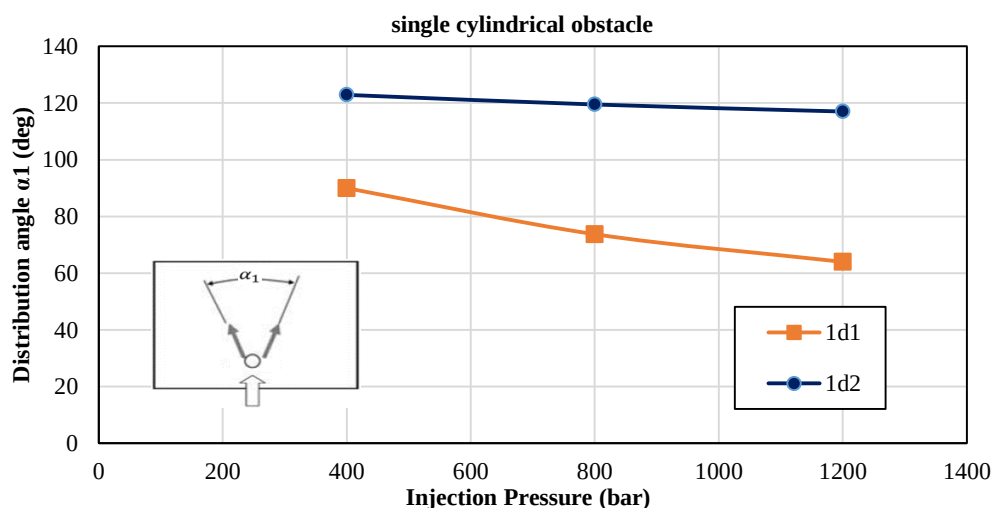


Figure 18 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel distribution angle for one cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

شکل ۱۸- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی زاویه پخش سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

### سه مانع استوانه‌ای

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ اثر فشار پاشش مختلف بر روی طول و عرض جت سوخت در برخورد با سه مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر را در مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، با افزایش فشار پاشش، طول و عرض جت سوخت افزایش یافته است. شکل ۲۱ اثر افزایش فشار پاشش بر روی زاویه پخش سوخت در برخورد با سه مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر را به تصویر می‌کشد. این نمودار مشخص می‌کند که برای سه مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش  $\alpha_1$  افزایش و زاویه پخش  $\alpha_2$  کاهش می‌یابد.

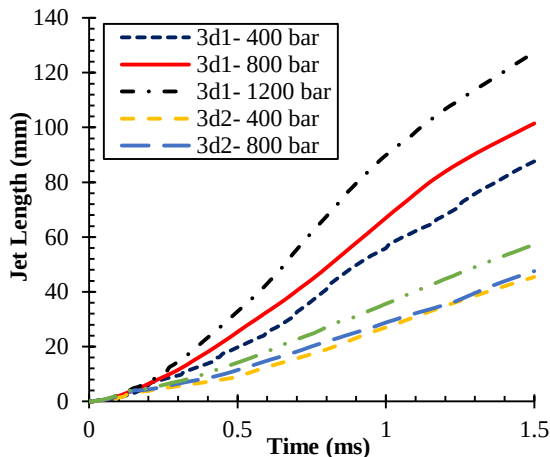


Figure 19 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel jet length for three cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

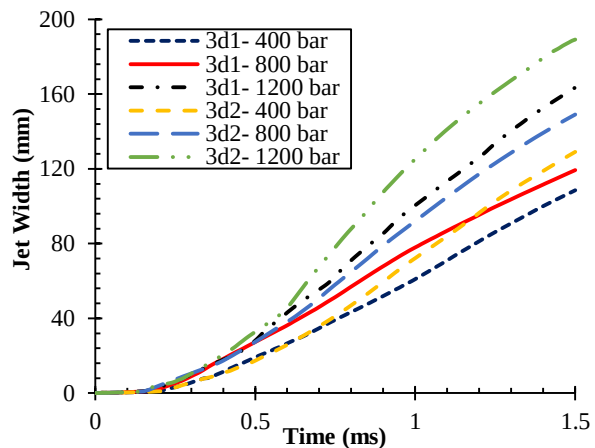


Figure 20 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel jet width for three cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

شکل ۱۹- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی طول جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

شکل ۲۰- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی عرض جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

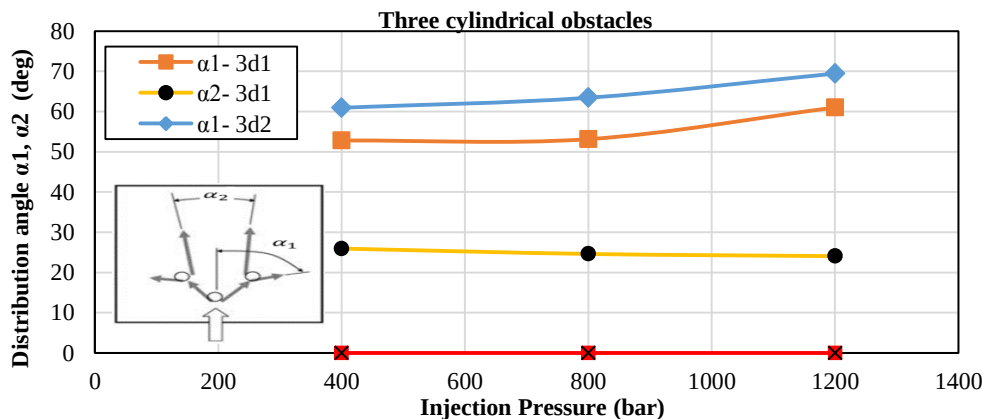


Figure 21 - Investigation of the effect of change in injection pressure on fuel distribution angles for three cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm

شکل ۲۱- بررسی اثر تغییر فشار پاشش روی زاویه پخش سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر

### بررسی تأثیر فاصله بین نازل و اولین مانع بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت

در این بخش اثر فاصله بین نازل و اولین مانع برای ساختارهای مختلف هندسی بر روی زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت بحث شده است. انتظار می‌رود با افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع، طول جت سوخت افزایش یافته و عرض جت و زاویه پخش سوخت با کاهش همراه شود.

## یک مانع استوانه‌ای

اثر تغییر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی طول و عرض جت سوخت، برای یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار، در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ قابل مشاهده است. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع، طول جت سوخت افزایش و عرض جت سوخت کاهش یافته است. همچنین، تأثیر افزایش این فاصله روی زاویه پخش سوخت برای یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر در شکل ۲۶ بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع سبب کاهش زاویه پخش سوخت شده است. برای یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر، در یک فاصله ثابت بین نازل و اولین مانع، با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش سوخت کاهش می‌یابد.

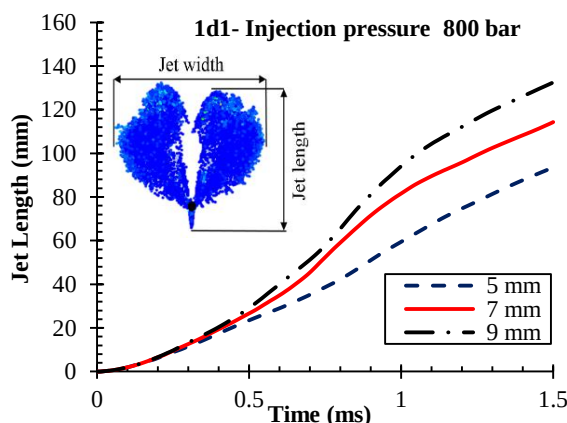


Figure 22- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet length for one cylindrical obstacle with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۲- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی طول جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

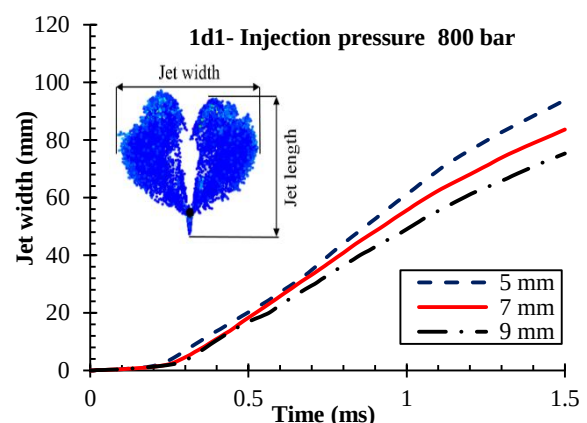


Figure 23- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet width for one cylindrical obstacle with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۳- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی عرض جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

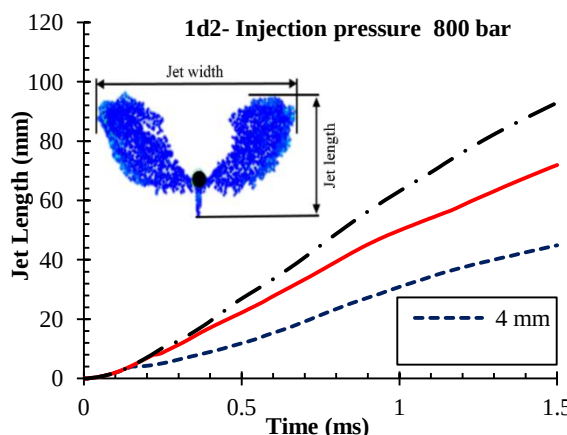


Figure 24- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet length for one cylindrical obstacle with diameter of 2 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۴- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی طول جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۲ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

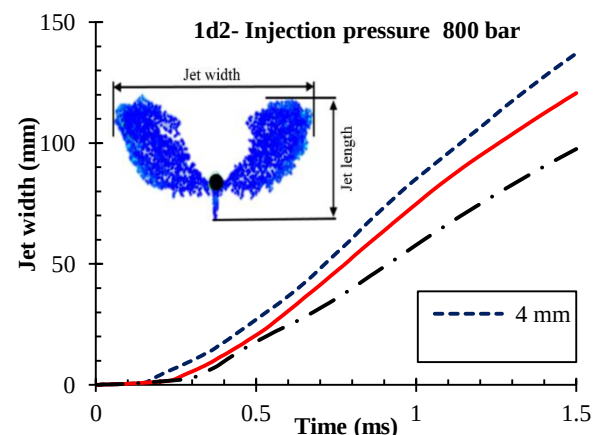


Figure 25- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet width for one cylindrical obstacle with diameter of 2 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۵- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی عرض جت سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۲ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

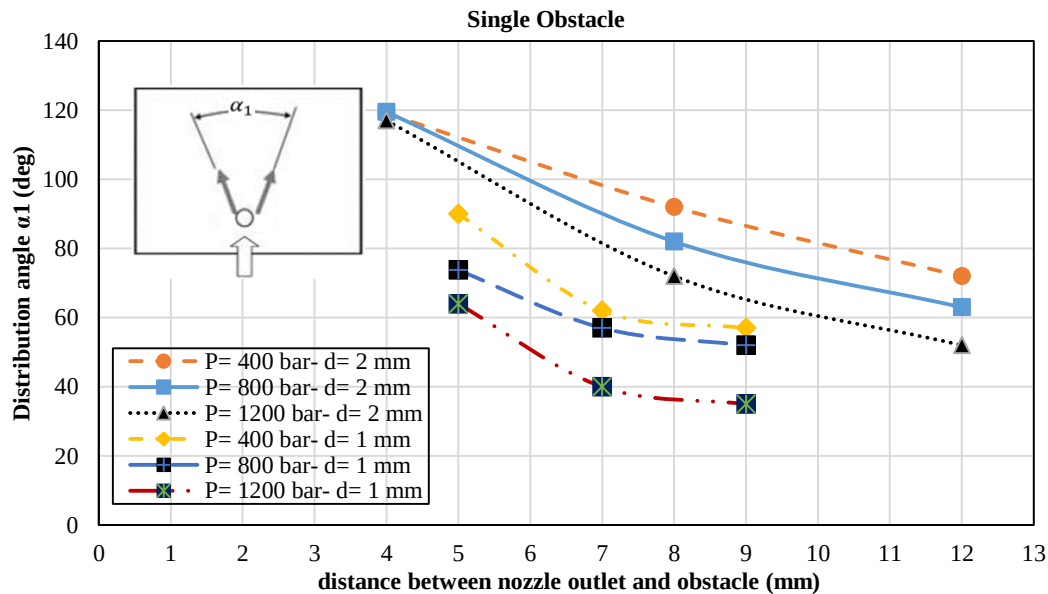


Figure 26- Investigating the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel distribution angle for one cylindrical obstacle with diameter of 1 and 2 mm in different injection pressures

شکل ۲۶- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی زاویه پخش سوخت برای یک مانع استوانه‌ای به قطر ۱ و ۲ میلی‌متر در فشارهای پاشش مختلف

### سه مانع استوانه‌ای

اثر تغییر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی طول جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار در شکل ۲۷ قابل مشاهده است. از این شکل می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع، طول جت سوخت افزایش یافته است. همچنین، تأثیر افزایش این فاصله روی عرض جت و زاویه پخش سوخت به ترتیب در شکل ۲۸ و ۲۹ برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار بررسی شده است.

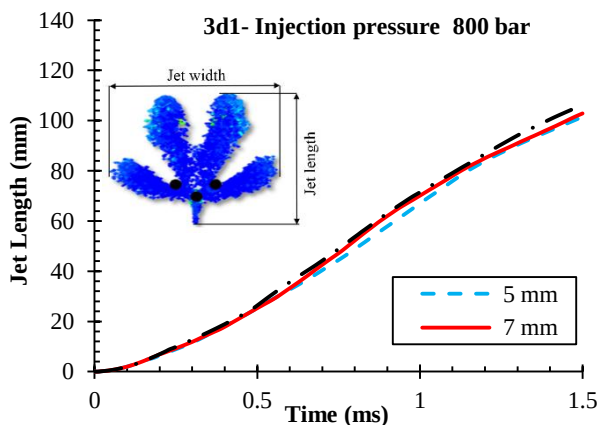


Figure 27- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet length for three cylindrical obstacle with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۷- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی طول جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

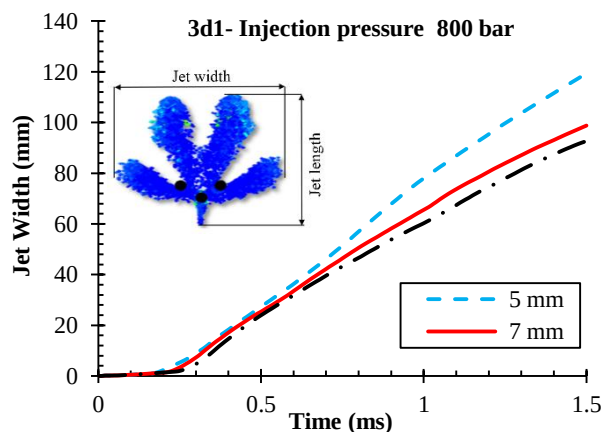


Figure 28- Investigation of the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel jet width for three cylindrical obstacle with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۲۸- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی عرض جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

همان‌طور که در شکل‌های ۲۸ و ۲۹ مشخص است، افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع، سبب کاهش عرض جت و کاهش زاویه پخش سوخت شده است. برای سه مانع به قطر یک میلی‌متر، در یک فاصله ثابت بین نازل و اولین مانع، با افزایش فشار پاشش، زاویه پخش  $\alpha_1$  افزایش و زاویه پخش  $\alpha_2$  کاهش می‌یابد.

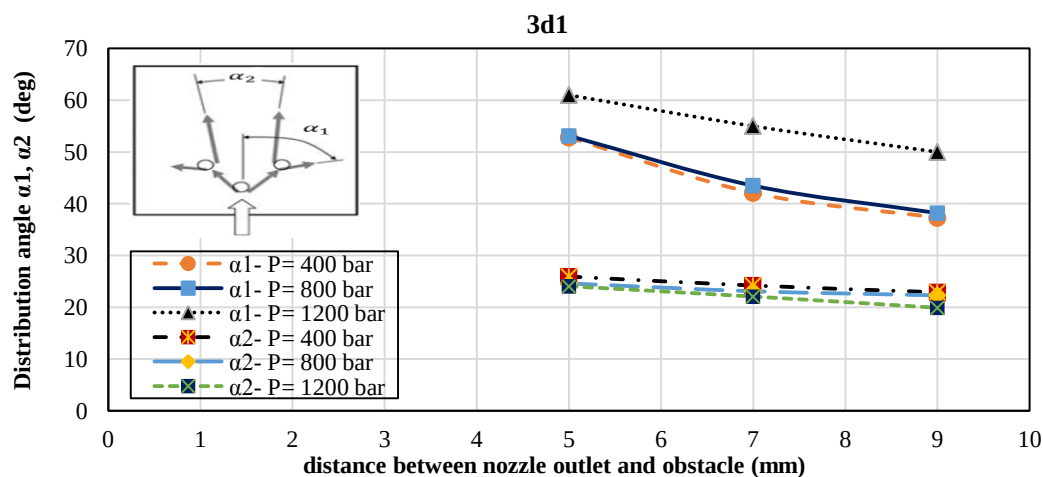


Figure 29- Investigating the effect of the distance between the nozzle outlet and the first obstacle on the fuel distribution angles for three cylindrical obstacle with diameter of 1 mm in different injection pressures

شکل ۲۹- بررسی اثر فاصله بین خروجی نازل و اولین مانع بر روی زوایای پخش سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشارهای پاشش مختلف

### بررسی ساختار هندسی جدید برای موانع استوانه‌ای

در بررسی آزمایشگاهی، برای پخش سوخت در محفظه احتراق به کمک موانع استوانه‌ای، طبق ساختارهای هندسی پیشنهاد شده فاصله بین یک مانع با مانع دیگر دوبرابر قطر موانع لحاظ شده است. در این قسمت، فاصله بین موانع سه‌برابر قطر موانع (۳ میلی‌متر) لحاظ شده تا تفاوت‌های ایجاد شده با حالت قبل بر روی مواردی چون شکل پخش سوخت، زاویه پخش، طول و عرض جت سوخت مورد بررسی قرار گیرد. برای شبیه‌سازی از ساختارهای هندسی شامل سه و هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر استفاده شده است. مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه و فشار پاشش سوخت ۸۰۰ بار اعمال شده است. تأثیر سه‌برابر شدن فاصله بین موانع روی توزیع فضایی سوخت برای ساختارهای مختلف هندسی در شکل ۳۰ به تصویر کشیده شده و با حالتی که فاصله بین موانع دوبرابر قطر است، مقایسه شده است. در شکل ۳۰، تصاویر سمت چپ مربوط به موانع با فاصله ۲ میلی‌متر بین آن‌ها و تصاویر سمت راست مربوط به موانع با فاصله ۳ میلی‌متر بین آن‌هاست.

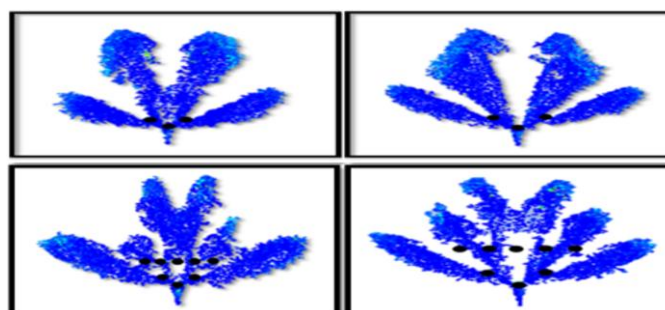


Figure 30 - The effect of increasing the distance between obstacles from 2 mm to 3 mm, on the spatial distribution of fuel for three and eight obstacles with diameter of 1 mm

شکل ۳۰- تأثیر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی توزیع فضایی سوخت برای سه و هشت مانع به قطر ۱ میلی‌متر

شکل‌های ۳۱ تا ۳۴ طول و عرض جت مربوط به ساختارهای مختلف هندسی از موانع استوانه‌ای برای فاصله دوبرابر و سه‌برابر قطر بین موانع را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، برای سه و هشت مانع، با سه‌برابر قطر کردن فاصله بین موانع، طول جت سوخت افزایش و عرض جت سوخت کاهش یافته است. در شکل ۳۵، به بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی زوایای پخش پرداخته شده است. از این شکل دریافت می‌شود که با افزایش فاصله بین موانع برای سه و هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر، زوایای پخش با افزایش همراه شده است.

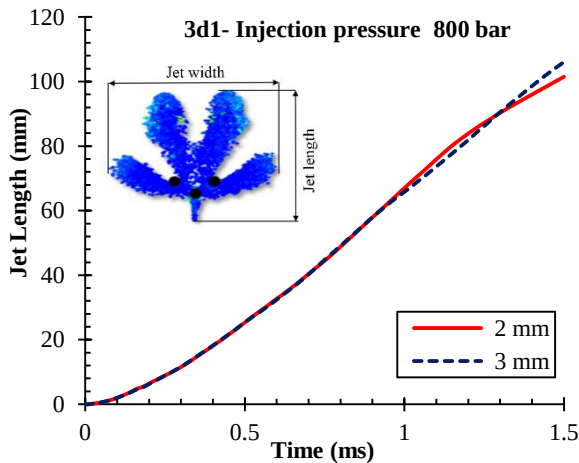


Figure 31 - Investigation of the effect of increasing the distance between obstacles from 2 to 3 mm on the fuel jet length for three cylindrical obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۳۱- بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی طول جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

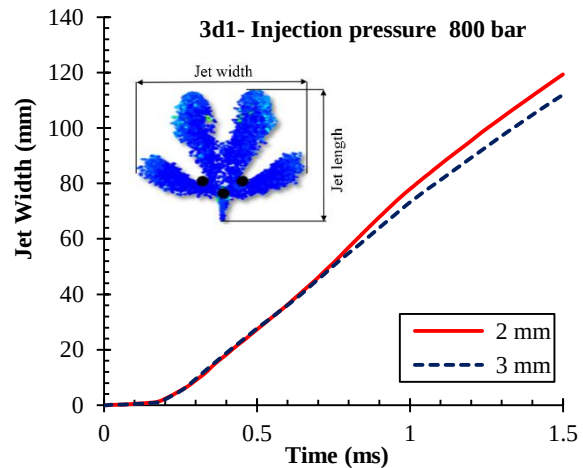


Figure 32 - Investigation of the effect of increasing the distance between obstacles from 2 to 3 mm on the fuel jet width for three cylindrical obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۳۲- بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی عرض جت سوخت برای سه مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

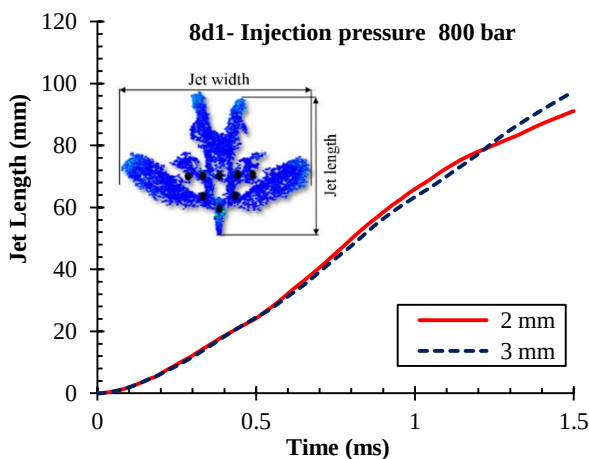


Figure 33 - Investigation of the effect of increasing the distance between obstacles from 2 to 3 mm on the fuel jet length for eight cylindrical obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۳۳- بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی طول جت سوخت برای هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

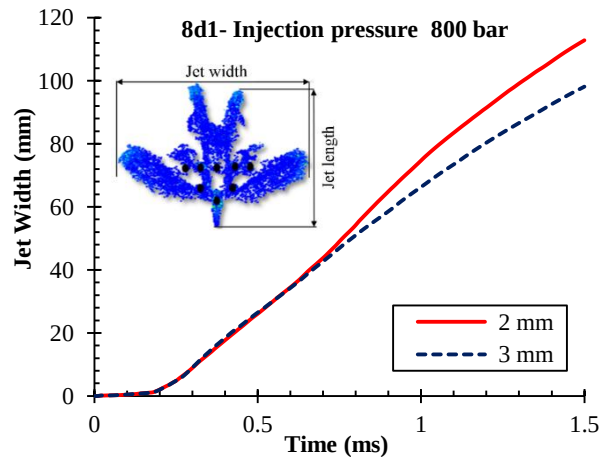


Figure 34 - Investigation of the effect of increasing the distance between obstacles from 2 to 3 mm on the fuel jet width for eight cylindrical obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۳۴- بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی عرض جت سوخت برای هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار



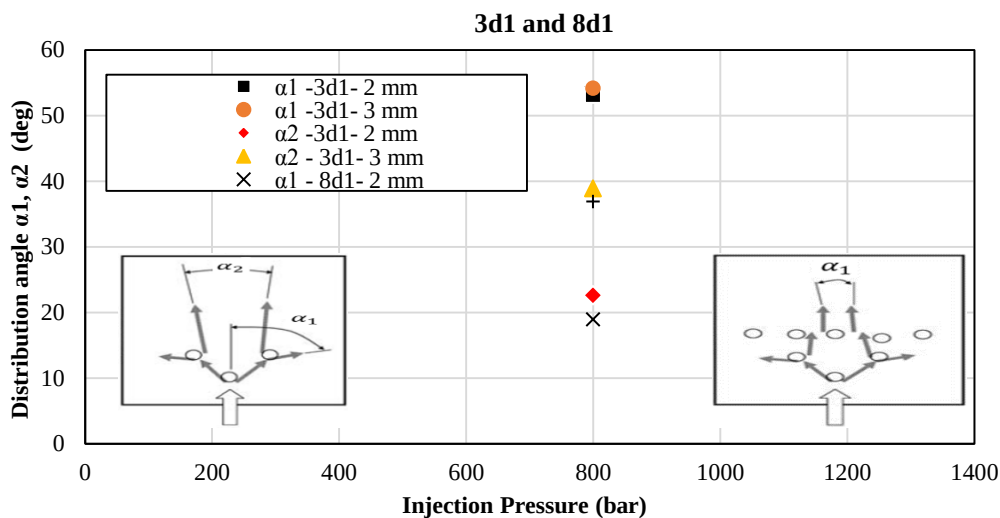


Figure 35 - Investigation of the effect of increasing the distance between obstacles from 2 to 3 mm on the fuel distribution angles for three and eight cylindrical obstacles with diameter of 1 mm at injection pressure of 800 bar

شکل ۳۵- بررسی اثر افزایش فاصله بین موانع از ۲ به ۳ میلی‌متر بر روی زوایای پخش سوخت برای سه و هشت مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر در فشار پاشش ۸۰۰ بار

### پیشنهاد ساختار بهینه برخورد جت و محیط متخلخل برای پیکربندی موانع استوانه‌ای

محیط متخلخل به‌طور کلی الگوی ساختاری خاصی ندارد و این حفره‌ها به‌صورت تصادفی در کنار هم قرار گرفته‌اند (شکل ۳۶-b). در این بخش هدف این است که با ارائه ساختار هندسی توسط موانع استوانه‌ای، محیط متخلخل استفاده‌شده در آزمایشگاه توسط این موانع شبیه‌سازی شود. در شبیه‌سازی از ۱۴ مانع استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر استفاده شده است. برای مقایسه برخورد سوخت با ساختار متخلخل و موانع استوانه‌ای، شکل پخش سوخت در فضای اطراف در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار و ۹۰۰ میکروثانیه بعد از برخورد را می‌توان در شکل ۳۶-b مشاهده کرد. شکل ۳۶-a مربوط به شبیه‌سازی عددی موانع استوانه‌ای و شکل ۳۶-b متعلق به نتایج آزمایشگاهی است. از مقایسه دو تصویر موجود در شکل ۳۶ دریافت می‌شود که با ارائه این ساختار هندسی از موانع می‌توان تا حد زیادی به نتایج پخش سوخت حاصل از برخورد سوخت با محیط متخلخل موجود در آزمایشگاه رسید.

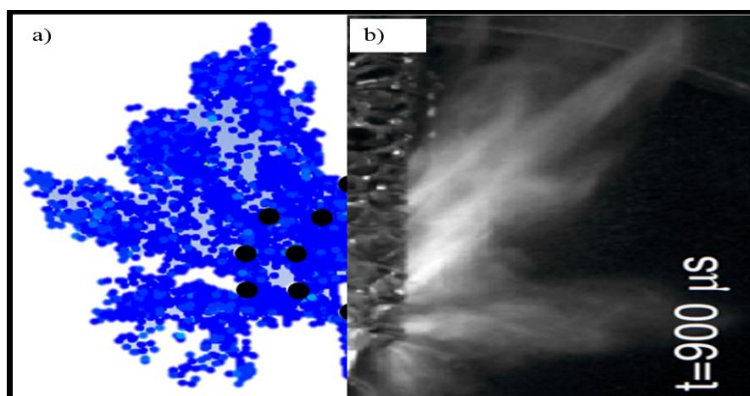


Figure 36 - Comparison of the shape of fuel distribution in the surrounding space due to the impingement of fuel with a) cylindrical obstacles and b) porous structure, at injection pressure of 1200 bar and 900  $\mu$ s after impingement

شکل ۳۶- مقایسه شکل پخش سوخت در فضای اطراف در اثر برخورد سوخت با (a) موانع استوانه‌ای و (b) ساختار متخلخل در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار و ۹۰۰ میکروثانیه بعد از برخورد

## نتیجه گیری

در این مطالعه، شبیه سازی برخورد سوخت مایع با موانع استوانه ای به عنوان محیط متخلخل انجام گرفت و اثر پارامترهای مختلف اعم از تغییر در قطر موانع، فشار پاشش، فاصله بین نازل و اولین مانع و فاصله بین موانع بر روی ساختارهای گوناگونی از موانع استوانه ای بررسی شده و نتایج زیر به دست آمد:

۱- با افزایش قطر موانع برای تمام ساختارهای هندسی، طول نفوذ کاهش و عرض جت و زاویه پخش سوخت افزایش می یابد.

۲- افزایش فشار پاشش برای ساختار یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی متر، سبب افزایش طول و عرض جت سوخت شده و زاویه پخش سوخت را کاهش می دهد.

۳- افزایش فشار پاشش برای ساختار سه مانع به قطر ۱ و ۲ میلی متر، سبب افزایش طول و عرض جت سوخت شده و زاویه پخش  $\alpha_1$  افزایش و زاویه پخش  $\alpha_2$  کاهش می یابد.

۴- برای ساختار یک مانع به قطر ۱ و ۲ میلی متر و ساختار سه مانع به قطر ۱ میلی متر، با افزایش فاصله بین نازل و اولین مانع، طول جت افزایش و عرض جت و زاویه پخش سوخت کاهش می یابد.

۵- برای سه و هشت مانع، با افزایش فاصله بین موانع، طول جت سوخت افزایش و عرض جت سوخت کاهش می یابد.

۶- افزایش فاصله بین موانع برای تمام ساختارهای هندسی، سبب افزایش زاویه پخش سوخت می شود.

۷- بیشترین افزایش زاویه پخش با سه برابر کردن فاصله بین موانع، مربوط به ساختار هندسی هشت مانع استوانه ای است.

۸- ساختار هندسی موانع برای دستیابی به الگوی مناسب پخش سوخت بسیار مهم بوده و به تعداد موانع وابسته نیست.

## منابع

1. M. Polasek and J. Macek, "Homogenization of Combustion in Cylinder of CI Engine using Porous Medium," *SAE Paper*, 2003-01-1085, 2003.
2. M. Weclas, "Homogenization of liquid distribution in space by Diesel jet interaction with porous structures and small obstacles," in *Proceedings of the 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Como, Italy, September 2008.
3. F. Durst and M. Weclas, "A New Concept of I.C Engine with Homogeneous Combustion in a Porous Medium," *Fifth International Symposium on Diagnostic and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, Nagoya, 2001.
4. F. Durst and M. Weclas, "A new type of internal combustion engine based on the porous-medium combustion technique," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 215, No. 1, pp. 63-81, 2001.
5. M. Weclas, B. Ates and V. Vlachovic, "Basic aspects of interaction between a high velocity Diesel jet and a highly porous medium (PM)," *9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems ILASS*, Erlangen, Germany, 2003.
6. M. Weclas, "High velocity CR diesel jet impingement on to porous structure and its utilization for mixture homogenization in I.C. engines," *DITICE Workshop: Drop/wall interaction: Industrial applications*, Experiments and Modeling, Bergamo, Italy, 19 May 2006.
7. M. XIE and Z. ZHAO, "Numerical investigation of the effects of fuel spray type on the interaction of fuel spray and hot porous medium," *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2, No. 1, 2008, pp. 59-65.
8. M. Weclas and R. Faltermeier, "Diesel Jet Impingement on Small Cylindrical Obstacles for Mixture Homogenization by Late Injection Strategy," *Int. J. Engine Res*, 8, 2007, pp. 399-413.
9. M. Weclas, "Non-stationary high velocity jet impingement on small cylindrical obstacles," *Institut für Fahrzeugtechnik (IFZ)*, D-90489 Nuremberg, Germany, 2007.
10. M. Weclas, "Potential of porous-media combustion technology as applied to internal combustion engines," *Journal of Thermodynamics*, Volume 2010, Article ID 789262, 39 pages, doi:10.1155/2010/789262.
11. M. Weclas, J. Cypris, and T. Maksoud, "Diesel spray interaction with highly porous structures for supporting of liquid distribution in space and its vaporization," *AIP Conference Proceedings 4*, American Institute of Physics, Potsdam, Germany 2012.
12. M. Weclas, J. Cypris and P. Weigand, "Diesel spray interaction with a thin porous ring and its contribution to mixture homogenization in IC engine," *26th Annual Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems*, Bremen, Germany, 8-10

- September, 2014.
13. M. Maher, et al., "CFD Modeling of Spray Formation in Diesel Engines," *Athens Journal of Technology and Engineering*, 4, No. 4, pp. 271-294, 2017.
  14. R. Falgenhauer, P. Rambacher, L. Schlier, J. Volkert, N. Travitzky, P. Greil and M. Weclas, "Electrically heated 3D-macro cellular SiC structures for ignition and combustion application," *Applied Thermal Engineering*, 112, 2017, pp. 1557-1565.
  15. R. Muggleton, M. Haghshenasfard and K. Hooman, "Numerical simulation of mixture homogenization through jet impingement on cylindrical obstacles," *Fluid Dynamics Research*, 50, No. 4, 2018, pp. 045515.
  16. C. Baumgarten, *Mixture formation in internal combustion engines*, Springer Science & Business Media, 2006.
  17. H. Mohammadi and et al., "Numerical investigation on the hydrodynamics of the internal flow and spray behavior of diesel fuel in a conical nozzle orifice with the spiral rifling like guides," *Fuel*, 196, 2017, pp. 419-430.

## English Abstract

# Liquid fuel distribution in the combustion chamber by jet impingement with small cylindrical obstacles

Saeed Kazemi Seresht<sup>1\*</sup> and Arash Mohammadi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, kazemi.saeed@sru.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, amohammadi@sru.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2020.06.06., Received in revised form: 2020.08.02, Accepted: 2020.08.19)

Homogenization of lean air-fuel mixture decrease flame front temperature and simultaneously reduces NO<sub>x</sub> and particulate matter. Experimental work has been shown high level of dispersion can be obtained by impingement of diesel jet onto a matrix of cylindrical obstacles in accordance structure close to Porous media. The injected fuel impinges with the first cylindrical obstacle and splits to two smaller jets and with impingement with other obstacles causes to multi-jets formation causes to fuel dispersion. Previous experimental works have been shown geometrical structure and obstacle diameter are of key factors in multi-jet formation and spatial distribution of the charge. This paper develops computational fluid dynamics models that accurately predict the transient multi-jet formation behavior and after validation, new obstacle structures are presented by increasing the distance between them and an improved structure was delivered. The new model shows that these configurations to have improved homogenization characteristics compared to those previously investigated and space distribution is more applicable.

**Keywords:** Diesel spray, Mixture formation, small cylindricals