

# مطالعه عددی اثرات مشخصه‌های انژکتور توربین گاز بر طول نفوذ سوخت مایع

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۶

سعید کاظمی سرشنت<sup>۱\*</sup>، آرش محمدی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، kazemi.saeed@sru.ac.ir

۲. استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران

## چکیده

در این مقاله، انژکتور یک توربین گاز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده است. طول نفوذ انژکتور در شرایط مشخص با نتایج تست آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. سپس، اثرات نوع مدل آشفتگی، پارامترهای پاشش روی طول نفوذ سوخت در اثر تغییر فشار پاشش، زاویه مخروط پاشش، فشار و دمای محفظه احتراق بررسی شده است. مقدار سوخت تبخیر شده در دماهای مختلف و عرض جت سوخت در فشارهای پاشش مختلف به عنوان نوآوری مقاله ارائه شده است. نتایج نشان داد که افزایش فشار پاشش سبب افزایش طول نفوذ و عرض جت سوخت شده و همچنین با بزرگ‌تر شدن زاویه مخروط پاشش و افزایش فشار محفظه احتراق، طول نفوذ کاهش یافته است. با افزایش دمای محیط از ۳۰۰ تا ۴۵۰ کلوین، جرم سوخت تبخیر شده افزایش یافته است. عرض جت سوخت در اثر ۲، ۳، و ۴ برابر شدن فشار پاشش، افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: انژکتور توربین گاز، مشخصه‌های پاشش، طول نفوذ، سوخت مایع

## Numerical Study of the Effects of Gas Turbine Injector Characteristics on the Penetration Length of Liquid Fuel

Saeed Kazemi Seresht<sup>1</sup>, Arash Mohammadi<sup>2</sup>

1. MSc, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, kazemi.saeed@sru.ac.ir

2. Assistant Professor, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran

### Abstract

In the present work, the injector of a gas turbine is simulated using computational fluid dynamics. The penetration length of the injector under certain conditions has been validated by the results of laboratory tests. Then, the effects of turbulence model type, spray parameters on fuel penetration length due to change of spray pressure, spray cone angle, pressure and temperature of the combustion chamber are investigated. The amount of evaporated fuel at different temperatures and the jet width of the fuel at different spray pressures is presented as an innovation of the paper. The results showed that increasing the injection pressure increased the penetration length and jet width of the fuel and also with increasing the spray cone angle and increasing the combustion chamber pressure, the penetration length decreased. With increasing ambient temperature from 300 to 450 K, evaporated mass of the fuel has increased. The jet width of the fuel is increased by 2, 3 and 4 times the spray pressure.

**Keywords:** Gas Turbine Injector, Spray Characteristics, Penetration Length, Liquid Fuel.



## ۱. مقدمه

به دلیل افزایش بی‌رویه آلاینده‌های هوا و قوانین وضع شده برای کنترل آن و به خاطر پیشرفت روزافزون فناوری و تقاضا برای کارایی بیشتر، باید بهبود طراحی تجهیزات مربوط به احتراق سوخت‌های فسیلی در دستور کار قرار گیرد. در میان انواع سوخت‌های جامد، مایع و گازی، سوخت مایع جایگاه ویژه‌ای دارد. با گذر از سوخت‌های جامد و کاربردهای خاص آن، سوخت مایع به دلیل برتری‌هایی چون حمل و نقل و نگهداری ساده‌تر و چگالی انرژی بیشتر نسبت به سوخت گازی، در صنایع حمل و نقل زمینی، دریایی و هوایی کاربردهای وسیعی دارد. جدا از آن، در توربین‌های گازی، بویلرهای صنعتی و بسیاری مصارف دیگر بهترین سوخت، از نوع مایع می‌باشد. طول نفوذ<sup>۱</sup> و عرض جت<sup>۲</sup> سوخت از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تشکیل مخلوط و آلاینده‌های حاصل از احتراق می‌باشند. می‌توان با بهبود پخش سوخت به وسیله تغییر در پارامترهای اثرگذار روی آن، آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت مایع را کاهش داد. هدف از تغییر این پارامترها بررسی تأثیر آن‌ها بر تشکیل مخلوط است. توزیع فضایی سوخت باعث اختلاط سریع قطرات با هوای موجود در محفظه احتراق شده و روند تبخیر را بهبود می‌بخشد، در نتیجه مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده‌ها کاهش می‌یابد.

طول نفوذ و زاویه مخروط<sup>۳</sup> پاشش ویژگی‌های ماکروسکوپی هستند که در بسیاری از پژوهش‌های گذشته بررسی شده‌اند. در سال ۱۹۹۰ هیرویاسو و آری [۱] به‌طور تجربی به بررسی طول نفوذ بر حسب زمان پرداختند و دریافتند که پاشش را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد. در مرحله اول، طول نفوذ با زمان متناسب است و تحت تأثیر چگالی محیط قرار نمی‌گیرد

و در مرحله دوم طول نفوذ با جذر زمان متناسب است [۱]. سیبرس و نابر در سال ۱۹۹۰ [۲] اثر چگالی گاز محیطی روی نفوذ و پراکندگی پاشش دیزل را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که طول نفوذ با افزایش فشار محیط یا چگالی کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۶ و کلاس [۳] پاشش سوخت مایع در هوا به‌عنوان گاز محیطی را مورد مطالعه قرارداد و تغییر طول نفوذ را در فشار پاشش ۸۰۰ و ۱۲۰۰ بار را بررسی کرد. او نتیجه گرفت با افزایش فشار پاشش طول نفوذ افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۷ رویزن و همکاران [۴] تأثیر فشار محیط بر طول نفوذ یک نازل انژکتور را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فشار محیط طول نفوذ سوخت کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۰ سپرت و همکاران [۵] به بررسی تأثیر چگالی محیط بر طول نفوذ سوخت توسط پاشش انژکتور اقدام کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش چگالی محیط از مقدار ۷/۲ به ۱۸ و ۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب، طول نفوذ کاهش یافته است. در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ جینگو ژو و همکاران [۶،۷] تأثیر فشار پاشش سوخت در مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مگا پاسکال و چگالی گاز محیط ۱۱ و ۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فشار پاشش، طول نفوذ افزایش و با افزایش چگالی گاز محیطی در یک فشار پاشش برابر طول نفوذ کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۳ نوروزی و همکاران [۸] مطالعه عددی تأثیر فشار پاشش و دمای محفظه احتراق بر مشخصه‌های جت سوخت که ترکیبی از سوخت دیزل و نرمال بوتانول بود، را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش فشار محفظه احتراق، طول نفوذ سوخت کاهش یافته و با افزایش دمای محفظه احتراق طول نفوذ سوخت افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۵ راجو و همکاران [۹] به بررسی تأثیر فشار پاشش



وزاویه مخروط پاشش در موتور دیزل اقدام کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند با افزایش فشار پاشش و زاویه مخروط پاشش عملکرد موتور بهبود می‌یابد. آن‌ها فشار و زاویه مخروط پاشش بهینه را به ترتیب ۱۰۰۰ بار و ۹ درجه معرفی کرده‌اند. در سال ۲۰۱۵ یوسفی فرد و همکاران [۱۰] اثرات فشار و دمای محفظه احتراق روی مشخصات پاشش سوخت سنگین نفت کوره را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، افزایش فشار محفظه باعث کاهش طول نفوذ پاشش می‌شود. همچنین دمای محیط بیشتر باعث افزایش طول نفوذ پاشش در تمام فشارهای محفظه می‌شود. در سال ۲۰۱۷ ماهر و همکاران [۱۱] مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی تشکیل پاشش را انجام دادند. آن‌ها طول نفوذ را برای فشارهای پاشش ۳۵۰، ۵۰۰ و ۶۵۰ بار بررسی کردند و دریافتند که با افزایش فشار پاشش طول نفوذ سوخت افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۷ نوروزی و همکاران [۱۲] پیش‌بینی طول نفوذ را در شرایط مختلف پاشش و محیط، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. آن‌ها تأثیرات تغییر در فشار پاشش، دمای محیط و فشار محفظه احتراق روی طول نفوذ سوخت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش فشار پاشش و دمای محیط طول نفوذ را افزایش و افزایش فشار محفظه احتراق طول نفوذ را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۷ اندلسر و همکاران [۱۳] اثر فشار پاشش ۴۰، ۷۰ و ۱۴۰ مگاپاسکال و دمای محیط ۵۰۰ و ۷۰۰ کلوین را بر ویژگی‌های پاشش سوخت بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش فشار پاشش و دمای محیط سبب افزایش طول نفوذ می‌گردد. در سال ۲۰۱۹ میشاک هاوی و همکاران [۱۴] تأثیر فشار پاشش و چگالی محیط بر خصوصیات پاشش سوخت‌های دیزل و بیودیزل را بررسی کردند.

مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد افزایش فشار پاشش سبب افزایش طول نفوذ شده و از طرفی افزایش چگالی گاز محیطی، کاهش طول نفوذ سوخت را به همراه دارد. در این تحقیق پاشش یک انژکتور توربین گاز با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت شبیه‌سازی شده است. ابعاد به کار رفته برای محفظه احتراق (۱۵۰×۵۰×۵۰) میلی‌متر است. نازل از نوع کامل مخروطی<sup>۴</sup> و قطر آن ۱۴۱ میکرومتر است. نیروی وارد به قطرات از نوع درگ دینامیکی<sup>۵</sup> و همچنین از مدل کلون هلمهولتز-رایلی تیلور<sup>۶</sup> (KH-RT) به‌عنوان مدل تجزیه استفاده شده است. مدل توربولانسی مورد استفاده،  $k-\epsilon$  می‌باشد. شبیه‌سازی برای فشار پاشش ۱۲۰۰ بار، دمای محفظه احتراق ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کلوین، زاویه مخروط پاشش ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ و ۴۰ درجه و فشار محفظه احتراق ۱، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ بار انجام شده است. در این پژوهش، ابتدا طول نفوذ با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و سپس رفتار طول نفوذ تحت تأثیر تغییر در مدل آشفتگی، زاویه مخروط پاشش، فشار پاشش و فشار و دمای محفظه احتراق به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت بررسی شده است. در انتها جرم سوخت تبخیر شده برای دماهای مختلف محفظه احتراق و عرض جت سوخت در فشارهای پاشش مختلف به‌عنوان نوآوری مقاله بررسی شده است.

## ۲. معادلات حاکم [۱۵]

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

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





در رابطه (۱) چگالی کلی گاز،  $\vec{v}$  بردار سرعت گاز و  $t$  زمان می‌باشد. همچنین فرم کلی معادله مومنتم برای نازل به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

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

در معادله بالا  $p$  فشار استاتیکی و  $\bar{\tau}$  نماد تانسور تنشی  $F$  یک نیروی تماسی به منظور ارتباط تغییر فاز با فاز پیوسته است. در رابطه مومنتم از اثر نیروی گرانشی چشم‌پوشی شده است که علت آن، مقدار ناچیز آن در مقابل مومنتم پاشش است. در این حالت معادله انرژي سیال به صورت رابطه (۳) بیان خواهد شد.

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

عبارت بین کروه‌ها در سمت راست معادله شامل انتقال حرارت ناشی از هدایت، پخش گونه‌ها و تلفات لژی است. همچنین  $T$  دما،  $k_{eff}$  ضریب هدایت گرمایی مؤثر،  $E$  انرژي 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 به صورت مایع است که بعد از تبخیر، به فاز گازی منتقل می‌شود، درجایی که اختلاط رخ می‌دهد. معادله پیوستگی گونه‌های شیمیایی برای جزء  $i$  ام، به صورت 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.

آشفستگی با استفاده از معادله انتقال، برای آشفستگی انرژي جنبشی ( $k$ ) و نرخ اتلاف ( $\epsilon$ )، محاسبه می‌شود. در اینجا مدل استاندارد  $k - \epsilon$  به همراه تابع دیوار سرعت استفاده شده است. در رابطه‌های (۵) و (۶) به ترتیب رابطه استاندارد انرژي جنبشی و نرخ اتلاف آورده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \quad (6)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

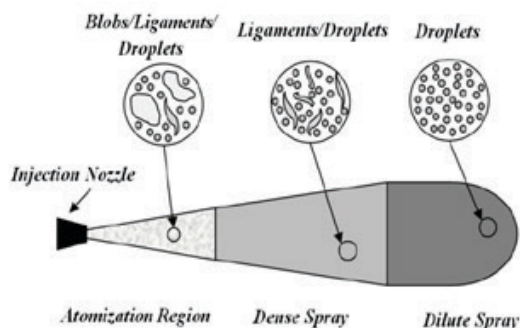
$$+ C_1 \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

از آنجایی که بزرگی نیروهای فشاری و سایر نیروها در مقایسه با نیروهای پسا و گرانشی قابل اغماض است فقط نیروی پسا روی قطره پاشش (شامل مؤلفه‌های فشار و لزجت) برای فروپاشی اولیه و ثانویه پاشش سوخت مایع لحاظ شده است [۱۶]. معادله حرکت قطرات به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

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

$u_p$  و  $u_g$  به ترتیب بیانگر سرعت ذرات و گاز هستند.  $C_D$  ضریب درگ (پسا) قطرات است که تابعی از عدد رینولدز جریان پاشش بوده و با سطح مقطع قطره مرتبط می‌باشد و به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

دارند به عنوان یک بسته، محاسبات را کاهش می دهد [۱۷]. شماتیکی از تشکیل جت مایع با نواحی مختلف تجزیه در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱. طرحی از نواحی مختلف تجزیه یک جت مایع [۱۸]

همان گونه که در شکل ۱ دیده می شود، نخستین ناحیه پس از خروج سوخت از نازل، ناحیه اتمیزاسیون است. انتقال جت سوخت مایع از نازل تا انتهای ناحیه اتمیزاسیون به عنوان تجزیه اولیه<sup>۸</sup> شناخته می شود. جداسازی هسته سوخت مایع به حبابها<sup>۹</sup>، ورقهها<sup>۱۰</sup> و قطرات<sup>۱۱</sup> اولین پدیده در ناحیه اتمیزاسیون است. از سویی دیگر، حبابها به خودی خود، پتانسیل تبدیل شدن به ورقهها را دارند که از آن به عنوان انباشتگیهای مایع پیوسته نام برده میشود. به صورت مشابه، این ظرفیت به صورت طبیعی در ورقهها برای تبدیل شدن به قطرات وجود دارد. تجزیه ثانویه<sup>۱۲</sup> قطرات و ورقهها در ناحیه جت متراکم<sup>۱۳</sup> اتفاق می افتد. مشخصه اصلی این ناحیه حضور فراوان ورقهها به عنوان صفحات مایع غیر کروی و حبابهای مایع که اتمیزه شده اند، می باشد [۱۸]. سرانجام نیز ورقهها و قطرات در ناحیه ای به عنوان ناحیه جت رقیق<sup>۱۴</sup> به قطراتی کوچک تر، تبدیل می گردد. پدیدههای مذکور، به دلیل تأثیر آیرودینامیکی تعامل قطرات با حالت گازی در محفظه احتراق، رخ می دهد. علاوه بر این، متغیرهایی مانند، اندازه نازل، چسبندگی، چگالی سوخت، فشار محفظه و غیره، نقش قابل توجهی

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{1}{6} Re_p^{\frac{2}{3}} \right), & Re_p < 1000 \\ 0.424, & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (۸)$$

در معادله بالا عدد رینولدز قطرات به صورت

$$Re_p = \frac{\rho_g d |u_g - u_p|}{\mu_g}$$

تعریف می شود.

### ۳. مشخصات پاشش سوخت

عملکرد توربین های گاز با کاربرد هوایی تحت تأثیر اتمیزه شدن سوخت و تبخیر آن است.

#### ۳-۱. نازل

به منظور افزایش سرعت تبخیر و سطح تماس قطرات با هوا، سوخت مایع باید به قطرات خیلی کوچک اتمیزه شود. کاهش قطر قطرات، میزان تبخیر آنها را افزایش داده و افزایش همگنی مخلوط تشکیل شده را به همراه خواهد داشت.

#### ۳-۲. جت مایع

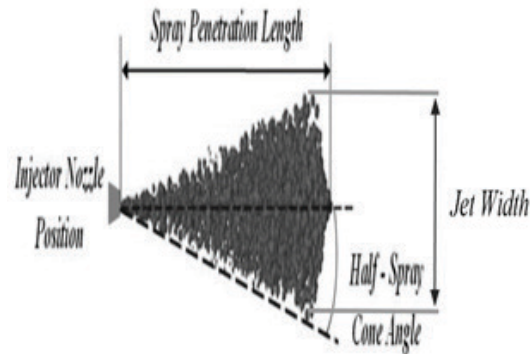
لحظه خروج سوخت از نازل، جت مایع با فشار پاشش، به داخل محیط گازی محفظه احتراق نفوذ می کند. جریان گاز به عنوان فاز پیوسته می باشد و به صورت اوپلری مدل می شود، اما ناحیه نزدیک به پاشش سوخت، به دلیل پاشش قطرات که کسر حجمی آنها کمتر از ۱۰ درصد کسر حجمی فاز گازی می باشد، فاز گسسته ای ایجاد می گردد که برای مدل کردن آن از دیدگاه لاگرانژی استفاده می شود. به دلیل اینکه تعداد زیاد قطرات باعث زیاد شدن تعداد محاسبات و زمان شبیه سازی می شود، استفاده از مدل فاز گسسته<sup>۷</sup> (DPM) محاسبات را بسیار بهینه می کند. مدل DPM با در نظر گرفتن گروهی از قطرات که خواص یکسانی



بر ساختار بدنه جت و فرایند تجزیه آن دارند [۱۸].

### ۳-۳. طول نفوذ، عرض جت و زاویه مخروط پاشش

نفوذ پاشش به معنای توسعه ماکروسکوپی پاشش سوخت است. طول نفوذ [۱] به عنوان فاصله بین لبه جلو پاشش و خروجی نازل و عرض جت به عنوان بیشترین پخش در عرض محفظه احتراق توربین گاز تعریف می شود؛ در حالی که زاویه مخروط [۱۹،۲۰] همیشه به عنوان زاویه بین دو خط مماس لبه جانبی پاشش تعریف می شود. با افزایش اندازه زاویه مخروط پاشش، توزیع سوخت در فضای محفظه احتراق گسترش می یابد. در شکل ۲ طول نفوذ، عرض جت و نصف زاویه مخروط پاشش مشاهده می شود.



شکل ۲. طول نفوذ، عرض جت و نصف زاویه مخروط پاشش [۲۱]

### ۳-۴. مدل تجزیه پاشش

اتمیزاسیون پاشش و تجزیه قطرات پاشش نازل کامل مخروطی، توسط مدل تجزیه ترکیبی کلون هلمهولتز-رایلی تیلور (KH-RT) مدل می شود [۲۲،۲۳]. شکل ۳ مدل تجزیه کلون هلمهولتز-رایلی تیلور برای پاشش نازل کامل مخروطی، در روش تجزیه کلون هلمهولتز-رایلی تیلور را مشخص می کند. مدل تجزیه کلون

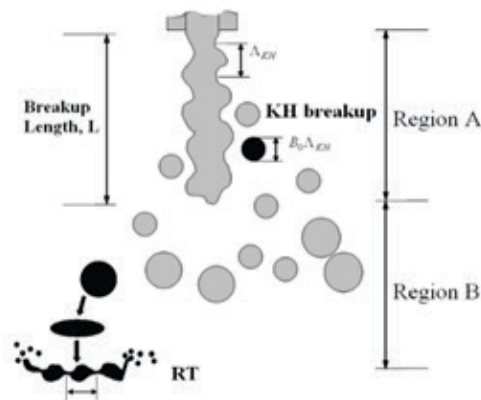
هلمهولتز در یک طول تجزیه مشخص (L)، از خروجی نازل (ناحیه A) استفاده می کند. در ناحیه A حبابها یا ورقههایی از جت مایع نمایان است، اما جت همچنان خود را به عنوان یک هسته مایع متراکم حفظ می کند. خارج از طول تجزیه (ناحیه B)، مدل رایلی تیلور در رابطه با مدل کلون هلمهولتز برای پیش بینی تجزیه ثانویه استفاده می شود [۲۲،۲۴]. نرخ رشد گردابه های کلون هلمهولتز طبق رابطه (۹) بیان می شود:

$$\omega_r = -\frac{2v_1 k^2 \tanh(kh)}{\tanh(kh) + Q} \quad (9)$$

$$+ \frac{\sqrt{4v_1^2 k^4 \tanh^2(kh) - Q^2 U^2 k^2}}{\tanh(kh) + Q}$$

$$+ \sqrt{\frac{-[\tanh(kh) + Q](-QU^2 k^2 + \sigma k^3 / \rho_l)}{\tanh(kh) + Q}}$$

جایی که h ضخامت ورق مایع، k عدد موج، U سرعت و  $Q = \rho_g / \rho_l$  می باشد.

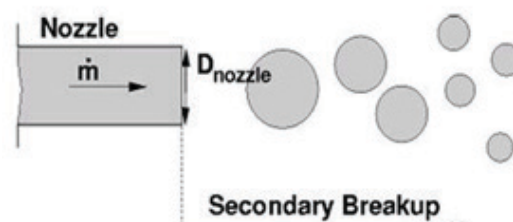


شکل ۳. مدل تجزیه KH-RT برای پاشش نازل کامل مخروطی [۲۲-۲۴]

### ۳-۵. روش حباب<sup>۱۵</sup>

ساده ترین روش برای تعیین شرایط شروع و قطرات اولیه در خروجی سوراخ نازل پاشش مخروطی کامل روش Blob است (شکل ۴). روش Blob بر این فرض استوار است که اتمیزاسیون<sup>۱۶</sup> و فروپاشی قطره در پاشش

نزدیک نازل، فرایند جدایی ناپذیر و غیر قابل تشخیص از هم هستند. در این صورت می توان پاشش قطرات کروی بزرگ با اندازه یکسان را جایگزین شبیه سازی جزئی کرد. قطرات کروی با ابعاد یکنواخت،  $D_p = D_{nozzle}$ ، پاشش می شوند که در معرض تجزیه ثانویه ناشی از نیروی آیرودینامیکی هستند.



شکل ۴. روش Blob [۲۵] و [۲۶]

### ۳-۶. مدل تجزیه KH-RT

مدل KHRT برای شبیه سازی پاشش هایی با عدد وبر بالا طراحی شده و نباید به پاشش های کم فشار اعمال شود. این مدل فرض می کند که یک هسته مایع در منطقه نزدیک نازل وجود دارد. قطرات کوچک از این هسته مایع جدا شده و به خاطر شتاب ناگهانی کنترل می شوند، هنگامی که آن ها به داخل جریان آزاد تزریق شوند، اثر ناپایداری رایلی تیلور نمایان می شود.

### ۳-۶-۱. مدل تجزیه KH

تغییر شعاع قطرات طبق مدل کلون هلمهولتز، با رابطه (۱۰) بیان می شود؛ که در آن،  $\tau$  شعاع قطره قبل از تجزیه و  $\tau_{KH}$  زمان مدل تجزیه می باشد که با رابطه (۱۱) بیان می گردد:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{(r - r_c)}{\tau_{KH}} \quad (10)$$

$$\tau_{KH} = \frac{3.72 B_1 r}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}} \quad (11)$$

$\Omega_{KH}$  و  $\Lambda_{KH}$  به ترتیب بیانگر طول موج و نرخ رشد موج مربوط به موج کلون هلمهولتز می باشند. همچنین ثابت  $B_1$  زمان تجزیه را تصحیح می کند و

مقادیر متنوعی بین ۱۰ تا ۶۰ می باشد. قطره تجزیه می شود تا قطرات جدیدی با شعاع  $r_c$  ایجاد کند. (rc) به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود. ثابت  $B_0$  برابر با ۰/۶۱ می باشد. طول موج و نرخ رشد موج وابسته به مشخصات محلی سیال بوده و به صورت رابطه های (۱۳) و (۱۴) بیان می شوند:

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02 \times r (1 + 0.45 oh^{0.5})}{r_c \bar{B}_0 \Lambda (1 + 0.865 We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (12)$$

$$\times \frac{(1 + 0.4(oh \cdot we_g^{0.5})^{0.7})}{(1 + 0.865 We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (13)$$

$$\Omega_{KH} = \left[ \frac{\rho_l r_0^3}{\sigma} \right]^{-0.5} \times \frac{0.34 + 0.38 We_g^{1.5}}{(1 + oh)(1 + 1.4(oh \cdot we_g^{0.5})^{0.6})} \quad (14)$$

در معادله های بالا،  $We$  عدد وبر و  $Oh$  عدد اهنسگ می باشد.

### ۳-۶-۲. مدل تجزیه RT

همانند مدل کلون هلمهولتز، مدل رایلی-تیلور (RT) مبتنی بر ناپایداری موج روی سطح قطره است. فرکانس سریع ترین موج در حال رشد با رابطه (۱۵) بیان می شود:

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2[-g_t(\rho_p - \rho_g)]^{3/2}}{3\sqrt{3}\sigma(\rho_p + \rho_g)}} \quad (15)$$

$g_t$  شتاب قطرات در جهت حرکت قطره است. تجزیه شدن پس از امواج RT برای یک زمان بزرگ تر از زمان تجزیه ( $\tau_{RT}$ ) افزایش یافته است، زمان تجزیه به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود:

$$\tau_{RT} = \frac{C_\tau}{\Omega_{RT}} \quad (16)$$



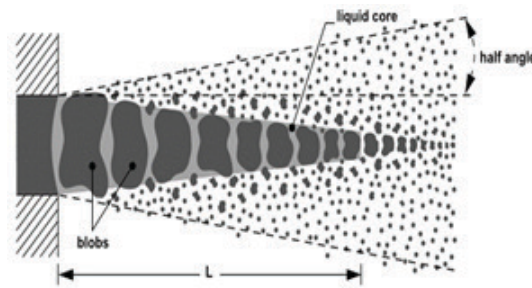
$C_c$  ثابت زمانی تجزیه رایلی تیلور بوده که مقدار پیش فرض آن ۰,۵ می باشد. رشد موج زمانی دنبال می شود که طول موج پیش بینی شده مربوط به نسبت سریع ترین رشد موج،  $2\pi_{CRT} / k_{RT}$  کوچک تر از قطر قطرات محلی است. شعاع قطرات کوچک با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می شود:

$$r_c = \frac{\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (17)$$

$C_{RT}$  ثابت شعاع تجزیه بوده که مقدار پیش فرض آن ۰,۱ است. طول هسته مایع ( $L$ ) با توجه به نظریه لوییچ از رابطه (۱۸) به دست می آید [۲۷]:

$$L = C_L d_o \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (18)$$

جایی که  $C_L$  ثابت مدل لوییچ و  $d_o$  قطر نازل می باشد. در شکل ۵ تقریبی از یک هسته مایع به وسیله حباب‌ها دیده می شود.

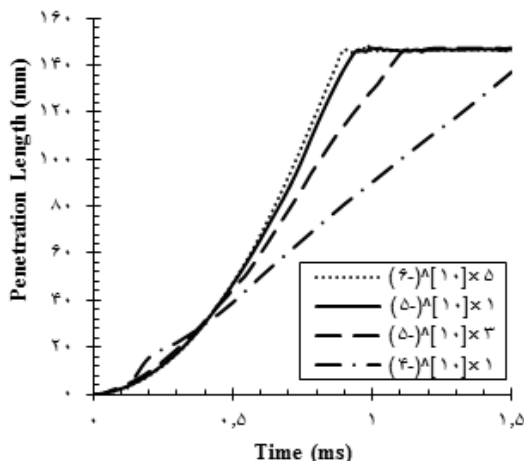


شکل ۵. نمایش تقریبی هسته مایع [۲۲]

#### ۴. بررسی استقلال نتایج از گام زمانی و شبکه محاسباتی

در مسائلی که میدان جریان ناپایا و وابسته به زمان است، باید درستی نتایج به دست آمده، تحت تأثیر گام زمانی و شبکه محاسباتی انتخاب شده آزمایش شود. تعداد شبکه‌های اندک و ناکافی به خطای ناشی از گسسته‌سازی منجر خواهد شد. از طرفی ریز گرفتن بیش از حد آن خطای ماندگار (ناشی از گرد کردن اعداد

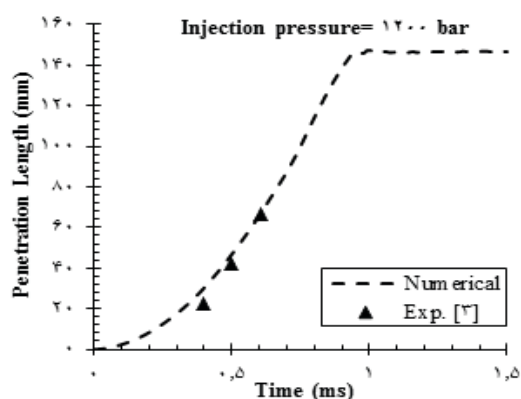
با رایانه) را افزایش می دهد. در این میان، می توان تعداد شبکه کافی برای بهینه کردن خطاها را با ریز کردن تدریجی شبکه تا جایی که بتوان از اثرات شبکه بر حل چشم پوشید، به دست آورد که در آن صورت گفته می شود حل از شبکه مستقل شده است. در این مطالعه به منظور بررسی استقلال حل عددی از گام زمانی و شبکه محاسباتی به ترتیب، ۴ گام زمانی،  $5 \times 10^{-6}$ ،  $3 \times 10^{-5}$ ،  $1 \times 10^{-4}$  و  $1 \times 10^{-5}$  شبکه محاسباتی با تعداد ۳۹۲۷۵۱، ۷۴۶۱۷۲ و ۱۱۱۴۵۶۰ سلول برای زاویه مخروط پاشش ۸ درجه و فشار پاشش ۱۲۰۰ بار در نظر گرفته شده است و تمامی تحلیل‌ها برای انتخاب مناسب ترین گام زمانی و شبکه محاسباتی انجام یافته و باهم مقایسه شده است. مقایسه طول نفوذ پاشش برای گام‌های زمانی و شبکه‌های محاسباتی مختلف در شکل‌های ۶ و ۷ به نمایش درآمده است. با توجه به نتایج شکل‌های ۶ و ۷، گام زمانی  $1 \times 10^{-5}$  و شبکه محاسباتی با تعداد ۱۱۱۴۵۶۰ سلول برای بررسی نتایج انتخاب شده است. برای ورودی محفظه شرط مرزی فشار، جداره محفظه شرط مرزی دیواره و خروجی محفظه به صورت خروجی فشار در نظر گرفته شده است.



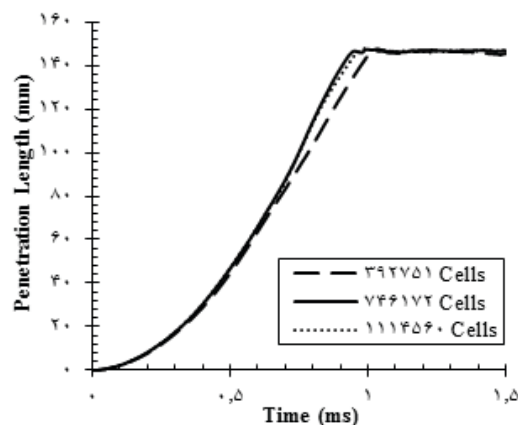
شکل ۶. مقایسه طول نفوذ پاشش برای گام‌های زمانی مختلف



داخل محفظه احتراق حجم ثابت پاشش شده است. مشخصات سوخت دیزل [۲۸] در جدول ۱ آمده است. میدان جریان، ناپایا و وابسته به زمان بوده و مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  استفاده شده است. نرخ جرمی جریان در فشارهای مختلف محفظه احتراق، همانند شکل ۱۰ محاسبه شده است [۲۹]. سپس نرخ جرمی جریان محاسبه شده، به شبیه‌سازی حاضر اعمال شده است. در ابتدا دمای محفظه احتراق ۳۰۰ کلوین، فشار آن ۱ بار و سیال مورد استفاده برای محفظه، هوا (گاز ایده‌آل) انتخاب شده است. محفظه احتراق به شکل مکعب مستطیل همانند شکل ۱۱ می‌باشد. نیروی وارد به قطرات از نوع درگ دینامیکی و مدل استفاده شده برای تجزیه قطرات KHRT می‌باشد. در زیر مدل انتشار آشفستگی<sup>۱۸</sup> برای پیگیری قطرات از مدل ردیابی تصادفی مجزا<sup>۱۹</sup> و ثابت مقیاس زمانی ۰,۱۵ استفاده شده است. طرح‌های<sup>۲۰</sup> گسسته‌سازی برای مومنتوم، آشفستگی انرژی و کسر حجمی از نوع بالادست<sup>۲۱</sup> و برای پیوستگی از نوع تفاضل مرکزی<sup>۲۲</sup> هستند. برای محاسبه مقادیر مرزی از روش برون‌یابی و برای محاسبه ترم‌های مشتق موجود در معادلات از روش حداقل مربعات استفاده شده است. همچنین برای کوپل فشار-مومنتوم از الگوریتم سیمپل<sup>۲۳</sup> استفاده شده است.



شکل ۸. مقایسه طول نفوذ حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت با نتایج تجربی در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار [۳]



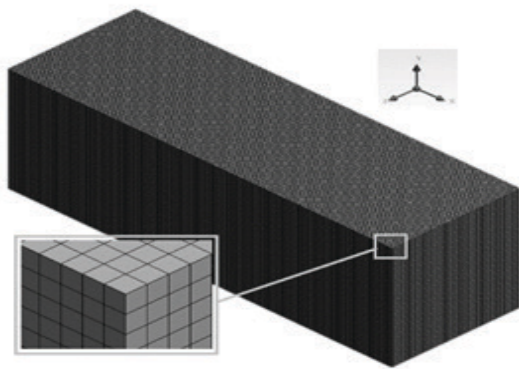
شکل ۷. مقایسه طول نفوذ پاشش برای شبکه‌های محاسباتی مختلف

## ۵. مقایسه نتایج و صحت‌گذاری

برای دستیابی به دقت نتایج به دست آمده، داده‌های عددی برای طول نفوذ پاشش با نتایج تجربی [۳] مقایسه شده است. با توجه به شکل ۸ تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج تجربی وجود دارد. در شکل ۸ فرایند پاشش سوخت مایع در محفظه احتراق برای فشار پاشش ۱۲۰۰ بار، در مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه صورت گرفته و با نتایج تجربی مقایسه شده است [۳]. بیشترین درصد خطا و اختلاف عددی در گزارش طول نفوذ بین مقادیر عددی و تجربی در فشار ۱۲۰۰ بار به ترتیب برابر با ۹ درصد و ۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۹ می‌توان مقایسه شکل پاشش سوخت در محفظه احتراق؛ (a-۹) مربوط به آزمایشگاه، (b-۹) مربوط به شبیه‌سازی در فلوئنت در فشار ۱۲۰۰ بار و مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی‌ثانیه و ۰/۶ میلی‌ثانیه بعد از آغاز پاشش را مشاهده کرد [۳].

## ۶. محفظه احتراق و مشخصات پاشش

در مطالعه حاضر، سوخت دیزل مایع<sup>۱۷</sup> از نازل کامل مخروطی تک سوراخ با قطر ۱۴۱ میکرومتر به

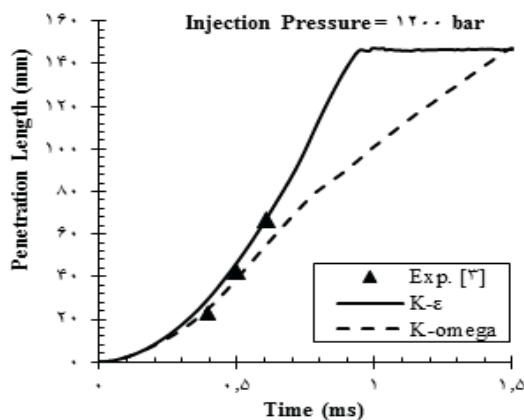


شکل ۱۱. شبکه‌بندی محفظه احتراق

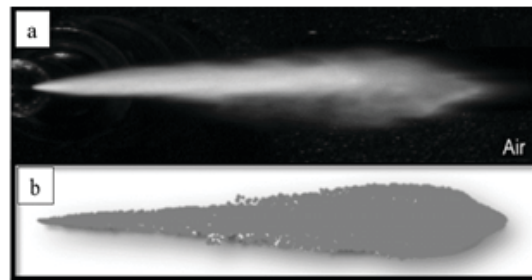
### ۱-۷. بررسی اثر مدل آشفته‌گی بر طول نفوذ سوخت

#### نفوذ سوخت

در شکل ۱۲ اثر مدل آشفته‌گی بر طول نفوذ سوخت برای فشار پاشش ۱۲۰۰ بار بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مدل آشفته‌گی  $k-\epsilon$  نسبت به مدل  $k-\omega$  با نتایج آزمایشگاهی مطابقت بهتری دارد. ماهیت مدل  $k-\epsilon$  به گونه‌ای است که برای جریان‌های با عدد رینولدز بالا و زمانی که در اثر پاشش سرعت سیال تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. مدل  $k-\omega$  نزدیک دیواره و مدل  $k-\epsilon$  دور از دیواره برای حل پارامترهای آشفته‌گی مناسب هستند. بنابراین به خاطر پاشش سوخت در مرکز محفظه احتراق و دور بودن از دیواره، مدل  $k-\epsilon$  پاسخ بهتری به ما ارائه کرده است.



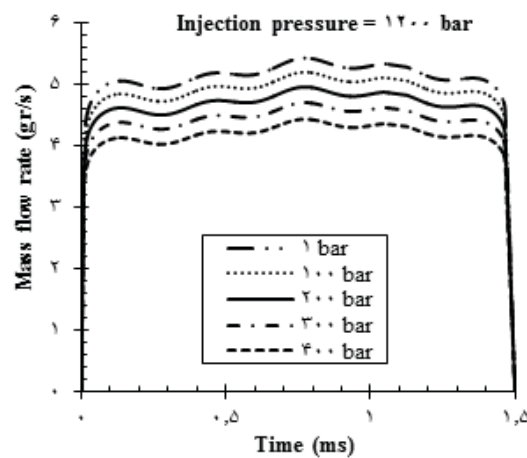
شکل ۱۲. اثر مدل آشفته‌گی بر طول نفوذ سوخت برای فشار پاشش ۱۲۰۰ بار



شکل ۹. مقایسه شکل پاشش سوخت در محفظه احتراق، ۰/۶ میلی‌ثانیه بعد از آغاز پاشش [۳]

### جدول ۱. مشخصات سوخت دیزل [۲۸]

خواص	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	گرمای ویژه ( $\text{J/kg-K}$ )	لزجت ( $\text{kg/m-s}$ )	گرمای نهان ( $\text{J/kg}$ )	دمای تبخیر ( $\text{K}$ )	نقطه جوش ( $\text{K}$ )	تشریحی فشار ( $\text{N/m}$ )
سوخت دیزل	۷۳۰	۲۰۹۰	۰/۰۰۲۴	۲۷۰۰۰	۳۴۱	۴۴۷	۰/۱۶۳۲۵۷



شکل ۱۰. نرخ جرمی جریان در فشارهای مختلف محفظه احتراق [۲۹]

### ۷. نتایج و بحث

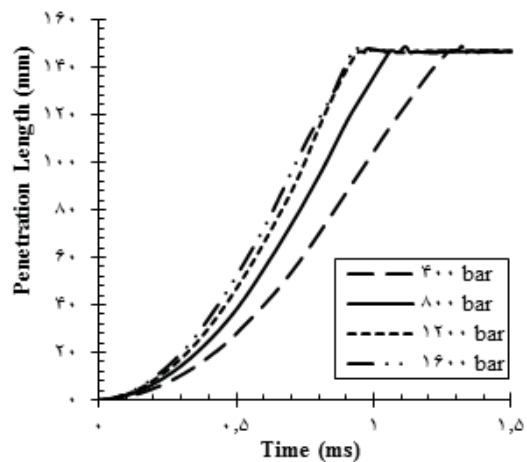
در این بخش اثر مدل آشفته‌گی، فشارهای مختلف پاشش، زاویه مخروط پاشش، فشار و دمای محفظه احتراق، جرم سوخت تبخیر شده روی طول نفوذ سوخت و همچنین فشارهای مختلف پاشش روی پخش عرضی جت سوخت در محفظه احتراق بررسی شده است



## ۲-۷. بررسی اثر فشارهای مختلف پاشش،

### بر طول نفوذ سوخت

شکل ۱۳ طول نفوذ فشارهای پاشش مختلف را در مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی ثانیه نشان می‌دهد. در مورد فشار پاشش سوخت برابر با ۴۰۰ بار، به دلیل اختلاف فشار کم بین فشار پاشش و فشار محفظه احتراق طول نفوذ سوخت از فشارهای پاشش دیگر کمتر است؛ بنابراین با افزایش فشار پاشش طول نفوذ سوخت افزایش می‌یابد. تأثیر چند برابر شدن فشار پاشش بر طول نفوذ سوخت در زمان ۰/۸ میلی ثانیه بعد از آغاز پاشش در جدول ۲ بررسی شده است. از جدول ۲ می‌توان دریافت که با ۲، ۳ و ۴ برابر شدن فشار پاشش، طول نفوذ به ترتیب ۱/۳۶، ۱/۶۵ و ۱/۷۱ برابر می‌شود.



شکل ۱۳. مقایسه طول نفوذ برای فشارهای پاشش مختلف

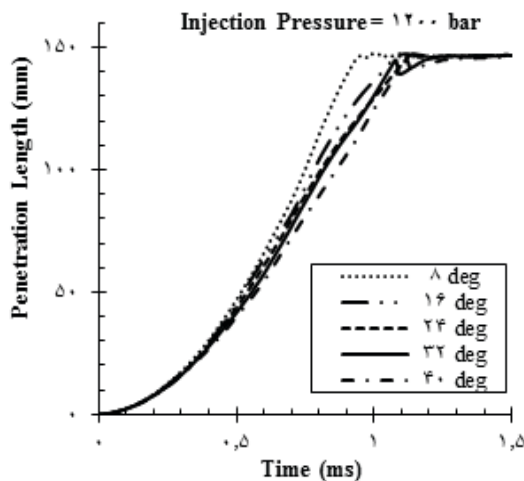
جدول ۲. بررسی تأثیر چند برابر شدن فشار پاشش بر طول نفوذ سوخت

طول نفوذ (mm)	فشار پاشش (bar)	زمان پاشش (ms)
۱/۳۶ برابر	۲×۴۰۰ = ۸۰۰	۰/۸
۱/۶۵ برابر	۳×۴۰۰ = ۱۲۰۰	
۱/۷۱ برابر	۴×۴۰۰ = ۱۶۰۰	

## ۳-۷. بررسی اثر زاویه مخروط پاشش، بر طول

### نفوذ سوخت

در شکل ۱۴ تأثیر زوایای مختلف مخروط پاشش، بر طول نفوذ، در فشار ۱۲۰۰ بار در مدت زمان ۱/۵ میلی ثانیه بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش زاویه پاشش، گستره توزیع قطرات وسیع‌تر شده و طول نفوذ پایین می‌آید. افزایش زاویه مخروط پاشش با اینکه سبب اختلاط بهتر سوخت و هوا در اثر بهبود توزیع فضایی می‌شود، اما در محفظه احتراق نباید زاویه را به اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفت که سوخت به دیواره برخورد کند، زیرا دمای دیوار پایین بوده و سوخت برخورد کرده در فرایند احتراق شرکت نمی‌کند و میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. تأثیر چند برابر شدن زاویه مخروط پاشش بر طول نفوذ سوخت در زمان ۰/۸ میلی ثانیه بعد از آغاز پاشش در جدول ۳ بررسی شده است. از جدول ۳ می‌توان دریافت که با ۲، ۳، ۴ و ۵ برابر شدن زاویه مخروط پاشش، طول نفوذ به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۸۵، ۰/۸۴ و ۰/۷۸ برابر می‌شود.



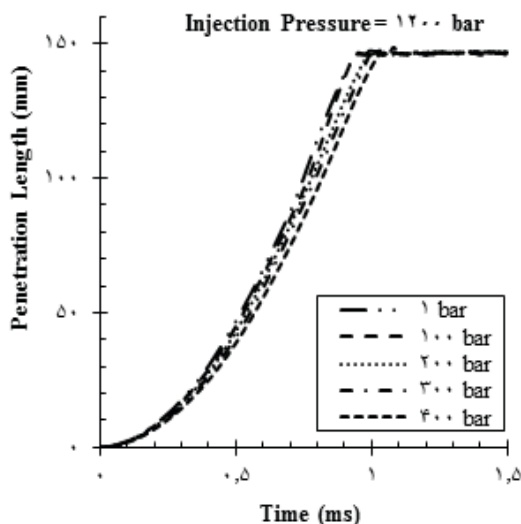
شکل ۱۴. مقایسه طول نفوذ برای زوایای مختلف پاشش در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار



جدول ۳. بررسی تأثیر چند برابر شدن زاویه مخروط پاشش بر طول نفوذ سوخت

طول نفوذ (mm)	زاویه مخروط پاشش (deg)	زمان پاشش (ms)
۰/۹۱ برابری	$2 \times 8 = 16$	۰/۸
۰/۸۵ برابری	$2 \times 8 = 24$	
۰/۸۴ برابری	$4 \times 8 = 32$	
۰/۷۸ برابری	$5 \times 8 = 40$	

است. این در حالی است که فشار محفظه به صورت یک موج حاوی شوک و نیروی مقاومت آیرودینامیکی بر مشخصه‌های جت و به خصوص طول نفوذ جت، تأثیر می‌گذارد. از طرف دیگر، مشخصه‌های فیزیکی سوخت پاشش شده، متأثر از دمای محیطی است. چگونگی تأثیرگذاری دمای محیطی بدین صورت است که با تغییر مشخصه‌های فیزیکی سوخت، مشخصه‌های جت در طی فرایند پاشش تغییر می‌یابد. در شکل ۱۷ تأثیر دمای محفظه احتراق بر طول نفوذ پاشش در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار و ۱/۵ میلی ثانیه بعد از آغاز پاشش به نمایش درآمده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که، طول نفوذ سوخت با افزایش دمای محیطی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، کاهش چگالی محیط گازی محفظه احتراق به عنوان نیروی آیرودینامیکی مقاوم در برابر نفوذ جت سوخت در داخل محفظه احتراق، می‌باشد. از طرف دیگر، به دلیل افزایش تأثیر فشرده‌سازی در اثر افزایش دما بر جت سوخت، طول نفوذ جت در دمای گرم‌تر افزایش یافته است.



شکل ۱۵. مقایسه طول نفوذ برای فشارهای مختلف محفظه احتراق، در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار

۴-۷. بررسی اثر فشار محفظه احتراق بر طول نفوذ سوخت

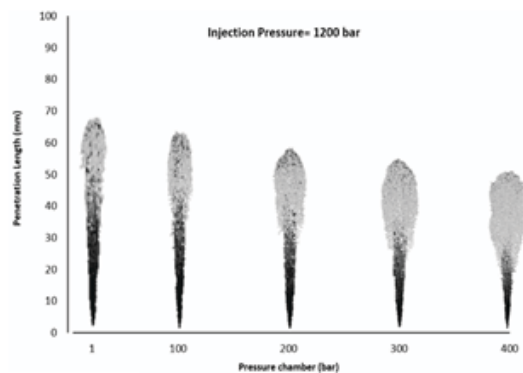
یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر طول نفوذ، فشار محفظه احتراق است که در شکل ۱۵ تغییرات طول نفوذ برای فشارهای مختلف محفظه احتراق، در فشار ۱۲۰۰ بار و مدت زمان پاشش ۱/۵ میلی ثانیه بررسی شده است. شکل ۱۶ طول نفوذ سوخت در فشارهای مختلف محفظه احتراق را در زمان ۰/۶ میلی ثانیه به تصویر کشیده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش فشار محفظه سرعت پاشش کم شده و تغییرات زمانی طول نفوذ جت، به دلیل افزایش نیروی درگ (در اثر افزایش چگالی هوا)، کاهش یافته است. تأثیر چند برابر شدن فشار محفظه احتراق بر طول نفوذ سوخت در زمان ۰/۸ میلی ثانیه بعد از آغاز پاشش در جدول ۴ بررسی شده است. از جدول ۴ می‌توان دریافت که با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ برابر شدن فشار محفظه احتراق، طول نفوذ به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۱، ۰/۸۸ و ۰/۸۴ برابر می‌شود.

۵-۷. بررسی اثر دمای محفظه احتراق، بر طول نفوذ سوخت

تأثیرگذاری فشار محفظه بر مشخصه‌های جت سوخت با تأثیر دمای محیطی بر این مشخصه‌ها، متفاوت



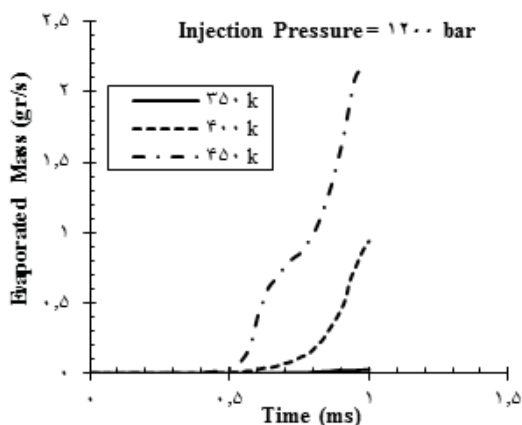
نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ابتدای پاشش، به دلیل مقادیر بالای قطر متوسط قطرات، تبخیر سوخت بسیار ناچیز و تقریباً برابر با صفر است، اما با افزایش دمای محفظه احتراق، ریز سازی جت مایع و فروپاشی حباب‌ها بیشتر شده، در نتیجه تبخیر سوخت پاشش شده، بیشتر می‌شود. جدول ۵ اثر افزایش دمای محفظه احتراق بر جرم سوخت تبخیر شده را در زمان ۰/۸ میلی‌ثانیه بعد از آغاز پاشش نشان می‌دهد. از جدول ۵ دریافت می‌شود که با تغییر دما از ۳۰۰ به ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کلوین، جرم سوخت تبخیر شده به ترتیب از مقدار صفر به مقادیر ۰/۰۰۷۲، ۰/۱۶۷ و ۰/۹۹ گرم بر ثانیه افزایش یافته است.



شکل ۱۶. ساختار جت سوخت مایع در فشار ۱۲۰۰ بار و زمان ۰/۶ میلی‌ثانیه پس از آغاز پاشش برای فشارهای مختلف محفظه احتراق

جدول ۴. بررسی تأثیر چند برابر شدن فشار محفظه احتراق بر طول نفوذ سوخت

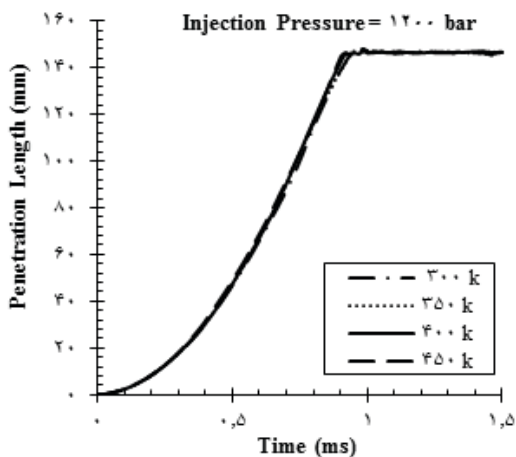
طول نفوذ (mm)	فشار محفظه (bar)	زمان پاشش (ms)
۰/۹۵ برابر	۱۰۰	۰/۸
۰/۹۱ برابر	۲۰۰	
۰/۸۸ برابر	۳۰۰	
۰/۸۴ برابر	۴۰۰	



شکل ۱۸. مقایسه جرم سوخت تبخیر شده برای دماهای مختلف محفظه احتراق در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار

جدول ۵. بررسی تأثیر افزایش دمای محفظه احتراق بر جرم سوخت تبخیر شده

زمان پاشش (ms)	دمای محفظه احتراق (K)	جرم سوخت تبخیر شده (gr/s)
۰/۸	۳۰۰	۰
	۳۵۰	۰/۰۰۷۲
	۴۰۰	۰/۱۶۷
	۴۵۰	۰/۹۹



شکل ۱۷. مقایسه طول نفوذ برای دماهای مختلف محفظه احتراق در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار

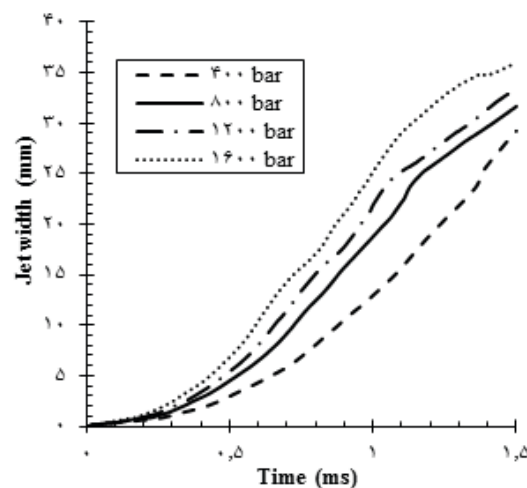
#### ۶-۷. بررسی جرم سوخت تبخیر شده

شکل ۱۸ تبخیر سوخت پاشیده شده را در برابر زمان پاشش برای دماهای مختلف در فشار پاشش ۱۲۰۰ بار



## ۷-۷. بررسی اثر فشارهای مختلف پاشش بر پخش عرضی جت سوخت در محفظه احتراق توربین گاز

پخش سوخت در محفظه احتراق برای ایجاد مخلوط همگنی از سوخت و هوا بسیار مؤثر است. عرض جت به پخش عرضی جت سوخت پاشش شده در محفظه احتراق اطلاق می‌شود. توزیع فضایی سوخت در محفظه روند تبخیر را بهبود می‌بخشد، در نتیجه مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده‌ها کاهش می‌یابد. شکل ۱۹ نشان‌دهنده پخش عرضی جت سوخت در محفظه احتراق می‌باشد که در فشارهای مختلف پاشش بررسی شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش فشار پاشش، پخش عرضی جت سوخت افزایش می‌یابد. تأثیر چند برابر شدن فشار پاشش بر عرض جت سوخت در زمان  $0/8$  میلی‌ثانیه بعد از آغاز پاشش در جدول ۶ بررسی شده است. از جدول ۶ می‌توان دریافت که با ۲، ۳ و ۴ برابر شدن فشار پاشش، عرض جت به ترتیب  $1/55$ ،  $1/87$  و  $2/12$  برابر می‌شود.



شکل ۱۹. مقایسه عرض جت سوخت برای فشارهای مختلف پاشش

جدول ۶. بررسی تأثیر چند برابر شدن فشار پاشش بر عرض جت سوخت

عرض جت (mm)	فشار پاشش (bar)	زمان پاشش (ms)
۱/۵۵ برابر	$2 \times 400 = 800$	۰/۸
۱/۸۷ برابر	$3 \times 400 = 1200$	
۲/۱۲ برابر	$4 \times 400 = 1600$	

## ۸. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر پارامترهای پاشش بر طول نفوذ سوخت مایع با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت بررسی شده است. برای این کار از نازل کامل مخروطی با زاویه مخروط پاشش ۸ درجه، فشار پاشش ۱۲۰۰ بار، فشار محفظه ۱ بار و دمای ۳۰۰ کلوین استفاده شده است. سایر شرایط عملکردی ثابت بوده و فقط چهار پارامتر ذکر شده، تغییر کرده است. با بررسی تأثیر پارامترهای پاشش روی طول نفوذ نتایج زیر به دست آمده است:

۱. مدل آشفتگی کا-اِپسیلون برای مدل‌سازی طول نفوذ سوخت مناسب‌تر است؛
۲. با افزایش فشار پاشش از ۴۰۰ بار به ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ بار، طول نفوذ سوخت افزایش می‌یابد؛
۳. ۲، ۳، ۴ و ۵ برابر شدن زاویه مخروط پاشش، طول نفوذ سوخت را کاهش می‌دهد؛
۴. با افزایش فشار محفظه احتراق از ۱۰۰ بار تا ۴۰۰ بار، طول نفوذ سوخت در زمان  $0/8$  میلی‌ثانیه، حدود  $0/1$  برابر کاهش می‌یابد؛
۵. افزایش دمای محفظه احتراق از ۳۰۰ کلوین به ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کلوین موجب افزایش طول نفوذ سوخت می‌شود؛
۶. با افزایش دمای محیط، جرم سوخت تبخیر شده

افزایش می‌یابد؛

## ۱۱. مآخذ

- [1] H. Hiroyasu and M. Arai, Structures of fuel sprays in diesel engines, SAE transactions, p. 1050-1061, 1990.
- [2] J.D. Naber and D.L. Siebers, Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays, SAE transactions, p. 82-111, 1996.
- [3] M. Weclas, Some fundamental observations on the diesel jet destruction and spatial distribution in highly porous structures, Journal of porous media, 2008. 11(2).
- [4] I. Roisman, L. Araneo, and C. Tropea, Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray, International journal of multiphase flow, 33(8): p. 904-920, 2007.
- [5] V. Sepret, et al., Effect of ambient density and orifice diameter on gas entrainment by a single-hole diesel spray, Experiments in fluids, 49(6): p. 1293-1305, 2010.
- [6] J. Zhu, O.A. Kuti, and K. Nishida, Effects of Injection Pressure and Ambient Gas Density on Fuel-Ambient Gas Mixing and Combustion Characteristics of DI Diesel Spray, SAE Technical Paper, 2011.
- [7] J. Zhu, O.A. Kuti, and K. Nishida, An investigation of the effects of fuel injection pressure, ambient gas density and nozzle hole diameter on surrounding gas flow of a single diesel spray by the laser-induced fluorescence-particle image velocimetry technique, International Journal of Engine Research, 14(6): p. 630-645, 2013.
- [8] H. Nowruzi, P. Ghadimi, and S. Mirsalim, Numerical study of effect of ambient backpressure and temperature on spray characteristics of heavy fuel oil/n-butanol blend, The Journal of Engine Research, 31(31): p. 43-53, 2013. (فارسی)
- [9] V. Raju and S.S. Rao, Effect of fuel injection pressure and spray cone angle in DI diesel engine using CONVERGETM CFD code, Procedia Engineering, 127: p. 295-300, 2015.

۷. افزایش فشار پاشش، موجب افزایش پخش عرضی جت سوخت می‌شود. ۴ برابر شدن فشار پاشش، عرض جت را بیش از ۲ برابر افزایش می‌دهد.

## ۹. علائم اختصاری

علائم انگلیسی

d قطر، m  
u سرعت، m/s  
r شعاع قطرات، m  
Z عدد آهنسبرگ  
Ta عدد تیلور  
We عدد وبر

علائم یونانی

$\rho$  چگالی،  $kg/m^3$   
 $\sigma$  تنش سطحی، N/m  
 $\mu$  لزجت سینماتیکی، kg/m.s

زیرنویس

eff مؤثر  
D درگ  
p قطرات  
g گاز  
KH کلون هلمهولتز  
RT رایلی تیلور  
l مایع

## ۱۰. پی‌نوشت

1. Penetration Length
2. Jet Width
3. Cone Angle
4. Solid Cone
5. Dynamic Drag
6. Kelvin Helmholtz Rayleigh Taylor
7. Discrete Phase Model
8. Primary breakup
9. Blobs
10. Ligaments
11. Droplets
12. Secondary breakup
13. Dense spray
14. Dilute spray
15. Blob Method
16. Atomize
17. Diesel Liquid
18. Turbulent Dispersion
19. Discrete random walk model
20. Scheme
21. Upwind
22. Central differencing
23. Simple



- [20] R. Klein-Douwel, et al. Gas density and rail pressure effects on diesel spray penetration from a heavy-duty common rail injector, in Proceedings of the 6th International Symposium: Towards Clean Diesel Engines, Italy, 2007.
- [21] H. Nowruzi, P. Ghadimi, and M. Yousefifard, A numerical study of spray characteristics in medium speed engine fueled by different HFO/n-butanol blends, International Journal of Chemical Engineering, 2014.
- [22] J.C. Beale and R.D. Reitz, Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model, Atomization and sprays, 1999.
- [23] T. Su, et al., Experimental and numerical studies of high pressure multiple injection sprays, SAE transactions, p. 1281-1292, 1996.
- [24] Y. Wang, H.-W. Ge, and R.D. Reitz, Validation of mesh-and timestep-independent spray models for multi-dimensional engine CFD simulation, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 3(1): p. 277-302, 2010.
- [25] R.D. Reitz. and R. Diwakar, Effect of drop breakup on fuel sprays, SAE transactions, p. 218-227, 1986.
- [26] R.D. Reitz and R. Diwakar, Structure of high-pressure fuel sprays, SAE transactions, p. 492-509, 1987.
- [27] V.G.e. Levich, Physicochemical hydrodynamics, 1962.
- [28] ANSYS, ANSYS FLUENT, User's Manual, Release 19.1, 2019.
- [29] CMT-Motores Térmicos. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n 46022 Valencia (Spain) Getting here, Web: <https://www.cmt.upv.es/>.
- [10] M. Yousefifard, P. Ghadimi, and H. Nowruzi, Numerical investigation of the effects of chamber backpressure on HFO spray characteristics, International Journal of Automotive Technology, 16(2): p. 339-349, 2015. (in Persian فارسی)
- [11] M. Maher, et al., CFD Modeling of Spray Formation in Diesel Engines, Athens Journal of Technology and Engineering, 2017.
- [12] H. Nowruzi, et al., Prediction of impinging spray penetration and cone angle under different injection and ambient conditions by means of CFD and ANNs, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39(10): p. 3863-3880, 2017.
- [13] A.R. Andsaler, et al. The effect of nozzle diameter, injection pressure and ambient temperature on spray characteristics in diesel engine, in Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing, 2017.
- [14] M. Hawi, et al., Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels, Fuel, 254: p. 115674, 2019.
- [15] C. Baumgarten, Mixture formation in internal combustion engines, 2006.
- [16] H. Mohammadi, 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: p. 419-430, 2017.
- [17] B.K. Kim, et al., Modeling of water-spray application in the forced dispersion of LNG vapor cloud using a combined eulerian-lagrangian approach, Industrial & engineering chemistry research, 51(42): p. 13803-13814, 2012.
- [18] X. Jiang, et al., Physical modelling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays, Progress in energy and combustion science, 36(2): p. 131-167, 2010.
- [19] R. Klein-Douwel, et al., Gas density and rail pressure effects on diesel spray growth from a heavy-duty common rail injector, Energy & Fuels, 23(4): p. 1832-1842, 2009.

