

مطالعه عددی نقش شکل تاج سمبه و محل شمع در عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای با پاشش مستقیم گاز طبیعی فشرده

بیژن یداللهی^۱ و مسعود برومند^۲

۱- دکترای مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مخاطب)، Byadollahi@aut.ac.ir

۲- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، Boromand@aut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۰/۲۸، پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۶)

در این تحقیق، یک مدل عددی در نرم‌افزار فایر (Fire) برای مطالعه احتراق و پاشش سوخت در استوانه (Cylinder) یک نمونه موتور اشتعال جرقه‌ای با پاشش مستقیم گاز طبیعی فشرده استفاده شده است. تحقیق به دو بخش مختلف تقسیم شده است. در بخش اول، پاشش سوخت گازی از طریق یک افشانه تک‌سوراخه در پنج نوع هندسه مختلف برای محفظه احتراق مطالعه شده و خواص پاشش سوخت در این حالت‌ها به دست آمده است. با استفاده از تحلیل‌های کمی و کیفی در مورد شکل مناسب محفظه احتراق برای کارکرد موتور در حالت پاشش مستقیم بحث شده و در انتها بهترین شکل هندسه انتخاب شده است. در بخش دوم، با استفاده از هندسه انتخاب شده بر روی زمان‌بندی جرقه و محل شمع، به‌عنوان دو متغیر بسیار مهم، مطالعات احتراقی صورت گرفته است. پنج حالت مختلف برای قرارگیری شمع در نظر گرفته شده و ایده استفاده از دو شمع نیز بررسی شده است. بهترین نتایج احتراقی مربوط به حالتی بوده که در آن از دو شمع استفاده شده است. در پایان، با در نظر گرفتن بهترین محل برای شمع، اثر زمان‌بندی جرقه نیز مطالعه شده است. نتایج حل احتراق نشان می‌دهد، برای بهترین خواص احتراقی، جرقه می‌بایست در ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا صورت گیرد.

کلیدواژگان: پاشش مستقیم، گاز طبیعی فشرده، اشتعال جرقه، هندسه محفظه احتراق، مدل‌سازی عددی

مقدمه

در حالت کلی، میدان جریان در داخل استوانه موتورهای پاشش مستقیم خیلی پیچیده است. چنین وضعیتی در موتورهای با سوخت گازی پیچیدگی بیشتری دارد. درحقیقت آماده‌سازی مخلوط با سوخت‌های گازی، به دلیل چگالی پایین آن نسبت به سوخت‌های مایع، بسیار دشوارتر است، زیرا حتی فشارهای بسیار بالای پاشش گاز باعث نفوذ اندکی شده و بنابراین مخلوط به‌دست آمده کیفیت بالایی نخواهد داشت. به همین دلیل، ایجاد یک مخلوط مناسب در موتورهای گازی نسبت به موتورهای بنزینی وابستگی بیشتری به میدان جریان داخل سیلندر دارد [۱].

برای بهبود میزان نفوذ سوخت گازی به داخل استوانه، فشارهای بسیار بالایی در حد ۲۰۰ بار برای خط سوخت استفاده می‌شود. چنین فشار بالایی میزان اغتشاش و بنابراین اختلاط کلی را افزایش می‌دهد. نسبت فشار بالا بین خط سوخت و فضای داخل استوانه جریان در خروجی افشانه را فرومنبسط^۱ می‌کند. این امر بدین معناست که جریان در خروجی نازل صوتی شده و یک مجموعه پیچیده از امواج ضربه‌ای-انبساطی را در پایین‌دست خروجی افشانه تشکیل می‌دهد.

نشان داده شده است که شکل پیچیده جریان، در نواحی نزدیک به خروجی افشانه، تأثیر مستقیم و بسیار قوی‌ای بر روی شکل فواره و تشکیل مخلوط در پایین‌دست نازل دارد [۲]. هوانگ و همکاران یک مجموعه مطالعات تجربی را بر روی مشخصات

1. Underexpanded

پاشش سوخت و احتراق گاز طبیعی انجام دادند [۳-۶]. در این مطالعات، اثر متغیرهای پاشش سوخت و احتراق، از جمله زمان بندی پاشش سوخت و جرقه، با استفاده از یک دستگاه تراکم سریع و یک موتور با سوخت گازی مطالعه شده و مقادیر بهینه این زمان ها در موتور مورد استفاده مشخص شده اند.

مدل سازی عددی جریان در موتورهای گازسوز بر روی چالش های مختلف مدل سازی متمرکز شده است. مدل سازی چندبعدی با تمرکز بر مدل سازی توربولانس در مراجع [۷] تا [۹] با تعیین ضرایب مناسب مدل RNG k-ε برای پاشش سوخت گازی انجام شده، و در مراجع [۷]، [۱۰] و [۱۱] نیز، با استفاده از مدل های تجربی و عددی، شبیه سازی پاشش سوخت به داخل محفظه صورت گرفته و مشخصات انواع فواره های سوخت ارائه شده است.

لی و همکاران، با استفاده از مدل سازی دوبعدی جریان و روش مشخصه ها، پاشش فرومنبسط گازی را به داخل استوانه یک موتور با قطر سمبه^۲ بزرگ مطالعه کردند [۲]. در این مطالعه، گزارش شده است که متغیرهای اصلی تعیین کننده مشخصات جریان خروجی از یک نازل صوتی نسبت فشار بین دو سر افشانه و هندسه نازل اند. در این مرجع بیان شده است که محاسبه دقیق جریان در خروجی نازل از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است، زیرا اختلاط در پایین دست نازل توسط آن کنترل می شود. در مراجع [۲]، [۱۱] و [۱۲] تعداد سلول های محاسباتی مورد نیاز در خروجی نازل مورد بحث قرار گرفته است. در این مطالعات گزارش شده که برای گرفتن دقیق شکل جریان در نواحی نزدیک نازل حداقل ۱۰ لایه سلول در عرض نازل مورد نیاز است.

اولت و همکاران [۱۱] پاشش توربولنت و گذرای گاز طبیعی و هوا به داخل یک محفظه با حجم ثابت را مطالعه کردند. در تحقیق آن ها، مدل سازی چندبعدی به همراه تست های تجربی، برای مطالعه فواره های صوتی و زیرصوتی خروجی از یک نازل ساده، در یک محفظه با حجم ثابت، مورد استفاده قرار گرفته است. کد محاسباتی کیوا برای انجام مدل سازی عددی استفاده شده و شکل فواره و میزان نفوذ آن در حالت های مختلف ارائه شده است و نشان داده شده است که شکل و میزان نفوذ فواره های صوتی و زیرصوتی تفاوت اساسی با هم دارند؛ به گونه ای که فواره صوتی در خروجی نازل الگوی جریان بسیار پیچیده تری را نشان می دهد.

در مراجع [۱۰]، [۱۳] و [۱۴] به جای محاسبات دقیق جریان در داخل افشانه از یک ایده نازل مجازی استفاده شده است. در این حالت ها، شرایط مرزی ورودی در محل رخ دادن دیسک ماخ واقع در خروجی نازل تعیین شده و تمام فضای داخل افشانه از مدل عددی حذف می شود. این روش باعث کاهش زیادی در تعداد سلول های محاسباتی مورد استفاده در مدل می شود، اما به هندسه های خاصی از نازل ها محدود است. همچنین میزان دقیق کمیت های جریان باید در محل دیسک ماخ مشخص شده و مهم تر از آن باید اطلاعات دقیقی در مورد اندازه و محل دیسک ماخ در دست باشد.

در مرجع [۱]، برای کاهش تعداد سلول های محاسباتی مورد استفاده، از ایده قطرات فرضی گاز در مدل سازی توسط نرم افزار کوئیک سیم استفاده شده است. در این روش، قطرات فرضی سوخت (به صورت سوخت مایع) با همان مشخصات سوخت گازی و با گرمای نهان صفر در نظر گرفته شده و از یک مدل پاشش سوخت مایع برای انجام محاسبات پاشش سوخت گازی استفاده شده است. روش فوق نیاز به ریزسازی شبکه محاسباتی در نزدیکی خروجی نازل را به شدت کاهش می دهد. همچنین، در مرجع [۱۵]، برای محاسبات ناحیه نزدیک به نازل، به جهت کاهش تعداد سلول های محاسباتی میدان، از یک مدل مفهومی در کنار کد کیوا استفاده شده است.

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه پاشش سوخت گازی در موتورهای پاشش مستقیم، می توان نتیجه گرفت که دقیق ترین روش برای حل عددی، در نظر گرفتن فضای داخل افشانه در محاسبات است. چنین روشی در مراجع [۱۶] تا [۱۹] به کار رفته است. در مرجع [۱۶]، یک روش مدل سازی چندبعدی در نرم افزار استار سی دی^۳ اعمال شده است. یک افشانه

2. Piston
3. STAR-CD

بازشونده به بیرون با قرارگیری در مرکز استوانه استفاده شده و پاشش سوخت و اختلاط در چند نمونه هندسه مختلف برای محفظه احتراق مطالعه شده است. در تحقیق اشاره شده، همچنین پاشش سوخت در یک موتور تک استوانه تحقیقاتی مطالعه شده و ترکیب بهینه‌ای برای هندسه محفظه احتراق موتور پاشش مستقیم معرفی شده است.

شکل هندسه محفظه احتراق یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین نقش‌ها را در عملکرد کلی موتورهای پاشش مستقیم داراست. دلیل این امر وابستگی بسیار بالا و تأثیرپذیری شدید جریان داخل استوانه نسبت به شکل هندسه محفظه است. از آنجایی که ایده پاشش مستقیم سوخت در موتورهای گازسوز اشتعال جرقه اخیراً مطرح شده است، اطلاعات چندانی در مورد فیزیک جریان در این موتورها در دست نیست. به‌ویژه در مورد تأثیر شکل هندسه بر روی تشکیل مخلوط در داخل مطالعات زیادی انجام نشده است. بنابراین، نیاز به بررسی دقیق‌تر تأثیر هندسه محفظه احتراق بر روی تشکیل مخلوط در داخل استوانه به خوبی احساس می‌شود.

مدل‌سازی پاشش سوخت به داخل استوانه در موتورهای پاشش مستقیم گاز طبیعی فشرده با استفاده از نرم‌افزار فایر در مطالعات پیشین نویسندگان بررسی شده است [۱۹، ۱۸]. در این مطالعات، در کنار مدل‌سازی‌های مربوط به اعتبارسنجی، تأثیر متغیرهای پاشش، هندسه تاج سمبه، نوع افشانه و دور موتور در حالت‌های مختلف بررسی شده است. در این مطالعات بررسی تبدیل یک موتور بنزینی به پاشش مستقیم گاز طبیعی با حداقل تغییرات ممکن مد نظر قرار گرفته است. در اولین بخش از کار، مدل‌سازی چندبعدی فرایند پاشش گذرای سوخت، اختلاط و میدان جریان انجام شده است. در این زمینه، تأثیر چند هندسه مختلف برای تاج سمبه بر روی شکل جریان و فواره ایجادشده توسط دو نوع افشانه مختلف بررسی شده و ترکیب مناسب هندسه محفظه احتراق با انجام تحلیل‌های کمی و کیفی مشخص شده است.

تحقیق حاضر بر روی مدل‌سازی پاشش و احتراق در این موتورها تمرکز یافته است. برای انجام مدل‌سازی‌ها از یک افشانه تک‌سوراخه با سوزن بازشونده به داخل، که در مرکز استوانه قرار گرفته، استفاده شده است. برای دستیابی به مصرف سوخت پایین‌تر، همان‌گونه که در مراجع [۱] و [۱۶] اشاره شده، در مدل‌سازی‌ها قصد بر اعمال شرایط برای ایجاد بار چینه‌ای^۴ بوده است.

مطالعه در دو بخش انجام شده است. بخش اول شامل مدل‌سازی پاشش سوخت به داخل استوانه با هدف دستیابی به یک بار چینه‌ای است. بر مبنای اطلاعات ارائه شده در مرجع [۱۶]، مقادیر $0/8$ و $1/4$ برای متغیر نسبت هوا به سوخت، به‌عنوان محدوده‌های اشتعال‌پذیری مخلوط در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر تضمین‌کننده وجود احتراق پایدار در داخل استوانه‌اند. مخلوط در نسبت‌های هوا به سوخت بیرون از این محدوده خیلی فقیر یا غنی خواهد بود. پنج شکل مختلف برای هندسه محفظه احتراق در نظر گرفته شده و پاشش سوخت و تهیه مخلوط در هر حالت مطالعه شده است. بر مبنای مقایسه‌های کمی و کیفی، بهترین شکل هندسه برای کارکرد در حالت پاشش مستقیم گازی انتخاب شده است.

در قسمت دوم، با استفاده از شکل هندسه انتخاب شده در قسمت قبل، مطالعات احتراقی انجام شده است. اثر محل شمع و زمان جرقه بر روی خواص احتراقی موتور پاشش مستقیم گاز طبیعی بررسی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده بر روی محل مناسب برای شمع و زمان مناسب برای جرقه‌زدن در مجموعه هندسی مد نظر بحث شده است.

توسعه مدل عددی

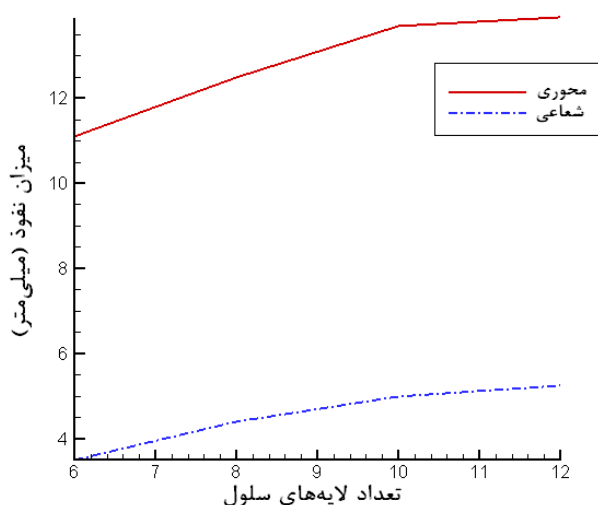
گرفتن جزئیات جریان در داخل نازل افشانه هزینه محاسباتی بالایی دارد. دلیل این امر در تفاوت مقیاس طولی بین نازل افشانه و قطر استوانه نهفته است. این تفاوت مقیاس می‌تواند در حد 1000 برابر باشد. افشانه‌های گاز طبیعی عموماً قطری کمتر از یک میلی‌متر دارند. یکی از مهم‌ترین متغیرهای تعیین‌کننده در دقت مدل عددی برای گرفتن پدیده‌های مختلف جریان تعداد

4. Stratified Charge

گره‌های محاسباتی در عرض چنین نازل کوچکی است. برای بررسی اثر تعداد گره‌های محاسباتی در عرض نازل، مطالعه کیودی و همکاران [۱]، به دلیل تشابه وضعیت آن با شرایط واقعی پاشش سوخت به داخل استوانه در موتورهای پاشش مستقیم، در نظر گرفته شده است. چند مدل عددی با تعداد متفاوتی از گره‌های محاسباتی در عرض نازل تولید شده و پاشش سوخت در این هندسه‌ها مدل شده است. شرایط مدل‌سازی در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل عددی مورد نظر در نرم‌افزار فایر تولید شده و پاشش گاز متان به داخل محفظه مدل شده است. نتایج به‌دست آمده برای نفوذ فواره در ۰/۰۰۰۱ ثانیه پس از آغاز پاشش سوخت برحسب تعداد گره‌های محاسباتی در شکل ۱ رسم شده است. دلیل بررسی نفوذ در این گام زمانی تأثیر شدید تعداد گره‌های محاسباتی در عرض نازل بر روی جریان در این ناحیه و همچنین شکل پیچیده جریان در نواحی نزدیک به خروجی نازل است.

جدول ۱- شرایط پاشش سوخت [۱]

سوخت پاشش شده	متان
سیال داخل محفظه	هوا
فشار خط سوخت	۸ بار
فشار محفظه	۱ بار
دمای محفظه	۳۰۰ کلوین
مدت پاشش	۱۰ میلی‌ثانیه
دبی جرمی سوخت	۲۷۰ میلی‌گرم بر ثانیه



شکل ۱- تغییرات نفوذ فواره در راستای شعاعی و محوری با تغییر تعداد گره‌های محاسباتی در عرض نازل

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نفوذ فواره با افزایش تعداد لایه‌های سلول افزایش می‌یابد، اما افزایش تعداد لایه‌ها به بیش از ۱۰ لایه تأثیر چندانی بر روی میزان نفوذ به‌دست آمده ندارد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که ۱۰ لایه سلول محاسباتی در عرض نازل برای به‌دست آوردن نتایج مستقل از شبکه کفایت می‌کند که با نتایج مرجع [۲] نیز همخوانی دارد. همان‌گونه که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، پاشش مستقیم سوخت گازی به داخل استوانه چالش‌های زیادی دربر دارد. از طرفی فشار مورد استفاده برای پاشش می‌بایست بسیار بالا باشد و از طرف دیگر قطر مورد استفاده در نازل افشانه‌ها بسیار کوچک است. این امر باعث پدید آمدن شکل پیچیده‌ای از جریان در خروجی نازل می‌شود، که گرفتن تمامی این پدیده‌ها در

حل عددی کار دشواری است. وجود چنین چالش‌هایی در حل معمول بوده و بنابراین می‌بایست با انجام تست‌های اعتبارسنجی قابلیت مدل عددی را در حل مسایل پاشش مستقیم گازی سنجید.

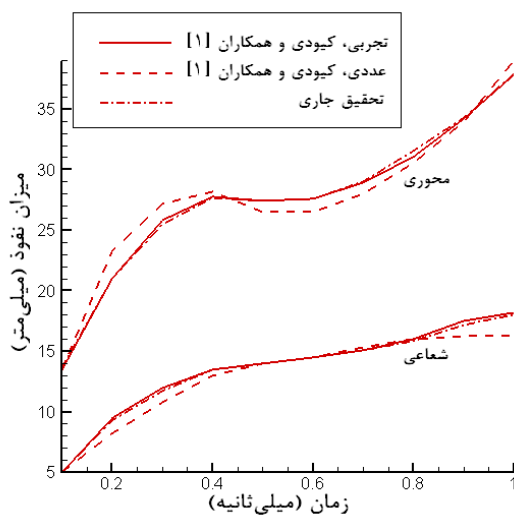
اعتبارسنجی نتایج

دو مسئله اعتبارسنجی در این تحقیق ارائه شده است. این مسائل شامل پاشش متان در شرایط مشابه با موتور واقعی بر مبنای اطلاعات ارائه شده در مرجع [۱] و همچنین مطالعه اولت [۱۱] با پاشش گاز متان به داخل یک محفظه با حجم ثابت با افشانه قرار گرفته در مرکزند. شرایط مدل‌سازی در این حالت‌ها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند. مدل عددی برای هر حالت در نرم‌افزار فایر تولید شده و مدل‌سازی پاشش سوخت متان به همراه حل میدان جریان در هر حالت انجام شده است. حالت اول، به دلیل پاشش کاملاً متغیر با زمان، شرایط نزدیک‌تری به موتور پاشش مستقیم گازسوز نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن حرکت سوزن افشانه در زمان پاشش سوخت، مدل عددی باید قادر به گرفتن امواج فشاری به شدت گذرا در داخل افشانه و استوانه باشد. اعمال جابه‌جایی سوزن افشانه با سرعت بالا و تأثیرات متغیر آن بر روی جریان در داخل افشانه نیازمند توانایی بالای مدل عددی برای انجام محاسبات داخل سیلندر است. اثر حرکت سوزن افشانه در این حالت با استفاده از شرایط مرزی متغیر با زمان در مدل عددی اعمال شده است.

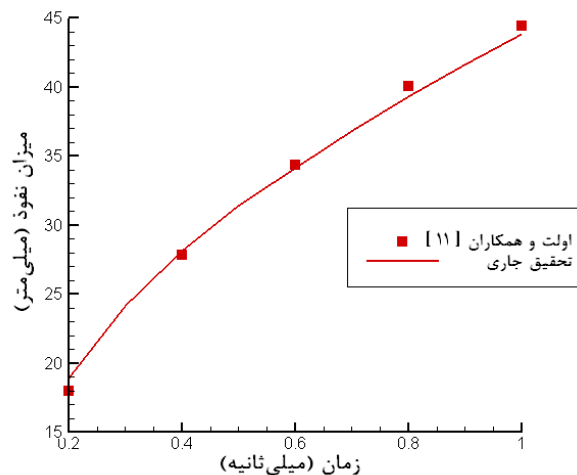
شکل ۲ نشان‌دهنده مقایسه‌ای میان میزان نفوذ جت در راستای محور افشانه برای حالات مختلف اعتبارسنجی است.

جدول ۲- شرایط پاشش سوخت برای دومین مسئله اعتبارسنجی [۱۱]

ابعاد محفظه	شعاع: ۲۰ میلی‌متر، طول: ۹۰ میلی‌متر
فشار و دمای پاشش	۱۵۰ بار و ۳۵۰ کلوین
فشار و دمای محفظه	۵۰ بار و ۸۵۰ کلوین
دمای دیواره	۴۵۰ کلوین
قطر نازل	۰/۵ میلی‌متر
سوخت پاشش شده	۳/۵ میلی گرم
میزان اغتشاش	۱/۵ متر مربع بر مجذور ثانیه



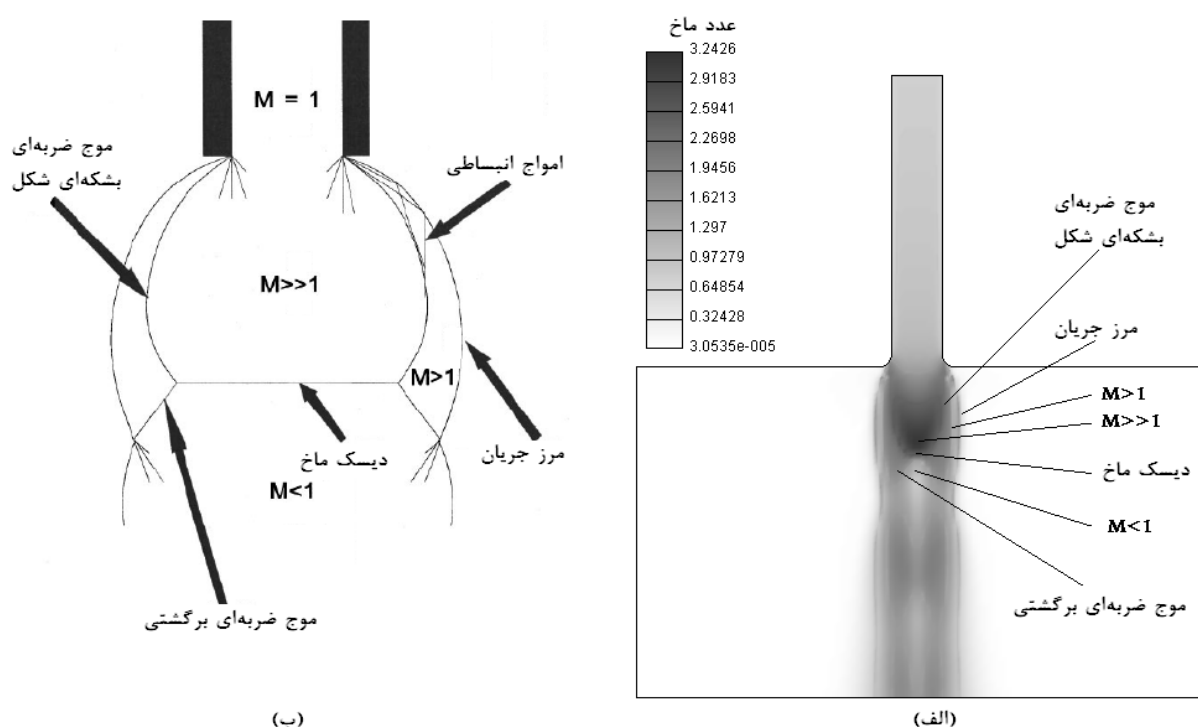
(ب)



(الف)

شکل ۲- مقایسه نفوذ فواره برای مسائل مختلف اعتبارسنجی، الف: مسئله اول، ب: مسئله دوم

همان‌طور که دیده می‌شود، در هر دو حالت همخوانی عالی بین نتایج وجود دارد. این امر بیانگر توانایی مدل عددی مورد استفاده در محاسبات در پیش‌گویی پدیده‌های جریان است. بررسی دقیق‌تر میدان جریان در این حالت‌ها نتایج جالب توجه دیگری را نیز نشان می‌دهد. تصویری از شکل میدان جریان در نزدیکی نازل افشانه برای مسئله دوم اعتبارسنجی در شکل ۳(الف) نشان داده شده است. الگوی پیچیده جریان به‌خوبی در این شکل مشاهده می‌شود. عدد ماخ در خروج از نازل حدود ۱/۰ و حداکثر میزان آن حدود ۳/۲۴ در حدود یک میلی‌متر پایین‌دست خروجی نازل است. همچنین الگوی جریان به‌دست آمده با الگوی ارائه‌شده توسط اولت و همکاران [۱۱]، که در شکل ۳(ب) نشان داده شده است، تطابق دارد. اطلاعات تکمیلی در مورد اعتبارسنجی و بررسی استقلال از شبکه در مدل عددی مورد استفاده در مطالعات پیشین نویسندگان [۱۸،۱۹] منتشر شده است.



شکل ۳- الگوی جریان در حالت فرومنبسط، الف: میدان محاسبه شده، ب: نمایش گرافیکی [۱۱]

مطالعه تأثیر شکل تاج سمبه بر روی تشکیل مخلوط

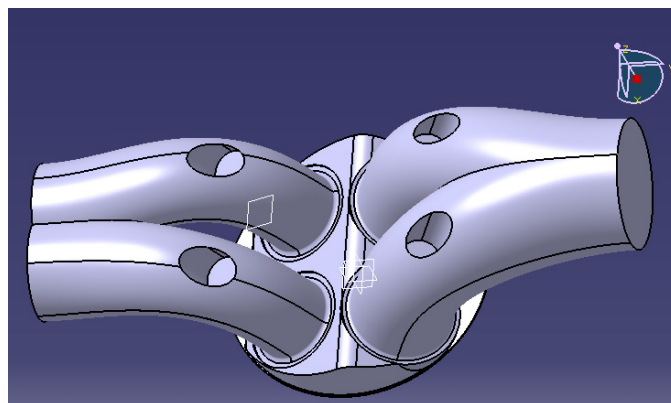
هندسه محفظه احتراق نقشی اساسی در تعیین مشخصات موتور پاشش مستقیم دارد. در این میان شکل تاج سمبه به‌نوعی بیش‌ترین سهم را داراست. بر این مبنا یک نمونه موتور تجاری موجود به‌عنوان موتور مینا برای انجام مدل‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است. با استراتژی کمترین تغییرات بر روی این موتور اصلاحاتی انجام شده و هدف تبدیل آن به یک موتور پاشش مستقیم است. در جدول ۳ مشخصات اصلی این موتور ارائه شده است. شکل ۴ نیز نمایی از هندسه موتور مینا نشان می‌دهد. هدف اصلی، اصلاح این هندسه و تبدیل آن برای کاربرد در حالت پاشش مستقیم بوده است.

مدل عددی اعتبارسنجی شده برای شبیه‌سازی پاشش مستقیم گاز متان به درون استوانه یک موتور با هندسه‌های مختلف محفظه احتراق به‌کار رفته است. برای این مطالعه، براساس اطلاعات موجود در مراجع، اثر پنج شکل مختلف تاج سمبه بر روی کیفیت و توزیع مخلوط سوخت و هوا در داخل استوانه بررسی شده است. یک افشانه تک‌سوراخه با سوزن بازشونده به

داخل و با قرارگیری در مرکز استوانه برای همه حالت‌ها در نظر گرفته شده است. در این قسمت هدف تعیین هندسه مناسب برای تاج سمبه بوده است.

جدول ۳- مشخصات اصلی موتور مینا

قطر	۸۳ میلی‌متر
کورس	۸۱/۴ میلی‌متر
حجم جابه‌جایی	۴۴۰ سانتی‌متر مکعب بر استوانه
طول میله رابط	۱۵۰/۱۵ میلی‌متر
نسبت تراکم	۹/۵

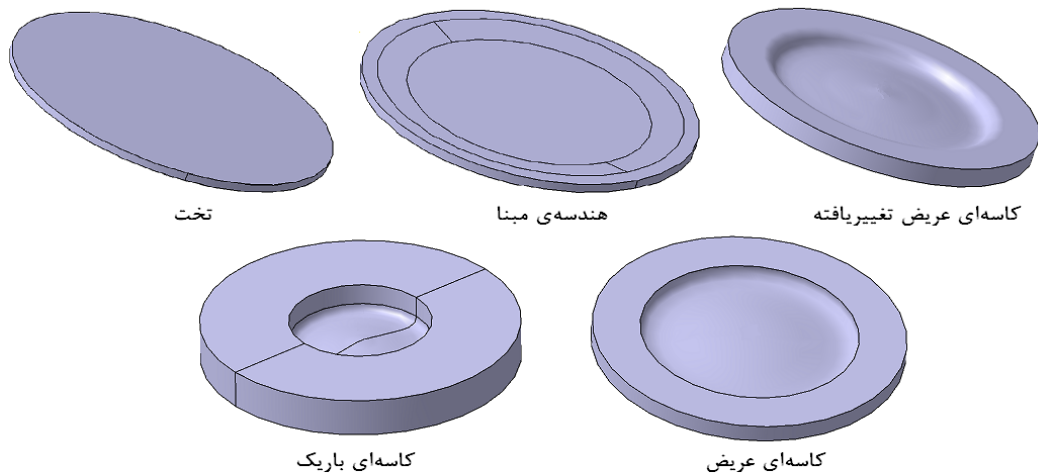


شکل ۴- نمایی از هندسه موتور مینا

جدول ۴ مشخصات هندسه‌های در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. تصویر هندسه‌های مورد نظر نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر شکل تاج سمبه بر روی تشکیل مخلوط در داخل استوانه، مشابه با مراجع [۱۴] و [۱۶]، مدل‌سازی تنها در سیکل بسته موتور، یعنی زمان بین بسته‌شدن دریچه هوا تا بازشدن دریچه دود، انجام شده است. برای این که تمرکز تنها بر روی هندسه تاج سمبه باشد، هندسه بستار برای همه حالت‌ها به صورت تخت در نظر گرفته شده است. نسبت تراکم نیز برای همه حالت‌ها برابر با نسبت تراکم موتور مینا، یعنی ۹/۵ است. مقدار کل سوخت پاشش شده به داخل استوانه به گونه‌ای انتخاب شده که مخلوط نهایی فقیری را ایجاد کند. افشانه و استوانه هم‌محور در نظر گرفته شده‌اند. تأثیر جابه‌جایی سوزن افشانه با اعمال شرایط مرزی متغیر لحاظ شده است؛ به گونه‌ای که بیشینه مقدار دبی جرمی در ۲۰۰۰ دور بر دقیقه برابر با ۲/۱۰ گرم بر ثانیه است. شرایط دما و فشار داخل استوانه در ابتدای محاسبات شرایط استاندارد محیط فرض شده است. شرط اولیه میدان سرعت برای تمامی حالت‌ها نیز برابر با صفر در نظر گرفته شده است. دور موتور نیز برای همه حالت‌ها برابر با ۲۰۰۰ دور بر دقیقه بوده است.

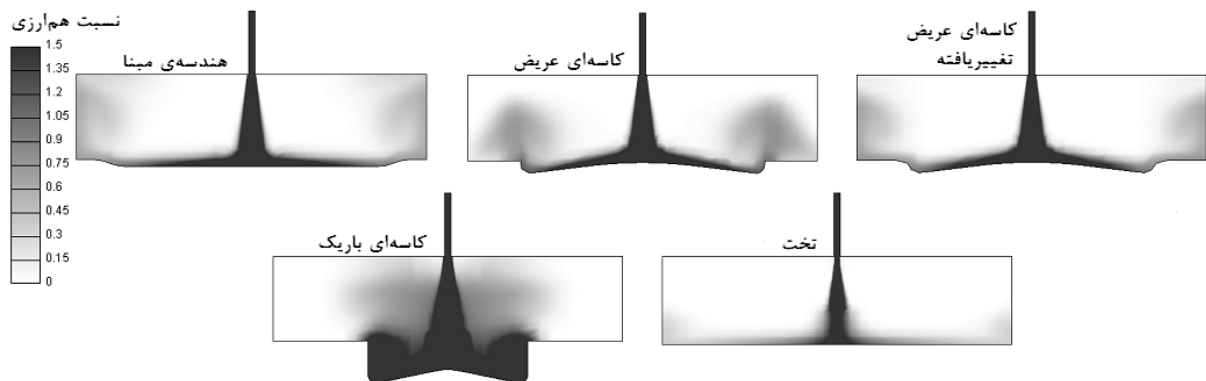
جدول ۴- مشخصات اصلی هندسه‌های مورد مطالعه

عمق کاسه (میلی‌متر)	قطر کاسه (میلی‌متر)	شکل تاج سمبه
-	-	تخت
۴	۶۵	مینا
۱۰	۳۸	کاسه‌ای باریک (Narrow bowl)
۵	۵۹	کاسه‌ای عریض (Large bowl)
۵	۵۹ (گردشده)	کاسه‌ای عریض تغییر یافته (Large bowl modified)



شکل ۵- نمای هندسه‌های مورد نظر در بررسی اثر شکل تاج سمبه

در شکل ۶ اثر شکل هندسه تاج سمبه بر روی تشکیل مخلوط داخل استوانه نشان داده شده است. تمامی تصاویر مربوط به زمان ۴۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالابند. نسبت هم‌ارزی، به‌عنوان متغیر مورد بررسی، در شکل‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۶- تأثیر شکل تاج سمبه بر روی شکل فواره داخل استوانه در ۴۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا

همان‌گونه که در شکل‌ها نیز دیده می‌شود، شکل تخت تاج سمبه باعث حرکت جریان به‌سمت دیواره‌های استوانه می‌شود، اما هندسه کاسه‌ای باریک باعث گردش مخلوط شده و بنابراین یک شکل باریک از فواره ایجاد می‌کند. هندسه‌های کاسه‌ای عریض و کاسه‌ای عریض تغییر یافته عموماً مشخصات نزدیکی نسبت به هندسه موتور مینا نشان دادند. در تمامی این حالت‌ها، شکل فواره به‌صورت عریضی در آمده و چینه‌سازی^۵ مخلوط داخل استوانه کاهش می‌یابد. اما برخلاف شکل تخت تاج سمبه، این هندسه‌ها از حرکت جریان به‌سمت دیواره‌های استوانه جلوگیری کرده و بنابراین شکل کلی فواره در این حالت‌ها نسبت به هندسه تخت جمع‌تر است.

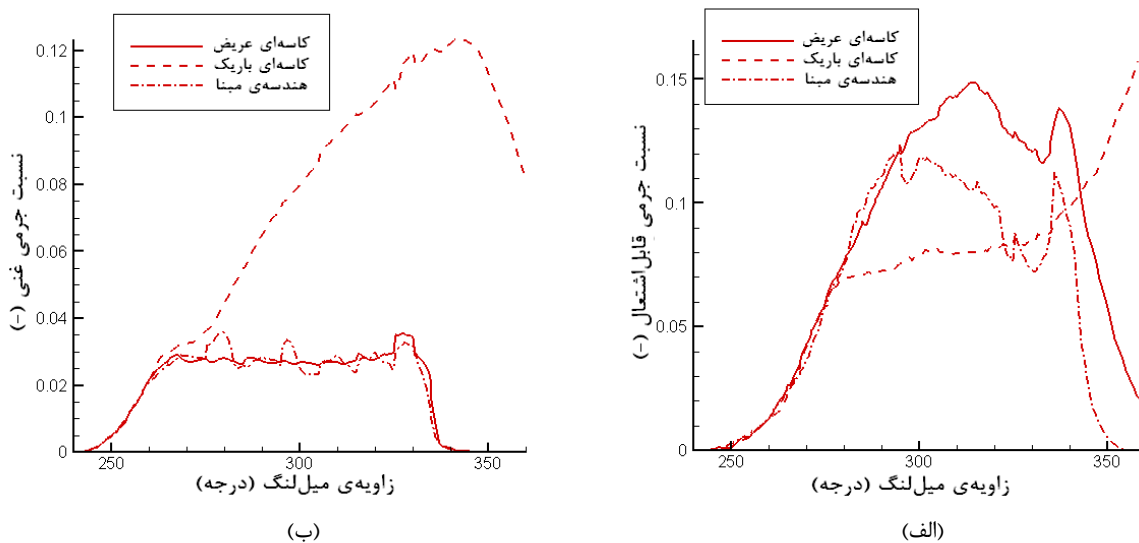
در کنار بررسی کیفی نتایج، باید از نظر کمی نیز تفاوت‌های این هندسه‌ها را در تولید مخلوط داخل استوانه سنجید. توزیع مکانی مخلوط هوا و سوخت با بررسی شکل‌های بالا به‌دست می‌آید. برازش‌های کیفی همچنین می‌تواند ایده‌هایی در مورد محل تقریبی شمع به‌دست دهد. اما بررسی‌های کمی نتایج شرایط کلی مخلوط را از نظر قابلیت اشتعال نشان می‌دهد. ترکیبی از برازش‌های کمی و کیفی می‌تواند درک بهتری از فرایند تشکیل مخلوط داخل استوانه را به‌دست دهد.

برای درک بهتر فرایند تشکیل مخلوط در داخل استوانه، به کمک تعریف نسبت جرمی قابل اشتعال، می توان مقایسه‌ای کمی نیز انجام داد. همان گونه که قبلاً هم اشاره شد، برای دستیابی به احتراق پایدار، محدوده بین ۰/۸ و ۱/۴ برای نسبت هوا به سوخت در نظر گرفته شده است. بنابراین می توان براساس این حدود نسبت جرمی قابل اشتعال داخل استوانه را به صورت نسبت جرم قابل اشتعال مخلوط به کل جرم مخلوط داخل استوانه تعریف کرد. به طور مشابه، نسبت جرمی غنی به صورت نسبت جرم مخلوط غنی به کل جرم مخلوط داخل استوانه تعریف می شود. به عبارت دیگر، می توان برای این دو نسبت روابط زیر را نوشت:

$$(۱) \quad \text{نسبت جرمی قابل اشتعال} = \frac{\text{جرم مخلوط قابل اشتعال}}{\text{کل جرم مخلوط}}$$

$$(۲) \quad \text{نسبت جرمی غنی} = \frac{\text{جرم مخلوط غنی}}{\text{کل جرم مخلوط}}$$

تغییرات زمانی نسبت جرمی قابل اشتعال برای هندسه‌های مختلف در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است. برای سادگی تحلیل، سه هندسه کاسه‌ای باریک، کاسه‌ای عریض و مینا انتخاب شده‌اند. با آغاز پاشش سوخت به داخل محفظه، این نسبت برای همه هندسه‌ها افزایش نشان می دهد. برای دو حالت کاسه‌ای عریض و مینا این مقدار به یک اندازه بیشینه رسیده و پس از آن کاهش می یابد. دلیل چنین کاهش حرکت مخلوط به سمت دیواره‌های استوانه است. چنین حرکتی در تصاویر میدان جریان در شکل ۶ به خوبی قابل مشاهده است. بعد از پایان زمان پاشش نسبت جرمی قابل اشتعال برای این دو حالت کاهش شدیدی را تا نزدیکی صفر نشان می دهد، که بیانگر اختلاط بیش از حد سوخت و هواست. برخلاف این دو حالت، هندسه کاسه‌ای باریک روند ثابت افزایشی نشان می دهد. این روند، در نزدیکی زمان پایان پاشش، شتاب بیشتری می گیرد.



شکل ۷- تغییرات زمانی مشخصه‌های مخلوط برای هندسه‌های مختلف، الف: نسبت جرمی قابل اشتعال، ب: نسبت جرمی غنی

چنین افزایشی به خوبی در نمودارهای مربوط به نسبت جرمی غنی در شکل ۷ (ب) نیز دیده می شود. در این شکل نیز هندسه کاسه‌ای باریک رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به حالت‌های دیگر نشان می دهد. افزایش شدید در نسبت جرمی غنی در این هندسه در نزدیکی زمان پایان پاشش کاملاً متضاد با رفتار کاهش نمودار مربوط به دو هندسه دیگر است. هندسه‌های کاسه‌ای عریض و مینا در این شکل نیز مانند شکل ۷ (الف) رفتار تقریباً یکسانی نشان می دهند. روند افزایشی در ابتدای تمامی نمودارها مربوط به زمان‌های آغاز پاشش سوخت به داخل استوانه است. اختلاط بیش از اندازه سوخت و هوا در هندسه‌های کاسه‌ای

عریض و مبنا باعث کاهش شدید در نسبت‌های جرمی قابل اشتعال و غنی می‌شود. در طرف مقابل، با توجه به توانایی هندسه کاسه‌ای باریک در نگه‌داشتن مخلوط سوخت و هوا در یک ناحیه محصور، نسبت‌های جرمی قابل اشتعال و غنی برای این حالت روند افزایشی نشان می‌دهد. در این حالت نیز، اختلاط بین ناحیه محصور و هوای بیرون باعث کاهش نسبت جرمی غنی بعد از پایان پاشش سوخت می‌شود.

اختلاف در رفتارهای مشاهده‌شده گویای تفاوتی بین هندسه کاسه‌ای باریک با دیگر حالات است. این تفاوت را می‌توان با دقت در تأثیر شکل تاج سمبه بر روی جریان توضیح داد. مقدار بیشتر مخلوط محصورشده در داخل کاسه سمبه دلیل اصلی برای مقادیر بالاتر نسبت‌های جرمی قابل اشتعال و غنی در داخل استوانه در این حالت است. برازش کمی و کیفی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در بین هندسه‌های مطالعه‌شده، هندسه کاسه‌ای باریک بهترین خواص را برای ایجاد یک بار چینه‌ای در داخل استوانه نشان می‌دهد. استفاده از این هندسه به همراه افشانه تک‌سوراخه فواره باریکی را در نزدیکی محور استوانه ایجاد می‌کند. چنین ترکیبی پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی میدان جریان داخل سیلندر نشان می‌دهد. بنابراین این ترکیب از شکل تاج سمبه و افشانه برای مطالعات احتراقی به‌عنوان ترکیب هندسی مبنا مد نظر قرار گرفته و اصلاحات بعدی روی آن انجام شده است.

نتایج حل احتراقی

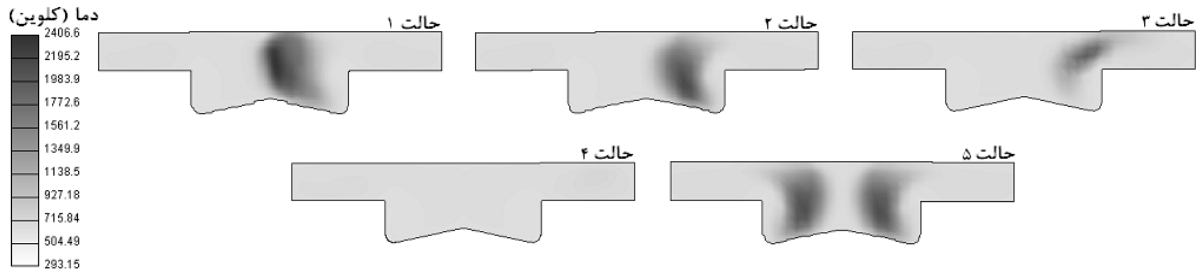
خواص احتراقی در یک موتور به‌شدت تحت تأثیر محل شمع است، زیرا شمع درحقیقت محل آغاز احتراق را کنترل می‌کند. بنابراین تعیین دقیق محل شمع در محفظه احتراق اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. بررسی نتایج توزیع نسبت هم‌ارزی داخل استوانه نشان می‌دهد که احتمالاً محلی نزدیک مرکز استوانه مکان مناسبی برای قرارگیری شمع باشد. برای تعیین دقیق محل شمع مطالعه احتراقی با درنظر گرفتن چند حالت مختلف انجام شده است. هندسه کاسه‌ای باریک به‌عنوان مبنا انتخاب شده و مدل عددی این حالت توسعه داده شده است. ترکیب هندسه مورد نظر متقارن محوری است؛ بنابراین تنها نیاز به مطالعه محل‌ها در راستای شعاع است.

چهار مکان بالقوه در راستای شعاع برای محل قرارگیری شمع درنظر گرفته شده است. علاوه بر این ایده استفاده از دو شمع با قرارگیری متقارن نیز امتحان شده است. جدول ۵ محل‌های مختلف درنظر گرفته شده برای شمع را نشان می‌دهد. شرایط مدل‌سازی، به استثنای این نکته که فاز احتراق نیز باید پوشش داده شود، دقیقاً مانند قبل درنظر گرفته شده است. زمان جرقه نیز برای تمامی حالت‌ها برابر با ۲۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا، یعنی همان زمان جرقه برای موتور مبنا، انتخاب شده است. مدل جرقه‌کروی برای مدل‌سازی جرقه استفاده شده است. در این مدل چگالی سطحی شعله در مدت زمان جرقه در داخل یک ناحیه کروی اطراف محل جرقه ثابت نگه داشته می‌شود. برای حل احتراق از مدل ECFM استفاده شده است. این مدل برای شبیه‌سازی احتراق در موتورهای پاشش مستقیم اشتعال جرقه‌ای توسط محققان زیادی [۲۱،۲۰] با موفقیت به‌کار گرفته شده است. در این مدل، یک سازوکار ساده دومعادله‌ای اسکلتی نیز برای واکنش درنظر گرفته می‌شود.

جدول ۵- محل‌های بالقوه درنظر گرفته شده برای شمع

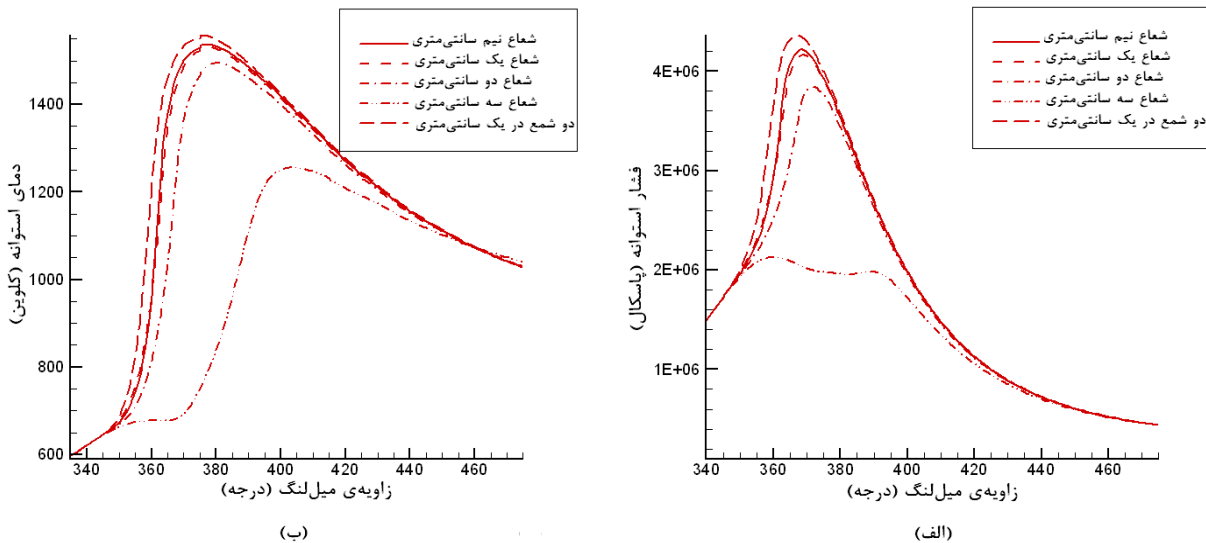
شماره حالت	فاصله شعاعی از محور (سانتی‌متر)
۱	۰/۵
۲	۱
۳	۲
۴	۳
۵	دو شمع در ۱

شکل ۸ چند تصویر از میدان دمای به دست آمده در داخل استوانه را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. تمامی شکل‌های ارائه شده مربوط به زمان ۱۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالیند. دیده می‌شود که به جز یک حالت، در بقیه حالت‌ها احتراق آغاز شده است. این امر به راحتی با توجه به افزایش دمای متناسب با احتراق در شکل‌ها قابل مشاهده است. در حالت ۴ احتراق هنوز آغاز نشده است.



شکل ۸- میدان دما برای حالت‌های مختلف قرارگیری شمع، در ۱۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا

نمودار تغییرات فشار داخل استوانه برای حالات مختلف در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این نمودار نیز مشاهده می‌شود، حالت ۵ بالاترین مقدار بیشینه فشار داخل استوانه را نشان می‌دهد. حالت‌های ۱ و ۲ نیز مقادیر بالایی را برای این بیشینه نشان می‌دهند. هرچند که تفاوت مقدار فشار بیشینه برای این دو حالت چندان قابل توجه نیست.

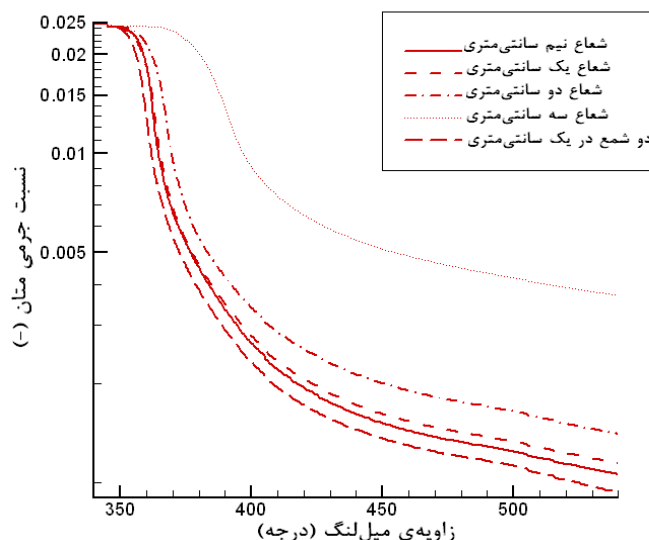


شکل ۹- تغییرات فشار و دمای داخل استوانه برای حالت‌های مختلف در مطالعه محل شمع

حالت ۴ در نمودارهای تغییرات فشار نیز رفتار کاملاً متفاوتی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در این حالت احتراق کاملاً متفاوتی نسبت به حالت‌های دیگر وجود داشته باشد. دلیل این امر نیز محل در نظر گرفته شده برای شمع با توجه به شکل فواره سوخت است. شمع محل آغاز احتراق را کنترل می‌کند؛ بنابراین باید در محلی قرار گرفته باشد که مخلوط قابل اشتعال هوا و سوخت به اندازه کافی در اطراف آن موجود باشد. درحقیقت به نظر می‌رسد که در این حالت فاز اصلی احتراق بسیار دیر اتفاق می‌افتد. به همین دلیل مقدار فشار و دمای داخل استوانه برای این حالت بسیار کمتر است. تأثیر تأخیر در آغاز احتراق در این حالت به خوبی در نمودارهای دمای داخل استوانه در شکل ۹ (ب) نیز مشاهده می‌شود.

حالتی که در آن دو شمع متقارن در نظر گرفته شده است، مقادیر بالاتری را برای دما در شکل ۹ (ب) نشان می‌دهد. مقدار بیشینه دما نیز برای این حالت از حالت‌های دیگر بالاتر است. مشابه با نمودارهای فشار داخل استوانه، حالت ۴ در نمودارهای دمای داخل استوانه نیز رفتار متفاوتی نسبت به بقیه حالت‌ها نشان می‌دهد. نمودار دما برای این حالت نشان‌دهنده تأخیر در فاز اصلی احتراق است. این تأخیر باعث می‌شود که احتراق در حجم بزرگ‌تری، که به دلیل حرکت سمبه به سمت پایین اتفاق افتاده، صورت گیرد. بنابراین مقادیر فشار و دمای به دست آمده در این حالت به میزان قابل توجهی نسبت به حالت‌های دیگر کاهش می‌یابد.

برای درک بهتر پدیده‌های جریان، تغییرات زمانی نسبت جرمی گاز متان در داخل استوانه برای حالت‌های مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. روند مشابهی در نمودارهای این شکل نسبت به نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود. در این مورد نیز، حالت ۵ مقادیر کمتری را برای میزان نسبت جرمی متان داخل استوانه به دست می‌دهد. این روند به‌ویژه در انتهای فرایند احتراق بیشتر به چشم می‌خورد. نکته جالب در شکل ۱۰ تأثیر تأخیر در آغاز احتراق در حالت ۴ است. نسبت جرمی متان برای این حالت تغییرات اندکی را، حتی تا حدود ۳۰ درجه میل‌لنگ بعد از زمان جرقه، نشان می‌دهد. این امر تأییدکننده عدم تناسب حالت ۴ برای قرارگیری شمع در هندسه کاسه‌ای باریک است.



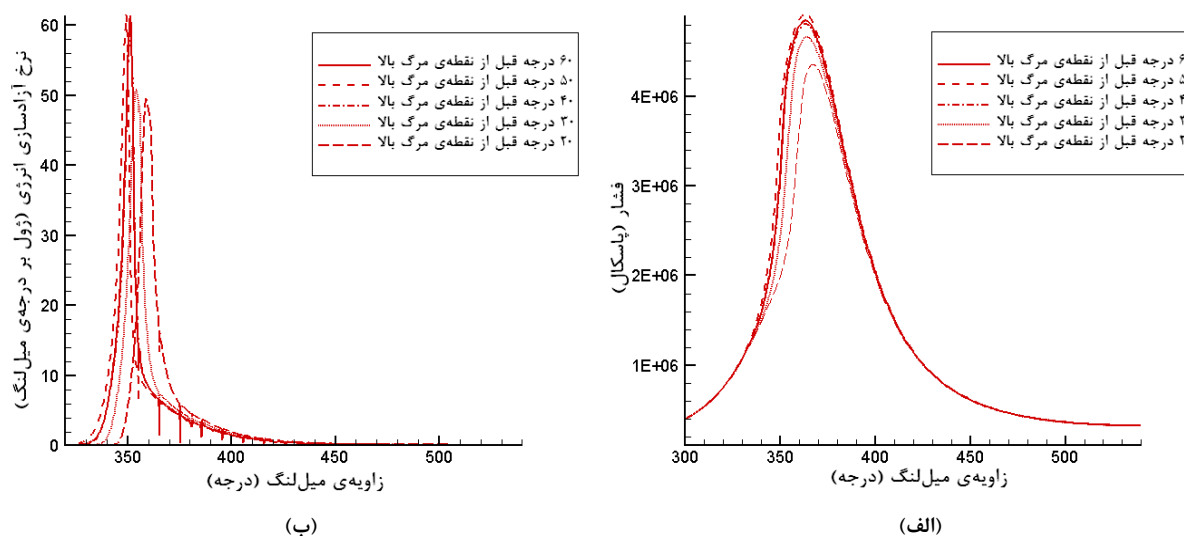
شکل ۱۰- تغییرات نسبت جرمی گاز متان برای حالت‌های مختلف در مطالعه محل شمع

تحلیل‌های کمی و کیفی نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی برای هندسه مورد نظر مکان‌های نزدیک محور استوانه برای قرارگیری شمع مناسب‌ترند. قرارگیری شمع در نزدیکی محور استوانه از جنبه دیگری نیز مطلوب است، زیرا باعث انجام احتراق متقارن‌تر در داخل استوانه شده و بنابراین فشار را بر روی تاج سمبه به شکل متقارن‌تری توزیع می‌کند.

میزان متان کمتر در انتهای فرآیند احتراق به همراه مقادیر بالاتر برای دما و فشار داخل استوانه مزیت زیادی را برای حالت ۵ به نسبت بقیه‌ی حالات ایجاد می‌کند. بنابراین این حالت در بین حالات بررسی شده به عنوان بهترین حالت انتخاب شده و برای ادامه مطالعه مد نظر قرار گرفته است.

زمان جرقه برای همه حالت‌ها در قسمت قبل برابر با زمان جرقه در موتور مینا انتخاب شده است. برای دستیابی به مشخصه‌های احتراقی بهتر زمان جرقه می‌بایست با در نظر گرفتن ترکیب هندسه محفظه احتراق به درستی تنظیم شود. زمان جرقه برای موتورهای گازسوز عموماً زودتر از موتورهای معادل بنزینی است. برای به دست آوردن زمان دقیق جرقه، حالت ۵ در

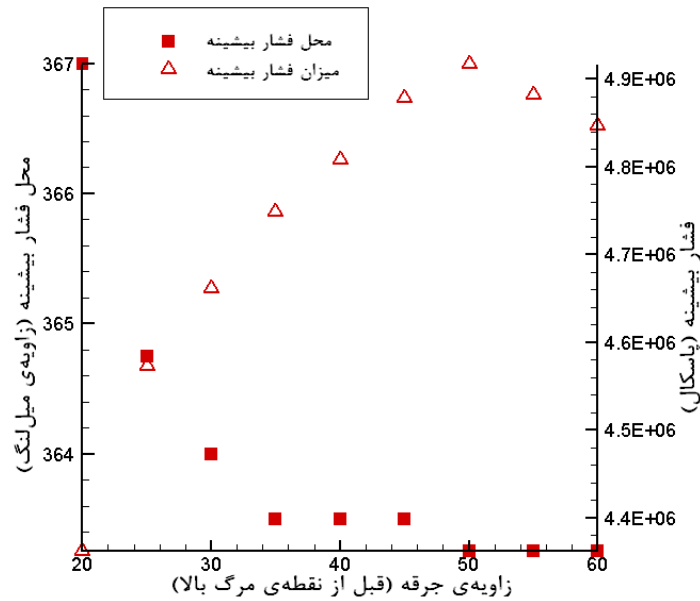
قسمت قبلی تحقیق به عنوان مبنا انتخاب شده و مطالعه‌ای بر روی زمان‌های مختلف جرقه انجام شده است. تمامی شرایط مدل‌سازی دقیقاً مانند قبل در نظر گرفته شده است. چند حالت مختلف برای زمان جرقه در نظر گرفته شده و در هر حالت مدل‌سازی احتراق انجام شده است. شکل ۱۱ تغییرات فشار داخل استوانه و نرخ آزادسازی حرارت را برای زمان‌های مختلف جرقه نشان می‌دهد. در شکل به خوبی مشخص است که زمان‌های جرقه زودتر منجر به مقادیر بالاتر برای بیشینه فشار و میزان نرخ آزادسازی حرارت در داخل استوانه می‌شود. این امر با توجه به تفاوت سوخت‌های مایع و گاز قابل توجیه است. گاز طبیعی زمان تأخیر جرقه بالاتری را برای احتراق نشان می‌دهد. بنابراین باید جرقه اندکی زودتر انجام شود تا زمان کافی برای آغاز احتراق فراهم شود.



شکل ۱۱- نتایج حل احتراقی برای مطالعه زمان جرقه، الف: نمودار فشار داخل استوانه، ب: نمودار نرخ آزادسازی حرارت

بررسی نتایج در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که زمان ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا بیشترین مقدار بیشینه فشار و نرخ آزادسازی حرارت را دارد. در صورتی که زمان‌های جرقه زودتر از این حد در نظر گرفته شود، روند کاهشی در میزان حداکثر فشار و نرخ آزادسازی حرارت مشاهده می‌شود.

میزان و زاویه میل‌لنگ بیشینه فشار برای زمان‌های مختلف جرقه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. زاویه میل‌لنگی که بیشینه فشار در آن اتفاق می‌افتد، با زودتر انجام شدن جرقه، اندکی کاهش می‌یابد، هرچند که تفاوت میزان کاهش زاویه بیشینه فشار تنها ۳/۷۵ درجه به ازای ۴۰ درجه تفاوت در زمان جرقه است. بیشینه فشار بالاترین مقدار خود را در زمان جرقه ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا به اندازه حدود ۴/۹ مگاپاسکال نشان می‌دهد. با انجام جرقه در زمان‌های زودتر مقدار بیشینه فشار کاهش می‌یابد. بنابراین زمان ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا به عنوان مناسب‌ترین زمان برای جرقه انتخاب می‌شود. به صورت کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عموماً هندسه‌های باریک‌تر کاسه سمبه برای به دست آوردن بار چینه‌ای مناسب‌ترند. یک مکان نزدیک مرکز استوانه می‌تواند احتراق مناسب و توزیع فشار متقارن‌تر بر روی تاج سمبه را به دست دهد. به دلیل زمان تأخیر جرقه بیشتر گاز نسبت به سوخت بنزین [۴]، زمان‌های زودتری باید برای جرقه انتخاب شود. زمان ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا بهترین زمان جرقه در بین حالت‌های مطالعه شده به نظر می‌رسد. با انجام جرقه در زمان‌های زودتر، مجدداً مقادیر فشار و دمای داخل استوانه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- محل و مقدار بیشینه فشار در مطالعه زمان جرقه

نتیجه گیری

براساس نتایج ارائه شده در قسمت های قبلی نتایج کلی به شرح زیر به دست آمده است:

- نتایج حل عددی حساسیت بالایی به تعداد گره های محاسباتی در عرض نازل نشان می دهند.
- حداقل ۱۰ لایه سلول محاسباتی در عرض نازل برای دستیابی به استقلال از شبکه مورد نیاز است.
- نتایج مدل سازی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی و عددی موجود در مراجع داشتند.
- با هدف دستیابی به بار چینه ای در داخل استوانه، هندسه کاسه ای باریک بهترین خواص را بین هندسه های مورد مطالعه نشان می دهد.
- مشاهده شد که عموماً هندسه های با کاسه عریض مخلوط را به سمت دیواره های استوانه پخش می کنند؛ در حالی که کاسه های باریک فواره سوخت را در یک ناحیه تقریباً بسته محصور می کنند.
- برای دستیابی به بار چینه ای باید به نحوی مخلوط قابل اشتعال در یک ناحیه بسته محصور شود. بنابراین هندسه هایی که مخلوط سوخت و هوا را در داخل استوانه پخش می کنند برای کارکرد در حالت بار چینه ای مناسب به نظر نمی رسند.
- هندسه کاسه ای باریک به دلیل خواص چینه سازی بیشتر، در تغییرات نسبت جرمی قابل اشتعال و غنی داخل استوانه روند کاملاً متفاوتی را نسبت به بقیه حالت های مورد بررسی نشان می دهد.
- اثر محل شمع با در نظر گرفتن چهار مکان بالقوه بررسی شده است. ایده استفاده از دو شمع نیز بررسی شده و نشان داده شده که این حالت بهترین خواص احتراقی را نسبت به سایر حالت ها به دست می دهد.
- با استفاده از دو شمع با جاگیری متقارن، اثر زمان جرقه مطالعه شده و نشان داده شد که زمان ۵۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا بهترین خواص را از نظر بیشینه فشار داخل استوانه و نرخ آزادسازی حرارت نشان می دهد. هرچند میزان بالاتر دمای درون استوانه، می تواند باعث افزایش میزان آلاینده های اکسید نیتروژن شود.

منابع

1. M. Chiodi, H. J. Berner and M. Bargende, "Investigation on Different Injection Strategies in a Direct-Injected Turbocharged CNG-Engine," *SAE Technical Paper* 2006-01-3000.
2. Y. Li, A. Kirkpatrick, C. Mitchell and et al., "Characteristic and Computational Fluid Dynamics Modeling of High-Pressure Gas Jet Injection," *ASME Trans. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126, 2004, pp. 192-197.
3. Z. Huang, S. Shiga, T. Ueda and et al., "Visualization Study of Natural Gas Direct Injection Combustion," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Automobile Engineering*, 217, 2003, pp. 667-673.
4. Z. Huang, S. Shiga, T. Ueda and et al., "Basic Characteristics of Direct Injection Combustion Fuelled with Compressed Natural Gas and Gasoline using a Rapid Compression Machine," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Automobile Engineering*, 217, 2003, pp. 1031-1038.
5. Z. Huang, S. Shiga, T. Ueda and et al., "Correlation of Ignitability with Injection Timing for Direct Injection Combustion Fuelled with Compressed Natural Gas and Gasoline," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Automobile Engineering*, 217, 2003, pp. 499-506.
6. Z. Huang, K. Zeng, B. Liu and et al., "Combustion Characteristics of a Direct-Injection Natural Gas Engine under Various Fuel Injection Timings," *J. applied Thermal Engineering*, 26, 2006, pp. 806-813.
7. G. Papageorgakis and D. N. Assanis, "Optimizing Gaseous Fuel-Air Mixing in Direct Injection engines using an RNG Based k-ε Model," *SAE 1998 Trans., Journal of Engines*, 107, 1999, pp. 82-107.
8. Z. Han and R. D. Reitz, "Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines using RNG k-ε Models," *Comb. Sci. & Tech.*, 106, 1995, pp. 267-295.
9. G. Li, P. Ouellette, S. Dumitrescu and P. G. Hill, "Optimization Study of Pilot-Ignited Natural Gas Direct-Injection in Diesel Engines," *SAE Technical Paper* 1999-01-3556.
10. J. Abraham and V. Magi, "Computation of Transient Jets: RNG k-ε Model Versus Standard k-ε Model," *SAE Technical Paper* 970885.
11. P. Ouellette and P. G. Hill, "Turbulent Transient Gas Injections," *ASME Trans, Journal of Fluids Engineering*, 122, 2000, pp. 743-753.
12. J. Abraham, "What is Adequate Resolution in the Numerical Computations of Transient Jets?," *SAE Technical Paper* 970051.
13. D. K. Mather and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Auxiliary Gas Injection on Diesel Engine Combustion and Emissions," *SAE 2001 Trans., Journal of Engines*, 109, 2002, pp. 443-458.
14. M. Baratta, E. Catania, F. C. Pesce, "Multidimensional Modeling of Natural Gas Jet and Mixture Formation in DI SI Engines- Development and Validation of a Virtual Nozzle Model," *ASME Proc. of the Internal Combustion Engine Division Technical Conference, ICES 2009*, Milwaukee, WI, 2009, pp. 583-596.
15. L. Andreassi, A. I. Facci, V. K. Krastev and et al., "Multidimensional Modeling of Gaseous Injection: Analysis of an Impinging jet," *Int. J. Heat Fluid Flow*, 31, 2010, 5, pp. 909-915.
16. M. Baratta, E. Catania, E. Spessa and et al., "Multi-Dimensional Modeling of Direct Natural-Gas Injection and Mixture Formation in a Stratified-Charge SI Engine with Centrally Mounted Injector," *SAE Technical paper* 2008-01-0975.
17. G. H. Kim, A. Kirkpatrick and C. Mitchell, "Computational Modeling of Natural Gas Injection in a large Bore Engine," *ASME Trans., Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126, 2004, pp. 656-664.
18. B. Yadollahi and M. Boroomand, "The Effect of Piston Head Geometry on Natural Gas Direct Injection and Mixture Formation in a SI Engine with Centrally Mounted Single-Hole Injector," *SAE Technical paper* 2011-01-2448.
19. B. Yadollahi and M. Boroomand, "A Numerical Investigation of Combustion Chamber Geometry Effects on Natural Gas Direct Injection Properties in a SI Engine with Centrally Mounted Multi-Hole Injector," *ASME Proc. of the Internal Combustion Engine Division Technical Conference, ICES 2012*, Torino, Piemonte, Italy, 2012.
20. S.N.D.H. Patel, M. Bogensperger, R. Tatschl and et al., "Coherent Flame Modeling of Turbulent Combustion - A Validation Study," *Proceedings of 2dn M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics*, Boston MA, June 17-20, 2003.
21. M. Bogensperger, M. Ban, P. Priesching and et al., "Modeling of Premixed SI-Engine Combustion using AVL FIRE - A Validation Study," *International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress*, April 13, Detroit, MI, 2008.

English Abstract

A Numerical Investigation of Combustion and Injection in a DISI CNG Engine

B. Yadollahi¹ and M. Boroomand²

1- PhD, Aerospace Eng. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Aerospace Eng. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2012.6.18, Received in revised form: 2013.1.18, Accepted: 2013.2.15)

In this study, a numerical model has been developed in AVL FIRE software to investigate combustion and injection inside the cylinder of a direct injection spark ignition CNG engine. In this regard two parts have been taken into consideration. In the first part of the study, gas injection via a single-hole injector into the cylinder with five different piston head geometries has been investigated. Using quantitative and qualitative representations of the results, the suitable combustion chamber geometry for DI application has been discussed. In the second part, combustion studies have been performed based on the selected geometry from the first part. Spark plug location and ignition timing have been investigated as two of the most important combustion variables. Five different configurations for the spark plug have been taken into consideration and the idea of using two spark plugs has been also tested, where it showed the best combustion characteristics. The spark timing has also been studied based on the selected configuration. The results show that ignition timing should be at 50 degrees before top dead center in order to have the best combustion characteristics.

Keywords: Direct injection, CNG, Spark ignition, Combustion chamber geometry, Numerical modeling