



## بررسی متغیرهای هندسی پاشش بر عملکرد یک موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش مستقیم با سوخت هیدروژن

شهربانو شامخی امیری<sup>۱\*</sup>، امید جهانیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، [Sh.shamekhi@yahoo.com](mailto:Sh.shamekhi@yahoo.com)

<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، [Jahanian@nit.ac.ir](mailto:Jahanian@nit.ac.ir)

\* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۹۸-۹۱۱۱۱۹۸۶۹+

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۲ فروردین ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش مستقیم

هیدروژن

فشار پاشش

زاویه افشانه

مکان شمع

در میان سوخت‌های تجدیدپذیر، هیدروژن به عنوان سوختی منحصر به فرد برای کاهش دی‌اکسید کربن در گازهای خروجی شناخته می‌شود. هیدروژن در موتورهای احتراق داخلی هیدروژن‌سوز، می‌تواند در راهگاه ورودی و یا در داخل محفظه احتراق پاشش شود. موتور پاشش مستقیم هیدروژن‌سوز ترجیحاً بهتر است؛ زیرا پاشش مستقیم هیدروژن علاوه بر اینکه پیش جرقه و پس زدن شعله را کاهش می‌دهد، از کاهش بازده حجمی به خاطر چگالی کم هیدروژن نیز جلوگیری می‌کند. در این موتورها، مؤلفه‌های پاشش سهم عمده‌ای در عملکرد موتور دارند. در مقاله حاضر، پس از شبیه‌سازی موتور با استفاده از نرم‌افزار AVL-Fire و صحنه‌گذاری با نتایج تجربی، سه متغیر فشار پاشش، زاویه افشانه و مکان شمع بررسی شده است. با افزایش فشار پاشش، عملکرد موتور بهبود می‌یابد و از سویی آلاینده اکسید نیتروژن افزایش پیدا می‌کند. بررسی زاویه افشانه نشان داد که با متمایل شدن افشانه به سمت شمع، نواحی غنی از هیدروژن در نزدیکی شمع گسترده‌تر است و عملکرد بهبود پیدا می‌کند. در کنار متغیرهایی از افشانه، مکان شمع نیز ارزیابی شد و بهترین مکان شمع با توجه به توزیع سوخت هیدروژن تعیین شد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



## ۱- مقدمه

در میان سوخت‌های تجدیدپذیر، هیدروژن به عنوان سوختی منحصر به فرد برای کاهش خروجی گاز دی‌اکسید کربن در گازهای خروجی شناخته می‌شود [۱]. استفاده از این سوخت به عنوان سوخت موتورهای احتراق داخلی برای چند دهه بررسی شده است. در محصولات خروجی احتراق هیدروژن، هیچگونه ذرات جامد، هیدروکربن نسوخته، مونوکسیدکربن و دی‌اکسید کربن دیده نمی‌شود [۲]. مزیت دیگر سوخت هیدروژن این است که می‌توان آن را با استفاده از روش‌هایی همچون الکترولیزاسیون آب، شکستن ملکول‌های آب<sup>۱</sup>، چرخه‌های ترموشیمیایی هسته‌ای، فرآیندهای نور-شیمیایی و نور-زیست-شیمیایی<sup>۲</sup>، فرآیندهای زیستی از باقی‌مانده‌های محصولات کشاورزی، تغییر شکل پلاسما<sup>۳</sup> و تخمیر سیاه<sup>۴</sup> در مقیاس‌های صنعتی تولید نمود [۳-۵].

هیدروژن دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است که آن را به سوختی مناسب برای موتورهای احتراق داخلی تبدیل نموده است که هزینه‌های زیاد پیل سوختی را نیز ندارد. سوخت هیدروژن دارای گستره بزرگی از اشتعال‌پذیری است که می‌تواند در نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای کمتر از ۰/۵ باعث تولید بسیار کم آلاینده اکسیدهای نیتروژن گردد. دمای خود اشتعالی هیدروژن بسیار زیاد است که این ویژگی باعث می‌شود که برای بهبود بازدهی موتور از نسبت تراکم بزرگتری استفاده گردد. سرعت شعله آرام هیدروژن به مقدار قابل توجهی، از سرعت شعله آرام سوخت‌های هیدروکربنی بیشتر است. این خاصیت باعث می‌شود که نرخ آزادسازی گرما در نزدیکی نقطه مکث بالا سریع باشد که منجر به تولید توان بیشتر می‌گردد [۶]. با این وجود، برای مخلوط‌های رقیق، سرعت شعله آرام هیدروژن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. سرعت زیاد سوختن هیدروژن حساسیت عملکرد موتور را به شکل محفظه احتراق، حرکت هوای ورودی کمتر می‌کند.

در کنار ویژگی‌های مفید هیدروژن، چالش‌هایی نیز برای موتورهای هیدروژنی وجود دارد. هیدروژن دارای ارزش گرمایی حجمی پایینی است که باعث می‌شود در شرایط عملکرد رقیق، به خصوص برای موتورهای مکش طبیعی، توان خروجی آن کمتر باشد. موتور هیدروژنی با مخلوط ورودی همگن دارای مشکلاتی همچون پیش‌جرقه<sup>۵</sup> و پس‌زدن شعله<sup>۶</sup> به علت دریاچه‌های داغ خروجی، الکترودهای داغ شمع و سوخت‌های به جا مانده در دیواره محفظه احتراق هستند [۷]. کم بودن کمینه انرژی لازم برای جرقه هیدروژن

(کمتر از یک دهم بنزین) و طول کم خاموشی شعله منجر به رخ دادن چنین ناپهنجاری‌هایی در احتراق می‌گردد. مشکل دیگر چالش‌برانگیزی که ممکن است برای موتورهای احتراق داخلی هیدروژن‌سوز اتفاق افتد، کوبش است. اعمال روش مناسبی برای پاشش و جرقه، همزمان با افزایش بازدهی موتور می‌تواند بسیاری از مشکلات موجود را نیز حل کند [۸].

هیدروژن در موتورهای احتراق داخلی هیدروژن‌سوز، می‌تواند در راهگاه ورودی و یا در داخل محفظه احتراق پاشش شود. موتور پاشش‌مستقیم هیدروژن‌سوز ترجیحاً بهتر است؛ زیرا پاشش‌مستقیم هیدروژن علاوه بر اینکه پیش جرقه و پس‌زدن شعله را کاهش می‌دهد، از کاهش بازده حجمی به خاطر چگالی پایین هیدروژن نیز جلوگیری می‌کند. از این رو، توان خروجی یکسان و یا بیشتر از موتورهای بنزین‌سوز تولید شود. از سویی، می‌توان با تغییر شیوه پاشش همچون زمان، طول و فشار پاشش به همراه مکان افشانه، عملکرد موتور را بهبود بخشید. چون نحوه پاشش تأثیر قابل توجهی روی تشکیل مخلوط و بهبود کیفیت احتراق و تشکیل آلاینده‌ها دارد. آرش نعمتی و همکاران [۹] اثر زمان پاشش را در نسبت غناهای مختلف سوخت به هوا روی شاخص‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک در موتور اشتعال جرقه‌ای پاشش‌مستقیم هیدروژن‌سوز بررسی نمودند. اما در شبیه‌سازی آنها به دلیل دقت ضعیف شبکه‌بندی، بررسی متغیرهای دیگر پاشش ممکن نبوده است.

حمزه‌لو و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای، پاشش هیدروژن و نحوه تشکیل مخلوط را در موتورهای اشتعال جرقه‌ای پاشش‌مستقیم بررسی نمودند. آنها در کار خود از دو روش RANS<sup>۷</sup> و LES<sup>۸</sup> استفاده نموده و نشان دادند که روش LES جزئیات انبساطی ضربه<sup>۹</sup> و برخی از ویژگی‌های اختلاط و پاشش هیدروژن را بهتر از RANS نشان می‌دهد.

والتر و همکاران [۱۱] اثرات زمان شروع پاشش و متغیرهای هندسی از جمله تعداد سوراخ‌های افشانه را روی بازده حرارتی درست و خروجی اکسیدهای نیتروژن در یک موتور تک استوانه پاشش‌مستقیم هیدروژنی بررسی نمودند.

ساکاماران و همکاران [۱۲] از نمونه‌ای برای شبیه‌سازی موتور پاشش‌مستقیم هیدروژن‌سوز استفاده نمودند تا اثر متغیرهای پاشش را روی مشخصه‌های مخلوط داخل استوانه بررسی نمایند. در کار حاضر متغیرهای هندسی مرتبط با موتور، افشانه و شمع که در ادبیات موضوع کمتر به آن پرداخته شده است، بررسی خواهند شد.

<sup>1</sup> Water splitting

<sup>2</sup> Photo-bio-chemical processes

<sup>3</sup> Plasma reforming

<sup>4</sup> Dark fermentation

<sup>5</sup> Pre-ignition

<sup>6</sup> Backfiring

<sup>7</sup> Reynolds Averaged Navier Stokes

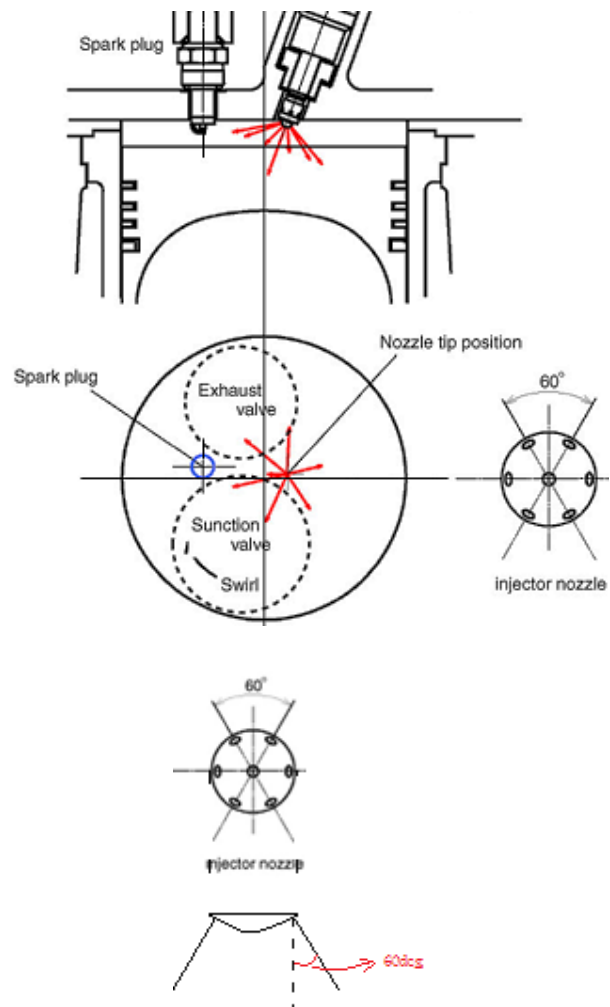
<sup>8</sup> Large Eddy Simulation

<sup>9</sup> Shock

## ۲- شبیه‌سازی

## ۱-۲- ایجاد هندسه

موتور مورد استفاده برای شبیه‌سازی، موتور Yanmar-NFD170 است. این موتور در ابتدا موتور دیزلی بوده که به موتور احتراق جرقه‌ای پاشش مستقیم هیدروژن‌سوز تبدیل شده است. نمای این موتور در شکل ۱ و برخی از مشخصات مهم آن در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: نمای موتور مورد استفاده برای اعتبارسنجی

هندسه مورد استفاده برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار CatiaV5 R15 ایجاد و شبکه‌های محاسباتی مورد نیاز و شبیه‌سازی جریان داخل محفظه احتراق به وسیله نرم‌افزار AVL Fire انجام شده است. برای کاهش زمان حل، شبیه‌سازی به صورت چرخه بسته (از زمان بسته شدن دریچه ورودی تا باز شدن دریچه خروجی) انجام گرفته است. از آنجایی که استقلال از شبکه‌بندی وابسته به صحنه‌گذاری نیست، پیش از انتخاب مدل احتراقی و شرایط مناسب پاشش، استقلال از شبکه‌بندی انجام گرفت. شبکه بندی در محیط Fame Engine Plus نرم‌افزار AVL Fire انجام گرفته است.

جدول ۱: مشخصات موتور احتراق جرقه‌ای چهار زمانه مورد بررسی

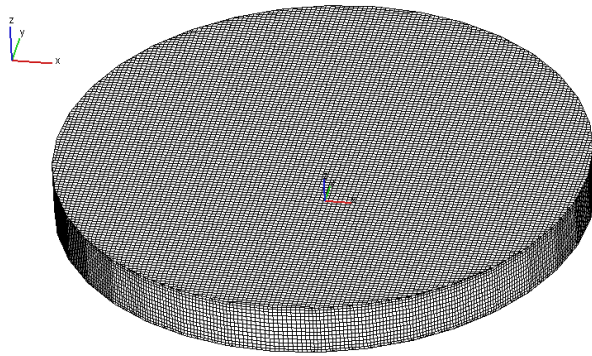
۱	تعداد استوانه
۱۰۲ mm	قطر استوانه
۱۰۵ mm	طول پیمایش سمبه
۱:۱۱,۵	نسبت تراکم
تخت	محفظه احتراق
۲,۶	نسبت چرخش
۳۶۰ aTDC	زمان باز شدن دریچه ورودی
۵۸۰ aTDC	زمان بسته شدن دریچه ورودی
۱۳۰ aTDC	زمان باز شدن دریچه خروجی
۳۸۰ aTDC	زمان بسته شدن دریچه خروجی
۷ × ۰,۵۲ Mm	قطر سوراخ × تعداد
۱۲۰۰ rpm	دور موتور
۰,۵	نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا

برای شبیه‌سازی دقیق پاشش گاز، از آنجایی که تفاوت‌های بزرگی در نزدیکی افشانه وجود دارد، نیاز است که در این ناحیه دانه بندی ریزتر باشند. در تحقیق حاضر برای کاهش هزینه محاسباتی، شبکه‌بندی به گونه‌ای ایجاد شده است که خانه‌های نزدیک افشانه فقط در زمان پاشش ریز می‌شوند. فضای ریز شدن خانه‌ها امر مهمی است، به طوری که باید به گونه‌ای انتخاب شود که تمامی نقاط با گردان‌های بزرگ را در برگیرد.

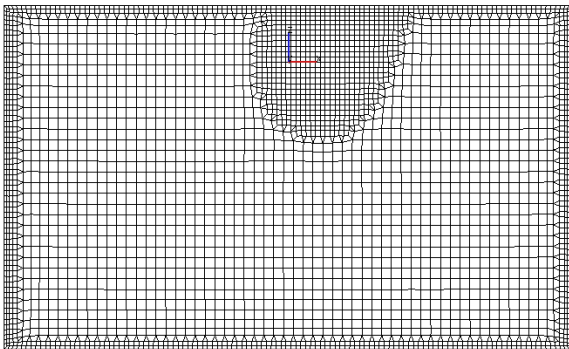
حمزه‌لو و آلیفیس [۱۰] در بررسی خود فضای لازم برای ریز نمودن سلول‌های اطراف افشانه را ۱۰ برابر قطر افشانه در راستای محور آن و ۵ برابر قطر افشانه در راستای عمود بر محور آن بیان نمودند. در کار حاضر نیز از همین روش برای ریز نمودن سلول‌های نزدیک افشانه مورد استفاده قرار گرفت. در نرم‌افزار AVL Fire می‌توان با ریز نمودن سلول‌ها در نزدیکی افشانه، فضای مناسب گفته شده را در اطراف سوراخ‌ها نیز ایجاد نمود.

برای انتخاب شبکه‌بندی مناسب استقلال از شبکه انجام گرفته است. نتایج استقلال از شبکه برای سه شبکه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. طبق این نتیجه، نمودار فشار شبکه‌بندی ۲ و ۳ اختلاف ۳,۵ درصدی با یکدیگر دارند و با توجه به اینکه ریزتر نمودن سلول‌ها موجب افزایش چشم‌گیر هزینه محاسباتی می‌شود، این مقدار خطا قابل قبول بوده و از شبکه‌بندی ۲ استفاده گردید. جدول ۲ تعداد خانه‌های هر سه شبکه‌بندی را در دو حالت نشان می‌دهد.

شکل ۴ مقطع برش خورده شبکه‌بندی ۲ را نشان می‌دهد. طبق توضیحات داده شده، فضای ریز شده در اطراف افشانه به اندازه‌ای است که فضای مورد نیاز برای اطراف سوراخ افشانه را پوشش می‌دهد.



شکل ۳: شبکه بندی موتور در نقطه مکث بالا



شکل ۴: مقطع برش خورده شبکه بندی ۲ در ۷۵ درجه قبل از نقطه مکث بالا

بنابراین نرخ واکنش میانگین را می توان به صورت معادله (۱) تعریف نمود.

$$\overline{\rho \dot{r}_{fu}} = \frac{C_{fu}}{\tau_R} \bar{\rho} \min \left( \bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}_{Ox}}{S}, \frac{C_{Pr} \bar{y}_{Pr}}{1+S} \right) \quad (1)$$

دو بخش اول مقدار کمینه عملگر  $\min$  تعیین می کند که آیا سوخت یا اکسیژن در محدوده مقداری وجود دارند یا نه و بخش سوم احتمال انجام واکنش است که این اطمینان را می دهد که شعله در نبود محصولات داغ پخش نمی شود.  $C_{fu}$  و  $C_{Pr}$  ضرایب تجربی هستند و  $\tau_R$  مقیاس زمانی شیمیایی برای انجام واکنش است. مقدار ضریب  $C_{fu}$  به آشفته گی جریان و سوخت بستگی دارد. از این رو، تعیین مقدار آن با تنظیم نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی تعیین می شود.

## ۲-۴- الگوی آلاینده گی

تولید آلاینده NOx به شدت به دمای محفظه احتراق بستگی دارد. برای بررسی سینتیک تشکیل NO از الگوی زلدویچ<sup>۴</sup> استفاده می شود.

## ۲-۲- الگوی پاشش

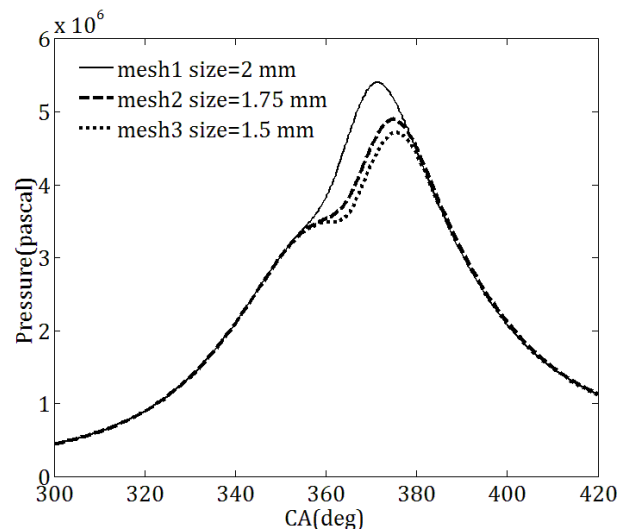
شبیه سازی پاشش با استفاده از فواره گاز خالص<sup>۱</sup> نرم افزار انجام گرفته است. از آنجایی که در این موتور جت تحت انبساط رخ می دهد، نواحی جریان فراصوت شبیه سازی نشده است و از صفحه ماخ<sup>۲</sup> شروع به شبیه سازی شده است.

## ۲-۳- الگوی احتراق

برای شبیه سازی احتراق از الگوی شکست گردابه ها<sup>۳</sup> استفاده شده است. این الگو یکی از الگوهای احتراقی موجود در نرم افزار است که با اختلاط آشفته گی پایش می شود [۱۳]. در این الگو فرض می شود که در شعله های آشفته از پیش آمیخته، واکنش دهنده ها (سوخت و هوا) در یک گردابه اند و از گردابه هایی که شامل محصولات داغ احتراق هستند، جدایند. از آنجایی که واکنش های شیمیایی دارای مقیاس زمانی شیمیایی هستند که در مقایسه با واکنش های آشفته گی کوچک هستند، می توان فرض نمود که نرخ انجام احتراق با نرخ اختلاط گردابه هایی که شامل واکنش دهنده ها و گردابه هایی که شامل محصولات داغ احتراق هستند، تعیین می شود.

جدول ۲: تعداد خانه ها در سه شبکه بندی

شماره	تعداد خانه ها در TDC	بیشترین تعداد خانه ها در IVC
۱	۸۵،۲۵۵	۳۲۲،۶۳۱
۲	۱۳۲،۰۷۷	۴۸۱،۷۹۷
۳	۱۶۰،۹۸۹	۶۴۲،۶۷۷



شکل ۲: نمودار فشار بر حسب زاویه لنگ برای سه شبکه بندی

<sup>1</sup> Pure gas jet

<sup>2</sup> Mach disk

<sup>3</sup> Eddy break up model

<sup>4</sup> Zeldovich

### ۳- صحنه گذاری

با استفاده از الگوهای گفته شده، شبیه‌سازی به صورتی است که در اعمال شرایط مرزی، دمای سمیه، استوانه و دیواره استوانه ۳۸۰ درجه کلوین فرض شده است. شرایط اولیه در جدول ۳ نشان داده شد. مقیاس طولی آشفستگی<sup>۱</sup> با استفاده از معادله (۲) بدست می‌آید [۱۴] و مقدار آن ۱۱,۲ میلی‌متر است [۱۵]:

$$(2) \quad \text{مقیاس طولی آشفستگی} = \frac{h_v}{2}$$

که در آن  $h_v$  بزرگترین مقدار بالا رفتن دریچه ورودی است. انرژی جنبشی آشفستگی (k) بصورت درصدی از انرژی جنبشی متوسط (K) بیان می‌گردد.

$$(3) \quad K = \frac{1}{2} U^2$$

$$(4) \quad k = \frac{3}{2} u'^2 = \frac{3}{2} (UI)^2$$

که در آن، I شدت توربولانسی است که با توجه به مرجع [۱۴]، ۲۵٪ فرض شده است و U، سرعت متوسط سمیه، بدین صورت محاسبه می‌شود:

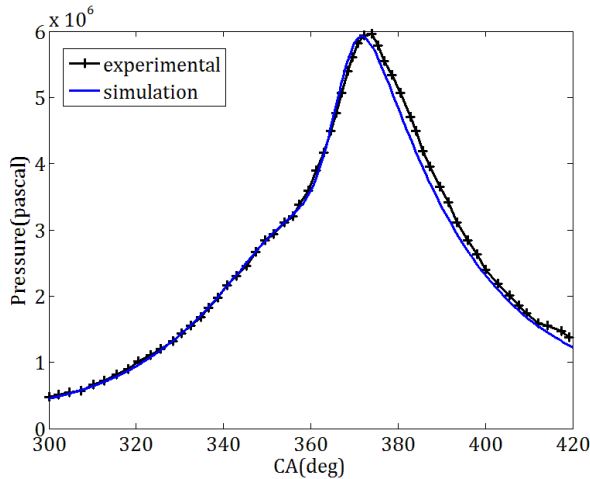
$$(5) \quad U = 2SN$$

که در S طول جابجایی موتور و N دور موتور است.

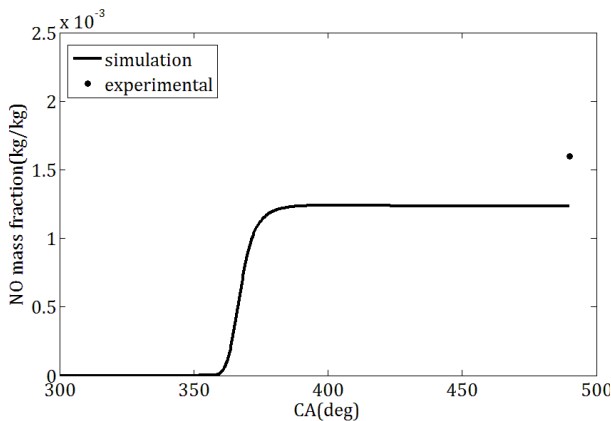
جدول ۳: شرایط اولیه

۳۵۶ (K)	دما
۱۰۸۰۰۰ (pascal)	فشار
۱,۶۵۴ ( $m^2/s^2$ )	انرژی جنبشی آشفستگی
۰,۰۰۵۶ (m)	مقیاس طولی آشفستگی
۲,۶	نسبت چرخش <sup>۲</sup>

شکل ۵ نمودار فشار محفظه احتراق بر حسب درجه لنگ را نشان می‌دهد. این نمودار برای شرایطی با نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای ۰,۵، و زمان شروع پاشش ۱۰۰ bTDC است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار شبیه‌سازی تطابق خوبی با نمودار آزمایشگاهی دارد، به طوری که قله فشار به اندازه ۰,۷ درصد خطا دارد. در شکل ۶ مقدار آلاینده‌گی شبیه‌سازی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده است. مقدار NOx تولیدی به اندازه ۲۰٪ خطا دارد. نتایج آزمایشگاهی از مرجع [۱۶] گرفته شده است.



شکل ۵: نمودار فشار بر حسب درجه لنگ برای شبیه‌سازی و آزمایشگاهی



شکل ۶: آلاینده‌گی NO تولیدی شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

### ۴- بحث در مورد نتایج

از آنجایی که موتور مورد بررسی در این کار در ابتدا موتور دیزلی بوده است و به موتور پاشش مستقیم اشتعال جرقه‌ای تبدیل شده است، مخلوط ایجاد شده، با وجود لایه‌ای بودن در لحظه قبل از جرقه، به طور مناسب در اطراف شمع به وجود نیامده است، زیرا موتور در ابتدا دیزلی بوده و برای موتور پاشش مستقیم اشتعال جرقه‌ای طراحی نشده است. اما به طور کلی، شرایط شبیه‌سازی موتور لایه‌ای بوده است. زمان پاشش در همه شرایط مورد بررسی ۱۰۰ BTDC بوده است.

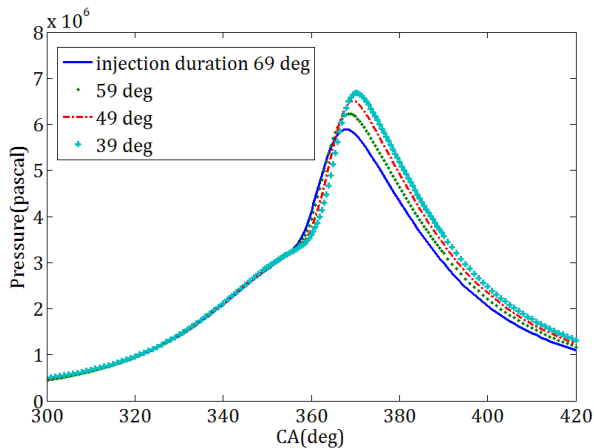
#### ۴-۱- بررسی طول دوره پاشش

به طور کلی، سامانه پاشش هیدروژن برای تشکیل خارجی مخلوط، در فشار پاشش ضعیفتر (۸-۲ bar) در مقایسه با سامانه‌های پاشش مستقیم هیدروژن (۲۵۰-۵ bar) کار می‌کنند.

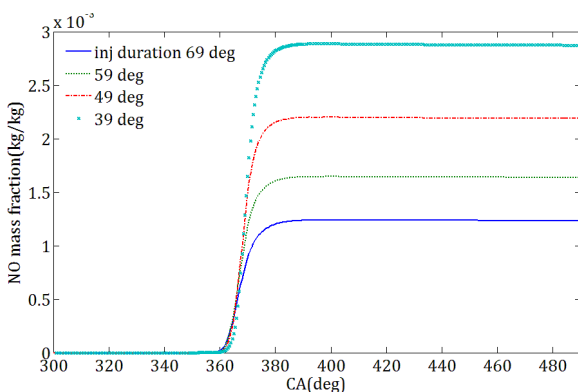
مواجه شدن افشانه‌های پاشش مستقیم با دما و فشار استوانه به بهبود بیشتر کیفیت افشانه نیاز دارد تا افشانه‌ها بتوانند استاندارد لازم را برای

<sup>1</sup> Turbulent length scale

<sup>2</sup> Swirl ratio



شکل ۷: نمودار فشار بر حسب درجه لنگ برای طول دوره پاشش‌های مختلف



شکل ۸: نمودار کسر جرمی NO بر حسب درجه لنگ

برای درک بهتر تأثیر فشار پاشش بر روی موتور، متغیرهای عملکردی آن نیز بررسی شد. شکل ۹ تغییرات برخی متغیرها را بر حسب طول دوره پاشش نشان می‌دهد. با کاهش طول دوره پاشش، فشار پاشش بیشتر بوده و در نتیجه باعث می‌شود که اختلاط بهتر انجام شود. با اختلاط بهتر، مخلوط هوا و سوخت در زمان جرقه همگن‌تر بوده است و در نتیجه موتور عملکرد بهتری خواهد داشت.

مقدار فشار متوسط میانگین به ازای هر ده درجه کاهش طول دوره پاشش، به اندازه ۱۱ درصد افزایش و مقدار مصرف سوخت ویژه به اندازه ۱۰ درصد کاهش داشته است. با وجود افزایش NO تولیدی، مقدار افزایش آلاینده‌گی نسبت به افزایش توان خروجی، کمتر است.

عمر کسب کنند. فشار پاشش از مهم‌ترین متغیرهای عملکردی موتور پاشش مستقیم است.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه سلونوئیدها و متحرک‌های پیژو، افشانه‌های فشار زیاد هیدروژن احتراق پاشش مستقیم را جایگزینی قابل دوام برای موتورهای هیدروژن‌سوز پاشش در راهگاه ورودی ساخته است که در موتورهای احتراقی تحقیقاتی و وسایل نقلیه نمایشی استفاده شده است [۱۷].

در شبیه‌سازی، فشار پاشش را می‌توان با تغییر متغیرهای طول دوره پاشش، قطر سوراخ افشانه، جرم سوخت تزریقی و تعداد سوراخ‌های افشانه تغییر داد. در کار حاضر، از آنجایی که جرم سوخت تزریق شده ثابت مانده است، طول دوره پاشش به عنوان متغیری برای افزایش و کاهش فشار پاشش انتخاب شده است. ارتباط بین فشار میانگین و طول دوره پاشش به شکل معادله (۶) بیان می‌گردد [۱۸].

$$meip = \left( \frac{0.0426 \times Q \times N}{d^2 \times \theta \times h} \right)^2 \quad (6)$$

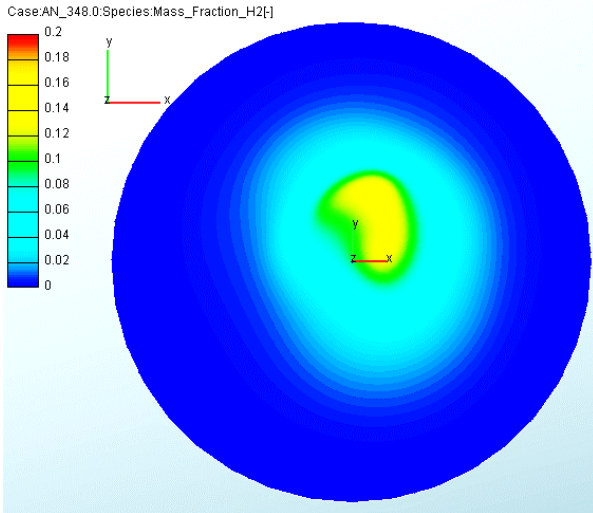
که در آن  $Q$  شار حجمی سوخت ( $mm^3/injection$ )،  $N$  سرعت موتور ( $rev/min$ )،  $\theta$  طول دوره پاشش ( $deg$ )،  $d$  قطر سوراخ افشانه ( $mm$ )،  $h$  تعداد سوراخ‌های افشانه و  $0.0426$  ثابتی است که شامل ضریب تخلیه افشانه خاصی می‌شود. در کار آزمایشگاهی که کار حاضر با آن صحنه‌گذاری شده است، شار واقعی داده شده و به ضریب تخلیه اشاره‌ای نشده است.

از سویی، در حالتی که فشار میانگین پاشش ۸ MPa است، طول دوره پاشش ۶۹ درجه لنگ بوده است. از آنجایی که جرم سوخت تزریقی در هر چهار حالت بررسی شده یکسان فرض شده است، فشار میانگین پاشش با استفاده از تغییر طول دوره پاشش محاسبه گردید. فشار معادل هر طول دوره پاشش در جدول ۴ نشان داده شده است.

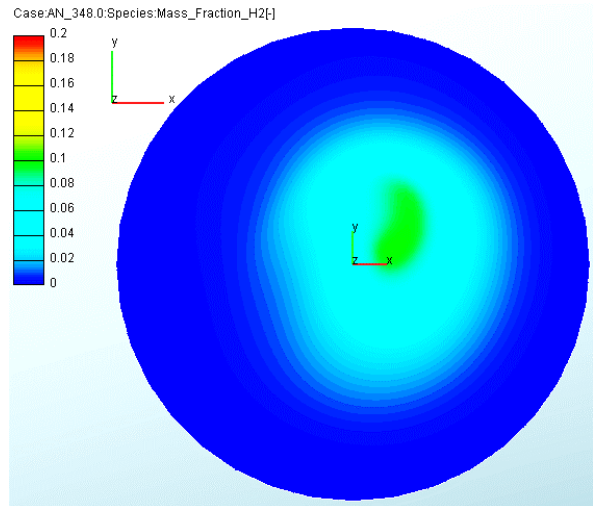
جدول ۴: فشار معادل پاشش با طول دوره پاشش

فشار میانگین پاشش (bar)	طول دوره پاشش (deg)
۱۱۰	۵۹
۱۶۰	۴۹
۲۵۰	۳۹

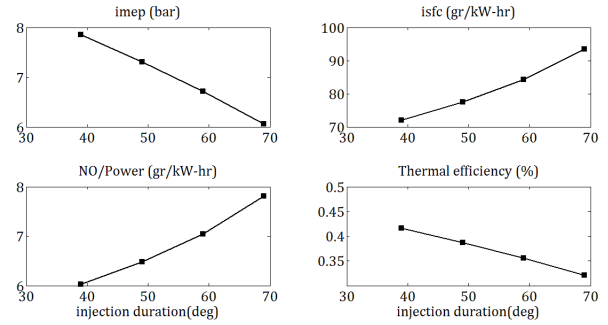
افزایش فشار پاشش، چگالی گاز را افزایش داده است و شار جرم سوخت ورودی را افزایش می‌دهد. در نتیجه سوخت در دوره زمانی کمتری پاشش می‌شود. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش فشار پاشش باعث افزایش قله فشار شده است، از سویی، بر طبق شکل ۸ به دلیل بزرگ شدن قله دمای محفظه، مقدار آلاینده‌گی NO به ازای هر ده درجه کاهش طول دوره پاشش، حدود ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۱: توزیع کسر جرمی هیدروژن در صفحه شمع برای طول دوره پاشش ۵۹ درجه

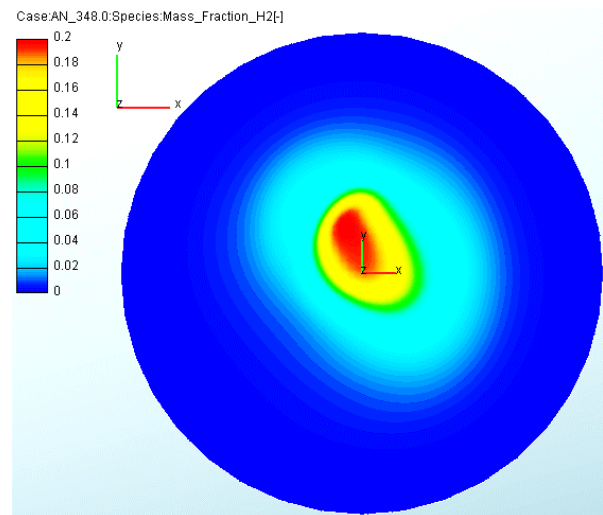


شکل ۱۲: توزیع کسر جرمی هیدروژن در صفحه شمع برای طول دوره پاشش ۴۹ درجه



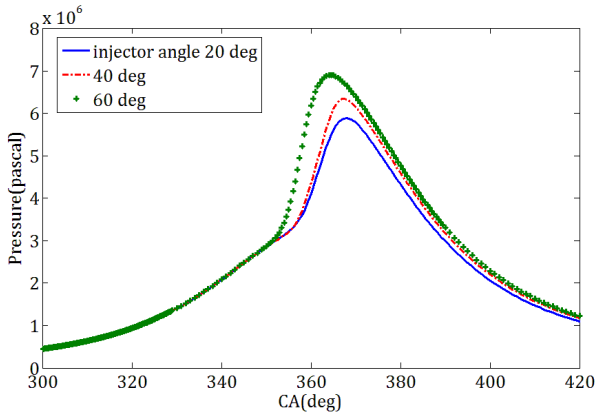
شکل ۹: نمودار فشار موثر میانگین درست<sup>۱</sup>، مصرف ویژه درست و نسبت آلانندی NO به توان خروجی بر حسب طول دوره پاشش

با وجود تأثیر مثبتی که فشار پاشش بر روی عملکرد موتور دارد، افشانه‌های پاشش مستقیم هیدروژن به بررسی‌های بیشتری در مورد بیشینه نرخ جریان سوخت و عمر آنها نیاز دارند [۱۱]. **Error! Reference source not found.** - نحوه توزیع کسر جرمی هیدروژن را در زمان ۲ درجه قبل از لحظه جرقه، در صفحه شمع در شرایط نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای ۰،۵، شروع پاشش bTDC ۱۰۰، زمان جرقه bTDC ۱۰ نشان می‌دهد. مختصات افقی مکان شمع  $x = -0,0220541$  است. همانطور که از شکل‌ها برمی‌آید، هر چه طول دوره پاشش کمتر شود و یا به عبارتی فشار افزایش پیدا کرده است، مخلوط هوا و سوخت به صورت هم‌گون‌تری توزیع شده است و نقاط غنی و فقیر کمتر شده است.

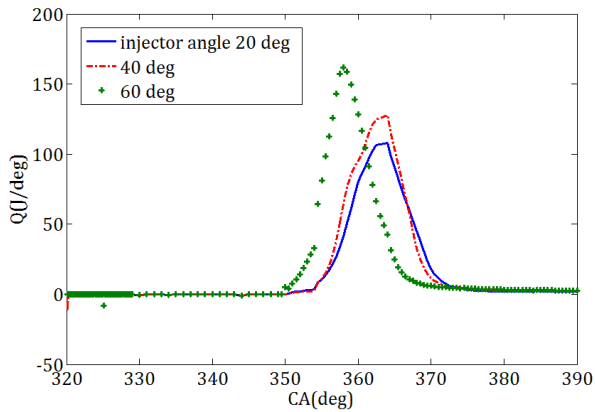


شکل ۱۰: توزیع کسر جرمی هیدروژن در صفحه شمع برای طول دوره پاشش ۶۹ درجه

<sup>1</sup> Indicator



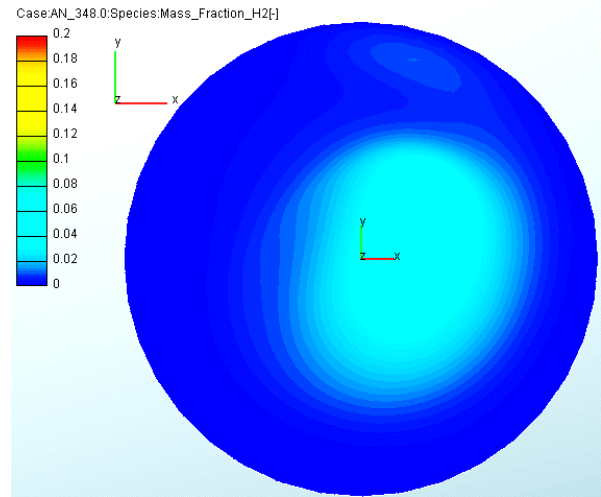
شکل ۱۵: فشار بر حسب درجه لنگ برای چهار زاویه افشانه



شکل ۱۶: حرارت آزاد شده بر حسب درجه لنگ برای سه زاویه افشانه

مقدار فشار متوسط میانگین، در زاویه افشانه ۶۰ درجه به اندازه ۶٫۵ درصد از حالت زاویه افشانه ۴۰ درجه و در زاویه ۴۰ به اندازه ۱۲٪ از حالت زاویه ۲۰ درجه بیشتر است. از این نتایج چنین برمی آید، که مقدار لایه‌ای بودن مخلوط در اطراف شمع نیز مهم است. در صورتی که مخلوط موجود در آن ناحیه، بیش از حد غنی باشد، منجر به آزاد شدن سریع‌تر حرارت و افزایش سریع‌تر فشار می‌شود. در نتیجه بیشینه فشار زودتر اتفاق می‌افتد.

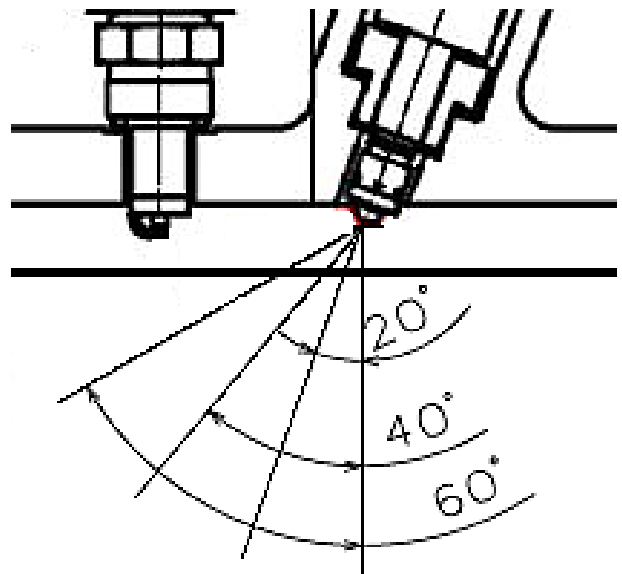
از این رو افزایش توان تولیدی در حالت زاویه افشانه ۶۰ به دلیل افزایش بیشینه فشار بوده است و در صورتی که در واقعیت ایجاد زاویه ۸۰ درجه ممکن باشد، انتظار می‌رود که بدلیل مکان نامناسب قله فشار، توان تولیدی کم شود.



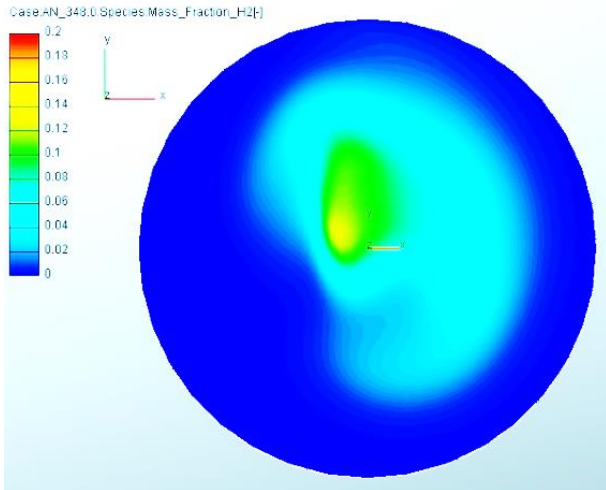
شکل ۱۳: توزیع کسر جرمی هیدروژن در صفحه شمع برای طول دوره پاشش ۳۹ درجه

#### ۲-۴- بررسی اثر زاویه پاشش

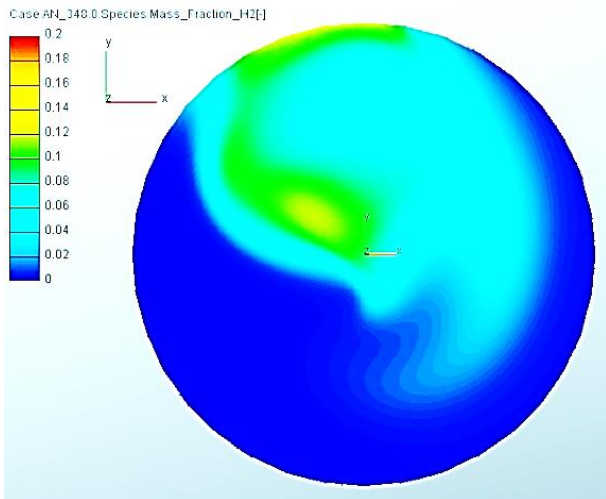
زاویه محور افشانه، تأثیر قابل توجهی روی کیفیت مخلوط لحظه جرقه دارد. در بررسی حاضر، سه زاویه افشانه بررسی گردید. شکل زوایای بررسی شده را نشان می‌دهد. هر چه جهت پاشش بیشتر به سمت شمع متمایل می‌شود، سوخت در نقاط بیشتری از محفظه توزیع می‌گردد و به دلیل وجود چرخش اولیه هوای ورودی که در شکل نمایش داده شده است، بخش‌های غنی از سوخت به مکان شمع نزدیک‌تر هستند. در نتیجه به دلیل گسترده‌تر بودن این بخش‌ها و نزدیک‌تر بودن آنها به مکان شمع، مقدار حرارت آزاد شده بیشتر بوده و زودتر آزاد شده است.



شکل ۱۴: زوایای محور افشانه



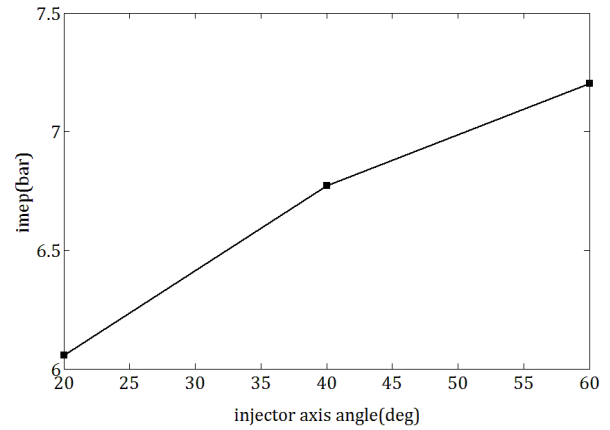
شکل ۲۰: توزیع کسر جرمی هیدروژن در زاویه افشانه ۴۰ درجه



شکل ۲۱: توزیع کسر جرمی هیدروژن در زاویه افشانه ۶۰ درجه

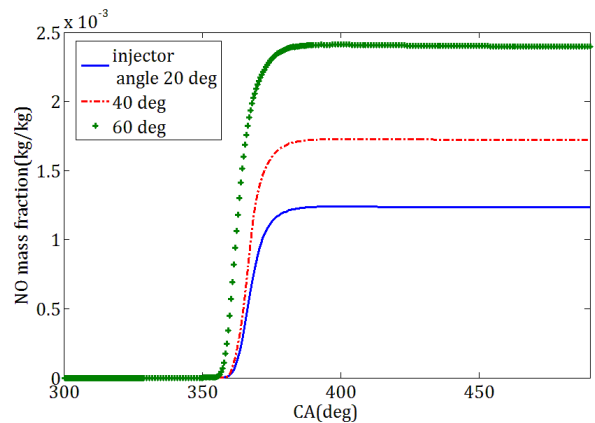
### ۴-۳- بررسی مکان شمع

مکان ایجاد شعله اولیه روی عمر شعله تأثیر می‌گذارد. موقعیت شمعی که کمترین مسافت طی شده توسط شعله را فراهم کند دارای بزرگ‌ترین نرخ گرمای آزاد شده بدلیل کاهش اتلاف حرارت به دیواره محفظه است. همچنین شمع‌ها یک ناحیه با دمای زیاد هستند که مکانی مناسب برای ایجاد NO می‌باشند، بنابراین تغییر موقعیت شمع نقش مهمی در عملکرد و مشخصه‌های آلاینده‌ی موتور دارد. شکل مکان‌های مورد بررسی شمع را نشان می‌دهد.

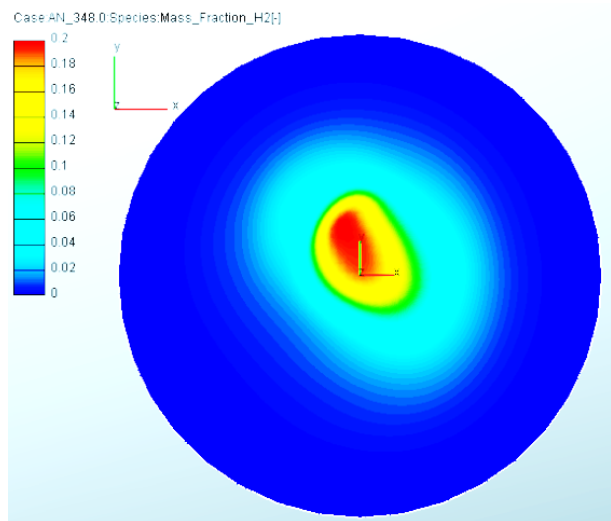


شکل ۱۷: مقدار فشار موثر میانگین برای سه زاویه افشانه

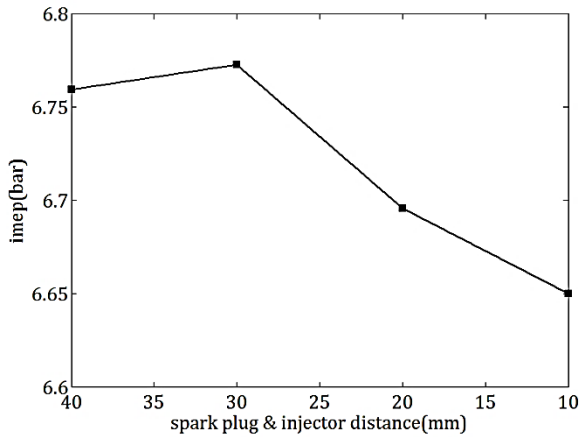
با وجود افزایش imep مقدار آلاینده‌ی NO زیاد می‌شود. شکل تغییرات NO را برای سه زاویه افشانه نشان می‌دهد. مقدار NO به ازای ۲۰ درجه جهت‌گیری به سمت شمع، حدود ۲۸ درصد افزایش می‌یابد. شکل ۱۹-۲۱ توزیع کسر جرمی هیدروژن را برای سه زاویه افشانه نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: آلاینده‌ی NO بر حسب درجه لنگ برای سه زاویه محور افشانه



شکل ۱۹: توزیع کسر جرمی هیدروژن در زاویه افشانه ۲۰ درجه



شکل ۲۲: نمودار تغییرات فشار موثر میانگین بر حسب فاصله شمع از افشانه

### ۵- نتیجه گیری

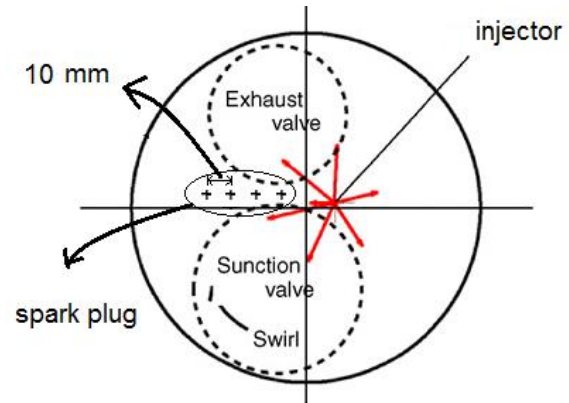
در این مقاله برخی مشخصات هندسی موتور پاشش مستقیم اشتعال جرقه‌ای هیدروژن سوز بررسی شد.

- فشار پاشش با استفاده از تغییر طول دوره پاشش اعمال شده است. این متغیر تأثیر بسزایی در شکل‌گیری مخلوط هوا و سوخت دارد و برای همگونی بیشتر در زمان جرقه بهتر است که فشار پاشش بیشتر باشد.
- زاویه محور افشانه متغیر مهمی در لایه‌ای نمودن مخلوط سوخت و هوای داخل محفظه احتراق است. هر چه زاویه پاشش به سمت شمع باشد، عملکرد موتور بهتر خواهد بود. از سویی آلاینده‌گی NO به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.

در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مکان شمع برای شکل‌گیری مناسب شعله، باید در جایگاه مناسب قرار گیرد. با قرارگیری شمع در نقاط غنی‌تر، شدت افزایش فشار بیشتر می‌شود و بیشینه فشار کمی بعد از نقطه مکث بالا قرار گرفته و ممکن است توان تولیدی کم شود.

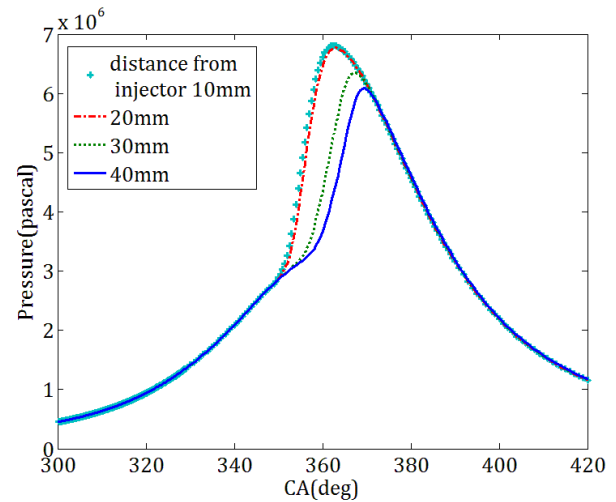
### مراجع

- [1] E. Kahmaran, Analysis of a Hydrogen fueled internal combustion engine, Master of Science thesis, School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, 2005
- [2] H. T. Izweik, CFD Investigations of Mixture Formation, Flow and Combustion for Multi-Fuel Rotary Engine, Ph.D. Dissertation, Brandenburg Technical University at Cottbus, Libya, 2009
- [3] J. W. Gosselink, Pass ways to a more sustainable production of energy: sustainable hydrogen- a research objective for Shell, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 27, pp. 1125-1129, 2002
- [4] I. Dincer and C. Zamfirescu, Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, pp. 16266-16286, 2012



شکل ۲۳: مکان شمع در فواصل مختلف از افشانه

در بررسی حاضر مکان شمع برای زاویه افشانه ۴۰ درجه در شرایط نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای ۰٫۵، شروع پاشش ۱۰۰ bTDC، زمان جرقه ۱۰ bTDC بررسی شد.



شکل ۲۴: نمودار فشار بر حسب درجه لنگ برای چهار فاصله شمع از افشانه

توضیحات داده شده، کاملاً در شکل مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، تغییرات imep خیلی چشم‌گیر نبوده اما می‌توان این نتیجه را گرفت که قرار گرفتن شمع در نقاط بسیار غنی از سوخت به دلیل زودتر آزاد شدن حرارت، منجر به قرار گرفتن قسمت اعظمی از نمودار فشار در زمان تراکم می‌گردد. از این رو، شمع باید در مکانی قرار گیرد که نزدیک به نواحی غنی است.

وقتی شمع در فاصله دورتری از افشانه قرار می‌گیرد، همانطور که در شکل ۲۰ نشان داده شده است، از نواحی غنی دور می‌شود. در نتیجه فشار با شیبی ملایم، افزایش می‌یابد. با نزدیک‌تر نمودن شمع به افشانه، به خاطر نزدیک بودن به نواحی غنی از هیدروژن، حرارت در زمان زودتری آزاد شده و شیب افزایش فشار بیشتر می‌شود. در نتیجه قسمت بیشتری از توان تولیدی، در زمان تراکم قرار می‌گیرد. از این رو، توان کاهش پیدا می‌کند.

- [10] A. Hamzehloo, P. Aleiferis, Computational study of hydrogen direct injection for internal combustion engines, SAE Technical Paper, 2013
- [11] T. Wallner, N. S. Matthias, R. Scarcelli, Influence of injection strategy in a high-efficiency hydrogen direct injection engine, SAE Technical Paper, 2011
- [12] S. Sukumaran, S. C. Kong, Numerical study on mixture formation characteristics in a direct-injection hydrogen engine, international journal of hydrogen energy, Vol. 35, No. 15, pp. 7991-8007, 2013
- [13] AVL FIRE user manual, 2013
- [14] AVL FIRE user manual, 2006
- [15] Q. Han, A Preliminary Study on Intake Flow to Improve In-Cylinder Air Motion, University of Windsor, 2013
- [16] A. Mohammadi, M. Shioji, Y. Nakai, W. Ishikura, E. Tabo, Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine, Int. J Hydrogen Energy, pp. 32296-304, 2007
- [17] A. Welch, D. Mumford, S. Munshi, Challenges in developing hydrogen direct injection technology for internal combustion engines, SAE Technical Paper, 2008
- [18] H. Zhao, Advanced Direct injection Combustion Engine Technologies and Development. Diesel engines, Woodhead, Vol. 1, 2012
- [5] R. Chaubey, S. Sahu, O. James and S. Maity, A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources, Renewable and Sustainable Energy reviews, Vol. 23, pp. 443-462, 2013
- [6] A. Gillingham, Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direction, Department of Management Science & Engineering Global Climate and Energy Project Precourt Institute for Energy Efficiency of Stanford University, 2007
- [7] S. Verhelst and T. Wallner, Hydrogen-fueled internal combustion engines, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, No. 6, pp. 490-527, 2009
- [8] A. Hamzehloo, P. Aleiferis, Numerical modelling of mixture formation and combustion in DISI hydrogen engines with various injection strategies, SAE Technical Paper, 2014
- [9] A. Nemati, V. Fathi, R. Barzegar, S. Khalilarya, Numerical investigation of the effect of injection timing under various equivalence ratios on energy and exergy terms in a direct injection SI hydrogen fueled engine, international journal of hydrogen energy, Vol. 38, No. 2, pp. 1189-1199, 2013



# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Investigation on the Effects of Geometrical Specifications of Injection on Performance of a Direct Injection Hydrogen Fueled Engine

S. Shamekhi Amiri<sup>1\*</sup>, O. Jahanian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Noshirvani University of technology, Babol, Iran, [Sh.shamekhi@yahoo.com](mailto:Sh.shamekhi@yahoo.com)

<sup>2</sup> Noshirvani University of technology, Babol, Iran, [Jahanian@nit.ac.ir](mailto:Jahanian@nit.ac.ir)

\*Corresponding Author, Telephone Number: +98-9111198691

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 1 April 2015

Accepted: 6 June 2015

#### Keywords:

Spark ignition direct injection engine

Hydrogen

Injection pressure

Injector angle

Spark plug place

### ABSTRACT

Hydrogen is a specified one among alternative fuels named for reducing carbon dioxide in exhaust gas. Hydrogen can be injected into runner or directly within the combustion chamber. However; direct injection would be desired because it would reduce the risk of pre-ignition and backfiring besides recovering volumetric efficiency losses. Injection parameters play a significant role in direct injection engines. In this paper, a direct injection hydrogen fueled engine is simulated in AVL-Fire commercial software and the results are validated with experimental data from reference works. The effects of injection pressure, injector angle and spark plug position have been investigated. Results showed that increasing injection pressure would improve engine performance with increase in nitrogen oxide pollutant. Tilting the injector toward spark plug would make a rich zone near spark thus better combustion process. The study was continued focusing on spark plug position and selecting the best position due to charge stratification.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.

