

بررسی تأثیر زمان جرقه، محل و تعداد شمع بر عملکرد یک نوع موتور وانکل

مسیح رمضانپور
صنایع هوایی شاهد- اصفهان
Ramezanpour.masih@gmail.com

شهرام طالبی
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه یزد
talebi_s@yazd.ac.i

ابوالفضل دهقانی سانج
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- دانشگاه یزد
ab_dehghani72@yahoo.com

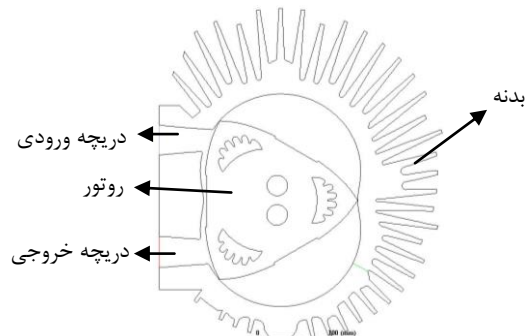
چکیده

در این مقاله یک موتور وانکل خاص که در صنایع هوایی استفاده می‌شود، شبیه‌سازی شده است. موتور وانکل شبیه‌سازی شده کاربراتوری بوده و احتراق آن از نوع پیش‌آمیخته است. هدف اصلی از این مطالعه بررسی حالت بهینه جرقه زنی برای موتور وانکل در حالت احتراق پیش‌آمیخته است. به دلیل پیچیدگی هندسه و امکانات نرم‌افزاری محدود، این موتور به صورت دوبعدی بررسی شده است. از نرم افزار تجاری فلوئنت^۱ در این مطالعه استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است در حالتی که از یک شمع در موتور وانکل استفاده می‌شود، بهترین مکان شمع پنج درجه متمایل به درجه خروجی و بهترین زمان جرقه زنی ۲/۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا است. در حالت احتراق دو شمع، بهترین مکان شمع‌ها، محلی است که دو شمع با خط افقی میانه زاویه ۲/۵ درجه می‌سازند. با بررسی مقالات عددی و تجربی در رابطه با موتور وانکل مشخص گردید که نتایج این شبیه‌سازی انطباق خوبی با نتایج مقالات دارد.

کلمات کلیدی: موتور وانکل، مکان شمع، زمان جرقه‌زنی، توان تولیدی

مقدمه

موتور وانکل که به نام مخترع آلمانی آن فلیکس وانکل مشهور شده است مانند سایر موتورهای چهار زمانه کار می‌کند و تفاوت اصلی آن در شکل سیلندر و روتور، نسبت به سیلندر و پیستون موتورهای رفت و برگشتی است. با این طراحی دیگر نیازی به تبدیل حرکت رفت و برگشتی پیستون به حرکت دورانی نیست، زیرا در این موتور مستقیماً حرکت دورانی تولید می‌گردد، که از اتلاف انرژی کاسته می‌شود. کمتر بودن قطعات متحرک و حرکت یکنواخت قطعات باعث می‌گردد که موتورهای وانکل کارکرد نرم‌تر و ارتعاش کمتری نسبت به موتورهای رفت و برگشتی داشته باشند. شکل ۱ هندسه یک نمونه موتور وانکل که برای شبیه‌سازی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این موتور وانکل در پهبادها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱. هندسه موتور وانکل مورد استفاده در این مطالعه

یکی از ویژگی‌های بارز موتورهای وانکل محفظه احتراق باریک و کشیده آنها است که احتراق را در این موتورها با محدودیت‌هایی روبرو می‌کند. همواره مهندسان در تلاش بوده‌اند تا کیفیت احتراق را در موتورهای وانکل بهبود بخشند و از این رو تحقیقات زیادی در سراسر جهان در این رابطه انجام شده است که در ادامه تعدادی از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. وادومستریج^[۱] به یک بررسی عددی در رابطه با موتورهای دورانی با تزریق مستقیم^۲ سوخت و احتراق جرقه‌ای^۳ پرداخته است بر اساس نتایج این تحقیق در حالتی که شمع در مکان ۱۰ درجه متمایل به درجه خروجی و انژکتور در مکان ۳۰ درجه متمایل به درجه ورودی بوده بیشترین توان خروجی حاصل شده است. چو و هی^[۲] طی گزارشی اطلاعاتی را در مورد موتورهای رفت و برگشتی با سوخت گاز طبیعی که دارای احتراق جرقه‌ای هستند ارائه کرده‌اند. در این گزارش بیان شده است که در موتورهایی که از گاز طبیعی استفاده می‌کنند جرقه بایستی بین ۲ تا ۱۰ درجه زاویه میل لنگ نسبت به موتورهای بنزینی زودتر زده شود و با غلیظ شدن مخلوط سوخت و هوا زمان جرقه باید عقب بیافتد. در این گزارش همچنین اثر تغییر مکان تزریق کننده سوخت بر روی عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفته است. لیانگ و ریتز^[۳] طی یک مطالعه عددی جزئیات شیمیایی واکنش احتراق موتورهای رفت و برگشتی با احتراق جرقه‌ای را بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که هر چه زمان جرقه به نقطه مرگ بالا نزدیک‌تر باشد مقدار اکسیدهای نیتروژن خروجی کمتر خواهد بود و هر چه جرقه زودتر از این زمان زده شود باعث افزایش در مقدار این آلاینده خواهد شد. ویلیس^[۴] طی یک مطالعه عددی تکنولوژی موتورهای دورانی را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که مخلوط سوخت و هوا در موتور وانکل در لحظه نقطه مرگ بالا، دچار غیر یکنواختی شدیدی است به گونه ای که دو ناحیه قابل اشتعال به وسیله یک ناحیه میانی با نسبت سوخت به هوای بالا و سرعت احتراق پایین از هم جدا شده‌اند. وقتی تنها از یک شمع در یکی از ناحیه‌های قابل اشتعال استفاده می‌گردد، اشتعال ناحیه دوم تا بعد از نقطه مرگ بالا به عقب می‌افتد اما با وجود دو شمع احتراق هر دو ناحیه در یک زمان شروع می‌شود و در نتیجه احتراق بزرگتری صورت می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان داده که با استفاده از دو شمع در موتور وانکل در بارهای کم تا متوسط مقدار راندمان حدود ۸ تا ۱۰ درصد ارتقا پیدا می‌کند. آبراهام و بارکو^[۵] یک مطالعه عددی را روی یک موتور دورانی انژکتوری به صورت سه بعدی انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که استفاده از دو شمع در این موتور حدود ۷ تا ۱۰ درصد راندمان را ارتقا خواهد داد. همچنین نتایج نشان داده است که استفاده از دو شمع در بارهای بالا اثر

² Direct injection

³ Spark ignition

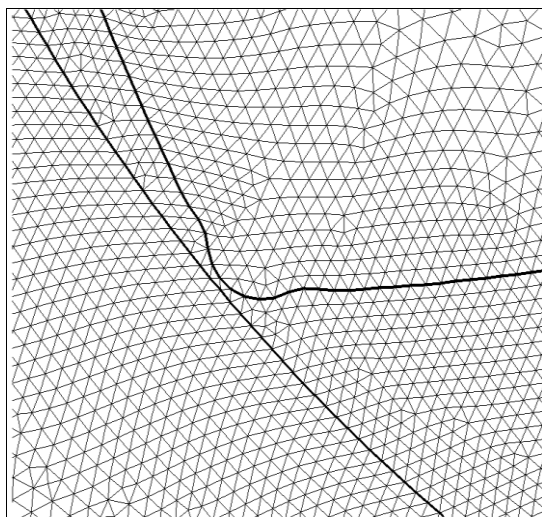
¹ Fluent

شبیه سازی نرم افزار

شبیه سازی به صورت دو بعدی و غیر دائم بوده است. احتراق کامل در نظر گرفته شده و بنزین به عنوان سوخت در نظر گرفته شده است. معادلات بقای جرم کلی، بقای جرم گونه‌ها، بقای مومنتوم، بقای انرژی و کا-اِپسیلون حل گردیده است.

هندسه مورد استفاده در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است که در این هندسه بخشی از میدان حل جامد و بخشی دیگر سیال است. فاصله بالا تا پایین محفظه هوزینگ^۴ این موتور وانکل، ۱۵ سانتی متر است. در قسمت جامد تنها انتقال حرارت هدایتی مد نظر است و چون از مش متحرک و معادلات غیر خطی و توربولانسی خبری نیست، شبکه بندی خیلی کوچک نیاز ندارد و با یک شبکه نسبتاً بزرگتری نسبت به قسمت سیال می‌توان نتایج قابل قبولی گرفت. برای ناحیه سیال اندازه شبکه از اهمیت زیادی برخوردار است. این اهمیت زمانی که از مش متحرک استفاده می‌شود دو چندان خواهد بود، لذا شبکه مناسب در تولید یک جواب مطلوب سهم به سزایی دارد. شبکه ایجاد شده باید تا حد امکان بزرگترین شبکه باشد تا به سرعت حل کمک کند. از طرفی بزرگتر شدن شبکه بدلیل استفاده از مکانیزم مش متحرک در نواحی بحرانی، ایجاد یک خطای بسیار رایج در این گونه مسائل، یعنی خطای حجم منفی، می‌کند. بنابر این رسیدن به شبکه بهینه برای این مسأله تنها از راه حدس و خطا در گام های زمانی متفاوت حاصل می‌گردد. در نهایت برای این شبیه سازی با در نظر گرفتن استقلال از مش تعداد ۱۷۳ هزار سلول در نظر گرفته شده است.

در مطالعه حاضر سرعت موتور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است که با این سرعت بهترین گام زمانی ممکن که در آن خطای حجم منفی مشاهده نمی‌گردد برابر ۶-۵۰ ثانیه است. در شکل ۲ تصویری از مش مورد استفاده در این مسأله قبل از شروع حرکت و در شکل ۳ تصویر مش همان ناحیه، بعد از چند دور چرخش روتور نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر مش نزدیک لبه روتور قبل از شروع حرکت

چندانی بر عملکرد موتور نخواهد داشت و تغییر محسوسی در راندمان دیده نمی‌شود. ایرمن و همکاران [۶] به یک مطالعه تجربی روی یک موتور دورانی کوچک با تزریق مستقیم و احتراق جرقه‌ای پرداخته‌اند. در این مطالعه از یک انژکتور به صورت تکی و در مکانهای مختلف استفاده شده است. این مطالعه شامل ارزیابی مکان شمع نسبت به نازل انژکتور است و مناسب ترین مکان شمع بر اساس داده ها به دست آمده است. همچنین در این مطالعه تأثیر عمق شمع روی قدرت موتور مورد بررسی قرار گرفته است. شیمیزو و همکاران [۷] طی گزارشی عملکرد موتورهای دورانی شرکت مزدا را بررسی کرده‌اند. در این گزارش بیان شده است که لبه فرار روتور در موتورهای دورانی یک ناحیه سیال پر فشار را به وجود می‌آورد که این ناحیه جلوی گسترش شعله به نواحی نزدیک لبه فرار را می‌گیرد. در این گزارش بیان شده که برای رفع این مشکل شرکت مزدا از یک شمع اضافی در نزدیک لبه فرار روتور استفاده کرده است. جونز و همکاران [۸] به بررسی تجربی یک موتور دورانی انژکتوری پرداخته‌اند. هدف اصلی این مطالعه به دست آوردن نسبت سوخت به هوای صحیح در مجاورت شمع بوده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که اگر علاوه بر انژکتور اصلی از یک انژکتور اضافی در نواحی نزدیک به شمع استفاده شود، توان تولیدی موتور افزایش می‌یابد. کاگاو و همکاران [۹] تأثیر مکان انژکتور اصلی به توان تولیدی موتور وانکل را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه از یک کد استفاده شده و شبیه‌سازی به صورت دو بعدی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که اگر انژکتور در قسمت پایین دست محفظه احتراق قرار بگیرد زمان کافی برای تبخیر شدن سوخت و مخلوط شدن سوخت و هوا وجود نخواهد داشت. بر خلاف آن تزریق سوخت از انژکتور بالادست باعث می‌شود که زمان کافی برای تبخیر سوخت و مخلوط شدن سوخت و هوا وجود داشته باشد.

در تحقیق حاضر با شبیه سازی جریان و احتراق درون یک نمونه موتور وانکل که در صنایع هوایی کاربرد دارد، حالت بهینه جرقه‌زنی برای احتراق پیش‌آمیخته مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار به کمک نرم‌افزار فلوئنت محفظه‌ی احتراق با استفاده از مش متحرک شبیه سازی و حل عددی شده است. با توجه به اینکه هندسه مربوطه پیچیدگی‌های خاصی دارد و همچنین استفاده از مش متحرک خود بر حجم محاسبات افزوده است از مدل دوبعدی برای این پژوهش استفاده شده است. در این تحقیق با بررسی حالت‌های مختلف احتراق در موتور وانکل، بهترین مکان شمع، بهترین زمان جرقه‌زنی شمع و بهترین مکان شمع‌ها در حالت دو شمعی، مشخص گردیده است. از آنجایی که بیشتر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با موتورهای وانکل مربوط به حالت انژکتوری یا غیرپیش‌آمیخته است و تحقیقات زیادی در رابطه با موتورهای وانکل کاربراتوری انجام نشده است، نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای خوبی برای تنظیم پارامترهای جرقه‌زنی در موتورهای وانکل کاربراتوری باشد. همچنین بررسی شرایط احتراق با وجود بیش از یک شمع نیز شناخت کاملی در رابطه با احتراق این نوع موتورها ایجاد خواهد کرد. نکته دیگر این که در هر موتور وانکل با توجه به ابعاد، شکل حفره روی روتور، نوع سوخت مصرفی، سرعت موتور و غیره پارامترهای جرقه زنی متفاوت خواهد بود و بنابر این تحقیق حاضر اطلاعات جدیدی را در رابطه با موتور وانکل خاص مورد بررسی به دست خواهد داد. با توجه به خاص بودن این نوع موتور و متفاوت بودن ابعاد و ویژگی‌های موتورهای وانکل مختلف، نتایج تجربی کافی و مطمئن در این زمینه موجود نیست.

^۴ منظور از هوزینگ ناحیه‌ای از موتور است که سیال در آن جریان دارد.

نتایج و بحث روی نتایج

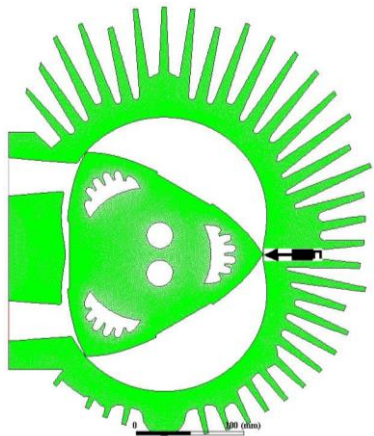
همان طور که قبلاً بیان گردید سرعت موتور وانکل در این تحقیق ۶۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده و جهت چرخش روتور ساعتگرد است. در این بخش نتایج به دست آمده ارائه گردیده است. برای بررسی حالت بهینه جرقه‌زنی در موتور وانکل لازم است که در بخش‌های مختلف تأثیر مکان شمع، زمان جرقه‌زنی و تعداد شمع مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور موتور وانکل شبیه‌سازی شده و حالت‌های مختلف جرقه‌زنی در موتور، مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی بهترین زمان جرقه‌زنی شمع

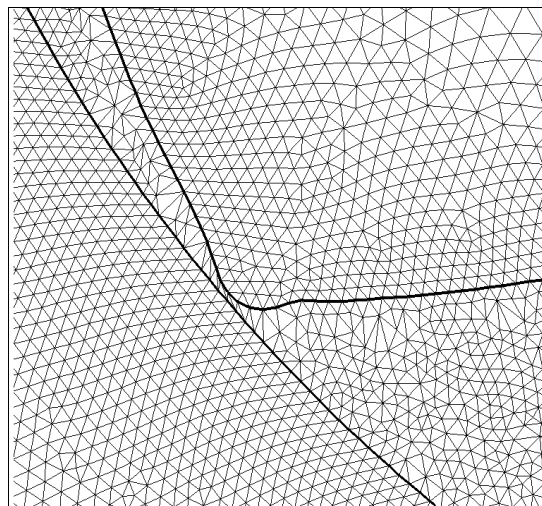
یکی از مهمترین عواملی که در عملکرد موتورهای دورانی تأثیر گذار است زمان جرقه‌زنی شمع است. بدست آوردن بیشترین فشار ممکن در اثر احتراق باید با توجه به این موضوع حاصل گردد که این فشار، گشتاور مؤثر تولید کند. البته باید به این نکته هم توجه داشت که از زمان جرقه زدن تا زمانی که شعله کاملاً گسترش پیدا می‌کند و فشار را بالا می‌برد، مدت زمانی به طول خواهد انجامید. در این مرحله از شبیه‌سازی که هدف بررسی زمان جرقه‌زنی شمع است، یک شمع در ناحیه وسط محفظه احتراق، که فاصله‌اش تا بالا و پایین محفظه احتراق یکسان است، در نظر گرفته شده است. با بررسی زمان‌های مختلف جرقه‌زنی و مقایسه توان‌های تولیدی در هر حالت می‌توان مناسب‌ترین زمان جرقه را بدست آورد.

در بحث زمان جرقه در احتراق، معمولاً زمان با پارامتری به نام زاویه روتور بیان می‌شود، به این صورت که اگر جرقه قبل از نقطه مرگ بالا رخ دهد، زاویه‌ای که روتور تا رسیدن به نقطه مرگ بالا فاصله دارد را بیان کرده و با واحد bTDC نشان می‌دهند. به عنوان مثال اگر جرقه ۱۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا رخ دهد، زمان جرقه را به صورت ۱۰bTDC نشان می‌دهند. همچنین برای نشان دادن زمان‌های بعد از نقطه مرگ بالا، مقدار زاویه‌ای که روتور از وضعیت مرگ بالا عبور کرده است را بیان کرده و با واحد aTDC نشان می‌دهند.

در نمودارهای ارائه شده در این مقاله برای این که خواننده دید بهتری نسبت به وضعیت روتور داشته باشد محور افقی به جای زمان، زاویه روتور قرار داده شده است، به این صورت که لحظه TDC به عنوان صفر محور افقی در نظر گرفته شده است و زوایای قبل از TDC با مقادیر منفی و زوایای بعد از TDC با مقادیر مثبت نشان داده شده است. شکل ۴ وضعیت روتور در حالت ۶۰bTDC که معادل ۶۰- روی محور افقی است را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۴ محل قرار گیری شمع نشان داده شده است.



شکل ۴. وضعیت روتور در ۶۰bTDC



شکل ۳. تصویر مش نزدیک لبه روتور پس از چند دور چرخش روتور

در این شبیه‌سازی از مدل توربولانسی کا-اپسیلون^۵ آر-ان-جی^۶ و کوپلینگ فشار-سرعت پیرو^۷ استفاده شده است. همچنین برای ترکیب و انتقال اجزاء شیمیایی و شبیه‌سازی واکنش احتراق از مدل انتقال اجزاء^۸ استفاده گردیده است.

بعد از انتخاب مدل انتقال اجزاء در نرم‌افزار فلوئنت از آنجایی که ماهیت جریان درون موتور اغتشاشی است باید اندرکنش شیمی-توربولانس مناسب نیز انتخاب گردد تا شبیه‌سازی به درستی صورت گیرد. در این شبیه‌سازی از اندرکنش شیمی-توربولانس «سرعت-محدود/اتلاف-ادی^۹» استفاده شده است. با انتخاب اندرکنش سرعت-محدود/اتلاف-ادی سرعت واکنش احتراق تا قبل از جرقه به وسیله معادله آرنیوس^{۱۰} کنترل می‌شود اما بعد از جرقه توربولانس کنترل سرعت واکنش را به عهده خواهد داشت، به عبارتی معادله آرنیوس مانند کلید قطع و وصلی است که از احتراق موتور قبل از جرقه شمع جلوگیری می‌کند. از آنجایی که در این تحقیق برای شبیه‌سازی موتور وانکل در حالت پیش‌آمیخته از شمع استفاده شده است و به عبارتی احتراق از نوع اشتعال جرقه‌ای و جریان مغشوش است اندرکنش سرعت-محدود/اتلاف-ادی مناسب ترین اندرکنش شیمی-توربولانس خواهد بود که در نرم‌افزار فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است.

جنس مواد استفاده شده برای قسمت جامد، آلومینیوم و برای قسمت سیال، مخلوط بنزین و هوا انتخاب شده است. کلیه شرایط مرزی مورد استفاده در این شبیه‌سازی از نتایج حاصل از مدل تجربی استفاده شده در صنایع هوایی شاهد اصفهان اقتباس شده است. مرز خارجی موتور دما ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه گیری‌های انجام شده دمای مرز خارجی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است. برای دیواره‌ی منفذهای عبور هوای خنک، در داخل روتور نیز از شرط مرزی دما ثابت استفاده شده است که دمای آنها ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. مجرای ورودی و خروجی به ترتیب با شرایط مرزی فشار ورودی و فشار خروجی مشخص شده‌اند که فشار نسبی، در هر دو آنها صفر در نظر گرفته شده است.

⁵ K-ε

⁶ RNG

⁷ Piso

⁸ Species transport

⁹ Finite-Rate/Eddy-Dissipation

¹⁰ Arrhenius

در اینجا پارامتری که با استفاده از آن می‌توان عملکرد موتور را در شرایط مختلف مقایسه نمود توان موتور است. با به دست آوردن متوسط گشتاور موتور و دانستن سرعت موتور که ۶۰۰۰ دور بر دقیقه است می‌توان توان تولیدی موتور وانکل را به دست آورد. برای مشخص شدن بهترین زمان جرقه‌زنی شمع، زمانهای مختلف جرقه را روی شمع تنظیم نموده و برای هر کدام، توان تولیدی موتور به دست آمده است. با مقایسه توانهای تولیدی موتور بهترین زمان جرقه‌زنی مشخص خواهد شد. جدول ۱ توان تولیدی موتور وانکل تک شمع در زمانهای مختلف جرقه را نشان داده است.

جدول ۱. توان تولیدی موتور حاصل از بررسی زمانهای مختلف جرقه‌زنی

زمان جرقه	توان خروجی (hp)
۱۰ bTDC	۳۴/۲۹
۷/۵ bTDC	۳۵/۶۶
۵ bTDC	۳۷/۱۳
۲/۵ bTDC	۳۸/۷۷
TDC	۳۶/۱۵
۳ aTDC	۳۲/۴۱

همان طور که در جدول ۱ دیده می‌شود در حالتی که شمع در زمان ۲/۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا جرقه زده است، بیشترین توان خروجی از موتور به دست آمده است، پس این زمان به عنوان بهترین زمان جرقه‌زنی در نظر گرفته می‌شود.

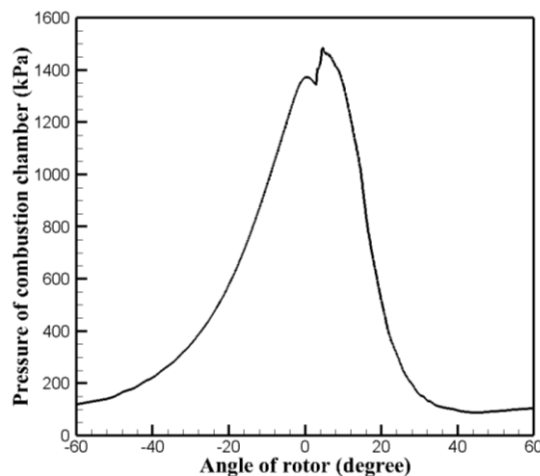
بررسی بهترین مکان شمع

پس از اینکه مناسب‌ترین زمان جرقه‌زنی شمع تعیین شد، بررسی روی مکان شمع صورت گرفته است تا بهترین مکان شمع نیز مشخص گردد. مکان شمع در نقاط مختلفی که موقعیتشان نسبت به خط افقی میانه موتور بالاتر و پایین‌تر است قرار داده شده و با بررسی نتایج حاصل از توان تولیدی موتور می‌توان مناسب‌ترین مکان برای جرقه‌زنی شمع را بدست آورد.

در اینجا منظور از خط افقی میانه موتور، خطی است که به صورت افقی رسم شده و دقیقاً از میان هوزینگ موتور عبور می‌کند. به عبارتی اگر فقط به شکل محفظه هوزینگ موتور نگاه کنیم، می‌توان گفت که این خط، خط تقارن موتور است.

همان طور که نتایج قبلی نشان داده است، اگر شمع در موقعیتی روی خط افق میانه موتور قرار بگیرد، بهترین زمان جرقه‌زنی حدود ۲/۵ bTDC است، پس در این مرحله نیز همین زمان برای جرقه در نظر گرفته شده است. برای مشخص شدن بهترین مکان شمع، نتایج حاصل از توان تولیدی موتور برای وضعیت هایی که خط زاویه شمع نسبت به خط افقی میانه موتور ۲/۵، ۵ و ۱۰ درجه زاویه دارد بررسی شده است. حال برای این که مکان شمع‌ها مشخص شوند، خطی از محل شمع به نقطه مرکزی محفظه هوزینگ رسم می‌شود. زاویه ای که این خط با خط افقی میانه موتور می‌سازد، بیانگر مختصات شمع است و یا به عبارتی این زاویه پارامتری برای مشخص کردن مکان شمع است. در شکل ۷ هندسه موتور وانکل، خط افقی میانه موتور، مکان شمع و خط زاویه شمع رسم گردیده است. این شکل مربوط به حالتی است که شمع ده درجه متمایل به دریچه ورودی است.

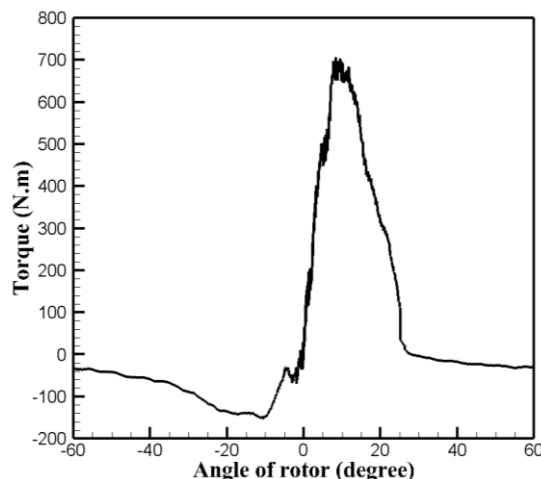
در اولین گام برای بررسی احتراق تک شمعی، نمودار فشار محفظه احتراق ارائه گردیده است. شکل ۵ یک نمونه نمودار فشار محفظه احتراق را برای حالتی که شمع در وسط محفظه احتراق قرار داشته و زمان جرقه در لحظه ۵ bTDC است نشان داده است.



شکل ۵. نمودار فشار محفظه احتراق برای زمان جرقه ۵ bTDC

نکته‌ای که در نمودار فشار به چشم می‌خورد، دو قله‌ای بودن این نمودار است. علت وجود دو قله در این نمودار، احتراق ترتیبی یا چند مرحله‌ای است که مانع از آزادسازی یکباره انرژی می‌گردد. به عبارتی به خاطر شکل خاص هندسه موتور وانکل تمام مخلوط سوخت و هوا در یک لحظه نمی‌سوزد و احتراق موتور در دو مرحله انجام می‌شود. لازم به ذکر است که با تغییر دادن زمان جرقه نیز شکل کلی نمودار فشار به همین صورت بوده و نمودار دارای دو قله خواهد بود. این موضوع یک عیب برای موتورهای وانکل تک شمع محسوب می‌شود که در ادامه و در بخش احتراق دو شمعی به طور کامل‌تر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۶ نمودار گشتاور تولیدی موتور را بر حسب زاویه روتور نشان داده است. نمودار گشتاور شکل ۶ مربوط به حالتی است که شمع در وسط محفظه احتراق قرار داشته و زمان جرقه در لحظه ۵ bTDC است. در نمودار گشتاور ارائه شده در شکل ۶، مقادیر منفی مربوط به زمانی است که روتور در حال متراکم کردن مخلوط سوخت و هوا است. در اثر بالا رفتن فشار در محفظه احتراق، گشتاوری در خلاف جهت حرکت موتور ایجاد خواهد شد که همان مقادیر منفی نمودار است. مقادیر مثبت هم مربوط به زمان احتراق و پس از آن است.



شکل ۶. نمودار گشتاور تولیدی موتور برای زمان جرقه ۵ bTDC

می‌گیرد و گسترش پیدا می‌کند. اما این که در کدام حالت موتور عملکرد بهتری دارد و توان بیشتری تولید می‌کند تنها از طریق اندازه‌گیری متوسط گشتاور تولیدی و توان تولیدی مشخص خواهد شد.

نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته برای مکان شمع در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج موجود در جدول ۲ می‌توان دریافت که مکان شمع تأثیر زیادی بر عملکرد موتور نداشته است و عملاً تغییر زیادی در توان تولیدی موتور مشاهده نمی‌گردد. اما از آنجایی که بیشترین توان تولیدی موتور مطلوب است، شمع‌ای که پنج درجه متمایل به دریچه خروجی است را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین مکان انتخاب کرد، زیرا بیشترین توان تولیدی را در میان مکانهای مورد آزمایش دارد.

نتیجه تحقیقات وادومستریج [۱] نیز نشان داده است که در موتور وانکل در حالتی که شمع متمایل به دریچه خروجی باشد نسبت به حالتی که شمع متمایل به دریچه ورودی است، توان بیشتری حاصل شده است. در تحقیقات وادومستریج مشخص شده که شمع ده درجه متمایل به دریچه خروجی بهترین عملکرد را دارد. البته مکان بهینه شمع در هر موتور با توجه به ابعاد موتور، نوع سوخت، شکل روتور و کاربراتور و انژکتوری بودن موتور متفاوت است.

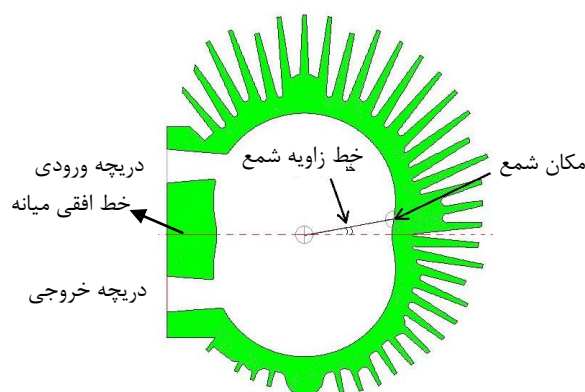
جدول ۲. توان تولیدی موتور حاصل از بررسی مکانهای مختلف شمع

توان تولیدی موتور (hp)	مکان شمع بر حسب زاویه
۳۸/۳۶	۱۰ درجه متمایل به دریچه ورودی
۳۸/۱۷	۵ درجه متمایل به دریچه ورودی
۳۸/۶۵	۲/۵ درجه متمایل به دریچه ورودی
۳۸/۷۷	روی خط افقی میانه موتور
۳۸/۸۲	۲/۵ درجه متمایل به دریچه خروجی
۳۸/۸۳	۵ درجه متمایل به دریچه خروجی
۳۸/۶۲	۱۰ درجه متمایل به دریچه خروجی

بررسی مناسب‌ترین مکان برای دو شمع

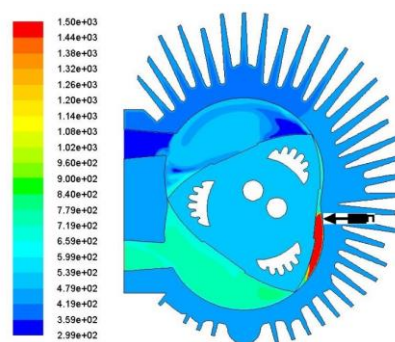
همان طور که در شکل ۵ مشخص است، وقتی برای احتراق از یک شمع استفاده می‌شود در نمودار فشار دو نقطه اوج وجود دارد. علت این امر را می‌توان در نحوه گسترش شعله در محفظه احتراق موتور جستجو نمود. زمانی که روتور به وضعیت نقطه مرگ بالا می‌رسد، در داخل محفظه احتراق دو ناحیه قابل اشتعال در قسمت بالا و پایین محفظه احتراق وجود دارد که به وسیله یک ناحیه مخلوط سوخت و هوا که در قسمت باریک میانی محفظه احتراق قرار دارد، از هم جدا شده‌اند. سرعت انتشار شعله در ناحیه باریک میانی نسبت به سرعت انتشار شعله در نواحی قابل اشتعال پایین و بالای محفظه احتراق کمتر است. در نتیجه زمانی که شمع در داخل یکی از نواحی قابل اشتعال جرقه می‌زند، شعله تشکیل و شروع به گسترش می‌کند، اما زمانی که به ناحیه میانی می‌رسد، به یکباره سرعتش کم می‌شود. در نتیجه احتراق در ناحیه دوم عقب می‌افتد و گاهی زمان احتراق در ناحیه دوم حتی به بعد از نقطه مرگ بالا هم می‌رسد. این احتراق ترتیبی باعث می‌شود که فشار در محفظه دو دفعه افزایش پیدا کند که نموداری با دو نقطه اوج ایجاد خواهد کرد.

مشکلی که در اینجا وجود دارد، این است که این احتراق توان تولیدی زیادی نخواهد داشت و از آنجایی که مقداری از مخلوط سوخت و هوا در یک زمان و مقدار باقی‌مانده در زمان دیگری آتش می‌گیرد، نمی‌تواند بیشترین توان تولیدی از موتور را ایجاد کند. برای برطرف کردن این مشکل روشهای

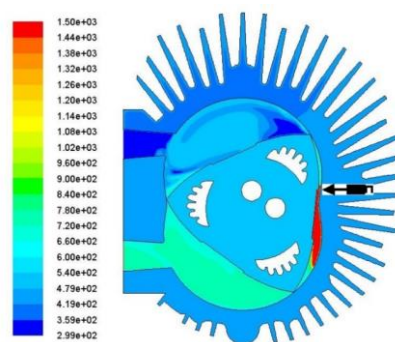


شکل ۷. وضعیت قرارگیری شمع نسبت به خط افقی میانه

برای این که تغییر وضعیت شعله با تغییر مکان شمع مشخص گردد در شکل‌های ۸ و ۹ کانتورهایی از دمای سیال داخل محفظه احتراق، بعد از جرقه زدن شمع ارائه گردیده است. همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مناطقی که در آن دما افزایش چشمگیری داشته، نشان دهنده وجود شعله در آن نقاط است. مشخص است که با تغییر مکان شمع نحوه شروع احتراق و گسترش آن متفاوت خواهد بود. در این شکل‌ها شمع با فلش نشان داده شده است.



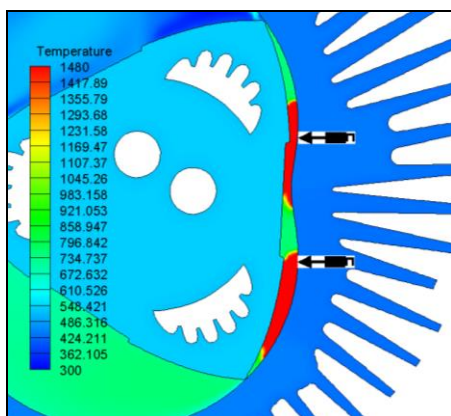
شکل ۸. توزیع دما در حالتی که مکان شمع ده درجه متمایل به دریچه خروجی است.



شکل ۹. توزیع دما در حالتی که مکان شمع ده درجه متمایل به دریچه ورودی است.

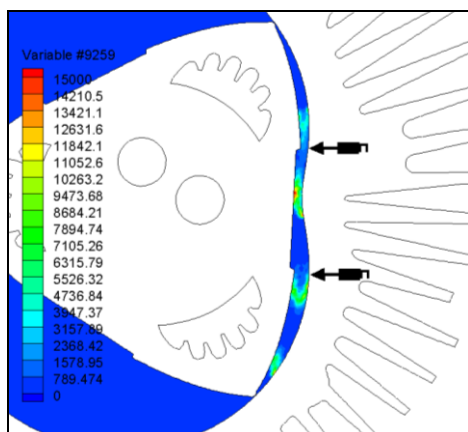
همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود زمانی که شمع در مکان ده درجه متمایل به دریچه خروجی است، احتراق در مکانی پایین‌تر تشکیل می‌شود و در ادامه نیز گسترش شعله به نقاط بالاتر به کندی صورت می‌گیرد در حالی که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، زمانی که شمع در مکان ده درجه متمایل به دریچه ورودی است، احتراق از مکان بالاتری شکل

شعله به هم می‌رسند. در نتیجه همه مخلوط سوخت و هوا در یک زمان دچار احتراق می‌شوند.



شکل ۱۱. کانتور دمای محفظه احتراق برای حالت دو شمعی

شکل ۱۲ نیز کانتور سرعت واکنش احتراق را برای حالت دو شمعی نشان داده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود سرعت واکنش احتراق در لبه‌ی شعله بیشتر است و شعله آتش ایجاد شده توسط هر شمع در دو جهت در حال گسترش است.



شکل ۱۲. کانتور سرعت واکنش احتراق برای حالت دو شمعی

توان تولیدی موتور وانکل با دو شمع و با زاویه‌های مختلف نسبت به خط افقی میانه در جدول ۳ آورده شده است.

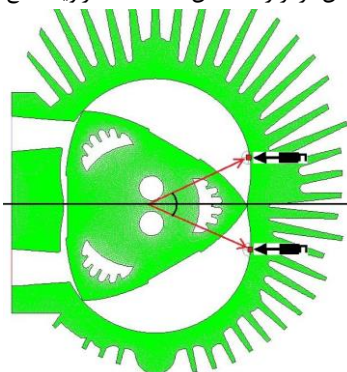
جدول ۳. توان تولیدی موتور برای حالت دو شمعی و با زوایای مختلف برای دو شمع

توان تولیدی (hp)	زاویه شمع‌ها نسبت به خط افقی میانه
۳۸/۲۱	۱۰ درجه
۳۸/۸۱	۵ درجه
۳۹/۰۷	۳/۷۵ درجه
۳۹/۹۹	۲/۵ درجه
۳۹/۱۲	۱/۲۵ درجه

مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از این روشها استفاده از دو شمع، یکی در ناحیه بالا و دیگری در ناحیه پایینی محفظه احتراق است. با این کار احتراق هر دو ناحیه قابل اشتعال همزمان شروع می‌گردد و در نتیجه دیگر احتراق ترتیبی رخ نمی‌دهد.

دلیل دومی که می‌توان برای افزایش تعداد شمع در موتور وانکل ذکر کرد وجود سیال پر فشار با سرعت پایین در نزدیکی لبه فرار روتور است. لازم به ذکر است منظور از لبه فرار در اینجا لبه انتهایی روتور است که در لحظه نقطه مرگ در قسمت بالای محفظه احتراق قرار دارد. زمانی که روتور در حال چرخش است، فشار سیال در نواحی نزدیک به لبه فرار روتور، افزایش یافته و سرعت ذرات سیال در این ناحیه پایین می‌آید. به خاطر همین موضوع گسترش شعله آتش به این ناحیه به کندی صورت می‌گیرد. زمانی که از دو شمع استفاده می‌شود، از آنجایی که یک شمع در نزدیکی ناحیه سیال پر فشار قرار دارد، گسترش شعله در این ناحیه بهتر صورت می‌گیرد.

از بررسی داده‌های تجربی موجود و مقالاتی از قبیل شیمیزو و همکاران [۷]، کاگاوا [۹]، احمدناگار [۱۰] و آبراهام [۱۱] مشخص می‌شود که در بیشتر مواردی که در موتور دورانی دو شمع به کار رفته است، موقعیت شمع‌ها به صورت متقارن در قسمت بالا و پایین محفظه احتراق است. در شکل ۱۰ محل دو شمع در موتور وانکل که به صورت متقارن قرار گرفته‌اند نشان داده شده است. دو پیکان قرمز رنگ نشان دهنده خط زاویه شمع‌ها می‌باشند.



شکل ۱۰. محل قرارگیری دو شمع به صورت متقارن در موتور وانکل

اما نکته‌ای که در اینجا بایستی مورد بررسی قرار بگیرد مکان بهینه شمع‌ها برای حالت دو شمعی است. در این مرحله مکان شمع‌ها را در چندین حالت متقارن و با زوایای متفاوت نسبت به خط افقی میانه قرار داده و زمان جرقه برای هر دو شمع همان ۲/۵ درجه قبل از نقطه مرگ، که برای احتراق تک شمع بدست آمد، انتخاب شده است.

نحوه قرارگیری شمع‌ها بدین صورت است که یک شمع در قسمت بالا و شمع دیگر در قسمت پایین محفظه احتراق قرار گرفته‌اند و زاویه آنها نسبت به خط افقی میانه برابر است. این نحوه قرارگیری شمع‌ها، برای زاویه‌های ۱۰، ۵، ۳/۷۵، ۲/۵ و ۱/۲۵ درجه بررسی شده است. به عنوان مثال برای زاویه ۱۰ درجه، یکی از شمع‌ها ۱۰ درجه متمایل به دریاچه ورودی و دیگری ۱۰ درجه متمایل به دریاچه خروجی است. با بررسی توان تولیدی موتور وانکل در هر کدام از حالات پیش گفته مشخص خواهد شد که کدام وضعیت برای قرارگیری دو شمع در محفظه احتراق موتور وانکل بهتر است. شکل ۱۱ توزیع دمای سیال داخل محفظه احتراق برای حالت دو شمعی را نشان داده است. در این شکل دیده می‌شود که با جرقه زدن شمع، شعله در قسمت بالا و پایین محفظه احتراق همزمان شروع شده و در ادامه این دو

شکل ۱۴. نمودار فشار نسبت به زاویه میل لنگ در سه حالت (۱) تک شمعی (۲) دو شمعی و جرقه عقب افتاده (۳) دو شمعی و جرقه جلو افتاده [۱۵]

نتیجه‌گیری

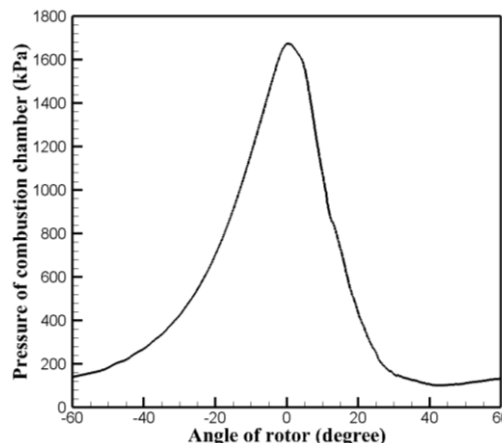
با بررسی‌های انجام شده مشخص گردیده است که بهترین زمان جرقه‌زنی شمع در موتور وانکل ۲/۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا است. همچنین بهترین مکان شمع در حالت تک شمعی، مکانی است که خط زاویه شمع ۵ درجه متمایل به دریچه خروجی باشد. در حالتی که دو شمع در موتور وانکل به کار رفته است، بهترین وضعیت قرارگیری شمع‌ها برای حصول توان تولیدی بیشتر وضعیتی است که یکی از شمع‌ها ۲/۵ درجه متمایل به دریچه خروجی و شمع دیگر ۲/۵ درجه متمایل به دریچه ورودی است. همچنین با بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که نمودار فشار محفظه احتراق موتور وانکل در حالت تک شمعی، دو قله‌ای است و علت آن احتراق ترتیبی است که با دو شمعی کردن موتور این مشکل برطرف می‌گردد.

مراجع

- 1- Wadumesthrige, A., 2010, "Computational investigation of optimal heavy fuel direct injection spark ignition in rotary engine", *MS thesis, wright state university*.
- 2- Cho, H., He, B., 2007, "Spark ignition natural gas engines: a review", *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 608–618.
- 3- Liang, L., Reitz, R., 2006, "Spark ignition engine combustion modeling using a level set method with detailed chemistry", *SAE thechnical paper series* 2006-01-0243.
- 4- Willis, E., 1992, "NASA's rotary engine technology enablement program - 1983 Through 1991", *NASA Technical* 105562.
- 5- Abraham, J., Bracco, F., 1992, "3-D Computations to improve combustion in a stratified-charge rotary engine - Part III: Improved ignition strategies". *Society of Automotive Engineers International (SAE)*, SAE 920304/SAE Trans.
- 6- Eiermann, D., Nuber, R., Breuer, J., Soimar, M., Gheorghiu, M., 1993, "An experimental approach for the development of a small spark assisted diesel fueled rotary engine", *Society of Automotive Engineers International (SAE)*, SAE 930683.
- 7- Shimizu, R., Tadokoro, T., Nakanishi, T., Funamoto, J., 1992, "Mazda 4-Rotor rotary engine for the Le Mans 24-hour endurance race", *Society of Automotive Engineers International (SAE)*, SAE 920309.
- 8- Jones, C., Lamping, H., Myers, D., Loyd, R., 1977, "An Update of the Direct Injected Stratified Charge Rotary Combustion Engine Developments at Curtiss-Wright", *Society of Automotive Engineers International (SAE)*, SAE 770044.
- 9- Kagawa, R., Okazaki, S., Somyo, N., Akagi, Y., 1993, "A Study of a Direct Injection Stratified-Charge Rotary Engine for Motor Vehicle Application", *Society of Automotive Engineers International (SAE)*, SAE 930677.
- 10- Ahmednagar, A., 2016, " Numerical Investigation on the Effects of Flame Propagation in Rotary Engine Performance With Leakage and Different Recess

از جدول ۳ مشخص است که در حالتی که دو شمع به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که هر کدام ۲/۵ درجه نسبت به خط افقی میانی زاویه دارند، بیشترین توان تولیدی از موتور به دست آمده است، پس این حالت مناسب‌ترین وضعیت قرارگیری دو شمع در موتور وانکل است. همچنین در این جدول مشاهده می‌گردد که توان تولیدی حاصل از دو شمعی به طور کلی از توان تولیدی تک شمعی بیشتر است.

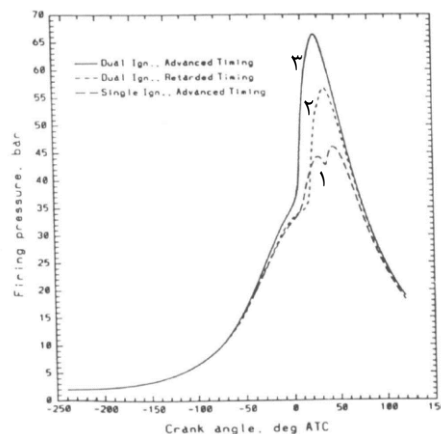
در شکل ۱۳ نمودار فشار محفظه احتراق، در حالتی که دو شمع در حالت متقارن قرار گرفته‌اند و زاویه آنها نسبت به خط افقی میانه برابر ۲/۵ درجه است، نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نمودار فشار محفظه احتراق برای حالتی که دو شمع در موتور وانکل استفاده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود در شکل ۱۳ دیگر دو قله فشار دیده نمی‌شود و در عوض یک قله فشار وجود دارد که مقدار بیشینه فشار بیشتری نسبت به حالت تک شمعی، بوجود آمده است. علت این امر در ابتدای این بخش مورد بحث قرار گرفت که مشکل احتراق ترتیبی با اضافه کردن یک شمع به محفظه احتراق برطرف شده است.

ویلیس [۴] نیز طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیده است که موتور وانکل با وجود دو شمع عملکرد بهتری داشته و نمودار فشار به جای دو قله، یک قله خواهد داشت. نتایج این مطالعه نشان داده است که با استفاده از دو شمع در موتور وانکل در بارهای کم تا متوسط مقدار راندمان حدود ۸ تا ۱۰ درصد ارتقا پیدا می‌کند. شکل ۱۴ که در تحقیقات ویلیس ارائه شده است نمودار فشار محفظه احتراق موتور وانکل را در حالت تک شمعی و دو شمعی نشان می‌دهد.



Shapes Using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics", *Journal of Energy Resources Technology*, SEPTEMBER 2016, Vol. 138 / 052210-1.

11- Abraham, J., Bracco, F., 1991, " 3-D Computations of Premixed-Charge Natural Gas Combustion in Rotary Engines", *SAE thechnical paper series 910625*.