هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران، ۲۹ تا ۳۱ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۸
هفتاد و پنجمین سالگرد تاسیس دانشگاه تهران

# بررسی آزمایشگاهی اثر افزایش سرعت موتور دوگانه سوز HCCI بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های هیدروکربن های نسوخته ، منواکسید کربن و دوده در دماهای مختلف سیستم خنک کننده

محسن قاضی خانی [۱] - یاسر کاشی طرقی [۲] - محمد رضا کلاته [۳]

[۱] استادیار گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه فردوسی مشهد ، m_ghazikhani@yahoo.com
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ، yaserkashi@yahoo.com
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ، mr_kalateh@yahoo.com

**چکیده**

در این کار تحقیقاتی تأثیر سرعت بر پارامترهای عملکردی وآلاینده های موتور دوگانه سوز بنزین-دیزل HCCI درسه دمای سیستم خنک کننده $^{o}C$۵۰،۴۰ و۶۰ ، در یک موتور تک سیلندر با نسبت تراکم ۱۷،۵:۱ بررسی شده است . نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت ، نسبت پیش آمیختگی کاهش، نسبت هم ارزی وآلاینده های آن افزایش یافته و افزایش دمای سیستم خنک کننده تأثیری بر آلاینده های موتور ندارد.

**کلمات کلیدی:** موتور دوگانه سوز HCCI، آلاینده های منواکسید کربن ، هیدروکربنهای نسوخته و دوده

## مقدمه

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در راستای کاهش آلودگی های موتورهای احتراق داخلی صورت گرفته و راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از این راهکارها احتراق محلوط پیش آمیخته همگن [۱](HCCI) می باشد . این نوع احتراق مزایای هر دو نوع احتراق اشتعال تراکمی و اشتعال جرقه ای را دارد که از آن جمله می توان به راندمان بالا ، آلاینده اکسیدهای ازت کم و تولید دوده بسیار پایین اشاره نمود [۱] .

در احتراق HCCI مخلوط پیش آمیخته با نسبت سوخت به هوای رقیق متراکم می شود تا به شرایط مناسب خود اشتعالی برسد [۲] . زمانی که مخلوط سوخت و هوا به نقطه خود اشتعالی برسد ، چشمه های احتراق به تعداد زیاد درکل مخلوط تشکیل می شوند و به طور همزمان به نقاط همسایه خود سرایت می کنند [۳].

نتایج آزمایشات نشان می دهد که در احتراق HCCI انرژی سوخت در دو مرحله آزاد می شود . مرحله اول انرژی در دمای پایین مخلوط آزاد می شود که زمان روی دادن آن به نوع سوخت بستگی دارد (شعله سرد) و مرحله دوم انرژی سوخت در دمای بالای مخلوط آزاد می شود و احتراق اصلی HCCI را شامل می شود [۳] .

روشهای مختلفی برای کنترل احتراق در این نوع موتورها پیشنهاد شده است ، از جمله ؛ تغییر نرخ بازگردانی گازهای اگزوز، استفاده از نسبت تراکم متغیر و استفاده از زمانبندی متغیر سوپاپها جهت تغییر درصد مواد باقیمانده داخل سیلندر [۴].

در این کار تحقیقاتی موتور دوگانه سوز HCCI جهت بررسی اثر سرعت بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های موتور در سه دمای سیستم خنک کننده آزمایش شده است .

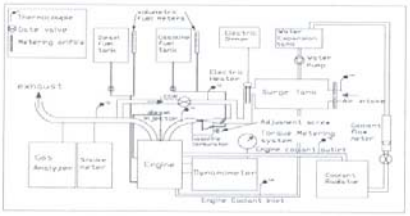
## بستر آزمون

آزمایشات مورد بحث بر روی یک موتور تک سیلندر چهار زمانه انجام شده است . سوخت بنزین از طریق کاربراتوری که توسط پیچ تنظیم دبی جریان سوخت در ونتوری آن قابل تغییر است ، در منی فولد با هوا مخلوط می شود . سوخت دیزل نیز به داخل سیلندر تزریق می شود . مشخصات موتور مورد نظر در جدول ۱ آمده است .

جدول ۱ – مشخصات موتور

| | |
|---|---|
| چهار زمانه | نوع موتور |
| ۱ | تعداد سیلندر |
| ۱۷،۵:۱ | نسبت تراکم |
| CC۵۸۲ | حجم جابجایی |
| mm۸۲ | کورس پیستون |
| mm۹۵ | قطر سیلندر |
| BTDC $^{o}$۳۵ | زمان پاشش سوخت دیزل |

محور موتور به یک دینامومتر الکتریکی متصل است . گشتاور مقاومی که در پوسته دینامومتر هنگام تولید توان ایجاد می شود ، آن را از حالت تعادل خارج می کند و جهت حفظ حالت اولیه نیاز به اعمال نیرو در بازوی مخصوصی به طول ۰،۲۵ متر می باشد .این نیرو و در نتیجه گشتاور موتور توسط نیروسنج اندازه گیری می شود . شکل۱ شماتیک دیاگرام بستر آزمون را نشان می دهد .




شکل ۱ – شماتیک بستر تست

## روش انجام آزمایش

در این نوع احتراق نسبت پیش آمیختگی به صورت انرژی سوخت پیش آمیخته نسبت به انرژی کل دراحتراقHCCIبه عنوان پارامتری مؤثر در تعیین شرایط کاری به صورت زیر تعریف می شود [۱] :

$$r_p = \frac{Q_p}{Q_t} = \frac{m_p h_{sp}}{m_p h_{sp} + m_d h_{sd}} \qquad (۱)$$

که در آن $m_p$ جرم سوخت پیش آمیخته،$m_d$ جرم سوخت

[1] Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI)

# بررسی آزمایشگاهی اثر افزایش سرعت موتور دوگانه سوزHCCI بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های هیدروکربن های نسوخته ، منواکسید کربن و دوده در دماهای مختلف سیستم خنک کننده

**محسن قاضی خانی [۱] - یاسر کاشی طرقی [۲] – محمد رضا کلاته [۳]**

[۱] استادیار گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه فردوسی مشهد ، m_ghazikhani@yahoo.com
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ، yaserkashi@yahoo.com
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ، mr_kalateh@yahoo.com

**چکیده**

موتورهای HCCI علی رغم مزایای زیاد خود مشکلاتی هم ، از جمله تولید زیاد آلاینده های منواکسید کربن و هیدروکرن نسوخته ، دارند که محور توجهات در سالهای اخیر قرار گرفته است . در این کار تحقیقاتی موتور دوگانه سوز بنزین-دیزل HCCI ، در یک موتور تک سیلندر با نسبت تراکم ۱۷,۵:۱ و دمای مخلوط سوخت و هوای ۱۱۰-۱۱۵ $^{o}C$ مورد آزمایش قرار گرفته و تأثیر سرعت بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های آن در سه دمای ۴۰ ، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد برای سیستم خنک کننده بررسی و در هر مرحله سرعت و توان موتور به طور جداگانه کنترل و اندزه گیری شده است . نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت موتور دوگانه سوز HCCI ، نسبت پیش آمیختگی کاهش ، نسبت هم ارزی و آلاینده های آن افزایش یافته اند . افزایش منواکسید کربن به دلیل کاهش زمان اکسیداسیون آن در احتراق به دی اکسید کربن ، افزایش هیدروکربن نسوخته به دلیل کاهش دمای ماکزیموم احتراق و افزایش دوده نیز به دلیل کاهش زمان سوختن دوده تولیدی در احتراق دیزل می باشد . همچنین نتایج نشان می دهند افزایش دمای سیستم خنک کننده تأثیر چندانی بر آلاینده ها در موتور مورد آزمایش ندارد.

**کلمات کلیدی:** موتور دوگانه سوز HCCI، آلاینده های منواکسید کربن ، هیدروکربنهای نسوخته و دوده

**مقدمه**

در روند تحقیقات و توسعه موتورهای احتراق داخلی ، دو نوع موتور اشتعال جرقه ای و اشتعال تراکمی بسیار مورد توجه بوده اند . در احتراق متداول موتورهای اشتعال جرقه ای ، جرقه شمع عامل اصلی احتراق مخلوط سوخت و هوای داخل سیلندر می باشد که در نتیجه بوجود آمدن نواحی با دمای بسیار بالا در مخلوط ، آلودگی اکسیدهای ازت[1] تولید می شود . در موتورهای اشتعال تراکمی ، پس از ورود هوا به داخل سیلندر و فرآیند تراکم ، زمان شروع احتراق توسط تزریق سوخت به داخل هوای فشرده با دمای بالا، کنترل می شود . این سامانه پاشش سوخت ، سیلندر را به چند ناحیه شامل نواحی با دمای بالا و نواحی با سوخت غنی تقسیم می کند ، که به ترتیب سبب تولید آلاینده های اکسیدهای ازت و ذرات معلق[2] می شوند [۱] .

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در راستای کاهش آلودگی های موتورهای احتراق داخلی صورت گرفته و راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از این راهکارها احتراق مخلوط پیش آمیخته همگن (HCCI)[3] می باشد . موتور HCCI با مخلوط پیش آمیخته همگن گزینه ای است که راندمان بالا و مشخصه های آلایندگی بسیار پایین را تضمین می نماید [۲] . این نوع احتراق مزایای هر دو نوع احتراق اشتعال تراکمی و اشتعال جرقه ای را دارد که از آن جمله می توان به راندمان بالا ، آلاینده اکسیدهای ازت کم و تولید دوده بسیار پایین اشاره نمود [۳و۴] .

تحقیقات در زمینه موتورهای HCCI ابتدا از موتورهای دو زمانه بنزینی با هدف کاهش آلاینده هیدروکربن های نسوخته[4] آغاز و خیلی سریع دامنه آزمایشات و مدل سازی ها به موتورهای چهار زمانه گسترش پیدا نمود . در احتراق HCCI مخلوط پیش آمیخته با نسبت سوخت به هوای رقیق متراکم می شود تا به شرایط مناسب خود اشتعالی برسد . در این نوع موتورها احتراق خود اشتعالی با رقیق سوزی مخلوط ، افزایش راندمان احتراق و کاهش احتمال تولید ضربه همراه است [۵] .

در موتورهای بنزینی زاویه ادوانس جرقه در شمع و در موتورهای دیزلی زمان پاشش سوخت ، عامل اصلی کنترل شروع احتراق هستند، اما در موتورهای HCCI عامل خارجی برای کنترل زمان شروع احتراق وجود ندارد. احتراق در موتور HCCI در فرآیند همزمان خوداشتعالی در کل مخلوط صورت می گیرد [۶] . زمانی که مخلوط سوخت و هوا به نقطه خود اشتعالی برسد ، چشمه های احتراق به تعداد بسیار زیاد در کل مخلوط تشکیل می شوند و به طور همزمان به نقاط همسایه خود سرایت می کنند ، در نتیجه تمامی نقاط مخلوط به طور تقریباً همزمان محترق می شوند و پیشروی شعله به وجود نمی آید . در این حالت نرخ احتراق بسیار بالا بوده و نتیجتاً به دلیل افت زمانی بسیار ناچیز احتراق و رقیق سوزی قابل توجه در این موتورها ، راندمان افزایش می یابد [۷و۸] .

نتایج تجربیات آزمایشگاهی و مدل سازی های به عمل آمده

---

[1] $NO_X$
[2] Particulate matter
[3] Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI)
[4] Unburned Hydrocarbon

نشان می دهد که در احتراق HCCI انرژی سوخت در دو مرحله آزاد می شود . مرحله اول انرژی در دمای پایین مخلوط آزاد می شود که زمان روی دادن آن به نوع سوخت بستگی دارد (شعله سرد) و مرحله دوم انرژی سوخت در دمای بالای مخلوط آزاد می شود و احتراق اصلی HCCI را شامل می شود . در این نوع احتراق کارکرد موتور بسیار وابسته به زاویه رخ دادن شعله سرد و مقدار انرژی آزاد شده در این مرحله می باشد [۸] .

در موتور HCCI تعیین زمان شروع احتراق و در نتیجه شرایط کاری موتور توسط سینتیک شیمیایی احتراق صورت می گیرد . به همین دلیل گستره عملکرد موتور در این نوع احتراق دامنه بسیار کمی دارد و در هر نقطه کاری ، با تغییر کمی در شرایط احتراق ، پارامترهای عملکرد موتور مانند سرعت و گشتاور تغییر می کند . تمامی راههای کنترلی پیشنهادی در این موتورها شرایط احتراق را به نحوی تغییر می دهند که شروع احتراق و یا به عبارتی زمان شروع شعله سرد ( واکنشهای دما پایین ) نزدیک نقطه مرگ بالا[1] اتفاق بیافتد . در حالت ایده آل این نوع احتراق ، کل مخلوط به طور همزمان محترق می شود . در موتورهای HCCI با سوخت بنزین علی رغم خاصیت تبخیر پذیری سریع بنزین و کمک به همگن سازی مخلوط ، احتراق خوداشتعالی بنزین تک مرحله ای است و جهت شروع احتراق واکنشهای دما پایین ( شعله سرد ) نیاز به سوخت کمکی دارد [۲] .

علی رغم تحقیقات فراوان صورت گرفته در این زمینه ، چالشهای زیادی وجود دارد که از آن جمله می توان به کنترل احتراق HCCI در شرایط استارت سرد و شرایط گذرای کارکرد موتور اشاره نمود . روشهای مختلفی برای کنترل احتراق در این نوع موتورها پیشنهاد شده که از آن جمله می توان به ؛ تغییر نرخ بازگردانی گازهای اگزوز[2] ، استفاده از نسبت تراکم متغیر[3] و استفاده از زمانبندی متغیر سوپاپها[4] جهت تغییر درصد مواد باقیمانده داخل سیلندر اشاره نمود، والبته تمامی این روشها به منظور ایجاد شرایط مناسب برای خود اشتعالی مخلوط سوخت و هوای رقیق در نقطه ای از زاویه میل لنگ است که بتوان راندمان بالاتر و آلودگی کمتر را از موتور اخذ نمود[۹].

یکی دیگر از روشهای کنترل زمان شروع احتراق ، بررسی تغییرات دمای مخلوط سوخت و هوا می باشد . انتقال حرارت احتراق به بدنه سیلندر نقش مهمی در تعیین شرایط دمایی مخلوط داخل سیلندر دارد . تغییر دمای بدنه سیلندر می تواند با تأثیر بر دمای مخلوط همجوار خود سبب تغییر شرایط احتراق و نرخ سوختن شود [۱۰] . علی رغم اهمیت بالای شرایط دمایی مخلوط سوخت و هوا در احتراق HCCI ، اطلاعات کمی از دمای هسته مرکزی مخلوط و یا حتی لایه مرزی حرارتی در جداره سیلندر وجود دارد ، لذا بررسی دمای اندازه گیری شده بدنه سیلندر ، می تواند اطلاعات باارزشی برای تعیین پارامترهای احتراقی به دست دهد [۱۰] .

در این کار تحقیقاتی موتور تک سیلندر چهار زمانه دوگانه سوز HCCI جهت بررسی اثر سرعت بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های موتور در سه دمای سیستم خنک کننده آزمایش شده ، که گستره دمایی آن در حالت پایدار موتور انتخاب شده است . نتایج آزمایشات نشان داده است موتور دوگانه سوز روش سهل و مناسبی برای تبدیل به موتور HCCI است . این موتور به دمای سیستم خنک کننده حساسیت بالایی دارد و افزایش آن سبب ایجاد ناپایداری در احتراق می شود .

## بستر آزمون

آزمایشات مورد بحث بر روی یک موتور تک سیلندر چهار زمانه با نسبت تراکم متغیر بین ۵:۱ تا ۱۸:۱ انجام شده است . این موتور در حالت پایه هم می تواند به صورت اشتعال جرقه ای با نسبت تراکمی بین ۷ تا ۱۱ و هم می تواند به صورت اشتعال تراکمی ( در این حالت انژکتور دیزل در محل شمع نصب می گردد ) با نسبت تراکمی بین ۱۲ تا ۱۸ تولید توان نماید .

سوخت بنزین از طریق کاربراتوری که در فاصله ۱۸۰ میلیمتری از دهانه سوپاپ ورود قرار گرفته و توسط پیچ تنظیم دبی جریان سوخت در ونتوری آن قابل تغییر است ، در منی فولد ورودی با هوا مخلوط می شود . سوخت دیزل نیز توسط انژکتور به داخل سیلندر تزریق می شود . مشخصات موتور مورد نظر در جدول ۱ آمده است .

جدول ۱ – مشخصات موتور

| | |
|---|---|
| نوع موتور | چهار زمانه |
| تعداد سیلندر | ۱ |
| نسبت تراکم | ۱۷,۵:۱ |
| حجم جابجایی | ۵۸۲CC |
| کورس پیستون | ۸۲mm |
| قطر سیلندر | ۹۵mm |
| نحوه سوخت رسانی بنزین | کاربراتور- داخل منی فولد |
| نحوه سوخت رسانی دیزل | انژکتور – داخل سیلندر |
| زمان پاشش سوخت دیزل | $35^{o}$ BTDC |

محور موتور به یک دینامومتر الکتریکی متصل است . در زمان استارت ، به عنوان موتور الکتریکی ، انرژی دورانی لازم جهت روشن شدن موتور را تأمین می نماید و هنگام کارکرد موتور ، به کمک کلید تغییر وضعیت ، به ژنراتور تولید برق تبدیل و به عنوان دینامومتر استفاده می شود . باتوجه به اینکه دینامومتر الکتریکی حول محور خود می تواند آزادانه حرکت دورانی داشته باشد ، گشتاور مقاومی که در پوسته دینامومتر هنگام تولید توان ایجاد می شود ، آن را از حالت تعادل خارج می کند و جهت حفظ حالت اولیه نیاز به اعمال نیرو در بازوی مخصوصی به طول ۰,۲۵ متر که بدین منظور تعبیه شده ، می باشد . این نیرو توسط نیروسنج اندازه گیری شده و با توجه به طول بازوی این نیرو نسبت به محور دینامومتر، گشتاور اعمل شده به آن و در نتیجه گشتاور تولیدی موتور اندازه گیری می شود .

---

[1] Top dead Center Point
[2] Exhaust Gas Recirculation (EGR)
[3] Variable Compression Ratio (VCR)
[4] Variable Valve Timing (VVT)

بستر آزمون همچنین شامل دستگاه دود سنج[1] ، آنالایزر گازهای خروجی[2]، ترموکوپلهای اندازه گیری دما ، گرمکن الکتریکی هوای ورودی ، سامانه بازگردانی گازهای اگزوز به داخل سیلندر[3] و اندازه گیری دبی جرمی هوا ، مخزن هوای ورودی[4] و اوریفیس می باشد . شکل ۱ شماتیک دیاگرام بستر آزمون را نشان می دهد . دقت دستگاههای اندازه گیری بستر آزمون در جدول ۲ آمده است .

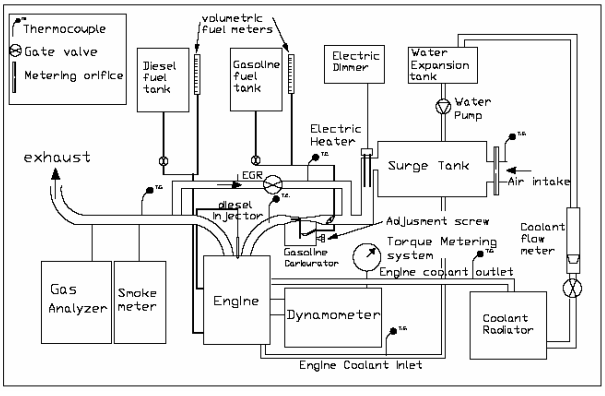
جدول ۲- دقت دستگاههای اندازه گیری

| نام دستگاه | خطای دستگاه |
|---|---|
| دستگاه دود سنج | 0.1 mgr/kWh |
| سرعت سنج | 0.1 rpm |
| نیوتن سنج | 0.01 Kg |
| فشار سنج | 0.1 mmHg |
| ترموکوپل های دما | $0.1^{oC}$ |
| دستگاه سنجش گازهای اگزوز | 0.1% (maximum) |

**روش انجام آزمایش**

انجام آزمایشات به منظور بررسی اثر سرعت بر پارامترهای عملکردی و آلاینده های موتور دوگانه سوز HCCI ، بر روی بستر آزمون نشان داده شده در بالا ، با سوخت اصلی بنزین و سوخت کمکی دیزل صورت گرفته است . در این موتور ، کنترل سوخت اصلی و سوخت کمکی به طور جداگانه انجام می شود . در این نوع احتراق نسبت پیش آمیختگی به صورت انرژی سوخت پیش آمیخته نسبت به انرژی کل در احتراق HCCI و به عنوان پارامتری مؤثر در تعیین شرایط کاری به صورت زیر تعریف می شود [۲] :

$$r_p = \frac{Q_p}{Q_t} = \frac{m_p h_{up}}{m_p h_{up} + m_d h_{ud}} \qquad (۱)$$




شکل ۱ – شماتیک بستر تست

که در آن $m_p$ جرم سوخت پیش آمیخته ، $m_d$ جرم سوخت تزریقی داخل سیلندر ، $h_u$ ارزش حرارتی پایین هر کدام و اندیس های p و d هرکدام به ترتیب نمایانگر سوخت های پیش آمیخته و تزریق شده داخل سیلندر می باشند .

در این آزمایشات با توجه به نحوه کنترل دبی جرمی سوختهای دیزل و بنزین ، در هر مرحله برای آزمایش موتور HCCI دوگانه سوز ، ابتدا موتور در حالت دیزل با نسبت تراکم ۱۷,۵:۱ و توان بسیار پایین ، سرعت و گشتاور در حد استارت موتور ، راه اندازی (در این حالت مسیر کاربراتور بنزین به طور کامل بسته می باشد ) و پس از رسیدن به شرایط پایدار ، دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی را تا ۵±۱۱۰ درجه سانتیگراد بالا می بریم . پس از رسیدن دمای سیستم خنک کننده به مقدار مورد نظر ، با باز کردن تدریجی پیچ تنظیم سوخت بنزین و به طور همزمان اعمال گشتاور جهت ایجاد شرایط مناسب فشار مؤثر متوسط ترمزی ، به طور تدریجی احتراق دیزل به احتراق HCCI میل می کند . مزیت اصلی موتور دوگانه سوز در سهولت کنترل احتراق آن می باشد که می تواند در دماهای سیستم خنک کننده پایین ، با افت زمانی بسیار کمی با تغییر در شرایط احتراق ، اعم از نسبت پیش آمیختگی ، فشار مؤثر متوسط ترمزی و دبی جرمی سوخت دیزل ، به احتراق HCCI پایدار میل نماید .

میزان سوخت مصرفی ( دیزل و بنزین ) توسط پیپت مدرج در مسیر سوخت رسانی از مخزن به صورت زمان مصرف حجم مشخصی از سوخت اندازه گیری می شود .

با توجه به اینکه سینتیک شیمیایی احتراق تعیین کننده شرایط کاری موتور می باشد ، در هر مرحله از آزمایش ، توان تولیدی موتور HCCI به پارامترهایی از قبیل ؛ سرعت اولیه موتور در حالت دیزل ، نسبت پیش آمیختگی ، نسبت هم ارزی سوخت وهوا ، دمای سیستم خنک کننده و گشتاور اعمال شده به موتور دیزل بستگی دارد .

برای تعیین دمای سیستم خنک کننده ، پایداری احتراق مبنای آزمایش قرار گرفته است و در این راستا آزمایشات پایه انجام پذیرفت و دماهای ۴۰ ، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد برای آب سیستم خنک کننده انتخاب شده اند (در این دماها پایداری احتراق بیشتری در موتور HCCI حاصل گردید) . سرعت موتور در هر مرحله از آزمایش متغیر و با توجه به نقطه کاری موتور و توان اخذ شده تعیین می گردد . دمای هوای ورودی به موتور در بازه ۱۱۵-۱۱۰ ثابت نگه داشته شده و از سامانه بازگردانی گازهای اگزوز به داخل سیلندر برای کنترل شروع احتراق در این مرحله از آزمایشات استفاده نشده است .

**بررسی نتایج و تحلیل داده ها**

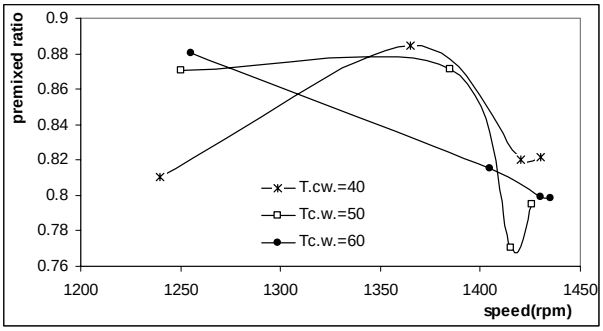
نسبت پیش آمیختگی

شکل ۲ تغییرات نسبت پیش آمیختگی را نسبت به سرعت موتور در دماهای مختلف سیستم خنک کننده نشان می دهد . در احتراق دوگانه سوز HCCI انرژی مورد نیاز جهت خود اشتعالی سوخت بنزین توسط احتراق اولیه دیزل تأمین می شود . افزایش میزان سوخت دیزل نسبت به سوخت بنزین سبب افزایش این انرژی شده ، احتراق HCCI با سرعت بیشتری ( در زاویه کمتری از میل لنگ ) رخ می دهد . همانطور که در شکل ۲ دیده می شود ، افزایش سرعت با کاهش میزان نسبت پیش آمیختگی همراه است . به این دلیل که با افزایش سرعت ، زاویه ای از میل لنگ که احتراق در آن رخ

---

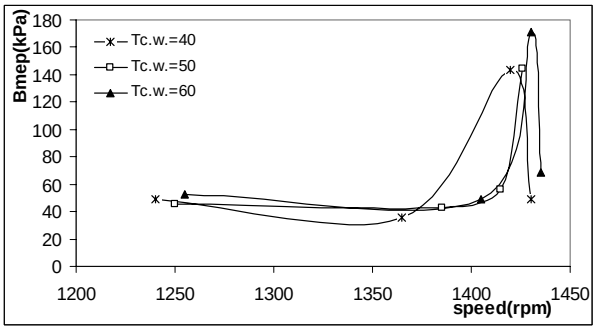
[1] AVL-415
[2] PLINT Re205
[3] EGR
[4] Surge Tank

می دهد کاهش می یابد . در نتیجه انرژی بیشتری جهت احتراق خود اشتعالی سوخت بنزین مورد نیاز می باشد . در نتیجه با افزایش میزان سوخت دیزل ، نسبت پیش آمیختگی با افزایش سرعت کاهش می یابد . این نتیجه را آقای کیم و همکارانش نیز تأیید نموده اند [۱۱] .




شکل ۲ – تغییرات نسبت پیش آمیختگی در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

شکل ۳ نمودار تغییرات فشار مؤثر متوسط ترمزی[1] را نسبت به تغییرات سرعت در سه دمای سیستم خنک کننده نشان می دهد . بررسی نمودار شکلهای ۲ و ۳ نشان می دهد که افزایش توان موتور ( افزایش سرعت و گشتاور ) نیازمند انرژی فعال سازی بیشتری ، جهت احتراق خود اشتعالی بنزین می باشد . همچنین این نمودارها نشان می دهند که نسبت پیش آمیختگی نقش اساسی در تأمین شرایط توان موتور ایفا می کند .




شکل ۳ – تغییرات bmep در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

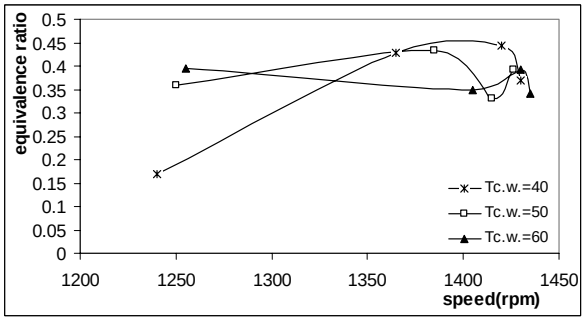
با مشاهده نمودار شکل ۲ مشاهده می کنیم که رفتار نسبت پیش آمیختگی در دمای مختلف سیستم خنک کننده ، تقریباً یکسان می باشد ، بدان معنی که تغییرات دمای سیستم خنک کننده اثر بسیار کمی بر نسبت پیش آمیختگی دارد .

نسبت هم ارزی سوخت به هوا [2]

شکل ۴ نمودار تغییرات نسبت هم ارزی سوخت و هوا را در سرعتهای مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده نشان می دهد . همانطور که در نمودار دیده می شود با افزایش سرعت موتور ، نسبت هم ارزی افزایش می یابد . البته نکته مهم در بررسی تغییرات نسبت هم ارزی در موتور دوگانه سوز HCCI توجه به تغییرات نسبت پیش آمیختگی می باشد .

با توجه به نمودار شکلهای ۲ و ۴ ، نسبت هم ارزی بیشتر در سرعتهای بالاتر موتور نیاز به نسبت پیش آمیختگی کمتر برای تأمین انرژی مورد نیاز خود اشتعالی سوخت بنزین دارد . این نتایج را آقای کیم و همکارانش نیز در آزمایشات خود تأیید نموده اند [۲] . آنها این پیامد را به دلیل رابطه مستقیم واکنشهای شیمیایی دما پایین با تمرکز مولکولهای سوخت در مخلوط عنوان نمودند .

با توجه به نمودار شکلهای ۳و۴ ، افزایش فشار مؤثر متوسط ترمزی در موتور HCCI دو گانه سوز ، نیازمند افزایش نسبت هم ارزی سوخت به هوا می باشد . همچنین بررسی این دو نمودار به طور همزمان نشان می دهد که در هر شرایطی که امکان افزایش نسبت هم ارزی بدون ایجاد ناپایداری ضربه[3] در احتراق وجود داشته باشد ، امکان اعمال گشتاور بیشتر بر موتور HCCI دوگانه سوز نیز فراهم است .




شکل ۴ – تغییرات $\phi$ در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

شکل ۴ نشان می دهد که در سرعت های مختلف موتور ، تغییرات نسبت هم ارزی سوخت به هوا برای دماهای مختلف سیستم خنک کننده تقریباً با تغییرات کمی بوده و در سرعت های یکسان ، نسبت هم ارزی برای سه دمای سیستم خنک کننده تغییر چندانی ندارد .

آلاینده منواکسید کربن[4]

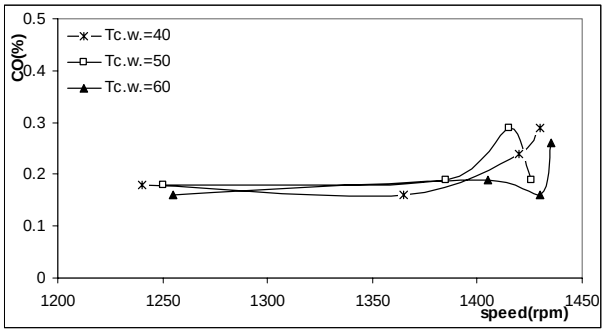
شکل ۵ نمودار تغییرات آلاینده منواکسید کربن را در سرعتهای مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده نشان می دهد . همانطور که در این شکل دیده می شود ، نرخ تولید این آلاینده در احتراق HCCI بالاتر از مقدار گزارش شده برای موتورهای متداول قدیمی است . این نتیجه را جری هاون [۴] نیز در آزمایشات خود نشان داده است . در شکل ۵ مشاهده می شود که افزایش سرعت به طور همزمان با کاهش نسبت پیش آمیختگی ، با افزایش آلاینده منواکسید کربن همراه است . این امر به دلیل کاهش زمان برای فرآیند احتراق و در نتیجه کاهش زمان اکسیداسیون این محصول

---

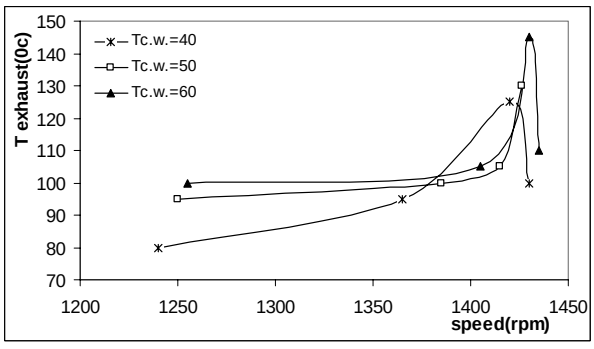
[1] Break Mean Effective Pressure
[2] Equivalence ratio
[3] Nock
[4] CO

میانی احتراق به دی اکسید کربن که یکی از فرآیندهای اصلی احتراق است [۱۲] می باشد . این همان نتیجه ای است که آقای کاناچی [۱] در آزمایشات خود بدست آورد .

طبق نمودار شکل ۶ با افزایش سرعت ، دمای اگزوز نیز افزایش یافته است . این امر به معنای دمای احتراق بالاتر و درنتیجه نرخ بیشتر تبدیل منواکسید کربن به دی اکسید کربن می باشد که بایستی طبق تجربیات آقای یاپ و همکارانش [۱۳] سبب کاهش نرخ تولید این آلاینده شود . ولی همانطور که در شکل دیده می شود ، اثر کاهش زمان فرآیند احتراق بر سایر پارامترها غالب بوده و نرخ تولید این آلاینده افزایش می یابد .



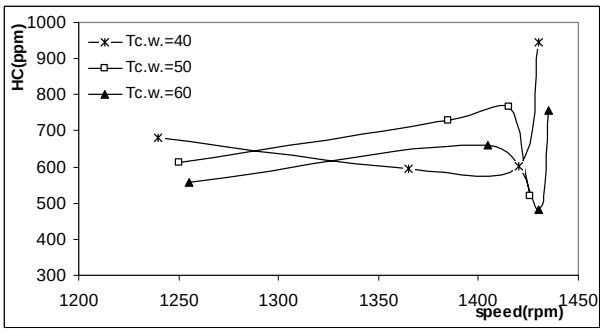

شکل ۵ – تغییرات آلاینده CO در سرعتهای مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده




شکل ۶ – تغییرات دمای اگزوز در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

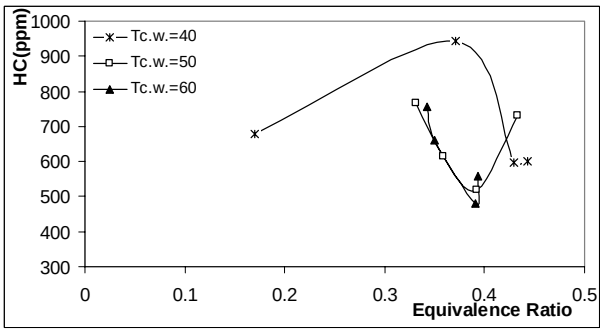
آلاینده هیدروکربن های نسوخته

شکل ۷ نمودار تغییرات آلاینده هیدروکربنهای نسوخته را در سرعتهای مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده نشان می دهد . همانطور که در شکل دیده می شود ، تغییرات دمای سیستم خنک کننده ، همانطور که آقای زینگ کای و همکارانش [۱۴] در آزمایشات خود نشان دادند ، تأثیری بر نرخ تولید این آلاینده ندارد . همچنین در این نمودار دیده می شود که با افزایش سرعت ، نرخ تولید این آلاینده افزایش می یابد . با افزایش سرعت در موتور HCCI دوگانه سوز طبق نمودار شکل ۲ نسبت پیش آمیختگی کاهش می یابد ، در نتیجه انرژی بیشتری از احتراق اولیه دیزل حاصل می شود . این افزایش انرژی سبب افزایش سرعت فرآیند احتراق شده ، نرخ انرژی منتقل شده به احتراق خود اشتعالی بنزین کاهش می یابد . این تغییرات سبب کاهش دمای ماکزیموم احتراق شده و در نتیجه این آلاینده موتور که به شدت به دمای احتراق وابسته است ، افزایش می یابد . این نتیجه را آقای کیم و همکارانش [۲] و همچنین آقای کاناچی [۱] در آزمایشات خود تأیید نموده اند .




شکل ۷ – تغییرات آلاینده HC در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

شکل ۸ نمودار تغییرات آلاینده هیدروکربنهای نسوخته را بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی برای سه دمای سیستم خنک کننده نشان می دهد . همانطور که در شکل دیده می شود ، با افزایش نسبت هم ارزی سوخت به هوا ، این آلاینده کاهش می یابد . با توجه به رقیق سوزی موتور ، علت کاهش آن افزایش دمای ماکزیموم احتراق با افزایش نسبت هم ارزی در فرآیند احتراق می باشد .




شکل ۸ – تغییرات آلاینده HC در $\phi$ مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

آلاینده دوده[1]

شکل ۹ نمودار تغییرات آلاینده دوده سیاه را نسبت به سرعت موتور در سه دمای مختلف سیستم خنک کننده ، نشان می دهد .

در این آزمایشات به دلیل استفاده از سوخت دیزل به عنوان سوخت کمکی ، تولید آلاینده دوده مورد توجه قرار می گیرد . آلاینده دوده موتور دوگانه سوز HCCI در مرحله اول احتراق ( احتراق اولیه سوخت دیزل ) تولید می شود . سپس در احتراق خود اشتعالی بنزین ، بخشی از آن در احتراق شرکت کرده و می سوزد . دوده اندازه گیری شده در اگزوز ، بخشی از کربن جامد تولید شده در فرآیند احتراق دیزل می باشد که در احتراق HCCI فرصت کافی برای سوختن نداشته است .

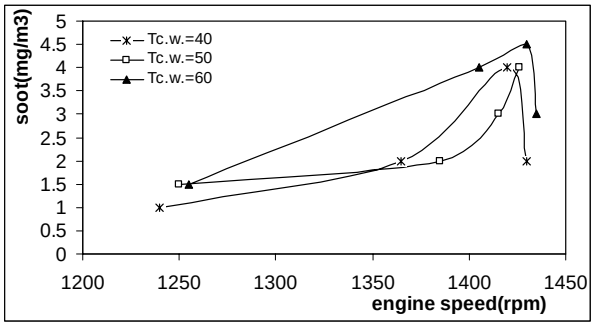
در موتور مورد آزمایش با افزایش سرعت ، فرصت زمانی برای

---

[1] Soot

دوباره سوختن دوده تولیدی احتراق دیزل در احتراق HCCI کاهش می یابد . همچنین با افزایش سرعت ، طبق نمودار شکل ۲ ، نسبت پیش آمیختگی کاهش می یابد که به معنی افزایش نسبت سوخت دیزل به سوخت بنزین می باشد . در نتیجه آلاینده دوده در موتور HCCI دوگانه سوز طبق نمودار شکل ۹ ، افزایش می یابد .

همانطور که در شکل ۹ دیده می شود ، تغییرات دمای سیستم خنک کننده در این بازه محدو د تأثیر چندانی بر نرخ تولید این آلاینده ندارد .




شکل ۹ – تغییرات آلاینده دوده در سرعت های مختلف موتور برای سه دمای سیستم خنک کننده

## نتیجه گیری

هدف این کار تحقیقاتی بررسی تأثیر افزایش سرعت بر پارامترهای عملکردی موتور HCCI دوگانه سوز و آلاینده های موتور در دماهای مختلف سیستم خنک کننده بوده است . با توجه به نتایج آزمایشات می توان به نکات زیر اشاره نمود :

۱- آزمایشات نشان می دهد موتور دو گانه سوز بنزین-دیزل HCCI روش سهل تری برای تبدیل سریع احتراق به احتراق از نوع HCCI می باشد.

۲- طبق نتایج آزمایش با افزایش سرعت موتور دوگانه سوز HCCI نیاز به انرژی بیشتر جهت احتراق خود اشتعالی بنزین سبب افزایش میزان سوخت دیزل شده ، در نتیجه نسبت پیش آمیختگی کاهش می یابد .

۳- با افزایش سرعت موتور به علت کاهش زمان اکسیداسیون محصول میانی منواکسید کربن به دی اکسید کربن نرخ تولید آلاینده منواکسیدکربن افزایش می یابد .

۴- نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت موتور به دلیل کاهش نرخ انتقال انرژی سوخت دیزل به احتراق خود اشتعالی بنزین ، دمای ماکزیموم احتراق کاهش پیدا نموده، آلاینده هیدروکربن نسوخته در موتور دوگانه سوز HCCI افزایش می یابد .

۵- با افزایش سرعت موتور ، همچنین به دلیل کاهش زمان سوختن دوده تولیدی فرآیند احتراق سوخت دیزل ، آلاینده دوده در موتور دوگانه سوز HCCI افزایش می یابد .

۶- همچنین نتایج نشان می دهند که تغییرات دمای سیستم خنک کننده ، تأثیری بر آلاینده های موتور نداشته است .

## تقدیر و تشکر


این پروژه تحت حمایت مالی شرکت بهینه سازی مصرف سوخت کشور بوده و از حمایت های بی دریغ آن سازمان کمال تشکر را دارد.


## مراجع


[1].Mustafa Canakci,“ An experimental study for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of DI-HCCI gasoline engine”, fuel , 2007.

[2].Dae Sik Kim, Chang Sik Lee,” Improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR”, Fuel 85, 695-704, 2006.

[3].P.Mehresh, J.Souder,” Combustion timing in HCCI engines determined by ion-sensor: experimental and kinetic modeling”, proceeding of the combustion institute 30, 2701-2709, 2005.

[4].Jari Hyvonen,” Supercharging HCCI to extend the operating range in multi cylinder VCR-HCCI engine”, SAE 2003-01-3214.

[5]. X. Cai Lu, W. Chen,” A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part I. the basic characteristics of HCCI combustion”, Fuel 84, 1074-1083, 2005.

[6].Zhili Chen, Konno Mitsuru,” How to put the HCCI engine to practical use: control the ignition timing by compression ratio and increase the power output by supercharge”, SAE 2003-01-1832.

[7].Daniel Flowers, Randy Hessel,” Effect of mixing hydrocarbon and carbon monoxide emissions predictions for isooctane HCCI engine combustion using a multi-zone detailed kinetics solver”, SAE 2003-01-1821.

[8].Lei Shi, Yi Cui,” Study of low emission homogeneous charge compression ignition engine (HCCI) using combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR)”, Energy 31, 2665-2676, 2006.

[9]. Lu Xingcai, Hou Yuchun,” Experimental study on the auto-ignition and combustion characteristics in the homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion operation with ethanol/n-heptane blend fuels by port injection”, Fuel 85,2622-2631,2006,

[10]. J chang, Z Filipi,” Characterizing the thermal sensitivity of a gasoline homogeneous charge compression ignition engine with measurements of instantaneous wall temperature and heat flux”, special issue paper, Int. J. Engines Res. Vol.6.

[11]. Kim DS, Kim MY,” Combustion and emissions characteristics of the Partial homogeneous charge compression ignition engines”, combustion Sci Technol, 177:107-125, 2005.

[12]. J. B. Heywood,” internal combustion engine fundamentals”, McGraw Hill, New York, 1998.

[13]. D. Yap, S.M. Peuncheret,” Natural gas HCCI engine operation with exhaust gas fuel reforming”, International Journal of Hydrogen Energy 31, 587-595, 2006.

[14]. X. Cai Lu, W. Chen,” A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part II. Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion”, Fuel 84, 2005, 1084-

1092.