



## بررسی آزمایشگاهی تاثیر نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی به ازای در صدهای مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور احتراق تراکمی شارژ همگن (HCCI) دو گانه سوز

محسن قاضی خانی<sup>۱</sup>، محمد رضا کلاته<sup>۲</sup>، یاسر کاشی طرقی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، m\_ghazikhani@yahoo.com  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، m\_r\_kalatch60@yahoo.com  
<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، yaserkashi@yahoo.com

سیلندر بدون پخش شعله ایجاد شود که این مشخصه منجر به کاهش خیلی زیاد آلودگیهای NO<sub>x</sub> و ذرات ریز (PM) می شود [۱-۴].

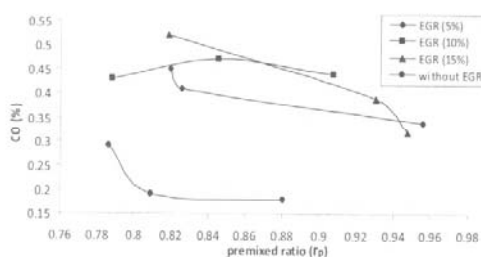
هدف از این پژوهش بررسی آلودگی CO و HC موتور HCCI دوگانه سوز با استفاده از بنزین پیش آمیخته می باشد. همچنین تاثیر نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی به ازای درصد های مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور HCCI دوگانه سوز مورد بررسی قرار گرفته است.

### بستر آزمون و روش آزمایش

موتور در بستر آزمون، موتور دیزل تنفس طبیعی، تک سیلندر، پاشش مستقیم، نسبت تراکم متغیر و چهار زمانه با حجم جابجایی ۵۸۲ سی سی می باشد. در این بررسی نسبت پیش آمیختگی (r<sub>p</sub>) با استفاده از مرجع شماره [۱] و نرخ EGR با استفاده از مرجع شماره [۴] تعریف شده اند. در تمام آزمایشات در ابتدا پیچ تنظیم سوخت پیش آمیخته (بنزین) بسته بوده و فقط با سوخت دیزل موتور را روشن می کنیم، سپس بتدریج و به طور همزمان مقدار سوخت پیش آمیخته و بار را برای میل به سمت احتراق HCCI تغییر می دهیم.

### بحث و نتیجه گیری

تاثیر نسبت پیش آمیختگی (r<sub>p</sub>) بر آلودگی CO:



شکل (۱): تاثیر نسبت پیش آمیختگی (r<sub>p</sub>) بر آلودگی CO موتور HCCI.

### چکیده

در این کار تحقیقاتی تاثیر نسبت پیش آمیختگی (r<sub>p</sub>) و نسبت هم ارزی (θ) به ازای درصد های مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور احتراق تراکمی شارژ همگن (HCCI) دوگانه سوز بررسی شده است. آزمایشات در یک موتور تحقیقاتی تک سیلندر با نسبت تراکم ۱۷،۵:۱ انجام شده است. سوخت پیش آمیخته بنزین از طریق کاربراتوری که دارای پیچ تنظیم سوخت می باشد فراهم می شود، و سوخت دیزل از طریق یک انژکتور مستقیماً به داخل سیلندر پاش می شود. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی در یک EGR ثابت، آلودگی هیدروکربن سوخته (UHC) به خاطر محبوس شدن مقادیر زیاد سوخت پیش آمیخته در درزهای رینگ و پیستون افزایش می یابد، اما آلودگی مونوکسید کربن (CO) به دلیل افزایش دمای احتراق و اکسیداسیون بیشتر CO<sub>۲</sub> به CO کاهش یافته است. با افزایش مقدار گازهای خروجی بر گشت داده شده (EGR) به خاطر رقیق سازی شارژ سیلندر و کاهش حداکثر دمای احتراق آلودگی CO افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی:** موتور HCCI دوگانه سوز، نسبت پیش آمیختگی، نسبت هم ارزی، EGR، آلاینده های CO و HC.

### مقدمه

HCCI به عنوان یک احتراق با راندمان بالا و آلودگیهای کم اکسید نیتروژن (NO<sub>x</sub>)<sup>۸</sup> و ذرات ریز (PM)<sup>۹</sup> ناچیز، در سالهای اخیر به طور خیلی زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. مخلوط همگن و رقیق سوخت و هوا بدون تلفات تراول به داخل سیلندر وارد شده و سپس متراکم می شود تا اینکه خود اشتعالی به طور همزمان در تمام

- ۱ premixed ratio (r<sub>p</sub>)
- ۲ equivalence ratio (θ)
- ۳ homogeneous charge compression ignition (HCCI)
- ۴ unburned hydrocarbons (UHC)
- ۵ crevices
- ۶ carbon monoxide (CO)
- ۷ Exhaust Gas Recirculation (EGR)
- ۸ nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>)
- ۹ Particulate matter (PM)

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی به ازای در صدهای مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور احتراق تراکمی شارژهمگن(HCCI) دو گانه سوز

محسن قاضی خانی<sup>۱</sup>، محمد رضا کلاته<sup>۲</sup>، یاسر کاشی طرقي<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه فردوسی مشهد ؛ m\_ghazikhani@yahoo.com  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ؛ ml\_kalateh60@yahoo.com  
<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی ، دانشگاه فردوسی مشهد ؛ yaserkashi@yahoo.com

## چکیده:

در این کار تحقیقاتی تاثیر نسبت پیش آمیختگی<sup>۱</sup> ( $r_p$ ) و نسبت هم ارزی<sup>۲</sup> ( $\theta$ ) به ازای درصد های مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور احتراق تراکمی شارژ همگن<sup>۳</sup> (HCCI) دو گانه سوز بررسی شده است. آزمایشات در یک موتور تحقیقاتی تک سیلندر با نسبت تراکم ۱۷٫۵:۱ انجام شده است. سوخت پیش آمیخته بنزین<sup>۴</sup> از طریق کاربراتوری که در مسیر منیفولد ورودی قرار گرفته و دارای پیچ تنظیم سوخت می باشد فراهم می شود ، و سوخت دیزل از طریق یک انژکتور در فشار ۲۵۰bar مستقیماً به داخل سیلندر پاشش می شود. از یک گرمکن الکتریکی که در مجرای ورودی نصب شده برای تنظیم دمای مخلوط ورودی در دمای ۱۱۵<sup>۰</sup>C-۱۱۰ استفاده شده است. زمان پاشش سوخت دیزل تاثیر زیادی در شروع احتراق HCCI دارد ، بنابراین زمان پاشش در ۳۵ درجه قبل از نقطه مرگ بالا<sup>۵</sup> (BTDC ۳۵<sup>۰</sup>) تنظیم شده است. در تمام آزمایشات دمای سیستم خنک کننده در دمای ۵۰<sup>۰</sup>C ثابت نگه داشته شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی در یک EGR ثابت ، آلودگی هیدروکربن نسوخته<sup>۶</sup> (UHC) به خاطر محبوس شدن مقادیر زیاد سوخت پیش آمیخته در درزهای<sup>۷</sup> رینگ و پیستون افزایش می یابد ، اما آلودگی منوکسید کربن (CO) به دلیل افزایش دمای احتراق و اکسیداسیون بیشتر CO<sup>۸</sup> به CO<sub>۲</sub> کاهش یافته است. با افزایش مقدار گازهای خروجی بر گشت داده شده<sup>۹</sup> (EGR) به خاطر رقیق سازی شارژ سیلندر و کاهش حداکثر دمای احتراق آلودگی CO افزایش یافته است.

**کلمات کلیدی:** موتور HCCI دو گانه سوز ، نسبت پیش آمیختگی ، نسبت هم ارزی ، EGR ، آلاینده های CO و HC .

## ۱- مقدمه:

در دهه گذشته مهندسی اتومبیل تلاش های زیادی برای بهبود عملکرد و کاهش آلودگیها خروجی موتور انجام داده اند. با وجود اینکه در هر دو زمینه پیشرفت کرده اند اما هنوز نیاز به بهبود بیشتر آلودگیها برای رسیدن به سطح آلودگیهای EURO-IV/V در آینده نزدیک می باشد [۱]. تحقیقات جایگزین زیادی برای بهبود بیشتر آلودگیهای خروجی موتور وجود دارد و یک فرآیند احتراق جایگزین قابل توجه که اخیراً به آن دست یافتند احتراق تراکمی شارژ همگن (HCCI) می باشد [۳]. کنترل خود اشتعالی<sup>۱۰</sup> (CAI) نیز با عنوان HCCI بیان می شود که تقریباً از ۳۰ سال قبل راجع به آن پژوهش می شود و ابتدا بوسیله ناگچی و آنشی<sup>۱۱</sup> به عنوان یک روش برای کاهش آلودگیها و مصرف سوخت موتور دو زمانه در شرایط بار متوسط بیان شده بود [۶]. در سال ۱۹۸۳ ناجت و فاستر<sup>۱۲</sup> [۱۰] با یک موتور چهار زمانه آزمایش HCCI را انجام دادند ، آنها اولین بار احتراق HCCI را در یک موتور بنزینی چهار زمانه آزمایش کردند. HCCI به عنوان یک احتراق جایگزین امید بخش با راندمان بالا و آلودگیهای کم اکسید نیتروژن<sup>۱۳</sup> (NO<sub>x</sub>) و ذرات ریز<sup>۱۴</sup> (PM) ناچیز ، در سالهای اخیر به طور خیلی زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. مخلوط همگن و رقیق سوخت وهوا بدون تلفات تراتل به داخل سیلندر وارد شده و سپس متراکم می شود تا اینکه خود اشتعالی به طور همزمان در تمام سیلندر بدون پخش شعله ایجاد شود که این مشخصه منجر به کاهش خیلی زیاد آلودگیهای NO<sub>x</sub> و ذرات ریز (PM) می شود [۱-۱۱]. موتور HCCI ترکیبی از

۱. premixed ratio ( $r_p$ )

۲. equivalence ratio ( $\theta$ )

۳. homogeneous charge compression ignition (HCCI)

۴. premixed gasoline

۵. before top dead center (BTDC)

۶. unburned hydrocarbons (UHC)

۷. crevices

۸. carbon monoxide (CO)

۹. Exhaust Gas Recirculation

۱۰. Controlled Auto Ignition (CAI)

۱۱. Noguchi and Onishi

۱۲. Najt and Foster

۱۳. nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>)

۱۴. Particulate matter (PM)

مزایای موتورهای اشتعال جرقه ای<sup>۱</sup> (SI) و موتور های اشتعال تراکمی<sup>۲</sup> (CI) را دارا می باشد که در واقع مزایای موتورهای SI و موتورهای احتراق ترکیبی مستقیم<sup>۳</sup> (CIDI) را به صورت یکجا دارد [۱۰،۷]. به هر حال قطع نظر از مزایای موجود، به خاطر حل نشدن برخی از مشکلات از قبیل کنترل زمان احتراق و نرخ سوختن بر روی محدوده وسیعی از سرعتها و بارها، تشکیل یک مخلوط کاملا همگن، مشکل عملکرد در بارهای بالا و پائین، نرخ آزاد شدن حرارت بالا، آلودگی CO و HC بالا مخصوصا در بارهای پائین، مشکل کار در شرایط سرد<sup>۴</sup> موتور، افزایش NO<sub>x</sub> در بارهای بالا و غیره موتور HCCI هنوز تجاری نشده است [۷،۳-۱۰]. در موتورهای HCCI خود اشتعالی و نرخ احتراق اساسا بوسیله سنتیک شیمیایی سوخت کنترل می شود که این به شدت به گونه های شارژ و تغییرات فشار و دما در طول مرحله تراکم حساس می باشد [۳،۴،۷،۱۰،۱۱]. احتراق HCCI ایده آل با واکنشهای دما پائین و رقیق سوز که به طور همزمان در نقاط مختلف بدون انتشار شعله شروع می شوند مشخص می شود [۳،۱۰]. بنابراین در موتور های تجاری بر روی محدوده وسیعی از سرعتها و بارها نگه داشتن زمان شروع احتراق نزدیک نقطه مرگ بالا (TDC) مشکل می باشد. احتراق ناقص<sup>۵</sup> در بارهای پائین و احتراق غیر طبیعی در بارهای بالا منجر به عملکرد محدود در موتور HCCI می شود [۷،۱۱]. نتایج آزمایشگاهی [۱،۴] و شبیه سازی [۵،۱۰] نشان می دهند که احتراق HCCI یک آزاد شدن حرارت دما پائین و یک آزاد شدن حرارت دما بالا دارد و هر دو در یک محدوده دمایی مشخص رخ می دهند. دفع حرارت دما پائین یک پدیده بسیار مهم در عملکرد موتورهای HCCI می باشد که این رویداد به طور شیمیایی به نوع سوخت بستگی دارد. در مرحله آزاد شدن حرارت دما پائین که به طور خیلی زیاد مرحله آزاد شدن حرارت دما بالا و عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار می دهد نداشتن اطلاعات دقیقی از زمان احتراق باعث شد که مهندسين و محققين راه حل های کنترل زیادی را جستجو کنند. تحقیقات زیادی برای بررسی روشهای کنترل احتراق HCCI انجام شده است از قبیل گرم کردن هوای ورودی [۱،۲۳،۲۴]، نسبت تراکم متغییر<sup>۶</sup> (VCR) [۱۳،۲۶]، نرخ EGR [۲-۱۲،۸] و استفاده از زمان بندی متغییر سوپاپها<sup>۷</sup> (VVT) و (VVA) [۳،۷،۹،۲۰]. علاوه بر این، تحقیقات زیادی نیز بر روی خواص فیزیکی و شیمیایی سوختهای مختلف جهت کنترل بهتر احتراق HCCI انجام شده است [۹،۱۴،۲۱،۲۴،۲۵]. اگر چه تاندازه ای پیشرفتهای قابل توجهی را گزارش داده اند اما هنوز روش مستقیمی برای کنترل فرآیند خود

اشتعالی وجود ندارد و هیچکدام از این روشها نتایج رضایت بخشی را بر روی محدوده وسیعی از سرعتها و بارها نشان نمی دهند. بررسی های آزمایشگاهی و عددی نشان می دهند که زمان پاشش سوخت پاشش مستقیم از آنجائیکه بر روی لایه بندی شارژ داخل سیلندر تأثیر می گذارد نقش مهمی را در فاز احتراق HCCI بازی می کند. ادوانس زیاد پاشش به تشکیل مخلوط همگن تر کمک می کند اما باعث احتراق غیر طبیعی در بارهای بالا شده و محدوده عملکرد موتور HCCI را کمتر می کند. ادوانس پاشش کم حد بالای بار را افزایش داده اما منجر به افزایش زیاد لایه بندی مخلوط داخل سیلندر می شود [۳، ۷، ۱۷]. بررسی های آزمایشگاهی نشان می دهند که حد پایداری احتراق HCCI خیلی حساس به دمای سیستم خنک کننده می باشد. کاهش زیاد دمای سیستم خنک کننده منجر به کاهش زیاد نرخ سوختن می شود که این نتیجه ناشی از به تاخیر افتادن احتراق می باشد. بنابراین این نتایج اهمیت لایه بندی حرارتی در نزدیکی لایه مرزی دیواره را مشخص می کنند. محدوده تغییرات دمای سیستم خنک کننده برای موتور HCCI بنزینی در حد پائین می باشد و افزایش زیاد دمای سیستم خنک کننده منجر به افزایش تغییرات سیکل به سیکل شده و مانع از حرکت پایدار موتور می شود [۱۸]. سوختهای که برای احتراق HCCI استفاده شده اند بنزین، دیزل، پروپان، گاز طبیعی، سوخت دوگانه بنزین - دیزل و غیره می باشند. سوخت بنزین مزایای مختلفی دارد، عدد اکتان<sup>۹</sup> بالای بنزین باعث می شود که بتوان از نسبت تراکم های بالا در موتور های HCCI استفاده کرد و به راندمان حرارتی بالا دست یافت (در محدوده راندمان موتور دیزل CIDI). نسبت تراکم موتور HCCI بنزینی از ۱۲:۱ تا ۲۱:۱ بستگی به عدد اکتان سوخت، دمای هوای ورودی و نوع موتور مورد استفاده تغییر می کند. از مزایای دیگر بنزین تبخیر بهتر آن و ایجاد مخلوط همگن تر می باشد [۲۲، ۲۷].

هدف از این پژوهش بررسی آلودگی CO و HC موتور HCCI دوگانه سوز با استفاده از بنزین پیش آمیخته می باشد. همچنین تأثیر نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی به ازای درصد های مختلف EGR بر آلایندگی های CO و HC موتور HCCI دوگانه سوز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تشکیل CO و HC در احتراق HCCI:

موتور HCCI آلودگی دوده و NO<sub>x</sub> خیلی پائینی دارد اما در مقایسه با موتورهای مرسوم دیگر آلودگیهای CO و UHC بالاتری دارد. آلودگی CO در موتور HCCI بوسیله سنتیک های شیمیایی کنترل می شود. CO ناشی از احتراق ناقص در ناحیه دمای متوسط می باشد که در این ناحیه غلظت رادیکالهای OH به طور قابل توجهی کاهش می یابد و در نتیجه CO کمتری تبدیل به CO<sub>2</sub> می شود. یا اینکه CO ناشی از احتراق ناقص در نواحی دما پائینی از قبیل، لایه

۱۵. spark ignition(SI)
۱۶. compression ignition(CI)
۱۷. compression ignition direct injection (CIDI)
۱. cold start
۲. misfiring
۳. Variable compression ratio(VCR)
۴. variable valve timing (VVT)
۵. Variable valve actuation (VVA)

بخش ، تاثیر رقیق سازی ( گازهای بی اثر موجود در EGR ) ، تاثیر گرمایی ( تبادل حرارت ، تلفات حرارتی به دیواره ، دمای EGR ، ظرفیت حرارتی ) و تاثیر شیمیایی تقسیم کرد ، تاثیر شیمیایی فقط بر روی سنتیکها نمی باشد بلکه آن همچنین می تواند مسیر واکنشهای خاصی را تغییر دهد که این باعث می شود تاثیر آن به طور ویژه ای مورد بررسی قرار گیرد [۵]. در واقع نقش EGR فراهم نمودن دمای کافی برای کمک به خود اشتعالی می باشد در حالیکه دمای احتراق را به اندازه کافی در حد پائین نگه می دارد [۱-۱۳]. رابطه بین مقدار EGR و تاثیر آن بر روی زمان احتراق HCCI غیر خطی می باشد . گونه های گازی مختلف موجود در EGR ، ظرفیت های حرارتی و واکنش پذیری های شیمیایی متفاوتی در مقابل واکنشهای احتراق دارند . بنابراین ، تاثیر آنها بر روی دمای داخل سیلندر و خود اشتعالی سوخت بایستی متفاوت باشد [۳۰]. رادیکالهای فعال موجود در EGR ، که با مخلوط سوخت و هوای تازه مختلط می شوند ، بر روی زمان احتراق تاثیر می گذارند [۱۱].

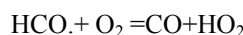
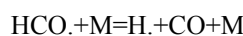
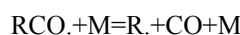
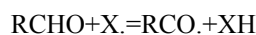
#### ۴- بستر آزمون و روش آزمایش:

۴-۱- بستر آزمون :

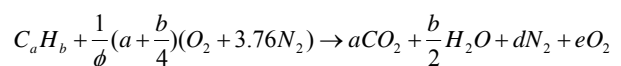
موتور در بستر آزمون ، موتور دیزل تنفس طبیعی ، تک سیلندر ، پاشش مستقیم ، نسبت تراکم متغیر ( VCR ) و چهار زمانه با حجم جایجایی ۵۸۲ سی سی می باشد . این موتور یک کاسه سر پیستون به قطر ۴۱،۵ میلیمتر و عمق ۱۹ میلیمتر دارد . مشخصات موتور بستر آزمون در جدول (۱) آمده است . سوخت بنزین پیش آمیخته از طریق کاربراتوری که در مسیر منیفولد ورودی قرار گرفته و دارای پیچ تنظیم سوخت است فراهم می شود . سوخت دیزل بوسیله انژکتور مستقیما به داخل سیلندر تزریق می شود . بستر آزمون همچنین شامل سیستم اندازه گیری گشتاور ، سیستم خنک کننده ، دینامومتر ، آنالیزور گاز ، گرمکن الکتریکی و دیمر برای تنظیم دمای مخلوط ورودی ، سیستم اندازه گیری سوخت مصرفی ، سیستم اندازه گیری دبی هوا با اریفیس ، سیستم EGR و تابلوی کنترل الکتریکی می باشد . طرح شماتیک موتور بستر تست در شکل (۱) نشان داده شده است . دینامومتر یک ماشین الکتریکی DC می باشد که علاوه بر بار گذاری موتور می تواند به عنوان استارتر موتور برای راه انداختن موتور استفاده شود . سیستم خنک کننده شامل پمپ آب ، دبی سنج ، شیر کنترل و رادیاتور می باشد که با کم و زیاد کردن دبی آب خنک کننده بوسیله شیر کنترل و با روشن و خاموش کردن فن رادیاتور می توان دمای آب سیستم خنک کننده را بر روی دمای مورد نظر تنظیم نمود . سیستم EGR شامل لوله برگشت گازهای اگزوز و شیرکنترل برای تنظیم آن می باشد . گازهای خروجی CO و HC با آنالیزور گاز پلینت مدل RE 205 اندازه گیری می شوند .

جدول(۱): مشخصات موتور

های مرزی ، نزدیک دیواره ها (پدیده خفه شدن احتراق) ، درزهای سیلندر و پیستون و غیره می باشد . برای سوختهای با عدد ستان بالا احتراق در ناحیه قبل از TDC رخ می دهد و محصولات ناشی از احتراق ناقص در لایه های مرزی و درزها بوسیله آشفستگی احتراق به مرکز محفظه احتراق رانده شده و در نتیجه بیشتر اکسید می شوند ، بدین دلیل نرخ EGR تاثیر کمی بر روی آلودگی CO سوختهای با عدد ستان بالا دارد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۹]. اما برای سوختهای با عدد اکتان بالا احتراق نزدیک TDC رخ می دهد و محصولات ناشی از احتراق ناقص در نواحی مرزی و درزها در طول مرحله انبساط وارد لوله اگزوز می شوند . با افزایش نرخ EGR دما کاهش یافته و از کسیداسیون در طول مرحله اگزوز کاسته می شود ، بنابراین برای سوختهای با عدد اکتان بالا با افزایش نرخ EGR مقدار CO افزایش می یابد [۱۰، ۱۱]. به طور کلی با افزایش واکنش پذیری آلودگی CO کاهش یافته و آلودگی CO<sub>2</sub> افزایش می یابد . افزایش آلودگی CO<sub>2</sub> را می توان با اصلاح نسبت تراکم و پارامترهای EGR تصحیح کرد . واکنشهای شیمیایی اساس تشکیل و مصرف CO می باشند [۲، ۸، ۹]. CO در طول واکنشهای زیر تشکیل می شود [۵]:



در اینجا R معرف رادیکال هیدرو کربن که معمولا H می باشد ، X یکی از رادیکالهای موجود در سیستم و M مولکول واکنش کننده یا عامل شروع کننده واکنش می باشد . این واکنشها در میان واکنشهای که درست بعد از شعله سرد رخ می دهند قرار دارند ، که در این ناحیه غلظت رادیکالهای OH پائین می باشد . تاثیر سوخت بر آلودگی CO<sub>2</sub> را می توان با استفاده از واکنش زیر توضیح داد [۹].



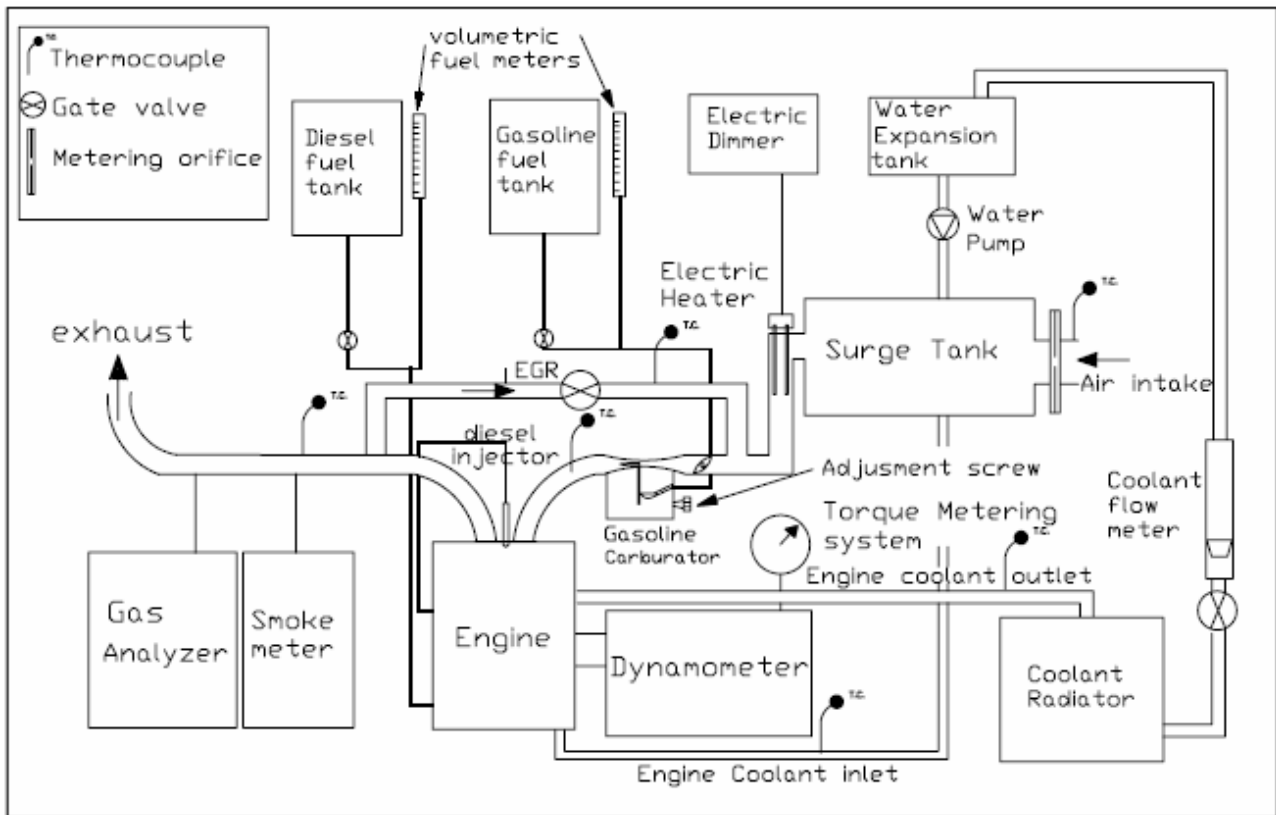
این واکنش نشان می دهد که سوختهای با اتم کربن بیشتر هنگامی که محترق می شوند ، CO<sub>2</sub> بیشتری تولید می کنند . همچنین این واکنش نشان می دهد که نسبت هم ارزی بالاتر منجر به CO<sub>2</sub> بیشتر می شود .

#### ۳- تاثیر EGR بر احتراق HCCI:

EGR شامل تعداد زیادی از گونه های شیمیایی می باشد ، که ترکیبات اصلی گازهای EGR عبارتند از: CO<sub>2</sub> ، H<sub>2</sub>O ، N<sub>2</sub> ، O<sub>2</sub> و گونه های ناشی از احتراق ناقص از قبیل CO ، PM و HC . اگر چه غلظت این گونه های EGR در مقایسه با بخش اعظم گازهای سوخته شده کم می باشد اما تاثیرات شیمیایی آنها بر روی احتراق HCCI به خاطر واکنش پذیری بالای آنها می باشد [۳۰]. هم اکنون به طور کلی روش EGR یک شیوه مؤثر برای کنترل احتراق HCCI می باشد. تاثیرات EGR بر روی احتراق HCCI را می توان به سه

۴	تعداد سوراخهای انژکتور
۲۵۰	فشار پاشش (bar)

۱	تعداد سیلندر
۵۸۲	حجم جابجایی (سی سی)
۱۷.۵	نسبت تراکم در این پژوهش
۹۵ × ۸۲	کورس (mm) × قطر (mm)



شکل (۱): طرح شماتیک بستر تست .

ورودی یک گرمکن الکتریکی ۲ KW قرار گرفته که با استفاده از یک رنوستا میزان جریان الکتریکی و در نتیجه دمای مخلوط ورودی را می توان تنظیم کرد . با استفاده از یک اریفیس در ورودی هوای ورودی و اندازه گیری اختلاف ارتفاع آب ( $\Delta H$ ) که به علت افت فشار

ایجاد می شود می توان نرخ دبی جرمی هوای ورودی برحسب ( $kg/s$ ) را با استفاده از فرمول (۱) محاسبه نمود .

$$\dot{m} = 3.65 \times 10^{-6} \times D^2 \times \sqrt{\frac{p \times h}{T}} \quad (1)$$

در این فرمول  $h$  اختلاف ارتفاع آب بر حسب میلیمتر (mm) ،  $D$  قطر اریفیس بر حسب (mm) ،  $P$  فشار محیط بر حسب (kPa) و  $T$  درجه حرارت مطلق محیط بر حسب  $^0K$  می باشند . در این بررسی نسبت پیش آمیختگی ( $T_p$ ) با استفاده از رابطه زیر تعریف می شود [۷] .

۴-۲- روش آزمایش :

برای استارت موتور کلید وضعیت دینامومتر را در حالت موتور قرار داده و دینامومتر به عنوان موتور الکتریکی برای به حرکت در آوردن موتور استفاده می شود . سپس هنگامی که موتور روشن شد کلید را در حالت ژنراتور قرار داده و دینامومتر برای بارگذاری و کنترل سرعت موتور در حالت دریاچه تراتل کاربراتور کاملاً باز استفاده می شود . کنترل قدرت در این موتور با تغییر میزان سوخت کاربراتور صورت می گیرد . برای بار دهی به موتور از مقاومت های الکتریکی استفاده می شود که با تغییر مقاومت در یک رنوستا جریان بار بر روی موتور توسط دینامومتر الکتریکی افزایش و یا کاهش می یابد . بدنه دینامومتر بر روی یاتاقانهای در سر محور سوار شده که می تواند به طور آزادانه بچرخد . سیستم اندازه گیری گشتاور شامل نیرو سنج ، شاخص تعادل و بازوی گشتاور می باشد که بازوی گشتاور به بدنه دینامومتر متصل شده است . در حالت بارگذاری بر روی موتور با قرار دادن شاخص های تعادل دینامومتر مقابل یگدیگر ، گشتاور اعمالی بر موتور از روی نیرو سنج اندازه گیری می شود . در مسیر منیفولد

(۲)

$$r_p = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_t} = \frac{m_p h_{up}}{m_p h_{up} + m_d h_{ud}}$$

در این رابطه  $m_{aEGR}$  دبی جرمی هوای ورودی برای حالت با EGR،  $m_{EGR}$  دبی جرمی گازهای EGR،  $m_a$  دبی جرمی هوای ورودی برای حالت بدون EGR،  $T_{exh}$  دمای گازهای EGR و  $T_{in}$  دمای هوای ورودی در سرعت مشخصی از موتور می باشد.

در این رابطه  $m_p$  دبی جرم سوخت پیش آمیخته (بنزین)،

در آزمایشات دمای مخلوط ورودی و دمای گازهای خروجی توسط ترموکوپل نوع K اندازه گیری می شوند. دمای مخلوط ورودی در بازه دمایی  $110^{\circ}\text{C}$  تا  $115^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته می شود و گازهای اگزوز تا ۱۵ درصد دبی جرمی هوای ورودی برگشت داده می شوند. با تغییر دمای سیستم خنک کننده در بازه  $70^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$  احتراق HCCI به ازای دمای  $50^{\circ}\text{C}$  عملکرد بهتری را نشان داد، بنابراین در تمام آزمایشات دمای سیستم خنک کننده بر روی دمای  $50^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته شده است. در تمام آزمایشات در ابتدا پیچ تنظیم سوخت پیش آمیخته (بنزین) بسته بوده و فقط با سوخت دیزل موتور را روشن می کنیم، سپس بتدریج و به طور همزمان مقدار سوخت پیش آمیخته و بار را برای میل به سمت احتراق HCCI تغییر می دهیم. بعد از دست یابی به احتراق HCCI، آلودگیها، مقدار سوخت پیش آمیخته و دیگر داده های اندازه گیری شده را یادداشت می کنیم. مشخصات سوختهای موتور HCCI دوگانه سوز مورد آزمایش در جدول (۲) و شرایط تست در جدول (۳) آورده شده اند.

$m_d$  دبی جرم سوخت دیزل تزریق شده،  $h_{up}$  ارزش حرارتی سوخت پیش آمیخته و  $h_{ud}$  ارزش حرارتی سوخت دیزل می باشند. بنابراین  $r_p=1$  معادل با احتراق HCCI تک سوخته و  $r_p=0$  به معنی احتراق CIDI موتورهای معمولی می باشد. نرخ EGR در این بررسی با استفاده از رابطه (۳) تعریف می شود [۵، ۸].

(۳)

$$EGR (\%) = \frac{m_{EGR}}{m_{EGR} + m_{aEGR}}$$

در این رابطه  $m_{aEGR}$  دبی جرمی هوای ورودی برای حالت با

EGR و  $m_{EGR}$  دبی جرمی گازهای EGR می باشند.

برای اینکه در سرعتها و شرایط کاری مختلف بتوانیم درصد EGR معینی اعمال نمائیم با استفاده از کدی که در محیط فرترن آماده شده است،  $(\Delta H)$  اریفیس مناسب با درصد EGR مورد نظر را در سرعتهای مختلف محاسبه و اعمال می نمائیم. برای فراهم نمودن کد مورد نظر ابتدا موتور را در دمای سیستم خنک کننده  $50^{\circ}\text{C}$  و در سر عتهای مختلف بدون EGR آزمایش نموده و مقدار  $\Delta H$  و دمای گازهای اگزوز ( $T_{exh}$ ) را اندازه گیری می کنیم. سپس با استفاده از رابطه (۱) نرخ دبی جرمی هوای ورودی را محاسبه می کنیم. با استفاده از برازش خم یک چند جمله ای بر نقاط اندازه گیری شده  $\Delta H$ ،  $T_{exh}$  و نقاط محاسبه شده برای دبی جرمی هوای ورودی برازش داده و تابع مربوط به هر کدام از داده ها را بدست می آوریم. با استفاده از توابع بدست آمده،  $\Delta H$ ،  $T_{exh}$  و نرخ دبی جرمی هوای ورودی در حالت بدون EGR را در سرعتهای مختلف می توان بدست آورد که از این توابع در کد محاسبه میزان EGR استفاده می شود. کد مورد نظر بر اساس داده های سرعت اولیه موتور، سرعت حداکثر موتور، دما و فشار محیط، چگالی هوا، دمای هوا در ورودی اریفیس، قطر اریفیس، حدس اولیه مقدار دبی جرمی گازهای EGR، مقدار خطا و درصد EGR مورد نظر ابتدا با استفاده از توابع بدست آمده،  $\Delta H$ ،  $T_{exh}$  و دبی جرمی هوای ورودی برای حالت بدون EGR را محاسبه نموده سپس با استفاده از رابطه (۴) دبی جرمی هوای ورودی برای حالت با EGR در یک سرعت مشخص را محاسبه می کند.

(۴)

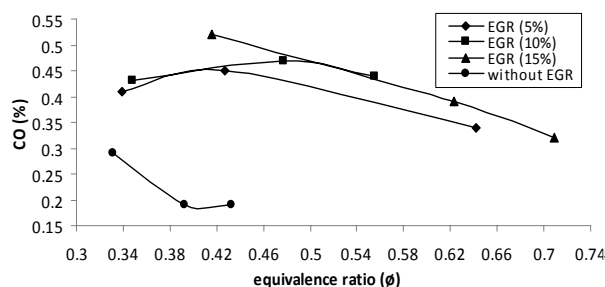
$$m_{aEGR} \approx m_a - m_{EGR} \times \frac{T_{exh}}{T_{in}}$$

دیزل	بنزین	
-	۹۸	عدد اکتان
۵۴	-	عدد ستان
۴۴۸۰۰	۴۷۳۰۰	ارزش حرارتی بالا ( $\text{kJ/kg}$ )
۴۲۵۰۰	۴۴۰۰۰	ارزش حرارتی پائین ( $\text{kJ/kg}$ )
۲۷۰	۳۵۰	گرمای تبخیر ( $\text{kJ/kg}$ ) در دمای $25^{\circ}\text{C}$ و فشار (۱ atm)
۲۸۰	۱۹۵	درجه جوش ( $^{\circ}\text{C}$ )
۷۸۰	۷۲۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۴,۵	۱۴,۶	نسبت هوا - سوخت استوکیومتریکی

۱۷۰۰ - ۱۲۰۰	سرعت (rpm)
۱۱۵ - ۱۱۰	دمای مخلوط ورودی ( $^{\circ}\text{C}$ )
۵۰	دمای سیستم خنک کننده ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰ - ۱۵٪	نرخ EGR (بر حسب دبی جرمی هوای ورودی)
۳۵ درجه زاویه میل لنگ قبل از TDC ( $35^{\circ}\text{ BTDC}$ )	زمان پاشش سوخت دیزل
۱ - ۰	نسبت پیش آمیختگی ( $r_p$ )

## ۵- بحث ونتیجه گیری:

۵-۱- تاثیر نسبت پیش آمیختگی بر آلودگی CO:



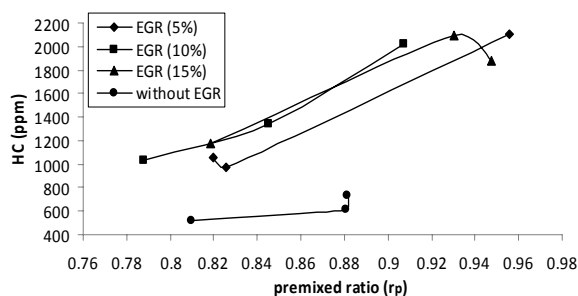
شکل (۳): تاثیر نسبت هم ارزی (φ) بر آلودگی CO موتور HCCI.

همانطور که از شکل (۳) مشاهده می شود با افزایش نسبت هم ارزی واکنش تبدیل CO به CO<sub>2</sub> کاملتر شده و مقدار آلودگی CO کاهش می یابد.

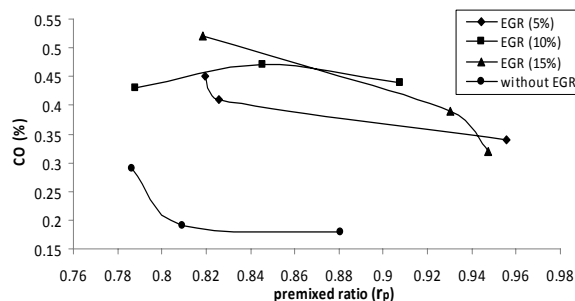
واکنشهای شیمیایی اساس تشکیل و مصرف CO می باشند و φ یک پارمتر تعیین کننده CO می باشد. واکنش پذیری یک پارمتر کلیدی در بررسی آلودگیهای احتراق HCCI می باشد، و این برای دلالت می کند که آلودگیها مستقل از زمان خود اشتعالی نیستند. یک نسبت هم ارزی مینیمم معین در سیستم، برای داشتن انرژی کافی برای تبدیل CO به CO<sub>2</sub> مورد نیاز می باشد. در غیر این حالت، نسبت هم ارزی بالا آلودگی CO را افزایش خواهد داد. در موتور HCCI نه تنها باید راندمان اندیکاتور برای توان خروجی بالاتر بالا باشد، باید واکنش پذیری سیستم نیز برای آلودگیهای کمتر بالا باشد.

۵-۳- تاثیر نسبت پیش آمیختگی بر آلودگی HC:

تاثیر نسبت پیش آمیختگی بر آلودگی HC موتور HCCI دو گانه سوز در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) با افزایش نسبت پیش آمیختگی به ازای همه نرخهای EGR آلودگی HC افزایش می یابد. دلیل اصلی آن این است که مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا در درزها و لایه های مرزی محبوس شده و به سختی در مرحله احتراق HCCI دما پائین اکسید می شوند. حرارت آزاد شده بوسیله سوخت دیزل پاشش مستقیم واکنش پذیری را افزایش داده و می تواند باعث اکسیداسیون بیشتر HC تولید شده در مرحله احتراق HCCI دما پایین سوخت پیش آمیخته شود.



تاثیر نسبت پیش آمیختگی بر آلودگی CO موتور HCCI دو گانه سوز در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۲) مشاهده می شود آلودگی CO با افزایش نسبت پیش آمیختگی کاهش می یابد. با افزایش نسبت پیش آمیختگی انرژی بیشتری توسط سوخت پیش آمیخته آزاد می شود، بنابراین در دمای بالای داخل سیلندر CO بیشتری تبدیل به CO<sub>2</sub> شده و آلودگی CO کاهش می یابد. همانطور که از شکل نیز می توان دید با افزایش EGR به خاطر رقیق سازی شارژ سیلندر و کاهش حداکثر دمای احتراق آلودگی CO افزایش می یابد.



شکل (۲): تاثیر نسبت پیش آمیختگی بر آلودگی CO موتور HCCI.

به طور کلی با افزایش واکنش پذیری آلودگی CO کاهش یافته و آلودگی CO<sub>2</sub> افزایش می یابد، به خاطر اینکه واکنش پذیری بالا به آزاد شدن حرارت احتراق نهایی کمک کرده و باعث اکسیداسیون بیشتر CO و تبدیل آن به CO<sub>2</sub> می شود. با افزایش نسبت پیش آمیختگی سوخت پیش آمیخته بیشتری وارد سیلندر شده که این باعث ایجاد مخلوط همگن تر و افزایش بخش پیش آمیخته احتراق می شود. همچنین حداکثر حرارت آزاد شده بوسیله شعله های سرد و مقدار رادیکالهای OH تولید شده قبل از احتراق HCCI اصلی نیز افزایش می یابد. بنابراین افزایش نسبت پیش آمیختگی به احتراق HCCI اصلی کمک کرده و با افزایش واکنش پذیری کلی آلودگی CO کاهش می یابد.

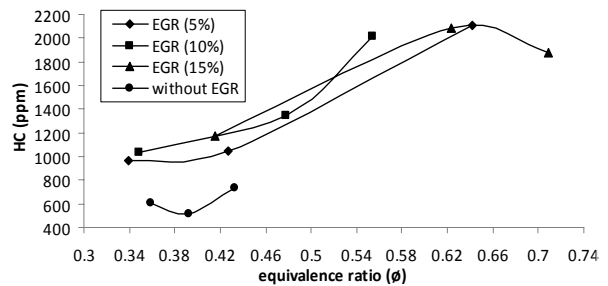
۵-۲- تاثیر نسبت هم ارزی بر روی آلودگی CO:

تاثیر نسبت هم ارزی بر آلودگی CO موتور HCCI در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل(۴): تاثیر نسبت پیش آمیختگی ( $r_p$ ) بر آلودگی HC موتور HCC.

۴-۵- تاثیر نسبت هم ارزی بر آلودگی HC :

تاثیر نسبت هم ارزی بر آلودگی HC موتور HCCI در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می شود با افزایش نسبت هم ارزی به ازای همه نرخهای EGR آلودگی HC افزایش می یابد. به خاطر اینکه مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا در درزها ولایه های مرزی محبوس شده و به سختی در مرحله احتراق HCCI دما پائین اکسید می شود. همانطور که از شکل نیز مشاهده می شود، با افزایش EGR به خاطر رقیق سازی شارژ ورودی و کاهش حداکثر دمای احتراق، هیدروکربن کمتری سوخته شده و آلودگی HC افزایش می یابد.



شکل(۵): تاثیر نسبت هم ارزی بر آلودگی HC موتور HCCI.

۵-۵- تاثیر EGR بر روی بسط محدوده عملکرد موتور HCCI دوگانه سوز :

طبق شکل‌های بالا، EGR می تواند باعث بسط محدوده عملکرد احتراق HCCI به نسبت های هم ارزی بالاتر شود. این را می توان به صورت زیر توضیح داد ( همانطور که آقای مکرافی و چن بیان کرده اند [۳۰، ۹، ۵] ) :

به طور کلی گونه های شیمیایی موجود در EGR نقش خیلی مهمی در تولید رادیکالهای OH موجود در سیلندر بازی می کنند، و در یک موتور افزایش واکنش پذیری کلی را می توان با کاهش تاخیر احتراق بیان کرد که با افزایش رادیکالهای OH واکنش پذیری افزایش می یابد. از آنجائیکه در نسبت های هم ارزی بالاتر رادیکالهای OH بیشتری بوسیله سوخت تولید می شود، بنابراین افزایش رادیکالهای OH به علت اضافه کردن EGR کمتر قابل توجه است. از اینرو تاثیر اصلی EGR در نسبت های هم ارزی بالا، رقیق سازی شارژ سیلندر و کاهش حداکثر دمای احتراق می باشد. از آنجائیکه با کاهش حداکثر دمای احتراق، احتراق غیر طبیعی در نسبت های هم ارزی بالاتری رخ می دهد، بنابراین EGR می تواند باعث بسط محدوده عملکرد احتراق HCCI به نسبت هم ارزی بالاتر

شود، که این را در همه شکل‌های بالا می توان مشاهده کرد. همچنین می توان توضیح داد که چرا در حالت بدون EGR محدوده عملکرد موتور محدودتر می شود. در نسبت های هم ارزی پائین رادیکالهای OH کمتری بوسیله سوخت تولید می شود، بنابراین افزایش رادیکالهای OH به خاطر اضافه کردن گونه های شیمیایی EGR قابل توجه بوده و واکنش پذیری کلی را افزایش خواهد داد. از اینرو آلودگی HC، همانطور که در شکل (۵) نیز مشاهده می شود، در نسبت های هم ارزی پائین کمتر می باشد.

#### ۶- نتیجه گیری :

در این تحقیق، بررسی تاثیر نسبت پیش آمیختگی ( $r_p$ ) و نسبت هم ارزی ( $\phi$ ) به ازای درصد های مختلف EGR بر آلاینده های CO و HC موتور HCCI دو گانه سوز انجام شده است که نتایج آن به صورت زیر می باشد :

(۱) از ویژگیهای موتور دوگانه سوز که در تمام آزمایشات ملاحظه شد، تبدیل سریع و آسان آن به موتور HCCI می باشد.  
(۲) با افزایش نسبت پیش آمیختگی انرژی بیشتری آزاد شده و در دمای بالای داخل سیلندر آلودگی CO به خاطر افزایش واکنش تبدیل CO به  $CO_2$  کاهش می یابد.

(۳) با افزایش EGR به خاطر رقیق سازی شارژ ورودی و کاهش حداکثر دمای احتراق آلودگی HC افزایش می یابد.

(۴) با افزایش نسبت پیش آمیختگی و نسبت هم ارزی آلودگی HC افزایش می یابد. به خاطر اینکه مخلوط پیش آمیخته سوخت و هوا در درزها ولایه های مرزی محبوس شده و به سختی در مرحله احتراق HCCI دما پائین اکسید می شوند

(۵) EGR به خاطر کاهش حداکثر دمای احتراق می تواند محدوده عملکرد موتور HCCI دوگانه سوز را به نسبت های هم ارزی بالاتر بسط دهد.

(۶) در نسبت های هم ارزی پائین، اضافه کردن EGR واکنش پذیری کلی را افزایش می دهد، بنابراین مقدار آلودگی HC در نسبت های هم ارزی پائین در مقایسه با نسبت های هم ارزی بالاتر، کمتر می باشد.

#### مراجع:

- [1] D. S. Kim, Ch. S. Lee, "improved emission characteristics of HCCI engine by various premixed fuels and cooled EGR," International Journal of Fuel, 85, 695-704, 2006.
- [2] A. Maiboom, X. Tazua, J. He' tet, "experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine," International Journal of Energy, 33, 22-34, 2008.
- [3] L. Shi, Y. Cui, K. Deng, H. Peng, Y. Chen, "study of low emission homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using



- [16] J. W. chung., J. H. kang., N. H. kim., W. kang., B. S. kim, "effects of the fuel injection ratio on the emission and combustion performances of the partially premixed charge compression ignition combustion engine applied with the split injection method," *International Journal of Automotive Technology*, 2008.
- [17] M. Canakci, "An experimental study for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of a DI-HCCI gasoline engine," *International Journal of Fuel*, 87, 1503-1514, 2008.
- [18] J. Chang, Z. Filipi, D. Assanis, T-W Kuo, P. Najt, R. Rask., "Characterizing the thermal sensitivity of a gasoline homogeneous charge compression ignition engine with measurements of instantaneous wall temperature and heat flux," *International Journal of IMechE*, 2005.
- [19] K. Yeom, J. Jang, Ch. Bae, "Homogeneous charge compression ignition of LPG and gasoline using variable valve timing in an engine," *International Journal of Fuel*, 86, 494-503, 2007.
- [20] A. Babajimopoulos, D. N. Assanis, S. B. Fiveland, "An Approach for Modeling the Effects of Gas Exchange Processes on HCCI Combustion and Its Application in Evaluating Variable Valve Timing Control Strategies," *SAE*, 01-2829, 2002.
- [21] M. L. Wyszynski., H. Xu., "HCCI with selected standard and alternative fuels: challenges and solutions," *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, vol. 12, 3-4, 2005.
- [22] K. Inagaki, T. Fuyuto, K. Nishikawa, K. Nakakita, I. Sakata, "combustion system with premixture-controlled compression ignition," *R&D Review of Toyota CRDL Vol.41 No.3*, 2006.
- [23] P. Yaping, T. Manzhi, G. Liang, L. Fafa, L. Hua , G. Yingnan, "Study the ethanol SI/HCCI combustion mode Transition by using the fast thermal management system," *Chinese Science Bulletin*, vol. 52, no. 19 , 2731-2736, 2007.
- [24] M. Sjöberg , J. E. Dec, "Comparing late-cycle autoignition stability for single- and two-stage ignition fuels in HCCI engines," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 , 2895–2902, 2007.
- [25] L. Xingcai, H. Yuchun, Z. Linlin, H. Zhen, "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.
- [26] A report to the U.S. Congress, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Technology ", 2001.
- [27] M. C. Drake., D. C. Haworth., "Advanced gasoline engine development using optical diagnostics and numerical modeling," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 , 99–124, 2007.
- [28] M. Christensen., B. Johansson., P. Amneus., F. Mauss., "supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition," *SAE* , 980787, 1998.
- [29] C. S. Daw, R. M. Wagner , K. D. Edwards, J. B. Green, "Understanding the transition between conventional spark-ignited combustion and HCCI combined internal and external exhaust gas recirculation (EGR)," *International Journal of Energy*, 31, 2665–2676, 2006.
- [4] J.J. Hernandez, J. Sanz-Argent, J. Benajes, S. Molina, "selection of a diesel fuel surrogate for the prediction of auto-ignition under HCCI engine conditions," *International Journal of Fuel*, 87, 655–665, 2008.
- [5] H. Machrafi, S. Cavadias, Ph. Guibert, "an experimental and numerical investigation on the influence of external gas recirculation on the HCCI autoignition process in an engine: Thermal, diluting, and chemical effects," *International Journal of Combustion and Flame*, 2008.
- [6] J. A. Gaynor, R. Fleck, R. J. Kee , R. G. Kenny, G. Cathcart, "a study of efficiency and emissions for a 4-stroke SI and a CAI engine with EEGR and light boost," *International Journal of SAE*, 32-0042, 2006.
- [7] J. Ma, X. Lü, L. Ji, Z. Huang, "an experimental study of HCCI-DI combustion and emissions in a diesel engine with dual fuel," *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 1235-1242, 2008.
- [8] N.K. Miller Jothi, G. Nagarajan, S. Renganarayanan, "LPG fueled diesel engine using diethyl ether with exhaust gas recirculation," *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 450-457, 2008.
- [9] H. Machrafi, S. Cavadias, J. Amouroux., "a parametric study on the emissions from an HCCI alternative combustion engine resulting from the auto-ignition of primary reference fuels," *International Journal of Energy*, 85, 755-764, 2008.
- [10] X. C. Lu", W. Chen, Z. Huang, "A fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 1. The basic characteristics of HCCI combustion," *International Journal of Fuel*, 84, 1074-1083, 2005.
- [11] X. C. Lu", W. Chen, Z. Huang., "a fundamental study on the control of the HCCI combustion and emissions by fuel design concept combined with controllable EGR. Part 2. Effect of operating conditions and EGR on HCCI combustion," *International Journal of Fuel*, 84, 1084-1092, 2005.
- [12] A. Dubreuil, F. Foucher, Ch. Mounar m-Rousselle, G. Dayma ,Ph. Dagaut, "HCCI combustion: Effect of NO in EGR," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2879-2886, 2007.
- [13] A. C. Alkidas, "Combustion advancements in gasoline engines," *International Journal of Energy Conversion and Management*, 48, 2751-2761, 2007.
- [14] M. Yao ,Z. Chen,Z. Zheng,B. Zhang,Y. Xing., "Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol," *International Journal of Fuel*, 85, 2046-2056, 2006.
- [15] M. Y. Kim , Ch. S. Lee, "Effect of a narrow fuel spray angle and a dual injection configuration on the improvement of exhaust emissions in a HCCI diesel engine," *International Journal of Fuel*, 2007.

- in a gasoline engine,” Proceedings of the Combustion Institute, 31, 2887–2894, 2007.
- [30] R. Chen, N. Milovanovic, “ A computational study into the effect of exhaust gas recycling on homogeneous charge compression ignition combustion in internal combustion engines fuelled with methane,” International Journal of Thermal Sciences, 41 , 805–813, 2002.