

# الگوسازی نحوه عملکرد موتور HCCI برای سوخت اتانول

علی اصغر مظفری

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف  
mozafari@sina.sharif.edu

علی رضا رهبری\*

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف  
ar.rahbari@gmail.com

\* نویسنده مسؤل

پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۸۷/۰۸/۲۱

## چکیده

نخستین بار در سال ۱۹۷۹ پیشنهاد جدیدی برای نحوه احتراق، علاوه بر موتورهای بنزینی و دیزلی ارائه شده است. هر دوی این موتورها مزایا و معایبی دارند و برای فراهم کردن بازده بیشتری از این موتورها، پیشنهاد موتورهای احتراق تراکمی همگن مطرح شد که آزمایش‌های انجام شده، نشان‌دهنده این مطلب است که این موتورها میزان NOx تولیدی کمتری در مقایسه با موتورهای بنزینی و دیزلی دارند و در مقابل، بازده حرارتی بزرگ و نزدیک به موتورهای دیزلی دارند. عوامل متعدد بسیاری در زمان احتراق HCCI دخیل است که همه این عوامل را می‌توان به سه دسته عوامل مؤثر بر شیمی احتراق، عوامل مؤثر بر دمای قبل از احتراق و عوامل مؤثر بر شیمی احتراق و دمای احتراق توأم تقسیم‌بندی کرد. در این پژوهش از الگویی ریاضی بر اساس الگوی ترمودینامیکی یک بعدی برای الگوسازی این موتورها استفاده شده است. سوخت استفاده شده در این پژوهش، سوخت اتانول است که میزان آلاینده‌ی این سوخت در مقایسه با سوخت‌های هیدروکربنی کمتر است. برای الگوسازی مرحله احتراق از سینتیک شیمیایی سوخت اتانول و برای حل دستگاه معادلات از نرم افزار کمکین<sup>۱</sup> استفاده شده؛ به این ترتیب که ابتدا معادلات اجزای واکنش و خواص ترمودینامیکی لازم برای حل معادلات به نرم‌افزار یادشده اعمال شده و در پایان با استفاده از معادله انتقال حرارت از دیواره‌ها به سطوح اطراف، دستگاه معادلات به طور همزمان حل شده است. در این الگوسازی اثر نسبت تعادل‌های مختلف بر احتراق سوخت اتانول ارائه و نتایج حاصل از الگوی پیشنهادی مثل فشار، دما و اجزای اصلی واکنش با نتایج آزمایشی و نظریه موجود، مقایسه و بدین ترتیب صحت نتایج تأیید شده است.

**واژه‌های کلیدی:** موتورهای احتراق تراکمی همگن (HCCI)، اتانول، سینتیک شیمیایی، انتقال حرارت، آلاینده‌ی

## ۱- مقدمه

می‌شود. در دماهای پایین (تا ۹۰۰ درجه کلوین) واکنش اصلی به این صورت است:

$$R + O_2 \rightarrow RO_2 \quad (2)$$

واکنش‌های جدید با افزایش دما (بالتر از ۸۰۰ درجه کلوین) شروع [۲و۱] و مجموعه واکنش‌های گرم‌ازا با واکنش (۲) آغاز می‌شود که سبب تولید شدن H<sub>2</sub>O و O = ROOH پراکسید الکیل (Alkylperoxide) می‌شود. واکنش‌های دما پایین زمانی به پایان می‌رسد که واکنش (۳) در دماهای گرم غیر فعال شود.

برخی مشخصات موتورهای احتراق تراکمی همگن، شبیه موتورهای احتراق جرقه‌ای و احتراق تراکمی است؛ بدین مفهوم که ورود مخلوط سوخت و هوا، مشابه موتورهای احتراق جرقه‌ای و شروع احتراق، مشابه موتورهای احتراق تراکمی است. هر دو مرحله خودسوزی و احتراق به وسیله سینتیک شیمیایی مخلوط در موتور پایش<sup>۲</sup> می‌شود. به طور کلی واکنش شیمیایی سوخت و هوا با استفاده از این معادله شروع می‌شود:



خودسوزی هیدروکربن‌ها زمانی رخ می‌دهد که مرحله زنجیره‌ای شدن واکنش آغاز

1- CHEMKIN

2- Control

داخلی (اندیکاتور) (IMEP) و بازده حرارتی را به دست آورد. در ضمن، نرخ حرارت آزاد شده را برای بررسی اثر نوع سوخت بر زمان شروع احتراق محاسبه کرد. نتایج آزمایش بیانگر این بود که اضافه کردن ایزواکتان به اتانول سبب تاخیر در اشتعال و در نهایت کاهش IMEP و بازده حرارتی می‌شود. باید یادآوری کرد که در شرایط مشخص، دمای ورودی تاثیر بسیار مهمی بر زمان شروع اشتعال دارد و افزایش دمای اولیه، سبب پیش انداختن زمان اشتعال می‌شود.

هوی در سال ۲۰۰۶ [۷] سوخت‌های الکلی را در این موتورها آزمایش کرد. این پژوهش نشان داد که استفاده از سوخت‌های الکلی در بهبود محدوده عملکرد این موتورها بسیار موثر است و میزان فشار متوسط در مورد این سوخت‌ها بسیار بیشتر از سوخت بنزینی است.

پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۷ [۸] در زمینه تعیین محدوده عملکرد موتورها برای احتراق تراکمی همگن از طریق تغییرات تجزیه سوخت و بازگردانی گازهای خروجی صورت گرفته است. سوخت مورد استفاده در این پژوهش، اتانول در نسبت تراکم‌های مختلف است. این پژوهش نشان داد که میزان بازگردانی گازهای خروجی نقش موثرتری بر محدوده عملکرد این موتورها دارد.

هاشیموتو در سال ۲۰۰۷ [۹] مخلوطی از سوخت هپتان و اتانول را در موتورها احتراق تراکمی همگن به کار برد و نشان داد که اتانول سبب به تاخیر انداختن شروع اشتعال می‌شود. در این پژوهش اثر سوخت دی‌متیل‌تر نیز بر احتراق این موتورها بررسی شد و چون این سوخت انرژی اشتعال‌زایی بسیار زیادی دارد، می‌تواند در ترکیبی با اتانول پدیده احتراق را پیش کند.

مارتینز در سال ۲۰۰۷ [۱۰] مخلوط اتانول در آب را به عنوان سوخت در این موتورها استفاده کرد و نشان داد که مخلوطی از ۴۵ درصد اتانول و ۶۵ درصد آب بالاترین میزان بازده حرارتی در حدود ۳۸/۷ درصد و مقدار  $NO_x$  بسیار کم در حدود ۱/۶ ppm تولید می‌کند. در این پژوهش، استفاده از مخلوط اتانول و آب به عنوان سوختی نویدبخش در این موتورها بیان گشت.

رهبری و مظفری در سال ۲۰۰۷ [۱۱] سازوکار احتراق اتانول را به وسیله سازوکاری دو واکنشی الگوسازی کردند و در نهایت متغیر مؤثر بر احتراق این موتورها را مثل نمودارهای فشار، دما، اجزای واکنش، نرخ انتقال حرارت، نرخ حرارت آزاد شده، تغییرات IMEP و بازده حرارتی با در نظر گرفتن انتقال حرارت از دیواره‌ها برای سوخت اتانول را محاسبه کردند.

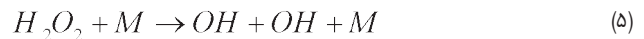
مانورا در سال ۲۰۰۸ [۱۲] تحقیقی تجربی بر روی موتورها احتراق تراکمی همگن برای سوخت اتانول را توضیح داد. در این پژوهش اثر نسبت تراکم بر نحوه عملکرد این موتورها بررسی شد. در این پژوهش، متغیرهای احتراقی مانند نمودار فشار، نرخ افزایش فشار، نرخ حرارت آزاد شده و نمودار دمای محفظه احتراق به دست آمد.

مگاریتیز در سال ۲۰۰۸ [۱۳] محدوده عملکرد موتورها HCCI برای سوخت اتانول بهبود پیدا کرد. در این پژوهش نشان داده شد که برای کاهش بیشینه فشار داخل استوانه<sup>۲</sup> و همچنین کاهش میزان آلایندگی، زمان باز و بسته کردن دریچه<sup>۳</sup> ورودی و مخلوط کردن سوخت با آب بسیار مؤثر است.

در پژوهش حاضر، احتراق موتورها احتراق تراکمی همگن با استفاده از سوخت اتانول الگوسازی شده است. به این ترتیب که واکنش اتانول با استفاده از سازوکار مارینوف و تولید  $NO_x$  با بهره‌گیری از سازوکار زلدوویچ<sup>۴</sup> الگوسازی شده و سپس خواص ترمودینامیکی لازم به معادلات یاد شده اضافه شده است. دستگاه معادلات شامل



در این حالت واکنش‌های شاخه‌ای بین دماهای ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه کلون رخ می‌دهد.



وقتی که دما تا ۱۰۰۰ درجه کلون افزایش یابد؛ واکنش گرمای شماره (۴) بیشتر رخ می‌دهد؛ بنابراین دما و مقدار  $H_2O_2$  افزایش می‌یابد [۲۰]. وقتی که دما به عددی در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه کلون می‌رسد، واکنش (۵) رخ می‌دهد و مقدار OH سریع افزایش می‌یابد. بیشتر مقدار OH تولیدی با مولکول‌های سوخت واکنش نشان می‌دهند (تولید آب و گرما می‌کنند)؛ بنابراین دمای مخلوط افزایش می‌یابد. وقتی که دما از ۱۱۰۰ درجه کلون بالاتر می‌رود، واکنش‌های شاخه‌ای دمای گرم رخ می‌دهند.



در این مرحله،  $O = ROOH$  و الفین به  $CO$  و  $H_2O$  تجزیه می‌شوند. در انتها  $H_2O$  از طریق واکنش، به دست می‌آید:



و  $CO$  از طریق این واکنش به  $CO_2$  تبدیل می‌شود:



واکنش‌های (۷) و (۸) بسیار گرمازا هستند و انرژی زیادی را آزاد می‌کنند [۳۰]. در موتورها HCCI پدیده خودسوزی در محلی رخ می‌دهد که انرژی آزاد شده سبب تولید واکنش‌های شیمیایی و شاخه‌ای شدن آن‌ها می‌گردد که بسیار شبیه به پدیده کوبش در موتورها بنزینی است. در تمام مطالعات انجام شده در موتورها HCCI به این نکته اشاره شده که احتراق این موتورها نمی‌تواند با دمای اولیه محیط آغاز شود و باید پیش‌گرمایش مخلوط صورت گیرد تا دمای انتهایی مرحله تراکم افزایش یابد. انرژی آزاد شده سبب می‌شود که گازهای باقیمانده، مشتعل و نرخ حرارت آزاد شده بسیار زیاد شود.

## ۲ - الگوی سینتیک شیمیایی سوخت اتانول

در سال‌های اخیر، استفاده از اتانول به عنوان سوخت مکمل یا اصلی به دلیل بالابودن عدد اکتان بیشتر شده است. پس از حذف ترا اتیل سرب از بنزین برای پایش آلایندگی و کاهش آن، نیاز به سوختی مکمل که بتواند عدد اکتان را به مقدار لازم برساند و منجر به کاهش منواکسیدکربن و دوده حاصل از واکنش‌های داخل موتور شود، مطرح شد. یادآوری می‌شود که سوخت اتانول این مزیت را دارد که می‌تواند از سوخت‌های جدید تولید شود.

مک در سال ۲۰۰۴ [۴] اظهار داشت که اگر چه پدیده احتراق در موتورها احتراق تراکمی همگن بسیار سریع اتفاق می‌افتد؛ اما زمانی که مخلوطی از چند جزء داریم، این مخلوط همزمان مشتعل نمی‌شود. در احتراق دی‌متیل‌تر و اتانول، دی‌متیل‌تر، فرآیند احتراق را پایش و هدایت می‌کند و نتایج تجربی و تئوری این پژوهشگر، این موضوع را تایید می‌کند.

ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۵] اثر سوخت اتانول را بر روی این موتورها بررسی کردند و میزان آلایندگی را به عنوان شاخصی مهم در این موتورها برای نسبت تراکم‌ها و دوره‌های مختلف کارکرد موتور به دست آوردند. آن‌ها اشاره کردند که زمان اشتعال و مدت زمان آن را می‌توان از طریق زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌ها، نسبت تراکم و سرعت‌های مختلف موتور پایید.

گنانام در سال ۲۰۰۶ [۶] اثر سوخت‌های ایزواکتان، اتانول و ترکیبی از این سوخت‌ها را بر عملکرد این موتورها مطالعه کرد و مشخصه‌های موتور مثل فشار متوسط مؤثر

1- Maximum

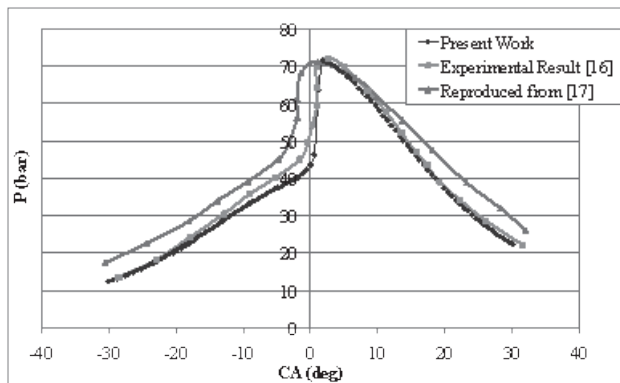
3- Valve

2- Cylinder

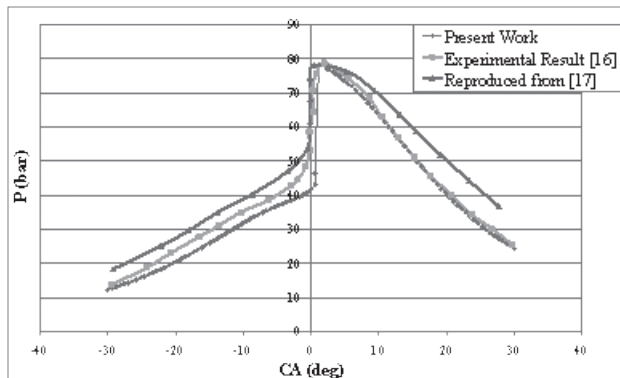
4- Zeldovich

جدول (۱): متغیرهای موتور مورد استفاده در این الگوسازی [۱۶]

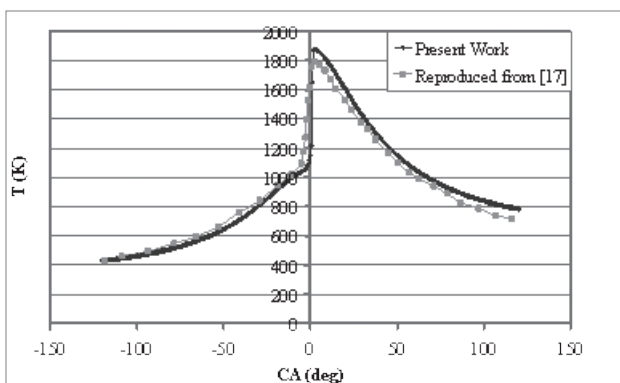
نسبت تراکم	۱۸
حجم جابه‌جا شده	۱۶۰۰ cm <sup>3</sup>
حجم مرده (V <sub>c</sub> )	۹۴/۱۲ cm <sup>3</sup>
نسبت طول شاتون به شعاع لنگ	۳/۷۱۴۳
سرعت موتور	۱۰۰۰ rpm
زمان محاسبات	۱۸۰ °BTDC - ۱۸۰ °ATDC
شعاع استوانه	۱۲۰/۶۵ mm
دمای اولیه گاز	۳۸۳ K
دمای دیواره استوانه	۵۰۰ K
φ	A = -۰/۲۷۸ B = -۰/۳۳۴



شکل (۱): نمودار تغییرات فشار بر حسب زاویه لنگ (CR=18 و φ=0.278 و N=1000 rpm)



شکل (۲): نمودار تغییرات فشار بر حسب زاویه لنگ (CR=18 و φ=0.334 و N=1000 rpm)



شکل (۳): نمودار تغییرات دما بر حسب زاویه لنگ (CR=18 و φ=0.278 و N=1000 rpm)

1- Therm

2- Zeldovich Mechanism

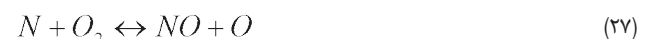
معادلات بقای جرم، انرژی، اجزای واکنش و معادله انتقال حرارت از دیواره‌ها به سطوح اطراف به طور همزمان حل شده‌اند. در انتها، نمودار فشار، دما و اجزای واکنش داخل استوانه رسم شده‌اند و این نتایج با نتایج آزمایشگاهی و نظری موجود مقایسه شده که بیانگر صحت نتایج الگوی ارائه شده است.

### ۳- الگوی محاسباتی

برای محاسبات واکنش‌های شیمیایی از نرم افزار کمکین و برای الگوسازی این واکنش‌ها از الگوی مخلوط همگن در یک سامانه بسته استفاده شد. اطلاعات ترمودینامیکی و سازوکارهای واکنش مارینوف [۱۴ و ۱۵] که ترکیبی از واکنش‌های هیدروژن، متان، اتیلن، اتان و پروپان است، در این الگو استفاده شده که شامل ۵۶ جزء واکنشی و ۳۸۳ واکنش است. ظرفیت گرمایی ویژه، آنتالپی و آنتروپی سوخت اتانول برای دمای بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه کلوین تخمین زده شده و تا دمای ۵۰۰۰ درجه کلوین نیز با استفاده از معادلات هارمونیک و توابع نمایی به روش ترم برون‌یابی شده است. این روش سبب تولید یک چند جمله ای مرتبه ۱۴ برای محاسبه خواص ترمودینامیکی سوخت اتانول می‌شود.

### ۴- الگوسازی آلاینده‌ی NO<sub>x</sub>

آلاینده‌ی NO<sub>x</sub> با استفاده از سازوکار جزئی، الگوسازی شده که نتایج حاصل از واکنش‌های فوق شامل NO از نیتروژن هوا است. ساختار واکنش NO با استفاده از سازوکار زلدوویچ<sup>۲</sup> بیان شده است. (واکنش‌های ۲۹-۲۶)



NO<sub>۲</sub> از طریق NO و این واکنش حاصل می‌شود:



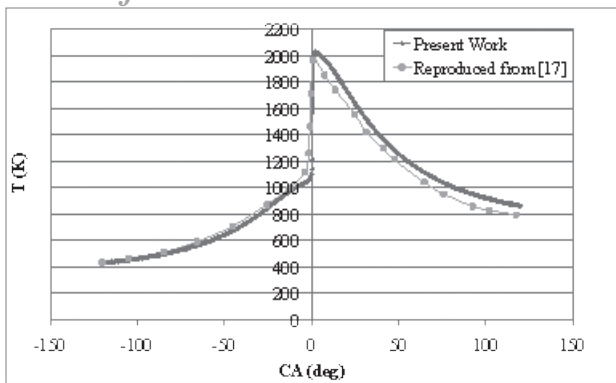
برای الگوسازی اثر آلاینده‌ی NO که بسیار مهم است باید ۳ واکنش بالا را به سینتیک واکنشی اتانول اضافه کرد و برای خصوصیات ترمودینامیکی نیز باید خواص اجزای این سه واکنش را به خواص ترمودینامیکی اضافه کرد. نکته قابل ذکر، این است که هر واکنشی را که می‌خواهیم به مجموعه واکنش‌ها بیافزاییم، باید در قسمت اجزای واکنش نیز اجزای جدید واکنش اضافه شوند. توجه شود که این اجزا نباید تکراری باشند؛ به دلیل این که در کمکین با خطا مواجه می‌شویم.

### ۵- نتایج

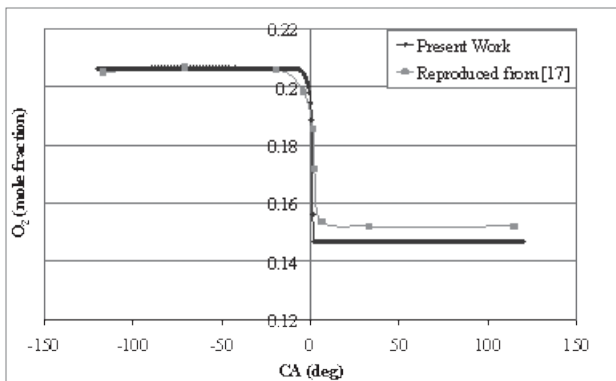
#### ۵-۱- صحت نتایج

در جدول (۱) متغیرهای استفاده شده در این الگوسازی بیان شده که برای مقایسه نتایج حاضر، با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده به وسیله کریستنسن و جوهانسون [۱۶] مد نظر قرار گرفته است.

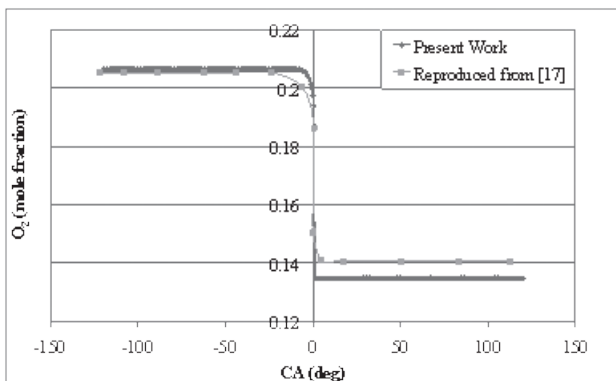
نتایج حاصل از این پژوهش برای مقادیر فشار بر حسب زاویه لنگ در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه و با نتایج تجربی منتشر شده به وسیله کریستنسن [۱۶] و با مقادیر حاصل از الگوی پایشی سان و چن [۱۷] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد (حدود ۱ درصد خطا) و علت آن نیز در نظر گرفتن واکنش‌های رادیکالی (۳۸۶ واکنش) است؛ اما در الگوی پایشی از واکنش‌های کلی آربینوس (۲ واکنش) استفاده شده و به همین سبب بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج این الگو در حدود ۱۰ درصد خطا وجود دارد.



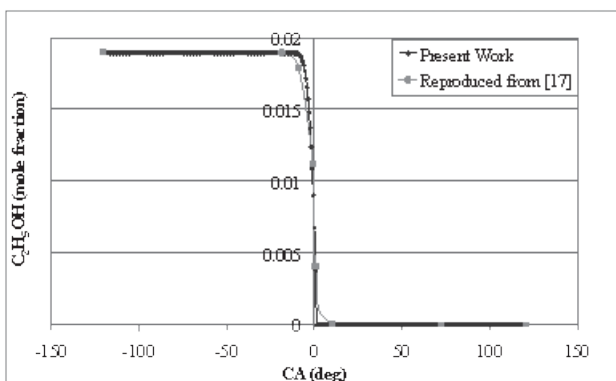
شکل (۴): نمودار تغییرات دما بر حسب زاویه لنگ  
( $N=1000$  rpm و  $\phi=0.334$  و  $CR=18$ )



شکل (۵): نمودار تغییرات جزء مولی  $O_2$  بر حسب زاویه لنگ  
( $N=1000$  rpm و  $\phi=0.278$  و  $CR=18$ )



شکل (۶): نمودار تغییرات جزء مولی  $O_2$  بر حسب زاویه لنگ  
( $N=1000$  rpm و  $\phi=0.334$  و  $CR=18$ )



شکل (۷): نمودار تغییرات جزء مولی  $C_2H_5OH$  بر حسب زاویه لنگ  
( $N=1000$  rpm و  $\phi=0.278$  و  $CR=18$ )

همان طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی نقطه مکث بالا یک افزایش ناگهانی فشار وجود دارد که علت این امر اکسایش سریع اتانول است و در حوالی نقطه مرگ بالا بیشینه فشار حاصل می‌شود. البته شایان ذکر است که با افزایش نسبت تعادل، انتظار می‌رود که بیشینه فشار افزایش یابد که این افزایش فشار با مقایسه شکل‌های (۱) و (۲) ملاحظه می‌شود. این مطلب، نشان‌دهنده این نکته است که الگوی سینتیک شیمیایی توانایی بسیار خوبی در الگوسازی احتراق موتورهای HCCI دارد و الگوی استفاده شده نیز الگوی بهبود یافته مارینوف برای سوخت اتانول به شمار می‌رود. تمرکز مارینوف و همکارانش بیشتر بر روی سینتیک شیمیایی بود و از این واکنش‌ها در موتورهای HCCI استفاده نکرده‌اند و در این پژوهش برای نخستین بار از این سلسله واکنش‌ها برای الگوسازی احتراق این موتورها با سوخت اتانول استفاده شده است.

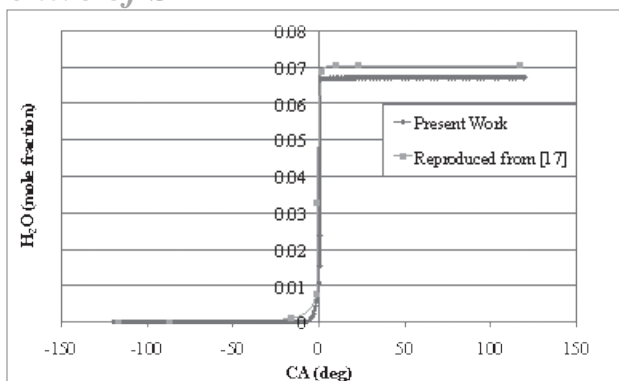
#### ۵-۲-دما

شکل‌های (۳) و (۴) نمودار تغییرات دما بر حسب زاویه لنگ را برای نسبت تعادل‌های مختلف برای الگوی حاضر و الگوی پایشی سان و چن نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در  $0/6$  درجه زاویه لنگ قبل از نقطه مکث بالا، احتراق آغاز می‌شود و در TDC بیشینه دما حاصل می‌شود. مقدار بیشینه دمای الگوی سینتیک برای حالت A ( $\phi=0.278$ ) در حدود  $1880$  درجه کلونین و برای حالت B ( $\phi=0.334$ ) در حدود  $2020$  درجه کلونین است که این افزایش دما به علت افزایش نسبت تعادل است و برای الگوی پایشی عددی در حدود  $1790$  و  $1970$  درجه کلونین است. بین مقدار بیشینه دمای الگوی سینتیک و الگوی پایشی در حالت‌های A و B حدود  $4$  و  $2/5$  درصد خطا وجود دارد. علت این امر آن است که در الگوی پایشی مقدار بیشینه فشار کمتر از الگوی آزمایشگاهی است و در مقابل دمای حاصل نیز کمتر است. چون که نتایج الگوی سینتیک فشار به الگوی آزمایشگاهی بیشتر نزدیک است، دمای الگوی سینتیک دقت بیشتری دارد. البته در حالت B این درصد خطا، کمتر است و علت نیز این است که نتایج نمودار فشار الگوی پایشی و الگوی سینتیک در حالت B بیشتر به هم نزدیک است. علت دیگر این اختلاف می‌تواند تعداد اجزای واکنش باشد.

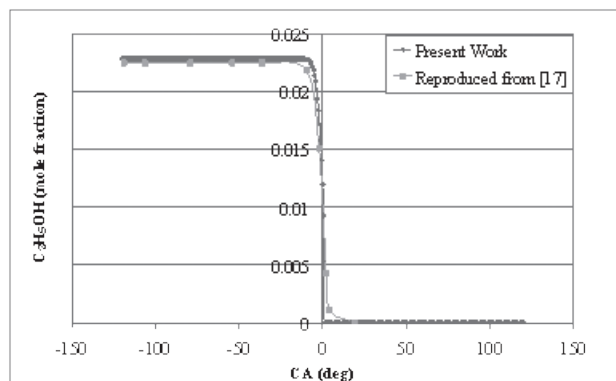
#### ۵-۳- نمودار اجزای واکنش

شکل‌های (۵) تا (۱۲) تغییرات جزء مولی حاصل از واکنش بر حسب زاویه لنگ را برای الگوی سینتیک و پایشی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود سیر حرکتی نمودارهای جزء مولی دقیقاً مشابه نمودارهای فشار و دماست. شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات جزء مولی اکسیژن و شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات جزء مولی اتانول بر حسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود نتایج الگوی سینتیک و الگوی پایشی به هم نزدیک هستند. برای حالت‌های A و B مقدار اکسیژن مصرفی به ترتیب در حدود  $3$  و  $4$  درصد با هم اختلاف دارند و مقدار اتانول نسوخته در هر دو حالت به صفر می‌رسد و علت نیز آن است که کل اتانول در واکنش‌ها مصرف می‌شود و اتانول باقیمانده در محصولات احتراقی وجود ندارد. علت اختلاف  $3$  و  $4$  درصدی در نمودارهای اکسیژن نیز به این علت است که در الگوی سینتیک نحوه زنجیره‌ای شدن معادلات نقش بسیار مهمی در تعیین جزء مولی ذرات دارد و در این  $386$  معادله، جزء مولی اکسیژن در بیشتر معادلات رادیکالی به عنوان عامل اکسایش وجود دارد؛ اما در الگوی پایشی از سازوکارهای کلی واکنش استفاده شد که شامل  $5$  جزء واکنشی است و به همین دلیل این درصد خطا دیده می‌شود.

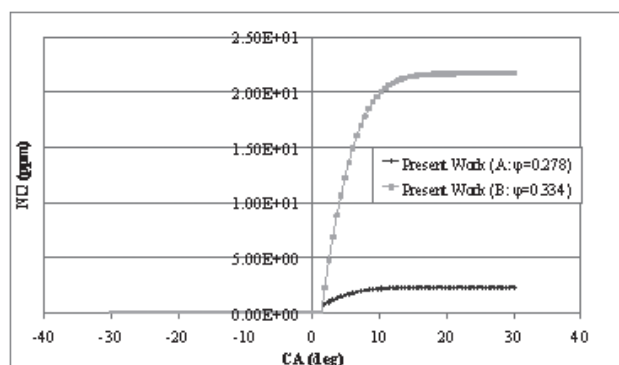
شکل‌های (۹) و (۱۰) تغییرات جزء مولی دی‌اکسیدکربن بر حسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت تعادل، مقدار دی‌اکسیدکربن بیشتر می‌شود.



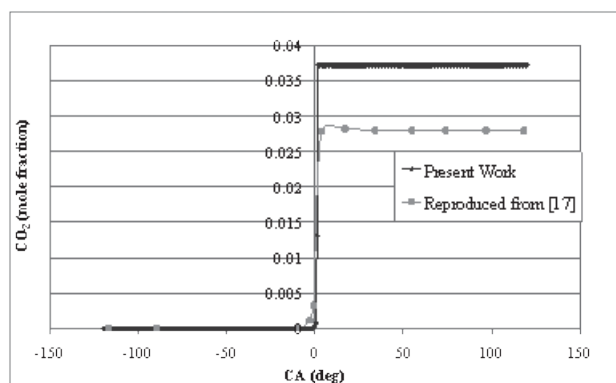
شکل (۱۲): نمودار تغییرات جزء مولی  $H_2O$  بر حسب زاویه لنگ  
(CR=18 و  $\phi=0.278$  و  $N=1000$  rpm)



شکل (۸): نمودار تغییرات جزء مولی  $C_2H_5OH$  بر حسب زاویه لنگ  
(CR=18 و  $\phi=0.334$  و  $N=1000$  rpm)



شکل (۱۳): نمودار تغییرات جزء مولی NO بر حسب زاویه لنگ A ( $\phi=0.278$ ) و B ( $\phi=0.334$ )



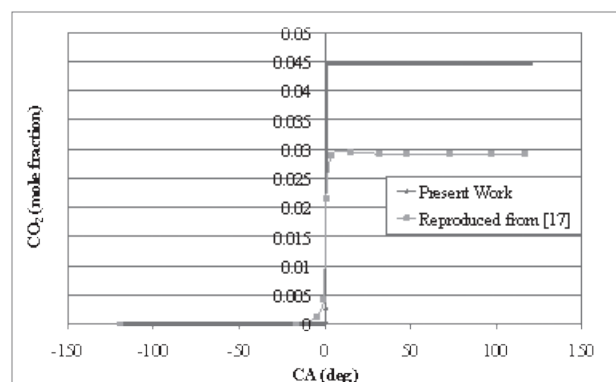
شکل (۹): نمودار تغییرات جزء مولی  $CO_2$  بر حسب زاویه لنگ  
(CR=18 و  $\phi=0.278$  و  $N=1000$  rpm)

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات جزء مولی آب بر حسب زاویه لنگ را نشان می‌دهد و با افزایش نسبت تعادل مقدار نمودارها پس از نقطه مرگ بالا افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد تعداد معادلات و اجزای واکنشی، نقش مؤثری در تعیین غلظت اجزا دارند. در الگوی پایشی میزان دی‌اکسید کربن و آب به علت استفاده از سازوکار واکنش دو مرحله‌ای، اندکی با نتایج الگوی سینتیکی اختلاف دارند و چون سینتیک شیمیایی در این موتورها نقش مؤثری ایفا می‌کند و در این الگوسازی از سلسله واکنش‌های کامل مارینوف استفاده می‌شود، نتایج این الگو از دقت بالاتری برخوردار است.

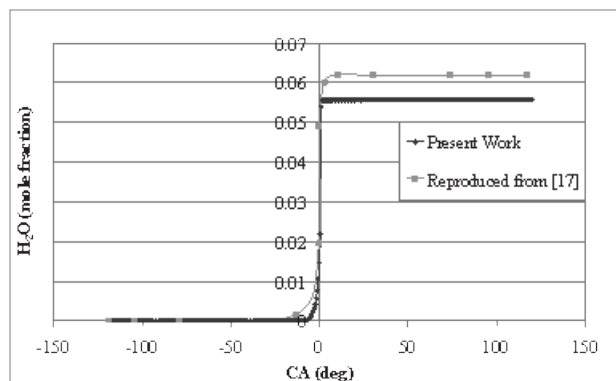
شکل (۱۳) تغییرات NO بر حسب زاویه لنگ را برای نسبت تعادل‌های حالت A و B می‌دهد. همان‌طور که در موتورهای HCCI انتظار می‌رود مقدار NO تولید شده، بسیار کم است و مقدار آن برای سوخت اتانول حتی از بقیه سوخت‌ها بسیار کمتر است. مقدار NO با افزایش مقدار نسبت تعادل افزایش می‌یابد و علت نیز این است که با افزایش نسبت تعادل دمای مرحله احتراق نیز افزایش می‌یابد و همان‌طور که می‌دانیم میزان NO تولیدی بسیار به دمای مرحله احتراق وابسته است. در حالت A میزان پیشینه دما حدود  $1880$  درجه کلوین و میزان NO تولیدی  $2/33$  ppm و در حالت B پیشینه دما در حدود  $2020$  درجه کلوین و میزان NO تولیدی  $21/7$  ppm است و مطابق انتظار با افزایش دمای احتراق میزان NO تولیدی نیز بیشتر می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از یک الگوی ریاضی بر اساس الگوی ترمودینامیکی یک بعدی برای الگوسازی موتورهای HCCI استفاده شده و سوخت مورد استفاده، سوخت اتانول است. برای الگوسازی مرحله احتراق از سازوکار سینتیک شیمیایی اتانول که مارینوف آن را ارائه کرده، استفاده شده و برای الگوسازی سازوکار  $NO_x$  از سلسله سازوکار زلدوویچ



شکل (۱۰): نمودار تغییرات جزء مولی  $CO_2$  بر حسب زاویه لنگ  
(CR=18 و  $\phi=0.334$  و  $N=1000$  rpm)



شکل (۱۱): نمودار تغییرات جزء مولی  $H_2O$  بر حسب زاویه لنگ  
(CR=18 و  $\phi=0.278$  و  $N=1000$  rpm)

مقایسه شد که نتایج به هم نزدیک هستند. بیشینه خطای مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر تئوری در مراجع به ترتیب ۵، ۲ تا ۴ درصد برای دما و ۳ تا ۴ درصد برای اجزای واکنش است که مقدار این خطا به نسبت تعادلی وابسته است.

۳- افزایش نسبت تعادل سبب افزایش بیشینه فشار و دمای داخل استوانه می‌شود.

۴- با افزایش نسبت تعادل از ۰/۳۷۸ به ۰/۳۳۴ میزان NO تولیدی داخل استوانه از ۲/۳۳ ppm به ۲۱/۷ ppm افزایش یافت.

بهره گرفته‌ایم. معادلات بقای جرم، انرژی و اجزای واکنش و در نهایت انتقال حرارت از دیواره به محیط اطراف به‌طور همزمان حل شده‌اند.

نتایج حاصل از این الگوسازی عبارتند از:

۱- صحت نتایج برای فشار داخل استوانه برای دو نسبت تعادل با نتایج تجربی و تئوری موجود مقایسه شده که بیانگر همخوانی نتایج الگوی حاضر با نتایج موجود است. خطای بیشینه فشار پیش‌بینی با مقادیر تجربی حدود یک درصد است.

۲- دمای داخل استوانه و اجزای واکنش برای دو نسبت تعادلی با نتایج تئوری موجود

## منابع

- 1- Tanaka, S., Ayala, F., Keck, J.C., and Heywood, J.B. "Two-stage ignition in HCCI combustion by fuels and additives", *Combustion and Flame*, vol. 132 (2003): 219-239.
- 2- Milovanovic, N., Chen, R. "A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-ignition Combustion," SAE 2001-01-1890, 2001.
- 3- Yamasaki, Y. and Jida, N. "Numerical Analysis of Auto-ignition and Combustion of N-butane and Air mixture in the Homogeneous Charge Compression Ignition Engine by Using Elementary Reactions," The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001), pp: 417-425, 2001.
- 4- Mack, J.H. Investigation of HCCI Combustion of Diethyl Ether and Ethanol Mixtures Using Carbon 14 Tracing and Numerical Simulations, Proceedings of the Combustion Institute, 2004.
- 5- Zhang, Y., He.B.Q., Xie, H., and Zhao, H., "The Combustion and Emission Characteristics of Ethanol on a Port Fuel Injection HCCI Engine" SAE 2006-01-0631.
- 6- Gnanam, G. "An HCCI Engine Fuelled with Iso-octane and Ethanol", SAE 2006-01-3246.
- 7- Hui, X., Yan, Z., Chan, J., and Hua, Z. "Experimental Research on HCCI Combustion of Alcohol Fuels", *Journal of Combustion Science and Technology*, No. 01, 2006.
- 8- K.W.Ng. Cathy, and Thomson, M.J. "Modelling of the effect of fuel reforming and EGR on the acceptable operating range of an ethanol HCCI engine", *International Journal of Vehicle Design*, Vol.44, No.1/2 (2007): 107-123.
- 9- Hashimoto, K. "Effect of Ethanol on the HCCI Combustion", SAE 2007-01-2038.
- 10- Martines-Frias, J., Aceves S.M. and Flowers D.L. "Improving Ethanol Life Cycle Energy Efficiency by Direct Utilization of Wet Ethanol in HCCI Engines", *J. Energy Resource Technology*, Vol. 129 (2007), Issue 4, 332.
- 11- Rahbari A., and Mozafari A. "Performance Prediction and Heat Transfer from In-Cylinder Contents to Surrounding Surfaces of HCCI Engines by Using Ethanol as a Fuel" Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering, 25-26 October 2007, Kangar, Perlis, Malaysia.
- 12- Maurya, R.K. and Agarwal, A.K. "Combustion and Emission Behavior of Ethanol-Fuelled Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine", SAE 2008-28-0064.
- 13- Megaritis, A., Yap D. and Wyszynski, M. L. "Effect of Inlet Valve Timing and Water Blending on Bioethanol HCCI Combustion Using Forced Induction and Residual Gas Trapping Fuel", Volume 87, (2008): 732-739.
- 14- Marinov, N. M. "A Detailed Chemical Kinetic Model for High Temperature Ethanol Oxidation", Lawrence Livermore National Laboratory, P. O. Box 808, Livermore, 1998.
- 15- Marinov, N.M., Westbrook C.K., and Pitz, W.J. Transport Phenomena in Combustion, Eighth International Symposium on Transport Processes, (1996): 118.
- 16- Christensen M., and Johansson, B. "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE Paper 982454, 1998.
- 17- Sun, F., Chen, X., Ting D., and Sobiesiak A. "Modeling Operation of HCCI Engines Fueled with Ethanol", American Control Conference, June 8-10, 2005. Portland, OR, USA.