

# تخمین سریع تاخیر اشتعال موتورهای اشتعال تراکمی همگن توسط شبکه‌های عصبی

عبدالاحد ولیدی<sup>۱</sup>، محمدعلی سرودی<sup>۲</sup>، اکبر غفوریان<sup>۳</sup>

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا  
aavalidi@yahoo.com

## چکیده

زمان تاخیر اشتعال گاز متان در موتورهای اشتعال تراکمی همگن با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی آموزش یافته محاسبه شده است. کنترل زمان شروع احتراق در این نوع موتورها یک چالش عمده برای کاربردهای عملی آنها محسوب می‌شود. در طی فرآیند تخمین زمان شروع احتراق، محاسبه‌ی زمان تاخیر اشتعال، گلوگاه اصلی مطالعات محسوب می‌شود. مدل پیشنهادی جهت شبیه‌سازی احتراق سوخت متان برای تهیه داده‌های آموزش و تست شبکه عصبی، یک مدل صفر بعدی و حجم ثابت مبتنی بر سینتیک شیمیایی می‌باشد. جهت توصیف واکنش‌های شیمیایی از مکانیزم GRI3.0 و الگوی احتراق گذرا استفاده شده است. شبکه پسانتشار با سه لایه‌ی مخفی میانی و یک گره خروجی زمان تاخیر اشتعال برای تخمین زمان تاخیر اشتعال آموزش یافته است. بدین ترتیب زمان محاسبات نسبت به کدهای رایج سینتیکی نظیر CHEMKIN در حدود 1000 برابر سریع‌تر است. این ویژگی برای بررسی استراتژی‌های کنترلی زمان تاخیر اشتعال مفید می‌باشد. خطای میانگین تست شبکه نسبت به نرم افزار CHEMKIN 2.76 درصد است.

واژه‌های کلیدی: تاخیر اشتعال - شبکه عصبی - موتور اشتعال تراکمی همگن - متان.

## 1- مقدمه

محدودیت سوخت‌های فسیلی و نقش عمده آنها در تولید قدرت در کنار حفظ محیط زیست از مسائلی می‌باشند که نیاز به روش‌های جدید در زمینه افزایش قدرت موتور، قابلیت تطابق آنها با سوخت‌های گوناگون و کاهش آلاینده‌ها را بارز می‌کند. در موتورهای کلاسیک، افزایش قدرت، تنوع سوخت و کاهش آلاینده‌ها یک چالش اساسی به حساب می‌آیند که طی سال‌های اخیر روش‌های جدید احتراقی که قادر به غلبه بر این چالش باشند، مطالعه و بررسی شده است. یکی از مهمترین این روش‌ها، اشتعال تراکمی همگن (Homogeneously Charged Compression Ignition, HCCI) می‌باشد. این روش احتراق امکان ساخت موتورهای مطلوبی مابین موتورهای اشتعال جرقه‌ای (Spark Ignition) و اشتعال تراکمی (Compression Ignition) فراهم می‌کند که اساس احتراق و تولید قدرت آنها، مکانیزم خوداشتعالی می‌باشد. از نظر راندمان حرارتی و تولید آلاینده‌ها نسبت به موتورهای کلاسیک شرایط بهتری دارند.

تحقیقات در این حوزه از سال 1979 توسط اونیشی و همکاران وی شروع شد [1] و در سال 1983 توسط ناچت و فاستر [2] ادامه یافته و تا به امروز مطالعات تئوری و تجربی بر روی آن دنبال می‌شود. احتراق در این موتورها یک فرایند

1- دانشجوی کارشناسی ارشد پیش‌رانش

2- کارشناس ارشد پیش‌رانش

3- استادیار

خوداشتعالی ترمودینامیکی بوده که قبل از انتشار سریع سوخت در محفظه احتراق، در ناحیه های متعددی به طور همزمان شروع می شود [1].

خوداشتعالی در موتورهای HCCI برخلاف احتراق با پیشروی شعله گذرا در موتورهای بنزینی و احتراق کنترل شده در موتورهای دیزلی می باشد. در احتراق موتورهای دیزلی و همچنین در احتراق موتورهای بنزینی که توسط یک جرقه محترق می شوند، آشفته‌گی درون سیلندر برای نفوذ شعله مساله مهمی می باشد. ولی موتورهای HCCI توسط تراکمی که پیستون ایجاد می کند محترق می شوند. لذا، سینتیک شیمیایی نقش مهمی را در کل فرآیند احتراق و کنترل آن ایفا می کند [3].

موتورهای HCCI دارای بعضی از ویژگی‌های موتورهای بنزینی و دیزلی می باشند. مانند موتورهای بنزینی سوخت و هوا قبل از ورود به سیلندر، کاملاً با هم مخلوط می شوند و مانند موتورهای دیزلی درون سیلندر با رسیدن به نقطه خود اشتعالی بدون وجود عامل کنترل کننده خارجی، نظیر شمع یا انژکتور، محترق می شوند. از آنجا که در این موتورها سوخت و هوا پیش مخلوط هستند، ذرات معلق (Particulate molecules) ناشی از احتراق آن‌ها بسیار کاهش می یابد. این موتورها افت درجه گاز ندارند. به علت همگنی مخلوط سوخت و هوا، دمای احتراق آن‌ها پایین است، لذا تولید دوده و میزان تشکیل اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) در مقایسه با موتورهای دیزلی کمتر می باشد. اما سطح تولید مونوکسید کربن (CO) و هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به موتورهای بنزینی می تواند بالاتر است.

در مقابل مزایای فراوان HCCI، کنترل زمان احتراق آن از مسایلی می باشد که نیاز به حل و بررسی بیشتری دارد. برای کنترل HCCI راهکارهای متنوعی مورد بررسی قرار گرفته است، از قبیل کنترل زمان باز و بسته شدن دریچه‌های سوخت و هوا، نسبت‌های تراکمی مختلف و به کارگیری سوخت‌های متنوع. این روش‌های کنترلی شامل ویژگی‌های مخلوط ورودی از قبیل دمای ورودی ( $T_{Inlet}$ )، فشار ورودی ( $P_{Inlet}$ )، نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ ) و میزان بازگشت گازهای خروجی به محفظه احتراق (EGR) می شود. در سال‌های اخیر، گاز طبیعی به عنوان یک سوخت مناسب در موتورهای HCCI در نظر گرفته شده است. فلاورز و همکاران [5] با استفاده از سینتیک شیمیایی جزئی، احتراق گاز طبیعی و روش‌های کنترل آن را بررسی کرده‌اند. ساتو [6] و مورسی [7] نیز احتراق متان و عوامل موثر بر آن را مورد توجه قرار داده‌اند.

برای تخمین زمان شروع احتراق در کنترل زمان واقعی (Real Time) موتور HCCI، یک مدل سریع و دقیق ضروری می باشد. گرچه زمان شروع احتراق توسط کدهای پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به همراه سینتیک شیمیایی جزئی حل می شوند [8]، اما زمان محاسبه CPU برای کنترل در زمان واقعی زیاد است. در محاسبه زمان شروع احتراق، محاسبه زمان تاخیر اشتعال، بیشترین سهم زمانی CPU را به خود اختصاص می دهد.

یکی از کدهای موجود CHEMKIN می باشد که توسط آن می توان تاخیر زمانی اشتعال را محاسبه کرد، که زمان CPU برای هر محاسبه، توسط PC Core 2 Duo در بازه‌ی 30-4 ثانیه می باشد. در این مقاله با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدلی برای محاسبه‌ی تاخیر زمانی اشتعال سوخت متان با زمان CPU در حدود میلی ثانیه و دقت کافی ارائه شده و همچنین تاثیر پارامترهای کنترلی بر روی آن بررسی گردیده است.

## 2- مدل سازی احتراق در موتورهای HCCI

برای مطالعات شیمیایی با یک فرآیند واحد در کاربردهای مختلف، از مدل رآکتورهای کاملاً آمیخته (Perfectly Stirred Reactor) استفاده می شود [9]. این گونه مدل‌ها در تحقیقات احتراق به طور وسیعی به کار گرفته شده‌اند [10-17].

### 2-1- فرضیات

قبل از شروع احتراق (Start of Combustion, SOC)، وقتی که مخلوط سوخت و هوا تحت شرایط اشتعال می باشد، به میزان بازه زمانی کوتاهی، دیرتر از زمانی که انتظار داریم مخلوط مشتعل می شود. این زمان معادل مدت زمانی است که از زدن

اولین جرقه تا دیدن اولین نقطه نورانی در مخلوط طول می کشد، که به آن زمان تاخیر اشتعال گفته می شود. فشار و دما در این شرایط متفاوت با ورودی موتور است اما  $\phi$  و EGR با ورودی یکسان است. مدل AURORA در نرم افزار CHEMKIN، قادر به شبیه سازی رآکتورهای گذرا و پایا می باشد. برای سیستم های گذرا، کاربر بایستی شرایط کنترلی رابه عنوان تابعی از زمان تعریف نماید. AURORA می تواند شرایط پایا را محاسبه کند درحالی که یک و یا چند پارامتر کنترلی از قبیل فشار و اتلاف گرما نیز تغییر کنند. مدل پیشنهادی جهت شبیه سازی احتراق سوخت متان برای تهیه داده های آموزش و تست شبکه عصبی، یک مدل صفر بعدی و حجم ثابت مبتنی بر سینتیک شیمیایی می باشد که در آن جهت توصیف واکنش های شیمیایی از مکانیزم GRI3.0 [18] و الگوی احتراق گذرا (Transient) استفاده شده است. مکانیزم GRI3.0 شامل واکنش های اکسیداسیون گاز های متان، اتان و پروپان بوده و فرآیند تشکیل آلاینده های  $\text{NO}_x$  تابع زیرمکانیزم توسعه یافته زلدوویچ (Zeldovich) می باشد.

## 2-2- معادلات حاکم

در این بخش تئوری مدل پیشنهادی با استفاده از معادلات حاکم شرح داده می شود. شکل کلی واکنش های مقدماتی (Elementary reaction) در معادله (1) نشان داده شده است.

$$\sum_{k=1}^K v'_{ki} \chi_k \Leftrightarrow \sum_{k=1}^K v''_{ki} \chi_k \quad (i = 1, \dots, I) \quad (1)$$

در این رابطه  $v'_{ki}$  و  $v''_{ki}$  ضرایب استوکیومتریکی،  $\chi_k$  نماد مربوط به گونه  $k$ ام، علامت " " مربوط به واکنش های رفت و علامت " " مربوط به واکنش های برگشت می باشد. اگر رابطه (1) به فرم ماتریسی نوشته شود، بسیاری از درایه های ماتریس های ضرایب برابر با صفر می باشند، لذا سیستم واکنشی یک سیستم پراکنده (Spares) است.

نرخ تولید گونه  $k$ ام ( $\omega_k$ ) بر حسب مجموع نرخ های تولید این گونه خاص در کل سیستم بصورت زیر بیان می شود.

$$\omega_k = \sum_{i=1}^I v_{ki} q_i \quad (k = 1, \dots, I) \quad (2)$$

که در آن  $v_{ki} = v''_{ki} - v'_{ki}$  و  $q_i$  نرخ پیشرفت واکنش  $i$ ام است که از تفاضل نرخ پیشرفت واکنش های رفت و برگشت مطابق رابطه (3) محاسبه می شود.

$$q_i = k_{fi} \prod_{k=1}^K [\chi_k]^{v'_{ki}} - k_{ri} \prod_{k=1}^K [\chi_k]^{v''_{ki}} \quad (3)$$

در این رابطه  $\chi_k$  جزء مولی گونه  $k$ ام و  $k_{fi}$  و  $k_{ri}$  ثابت های نرخ واکنش های رفت و برگشت برای واکنش  $i$ ام می باشند. ثابت  $k_{fi}$  تابعی از نوع واکنش است و برای واکنش های فشار ثابت تابعی از دما فرض شده و از رابطه آرنیوس مطابق معادله (4) بدست می آید.

$$k_{fi} = A_i T^{\beta_i} \exp\left(\frac{-E_i}{R_c T}\right) \quad (4)$$

که در آن  $E_i$  انرژی اکتیواسیون واکنش  $k$ ام است. ثابت واکنش برگشت در سیستم های گرمایی  $k_{ri}$  با ثابت واکنش رفت توسط ثابت تعادل و بصورت زیر مرتبط می شود.

$$k_{ri} = \frac{k_{fi}}{K_{ci}} \quad (5)$$

$K_{ci}$  ثابت تعادلی در واحد غلظت بوده و به ثابت تعادلی در واحد فشار  $K_{pi}$  مطابق رابطه (6) مرتبط می شود.

$$K_{ci} = K_{pi} \left( \frac{P_{atm}}{R_g T} \right)^{\sum_{k=1}^K \nu_{ki}} \quad (6)$$

و ثابت تعادلی  $K_{pi}$  با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$K_{pi} = \exp\left(\frac{\Delta S_i^o}{R_g} - \frac{\Delta H_i^o}{R_g T}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\Delta S_i^o}{R_g} = \sum_{k=1}^K \nu_{ki} \frac{S_k^o}{R_g} \quad (8)$$

(9)

$$\frac{\Delta H_i^o}{R_g T} = \sum_{k=1}^K \nu_{ki} \frac{H_k^o}{R_g T}$$

### 2-3- محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز ایده‌آل و مخلوط گازها

جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز ایده‌آل از روابط زیر استفاده شده‌است.

(10)

$$\frac{C_{pk}^o}{R_g} = a_{1k} + a_{2k} T_k^1 + a_{3k} T_k^2 + a_{4k} T_k^3 + a_{5k} T_k^4$$

$$\frac{H_k}{R_g T} = a_{1k} + \frac{a_{2k}}{2} T_k^1 + \frac{a_{3k}}{3} T_k^2 + \frac{a_{4k}}{4} T_k^3 + \frac{a_{5k}}{5} T_k^4 + \frac{a_{6k}}{T} \quad (11)$$

(12)

$$\frac{S_k}{R_g} = a_{1k} \ln(T) + \frac{a_{2k}}{2} T_k^1 + \frac{a_{3k}}{3} T_k^2 + \frac{a_{4k}}{4} T_k^3 + \frac{a_{5k}}{5} T_k^4 + \frac{a_{6k}}{T} + a_{7k}$$

$$C_{vk}^o = C_{pk}^o - R_g \quad (13)$$

$$U_k^o = H_{pk}^o - R_g T_k \quad (14)$$

$$G_k^o = H_k^o - T_k S_k^o \quad (15)$$

خواص مخلوط گازها متناسب با جزءهای مولی در مخلوط محاسبه می‌شود. به عنوان مثال  $\bar{C}_p$  مخلوط طبق رابطه

(16) محاسبه می‌گردد.

(16)

$$\bar{C}_p = \sum_{k=1}^K C_{pk} \chi_k$$

برای سیستم بسته مورد نظر معادله بقای جرم بصورت:

$$m = \sum_{k=1}^K m_k = cte. \quad (17)$$

و معادله بقای جرمی گونه‌ها بصورت زیر درمی‌آید.

$$\rho_k \frac{dY}{dt} = \omega_k W_k \quad (18)$$

در رابطه (18)،  $W_k$  وزن مولکولی گونه  $k$ ام،  $\omega_k$  نرخ تولید آن،  $Y$  جزء جرمی و  $\rho_k$  دانسیته این جزء می‌باشد. با

توجه به تغییرات دمای سیستم، معادله انرژی برای آن در نظر گرفته و سیستم آدیاباتیک فرض می‌شود.

به این ترتیب سیستم معادلات حاکم بر مساله شامل معادله بقای جرمی گونه‌ها، معادله بقای انرژی و معادله حالت می‌باشد که برای سیستم آدیاباتیک، حجم ثابت و گذرا بصورت همزمان حل می‌شوند و برای این منظور از حل‌کننده CHEMKIN استفاده شده است.

### 3- شبکه‌های عصبی مصنوعی

امروزه شبکه‌های عصبی یکی از پویاترین حوزه‌های تحقیق و پژوهش می‌باشند که افراد متعددی از رشته‌های گوناگون علمی را به خود جلب کرده‌اند و هرکدام از این افراد پشتوانه علمی متفاوتی را بر این حوزه افزوده‌اند. شبکه‌های عصبی که نحوه‌ی پردازش آن‌ها شبیه مغز انسان بوده و متفاوت با کامپیوترهای عددی می‌باشند، کارکرد موفقیت‌آمیزی در زمینه ریاضیات، مهندسی پزشکی، اقتصاد، هواشناسی، روان‌شناسی و عصب‌شناسی داشته‌اند و هر روزه بر کاربرد آن‌ها افزوده می‌شود [19]. کاربرد شبکه‌های عصبی در مدل‌های شیمیایی احتراق نیز در مقالات متعددی ارائه شده است. شبکه‌های عصبی پردازنده‌های توزیع موازی هستند که طبیعتاً میل به ذخیره اطلاعات تجربی خود را داشته تا بتوانند در مراحل بعدی از آن‌ها استفاده کنند. این رفتار شبکه‌های عصبی از دو حیث به مغز انسان شباهت دارد:

- 1- شبکه از طریق یادگیری کسب دانش می‌کند،
  - 2- اطلاعات آموخته شده را توسط قدرت وزن‌های سیناپسی ذخیره می‌کند.
- نحوه کار شبکه عصبی مانند جعبه سیاه می‌باشد و نیاز به اطلاعات جزئی از سیستم‌های مورد تست ندارد و روابط بین پارامترهای ورودی جدید با متغیرهای کنترلی و غیرکنترلی را با مطالعه داده‌های ذخیره‌شده قبلی یاد می‌گیرد. مزیت دیگر شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی آن‌ها در زمینه هدایت سیستم‌های پیچیده با پارامترهای وابسته به هم می‌باشد. بعلاوه اگر مقیاس سیستم مورد مطالعه بسیار کوچک باشد، شبکه کارایی بسیار خوبی خواهد داشت. در فرآیند تولید و استفاده یک شبکه عصبی مصنوعی چهار مرحله وجود دارد:

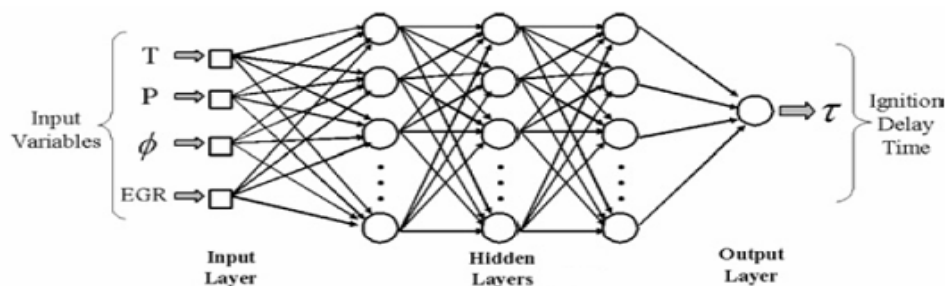
- 1- تنظیم داده‌های آموزشی،
  - 2- ایجاد ساختار شبکه،
  - 3- آموزش شبکه،
  - 4- شبیه‌سازی شبکه با ورودی‌های جدید.
- کدی به زبان برنامه‌نویسی فرترن برای تهیه داده‌های آموزش، تست و اعتبارسنجی شبکه تدوین گردیده است. در این کد با تغییر فایل ورودی نرم‌افزار CHEMKIN، و پیگیری روند اجرای آن در محیط DOS، استفاده از آن در یک حلقه قرار گرفته و 9000 مرتبه اجرا شده است. از این تعداد اطلاعات، دوسوم برای آموزش شبکه و یک سوم نیز برای تست و اعتبارسنجی آن به کار گرفته شده است. مدت زمان هر یک مرتبه فراخوانی CHEMKIN در کد، با یک PC Core 2Duo، بسته به مقادیر پارامترهای ورودی از 4 ثانیه الی 30 ثانیه به طول می‌انجامد. نوع و محدوده پارامترهای ورودی در جدول (1) آمده است.

جدول 1 - پارامترهای ورودی آموزش شبکه عصبی و محدوده آن‌ها

پارامترهای ورودی	مقدار
دما (کلوین K)	790-1270
فشار (atm)	1-45
EGR (درصد جرمی %mass)	0.0 - 10
نسبت هم‌ارزی	0.2 - 0.6

شبکه‌های عصبی دارای ساختارهای متعددی می‌باشند. یکی از شبکه‌های مورد استفاده شبکه پس‌انتشار (Back Propagation) است که با تعمیم قانون Widrow-Haff به شبکه‌های چندلایه با توابع غیرخطی مشتق‌پذیر، به وجود آمده است. استاندارد BP یک الگوریتم کاهش گرادیان (gradient descent) است که در آن وزن‌های شبکه در امتداد منفی گرادیان تابع عملکرد، حرکت داده می‌شوند. این‌گونه شبکه‌ها معمولاً از یک لایه ورودی، یک و یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند.

در این تحقیق از یک شبکه پیشخور (Feed Forward) با الگوریتم آموزش پس‌انتشار استفاده شده است، که شبکه شامل یک لایه ورودی با چهار گره  $T$ ،  $P$ ،  $EGR$ ،  $\phi$ ، سه لایه مخفی میانی و یک لایه خروجی با یک گره زمان تاخیر اشتعال می‌باشد. در شکل (1) ساختار شبکه مورد استفاده نشان داده شده است. از آنجا که تعداد داده‌های آموزش شبکه زیاد می‌باشد، استفاده از سه لایه مخفی میانی تاثیر بسزایی در کاهش زمان آموزش و همچنین در بهبود دقت شبکه داشته است.



شکل 1- ساختار شبکه عصبی استفاده شده

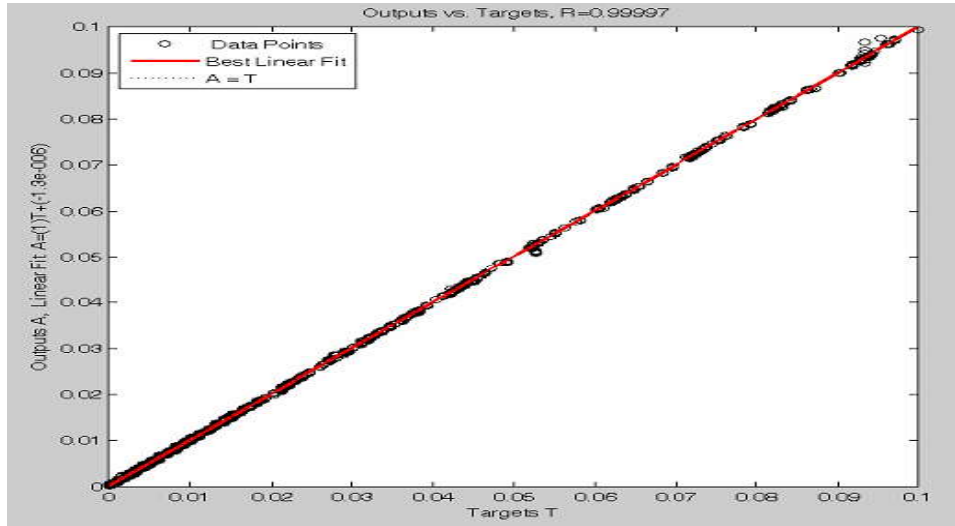
همان‌طور که در شکل (1) دیده می‌شود، هر گره با تمامی گره‌های لایه‌ی قبل توسط وزن‌های سیناپسی ارتباط دارد و اطلاعات داده‌شده عموماً توسط این وزن‌ها ذخیره می‌شوند. آموزش شبکه، فرآیند تصحیح این وزن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری می‌باشد.

جهت آماده‌سازی یک شبکه کارا بایستی برای پارامترهای آن از قبیل تعداد لایه‌های مخفی، تعداد گره‌های هر لایه، نرخ یادگیری و توابع عملکرد هر گره مقادیر مطلوبی تعیین شود. شبکه آموزش‌یافته توسط داده‌های جدید، تست و اعتبارسنجی می‌شود که اگر جواب شبکه قابل قبول باشد، از آن برای اهداف مورد نظر استفاده می‌شود. در غیر این‌صورت ساختار شبکه و یا پارامترهای آن بایستی تغییر داده‌شوند. نتایج این روش برای سیستم ارائه شده در قسمت مدل سازی در بخش بعدی ارائه شده است.

#### 4- نتایج

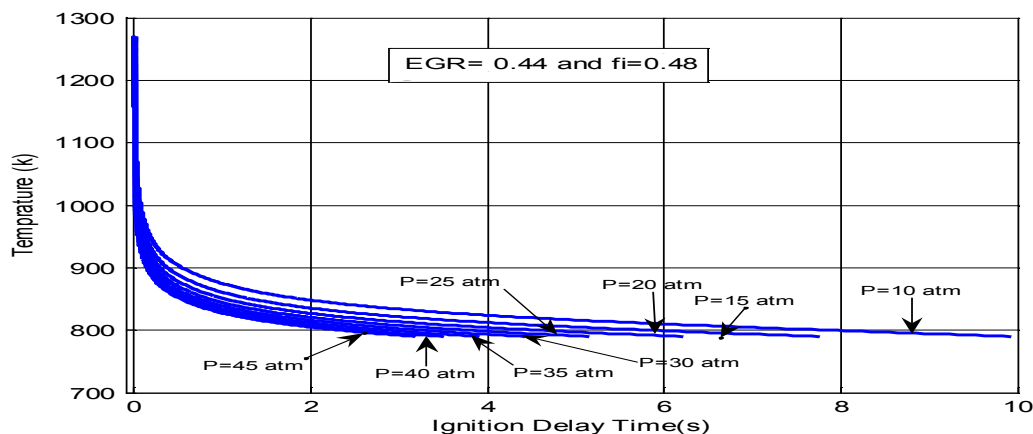
برای نشان دادن کیفی تاثیر پارامترهای ورودی بر زمان تاخیر اشتعال، شبکه‌ای منفک از محدوده عملکرد موتور HCCI تولید می‌شود. به‌علت پراکندگی بازه‌ی تغییرات زمان تاخیر اشتعال از حدود ثانیه تا هزارم ثانیه، خطای میانگین تست این شبکه با این داده‌های آموزشی در حدود 20 درصد است که برای مطالعات کمی در محدوده عملکرد موتور HCCI مناسب نمی‌باشد. لذا، از این شبکه فقط برای مطالعات کیفی تاثیر این پارامترها بر زمان تاخیر اشتعال استفاده می‌شود. همچنین از شبکه‌ای که در محدوده عملکرد موتور HCCI یعنی زمان تاخیر اشتعال کمتر از 0.08 ثانیه، آموزش یافته است، با خطای میانگین تست 2.76 درصد، برای مطالعه تاثیرات کمی پارامترها بر موتور HCCI استفاده می‌شود. در شکل (2) زمان تاخیر اشتعال محاسبه شده توسط شبکه عصبی آموزش یافته و جواب سینتیک شیمیایی نسبت به یکدیگر رسم شده است. به طور کلی شروع خوداشتعالی توام با افزایش ناگهانی فشار خواهد بود که این افزایش فشار در پی آزاد شدن انرژی زیادی است که به دنبال یک سری واکنش‌های زنجیره‌ای صورت می‌گیرد. البته تعاریف متفاوتی برای شروع خوداشتعالی بیان

می‌شود که می‌توان به نقطه عطف نمودار فشار-درجه لنگ، نقطه عطف نمودار دما-درجه لنگ، زمان مربوط به بیشینه نرخ حرارت آزاد شده و یا بیشینه نرخ تولید یک گونه خاص، اشاره کرد. در کنار تعاریف گوناگون از زمان خود اشتعالی، تمامی مطالعات در این حوزه به منظور تنظیم پارامترهای عملکردی موتور برای کار در شرایط بهینه است.



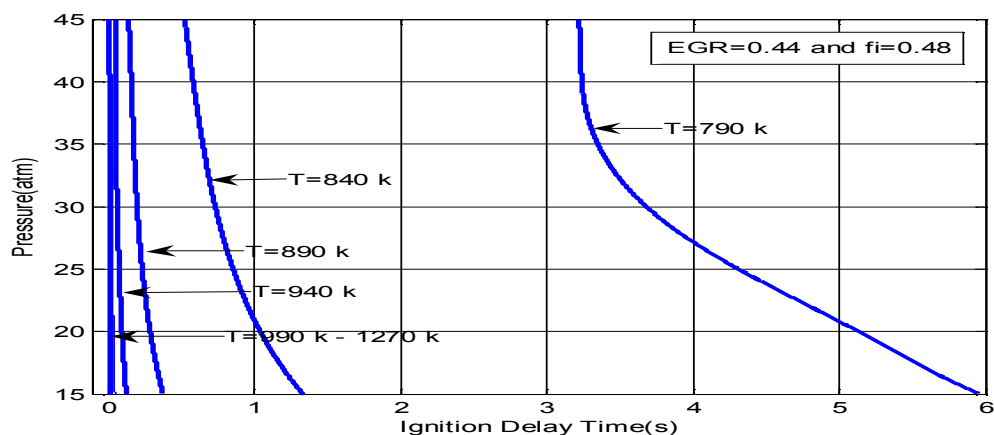
شکل 2- مقایسه زمان تاخیر اشتعال محاسبه شده توسط شبکه آموزش یافته با سینتیک شیمیایی

زمان تاخیر خوداشتعالی در نظر گرفته شده معادل مدت زمانی است که طول می‌کشد تا دمای مخلوط حجم ثابت، 400 درجه کلوین بیشتر از دمای اولیه آن شود. تاثیر دمای اولیه بر زمان تاخیر اشتعال در نمودار (1) مشاهده می‌شود، که برای یک فشار، نسبت هم‌ارزی و EGR ثابت، با افزایش دمای اولیه زمان تاخیر اشتعال کاهش می‌یابد. هرچه دما بالاتر رود انرژی جنبشی مولکول‌های مخلوط بیشتر شده و میل به آزاد کردن انرژی در آن‌ها افزایش یافته و خوداشتعالی زودتر اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ کاهش زمان تاخیر اشتعال در دماهای بالاتر، بیشتر می‌باشد.



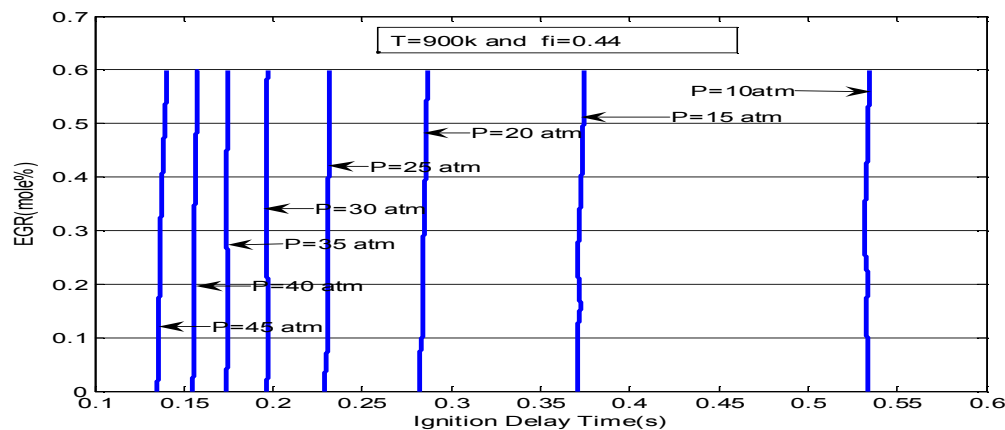
نمودار 1- تاثیر دمای اولیه بر زمان تاخیر اشتعال در فشارهای مختلف

پارامتر بررسی شده دیگر فشار است، که برای یک دما، نسبت هم‌ارزی و EGR ثابت، زمان تاخیر اشتعال با افزایش فشار کاهش می‌یابد همانطوری که در نمودار (2) نشان داده شده است. میزان کاهش زمان تاخیر اشتعال با افزایش فشار نسبت به افزایش دما کمتر است که بیانگر حساسیت بیشتر این پارامتر به دما می‌باشد.

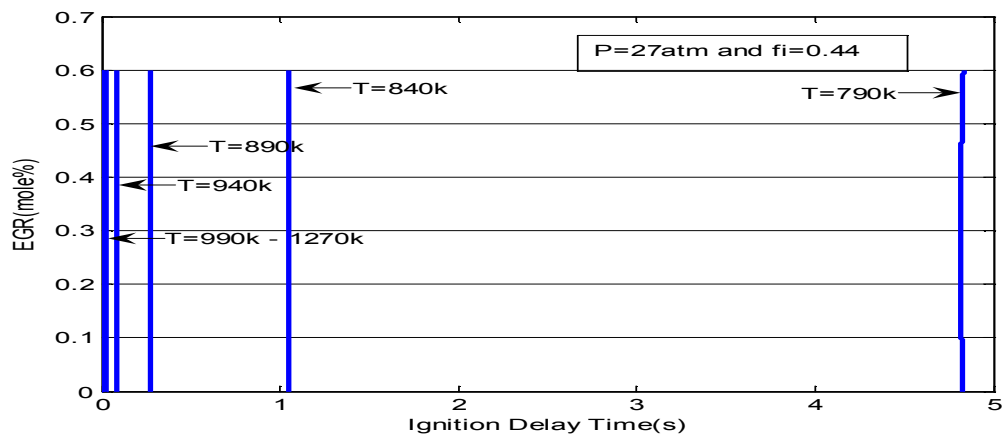


نمودار 2- تغییرات فشار - زمان تاخیر اشتعال به ازای دما های مختلف

EGR نسبت جرمی گاز دی اکسید کربن ورودی موتور به خروجی از موتور در نظر گرفته شده است [22]. با این تعریف تاثیر این پارامتر بر تاخیر زمان خوداشتعالی سوخت متان ناچیز می باشد. نتایج اثرات تغییر EGR بر زمان تاخیر اشتعال در نمودارهای (4) و (3) نشان داده شده است. از آنجا که  $CO_2$  در سینتیک واکنش نقش زیادی را ایفا نمی کند، تغییرات ناشی از افزایش تا 10٪ EGR فقط حدود یک درصد تاخیر زمان خوداشتعالی را افزایش می دهد.



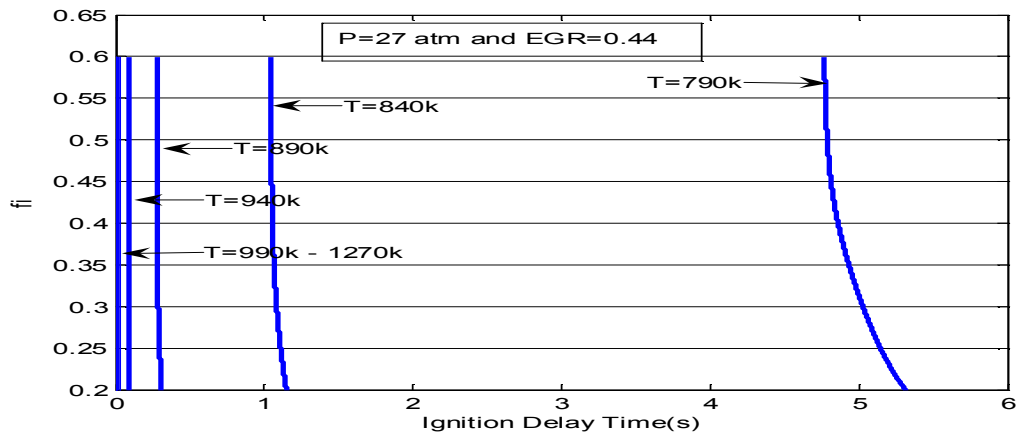
نمودار 3- تغییرات EGR - زمان تاخیر اشتعال به ازای فشارهای مختلف



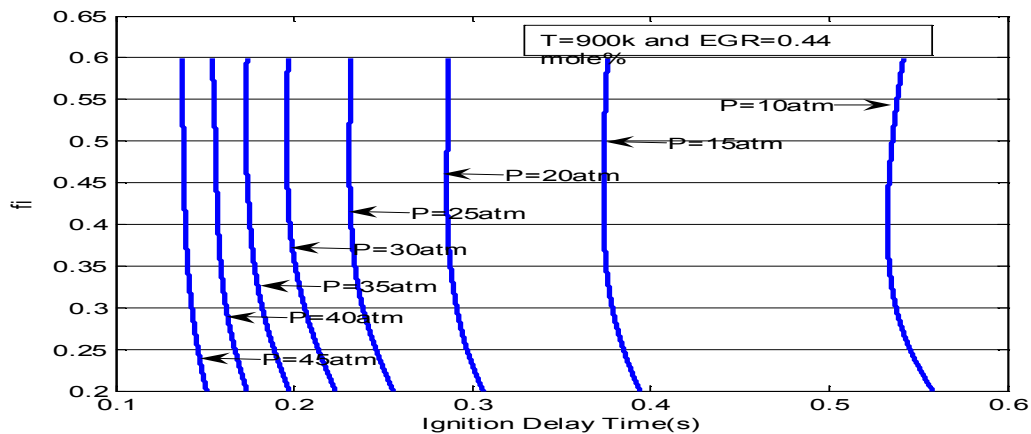
نمودار 4- تغییرات EGR - زمان تاخیر اشتعال به ازای دما های مختلف



تغییرات نسبت هم‌ارزی بر زمان تاخیر خوداشتعالی گاز متان تاثیر کمی دارد (نمودار (6 و 5)).

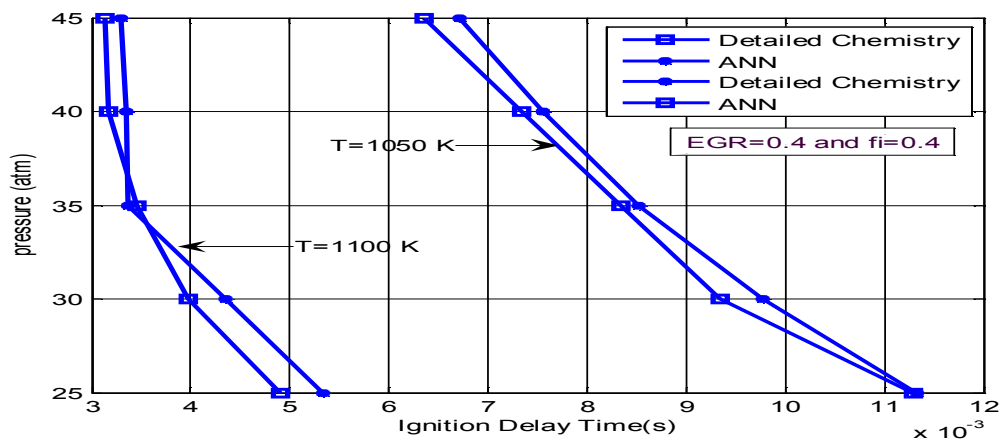


نمودار 5- تغییرات  $\phi$  - زمان تاخیر اشتعال به‌ازای دماهای مختلف

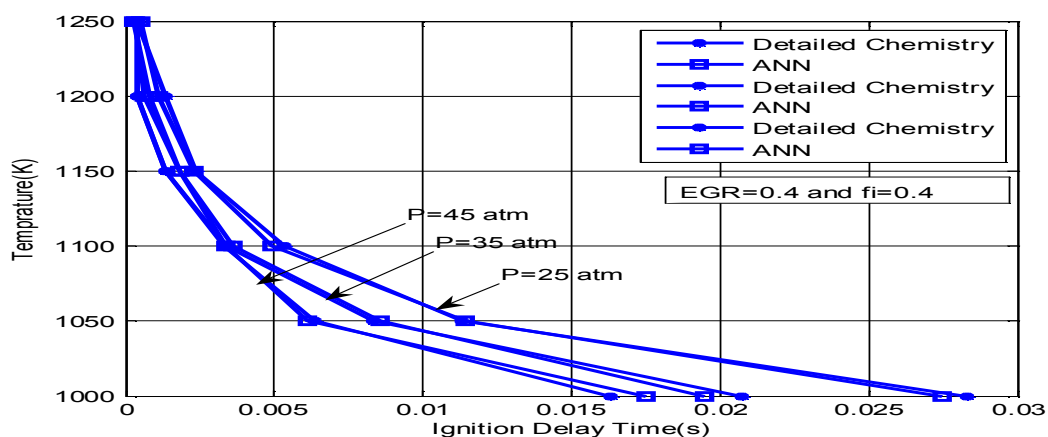


نمودار 6- تغییرات  $\phi$  - زمان تاخیر اشتعال به‌ازای فشارهای مختلف

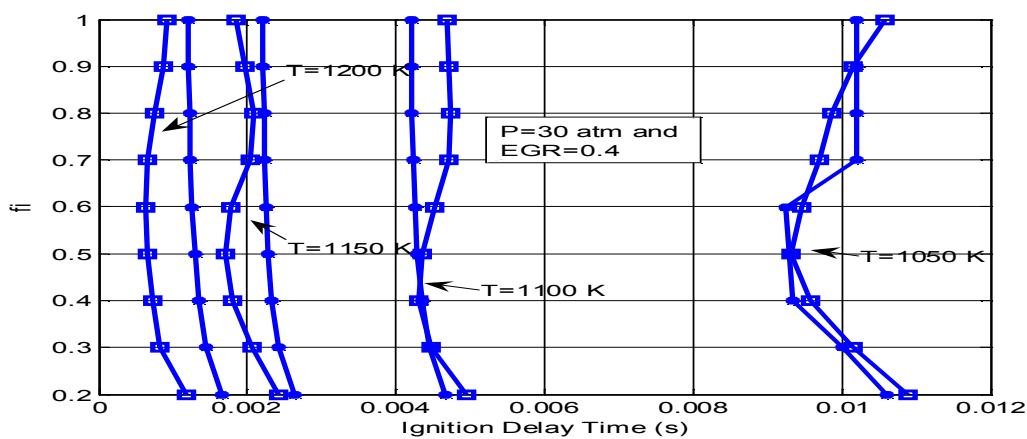
در محدوده عملکرد HCCI نیز، پارامترهای ذکر شده در بالا از روند کلی حاکم تبعیت می‌کنند (نمودارهای (10-7)).



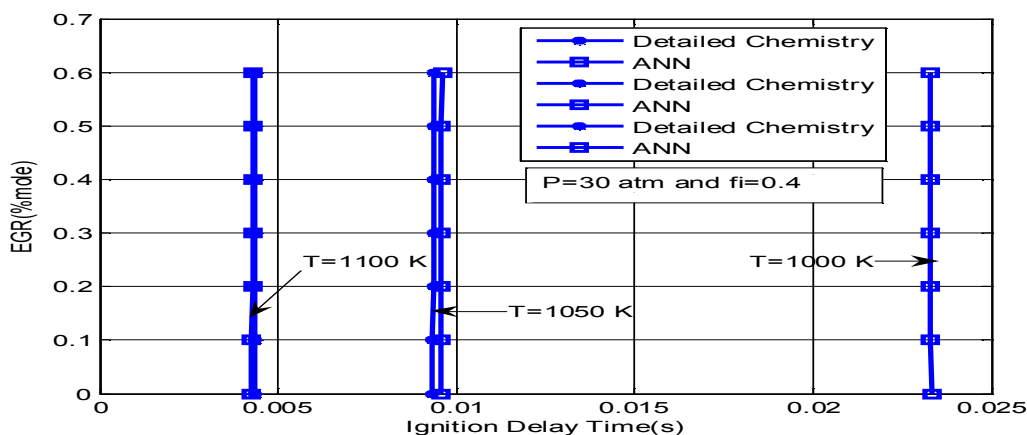
نمودار 7- تغییرات فشار - زمان تاخیر اشتعال به‌ازای دماهای مختلف در محدوده عملکرد HCCI



نمودار 8- تغییرات دما- زمان تاخیر اشتعال به ازای فشارهای مختلف در محدوده عملکرد HCCI



نمودار 9- تغییرات زمان تاخیر اشتعال - phi به ازای دماهای مختلف در محدوده عملکرد HCCI



نمودار 10- تغییرات زمان تاخیر اشتعال EGR- به ازای دماهای مختلف در محدوده عملکرد HCCI

## 5- نتیجه گیری

در این مطالعه، با تهیه و آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی برای محاسبه زمان تاخیر اشتعال در موتورهای HCCI، تاثیر پارامترهای فشار، دما، نسبت هم‌ارزی و EGR بر زمان تاخیر اشتعال گاز متان بررسی شده است. عملکرد این شبکه در تخمین

زمان تاخیر اشتعال بسته به پارامترهای ورودی یعنی دما و فشار در شرایط اشتعال و  $\phi$  و EGR در شرایط ورود سوخت به موتور می باشد. با اعمال مطالعات انجام شده در زمینه شرایط اشتعال موتورهای HCCI جهت تولید شبکه عصبی مناسب، شبکه استفاده شده قادر به پیش‌بینی زمان تاخیر اشتعال گاز متان با دقت 2.76 درصد خطا نسبت به نرم افزار CHEMKIN می‌باشد که به طور قابل ملاحظه‌ای (حدود 1000 برابر) سریع‌تر از کدهای رایج می‌باشد. این ویژگی امکان بررسی استراتژی‌های کنترلی را در زمان کم و به صورت Real Time فراهم می‌آورد. پیشنهاد می‌شود که این کار برای سوخت‌های دیگر نیز انجام شود.

## مراجع

- 1-Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., and Kato, S., "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) A New Combustion Process for Internal Combustion Engines," SAE Paper No. 790501.
- 2-Najt, P., and Foster, D. E., "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion," SAE Paper No. 830264.
- 3-Noguchi, M., Tanaka, Y., Tanaka, T., and Takeuchi, Y., "A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products during Combustion," SAE paper 790840, 1979.
- 4-D.Flowers, S.Aceves, C.K. Westbrook, J.R. Smith, R.Dibble, "Detailed Chemical Kinetics Simulation of Natural Gas HCCI Combustion: Gas Composition Effects and Investigation of Control Strategies, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, APRIL 2001, Vol. 123.
- 5-Sato, Yamasaki, Kawamura, Lida, Research on the Influence of Hydrogen and Carbon Monoxide on Methane HCCI Combustion, JSME International Journal, Series B, Vol.48, No.4,2005.
- 6-Morsy Mohammad. H, Ignition control of methane fueled homogeneous charge compression ignition engine using additives, Fuel Vol.86(2007) 533-540.
- 7-A. Babajimopoulos, G.A. Lavoie, D.N. Assanis, SAE paper 2003-01-3220 (2003).
- 8-Oakley, A., Zhao, H., Ma, T., and Ladommatos, N., "Dilution Effects on the Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion of Hydrocarbon and Alcohol Fuels," SAE Paper 2001-01-3606, 2001.
- 9-Aceves, S. M., Flowers, D.L., Westbrook, C.K., Smith, J. R., Pitz, W.J., Dibble, R., Christensen, M. and Johansson, B., "A Multi-Zone Model for Prediction of HCCI Combustion and emissions," SAE Paper 2000-01-0327, 2000.
- 10- Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R.W., "Combustion," 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- 11-Aceves, S.M., Flowers, D.L., Espinosa-Loza, F., Martinez-Frias, J., Dibble, R.W., Christensen, M., Johansson, B., and Hessel, R.P., "Piston-Liner Crevice Geometry Effect on HCCI Combustion by Multi-Zone Analysis," SAE Paper 2002-01-2869, 2002.
- 12-Aceves, S.M., Flowers, D.L., Espinosa-Loza, F., Martinez-Frias, J., Dec, J.E., Sjöberg, M., Dibble, R.W., and Hessel, R.P., "Spatial Analysis of Emissions Sources for HCCI Combustion at Low Loads Using a Multi-Zone Model," SAE Paper 2004-01-1910, 2004.
- 13-Turns, S.R., An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Chapter 8, McGraw-Hill, New York, NY, 2000.
- 14-Hultqvist, A., Christensen, M., Johansson, B., Richter, M., Nygren, J., Hult, J., and Alden, M., "The HCCI Combustion Process in a Single Cycle-High-Speed Fuel Tracer LIF and hemiluminescence Imaging, SAE Paper 2002-01-0424, 2004.
- 15-Kong, S.C., Reitz, R.D., Christensen, M., and Johansson, B., "Modeling the Effects of Geometry- Generated Turbulence on HCCI Engine Combustion," SAE Paper 2003-01-1088, 2003.
- 16-Christo, F.C., Masri, A.R., and Nebot, E.M., "Integrated PDF/neural network approach for simulating turbulent reacting systems," Combustion and Flame, Vol. 106, pp. 406-421, 1996.
- 17-M. Frenklach, H. Wang, C.-L. Yu, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, D.F. Davidson, E.J. Chang, G.P. Smith, D.M. Golden, W.C. Gardiner, V. Lissianski. Available from [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- 18-Kalogirou SA. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. Progr Combust Energy Sci 2003;29:515-66.
- 19-Kalogirou SA. Artificial neural networks in renewable energy system applications: a review. Renew Sustain Energy Rev 2001;5:373-401.
- 21-Kalogirou SA. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. Progr Combust Energy Sci 2003;29:515-66.
- 22- Y. Choi\*, J.-Y. Chen. Fast prediction of start-of-combustion in HCCI with combined artificial neural networks and ignition delay model. Combustion Institute.