

## بهینه‌یابی غلظت اکسیژن اضافه و زمان جرقه‌زنی به منظور بهبود

### عملکرد موتور XU7

محسن قنبرنیا سوته<sup>۱</sup>، محمدمهدی دوستدار<sup>۲</sup> و امیر گودرزی<sup>۳</sup>

دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۴)

#### چکیده

در این تحقیق، برای درک بهتر اثر افزایش غلظت اکسیژن در موتورهای احتراق داخلی، از شبیه‌سازی عددی موتور XU7 در نرم‌افزار GT-Power استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی افزایش حدود ۸ درصدی گشتاور و توان، و کاهش حدود ۷ درصدی میزان مصرف سوخت ترمزی را در ۲۳ درصد حجمی اکسیژن افزوده شده نشان می‌دهد. تنها اثر نامطلوب این تغییر افزایش اکسیدهای ازت می‌باشد. به منظور کاهش اکسیدهای نیتروژن خروجی، یک متغیر زمانی مناسب انتخاب شد که بتواند این اثر را تعدیل کرده و گشتاور و توان افزوده شده را بیش از حد کاهش ندهد. پس از انتخاب متغیر زمانی مناسب، به منظور یافتن مقادیر بهینه اکسیژن و متغیر زمانی موردنظر که در اینجا زمان جرقه‌زنی است، از اتصال GT-Power با Simulink-MATLAB و همچنین ابزار شبکه‌های عصبی نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. هدف‌گذاری بهینه‌سازی روی کاهش ۵۰ درصدی میزان اکسیدهای نیتروژن نسبت به حالت غنی‌سازی شده با ۲۳ درصد حجمی اکسیژن و افزایش ۵ درصدی توان نسبت به حالت بدون غنی‌سازی، پایه‌ریزی شد. مکانیزم طراحی شده قادر است با توجه به هدف‌گذاری فوق، ورودی‌های موردنظر (اکسیژن افزوده شده و زمان جرقه‌زنی) را بهینه نماید.

**واژه‌های کلیدی:** غنی‌سازی اکسیژن، اکسیدهای ازت، زمان جرقه‌زنی، بهینه‌یابی، شبکه‌های عصبی

## Optimization of Excess Oxygen and Spark Timing to Improve the XU7 Engine Performance

M. GhanbarniaSooteh, M.M. Doostdar and A. Goudarzi

Imam Hossein University

(Received: 14/November/2013; Accepted: 24/April/2014)

#### ABSTRACT

To investigate the effect of oxygen enrichment in internal combustion engines, we used GT-POWER code to simulate the XU7 engine. The result show an increase of %8 in power and torque, and a decrease of %7 in brake fuel consumption for %23 volumetric excess oxygen. However, the increase of NO<sub>x</sub> is the only undesired side effect. To reduce exhaust NO<sub>x</sub> a convenient time variable is selected which can modify this effect, while prevents too much reduction in excess power and torque. Spark timing is chosen as the mentioned time variable. To optimize oxygen amount and spark timing, we link GT-POWER and SIMULINK-MATLAB as well as neural network toolbox of MATLAB. The target of optimization is %50 reduction in NO<sub>x</sub> with respect to %23 volumetric oxygen enrichment case and %5 increment in power with respect to natural aspiration case. The designed algorithm is capable of optimizing excess oxygen and spark timing.

**Keywords:** Oxygen Enrichment, NO<sub>x</sub>, Spark Timing, Optimization, Neural Network

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mdostdar@ihu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: kpagoudarzi@ihu.ac.ir

## ۱- مقدمه

پیشینه مسئله کنترل آلودگی (مشخصاً در ایالات متحده) به دهه ۶۰ میلادی باز می‌گردد. این مسئله روی صنایع مختلف تأثیر گذاشت و سبب ایجاد جهش تکنولوژیک در این صنایع شد که صنعت خودرو نیز از این قانده مستثنی نبود [۱].

انطباق زمانی بین موضوع غنی‌سازی اکسیژن در موتورهای احتراق داخلی و قوانین وضع شده در جهت کنترل آلودگی و همچنین رویکرد برخی تکنولوژی‌های به‌کارگیری شده در این زمینه نشان می‌دهد که در ابتدا موضوع غنی‌سازی اکسیژن در خودرو با رویکرد کاهش آلاینده‌های بروز یافته است [۲]. با پیشرفت این موضوع در طول زمان مشخص شد که به‌کارگیری اکسیژن به‌عنوان اکسیدکننده در خودرو اثرات متعدد و گاه متعارضی دارد.

تحقیقات انجام شده در این زمینه عموماً روی موتورهای دیزلی متمرکز شده‌اند (به جهت گستردگی کاربرد و آلودگی‌های بیشتر) و رویکردشان کاهش آلودگی این نوع موتور می‌باشد. نتایج حاصله از تحقیقات بر این امر اتفاق نظر دارند که افزایش غلظت اکسیژن سبب کاهش آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و ذرات معلق<sup>۱</sup> شده [۳ و ۲] و به آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن می‌افزاید [۴ و ۵] و اثر ناچیزی روی کاهش منواکسیدکربن می‌گذارد [۶]. از سوی دیگر عواملی مانند بازده حرارتی و میزان مصرف سوخت، عواملی هستند که محققان بر سر آنها به توافق نرسیده‌اند؛ برای مثال وارتنبی<sup>۲</sup> معتقد است که با افزایش میزان اکسیژن مقدار مصرف مخصوص سوخت<sup>۳</sup> افزایش می‌یابد [۷]، درحالی‌که قوجال<sup>۴</sup> و همکارانش به این نتیجه رسیدند که میزان مصرف سوخت تقریباً ثابت می‌ماند [۸] همچنین نتایج سکار و همکاران<sup>۵</sup> نشان می‌دهد که با غنی‌سازی اکسیژن تحت شرایط کنترل شده می‌توان مصرف سوخت را نیز کاهش داد [۹].

مطالعاتی نیز با رویکرد بهینه‌سازی متغیرها انجام شده است که با توجه به موضوع تحقیق، بیشتر مورد توجه می‌باشد. واتسون<sup>۶</sup> و همکارانش رفتار موتور دیزلی تزریق مستقیم را با هدف مطالعه تأثیر تغییر غلظت اکسیژن بررسی کرده‌اند و

برای غلظت‌های مختلف زمان پاشش را مطابق با پیشینه گشتاور بهینه‌سازی کردند [۴].

کشمیر<sup>۷</sup> و همکارانش برای فائق آمدن بر مشکل اکسیدهای نیتروژن درصد حجمی کمی از اکسیژن را به محفظه احتراق فرستادند (۲۱ تا ۲۲/۵ درصد) و زمان پاشش سوخت را نیز قدری به تاخیر انداختند [۱۰].

هدف این تحقیق مطالعه اثرات افزایش غلظت اکسیژن روی عوامل عملکرد موتور احتراق داخلی می‌باشد. همچنین با بررسی متغیرهای مختلف و بهینه نمودن آنها سعی شده است که اثر نامطلوب افزایش اکسیدهای نیتروژن تعدیل گردد. با این کار، هم صحت و سقم نتایج متعارض گزارش شده بررسی می‌گردد و هم روشی برای تعدیل اثر نامطلوب مذکور ارائه می‌شود.

به منظور تحقق اهداف فوق، از مدل تهیه شده موتور XU7 (که در نوع خود موتور پرکاربرد و گشتاور پایینی می‌باشد) در محیط نرم افزار GT-Power استفاده می‌شود. بعد از صحنه‌گذاری مدل با استفاده از داده‌های تجربی، روش‌های مختلف افزایش غلظت اکسیژن در مدل بررسی شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردند و نتایج حاصل از افزایش غلظت اکسیژن ارائه می‌شود. پس از یافتن متغیر زمانی مناسب به منظور تعدیل اثر اکسیدهای نیتروژن، مدل موردنظر به نرم افزار Simulink-MATLAB متصل می‌گردد تا نقاط نزدیک به مقادیر بهینه متغیرهای موردنظر (غلظت اکسیژن اضافه و زمان جرقه‌زنی) به دست آیند. سپس با استفاده از این نقاط و ابزار شبکه‌های عصبی نرم افزار MATLAB و هدف‌گذاری روی کاهش اکسیدهای نیتروژن و افزایش گشتاور و توان، مقادیر بهینه ارائه می‌شوند.

## ۲- شبیه‌سازی موتور در نرم افزار GT-Power و صحنه‌گذاری

در این تحقیق یک موتور XU7/L3 در محیط GT-Power شبیه‌سازی شده است. اطلاعات هندسه موتور شبیه‌سازی شده در جدول ۱ آمده است.

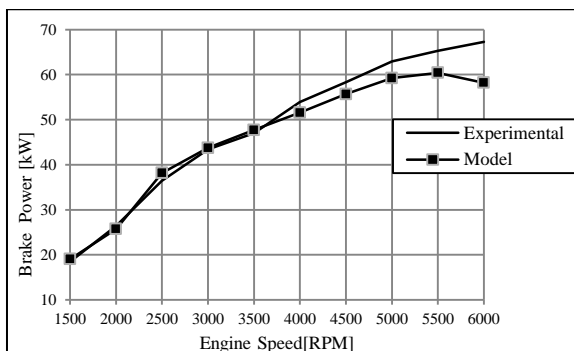
سوخت مورد استفاده از نوع بنزین پیش فرض نرم افزار است که ویژگی‌های آن به بنزین سوپر مورد استفاده در کشور نزدیک است.

- 1- Particulate Emission
- 2- Wartinbee
- 3- Brake Specific Fuel Consumption
- 4- Ghoyal
- 5- Sekar
- 6- Watson

انحراف نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دیده می‌شود که این انحراف را می‌توان به کاهش دقت مدل‌سازی رفتار فیزیکی در دوره‌های بالاتر نسبت داد [۱۱].

### ۲-۲- مقایسه توان

شکل ۲ مقایسه توان خروجی مدل تهیه‌شده با مقادیر آزمایشگاهی موجود را نشان می‌دهد.

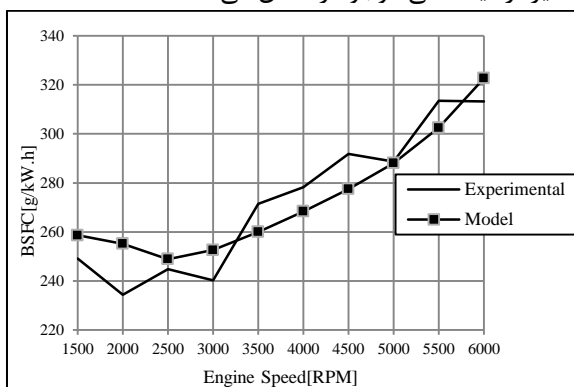


شکل (۲): منحنی تغییرات توان ترمزی برحسب دور موتور.

برای توان موتور هم به مانند گشتاور در دوره‌های بالا درصد خطا افزایش می‌یابد.

### ۳-۲- مقایسه مصرف سوخت ویژه ترمزی

شکل ۳ مقایسه مصرف سوخت مخصوص مدل تهیه‌شده با مقادیر آزمایشگاهی موجود را نشان می‌دهد.



شکل (۳): منحنی تغییرات مصرف سوخت برحسب دور موتور.

جدول ۲ میزان خطای نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

### جدول (۱): اطلاعات مربوط به موتور شبیه‌سازی‌شده.

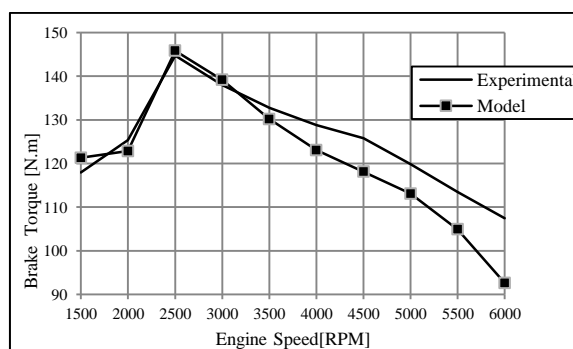
۸۳ mm	قطر سیلندر
۸۱/۴ mm	کورس پیستون
۱۵۰/۱ mm	طول شاتون
۰/۸ mm	خارج از محوری پیستون
۴	تعداد سیلندر
۱/۷۶ Liter	حجم موتور
۹/۳	نسبت تراکم

لازم به ذکر است که، یکی از ویژگی‌های شبیه‌سازی در این تحقیق، مدل احتراقی خاص به‌کارگیری شده می‌باشد. در نرم‌افزار مذکور برای موتور اشتعال جرقه‌ای، امکان انتخاب چند مدل احتراقی وجود دارد. مدل احتراقی به‌کاررفته بر پایه پیشروی شعله آشفته بنا شده است و در محاسبات به‌شدت کند عمل می‌کند، اما از ویژگی‌های خاص آن تعیین دقیق زمان جرقه‌زنی، آنالیز سرعت سوختن و پیش‌بینی ضربه می‌باشد.

پس از تهیه مدل، خروجی‌های مدل (اعم از گشتاور، توان و مصرف سوخت) با مقادیر آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مراجع [۱۱]، مقایسه شده‌اند که شرح آن در ادامه ارائه می‌شود.

### ۱-۲- مقایسه گشتاور

شکل ۱ مقایسه گشتاور مدل تهیه‌شده با مقادیر آزمایشگاهی موجود را نشان می‌دهد.



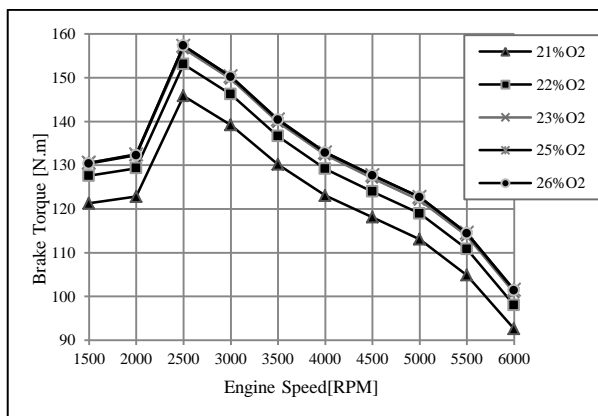
شکل (۱): منحنی تغییرات گشتاور برحسب دور موتور.

همان‌طور که مشخص است در دوره‌های پایین انطباق خوبی بین دو سری داده وجود دارد اما در دوره‌های بالاتر مقداری

جهت کنترل پذیر بودن مکانیزم دوم از این روش استفاده می‌شود؛ چرا که روند بهینه‌یابی در حل مسئله معکوس با این قابلیت تسهیل می‌گردد.

### ۳-۱- اثر افزایش غلظت اکسیژن روی گشتاور

شکل ۴ اثر افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۶٪ حجمی را در دوره‌های مختلف، روی گشتاور نشان می‌دهد.

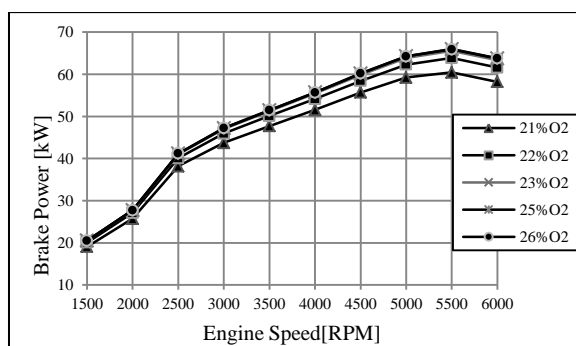


شکل (۴): منحنی تغییرات گشتاور برحسب دور موتور برای غلظت‌های مختلف اکسیژن.

همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۳٪ حجمی، گشتاور افزایش یافته و به یک میزان اشباع شده می‌رسد و بعد از آن تغییر چندانی نمی‌یابد.

### ۳-۲- اثر افزایش غلظت اکسیژن روی توان ترمزی

شکل ۵ اثر افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۶٪ حجمی را در دوره‌های مختلف، روی توان ترمزی نشان می‌دهد.



شکل (۵): منحنی تغییرات توان ترمزی برحسب دور موتور برای غلظت‌های مختلف اکسیژن.

جدول (۲): درصد خطای نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج آزمایشگاهی.

دور موتور [rpm]	[%] توان	BSFC [%]	[%] گشتاور
۱۵۰۰	۳/۰۰	۳/۷۹	۲/۸۶
۲۰۰۰	۲/۷۴	۸/۸۷	۲/۰۴
۲۵۰۰	۴/۷۵	۱/۶۶	۰/۷۵
۳۰۰۰	۰/۷۵	۵/۱۴	۰/۷۸
۳۵۰۰	۱/۵۳	۴/۲۰	۱/۹۴
۴۰۰۰	۴/۳۷	۳/۵۳	۴/۴۸
۴۵۰۰	۴/۵۲	۴/۹۴	۶/۱۲
۵۰۰۰	۷/۹۰	۰/۲۴	۵/۶۵
۵۵۰۰	۷/۴۹	۳/۵۰	۷/۷۵
۶۰۰۰	۱۳/۵۴	۳/۰۰	۱۳/۸۲

همان‌طور که مشخص است به‌طور کلی انطباق خوبی بین نتایج حاصل از مدل تهیه‌شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و بر این اساس می‌توان بر صحت عملکرد مدل تهیه‌شده اطمینان حاصل کرد.

### ۳-۳- افزایش غلظت اکسیژن

در این تحقیق تأثیر افزایش غلظت اکسیژن بر عملکرد موتور بدون تغییر نسبت هوا به سوخت مورد مطالعه قرار گرفته است.

به‌منظور افزایش غلظت اکسیژن از دو روش استفاده شده است:

۱) غنی‌سازی هوای ورودی<sup>۱</sup>: در این روش فرض بر این است که مقداری اکسیژن به هوای ورودی اضافه می‌شود و بسته به میزان اکسیژن افزوده‌شده به‌جای ۲۱ درصد حجمی، درصد‌های بیشتری از اکسیژن در هوای ورودی به محفظه‌ی احتراق موجود می‌باشد و

۲) پاشش اکسیژن<sup>۲</sup>: در این روش از یک انژکتور مجزا استفاده شده است که اکسیژن خالص را در محل پاشش سوخت به چندراه<sup>۳</sup> ورودی می‌پاشد.

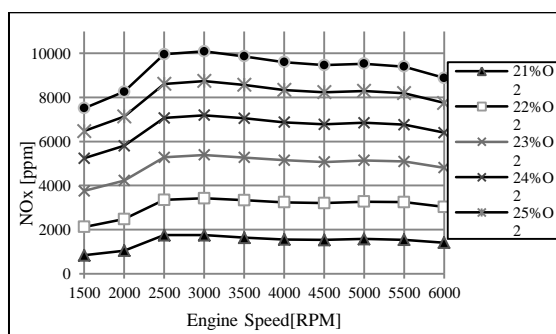
نتایج حاصل از این دو تغییر کاملاً مشابه هستند به‌طوری که حدود ۰/۵ درصد خطا در نتایج مشاهده شده است، اما به

1- Air-Enriched  
2- Oxygen Injection  
3- Manifold

همان‌طور که مشخص است با اعمال تغییر ۲ درصدی در غلظت اکسیژن افزوده شده، به‌طور میانگین در دوره‌های مختلف ۷/۸٪ افزایش توان و گشتاور و ۷/۲٪ کاهش مصرف ویژه سوخت نتیجه شده است.

### ۴-۳- اثر افزایش غلظت اکسیژن روی مقدار اکسیدهای نیتروژن

شکل ۷ اثر افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۶٪ را در دوره‌های مختلف روی اکسیدهای نیتروژن خروجی، نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت اکسیژن، مقادیر اکسیدهای ازت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند.



شکل (۷): منحنی تغییرات اکسیدهای نیتروژن تولیدشده برحسب دور موتور برای غلظت‌های مختلف اکسیژن.

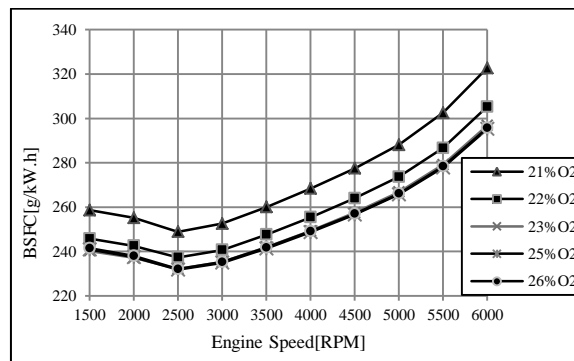
### ۴- یافتن متغیر زمانی مناسب به‌منظور تعدیل میزان اکسیدهای نیتروژن

تحقیقاتی که پیشتر در زمینه بهینه‌سازی انجام شد، روی موتور دیزل بوده است؛ به این ترتیب که اثر نامطلوب افزایش غلظت اکسیژن یعنی افزایش اکسیدهای نیتروژن را با تأخیر اشتعال تعدیل نمودند که این امر با دیرترپاشیدن سوخت میسر می‌شد. اما در این تحقیق با توجه به مطالعه عملکرد موتور اشتعال جرقه‌ای به‌نظر نمی‌رسد که زمان پاشش سوخت مهمترین متغیری باشد که بخواهد اثر نامطلوب حاصل از افزایش غلظت اکسیژن را تعدیل نماید. از این‌رو باید یک متغیر زمانی مناسب‌تری به‌منظور تعدیل این اثر نامطلوب جایگزین گردد. به‌این‌منظور مقدار اکسیدهای نیتروژن تولید شده برحسب سه متغیر زمانی مختلف که در مرحله‌ی طراحی آزمایش مهم تشخیص داده شده‌اند، محاسبه می‌شود. این سه متغیر زمانی عبارتند از: زمان پاشش سوخت، زمان بازشدن

همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۳٪ حجمی، توان ترمزی افزایش یافته و به یک میزان اشباع شده می‌رسد و بعد از آن تغییر چندانی نمی‌یابد.

### ۳-۳- اثر افزایش غلظت اکسیژن روی مصرف سوخت

شکل ۶ اثر افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۶٪ حجمی را در دوره‌های مختلف، روی مصرف ویژه سوخت ترمزی نشان می‌دهد.



شکل (۶): منحنی تغییرات مصرف سوخت مخصوص ترمزی برحسب دور موتور برای غلظت‌های مختلف اکسیژن.

همان‌طور که مشخص است با افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۳٪ حجمی، مصرف سوخت مخصوص ترمزی کاهش یافته و به یک میزان اشباع شده می‌رسد و بعد از آن تغییر چندانی نمی‌یابد.

جدول ۳ درصد تغییر نتایج را براساس افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۳٪ حجمی برای دوره‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۳): درصد تغییرات نتایج با افزایش ۲ درصدی غلظت اکسیژن.

کاهش BSFC [%]	افزایش گشتاور [%]	افزایش توان [%]	دور موتور [rpm]
۷/۱۱	۷/۶۴	۷/۶۴	۱۵۰۰
۷/۰۷	۷/۷۶	۷/۷۶	۲۰۰۰
۶/۷۳	۷/۴۱	۷/۴۱	۲۵۰۰
۶/۸۳	۷/۵۵	۷/۵۵	۳۰۰۰
۶/۹۵	۷/۴۰	۷/۴۰	۳۵۰۰
۷/۱۴	۷/۵۷	۷/۵۷	۴۰۰۰
۷/۲۲	۷/۵۴	۷/۵۴	۴۵۰۰
۷/۳۹	۷/۹۰	۷/۹۰	۵۰۰۰
۷/۷۳	۸/۵۲	۸/۵۲	۵۵۰۰
۸/۰۳	۸/۸۹	۸/۸۹	۶۰۰۰
۷/۲۰	۷/۸۰	۷/۸۰	میانگین تغییرات

همان‌طور که از شکل فوق مشخص است، مقادیر اکسیدهای نیتروژن خروجی شدیداً تحت تأثیر زمان جرقه زنی قرار دارند درحالی‌که متغیرهای زمانی پاشش سوخت و زمان‌بندی سوپاپ ورودی، تأثیر چندانی روی مقدار اکسیدهای نیتروژن خروجی ندارند. از این‌رو بهترین متغیر زمانی به‌منظور تعدیل اثر مخرب افزایش اکسیدهای نیتروژن که در اثر افزایش غلظت اکسیژن رخ می‌دهد زمان جرقه‌زنی می‌باشد.

#### ۵- فرآیند بهینه‌یابی مقادیر اکسیژن و زمان جرقه‌زنی

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، افزایش اکسیژن اثرات مطلوبی دارد اما مقدار اکسید ازت تولیدشده طی این تغییر بیش از حد افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که به‌منظور تعدیل این اثر نامطلوب تغییر زمان جرقه‌زنی روش مناسبی است. از طرفی زمان جرقه‌زنی را به هر اندازه‌ای نمی‌توان تغییر داد؛ چرا که با اِعمال تاخیر بیش از حد در زمان جرقه‌زنی در دوره‌های پایین پدیده ضربه رخ می‌دهد [۱۲]. لذا لازم است هم‌زمان با تغییر زمان جرقه‌زنی، مقدار اکسیژن اضافه‌شده هم از مقداری که در آن، خروجی‌ها اشباع شده‌اند (۲۳٪ حجمی) کاهش یابد. اگرچه این دو تغییر در راستای تعدیل اثر مخرب اکسیدهای نیتروژن است اما باید توجه داشت که این تغییرات خروجی‌های مطلوب (مثلاً توان و گشتاور خروجی) را بیش از حد کاهش ندهد.

در نتیجه یک مسئله‌ی معکوس حاصل می‌شود که در آن با هدف‌گذاری روی خروجی‌هایی مثل اکسیدهای نیتروژن و گشتاور خروجی، مقادیر بهینه‌ی میزان اکسیژن و زمان جرقه‌زنی جست‌وجو می‌شوند. به‌منظور حل این مسئله از دو ابزار هم‌زمان استفاده می‌گردد:

- ۱- اتصال دو نرم‌افزار GT-Power و Simulink-MATLAB و
- ۲- ابزار شبکه‌های عصبی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار MATLAB.

#### ۵-۱- اتصال Simulink-MATLAB و GT-Power

شکل ۹ نمای شماتیک چگونگی اتصال دو نرم‌افزار و پارامترهای موردنظر را نشان می‌دهد.

سوپاپ ورودی و زمان جرقه‌زنی. از آنجایی که بازه زمانی تغییرات این سه متغیر کاملاً متفاوت از هم است، به‌منظور مقایسه و مشاهده بهتر چگونگی تغییرات اکسیدهای نیتروژن تولیدشده، یک متغیر زمانی بی‌بعد  $T^*$  تعریف شده است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T^* = \frac{|T - T_{\min} + 5|}{|T_{\max} - T_{\min} + 5|} \quad (1)$$

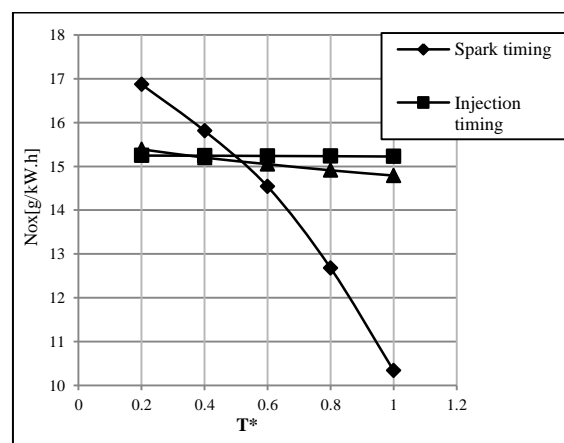
در رابطه اخیر،  $T_{\max}$  و  $T_{\min}$  مقادیر کمینه و بیشینه مربوط به هر یک از سه متغیر زمانی فوق می‌باشند. مثلاً برای زمان جرقه زنی این متغیر از  $27/5$  تا  $7/5$  درجه قبل از نقطه مرگ بالا تغییر داده شد و میزان اکسیدهای نیتروژن متناظر ثبت گردید. جدول ۴ این مقادیر و  $T^*$  را نشان می‌دهد.

#### جدول (۴): مقدار اکسیدهای نیتروژن خروجی در دور

$2500 \text{ rpm}$  برحسب زمان جرقه زنی.

T [°BTDC]	-۲۷/۵	-۲۲/۵	-۱۷/۵	-۱۲/۵	-۷/۵
$T^*$	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱
NOx [ $\frac{g}{kW.h}$ ]	۱۶/۸۷	۱۵/۸۱	۱۴/۵۴	۱۲/۶۸	۱۰/۲۴

از آنجایی که برای هر سه متغیر زمانی یادشده، تغییرات در هر ۵ درجه ثبت شد، زمان بی‌بعد  $T^*$  برای هر سه مورد، مقدار یکسانی خواهد بود. با این توضیح شکل ۸ در نظر گرفته می‌شود:



شکل (۸): منحنی تغییرات اکسیدهای نیتروژن تولیدشده

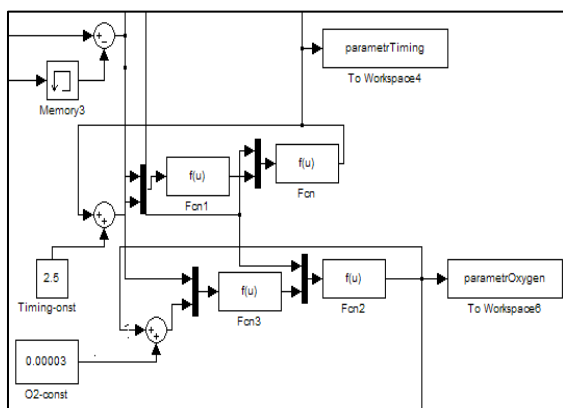
برحسب سه متغیر زمان بی‌بعد در دور  $2500 \text{ rpm}$ .

$$T_{new} = (T_{old} + C_T) \left( \frac{NO_{x-target} - NO_{x-new}}{NO_{x-new} - NO_{x-old} + 1} \right) \quad (3)$$

$$O_{new} = (O_{old} + C_O) \left( \frac{NO_{x-target} - NO_{x-new}}{NO_{x-new} - NO_{x-old} + 1} \right) \quad (4)$$

در روابط فوق، T پارامتر اصلاح زمان جرقه‌زنی و O پارامتر اصلاح میزان پاشش اکسیژن بعد از هر تکرار و C ثابت اعمالی برای هر یک از متغیرها می‌باشند که به‌شکل زیر در محیط Simulink اعمال می‌گردند.

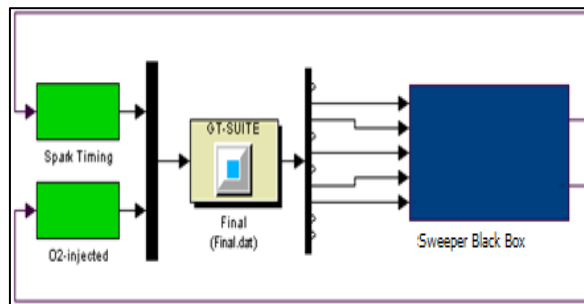
توسط مکانیزم طراحی‌شده و هدف‌گذاری ذکرشده و میزان مناسب Error\_NO<sub>x</sub> می‌توان به مقادیری از زمان جرقه‌زنی و اکسیژن اضافه‌شده رسید که به‌مقدار بهینه مورد نظر بسیار نزدیک هستند.



شکل (۱۰): شمایی از محاسبات اصلاح ورودی‌ها در محیط Simulink

### ۵-۲- ابزار شبکه‌های عصبی در نرم‌افزار MATLAB

در این تحقیق به‌منظور تعیین دقیق درصد حجمی اکسیژن و زمان جرقه‌زنی با هدف رسیدن به توان و آلاینده‌های نیتروژن مطلوب از روش شبکه‌های عصبی استفاده شده است. دلیل این امر توانمندی شبکه‌های عصبی در ایجاد ساختاری هوشمند از داده‌های صحیح موجود می‌باشد. به این ترتیب ساختار ایجاد شده امکان تخمین خوبی از خروجی را برای ورودی‌های جدید بدون نیاز به بازسازی شبکه می‌دهد. ایده اصلی این‌گونه شبکه‌ها الهام‌گرفته از شیوه کارکرد سیستم عصبی زیستی برای پردازش داده‌ها، به‌منظور یادگیری و ایجاد دانش می‌باشد. عنصر کلیدی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی به‌هم پیوسته با نام نورون<sup>۱</sup> تشکیل شده که برای حل یک مسأله به‌صورت موازی



شکل (۹): نحوه اتصال GT-Power و Simulink.

در نگاه کلی، روش حل مسئله به این شکل است که ورودی‌های موردنظر (که در این تحقیق غلظت اکسیژن و زمان جرقه‌زنی می‌باشند) خود را با خروجی‌های مطلوب سازگار می‌کنند. از طرفی، چه بسا که اصلاً خروجی‌هایی که از مسئله انتظار می‌روند، خروجی‌های اشتباهی باشند و همه خروجی‌های موردانتظار ارضاء نشده و در روند حل ایجاد اشکال نماید. در نتیجه باید با سعی و خطا خروجی‌ها را تصحیح نمود و بعد از هر بار اصلاح هدف‌گذاری روی خروجی‌ها، روند حل را پیگیری کرد که با توجه به کندی روند حل، کار زمانبری است. از طرفی در این مرحله از حل پاسخ دقیقی برای نقطه‌ی بهینه دنبال نمی‌شود بلکه این مکانیزم حل، تعدادی از نقاط نزدیک به‌مقدار بهینه را می‌دهد و یافتن نقطه دقیق بر عهده‌ی بخش مربوط به شبکه‌های عصبی است. لذا مسئله کوچک‌تر شده و هدف‌گذاری تنها روی میزان اکسیدهای نیتروژن خروجی معطوف گردید.

حال به‌منظور هدف‌گذاری خروجی موردنظر، مقدار اکسیدهای نیتروژن متناظر با ۲۳٪ حجمی اکسیژن و زمان جرقه‌زنی MBT معیار قرار می‌گیرد. هدف‌گذاری روی ۵۰ درصد اکسیدهای نیتروژن تولیدی در شرایط کارکردی فوق انجام شد. در محاسبات این مقدار NO<sub>x-target</sub> نامیده می‌شود. نحوه عملکرد طبق رابطه (۲) می‌باشد که طی آن در هر مرحله مقدار NO<sub>x</sub> با مقدار هدف سنجیده می‌شود و به این وسیله خطای NO<sub>x</sub> به‌دست می‌آید.

$$Error\_NO_x = \frac{NO_{x-target} - NO_{x-new}}{NO_{x-target}} \quad (2)$$

با استفاده از این مقدار خطا، مقدار اکسیژن پاشیده‌شده و زمان جرقه‌زنی اصلاح می‌شوند. نحوه‌ی اصلاح‌شدن این دو مقدار در هر مرحله طبق روابط (۳) و (۴) انجام می‌پذیرد.

1- Neuron

(۲) محاسبه ماتریس ژاکوبی مقادیر خطا برحسب متغیرهای وزن و بایاس نورون‌ها توسط معادله زیر:

$$J_{ij}(x) = \frac{\partial v_i(x)}{\partial x_j} \quad (۵)$$

(۳) محاسبه توسط حل معادله زیر:

$$\Delta x_k = -[J^T(x_k)](x_k) + \mu_k [I]^{-1} J^T(x_k) v(x_k) \quad (۶)$$

(۴) محاسبه مجدد مجموع مربعات خطاها توسط  $x_k + \Delta x_k$ . اگر این مجموع مربعات خطاهای جدید از مجموع مربعات خطاهای محاسبه شده در گام اول کوچک‌تر باشد آنگاه مقدار پیش‌فرض  $\mu$ ، به‌عنوان مثال  $0.1$ ، بر مقدار تعیین شده  $\mu$ ، به‌عنوان مثال  $10$ ، تقسیم می‌شود و  $x_{k+1}$  به مرحله ۱ بر می‌گردد. در غیر این صورت  $\mu$  در  $\nu$  ضرب می‌شود و به مرحله ۳ بر می‌گردد.

با توجه به مسئله‌ی معکوس موجود مقادیر اکسیدهای نیتروژن و توان خروجی مربوط به نقاط نزدیک به مقادیر بهینه را که از مرحله قبل به‌دست آمد، به‌عنوان ورودی به ابزار شبکه‌های عصبی داده می‌شود. هدف‌گذاری اکسیدهای نیتروژن روی کاهش ۵۰ درصدی نسبت به حالت ۲۳٪ حجمی اکسیژن و جرقه‌زنی MBT می‌باشد. همچنین هدف‌گذاری توان، روی افزایش ۵ درصدی نسبت به حالت بدون غنی‌سازی است. با این تابع هدف مقادیر میزان اکسیژن افزوده شده و زمان جرقه‌زنی در هر دور بهینه شده‌اند و در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

جدول (۵): مقادیر بهینه نسبت حجمی اکسیژن و زمان جرقه زنی.

دور موتور [rpm]	زمان جرقه‌زنی بهینه	مقدار اکسیژن بهینه
۱۵۰۰	-۱۳/۳۲	۲۲/۷۱
۲۰۰۰	-۱۳/۴۴	۲۲/۷۸
۲۵۰۰	-۱۳/۵۱	۲۲/۷۸
۳۰۰۰	-۱۳/۰۷	۲۲/۸۶
۳۵۰۰	-۱۳/۳۸	۲۲/۹۱
۴۰۰۰	-۱۳/۲۰	۲۲/۸۹
۴۵۰۰	-۱۳/۳۳	۲۲/۹۲
۵۰۰۰	-۱۳/۵۷	۲۲/۹۵
۵۵۰۰	-۱۳/۴۴	۲۲/۹۸
۶۰۰۰	-۱۳/۸۷	۲۳/۰۴

عمل می‌کنند و توسط خطوط ارتباطی اطلاعات را منتقل می‌کنند. یادگیری در این سیستم‌ها به‌صورت تطبیقی صورت می‌گیرد، یعنی با استفاده از مثال‌ها وزن ارتباطها و بایاس<sup>۱</sup> هر نورون به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که در صورت دادن ورودی‌های جدید، سیستم پاسخ درستی تولید کند. شبکه‌های عصبی از مجموعه لایه‌های نورونی مرتبط به‌هم تشکیل می‌گردند. این لایه‌های نورونی در یک نمای کلی در قالب لایه‌های پنهان و لایه خروجی دسته‌بندی می‌شوند [۱۳]. در این روش‌ها داده‌های ورودی به‌منظور آموزش شبکه در سهدسته آموزش<sup>۲</sup>، اعتبارسنجی<sup>۳</sup> و آزمایش<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۴].

در این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی مقادیر ورودی (درصد اکسیژن اضافه و زمان جرقه‌زنی) به‌منظور دستیابی به خروجی مطلوب (مقادیر اکسیدهای نیتروژن و توان هدف‌گذاری شده) از نرم‌افزار MATLAB و ابزار nftool در مجموعه neural network toolbox استفاده شده است. این ابزار سبب سهولت انتخاب داده، ساخت و آموزش شبکه و ارزیابی عملکرد آن از طریق روش حداقل مربعات و آنالیز رگرسیون می‌گردد. در این ابزار از یک شبکه دولایه‌ای پیشرو<sup>۵</sup> با لایه مخفی سیگموئید<sup>۶</sup> و لایه خروجی خطی استفاده شده است [۱۴]. قاعده یادگیری این الگوریتم از نوع قواعد یادگیری نظارت‌شده می‌باشد و برای تنظیم وزن‌ها و بایاس‌های شبکه از مقایسه نتیجه حاصل از شبکه برای ورودی‌های مشخص با خروجی هدف استفاده می‌گردد [۱۵]. این ابزار همچنین امکان تغییر تعداد نورون‌های لایه مخفی را به‌منظور تطابق مناسب نتایج به وجود آورده است. در این ابزار آموزش شبکه از طریق الگوریتم پس انتشار LMBP<sup>۷</sup> انجام می‌گیرد. البته در مواردی که کمبود حافظه به‌وجود آید از الگوریتم پس انتشار گرادیان توأم استفاده می‌شود [۱۴].

روال کلی روش LMBP را می‌توان در مراحل زیر بیان کرد [۱۵]:

(۱) ارائه همه ورودی‌ها به شبکه و محاسبه خروجی‌ها و خطاهای متناظر و سپس محاسبه مجموع مربعات خطاها به‌عنوان تابع هدف کمینه‌سازی.

- 1- Bias
- 2- Training
- 3- Validation
- 4- Test
- 5- Feed forward
- 6- Sigmoid
- 7- Levenberg-Marquardt Back Propagation



7. Wartinbee, W.J. "Emissions Study of Oxygen Enriched Air", SAE paper No. 710606, 1971.
8. Ghajel, H., and Levendis, H. "Effect of Oxygen-Enrichment on the Performance and Emissions of I.D.I. Diesel Engines", SAE paper No. 830245, 1983.
9. Poola, R.B., and Sekar, R. "Reduction of NOx and Particulate Emissions by Using Oxygen-Enriched Combustion Air in a Locomotive Diesel Engine", ASME, Vol. 125, No. 2, pp. 524-533, 2003.
10. Kashmir, S., Kokturk, U., and Bartels, R. "Effects of Oxygen-Enriched Air on Diesel Engine Exhaust Emissions and Engine Performance", SAE paper No.931004, 1993.
11. Pishgooie, M. "Reduction of Fuel Consumption of XU7/L3 Engine Using Variable Valve Timing System", MSC Thesis of Iran University of Science and Technology, November 2010 (In Persian).
12. Nasrabadi, M., and Kakaee, M. "Investigation of the Effect of Operating Conditions on Knock Limited Spark Advance and Octane Requirement in Internal Combustion Engine", Mech. & Aerospace Eng. J. Vol. 9, No. 1, pp. 1-14, 2013 (In Persian).
13. Demuth, H.B., and Beale, M.H. "Neural Network Toolbox User's Guide", The Mathworks, Inc., 2002.
14. "MathWorks User's Guide", Mathworks Inc, 1984.
15. Hagan, M.T., Demoth, H.B., and Beale, M.H. "Neural Network Toolbox User's Guide", PWS Pub, Boston, 1996.

## ۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌منظور بررسی اثر افزایش غلظت اکسیژن به بیش از ۲۱٪ حجمی پایه‌ریزی شد. بدین‌منظور از یک مدل شبیه‌سازی‌شده موتور XU7 در نرم‌افزار GT-Power استفاده شد. به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل شبیه‌سازی‌شده، خروجی‌های مدل با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد که به‌طور میانگین در دوره‌های مختلف برای میزان مصرف مخصوص سوخت حدود ۴ درصد و برای مقادیر گشتاور و توان حدود ۵ درصد خطا نسبت به مقادیر آزمایشگاهی مشاهده شد. پس از بررسی صحت عملکرد شبیه‌سازی، اثر افزایش غلظت اکسیژن مورد بررسی واقع شد. نتایج حاصله، افزایش حدود ۸ درصدی گشتاور و توان و کاهش حدود ۷ درصدی مصرف مخصوص سوخت را در دوره‌های مختلف برای ۲۳ درصد حجمی اکسیژن نشان داد. البته با اعمال این تغییر میزان اکسیدهای نیتروژن خروجی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت که به‌منظور تعدیل این اثر از تغییر زمان جرقه‌زنی استفاده شد. درنهایت به‌منظور بهینه‌یابی، از اتصال GT-Power و Simulink-MATLAB استفاده شد و با توجه به هدف‌گذاری اکسیدهای نیتروژن و توان خروجی، مقادیر بهینه اکسیژن اضافی و زمان جرقه‌زنی حاصل گردید.

## ۷- مراجع

1. Heywood, J.B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 1988.
2. Hongsik, B., Hong, B., and Lee, B. "The Effect of Oxygen Enriched Air Obtained by Gas Separation Membranes from the Emission Gas of Diesel Engines", Desalination Vol. 193, No's 1-3, pp. 73-81, 2006.
3. Sekar, R., Marr, W., and Assanis, N. "Oxygen-Enriched Diesel Engine Performance: a Comparison of Analytical and Experimental Result", ASME, Vol. 113, No. 3 pp. 365-369, 1991.
4. Watson, C., Milkins, E., and Rigby, R. "A New Look at Oxygen Enrichment 1) The Diesel Engine", SAE paper No. 900344, 1990.
5. Detuncq, B., and Williams, J. "Performance of a Spark Ignition Engine Fueled by N.G. Using Oxygen-Enriched Air", SAE paper No. 881658, 1988.
6. Sekar, R., and Kraft, W. "The Potential Benefits of Intake Air Oxygen Enrichment in Spark Ignition Engine Powered Vehicle", SAE paper No. 932803, 1993.