

به نام خدا

پروژه پایانی درس شناسایی سیستم‌ها

دکتر اعرابی - دانشکده مهندسی برق

علی صفائی - ۸۱۰۶۸۹۰۴۷

دانشکده فنی - دانشگاه تهران

تیر ۱۳۹۰

فهرست

۲	مقدمه
۳	۱ داده‌های ورودی و خروجی مدل
۳	۱-۱ پارامترهای ورودی مدل
۷	۲-۱ داده‌های خروجی مدل
۸	۲ انتخاب پارامترهای ورودی مناسب مدل
۱۰	۳ تخمین مقدار bsfc موتور دیزل با استفاده از یک مدل خطی
۱۲	۴ تخمین مقدار bsfc موتور دیزل با استفاده از یک مدل غیرخطی
۱۷	۵ نتیجه‌گیری

مقدمه

امروزه کاهش مصرف سوخت در خودروها به عنوان یکی از بخش های اصلی مصرف سوخت، از اهمیت خاصی برخوردار است. به منظور کاهش مصرف سوخت در یک خودرو، دسترسی به اطلاعات عملکرد موتور احتراقی آن الزامی است. یکی از اطلاعات مهم در مورد عملکرد یک موتور احتراقی، پارامتری به نام مصرف سوخت ویژه ترمزی^۱ است. این پارامتر بیانگر مقدار جرم سوخت مصرفی در ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی می باشد. بنابراین واحد bsfc، گرم بر کیلووات ساعت است. در یک موتور احتراقی، مقدار bsfc در سرعت و گشتاورهای مختلف متفاوت است و مقدار کوچکتر آن به معنای بازده بیشتر موتور می باشد. شرکت های تولید کننده موتور احتراقی با انجام تست دینامومتر که یک تست پرهزینه از لحاظ قیمت و زمان است، نمودار bsfc را برای موتورهای خود، ارائه می نمایند. از آنجایی که این نمودار از اهمیت خاصی برخوردار بوده و انجام تحقیقات دقیق در مورد مصرف سوخت موتور به در اختیار داشتن آن منوط است، نمودار به عنوان مشخصه موتور در کاتالوگ ارائه نمی شود. به زبان ساده تر شرکت های تولید کننده موتور احتراقی، نمودار bsfc موتورهای خود را در اختیار عموم قرار نمی دهند.

در پروژه حاضر، با در اختیار قرار داشتن اطلاعات مربوط به ۱۴ موتور احتراقی دیزل، سعی شده است، شناسایی نمودار bsfc این نوع موتورها انجام گیرد. دلیل استفاده از موتورهای دیزل، بازده بالاتر آنها و البته کاربرد در اتوبوس ها بوده است. اتوبوس های درون شهری به عنوان بهترین و اولین گزینه جهت انجام تحقیقات به منظور کاهش مصرف سوخت مطرح هستند. اطلاعات مربوط به bsfc این ۱۴ موتور از بانک اطلاعاتی نرم افزار ADVISOR و همچنین اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران بدست آمده است. همان طور که اشاره شد در بدست آوردن نمودار bsfc موتورها با محدودیت روبرو هستیم. در فصول این گزارش، ابتدا اطلاعات ورودی مسأله و نحوه انتخاب آنها بیان شده است. سپس با استفاده از یک روش استاندارد انتخاب ورودی^۲، پارامترهای ورودی مناسب تعیین شده اند. در مرحله بعد

^۱ Braking Specific Fuel Consumption (BSFC)

^۲ Input Selection

با استفاده از یک مدل خطی، سیستم تخمین زده شده است. سپس باتوجه به کمبودهای مدل خطی ارائه شده، یک مدل غیرخطی برای تخمین سیستم ارائه شده است. توجه شود که تمامی مدل‌های استفاده شده، ایستا هستند. در پایان نتایج مدل‌سازی‌ها و همچنین گزینه‌های موجود برای ادامه این پروژه بیان شده است.

۱ داده‌های ورودی و خروجی مدل

در این بخش، داده‌های ورودی و خروجی مدل معرفی شده‌اند. همچنین توضیحاتی در مورد نحوه و دلایل انتخاب پارامترها ارائه شده است.

۱-۱ پارامترهای ورودی مدل

به منظور انتخاب پارامترهای ورودی مدل، اطلاعاتی موردنظر هستند که با استفاده از کاتالوگ‌های ارائه شده توسط شرکت تولیدکننده موتور، برای عموم قابل دسترس باشند. پارامترهایی که در این مرحله انتخاب می‌شوند، مجموعه کلی پارامترهای ورودی را مشخص می‌نمایند. در فصل بعد از میان اعضای این مجموعه، پارامترهای مناسب جهت مدل‌سازی تعیین شده است. در شکل ۱، کاتالوگ یک موتور احتراقی دیزل نشان داده شده است. بطور کلی اطلاعات موجود در کاتالوگ یک موتور احتراقی شامل موارد زیر می‌باشد:

- *اطلاعات/ابعادی موتور*. شامل تعداد سیلندرها، ابعاد هر سیلندر، حجم کلی موتور، ابعاد کلی موتور و وزن موتور. این اطلاعات همپوشانی دارند. به این معنی که یکی از پارامترها باتوجه به مقدار چند پارامتر دیگر قابل تعیین است. ابعاد هر سیلندر در کاتالوگ با نام Bore and stroke آمده است. Bore قطر هر سیلندر و stroke مقدار طول حرکت پیستون درون سیلندر است. با استفاده از این دو پارامتر می‌توان حجم هر سیلندر را تعیین نمود. حجم کلی موتور برابر با حاصل ضرب تعداد سیلندرها در حجم هر سیلندر است. این ارتباط در رابطه ۱ که مربوط به کاتالوگ

ارائه شده در شکل ۱ می باشد، نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقدار حجم موتور بدست آمده از رابطه ۱ با مقدار ارائه شده در شکل ۱ یکسان است.

General Specifications

Basic Engine	4 Cycle
Model	6047MK2E
Number of Cylinders	4 Inline
Air System	Turbocharged Air-to-Air Charge Cooling
Control	DDEC
Bore and Stroke	5.12 in x 6.30 in (130 mm x 160 mm)
Displacement	519 cu in (8.5 liters)
Compression Ratio	16.5:1
Dimensions: (approx.)	
Length	42.9 in (1090 mm)
Width	44.2 in (1123 mm)
Height	47.5 in (1207 mm)
Weight (dry)	2230 lbs (1012 kg)

Rated Power Output*

Gross Power	*250 BHP (187 kW) @ 2100 RPM
Peak Torque	890 lb ft (1207 N•m) @ 1200 RPM
Gross Power	*275 BHP (205 kW) @ 2100 RPM
Peak Torque	890 lb ft (1207 N•m) @ 1200 RPM
Gross Power	**320 BHP (239 kW) @ 2100 RPM
Peak Torque	1150 lb ft (1559 N•m) @ 1200 RPM

شکل ۱ - کاتالوگ یک موتور دیزل

$$V = \left(\frac{130}{2}\right)^2 \times \pi \times 160 = 2.12 \text{ lit}$$

(۱)

$$V_{tot} = V \times 4 = 2.12 \times 4 \approx 8.5 \text{ lit}$$

بنابراین برای از بین بردن ارتباط مستقیم بین پارامترهای ورودی مدل، از میان پارامترهای دخیل در رابطه ۱، فقط حجم کلی موتور مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین حجم کلی موتور می‌تواند معرف ابعاد خارجی موتور (طول، عرض و ارتفاع) نیز باشد. پارامتر ابعادی دیگری که می‌توان از آن استفاده کرد، وزن موتور است.

- *اطلاعات عملکردی موتور.* شامل مقادیر حداکثر سرعت، گشتاور و توان موتور و همچنین نسبت تراکم موتور.

نسبت تراکم موتور، عددی بزرگتر از ۱ است که بیانگر نسبت ماکزیمم و مینیمم حجم محفظه سوخت درون سیلندر موتور است. تمامی چهار پارامتر فوق می‌توانند به‌عنوان پارامتر ورودی انتخاب شوند.

- *سال تولید موتور.* این پارامتر می‌تواند به‌عنوان عاملی برای در نظر گرفتن تکنولوژی استفاده‌شده در ساخت موتور به کار رود.

بنابراین در پروژه حاضر، ۷ مشخصه یک موتور احتراقی به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات مربوط به این پارامترها برای هر موتور باتوجه به کاتالوگ آن، قابل دسترسی است. کاتالوگ هر موتور با جستجو در اینترنت بدست آمده‌است. مقادیر پارامترهای ورودی مربوط به ۱۴ موتور دیزل موردنظر در جدول ۱ ارائه شده‌است. یادآوری می‌شود که ۱۴ موتور دیزل که در این پروژه استفاده می‌شوند، با توجه به اطلاعات موجود در نرم‌افزار ADVISOR و مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشگاه تهران انتخاب شده‌اند. نرم‌افزار ADVISOR یک نرم‌افزار شبیه‌سازی حرکت خودرو و تخمین مقدار مصرف سوخت آن در سیکل‌های مختلف حرکتی می‌باشد.

جهت استفاده از مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱، باید یک عمل نرمال‌سازی روی پارامترها انجام گیرد. به‌منظور انجام نرمال‌سازی، برای هر پارامتر یک مقدار ماکزیمم و مینیمم در نظر گرفته شده‌است. خروجی فرآیند نرمال‌سازی برای هر پارامتر، اعدادی بین صفر و یک می‌باشد. مقادیر پارامترهای نرمال‌شده در پوشه ضمیمه گزارش، با نام input_nrm.mat قابل دسترسی است. مرحله انتخاب پارامترهای ورودی مدل، پرهزینه‌ترین قسمت پروژه از لحاظ زمان بوده‌است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی موتورهای دیزل مورد استفاده در پروژه

سال تولید موتور	وزن موتور (kg)	حجم موتور (lit)	سرعت ماکزیمم (rad/s)	گشتاور ماکزیمم (Nm)	توان ماکزیمم (kW)	نسبت تراکم	نام موتور
۱۹۸۰	۱۵۴	۱.۵	۵۲۳.۶	۸۵	۳۷	۱۸.۵	IC۳۷
۱۹۸۸	۲۲۶	۲.۰	۵۲۳.۶	۱۳۴	۵۴	۲۳	IC۵۴
۱۹۹۰	۲۸۱	۲.۰	۴۷۱.۲۴	۱۸۲	۶۷	۱۹.۵	IC۶۷ Volkswagen
۱۹۹۰	۳۸۰	۲.۵	۴۷۱.۲۴	۲۶۵	۸۸	۲۰.۵	IC۸۸ Audi
۱۹۸۴	۵۰۸	۶.۵	۳۶۶.۵۲	۴۰۰	۱۱۹	۱۸	IC۱۱۹
۱۹۹۱	۷۲۰	۷.۳	۲۴۰.۸۵	۷۶۵	۱۷۱	۱۶.۵	IC۱۷۱ Detroit Diesel - series ۳۰
۱۹۹۳	۱۰۱۲	۸.۵	۲۱۹.۹۱	۱۲۲۰	۲۰۵	۱۶.۵	IC۲۰۵ Detroit Diesel - series ۵۰
۱۹۹۴	۱۰۳۴	۱۰.۹	۲۰۹.۴۴	۱۷۰۰	۲۴۶	۱۶.۱	IC۲۴۶ Cummins - M۱۱
۱۹۹۵	۱۰۹۰	۱۰.۳	۲۱۹.۹۱	۱۷۰۰	۲۵۰	۱۷	IC۲۵۰ Caterpillar – c۱۰
۱۹۹۷	۱۱۴۰	۱۲.۰	۲۱۹.۹۱	۲۲۳۷	۳۲۱	۱۷	IC۳۲۱ Caterpillar - c۱۲
۱۹۹۹	۱۲۲۵	۱۴.۶	۲۱۹.۹۱	۲۱۰۸	۳۲۴	۱۸.۱	IC۳۲۴ Caterpillar - c۱۵
۱۹۹۳	۱۱۵۷	۱۲.۷	۲۱۹.۹۱	۲۱۰۲	۳۳۶	۱۶.۵	IC۳۳۰ Detroit Diesel - series ۶۰
۱۹۹۶	۵۵۵	۶.۴	۲۶۱.۷۸	۱۱۰۰	۲۰۵	۱۸	idem_۹۰۶ Benz
۱۹۹۶	۹۲۰	۱۲	۲۰۹.۴۴	۱۲۵۰	۲۲۰	۱۷.۷۵	idem_۴۵۷ Benz

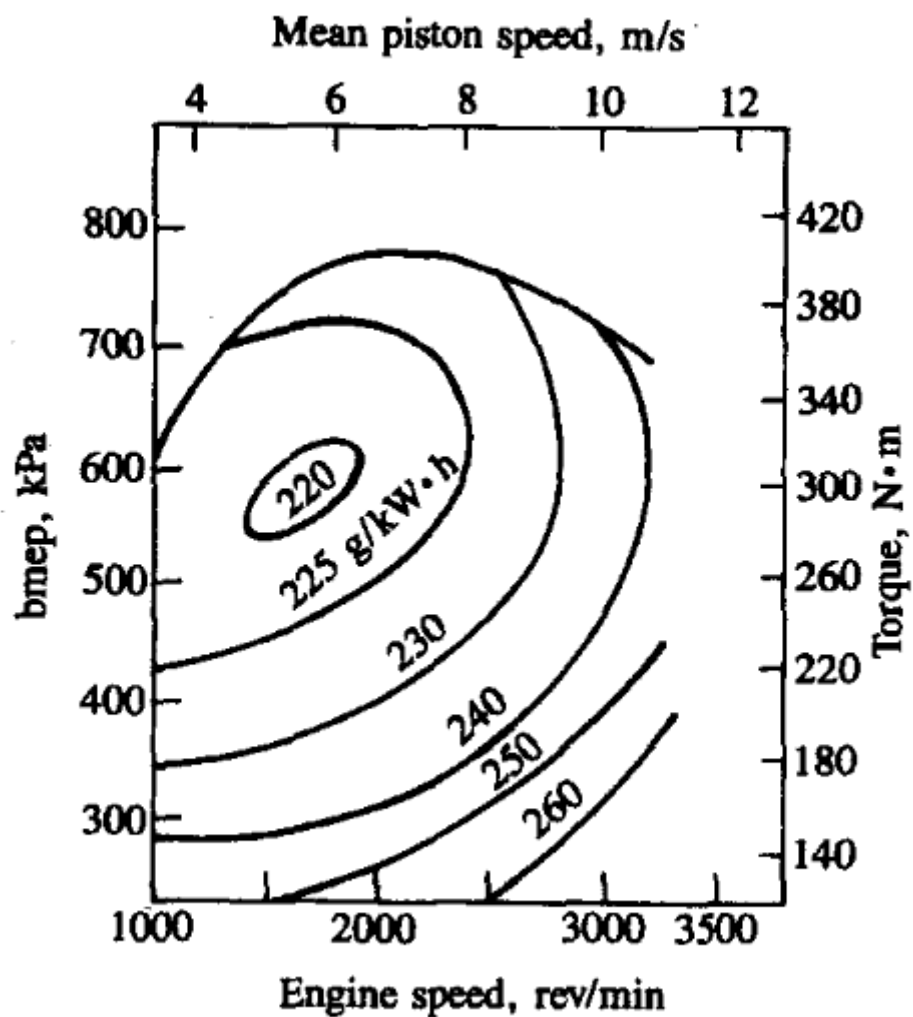
۱-۲ داده‌های خروجی مدل

همان‌طور که اشاره شد پارامتر خروجی مدل، مقدار bsfc موتور در سرعت و گشتاورهای مختلف است. محدوده سرعت و گشتاور کاری هریک از موتورهای مورد بحث، متفاوت است. برای یکسان سازی نتایج، محدوده سرعت و گشتاور هر موتور نرمال شده و به صورت اعدادی بین صفر و یک و ضربی از ۰.۱ ارائه شده‌اند؛ بطوری که مقدار ۱ بیانگر ماکزیمم سرعت یا گشتاور می‌باشد. همچنین، باتوجه به وجود سرعت بی‌باری^۳ برای موتورهای احتراقی، محدوده سرعت مورد نظر بین ۰.۴ تا ۱ برابر سرعت ماکزیمم موتور در نظر گرفته شده‌است. محدوده ۰.۲ تا ۱ نیز برای محدوده گشتاور موتور در نظر گرفته شده‌است. در عمل، مقدار bsfc یک موتور در این محدوده گشتاور مورد علاقه است. نمودار bsfc یک موتور احتراقی دیزل در شکل ۲ نشان داده شده‌است. محدوده گشتاور و سرعت که مقدار bsfc برای آن مشخص شده‌است، قابل توجه می‌باشد.

بنابراین، داده‌های خروجی در یک فضای ۷ (۰.۴ تا ۱) در ۹ (۰.۲ تا ۱) قرار می‌گیرند. برای هریک از این ۶۳ نقطه، مقدار bsfc ۱۴ موتور موجود است. مقادیر داده‌های خروجی مدل در یک structure قرار داده شده‌است. این مقادیر در پوشه ضمیمه گزارش با نام output.mat قابل مشاهده است.

باتوجه به مطالب ارائه شده در این فصل، مسأله شناسایی حاضر یک مسأله ۷ ورودی و ۶۳ خروجی است.

^۳ Idle speed



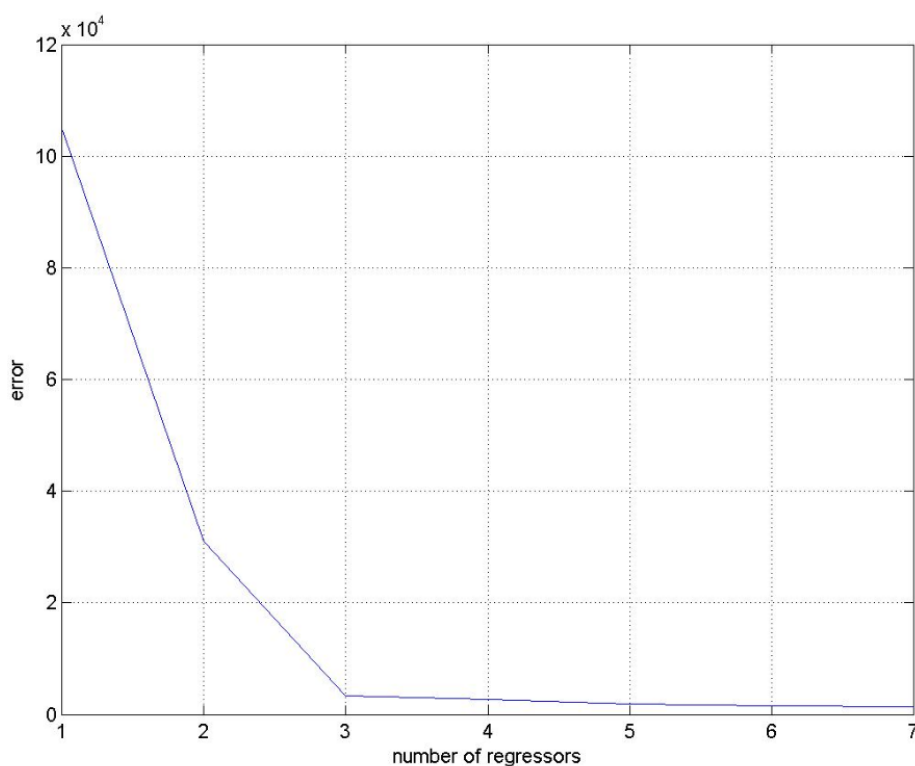
شکل ۲ - نمودار bsfc یک موتور احتراقی دیزل

۲ انتخاب پارامترهای ورودی مناسب مدل

پس از انتخاب مجموعه پارامترهای ورودی و خروجی مدل، به منظور کاهش حجم محاسبات و همچنین افزایش دقت مدل سازی، در این مرحله انتخاب پارامتر ورودی مناسب انجام می گیرد. بدین منظور از الگوریتم OLS^۴ استفاده شده است.

^۴ Orthogonal Least Squares

ابتدا یک کد برای پیاده‌سازی الگوریتم OLS نوشته شده‌است. کد مورد بحث در پوشه ضمیمه گزارش با نام bsfc_ols.m موجود است. جهت اعمال این الگوریتم برای مجموعه داده‌های ورودی و خروجی مدل، مسأله شناسایی به ۶۳ مسأله ۷ ورودی و یک خروجی تبدیل شده‌است. سپس الگوریتم OLS به هریک از مسائل اعمال شده‌است. اعمال الگوریتم OLS نشان می‌دهد که برای تمامی ۶۳ مسأله موجود، استفاده از ۳ پارامتر از میان ۷ پارامتر ورودی موجود کافی است. نمونه‌ای از نتایج استفاده از الگوریتم OLS به عنوان یک روش انتخاب ورودی، در شکل ۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۳- نمودار خطا در الگوریتم OLS بر حسب تعداد پارامتر ورودی

نکته قابل توجه در بحث انتخاب ورودی مناسب آن است که سه ورودی مناسب برای هریک از ۶۳ مسأله شناسایی موجود، متفاوت است. از این رو برای تخمین خروجی سیستم در هر مسأله، در ابتدا با استفاده از کد الگوریتم OLS نوشته شده، پارامترهای ورودی مناسب برای هر مسأله بطور جداگانه مشخص می‌شود. به این موضوع در فصل بعد اشاره

خواهد شد. ترتیب اهمیت پارامترها برای هریک از ۶۳ مسأله شناسایی در پوشه ضمیمه گزارش با نام I_max_ols.mat ارائه شده است. در مجموع می توان گفت پارامترهای ماکزیم سرعت و حجم موتور پراهمیت ترین پارامترها و پارامترهای ماکزیم توان و وزن موتور کم اهمیت ترین پارامترهای ورودی هستند.

۳ تخمین مقدار bsfc موتور دیزل با استفاده از یک مدل خطی

برای تخمین مقدار bsfc، ابتدا از یک مدل خطی استفاده شده است. بدین منظور الگوریتم LS^۵ به کار رفته است. ابتدا کد مربوط به الگوریتم LS نوشته شده است. کد الگوریتم LS با نام bsfc_ls_tot.m در پوشه ضمیمه گزارش ارائه شده است. سپس از این کد برای مدل سازی ۶۳ مسأله ۷ ورودی و یک خروجی استفاده شده است. توجه داریم که مسأله اصلی یک مسأله شناسایی با ۷ ورودی و ۶۳ خروجی است که آن را به ۶۳ مسأله ۷ ورودی و یک خروجی تبدیل کرده ایم. همچنین داده های ورودی و خروجی که برای مدل سازی از آنها استفاده شده است، مربوط به ۱۴ موتور هستند. به عبارت دیگر ۱۴ مشاهده در اختیار است. ۱۱ سری از این اطلاعات ورودی- خروجی به عنوان داده train و ۳ سری (۲۰ درصد) به عنوان داده test در نظر گرفته شده است. داده های تست به صورت آگاهانه و غیر تصادفی انتخاب شده اند. به طوری که پراکندگی داده های train حفظ شود و در نتیجه از over fitness جلوگیری شود. در جدول ۱، موتورهای سطرهای ۴، ۸ و ۱۲ به عنوان داده تست در نظر گرفته شده اند.

همان طور که در بخش ۲ اشاره شد، برای مدل سازی از پارامترهای مناسب که با استفاده از الگوریتم OLS، برای هر مقدار سرعت و گشتاور موتور (۶۳ مسأله شناسایی) بدست آمده اند، استفاده شده است. از این رو در ابتدای کد نوشته شده برای الگوریتم LS که تخمین خطی را انجام می دهد، یک الگوریتم OLS اضافه شده است. در نتیجه پارامترهای فیلتر شده، به عنوان ورودی وارد الگوریتم LS می شود.

^۵ Least Squares

برای تعیین کیفیت عملکرد مدل خطی ساخته شده، از تابعی به نام میانگین درصد خطا^۶ استفاده شده است. این تابع که بیانگر مقدار متوسط درصد خطا روی مجموع ۶۳ مسأله است، در رابطه ۲ نشان داده شده است. همچنین مقدار خطای هریک از ۶۳ مسأله شناسایی در فایلی به نام err_ls.mat و مقدار خروجی مسائل برای داده‌های تست در فایلی به نام y_tst_mdls.mat در پوشه ضمیمه گزارش، ارائه شده است.

$$APE = \text{average percentage error} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \frac{|T(i) - O(i)|}{|T(i)|} * 100\% \quad (2)$$

به عنوان نمونه، نتایج مربوط به خطای مدل برای دومین داده تست (موتور سطر هشتم در جدول ۱) در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول، ستون اول، مقادیر نرمال شده سرعت و سطر اول مقادیر نرمال شده گشتاور موتور است.

جدول ۲- مقادیر خطای تخمین bsfc مربوط به موتور دوم در داده‌های تست تحت تخمین LS (برحسب درصد)

	۰.۲	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۶	۰.۷	۰.۸	۰.۹	۱
۰.۴	۲.۵۸	۸.۴۵	۹.۱۳	۹.۴۶	۹.۶۶	۹.۸۴	۱۰.۱۳	۱۰.۳۲	۱۰.۴۱
۰.۵	۳.۱۵	۱۴.۲۲	۱۰.۶۳	۱۰.۱۵	۹.۸۲	۹.۷۱	۹.۷۸	۹.۷۸	۹.۷۰
۰.۶	۱۸.۸۱	۱۶.۷۷	۱۶.۸۳	۱۳.۳۷	۱۳.۲۵	۱۳.۲۸	۱۳.۲۲	۱۳.۱۵	۱۳.۱۱
۰.۷	۱۸.۱۰	۱۵.۶۹	۱۶.۰۳	۱۵.۹۷	۱۱.۶۴	۱۱.۷۵	۱۱.۷۸	۱۱.۵۹	۱۱.۴۰
۰.۸	۱۸.۷۵	۱۵.۶۸	۱۵.۳۱	۱۵.۲۲	۱۵.۳۲	۱۰.۳۰	۱۰.۱۳	۱۰.۰۸	۱۴.۷۱
۰.۹	۱۸.۶۲	۱۵.۱۳	۱۴.۷۹	۱۴.۷۱	۱۴.۷۴	۱۴.۴۶	۱۴.۱۳	۱۴.۱۸	۱۴.۰۸
۱	۱۸.۳۴	۱۵.۷۷	۱۸.۶۴	۱۴.۲۹	۱۴.۲۳	۱۴.۵۱	۱۴.۴۳	۱۴.۴۷	۱۴.۲۵

^۶ Average percentage error

همچنین به عنوان یک نتیجه گیری کلی، مقادیر تابع متوسط درصد خطا برای هر سه داده تست در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۲ و ۳ با توجه به محدوده مقادیر bsfc که از مرتبه ۱۰ به توان ۲ می باشد، مقادیر بزرگی محسوب می شوند.

جدول ۳- مقادیر تابع متوسط درصد خطا برای داده های تست در تخمین LS

شماره داده تست	۱	۲	۳
مقدار تابع متوسط درصد خطا	۹.۵۳	۱۲.۹۹	۲۰.۵۲

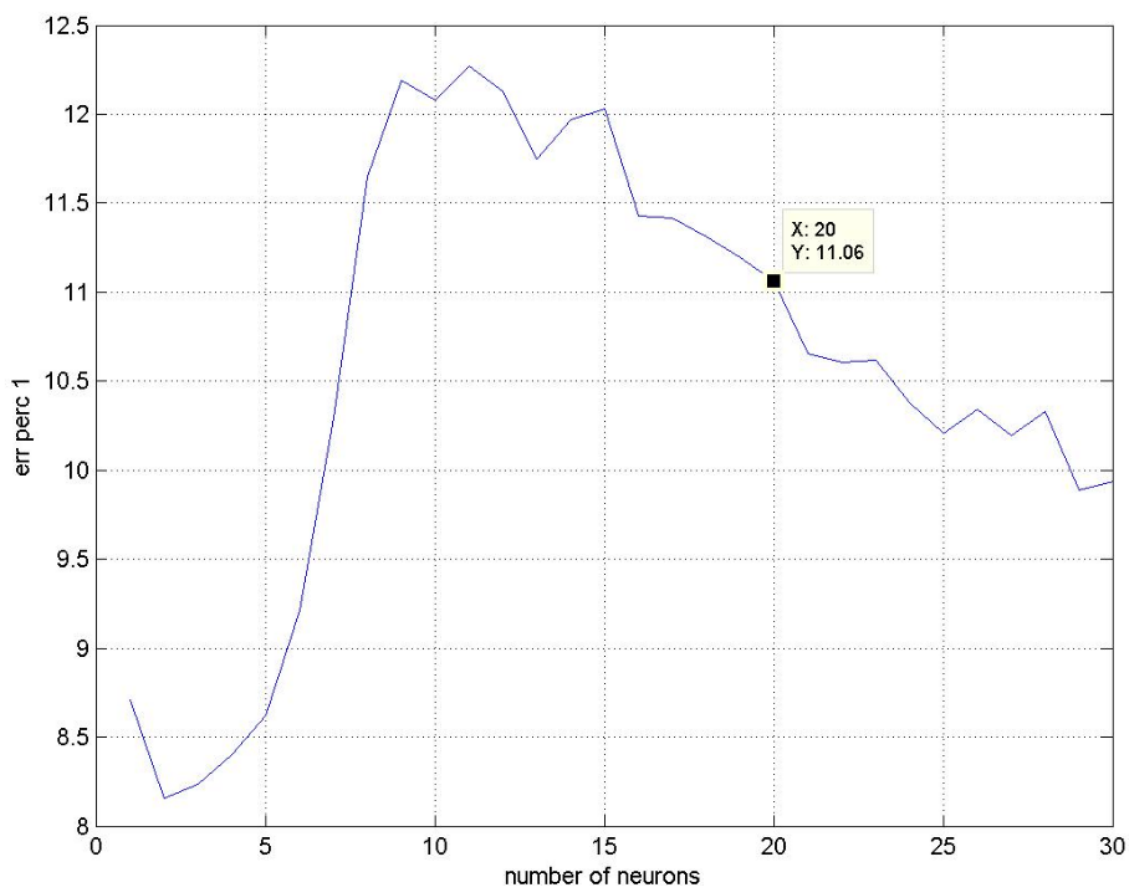
۴ تخمین مقدار bsfc موتور دیزل با استفاده از یک مدل غیر خطی

بعد از آن که تخمین خطی برای شناسایی سیستم، با خطای نسبتاً بالایی همراه بود، در این بخش از یک مدل غیر خطی برای تخمین مقدار bsfc موتور دیزل استفاده شده است. این مدل خطی یک شبکه عصبی با یک لایه درونی است. بدین منظور یک کد شبکه عصبی نوشته شده است. این کد با نام bsfc_nn_tot.m در پوشه ضمیمه گزارش ارائه شده است. در اینجا نیز کد نوشته شده برای تخمین ۶۳ مسأله شناسایی موجود به کار رفته است. همچنین داده های train و test مشابه مدل خطی در نظر گرفته شده اند. موتورهای سطرهای ۴، ۸ و ۱۲ در جدول ۱ به عنوان داده های تست انتخاب شده اند. به علاوه به منظور استفاده از پارامترهای ورودی مناسب، برای مدل غیر خطی نیز یک الگوریتم OLS به ابتدای کد شبکه عصبی اضافه شده است. در مدل غیر خطی استفاده شده، چندین پارامتر قابل تنظیم هستند:

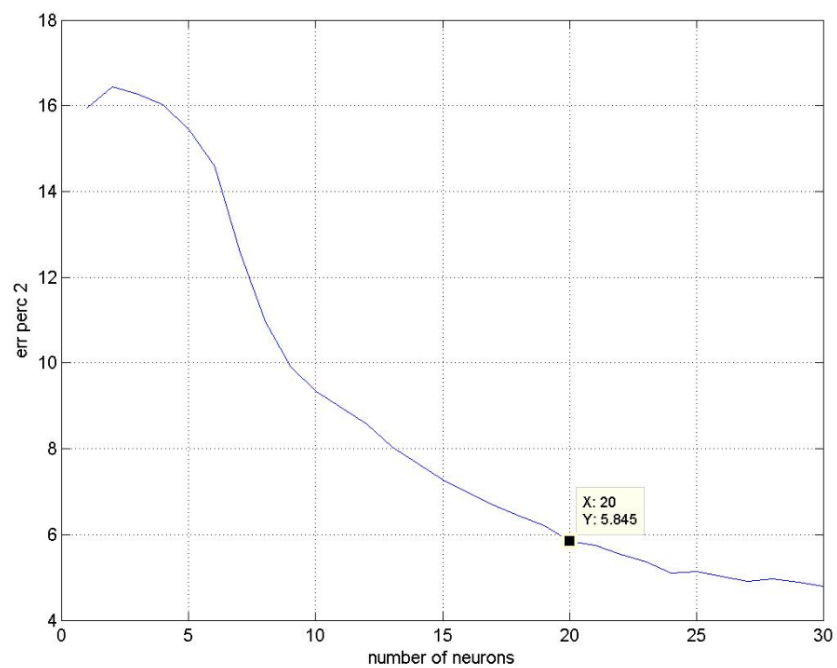
- تابع غیر خطی استفاده شده در هر نرون. این تابع به طور پیش فرض برای تمامی نرون ها، تابع تانژانت هایپربولیک در نظر گرفته شده است. نوع این تابع در صورت بالا بودن خطای مدل، تغییر خواهد کرد. البته در طی فرآیند تخمین نیازی به تغییر نوع تابع مشاهده نشد.

- شرایط اولیه شبکه. منظور مقادیر اولیه ضرائب لایه‌های درونی و خروجی است. هردوی این ضرائب به صورت تصادفی و با استفاده از دستور randn انتخاب شده‌اند. البته مقدار ضرائب لایه درونی طوری انتخاب شده‌است که تابع غیرخطی درون نرون در شروع فرآیند آموزش در محدوده خطی خود باشد. به عبارت دیگر مقادیر اولیه برای ضرائب لایه درونی به صورت تصادفی و بین ۰.۲۵ و ۰.۲۵ - انتخاب شده‌است. مقادیر خروجی مدل غیرخطی کاملاً وابسته به مقدار شرایط اولیه ضرائب لایه‌های درونی و خروجی است. با توجه به انتخاب تصادفی این ضرائب، برای حل این مشکل، شبکه ۲۰ بار و هر بار با یک سری شرایط اولیه تصادفی جدید آموزش داده شده‌است و در پایان بین مقادیر خطاهای بدست آمده یک میانگین گرفته شده‌است. این مقدار میانگین به عنوان معیار سنجش کیفیت تخمین انجام شده توسط مدل غیرخطی به کار رفته‌است.
- روش بهینه‌سازی شبکه. در اینجا از روش gradient descent استفاده شده‌است. همچنین نحوه محاسبه مقدار گرادیان به صورت back propagation می‌باشد.
- نرخ یادگیری شبکه. این پارامتر به صورت پیش فرض برابر با ۰.۰۱ در نظر گرفته شده‌است. در صورت مشاهده سرعت پایین در همگرایی خطای مدل، این مقدار افزایش خواهد یافت. البته در طی فرآیند تخمین نیازی به تغییر نوع تابع مشاهده نشد.
- تعداد epoch ها. با چندبار train شبکه مشاهده شد که تعداد ۱۰۰ epoch کافی است.
- تابع عملکرد. برای بررسی کیفیت عملکرد شبکه، از تابع متوسط درصد خطا (رابطه ۲) استفاده شده‌است.
- تعداد نرون‌های لایه درونی. برای تعیین تعداد بهینه نرون‌ها در لایه درونی، یک کد جداگانه نوشته شده‌است. در این کد، شبکه برای تعداد نرون‌های بین ۱ تا ۳۰، بطور جداگانه train می‌شود. سپس مقدار تابع متوسط درصد خطا برای هر سری از داده‌های تست و تعداد نرون‌های مختلف، به عنوان خروجی کد، رسم می‌شود. در طی این مرحله

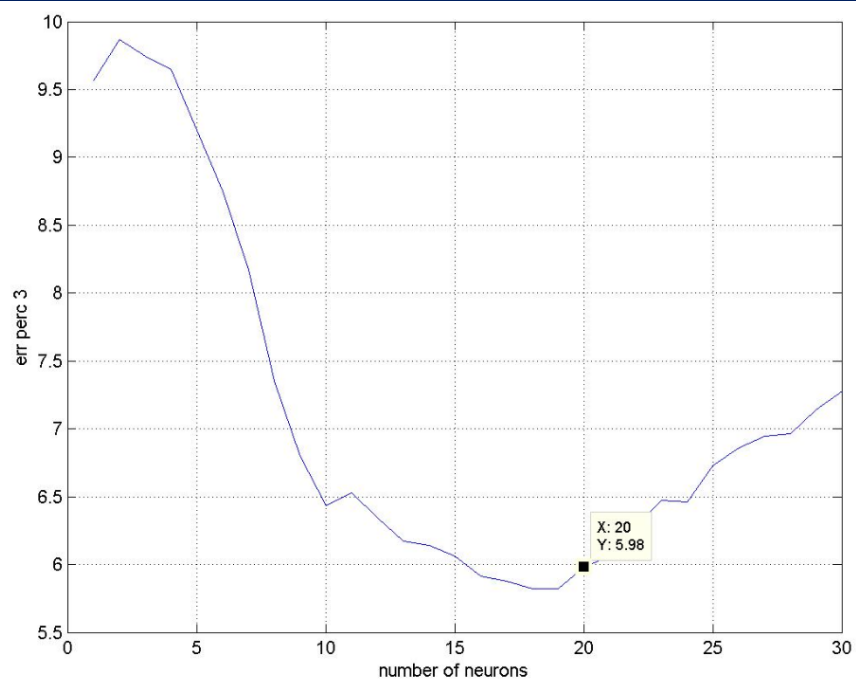
با در نظر گرفتن مقادیر هر سه داده تست، مشاهده شد که تعداد ۲۰ نرون مناسب است. نمودارهای مربوط به مقدار تابع متوسط درصد خطا برای هر سری از داده‌های تست در شکل ۴ تا شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین کد مربوط به این قسمت با نام bsfc_nn_opt_num_nrn.m در پوشه ضمیمه گزارش ارائه شده است.



شکل ۴ - نمودار مقدار تابع متوسط درصد خطا برای داده اول تست در تخمین غیرخطی سیستم



شکل ۵- نمودار مقدار تابع متوسط درصد خطا برای داده دوم تست در تخمین غیرخطی سیستم



شکل ۶- نمودار مقدار تابع متوسط درصد خطا برای داده سوم تست در تخمین غیرخطی سیستم

به عنوان نتایج مربوط به تخمین غیرخطی سیستم، مقادیر تابع متوسط درصد خطا برای داده دوم تست، در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، ستون اول، مقادیر نرمال شده سرعت و سطر اول مقادیر نرمال شده گشتاور موتور است. با مقایسه مقادیر دو جدول ۲ و ۴ می توان به برتری مدل غیرخطی اذعان داشت.

جدول ۴ - مقادیر خطای تخمین bsfc مربوط به موتور دوم در داده های تست تحت تخمین غیرخطی (برحسب درصد)

۱	۰.۹	۰.۸	۰.۷	۰.۶	۰.۵	۰.۴	۰.۳	۰.۲	
۱۴.۰۶	۱۳.۴۱	۱۳.۲۱	۱۲.۹۰	۷.۲۲	۹.۴۷	۱۴.۱۶	۸.۶۷	۲۰.۰۸	۰.۴
۳.۰۳	۳.۹۸	۱.۹۶	۰.۶۴	۲.۸۰	۱.۱۹	۳.۶۱	۵.۰۴	۱۷.۶۴	۰.۵
۱.۲۰	۱.۲۶	۹.۸۰	۰.۸۷	۰.۲۳	۲.۰۷	۰.۳۳	۰.۷۵	۱۷.۸۸	۰.۶
۳.۰۸	۲.۷۳	۳.۳۲	۳.۷۹	۳.۳۰	۰.۱۷	۰.۲۵	۲.۳۰	۱۹.۰۴	۰.۷
۰.۸۹	۶.۳۴	۶.۷۰	۱۰.۴۷	۱.۶۷	۲.۴۶	۵.۷۲	۷.۱۸	۵.۹۲	۰.۸
۰.۲۰	۰.۹۵	۲.۵۳	۲.۳۳	۳.۲۴	۳.۱۴	۴.۳۵	۶.۹۷	۲۳.۸۹	۰.۹
۱.۰۵	۱.۴۲	۱.۵۹	۱.۶۱	۳.۸۶	۴.۱۹	۴.۴۲	۶.۵۸	۲۲.۲۳	۱

همچنین به عنوان یک نتیجه گیری کلی، مقادیر تابع متوسط درصد خطا برای هر سه داده تست در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۴ و ۵ با توجه به محدوده مقادیر bsfc که از مرتبه ۱۰ به توان ۲ می باشد، مقادیر کوچکی محسوب می شوند. مقدار خطای هریک از ۶۳ مسأله شناسایی در فایلی به نام err_nn.mat و مقدار خروجی مسائل برای داده های تست در فایلی به نام y_tst_mdl_nn.mat در پوشه ضمیمه گزارش، ارائه شده است.

جدول ۵ - مقادیر تابع متوسط درصد خطا برای داده‌های تست در تخمین LS

شماره داده تست	۱	۲	۳
مقدار تابع متوسط درصد خطا	۱۱.۰۰	۶.۱۲	۵.۹۵

۵ نتیجه‌گیری

در این پروژه، مقادیر bsfc در سرعت و گشتاورهای مختلف برای موتورهای احتراقی دیزل تخمین زده شد. bsfc یک پارامتر مهم در بررسی بازده موتورهای احتراقی می‌باشد. برای تخمین، ابتدا از یک مدل خطی و سپس از یک مدل غیرخطی استفاده شده‌است. در طول پروژه مشاهده شد که مدل خطی با خطای بالایی همراه است و مدل غیرخطی که یک شبکه عصبی با یک لایه درونی است، خطای ناچیزی دارد. همچنین در بین پارامترهای فضای ورودی، یک input selection انجام شد و نتیجه این شد که مقدار حجم موتور، مقدار سرعت ماکزیمم موتور و سال تولید موتور پراهمیت ترین پارامترها هستند.

در عمل برای بدست آوردن نمودار bsfc یک موتور نیازمند انجام تست دینامومتر هستیم. با استفاده از مدل غیرخطی ساخته شده می‌توان نمودار bsfc یک موتور احتراقی دیزل را بدون نیاز با آزمایش دینامومتر بدست آورد. البته تعداد موتورهای به کار رفته برای شناسایی کم است و همین امر از دقت فرآیند شناسایی کاسته‌است. این مشکل بدلیل عدم دسترسی به اطلاعات تست موتورهاست. در آینده می‌توان با جستجوی گسترده‌تر اطلاعات بیشتری بدست آورد.

جهت استفاده از مدل غیرخطی ارائه شده برای موتورهای دیگر (simulation)، یک کد نوشته شده‌است. این کد با نام bsfc_nn_sim.m در پوشه ضمیمه گزارش ارائه شده‌است. این کد با دریافت اطلاعات مربوط به ۷ پارامتر ورودی موردنظر، ۶۳ مقدار bsfc متناسب با سرعت و گشتاورهای مختلف موتور دیزل را به عنوان خروجی استخراج می‌کند.