

پیش‌بینی متغیرهای روغن کاری یاتاقان چشم کوچک دسته‌سمبه موتور ملی EF7 به کمک شبکه‌های عصبی با شبیه‌سازی در نرم‌افزار AVL EXCITE

محمد کاظمی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس
mohammad.kazemi@yahoo.com

تیمور توکلی هاشجین*

استاد دانشگاه تربیت مدرس
ttavakol@modares.ac.ir

سیامک علیزاده نیا

کارشناس ارشد، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
s.alizadehnia@gmail.com

غلامحسین نجفی

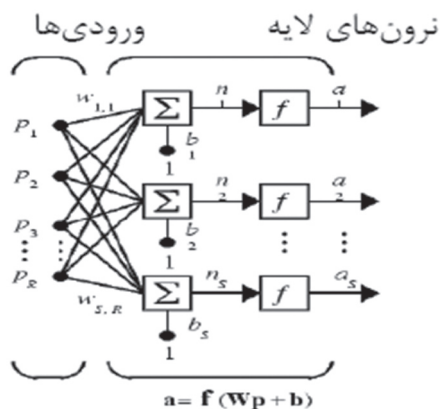
استادیار دانشگاه تربیت مدرس
g.najafi@modares.ac.ir

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۴/۱۲

چکیده

برای کاهش سایش در مجموعه محور سمبه، بوئش و باس سمبه روغن کاری انجام می‌شود. روغن مورد استفاده در موتور ملی از نوع 10W40 با گراندرومی دینامیکی 5/5 mPa.s در دمای کاری 140 درجه سلیسیوس است. به منظور تحلیل هیدرودینامیک لایه روغن در چشم کوچک دسته‌سمبه، مدل واقعی موتور با در نظر گرفتن چهار سیلندر در نرم‌افزار AVL EXCITE 5.1 شبیه‌سازی شد. در این نرم‌افزار تأثیر شش عامل دمای روغن، نوع تنفس، نوع سوخت، مقدار لقی بین محور سمبه و بوئش برنزی چشم کوچک دسته‌سمبه، موقعیت قرارگیری یاتاقان، سرعت دورانی موتور بر متغیرهای روغن کاری (بیشینه فشار و کمینه ضخامت) مدل‌سازی شده و نمودارهای مربوطه استخراج می‌شود. همچنین تأثیر این شش فاکتور بر متغیر روغن‌کاری برای چهار حالت مختلف موتور ملی EF7 توسط شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار AVL EXCITE 5.1 نشان می‌دهد که بیشترین فشار و کمترین ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن در دور 3500 rpm در زاویه لنگ 373 درجه (لحظه احتراق) در موتور EF7 پرخوران (TC) با سوخت CNG به ترتیب 446 MPa و 1/83 μm در دمای کاری 140 C رخ می‌دهد، که احتمال سایش یاتاقان در این شرایط کاری وجود دارد. از شبکه‌های عصبی پس انتشار رو به عقب (FFBP) برای مدل‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین توپولوژی برای پیش‌بینی متغیرهای روغن کاری (بیشینه فشار و کمینه ضخامت)، شبکه عصبی ای با ساختار 2-30-24-6، قاعده آموزش trainlm و توابع آستانه tansig، logsig و pureline می‌باشد.

کلید واژه‌ها: موتور پرخوران EF7، چشم کوچک دسته‌سمبه، محور سمبه، تحلیل هیدرودینامیک روغن کاری، لقی، شبکه عصبی مصنوعی.



شکل ۱ ساختار شبکه تک لایه [۳]

از آنجائی که عوامل زیادی بر روی متغیرهای روغن کاری هیدرودینامیک لایه روغن یاتاقان چشم کوچک دسته سمبه تأثیر دارند از مدل های شبکه عصبی برای مدل سازی استفاده می شود. لازم به ذکر است که استفاده از روش شبکه عصبی در این تحقیق، به دلیل صحت گذاری نتایج حاصل از شبیه سازی یاتاقان در نرم افزار AVL EXCITE بوده است [۱].

۲- پیشینه پژوهش

رابطه بین اصطکاک و روغن کاری محور سمبه در موتورهای اتومبیل تحقیقی بود که توسط Suhara و همکارانش در انستیتو Musashi انجام شد. در این تحقیق از یک سیستم داده خوانی مجهز برای اندازه گیری اصطکاک در باس سمبه بهره بردند. پژوهش آن ها بر روی چهار نمونه محور سمبه با اندازه، زبری و لقی های مختلف بوده است [۴]. Zhang و همکاران در تحقیقی جامع به مطالعه رفتار سایشی بین یاتاقان همراه با روغن کاری به صورت تجربی پرداختند. در این پژوهش آن ها از آزمایشی استفاده کردند که در آن محور سمبه با سرعت مشخص سینوسی در حال چرخیدن بوده و از طریق سیستم رایانه ای داده برداری اطلاعات مربوط به ضریب اصطکاک، بارهای عمودی وارد به یاتاقان را ثبت کردند [۵]. اندازه گیری تجربی فشار هیدرودینامیک و ضخامت لایه روغن به طور آزمایشگاهی توسط Mihara در دانشگاه توکیو ژاپن انجام شده است. در این پژوهش حسگری برای اندازه گیری فشار لایه نازک روغن در یاتاقان و باس بین سمبه موتور توسعه داده شد. در این تحقیق سعی شد که عوامل ایجاد کننده خطا در اندازه گیری مانند تغییرات دما و له شدگی را با تغییر شکل حسگر مرتفع نمایند. حسگر با ضخامت تقریبی ۳-۵ μm در فواصل معین سطوح سایشی درگیر در باس بین سمبه قرار داده شد و مقاومت الکتریکی آن تحت فشار (مقاومت پیزو) اندازه گیری

۱- مقدمه

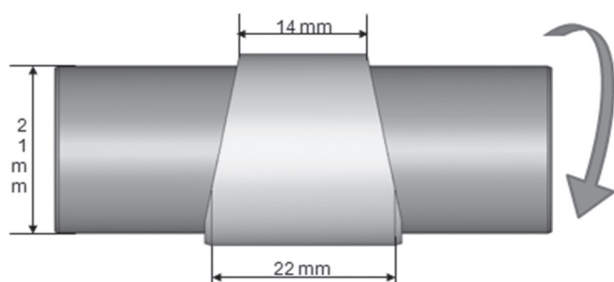
هدف از روغن کاری کاهش اصطکاک، جلوگیری از تولید حرارت و سایش قطعاتی است که نسبت به هم در حال حرکت هستند. مجموعه انتهای کوچک دسته سمبه، بوش برنزی، باس سمبه و گژن پین از جمله قطعات حساس در درون موتور هستند که در شرایط کاری سخت و دمای بالا قرار دارند. وجود لایه روغن در سطح خارجی محور سمبه علاوه بر خنک کاری، سایش و خوردگی آن را نیز کاهش می دهد. این روغن از طریق تراوشات روغن توسط پاشنده هایی که در قسمت زیرین سمبه قرار دارد تامین می شود [۱ و ۲]. محور سمبه موتور ملی EF7 به صورت کاملاً شناور طراحی شده است که توسط دو حلقه حلقوی در کناره نگه داشته شده تا حرکت طولی نداشته باشد. محور سمبه به عنوان یک محور ارتباطی وظیفه اتصال دسته سمبه به سمبه و انتقال نیرو را بر عهده دارد. نرم افزار AVL EXCITE یک نرم افزار قدرتمند در زمینه شبیه سازی و تحلیل اجزای موتور می باشد، که توسط شرکت AVL Shirk AVL توسعه داده شده است. این نرم افزار به طور گسترده در مراکز تحقیقاتی موتور استفاده می شود. محیط های مختلف این نرم افزار جهت تحلیل دینامیکی مکانیزم لنگ، تحلیل احتراق، تحلیل اصطکاک جداره سیلندر و حلقه سمبه و تحلیل هیدرودینامیک روغن کاری (HLA) یاتاقان ها بکار می رود. در سالیان اخیر سیستم های هوشمند به طور فزاینده ای برای مسایلی که راه حل مشخصی ندارند مورد توجه واقع شده، که شبکه های عصبی مصنوعی از این مجموعه می باشند که با پردازش اطلاعات، قانون نهفته در ورای این اطلاعات را استنتاج می کنند. شبکه های عصبی مصنوعی که در نیمه دوم قرن بیستم و اواخر دهه ۸۰ کاربرد همه جانبه یافتند، تکنیک های محاسباتی یادگیری هستند که به کمک آن ها می توان یک نگاشت خاص را تقریب زد یا داده های مختلفی را دسته بندی کرد [۱]. روش شبکه های عصبی نسبت به بسیاری از روش های معمولی آماری و قطعی برتری دارد. در مقایسه با مدل های رگرسیون خطی، این روش مقادیر پیش بینی را ملزم به فرارگیری در اطراف مقدار میانگین نکرده و به همین دلیل تغییرپذیری واقعی داده را حفظ می کند. معماری شبکه عصبی از تعداد زیادی پردازشگر ساده و مرتبط به هم بنام نرون تشکیل شده است و در ساختار آن از ساختمان مغز انسان الهام گرفته شده است. ساختار یک لایه با R ورودی و با S نرون در شکل (۱) نشان داده شده است [۳].

۱- Hydrodynamic Lubrication Analysis

شد [۶].

جلوگیری کرده و آن‌ها را جدا می‌کند تا میزان سایش کاهش یابد. در واقع لایه روغن با مقاومت در برابر حرکت، سطوح «اصطکاک داخلی» با ایجاد مقاومت برشی توسط گرانشی روغن باعث کم شدن سایش سطوح درگیر می‌شود که موجب ایجاد فشار در لایه روغن جداکننده می‌گردد.

گرانشی روغن یکی از مهمترین ویژگی‌های آن است که تمام خصوصیات دیگر روغن را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. گرانشی در اثر عواملی چون نوع روغن، تغییرات درجه حرارت و تغییر فشار، تغییر می‌کند. همواره مدل‌های تحلیلی برای مدل‌سازی روابط گرانشی با سایر متغیرهای وابسته به کار رفته است. روغن مورد استفاده در موتور EF7 از نوع SAE 10W40 ساخت شرکت بهران است. گرانشی دینامیکی آن از رابطه Vogel تبعیت می‌کند [۱ و ۲]. شکل (۲) نمای یاتاقان بوش برنزی چشم کوچک دسته‌سمبه و محور سمبه را نشان می‌دهد، محور سمبه و بوش به‌صورت یک یاتاقان کامل فرض می‌شود.



شکل ۲ شماتیک یاتاقان کوچک دسته‌سمبه موتور ملی EF7 طراحی شده در نرم‌افزار Pro/E

۳-۱ مدل‌سازی و تحلیل به کمک نرم‌افزار AVL EXCITE

سیستم روغن‌کاری موتور به‌صورت دو بعدی و برای ۴ سیلندر موتور در این نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه تک تک اجزا شامل سمبه، گژن‌پین، دسته‌سمبه، یاتاقان‌ها و میل‌لنگ مدل‌سازی شده و خواص جرمی و هندسی آن تعیین می‌گردد. ارتباط بین اجزا با اتصال دهنده‌هایی که در نرم‌افزار تعبیه شده است، برقرار می‌شود (شکل ۳). داده‌های تجربی فشار گاز برای ۴ حالت مختلف موتور ملی از لحاظ تنفس و سوخت به‌صورت فایل‌های متنی (*.txt) به نرم‌افزار معرفی می‌شود. گرانشی روغن نیز به یکی از دو روش مرسوم (وارد کردن مستقیم گرانشی یا استفاده از کتابخانه روغن نرم‌افزار) تعیین می‌گردد.

متغیرهای موثر بر تحلیل مانند لقی‌ها، بار فشار گاز و گرانشی دینامیک به‌صورت یک مورد (Case) به نرم‌افزار معرفی می‌شود. نتایج خروجی نرم‌افزار به‌صورت فایل‌های کد اسکریپت (*.CSV) وارد نرم‌افزار Excel شده و نمودارهای مورد نیاز استخراج شد.

یکی دیگر از کارهای تجربی در زمینه سایش و روغن‌کاری محور سمبه توسط شرکت FVV آلمان انجام شد. در این تحقیق به مدل‌سازی الاستوهیدرودینامیک لایه روغن موجود در محور سمبه و مدل‌سازی زبری سطح پین پرداخته شده و معادله رینولدز با در نظر گرفتن اثر اصطکاک و زبری سطح حل شده است. در این تحقیق از یک سیستم مجهز برای آزمون و اندازه‌گیری ضخامت لایه روغن، فشار هیدرودینامیک لایه روغن و زبری سطوح استفاده شد [۷].

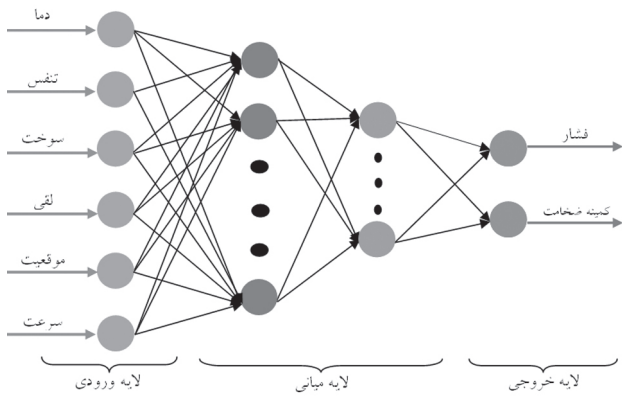
در داخل ایران نیز تحقیقاتی در زمینه تحلیل هیدرودینامیک و الاستوهیدرودینامیک یاتاقان انجام شده است، از جمله چمنی و کریمائی طی پژوهشی با استفاده از نرم‌افزارهای AVL Brike، AVL EXCITE، به مدل‌سازی الاستوهیدرودینامیک روغن‌کاری یاتاقان اصلی میل‌لنگ یک موتور دیزل سنگین در شرکت دسا پرداختند. همچنین آن‌ها با استفاده از روش Butencechon توزیع فشار لایه روغن را در یاتاقان میل‌لنگ به‌صورت کانتورهای رنگی ارائه کردند [۸].

جامع‌ترین تحقیق در زمینه شبیه‌سازی اتصال محور سمبه به چشم کوچک دسته‌سمبه موتور ملی و مطالعه روغن‌کاری آن، توسط کاظمی در شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو بر روی موتور ملی EF7 انجام شد. وی در تحقیق خود به تحلیل عددی معادله رینولدز پرداخته و جهت اعتبار سنجی آن یاتاقان را در نرم‌افزارهای AVL EC-ITE مدل‌سازی نمود. در این تحقیق اندرکنش سطوح نیز به روش تحلیلی و اجزای محدود مدل‌سازی شده است. همچنین با استفاده از شبکه‌های عصبی تأثیر متغیرهای مختلف بر فشار و ضخامت لایه روغن شبیه‌سازی شد [۱ و ۲].

۳-۲ روش پژوهش

در این تحقیق موتور ملی EF7 مورد بررسی قرار گرفته است. این موتور دارای چهار سیلندر بوده و همچنین امکان استفاده از سوخت بنزین و گاز طبیعی (CNG) را دارا می‌باشد. حجم این موتور ۱/۷ لیتر، دارای ۱۶ سوپاپ و مجهز به سامانه زمان‌بندی متغیر سوپاپ‌ها می‌باشد. در این تحقیق موتور در حالت سوخت گاز طبیعی و دارای توربوشارژر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این حالت، بیشینه فشار احتراق موتور را ۱۱ MPa در سرعت ۵۵۰۰ rpm نشان داد.

به منظور کم کردن اصطکاک و از بین بردن سایش، یک لایه نازک روغن بین محور سمبه و بوش برنجی چشم کوچک در موقع حرکت ایجاد می‌شود. این لایه نازک روغن از برخورد تماس فیزیکی دو سطح



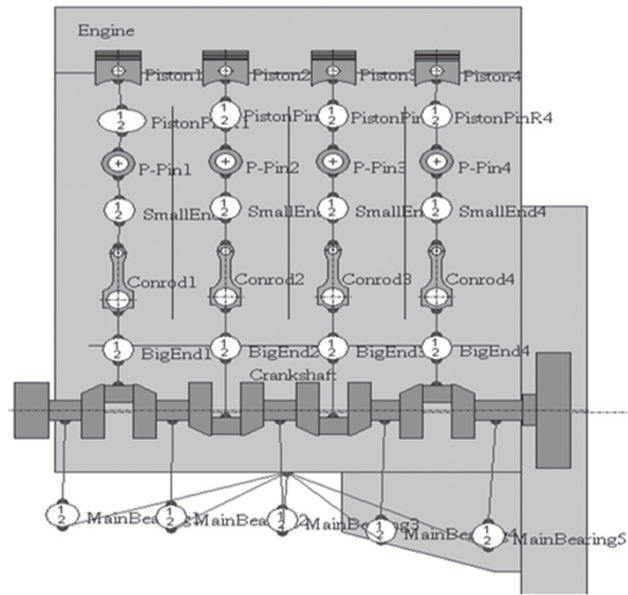
شکل ۴ ساختار عمومی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده

جدول ۱ محدوده و سطوح در نظر گرفته شده برای متغیرهای مستقل [۱]

عوامل مؤثر	کمینه	بیشینه	تعداد سطوح
دمای روغن (C°)	۲۰	۱۵۰	۱۴
تنفس موتور	طبیعی	پرخوران	۲
نوع سوخت	بنزین	CNG	۲
لقی (μm)	۵	۷	۳
موقعیت	پایین	بالا	۲
سرعت دورانی (rpm)	۱۵۰۰	۶۰۰۰	۱۰

ابتدا شبکه‌های مختلف با تعداد لایه‌های متفاوت برای این مدل سازی استفاده شد. ابعاد ماتریس ورودی و خروجی با توجه به شکل ۴ و جدول یک به ترتیب 6×3360 و 2×3360 است، که بعد از نرمال سازی به سه دسته الگو آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم بندی شد. ابعاد ماتریس‌ها برای سه دسته الگو ورودی آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب 6×2016 ، 6×1008 و 6×336 می باشد. این انتخاب بر اساس ۶۰٪ برای آموزش ۳۰٪ برای ارزیابی و مابقی برای آزمون می باشد انتخاب الگوها در این مرحله به صورت تصادفی انجام شده است.

تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر تعداد متغیرهای مستقل (۶ عدد) و تعداد نرون‌های خروجی برابر با تعداد متغیرهای وابسته (۲ عدد) می باشد. تعداد لایه‌ها و نرون‌های لایه میانی به روش سعی و خطا با در نظر گرفتن کمترین ریشه میانگین مربعات خطا MSE و بیشترین ضریب تبیین (R^2) تعیین می شود. با در نظر گرفتن متغیرهای فوق الذکر، بهترین توپولوژی شبکه نیز مشخص می شود.



شکل ۳ مدل سازی موتور در نرم افزار AVL EXCITE

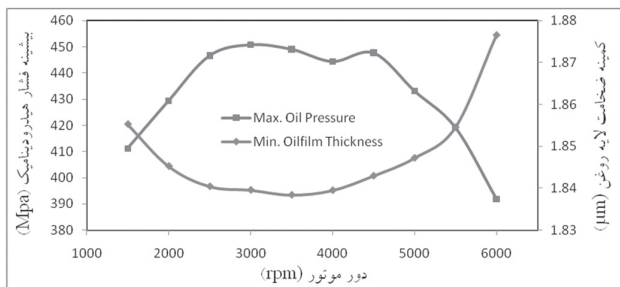
۳-۲- مدل سازی تحلیل هیدرودینامیک با استفاده از

شبکه عصبی

چون عامل‌های زیادی بر روی متغیرهای روغن کاری هیدرودینامیک لایه روغن یاتاقان چشم کوچک دسته سمبه تأثیر گذار هستند، از مدل های شبکه عصبی برای مدل سازی استفاده می شود.

هر شبکه عصبی از سه لایه ورودی، میانی یا مخفی و خروجی تشکیل شده است. تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر تعداد متغیرهای مستقل (دمای روغن، نوع تنفس، سوخت، لقی، موقعیت یاتاقان، سرعت دورانی میل لنگ) و تعداد نرون‌های خروجی برابر با تعداد متغیرهای وابسته (کمینه ضخامت و بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن) می باشد، جدول (۱) محدوده و سطوح عامل‌های مستقل را نشان می دهد. لایه مخفی می تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شود که تعداد نرون‌های هر لایه آن متغیر است و عموماً به روش سعی و خطا تعیین می شود. شماتیکی از ساختار شبکه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۴) نشان داده شده است.

بالایی یاتاقان موتور EF7 پرخوران در دمای $140^{\circ}C$ برای حالت سوخت CNG بر حسب سرعت دورانی موتور نشان داده شده است.



شکل ۶ بیشینه فشار و کمینه ضخامت لایه روغن در پوسته پایینی یاتاقان در دورهای مختلف موتور

آنچه که به عنوان حداقل ضخامت لایه روغن قلمداد می‌شود، حداقل ضخامت لایه روغن در کل پوسته یاتاقان در هر زاویه میل‌لنگ می‌باشد. کمینه ضخامت لایه روغن و بیشینه فشار در پوسته پایینی یاتاقان به علت اعمال بار از بالا به محور محور سمبه رخ می‌دهد. با افزایش سرعت دورانی موتور، کمینه ضخامت لایه روغن در پوسته بالایی یاتاقان کاهش می‌یابد و بالطبع بیشینه فشار، افزایش می‌یابد. به همین ترتیب در پوسته پایینی که بار اصلی یاتاقان را تحمل می‌کند، با افزایش دور موتور، بیشینه فشار ابتدا افزایش، و سپس کاهش می‌یابد. کمینه ضخامت لایه روغن نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. کمترین ضخامت لایه روغن در دور 3500 rpm به میزان $1/83 \mu m$ می‌باشد.

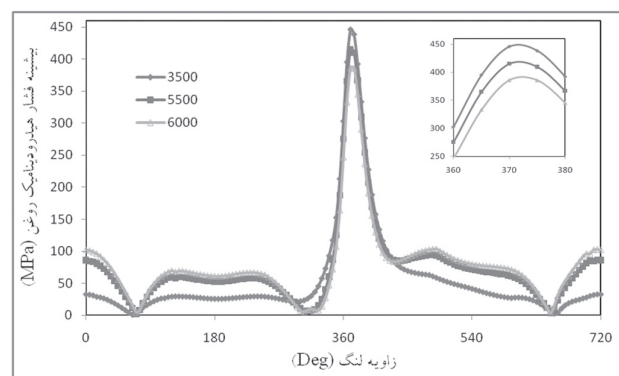
تأثیر فشار احتراق بر بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن در حالت‌های مختلف تنفس و سوخت موتور EF7 در شکل (۷) و در دمای کاری بیشینه $140^{\circ}C$ نشان داده شده است. پرواضح است که با افزایش فشار احتراق، فشار بیشینه هیدرودینامیک لایه روغن نیز افزایش می‌یابد، این به علت افزایش نیروی وارده به یاتاقان می‌باشد. در موتور EF7 پرخوران با سوخت CNG بیشترین فشار هیدرودینامیک در لایه روغن رخ می‌دهد.

در این پژوهش از شبکه‌های عصبی چند لایه (MLP) با قاعده یادگیری پس انتشار خطا روبه جلو (FFBP) استفاده شد. این نوع شبکه، ساده ولی در عین حال به علت دقت بالا، کاربرد زیادی دارد. از توابع آستانه مختلفی چون سیگموئیدی (logsig)، لگاریتمی (tansig) و خطی (purelin) و قاعده‌های آموزش همراه با نظارت، مانند قاعده -traim (لونبرگ-مارکوارت)، و traincsg و traingdx استفاده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شد تا بهترین ساختار برای پیش‌بینی متغیرهای روغن کاری موتور ملی تعیین شود.

۴- نتایج

۴-۱- نتایج مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار AVLEXCITE

نمودار فشار هیدرودینامیک لایه روغن در یک چرخه کاری موتور در دمای $140^{\circ}C$ برای موتور EF7 با سوخت CNG بر حسب درجه میل‌لنگ در سه سرعت دورانی موتور در شکل (۵) نشان داده شده است. بیشترین فشار هیدرودینامیک لایه روغن مربوط به دور 3500 rpm در لحظه بعد از احتراق به میزان $445/81 MPa$ می‌باشد. در این هنگام بیشترین بار به صورت ضربه‌ای به لایه روغن وارد شده، و آن را می‌فشارد. لازم به ذکر است، حل عددی (CFD) معادله رینولدز به روش اختلاف محدود نیز این میزان فشار و ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن را تأیید می‌کند [۱ و ۲].



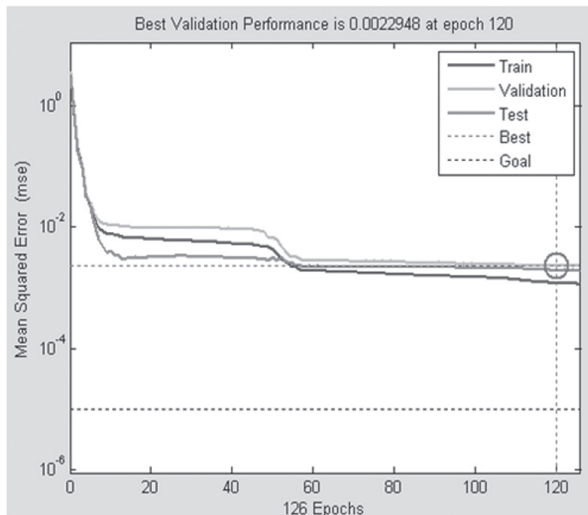
شکل ۵ پروفیل بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن در چرخه کاری در سه دور مختلف موتور در دمای $140^{\circ}C$

سایس در یاتاقان مرتبط با حداقل ضخامت لایه روغن می‌باشد. محل حداقل ضخامت لایه روغن بیان‌گر محل احتمالی رخداد سایس در سطح داخلی یاتاقان است. با توجه به موقعیت یاتاقان و جهت اعمال بار، ضخامت لایه روغن در نقاط مختلف پوسته یاتاقان متغیر است و معمولاً در پوسته بالایی، ضخامت لایه روغن زیاد و در قسمت پوسته پایینی کمتر است. در شکل (۶) ضخامت لایه روغن در یاتاقان چشم کوچک به ترتیب در پوسته

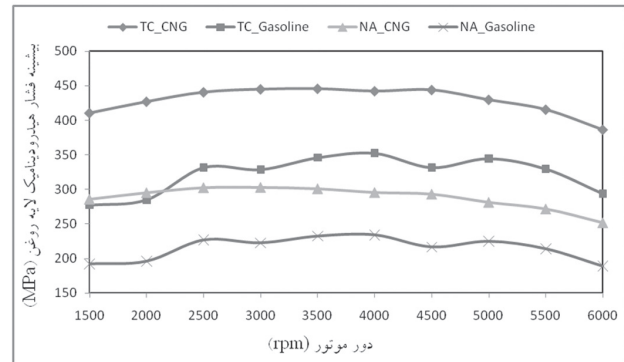
۴-۲- نتایج پیش‌بینی متغیرهای هیدرودینامیک با استفاده از شبکه عصبی

در جدول (۲) به‌طور خلاصه فهرستی از بهترین ساختار توپولوژی‌های شبکه عصبی، توابع آستانه و قاعده‌های مختلف به‌کار رفته برای تخمین بیشینه فشار و کمینه ضخامت لایه روغن آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد اکثر توپولوژی‌ها و توابع آستانه به‌کار گرفته شده دارای خطای آموزش و ارزیابی مناسب هستند. در واقع می‌توان ادعا کرد که برای شبیه‌سازی شرایط مختلف روغن‌کاری در موتور، شبکه‌های عصبی ابزار قدرتمندی هستند که دارای دقت بالا، هزینه و زمان کمی هستند. البته علت اصلی همگرایی شبکه عصبی، بزرگ بودن ماتریس الگوهای ورودی شبکه است.

از بین توپولوژی‌های مختلف در جدول (۲)، شبکه عصبی‌ای با ساختار ۲-۲۴-۳۰-۶ با توابع تحریک tansig، logsig و purelin و قاعده آموزش لونیگ-مارکواریت (trainlm) دارای کمترین خطا و بیشترین مقدار ضریب تبیین است. شکل (۹) منحنی آموزش (خطا) و شبکه را برای هر سه قسمت آموزش، ارزیابی و آزمون بهترین شبکه را نشان می‌دهد. خطای شبکه (MSE) برای این توپولوژی برای الگوهای آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب ۰/۰۰۱۳، ۰/۰۰۲۷ و ۰/۰۰۱۸ می‌باشد. این شبکه در ۱۲۰ تکرار در مدت ۸۵/۶ ثانیه با خطای یادگیری ۰/۰۰۲۲۹ همگرا می‌شود. تحلیل رگرسیونی نشان داد، ضریب تبیین (R^2) نیز برای الگوهای آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب ۰/۹۹۵۲، ۰/۹۹۸۸ و ۰/۹۹۶۵ می‌باشد.



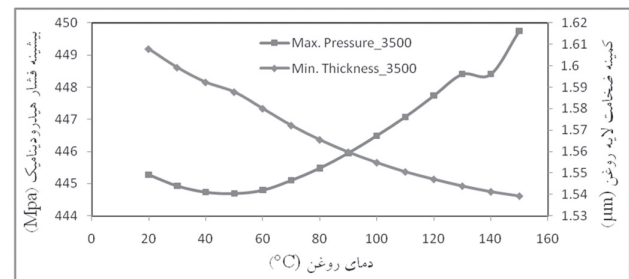
شکل ۹ منحنی آموزش شبکه (خطای آموزش)



شکل ۷ نمودار فشار هیدرودینامیک لایه روغن در دمای کاری $140^\circ C$ در دورهای مختلف موتور

افزایش دمای روغن سبب کاهش گرانیوی آن می‌شود. با کاهش گرانیوی روغن، فشار بیشینه لایه روغن در یاتاقان افزایش می‌یابد ولی تغییرات فوق در حل هیدرودینامیک تقریباً اندک می‌باشد. لازم به ذکر است که بیشینه فشار لایه روغن، در لحظه حداکثر نیروی احتراق رخ می‌دهد. پوسته یاتاقان و سازه اطراف آن در اثر بارگذاری تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای ندارند. با کاهش گرانیوی لایه روغن میزان بیشینه فشار روغن افزایش می‌یابد ولی این افزایش فشار وارده بر یاتاقان سبب افزایش تغییر شکل بیشتر بوش برنجی شده و در نتیجه باعث توزیع پیوسته و گسترده‌تر لایه روغن می‌شود.

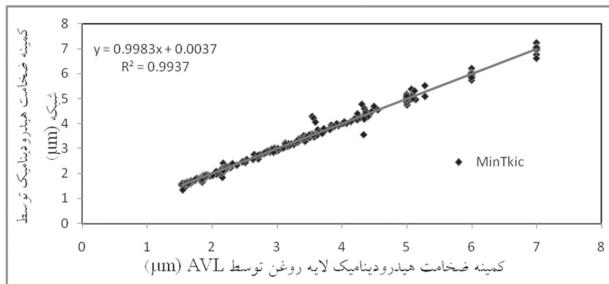
در شکل (۸) نمودار تغییرات حداکثر فشار و حداقل ضخامت لایه روغن در یاتاقان بر حسب دمای ورودی لایه روغن برای پوسته پایینی یاتاقان برای حالت سوخت CNG موتور EF7 پرخوران نشان داده شده است. کاهش گرانیوی روغن سبب کاهش حداقل ضخامت لایه روغن و بنابراین افزایش احتمال سایش در یاتاقان می‌گردد. کمترین ضخامت لایه روغن همواره در پوسته پایینی در دمای کاری $140^\circ C$ رخ می‌دهد.



شکل ۸ نمودار کمینه ضخامت و فشار بیشینه هیدرودینامیک لایه روغن در پوسته پایینی یاتاقان در دورهای مختلف موتور

جدول ۲ ساختارهای مختلف شبکه عصبی و مقایسه آن‌ها برای تعیین بهترین عملکرد شبکه

توابع آستانه	قاعده آموزش	تعداد نرون‌ها		خطای شبکه (MSE)			ضریب تبیین (R ²)			تکرار (epoch)	زمان شبیه سازی (Sec)
		لایه اول	لایه دوم	آموزش	ارزیابی	آزمون	آموزش	ارزیابی	آزمون		
Tan/Lin	trainlm	۲۸	۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۰۷	۰/۹۹۰۱	۳۴۹	۷۶/۷۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۰	۱۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۳۰	۰/۹۹۰۹	۵۳۹	۱۵۸/۱۷
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۵	۱۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۱۷	۰/۹۹۰۵	۱۴۷	۴۷/۱۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۱۲	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۴۱	۰/۰۰۸۳	۰/۹۹۳۶	۰/۹۸۸۳	۰/۹۹۰۴	۱۲۰	۵۴/۶۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۱۸	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۱۲	۰/۹۸۶۳	۰/۹۹۲۱	۱۴۳	۹۶/۵۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۸	۲۰	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۳۱	۰/۹۸۸۲	۰/۹۹۲۵	۳۰۳	۱۵۹/۰۵
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹۰۹	۰/۹۸۶۳	۰/۹۹۰۹	۱۴۲	۱۰۴/۳
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۲	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹۱۲	۰/۹۸۱۵	۰/۹۹۲۶	۳۲	۳۶/۰۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۸	۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۱۴	۰/۹۸۴۱	۰/۹۹۰۳	۲۷۶	۴۰۱/۳
Log/Tan/Lin	trainlm	۳۰	۲۴	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۶۵	۱۲۰	۸۵/۶
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۸	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۸۹	۰/۹۸۷۵	۰/۹۸۶۹	۰/۹۹۱۱	۳۰	۴۴/۳۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۳۰	۲۸	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹۴۴	۰/۹۸۰۸	۰/۹۹۳۳	۱۶۱	۳۰۱/۱۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۸	۳۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۱۷	۰/۹۸۷۹	۰/۹۹۰۱۱	۶۱	۷۰/۹۴



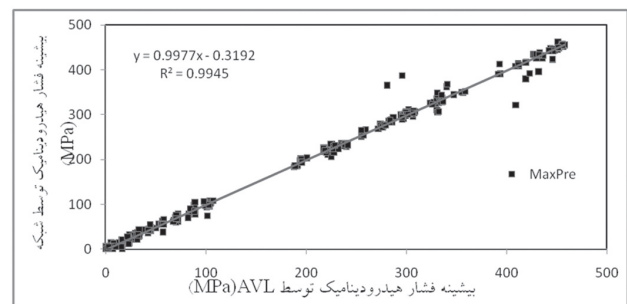
شکل ۱۱ مقایسه مقادیر خروجی نرم‌افزار AVL و نتایج پیش‌بینی شده برای کمیته ضخامت توسط شبکه عصبی

برای مقایسه نتایج AVL (داده‌های اصلی) با نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و پی‌بردن به کارایی شبکه در پیش‌بینی متغیرهای روغن کاری، خطای بین دو سری داده محاسبه و در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این شکل، فقط نتایج ۱۰ درصد الگوهای قسمت آزمون به کمک شبکه با ساختار ۲-۲۴-۳۰-۶ که قبلاً اشاره شد مقایسه و خطای آن محاسبه شده است. این شکل نشان می‌دهد بین داده‌های خروجی نرم‌افزار AVL و شبکه عصبی تطابق خوبی وجود دارد و میزان خطا در اکثر الگوها تقریباً نزدیک به صفر است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه عصبی با نتایج حاصل از نرم‌افزار AVL نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی شرایط مختلف روغن کاری در موتور هستند.

۴-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه عصبی و نرم‌افزار

AVL

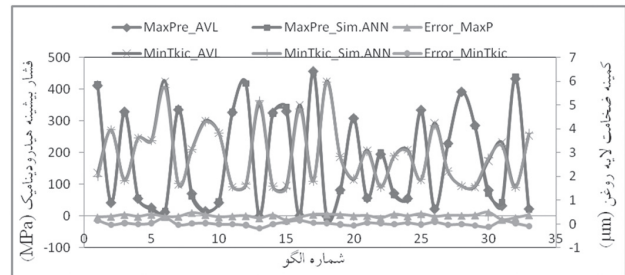
به منظور مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار AVL و نتایج شبکه عصبی، برازش خطی (رگرسیون) بین متغیرهای وابسته روغن کاری هیدرودینامیک انجام شده است. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) تحلیل رگرسیونی را به ترتیب برای راستی‌آزمایی متغیرهای بیشینه فشار و کمیته ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن نشان می‌دهند. (این نمودار تنها با در نظر گرفتن ۱۰ درصد داده‌های الگوی آزمون رسم شده است). مقدار ضریب تبیین (R²) برای بیشینه فشار و کمیته ضخامت به ترتیب برابر با ۰/۹۹۴۵ و ۰/۹۹۳۷ و میانگین مربعات خطا برای این متغیرها نیز، ناچیز است.



شکل ۱۰ مقایسه مقادیر خروجی نرم‌افزار AVL و نتایج پیش‌بینی شده برای بیشینه فشار توسط شبکه عصبی

References

1. Kazemi, M., "Analysis and Evaluation Stress, Estimation of Life Cycle Fatigue and Oil Film Hydrodynamic Analysis of Gudgeon Pin EF7 Engine", *Master Science Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. 2011*
2. Kazemi, M., "Contact Surface and Hydrodynamic Oil Film Lubrication Analysis in Bush and Gudgeon Pin Bearing Assembly at EF7 Engine". *Master Science Seminar, Tarbiat M,odares University, Tehran, Iran. 2011*
3. Alborzi, M., "Introduction with neural networks", *Sharif University of Technology Publications. 2005.*
4. Suhara, T., Ato, S., Takiguchi, M. and Furuhashi, S.; "Friction and Lubrication Characteristics of Piston Pin Bearing of Automotive Engine," *SAE TECHNICAL PAPER SERIES 970840, 1997.*
5. Zhang, C., Cheng, H. S., Liangheng, Q., Knipstien, K. W. and Bolyard, J.; "Scuffing Behavior of Piston-Pin/Bore Bearing in Mixed Lubrication, Part I: Experimental Studies, *Tribology Transaction*", Vol. 46. Pp 193-199, 2003.
6. Mihara, Y., Sekine, K. and Someya, T., "Study on the Development of a Thin-Film Sensor for Measuring oil-Film Pressure in Engine Bearing and Piston Pin-Boss", *Tribological Research and Design for Engineering Systems, 2003.*
7. Knoll, G., Bargond, M., Lang, J., Philipp, U. and Lazara, M.; "Kolbenbolzen im Mischreibungskontakt Elastohydrodynamische Simulationstheorie für die lagerungsanalyse". *MTZ 04/2009 jahrgang 70. www. MTZ-online.de, 2009.*
8. Chamani, H. and Karimani, H., "Studies of Parameters of Film Lubrication analysis in big end bearing of heavy diesel engine by Elastohydrodynamic Analysis". *6th International Conference on Internal combustion engines, Tehran. 2010.*



شکل ۱۲ مقایسه نتایج AVL (داده‌های اصلی) با نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی برای ۱۰ درصد الگوهای قسمت آزمون

۵- نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار AVL EXCITE 5.1 نشان می‌دهد که بیشترین فشار و کمترین ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن در دور ۳۵۰۰ rpm در زاویه لنگ ۳۷۳° (لحظه احتراق) در موتور EF7 پرخوران (TC) با سوخت CNG به ترتیب ۴۴۶ MPa و ۱/۸۳ μm در دمای کاری ۱۴۰ C° رخ می‌دهد، که احتمال سایش یا تاقان در این شرایط کاری وجود دارد. بهترین توپولوژی شبکه عصبی FFBP برای پیش‌بینی متغیرهای روغن کاری بیشینه فشار و کمینه ضخامت، ساختار ۲-۳۴-۶ با قاعده آموزش trainlm و توابع آستانه logsig، tansig و pureline است. این شبکه در ۱۲۰ تکرار و در مدت زمان ۸۵/۶ ثانیه با خطای یادگیری ۰/۰۰۲۲۹ همگرا می‌شود. خطای شبکه (MSE) برای این توپولوژی برای الگوهای آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب ۰/۰۰۱۳، ۰/۰۰۲۷ و ۰/۰۰۱۸ است. ضریب تبیین (R²) نیز برای الگوهای آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب ۰/۹۹۵۲، ۰/۹۹۸۸ و ۰/۹۹۶۵ است. نتایج حاصل از شبکه عصبی با نتایج حاصل از نرم‌افزار AVL مقایسه و مشاهده شد که نتایج حاصل بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (IPCO). جهت همکاری در انجام این تحقیق اعلام می‌دارند. همچنین از همکاری آقایان مهندس رضا سلطانی و حیدر آهنگری که اطلاعات ارزشمندی در اختیار نویسندگان قرار دادند کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.