

# 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 هنجین\*

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

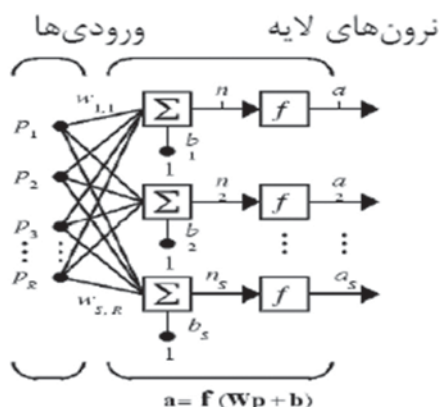
برای کاهش سایش در مجموعه محور سمبه، بوش و باس سمبه روغن کاری انجام می‌شود. روغن مورد استفاده در موتور ملی از نوع 10W40 با گراندرومی دینامیکی 5/5 mPa.s در دمای کاری 140 درجه سلیسیوس است. به منظور تحلیل هیدرودینامیک لایه روغن در چشم کوچک دسته‌سمبه، مدل واقعی موتور با در نظر گرفتن چهار سیلندر در نرم‌افزار AVL EXCITE 5.1 شبیه‌سازی شد. در این نرم‌افزار تأثیر شش عامل دمای روغن، نوع تنفس، نوع سوخت، مقدار لقی بین محور سمبه و بوش 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 372° (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.

## 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 دسته‌سمبه، 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 می‌دهد. این روغن از طریق تراوشات روغن توسط پاشنده‌هایی که در قسمت زیرین سمبه قرار دارد تامین می‌شود [۱ و ۲]. محور سمبه موتور ملی EF7 به‌صورت 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 دسته‌سمبه به سمبه و انتقال نیرو را بر عهده دارد. نرم‌افزار AVL EXCITE یک نرم‌افزار قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل اجزای موتور می‌باشد، که توسط شرکت AVL Shireck توسعه داده شده است. این نرم‌افزار به‌طور گسترده در مراکز تحقیقاتی موتور استفاده می‌شود. محیط‌های مختلف این نرم‌افزار جهت تحلیل دینامیکی مکانیزم لنگ، تحلیل احتراق، تحلیل اصطکاک جداره سیلندر و حلقه سمبه و تحلیل هیدرودینامیک روغن کاری (HLA) یاتاقان‌ها بکار می‌رود.

در سالیان اخیر سیستم‌های هوشمند به‌طور فزاینده‌ای برای مسایلی که راه حل مشخصی ندارند مورد توجه واقع شده، که شبکه‌های عصبی مصنوعی از این مجموعه می‌باشند که با پردازش اطلاعات، قانون نهفته در ورای این اطلاعات را استنتاج می‌کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی که در نیمه دوم قرن بیستم و اواخر دهه ۸۰ کاربرد همه جانبه یافتند، تکنیک‌های محاسباتی یادگیری هستند که به کمک آن‌ها می‌توان یک نگاشت خاص را تقریب زد یا داده‌های مختلفی را دسته‌بندی کرد [۱]. روش شبکه‌های عصبی نسبت به بسیاری از روش‌های معمولی آماری و قطعی برتری دارد. در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی، این روش مقادیر پیش‌بینی را ملزم به قرارگیری در اطراف مقدار میانگین نکرده و به همین دلیل تغییرپذیری واقعی داده را حفظ می‌کند. 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].



شکل ۱ ساختار شبکه تک لایه [۳]

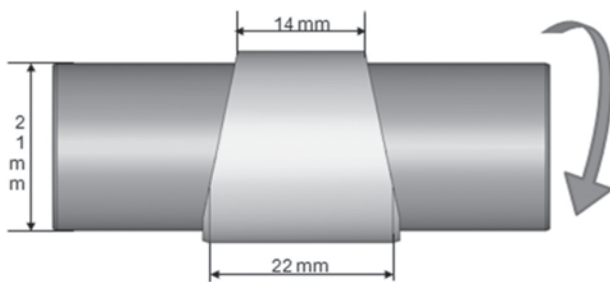
از آنجائی که عوامل زیادی بر روی متغیرهای روغن کاری هیدرودینامیک لایه روغن یاتاقان چشم کوچک دسته‌سمبه تأثیر دارند از مدل‌های شبکه عصبی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از روش شبکه عصبی در این تحقیق، به دلیل صحت‌گذاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی یاتاقان در نرم‌افزار AVL EXCITE بوده 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 اندازه‌گیری اصطکاک در باس سمبه بهره بردند. پژوهش آن‌ها بر روی چهار نمونه محور سمبه با اندازه، زبری و لقی‌های مختلف بوده است [۴]. Zhang و همکاران در تحقیقی جامع به مطالعه رفتار سایشی بین یاتاقان همراه با روغن کاری به‌صورت تجربی پرداختند. در این پژوهش آن‌ها از آزمایشی استفاده کردند که در آن محور سمبه با سرعت مشخص سینوسی در حال چرخیدن بوده و از طریق سیستم رایانه‌ای داده برداری اطلاعات مربوط به ضریب اصطکاک، بارهای عمودی وارد به یاتاقان را ثبت کردند [۵]. اندازه‌گیری تجربی فشار هیدرودینامیک و ضخامت لایه روغن به‌طور آزمایشگاهی توسط Mihara در دانشگاه توکیو ژاپن انجام شده است. در این پژوهش حسگری برای اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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) اندازه‌گیری

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 روغن کاری موتور به‌صورت دو بعدی و برای ۴ سیلندر موتور در این نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه تک تک اجزا شامل سمبه، گژن‌بین، 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 اسکی (\*.CSV) وارد نرم افزار Excel شده و نمودارهای مورد نیاز استخراج شد.

یکی دیگر از کارهای تجربی در زمینه سایش و روغن کاری محور سمبه توسط شرکت FVV آلمان انجام شد. در این تحقیق به مدل‌سازی الاستوهیدرودینامیک لایه روغن موجود در محور سمبه و مدل‌سازی زبری سطح بین 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].

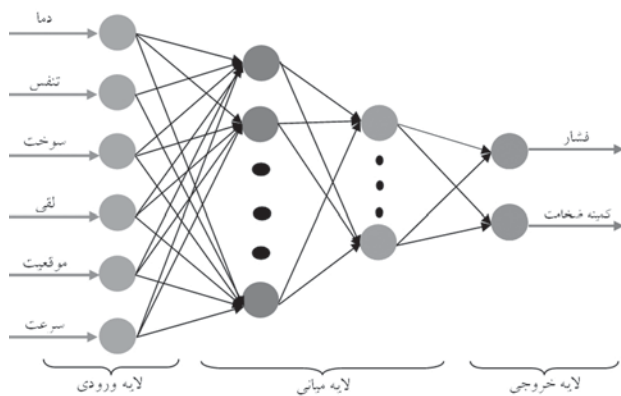
در داخل ایران نیز تحقیقاتی در زمینه تحلیل هیدرودینامیک و الاستوهیدرودینامیک یاتاقان انجام شده است، از جمله چمنی و کریمائی طی پژوهشی با استفاده از نرم‌افزارهای AVL Brike، AVL EXCITE، به مدل‌سازی الاستوهیدرودینامیک روغن کاری یاتاقان اصلی میل‌لنگ یک موتور دیزل سنگین در شرکت دسا پرداختند. همچنین آن‌ها با 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 روغن کاری 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



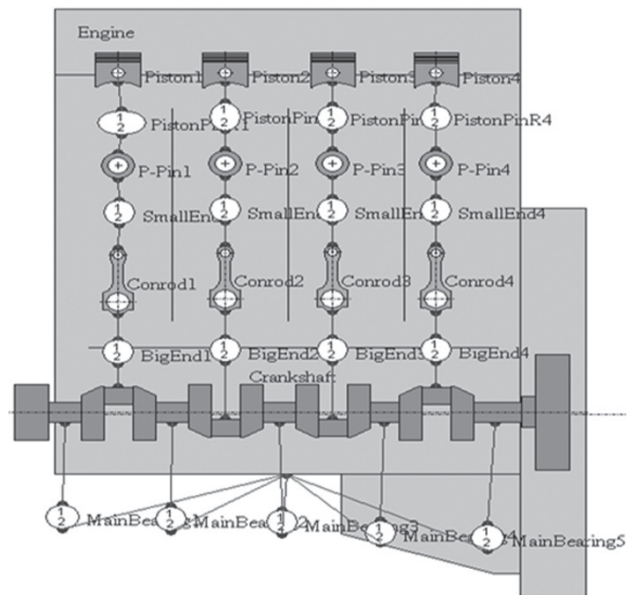
شکل ۴ ساختار عمومی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده

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 مدل‌سازی استفاده شد. ابعاد ماتریس ورودی و خروجی با توجه به شکل ۴ و جدول یک به ترتیب  $6 \times 3360$  و  $2 \times 3360$  است، که بعد از نرمال‌سازی به سه دسته الگو آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم‌بندی شد. ابعاد ماتریس‌ها برای سه دسته الگو ورودی آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب  $6 \times 2016$ ،  $6 \times 1008$  و  $6 \times 336$  می‌باشد. این انتخاب بر اساس ۶۰٪ برای آموزش ۳۰٪ برای ارزیابی و مابقی برای آزمون می‌باشد 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) می‌باشد. 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 می‌شود. با در نظر گرفتن متغیرهای فوق‌الذکر، بهترین توپولوژی شبکه نیز مشخص می‌شود.



شکل ۳ مدل‌سازی موتور در نرم‌افزار AVL EXCITE

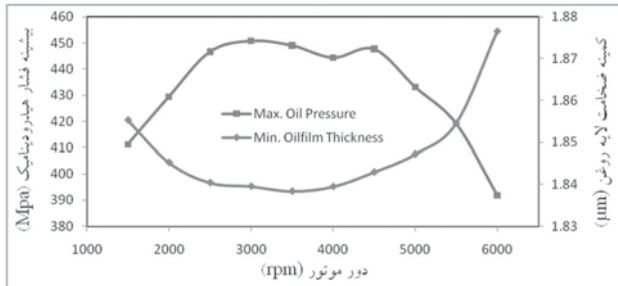
### ۳-۲- مدل‌سازی تحلیل هیدرودینامیک با استفاده از

#### شبکه عصبی

چون عامل‌های زیادی بر روی متغیرهای روغن کاری هیدرودینامیک لایه روغن یاتاقان چشم کوچک دسته‌سمبه تأثیر گذار هستند، از مدل‌های شبکه عصبی برای مدل‌سازی استفاده می‌شود.

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 میل‌لنگ) و تعداد نرون‌های خروجی برابر با تعداد متغیرهای وابسته (کمینه ضخامت و بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن) می‌باشد، جدول (۱) محدوده و سطوح عامل‌های مستقل را نشان می‌دهد. لایه مخفی می‌تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شود که تعداد نرون‌های هر لایه آن متغیر است و عموماً به روش سعی و خطا تعیین می‌شود. شماتیکی از ساختار شبکه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۴) نشان داده شده است.

بالایی یاتاقان موتور EF7 پرخوران در دمای  $140^{\circ}\text{C}$  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  $1/83 \mu\text{m}$  می‌باشد.

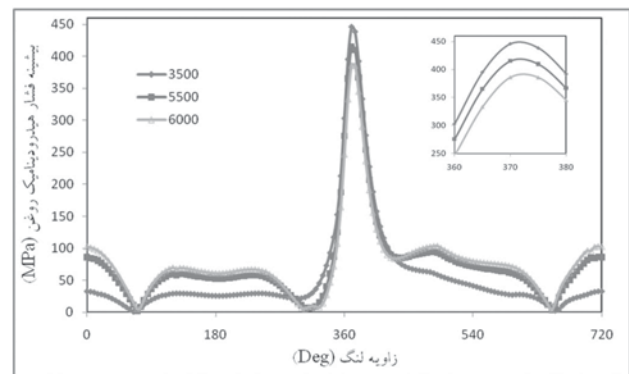
تأثیر فشار احتراق بر بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن در حالت‌های مختلف تنفس و سوخت موتور EF7 در شکل (۷) و در دمای کاری بیشینه  $140^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. پرواضح است که با افزایش فشار احتراق، فشار بیشینه هیدرودینامیک لایه روغن نیز افزایش می‌یابد، این به علت افزایش نیروی وارده به یاتاقان 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  $140^{\circ}\text{C}$  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  $445/81 \text{ MPa}$  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].



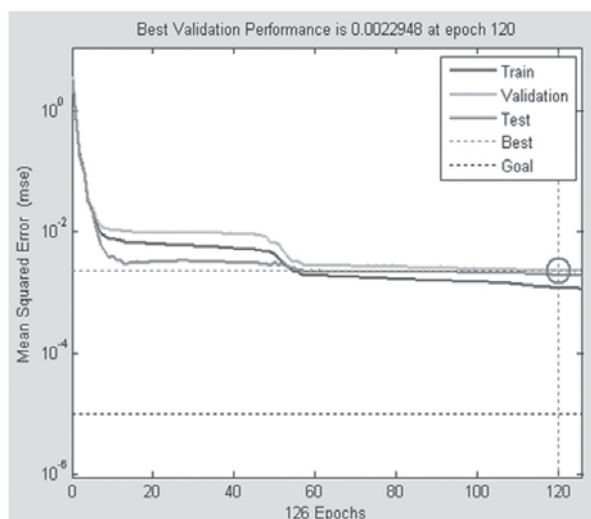
شکل ۵ پروفیل بیشینه فشار هیدرودینامیک لایه روغن در چرخه کاری در سه دور مختلف موتور در دمای  $140^{\circ}\text{C}$

سایش در یاتاقان مرتبط با حداقل ضخامت لایه روغن می‌باشد. محل حداقل ضخامت لایه روغن بیان‌گر محل احتمالی رخداد سایش 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

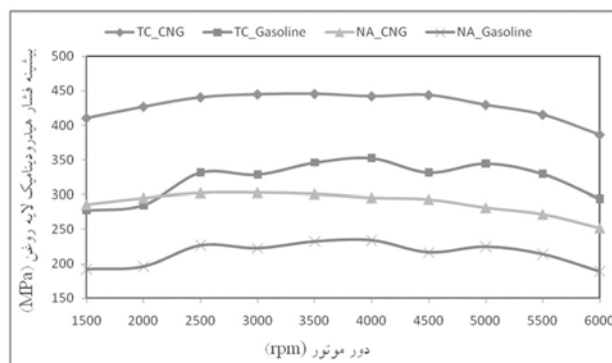
## ۴-۲- نتایج پیش‌بینی متغیرهای هیدرودینامیک با استفاده از شبکه عصبی

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 با توابع تحریک tansig، logsig و purelin و قاعده آموزش لونیگ-مارکوارت (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.



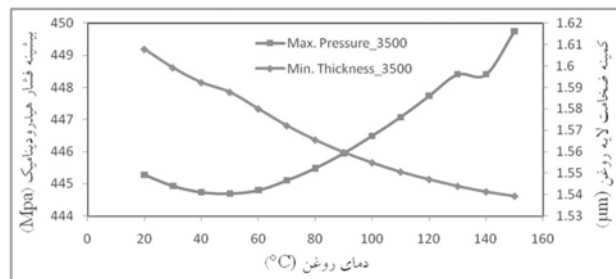
شکل ۹ منحنی آموزش شبکه (خطای آموزش)



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.

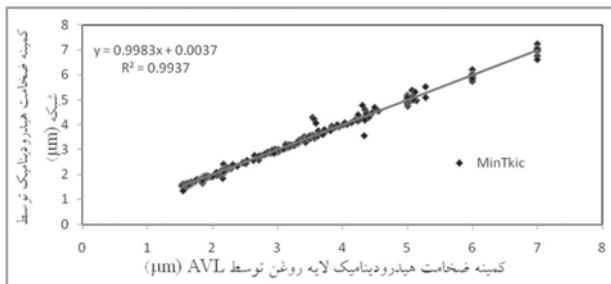
در شکل (۸) نمودار تغییرات حداکثر فشار و حداقل ضخامت لایه روغن در یاتاقان بر حسب دمای ورودی لایه روغن برای پوسته پایینی یاتاقان برای حالت سوخت CNG موتور EF7 پرخوران نشان داده شده است. کاهش گرانیوی روغن سبب کاهش حداقل ضخامت لایه روغن و بنابراین افزایش احتمال سایش در یاتاقان می‌گردد. کمترین ضخامت لایه روغن 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 <sup>2</sup> )		تکرار (epoch)	زمان شبیه سازی (Sec)
		لایه اول	لایه دوم	آموزش ارزیابی	آموزش	ارزیابی	آموزش	ارزیابی		
Tan/Lin	trainlm	۲۸	۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۰۷	۰/۹۹۰۱	۷۶/۷۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۰	۱۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۳۰	۰/۹۹۰۹	۱۵۸/۱۷
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۵	۱۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۱۷	۰/۹۹۰۵	۴۷/۱۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۱۲	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۴۱	۰/۰۰۸۳	۰/۹۹۳۶	۰/۹۸۸۳	۰/۹۹۰۴	۵۴/۶۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۱۸	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹۱۲	۰/۹۸۶۳	۰/۹۹۲۱	۹۶/۵۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۸	۲۰	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۳۱	۰/۹۸۸۲	۰/۹۹۲۵	۱۵۹/۰۵
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹۰۹	۰/۹۸۶۳	۰/۹۹۰۹	۱۰۴/۳
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۲	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۰۷	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹۱۲	۰/۹۸۱۵	۰/۹۹۲۶	۳۶/۰۸
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۸	۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹۱۴	۰/۹۸۴۱	۰/۹۹۰۳	۴۰/۱۳
Log/Tan/Lin	trainlm	۳۰	۲۴	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۶۵	۸۵/۶
Log/Tan/Lin	trainlm	۲۲	۲۸	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۸۹	۰/۹۸۷۵	۰/۹۸۶۹	۰/۹۹۱۱	۴۴/۳۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۳۰	۲۸	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹۴۴	۰/۹۸۰۸	۰/۹۹۳۳	۳۰/۱/۱۱
Log/Tan/Lin	trainlm	۱۸	۳۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۱۷	۰/۹۸۷۹	۰/۹۹۰۱۱	۷۰/۹۴



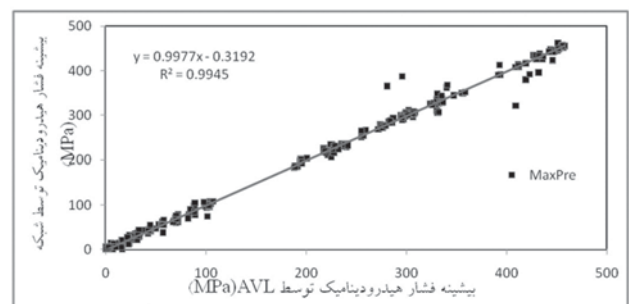
شکل ۱۱ مقایسه مقادیر خروجی نرم‌افزار AVL و نتایج پیش‌بینی شده برای کمیته ضخامت توسط شبکه عصبی

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.

### ۳-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه عصبی و نرم‌افزار

AVL

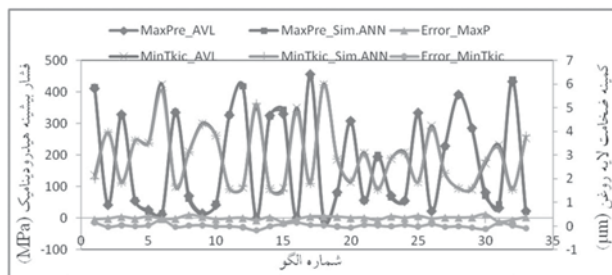
به منظور مقایسه نتایج خروجی نرم‌افزار AVL و نتایج شبکه عصبی، برازش خطی (رگرسیون) بین متغیرهای وابسته روغن کاری هیدرودینامیک انجام شده است. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) تحلیل رگرسیونی را به ترتیب برای راستی‌آزمایی متغیرهای بیشینه فشار و کمیته ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن نشان می‌دهند. (این نمودار تنها با در نظر گرفتن ۱۰ درصد داده‌های الگوی آزمون رسم شده است). مقدار ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) 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 Modares 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". *6<sup>th</sup> 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- نتیجه‌گیری

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 ۲-۳۰-۲۴-۶ 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 (R<sup>2</sup>) 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.

# Prediction Oil Parameter of Connecting Rod Small End Bearing of EF7 Engine by Using Artificial Neural Network by Simulation in AVL Excite Software

## M. Kazemi

Graduated of Master Science  
Tarbiat Modares University  
mohammad.kazemi@yahoo.com

## S. Alizadenia

Graduated of Master Science  
Irankhodro Power Train (I.P.Co)  
s\_alizadehnia@ip-co.com

## T. Tavakoli Hashjin\*

Professor  
Tarbiat Modares University  
ttavakol@modares.ac.ir

## Gh. Najafi

Assistance Professor  
Tarbiat Modares University  
g.najafi@modares.ac.ir

\*Corresponding Authors

Received: Mar. 02.2011

Accepted in Revised Form: May. 31.2011

## Abstract

In order to reduce wear in gudgeon pin, bush and piston boss lubrication is done. Oil used in national engine species was 10W40 with dynamic viscosity 5.5 mPa.s at 140 °C (the working temperature). In order to complete investigation the oil film hydrodynamics analysis in small end of connecting rod, a real full model engine with four cylinders has been simulated by AVL EXCITE5.1 software. In this software, effect of 6 variables consist of; oil temperature, kind of intake, kind of fuel, tolerance bearings between gudgeon pin and bronze bush, position of bearing and engine speed on maximum pressure and minimum thickness of film were investigated, and each curves of them has been extracted. The effect of six inputs (oil temperature, intake type, fuel type, tolerance, bearing position, and engine rotation speed) on the lubrication parameters was simulated for four different modes of national engine EF7 by neural networks.

The results of AVL EXCITE simulation show that Maximum hydrodynamics pressure of oil film occurs at 3500 rpm in 372° crank angle (combustion moment) in turbocharged engine EF7 with CNG fuel was 446 MPa and 1.83 μm respectively at 140°C working temperature of oil. At same condition, minimum hydrodynamics of oil thickness was 1.83 μm, which bearing wear was the possibility. The best neural network FFBP topology for the prediction lubrication parameters (maximum pressure and minimum thickness) was 6-24-30-2 structure with learning algorithm trainlm and functions threshold logsig, tansig and is pureline.

*Keywords: TC EF7 Engine, Connecting Rod Small End, Gudgeon Pin, Hydrodynamic Lubrication, Tolerance, Artificial Neural Network.*