

بنام خداوند، مستی بخش.



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده کشاورزی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی

تحلیل و ارزیابی تنش، تخمین عمر خستگی و تحلیل هیدرودینامیک لایه  
روغن گژن پین موتور ملی EF7

نگارش:

محمد کاظمی

استاد راهنما:

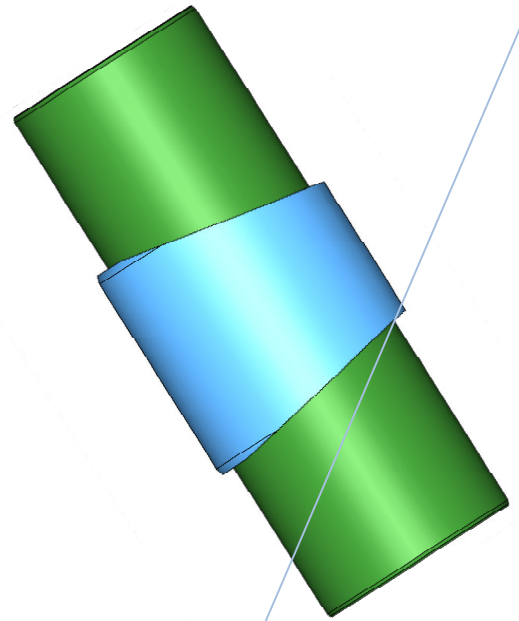
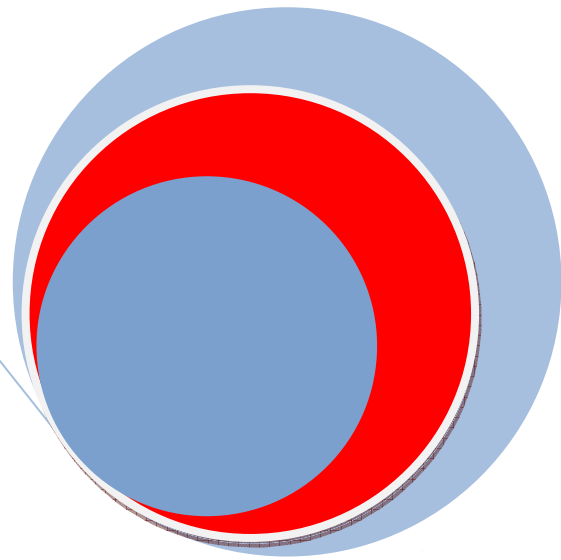
دکتر تیمور توکلی هاشجین

استاد مشاور:

مهندس سیامک علیزاده نیا

(تحت حمایت مادی و معنوی شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو. IP.Co.))

شهریور ۱۳۸۹

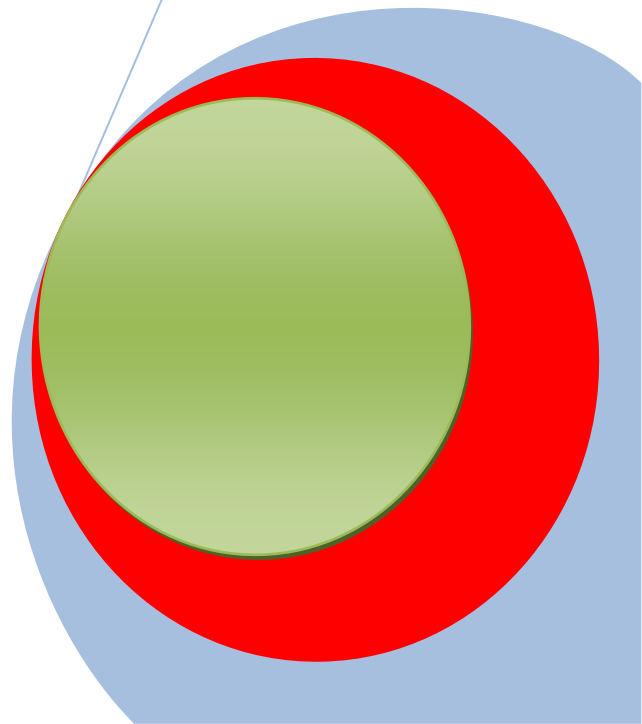


**تحليل و اذريابی تنش، تخمين عمر  
خستگی و تحليل هيدروديناميك  
لايه روغن در گژن پين موتور EF7**

Analysis and Evaluation Stress, Estimation of  
Life Cycle Fatigue and Oil Film Hydrodynamic  
Analysis of Gudgeon Pin EF7 Engine

**By : Mohammad Kazemi**

**Sep 2010**





### بسمه تعالی

اعضای هیأت داوران نسخه نهایی پایان نامه آقای محمد کاظمی تحت عنوان: «تحلیل و ارزیابی تنش، تخمین عمر خستگی و تحلیل هیدرودینامیک لایه روغن در گزن پین موتور ملی EF7» را از نظر شکل (فرم) و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد پیشنهاد می کنند.

این پایان نامه به ارزش ۶ واحد در تاریخ ۱۳۸۹/۶/۱ ارائه شد.

ردیف	اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
۱	استاد راهنما	تیمور توکلی هشتجین	استاد	
۲	استاد مشاور	سیامک علیزاده نیا	مربی	
۳	نماینده تحصیلات تکمیلی	غلامحسن نجفی	استادیار	
۴	استاد ناظر داخلی	غلامحسن نجفی	استادیار	
۵	استاد ناظر خارجی	غلامحسین رحیمی شعرباف	دانشیار	



بسمه تعالی

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت های علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

**ماده ۱** در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به دفتر نشر آثار علمی دانشگاه اطلاع دهد.

**ماده ۲** در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

” کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مکانیک ماشین های کشاورزی است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر تیمور توکلی هشتجین مشاوره جناب آقای مهندس سیامک علیزاده نیا از آن دفاع شده است“

**ماده ۳** به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به دفتر نشر آثار علمی دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

**ماده ۴** در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

**ماده ۵** دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند، به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

**ماده ۶** اینجانب **محمد کاظمی** دانشجوی رشته مکانیک ماشین های کشاورزی مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

محمد کاظمی

۱۳۸۹/۶/۱



## دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه

### تربیت مدرس

**مقدمه :** با عنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان ها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح در مورد نتایج پژوهش های علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرح های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها، رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.**

**ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند.**

**تبصره :** در مقالاتی که پس از دانش آموختگی به صورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه و رساله منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

**ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه، رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و براساس آیین نامه های مصوب انجام شود.**

**ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه، رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.**

**ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.**

آری شود و یک به خون جگر شود

کویزندگ لعل شود در مقام صبر

تقدیم به

پدر و مادرم

که بعد از خدا هر چه دارم  
از آنهاست

.... و تمامی جویندگان واقعی علم



## مشکر و قدرانی

تایش و سپاس، خالق هستی را سزا است که علم را بایه مهابت قرار داد و بر این بنده کمترین، منت گذارده و همواره هادی و راهنمایم بوده است. اکنون که به لطف و یاری خداوند متعال، مراحل نگارش و تدوین تحقیق به اتمام رسیده است لازم می دانم مراتب امتنان و قدردانی فراوان خویش را تقدیم سرورانی نمایم که اراده پامان نامه حاضر مرمون مساعدت های بی شائبه آنان بوده است. درجه اول سپاس گذار خانواده محترم، هستم که تا این مرحله از زندگی ام همواره مشوق بنده بوده اند. از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر تیمور توکلی، شبحین که بزرگوارانه و دلسوزانه با مساعدت های بی دریغ خویش راه گشای انجام تحقیق شدند، کمال مشکر و قدردانی را دارم. از جناب آقایان مهندس سیامک علینزاده نیا و مهندس حیدر آهنگری که مشاوره اینجناب را بر عهده داشتند و در طول انجام پروژه با نظرات ارزشمند خود اینجناب را بهره مند ساختند، و در این مدت علاوه بر یک همکار، دوست واقعی، نیز معلم اخلاق بودند، مشکر فراوان دارم. از استادان محترم ناظر پامان نامه جناب آقای دکتر غلامحسن نجفی و جناب آقای دکتر غلامحسین رحیمی شهرباف که زحمت مطالعه پامان نامه را عهده دار بودند و بار راهنمایی ها و نظرات سازنده باعث غنی تر شدن پژوهش حاضر گردیدند نهایت قدردانی را می نمایم.

جادار که مراتب مشکر خود را از مرکز تحقیقات موتور ایران خورد و شرکت ایپکو (I.P.Co) که حمایت مالی و معنوی از این پامان نامه را داشتند و تمام هزینه های آنرا تقبل کردند، اعلام دارم. بر خود لازم می دانم که از مهندسان و همکاران محترم در واحد محاسبات مهندسی (CAE) شرکت ایپکو جناب آقای مهندس احمدی، مهندس سلطانی، مهندس زاهدی، مهندس رضایی، و مسئولین محترم اداره پژوهش مهندس علینزاده، مهندس اسدزاده، آقای راه چینی و نیز از سایر دوستان عزیز کمال مشکر و قدردانی را داشته باشم.

در پامان توفیق یکایک این عزیزان در مراحل مختلف زندگی را از خداوند ننان خواهانم.





## چکیده:

مجموعه انتهایی چشم کوچک شاتون، بوش برنزی، باس پیستون و گژن‌پین از جمله قطعات حساس درون موتور هستند که در شرایط کاری سخت و دمای بالا قرار دارد. در تحقیق حاضر به مطالعه جامع تحلیل تنش، خستگی و هیدرودینامیک روغن‌کاری و سطوح تماسی در مجموعه انتهایی کوچک شاتون، باس پیستون، گژن‌پین و بوش برنزی موتور ملی EF7 پرداخته شد. برای هر تحلیل بیش از سه روش ارائه شد، آزمون تجربی کرنش‌سنجی و آزمون دوام جهت صحت‌گذاری نتایج تحلیل تنش و تحلیل خستگی انجام شد، از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی پارامترهای روغن‌کاری حالات مختلف موتور استفاده شد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بیشترین نیروی عمودی ( $F_y$ ) وارده به گژن‌پین در دور 4000 rpm به میزان 42373 N در لحظه احتراق می‌باشد، که نرم‌افزار AVL EXCITE آن را نیز تایید و صحت‌گذاری می‌کند. بیشترین تنش و تغییر شکل بیضوی شدن به روش تحلیلی به ترتیب 412 MPa و 0/00147 mm در دور 4000 rpm موتور ملی پرخوران در لحظه احتراق رخ می‌دهد. بیشترین فشار سطوح تماسی به مقدار 45/42 MPa است، که این مقدار دقیقاً به روش اجزای محدود نیز بدست آمد. بیشترین تنش فونمیسز به روش اجزای محدود به میزان 418 در مرکز گژن‌پین بعد از احتراق در گره 453 از المان 1444 در دور 4000 rpm رخ می‌دهد. اندازه‌گیری تجربی تنش تبعیت خوبی با نتایج مدل اجزای محدود را نشان داد. آن چنان که حداکثر اختلاف بین نتایج تحلیل اجزای محدود تنش، به روش CAE و روش تجربی کرنش‌سنجی در دو المان شماره 2522 و 212 بیش از 3/5٪ مشاهده نشد.

گره 1110 بحرانی‌ترین وضعیت به لحاظ تحلیل خستگی دارد. بیشترین آسیب خستگی به روش شمارش جریان باران و کمترین ضریب اطمینان خستگی در این گره به ترتیب به میزان  $10^{-10} \times 1/76$  و 2/84 در دور 4000 rpm به روش فونمیسز استفاده شده در نرم‌افزار FEMFAT می‌باشد، که با نتایج کد نویسی در نرم‌افزار Matlab نیز تطابق دارد. نتایج آزمون دوام 800 ساعته گژن‌پین، نحوه سایش واقعی آن‌را نشان داد، گژن‌پین آسیب قابل ملاحظه‌ای نمی‌بیند و رتبه آن شماره 1 معادل عالی می‌باشد.

بیشترین فشار هیدرودینامیک لایه روغن در دور 3500 rpm در 372° زاویه لنگ (لحظه احتراق) در موتور EF7 پرخوران با سوخت CNG به میزان 446 MPa در دمای کاری 140°C رخ می‌دهد. در شرایط کمترین فشار هیدرودینامیک لایه روغن به میزان 1/83  $\mu m$  می‌باشد، که احتمال سایش یاتاقان وجود دارد. نتایج حل عددی به روش FDM نیز نتایج مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار AVL را با تفاوت بسیار کمی صحت می‌گذارد. بهترین توپولوژی شبکه عصبی FFBP برای پیش‌بینی پارامترهای روغن‌کاری (بیشینه فشار و کمینه ضخامت) توسط شبکه عصبی ساختار 2-30-24-6 با الگوریتم آموزش trainlm و توابع آستانه tansig، logsig و pureline می‌باشد. این شبکه در 120 تکرار در مدت 85/6 ثانیه با خطای یادگیری 0/0229 همگرا می‌شود. خطای شبکه (MSE) برای این توپولوژی برای الگوهای آموزش، ارزیابی و تست به ترتیب 0/013، 0/027 و 0/018 می‌باشد. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) نیز برای الگوهای آموزش، ارزیابی و تست به ترتیب 0/9952، 0/9988 و 0/9965 می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** موتور پرخوران EF7، گژن‌پین، چشم کوچک، باس پیستون، روش CAE، اجزای محدود، تحلیل تنش، عمر خستگی، سطوح تماسی، کرنش‌سنج، روغن‌کاری هیدرودینامیک، لقی، شبکه عصبی مصنوعی.

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

صفحه	عنوان
	چکیده
الف	فهرست مطالب
ج	فهرست نمادها
د	فهرست شکل‌ها
ش	فهرست جداول
۱	فصل اول: مقدمه و هدف
۱-۱	مقدمه
۱-۲	بیان مسئله
۳-۱	اهداف
۶	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۶-۱	مقدمه
۶-۲	مجموعه گژن‌پین، انتهای کوچک شاتون و باس پیستون
۶-۳	اهمیت، وظایف، انواع و مواد گژن‌پین
۶-۴	محاسبات مورد نیاز گژن‌پین
۶-۵	شبیه‌سازی و تحلیل به کمک کامپیوتر (CAE)
۶-۶	مروری بر مطالعات انجام شده
۶-۶-۱	مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل تنش، خستگی و شکست
۱۱	الف) تحلیل نظری تنش
۱۴	ب) تحلیل اجزای محدود و تجربی تنش و خستگی
۱۷	ج) تحلیل موادی شکست گژن‌پین و سایش
۶-۷-۲	مطالعات انجام شده در زمینه روانکاری
۷-۲	ویژگی‌های این تحقیق

۲۵	فصل سوم : مواد و روش‌ها.....
۲۵	۱-۳ مقدمه .....
۲۵	۲-۳ مشخصات فنی موتور EF7.....
۲۶	۳-۳ اندازه‌گیری فشار احتراق .....
۲۸	۴-۳ تحلیل دینامیکی مکانیزم لنگ.....
۲۸	۱-۴-۳ تحلیل سینماتیکی مکانیزم لنگ.....
۳۱	۲-۴-۳ تحلیل سینتیکی مکانیزم لنگ.....
۳۳	۵-۳ ویژگی‌های ساختاری و هندسی مجموعه گزن‌پین، باس پیستون و چشم کوچک .....
۳۴	۱-۵-۳ خواص مکانیکی ماده.....
۳۵	۶-۳ تحلیل تنش .....
۳۶	۱-۶-۳ مدل نظری (ریاضیاتی).....
۳۶	۱-۱-۶-۳ تحلیل نظری توزیع تنش در گزن‌پین .....
۳۹	۲-۱-۶-۳ مدل‌سازی تداخل سطوح تماسی .....
۴۲	۲-۶-۳ تحلیل تنش به روش اجزای محدود .....
۴۳	۱-۲-۶-۳ تهیه مدل سه‌بعدی هندسی و اجزای محدود (المان‌بندی 3D).....
۴۳	۱-۱-۲-۶-۳ ساخت مدل اجزای محدود (المان‌بندی 3D).....
۴۵	۲-۱-۲-۶-۳ سنجش کیفیت المان بندی .....
۴۷	۳-۱-۲-۶-۳ مدل‌سازی سه بعدی اجزای محدود سطوح تماسی .....
۴۹	۲-۲-۶-۳ تعیین شرایط مرزی .....
۵۰	۳-۲-۶-۳ تعیین خواص مواد .....
۵۰	۴-۲-۶-۳ روش اجزای محدود تداخل سطوح تماسی.....
۵۱	۵-۲-۶-۳ بارگذاری .....
۵۴	۶-۲-۶-۳ فرایند آماده سازی کد تحلیل .....
۵۵	۷-۲-۶-۳ پس پردازش نتایج تحلیل تنش .....
۵۵	۳-۶-۳ روش تجربی و ارزیابی صحت تحلیل تنش .....
۵۵	۱-۳-۶-۳ طراحی فیکسچر .....
۵۶	۲-۳-۶-۳ نحوه نصب کرنش‌سنج .....
۵۸	۳-۳-۶-۳ نحوه انجام آزمون .....
۵۹	۷-۳ تحلیل مودال گزن‌پین .....
۶۰	۸-۳ تحلیل خستگی .....
۶۸	۱-۸-۳ تحلیل خستگی به روش نظری .....

۶۹	.....FEMFAT 4.6C	تحلیل خستگی با استفاده از نرم افزار
۷۱	.....	تحلیل هیدرودینامیک لایه روغن
۷۲	.....	ویژگی روغن
۷۳	.....	تحلیل عددی
۷۳	.....	فرمولسازی معادله رینولدز
۷۵	.....(FDM)	حل عددی معادله رینولدز به روش اختلاف محدود
۷۶	.....	تعیین ناحیه محاسباتی
۷۷	.....	تولید شبکه مش بندی
۷۸	.....	اعمال شرایط مرزی
۷۹	.....	کد نویسی روش حل عددی اختلاف محدود
۷۹	.....AVL EXCITE	تحلیل مدل سازی نرم افزار
۸۱	.....	مدل سازی تحلیل هیدرودینامیک با استفاده از شبکه عصبی
۸۴	.....	تعیین محدوده تحلیل در این پروژه
۸۶	.....	فصل چهارم: نتایج و بحث
۸۶	.....	۱-۴ مقدمه
۸۶	.....	۲-۴ نتایج اندازه گیری فشار احتراق
۸۹	.....	۳-۴ نتایج تحلیل دینامیکی و نیروهای وارد بر گژن پین
۸۹	.....	۱-۳-۴ نتایج تحلیل سینماتیکی مکانیزم لنگ
۹۳	.....	۲-۳-۴ نتایج تحلیل سینماتیکی مکانیزم لنگ
۱۰۰	.....	۴-۴ نتایج تحلیل مودال
۱۰۲	.....	۵-۴ نتایج تحلیل تنش
۱۰۲	.....	۱-۵-۴ نتایج تحلیل نظری تنش
۱۰۵	.....	۲-۵-۴ نتایج تحلیل تنش به روش اجزای محدود
۱۰۵	.....	۱-۲-۵-۴ نتایج تحلیل تنش
۱۱۱	.....	۲-۲-۵-۴ نتایج تحلیل تداخل سطوح تماسی
۱۱۲	.....	۳-۵-۴ نتایج آزمون کرنش سنجی
۱۱۴	.....	۴-۵-۴ مقایسه نتایج تحلیل تنش
۱۱۶	.....	۶-۴ نتایج تحلیل خستگی
۱۱۶	.....FEMFAT	نتایج تحلیل خستگی در نرم افزار

- ۱۱۹.....۲-۶-۴ نتایج تحلیل نظری خستگی.....
- ۱۲۴.....۳-۶-۴ نتایج آزمون دوام ۸۰۰ ساعته.....
- ۱۲۶.....۷-۴ نتایج تحلیل روغن کاری.....
- ۱۲۶.....۱-۷-۴ اثر دما بر لزجت دینامیکی روغن.....
- ۱۲۶.....۲-۷-۴ نتایج تحلیل مدل سازی نرم افزار AVL EXCITE.....
- ۱۳۰.....۱-۲-۷-۴ اثر فشار احتراق بر متغیرهای روغن کاری.....
- ۱۳۱.....۲-۲-۷-۴ اثر دمای روغن بر متغیرهای روغن کاری.....
- ۱۳۳.....۳-۲-۷-۴ اثر لقی بین بوش و گژن پین.....
- ۱۳۴.....۴-۲-۷-۴ اثر سرعت دورانی موتور.....
- ۱۳۴.....۳-۷-۴ نتایج تحلیل عددی.....
- ۱۳۶.....۴-۷-۴ نتایج شبیه سازی با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی.....

- ۱۴۳.....فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها.....
- ۱۴۳.....۱-۵ نتیجه گیری.....
- ۱۴۷.....۲-۵ پیشنهادها برای تحقیق های آینده.....
- ۱۴۸.....منابع.....

- ۱۵۲.....پیوست.....
- ۱۵۲.....پیوست الف: استاندارد مرجع مواد و ابعاد برای گژن پین.....
- ۱۵۴.....پیوست ب: روش نصب کرنش سنج و محل قرار گیری آن.....
- ۱۵۴.....ب-۱ روش آماده سازی نصب کرنش سنج.....
- ۱۵۶.....ب-۲ محل های نصب کرنش سنج.....
- ۱۵۷.....پیوست و: روش اندازه گیری زبری.....

## فهرست نمادها

واحد	عنوان	نماد
$m^2$	مساحت سطح پیستون	$A$
$m$	قطر سیلندر	$d$
$m$	جابجایی پیستون از مرکز میل لنگ	
$m$	شعاع لنگ	
$m$	طول موثر شاتون (فاصله مرکز چشم کوچک تا چشم بزرگ)	
-	نسبت تراکم موتور	$CR$
$m^3$	حجم جابجایی سیلندر	
$m^3$	حجم محفظه احتراق	
$m^3$	حجم کل جابجایی سیلندر	
$m/s$	سرعت پیستون	
$m/s^2$	شتاب پیستون	
$kg$	جرم پیستون	
$N$	نیروی عمودی جداره سیلندر به پیستون	
$N$	نیروی قائم وارد به گژن پین	
$N$	نیروی ناشی از فشار احتراق	
$N$	نیروی اینرسی	
$N$	نیروی وارده به شاتون	
$N$	نیروی های فعال بروی گژن پین	
$N$	نیروی شعاعی	
$N$	نیروی مماسی	
$Pa$	فشار لحظه ای داخل سیلندر	

Pa	فشار اتمسفر	
mm	طول گژن پین	
mm	قطر خارجی گژن پین	
mm	قطر داخلی گژن پین	
mm	فاصله بین باس های پیستون	
mm	طول سطح تماس گژن پین با چشم کوچک شاتون	
GPa	ضریب الاستیسیته	
Pa	تنش خمشی	
Pa	تنش شعاعی	
Pa	تنش برشی مماسی	
mm	حداکثر تغییر شکل گژن پین	
Pa	تنش ناشی از ضربه	
mm	لقی شعاعی	
Pa	تنش بیشینه و تنش کمینه	$\sigma_{\min}$ و $\sigma_{\max}$
Pa	تنش دامنه و تنش میانگین	$\sigma_m$ و $\sigma_a$
-	نسبت تنش کمینه به تنش بیشینه	
-	عمر خستگی	
Pa	ضریب استحکام خستگی در کشش و برش	$\tau'_f$ و $\sigma'_f$
-	نمای استحکام خستگی در کشش و برش	$b_f$ و $b$
Pa	مقاومت خستگی	
Pa	تنش تسلیم	
Pa	تنش حد کششی	
-	ضریب اطمینان	
Pa	تنش های اصلی در میدان سه محوره	$\sigma_3$ و $\sigma_2$ ، $\sigma_1$
Pa	تنش معادل فون میسز	

Pa	تنش نرمال	
Pa	تنش برشی معادل	
-	پارامترهای آسیب فایندلی	$k$ و $f$
-	استحکام خستگی برشی ترک نوع A و B	
-	آسیب خستگی	
	میانگین ارتفاع زبری‌ها	
	جذر میانگین مربعات ارتفاع زبری‌ها	
	فشار و ضخامت هیدرودینامیک لایه روغن	$h_{i,j}$ و $p_{i,j}$

### علایم یونانی

-	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی گژن‌پین	
1/°C	ضریب انبساط طولی	
deg	زاویه شاتون با محور مرکزی سیلندر	
deg	زاویه چرخش میل لنگ	
deg	زاویه استقرار نقاط بروی گژن‌پین	
-	نسبت شعاع میل لنگ به طول شاتون	
rad/s	سرعت زاویه‌ای میل لنگ (سرعت زاویه‌ای موتور)	
-	ضریب پواسن	
rad/s	سرعت زاویه‌ای چشم کوچک شاتون نسبت مرکز جرم شاتون	
kg/m <sup>3</sup>	چگالی	
Pa.s	لزجت دینامیکی روغن	
mm	تغییر شکل	
-	نسبت خروج از مرکز	



## فهرست شکل

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲: مدل هندسی نحوه قرار گیری مجموعه انتهای کوچک شاتون، گژن پین و باس پیستون... ۷
- شکل ۲-۲: اشکال مختلف انواع گژن پین..... ۷
- شکل ۳-۲: مدل نیرویی Schlaefke وارده به گژن پین (Anonymous, 2008)..... ۱۱
- شکل ۴-۲: الف) مدل نیروی وارده به پین، ب) توزیع بار سینوسی در صفحه شعاعی گژن پین..... ۱۲
- شکل ۵-۲: الف) هندسه قرار گیری گژن پین، ب) شماتیک نیروی وارده به گژن پین..... ۱۳
- شکل ۶-۲: دیاگرام آزاد نیروی وارده به گژن پین..... ۱۳
- شکل ۷-۲: الف) نمایش سیستم مختصات مجموعه، ب) مدل سه بعدی اجزای محدود..... ۱۵
- شکل ۸-۲: مدل صفحه‌ای بار وارده به گژن پین (Strozzi and Bona; 2005)..... ۱۶
- شکل ۹-۲: الف) المان بندی، ب) تنش ناشی از تداخل چشم کوچک شاتون..... ۱۶
- شکل ۱۰-۲: الف) اجزای گژن پین شکسته، ب) مقطع عرضی شکست گژن پین..... ۱۸
- شکل ۱۱-۲: دستگاه تست گژن پین با الکتروموتور، سیستم رفت و برگشتی لغزنده و گژن پین..... ۱۸
- شکل ۱۲-۲: الف) شماتیک نیروها و سیستم اندازه گیری، ب) نصب حسگر در ساق شاتون..... ۱۹
- شکل ۱۳-۲: کمینه ضخامت روغن در یک چرخه بارگذاری (Zhang et al., 2004)..... ۲۰
- شکل ۱۴-۲: سامانه رایانه‌ای اندازه گیری فشار لایه روغن و اصطکاک..... ۲۱
- شکل ۱-۳: نمای از موتور ملی EF7 پرخوران..... ۲۵
- شکل ۲-۳: الف) نمایی از حسگر کواترتز (Sio2)، ب) حسگر نصب شده بروی شمع موتور به منظور اندازه گیری فشار داخل سیلندر..... ۲۷
- شکل ۳-۳: هندسه مکانیزم لنگ-لغزنده موتور و حرکت پیستون..... ۲۹
- شکل ۴-۳: دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر الف) مجموعه مکانیزم لنگ، ب) پین پیستون..... ۳۱
- شکل ۵-۳: نمودار توزیع جرمی مجموعه الف) بصورت کامل، ب) فقط پیستون، رینگ و گژن پین..... ۳۴
- شکل ۶-۳: نمایش ابعاد مجموعه..... ۳۷
- شکل ۷-۳: الف) توزیع تنش محیطی ناشی از بار سینوسی در گژن پین، ب) توزیع بار سینوسی در صفحه شعاعی گژن پین..... ۳۷
- شکل ۸-۳: مختصات استوانه‌ای گژن پین..... ۳۸

- شکل ۳-۹: طرح انقباق تماسی در بوش برنجی شاتون (پرسی)..... ۴۰
- شکل ۳-۱۰: نمودار روندنمای فرایند CAE انجام شده برای تحلیل..... ۴۲
- شکل ۳-۱۱: نمای هندسه المان‌ها - الف) المان شش وجهی، ب) المان چهار وجهی درجه ۲..... ۴۴
- شکل ۳-۱۲: دو نما از هندسه و شبکه بندی مجموعه مدل‌سازی شده..... ۴۵
- شکل ۳-۱۳: نمایی از تنظیمات کیفیت المان‌ها 3D در نرم‌افزار Hypermesh..... ۴۶
- شکل ۳-۱۴: نمای روبروی هندسه مجموعه انتهای کوچک شاتون و اندرکنش بین آن‌ها..... ۴۷
- شکل ۳-۱۵: سطوح تماسی الف) در دو طرف بوش، ب) در مرز سطوح باس پیستون و گژن‌پین..... ۴۸
- شکل ۳-۱۶: شرایط مرزی در صفحه تقارن ZX و ZY (۱۱۸۹ گره)..... ۴۹
- شکل ۳-۱۷: مدل‌سازی طرح انقباق تماسی (تداخل فشاری)..... ۵۰
- شکل ۳-۱۸: کد Abaqus مربوط مدل‌سازی طرح انقباق تماسی (تداخل فشاری)..... ۵۰
- شکل ۳-۱۹: کد Abaqus مربوط اعمال شرایط مرزی دما..... ۵۱
- شکل ۳-۲۰: کد Abaqus مربوط تحلیل سطوح تماسی..... ۵۲
- شکل ۳-۲۱: کد Abaqus مربوط اعمال شرایط مرزی دما..... ۵۲
- شکل ۳-۲۲: نحوه بارگذاری..... ۵۳
- شکل ۳-۲۲: نمای واقعی فیکسچر آزمون کشش-فشار شاتون نصب شده بر دستگاه آزمون مواد و نمای طراحی شده آن در نرم‌افزار SolidWork..... ۵۶
- شکل ۳-۲۳: محل نصب کرنش سنج بروی گژن‌پین و چشم کوچک..... ۵۷
- شکل ۳-۲۴: تنظیم و نصب دستگاه جهت اندازه‌گیری کرنش..... ۵۸
- شکل ۳-۲۵: مولتی‌متر خوانش و ثبت خروجی (مقاومت الکتریکی) کرنش سنج‌ها..... ۵۹
- شکل ۳-۲۶: مدل سه بعدی کامل اجزای محدود گژن‌پین جهت تحلیل مودال..... ۵۹
- شکل ۳-۲۷: نمودار S-N با استفاده از نتیجه آزمون‌های خستگی محوری کاملاً معکوس شونده..... ۶۱
- شکل ۳-۲۸: روش شمارش جریان باران..... ۶۳
- شکل ۳-۲۹: تعیین آسیب تجمعی از منحنی تنش-زمان و منحنی S-N..... ۶۷
- شکل ۳-۳۰: ضرایب اصطکاک در اجزای موتور (Tung and McMillan; 2004)..... ۷۱
- شکل ۳-۳۱: سیستم مختصات و نمادها..... ۷۴
- شکل ۳-۳۲: ناحیه محاسباتی برای تولید شبکه..... ۷۷
- شکل ۳-۳۳: شبکه MxN تولید شده برای حل روش اختلاف محدود..... ۷۷
- شکل ۳-۳۴: شبیه‌سازی سطوح یاتاقان بصورت شیب‌دار خطی..... ۷۸
- شکل ۳-۳۵: مدل پنج نقطه‌ای جهت محاسبه فشار و ضخامت لایه روغن در معادله رینولدز..... ۷۹

- شکل ۳-۳۶: نمودار روند نمای تحلیل هیدرودینامیک لایه روغن..... ۸۰
- شکل ۳-۳۷: مدل سازی موتور EF7 در نرم افزار AVL EXCITE..... ۸۰
- شکل ۳-۳۸: ساختار شبکه تک لایه..... ۸۱
- شکل ۳-۳۹: ساختار عمومی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده..... ۸۳
- شکل ۴-۱: فشار درون سیلندر موتور EF7 پرخوران با سوخت گاز طبیعی در دورهای مختلف.... ۸۷
- شکل ۴-۲: فشار درون سیلندر موتور EF7 پرخوران با سوخت بنزین در دورهای مختلف..... ۸۷
- شکل ۴-۳: فشار درون سیلندر موتور EF7 تنفس طبیعی، سوخت گاز طبیعی در دورهای مختلف ۸۸
- شکل ۴-۴: فشار درون سیلندر موتور EF7 تنفس طبیعی با سوخت بنزین در دورهای مختلف..... ۸۸
- شکل ۴-۵: فشار بیشنه درون سیلندر موتور EF7 در حالت های مختلف..... ۸۸
- شکل ۴-۶: (الف) فشار درون سیلندر ب) نمودار اندیکاتوری، موتور EF7 در حالت های مختلف.... ۸۹
- شکل ۴-۷: تغییرات جابجایی حجم کل و جابجایی پیستون نسبت به مرکز میل لنگ..... ۹۰
- شکل ۴-۸: جابجایی زاویه ای چشم کوچک نسبت به خط مرکزی سیلندر..... ۹۰
- شکل ۴-۹: پروفیل سرعت خطی پیستون در سه سرعت دورانی مختلف میل لنگ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۰: پروفیل شتاب خطی پیستون در سه سرعت دورانی مختلف میل لنگ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۱: پروفیل سرعت نسبی چشم کوچک شاتون نسبت به مرکز جرم شاتون..... ۹۲
- شکل ۴-۱۲: پروفیل نیروی ناشی از فشار درون سیلندر..... ۹۳
- شکل ۴-۱۳: پروفیل نیروی اینرسی ناشی از حرکت رفت و برگشتی قطعات..... ۹۴
- شکل ۴-۱۴: پروفیل برآیند نیروی های عمودی (نیروی فعال) وارده به گژن پین..... ۹۴
- شکل ۴-۱۵: بیشینه نیروهای گاز، اینرسی و برآیند نیروهای وارده به گژن پین در دورهای مختلف ۹۵
- شکل ۴-۱۶: پروفیل نیروهای وارده گژن پین در دور ۵۵۰۰ rpm..... ۹۶
- شکل ۴-۱۷: پروفیل نیروهای وارده گژن پین در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۹۶
- شکل ۴-۱۸: پروفیل نیروی جانبی وارده بر گژن پین..... ۹۷
- شکل ۴-۱۹: پروفیل نیروی عمودی و جانبی وارده گژن پین در دور ۵۵۰۰ rpm..... ۹۸
- شکل ۴-۲۰: پروفیل نیروی عمودی و جانبی وارده گژن پین در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۹۸
- شکل ۴-۲۱: پروفیل نیروی عمودی وارده بر گژن پین در دور ۴۰۰۰ rpm موتور ملی پرخوران با سوخت CNG در سیلندرهاى مختلف..... ۹۹
- شکل ۴-۲۲: پروفیل نیروی جانبی وارده بر گژن پین در دور ۴۰۰۰ rpm موتور ملی پرخوران با سوخت CNG در سیلندرهاى مختلف..... ۹۹

- شکل ۴-۲۳: شکل مودهای اول تا دهم تحلیل مودال گژن‌پین..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۴: پروفیل بیشینه تغییر شکل گژن‌پین..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۵: پروفیل تنش برشی گژن‌پین..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۶: پروفیل تنش خمشی گژن‌پین..... ۱۰۳
- شکل ۴-۲۷: پروفیل تنش شعاعی در چهار نقطه مختلف گژن‌پین در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۸: پروفیل تنش شعاعی در نقطه ۲ شکل گژن‌پین..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۹: کانتور تنش فون‌میسز در مرحله الف) دوم (سطوح تماسی) و ب) سوم (اعمال دما)..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۰: کانتور تنش فون‌میسز در زاویه الف) ۳۷۱ و ب) ۱ درجه..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۱: کانتور شش مولفه تنش در زاویه ۳۷۱ درجه..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۲: کانتور تغییر شکل گژن‌پین در زاویه الف) ۳۷۱ و ب) ۱ درجه..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۳: محل قرارگیری گره‌های انتخاب شده برای مقایسه نتایج و تحلیل خستگی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۴: پروفیل تنش فون‌میسز و تغییر شکل در خط مرکزی Int و Ext در دور ۴۰۰۰..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۵: تنش فون‌میسز در شش گره ۴۵۳، ۸۴۸، ۲۰۷، ۴۳۴، ۸۰۷ و ۱۱۱۰ در دور ۴۰۰۰..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۶: شش مولفه تانسور تنش و تنش فون‌میسز در گره ۴۵۳ در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۷: بیشینه تنش فون‌میسز در شش گره انتخابی در مرحله ۶ تحلیل..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۸: کانتور فشار تماسی در مرحله ۲ و ۶ (تداخل و برابند نیروها) در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۹: کرنش  $\epsilon_{11}$  اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها در اثر بار فشاری و کششی..... ۱۱۳
- شکل ۴-۴۰: مقایسه نتایج تحلیل تنش به روش تجربی (TEST) با روش اجزای محدود (CAE)..... ۱۱۵
- شکل ۴-۴۱: کانتور تنش الف) بیشینه و ب) کمینه در زاویه ۳۷۱ درجه در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۲: کانتور تنش الف) دامنه و ب) میانگین در زاویه ۳۷۱ درجه در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۱۶
- شکل ۴-۴۳: نمودارهای الف) تنش-کرنش و ب) تنش-عمر (S-N) فولاد 17Cr3..... ۱۱۷
- شکل ۴-۴۴: الف) نمودار خستگی (haigh) و ب) اطلاعات مهندسی فولاد 17Cr3..... ۱۱۷
- شکل ۴-۴۵: کانتور الف) آسیب و ب) ضریب اطمینان خستگی در زاویه ۳۷۱، و دور ۴۰۰۰..... ۱۱۸
- شکل ۴-۴۶: کانتور الف) آسیب و ب) ضریب اطمینان خستگی در زاویه ۳۷۱، و دور ۵۵۰۰..... ۱۱۸
- شکل ۴-۴۷: کانتور الف) آسیب و ب) ضریب اطمینان خستگی در زاویه ۳۷۱، و دور ۶۰۰۰..... ۱۱۸
- شکل ۴-۴۸: شمارش بارش باران تنش فون‌میسز در گره ۴۵۳ در دور ۴۰۰۰ rpm..... ۱۱۹
- شکل ۴-۴۹: مقایسه تنش بیشینه، کمینه، دامنه و میانگین در شش المان انتخابی در دور ۴۰۰۰..... ۱۲۰
- شکل ۴-۵۰: تغییرات تنش الف) نرمال و ب) تنش برشی در داخل المان ۱۴۴۴ در دور ۴۰۰۰..... ۱۲۱
- شکل ۴-۵۱: نحوه سایش و خستگی واقعی گژن‌پین بعد از آزمون دوام ۸۰۰ ساعت..... ۱۲۴