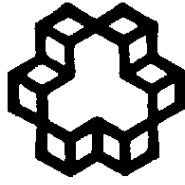


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

## تحلیل خنک کاری موتور اشتعال جرقه‌ای

توسط

نیما خراسانی

استاد راهنما:

دکتر سیدعلی جزایری

## چکیده

یکی از مسائل اساسی و مهم در هر موتور بحث خنک‌کاری بهینه موتور می‌باشد. پارامترهای مختلفی مانند دمای هوای ورودی به موتور، دمای سیال خنک‌کننده، فشار مجموعه و ... در نرخ انتقال حرارت موثر هستند. یکی از این پارامترها، دبی ورودی به مجموعه راه‌گاه خنک‌کاری می‌باشد.

جهت بررسی سیستم خنک‌کاری معمولاً کل مجموعه را حل همزمان نموده و تغییر پارامترها را بررسی می‌کنند. در رویکردی که در این مطالعه بدان پرداخته شده است، حل غیر همزمان سیستم خنک‌کاری انجام می‌شود. جهت افزایش دقت نتایج به دست آمده، پدیده جوشش هسته‌ای که فاکتور مهمی در زمینه طراحی سیستم خنک‌کاری موتور می‌باشد، مدنظر قرار گرفته است.

در این رویکرد شار حرارتی متوسط سیکل در سمت گاز داغ توسط مدل نرم‌افزاری موتور وجود داشته است. این شار به همراه ضریب انتقال حرارت به دست آمده از تحلیل CFD راه‌گاه خنک-کاری مجموعه‌ای از شرایط مرزی را تولید می‌کنند. دمای فلز بدنه از روش FEM تخمین زده می‌شود و مقادیر به دست آمده جهت همگرا شدن نتایج کنترل شده‌اند.

تحلیل به صورت شبیه‌سازی سه بعدی جریان با استفاده از نرم‌افزارهای FLUENT، GAMBIT، HYPERMESH و ABAQUS و نگاشت خروجی‌های آن‌ها صورت پذیرفته است. کد جوشش هسته‌ای به صورت برنامه‌ای جداگانه در نرم‌افزار Matlab نوشته شده است.

با تغییر دبی ورودی و بررسی پارامتری نتایج، دبی بهینه در دور مشخص مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل حرارتی ، ضریب انتقال حرارت، جوشش فرسرد، مدل‌سازی، انتقال

حرارت اجباری.

## فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه
فهرست مطالب.....	أ
فهرست شکل‌ها.....	د
فهرست جدول‌ها.....	ح
نمادها.....	ط
فصل ۱.....	۱
مقدمه.....	۲
فصل ۲- انتقال حرارت در موتورهای احتراق داخلی.....	۴
۲-۱- مقدمه‌ای بر اهمیت و ضرورت خنک‌کاری.....	۵
۲-۲- انتقال حرارت در موتور.....	۶
۲-۲-۱- انتقال حرارت از گازهای داخل سیلندر به بدنه.....	۷
۲-۲-۲- انتقال حرارت از سیلندر و سرسیلندر.....	۹
۲-۲-۳- محاسبه ضریب انتقال حرارت گازهای داخل موتور.....	۱۰
۲-۳- انتقال حرارت از سیستم مکش و تخلیه.....	۱۳
۲-۴- اثر متغیرهای مختلف در میزان انتقال حرارت از موتور.....	۱۵
۲-۴-۱- اثر سرعت و توان.....	۱۶
۲-۴-۲- اثر نسبت ترکیب سوخت و هوا.....	۱۸
۲-۴-۳- اثر دمای گازهای ورودی.....	۱۹
۲-۴-۴- اثر زمان جرقه و مدت زمان احتراق.....	۲۰
۲-۴-۵- اثر نسبت تراکم.....	۲۲
۲-۴-۶- اثر جریان چرخشی.....	۲۳
۲-۴-۷- اثر دما و ترکیب سیال خنک‌کننده.....	۲۳
۲-۵- انتقال حرارت از بدنه به سیال خنک‌کننده.....	۲۵
۲-۵-۱- عوامل موثر بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده.....	۲۵
۲-۵-۲- حالات انتقال حرارت از دیواره به سیال خنک‌کننده.....	۲۹
۲-۶- توزیع دما در قطعات مختلف موتور.....	۳۵
۲-۶-۱- توزیع دما در سرسیلندر.....	۳۵
۲-۶-۲- توزیع دما در سیلندر.....	۳۷
فصل ۳ تحلیل جریان در راه‌گاه‌های آب موتور <i>EF7</i> .....	۴۱
۳-۱- مقدمه‌ای بر تحلیل جریان در راه‌گاه‌های آب.....	۴۲

۴۲	۲-۳- روش حل جریان سیال
۴۳	۳-۳- تهیه و آماده سازی مدل
۴۳	۳-۳-۱- آماده سازی مدل راه گاه های آب سرسیلندر
۴۶	۳-۴- المان بندی مدل راه گاه آب
۴۶	۳-۴-۱- اندازه و تعداد المان ها
۴۷	۳-۴-۲- نوع المان انتخاب شده از نظر شکل
۵۰	۳-۵- تعیین شرایط مرزی (ورود و خروج سیال)
۵۱	۳-۶- تعیین روش حل جریان
۵۱	۳-۶-۱- خواص جریان
۵۱	۳-۶-۲- خواص فیزیکی مواد
۵۱	۳-۶-۲-۱- چگالی
۵۱	۳-۶-۲-۲- ظرفیت گرمایی ویژه
۵۲	۳-۶-۳- معادلات حاکم بر جریان
۵۲	۳-۶-۴- معادلات مورد استفاده در روش $K-\epsilon$
۵۳	۳-۷- تحلیل جریان سیال خنک کننده داخل راه گاه ها
۵۳	۳-۷-۱- اعمال شرایط مرزی
۵۳	۳-۷-۱-۱- شرط مرزی ورودی
۵۳	۳-۷-۱-۲- شرط مرزی خروجی
۵۴	۳-۷-۱-۳- شرط مرزی دیوار
۵۴	۳-۷-۲- مشخصات هندسی و شرایط کارکردی موتور
۵۴	۳-۷-۲-۱- مشخصات هندسی موتور
۵۴	۳-۷-۲-۲- شرایط کارکردی
۵۴	۳-۷-۳- نتایج برای سرسیلندر بدون تغییر
۶۲	فصل ۴ مدل سازی پدیده جوشش
۶۳	۴-۱- بررسی پدیده جوشش در موتورهای احتراق داخلی
۷۰	۴-۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه جوشش
۷۰	۴-۱-۲-۱- تحقیقات تجربی صورت پذیرفته
۷۴	۴-۱-۲-۲- تحقیقات مدل سازی عددی
۷۵	۴-۱-۲-۳- تحقیقات در رابطه با مدل سازی های انجام شده در زمینه خودرو
۷۷	۴-۱-۳- مدل جوشش
۸۲	فصل ۵ تحلیل حرارتی سرسیلندر موتور
۸۳	۵-۱- روش تحلیل حرارتی سرسیلندر

۸۴	۲-۵- شرایط مرزی.....
۸۵	۱-۲-۵- شرایط مرزی حرارتی.....
۸۷	۳-۵- شرایط تعریف مساله.....
۸۸	فصل ۶ نتایج-بررسی-پیشنهادها.....
۸۹	۱-۶- نتایج حل جریانی هندسه راه‌گاہ خنک‌کاری.....
۸۹	۱-۶-۲- نتایج برای ورودی دبی $1/8 \text{ Kg/s}$ .....
۹۲	۱-۶-۳- نتایج برای ورودی $2/33 \text{ Kg/s}$ .....
۹۳	۱-۶-۴- نتایج برای ورودی $3/00 \text{ Kg/s}$ .....
۹۶	۲-۶- نتایج تحلیل حرارتی سرسیلندر.....
۹۶	۱-۲-۶- تحلیل حرارتی کامل در دور مشخص و دبی ورودی مشخص.....
۹۶	۱-۲-۶-۱- نتایج برای دبی ورودی $2/33 \text{ Kg/s}$ .....
۹۹	۱-۲-۶-۲- نتایج برای دبی ورودی $2/40 \text{ Kg/s}$ .....
۱۰۱	۱-۲-۶-۳- نتایج برای دبی $2/50 \text{ Kg/s}$ .....
۱۰۲	۱-۲-۶-۴- نتایج برای دبی $2/60 \text{ Kg/s}$ .....
۱۰۵	۳-۶- بررسی تغییرات دبی بر پارامترهای انتقال حرارت موتور.....
۱۰۵	۳-۶-۱- بررسی تغییر دما.....
۱۰۶	۳-۶-۲- بررسی تغییرات شعاع جدایش.....
۱۰۷	۳-۶-۴- بررسی تحلیل انتقال حرارت بدون در نظر گرفتن مدل جوشش.....
۱۰۸	۵-۶- نتیجه‌گیری.....
۱۰۹	۶-۶- پیشنهادها.....
۱۱۱	مراجع.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان.....	صفحه
شکل (۱-۲) نمایی از نوسانات دما در لایه مرزی و همچنین دیواره محفظه احتراق.....	۸
شکل (۲-۲) مدل انتقال حرارت از گازهای داخل سیلندر به سیال خنک‌کننده.....	۹
شکل (۳-۲) منحنی کاهش درصد انتقال حرارت در اثر افزایش سرعت و قدرت خروجی موتور.....	۱۶
شکل (۴-۲) منحنی کاهش انتقال حرارت در اثر افزایش سرعت موتور.....	۱۷
شکل (۵-۲) تغییرات مقدار انتقال حرارت به سیال خنک‌کننده با تغییر سرعت موتور.....	۱۷
شکل (۶-۲) منحنی اثر نسبت ترکیب سوخت و هوا بر انتقال حرارت به سیال خنک‌کننده.....	۱۸
شکل (۷-۲) تغییرات حرارت انتقالی به سیال خنک‌کننده در اثر تغییر نسبت هوا به سوخت.....	۱۹
شکل (۸-۲) منحنی اثر تغییر در دمای گازهای ورودی بر مقدار انتقال حرارت.....	۱۹
شکل (۹-۲) متوسط انتقال حرارت به محفظه احتراق بر حسب زمان جرقه و همچنین طول زمان احتراق.....	۲۰
شکل (۱۰-۲) منحنی اثر تغییر در زمان جرقه بر مقدار انتقال حرارت.....	۲۱
شکل (۱۱-۲) اثر زمان جرقه بر حرارت انتقال یافته به خنک‌کننده.....	۲۱
شکل (۱۲-۲) منحنی اثر نسبت تراکم بر مقدار انتقال حرارت.....	۲۲
شکل (۱۳-۲) منحنی اثر افزایش جریان چرخشی بر انتقال حرارت.....	۲۳
شکل (۱۴-۲) منحنی تاثیر تغییر در دمای سیال خنک‌کننده بر روی قسمت‌های مختلف موتور.....	۲۴
شکل (۱۵-۲) نمودار تغییرات حرارت انتقالی به سیال خنک‌کننده در اثر تغییر در دمای ورودی سیال خنک‌کننده.....	۲۵
شکل (۱۶-۲) اثر تغییر دور موتور بر ضریب انتقال حرارت جابجایی گازهای داخل سیلندر.....	۲۷
شکل (۱۷-۲) اثر تغییر دور موتور بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده موتور.....	۲۷
شکل (۱۸-۲) اثر تغییر نسبت تراکم بر ضریب انتقال حرارت جابجایی گازهای داخل سیلندر.....	۲۷
شکل (۱۹-۲) اثر تغییر نسبت تراکم بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده موتور.....	۲۸
شکل (۲۰-۲) اثر تغییر دمای هوای ورودی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده.....	۲۸
شکل (۲۱-۲) اثر تغییر نسبت تراکم بر ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده موتور.....	۲۸
شکل (۲۲-۲) اثر تغییر فشار هوای ورودی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی گازهای داخل سیلندر.....	۲۹
شکل (۲۳-۲) اثر تغییر فشار هوای ورودی بر انتقال حرارت جابجایی سیال خنک‌کننده موتور.....	۲۹
شکل (۲۴-۲) محل نصب ترمو کوپل‌ها برای اندازه‌گیری دمای سطح و مناطق مختلف سرسیلندر.....	۳۲
شکل (۲۵-۲) نمودار تغییر دمای ترمو کوپل‌های مختلف در سه سرعت چرخشی متفاوت.....	۳۲
شکل (۲۶-۲) نمودار مربوط به برون‌یابی برای محاسبه سطوح در تماس با گاز و سیال خنک‌کننده.....	۳۳
شکل (۲۷-۲) تاثیر کاهش فشار بر دمای سرسیلندر در دور $rpm$ ۲۰۰۰.....	۳۴

- شکل (۲-۲۸) تاثیر تغییر فشار خنک کننده بر دمای ترمو کوپل ها..... ۳۴
- شکل (۲-۲۹) توزیع دما در نقاط مختلف سرسیلندر که با نصب ترمو کوپل اندازه گیری شده است... ۳۶
- شکل (۲-۳۰) تغییر دمای دیواره های سرسیلندر در اثر تغییر در سرعت چرخش موتور..... ۳۷
- شکل (۲-۳۱) توزیع دما و نرخ انتقال حرارت در دیواره سیلندر یک موتور تزریق مستقیم دیزلی..... ۳۸
- شکل (۲-۳۲) تغییر دمای دیواره های سیلندر در اثر تغییر در سرعت گردش موتور..... ۳۸
- شکل (۲-۳۳) تغییر دمای دیواره های سیلندر در اثر تغییر در نسبت هوا به سوخت..... ۳۹
- شکل (۲-۳۴) نمودار تغییرات دما بر حسب نسبت جرمی اتیلن گلیکول..... ۴۰
- شکل (۳-۱) هندسه راه گاه سیال - سرسیلندر..... ۴۴
- شکل (۳-۲) هندسه راه گاه سیال - بوش های اطراف سیلندر..... ۴۴
- شکل (۳-۳) هندسه کلی راه گاه آب - سرسیلندر..... ۴۵
- شکل (۳-۴) هندسه واشر سرسیلندر..... ۴۶
- شکل (۳-۵) وجود المان های بد در صورت پاک نکردن خطوط زاید..... ۴۸
- شکل (۳-۶) مدل مش خورده راه گاه آب..... ۴۸
- شکل (۳-۷) مدل مش خورده راه گاه آب - نمای پایین..... ۴۹
- شکل (۳-۸) مقطع برش خورده راه گاه آب..... ۴۹
- شکل (۳-۹) استفاده از مش غیریکنواخت..... ۵۰
- شکل (۳-۱۰) تعیین شرایط مرزی در نرم افزار *Gambit*..... ۵۰
- شکل (۳-۱۱) نمایی از کانتور سرعت در یکی از مدل های اولیه..... ۵۵
- شکل (۳-۱۲) بردارهای سرعت در راه گاه آب..... ۵۶
- شکل (۳-۱۳) نمودار باقیمانده های تحلیل سیالاتی راه گاه های آب سرسیلندر..... ۵۶
- شکل (۳-۱۴) کانتور سرعت در ماهیچه های آب..... ۵۷
- شکل (۳-۱۵) کانتور سرعت در ماهیچه های آب..... ۵۷
- شکل (۳-۱۶) نمایی از سطح مقطع سرعت آب در مدل ریزشده..... ۵۸
- شکل (۳-۱۷) نمایی از سطح مقطع سرعت آب در مدل اولیه..... ۵۸
- شکل (۳-۱۸) مقطع انتخابی مقایسه بین دو مدل..... ۵۹
- شکل (۳-۱۹) کانتور<sup>+</sup>..... ۶۰
- شکل (۳-۲۰) مقایسه نتایج تحلیلی و گزارش مرکز تحقیقات موتور..... ۶۱
- شکل (۴-۱) نمودار جوشش..... ۶۳
- شکل (۴-۲) مکانیزم جریان های ایجاد شده در پدیده جوشش..... ۶۴
- شکل (۴-۳) پروفیل دمایی و ناحیه ایجاد شده در پدیده جوشش..... ۶۶
- شکل (۴-۴) ناحیه های تشکیل حباب ها در لوله و نمودار تغییرات ضریب جابجایی در هر ناحیه..... ۶۷



- شکل (۴-۵) ناحیه‌های تشکیل حباب‌های هوا در لوله و نمودار تغییرات دما در هر ناحیه (شکل سمت راست) به همراه انواع رژیم‌های جریان همراه با پدیده جوشش (شکل سمت چپ)..... ۶۷
- شکل (۴-۶) عکس‌هایی تجربی از پدیده جوشش..... ۶۸
- شکل (۴-۷) مقایسه درصد انتقال حرارت برای سیال *FC-72* در حالت جوشش توسعه یافته..... ۶۹
- شکل (۴-۸) نتایج و نحوه آزمایش..... ۷۱
- شکل (۴-۹) دستگاه آزمایش مرجع..... ۷۱
- شکل (۴-۱۰) شماتیکی از دستگاه تست..... ۷۲
- شکل (۴-۱۱) روش اندوسکوپی جهت نشان دادن مکان تشکیل حباب..... ۷۲
- شکل (۴-۱۲) نحوه‌ی از بین رفتن حباب..... ۷۳
- شکل (۴-۱۳) پدیده جدایش و از بین رفتن حباب..... ۷۳
- شکل (۴-۱۴) بررسی قطر حباب تشکیل شده روی سطح در سرعت‌های متفاوت..... ۷۴
- شکل (۴-۱۵) نتایج دمایی و غلظتی جریان جوشش سرد در لوله عمودی..... ۷۵
- شکل (۴-۱۶) محل‌های تخمینی تشکیل حباب در راهگاه خنک‌کاری..... ۷۶
- شکل (۴-۱۷) نتایج حاصل از مدل‌های چن و *BDL*..... ۷۶
- شکل (۴-۱۸) توازن نیروها در لحظه جدا شدن حباب..... ۷۷
- شکل (۴-۱۹) سه حالت شناوری حباب..... ۷۷
- شکل (۵-۱) روند تحلیل حرارتی سرسیلندر..... ۸۳
- شکل (۵-۲) المان‌های تولید شده در نرم‌افزار *Hypermesh*..... ۸۴
- شکل (۵-۳) نمودار توزیع دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی گاز بر حسب زاویه لنگ..... ۸۵
- شکل (۵-۴) مدل موتور تحلیل شده در نرم‌افزار *GTPOWER*..... ۸۶
- شکل (۶-۱) کانتور فشار کلی بر روی دیواره..... ۹۰
- شکل (۶-۲) کانتور تنش برشی بر روی دیواره..... ۹۰
- شکل (۶-۳) ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره..... ۹۱
- شکل (۶-۴) کانتور فشار کلی بر روی دیواره..... ۹۲
- شکل (۶-۵) کانتور تنش برشی بر روی دیواره..... ۹۲
- شکل (۶-۶) ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره..... ۹۳
- شکل (۶-۷) کانتور فشار کلی بر روی دیواره..... ۹۴
- شکل (۶-۸) کانتور تنش برشی بر روی دیواره..... ۹۴
- شکل (۶-۹) ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره..... ۹۵
- شکل (۶-۱۰) توزیع دمایی سرسیلندر در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی ورودی  $2/33\text{ Kg/s}$ ..... ۹۸
- شکل (۶-۱۱) توزیع دما در راهگاه خنک‌کاری در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی ورودی  $2/33\text{ Kg/s}$ ..... ۹۸
- شکل (۶-۱۲) توزیع دما در سرسیلندر در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/40\text{ Kg/s}$ ..... ۱۰۰

- شکل (۶-۱۳) کانتور توزیع دما در محفظه احتراق در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/40\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۰
- شکل (۶-۱۴) توزیع دما در سرسیلندر در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/50\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۱
- شکل (۶-۱۵) کانتور توزیع دما در محفظه احتراق در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/50\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۲
- شکل (۶-۱۶) توزیع دما در سرسیلندر در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/60\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۳
- شکل (۶-۱۷) توزیع دما در سطح در تماس سیال در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی ورودی  $2/60\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۳
- شکل (۶-۱۸) کانتور سرعت در برشی در محفظه احتراق در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/60\text{ kg/s}$  ..... ۱۰۴
- شکل (۶-۱۹) کانتور توزیع دما در محفظه احتراق در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/60\text{ Kg/s}$  ..... ۱۰۴
- شکل (۶-۲۰) تغییرات دما بر حسب تغییرات دبی ورودی ..... ۱۰۵
- شکل (۶-۲۱) نمودار تغییرات دما بر حسب تغییر دبی ورودی ..... ۱۰۶
- شکل (۶-۲۲) تغییرات شعاع جدایش نسبت به تغییر دبی ورودی ..... ۱۰۶
- شکل (۶-۲۳) توزیع دمای به دست آمده در دور  $6000\text{ rpm}$  و دبی  $2/33\text{ Kg/s}$  بدون در نظر گرفتن مدل جوشش ..... ۱۰۷

## فهرست جدول‌ها

عنوان.....	صفحه
جدول (۱-۳) مقایسه بین دو مدل اولیه و مدل انتخابی.....	۵۹
جدول (۱-۴) مقایسه ضریب انتقال حرارت در مکانیزم‌های متفاوت انتقال حرارت.....	۶۹
جدول (۲-۵) مشخصات ترمودینامیکی آلومینیم.....	۸۵
جدول (۳-۵) مقادیر دما و ضریب انتقال حرارت در پورتهای هوا و دود.....	۸۶
جدول (۱-۶) پارامترهای مکانیکی سیستم خنک‌کاری.....	۸۹
جدول (۲-۶) مقادیر متوسط ضریب انتقال حرارت در دبی‌های متفاوت.....	۹۵
جدول (۳-۶) نتایج خروجی از <i>Fluent</i> - تکرار اول.....	۹۶
جدول (۴-۶) نتایج خروجی از <i>Abaqus</i> -تکرار اول.....	۹۶
جدول (۵-۶) نتایج خروجی از <i>Fluent</i> - تکرار دوم.....	۹۷
جدول (۶-۶) نتایج خروجی از <i>Abaqus</i> -تکرار دوم.....	۹۷
جدول (۷-۶) نتایج خروجی از <i>Fluent</i> - تکرار سوم.....	۹۷
جدول (۸-۶) نتایج پروسه تحلیل دمایی در دور $6000\ rpm$ و ورودی $2/40\ Kg/s$ .....	۹۹
جدول (۹-۶) نتایج پروسه تحلیل دمایی در دور $6000\ rpm$ و ورودی $2/50\ Kg/s$ .....	۱۰۱
جدول (۱۰-۶) نتایج پروسه تحلیل دمایی در دور $6000\ rpm$ و ورودی $2/60\ Kg/s$ .....	۱۰۲
جدول (۱۱-۶) نتایج خروجی از <i>Abaqus</i> -تکرار سوم.....	۱۰۷

## نمادها

ثابت مدل [-]	b
حرارت ویژه [J/KgK]	c
ثابت [-]	$C_s$
قطر هیدرولیکی [m]	$d_{hyd}$
نیرو [N]	F
شتاب جاذبه [ $m/s^2$ ]	g
دبی جرمی ویژه [Kg/m <sup>2</sup> s]	G
نرخ تنش [-] (du/dy)(y/u)	$G_s$
ضریب انتقال حرارت [W/m <sup>2</sup> K]	h
حرارت جانبی [J/kg]	$h_{lg}$
ضریب هدایت [W/m K]	k
ثابت	K
ثابت	m,n
فشار [N/m <sup>2</sup> ]	p
نرخ انتقال حرارت ویژه [W/m <sup>2</sup> ]	q
شعاع [m]	r
نسبت ایستایی [-]	S
دما [C]	T
زمان [s]	t
سرعت [m/s]	u
سرعت اصطکاکی دیواره [m/s]	$u_\tau$
حجم [m <sup>3</sup> ]	V
محور مختصات [m]	x
فاصله بدون بعد دیوار [-]	$y^+$
پخش حرارتی [m <sup>2</sup> /s]	$\alpha$
ثابت [-]	$\kappa$ و $\chi$
لزجت دینامیکی [kg/m s]	$\mu$
چگالی جرمی [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$
ضریب تصحیح [-]	$\Phi$
ثابت [-]	$\Psi$
کشش سطحی [kg/s <sup>2</sup> ]	$\sigma$
تنش برشی [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau$
زاویه [rad]	$\square$
نسبت جرمی [-]	$\zeta$

## زیرنویس‌ها

بالک	b
شناوری	bcy
درگ	d
بزرگ‌شدن حباب	du
جدایش	D
جابجایی اجباری	fc
جریان القایی	flow
فاز بخار	g
فاز مایع	l
بلند شدن	L
جوشش هسته‌ای	nb
آغاز جوشش	onb
فشار ثابت	p
اشباع	s
تنش جدایش	sl
فروسرد	sub
دو فاز	tp
انتقال	trans
دیوار	w
جابجایی	cv
ضریب پخش	$\varepsilon$
تشنه‌شع	R
دیوار سمت گاز	w,g
دیوار سمت	w,c
سیال خنک‌کننده	c,c
پیستون	p
جابجایی	d
تراکم	c

## فصل ۱ مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون صنعت خودروسازی در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای بر روی بهینه‌سازی عملکرد خودرو انجام شده است. در این میان، مطالعات گسترده‌ای بر مهمترین بخش خودرو، موتور خودرو صورت می‌پذیرد. در بحث کاهش مصرف سوخت، سبک‌سازی بدنه موتور و مقاوم‌سازی آن و .... تحقیقات زیادی صورت پذیرفته است. در دهه‌های اخیر با گسترش روش‌های حل عددی، تحقیقات و مدل‌سازی با فرضیات کم مورد توجه شرکت‌های تحقیقاتی خودروسازی و پژوهشگران دانشگاهی واقع شده است.

از آنجایی که استفاده از موتورهای احتراق داخلی در موارد نیاز به توان کم، خودروها و نیروگاه‌های کوچک، و همچنین در موارد نیاز به توان بالا، کشتی‌های بزرگ و نیروگاه‌های بزرگ، متداول است، استفاده از موتورهای احتراق داخلی و موتورهایی که راندمان بالایی داشته باشند و از طرفی نیز دارای حجم و وزن کمی باشند ضروری می‌باشد. تحقیقات زیادی در امر کاهش وزن، افزایش راندمان حرارتی، افزایش توان، ایجاد احتراق مناسب و ... صورت پذیرفته است.

در تمامی این تحقیقات بررسی تنش داخل بدنه و انتقال حرارت در بدنه بسیار ضروری می‌باشد. انتخاب جنس بدنه، نحوه خنک‌کاری، هندسه محفظه احتراق، ثابت نگه داشتن بدنه در دمای مطلوب، نداشتن پدیده خودسوزی و .... پدیده‌هایی هستند که حائز اهمیت می‌باشند.

از طرفی دبی سیال ورودی به موتور تاثیر به‌سزایی در انتقال حرارت از موتور دارد. با افزایش دبی تا حدی سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود. نکته قابل توجه در اینجاست که با توجه به جنس موتور هرچه دمای کارکرد موتور بالاتر باشد، راندمان موتور نیز بالاتر بوده لذا انتخاب دبی ورودی بهینه به موتور نقش مهمی در راندمان خروجی موتور می‌باشد.

از آنجایی که به دست آوردن توزیع حرارتی موتور در سیلندر بدون در نظر گرفتن پدیده جوشش از دقت کمتری برخوردار است، در این پروژه سعی شده است تا با در نظر گرفتن جوشش هسته‌ای توزیع دمای مناسب در دبی‌های متفاوت به دست آید.

در این پایان‌نامه پس از مدل‌کردن راه‌گاه‌های آب داخل سیلندر و سرسیلندر، جریان سیال خنک‌کننده در داخل راه‌گاه‌های آب سیلندر و سرسیلندر شبیه‌سازی شده است، سپس حل جریانی در این مسیر صورت پذیرفته و خروجی‌های لازم جهت تحلیل حرارتی سرسیلندر به دست آمده است. از طرفی دیگر با توجه به مشخصات موتور، نسبت تراکم، کورس پیستون، حجم موتور و ... ضریب انتقال حرارت جابجایی و دمای گازهای داخل سیلندر محاسبه شده است که این نتایج نیز جهت تحلیل حرارتی سرسیلندر به کار رفته‌اند.



## فصل ۲ انتقال حرارت در موتورهای احتراق داخلی

## ۲-۱- مقدمه‌ای بر اهمیت و ضرورت خنک‌کاری

اولین وظیفه سیستم خنک‌کاری از بین بردن قسمتی از حرارتی است که در محفظه‌ی احتراق تولید شده و توسط اجزای موتور مانند پیستون، رینگ پیستون، سرسیلندر و بلوکه جذب می‌شود. این سیستم باید امکان احتراق مناسب را فراهم کرده و مقدار بلوبای را کاهش دهد و امکان عملکرد مناسب سیستم روغن‌کاری موتور را فراهم کند [۱].

دمای گازهای مشتعل در سیلندر موتورهای احتراق داخلی در حدود  $2500\text{K}$  می‌باشد که از دمای ذوب جنس قطعات مختلف مورد استفاده در موتور بالاتر می‌باشد، بنابراین برای جلوگیری از صدمات جدی به موتور می‌بایست گرمای اضافه از موتور دفع شود.

از اشکالاتی که دمای زیاد می‌تواند در موتور ایجاد کند، انبساط ابعادی قطعات در اثر دمای بالا می‌باشد که باعث بهم خوردن انطباق‌ها و تلرانس‌های کارکرد اجزا موتور می‌شود که نتیجه آن سایش و خرابی قطعات خواهد بود.

افزایش دمای دیواره داخلی سیلندر، باعث افزایش دمای فیلم روغن بین رینگ و پیستون و در نتیجه آن، تغییر در ویسکوزیته می‌شود که برای جلوگیری از این پدیده، دمای دیواره داخلی سیلندر که در تماس با گازهای احتراق می‌باشد، می‌بایست زیر  $180$  درجه سانتیگراد نگهداری شود [۲].

در صورت بالا بودن دمای دیواره‌های داخلی موتور، تبادل حرارتی بین مخلوط سوخت و هوا با دیواره سیلندر و محفظه احتراق، می‌تواند باعث اشتعال مخلوط قبل از زمان جرقه شمع شده و در نتیجه باعث بروز پدیده کوبش و به تبع آن آسیب‌های جدی به اجزای موتور شود.

شمع‌ها و همچنین سوپاپ‌ها از جمله قطعاتی هستند که در صورت عدم انجام خنک‌کاری موجب بوجود آمدن پدیده کوبش و خوداشتعالی خواهند شد.

انتقال حرارت بر روی عملکرد موتور و راندمان آن تاثیر مستقیم دارد. برای یک جرم مشخص سوخت، افزایش مقدار حرارت انتقالی به دیواره محفظه احتراق باعث کاهش دمای متوسط گازهای

احتراق و فشار آنها خواهد شد و این امر باعث کاهش قدرت انتقالی به پیستون در هر سیکل شده، لذا توان مخصوص و راندمان، تحت تاثیر مقدار گرمای انتقالی از موتور می‌باشند [۲ و ۳].

با توسعه‌ی فن‌آوری موتور، توان موتورهای مدرن افزایش یافته است و متناظر با آن بار حرارتی وارد بر آن نیز بسیار بالاتر رفته است. در حال حاضر تاکید بیشتری بر روی طراحی سیستم خنک‌کاری می‌شود.

از طرفی دیگر در صورت عدم خنک‌کاری مناسب، پدیده جوشش در مجاری خنک‌کاری ممکن است رخ دهد که می‌تواند باعث کم‌شدن نرخ انتقال حرارت و خرابی قطعات موتور از جمله پیستون‌ها و سوپاپ‌ها یا رینگ‌های موتور شود.

از این‌رو سیستم‌های خنک‌کاری باید در شرایط کاری مختلف و دماهای مختلف موتور دارای راندمان مناسبی باشند. این سیستم‌ها نباید بسیار سرد یا گرم کار کنند تا بتوانند شرایط رانندگی مناسب و مصرف بهینه را فراهم کنند [۴].

## ۲-۲- انتقال حرارت در موتور

انتقال حرارت در موتور از محفظه‌ی احتراق تا سیال خنک‌کننده را می‌توان به چهار گروه زیر

تقسیم کرد:

۱. انتقال حرارت از گازهای داخل سیلندر به بدنه سیلندر، سرسیلندر، پیستون

۲. انتقال حرارت از بدنه سیلندر و سرسیلندر به سیال خنک‌کن

۳. توزیع دما در قسمت‌های مختلف موتور

۴. سیستم‌های خنک‌کاری نوین

## ۲-۲-۱- انتقال حرارت از گازهای داخل سیلندر به بدنه

موضوع انتقال حرارت از گازهای احتراق به دیواره سیلندر یکی از مباحث مهم و پیچیده در تحلیل حرارتی موتور می‌باشد که مورد تحقیق و بررسی زیادی قرار گرفته است.

انتقال حرارت از گازهای داخل سیلندر به دیواره محفظه احتراق و سیلندر به صورت گذرا و ناپایدار بوده و به همین دلیل در یک لایه نازک از دیواره در تماس با گازهای احتراق، دمای نوسانی ایجاد می‌کند که این نوسانات دما بر عملکرد موتور و همچنین افزایش دمای بیشینه قطعات موتور تاثیرگذار می‌باشد.

امواج نوسان دمایی باعث ایجاد شرایط مرزی غیر پایدار در مرز بین گازها و دیواره سیلندر و سرسیلندر می‌شود که عمق انتشار آن در داخل بدنه موتور در یک محدوده کم حدود  $1\text{mm}$  صورت می‌گیرد.

برای بررسی و آنالیز این اثرات یک مدل انتقال حرارت هدایتی یک بعدی ناپایدار در نظر گرفته شد که قابلیت استفاده در دیوارهای لایه ای و همچنین موادی که خواص ترمودینامیکی آنها وابسته به دما هستند را دارد.

بدلیل آنکه انتشار دما در جهت عمود بر سطح بسیار سریعتر از انتشار آن در صفحات موازی می‌باشد لذا در بیشتر تحقیقاتی که نوسانات دمایی در مرز بین گازهای احتراق و دیواره را مدل کرده- اند از مدل یک بعدی انتشار دما استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۶۶ برادیش<sup>۱</sup> [۵] انتقال حرارت هدایتی را با روش‌های عددی حل کرد و این حل را برای محاسبه اثرات گرمای ذخیره شده در دیوار<sup>۲</sup> بر انتقال حرارت و همچنین دمای دیواره استفاده نمود.

شاما<sup>۱</sup> [۶] در سال ۱۹۶۷ این تحلیل را توسعه داده و با استفاده از یک راه حل عددی برای پیش بینی اثرات نوسانات دمایی در عملکرد موتور استفاده کرد.

<sup>1</sup> Bradish

<sup>2</sup> Wall deposits