

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی
گروه مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد
در رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

توسعه کد ترمودینامیکی برای تعیین سرعت سوختن در مخلوط گاز طبیعی - هوا و
گازهای باقی مانده

استاد راهنما

دکتر ابراهیم عبدی اقدم

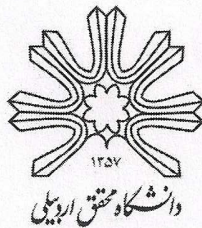
با مشاورت

محمدرضا رنجبر امید

توسط

احسان ناجی

زمستان ۱۳۹۱



توسعه کد ترمودینامیکی برای تعیین سرعت سوختن در مخلوط گاز طبیعی - هوا و گازهای باقی مانده

توسط:

احسان ناجی

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

از دانشگاه محقق اردبیلی

اردبیل - ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر ابراهیم عبدی اقدم (استاد راهنما و رئیس کمیته)..... استادیار

دکتر بهروز میرزایی ضیاپور (داور)..... دانشیار

مهندس محمدرضا رنجبرامید (استاد مشاور)..... مربی

زمستان ۹۱

تعهدنامه‌ی اصالت اثر و رعایت حقوق دانشگاه

تمامی حقوق مادّی و معنوی مترتب بر نتایج، ابتکارات، اختراعات و نوآوری‌های ناشی از انجام این پژوهش، متعلق به **دانشگاه محقق اردبیلی** می‌باشد. نقل مطلب از این اثر، با رعایت مقررات مربوطه و با ذکر نام دانشگاه محقق اردبیلی، نام استاد راهنما و دانشجو بلامانع است.

اینجانب احسان ناجی دانش‌آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده‌ی فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی به شماره‌ی دانشجویی ۸۹۴۴۴۵۳۱۱۵ که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۱۷ از پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود تحت عنوان توسعه کد ترمودینامیکی برای تعیین سرعت سوختن در مخلوط گاز طبیعی- هوا و گازهای باقی‌مانده دفاع نموده‌ام، متعهد می‌شوم که:

- (۱) این پایان‌نامه را قبلاً برای دریافت هیچ‌گونه مدرک تحصیلی یا به عنوان هرگونه فعالیت پژوهشی در سایر دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی و پژوهشی داخل و خارج از کشور ارائه ننموده‌ام.
- (۲) مسئولیت صحت و سقم تمامی مندرجات پایان‌نامه‌ی تحصیلی خود را بر عهده می‌گیرم.
- (۳) این پایان‌نامه، حاصل پژوهش انجام شده توسط اینجانب می‌باشد.
- (۴) در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و مقررات مربوطه و با رعایت اصل امانتداری علمی، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در متن و فهرست منابع و مأخذ ذکر نموده‌ام.
- (۵) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده یا هرگونه بهره‌برداری اعم از نشر کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان‌نامه را داشته باشم، از حوزه‌ی معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی، مجوزهای لازم را اخذ نمایم.
- (۶) در صورت ارائه‌ی مقاله‌ی مستخرج از این پایان‌نامه در همایش‌ها، کنفرانس‌ها، سمینارها، گردهمایی‌ها و انواع مجلات، نام دانشگاه محقق اردبیلی را در کنار نام نویسندگان (دانشجو و اساتید راهنما و مشاور) ذکر نمایم.
- (۷) چنانچه در هر مقطع زمانی، خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن (منجمله ابطال مدرک تحصیلی، طرح شکایت توسط دانشگاه و ...) را می‌پذیرم و دانشگاه محقق اردبیلی را مجاز می‌دانم با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات مربوطه رفتار نماید.

نام و نام خانوادگی دانشجو: احسان ناجی

امضا

تاریخ

تقدیم بہ پدر و مادر

کہ از نگاہشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

سپاس خدای را که سخنوران، دستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بکاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تائین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عضو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند سپاسگذارم. همچنین از استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر ابراهیم عبدی اقدم که بارها بهمانی هایشان سختی های راه انجام این پایان نامه را بر من هموار نمودند کمال تشکر را دارم. همچنین از دوستان عزیزم، آقایان مهران حاکی، مرتضی ورمزیار، حامد خندان پور، هادی منادی نیا و سامان صراف پور که همواره حضورشان باعث دلگرمی من بوده است بی اندازه سپاسگذارم.

| | |
|--|------------|
| نام خانوادگی دانشجو: ناجی | نام: احسان |
| عنوان پایان نامه: توسعه کد ترمودینامیکی برای تعیین سرعت سوختن در مخلوط گاز طبیعی- هوا و گازهای باقی مانده | |
| استاد راهنما: دکتر ابراهیم عبدی اقدم با مشاورت: مهندس محمدرضا رنجبر امید | |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: تبدیل انرژی دانشگاه: محقق اردبیلی دانشکده: فنی و مهندسی تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۱ تعداد صفحه: ۹۶ | |
| واژه‌های کلیدی: سرعت سوختن ورقه‌ای، گاز طبیعی، گازهای رقیق کننده، کد ترمودینامیکی، بمب حرارتی | |
| چکیده: کد ترمودینامیکی موجود برای محاسبه سرعت سوختن ورقه‌ای از جمله کدهای معتبر و قوی در این زمینه بوده که در بسیاری از منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مطالعات تازه با شرایط اولیه جدید، استفاده از سوخت‌های ترکیبی و استفاده از گازهای باقی مانده و رقیق کننده‌ها به عنوان افزودنی در مواد اولیه ملاحظاتی را در کد می‌طلبد. همچنین پیدایش روش‌های جدید برای محاسبه خواص ترمودینامیکی در محدوده‌های دمایی مختلف از طریق برازش منحنی به داده‌های تجربی، اعمال روش‌های سعی و خطای جدید برای کوتاه شدن زمان پردازش کد و روش‌های جدید برای بررسی شرایط تعادلی مخلوط سوخته، نیاز به ارتقاء کدهای موجود به جهت افزایش کارایی آن‌ها را ضروری جلوه می‌دهد. در این پایان نامه کد مربوطه برای پوشش دادن شرایطی ارتقاء داده شد که در آن از گازهای باقی مانده از آزمایشات قبلی و رقیق کننده‌ها با درصد‌های مختلف در کنار مخلوط سوخت با هوا استفاده شد. همچنین به منظور بررسی کارایی کد ترمودینامیکی ارتقاء یافته، داده‌های تجربی وسیعی با انجام آزمایشات در یک بمب کروی حجم ثابت با حجم ۴۱۶ سانتی متر مکعب با استفاده از مخلوط‌های گاز طبیعی- هوا و گازهای باقیمانده در شرایطی با فشارهای اولیه ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ بار، دمای اولیه ۳۶۹ کلوین، نسبت هم‌ارزی ۰/۹ تا ۱/۱ و مقدار گازهای رقیق کننده از ۰ تا ۱۵ درصد حجمی استخراج شد و به عنوان ورودی به کد ترمودینامیکی اعمال و سرعت سوختن محاسبه گردید. در نهایت آنالیز خطا برای سرعت سوختن حاصله انجام شد و ستون‌های خطای مربوطه رسم گردید. نتایج حاصله، انحراف بیشینه ۳/۳٪ در نتایج را نشان داد. همچنین دو رابطه همبستگی جدید برای سرعت سوختن ورقه‌ای یکی بر حسب نسبت هم‌ارزی و دیگری بر حسب کسر مولی گازهای رقیق کننده بدست آمد که حداکثر انحراف نتایج بدست آمده از رابطه همبستگی با نتایج داده‌های تجربی ۳/۸٪ برآورد شد. همچنین به منظور معتبرسازی، نتایج کار حاضر با کار لیاو و همکاران مقایسه و اختلاف ۴/۵٪ مشاهده گردید. نتایج حاصل از کار تجربی، کاهش سرعت سوختن ورقه‌ای را در اثر افزایش فشار اولیه از ۱/۵ به ۲، از ۲ به ۳ و از ۳ به ۴ بار به ترتیب به میزان ۲۳٪، ۷/۲٪ و ۱۸/۲٪ نشان می‌دهد. همچنین افزایش درصد حجمی گازهای رقیق کننده با گام ۵٪ از ۰ تا ۱۵٪ به‌طور مثال در فشار اولیه ۱/۵ بار باعث کاهش سرعت سوختن ورقه‌ای به ترتیب به میزان ۱۶/۴۶٪، ۱۱/۸۶٪ و ۲۰/۰۴٪ گردید. | |

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل ۱: مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته |
| ۲ | ۱-۱- برنامه‌نویسی کامپیوتر و تاریخچه آن |
| ۴ | ۱-۲- گاز طبیعی و تاریخچه استفاده از آن در خودروها |
| ۶ | ۱-۳- هدف و ضرورت تحقیق |
| ۸ | ۱-۴- سرعت سوختن ورقه‌ای آدیاباتیک |
| ۱۰ | ۱-۵- سرعت سوختن آشفته |
| ۱۲ | ۱-۶- ساختار جبهه شعله |
| ۱۳ | ۱-۷- پیشینه تحقیق |
| ۱۵ | ۱-۸- چشم‌اندازی به فصل‌های آتی |
| ۱۶ | فصل ۲: مواد و روش تحقیق |
| ۱۷ | ۲-۱- مقدمه |
| ۱۷ | ۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری سرعت سوختن ورقه‌ای |
| ۱۸ | ۲-۲-۱- روش عکس‌برداری مستقیم |
| ۱۹ | ۲-۲-۲- روش عکس‌برداری شلیرن و سایه‌نگار |
| ۲۱ | ۲-۲-۳- روش تداخل‌سنجی |
| ۲۳ | ۲-۲-۴- روش حباب صابون |
| ۲۴ | ۲-۲-۵- روش لوله استوانه‌ای |
| ۲۵ | ۲-۲-۶- روش جریان مخالف |
| ۲۶ | ۲-۲-۷- روش مشعل بنسون |
| ۲۷ | ۲-۲-۸- روش شعله مسطح |
| ۲۸ | ۲-۲-۹- روش شار حرارتی |
| ۲۹ | ۲-۲-۱۰- روش بمب حرارتی کرووی |
| ۲۹ | ۲-۳- گازهای رقیق‌کننده، مزایا و معایب |
| ۳۱ | ۲-۴- مدل‌های ترمودینامیکی احتراق |
| ۳۳ | ۲-۵- تجهیزات آزمایشگاهی |
| ۳۳ | ۲-۵-۱- بمب حرارتی کرووی |
| ۳۴ | ۲-۵-۲- منبع گاز طبیعی |

| | | | |
|----|-------|----------|---|
| ۳۴ | ..... | ۳-۵-۲ | کمپرسور هوا |
| ۳۴ | ..... | ۴-۵-۲ | روتامتر گاز |
| ۳۵ | ..... | ۵-۵-۲ | سیستم خلاءساز |
| ۳۵ | ..... | ۶-۵-۲ | سیستم گرم کن |
| ۳۵ | ..... | ۷-۵-۲ | ترموکوپل |
| ۳۵ | ..... | ۸-۵-۲ | سیستم جرقه زنی |
| ۳۶ | ..... | ۹-۵-۲ | ترنسدیوسرهای فشار مطلق و فشار دینامیک |
| ۳۶ | ..... | ۱۰-۵-۲ | سیستم ADC |
| ۳۷ | ..... | ۶-۲ | نحوه انجام آزمایش |
| ۳۸ | ..... | ۷-۲ | محاسبه فشارهای جزئی گاز طبیعی و ملاحظات نقطه شبنم |
| ۴۲ | ..... | ۸-۲ | کد کامپیوتری |
| ۴۳ | ..... | ۱-۸-۲ | معرفی زیربرنامه‌ها و توابع برنامه |
| ۴۳ | ..... | ۱-۱-۸-۲ | زیربرنامه cvadft |
| ۴۴ | ..... | ۲-۱-۸-۲ | زیربرنامه equal pressure |
| ۴۶ | ..... | ۳-۱-۸-۲ | زیربرنامه mix |
| ۴۷ | ..... | ۴-۱-۸-۲ | زیربرنامه PatGivTVM |
| ۴۸ | ..... | ۵-۱-۸-۲ | زیربرنامه rset |
| ۴۸ | ..... | ۶-۱-۸-۲ | زیربرنامه mfrac |
| ۵۱ | ..... | ۷-۱-۸-۲ | زیربرنامه eqcos |
| ۵۳ | ..... | ۸-۱-۸-۲ | زیربرنامه eqcom |
| ۵۵ | ..... | ۹-۱-۸-۲ | زیربرنامه smothing |
| ۵۵ | ..... | ۱۰-۱-۸-۲ | زیربرنامه Pspark |
| ۵۶ | ..... | ۱۱-۱-۸-۲ | زیربرنامه CalcUI |
| ۵۷ | ..... | ۱۲-۱-۸-۲ | تابع Poly |
| ۵۹ | ..... | ۱۳-۱-۸-۲ | تابع enthalpy |
| ۵۹ | ..... | ۱۴-۱-۸-۲ | تابع entropy |
| ۶۰ | ..... | ۱۵-۱-۸-۲ | تابع gama |
| ۶۰ | ..... | ۱۶-۱-۸-۲ | تابع nmoles |

- ۶۰..... qsolve تابع ۱۷-۱-۸-۲
- ۶۱..... dednsity تابع ۱۸-۱-۸-۲
- ۶۱..... مراحل الگوریتم برنامه ۲-۸-۲

فصل ۳: استخراج نتایج تجربی و تحلیل آن‌ها

- ۶۷
- ۶۸..... ۱-۳- مقدمه
- ۶۸..... ۲-۳- تحلیل خطا در داده‌های تجربی
- ۷۲..... ۳-۳- رابطه همبستگی سرعت سوختن ورقه‌ای، دما و فشار
- ۷۶..... ۴-۳- معبرسازی نتایج تجربی
- ۷۷..... ۵-۳- تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای نسبت به شعاع بخش سوخته
- ۷۹..... ۶-۳- اثر گازهای رقیق‌کننده بر سرعت سوختن ورقه‌ای
- ۸۳..... ۷-۳- اثر نسبت هم‌ارزی بر سرعت سوختن ورقه‌ای
- ۸۵..... ۸-۳- تغییرات فشار بر حسب زمان
- ۸۶..... ۹-۳- اثر فشار اولیه بر سرعت سوختن ورقه‌ای

فصل ۴: بحث و نتیجه‌گیری

- ۸۷
- ۸۸..... ۱-۴- نتیجه‌گیری
- ۸۹..... ۲-۴- پیشنهادات برای کارهای آینده
- ۹۳..... منابع

فهرست اشکال

- ۸..... شکل (۱-۱) انتشار یک‌بعدی آزاد شعله
- ۱۱..... شکل (۲-۱) سرعت سوختن در حالت آشفته
- ۱۲..... شکل (۳-۱) پروفیل دمایی در جبهه شعله
- ۱۳..... شکل (۴-۱) پروفیل‌های دما و سرعت و نسبت نواحی
- ۱۸..... شکل (۱-۲) نمای کلی روش عکس‌برداری مستقیم

- شکل (۲-۲) نمونه ای از تصاویر گرفته شده توسط روش عکس برداری مستقیم..... ۱۹
- شکل (۳-۲) نمای کلی روش عکس برداری شلیرن..... ۲۰
- شکل (۴-۲) نمونه تصاویر ثبت شده توسط روش شلیرن..... ۲۱
- شکل (۵-۲) نمونه تصویر ثبت شده توسط روش سایه نگار..... ۲۱
- شکل (۶-۲) دو نمونه استفاده از روش تداخل سنجی..... ۲۲
- شکل (۷-۲) نمونه ای از تصاویر ثبت شده توسط روش تداخل سنجی..... ۲۳
- شکل (۸-۲) نمای کلی روش حباب صابون..... ۲۳
- شکل (۹-۲) نمای کلی روش لوله استوانه ای..... ۲۴
- شکل (۱۰-۲) نمای کلی روش جریان مخالف..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲) نمای کلی شعله بونسن..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲) نمای کلی روش شعله مسطح..... ۲۷
- شکل (۱۳-۲) نمای کلی روش شار حرارتی..... ۲۸
- شکل (۱۴-۲) نمونه تصاویر بدست آمده در روش بمب حرارتی کروی..... ۲۹
- شکل (۱۵-۲) طرح کلی بمب حرارتی و تجهیزات آزمایشگاهی..... ۳۷
- شکل (۱۶-۲) مدل احتراق دو منطقه ای، نواحی سوخته، نسوخته و در حال سوختن..... ۴۵
- شکل (۱۷-۲) تغییرات شعاع بخش سوخته در طول احتراق..... ۶۴
- شکل (۱۸-۲) فلوجارت تعیین حجم اولیه احتراق..... ۶۵
- شکل (۱۹-۲) فلوجارت تعیین سرعت سوختن ورقه ای..... ۶۶
- شکل (۱-۳) سرعت سوختن ورقه ای با در نظر گرفتن ستون های خطا..... ۷۰
- شکل (۲-۳) تغییرات فشار بر حسب زمان برای تکرار یک آزمایش..... ۷۱
- شکل (۳-۳) تغییرات سرعت سوختن ورقه ای بر حسب فشار بمب برای تکرار یک آزمایش..... ۷۱
- شکل (۴-۳) مقایسه سرعت سوختن ورقه ای بدست آمده از داده های تجربی و رابطه همبستگی..... ۷۵
- شکل (۵-۳) مقایسه نتایج بدست آمده با کار لیاو و همکاران..... ۷۷
- شکل (۶-۳) تغییرات سرعت سوختن ورقه ای نسبت به شعاع بخش سوخته در نسبت هم ارزی ۰/۹۵..... ۷۸
- شکل (۷-۳) تغییرات سرعت سوختن ورقه ای نسبت به شعاع بخش سوخته در نسبت هم ارزی ۱/۰۵..... ۷۸
- شکل (۸-۳) تغییرات سرعت سوختن ورقه ای بر حسب فشار، در فشار اولیه ۱/۵ بار..... ۸۰

- شکل (۳-۹) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، در فشار اولیه ۲ بار..... ۸۰
- شکل (۳-۱۰) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، در فشار اولیه ۴ بار..... ۸۱
- شکل (۳-۱۱) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، در فشار اولیه ۳ بار و نسبت هم‌ارزی ۰/۹..... ۸۱
- شکل (۳-۱۲) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، در فشار اولیه ۳ بار و نسبت هم‌ارزی ۱/۱..... ۸۲
- شکل (۳-۱۳) تغییرات نسبت سرعت سوختن ورقه‌ای در حضور گازهای رقیق‌کننده به سرعت سوختن ورقه‌ای بدون حضور گازهای رقیق‌کننده..... ۸۳
- شکل (۳-۱۴) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف..... ۸۴
- شکل (۳-۱۵) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار مربوط به کار متقارچی و همکاران..... ۸۵
- شکل (۳-۱۶) تغییرات فشار نسبت به زمان در حضور گازهای رقیق‌کننده..... ۸۶
- شکل (۳-۱۷) تغییرات سرعت سوختن ورقه‌ای بر حسب فشار، به ازای فشارهای اولیه مختلف..... ۸۷
- شکل (۳-۱۸) تغییرات سرعت سوختن در فشارهای اولیه مختلف در یک فشار احتراقی خاص..... ۸۸

فهرست جداول

- جدول (۲-۱) ترکیب گاز طبیعی شهر اردبیل..... ۳۹
- جدول (۲-۲) فشارهای جزئی گاز طبیعی، هوا و گازهای رقیق‌کننده در نسبت هم‌ارزی ۱..... ۴۰
- جدول (۲-۳) فشارهای جزئی گاز طبیعی، هوا و گازهای رقیق‌کننده در فشار اولیه ۳ بار..... ۴۱
- جدول (۲-۴) فشارهای جزئی و دماهای نقطه شبنم بخار آب موجود در محصولات..... ۴۲
- جدول (۳-۱) مقادیر u_{10} ، α و β برای فشار ۱/۵ بار، دمای ۳۶۹ کلوین، نسبت هم‌ارزی ۱ درصدی مختلف گازهای رقیق‌کننده..... ۷۳
- جدول (۳-۲) مقادیر u_{10} ، α و β در شرایط فشار اولیه ۳ بار، دمای ۳۶۹ کلوین با حضور ۵٪ از گازهای رقیق‌کننده در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۹ تا ۱..... ۷۴

فهرست علائم اختصاری

| | |
|------------|--|
| u_g | سرعت گازهای نسوخته |
| u_l | سرعت سوختن ورقه‌ای |
| T_u | دمای مخلوط نسوخته |
| ρ_u | چگالی مخلوط نسوخته |
| P_u | فشار مخلوط نسوخته |
| ϕ | نسبت هم‌ارزی |
| u' | شدت آشفته‌گی |
| u_t | سرعت سوختن آشفته |
| A_t | سطح شعله آشفته |
| A | سطح عمود بر جهت جریان |
| \dot{m} | شار جرمی ورودی به سطح جبهه شعله |
| v | مولفه عمودی سرعت |
| y_{NG} | کسر مولی گاز طبیعی در مخلوط سوخت و هوا |
| n_{NG} | تعداد مول‌های گاز طبیعی |
| n_{tot} | تعداد مول کل |
| P_{NG} | فشار جزئی گاز طبیعی |
| P_{tot} | فشار کل |
| P_{air} | فشار جزئی هوا |
| X_{rg} | درصد حجمی گازهای رقیق‌کننده |
| P_{H_2O} | فشار جزئی بخار آب |
| n_{H_2O} | تعداد مول‌های بخار آب |
| U_p | انرژی درونی محصولات |
| H_{Tp} | آنتالپی محصولات در دمای مشخص |
| n_p | تعداد مول محصولات |

| | |
|----------------|--|
| R | ثابت جهانی گازها |
| T_p | دمای محصولات |
| dT | گام حدس دما |
| P_{eq} | فشار معادل |
| P_u | فشار مخلوط نسوخته |
| V_u | حجم مخلوط نسوخته |
| P_b | فشار مخلوط سوخته |
| V_b | حجم مخلوط سوخته |
| V_{tot} | حجم کل |
| $T_{u,eq}$ | دمای مخلوط نسوخته پس از معادل سازی فشار |
| γ_u | نسبت گرماهای ویژه مخلوط نسوخته |
| $V_{u,eq}$ | حجم مخلوط نسوخته پس از معادل سازی فشار |
| $U_{u,eq}$ | انرژی درونی مخلوط نسوخته پس از معادل سازی فشار |
| $H_{T_{u,eq}}$ | آنتالپی مخلوط نسوخته پس از معادل سازی فشار |
| $n_{u,eq}$ | تعداد مول مخلوط نسوخته پس از معادل سازی فشار |
| $T_{b,eq}$ | دمای مخلوط سوخته پس از معادل سازی فشار |
| $V_{b,eq}$ | حجم مخلوط سوخته پس از معادل سازی فشار |
| $U_{b,eq}$ | انرژی درونی مخلوط سوخته پس از معادل سازی فشار |
| $H_{T_{b,eq}}$ | آنتالپی مخلوط سوخته پس از معادل سازی فشار |
| $n_{b,eq}$ | تعداد مول مخلوط سوخته پس از معادل سازی فشار |
| m_1 | جرم بخش سوخته در گام نخست |
| m_2 | جرم بخش سوخته در گام دوم |
| m_3 | جرم بخش سوخته ترکیبی جدید |
| V_1 | حجم بخش سوخته در گام نخست |
| V_2 | حجم بخش سوخته در گام دوم |
| V_3 | حجم بخش سوخته ترکیبی جدید |

| | |
|------------|---|
| T_1 | دمای بخش سوخته در گام نخست |
| U_1 | انرژی درونی بخش سوخته در گام نخست |
| H_{T_1} | آنتالپی بخش سوخته در گام نخست |
| n_1 | تعداد مول بخش سوخته در گام نخست |
| T_2 | دمای بخش سوخته در گام دوم |
| U_2 | انرژی درونی بخش سوخته در گام دوم |
| H_{T_2} | آنتالپی بخش سوخته در گام دوم |
| n_2 | تعداد مول بخش سوخته در گام دوم |
| U_3 | انرژی درونی بخش سوخته ترکیبی جدید |
| $mf(1)$ | کسر مولی سوخت هیدروکربنی |
| $mf(2)$ | کسر مولی O_2 در سمت واکنش دهنده‌ها |
| $mf(3)$ | کسر مولی N_2 در سمت واکنش دهنده‌ها |
| $mf(4)$ | کسر مولی CO در سمت محصولات |
| $mf(5)$ | کسر مولی CO_2 در سمت محصولات |
| $mf(6)$ | کسر مولی O_2 در سمت محصولات |
| $mf(7)$ | کسر مولی H_2 در سمت محصولات |
| $mf(8)$ | کسر مولی H_2O در سمت محصولات |
| $mf(9)$ | کسر مولی OH در سمت محصولات |
| $mf(10)$ | کسر مولی H در سمت محصولات |
| $mf(11)$ | کسر مولی O در سمت محصولات |
| $mf(12)$ | کسر مولی NO در سمت محصولات |
| $mf(13)$ | کسر مولی N_2 در سمت محصولات |
| $r(1)$ | نسبت تعداد اتم‌های کربن به تعداد اتم‌های هیدروژن |
| $r(2)$ | نسبت تعداد اتم‌های اکسیژن به تعداد اتم‌های هیدروژن |
| $r(3)$ | نسبت تعداد اتم‌های نیتروژن به تعداد اتم‌های هیدروژن |
| X_{mole} | کسر مولی سوخت گاز طبیعی در مخلوط دو سوخت |

| | |
|---------------------|--|
| Y_{CC} | تعداد مول‌های صحیح شیمیایی اکسیژن به ازای یک مول سوخت |
| Y_{min} | حداقل تعداد مول O_2 مجاز برای واکنش |
| X | تعداد مول‌های CO در حالت مخلوط غنی |
| K_i | ثابت‌های تعادل شیمیایی |
| $d(n, k, m)$ | ضرایب چند جمله‌ای مربوط به محاسبه ثابت‌های تعادل |
| np | پارامتر مربوط به روش هموارسازی داده‌های خام فشار |
| $nssm$ | پارامتر مربوط به وضعیت سیگنال جرقه |
| $b(1, jp, js, j)$ | ضرایب چند جمله‌ای مربوط به محاسبه گرمای ویژه |
| $b(2, jp, js, j)$ | ضرایب چند جمله‌ای مربوط به محاسبه آنتالپی ویژه |
| $b(3, jp, js, j)$ | ضرایب چند جمله‌ای مربوط به محاسبه آنتروپی ویژه |
| \bar{h}_i | آنتالپی ویژه گونه i ام |
| $\bar{h}_{f,298}^0$ | آنتالپی تشکیل در شرایط مرجع |
| \bar{h}_T | آنتالپی ویژه در دمای مشخص |
| \bar{s}_T | آنتروپی ویژه در دمای مشخص |
| \bar{s}_{298}^0 | آنتروپی ویژه در شرایط مرجع |
| C_p | گرمای ویژه در فشار ثابت |
| C_v | گرمای ویژه در حجم ثابت |
| ing | پارامتر مربوط به حالتی که گازهای رقیق‌کننده فقط ترکیب نیتروژن و دی‌اکسیدکربن باشند |
| v_{b1} | حجم سوخته اولیه |
| r_{b1} | شعاع سوخته اولیه |
| P_{cut} | فشار اولین برش از داده‌ها پس از احتراق |
| P_r | فشار اولیه واکنش‌دهنده‌ها |
| P_p | فشار محصولات با فرض احتراق در حجم ثابت |
| v_{b2} | حجم سوخته در گام دوم |
| P_2 | فشار گام دوم |
| ΔP | خطای تنظیم فشارهای جزئی |

| | |
|------------|--|
| V_{bomb} | حجم بمب |
| MW_{NG} | جرم مولکولی گاز طبیعی |
| MW_{air} | جرم مولکولی هوا |
| α_s | نسبت سوخت به هوا در حالت استوکیومتری |
| α | ثابت مربوط به کسر دما در رابطه همبستگی سرعت سوختن ورقه‌ای |
| β | ثابت مربوط به کسر فشار در رابطه همبستگی سرعت سوختن ورقه‌ای |
| u_{10} | ثابت مربوط به رابطه همبستگی سرعت سوختن ورقه‌ای |
| S | مجموع مربعات خطا |

فصل اول

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱- برنامه‌نویسی کامپیوتر و تاریخچه آن

ظهور اولین زبان‌های برنامه‌نویسی به قبل از رایانه‌های مدرن باز می‌گردد. قرن ۱۹ دستگاه‌های نساجی و متون نوازنده پیانو قابلیت برنامه‌نویسی داشت که امروزه به عنوان مثال‌هایی از زبان‌های برنامه‌نویسی با حوزه مشخص شناخته می‌شوند. با شروع قرن بیستم، پانچ کارت‌ها داده‌ها را کدگذاری کردند و پردازش مکانیکی را هدایت کردند. در دهه ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰، حساب لاندای آلونزو چرچ^۱ و ماشین تورینگ آلن تورینگ^۲ مفاهیم ریاضی بیان الگوریتم‌ها را فراهم کردند که حساب لاندای همچنان در طراحی زبان مؤثر است [۳ و ۲]. در دهه ۱۹۴۰، اولین رایانه‌های دیجیتال که توسط برق تغذیه می‌شدند ایجاد شدند. اولین زبان برنامه‌نویسی سطح بالای طراحی شده برای کامپیوتر، پلانکالکول^۳ بود، که بین سال‌های ۱۹۴۳ و ۱۹۴۵ توسط کنراد زوس^۴ برای کامپیوتر Z3 آلمان طراحی شد [۴].

برنامه‌نویسی رایانه، به گونه‌ای که ما امروز می‌شناسیم در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی شروع شد و در دهه ۶۰ میلادی به سرعت رشد نمود. در آن دوران، برنامه‌نویسی یک کار تخصصی و مهندسی تلقی نمی‌شد زیرا رایانه‌ها بسیار محدود بودند و کارهای ساده‌ای انجام می‌دادند. اغلب اینگونه بود که افراد بسیار سریعتر از رایانه‌ها پاسخ محاسبات ریاضی را می‌یافتند. لذا برنامه‌نویسی برای چنین دستگاه‌هایی چندان ارزش و اهمیت نداشت و اولین برنامه‌ها فقط چند دستور ساده متوالی بودند. پس از اجرای این دستورها، رایانه باید از نو راه‌اندازی می‌شد تا برای اجرای دوباره برنامه آماده شود. کم‌کم سخت‌افزار متحول شد و رایانه‌ها قدرتمندتر و کارآمدتر شدند اما به همان نسبت، تولید برنامه برای آن‌ها دشوار گشت، به طوری که برنامه‌های ساده اولیه، مشکل جدی بر سر راه کاربری رایانه محسوب می‌شدند. سپس تلاش‌هایی صورت گرفت تا برنامه‌های کارآمدتری نوشته شود. اما طبق یک قانون کلی، پیچیدگی نرم‌افزار بیشتر و بیشتر می‌گردد تا جایی که دیگر انسان نمی‌تواند آن را مدیریت کند و از همان جا هرج و مرج شروع می‌شود.

به زودی نهضت همگانی صورت گرفت تا همکاری برای مدیریت پیچیدگی و کارایی برنامه‌ها یافت شود. سرانجام در اواخر دهه ۶۰ «برنامه‌نویسی ساخت‌یافته»^۵ به عنوان راه حل پذیرفته شد. برنامه‌نویسی

1- Alonzo Church

2- Alan Turing

3 - Plankalkul

4 - Kunrad Zuse

5- Structural programming

ساخت یافته امکان می‌داد که برنامه به چند تابع تقسیم شود و چند نفر به طور همزمان کار تولید نرم‌افزار را پیش ببرند و همین امر سبب افزایش سرعت تولید نرم‌افزار و کاهش خطاهای برنامه‌نویسی گردید و برنامه‌های بزرگ و مفید ساخته شدند. برنامه‌هایی که در ابتدا با این روش ایجاد شدند چیزی بین ۱۰ تا ۲۰ هزار خط کد داشتند، از ساختمان داده کوچکی بهره می‌جستند و الگوریتم‌های ساده‌ای در آن‌ها به کار می‌رفت. با استفاده از برنامه‌نویسی ساخت یافته به راحتی می‌شد چنین برنامه‌ای را مدیریت کرد. برنامه‌ها آرام‌آرام به قصد بهبود کارایی حجیم‌تر شدند. الگوریتم‌های پیشرفته‌ای به کار گرفته شد و ساختمان داده پیچیده‌تری در ترکیب برنامه استفاده شد. برنامه‌نویسی ساخت یافته دیگر نمی‌توانست از پس کدهای طولانی چنین برنامه‌هایی بر بیاید (سیستم عامل ویندوز *NT* بیش از ۱۰ میلیون خط کد دارد).

به نظر می‌رسید که روش دیگری لازم بود تا تولیدکنندگان نرم‌افزار را از دست متغیرهای فراوان و توابع طولانی و سرگیجه‌آور خلاص کند. بر اساس این تفکر بود که «برنامه‌نویسی شیء‌گرا»^۱ پیش کشیده شد. تفکر شیء‌گرا تقریباً همزمان با تفکر ساخت یافته مطرح شد اما فقط برای طراحی برنامه استفاده می‌شد. پس از عاجز ماندن برنامه‌نویسی ساخت یافته، شیء‌گرایی در برنامه‌نویسی هم استفاده شد. حال برنامه‌نویسان می‌توانستند در برنامه به پانزده شیء فکر کنند که این اشیاء با چهل پیام مشخص با هم ارتباط داشتند، حال آن‌که همین برنامه اگر به سبک ساخت یافته ایجاد می‌شد می‌بایست به صد متغیر، بیست ثابت، ششصد تابع و غیره فکر کرد [۱]. از دهه ۵۰ تا کنون شاهد پیدایش زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف و تکامل آن‌ها هستیم. مشکل است که مشخص کنیم کدام زبان برنامه‌نویسی بیشتر مورد استفاده است. یک زبان ممکن است زمان بیشتری از برنامه‌نویس بگیرد، زبان دیگر ممکن است خطوط بیشتری داشته باشد، و دیگری ممکن است زمان بیشتری از پردازنده را مصرف کند. برخی زبان‌ها برای کاربردهای خاص بسیار محبوبند. برای مثال *Cobol* همچنان در مراکز داده متحد، غالباً روی کامپیوترهای بزرگ توانا است، *Fortran* در مهندسی برنامه‌های کاربردی، *C* در سیستم‌های عامل و بقیه زبان‌ها معمولاً برای نوشتن انواع دیگر برنامه‌ها کاربرد دارند. در آخر باید توجه داشت که در عصر حاضر، استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی برای سهولت و تسریع در روند محاسبات امری اجتناب‌ناپذیر بوده و آشنایی با یک یا دو زبان برنامه‌نویسی ضروری است.