دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

مدلسازی عددی جریان دو فازی داخل سیلندر با استفاده از مدل توربولانسی تنشهای جبری (ASM)

علی طیبی

استاد راهنما

دکتر حسن خالقی

تابستان ۱۳۸۷

بسم الله الرحمن الرحیم

ناچیز است ولی

تقدیم به

خانوادۀ از جان بهترم

تقدیر و تشکر

منت خدای را عز و وجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون برمی‌آید مفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

نخست، سپاس بیکران خدای را که نعمت زندگی کردن به من عطا فرمود. پس از آن از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حسن خالقی تشکری ویژه دارم چرا که به معنای واقعی کلمه، حق استادی را بر من تمام کردند. راهنماییهای ارزندۀ ایشان نه تنها در راه علم بلکه در راه زندگی همیشه برای من ارزشمند بوده است. از اساتید محترم بخش، همچنین از اساتید بزرگواری که زحمت مطالعه و داوری این تحقیق را متقبل شدند نیز کمال تشکر را دارم. از آقای امیر امیدوار که در این مدت از کمکها، راهنماییها و توصیه‌های ایشان استفاده کردم نیز تشکر می‌کنم. در پایان از همه دوستان و آشنایانی که مرا در انجام این تحقیق به هر طریق ممکن یاری کرده‌اند قدردانی می‌کنم.

چکیده:

جریان داخل سیلندر در موتورهای احتراق داخلی در حالت کلی سه بعدی، غیر دائم و مغشوش است. برای تحلیل و بررسی جریان داخل سیلندر می‌بایست معادلات بقای حاکم بر جریان حل شوند. بخشی از جریان داخل سیلندر به علت پاشش اسپری سوخت مایع جریانی دوفازی است. در جریانهای دو فازی گاز-مایع مانند جریان اسپری، ذرات فاز پراکنده بر تولید و میرایی توربولانس فاز گازی تأثیر گذارند. در این تحقیق به نحوهٔ بکارگیری و اصلاح مدلهای توربولانسی مرسوم برای شبیه سازی جریانهای دو فازی پراکنده گاز-مایع پرداخته شده است. مدلهای توربولانسی بکار گرفته شده عبارتند از: دو مدل تنش جبری رینولدز(ASM)، مدل $RNG\,k-\varepsilon$ و مدل $RNG\,k-\varepsilon$ اصلاح شده. در تحقیق حاضر شبیه سازی جریان داخل سیلندر در مرحلهٔ تراکم انجام شده است. از آنجاییکه میدان جریان سیال در نزدیکیهای نقطهٔ مرگ بالا (TDC) نقش بسیار مهمی در چگونگی فرآیند احتراق دارد پس سعی شده که خصوصیات میدان جریان در این نقطه و نزدیکیهای آن تا حد امکان تشریح شود.

به فرآیند اصلاح مدلهای توربولانسی به علت حضور فاز پراکنده در فاز پیوسته در جریانهای دو فازی مدولاسیون توربولانس گفته می‌شود. این پدیده نیز در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفت تا الگوی جریانی هر چه نزدیکتر به واقعیت حاصل گردد. مدولاسیون توربولانس بسته به شرایط هم می‌تواند توربولانس محیط را تقویت و هم می‌تواند آن را تضعیف کند. در این تحقیق ملاحظه شد که علیرغم فعال بودن هر دو مود مدولاسیون (مود تولید و استهلاک)، اثر کلی آن استهلاک توربولانس محیط است. همچنین ملاحظه شد که سرعت فاز پراکنده نیز عاملی تعیین کننده در فعال شدن مودهای مدولاسیون است. علاوه بر آن مشاهده شد که اثرپذیری مدلهای مختلف توربولانسی از مدولاسیون توربولانس متفاوت است بنابراین تعیین مدل مدولاسیون سازگار با یک مدل توربولانسی نیز موضوع مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. با مقایسهٔ مدلهای مختلف توربولانسی مشاهده شد که نتایج مدلهای تک فازی $RNG\,k-\varepsilon$ و تنش جبری لاملی۹۵ تا حد زیادی مشابه‌اند. همچنین نقاط ضعف مدل $k-\varepsilon$ نیز بدلیل طبیعت ایزوتروپ آن در مناطقی که غیر ایزوتروپی توربولانس بالاست مشاهده گردید. عملکرد منطقی‌تر مدل $RNG\,k-\varepsilon$ نیز در بعضی موارد مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: جریان دو فازی، جریان داخل سیلندر، مدل توربولانسی تنش جبری رینولدز، مدولاسیون توربولانس، مدل $RNG\,k-\varepsilon$

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱ **مقدمه** **۱**

فصل ۲ **معادلات حاکم** **۶**

۲-۱- مقدمه **۶**

۲-۲- معادلات بقای فاز گاز[۹] **۶**

۲-۲-۱- معادلهٔ پیوستگی ۶

۲-۲-۲- معادلات بقای مومنتم ۷

۲-۲-۳- معادلهٔ بقاء انرژی ۹

۲-۲-۴- معادلهٔ بقاء جرم بخار سوخت ۱۰

۲-۲-۵- معادلهٔ انرژی جنبشی توربولانس (k) ۱۰

۲-۲-۶- معادلهٔ نرخ اتلاف انرژی جنبشی توربولانس (ε) ۱۰

۲-۳- معادلهٔ کلی انتقال **۱۱**

۲-۳-۱- انتقال سیستم مختصات ۱۲

۲-۳-۱-۱-ناحیهٔ انقباضی-انبساطی ۱۲

۲-۳-۱-۲-ناحیهٔ انتقالی ۱۴

۲-۴- معادلات فاز مایع[۹] **۱۵**

۲-۴-۱- معادلات مسیر ۱۵

۲-۴-۲- معادلات حرکت و اثرات توربولانس فاز گاز ۱۶

۲-۴-۳- معادلات تغییرات جرم و انرژی فاز مایع ۱۷

۲-۴-۴- مدل اتمایزیشن ۱۷

۲-۴-۵- معادلات شکست قطرات ۲۰

۲-۴-۶- بررسی پدیدهٔ برخورد و بهم پیوستگی قطرات ۲۴

۲-۴-۶-۱ توصیف پدیدهٔ برخورد از نظر اورکه و برکو ۲۵

۲-۴-۶-۲ مدل نمودن اثرات متقابل قطره، برخورد و بهم پیوستگی ۲۷

۲-۵- معادلات کمکی **۳۳**

۲-۵-۱- معادلات کمکی فاز گاز ۳۳

۲-۵-۲- معادلات کمکی فاز مایع ۳۴

۲-۵-۳- معادلات کمک فاز مایع-گاز ۳۴

۲-۶- شرایط اولیه و مرزی ۳۶
۲-۶-۱- شرایط اولیه ۳۶
۲-۶-۲- شرایط مرزی روی محور تقارن ۳۶
۲-۶-۳- شرایط مرزی فاز گاز ۳۶
۲-۶-۴- شرایط مرزی مایع ۳۹
۲-۷- مدل برخورد قطره به جداره ۴۰

فصل ۳ مدلهای توربولانسی مورد استفاده در این تحقیق ۴۵

۳-۱- مقدمه ۴۵
۳-۲- مدل لاملی ۹۵ ..... ۴۶
۳-۳- مدل والین و جانسون ۵۱
۳-۴- مدل $RNG\, k-\varepsilon$ ۵۵
۳-۵- مدلسازی توربولانس غیرتعادلی ۵۶
۳-۵-۱- اصلاحیهٔ ریتز ۵۸

فصل ۴ مدلسازی تأثیر قطرات اسپری بر توربولانس فاز پیوسته (فاز گازی) ۶۰

۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- پارامترهای موثر بر مدولاسیون توربولانس ۶۱
۴-۳- مدلسازی مدولاسیون توربولانس ۶۲

فصل ۵ بحث و بررسی نتایج ۶۴

۵-۱- مقدمه ۶۴
۵-۲- شبکه محاسباتی ۶۶
۵-۳- اعتبار سنجی نتایج ۶۷
۵-۳-۱- استقلال از شبکه و گام زمانی ۶۷
۵-۳-۲- مقایسه با نتایج تجربی ۷۱
۵-۴- بررسی پارامترهای انتگرالی میدان ۷۴
۵-۵- منطقه تک فاز ۸۰
۵-۶- منطقه دو فازی ۸۲

۵-۶-۱- طول نفوذ اسپری ۸۲
۵-۶-۲- مقدار جرم سوخت تبخیر شده ۸۴
۵-۶-۳-۵ CA=350 ۸۷
۵-۶-۴-۵ CA=360 ۹۵

فصل ۶ جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۹

فهرست منابع و مآخذ: ۱۱۳

پیوست ۱ : انفصال معادلات ۱۱۵

۱-۱-مقدمه ۱۱۵

۱-۲-میدان حل ۱۱۵

۱-۳-انفصال معادلات حاکم بر فاز گاز ۱۱۶

۱-۳-۱-معادلهٔ کلی انتقال ۱۱۶
۱-۳-۲-معادلهٔ پیوستگی فاز گاز ۱۱۸
۱-۳-۳-معادلهٔ مومنتم در جهت محوری در فاز گاز ۱۱۹
۱-۳-۴-معادلهٔ مومنتم در جهت شعاعی در فاز گاز ۱۲۲
۱-۳-۵-معادلهٔ بقاء انرژی ۱۲۴
۱-۳-۶-معادلهٔ بقاء جرم بخار سوخت ۱۲۵

۱-۴-انفصال معادلات حاکم بر فاز مایع ۱۲۵

پیوست ۲ : الگوریتم پیزو و فلوچارت اجرای برنامه ۱۲۸

۲-۱-الگوریتم پیزو ۱۲۸

۲-۲-فلوچارت اجرای برنامه ۱۳۲

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱ ناحیهٔ انقباضی-انبساطی ۱۲

شکل ۲-۲ ناحیهٔ انتقالی ۱۴

شکل ۲-۳ شمایی از سلول تزریق سوخت ۱۸

شکل ۲-۴ هندسهٔ برخورد قطرات ۳۰

شکل ۲-۵ عدد وبر قطره بعد از برخورد بر حسب عدد وبر قطره قبل از برخورد[۲] ۴۰

شکل ۲-۶ نمای شماتیک مدلهای برخورد قطرات ۴۱

شکل ۲-۷ نمای شماتیک برخورد جت سیال به سطح در حالت دو بعدی ۴۲

شکل ۲-۸ مدل آنالوژی جت مایع و جت سیال ۴۲

شکل ۲-۹ تخمین عددی منحنی شکل ۲-۵ [۱۱] ۴۳

شکل ۵-۱ مقاطع انتخاب شده برای بررسی نتایج ۶۵

شکل ۵-۲ شبکه بندی میدان حل ۶۷

شکل ۵-۳ اثرات شبکهٔ محاسباتی بر پروفیل سرعت در CA=320 و X=0.01536056 ..... ۶۸

شکل ۵-۴ اثرات شبکهٔ محاسباتی بر پروفیل سرعت در CA=345 و X=0.01104407 ..... ۶۸

شکل ۵-۵ اثرات شبکهٔ محاسباتی بر پروفیل سرعت در CA=350 و X=0.006829689 ..... ۶۹

شکل ۵-۶ اثرات شبکهٔ محاسباتی بر پروفیل سرعت در CA=360 و X=0.008 ..... ۶۹

شکل ۵-۷ اثرات گام زمانی بر پروفیل سرعت در CA=320 و X=0.01536056 ..... ۷۰

شکل ۵-۸ اثرات گام زمانی بر پروفیل سرعت در CA=350 و X=0.006829689 ..... ۷۱

شکل ۵-۹ طول نفوذ اسپری به داخل یک محیط حجم ثابت و ساکن در دمای ۵۷۳ کلوین و فشار 25bar برای مدلهای توربولانسی مختلف ۷۲

شکل ۵-۱۰ طول نفوذ اسپری به داخل یک محیط حجم ثابت و ساکن در دمای ۶۷۳ کلوین و فشار 25bar برای مدلهای توربولانسی مختلف ۷۲

شکل ۵-۱۱ طول نفوذ اسپری به داخل یک محیط حجم ثابت و ساکن در دمای ۵۷۳ کلوین و فشار 45bar برای

مدلهای توربولانسی مختلف ۷۳
شکل ۵-۱۲ طول نفوذ اسپری به داخل یک محیط حجم ثابت و ساکن در دمای ۶۷۳ کلوین و فشار 45bar برای مدلهای توربولانسی مختلف ۷۳
شکل ۵-۱۳ سرعت متوسط انتگرالی میدان و نیز تأثیر مدولاسیون توریولانس بر آن با مدل $k-\varepsilon$ ۷۴
شکل ۵-۱۴ تأثیر مدولاسیون توریولانس بر سرعت متوسط انتگرالی با مدل ASM2 ..... ۷۶
شکل ۵-۱۵ شدت توربولانس انتگرالی میدان و همچنین تأثیر مدولاسیون توربولانس بر آن با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۷۷
شکل ۵-۱۶ مقیاس طولی توربولانس برای انواع مدلها ۷۹
شکل ۵-۱۷ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقیاس طولی توربولانس با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۷۹
شکل ۵-۱۸ سرعت در مقطع A و CA=300 برای مدلهای مختلف ۸۰
شکل ۵-۱۹ شدت توربولانس در مقطع A وCA=300 برای مدلهای مختلف ۸۱
شکل ۵-۲۰ شدت توربولانس نسبی در مقطع B وCA=300 برای مدلهای توربولانسی مختلف ۸۲
شکل ۵-۲۱ طول نفوذ اسپری به داخل یک محیط حجم ثابت و ساکن برای شرایط و نیز مدلهای توربولانسی مختلف ۸۳
شکل ۵-۲۲ نمودار مقدار جرم سوخت تبخیر شده برای مدلهای توربولانسی مختلف ۸۴
شکل ۵-۲۳ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقدار جرم تبخیر شده با مدل $k-\varepsilon$ ۸۵
شکل ۵-۲۴ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقدار جرم تبخیر شده با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۸۵
شکل ۵-۲۵ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقدار جرم تبخیر شده با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ اصلاح شده ۸۶
شکل ۵-۲۶ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقدار جرم تبخیر شده با مدلASM1 ..... ۸۷
شکل ۵-۲۷ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر مقدار جرم تبخیر شده با مدلASM2 ..... ۸۷
شکل ۵-۲۸ نمودار سرعت متوسط در مقطع A و CA=350 برای مدلهای مختلف ۸۸
شکل ۵-۲۹ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر سرعت متوسط در مقطع A و CA=350 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۸۹
شکل ۵-۳۰ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر سرعت متوسط در مقطع B و CA=350 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۸۹
شکل ۵-۳۱ شدت توربولانس در مقطع A وCA=350 برای مدلهای $k-\varepsilon$ و $RNG\,k-\varepsilon$ ۹۰

شکل ۵-۳۲ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر شدت توربولانس در مقطع A و CA=350 با مدل $k-\varepsilon$ ۹۱
شکل ۵-۳۳ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر شدت توربولانس در مقطع A و CA=350 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۹۲
شکل ۵-۳۴ شدت توربولانس در مقطع B وCA=350 برای مدلهای $k-\varepsilon$ و $RNG\,k-\varepsilon$ ۹۲
شکل ۵-۳۵ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر شدت توربولانس در مقطع B وCA=350 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۹۴
شکل ۵-۳۶ شدت توربولانس نسبی در مقطع A وCA=350 برای مدلهای مختلف ۹۵
شکل ۵-۳۷ نمودار سرعت متوسط در مقطع A و CA=360 برای مدلهای مختلف ۹۷
شکل ۵-۳۸ نمودار سرعت متوسط در مقطع C و CA=360 برای مدلهای مختلف ۹۷
شکل ۵-۳۹شدت توربولانس نسبی در مقطع B و CA=360 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۹۹
شکل ۵-۴۰ شدت توربولانس نسبی در مقطع B وCA=360 برای مدلهای مختلف ۱۰۰
شکل ۵-۴۱ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر شدت توربولانس نسبی در مقطع A و CA=360 با مدل $k-\varepsilon$ با فرض انعکاس قطره‌های برخورد کننده به پیستون ۱۰۱
شکل ۵-۴۲ تأثیر مدولاسیون توربولانس بر شدت توربولانس نسبی در مقطع A و CA=360 با مدل $k-\varepsilon$ با فرض چسبیدن قطرات به جداره ۱۰۲
شکل ۵-۴۳ خطوط جریان در CA=360 با مدل $k-\varepsilon$ ۱۰۳
شکل ۵-۴۴ خطوط جریان در CA=360 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۱۰۳
شکل ۵-۴۵ خطوط جریان در CA=360 با مدل $Corrected\ RNG\,k-\varepsilon$ ۱۰۴
شکل ۵-۴۶ خطوط جریان در CA=360 با مدل ASM1 ..... ۱۰۴
شکل ۵-۴۷ خطوط جریان در CA=360 با مدل ASM2 ..... ۱۰۵
شکل ۵-۴۸ توزیع بردار سرعت در CA=360 با مدل $k-\varepsilon$ ۱۰۶
شکل ۵-۴۹ توزیع بردار سرعت در CA=360 با مدل $RNG\,k-\varepsilon$ ۱۰۶
شکل ۵-۵۰ توزیع بردار سرعت در CA=360 با مدل $Corrected\ RNG\,k-\varepsilon$ ۱۰۷
شکل ۵-۵۱ توزیع بردار سرعت در CA=360 با مدل ASM1 ..... ۱۰۷
شکل ۵-۵۲ توزیع بردار سرعت در CA=360 با مدل ASM2 ..... ۱۰۸

فهرست علائم و نشانه‌ها

ضریب معادلات منفصل شده ، ضریب تصحیح سرعت برای قطرات	A
ضریب ثابت	C
ضرایب معادلات توربولانسی	$C_{\varepsilon 3}$ ،$C_{\varepsilon 2}$ ،$C_{\varepsilon 3}$ ،C_1
ضریب درگ	C_D
ضریب نفوذ	D
ضرایب معادلات شکست قطره	D_2 ،D_1
قطر متوسط قطره	D_{32}
قطر قطره	D_d ,d
قطر ذره	d_p
جرم بخار سوخت ، عدد تصادفی مثبت کوچکتر از یک	f
عامل تولید انرژی جنبشی توربولانس	G
آنتالپی فاز گاز	h
شدت توربولانس نسبی	I_r
مولفه های تنشهای رینولدز	$\overline{v''v''}$ ،$\overline{u''u''}$ ،$\overline{u''v''}$
انرژی جنبشی توربولانس	k
مقیاس طول توربولانس	L_ε
مقیاس طولی تیلور	L_λ
مقیاس طول انتگرالی	L_I ,l_e
جرم هر بسته از قطرات	m

نرخ کل جریان جرمی ذره	$\dot{m}_p$
نرخ کل جریان جرمی گاز	$\dot{m}_g$
تعداد قطرات موجود در هر بسته	N_d
عدد نوسلت	Nu
فشار گاز	P
فشار تبخیر دور از قطره	$P_{v,\infty}$
فشار تبخیر در سطح قطره	$P_{v,s}$
عدد پکلت	Pe
عدد پرانتل	Pr
عدد ثابت گازها	R
شدت توربولانس	q
عدد رینولدز	R_e
شعاع نازل	R_{inj}
عدد اشمیت	Sc
عدد شروود	Sh
ترم های تولید در فاز گاز	S_Φ ، S_v ، S_u
ترم های تولید توسط فاز مایع	S_{md} ، S_{hd} ، S_{vd} ، S_{ud}
زمان	t
درجه حرارت فاز گاز	T
درجه حرارت قطره	T_d
شدت توربولانس نرمالیزه شده	$T.I.$
مولفه های میدان سرعت	u,v

مولفه های سرعت قطره	U_d , V_d
مولفه های سرعت گاز در سلول	U_o, U_{go}
مولفه های سرعت مایع در سلول تزریق	U_{do}, V_{do}
سرعت مایع در خروج از نازل	U_{inj}
سرعت تنش برشی	U_τ
سرعت بدون بعد	U^+
سرعت نسبی بین دوفاز	V_{rel}
عدد وبر	We
عدد فون کارمن	X
فاصله عمودی بدون بعد	y^+
نصف زاویه پاشش	β
غلظت ذرات (جرم ذرات در واحد حجم)	α
ضریب تراکم پذیری	γ
نرخ استهلاک انرژی جنبشی توربولانس	ε
نرخ استهلاک انرژی جنبشی توربولانس در حالت تعادل	ε_{eq}
نسبت فضای اشغال شده توسط گاز	θ
ضریب ویسکوزیته گاز	μ
چگالی گاز	ρ
چگالی مایع	ρ_d
ضریب ویسکوزیته سینماتیک	υ
نامتغییرهای ماتریسی	Π_s , Π_ω , IV
مقیاس زمانی توربولانس	τ

مقیاس زمان لاگرانژی	τ_{LI}
مقیاس زمان دیفیوژن مولکولی	τ_m
زمان پاسخ ذره	τ_p
زمان تصادم بین دو ذره	τ_c
کشش سطحی مایع، تابع توزیع احتمال گوس	σ

فصل ۱ مقدمه

از جمله مسائلی که در طراحی موتورهای احتراق داخلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است مسائل مربوط به کاهش مصرف سوخت، افزایش راندمان و کاهش آلودگی محیط زیست در فرآیند احتراق می‌باشد. فرآیند احتراق شدیداً به میدان جریان سیال در زمان تراکم در داخل سیلندر وابسته است. بنابراین درک صحیحی از جریان و خواص آن در زمان تراکم این امکان را فراهم می‌سازد تا شرایط بهینه برای یک احتراق خوب ایجاد گردد. با نگاهی گذرا به تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان دید که تلاشهای اولیه بر روی قسمتهای بسته سیکل موتور یعنی تراکم، احتراق و انبساط متمرکز بودند. این مدلها از محاسبات سیکلها در دهۀ ۵۰ میلادی به مدلهای ساده انگارانۀ دهۀ ۶۰ و مدلهای کامل ترمودینامیکی دهۀ ۷۰ رسید. روند توسعه مدلها با ظهور مدلهای چند بعدی و چند ناحیه‌ای احتراق در دهۀ ۸۰ ادامه یافت. در دو دهه اخیر و به کمک پیشرفت ابزار و وسایل مورد نیاز، تلاشهای زیادی صرف توسعه و پیشرفت در مدلسازی سه بعدی توربولانس، انتقال حرارت، اسپری سوخت مایع، اختلاط، احتراق و نیز ایجاد آلودگی در موتورهای رفت و برگشتی صورت گرفته است[۱].

بطور کلی می‌توان مدلهای ارائه شده برای موتورهای احتراق داخلی را به سه دسته تقسیم نمود؛ مدلهای صفر بعدی، مدلهای شبه بعدی و مدلهای چند بعدی.

مدلهای صفر بعدی عموماً با معادلات ترمودینامیکی سروکار دارند و برای تحقیق پیرامون بالانس انرژی در موتور، آنالیز افت انرژی و یا به عنوان مثال بررسی سازگاری یک موتور با یک توربوشارژر، ایده‌آل هستند. این روشها امکان بررسی‌های اولیه پیرامون راه حلهای جدید بکارگرفته شده در موتور را فراهم می‌کنند، نظیر اثر عایق سازی حرارتی دیواره های محفظه احتراق موتور.

روش دیگر استفاده از مدلسازی شبه بعدی است. ویژگی اساسی این مدلها، معرفی و استفاده از مفهوم

فضا است. مدلهای صفر بعدی مدلهای تک نقطه‌ای هستند و کل محفظه احتراق را بصورت یک نقطه‌ای مدل می‌کنند. این در حالی است که مدلهای شبه بعدی قادرند فضای داخل محفظه احتراق را به صورت چند نقطه‌ای مدلسازی کنند و فرایندهای انتقال را در داخل محفظه شبیه‌سازی نمایند. به عنوان مثال، چنین مدلهایی می‌توانند انتشار شعله در یک موتور بنزینی جرقه‌ای و یا نفوذ و جذب سوخت در یک موتور انژکتوری را تخمین بزنند. اما این مدلها نیز به دلیل ساده‌سازیهای انجام شده در آنها کاربرد محدودی دارند. این مدلها برای فهم کلی تحولات انجام شده در موتور مناسبند ولی به هیچ وجه نمی‌توانند پیشگویی نزدیک به واقعیت از تحولات داخل سیلندر داشته باشند.

گروه آخر، مدلسازی چند بعدی است. اکثر محققین بر این باورند که تنها مدلهای چند بعدی می‌توانند پیش‌گوییهای منطقی از آنچه در داخل موتور رخ می‌دهد به عمل آورند. مدلهای چند بعدی به تدریج در حال کامل شدن بوده و اندک اندک هندسه محفظه احتراق و فرایندهای انجام شده در داخل آن با جزئیات کاملتری مدلسازی می‌شوند. این نوع مدلسازی کمک زیادی به فهم دینامیک سیال و جریان توربولانس در داخل سیلندر و حتی تعامل توربولانس با احتراق دارد، اما با وجود برتری‌های قابل توجه، این مدل هنوز بطور کامل جایگزین دو نوع دیگر نشده است. از جمله علل این امر می‌توان به دشواریهای بکارگیری این مدلها و زمان زیاد لازم برای محاسبات کامپیوتری اشاره نمود. همچنین، این مدلها برای تمام مسائل به صورت یکسان بکار نرفته و می‌بایست برای هر مسأله، مدل با نمونه واقعی انطباق یابد. با این حال با پیشرفت‌های چشمگیر انجام شده استفاده از مدلسازی چند بعدی به تدریج به روش غالب مدلسازی در این زمینه تبدیل خواهد شد[۲].

با توجه به مغشوش بودن جریان داخل سیلندر و اثرات متقابلی که این اغتشاش در دینامیک سیال داخل سیلندر، انتقال حرارت، انتقال جرم و نیز واکنش‌های شیمیایی انجام شده در داخل سیلندر می‌گذارد، انتخاب یک مدل توربولانسی مناسب جهت دست‌یابی به تخمینی قابل‌قبول از جریان داخل سیلندر ضروری به نظر می‌رسد.

اکنون به طور اجمالی به بررسی روشهای مختلف عددی بکار رفته جهت حل جریان داخل سیلندر

پرداخته می‌شود. در طی سالیان اخیر به طورکلی سه رویکرد به تحلیل و شبیه‌سازی جریان مغشوش داخل سیلندر وجود داشته است.

۱-روش شبیه‌سازی مستقیم عددی(DNS)، که در آن معادلات ناویر استوکس و سایر معادلات کمکی موجود به طور مستقیم حل می‌شوند.

۲-روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ(LES)، که در آن متغیرهای حاکم، طی یک پروسه فیلترسازی به دو دسته بزرگ مقیاس و مقیاس زیر شبکه تقسیم می‌شوند. این روش، بصورت ترکیبی از روش DNS برای قسمت فیلترشدهٔ هر یک از متغیرها و مدلسازی جهت قسمت زیر شبکه می‌باشد. سلیک و همکاران[۱] با مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه به این جمع‌بندی رسیدند که روش LES پتانسیل بسیار بالایی برای کاربرد در شبیه سازی جریان داخل سیلندر دارد[به نقل از مرجع ۳]. ریچارد و همکاران[۲] نیز با بکارگیری روش LES نتیجهٔ مشابهی را گزارش کردند[۴].

۳- روشهای متوسط‌گیری(RANS)، که در آنها معادلات متوسط گیری شده جریان حل می‌شوند و تنشهای توربولانسی بطور کامل مدلسازی می‌شوند تا مقدار متوسطی از هریک از متغیرهای حاکم بدست آید. در روشهای متعلق به این دسته، تمام مقیاس‌های حرکت از هر اندازه‌ای که باشند از مقیاس‌های بزرگ تا مقیاسهای بسیار ریز، متوسط‌گیری می‌شوند. برای این منظور روشهای مختلفی وجود دارد. لذا روش RANS از انواع متنوعی برخوردار است که بسته به نوع روش متوسط‌گیری، خصوصیات و محدودیتهای خاص خود را دارند.

تا بحال محاسبات بسیاری از شبیه‌سازی جریان داخل سیلندر گزارش شده است. گاسمن و همکاران[۳]، ریتز و همکاران[۴]، واتکینز و همکاران[۵]، زور لوی و همکاران[۶]، کونو و همکاران[۷]، واکیزاکا و همکاران[۸]،

[1] Celik et al.
[2] Richard et al.
[3] Gosman et al.
[4] Reitz et al.
[5] Watkins et al.
[6] Zur Loye et al.
[7] Kono et al.
[8] Wakisaka et al.

هنریت و همکاران[1] و ... که تقریباً در تمام موارد مدلهای توربولانسی خانواده $k-\varepsilon$ را بکار برده اند [به نقل از مرجع ۳]. تسکینن[2] به طور خاص انواع مدلهای $RNG\,k-\varepsilon$ را در جریان درون سیلندر مقایسه کرد[۵]. یانگ و همکاران[3] نیز مدل تنشهای رینولدز (RSM) را بر کد کیوا اعمال کرده و نتایج خود را با داده‌های تجربی مقایسه کردند[۶].

بحث مدلسازی توربولانس غیر تعادلی در موتور نیز اولین بار توسط ریتز و همکاران (۲۰۰۱) مطرح شد. ایشان اصلاحیه‌ای را برای مدلسازی جریان‌های به شدت گذرا پیشنهاد دادند. با بکار بردن این اصلاحیه در کد کیوا و در جریان تک فاز نشان دادند که مقیاس‌های طولی توربولانس به صورت صحیح‌تری محاسبه می‌شوند[۷].

مدولاسیون توربولانس یعنی در نظر گرفتن اثرات حضور ذرات پراکنده بر میدان سیال نیز از اهمیت بسزایی در مدلسازی جریان داخل موتور برخوردار است. بحث مدولاسیون توربولانس توسط محققین زیادی برای جریان داخل لوله بصورت تجربی بررسی شده است. از آن جمله می‌توان به تحقیقات سوجی و موریکاوا[4] (۱۹۸۲)، سوجی و همکاران (۱۹۸۴)، لی و درست[5] (۱۹۸۲) و فان و همکاران[6] (۱۹۹۷) در این زمینه اشاره نمود. این پدیده برای جریان گاز-جامد درون لوله نیز بصورت تجربی توسط محققینی مثل مصطفی و مونگیا[7] (۱۹۸۹)، لوی و لاکوود[8] (۱۹۸۱) مدرس و همکاران[9] (۱۹۸۴) بررسی شده است. مدرس و همکاران جریان جت گاز-جامد را نیز بررسی کردند[به نقل از مرجع ۸]. در تحقیق حاضر پدیدهٔ مذکور بر جریان دوفازی گاز-مایع داخل سیلندر اعمال شده و اثرات آن بر کلیه مدلهای توربولانسی نیز بررسی شده است.

کد کامپیوتری مبنای استفاده شده در این تحقیق کد EPISO-II می‌باشد. این کد از کدهای معروف

[1] Heniot et al.
[2] Taskinen
[3] Yang et al.
[4] Tsuji and Morikawa
[5] Lee and Durst
[6] Fan et al.
[7] Mostafa and Mongia
[8] Levy and Lockwood
[9] Modarress et al.

دنیا در زمینهٔ شبیه سازی عددی جریان داخل سیلندر است که در ابتدا توسط پروفسور گاسمن، عیسی[1] و واتکینز در دانشگاههای امپریال کالج و یومیست انگلستان تهیه شده است. کد مذکور توانایی حل جریانهای دو بعدی (جریان متقارن محوری) در داخل سیلندر موتور احتراق داخلی را در کل فرآیند سیکل دارا می‌باشد که توسط دکتر خالقی و همکارانش در ایران توسعه یافته و قابلیتهای آن افزایش یافته است. مدل توربولانسی موجود در آن مدل $k-\varepsilon$ استاندارد می‌باشد. در این تحقیق دو نوع مدل توربولانسی تنش جبری رینولدز(ASM)، مدل $RNG\,k-\varepsilon$، اصلاحیهٔ ریتز و همکاران برای شبیه‌سازی توربولانس غیرتعادلی و همچنین اثرات مدولاسیون توربولانس بر توربولانس فاز گاز نیز به این کد اضافه شد.

گزارش حاضر شامل شش فصل می‌باشد. در فصل اول به اختصار خلاصه‌ای از سوابق شبیه‌سازی جریانهای داخل سیلندر ذکر شده است. در فصل دوم معادلات حاکم بر فاز گاز و فاز مایع و نیز شرایط اولیه و مرزی حاکم بر آنها بررسی شده است. در فصل سوم مدلهای مختلف توربولانسی بکار گرفته شده در این پایان‌نامه تشریح شده‌اند. در فصل چهارم مدولاسیون توربولانس و نحوهٔ اعمال آن توضیح داده شده است. در فصل پنجم به بررسی نتایج و نهایتاً در فصل ششم به جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است. تحقیق حاضر شامل دو پیوست نیز می‌باشد که در پیوست اول به نحوه انفصال معادلات و در پیوست دوم به تشریح الگوریتم پیزو و فلوچارت اجرای برنامه اشاره شده است.

[1] Issa