

شبیه سازی عددی احتراق توربولانسی اسپری در شرایط "مایلد"

امیر مردانی
استادیار
دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف
amardani@sharif.edu

حامد کریمی
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی هوافضا
دانشگاه صنعتی شریف
Karimi_hamed@ae.sharif.edu

چکیده

احتراق مایلد رژیمی نسبتاً نو در شاخه ی احتراق به شمار می رود که با بازده گرمایی بالا و تولید اندک آلاینده ها به خصوص اکسیدهای نیتروژن و دوده متمایز می شود. به دلیل ویژگی های مطلوب این رژیم احتراقی استفاده از آن در حال گسترش است که از آن جمله می توان به مشعل ها، کوره های صنعتی و توربین های گازی اشاره نمود. در همین راستا مطالعات تجربی و عددی نیز بر روی این نوع از احتراق به خصوص با سوخت های مایع نیز در حال گسترش است. در این مطالعه به شبیه سازی و بررسی عددی مشعلی آزمایشگاه که با هدف مطالعه شعله توربولانسی حاصل از اسپری در شرایط مایلد ایجاد شده، پرداخته شده است. شبیه سازی عددی احتراق اسپری مسئله ای چند وجهی می باشد. به طور کلی می توان شبیه سازی عددی احتراق توربولانسی اسپری را متشکل از سه مدل سازی از زیر پدیده های کلان مسئله دانست: مدل سازی اسپری، مدل سازی توربولانس و مدل سازی احتراق. در این مطالعه ی عددی از رویکرد لاگرانژی برای مدل سازی اسپری، رویکرد میانگین گیری زمانی برای مدل سازی توربولانسی و رویکرد احتراقی اختلاطی و حجم مینا استفاده است. نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های تجربی موجود اعتبارسنجی شده و به شرح ساختار شعله بر اساس نتایج های استخراجی پرداخته شده است. در کل نتایج عددی، پیش بینی مناسبی از ساختار شعله ارائه داده اند. دلایل احتمالی برای خطاهای مشاهده شده ارائه شده است و راهکارهای حل آن نیز بیان گردیده است.

کلمات کلیدی: احتراق مایلد، اسپری، اسپری مایلد، اسپری توربولانسی.

۱- مقدمه

از تکنولوژی های جدید در زمینه احتراق، احتراق در شرایط رقیق سازی متوسط و یا بالا و نیز پیش گرمایش بالا (مایلد^۱) می باشد. بنابه تعریف کوالیر و جواتون [1] فرآیند احتراقی مایلد نامیده می شود که دمای ورودی مخلوط واکنش دهنده از دمای خود اشتعالی مخلوط بالاتر باشد و بیشینه افزایش دما نسبت به دمای ورودی در حین احتراق از دمای خود اشتعالی مخلوط (به کلوین) کمتر باشد. بازده گرمایی بالا، کاهش قابل ملاحظه در تولید آلاینده های کربن مونوکسید و اکسیدهای نیتروژن، میدان حرارتی تشعشعی تقریباً یکنواخت، کاهش حجم محفظه احتراق، امکان بهره برداری از سوخته های نامرغوب، صدای احتراق پایین و پایداری شعله ی آسان از مشخصات عملکردی این تکنولوژی می باشد [2]، [1]. در احتراق مایلد رقیق سازی واکنش دهنده ها باعث کاهش قله ی دمای احتراق و جلوگیری از به وجود آمدن غلظت بالای اکسیژن می شود. به این صورت کاهش قابل ملاحظه ای در تولید اکسیدهای نیتروژن قابل دستیابی است [3]. همچنین پیش گرمایش مخلوط ورودی پایداری بالا و نیز افزایش

حجم شعله را موجب خواهد شد. لذا در مجموع واکنش های با سرعت پایین تر و ناحیه ی احتراقی توزیع شده ای در محفظه ایجاد خواهد شد و حجم مفید محفظه را افزایش خواهد داد. این افزایش حجم ناحیه ی احتراقی همچنین سبب افزایش انتقال حرارت تشعشعی (که در بسیاری از کوره های صنعتی مهم است) می شود.

احتراق مایلد پس از سال ۲۰۰۰ به طور گسترده ای به صورت تجربی و چه عددی مورد مطالعه قرار گرفته است که این بررسی ها اکثراً بر روی سوخت های گازی متمرکز بوده است. از این جمله می توان به مطالعات مردانی و همکاران [4] و [5] اشاره کرد.

تا به دین جا استفاده از این فناوری به طور عمده در حوزه ی کوره ها و مشعل های صنعتی متمرکز بوده است که به دلیل ویژگی های مطلوب ذکر شده برای این رژیم احتراقی، مطالعات جهت بهره گیری از این فناوری در توربین های گازی نیز به تازگی مد نظر قرار گرفته است. از مشکلات پیشرو در این مسیر به کمبود چگالی تولید توان می توان اشاره کرد.

از دیدگاه فاز سوخت های به کار رفته در فرآیند احتراقی، احتراق مایلد سوخته های گازی توسعه خوبی یافته است این در حالی است که مطالعات تجربی و عددی در ارتباط با احتراق مایلد اسپری در ابتدای راه خود به سر می برد [6] که از این موارد می توان به مطالعات تجربی و عددی مربوط به دانشگاه دلفت هلند نام برد که به سال ۲۰۱۴ به بعد مرتبط می باشد و هدف آن استفاده از این تکنولوژی در مشعل های صنعتی جهت مصرف سوخت های هیدروکربنی سنگین با قیمت ارزان توام با آلاینده ی پایین و بازده حرارتی بالا می باشد. بدین منظور مطالعه ی احتراق شعله های کوچک تر با سوخت های مایع سبک تر آغاز شده است.

جنی و همکاران [7] مروری بر کارهای تجربی و عددی انجام گرفته تا سال ۲۰۱۳ در ارتباط با احتراق توربولانسی اسپری انجام داده اند. در این بررسی مشعل های آزمایشگاهی جهت مطالعه احتراق توربولانسی اسپری طبقه بندی شده است. در ردیف های ۱ تا ۷ جدول ۱ مشخصات کاری این مشعل ها آمده است. مشعل های آزمایشگاهی ردیف ۸ و ۹ جدید تر بوده و مربوط به به تاریخ بعد از سال ۲۰۱۳ می باشد. لازم به ذکر است که در این جدول مشعل های آزمایشگاهی که برای تولید پایگاه داده جهت مطالعات عددی توسعه داده شده اند، آمده است.

جدول ۱: مشخصات مشعل های آزمایشگاهی دارای داده های تجربی

#	نام	سوخت پاش	سوخت	تعداد آزمایش ها	پایداری شعله
۱	هیل-ویتنبرگ	فشاری	ایزو پروپیل الکل	۴ سرد	
۲	ایرواین	فشاری	متانول	۳ سرد+۲ گرم	پیچش
۳	استاندارد آمریکا	فشاری	متانول	۱ گرم	پیچش
۴	هیدلبرگ	فشاری	اتانول	۱ سرد+۱ گرم	
۵	اورلئان	فشاری	ان-هپتان	۹ گرم	مشعل ثانویه
۶	بیل	بخورساز	متانول	۲ گرم	
۷	سیدنی	بخورساز	استون اتانول	۸ سرد+۱۶ گرم	مشعل ثانویه
۸	دلفت	فشاری	استون اتانول	۵ گرم	

¹ MILD (Moderate or intense low-oxygen dilution combustion)

مراجعه اصلی	سال	هوای همراه رقیق	هوای همراه گرم	نام	#
[8]	۱۹۹۸	بله	بله	هیل-ویتنبرگ	۱
[9]	۱۹۹۵			ایرواین	۲
[10][11]	۲۰۰۵			استاندارد آمریکا	۳
[12][13]	۲۰۰۸-۲۰۰۷			هیدلبرگ	۴
[14]	۲۰۰۲			اورلن	۵
[15][16]	-۱۹۹۸			بیل	۶
[17]	۲۰۰۰				
[18][19]	۲۰۱۱-۲۰۰۹			سیدنی	۷
[20]					
[21][22]	۲۰۱۵	بله	بله	دلفت	۸
[23]					
[24]	۲۰۱۵	بله		کریا روئن	۹

این مشعل به منظور بررسی اثرات رقیق سازی به وسیله دی اکسید کربن بر شعله اسپری اکسی-فیول^۲ و بررسی ساختار و پایداری شعله، ایجاد شده است. بدین منظور شرایط مرزی مشعل تا جای ممکن دقیق تعریف و اندازه گیری شده است تا پایگاه قابل استفاده در کارهای عددی ایجاد گردد [24]. ما و همکاران [25] به بررسی عددی این مشعل با رویکرد توربولانسی "شبه سازی گردابه بزرگ"^۳ و مدل توربولانسی اف جی ام^۴ پرداختند. نتایج این بررسی ها نشان داد که می توان تفاوت های میان ساختارهای متفاوت شعله در شرایط متفاوت کارکردی را با مجموع اثرات گرمایش قطرات، نوسانات سرعت قطرات^۵ و تبخیر قطرات تابعی از اندازه قطرات توضیح داد. در حالت هایی از شعله، برهمکنش قوی میان فرآیندهای ریزسازی و احتراق در توجیه ساختار شعله و فرآیند تشکیل قطرات مهم می باشد که نیاز به بررسی بیشتر در این زمینه وجود دارد.

مشعل آزمایشگاهی اسپری دانشگاه دلفت به دلیل هندسه تقارن محوری و داده های اندازه گیری شده ی مناسب در مرز و درون ناحیه احتراقی، گزینه ی مناسبی برای مطالعات عددی احتراق توربولانسی اسپری رقیق در شرایط مایلد (هوای همراه گرم و رقیق از اکسیژن) می باشد. این مطالعات، بر پایه ی کارهای تجربی رودریگز [21]، [22]، [23] صورت گرفته است. در رساله دکترا رودریگز [21]، ساخت و انجام آزمایش های مختلف بر روی اسپری در هوای همراه پیشگرم شده دلفت در دستور کار بوده است. این مشعل با رویکردهای مختلف توربولانسی و احتراقی مورد بررسی های عددی قرار گرفته است. از آن جمله رویکرد رنس/فلمیل^۶ [26]، پی دی اف توربولانسی/اف جی ام^۷ [27] و ال ای اس/اف جی ام^۸ [28] می باشد. این بررسی ها نشان داد که مدل اف جی ام پیش بینی بهتری نسبت به مدل فلیملت در شناسایی ساختار شعله از جمله شعله دو شاخه در حالت هوای همراه سرد و شعله برخاسته را دارا می باشد. با این حال مدل اف جی ام فرض هایی ساده کننده ای بر سینتیک شیمیایی اعمال می کند که در احتراق مایلد، سینتیک شیمیایی به دلیل پایین بودن عدد دامکالر بسیار مهم می باشد.

مدل "مفهوم اضمحلال ادی"^۹ (ای پی دی سی) [29] برای مدل سازی جریان احتراقی توربولانسی به خصوص مواردی که سینتیک شیمیایی نقش مهمی را ایفا می کند و ارتباط قوی ای میان توربولانس و سینتیک شیمیایی وجود دارد به طور گسترده ای استفاده شده است. چنین ویژگی هایی در احتراق مایلد که ابعاد زمانی واکنش های شیمیایی نسبت به احتراق معمول افزایش می یابد (کنشدن واکنش ها به دلیل رقیق سازی واکنش دهنده ها)، وجود دارد [30]. در این مطالعه از رویکرد اختلاط توربولانسی و مدل ای پی دی سی برای مدل سازی احتراق استفاده شده است.

در مقاله حاضر به شبه سازی احتراق آشفته ی اسپری در شرایط هوای همراه گرم و رقیق از اکسیژن پرداخته شده است. مشعل اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه دلفت به منظور بررسی عددی انتخاب شده است و نتایج شبه سازی های عددی با نتایج آزمون های تجربی مقایسه شده است. هدف کلی در این بررسی عددی دستیابی به ترکیبی از مدل های اسپری،

از ویژگی های یک پایگاه داده ی تجربی خوب می توان به داده برداری از چندین متغیر در چندین مکان، شرایط ورودی متفاوت و رژیم های احتراقی متفاوت مرتبط با آن ها و اندازه گیری دقیق و کامل شرایط ورودی اشاره کرد. شرایط ورودی به ناحیه ای اطلاق می شود که اسپری رقیق وارد محدوده ی آزمایش می شود.

از میان مشعل های آزمایشگاهی جدول ۱ که مربوط به احتراق توربولانسی اسپری می شدند تنها دو مورد هیل-ویتنبرگ و دلفت دارای آزمایش های با هوای پیش گرم هستند (قید هوای پیش گرم و رقیق شده از اکسیژن به دلیل بررسی شرایط مایلد اهمیت دارد). مشعل دانشگاه کریا روئن هم که از آخرین کارهای تجربی به شمار می رود، به اثر رقیق سازی اکسیژن در هوای همراه تمرکز دارد. از این میان، مشعل آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت^۱ به دلیل جدید و جامع بودن به عنوان مشعل هدف برای مطالعه عددی احتراق توربولانسی اسپری در شرایط مایلد انتخاب شده است.

شبه سازی عددی احتراق اسپری به خودی خود مسئله ای چندوجهی و پیچیده می باشد که عملاً نیاز به مدل سازی های مختلف اسپری، توربولانس و احتراق برای این کار می باشد. پیچیدگی های جدیدی نیز به احتراق مایلد اسپری اضافه می شود. به طور مثال حضور هوای گرم و رقیق شده از اکسیژن می تواند بر فروپاشی و تبخیر قطرات اثرگذار باشد و مدل هایی برای در نظر گرفتن این تأثیرات مورد نیاز می باشد. مدل های احتراقی که به طور مؤثر و دقیق برهم کنش توربولانس- شیمی را در احتراق مایلد اسپری پیش بینی کنند در حال توسعه می باشد. سؤال هایی از قبیل این که مدل هایی که برای احتراق اسپری در شرایط معمول توسعه داده شده است برای شرایط مایلد نیز قابل استفاده می باشد یا خیر و یا کدام مدل ها (و یا اجزای مدل ها، زیر مدل ها) اثر مهمی در پیش بینی احتراق مایلد اسپری دارد قابل پرسش می باشد.

جنی و همکاران [7] مروری به کارهای انجام گرفته در ارتباط شبه سازی عددی احتراق توربولانسی اسپری رقیق تا سال ۲۰۱۲ انجام داده اند. همچنین خلاصه ای از زیر مدل های عددی متفاوت جهت شبه سازی احتراق توربولانسی اسپری رقیق ارائه شده است.

از جمله مشعل های آزمایشگاهی اخیر جهت بررسی احتراق اسپری رقیق مشعل کریا روئن فرانسه می باشد [24]. در این مشعل، اسپری از جنس اتانول درون مخلوطی از کربن دی اکسید و اکسیژن با نسبت های اختلاط متفاوت که در راستای محور اسپری را همراهی می کند، پاشیده شده است.

¹ Delft Spray in Hot Co-flow (DSHC)

² Oxyfuel

³ Large Eddy Simulation (LES)

⁴ FGM (Flamelet Generated Manifold)

⁵ Dispersion

⁶ RANS/Flamelet

⁷ TPDF/FGM

⁸ LES/FGM

⁹ Eddy Dissipation Concept (EDC)

۰.۴	۱۴.۹	۳.۱	۱۱.۵	۱.۴۶	H	اتانول
-----	------	-----	------	------	-----------------	--------

۳- مدل سازی عددی

حل عددی جریان سیال شامل حل معادلات حاکم میانگین گیری شده ی زمانی تراکم ناپذیر پیوستگی، مومنتوم، انرژی و بقای گونه های شیمیایی می شود. از رویکرد میانگین گیری زمانی نویر-استوکس^۲ برای مدل سازی توربولانسی و از مدل استاندارد k-e به عنوان مدل توربولانسی استفاده شده است. معادلات جریان در دستگاه مختصات دو بعدی تقارن محوری حل شده اند. تزریق و تعقیب مسیر قطرات در دستگاه مختصات لاگرانژی به وسیله ی حل معادله ی بالانس نیرویی نیوتون برای قطرات انجام می گردد.

از مدل "مفهوم اضمحلال ادی ها" (ای دی سی) به همراه مکانیزم شیمیایی جزئی [32] برای احتراق اتانول/هوا که دارای ۴۰ گونه و ۵۷۶ واکنش شیمیایی برگشت پذیر است، برای برهمکنش احتراق-توربولانس استفاده شده است. مدل ای دی سی توسعه یافته ی "مدل اتلاف گردابه"^۳ (ای دی ام) محسوب می شود که مکانیزم های شیمیایی جزئی در جریان های توربولانسی را هم در برمی گیرد. در مدل اتلاف گردابه نرخ واکنش با فرکانس اختلاط توربولانسی و غلظت واکنش دهنده ی محدود کننده، کنترل می شود. در مدل ای دی سی واکنش شیمیایی در ساختارهای کوچک توربولانسی به نام، ابعاد ریز رخ می دهند که طول این ابعاد ریز به خواص توربولانسی جریان آشفته مرتبط می گردد. در این مدل به طور معمول احتراق در ابعاد ریز درون راکتور فشار ثابت با شرایط اولیه گونه ها و دمای برابر با مقادیر موجود در سلول محاسباتی انجام می شود. واکنش های شیمیایی طی بازه ی زمانی مشخص که به خواص توربولانسی جریان مرتبط اند و طبق نرخ آربینوس انجام می گیرد. مدل ای دی سی به دلیل استفاده از مکانیزم های شیمیایی جزئی در جریان واکنشی توربولانسی، توانایی محاسبه ی غلظت گونه های میانی و یا با نرخ واکنش پایین را دارا می باشد و جزء مدل های شیمی نرخ محدود محسوب می شود. شرایط مرزی جریان هوای همراه، شامل غلظت گونه ها، دما، سرعت جریان و شدت توربولانسی به صورت پروفایل به دست آمده از داده برداری های تجربی، در حل عددی تنظیم شده است. مقادیر متوسط این شرایط مرزی به همراه دبی سوخت پاش سوخت مایع در جدول ۳ آمده است. سایر شرایط مرزی به همراه ابعاد محدوده ی حل محاسباتی در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۳: شرایط مرزی جریان اکسنده و سوخت شعله H_{||} مشعل

آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت

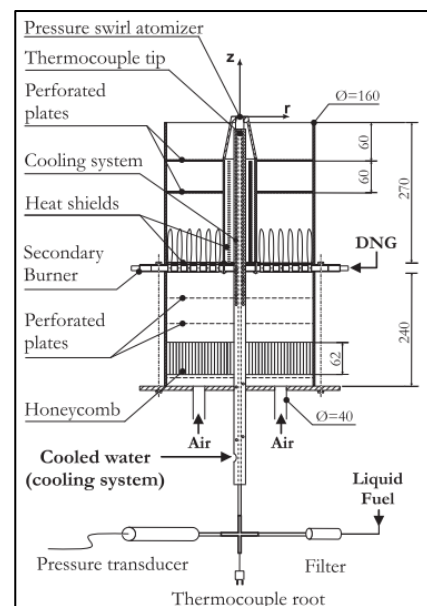
حالت	\bar{T}_{cf} [k]	$\bar{X}_{O_2,cf}$ [%]	$\bar{X}_{N_2,cf}$ [%]	$\bar{X}_{H_2O,cf}$ [%]	$\bar{X}_{CO_2,cf}$ [%]
H	۱۴۰۰	۸.۷۱	۷۴.۸۱	۱۰.۹۴	۵.۵۴

حالت	\bar{U}_{cf} [m/s]	\bar{I}_{cf} [%]	m_{liq} [kg/h]
H	۲.۵	۲.۰	۱.۴۶

احتراق و توربولانس برای پیش بینی صحیح ساختار شعله اسپری مایلد بوده است تا شناخت بیشتری از پدیده ها و فیزیک جریان احتراقی اسپری مایلد حاصل گردد.

۲- مشعل آزمایشگاهی "اسپری در هوای همراه گرم دلفت"

مشعل آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت از یک جت اسپری محوری که به وسیله ی سوخت پاشی فشاری-پیچشی تولید می شود و توسط هوای همراهی گرم و رقیق از اکسیژن که اسپری را به صورت هم محور احاطه کرده است، تشکیل شده است. شماتیکی از مشعل به همراه ابعاد هندسی و اجزای مختلف مشعل در شکل ۱ مشاهده می شود. هوای همراه گرم و رقیق به وسیله ی مشعلی ثانویه در بالادست مشعل اصلی تامین می شود. از میان شعله های مختلف آزمایش شده در این مشعل، حالت H_{||} در این جا مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۲ مشخصات کارکردی این حالت مشاهده می شود. این حالت به احتراق اسپری اتانول در هوای همراه با دمای ۱۴۰۰ کلوین و غلظت اکسیژن در حدود ۹ درصد مربوط می شود. به دلیل دمای بالا و رقیق از اکسیژن بودن جریان اکسنده، این حالت نماینده ی مناسبی برای بررسی احتراق مایلد اسپری می باشد.



شکل ۱: طرح مشعل آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت [21]

جدول ۲: مشخصات شعله H_{||} مشعل آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت [31]

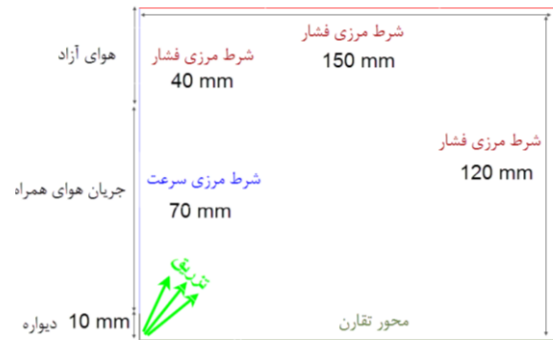
هوای همراه						
سوخت	حالت	m_{air} [kg/h]	m_{DNG} [kg/h]	\bar{U}_{cf} [m/s]	\bar{T}_{cf} [k]	\bar{X}_{O_2} [%]
اتانول	H	۵۱	۲.۱۳	۲.۲	۱۴۰۰	۹
اسپری (مخروط توخالی)						
سوخت	حالت	m_{liq} [kg/h]	P [bar]	T _{liq} [K]	U _{jet} [m/s]	We [-]

² RANS

³ Eddy Dissipation Model (EDM)

¹ Delft Spray in Hot Co-flow (DSHC)

جریان با گسسته سازی مرتبه دو برای تمامی ترم های مشتقی معادلات استفاده شده است. انتگرال گیری ناپایای معادلات مشتقی معمولی^۴ حرکت قطرات نیز به روش ذوزنقه ای و ضمنی انجام گرفته است.



شکل ۲: محدوده ی حل عددی و شرایط مرزی شبیه سازی مشعل آزمایشگاهی اسپری در هوای همراه گرم دانشگاه صنعتی دلفت

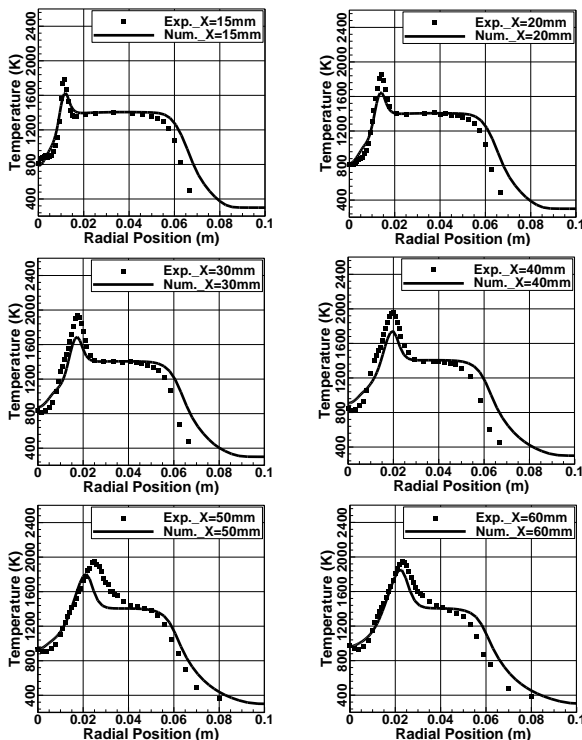
۴- اعتبارسنجی و شرح نتایج

در این بخش به شرح نتایج حاصل از شبیه سازی عددی احتراق اسپری شعله H_{II} پرداخته شده است. پروفیل های دمای گاز، سرعت گاز و قطر قطرات استخراج و با داده های اندازه گیری شده به صورت تجربی مقایسه و اعتبارسنجی صورت گرفته است.

در هر زیربخش ابتدا به توجیه رفتار پروفیل و تغییرات مکانی آن پرداخته شده و سپس مقایسه نتایج عددی و تجربی، بیان شباهت ها و دلایل اختلافات در پیش بینی ها عنوان شده است.

۴-۱ پروفیل دما

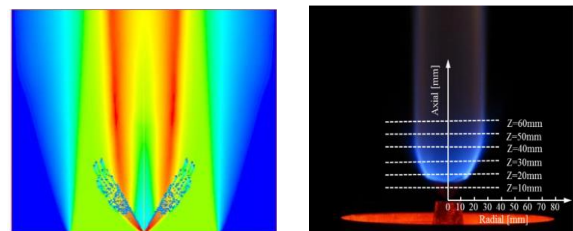
در شکل ۳ پروفیل های شعاعی دما در مقاطع محوری مختلف نشان داده شده است. با افزایش فاصله از محور در راستای شعاع افزایش دمای میدان احتراقی مشاهده می شود، تا جایی که قله ی دمایی درون شعله حاصل شود. مقدار و مکان شعاعی دمای بیشینه با افزایش فاصله محوری (از فاصله ۱۵ تا ۶۰ میلی متر نسبت به سوخت پاش) افزایش یافته است. پس از قله دمایی، دما افت می یابد تا دمای هوای همراه حاصل شود. در فواصل شعاعی تقریبی ۵ تا ۸ سانتی متر لایه برشی بین هوای همراه و هوای آزاد اطراف مشعل باعث کاهش بیشتر دما می شود.



شکل ۴: پروفیل های شعاعی دما جریان گازی در مقاطع محوری مختلف، حاصل از شبیه سازی عددی شعله H_{II} مشعل آزمایشگاهی اسپری دلفت و مقایسه با داده های تجربی

در مدل سازی فاز گسسته (قطرات) قطرات به صورت ناپایا مسیریابی شده اند. برای مدل سازی فروپاشی اولیه سوخت مایع اتانول خروجی از سوخت پاش فشاری-پیچشی، از مدل ناپایداری خطی تجزیه صفحه مایع معروف به لیسا^۱ [33] استفاده شده است. مقادیر ورودی مدل فروپاشی اولیه و تنظیمات تزریق و تعقیب ناپایای قطرات، با استفاده از ویژگی های گزارش شده از سوخت پاش [26][6]، به نحوی که ساختار اسپری به دست آمده از حل عددی با مقادیر داده برداری شده از آزمایش های تجربی همخوانی قابل قبولی داشته باشند، تنظیم شده است. مدل تبخیر قطرات از کار میلر [34] و سازین [35] اقتباس شده است. برای محاسبات نیروی پسی قطرات، قطرات کروی و صاف فرض شده اند و ارتباط میان ضریب پسا و عدد رینولدز از کار مرسی و الکساندر [36] اقتباس شده است.

از شبکه بندی سازمان یافته ۴ ضلعی در حدود ۲۰۰۰ سلول محاسباتی پس از انجام مطالعات استقلال جواب ها از شبکه، برای انجام محاسبات عددی استفاده شده است. نتایج شبیه سازی عددی با داده های تجربی مقایسه شده است که روند اعتبارسنجی در بخش بعد شرح داده شده است. در تصویر سمت چپ شکل ۳ کانتوری برهم نهاده شده از دما و تزریق قطرات از حل عددی مشاهده می شود و در تصویر سمت راست شکل ۳ مقاطع داده برداری تجربی نشان داده شده است که در ادامه از داده های تجربی به دست آمده در این مقاطع استفاده شده است.



شکل ۳: راست) تصویری از شعله ی مشعل آزمایشگاهی دانشگاه دلفت به همراه خطوط شعاعی داده برداری تجربی [28]، چپ) تصویری از هم برهم نهی کانتور دما و تزریق قطرات در شبیه سازی حالت H_{II}

از نرم افزار تجاری انسیس فلونت ۱۶ برای حل معادلات حاکم جریان و معادلات قطرات استفاده شده است. معادلات انتقالی متوسط گیری شده ی جریان به روش پایا و معادلات بالانس نیرویی قطرات به روش ناپایا حل شده است. از الگوریتم سیمپل^۲ در همبستگی معادلات فشار-سرعت^۳

³ Pressure-Velocity Coupling

⁴ ODE

¹ Linearized Instability Sheet Atomization (LISA) model

² SIMPLE

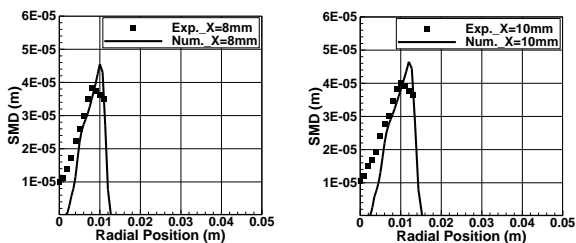
ایی دی سی ثوابتی برای تعیین حجم و زمان مشخصه احتراق در ریزساختارهای رآکتوری استفاده می شود که از مطالعه ی شعله های مختلفی استخراج شده است. تعمیم و استفاده از این ثوابت برای کلیه مسائل احتراقی مسلماً با خطاهایی همراه خواهد بود؛ از جمله در پیش بینی نقطه شروع احتراق و به تبع آن در مقدار دمای بیشینه در مقاطع مختلف. برای حل این مشکل به تازگی روش های دینامیک برای به روزرسانی این ثوابت با توجه به پارامترهای محلی جریان پیشنهاد شده است [30]، [37].

خطای مدل سازی پاشش قطرات نیز می تواند علتی دیگر در خطای پیش بینی دمای بیشینه باشد. در شکل ۵ پروفیل قطر میانگین اس ام دی^۴ نشان داده شده است. علاوه بر پیش بینی رفتار کلی پروفیل قطرات، عدم پیش بینی قطرات ریز نزدیک به محور تقارن مشاهده می شود که می تواند در نرخ تبخیر قطرات سوخت، مهیا شدن مخلوط گازی آماده احتراق، مکان شروع احتراق و بیشینه دمای احتراق در مقاطع مختلف تأثیرگذار باشد.

۴-۲ پروفیل قطر میانگین قطرات

در شکل ۵ پروفیل های قطر میانگین ساتر قطرات (اس ام دی) در راستای شعاع و در چند مقطع از جریان مشاهده می شود. قطرات ریزتر با عدد استوکس پایین با سرعت بیشتری مومنوم اولیه خود را از دست داده و در شعاع های نزدیک به محور تقارن و قطرات بزرگتر به دلیل مومنوم بالاتر و قدرت نفوذ بیشتر در فاصله ی دورتری نسبت به محور تقارن حضور دارند. با افزایش فاصله ی محوری از سوخت پاش افزایش مقدار قطر بیشینه و کمینه در پروفیل و افزایش نفوذ این قطرات در راستای شعاع مشاهده می شود.

نتایج عددی همخوانی قابل قبولی با داده های تجربی نشان می دهد. هرچند قطرات ریز نزدیک محور تقارن به درستی پیش بینی نشده اند که این به دلیل خطای مدل تزریق سوخت پاش فشاری-پیچشی نسبت به کارکرد سوخت پاش آزمایش تجربی می باشد. برای اصلاح این نقیصه می توان با استفاده از داده های تجربی نزدیک به شرط مرزی تزریق (نزدیک به سوخت پاش) توابعی جهت تعیین توزیع مکان، سرعت و قطر قطرات تزریقی ایجاد نمود. راه حل دیگر استفاده از دو تزریق با استفاده از مدل سوخت پاش فشاری-پیچشی ولی با مشخصات هندسی و کارکردی بهینه شده برای دستیابی با ساختار پاشش آزمایش تجربی و به شرط برابری با دبی تزریقی سوخت پاش آزمایش است.



⁴ SMD (Sauter Mean Diameter)

از مقایسه نتایج تجربی و عددی شکل ۴ مشاهده می شود که همخوانی مناسبی بین دمای گاز بر روی محور تقارن ($r=0$ mm)، مکان قله ی دمایی، عرض ناحیه آزاد سازی حرارتی درون شعله و دمای هوای همراه وجود دارد. اختلافی نیز در پیش بینی مقدار قله ی دمایی و تغییرات دمایی لایه برشی جریان هوای همراه و هوای آزاد دیده می شود؛ هرچند این دو مورد اختلاف در پیش بینی حل عددی، با افزایش فاصله ی محوری رو به کاهش است.

همخوانی دما بین نتایج عددی و تجربی در ناحیه یکنواخت هوای همراه (پس از قله دمایی و قبل از ناحیه برشی با جریان آزاد) ناشی از مقادیر مناسب شرط مرزی دما در ورودی این ناحیه است. برای تولید این پروفیل دمایی، ناحیه ای از بالادست مشعل، بین مشعل ثانویه تا سوخت پاش اصلی (به شکل ۱ توجه شود)، حل عددی غیر احتراقی انجام گرفته و پروفیل خروجی دما از آن حل عددی به عنوان شرط مرزی ورودی هوای همراه محدوده ی حل اصلی استفاده شده است.

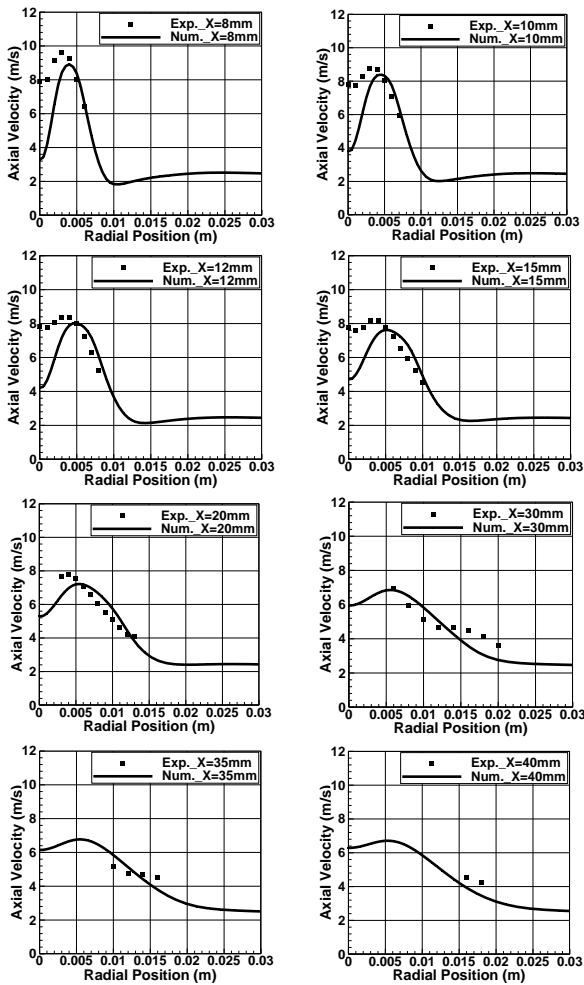
پیش بینی مناسب دما بر روی محور تقارن و پیش بینی با اختلاف در لایه برشی بین هوای همراه و هوای آزاد می تواند به شرط مرزی پروفیل دما در ورودی و یا توان مدل توربولانسی استفاده شده در پیش بینی اختلاط برشی در ارتباط باشد. هرچند در شروع و اتمام ناحیه هوای همراه، جریان برشی و اختلاط^۱ دو جریان سیال را شاهد هستیم ولی برای پیش بینی مناسب مقادیر بر روی محور تقارن شناسایی طول و قدرت ناحیه چرخشی^۲ پشت دیواره سوخت پاش (ناشی از پله رو به عقب^۳ این دیواره) و همچنین برهم کنش پاشش، تبخیر و احتراق ضروری به نظر می رسد. این در حالی است که در ناحیه بین هوای همراه و هوای آزاد، جریان برشی صرف، ناشی از اختلاط توربولانسی و مولکولی دو جریان سیال با دما و ترکیب گونه ای متفاوت است. علت احتمالی دیگری نیز می توان برای اختلاف نتایج تجربی و عددی در ناحیه برشی هوای همراه و آزاد بر شمرده و آن عدم اطلاع دقیق از شرایط دمایی هوای آزاد در شرایط آزمایش تجربی است. این دما در شبیه سازی عددی به صورت یکنواخت و برابر ۳۰۰ کلون لحاظ شده است. عدم قطعیت دمای هوای آزاد در شرایط تست است که می تواند منجر به انتقال حرارت و تولید پروفیل دمای غیر دقیق در اطراف مرز بیرونی هوای همراه (در تماس با هوای آزاد) در شبیه سازی بالادست محدوده حل اصلی شده باشد.

در ارتباط با اختلاف دمای پیش بینی شده برای قله دمایی می توان چندین علت احتمالی را بیان نمود. مورد اول احتمال وجود خطا در داده برداری است. برای نمونه اطلاعات گزارش شده ی تجربی در راستای شعاع در بازه ای قرینه از منفی ۸۰ میلی متر تا مثبت ۸۰ میلی متر است که مقادیری گزارش شده برای دما کاملاً متقارن نیست. البته عدم تقارن کامل، حول محور تقارن به دلیل همگن نبودن جریان حاصل از احتراق مشعل ثانویه بالادست و ماهیت ناپایای شعله قابل پذیرش است. این درحالی است که نتایج حاصل از شبیه سازی عددی از رویکردی پایا و میانگین گیری شده نشأت گرفته است. در این راستا استفاده از رویکرد "شبیه سازی گردابه بزرگ" در هندسه سه بعدی محدوده حل می تواند برای گام بعد به کاهش خطای اشاره شده کمک کند.

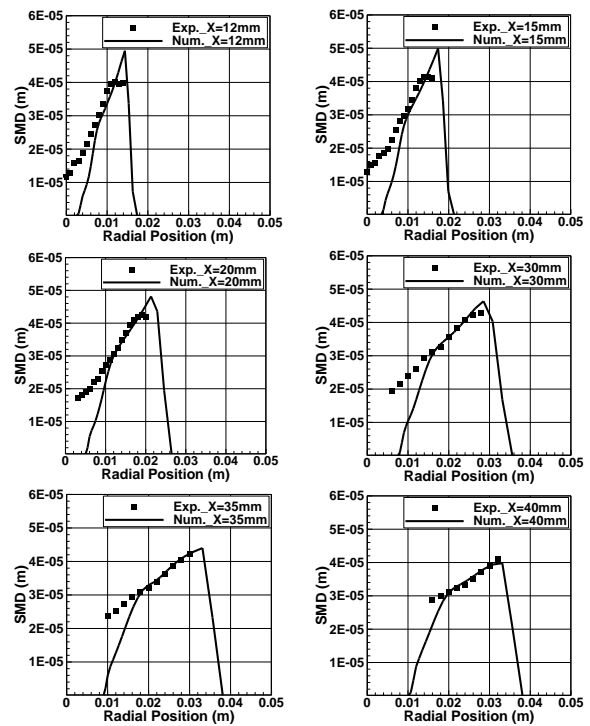
علت دیگر اختلاف دمای مشاهده شده در قله دمایی بین نتایج عددی و تجربی را می توان در عملکرد مدل احتراقی جستجو کرد. در مدل احتراقی

¹ Mixing
² Recirculating
³ Backward Step

شده به روش تجربی در شکل ۷ به وسیله سرعت سنجی لیزر داپلر^۲ (آی دی ای) به دست آمده است. بنابراین مقادیر سرعت محوری بر روی محور تقارن نزدیک به مقادیر به دست آمده از حل عددی خواهد بود و اختلاف مشاهده شده در شکل ۶ خطای روش اندازه گیری به نظر می رسد.



شکل ۶: پروفیل های شعاعی سرعت محوری جریان گازی در مقاطع محوری مختلف، حاصل از شبیه سازی عددی شعله $H_{||}$ مشعل آزمایشگاهی اسپری دلفت و مقایسه با داده های تجربی



شکل ۵: پروفیل های شعاعی قطر میانگین SMD قطرات در مقاطع محوری مختلف، حاصل از شبیه سازی عددی شعله $H_{||}$ مشعل آزمایشگاهی اسپری دلفت و مقایسه با داده های تجربی

۳-۴ پروفیل سرعت

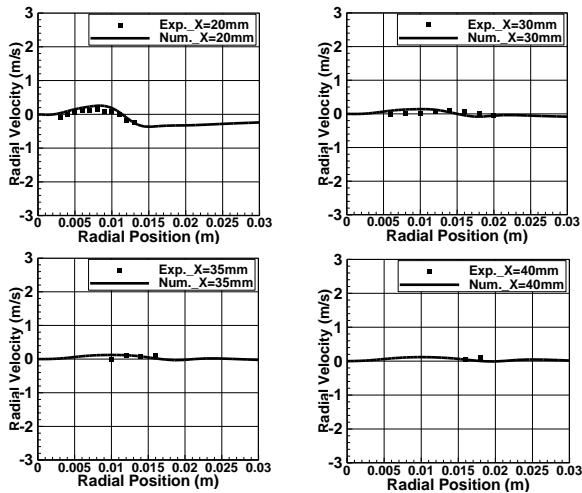
در شکل ۶ پروفیل های شعاعی سرعت محوری در مقاطع مختلف محوری نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز سرعت محوری و شعاعی جریان بر روی محور تقارن رسم شده است.

با مشاهده در پروفیل های سرعت محوری شکل ۶ نقش شعله و ناحیه آزادسازی انرژی حرارتی به خوبی دریافت می شود. آزاد سازی حرارت و افزایش مومنتوم ناشی از آن به جریان گازی باعث دو تا سه برابر بودن مقدار سرعت محوری بر روی محور تقارن نسبت به سرعت میانگین هوای همراه (۲،۲ متر بر ثانیه) باشد. این افزایش سرعت در راستای شعاعی ادامه می یابد تا در درون شعله به میزان بیشینه ی خود می رسد و پس از آن با کاهش سرعت به مقدار میانگین سرعت اعمالی در شرط مرزی هوای همراه نزدیک می شود. تغییرات شعاعی سرعت محوری با افزایش فاصله محوری ملایم تر می شود که علت آن وجود زمان بیشتر برای اختلاط بیشتر جریان احتراقی و غیر احتراقی می باشد. با مشاهده شکل ۷ (و همچنین شکل ۶) می توان دریافت که مقادیر سرعت محوری بر روی محور تقارن با شیب کمی رو به افزایش است.

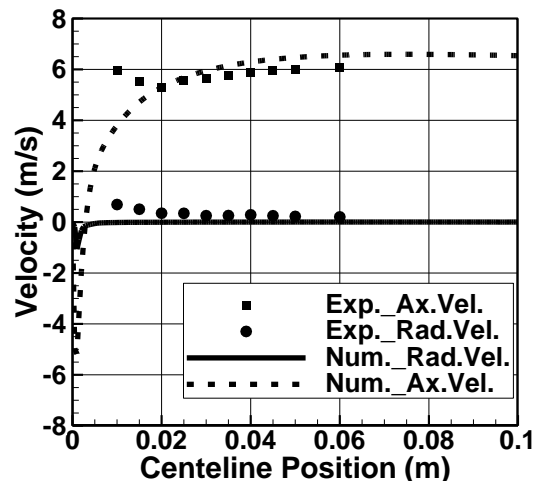
نتایج عددی رفتار کلی پروفیل شعاعی سرعت محوری را پیش بینی می کند؛ هرچند اختلافی در شعاع های نزدیک به محور تقارن ($r=0$) مشاهده می شود. با مقایسه ی مقادیر سرعت محوری تجربی بر روی محور تقارن در شکل ۶ و شکل ۷ عدم انطباقی مشاهده می شود که علت آن روش های اندازه گیری تجربی متفاوت، به نظر می رسد. داده های تجربی شکل ۶ با روش سرعت سنجی فاز داپلر^۱ (پی دی ای) از قطرات زیر ۶ میکرومتر به دست آمده است (در واقع سرعت این قطرات بسیار ریز برابر با سرعت فاز گازی فرض شده است). این در حالی است که داده های اندازه گیری

² Laser Doppler Anemometer (LDA)

¹ Phase Doppler Anemometry (PDA)



شکل ۸: پروفیل های شعاعی سرعت شعاعی جریان گازی در مقاطع محوری مختلف، حاصل از شبیه سازی عددی شعله H_{II} مشعل آزمایشگاهی اسپری دلفت و مقایسه با داده های تجربی



شکل ۷: سرعت محوری و شعاعی جریان گازی در راستای محور تقارن، حاصل از شبیه سازی عددی شعله H_{II} مشعل آزمایشگاهی اسپری دلفت و مقایسه با داده های تجربی

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه به شبیه سازی و بررسی عددی شعله ای حاصل از احتراق توربولانسی اسپری اتانول در جریان هوای اکسندگرم و رقیق از اکسندگرم پرداخته شد. پروفیل های دما، قطر قطرات و سرعت های محوری و شعاعی استخراج و با داده های تجربی مقایسه شد. نتایج زیر را می توان در ارتباط با مقایسه داده های عددی و تجربی و شرح ساختار شعله بیان نمود:

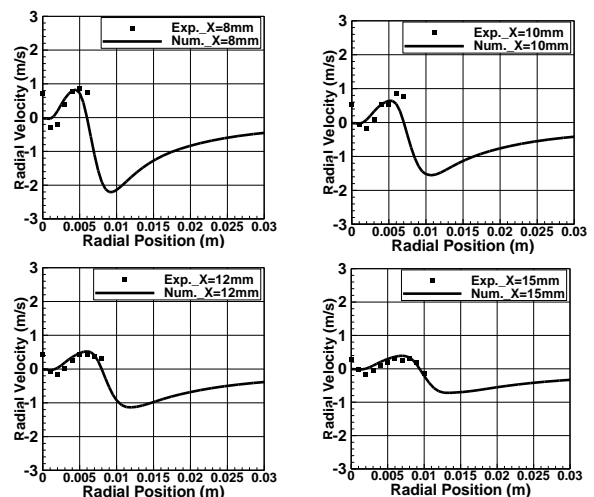
پروفیل دما:

- همخوانی مناسبی بین دمای گاز بر روی محور تقارن، مکان قله ی دمایی، عرض ناحیه آزاد سازی حرارتی درون شعله و دمای هوای همراه وجود دارد. اختلافی نیز در پیش بینی مقدار قله ی دمایی و تغییرات دمایی لایه برشی جریان هوای همراه و هوای آزاد دیده می شود.
- در ابتدا و انتهای جریان هوای همراه دو جریان برشی و اختلاطی به ترتیب با پاشش اسپری و هوای آزاد مشاهده می شود. نتایج عددی، پیش بینی خوبی برای جریان برشی ابتدایی نشان می دهد ولی جریان برشی انتهایی با کمی خطا همراه است که دلیل آن می تواند با شرط مرزی پروفیل دما در ورودی و یا توان مدل توربولانسی استفاده شده در پیش بینی اختلاط برشی در ارتباط باشد.
- در ارتباط با اختلاف دمای پیش بینی شده برای قله دمایی می توان چندین علت احتمالی را بیان نمود. خطای داده برداری تجربی، خطا در تنظیم ثوابت مدل احتراقی برای کارکرد در شرایط احتراقی مسئله و خطای اندک در پیش بینی کامل ساختار پاشش (برهمکنش احتراق- پاشش قطرات) از جمله این دلایل احتمالی می توان دانست.

پروفیل قطر قطرات:

- قطرات ریزتر با عدد استوکس پایین با سرعت بیشتری مومنتوم اولیه خود را از دست داده و در شعاع های نزدیک به محور تقارن و قطرات بزرگتر به دلیل مومنتوم بالاتر و قدرت نفوذ بیشتر در فاصله ی دورتری نسبت به محور تقارن حضور دارند. نتایج عددی همخوانی

در شکل ۸ پروفیل های شعاعی سرعت شعاعی در مقاطع محوری مختلف مشاهده می شود. در فواصل محوری نزدیک به سوخت پاش با حرکت در راستای شعاع ابتدا سرعت محوری مثبت می شود که بیانگر جریانی درونگرا (به سمت محور تقارن) است که نشان گر مکش جریان هوای همراه، ناشی از وجود جبهه شعله است. این مکش جریان به ناحیه داخلی اسپری نقش مهمی در احتراق ناحیه درونی شعله، جایی که قطرات کوچک با تبخیر سریع آماده اختلاط با جریان اکسندگرم اند، بازی می کند. شروع اشتعال شعله نیز در چنین مکانی خواهد بود. با افزایش فاصله شعاعی سرعت شعاعی منفی می شود یعنی به جریانی برون گرا (به سمت جریان هوای آزاد) تبدیل می شود که این پدیده هم به دلیل انبساط جریان گاز ناشی از افزایش دمای ناحیه شعله است. قدرت جریان برون گرا بیشتر از جریان درونگراست که دلیل آن می تواند سرعت شعاعی برون گرای پاشش قطرات و به تبع آن گاز تبخیری آن ها باشد. تغییرات پروفیل سرعت شعاعی با افزایش فاصله از سوخت پاش همانند پروفیل های سرعت محوری ملایم تر می شود. پیش بینی حل عددی به جز برای مقادیر روی محور تقارن قابل قبول به نظر می رسد که انتظار می رود در حل سه بعدی جریان این خطا کاهش یابد.



- Beishuizen, "Modeling of turbulent dilute spray combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, pp. 846-887, 2012.
- [8] Sommerfeld M, Qiu H., "Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow," *Int J Heat Fluid Flow*, vol. 19, p. 10e22, 1998.
- [9] McDonell V, Samuelsen G., "An experimental database for the computational fluid dynamics of reacting and nonreacting methanol sprays," *J Fluids Eng*, vol. 117, pp. 145-53, 1995.
- [10] Widmann J, Presser C., "A benchmark experimental database for multiphase combustion model input and validation," *Combust Flame*, vol. 129, pp. 47-86, 2002.
- [11] Widmann J, Presser C., "Erratum to "a benchmark experimental database formultiphase combustion model input and validation"," *Combust Flame*, vol. 130, pp. 386-390, 2002.
- [12] Düwel I, Ge H-W, Kronemayer H, Dibble R, Gutheil E, Schulz C, et al., "Experimental and numerical characterization of a turbulent spray flame," *Proc Combust Inst*, vol. 31, p. 2247e55, 2007.
- [13] Ge H-W, Gutheil E, "Simulation of a turbulent spray flame using coupled PDF gas phase and spray flamelet modeling," *Combust Flame*, vol. 153, pp. 173-85, 2008.
- [14] Pichard C, Michou Y, Chauveau C, Gökalp I., "Average droplet vaporization rates in partially prevaporized turbulent spray flames," *Proc Combust Inst*, vol. 29(1), pp. 527-33, 2002.
- [15] K. A., *Self-similarity, momentum scaling and Reynolds stress in nonpremixed turbulent spray flames*, Yale University, 1998.
- [16] Karpetis A, Gomez A., "An experimental investigation of non-premixed turbulent spray flames and their self similar behavior," *Proc Combust Inst*, vol. 27, pp. 2001-8, 1998.
- [17] Karpetis A, Gomez A., "An experimental study of well-defined turbulent nonpremixed spray flames," *Combust Flame*, vol. 121, pp. 1-23, 2000.
- [18] Gouesbet G, Berlemont A., "Eulerian and Lagrangian approaches for predicting the behaviour of discrete particles in turbulent flows," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 25, p. 133e59, 1999.
- [19] Masri A, Gounder J., "Turbulent spray flames of acetone and ethanol approaching extinction," *Combust Sci Technol*, vol. 182(4), pp. 702-15, 2010.
- [20] Masri A, Gounder J., "Details and complexities of boundary conditions in turbulent piloted dilute spray jets and flames," in *Experiments and numerical simulations of diluted spray turbulent combustion*, Springer-Verlag, 2011.
- [21] H. R. C. RODRIGUES, *Spray combustion in*
- قابل قبولی با داده های تجربی نشان می دهد. هرچند قطرات ریز نزدیک محور تقارن به درستی پیش بینی نشده اند که این به دلیل خطای مدل تزریق سوخت پاش فشاری-پیچشی نسبت به کارکرد سوخت پاش آزمایش تجربی می باشد.
- پروفیل سرعت محوری:
- با دقت در پروفیل های سرعت محوری نقش شعله و ناحیه آزادسازی انرژی حرارتی در افزایش سرعت به جریان گازی به خوبی مشاهده می شود. رفتار کلی پروفیل سرعت محوری صحیح پیش بینی شده است؛ هرچند اختلافی در شعاع های نزدیک به محور تقارن مشاهده می شود که علت آن روش های اندازه گیری بر مبنای سرعت قطرات ریز به نظر می رسد.
- پروفیل سرعت شعاعی:
- پروفیل های سرعت شعاعی گویای این مطلبند که جریانی درونگرا (به سمت محور تقارن) باعث مکش جریان هوای همراه گرم به ناحیه داخلی اسپری می شود. این جریان نقش مهمی در احتراق ناحیه درونی شعله، جایی که قطرات کوچک با تبخیر سریع آماده اختلاط با جریان اکسنده اند، بازی می کند.
 - در فواصل شعاعی بالاتر جریانی برون گرا (به سمت جریان هوای آزاد) مشاهده می شود که به دلیل انبساط جریان گاز ناشی از افزایش دمای ناحیه شعله است به وجود آمده است.
 - قدرت جریان برون گرا بیشتر از جریان درونگراست که دلیل آن می تواند سرعت شعاعی برونگرای پاشش قطرات و به تبع آن گاز تبخیری آن ها باشد.
- ۶- مراجع
- [1] A. Cavaliere and M. de Joannon, "Mild Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, p. 329, 2004.
- [2] A. Mardani and A. Fazlollahi Ghomshi, "Numerical study of oxy-fuel MILD (moderate or intense low-oxygen dilution combustion) combustion for CH₄-H₂ fuel," *Energy*, vol. 99, no. C, pp. 136-151, 2016.
- [3] J. A. Wüning and J. G. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal no formation," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vols. 23, 81, 1997.
- [4] A. Mardani and S. Tabejamaat, "NOX FORMATION IN H₂-CH₄ BLENDED FLAME UNDER MILD CONDITIONS," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 184, pp. 995-1010, 2012.
- [5] ا. مردانی، اثر دینامیک جریان و مکانیزم شیمیایی بر شعله در رژیم/احتراقی، *HiTAC*، تهران: دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۹.
- [6] L. MA, *COMPUTATIONAL MODELING OF TURBULENT SPRAY COMBUSTION*, Gildeprint, TU Delft, 2016.
- [7] Patrick Jenny, Dirk Roekaerts, Nijso

- "valuation of Equilibrium and Non-Equilibrium Evaporation Models for Many Droplet Gas-Liquid Flow Simulations," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 24, pp. 1025-1055, 1998.
- [35] S. S. Sazhin, "Advanced Models of Fuel Droplet Heating and Evaporation," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, pp. 162-214, 2006.
- [36] S. A. Morsi and A. J. Alexander, "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," *Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 2, pp. 193-208, 1972.
- [37] A. Mardani, "Optimization of the Eddy Dissipation Concept (EDC) model for turbulence-chemistry interactions under hot diluted combustion of CH₄/H₂," *Fuel*, vol. 191, pp. 114-129, 2017.
- moderate and intense low-oxygen conditions An experimental study*, Delft technology University, 2015.
- H. Correia Rodrigues, M.J. Tummers, E.H. van Veen, D.J.E.M. Roekaerts, "Effects of coflow temperature and composition on ethanol spray flames in hot-diluted coflow," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 51, p. 309–323, 2015.
- [22] Hugo Correia Rodrigues, Mark J. Tummers, Eric H. van Veen, Dirk J.E.M. Roekaerts, "Spray flame structure in conventional and hot-diluted combustion regime," *Combustion and Flame*, vol. 162, p. 759–773, 2015.
- [23] G. Cle'on, D. Honore', C. Lacour, A. Cessou, "Experimental investigation of structure and stabilization of spray oxyfuel flames diluted by carbon dioxide," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, p. 3565–3572, 2015.
- [24] Likun Ma, Xu Huang, Dirk Roekaerts, "Large Eddy Simulation of CO₂ diluted oxy-fuel spray flames," *Fuel*, vol. 201, pp. 165-175, 2017.
- [25] S. H. Jamali, *Computational Modeling of Turbulent Ethanol Spray Flames in a Hot Diluted Coflow*, Delft University of Technology, August 26, 2014.
- [26] Likun Ma, Bertrand Naud, Dirk Roekaerts, "Transported PDF Modeling of Ethanol Spray in Hot-Diluted Coflow Flame," *Flow Turbulence Combust*, 2015.
- [27] Likun Ma, Dirk Roekaerts, "Modeling of spray jet flame under MILD condition with non-adiabatic FGM and a new conditional droplet injection model," *Combustion and Flame*, vol. 165, p. 402–423, 2016.
- [28] Gran IR, Magnussen BF, "A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry," *Combust Sci Technol*, vol. 119, pp. 191-217, 1996.
- [29] Alessandro Parente, Mohammad Rafi Malik, Francesco Contino, Alberto Cuoci, Bassam B. Dally, "Extension of the Eddy Dissipation Concept for turbulence/chemistry interactions to MILD combustion," *Fuel*, vol. 163, pp. 98-111, 2016.
- [30] Likun Ma, Dirk Roekaerts, *Developments in turbulent spray combustion model validation*, London: Delft University of Technology, 2015.
- [31] Bhagatwala A., Chen J.H., Lu T.F., "Direct numerical simulations of HCCI/SACI with ethanol," *Combustion and Flame*, vol. 161, pp. 1826-1841, 2014.
- [32] Schmidt DP, Nouar I, Senecal PK, et al, "Pressure-swirl atomization in the nearfield," *SAE*, no. Paper 01–0496, 1999.
- [33] R. S. Miller, K. Harstad and J. Bellan.,
- [34]