

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰



مطالعه عددی سیستم پاشش شعلهای سرعت بالای محلولی(HVSFS)

سید مجید طالبی^{۱*}، سیامک حسین پور^۲ تبریز، دانشگاه صنعتی سهند (^{*}نویسنده مخاطب: m_taleby@sut.ac.ir)

چکیدہ

اخیراً در زمینه سیستمهای پاشش سرعت بالای اکسیژن- سوخت (High Velocity Oxygen Fuel)، روش پاشش شعلهای سرعت بالای محلولی (High Velocity Suspension Flame Spray) توسعه داده شده است؛ که در این روش به جای تزریق ذرات پودری ماده پوششی، محلول سوسپانسیون ذرات تزریق میشود. از دیدگاه دینامیک سیالاتی، فرآیند چای شریق شعلهای سرعت بالای محلول (HVSFS) فرآیندی پیچیده بوده که شامل جنبههای مختلفی از قبیل: برهم کنش سه فازی(گاز، مایع و ذرات جامد)، جریان آشفته، انتقال حرارت، تبخیر محلول(اتانول)، واکنشهای شیمیایی سوخت سیالاتی محلول (اتانول) و گذر جریان آشفته، انتقال حرارت، تبخیر محلول(اتانول)، واکنشهای شیمیایی سوخت سیالات محلوبان) و محلول(اتانول) و گذر جریان مادون صوت به جریان مافوق صوت است. در این مطالعه روشهای دینامیک سیالات محالی(پروپان) و محلول(اتانول) و گذر جریان مادون صوت به جریان مافوق صوت است. در این مطالعه روشهای دینامیک سیالات محاسباتی به کار گرفته شده اند تا معادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی برای این فرآیند حل شوند. برای اعمال اثرات آشفتگی از مدل آشفتگی عمادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی برای این فرآیند حل شوند. برای اعمال اثرات آشفتگی از مدل آشفتگی احماد که است. در فرآیند HVSFS، دو واکنش احتراقی اتفاق می فند: تا تعادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی برای این فرآیند حل شوند. برای اعمال اثرات آشفتگی از مدل آشفتگی عمادله دلی یک مرحلهای، که اثرات تجزیه و واکنش های میانی را در بردارند، از که واکنش اصلی که احتراق پیش آمیخته اکسیژن-پروپان و واکنش دوم که احتراق غیر پیش آمیخته اکسیژن و اتانول واکنش داسی در ای قدال تیخیرشده است. برای هر واکنش یک معادله کلی یک مرحلهای، که اثرات تجزیه و واکنشهای میانی را در بردارند، از که مدل استهلاک ادی بر اساس معادله انتقال گونهها برای تمامی گونهها (۱۰ گونه) محاسبه شده است. قطرها بر ایسی مدل استی اسیکل کران گران گرانژی در فاز پراین آمین خرای قران آمیکه کاز و رفتار تبخیری رویکه دانت ای مدون در جریانی گاز و رفتار تبخیری مدل استهلاک ادی بر اساس معادله انتقال گونهها برای تمامی گونهها (۱۰ گونه) محاسبه شده است. قطرها بر اساس معادله انتقال گونها برای تمامی گونهها (۱۰ گونه) محاسبه شده است. قطرما بر دیز مریزی معروبی کازو ر منان خران مین مرد خریانی گاز و رفتار تبخیری مولاله مدولان بریز میزه بخری و اکنشها را می مدو

واژههای کلیدی: پاشش شعلهای سرعت بالای محلولی- دینامیک سیالات محاسباتی- احتراق- تبخیر قطرات اتانول

۱– مقدمه

چندین دهه است که از روش پاشش حرارتی به عنوان روشی بسیار موفق برای پوشش دهی سطوح مختلف استفاده میشود و با وجود پیشرفتهای اخیر در روشهای پوشش دهی، هنوز هم نقشی بزرگ در صنایع مختلف بر عهده دارد. یکی از مزایای بزرگ این روش قابلیت به کار گیری دامنه وسیعی از مواد پاششی است که برای سطوح با مواد پایهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از چالشهای بزرگ پیش رو در روش پاشش حرارتی، ساخت پوششهای با ساختار نانو است. تکنولوژی پوششهای نانو ساختار، افق کاملاً جدیدی از پوششهایی که دارای سبکی متفاوت و ویژگیهای فیزیکی کاملاً متمایز هستند را می گشاید [1]. عموماً خصوصیات یک پوشش، متأثر از ساختار آن پوشش است، که با فرض ساختاری در محدوده نانو، اصلاحات عمدهای در رابطه با خواص مکانیکی(سختی [۲] و ...)، شیمیایی (مقاومت خوردگی و ...) و الکتریکی، مورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای متفاوت و پاشش های گرمایی محدودیت مورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای متفاوت دارای محدودیت مورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای متفاوت دارای محدودیت مرد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای متفاوت دارای محدودیت محدوده نازه، اصلاحات معدهای داز وی استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای معفاوت دارای محدودیت مورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای متفاوت دارای محدودیت ما ورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایجاد پوششهایی با ضخامتهای معمان دارای محدودیت ما ورد انتظار است. علاوه بر این، روشهای استاندارد پاششی در ایمون و کار بر روی پودرهای متشکل از ذرات نانو کرمایی متداول را پر کند [۳]. با وجود محاسن پوششهای نانو ساختار، حمل کردن و کار بر روی پودرهای متشکل از ذرات نانو هم خر از پوست با نانومتر)، به علت ایجاد خطر برای سلامتی حساس است. ذرات نانو به آسانی در هوا پخش شده و بعد از نفوذ از پوست

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران







تغذیه پودری مورد استفاده قرار داد. علاوه بر جنبه ایمنی به کار گیری این نوع پودرها عملیات پر کردن مجدد، پاک کردن و غیره را در شرایط عادی محدود میسازد؛ همچنین تغذیه مکانیکی این ذرات به دلیل چسبندگی قوی آنها عملاً غیر ممکن میباشد.

کار با این ذرات به صورت محلول جامد در مایع یا سوسپانسیون(حلال معدنی یا آلی) این مشکلات را حل می کند، حمل کردن این ذرات را آسان می کند و تغذیه سیال را نیز میتوان با روش های کاملاً ساده پاشش گرمایی تحقق بخشید [۴]. روش های پاشش پلاسما^۱، شعلهای^۲ و سرعت بالای اکسیژن-سوخت^۲، توانایی پاشش محلول های سوسپانسیونی را دارا هستند. در این مقاله، روش پاشش شعلهای سرعت بالای محلولی¹ مورد بررسی قرار گرفته است، که اساس آن مشعل رایج سرعت بالای اکسیژن-سوخت (شامل تزریق محوری پودر به داخل محفظه احتراق) است که جهت تزریق سیال، اصلاحاتی روی آن انجام گرفته شده است. در فرآیند HVOF، اکسیژن و سوخت گازی با هم مخلوط شده و مخلوط با فشار و دبی جریانی بالا در محفظه احتراق سوزانده می شود تا جت سرعت بالا و دما بالا تولید شود [۵، ۶]. ذرات پودری، معمولاً در محدوده ۵ تا ۵ میکرومتری، توسط گاز حمل کننده(نیتروژن یا آرگون) به داخل جت تزریق میشوند، ذرات تزریق شده در مسیر حرکتشان به سمت سطحی که باید پوشش داده شود، همزمان با افزایش سرعت، حرارت نیز دریافت می کند. در فرآیند HVSFS، به حلیا گاز حمل کننده، سوسپانسیون مایع مستقیماً به داخل محفظه احتراق تزریق می شوند، فرات تزریق شده در می بالای این ایم ای ای از می می کند. در فرآیند HVSFS، به جای گاز حمل کننده، سوسپانسیون مایع مستقیماً به داخل محفظه احتراق تزریق می شوند، فرات تزریق شده در میش حدوده ۵ تا ۵ گار کرد پایدار در فرآیند HVSFS دارد، به عنوان سوخت اصلی و اتانول به عنوان حلال آلی که به صورت محوری به محفظه کار کرد پایدار در فرآیند HVSFS دارد، به عنوان سوخت اصلی و اتانول به عنوان حلال آلی که به صورت محوری به محفظه احتراق تزریق می شود. فرآیند GTV-mb دارد، به عنوان سوخت اصلی و اتانول به عنوان حلال آلی که به صورت محوری به محفظه احتراق تزریق می شود دول آلی که به صورت محوری به محفظه در تران خریتی که به محفظه در آلی گار کرد پایدار در فرآین در فرایت می می توند و می دور آیند وری به محفظه در آیز در باقت می گیرد [۲]. پروپان به دایل مریتی که به محفظه در آلی ترم می قرر تر محروی به محفظه در ترتریق می شود. انتخاب شده است [۸].

از دیدگاه دینامیک سیالاتی فرآیند HVSFS فرآیندی پیچیده که شامل جنبههای مختلفی از قبیل: برهم کنش سه فازی(گاز، مایع و ذرات جامد)، جریان آشفته، انتقال حرارت، تبخیر محلول(اتانول)، واکنشهای شیمیایی سوخت اصلی(پروپان) و محلول(اتانول) و گذر جریان مادون صوت به جریان مافوق صوت است. ساختار و ویژگیهای فیزیکی پوششها به پیشینه دمایی و سرعتی ذرات برخوردی بستگی دارند. در سیستم HVSFS، نانو ذرات در داخل قطرات حلال به محفظه احتراق تزریحق می گوند، که این قطرات بعد از طی مسافتی معین در تفنگ HVSFS، نانو ذرات در داخل قطرات را در جریان گاز احتراقی رها می کنند. بنابراین دما و سرعت نانو ذرات هم به جریان گاز احتراقی و هم خصوصیات تزریق سوسپانسیون بستگی دارد. عوامل می کنند. بنابراین دما و سرعت نانو ذرات هم به جریان گاز احتراقی و هم خصوصیات تزریق سوسپانسیون بستگی دارد. عوامل معددی وجود دارد که در کیفیت پوشش موثر هستند، بنابراین مطالعه محدود و منحصر به یک دیدگاه خاص نمی تواند فهمی می کوند. به توان از فرآیندهای پیچیده، که در تفنگ HVSFS روی می دهد، فراهم نماید. هدف این مقاله توسعه مدلی بر اساس روشهای دینامیک سیالات محاسباتی است که با تحلیل جریان گازی و انتقال حرارت در داخل سیستم HVSFS بتوان به توان نهایی این روش رسید. تنها یک نمونه کار دینامیک سیالات محاسباتی بر روی فرآیند HVSFS بتوان به مهای دینامیک سیالات محاسباتی است که با تحلیل جریان گازی و انتقال حرارت در داخل سیستم پاششی HVSFS روشهای دینامیک سیالات محاسباتی است که با تحلیل جریان گازی و انتقال حرارت در داخل سیستم پاششی HVSFS بتوان به یوان نهایی این روش رسید. تنها یک نمونه کار دینامیک سیالات محاسباتی بر روی فرآیند HVSFS انجام شده است. روشهای دینامیک سیالات محاسباتی است که با تحلیل جریان گازی نو انتقال حرارت در داخل سیستم پاششی HVSFS بتوان به توان نهایی این روش رسید. تنها یک نمونه کار دینامیک سیالات محاسباتی بر روی فرآیند HVSFS انجام شده است. بوش لی کر مری و فرز دار داند دان در موری و پایا مورد بررسی قرار دادند. کار آنها بنها می کردند. آن ها در راین مقال و خارج تفنگ به صورت همزمان مدون و از مران داخی کونفر کردند. آن ها در فرآیند HVS53 سیزن در این مقال و فرآیند این در فران مادن و خارج تفنگ میرفنظر کردند. در ایس مقال و فرآیند این در در یانی انانول در فرآین در در یان مقان مر ما و خارج جریانی ا

¹ Plasma

² Flame Spraying

³ High Velocity Oxygen Fuel(HVOF)

⁴ High Velocity Suspension Flame Spray(HVSFS)

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰





۲- توسعه مدل مناسب

در کار پیش رو، مدل محاسباتی سه بعدی هندسه ای مشابه با هندسه تفنگ G-®TopGun توسعه داده شده است. طرح کلی مدل و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط پیش آمیخته اکسیژن-پروپان از طریق سوراخهای ریزی به محفظه احتراق تزریق می شود که در آن سوخت محترق شده و گازهای احتراقی در حین عبور از نازل همگرا و لوله، سرعت می گیرند. در راستای خنک کاری تفنگ، آب در درون لولههایی در اطراف محفظه احتراق و لوله تفنگ در جریان از سریق می شود که در آن سوخت محترق شده و گازهای احتراقی در حین عبور از نازل همگرا و لوله، سرعت می گیرند. در راستای خنک کاری تفنگ، آب در درون لولههایی در اطراف محفظه احتراق و لوله تفنگ در جریان است. سرعت سوسپانسیون نانو ذرات در اتانول به صورت محوری به محفظه احتراق تزریق می شود، که ابتدا قطرات حلال تبخیر شده، سپس نانو ذرات ذوب شده و بعد از خروج از تفنگ توسط جت گاز انبساطی به سمت سطح مورد نظر سرعت داده می شوند.



شکل ۱- طرح سه بعدی تفنگ فرایند پاشش حرارتی HVSFS همراه با ورودیهای مخلوط اکسیژن - پروپان و سوسپانسیون [۷]

۲-۱- دامنه و شبکه بندی مدل

همان طور که از شکل ۱ مشخص است، تفنگ پاششی دارای هندسه ای متناوب^۱ است که برای کاهش پیچیدگی و زمان محاسبات تنها یک قطاع از تفنگ به عنوان دامنه محاسباتی انتخاب شده است. دامنه مدل محاسباتی شامل نواحی داخل تفنگ و ناحیه جت آزاد خروجی است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل سازی برای شبکه بندی دامنه محاسباتی از شبکه بندی نامنظم استفاده شده است. شبکه بندی داخل تفنگ شامل ۳۹۰۰ گره و ۱۲۵۰۰ المان چهار وجهی است. دامنه خارجی جت آزاد، مسافت نفوذ جت را پوشش می دهد که در این مدل، به اندازه ۲۰ برابر شعاع خروجی تفنگ در راستای محوری و ۳ برابر شعاع خروجی تفنگ در راستای شعاعی گسترده شده است. این ناحیه توسط ۱۰۸۰۰ گره و ۴۵۶۰۰ المان چهاروجهی شبکه بندی شده است.

برای تمامی دیوارهای تفنگ اعم از دیوارهای محفظه احتراق، نازل و لوله متصل به نازل شرایط مرزی عـدم لغـزش و دما ثابت اعمال شده است. این مطالعه بر روی فرآیند انتقال حرارت آب خنک کننده، دقیق نشده و دمای دیوارها در سراسر تفنـگ برابر با دمای آب ورودی (۲۸۳ K) فرض شده است. بر اساس مطالعات پیشین بر روی سیسـتمهای HVOF [۹] در ورودیها، مقیاسهای طولی آشفتگی^۲ بر پایه اندازه فیزیکی ورودیها و شدت آشفتگی^۳ ۱۰٪ لحاظ شدهاند. مخلـوط اکسـیژن-پروپـان از طریق سوراخهایی به قطر ۱ میلی متر و با دبی ۲/۲۰ گرم بر ثانیه و دمای ۳۰۰ کلوین به محفظه احتـراق تزریـق مـیشود. در راستای تکمیل واکنش احتراق اتانول تبخیر شده، باید کسر جرمی اکسیژن بیشتر از مقدار استوکیومتری آن در واکنش احتـراق اصلی باشد، زیرا اکسیژن باقی مانده برای احتراق اتانول تبخیرشده، مصرف خواهد شد. از این رو در این کار نسبت پروپـان به اکسیژن در تمامی مدلهای مطالعاتی ۲۰۲۵ لحاظ شده است. قطرات کروی اتانول با اندازه یکسان قطر ۳/۰ میلی متـر و دبـی

¹ Periodic

² Turbulent length scales

³ Turbulence intensity







ثانیه فرض شده است. گازهای احتراقی از خروجی تفنگ به هوای بیرون تخلیه می شوند که شرط مرزی فشار خروجی با دمای ۳۰۰ ۳۰۰ کلوین و فشار ۱۰^{۵×۱}/۱۷ پاسکال برای آن فرض شده است.



شکل ۲- شبکه بندی داخل و خارج تفنگ

۲-۲- روش حل

در این مدلسازی از الگوریتم حل تفکیکی^۱ [۱۰] بر مبنای حجم کنترل^۲ استفاده شده است. این الگوریتم از عدم همگرایی و نوسان در میدانهای سرعت و فشار جلوگیری میکند. در این روش، از تمامی معادلات حاکم بر مدل شامل معادلات بقاء جرم، مومنتوم، انرژی، آشفتگی و انتقال گونهها روی هر یک از سلولهای محاسباتی انتگرال گیری می شود تا برای هر یک از متغیرهای وابسته مجهول، معادلات جبری تولید شود. مؤلفههای سرعت و فشار با استفاده از روش شبه ضمنی معادلات الحاقی فشاری^۳ (SIMPLE) به همدیگر جفت شدهاند [۱۱، ۱۲]، که این روش برای محاسبه فشار از روند حدس و اصلاحی استفاده می کند. برای گسسته سازی معادلات حاکم نیز از روش روبه باد مرتبه اول/دوم استفاده شده است. این روش

گستره وسیعی از مسائل جریان آشفته را میتوان با استفاده از مدل ٤-k مدلسازی کرد [۱۴، ۱۵]. اساس این روش فـرض وجود تشابه بین تنشهای ویسکوز و تنشهای رینولدزی است. مدل ٤-k با توجه به شرایط جریان دارای انواع مختلفی است. یکی از مدلهای توسعه یافته، مدل تحقق پذیر ٤-k ^۴ است؛ که شامل فرمول بندی جدیـدی بـرای لزجـت آشـفتگی اسـت کـه ضریب لزجت دینامیکی در آن مقداری ثابت نمیباشد [۱۶]. در این کار برای مدلسازی آشـفتگی از ایـن مـدل اسـتفاده شـده است.

قطرات و نانو ذرات توسط رویکرد لاگرانژی مسیریابی شدند. در رویکرد لاگرانژی، معادلات ناویر ⊣ستوکس برای سـیال بــه عنوان یک محیط پیوسته حل میشوند، در حالیکه رفتار فاز گسسته(قطرات و نانو ذرات) با مسیریابی تعـداد زیـادی از ذرات در داخل فاز پیوسته محاسبه شده و بررسی میشود.

۲–۳– مدل شیمیایی

در تفنگ پاشش حرارتی HVSFS دو واکنش احتراق اتفاق میافتد: الف) واکنش احتراق اصلی، واکنش اکسیژن و پروپان پیش آمیخته میباشد که نقش اصلی را در فراهم کردن انرژی فرآیند پوشش دهی بازی میکند. انرژی آزاد شده از این واکنش با منبسط شدن گازها هنگام عبور از نازل همگرا به انرژی جنبشی تبدیل میشود؛ و همراه با این تبدیل، از فاز گازی به قطرات و نانو ذرات، مومنتوم و حرارت منتقل میشود. ب) واکنش ثانویه، واکنش غیر پیش آمیخته اتانول تبخیرشده و اکسیژن است. بعد از تزریق قطرات اتانول به محفظه احتراق، به این قطرات گرما داده میشود تا تبخیر شده، سپس اتانول

¹ Segregated solution algorithm

² Control volume

³ Semi-implicit method for pressure linked equations

⁴ Realizable k–ε

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران







تبخیر شده شروع به واکنش با اکسیژن باقیمانده از احتراق اولیه میکند. با توجه به دبیهای ورودی مخلوط اکسیژن-پروپان و اتانول، میتوان نتیجه گرفت که کسر حجمی اتانول بخار شده بسیار کوچک است. با این حال به علت نزدیکی این واکنش به مسیر ذرات رها شده، این واکنش اثر ویژهای در گرمایش و ذوب نانو ذرات خواهد داشت. بنابراین مطالعه این واکنش برای دستیابی به فهم دقیقی از فرآیند HVSFS ضروری است.

برای مدل سازی هر یک از واکنشهای احتراقی، یک واکنش کلی یک قدمی که اثرات تجزیـه^۱ و واکـنشهـای میـانی را محاسبه میکند، از کد شیمیایی تعادلی CEA که توسط Gordon و McBride [۱۷] توسعه داده شده، استخراج شده است کـه به صورت ذیل هستند:

 $C_{3}H_{8} + 4.387 O_{2} \rightarrow 1.42 Co_{2} + 2.933 H_{2}O + 1.58 CO + 0.415 H_{2} + 0.979 OH + 0.325 H + 0.424 O$

$$C_2H_5OH + 2.496O_2 \rightarrow 0.874Co_2 + 2.016H_2o + 1.126CO + 0.427H_2 + 0.757OH + 0.387H + 0.345O$$

مدل استهلاک ادی^۲ [۱۸] برای حل این واکنشها مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این مدل معادلات انتقال گونهها برای تمامی گونههای موجود در فرآیند(۱۰گونه) حل شده است. فرض شده است که نرخهای واکنشی به جای ضرایب آرینوس توسط پارامترهای آشفتگی کنترل میشوند. نرخ خالص تولید گونه i در واکنش r توسط عبارت کوچکتر دو عبارت زیر تعیین میشود:

$$R_{i,r} = v_{i,r} M_{w,r} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v_{R,r} M_{w,R}}\right)$$
(1)

$$R_{i,r} = v_{i,r} M_{w,i} AB \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{\sum_{p} Y_{p}}{\sum_{j}^{N} v_{i,r} M_{w,j}} \right]$$
(7)

i در این روابط N تعداد گونههای حاضر در واکنش، $v_{i,r}$ ضریب استوکیومتری واکنشگر i در واکنش F وزن مولکولی گونه i Y_R کسر جرمی واکنشگر R کسر جرمی واکنشگر P است. A و B ضرایب تجربی هستند که به ترتیب برابرند با ۴/۰ و ۲/۰.

۳- نتايج

۳-۱- دینامیک جریان

اثر تبخیر قطرات اتانول و احتراق اتانول گازی بر دما و سرعت فاز گازی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل منحنی تغیرات دما و سرعت در دو حالت تزریق قطرات اتانول و عدم تزریق قطرات اتانول مقایسه شدهاند. کهش دمای فاز گازی در ناحیه محوری تفنگ به علت تبخیر قطرات اتانول، در شکل ۳(الف) کاملاً مشهود است. بیشترین اختلاف دما بین دو منحنی در ناحیه محوری تفنگ به علت تبخیر قطرات اتانول، در شکل ۳(الف) کاملاً مشهود است. بیشترین اختلاف دما بین دو منحنی در ناحیه محوری تفنگ به علت تبخیر قطرات اتانول، در شکل ۳(الف) کاملاً مشهود است. بیشترین اختلاف دما بین دو منحنی ۲۰۰ کلوین است که مربوط به ناحیه تبخیر قطرات است و این ناحیه در جلوی گلوگاه اتفاق میافتد. بعد از گذر از این ناحیه دمای گاز به علت احتراق اتانول تبخیر شده، افزایش مییابد. در شکل ۳(ب) اختلاف بین دو منحنی سرعت نیز از تبادل مرعت در باین دو منحنی سرعت نیز از تبادل می بین قطرات اتانول و منه با فاز پیوسته ناشی میشود.

رفتار منحنیهای سرعت و دما در راستای خط محوری منطبق بر تئوری جریان تراکم پذیر است. جریان مادون صـوت در نازل، سرعت داده میشود؛ سپس در گلوگاه با موج تراکمی ضعیفی برخورد میکند، بنابراین در این ناحیه سرعت جریان گـازی کمی کاهش پیدا کرده و دمای آن نیز افزایش مییابد. در لوله متصل به نازل به دلیل احتراق اتانول گازی و اختلاط شعله، دمـا

¹ Dissociation

² Eddy dissipation model

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران



کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰



و سرعت جریان گازی در راستای خط محوری افزایش مییابد. در ناحیه خروجی تفنگ، جت سرعت بالا قبل از اینکه از بین رود، از تعدادی موج تراکمی و انبساطی عبور میکند. جت گازی به تدریج با هوای محیط مختلط میشود، به نحوی کـه طول هسته جت آزاد با هسته جت آزاد تقریباً شش برابر قطر خروجی تفنگ میباشد. در جدول ۱ پیش بینی روش عـددی طـول هسته جـت آزاد با نتایج روابط تجربی [۱۹، ۲۰، ۲۱]، مقایسه شده است. کاملاً مشهود است که روابط آزمایشگاهی Witz و Mitz و Mitz می ماند. در جدول ۱ پیش بینی روش عـددی طـول هسته جـت آزاد با ملاحظه ای زوال جت گرم مافوق صوت را بیش از روش عددی پیش بینی میکند. این اختلاف میتواند ناشی از این نکته باشـد که روابط آزمایشـگاهی Witz و Mitz و Mitz ملاحظه ای زوال جت گرم مافوق صوت را بیش از روش عددی پیش بینی میکنند. این اختلاف میتواند ناشی از این نکته باشـد که روابط آنها بر اساس دادههای آزمایشگاهی بدست آمده که نسبت چگالی آنها از ۲۰٬۴۲ تغییـر میکـرد (نسبت چگالی برابر است با نسبت چگالی جریان آزاد به چگالی خروجی). در حالیکه در فرآیند ST/۶ تا ۲۰/۰ تا می روابط آنها بر اساس دادههای آزمایشگاهی بدست آمده که نسبت چگالی آنها از ۲۰٬۴۲ تغییـر میکـرد (نسبت چگالی برابر است با نسبت چگالی جریان آزاد به چگالی خروجی). در حالیکه در فرآیند HVSFS، نسبت چگالی جت گرم برابر با می با درای می ایند. این روابط که بر اساس دادههای آزاد به چگالی خروجی). در حالیکه در فرآیند HVSFS، نسبت چگالی جت گرم برابر با می بازاین این روابط که بر اساس نسبتهای چگالی کم جتهای سرد بدست آمدهاند، برای جتهای مافوق صوت گرم دقیق نمیباشند. از طرف دیگر، رابطه آزمایشگاهی دما ثابت La به طور کامل از تبادل حـرارت بـین جـت گـرم و هوای گرم دقی نمی پیش میکند که در عمل روی میده.

جدول ۱- پیش بنی طول هسته جت

مطالعه حاضر	Lau [٢١]	Chu [۲۰]	Witz [۱۹]	
۶١/٢	۲۰/۴	۶٩/۵	۶۸/۱	طول هسته جت (میلی متر)



شکل ۳- بررسی اثر تزریق اتانول بر جریان گازی در راستای خط محوری الف- دما ب- سرعت

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران



کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰



۲-۲- رفتار قطرات اتانول و نانو ذرات ماده پوششی

منحنی تغییرات دما و سرعت یک قطره اتانول در راستای خط محوری در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای قطره تا دمای جوش(۳۵۵ کلوین) به صورت خطی افزایش مییابد، سپس قطره شروع به تبخیر شدن میکند. قسمت تبخیر نشده قطره، تفنگ را با دمای ثابت ۳۵۵ کلوین ترک میکند. قطره سرعت تزریق خود را تا نقطه جوش حفظ میکند، سپس قسمت تبخیر نشده قطره به دلیل کاهش جرم، به شدت تحت تأثیر فاز پیوسته قرار گرفته و سرعت آن افزایش مییابد.

در شکل ۵ خطوط کسر جرمی ثابت اتانول در داخل تفنگ نشان داده شده است. تقریباً در فاصله ۲۰ میلی متری (ابتدای نازل)، تبخیر قطرات اتانول شروع شده و در جلوی گلوگاه بیشترین کسر جرمی اتانول (۰/۳۵) به فاز گازی ملحق مـیشـود. در پایین دست اتانول گازی با اکسیژن باقیمانده از احتراق پروپان واکنش داده و کسر جرمی آن کاهش مییابد.

نانو ذرات ماده پوششی به دلیل ناچیز بودن اینرسی حرکتی و گرماییشان، تحت تأثیر میدانهای مومنتومی و گرمایی محیط اطراف قرار می گیرند. در فرآیند HVSFS، نانو ذرات مسافت معینی را داخل قطرات اتانول با دما و سرعت برابر با دما و سرعت قطرات طی می کنند، بعد از تبخیر قطرات، نانو ذرات در فاز گازی رها می شوند و دما و سرعتشان به مقادیر نزدیک به دما و سرعت فاز گازی میل خواهد کرد.در کار پیش رو در راستای بررسی پیشینه گرمایی و مومنتومی نانو ذرات رفتار تبخیری قطرات اتانول، میدان جریان گازی و عوامل موثر بر آنها مطالعه شده است. برای مطالعه رفتار تبخیری قطرات اتانول دو کمیت نقطه تبخیر ^۱ و شدت تبخیر^۲ معرفی می شود. در نقطه تبخیر بیشترین مقدار کسر جرمی اتانول وارد فاز گازی می شود؛ و شدت تبخیر نیز عدد بی بعدی است که به صورت زیر تعریف می شود:



¹ Evaporation point

² Evaporation intensity



شکل ۵- خطوط کسر جرمی ثابت اتانول گازی در داخل تفنگ

۳-۳- بررسی عوامل موثر در فرآیند

برای بررسی اثر شرایط مختلف کارکردی در فرآیند HVSFS چند مورد مختلف شبیه سازی شده است؛ کـه هـر یـک از این موردها تنها شامل تغییر در یکی از پارامترهای سیستم است. عوامل فرآیندی کـه در ایـن مقالـه بررسـی شـدهانـد عبـارت هستند از: دبی ورودی مخلوط اکسیژن-پروپان و دبی ورودی اتانول.

۳-۳-۱- دبی مخلوط اکسیژن-پروپان

در موردهای مطالعه شده، دبی ورودی اتانول و همچنین نسبت اکسیژن به پروپان ثابت نگه داشته شد. در مورد اول، دبی اکسیژن-پروپان نصف دبی مورد اصلی و در مورد دوم، دبی ورودی ۱/۵ برابر دبی مورد اصلی تنظیم شد. در شکل ۶ منحنیهای فشار، دما و سرعت فاز گازی در راستای خط محوری نشان داده شده است. افزایش دبی ورودی باعث افزایش فشار داخل تفنگ میشود. شکل ۶(الف) نشان میدهد که با افزایش دبی به اندازه ۵۰٪، فشار استاتیکی محفظ و احتراق تقریباً به اندازه ۵۰٪ افزایش مییابد.

با مقایسه منحنیهای سرعت در شکل ۶(ج)، میتوان به این نتیجه رسید که تغییر دبی اکسیژن-پروپان تأثیر محدودی در افزایش سرعت گاز داخل نازل دارد، زیرا جریان گازی در گلوگاه به حالت خفگی(عدد ماخ یک) میرسد. با این حال اختلاف دما در این ناحیه میتواند به چند صد درجه برسد. در لوله متصل به نازل با کاهش اثر تبخیری قطرات اتانول، دما و سرعت فاز گازی بر اساس میزان دبی خروجی از گلوگاه افزایش مییابد. با افزایش دبی اکسیژن-پروپان، نسبت دبی اکسیژن- پروپان به دبی اتانول افزایش مییابد. بنابراین حرارت بیشتری نسبت به حرارت جذب شده توسط قطرات اتانول تولید میشود، که منجر به افزایش دما و سرعت شعله میشود. با این حال این گزاره صحیح نیست که افزایش سرعت و دمای داخل تفنگ نامحدود است. هنگامی که دبی ورودی اتانول به اندازهای کم شود که بتوان در مقایسه با دبی اکسیژن-پروپان از آن صرفنظر کرد، سرعت و دمای فاز گازی به حالت "اشباع" میل میکنند. مخصوصاً در مورد دمای محفظه احتراق، با افزایش دما از آن صرفنظر کرد، نیز از طریق دیوارهای خنک کننده نیز افزایش مییابد. بنابراین، این موضوع، عجیب نیست که منحنی ها انتقال حرارت مورد اصلی و مورد دوم، در داخل تفنگ مشابه هم هستند.

سرعت و دمای جریان گازی بعد از خروج از تفنگ همسان با افزایش دبی اکسیژن-پروپان افزایش مییابد. بـرای مثـال در فاصله ۱۵ سانتی متری خروجی تفنگ، افزایش ۵۰ درصدی دبی اکسیژن- پروپان باعث افزایش سرعت به انـدازه ۵۰۰ متـر بـر ثانیه و دما به اندازه ۳۰۰ کلوین میشود؛ علاوه بر این با افزایش دبی اکسیژن-پروپان، اینرسی مومنتومی و گرمـایی خروجـی از تفنگ نیز افزایش مییابد و شعله گازی میتواند برای مسافت طولانیتری، سرعت و دمای خود را حفظ کند؛ به عبارت دیگـر بـا افزایش دبی مخلوط اکسیژن-پروپان، طول هسته جت افزایش مییابد.

با افزایش دبی اکسیژن-پروپان، حرارت انتقالی به قطرات به علت افزایش انرژی تولیدشـده، افـزایش مـییابـد؛ کـه باعـث انتقال نقطه تبخیر به بالادست جریان میشود و شدت تبخیر نیز افزایش مییابد. این نتایج توسـط نمودارهـای نقطـه تبخیـر و شدت تبخیر در شکل ۷ نشان داده شدهاند. مقایسه خطوط دما ثابت داخل تفنگ برای سه دبی مختلف در شکل ۸، نتـایج ذکـر

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران





کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰

شده را تایید میکند. در شکل ۸ با افزایش دبی اکسیژن-پروپان، ناحیه تبخیر به بالادست منتقل و فشردهتر میشود. افزایش حرارت انتقالی به قطرات در اثر افزایش دبی اکسیژن-پروپان نامحدود نمیباشد. به همین دلیل است که منحنیهای شدت تبخیر و نقطه تبخیر به مقادیر معینی میل میکنند.







شکل ۶- تأثیر دبی جریان اکسیژن-پروپان بر جریان گازی الف-فشار ب- دما ج- سرعت (F.R(ref)= 0.26 g/s)



چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰





شکل ۷- تأثیر دبی جریان اکسیژن- پروپان بر شدت تبخیر و نقطه تبخیر (F.R(ref)= 0.26 g/s)



شکل ۸- خطوط دما ثابت داخل تفنگ برای دبیهای اکسیژن -سوخت مختلف (F.R(ref)= 0.26 g/s)

۳-۳-۲ دبی اتانول

در این بخش چهار مورد با دبیهای مختلف اتانول بررسی شد، در حالیکه سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد. در اولین مورد دبی اتانول نصف دبی مورد اصلی، در دومین مورد دبی اتانول ۲/۷۵ دبی مورد اصلی و در آخرین مورد دبی اتانول ۱/۵ برابر دبی مدل اصلی تنظیم گردید. شکل ۹ تأثیر دبی اتانول بر سرعت و دمای فاز گازی در راستای خط محوری را نشان می دهد. با افزایش دبی اتانول، سرعت و دمای شعله به شدت در ناحیه تبخیر اتانول در جلوی گلوگاه کاهش می یابد. در مورد اول دمای گاز در ناحیه تبخیر در حدود ۲۶۰۰ کلوین است. هنگامی که دبی اتانول دو برابر می شود (مورد اصلی)، دما به ۱۸۰۰ کلوین کاهش می یابد و سرعت نیز از ۲۶۰۰ متر بر ثانیه به ۲۰۰ متر بر ثانیه کاهش می یابد. بعد از خروج شعله از تفنگ، منحنیهای دما و سرعت گاز در دبیهای مختلف، رفته رفته به هم نزدیک تر می شوند. این موضوع با در نظر گرفتن ایـن نکته که دبی اتانول معمولاً خیلی کوچک تر از دبی اکسیژن -پروپان است، قابل پیش بینی است. با اختلاط شعله در خروجی تفنگ، رفتار شعله در راستای خط محوری به رفتار محصولات واکنش اکسیژن -پروپان میل می کند. نتایج نشان می دهند که برای اینکه بیشترین دما و سرعت شان در معری منانو ذرات پوششی داشته باشیم، بهتر است دی انانول ورودی در کم ترین مقدار نود باشد. با افزایش دبی اتانول، تجمع قطرت اتانول نیز در ناحیه محوری تفنگ افزایش می می یابد. بنابراین حرارت منتقل مود باشد. با افزایش دی اتانول، تجمع قطرت اتانول نیز در ناحیه محوری تفنگ افزایش می می یابد. بنابراین حرارت منتقل مود باشد. با افزایش دی اتانول، تجمع قطرت اتانول نیز در ناحیه محوری تفنگ افزایش می می می در ترایت می می یابد. به هر کدام از قطرات کاهش می یابد. به این دلیل است که با افزایش دبی اتانول، نقطه تبخیر به پایین دست جریان منتقل



چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران کاشان – دانشگاه کاشان – بهمن ماه ۱۳۹۰



دارای شکست است. دلیل این نکته این است که در مورد اصلی تبخیر در نازل اتفاق میافتد که به دلیل افزایش سرعت در این ناحیه، انتقال حرارت کاهش پیدا کرده و نقطه تبخیر بیشتر از مقدار مورد انتظار به پایین دست منتقل میشود.



شکل ۹- تأثیر دبی جریان اتانول بر جریان گازی الف- فشار ب- دما ج- سرعت (F.R(ref)= 1.24 g/s)



شكل ۱۰- تأثير دبي جريان اكسيژن-سوخت بر شدت تبخير و نقطه تبخير (F.R(ref)= 1.24 g/s)

۴ – نتیجه گیری

در این مقاله، دینامیک کلی جریان در داخل تفنگ و ناحیه جت آزاد تفنگ با استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی شرح داده شد و تأثیر دبی اکسیژن-پروپان و دبی اتانول در رفتار فاز گازی و تبخیر شدن قطرات اتانول بررسی شد.

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران







روش عددی استفاده شده در این مطالعه قابلیت بازنمایی مناسب تأثیرات تراکم پذیری جریان، احتراق، تبخیر و آشفتگی را دارا بود. هدف اصلی این مطالعه، فراهم کردن بینش و فهم دقیقی از فرآینـد HVSFS و نقـش عوامـل تـأثیر گـذار در آن بـود؛ کـه شناخت این عوامل منجر به تولید پوششهایی با ساختار و کیفیتی ممتاز خواهد شد. یافتههای اساسی این مطالعه را مـی تـوان به صورت ذیل جمع بندی کرد: الف) جریان داخل و خارج تفنگ با تئوری جریان تراکم پذیر سازگار است. طـول هسـته جـت آزاد مافوق صوت، شش برابر قطر خروجی تفنگ پیش بینی شد که با پیش بینیهـای روابـط آزمایشـگاهی هـمخـوانی داشت. ب) افزایش دبی مخلوط اکسیژن-پروپان، دما و سرعت شعله را مخصوصاً در خروجی تفنگ افـزایش مـیدهـد بـا ایـن حـال مهم ترین اثر این پارامتر افزایش طول هسته جت است که باعث میشود شعله برای مسافت طولانی تری دمـا و سـرعت خـود را حفظ کند. ج) تغییر دبی اتانول اثر چشمگیری در دما و سرعت فاز گازی در راستای خط محوری ندارد. با این حال کاهش ایـن پارامتر باعث میشود که منحنیهای دما و سرعت داخل تفنگ هموارتر شوند.

References

1- S S. Siegmann, M. Leparoux, L. Rohr, Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen, Werkstoff technischen Kolloquium, Chemnitz, 2005, p 314.

2- Z.G. Ban, and L. Shaw, Characterization of Thermally Sprayed Nanostructured WC-Co Coatings Derived from Nanocrystalline WC-18wt% Co Powders, J. Therm. Spray Technol., 2003, 12(1), p 112-119.

3- J.R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH), 2004.

4- R. Gadow, A. Killinger, and J. Rauch, Introduction to High-Velocity Suspension Flame Spraying, J. Therm. Spray Technol., 2008, 17(5-6), p 655-661.

5- R.W. Smith, R. Knight, Thermal Spraying I: Powder Consolidation from Coating to Forming, J. Met., 1995, 47, p 32-39.

6- V.V. Sobolev, and J.M. Guilemany, Dynamic Processes During High Velocity Oxy-Fuel Spraying, Int. Mater. Rev., 1996, 41(1), p 13-32.

7- E.Dongmo, R.Gadow, A.Killinger, and M.Wenzelburger, Modeling of Combustion as well as Heat, Mass, and Momentum Transfer During Thermal Spraying by HVOF and HVSFS, J. Therm. Spray Technol., 2009, 18, p 896-908.

8- H. Kreye, Vergleich der HVOF-Systeme-Werkstoffverhalten und Schichteigenschaften, 4. Kolloquium Hochgeschwindigkeit-Sflammspritzen, 1997, p 13-21.

9- B. Martinez, G. Mariaux, A. Vardelle, G. Barykin, and M. Parco, Numerical Investigation of a Hybrid HVOF-Plasma Spraying Process, J. Therm. Spray Technol., 2009, 18, p 909-920.

10- J.P. Van Doormal, G.D. Raithby, B.H. McDonald, The Segregated Approach to Predicting Viscous Compressible Fuid Fows, ASME J. Turbomach., 1987, 109, p 268-277.

11- M. Peric, Analysis of Pressure-Velocity Coupling on Non–Orthogonal Grids, Numer. Heat Transfer, Part B: Fundam., 1990, 17, p 63-82.

12- G.D. Raithby, G.E. Schneider, Numerical Solution of Problems in Compressible Fuid Flow: Treatment of the Velocity–Pressure Coupling, Numer. Heat Transfer, 1979, 2, p 417-440.

13- B.P. Leonard, Order of Accuracy of QUICK and Related Convection–Diffusion Schemes, Appl. Math. Modell., 1995, 19 (11), p 640-653.

14- B.E. Launder, and D.B. Spalding, Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, UK, 1972.

15- B.P. Stephen, Turbulent Flows, Cambridge University Press, New York, USA, 2001.

16- T.H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, A New Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows Model Development and Validation, Comput. Fluids, 1995, 24(3), p 227-238.

17- S. Gordon, and B.J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, NASA Reference Publication No. 1311, Lewis Research Center, Cleveland, OH, Oct. 1994.

18- T. Furuhata, S. Tanno, T. Miura, Y. Ikeda, and T. Nakajima, Performance of Numerical Spray Combustion Simulation, Energy Convers. Manage., 1997, 38(10-13), p 1111-1122.

19- P.O Witze, Centerline Velocity Decay of Compressible Free Jets, AIAA J., 1974, 12, p 417-418.

20- C. ChU, A Simple Analytical Method for Predicting Axisymmtric Turbulent Jet Flow Fields in a Freestream, AIAA J., 35,1985, p 1-9.

21- Jark C. Lau, Philip J. Morris, and Michael J. Fisher, Measurements in Subsonic and Supersonic Free Jets Using a Laser Velocimeter, J. Fluid Mech, 93(1), 1979, p 1-27.