

مدلسازی عددی بویلر نیروگاه توس به منظور امکان سنجی افزایش راندمان: شبیه سازی نازل سوخت مایع

ایمان میرزایی^a، حسن صباحی، محمد پسندیده فرد، ناصر شاله
^aدانشگاه فردوسی مشهد، imanmirzaii@gmail.com

چکیده

در این مقاله بخش اول از مدلسازی بویلر نیروگاه توس مشهد به منظور امکان سنجی افزایش راندمان و کاهش آلاینده های خروجی ارائه شده است که در آن تمیزه شدن سوخت مایع در نازل سوخت پاش بویلر این نیروگاه با استفاده از مدلسازی عددی بررسی شده است. به منظور ارائه مدل قابل قبول برای نازل سوخت پاش ابتدا با استفاده از پروسه وایرکات اقدام به برش یک نازل نمونه دریافتی از نیروگاه و ایجاد یک مدل دقیق سه بعدی از آن در محیط نرم افزار سالید ورکس شد. سپس یکی از مجاری سوخت پاش نازل که در آن بخار تحت فشار و با سرعت بالا برای تمیزه کردن سوخت مایع جریان دارد مورد بررسی ابعادی قرار گرفت و در نرم افزار تجاری فلوئنت جریان داخل مجرای سوخت پاش با به کارگیری روش نسبت حجمی سیال (VOF) حل شد. پس از مدلسازی جریان در داخل مجرای سوخت پاش، مشخص شد که تمیزه شدن سوخت در داخل مجرای سوخت پاش اتفاق نمی افتد و در خروجی نازل یک جت سیال با شکل سطح مقطع مشخص که توسط بخارهای خروجی با سرعت بالا احاطه شده است تشکیل می شود. این جت سوخت پس از ورود به بویلر به دلیل نوسانات حاصل از بخار با سرعت بالا در اطراف آن به ذرات ریز سوخت شکسته خواهد شد. حل عددی در خروجی مجرای سوخت پاش، شکل سطح مقطع جت خروجی سوخت و توزیع سرعت بخار و سوخت را در اختیار ما قرار می دهد. با توجه به این داده ها و خصوصیات فیزیکی بخار و سوخت، با استفاده از روابط تحلیلی/آزمایشگاهی موجود در منابع علمی معتبر اقدام به تعیین قطر میانگین سوخت ورودی به بویلر شد. در انتها با توجه به مدلسازی انجام شده برای احتراق در داخل بویلر در بخش دوم از مدلسازی بویلر نیروگاه توس مشهد، تأثیر تغییر در هر یک از پارامترهای کارکردی نازل سوخت پاش بر راندمان و آلاینده های خروجی از بویلر بررسی شد.

واژه های کلیدی: اتمایزر، حل عددی، روش VOF

چرخنده^۳ و ... اشاره نمود [۱]. علاوه بر این به دلیل نیاز روز افزون کنترل پارامترهای مختلف در تمیزه کردن سوخت، مانند توزیع قطر قطرات و طول نفوذ سوخت، همواره ایجاد اصلاح و نوآوری در اتمایزرهای^۴ موجود در صنعت وجود داشته است [۴-۲]. اما تعداد گزینه های موجود در انتخاب نوع نازل برای بویلرها و کوره های حرارتی که تمیزه کردن سوخت ویسکوز در مقیاس بالا مد نظر است بسیار کم می شود. در این نوع از شرایط کارکردی، یکی از اتمایزرهای مورد استفاده اتمایزرهای "نوع Y"^۵ هستند. در این نوع از اتمایزرها فرآیند تمیزه کردن در مجاری اختلاط، توسط تزریق سوخت با یک زاویه مشخص در جریان بخار هوای با سرعت بالا صورت می پذیرد. در مقطع

مقدمه

تغییر در کیفیت تمیزه کردن سوخت خروجی از نازل بلافاصله بر راندمان احتراق و میزان آلاینده های خروجی از بویلر و کوره های حرارتی تأثیر می گذارد. به همین دلیل نوع نازل مورد استفاده و پارامترهای کارکردی آن، که مستقیماً بر توزیع قطر قطرات تأثیر گذار است، نقش بسیار مهمی را در فرآیند احتراق ایفا می کنند. تحلیل و بررسی فرآیند تمیزه کردن مایعات به منظور کنترل کیفیت فرآیند تمیزه کردن سوخت همواره مورد توجه بسیاری از دانشمندان و مهندسين در علوم مختلف بوده است. برای تمیزه کردن مایعات در کارهای مختلف صنعتی نازل های متفاوتی استفاده می شوند. از آن جمله می توان به اتمایزرهای چرخشی تحت فشار^۱، مافوق صوت^۲، دارای کاسه

² Ultrasonic atomizer

³ Rotary cup

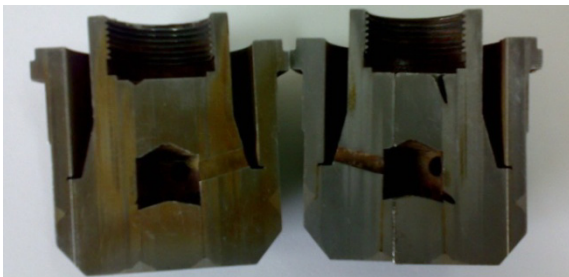
⁴ Atomizer

⁵ Y-type atomizer

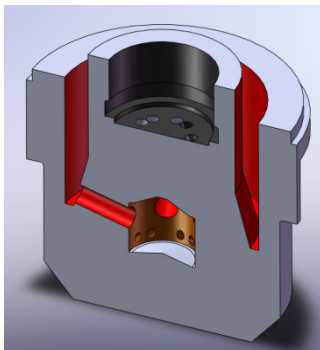
¹ Pressurized swirl atomizer

هم اکنون در نیروگاه توس برای اتمیزه کردن سوخت مایع (مازوت) استفاده می‌شود. اندازه برداری خارجی از این نازل با دقت به عمل آمد. سپس توسط پروسه وایرکات^۷ نازل در مقاطع مورد نظر برش خورده و کلیه ابعاد و ویژگی‌های داخلی آن نیز اندازه برداری گردید. بدین منظور از ابزارهای کولیس دیجیتالی با دقت (mm) ۰/۰۱، میکرومتر با دقت (mm) ۰/۰۱ و دستگاه دیجیتایزر رنیشا^۸ با دقت (mm) ۰/۰۱ جهت اندازه برداری پروفیل‌ها و همچنین زوایای موجود در نازل، با داشتن همه ابعاد و ویژگی‌های داخلی و خارجی نازل، مدلسازی آن در محیط سالید ورکس^۹ انجام شد.

تصویر برش محوری نازل مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است. شکل ۲ نیز مقطع برش خورده نازل محوری نازل را پس از وارد کردن آن در نرم افزار سالید ورکس نشان می‌دهد. در این مقطع، مجرای ورودی بخار اتمایزر (قسمت قرمز رنگ) به محفظه میانی نازل دیده می‌شود.



شکل ۱- تصویر برش محوری نازل سوخت مایع بویلر



شکل ۲- یک مقطع برش خورده نازل که در آن مجرای ورودی بخار اتمایزر (قسمت قرمز رنگ) به محفظه میانی نازل دیده می‌شود.

انتهایی این نوع از اتمایزرها، مجاری اختلاط به صورت دایره‌ای دور تا دور آن قرار گرفته‌اند که این ساختار باعث می‌شود سوخت اتمیزه شده خروجی از این مجراها در داخل بویلر به صورت مخروط تو خالی در آید. اما این نوع از اتمایزرهای مورد استفاده در بویلرها و کوره‌های حرارتی دارای یک نقیصه مهم هستند. نسبت سرعت بخار به سوخت در آن‌ها بسیار بالا است که این امر باعث ایجاد تنش‌های برشی بسیار بالا و خاموش شدن محلی شعله می‌گردد. همچنین حجم بالای بخار تزریقی باعث افت دمای شعله و افزایش طول نفوذ سوخت در بویلر و برخورد آن با دیواره خواهد شد. مجموعه این عوامل می‌تواند احتمال بدسوزی و حتی خاموشی شعله را افزایش دهد [۴]. به همین منظور همواره در نقاط مختلف دنیا اقدام به تبدیل این نوع از اتمایزرها به اتمایزرهای کارآمدتر شده است [۴].

در ایران با توجه به نیاز برای رسیدن به پارامترهای بهره‌برداری مناسبتر در صنعت نیروگاهی، در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای درک بهتر فرآیندهای فیزیکی موجود در تجهیزات نیروگاهی و بهینه‌سازی آن‌ها آغاز شده است. به همین منظور در نیروگاه توس مشهد پروژه‌ای [۵] به منظور مدلسازی بویلر نیروگاه و امکان‌سنجی بهبود پارامترهای عملکردی آن صورت پذیرفت. مقاله حاضر اتمیزه شدن سوخت مایع در نازل سوخت‌پاش محفظه احتراق بویلر را به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌دهد. این امر به منظور ارائه مدل قابل قبول از دیدگاه مهندسی برای اتمیزه شدن سوخت در بویلر صورت پذیرفته است تا از این طریق بتوان تأثیر پارامترهای مختلف بر توزیع قطر قطرات سوخت و در نهایت بر پارامترهای کارکردی بویلر را تقریب زد. این گام بخش اول در راه بهینه‌سازی عملکرد بویلر است. همچنین با مدلسازی این نوع از اتمایزرهای موجود در صنعت نیروگاهی کشور و آشنایی با نحوه اتمیزه شدن سوخت در آن‌ها می‌توان به اصلاح ساختار آن‌ها و رسیدن به پارامترهای کارکردی مناسبتر برای اتمیزه کردن سوخت امیدوار بود.

شکل دقیق سه بعدی نازل

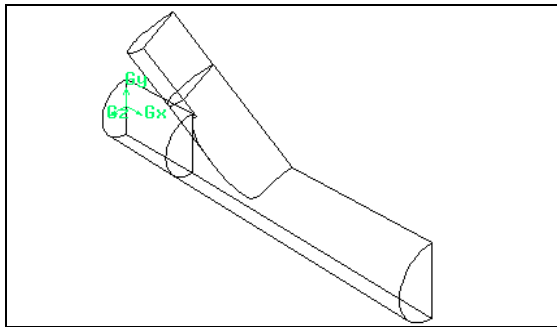
در این بخش مراحل انجام شده جهت تعیین دقیق شکل سه بعدی نازل به همراه شکل مقاطع مختلف برش خورده آن ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس قسمتی از نازل که جهت حل عددی فرآیند اتمیزه شدن مورد نیاز است مشخص می‌گردد. بدین منظور ابتدا یک نمونه نازل کار کرده از طرف شرکت مدیریت تولید برق توس در اختیار مجری پروژه قرار گرفت. شکل و طرح این نازل دقیقاً مشابه نازل‌هایی می‌باشد که

⁷ Wire cut

⁸ Renishaw digitizer

⁹ Solid works

⁶ Atomization



شکل ۵- مدل سازی سه بعدی انجام شده در نرم افزار گمبیت

معادلات حاکمه

در این بخش از گزارش به بررسی اجمالی روش عددی حل جریان در داخل مجرای نازل پرداخته شده است [۶]. سطح مشترک بین یک مایع و یک گاز اصطلاحاً سطح آزاد^{۱۱} نامیده می شود. در پدیده پاشش یک سوخت مایع و اتمیزه شدن آن توسط بخار اتمایزر، مرز بین جت سوخت و بخار یک سطح آزاد می باشد. با توجه به این موضوع برای بدست آوردن اندازه قطرات حاصل از شکست مایع توسط بخار باید از روش های عددی که مخصوص بررسی سطح آزاد بین یک مایع و یک گاز می باشد استفاده نمود. برای این منظور با استفاده از نرم افزار تجاری فلونت^{۱۲}، برای حل معادلات حاکم از روش نسبت حجمی سیال^{۱۳} (VOF) استفاده شده است. در روش نسبت حجمی سیال برای هر فاز در حوزه حل یک متغیر اختصاص داده می شود که این متغیر بیانگر نسبت حجمی سیال در هر سلول از حوزه حل می باشد. در هر سلول مجموع تمام نسبت های حجمی نمی تواند مقادیر بیشتر از یک و کمتر از صفر را اختیار نماید. با توجه معلوم بودن مقدار نسبت حجمی برای هر فاز در هر سلول، به خصوص برای سلول هایی که در سطح آزاد قرار دارند، سایر پارامترهای مورد نیاز از قبیل دانسیته و ویسکوزیته قابل تعیین می باشند. در واقع در روش نسبت حجمی سیال، اگر نسبت حجمی هر سیال (q^{th}) را f_q بنامیم سه مقدار مختلف به صورت زیر برای آن ها قابل تصور است

$$f_q = 0$$

سلول خالی از سیال q^{th}

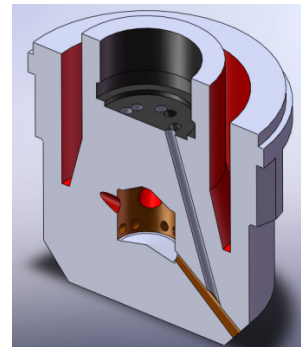
$$f_q = 1$$

سلول پر از سیال q^{th}

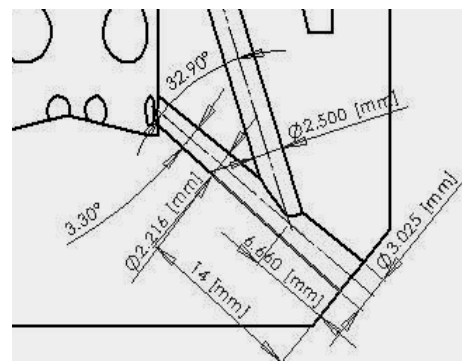
$$0 < f_q < 1$$

سلول شامل سطح آزاد برای سیال q^{th}

شکل ۳ مقطع برش خورده ای از نازل را نشان می دهد که در آن ناحیه اصلی پدیده اتمیزه شدن مشخص می باشد. یکی از راهگاه های ورودی سوخت مایع (خاکستری رنگ) و راهگاه بخار اتمایزر (قهوه ای رنگ) در این مقطع بخوبی دیده می شوند. تعیین دقیق یکی از این مجاری یا روزنه های پاشش سوخت جهت حل عددی لازم می باشد. به همین منظور با استفاده از نرم افزار سالیید ورکس یکی از این روزنه ها بطور کاملاً دقیق مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ مشخصات ابعادی یکی از راهگاه ها به صورت شماتیک آورده شده است. از آنجا که مدل سازی کل مجرای سوخت و بخار برای تحلیل عددی مورد نیاز نبود و تنها مدت زمان حل را افزایش می داد، بخشی از این مجراها را برای بررسی جدا نمودیم. مدل سازی سه بعدی انجام شده در نرم افزار گمبیت^{۱۰} در شکل ۵ دیده می شود. این مدل سازی دقیقاً براساس مقادیر داده شده در شکل ۴ انجام شده است. توجه شود که دلیل متقارن بودن هندسه تنها نیمی از آن برای مدل سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- مقطع برش خورده ای از نازل برای نشان دادن ناحیه اصلی پدیده اتمیزه شدن



شکل ۴- مقادیر در نظر گرفته شده برای مدل سازی سه بعدی انجام شده

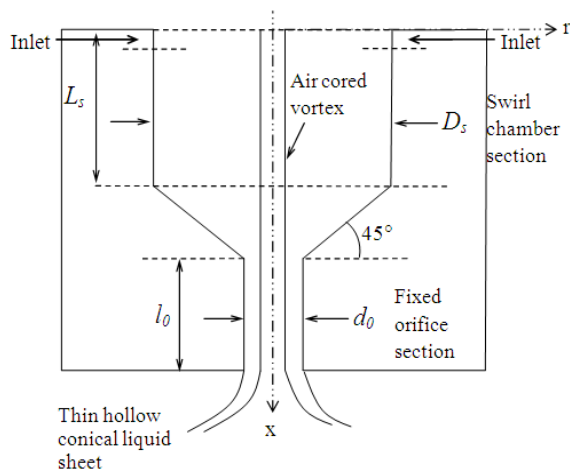
¹¹ Free surface

¹² FLUENT

¹³ Volume of Fluid

¹⁰ Gambit

کوچکتر از محفظه اتمایزر است. جریان چرخشی بسیار قوی تولید شده در خروجی اتمایزر باعث به وجود آمدن یک لایه نازک از مایع تزریق شده در کناره دیواره و افت فشار در روی محور تقارن اتمایزر می‌شود. این افت فشار در روی محور اتمایزر باعث به وجود آمدن جریان برگشتی برای هوا و ورود آن به داخل اتمایزر و نهایتاً تشکیل یک استوانه از هوا به محوریت خط تقارن مرکزی می‌شود. مایع تزریق شده پس از خروج از نازل به دلیل دارا بودن چرخش بسیار بالا و به تبع آن نیروهای گریز از مرکز به صورت یک مخروط در خواهد آمد. مخروط حاصله به دلیل نازک شدن و نوسانات اطراف آن در نهایت به لیگامنت^{۱۴} و ذرات ریز پودر شده مایع در خواهد آمد. برای مدلسازی اتمایزر چرخشی و مقایسه نتایج به دست آمده از آن با کارهای انجام شده در سایر مقالات، مدل ساده نشان داده شده در شکل ۸ در گمبیت تولید شد. تولید این مدل عیناً مطابق با مقادیر داده شده در صفحه ۲۴ از مرجع [۷] صورت پذیرفته است. بر اساس اسن مرجع مقادیر در هندسه نشان داده شده (شکل ۷) به صورت جدول ۱ در خواهد آمد.



شکل ۷- شماتیک اتمایزر چرخشی مورد بررسی برای اعتبار سنجی روش حل عددی

جدول ۱- مقادیر در نظر گرفته شده برای هندسه حوزه

مورد بررسی

فشار ورودی (MPa)	مساحت ورودی (mm ²)	d ₀ , l ₀ (mm)	D _s , L _s (mm)
0.5	0.054	0.3, 0.3	0.9, 0.45

بر اساس این مقدار از f_q خواص و پارامترهای مختلف در هر سلول از حوزه حل مشخص می‌شوند.

دنبال کردن سطح آزاد بین فازهای مختلف با حل یک معادله پیوستگی برای فازهای مختلف صورت می‌پذیرد که در انتها برای هر سلول باید شرط ذیل برقرار باشد:

$$\sum_{q=1}^n f_q = 1 \quad (1)$$

در روش VOF برای کل حوزه حل یک معادله مومنتم (معادله ۲) حل می‌شود و سپس با استفاده از حوزه سرعت به دست آمده مقادیر سرعت در هر فاز مشخص می‌شود. همان طور که در این جا نشان داده شده است این معادله مومنتم شامل متغیرهای نسبت حجمی سیالات نمی‌شود و تنها از طریق دانسیته و ویسکوزیته از این مقادیر تأثیر می‌پذیرد. پس از به دست آمدن مقادیر سرعت با استفاده از معادله مومنتم، بر اساس تعریف مسئله صورت گرفته سایر مقادیر اسکالر (نظیر f, ϵ, K) به دست می‌آیند. لازم به ذکر است که در این بررسی به دلیل بالا بودن رینولدز در داخل مجاری اختلاط از روش حل ϵ - K استاندارد برای حل جریان توربولانت استفاده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T \right) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

ارائه نتایج و بررسی آن‌ها

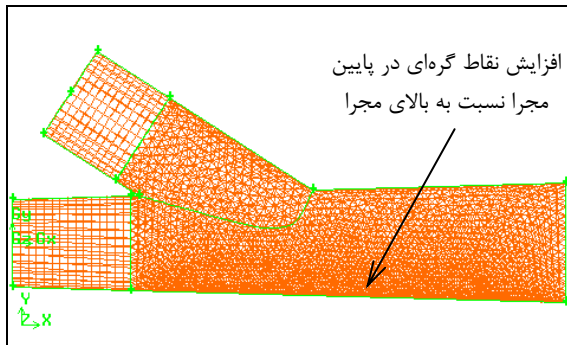
اعتبارسنجی روش حل عددی استفاده شده در تعیین

شکل جت سوخت مایع

با توجه به در اختیار نبودن نتایج آزمایشگاهی برای اتمایزر مدل‌سازی شده در اسناد موجود در نیروگاه توس، در این جا برای بررسی میزان اعتبار نتایج به دست آمده از مدلسازی یک اتمایزر ساده‌تر استفاده شده است. اتمایزر مورد بررسی از اتمایزرهای چرخشی تحت فشار می‌باشد. انتخاب این نوع از اتمایزر به دلیل ساده بودن مدلسازی آن (امکان مدلسازی آن در حالت دو بعدی) و مشابه بودن شرایط آن با اتمایزر مورد بررسی از لحاظ وجود جریان دو فازی است. شماتیک اتمایزر چرخشی تحت فشار مورد بررسی در شکل ۷ آورده شده است. مایع در این نوع از اتمایزرها به صورت مماسی وارد آن می‌شود. این امر باعث به وجود آمدن یک جریان چرخشی بسیار قوی در داخل محفظه اتمایزر می‌شود. مایع تزریق شده پس از عبور از محفظه اتمایزر وارد مجرای خروجی نازل می‌شود که دارای سطح مقطعی

¹⁴ Ligament

شبکه‌بندی سعی شد تا تعداد نقاط گره در سمت پایین آن بیشتر از نواحی بالایی باشد. برای شبکه‌بندی نهایی مجرای پاشش سوخت، از شبکه‌بندی نامنظم با نوع Tet/Hybrid استفاده شد. پس از بررسی استقلال از شبکه تعداد نهایی سلول‌ها در حوزه حل به حدود ۲۵۰۰۰۰ رسید. شبکه‌بندی نهایی در نرم افزار گمبیت در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است در هنگام تولید هندسه مورد نظر به منظور امکان کاهش تعداد نقاط گره‌ای و افزایش روند حل، اقدام به تولید دو ناحیه جدا از کل حوزه حل در ابتدای ورودی سوخت و ورودی بخار شد. با توجه به این که این نواحی بر نحوه اختلاط سوخت و بخار تأثیر کمی دارند می‌توان آن‌ها را با شبکه‌بندی سبکتر و ساده‌تری بررسی نمود.



شکل ۶- شبکه بندی حوزه حل در نرم افزار گمبیت

شرایط مرزی استفاده شده در این بررسی در حالت پایه برای شرایط کارکردی ۱۰۰ درصد توانایی بویلر در نظر گرفته شده است. در این حالت کارکردی از بویلر، ورودی‌های مورد نیاز برای اتمایزر از اسناد موجود در نیروگاه استخراج شدند و با مهندسی بهره‌برداری در نیروگاه چک شد، که این ورودی‌ها برای هر یک مجاری اختلاط سوخت و بخار (حوزه حل در نظر گرفته شده) به صورت زیر اعلام شدند

۰/۰۰۲۲۸ kg/s	دبی جرمی بخار مصرفی
۰/۱۱۴۲۳ kg/s	دبی جرمی سوخت مصرفی
۲۲۰°C	دمای بخار ورودی
۱۲۰°C	دمای سوخت اتمایزر

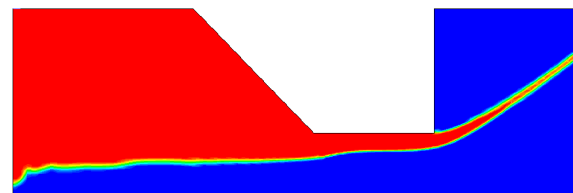
لازم به ذکر است به منظور شروع به حل نیازمند دانستن مقدار ویسکوزیته و چگالی برای بخار و سوخت در دماهای مختلف هستیم. این اطلاعات ورودی مورد نیاز نیز به صورت نمودارهایی که تغییرات ویسکوزیته و چگالی را با دما را نشان می‌داد در

با توجه به تنظیمات فوق، دو پارامتر مهم در اتمایزرهای چرخشی که ضخامت لایه مایع خروجی و زاویه مخروط حاصله می‌باشد از حل عددی به دست آمد و با نتایج ارائه شده در مرجع [۷] مقایسه شد. جدول ۲ این نتایج را نشان می‌دهد که معرف دقت بالای روش حل عددی می‌باشد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب توزیع مایع و خطوط مسیر^{۱۵} را در اتمایزر به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده فوق می‌توان ادعا نمود که تنظیمات مورد استفاده در فلونتت برای حل عددی جریان در داخل اتمایزر اصلی مورد بررسی در این پژوهش مربوط به نیروگاه توس نیز به درستی صورت پذیرفته است.

جدول ۲- مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج موجود در

سایر کارهای علمی انجام شده [۷]

ضخامت مایع خروجی به دست	0.0405 (mm)
ضخامت مایع خروجی [۷]	0.0435 (mm)
زاویه مخروط تشکیل شده از	35.4°
زاویه مخروط تشکیل شده [۷]	37°



شکل ۸- توزیع مایع در اتمایزر چرخشی، به تشکیل مخروط مایع در خروجی به دلیل چرخش بالا توجه شود.



شکل ۹- خطوط مسیر در اتمایزر چرخشی

شبکه بندی حوزه حل و شرایط مرزی برای اتمایزر

نوع Y

پس از مدل‌سازی هندسه مورد بررسی، با استفاده از نرم افزار گمبیت اقدام به شبکه‌بندی^{۱۶} آن شد. با توجه به این که سرعت بخار در نواحی انتهایی مجرای اختلاط در قسمت‌های پایین آن بسیار بیشتر از سرعت در قسمت‌های بالای مجرا است در هنگام

¹⁵ Path lines

¹⁶ Mesh

شده محاسبه می‌شوند. در این پروژه نیز از همین روش استفاده شده است. با تغییر شرایط در جریان سوخت و بخار، شکل جت مایع، سرعت جت و سرعت بخار اطراف آن تغییر کرده و لذا اندازه ذرات نهایی پودر شده نیز تغییر خواهند کرد.

در اینجا یکی از کاملترین روابط تحلیلی-تجربی موجود را که به منظور بررسی پدیده اتمیزه شدن در تحقیق حاضر بکار رفته است ارائه می‌کنیم [۱۲]. لازم به ذکر است که رابطه ذیل کاملاً از روند حل تحلیلی و فرضیات قابل قبول فیزیکی برای جریان گاز پر سرعت در اطراف جت مایع به دست آمده است.

$$\frac{SMD}{D_l} = C_1(1+m_r) \left(\frac{b_g}{D_l} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{\sqrt{We_{D_l}}} \left\{ 1 + C_2 \left(\frac{D_l}{b_g} \right)^{1/6} \left(\frac{Re_{bg}}{\rho_l / \rho_g} \right)^{1/12} We_{D_l}^{1/6} Oh^{2/3} \right\} \right) \quad (3)$$

در این رابطه D_l ، ρ_l و ρ_g به ترتیب قطر جت مایع، دانسیته جت مایع و دانسیته گازهای خروجی از نازل می‌باشند و $b_g = (D_g - D_l)/2$ پارامتر SMD^{18} قطر میانگین حدی قطرات مایع است. در واقع SMD میانگینی از قطرات مایع حاصله است که تابع توزیع قطر قطرات نیز می‌باشد و به صورت $SMD = \sum N_i d_i^3 / \sum N_i d_i^2$ تعریف می‌شود که در آن N_i تعداد قطرات در واحد حجم در محدوده اندازه i و d_i قطر قطرات هستند.

اعداد بدون بعد موجود در رابطه فوق به ترتیب به شرح ذیل می‌باشند:

$$\text{Mass flux ratio : } m_r = \frac{\rho_l U_{Liquid} A_l}{\rho_g U_{Gas} A_g} \quad (4)$$

که در آن U_{Liquid} ، U_{Gas} ، A_l و A_g به ترتیب سرعت میانگین جت مایع، سرعت میانگین گازهای خروجی، سطح مقطع میانگین جت مایع و سطح مقطع میانگین بخار می‌باشند.

$$\text{Reynolds number : } Re_{bg} = \frac{U_{Gas} b_g}{\nu_g} \quad (5)$$

که در آن ν_g ویسکوزیته سینماتیکی گازهای خروجی است.

$$\text{Ohnesorgenumber : } Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D_l}} \quad (6)$$

اسناد نیروگاه موجود بود. در حالت پایه با توجه به این اسناد مقدار این پارامترهای فیزیکی به صورت زیر در نظر گرفته شدند

ویسکوزیته سوخت	۰/۰۰۷۸۰۵ kg/m.s
ویسکوزیته بخار	۱/۶۸e-۵ kg/m.s
چگالی بخار	۲/۷۱۲ kg/m ³
چگالی سوخت	۸۹۲ kg/m ³

به منظور حل معادله حاکم در روش VOF، از گسسته‌سازی صریح به همراه روش بازسازی هندسه^{۱۷} (Geo) استفاده شده است.

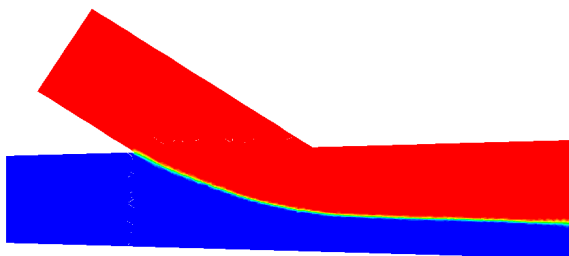
ارائه نتایج نهایی برای اتمایزر نوع Y

پس از پایان روند حل مسئله نتایج نمونه در حالت پایدار به دست آمدند. توزیع سوخت نفت کوره در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص شده‌اند. همان طور که از مجموعه این شکل‌ها مشاهده می‌شود، فرآیند پودر شدن سوخت در داخل مجرای باریک نازل صورت نمی‌گیرد بلکه در خروجی روزنه یک جت سیال با مقطعی تقریباً دایره‌ای مطابق شکل ۱۱ تشکیل می‌شود. در اطراف این جت سیال، بخار با سرعت بسیار زیاد جریان می‌یابد. جت مایع اندکی بعد از خروجی نازل در اثر ورود به محفظه بویلر و سرعت بخار زیاد اطراف آن ابتدا به لیگامنت شکسته شده و سپس به قطرات ریزی تبدیل می‌گردد. این فرآیند، اتمیزه شدن یا پودر شدن جت مایع نامیده می‌شود. نتایج به دست آمده در اینجا در سایر کارهای علمی نیز وجود دارد [۸]. استفاده از روش حل عددی برای تعیین اندازه ذرات نهایی معمول نمی‌باشد. علت این مسئله، تفاوت بسیار زیاد طول مشخصه جت مایع (در محدوده چند میلیمتر) و طول مشخصه ذرات نهایی پودر شده (در محدوده ۵۰ میکرون یا ۰/۰۵ میلیمتر) می‌باشد. بنابراین حل کردن همزمان جت سیال و ذرات نهایی در یک حوزه حل کامپیوتری امکان پذیر نیست. علاوه براین، اندازه ذرات بدست آمده از حل عددی تابع اندازه شبکه خواهد بود که عملاً ارائه یک نتیجه منحصر به فرد از یک شبیه‌سازی عددی را با مشکل مواجه می‌سازد. روشی که معمولاً در شبیه‌سازی پدیده اتمیزه شدن بکار می‌رود اینست که ابتدا به کمک حل عددی، شکل و سرعت جت یا فیلم مایع و همچنین سرعت جریان گاز اطراف آن بدست آورده می‌شود و سپس با استفاده از روابط تحلیلی-آزمایشی [۹-۱۲] در زمینه شکست یک جت یا فیلم مایع در مجاورت یک گاز با سرعت زیاد، توزیع اندازه ذرات نهایی پودر

¹⁸ Sauter Mean Diameter

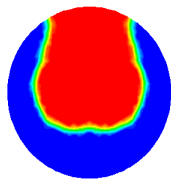
¹⁷ Geo-Reconstruct

دوده در خروجی از بویلر با نتایج حاصل از اندازه‌گیری این کمیات کاملاً تائید شده است، میزان SMD در شرایط کارکردی ۱۰۰ درصد توان بویلر، $60\mu\text{m}$ به دست آمده است. ضمن این که این مقدار برای SMD، تطابق خوبی را با نتایج حاصل در تحقیقات مستقل انجام شده روی اتمیزه شدن سوخت‌های مایع سنگین نشان می‌داد [۱۴]. به همین دلیل می‌توان مقدار $SMD = 60\mu\text{m}$ را تخمین مناسبی برای ذرات سوخت پاشیده شده به بویلر در شرایط کارکردی ۱۰۰ درصد توان بویلر در نظر گرفت که از نتایج عددی حل جریان در داخل بویلر به دست آمده است. حال با توجه به مقدار $60\mu\text{m}$ برای SMD و سایر پارامترهای فیزیکی و سرعتی سوخت و بخار در شرایط کارکردی ۱۰۰ درصد توان بویلر، که در بخش‌های مختلف این تحقیق ارائه شد، می‌توان ضریب C_1 را تعیین نمود. لازم به ذکر است که مقدار سرعت میانگین و سطح مقطع سوخت در مقطع خروجی یک روزنه، از حل عددی (شکل‌های ۱۳-۱۰) بدست می‌آیند. مقدار ضریب C_1 محاسبه شده در اینجا 0.165 به دست آمده است. حال با داشتن تمامی پارامترهای مورد نیاز در رابطه ۳ و به دست آوردن مقدار سرعت میانگین برای سوخت و بخار و سطح مقطع جت سوخت خروجی از حل عددی، می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف را بر عملکرد اتمایزر بررسی نمود.



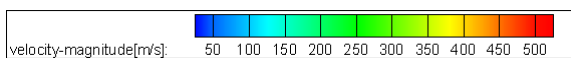
شکل ۱۰- توزیع سوخت (رنگ قرمز) در مقطع مرکزی برای

مجرای مورد بررسی



شکل ۱۱- توزیع سوخت (رنگ قرمز) در مقطع خروجی

مجرای مورد بررسی



که در آن μ_l و σ به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی جت مایع خروجی و کشش سطحی بین گازهای خروجی و جت مایع خروجی است.

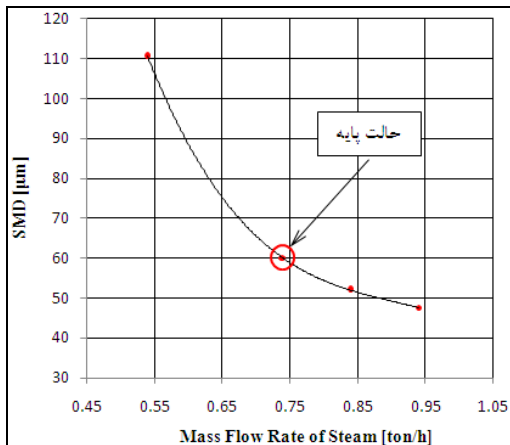
$$\text{Weber number : } We_{D_i} = \frac{\rho_g (U_{Gas} - U_c)^2 D_i}{\sigma} \quad (7)$$

که در آن U_c به صورت زیر تعریف می‌شود:

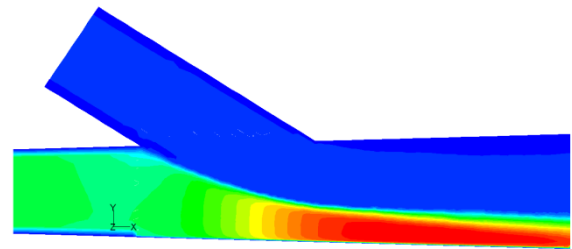
$$U_c = \frac{\sqrt{\rho_l} U_{Liquid} + \sqrt{\rho_g} U_{Gas}}{\sqrt{\rho_l} + \sqrt{\rho_g}} \quad (8)$$

ثوابت C_1 و C_2 در معاله ۳ بر اساس نتایج آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. مقدار C_1 در حالت کلی به هندسه نازل مورد بررسی بستگی دارد و مقدار C_2 وابسته به ویسکوزیته و تنش سطحی برای سیال‌های مختلف در فرآیند اتمیزه شدن است. با توجه به این که در مرجع مورد بحث [۱۲]، سیال‌های مختلف با تنش سطحی و ویسکوزیته‌های مختلف (نیوتنی و غیر نیوتنی) مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مقدار $C_2 = 1$ ، در تمامی این حالت‌ها مقادیر SMD را با تقریب بسیار خوبی پیش‌بینی کرده است این مقدار در این جا نیز ۱ در نظر گرفته شده است. اما در مورد ضریب C_1 باید دقت کرد. همان طور که گفته شد این ضریب به طور کلی به هندسه نازل مورد بررسی و به طور خاص به نسبت همگرایی^{۱۹} نازل بستگی دارد، چرا که برای یک نازل با پارامترهای ابعادی مشخص، ضخامت لایه مرزی در خروجی نازل به شدت وابسته به نسبت همگرایی و به تبع آن نسبت سرعت جت مایع به سرعت گازهای خروجی است [۱۲]. در نتیجه برای تعیین مقدار آن باید حداقل یک داده آزمایشگاهی از نازل مورد بررسی موجود باشد که این روند در کارهای مختلف عملی نیز صورت پذیرفته است. به عنوان مثال مقدار این ضریب با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در مرجع [۹]، 0.58 و در [۱۲]، ۱ به دست آمده است. با توجه به این که در اسناد نیروگاه مقدار SMD در هیچ حالتی موجود نبود در این جا برای تعیین مقدار ضریب C_1 از نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی موجود برای جریان در داخل بویلر نیروگاه توس استفاده شد. این مدل‌سازی عددی برای بررسی جریان احتراقی در داخل بویلر، بخش دوم از پروژه تعریف شده در نیروگاه توس مشهد برای بررسی تأثیرات پارامترهای مختلف بر روی راندمان و آلاینده‌های خروجی از بویلر را تشکیل می‌دهد که توسط همکاران پروژه انجام شده است [۵ و ۱۳]. در این مدل‌سازی عددی که نتایج آن برای پارامترهایی مثل مقدار دما و میزان آلاینده‌هایی چون NOx و

¹⁹ Contraction ratio

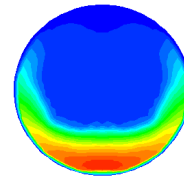
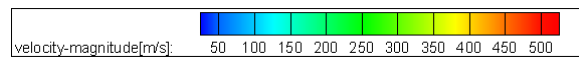


شکل ۱۳- تأثیر تغییرات دبی بخار اتمایزر بر میزان SMD



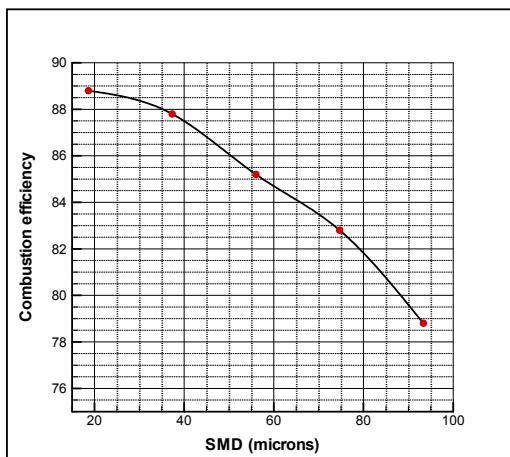
شکل ۱۲- نمایی از مقطع مرکزی برای مجرای مورد

بررسی برای توزیع سرعت m/s



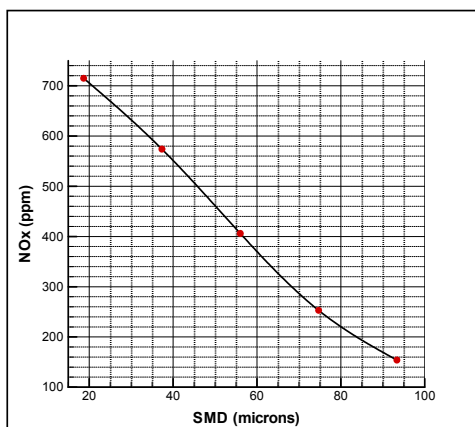
شکل ۱۴- نمایی از مقطع خروجی برای مجرای مورد

بررسی برای توزیع سرعت m/s



شکل ۱۵- اثر قطر قطرات پاشش شده بر راندمان احتراق

[۵۱۳]

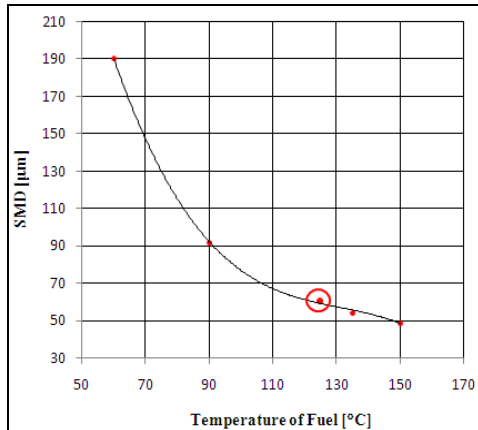


شکل ۱۶- اثر قطر قطرات پاشش شده بر میزان NOx

در خروجی بویلر [۵۱۳]

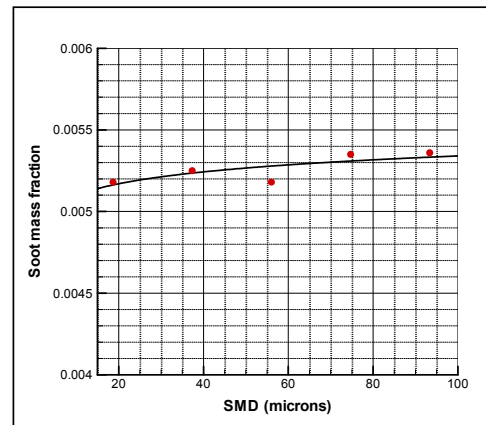
شکل ۱۴ میزان دبی کل بخار اتمایزر در چند حالت مختلف را نشان می دهد (لازم به ذکر است که بویلر دارای نه نازل است که هر کدام از این نازلها دارای ۱۰ مجرای اختلاط می باشد). با افزایش دبی بخار، افزایش سرعت بخار در خروجی از اتمایزر را خواهیم داشت. این مسئله باعث افزایش نسبت مومنتوم بخار به سوخت در خروجی اتمایزر و به تبع آن افزایش تنش های برشی اعمال شده به سوخت و تشدید بیشتر نوسانات ایجاد شده خواهد شد که تولید قطرات سوخت با قطر کمتر را نتیجه می دهد. برای مثال با افزایش مقدار دبی بخار اتمایزر برای مجموع نه مشعل از ۰/۷۴ton/h به ۰/۹۴ton/h (شکل ۱۴) که باعث کاهش مقدار میانگین قطر قطرات پاشش شده به داخل بویلر (SMD) از ۶۰ μm به ۴۷/۷ μm (کاهش ۲۰/۵ درصدی) می گردد، راندمان احتراق ۲ درصد (شکل ۱۵) و بطور همزمان میزان NOx تولیدی ۱۱۰ ppm (شکل ۱۶) افزایش می یابد (یعنی افزایش ۲۹ درصدی NOx). کاهش قطر قطرات، تأثیر قابل ملاحظه ای بر کسر جرمی دوده تشکیل شده ندارد و مقدار آن را تنها از ۰/۰۰۵۳ به ۰/۰۰۵۲۵ کاهش می دهد (شکل ۱۷).

عدم افزایش دمای سوخت به مقادیر بالاتر از 125°C برای جلوگیری از پدیده فلشینگ^{۲۰} در سوخت باشد.



شکل ۱۸- تأثیر میزان پیش گرم کردن سوخت بر میزان SMD

شکل ۱۹ تأثیر میزان دبی سوخت مایع بر اندازه ذرات در چند حالت مختلف را نشان می دهد. افزایش دبی سوخت، افزایش سرعت سوخت ورودی به مجاری اتمایزر را نتیجه می دهد و این امر باعث افزایش سرعت سوخت در هنگام خروج از اتمایزر خواهد شد. افزایش سرعت سوخت، کاهش مومنتوم بخار خروجی نسبت به مومنتوم سوخت خروجی را نتیجه می دهد. روند تغییرات میزان قطر قطرات با مقدار دبی سوخت در شکل ۱۹ قابل بررسی است. با افزایش دبی سوخت در اتمایزر از $37/01 \text{ ton/h}$ به 46 ton/h (افزایش ۲۴/۳ درصدی سوخت)، مقدار SMD از $60 \mu\text{m}$ به $70 \mu\text{m}$ (۱۶/۳ درصد) افزایش داشته است. این در حالی است که با کاهش دبی سوخت در اتمایزر از $37/01 \text{ ton/h}$ به 28 ton/h (کاهش ۲۴/۳ درصدی سوخت) مقدار SMD از $60 \mu\text{m}$ به $47/9 \mu\text{m}$ (۲۰/۳ درصد) کاهش را نشان می دهد.



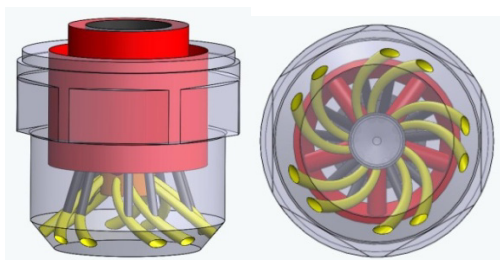
شکل ۱۷- اثر قطر قطرات پاشش شده بر متوسط کسر جرمی دوده در خروجی بویلر [۱۳ و ۵]

با افزایش میزان ویسکوزیته سوخت، مقاومت آن در برابر تنش برشی بخار افزایش یافته و در نتیجه اندازه ذرات حاصل از شکست سوخت بیشتر می گردد. بنابراین، قطر قطرات تولیدی در انتهای فرآیند اتمیزه شدن افزایش می یابد. همچنین افزایش ویسکوزیته سوخت با افزایش میزان مقاومت جت سوخت در برابر نوسانات ایجاد شده همراه خواهد بود که این امر نیز بر افزایش قطر قطرات در حالت نهایی تأثیرگذار است. عامل مهم تأثیرگذار بر ویسکوزیته سوخت مقدار پیش گرم شدن آن قبل از ورود به اتمایزر است. با توجه به معلوم بودن روند تغییرات ویسکوزیته سوخت نسبت به دمای آن در اسناد نیروگاه توس، تأثیر پیش گرم شدن سوخت بر ویسکوزیته و در نهایت اندازه ذرات نهایی حاصل از فرآیند اتمیزه شدن قابل بررسی است. شکل ۱۸، تغییر مقادیر SMD سوخت نسبت به میزان پیش گرم شدن آن را نشان می دهد. افزایش دمای پیش گرم کردن سوخت از 125°C به 150°C (شکل ۱۸) باعث کم شدن ویسکوزیته سوخت و به تبع آن باعث کاهش مقدار SMD از $60 \mu\text{m}$ به $48/7 \mu\text{m}$ (کاهش ۱۸/۸ درصدی) خواهد شد. با کاهش قطر قطرات پاشش شده، راندمان احتراق افزایش ۱/۸ درصدی (شکل ۱۵) و میزان NO_x تولیدی افزایش ۱۰۰ ppm یا ۲۷ درصدی (شکل ۱۶) خواهد داشت. کسر جرمی دوده تشکیل شده نیز اندکی کاهش خواهد یافت (از مقدار $0/0053$ به $0/00525$ با توجه به شکل ۱۷). در این جا لازم به ذکر است که افزایش دمای سوخت به مقادیر بالاتر از 125°C فعلی باید با ملاحظات خاص صورت پذیرد. چراکه معمولاً مقدار پیش گرم کردن مازوت برای امکان پمپ کردن آن بین 66°C تا 122°C اعلام شده است (مراجع ۱۱ و ۱۲ از فصل ۲) و احتمال این وجود دارد که

²⁰ Flashing

فعلی از نوع Y-type می‌باشد لذا میزان اختلاط سوخت و هوا تنها در اثر تغییر میزان چرخش و جهت هوای ورودی در اطراف مشعل‌ها می‌تواند تغییر کند. برای ایجاد اختلاط بیشتر سوخت و هوا می‌توان تغییر شکل نازل از حالت فعلی به شکل دیگری که در آن سوخت در عبور از راهگاه‌های نازل در جهت شعاعی نیز سرعت یافته و هنگام خروج چرخش داشته باشد، را مورد مطالعه و امکان سنجی قرار داد.

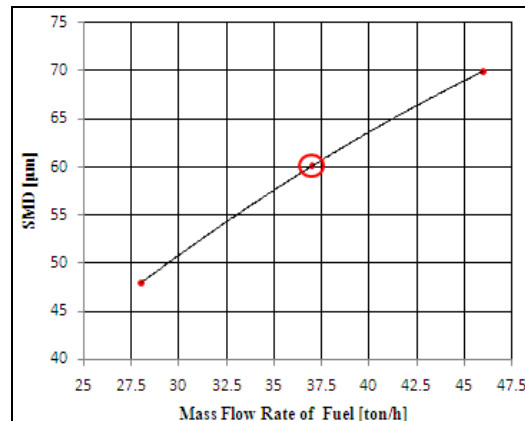
شکل ۲۱ یک نمونه از اشکال پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این نازل پیشنهادی، اندازه‌های مقیاسی نازل اصلی تغییر داده نشده است و تنها به جای مجراهای مستقیم حامل بخار، که در بین راه مجرای حامل سوخت به آن وارد می‌شود، مجاری دارای انحنایی تعبیه شده‌اند. پیش بینی می‌شود در این نوع از ساختار پیشنهادی برای نازل، وجود انحنا در مسیر حرکت بخار باعث به وجود آمدن چرخش جریان بخار و سوخت و به تبع آن متمیز شدن مناسب‌تر سوخت شده و در نتیجه اختلاط کاملتر بین سوخت و هوا قبل از احتراق را موجب گردد. به دست آوردن نتایج قطعی تأثیر تغییر شکل نازل بر فرآیند پاشش سوخت و کیفیت احتراق، نیازمند انجام آزمایش‌های متعدد و مدلسازی‌های پیچیده‌تر برای حل عددی جریان در داخل این نوع از اتمایزرهاست. اصلاح ساختار اتمایزرهای نوع Y-type در نقاط مختلف دنیا از دهه‌های گذشته آغاز و هم اکنون نیز در حال انجام است [۴] که نتایج بسیار خوبی را بر عملکرد نیروگاه‌ها داشته است. در اغلب این اصلاحات تلاش می‌شود تا جریان بخار اتمایزر و سوخت در هنگام خروج از نازل دارای چرخش باشد.



شکل ۲۱- ساختار نازل پیشنهادی در چند نمای مختلف

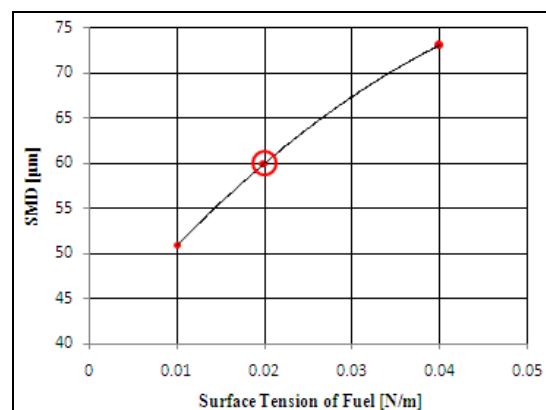
نتیجه‌گیری

در این تحقیق اتمیزه شدن سوخت مایع (مازوت) در نازل بویلر نیروگاه توس مشهد با استفاده از یک نرم افزار تجاری به صورت عددی بررسی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که فرآینده اتمیزه شدن سوخت در داخل مجاری اختلاط نازل اتفاق نمی‌افتد و سوخت با شکلی مشخص که می‌تواند به صورت یک جت دایروی تخمین زده شود، نازل را ترک می‌کند. این جت



شکل ۱۹- تأثیر تغییرات دبی سوخت اتمایزر بر میزان SMD

مقدار کشش سطحی سوخت یکی دیگر از خصوصیات فیزیکی تأثیر گذار بر روند تشکیل قطرات نهایی و SMD آن است. افزایش کشش سطحی سوخت باعث افزایش مقاومت جت سوخت و لیگامنت‌های تشکیل شده در اطراف آن و نهایتاً افزایش قطر قطرات نهایی تشکیل شده خواهد شد. این موضوع در شکل ۲۰ نشان داده شده است به طوری که با افزایش کشش سطحی از 0.02N/m به 0.04N/m مقدار SMD از $60\mu\text{m}$ به $73\mu\text{m}$ (۲۲ درصد) افزایش خواهد یافت. همچنین با کاهش کشش سطحی از 0.02N/m به 0.01N/m مقدار SMD از $60\mu\text{m}$ به $51\mu\text{m}$ (۱۵ درصد) کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰- تأثیر میزان کشش سطحی سوخت بر میزان SMD

پیشنهاد ادامه کار

در این تحقیق همه مدلسازی‌های صورت گرفته بر اساس نازل فعلی مورد استفاده در نیروگاه توس مشهد انجام شد. یکی از پارامترهای مهم جهت انجام احتراق کامل، اختلاط بهتر سوخت و هوا در محفظه احتراق می‌باشد. از آنجا که نازل سوخت مایع



[۱۳]- مرتضی عنبرسوز، محمد جوادی، محمد پسندیده فرد، حمید ایزدی، "مدلسازی عددی بویلر نیروگاه توس به منظور امکان سنجی افزایش راندمان: شبیه سازی جریان و احتراق داخل بویلر"، دومین کنفرانس صنعت نیروگاه های حرارتی

[14]- The IPCO Power Co. web site at: "<http://www.ipcower.com>"

سوخت توسط بخار با سرعت بالا احاطه شده است که این امر باعث متمیز شدن سوخت بلافاصله پس از خروج از نازل می شود. برای یافتن مقدار تقریبی میانگین قطر قطرات سوخت در داخل بویلر به دلیل ناممکن بودن استفاده از روش های عددی برای به دست آوردن مقدار SMD در شرایط کارکردی مختلف، از روابط تحلیلی-آزمایشگاهی استفاده شد که داده های ورودی مورد نیاز برای این روابط از اسناد موجود در نیروگاه و نتایج حاصل از حل عددی در داخل اتمایزر بدست آمد.

مراجع

- [1]- Lefebvre, A. H. *Atomization and Sprays*, Hemisphere, 1989.
- [2]- US patent NO. 0128805, Twin fluid atomizer.
- [3]- US patent NO. 3831843, Method of fuel atomization and a fuel atomizer nozzle therefore.
- [4]- Barreras, F., Lozano, A., Barroso, J., and Lincheta, E., "Experimental characterization of industrial twin fluid atomizers", *Atomization and Sprays*, Vol. 16, pp. 127-145, 2006.
- [۵]- محمد پسندیده فرد، محمد جوادی، مرتضی عنبرسوز، ایمان میرزائی، "امکان سنجی روش های بهینه سازی احتراق از طریق شبیه سازی کامپیوتری جریان و انتقال حرارت در بویلر با سوخت مایع"، نیروگاه توس مشهد، فروردین ۱۳۸۹.
- [6]- FLUENT 6.3 User's Guide.
- [7]- Mandal, A., "Computational Modeling of Non-Newtonian Fluid Flow in Simplex Atomizer," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Cincinnati, Ohio, USA, pp. 86, 2007.
- [8]- Song, S. H., Lee, S. Y., "Study of atomization mechanism of gas liquid mixtures flowing through Y-jet atomizers", *Atomization and Sprays*, Vol. 6, pp. 193-209, 1996.
- [9]- Varga, C.M., Lasheras, J.C., and Hopfinger, E. J., "Initial Breakup of a Small-Diameter Liquid Jet by a High-Speed Gas Stream," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 497, pp. 405-434, 2003.
- [10]- Costa, M., Melo, M.J., Sousa, J.M.M., and Levy, Y., "Spray Characteristics of Angled Liquid Injection into Subsonic Crossflows," *AIAA Journal*, Vol. 44, 2006.
- [11]- Lee, K., Aalburg, C., Diez, F.J., Faeth, G. M., and Sallam, K.A., "Primary Breakup of Turbulent Round Liquid Jets in Uniform Crossflows," *AIAA Journal*, Vol. 45, 2007.
- [12]- Aliseda, A., Hopfinger, E.J., Lasheras, J.C. Kremer, D.M., Berchielli, A. and Connolly, E.K., "Atomization of Viscous and Non-Newtonian Liquids by a Coaxial, High-Speed Gas Jet: Experiments and Droplet Size Modeling," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, pp. 161-175, 2008.