نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۲، سال ۱۳۹۹، صفحات ۴۱۹ تا ۴۳۶
DOI: 10.22060/mej.2018.13936.5757

مطالعه عوارض مکانیکی-بیوسیستمی سوخت مازوت و بررسی فنی استفاده از فنون نوین جهت کاهش آلاینده‌ها در نیروگاه ایرانشهر

شهریار کوراوند*، علی ماشاء الله کرمانی

گروه فنی کشاورزی ، پردیس ابوریحان،دانشگاه تهران ، تهران،ایران

خلاصه: کاهش آلودگی هوا در هنگام مصرف سوخت مازوت از جمله نیازهای ضروری بخش نیروگاهی برای جلوگیری از بروز آسیب‌های زیست محیطی می‌باشد. از طرفی آلودگی‌های سمی موجود در هوا با نزولات جوی ترکیب شده و باران‌های اسیدی به وجود می‌آورند، لذا اثر تخریبی آن‌ها زیاد می‌گردد. پژوهش حاضر به بررسی ویژگی‌های مکانیکی و متالوژیکی رسوب‌های حاصل از احتراق سوخت مازوت بر روی مشعل و لوله‌های سوپر هیت‌های نیروگاه ایرانشهر و همچنین میزان آلاینده‌های آن می‌پردازد. سپس مطالعات و تحلیل و بررسی در زمینه عوامل ایجاد آلودگی زیست محیطی در هنگام مصرف سوخت مازوت انجام می‌شود. همچنین روش‌های نوین کاهش این آلودگی‌ها و استفاده از فناوری‌های جدید بررسی و بهترین راه‌حل برای کاهش این آلاینده‌ها و حفظ محیط زیست در نیروگاه ایرانشهر مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. با تعیین ده ملاک اصلی، از بین روش‌های گوناگون، دو روش نانوامولسیون مازوت و روش گوگردزدایی از گازدودکش به روش جذبی تر انتخاب و پیشنهاد شده است. علاوه بر این با امکان‌سنجی استفاده از فناوری‌های جدید روش ایده‌آلی برای کاهش آلودگی ناشی از احتراق سوخت مازوت در نیروگاه ایرانشهر انجام گردیده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۱۷
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۳/۳۰

کلمات کلیدی:
خاکستر
آلودگی
مازوت
نیروگاه
نانوامولسیون

۱- مقدمه

نفت کوره یا مازوت ارزش حرارتی بالایی دارد و به همین دلیل در نیروگاه به عنوان سوخت مورد مصرف قرار می‌گیرد. در هنگام احتراق سوخت مازوت، حرارت ایجاد شده باعث افزایش دمای آب درون لوله‌های واتروال و ایجاد بخار فوق اشباع مناسب برای تحریک توربین می‌شود. در حین احتراق مازوت تعدادی مواد جانبی از جمله خاکستر و دود تولید می‌شود. خاکستر باعث آسیب‌های مکانیکی و شیمیایی به اجزا نیروگاه شده و ترکیبات آلاینده موجود در دود، محیط زیست را تهدید می‌کند. با توجه به منابع عظیم گازی کشور و پاک‌تر بودن آن نسبت به مازوت، اصطلاحاً دوگانه‌سوز نمودن نیروگاه‌های حرارتی انجام شده که دارای مزایا و معایبی فنی بوده است. در این فرآیند، رسوبات به صورت لایه لایه روی یکدیگر تشکیل می‌شوند. وقتی لایه دوم تشکیل می‌گردد، به علت گرما، ذوب شده و در نتیجه چسبنده می‌گردد و بدین ترتیب جذب ذرات پراکنده خاکستر سوخت مازوت اتفاق می‌افتد و ضخامت آن افزایش می‌یابد. خاکستر مازوتی که بر روی دو قسمت از تجهیزات نیروگاه یعنی لوله‌های سوپرهیتر و مشعل رسوب می‌کند، اهمیت دارد. به دلیل این رسوب، ضخامت جداره لوله افزایش یافته و حرارت کم‌تری به آب درون لوله می‌رسد که موجب کاهش راندمان حرارتی و خوردگی اجزاء بویلر می‌گردد. همچنین رسوب روی مشعل باعث نقصان در احتراق سوخت و ایجاد آلودگی بیشتر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود تا نیازمند تعمیرات دوره‌ای و از کارانداختن واحد برای مدت زمانی مشخص باشد. انجام تعمیرات دوره‌ای و استفاده از روش‌های مکانیکی برای برداشتن رسوبات نیز آسیب‌هایی به لوله و اجزا آن وارد می‌کند. این رسوب‌ها در لوله‌ها و بویلر به قدری است که مستلزم خارج کردن بویلر از مدار طی هفته‌ها جهت رسوب‌زدایی می‌باشد. علاوه بر این، چنانچه رسوب زدایی نشود منجر به افت فشار شدید و ناتوانی دمنده بویلر می‌شود. در اثر احتراق مازوت عناصر خورنده به صورت اکسیدی درآمده و برروی سطوح لوله‌ها رسوب می‌کنند. انواع ترکیبات ایجاد شده که نقطه ذوب پایین

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: skouravand@ut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

هم دارند تجهیزات بویلر را در معرض اکسیداسیون قرار داده و باعث تشدید خوردگی می‌شود. برای پیشگیری از اتلاف حرارتی و خوردگی حاصل از آتش مشعل‌ها که دلیل آن خاکستر حاصل از احتراق سوخت مازوت می‌باشد، مطالعه مکانیکی و متالوژیکی خاکستر ایجاد شده بر روی لوله‌ها و مشعل اطلاعات مناسبی در دست قرار خواهد داد.

از طرفی افزایش روزهای آلوده و بحرانی، خطری برای سلامت شهروندان بوده و تاثیر آلاینده‌ها و مواد سمی و آلاینده‌های شیمیایی که از طریق تنفس و حتی پوست جذب بدن می‌شود، انکارناپذیر است. عدم توانایی شبکه سراسری گاز برای تامین گاز مورد نیاز برای ایام سال و همچنین اختلاف در تولید و مصرف گاز شرایطی را برای نیروگاه‌ها ایجاد می‌کند که از سوخت مازوت استفاده کنند. مدیریت آلودگی و بررسی کیفیت هوا ازجمله نیازهای ضروری برای جلوگیری از بروز آسیب‌های زیست محیطی می‌باشد [۱]. برای کاهش آلودگی حاصل از احتراق سوخت مازوت سه استراتژی کلی پیش روی است؛ ۱- کاهش گوگرد سوخت قبل از احتراق و با روش‌هایی مانند افزودنی‌ها ، ۲- در حین احتراق و با تغییر فرآیند احتراق مازوت و کنترل آن با تولید ترکیبات کم خطرتر ، ۳- بعد از احتراق و با تصفیه دود حاصل از احتراق و کاهش آلاینده‌های خروجی. در ادامه روش‌های هر سه دسته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای گوگردزدایی، گوگردزدایی به روش هیدروژیناسیون می‌باشد. از انواع کاتالیست‌های این روش می‌توان به $NiMO/AL_2O_3$ و $COMO/AL_2O_3$ اشاره کرد [۲]. در روش گوگردزدایی استخراجی مایع-مایع، از فرآیند فیزیکی حلال و محلول استفاده می‌شود؛ به‌طوری‌که محلول در این فرآیند نفت کوره یا مازوت، به طور کلی هیدروکربن با گوگرد زیاد و حلال مناسب صورت می‌گیرد [۳]. پلیمرهای مولکولی در روش ایمپرینتینگ مولکولی برای جذب گوگرد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. در فرآیند گوگردزدایی به روش اکسیداسیون، گوگرد با یک ماده اکسیدکننده ترکیب شده، ماهیت ماده تغییر کرده و گوگرد حذف می‌شود [۵]. از جمله تکنولوژی‌های گوگردزدایی غیر متعارف، گوگردزدایی اکسیداسیونی به کمک التراسونیک می‌باشد که یک فناوری جدید است و مزایای بیشتری نسبت به گوگردزدایی هیدروژنی دارد [۶]. در کاری در دانشگاه ایلینوی انجام شده است، جاذب‌های مبتنی بر بافت‌های ریزتیتانات روی با مورفولوژی نانوفیبر، می‌توانند توانایی اولیه واکنش‌پذیری وحذف گوگرد را در طی چند دوره بازسازی حفظ کنند [۷]. گوگردزدایی زیستی با استفاده از میکروارگانیسم‌ها یا فرآورده‌های آن و یا به طور کلی با استفاده از فرآیندهای زیستی انجام می‌شود.

خاک رس، که به‌طور محلی در دسترس است، می‌تواند به طور موثر برای جاذب گوگردزدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اشباع فلزات روی خاک رس ویژگی‌های جذب آن را افزایش می‌دهد که در یک تحقیق ۶۰ درصد گوگردزدایی انجام شده است [۸]. نانوذرات مغناطیسی به دلیل اینکه به سادگی قابل جداسازی توسط آهنربا می‌باشند، قابلیت ویژه‌ای برای گوگردزدایی دارند [۹]. در تحقیق دیگری به منظور ارتقاء قیر اتابازکا با ۵/۴ درصد وزنی گوگرد، تجزیه حرارتی کاتالیزوری با استفاده از مایکروویو مورد استفاده قرار گرفت که کاهش گوگرد در آن ۴۷/۴ درصد بوده است.[۱۰].

انواع مختلفی از روش‌های کاهش آلودگی در حین احتراق وجود دارد از جمله می‌توان به احتراق پیشرفته برای جلوگیری از تشکیلناکس (NO_X)،و کنترل مرطوب با استفاده از آب یا تزریق بخار برای کاهش دمای احتراق [۱۱] اشاره نمود. فرآیند امولسیون با آب، سطح قابل احتراق هوا را به طور قابل توجهی افزایش داده و باعث بهبود در فرآیند سوخت و کاهش آلاینده ها و کاهش مصرف انرژی می‌شود [۱۲]. در مقایسه با سوخت امولسیونی معمولی، اندازه ذرات آب در سوخت نانو امولسیون بسیار کوچک است و در نتیجه، احتراق پایدارتر بوده و بنابراین کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه ای بیشتر است.[۱۳].

گوگردزدایی از گازدودکش به روش جذبی از جمله کاربردی‌ترین راه‌های کاهش آلودگی است [۱۴]. این روش به دو صورت انجام می‌شود: الف- گوگردزدایی به روش جذبی تر[۱۵] ب- گوگردزدایی به روش جذبی خشک [۱۶]. فرآیندهای تر و خشک به راحتی با توجه با اینکه آیا عامل حذف شونده یک محلول مایع است یا خیر قابل تمایز می‌باشند. فرآیند تر بر اساس تماس گاز خروجی حاصل از سوختن مازوت که حاوی ترکیبات گوگردی می‌باشد با سنگ آهک یا آهک انجام می‌شود به‌طوری‌که دوغاب سنگ آهک یا آهک پس از برخورد با گاز خروجی ترکیبات گوگردی را به خود جذب می‌کند [۱۷].

کنترل آلاینده ناکس پس ازاحتراق از روش‌های دیگری است که در حال حاضر مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها می‌توانند به طور مستقل اجرا یا در ترکیب با اقدامات اولیه مانند مشعل کم به کار گرفته شوند. روش‌های کنترل پس از احتراق را می‌توان به دو

دسته تقسیم کرد [۱۸]: روش احیاء کاتالیزوری انتخابی و روش احیاء غیرکاتالیزوری انتخابی.

در روش اسپری جاذب خشک محلولی از آهک اتمیزه شده و به طرف گاز داغ حاوی SO_2و اسیدهای دیگر اسپری می‌شود تا آن‌ها را جذب کند [۱۹].در تکنولوژی اسپری گرد خشک از یک بستر سیال برای تماس معرف (آهک هیدراته) و گاز خروجی استفاده می‌شود. گاز و قطعات خشک آهک به شدت با یکدیگر ترکیب می‌شوند و باعث واکنش SO_X ها در راکتور می‌شوند [۲۰].

روش تزریق جاذب خشک در بین روش‌های ذکر شده به علت عدم نیاز به ظرف جداگانه برای محصول و استفاده کمتر از واکنشگرها کم‌ترین هزینه را داراست و معمولا برای واحدهایی که جذب میزان کمی از سولفور را دارند و یا حجم واحد خیلی کم است، استفاده می شوند [۲۱]. جداکننده الکترواستاتیک تر روشی موثر جهت حذفSO_3 مخصوصا زمانی که غلظت آلایندگی بسیار کم باشد است و بعد از اتمام گوگردزدایی از گازدودکش جهت پاکسازی نهایی انجام می‌شود [۲۲]. در یک تحقیق، اندازه نانو اکسید روی با استفاده از روش ماتریس سنتز شد و کاربردهای امکان‌پذیر آن در گوگردزدایی ازگاز داغ در نیروگاه سیکل ترکیبی یکپارچه مورد مطالعه قرار گرفت [۲۳]. میزان گوگردی که این اکسید روی نانو ساختار جذب می‌کند ۳ برابر اکسید روی معمولی و تجاری است. به دلیل وجود SO_2در دود خروجی از دودکش نیروگاه، در سال‌های اخیر روشی مبتنی بر استفاده از مواد نانولوله کربنی و کربن فعال برای جذب SO_2 و تبدیل آن به H_2SO_4 به عنوان یک فرآیند خشک در تکنولوژی جذب گوگرد گسترش یافته است [۲۴].

از این‌رو، هدف از این مطالعه بررسی مکانیکی متالوژیکی خاکستر و همچنین میزان آلاینده‌های حاصل از احتراق مازوت در نیروگاه ایرانشهر بوده است. توسعه فناوری‌های کاهش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های حرارتی نیازمند دستیابی به روش‌ها و رویکردهای جدید در این بخش می‌باشد. آلودگی هوا یکی از چالش‌هایی است که در سال‌های اخیر بیشتر از گذشته دامنگیر کشور شده است. در قسمت بعد سوخت مازوت و خاکستر به جا مانده از آن مورد تحلیل و آزمایش قرار می‌گیرد. در ادامه سعی می‌شود تا با مطالعه روش‌های نوین کاهش آلودگی، روش مناسب برای اعمال در نیروگاه ایرانشهر به عنوان پایلوت انتخاب شود. تاکنون کار مشابهی در مورد ارزیابی و انتخاب روش‌های مطلوب جهت کاهش آلودگی حاصل از احتراق سوخت مازوت در نیروگاه ایرانشهر انجام نشده است که در اینجا یک ارزیابی جامع و کامل در سه محور قبل از احتراق، در حین احتراق و پس از احتراق انجام شده است.

۲- مواد و روشها

نیروگاه بخار ایرانشهر به عنوان پایلوت مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا آزمایش‌هایی برای بررسی خواص عمومی سوخت مازوت مورد استفاده و ارزیابی دماهای حین سوختن انجام شد (شکل ۱). این آزمایش‌ها در دو تکرار صورت گرفت. برای اندازه‌گیری دمای اشتعال و نقطه ریزش مطابق استانداردها۹۳-ASTM D و۹۷-ASTM D عمل شد. همچنین نمونه حدود ۵ کیلوگرمی از خاکستر رسوب کرده ناشی از احتراق مازوت بر روی لوله‌های سوپرهیت و مشعل نیروگاه ایرانشهر تهیه و به منظور بررسی به آزمایشگاه منتقل شد (شکل ۲) سوخت مازوت مورد استفاده در نیروگاه ایرانشهر، نفت کوره ۲۰۰۰ از پالایشگاه اصفهان بوسیله تانکرهای سوخت تأمین می‌گردد. مازوت مصرفی دارای ۳ درصد وزنی گوگرد می‌باشد. چگالی مازوت ۹۹۰ kg/m^3 و ارزش حرارتی آن ۴۱/۷MJ/kg می‌باشد.

برای بررسی مکانیکی خاکستر حاصل از احتراق مازوت، نمونه‌های خاکسترها تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و آزمون‌های ضربه قرار گرفت. آزمایش‌های فشار و ضربه برای تعیین نیرو و انرژی مورد نیاز برای برداشتن رسوبات انجام شد. آزمون مقاومت فشاری توسط دستگاه آزمون فشار یونیورسال سنتام مدل اِس.تی.اِم-۵[1] با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم انجام شد. در خصوص حذف رسوبات خاکستر مازوت روی لوله‌ها و مشعل‌های نیروگاه به صورت دستی و وارد کردن ضربه است. از این‌رو در این تحقیق به منظور ارزیابی انرژی مورد نیاز برای این کار از آزمون ضربه استفاده شد. آزمون ضربه یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین انرژی شکست مواد در اثر بارهای دینامیکی است. اساس آزمون ضربه تعیین مقدار انرژی لازم برای شکستن قطعه در اثر ضربه می‌باشد. آزمون ضربه توسط دستگاه آزمون ضربه پاندولی اِس.آی.تی-۵۰[2] برای تخمین مقاومت به ضربه انجام شد.

1 STM-5
2 SIT-50

شکل ۱: آزمایش‌های تعیین مشخصات سوخت مازوت

Fig. 1: Experimental setup to determine the combustion specification of Mazut

(a) (b)

شکل ۲: خاکستر رسوب شده ناشی از سوختن مازوت در نیروگاه ایرانشهر ، (a) روی مشعل (b) روی لوله‌های سوپرهیت

Fig. 2: The sedimented ash caused by mazut combustion at Iranshahr power plant, (a) on the torch, (b) On Super Heat Pipes

به منظور آنالیز ترکیبی و ساختار کریستالی خاکستر رسوب کرده، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس[1] بر روی نمونه‌های خاکستر روی مشعل و لوله‌های سوپر هیت تکرار انجام شد. در هر آزمایش ابتدا نمونه همگن و معرف خاکستر مورد نظر توسط آسیاب به صورت پودر بسیار ریز در آمده و از سرند با مش ۲۰۰ (با اندازه ۷۵ میکرون) عبور داده شده و نمونه سه گرمی از آن در معرض بمباران پرتوهای اشعه ایکس با طول موج ۱۰۰-۰/۱ آنگستروم قرار داده شد. حاصل طیف‌سنجی یک دیفراکتوگرام یا الگوی پراش است. هر نمونه بلورین در ترکیب خاکستر الگوی پراش منحصر به فردی دارد که مقایسه آن با الگوهای پراش استاندارد، نوع ترکیب شناسایی شد.

1 X-Ray Diffraction (XRD)

به منظور آنالیز و اندازه‌گیری مقدار عناصر ترکیبات خاکستر رسوب شده روی مشعل و لوله‌های سوپرهیت آزمایش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس[2] طبق استاندارد۷۵۷۸ ASTM D انجام شد.

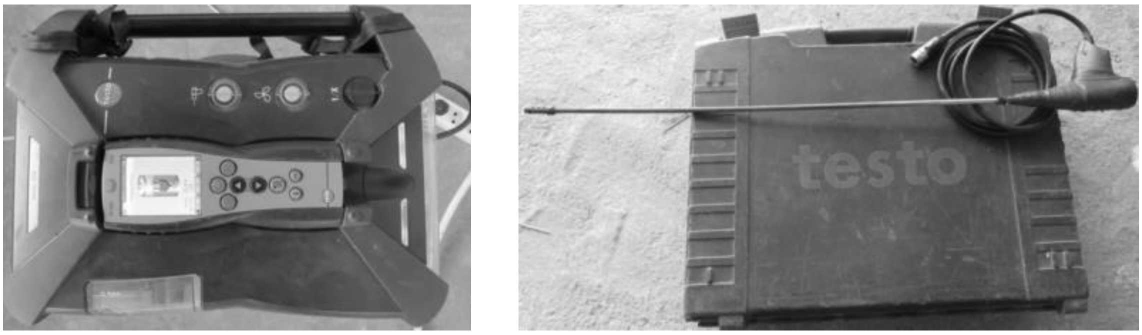
برای تعیین میزان آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت مازوت در هنگام خروج دود از دودکش اندازه گیری انجام شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود دستگاه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری آلاینده‌ها، یک دستگاه آنالیز گاز دودکش مدل تستو۳۵۰ایکس.اِل[3] ساخت شرکت تستو آ.جی[4] بود. این دستگاه در تاریخ ۱۲ اسفند ۱۳۹۵ یعنی قبل از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده است و گواهی کالیبراسیون تحت استاندارد DIN EN ISO ۹۰۰۱:۲۰۰۰ توسط شرکت مهرکاناز صنعت وابسته به شرکت تستو اینداستریال سرویس[5] کشور آلمان صادر گردیده است. در هر آزمایش پس از پایدار شدن شرایط آزمایش، اندازه‌گیری آلاینده‌ها در محل خروجی دودکش در بالای برج انجام می‌شود. قرائت داده‌ها در فاصله‌های زمانی ثابت انجام و میانگین آن‌ها به عنوان اندازه آلاینده گزارش شده است.

۳- نتایج آزمایش های تعیین مشخصات سوخت مازوت

جدول ۱ نتایج مقادیر میانگین دماهای مختلف را نشان می‌دهد. حجم مازوت مورد استفاده در هر آزمایش ۱۰۰ میلی‌لیتر بود. با افزایش دمای مازوت از حدود دمای ۵۰ درجه سلسیوس به بالا حباب کوچکی ایجاد می‌شد. در دمای کم تر از ۱۰۰ درجه سلسیوس بخارهای خاکستری رنگ که ناشی از فشار بخار مازوت است، مشاهده شد. این بخارات سوخت در دمای حدود ۱۵۵ تا ۱۶۰ درجه سلسیوس با ایجاد یک شوک مانند جرقه الکتریکی یا شعله، مشتعل شده و سپس مازوت شروع به شعله ور شدن می‌کرد. پس از شعله‌ور شدن رنگ دود به سمت سیاهی می‌رود. در این مرحله دمای شعله به ۶۷۰ درجه سلسیوس می‌رسد و دمای سوخت در حدود ۳۰۰ درجه سلسیوس بوده است.

نمودار شکل ۴ نتیجه آزمون فشار بر روی رسوبات مشعل را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش فشار رسوبات مشعل حاکی از آن است که این ماده تا نیروی ۲۰ نیوتن را تحمل می‌کند که البته نسبت به سطح

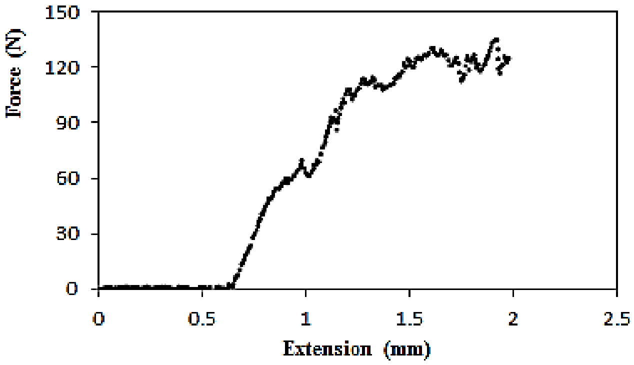
2 X-Ray Fluorescence (XRF)
3 Testo 350XL
4 Testo AG
5 Testo Industrial Services



شکل۳: دستگاه آنالیزور گاز دودکش مورد استفاده در آزمایش‌ها
Fig. 3: Gas analyzer device is used in the experiments The chimney gas analyzer used in the experiments

جدول ۱: نتایج بررسی رفتار عمومی سوخت مازوت
Table 1: Results of the study of the general behavior of Mazut

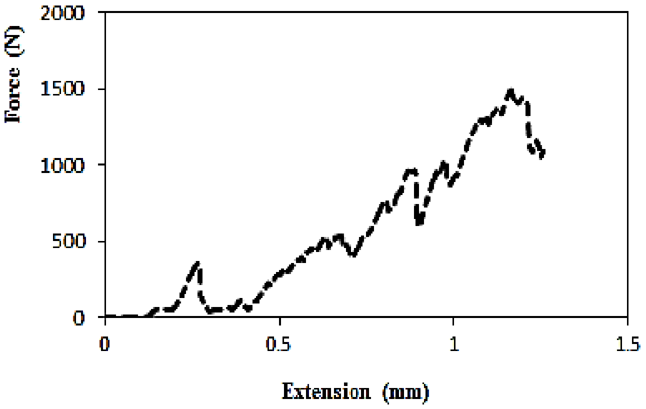
زمان (دقیقه)	وضعیت	دمای سوخت(°C)	دمای شعله(°C)	دمای دود (°C)
۰ (شروع)	شروع گرم شدن	۱۷	-	-
۱	تشکیل اولین بخارات	۷۰	-	-
۳	افزایش دود سفید	۱۱۲	-	-
۳:۳۰	اتمام حباب	۱۳۰	-	-
۴:۳۰	نقطه اشتعال	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰
۵	دود سیاه	۳۱۳	۶۷۰	۳۷۵
۱۷	پایان سوختن	-	-	-



شکل ۴: نمودار نیرو–جابجایی آزمون فشار نمونه رسوبات خاکستر روی مشعل
Fig. 4: Force-displacement diagram for the sedimented ash sample on the torch

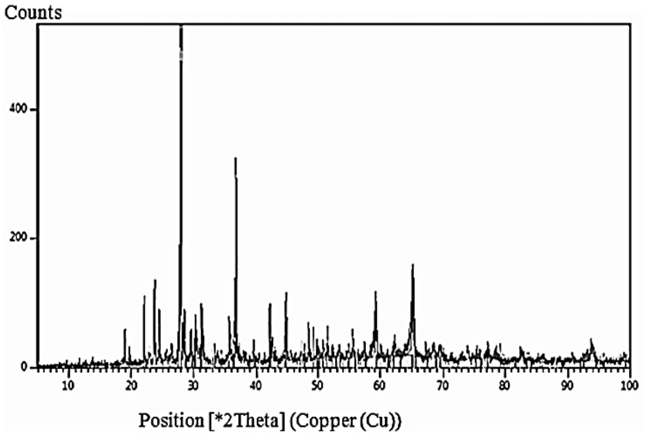
ماده مورد نظر این نیرو افزایش می‌یابد. علت نوسانی بودن نمودار این است که با افزایش نیرو، نمونه کمی فشرده شده است. ابتدا دچار ترک‌های بسیار ریز می‌شود و سپس فضای خالی بین مولکولی آن پر شده و لذا مقاومت آن افزایش می‌یابد.

نمودار شکل ۵ حاکی از آن است که رسوبات لوله تحت آزمایش فشار تا زمان خرد شدن مقدار نیروی ۲۰۰ نیوتن را تحمل می‌کند که نسبت به سطح مقایسه می‌گردد. با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت که به دلیل این که نمونه روی لوله‌های سوپرهیت ساختار فشرده‌تری نسبت به نمونه روی مشعل دارد و میزان نیروی بیشتری را نسبت به نمونه رسوبات روی مشعل تحمل می‌کند. رسوبات ایجاد شده در مشعل نیروگاه در اثر احتراق سوخت مازوت دارای ساختاری بسیار ترد و متخلخل هستند در حالی‌که خاکستر رسوب کرده بر روی لوله‌ها از لحاظ ساختاری نسبت به رسوبات مشعل سخت‌تر بوده و حالت لایه‌ای دارند. نوسانات زیاد در شکل‌های ۴ و ۵ به علت پدید آمدن ترک‌های ریز در ساختار نمونه و سپس فشرده شدن دوباره ساختار آن می‌باشد که این نوسانات در شکل ۵ بیشتر می‌باشد. همچنین به کمک دستگاه آزمایش ضربه انرژی شکست هر یک از رسوبات مشعل و لوله نیروگاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش ضربه نشان می‌دهد که انرژی شکست برای رسوبات داخل لوله ۷۲



شکل ۵: نمودار نیرو–جابجایی آزمون فشار نمونه رسوبات خاکستر روی لوله سوپرهیت

Fig. 5: Force-displacement diagram for the sedimented ash sample on the super heat pipes



شکل ۶: نمودار طیف سنجی پراش اشعه ایکس رسوبات خاکستر روی لوله‌های سوپر هیت

Fig. 6: X-Ray Diffraction (XRD) pattern for the sedimented ash sample on the super heat pipes

جدول ۲: ترکیبات رسوبات خاکستر روی لوله‌های سوپر هیت

Table 2: Components of ash deposits on superheated pipes

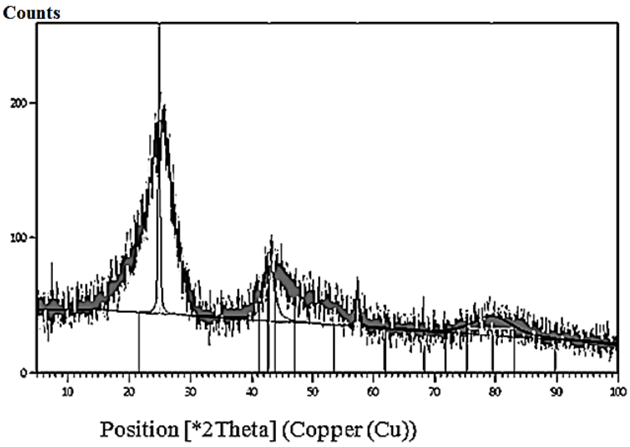
کدمرجع	امتیاز	تغییر [°۲Th.]	فاکتور مقیاس	فرمول شیمیایی
۰۰-۰۲۲-۱۰۵۸	۳۵	۰.۰۰۰	۰/۱۷۲	V
۰۰-۰۰۱-۰۸۵۰	۳۲	۰.۰۰۰	۰/۰۶۸	Na
۰۰-۰۳۷-۱۴۹۰	۱۸	۰.۰۰۰	۰/۰۸۴	Na C N
۰۰-۰۲۲-۱۳۴۲	۲۶	۰.۰۰۰	۰/۱۶۴	Na N3
۰۰-۰۰۸-۰۴۱۵	۱۹	۰.۰۰۰	۰/۰۱۷	C
۰۱-۰۷۷-۱۰۸۴	۱۱	۰/۰۰۰	۰/۲۰۰	Si5 C3
۰۰-۰۲۷-۱۴۰۲	۱۲	۰/۰۰۰	۰/۱۰۸	Si
۰۰-۰۲۴-۱۲۵۱	۱۴	۰/۰۰۰	۰/۱۳۱	S

ژول و انرژی شکست رسوبات داخل مشعل نیروگاه ۹ ژول می‌باشد.

شکل ۶ نتیجه طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس از نمونه رسوبات خاکستر روی لوله نیروگاه نشان می‌دهد که ترکیبات این رسوبات حاوی موادی همچون وانادیم، سدیم، سدیم سیانید، کربین، سیلیکن کربید، سیلیکون و سولفور می‌باشد (جدول ۲). وانادیم که عنصرغالب ترکیبات خاکستر لوله می‌باشد؛ عنصری جامد و نامحلول در آب و در برابر خوردگی مقاوم است.

وانادیم عنصر ارزشمندی است که با توجه به ارزش اقتصادی آن در صنایع فولاد خاکستر مازوت یک منبع اولیه برای استخراج و بازیابی وانادیم است. این عنصر در نیتریک، هیدرو فلوریک و سولفوریک غلیظ حل می‌شود و هنگام واکنش با بازها تشکیل وانادات‌های محلول در آب را می‌دهد. نقطه ذوب وانادیم ۱۹۰۰درجه سلسیوس است. در صورت استخراج این ماده از رسوبات می‌توان از آن در تولید آلیاژهای فولاد، ترکیبات وانادیم به خصوص کاتالیزور برای اسید سولفوریک و لاستیک، رنگ شیشه و تولید انواع آلیاژهای تیتانیم استفاده کرد. بعد از وانادیم، سدیم بیشترین ترکیب موجود در این رسوبات است که در صورت استخراج می‌توان از آن در صنایع شیشه‌سازی فلزی، ساخت کاغذ، صنعت نفت، ساخت صابون و نساجی استفاده کرد.

با توجه به نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس خاکستر روی مشعل در شکل ۷ و جدول ۳ ترکیبات رسوبات روی مشعل قابل مشاهده است که عنصر کربن (دوده)، عنصر غالب رسوبات مشعل می‌باشد. این ماده حاصل سوختن ناقص هیدروکربن‌های سنگین است و عمدتاً در محصولات لاستیکی و رنگ دانه‌ها و جوهر چاپگرها کاربرد دارد.



شکل ۷: نمودار طیف سنجی پراش اشعه ایکس رسوبات خاکستر روی مشعل

Fig. 7: X-Ray Diffraction (XRD) spectroscopy pattern the sedimented ash sample on the torch

جدول ۳: ترکیبات رسوبات خاکستر روی مشعل

Table 3: Components of ash deposits on the torch

کدمرجع	امتیاز	تغییر [°۲Th.]	فاکتور مقیاس	فرمول شیمیایی
۰۱-۰۷۹-۱۴۶۹	۷	۰/۰۰۰	۰/۱۷۴	C

جدول ۴: آلاینده‌های حاصل از احتراق مازوت

Table 4: Pollutants from the combustion of mazut

نوع	مقدار (ppm)
SOx	۱۱۰۴
NOx	۱۴۳
O_2	۲/۹

با توجه به میزان مصرف سوخت مازوت در واحدهای نیروگاهی مازوت سوز، افزایش مقاومت به خوردگی قطعات، هزینه‌های سنگین تعمیرات و خرابی‌ها مانند هزینه تعمیر و تعویض لوله، هزینه تعمیر بدنه، هزینه تعمیر بدنه محافظ‌های ورقی را کاهش داده و در نتیجه موجب افزایش بهره‌وری تجهیزات، کاهش آلودگی محیط زیست، دستیابی به حداکثر پتانسیل و در نتیجه حداکثر ظرفیت تولید خواهد گردید. تمیزکاری سطح بیرونی اجزا و تجهیزاتی مانند سوپرهیت‌ها و تسمه‌های نگهدارنده آن‌ها می‌تواند ضمن کاهش خوردگی از آلودگی‌های بعدی نیز جلوگیری کند. خوردگی که بر اثر خاکستر ناشی از سوزاندن مازوت پدید می‌آید به صورت حفره‌ای شکل بوده و باعث کاهش ضخامت می‌شود. در اثر احتراق مازوت عناصر خورنده گوگرد، سدیم و وانادیم به صورت اکسیدی در آمده و بر روی سطوح لوله‌ها رسوب می‌کند.

۴- بررسی روش‌های کاهش آلودگی و انتخاب روش مناسب

احتراق سوخت مازوت در نیروگاه ایرانشهر باعث تولید آلاینده‌های گازی در دود خروجی از دودکش‌ها شده و پیامدهای زیست محیطی در پی خواهد داشت. انتشار این آلاینده‌ها تخریب محیط زیست و به خطر افتادن سلامت انسان‌ها را در پی دارد. از طرفی آلودگی‌های سمی موجود در هوا با نزولات جو ی ترکیب شده و باران‌های اسیدی به وجود می‌آورند و لذا اثر تخریبی آن‌ها زیاد می‌گردد و تأثیر دیگر آن‌ها اثرات گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین است. از مهمترین آلاینده‌ها اکسیدهای گوگرد، اکسید نیتروژن، منواکسیدهای کربن و ذرات معلق می‌باشند. با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و تاثیر گازهای مخرب مذکور، ضروری است تا راه‌های کاهش این آلودگی‌ها بررسی و بهترین راه حل برای کاهش این آلاینده‌ها و حفظ محیط زیست در نیروگاه ایرانشهر مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

جدول ۴ آلاینده‌های حاصل از احتراق مازوت نتایج حاصل از اندازه‌گیری آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت مازوت نشان می‌دهد. در ادامه تلاش می‌شود با به کارگیری روش‌های مناسب بتوان میزان این آلاینده‌ها را به حداقل مقدار مورد تأیید استانداردهای محیط زیست رساند.

براساس مصوبه هیات دولت مورخ ۱۳۹۵/۱/۲۲ و به استناد ماده ۱۵ قانون نحوه جلوگیری از آلودگی هوا مصوب ۱۳۷۴ حد مجاز استانداردهای خروجی از دودکش نیروگاه‌ها به شرح جدول ۵ تعیین گردیده است [۲۵] همانطورکه ملاحظه می‌شود حد مجاز آلاینده SOx مازوت برای نیروگاه‌های جدید و قدیم معلوم می‌باشد که البته این مقدار در استانداردهای بین‌المللی کمتر می‌باشد به‌طوریکه حد مجاز در کشورهای چین، اتحادیه اروپا و آمریکا، مقدارآن درنیروگاه‌های قدیمی به ترتیب برابر۲۰۰ ، ۴۰۰ ، ۶۴۰ میلی‌گرم بر مترمکعب و درنیروگاه‌های جدید به ترتیب۱۰۰ ، ۲۰۰ و ۱۶۰ میلی‌گرم بر مترمکعب می‌باشد.

برای بررسی آلاینده‌های نیروگاه ایرانشهر میزان ودرصد هرکدام ازآلاینده‌ها در نیروگاه ایرانشهر تعیین می‌گردد. آلاینده‌های حاصل

جدول ۵: حدود مجاز انتشار آلاینده‌های هوا در نیروگاه‌ها در ایران[۲۵]

Table 5: The allowed limits of air pollutants emission in power plants in iran

آلاینده	واحد اندازه گیری	حد مجاز درجه ۱	انتشار درجه ۲	توضیحات
NOx	mg/Nm^3	۱۵۰	۳۰۰	باسوخت گاز
NOx	mg/Nm^3	۲۰۰	۴۰۰	باسوخت مازوت
NOx	mg/Nm^3	۲۰۰	۲۵۰	باسوخت گازوئیل
SO_2	mg/Nm^3	۱۰۰	۲۰۰	باسوخت گاز
SO_2	mg/Nm^3	۷۰۰	۸۰۰	باسوخت مازوت
SO_2	mg/Nm^3	۱۰۰	۱۵۰	باسوخت گازوئیل
ذرات	mg/Nm^3	۱۰۰	۱۵۰	درصورت استفاده از سوخت زغال سنگ
CO	mg/Nm^3	۱۵۰	۲۰۰	
H_2S	mg/Nm^3	۶	۸	

از احتراق سوخت مازوت درنیروگاه ایرانشهر دی‌اکسیدگوگرد، منواکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق می‌باشند. بر اساس اندازه‌گیری انجام شده در فصول مختلف یک سال مقدار آلاینده‌های نیروگاه تعیین شده‌اند.

در اینجا روش‌های کاهش آلودگی برای کاهش آلودگی محیط زیستی حاصل از احتراق سوخت مازوت در نیروگاه ایرانشهر بررسی می‌شود. روشی که انتخاب می‌شود باید بتواند بر اساس استانداردهای محیط زیستی ایران و اروپا آلودگی حاصل از سوخت مازوت را به مقدار مطلوب کاهش دهد. با توجه به نوع مازوت مصرفی نیروگاه ایرانشهر میزان ثبت شده انتشار آلاینده SOx در آن تا ۱۳۱۳ ppm گزارش شده است که با مقایسه با آن، میزان کاهش آلاینده SOx نیروگاه به ترتیب باید ۴۰ درصد و ۸۵ درصد باشد. همچنین میزان ثبت شده انتشار آلاینده ناکس در آن تا ۳۲۷/۵ ppm گزارش شده است. حد مجاز در استاندارد ایران و اروپا به ترتیب ۴۰۰ ppm و ۲۰۰ ppm می‌باشد که با مقایسه با آن، در حد مجاز استاندارد ایران قراردارد ولی برای رسیدن به استاندارد اروپا بای‌د ۳۹ درصد کاهش یابد. دیگر آلاینده ها مانند ذرات معلق و مونواکسیدکربن در حد مجاز هر دو استاندارد قرار دارند.

از آنجاکه معضل اصلی در احتراق سوخت مازوت آلاینده‌های SOx هستند، روش‌های مذکور با اولویت حذف SOx و سپس ناکس مورد بررسی قرار می‌گیرند. استراتژی و ملاک انتخاب روش‌های کاهش آلودگی بر اساس استاندارد محیط زیست اروپایی و به ترتیب اولویت‌های زیر انجام می‌شود:

۱- روش انتخابی باید بتواند بالاترین درجه حذف آلاینده SOx و پتانسیل کاهش ۸۵ درصدی آن را داشته باشد. ۲- روش انتخابی باید توان مطلوب حذف آلاینده ناکس و با پتانسیل ۴۰ درصدی را داشته باشد. ۳-توانایی به کارگیری در شرایط مازوت مصرفی نیروگاه ایرانشهر مانند درصد گوگرد و مانند آن را داشته باشد. ۴- در دسترس بودن و قیمت منسب مواد مصرفی و عدم وابستگی دایمی به تامین مواد از خارج از کشور. ۵- بهترین بازدهی را داشته باشد و بر پارامترهای احتراق و توان تولیدی کمترین اثرگذاری را داشته باشد. ۶- با شرایط فیزیکی و تجهیزات نیروگاه ایرانشهر همخوانی و سازگاری داشته باشد و نیاز به اصلاحات عمده در نیروگاه ایرانشهر از نظرتغییرات تجهیزات موجود و مانند آن نباشد. ۷- سابقه به کارگیری و آزمایش موفق در تاسیساتی در مقیاس نیروگاه ایرانشهر و بزرگتر از آن را داشته باشد. ۸- با رسالت نیروگاه ایرانشهر، عمر باقی‌مانده و فضای در دسترس در نیروگاه ایرانشهر همخوانی داشته باشد. ۹- قابلیت استفاده در انواع سوخت‌های گاز و مازوت را در آینده داشته باشد. ۱۰- مشکلات ثانویه مانند خوردگی و یا پساب‌ها را نداشته باشد.

با توجه به اینکه نیروگاه ایرانشهر مجهز به مشعل‌های دوگانه‌سوز شده است و اکنون سوخت اصلی نیروگاه گاز است بنابراین مازوت به عنوان سوخت جایگزین استفاده می‌شود. این سوخت در زمستان که

جدول ۶: روش‌های کاهش آلودگی با توجه به اولویت‌های ده‌گانه جهت اعمال در نیروگاه ایرانشهر

Table 6: The pollution reduction methods based on the ten priorities for Iranshahr power plant

روش	قابلیت حذف SO_x تا ۸۵٪	قابلیت حذف NO_x تا ۴۰٪	به کارگیری با شرایط مازوت مصرفی	قیمت مواد و دسترسی	عدم تاثیر بر بازدهی و توان	عدم اصلاحات عمده در نیروگاه	سابقه در مقیاس نیروگاه ایرانشهر	عمر باقی مانده و فضای در دسترس	قابلیت استفاده در هر دو سوخت	به وجود نیامدن مشکلات ثانویه
هیدروژناسیون	+	−	+	−	−	+	+	−	−	−
روش استخراجی	+	−	+	−	−	+	+	−	−	−
روش مایع یونی	+	−	+	−	−	+	+	−	−	−
ایمپیرینتیمگ مولکولی	+	−	−	−	−	+	−	−	−	−
روش اکسیداسیون	+	−	+	+	−	−	+	−	−	−
اکسیداسیون به کمک التراسونیک	+	−	+	+	+	+	+	+	−	+
تنیدن تیتانات روی	+	−	+	−	−	−	−	+	−	−
گوگردزدایی زیستی	+	−	−	+	−	+	−	+	−	−
جاذب های جامد	−	−	+	−	−	+	−	+	−	−
نانوذرات مغناطیسی آهن	+	−	−	−	+	+	−	+	−	−
تکنیک نوین استفاده از مایکروویو	−	−	+	+	+	+	−	+	−	+
امولیسیون با آب	−	+	+	+	−	+	−	+	−	+
نامولیسیون با آب	−	+	+	+	+	+	+	+	−	+
گوگردزدایی از گازدودکش تر	+	−	+	+	+	+	+	+	+	-
روش جدا کننده الکترواستاتیک تر	−	−	+	+	+	+	+	+	+	−
روش احیاء کاتالیست انتخابی[1]	−	+	+	+	+	+	+	+	+	-
روش های گوگردزدایی از گازدودکش خشک	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+
اسپری جاذب خشک	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+
اسپری گرد خشک	+	−	+	+	+	+	+	+	+	−
تزریق جاذب خشک	+	−	−	+	+	+	−	+	+	−
اکسیدروی نانوساختار	−	−	+	−	+	+	−	+	+	+
مواد نانولوله کربنی و کربن فعال	−	−	+	−	+	+	−	+	+	+

شبکه سراسری گاز فشار کافی را ندارد می‌تواند در نیروگاه استفاده شود. چون در طول سال حداکثر روزهای افت فشار گاز سه ماه می‌باشد. بنابراین استفاده از سوخت مازوت و در نتیجه آن استفاده از روش کاهش آلودگی محدود به تعداد روزهایی از سال است که از این سوخت استفاده می‌شود و معمولا از ۹۰ روز متجاوز نمی‌شود.

در جدول ۶ روش‌های متداول ذکر شده در این تحقیق از منظر ده

اولویت فوق بررسی گردیده و مورد بحث قرار گرفته است. روش‌هایی که بتواند با اولویت‌های فوق همخوانی بیشتری داشته باشند به عنوان روش مناسب برای اعمال در نیروگاه ایرانشهر پیشنهاد می‌گردند. بدیهی است این روش‌ها حداقل باید برای به حد استاندارد رساندن از آلاینده ها مناسب باشند. در مرحله بعدی به ترتیب اهمیت اولویت، سعی می‌شود با مقایسه روش‌ها بهترین آن انتخاب شود. در بخش بعدی با بررسی میزان اثرگذاری آزمایشگاهی روش انتخاب شده برای اعمال در نیروگاه ایرانشهر پیشنهاد گردند. سه حالت کلی برای بررسی روش‌های کاهش آلودگی پیش روی است.

۴-۱ روش‌های کاهش آلودگی قبل از احتراق با استفاده از افزودنی‌ها:

در این روش‌ها که عمدتا از طریق استفاده از افزودونی‌ها و یا کاتالیست‌ها با هدف کاهش میزان گوگرد موجود در سوخت انجام می‌شود. همانطور که در جدول ۶ دیده می‌شود، برخی از این روش‌ها قابیلت حذف ترکیبات گوگردی در حد استاندارد اروپا را دارند. اما عمده روش‌ها دارای مواد مصرفی گران و یا با دسترسی کم می‌باشد. بیشترین اثر افزودنی‌ها به سوخت مازوت بر روی کاهش مقدار گوگرد موجود در سوخت می‌باشد [۲۶]. بنابراین با استفاده از روش‌های این دسته، ترکیبات گوگردی موجود درآلاینده‌های خروجی از دودکش بیشترین کاهش را خواهند داشت که این کاهش تا بالای ۹۰ درصد هم گزارش شده است. اما این روش‌ها اثری بر آلاینده‌های ناکس ندارند.

باتوجه به ویژگی‌های پیچیده مازوت و ترکیبات گوگردی آن که ترکیبات سنگین بنزوتیوفنی وتیوفنی هستند، کاربرد روش‌های این دسته، برای گوگردزدایی از مازوت مسائل و مشکلات زیادی به همراه داشته است و مانع استفاده تجاری این روش‌ها در واحدهای بزرگ نیروگاهی می‌شود. اکثر روش‌های مذکور با توجه به ماهیت و تجهیزات مورد نیاز باید در پالایشگاه‌ها انجام شوند و امکان نصب تجهیزات آن‌ها در نیروگاه با توجه ماهیت و رسالت نیروگاه‌ها مشکل می‌باشد. در مجموع در مقایسه با روش‌های حذف ترکیبات گوگردی از محصولات احتراق که در ادامه می‌آید، هیچکدام از این روش‌ها مناسب نمی‌باشند. به این دلیل امکان استفاده از این روش‌ها در نیروگاه ایرانشهر پیشنهاد نمی‌شود. با این حال چنانچه هماهنگی‌های لازم با صنایع پالایش وجود داشته باشد یکی از روش‌های این دسته به نام روش گوگردزدایی هیدروژنی به دلایلی که در ادامه می‌آید می‌تواند به عنوان گزینه روش مناسب پالایشگاهی (نه نیروگاهی) برای تولید سوخت با گوگرد پایین انتخاب شود.

اگرچه هریک از روش‌های این دسته از لحاظ انرژی مصرفی و شرایط عملیاتی دارای مزیت‌های نسبی نسبت به فرآیند هیدروژنی هستند، اما با توجه به دلایل ذکر شده تنها گزینه جالب از بین روش‌های دسته اول که ملاک‌های ۱۰گانه استراتژی انتخاب روش کاهش آلودگی را بیشتر برآورده می‌سازد، روش هیدروتریتینگ می‌باشد. این روش را می‌توان قبل از ورود سوخت به نیروگاه یعنی در پالایشگاه عملیاتی کرد و مازوت گوگردزدایی شده در پالایشگاه را مورد بهره‌برداری قرار داد. اکنون با مطالعات اقتصادی به بررسی اثر استفاده از سوخت مازوت گوگردزدایی شده به روش هیدروژنی بر افزایش قیمت سوخت و توان تولیدی نیروگاه پرداخته می‌شود.

حداقل میزان سولفورزدایی مورد نیاز از سوخت ورودی نیروگاه‌ها محاسبه شده است. هر واحد نیروگاه ۲۵۶ مگاواتی ایرانشهر برای هر مگاوات ساعت نیاز به مصرف ۳۳۳ کیلوگرم مازوت دارد. که با توجه به نوع مازوت مصرفی میزان ثبت شده انتشار آلاینده SOx در آن تا ۱۳۱۳ ppm گزارش شده است که چنانچه با استاندارد ایران و اروپا مقایسه شود، میزان گوگردزدایی سوخت به ترتیب باید ۳۹ درصد و ۸۵ درصد باشد.

هزینه‌های تقریبی خرید تجهیزات و دستگاه های اصلی واحد گوگردزدایی هیدروژنی بر مبنای سال ۲۰۱۷ برای گوگردزدایی از سوخت برای رسیدن به استاندارد اروپا و ایران به ترتیب برابر ۹۴۱۱۶۶۰۰ دلار و ۶۵۱۳۰۴۸دلار می‌باشد. این مبالغ با جمع آوری تجهیزات مورد نیاز از منابع گوناگون و با توجه به نرخ بهره سال ۲۰۱۷ محاسبه گردیده است. علاوه بر این هزینه‌هایی دیگری نیز به عنوان هزینه‌های جانبی احداث واحد باید به این هزینه‌ها اضافه گردد. این هزینه‌ها شامل هزینه ساخت تاسیسات خطوط لوله و اتصالات، هزینه دستگاه‌ها ووسایل ابزار دقیق، هزینه دستگاه‌ها و وسایل الکتریکی، هزینه ساخت سازه و فرآیند، هزینه سرویس‌های وابسته، هزینه‌های مرتبط با ذخیره‌سازی و هزینه‌های توسعه‌ای می‌باشند. این هزینه‌های جانبی در منابع مختلف برابر ۱۳۰ درصد هزینه‌های تجهیزات در نظر گرفته می‌شوند و با جمع آن با هزینه خرید تجهیزات اصلی، هزینه کل تجهیزاتی بدست می‌آید.

برای محاسبه کل هزینه سرمایه‌گذاری واحد باید مواردی از قبیل هزینه طراحی و مهندسی، هزینه پیمانکار و سایر هزینه‌های احتمالی که مجموعا ۴۵ درصد کل هزینه‌های تجهیزاتی در نظر گرفته می‌شود را به آن اضافه کرد. بنابراین کل هزینه سرمایه‌گذاری برابر ۱/۴۵ برابرکل هزینه‌های تجهیزاتی خواهد بود.

هزینه ناخالص سالانه استفاده از روش هیدروژنی ازمجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه و هزینه‌های عملیاتی سالانه بدست می‌آید. هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه از ضرب نسبت هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه در کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحد بدست می‌آید. نسبت هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه از رابطه۱ تعیین می‌شود.

$$\text{نسبت هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه} = \frac{\text{نرخ بهره} \times \left(1+\text{نرخ بهره}\right)^{\text{طول عمر}}}{\left(1+\text{نرخ بهره}\right)^{\text{طول عمر}}-1} \quad (۱)$$

هزینه‌های عملیات جاری سالانه شامل سوخت و گازطبیعی، برق آب و قیمت تولید و انتقال هیدروژن در واحد رفرمینگ گاز طبیعی با احتساب ۳۳۰ روز کارکرد واحد گوگردزدایی محاسبه شده‌اند.

در عملیات گوگردزدایی به روش هیدروژنی، محصولات جانبی مانند بنزین و گازوییل نیز تولید می‌شوند که می‌توان عواید حاصل از این محصولات را از هزینه‌های سالانه کم کرد. هزینه خالص سالانه با کسر عواید جانبی بدست می‌آید. جدول ۷ هزینه‌های محاسبه شده استفاده از روش هیدروژنی برای گوگردزایی از سوخت مازوت را نشان می‌دهد.

برای بدست آوردن هزینه تمام شده به ازای هر کیلو وات ساعت توان تولیدی نیروگاه ایرانشهر، از رابطه۲ استفاده می‌شود.

$$\text{هزینه تمام شده گوگردزدایی} = \frac{\text{هزینه خالص سالانه}}{\text{توان تولیدی نیروگاه} \times 8760 \times \text{ضریب سالانه کارکرد نیروگاه}} \times 100\ (\text{cents/kWh}) \quad (۲)$$

جدول ۷: هزینه های محاسبه شده روش هیدروژنی برای گوگردزدایی از سوخت مازوت

Table 7: The estimated costs of hydrogen method for desulfurization of mazut fuel

نوع هزینه (دلار)	با هدف کاهش تا ۲۰۰ ppm	با هدف کاهش تا ۸۰۰ ppm
هزینه‌های خرید تجهیزات اصلی	۹۴۱۱۶۶۰۰	۶۵۱۳۰۴۸۰
هزینه کل تجهیزاتی	۲۱۶۴۶۸۱۸۰	۱۴۹۸۰۰۱۰۴
کل هزینه سرمایه‌گذاری	۳۱۳۸۷۸۸۶۱	۲۱۷۲۱۰۱۵۱
هزینه سرمایه‌گذاری سالانه	۵۸۶۹۶۹۲۰	۴۰۶۱۹۸۸۰
هزینه‌های عملیاتی	۷۲۳۴۷۰۴۰۰	۲۵۵۳۰۱۲۰
هزینه‌های ناخالص سالانه	۱۳۱۰۴۳۹۶۰	۶۶۱۵۰۰۰۰
عواید سالانه جانبی	۶۲۶۶۹۱۶۰	۱۴۹۴۲۸۸۰
هزینه خالص سالانه	۶۸۳۷۴۸۰۰	۵۱۲۰۷۱۲۰
هزینه تمام شده (cents/kWh)	۳/۳۹	۲/۵۴

جدول ۸: هزینه‌های تمام شده گوگردزدایی هیدروژنی به ازای هر کیلو وات ساعت

Table 8: Costs of hydrogen desulfurization per kilowatt-hour

ضریب کارکرد	هزینه تمام شده (cents/kWh) با هدف رسیدن تا ۲۰۰ ppm	هزینه تمام شده (cents/kWh) با هدف رسیدن تا ۸۰۰ ppm
۰/۹	۳/۳۹	۲/۵۴
۰/۲۵	۱۲/۲۰	۹/۱۳

با توجه به جدول ۸، هزینه تمام شده برای فرآیند گوگردزدایی هیدروژنی برای رسیدن به دو استاندارد اروپا و ایران به ترتیب ۳/۳۹ سنت و ۲/۵۴ سنت به ازای هر کیلووات ساعت خواهد بود. این هزینه در شرایطی محاسبه شده است که ضریب سالانه کارکرد واحد گوگردزدایی ۰/۹ باشد یعنی تعداد روزهای کارکرد ۳۳۰ روز در نظر گرفته شود. اما همانطورکه پیشتر گفته شد، چون مازوت در نیروگاه ایرانشهر در روزهای زمستان به علت افت فشار شبکه سراسری گاز عنوان سوخت جایگزین مصرف خواهد شد، بنابراین استفاده از سوخت مازوت و در نتیجه آن استفاده از روش کاهش آلودگی هزینه‌های بسیار زیاد این روش و تهیه تاسیسات و تجهیزات فرآوری برای نیروگاه ایرانشهر که به طور دایم از مازوت استفاده نخواهد کرد و فقط در مواقع اضطرار اقدام به سوزاندن مازوت می‌کند، مطلوب نیست. همانطور که در رابطه مشاهده می‌شود، با توجه به نسبت معکوس هزینه تمام شده گوگردزدایی و توان تولیدی، چنانچه واحد هیدروژنی به طور دایم در سال و برای چند نیروگاه با توان بالای ۱۰۰۰ مگاوات گوگردزدایی را انجام دهد هزینه تمام شده برای رسیدن به کمتر از ۰/۸۷ سنت در هر کیلو وات برای رسیدن به استاندارد اروپا و ۰/۶۵ سنت در هر کیلو وات برای رسیدن به استاندارد ایران کاهش پیدا خواهد کرد و در این حالت این روش می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.

۴-۲ روش‌های در حین احتراق و با تغییر فرآیند احتراق سوخت مازوت

روش‌های احتراق بیشترین تاثیر را روی کاهش آلاینده ناکس می‌گذارد و برخی از آن‌ها برای آلاینده‌های SOx در حد استاندارد اروپایی مناسب نیستند. این روش‌ها عموما جهت کاهش آلاینده‌هایی استفاده می‌شود که در اثر احتراق ناقص تولید می‌شوند که شایع‌ترین آن‌ها آلاینده‌های ناکس می‌باشد. در این بین، یکی از این روش‌ها به نام تولید امولسیون سوخت نانو می‌توانند همزمان آلاینده‌های ناکس و SOx را کاهش دهند. این روش از بین روش‌های دسته دوم بیشتر ملاک‌های ده گانه استراتژی انتخاب روش کاهش آلودگی را برآورده می‌سازد که به بررسی بیشتر آن پرداخته می‌شود. این روش با کاهش ابعاد مولکول سوخت و حضور آب با ایجاد میکرو انفجار سطح برخورد سوخت را بیشتر کرده و منجر به احتراق کامل سوخت می‌شود. در این روش نیاز به یک واحد امولسیون‌ساز می‌باشد که سوخت مازوت را با درصد مناسب آب و سورفکتانت تبدیل به ذرات نانو می‌کند. همچنین حضور آب باعث می‌شود که قبل از احتراق سوخت ذره سوخت دچار میکرو انفجار شود و به ذرات کوچکتر تبدیل شده و سطح احتراق افزایش یابد که این پدیده سبب احتراق کامل سوخت می‌شود. نصب تجهیزات این روش ساده است وزمان زیادی نیاز نمی‌باشد و می‌تواند بین تانک‌ها و تجهیزات احتراق جا داده شود. این واحد امولسیون‌ساز می‌تواند در مسیر انتقال سوخت و قبل از رسیدن به بویلر قرار گیرد؛ به نحوی‌که سوخت ورودی به واحد قبلا در مخازنی با آب و سورفکتانت‌ها مخلوط شده باشد و با قرارگیری در واحد امولسیون‌ساز توسط هموژنایزر ذرات آن به صورت ابعاد کوچک و همگن درآید. سوخت نانوامولسیون تولیدی با خروج از امولسیون‌ساز مستقیما به مشعل‌های سوخت هدایت می‌شود. بنابراین با توجه به ملاک‌های مطرح شده در این بخش روش نانوامولسیون مازوت به عنوان یکی از دو روش پیشنهادی انتخاب می‌شود. در ادامه با انجام آزمایش‌های عملکردی میزان اثر بخشی آن بر کاهش آلودگی حاصل از احتراق سوخت مازوت بررسی می‌گردد.

۴-۳ بعد از احتراق و با تصفیه دود حاصل از احتراق

با توجه به اینکه در کاهش آلاینده های SOx که در احتراق مازوت عمده‌ترین معضل می‌باشند، بیشترین کارآیی متعلق به این دسته می‌باشد، یکی از روش‌های این دسته الزاما باید برای کنترل آلودگی SOx به کار گرفته شوند. در این بین استفاده از گوگردزدایی به روش جذبی خشک به دلایل متعدد مفید نخواهد بود. یکی از اصلی‌ترین دلایل کارآیی پایین‌تر آن نسبت به روش تر می‌باشد چون این روش برای سوخت‌هایی با سولفور کمتر از ۲ ٪ مورد استفاده است و مناسب نیروگاه ایرانشهر نمی‌باشد. همچنین با وجود گوگردزدایی مورد قبولی که تحت شرایط واکنشی که درآزمایشگاه و پایلوت اعمال شده است، کارایی جاذب‌های این روش برای استفاده درصنعت هنوزکافی نیست. بنابراین روش گوگردزدایی از گازدودکش تر مناسب‌ترین روش از نظر کارآیی بالاتر می‌باشد که می‌تواند بیشتر ملاک های ده گانه را به موفقیت بگذراند.

برای استفاده از روش گوگردزدایی از گازدودکش تر در نیروگاه ایرانشهر باید نوع جاذب را نیز مشخص کرد. برخی واکنشگرهای

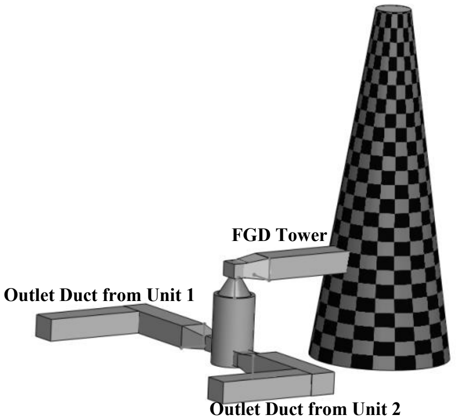
مورد نیاز در روش گوگردزدایی از گازدودکش تر[1] () شامل آهک، منیزیم برای خنثی‌سازی آهک، آب دریا و سودا اش یا کربنات کلسیم می‌باشند که همه از مواد در دسترس می‌باشد. فاصله ۳۵۰ کیلومتری از دریا، انتخاب آب دریا به عنوان گزینه جاذب را رد می‌کند. این مساله به دلیل نیاز به نصب تاسیسات، خط انتقال آب، پرداخت خسارت مالکین و معارضین زمین‌های سر راه خط لوله و همچنین تعمیر و نگهداری آن می‌باشد. چنانچه این موضوع مرتفع باشد، آب دریا هم می‌تواند به عنوان یک گزینه مورد نظر باشد.

در بین گزینه‌های جاذب آهک به دلیل در دسترس بودن و قیمت پایین‌تر آن انتخاب می‌شود. با توجه به موقیعت دود کش‌ها در نیروگاه ایرانشهر پیشنهاد می‌شود که قبل از هر کدام از دو دودکش یک برج گوگردزدایی از گازدودکش طراحی و نصب شود. موقیعت نصب برج مطابق شکل ۸ خواهد بود. یعنی داکتی که از واحد های ۱ و ۲ خارج می‌شود وارد برج گوگردزدایی از گازدودکش شماره یک شود. سپس دود خروجی این برج توسط یک داکت به دودکش اول انتقال می‌یابد. همچنین داکت خروجی از واحدهای شماره ۳ و ۴ وارد برج گوگردزدایی از گازدودکش شماره ۲ می‌شود و دود خروجی این برج توسط یک داکت به دودکش دوم انتقال می یابد. چگونگی اتصال برج گوگردزدایی از گازدودکش به دودکش در شکل ۸ نشان داده شده است.

مطابق نقشه نیروگاه، طرح پیشنهادی به صورت شکل ۹ خواهد بود. ضمنا همانطورکه قبل از این گفته شد، سوخت ورودی به بویلر توسط سیستم نانوامولسیون ساز آماده شده و به بویلر فرستاده می‌شود. همانطور که در این بخش اشاره شد، از بین روش‌های کاهنده آلودگی دو روش استفاده از سوخت نانوامولسیون مازوت و روش گوگردزدایی از گازدودکش تر ملاک‌های تعیین شده برای اثر بخشی را دارا هستند و برای استفاده در شرایط نیروگاه ایرانشهر مناسب تشخیص داده شد. برای بررسی فنی این روش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، روش‌های انتخاب شده مورد مطالعه و آزمایش قرار می‌گیرد و میزان کاهش آلودگی آن بررسی می‌شود.

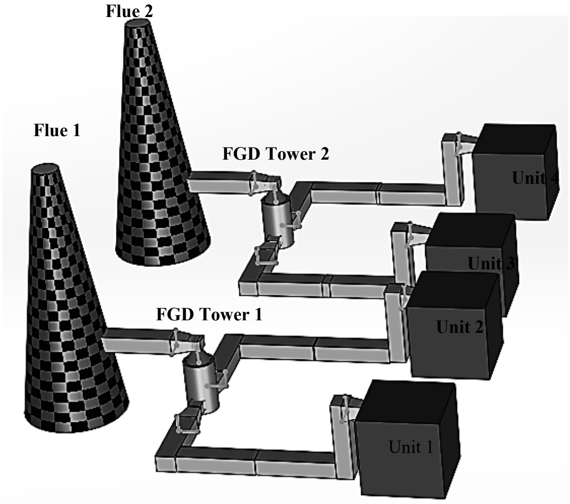
۵-مطالعه امکان‌سنجی استفاده از دوروش نانوامولسیون مازوت و گوگردزدایی از گازدودکش

برای بررسی میزان تاثیر استفاده از این دو روش بر افزایش قیمت توان تولیدی به محاسبه و تحلیل اقتصادی این روش پرداخته می‌شود. هزینه خرید تجهیزات واحد امولسیون‌ساز نانو شامل امولسیون‌ساز نانو و مخازن و پمپ‌های انتقال سوخت و تاسیسات آن می‌باشد. امولسیون‌ساز نانو یا دستگاه مولد نانو که به اختصار NGD نامیده می‌شود، شامل سه بخش اصلی دریافت سوخت، دریافت آب و محفظه اختلاط می‌باشد. همچنین هزینه‌های عملیاتی و نگهداری شامل هزینه‌های ثابت و متغیر باید در محاسبه قیمت تمام شده در نظر گرفته شوند. هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، نیروی کار و نیروی مهندسی می‌باشد. تعداد کارگران مورد نیاز اضافی در این روش ۵ نفر می‌باشد. هزینه‌های متغیر شامل هزینه



شکل ۸ : نحوه هدایت دود دو واحد کناری به برج گوگردزدایی از گازدودکش و سپس هدایت دود به سمت دودکش نیروگاه ایرانشهر

Fig. 8: A method to direct combustion gas from two units next to each other to a desulphurization tower and then direct the gas to the chimney of Iranshahr power plant



شکل ۹: نمای کلی نحوه نصب برج های گوگردزدایی از گازدودکش در نیروگاه ایرانشهر

Fig. 9: Overview of how to install gas desulphurization towers at iranshahr power plant

---
1 Wet FGD

مواد مصرفی مانند سورفکتانت و آب و نیز توان مورد نیاز می‌باشد. حجم سورفکتانت مورد استفاده ۱ گرم در هر لیتر سوخت (یا در یک کیلوگرم سوخت) می‌باشد. با توجه به حجم سوخت مصرفی می توان گفت میزان سورفکتانت مورد استفاده ۳۳۳ گرم به ازای هر کیلووات توان تولیدی می‌باشد. با توجه به مقدار آلاینده ناکس نیروگاه ایرانشهر تحلیل برای کاهش آلاینده در حد استاندارد اروپا انجام شده است.

اکنون با مطالعات اقتصادی به بررسی اثر استفاده از روش گوگردزدایی از گازدودکش بر افزایش قیمت توان تولیدی نیروگاه پرداخته می‌شود. با توجه به اهمیت آلاینده SOx و ضرورت کمینه‌سازی آن تحلیل اقتصادی برای کاهش آلاینده در حد استاندارد اروپا انجام شده است.هزینه اعمال روش گوگردزدایی از گازدودکش تر شامل هزینه تجهیزات مواد سازه و اجزا الکتریکی نیروی کار و مهندسی است. همچنین هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در فرآیند گوگردزدایی از گازدودکش تر شامل هزینه‌های ثابت و متغیر می‌باشد. هزینه‌های ثابت شامل نیروی کار و اداری و مواد نگهدارنده می‌باشد. برای نصب واحد گوگردزدایی از گازدودکش تر حدودا ۱۲ نفر نیروی کاری به مجموعه اضافه می‌گردد. هزینه‌های نگهداری شامل تعمیرات دوره ای تعویض قطعات و نیروی کار تعمیر و نگهداری است. هزینه‌های متغیر شامل هزینه مواد مصرفی مانند آهک و آب و نیز توان مورد نیاز می‌باشد. هزینه توان مصرفی شامل توان مورد نیاز برای پمپ‌های دوغاب کمپرسور سیستم آماده‌سازی آهک و سیستم آب‌گیری از سنگ گچ فن‌ها و وسایل متعدد کنترلی می‌باشد. در این تحلیل فرض می‌شود که عوایدی بابت محصولات جانبی فرآیند مانند سنگ گچ دریافت نمی‌شود. جدول ۹ هزینه های تمام شده برای احداث واحد سیستم گوگردزدایی از گازدودکش تر در نیروگاه ۲۵۶ مگاواتی ایرانشهر را نشان می‌دهد. هزینه‌های ذکر شده در جدول بر اساس منابع گوناگون و با نرخ سال ۲۰۱۷ محاسبه شده اند.

همانطور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود هزینه اضافه شده به قیمت توان ۰/۶۷۴ سنت به ازای هر کیلو وات توان تولیدی می‌باشد که در مقابل فواید زیست محیطی آن مبلغ مناسبی می‌باشد. چنانچه عواید حاصل از فروش سنگ گچ که یک محصول جانبی فرایند گوگردزدایی از گازدودکش است، به عنوان یک مزیت غیر مستقیم محسوب شود، فقط ۳ درصد از سنگ گچ تولیدی ارزش تجاری خواهد داشت [۲۷]. این موضوع به دلیل کیفیت نسبتا پایین محصول

جدول ۹: هزینه های محاسبه شده برای احداث سیستم گوگردزدایی از گازدودکش تر

Table 9: the estimated costs for the construction of a desulfurization system from the wet gas tower for Iranshahr power plant

نوع هزینه (دلار)	با هدف کاهش آلاینده های سولفوره تا ppm ۲۰۰
هزینه‌های خرید تجهیزات اصلی	۱۰۰۴۲۷۶۸
هزینه کل تجهیزاتی	۲۳۰۹۸۳۶۶
کل هزینه سرمایه‌گذاری	۳۳۴۹۲۶۳۱
هزینه سرمایه‌گذاری سالانه	۶۲۶۳۱۲۲
هزینه‌های عملیاتی	۷۳۴۴۰۰۰
هزینه‌های ناخالص سالانه	۱۳۶۰۷۱۲۲
عواید سالانه جانبی	-
هزینه خالص سالانه	۱۳۶۰۷۱۲۲
هزینه تمام شده (cents/kWh)	۰/۶۷۴

است. سنگ گچ تولیدی سالیانه حدود ۱۵ هزارتن خواهد بود که فقط ۴۵۰ تن آن ارزش تجاری دارد و عواید حاصل از فروش آن ۰/۰۱۳ سنت به ازای هر کیلووات خواهد بود.

با محاسبه هزینه‌های روش ترکیبی با توجه به قیمت سورفکتانت غیر یونی مورد استفاده قیمت تمام شده تقریبا ۱/۱۱ سنت ازای هر کیلووات تولیدی است.

۵-۱ آزمایشات تاییدی استفاده از دوروش نانوامولسیون مازوت و گوگردزدایی از گازدودکش برای کاهش آلاینده‌ها

در میان روش‌های کنترلی نانوامولسیون مازوت برای کاهش ناکس و گوگردزدایی از گازدودکش مرطوب برای حذف SOx مورد استفاده قرار گرفت. دو روش انتخاب شده از جمله روش‌های به روز شده و تجاری در سراسر جهان است [۲۸ و ۲۹]. بررسی روش‌های انتخاب شده برای کاهش آلودگی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. طراحی تجهیزات و سیستم‌ها انجام شد و سپس میزان آلودگی‌ها تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که روش گوگردزدایی از گازدودکش توانایی کاهش آلودگی SOx را به میزان ۸۰/۳۴٪ دارد اما ناکس را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. علاوه بر این، روش نانو امولسیون مازوت ۴۲۲/۱۲٪ از آلودگی SOx را حذف کرد. همچنین این روش می‌تواند

۳۰/۷۷٪ از آلاینده‌های ناکس را حذف کند. مقدار بهینه آب موجود در امولسیون برای تولید نانو امولسیون مازوت برای عملکرد مطلوب به میزان ۱۰٪ از حجم مازوت بدست آمد. ابعاد قطره سوخت در مقیاس نانو (قطر ۶۳/۷ نانومتر و عرض ۱۲۳ نانومتر) است. روش ترکیبی بهترین حالت است که به طور همزمان هر دو آلاینده را کاهش می‌دهد. این روش ترکیبی SOx و ناکس را با ۷۹/۸٪ و ۷۸/۳۲٪ کاهش می‌دهد که استاندارد اروپایی را رعایت می‌کنند. از آنجا که دی‌اکسید کربن یک محصول واکنش آهک و آب است، این گاز در طول فرآیند گوگردزدایی از گازدودکش افزایش می‌یابد. اگرچه، این گاز با استفاده از روش نانو امولسیون مازوت و روش ترکیبی کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

ویژگی‌های مکانیکی و متالوژیکی رسوب‌های حاصل از احتراق سوخت مازوت بر روی مشعل و لوله‌های سوپر هیت‌های نیروگاه ایرانشهر مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های مکانیکی نشان داد که رسوبات خاکستر روی لوله ساختار فشرده‌تری داشته و میزان نیروی شکست ۲۰۰ نیوتن را تحمل می‌کند. مقدار نیروی شکست برای خاکستر روی مشعل ۲۰ نیوتن بود. همچنین نتایج آزمایش ضربه نشان داد که انرژی شکست برای رسوبات روی لوله ۷۲ ژول و انرژی شکست رسوبات داخل مشعل نیروگاه ۹ ژول بود. نتایج بررسی های آنالیزهای طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس نشان داد که در رسوب‌های تشکیل شده بر روی لوله‌ها عمدتاً عناصر وانادیم و سدیم بود. در اثر احتراق مازوت عناصر خورنده گوگرد، سدیم و وانادیم به صورت اکسیدی در آمده و بر روی سطوح لوله‌ها رسوب می‌کند. برای مشعل عنصر غالب کربن (دوده) بود.

در این طرح با توجه به ویژگی‌های نیروگاه ایرانشهر و ضرورت کنترل آلودگی حاصل از احتراق سوخت مازوت روش‌های نوین کاهش آلودگی مورد مطالعه وبررسی قرار گرفت. ابتدا مطالعات اولیه و بررسی نیازهای زیست محیطی براساس استانداردهای ایران و اروپا انجام گردید. سپس به بررسی انواع روش‌های کاهش آلودگی پرداخته شد. این روش‌ها براساس سه استراتژی کنترل آلودگی قبل در حین و بعد از احتراق مورد مطالعه و ارزیابی قرارگرفت. با بررسی استانداردها و مشخصات فنی تجهیزات نیروگاه ایرانشهر، روش‌های مناسب برای اعمال در این نیروگاه جهت کاهش آلودگی حاصل از احتراق مازوت تعیین گردید و امکان‌سنجی اعمال آن‌ها در نیروگاه ایرانشهر مورد بررسی قرار گرفت. این انتخاب با ده ملاک و اولویت اصلی انجام گردید. در بین روش‌های کنترل در حین احتراق روش نانوامولسیون مازوت برای کاهش آلاینده ناکس و از روش‌های کنترل آلودگی پس از احتراق روش گوگردزدایی از گازدودکش تر مناسب تشخیص داده شد. روش‌های انتخاب شده توانسته‌اند بیشتر ملاک‌های اولویت‌بندی شده را برآورده سازند. دو روش انتخاب شده از جمله روش‌های روزآمد و تجاری شده در جهان می‌باشند.

با توجه به مباحث مطرح شده در این گزارش، برای رسیدن به استاندارد محیط زیستی اروپا توصیه به انتخاب روش ترکیبی گوگردزدایی از گازدودکش تر و نانوامولسیون مازوت در نیروگاه ایرانشهر می‌شود. با توجه به اینکه حد آلاینده‌های ناکس در نیروگاه ایرانشهر به استاندارد ایران نزدیک می‌باشد، برای کاهش هزینه‌ها روش تکی گوگردزدایی از گازدودکش تر با اولویت حذف SOx به عنوان گزینه دوم پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از شرکت مدیریت تولید نیروگاه‌های استان سیستان و بلوچستان برای حمایت مالی پروژه تحت عنوان بررسی استفاده از فناوری‌های نوین جهت کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از احتراق سوخت مازوت در نیروگاه ایرانشهر، تشکر و قدردانی به عمل می آید (قرارداد شماره ۹۴/۷۵).

مراجع

[1] J. Amnian, M. Maerefat, and G. Heidarinejad, “Offering a method for reducing pollution and criterion for evaluation of ventilation flow in multilevel enclosed parking lots,” Modares Mechanical Engineering, vol. 16, pp. 285-296, 2016. (in Persian)

[2] Mitra Ebrahiminejad and M. Haghighi, “Structural Modification of NiMo/Al2O3 Nanocatalyst by Phosphor via Impregnation Method Used in Desulfurization of Thiophene,” Fuel and Combustion, vol. 7, pp. 55-71, 04/21 2014.

[3] I. V. Babich and J. A. Moulijn, “Science and technology

108, pp. 301-308, 2017.

[12] K. R. Bukkarapu, Y. Jyothi, L. S. Raju, G. Chitti Babu, and K. Narayanan, "A review on current trends in water inoil emulsions," International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 8, pp. 359-371, 2017.

[13] H. Kumar and V. Kumar, "Preparation of water-in-diesel oil nano-emulsion using nonionic surfactants with enhanced stability and flow properties,» Journal of Dispersion Science and Technology, pp. 1-11, 2017.

[14] I. B. jovein, S. Saddighi, and J. Bashtany, "Simulating the effects of different absorbers for reduction reducing of SO2 from flue gases of in industrial boilers," Modares Mechanical Engineering, vol. 17, pp. 425-436, 2017. (in Persianیسراف)

[15] J. E. Cichanowicz, M. Hein, and J. Marchetti, "The first reporting quarters of mercury emissions rate: Effectiveness of control technology categories," in Air and Waste Management Association - Power Plant Pollutant Control "MEGA" Symposium, MEGA 2016, 2016, pp. 1-18.

[16] A. Efthimiadou, I. P. Nikolaides, and A. Tourlidakis, "A proposal for SO2 abatement in existing power plants using rich in calcium lignite," Applied Thermal Engineering, vol. 74, pp. 119-127, 2015.

[17 Y. Kang, J. Lu, and J. Guo, "Treatment of Wet FGD Wastewater by a Modified Chemical Precipitation Method Using a Solid Powder Reagent," Transactions of Tianjin University, vol. 23, pp. 110-121, 2017.

[18] S. Zhao, Q. Fang, C. Yin, T. Wei, H. Wang, C. Zhang, et al., "New Fuel Air Control Strategy for Reducing NOx Emissions from Corner-Fired Utility Boilers at Medium-Low Loads," Energy and Fuels, vol. 31, pp. 6689-6699, 2017.

[19] A. Licata, R. D'Alessandro, and T. Clark, "The use of NPV calculations to evaluate the selection of FGD technologies," in Air and Waste Management Association - Power Plant Air Pollutant Control "MEGA" Symposium 2012, pp. 1250-1262. 2012.

of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: A review," Fuel, vol. 82, pp. 607-631, 2003.

[4] C. Alexander, H. S. Andersson, L. I. Andersson, R. J. Ansell, N. Kirsch, I. A. Nicholls, et al., "Molecular imprinting science and technology: A survey of the literature for the years up to and including 2003," Journal of Molecular Recognition, vol. 19, pp. 106-180, 2006.

[5] J. P. Senosiain, J. H. Han, C. B. Musgrave, and D. M. Golden, "Use of quantum methods for a consistent approach to combustion modelling: Hydrocarbon bond dissociation energies," Faraday Discussions, vol. 119, pp. 173-189, 2001.

[6] N. H. Ince, G. Tezcanli, R. K. Belen, and G. Apikyan, "Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: The state of the artand environmental applications," Applied Catalysis B: Environmental, vol. 29, pp. 167-176, 2001.

[7] M. Behl, J. Yeom, Q. Lineberry, P. K. Jain, and M. A. Shannon, "A regenerable oxide-based H2S adsorbent with nanofibrous morphology," Nat Nano, vol. 7, pp. 810-815, 12//print 2012.

[8] W. Ahmad, I. Ahmad, M. Ishaq, and K. Ihsan, "Adsorptive desulfurization of kerosene and diesel oil by Zn impregnated montmorollonite clay," Arabian Journal of Chemistry, vol. 10, pp. S3263-S3269, 2017.

[9] T. Poursaberi, "Application of Magnetic Graphene-based Nanocomposite Functionalized with Ionic Liquid for the Sulfur Removal from Gasoline," Pajhoohesh naft, vol. 24, pp. 123-134, 2014.

[10] S. G. Jeon, N. S. Kwak, N. S. Rho, C. H. Ko, J.-G. Na, K. B. Yi, et al., "Catalytic pyrolysis of Athabasca bitumen in H2 atmosphere using microwave irradiation," Chemical Engineering Research and Design, vol. 90, pp. 1292-1296, 2012/09/01/ 2012.

[11] S. Woo, S. Park, J. Shon, and K. Lee, "An experimental study on removal of exhaust gas recirculation cooler fouling using washer fluid steam," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.

nanofibers: Effects of adsorbate size and adsorbent texture," Fuel, vol. 189, pp. 186-194, 2017

[25] A. o. t. C. o. Ministers, "The approval of standards for outlet from industrial and factories," vol. 9505/49065ه, ed: Environmental protection organization, 2016.

[26] A. Seeberger and A. Jess, "Desulfurization of diesel oil by selective oxidation and extraction of sulfur compounds by ionic liquids-a contribution to a competitive process design," Green Chemistry, vol. 12, pp. 602-608, 2010.

[27] V. Punyawadee, R. Pothisuwan, N. Winichaikule, and K. Satienperakul, "Costs and benefits of flue gas desulfurization for pollution control at the Mae Moh power plant, Thailand," ASEAN Economic Bulletin, vol. 25, pp. 99-112, 2008.

[28] D. Pudasainee, Y.-C. Seo, J.-H. Sung, H.-N. Jang, and R. Gupta, "Mercury co-beneficial capture in air pollution control devices of coal-fired power plants," International Journal of Coal Geology, vol. 170, pp. 48-53, 2017/02/01/ 2017.

[29] D. K. Soni and R. Gupta, "Application of nano emulsion method in a methanol powered diesel engine," Energy, vol. 126, pp. 638-648, 2017/05/01/ 2017.

[20] Z. Dongres, J. Knotek, R. Baege, F. Grafahrend, B. L. Johnson, and K. E. Redinger, "Modification and optimization of an existing CDS FGD system for biomass co-firing," in Air and Waste Management Association - 8th Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium 2010, pp. 2609-2646. 2010.

[21] G. Hunt and M. Sewell, "Utilizing drysorbent injection technology to improve acid gas control," in Air and Waste Management Association - International Conference on Thermal Treatment Technologies and Hazardous Waste Combustors 2015, IT3 2015, pp. 144-156. 2015.

[22] Y. Zhang, J. Yang, X. Yu, P. Sun, Y. Zhao, J. Zhang, et al., "Migration and emission characteristics of Hg in coal-fired power plant of China with ultra low emission air pollution control devices," Fuel Processing Technology, vol. 158, pp. 272-280, 2017.

[23] T. J. Lee, I. H. Cho, and N. K. Park, "Desulfurization using ZnO nanostructure prepared by matrix assisted method," Korean Journal of Chemical Engineering, vol. 26, pp. 582-586, 2009.

[24] Y. N. Prajapati and N. Verma, "Adsorptive desulfurization of diesel oil using nickelnanoparticle-doped activated carbon beads with/without carbon

این صفحه عمداً خالی است