مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۲، ویژه‌نامه، ۱۳۹۶
مقاله نامهٔ دومین کنفرانس ملی شتاب‌دهنده‌ها و کاربرد آنها، آذر ۱۳۹۴

کاهش آلاینده‌های NOx و SOx در واحدهای صنعتی با استفاده از شتاب دهندهٔ الکترون

حامد نـــوری[۱]، امیرحسین میردامادی[۱] و سید عبدالمهدی آقایان[۱]

۱. شرکت توسعه کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی ایران

چکیده

فناوری شتاب‌دهنده‌های باریکهٔ الکترونی طی سال‌های گذشته در کاربردهای زیست محیطی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. از جمله کاربردهای زیست محیطی شتاب‌دهنده‌های صنعتی، پاکسازی گازهای تولیدی تأسیسات صنعتی از اکسیدهای نیتروژن و گوگرد (NOx ,SOx) می‌باشد. گازهای حاصل از احتراق ذغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی و... که در نیروگاه‌های برق، پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های صنعتی تولید می‌شوند، شامل مقادیر بالایی از این اکسیدها بوده که در اغلب موارد بیش از حد مجاز است. پاکسازی به روش پرتودهی، شامل اضافه کردن مقادیری آمونیاک به گازهای خروجی و پرتودهی از طریق باریکهٔ الکترونی شتاب‌دهنده است. پرتودهی، رادیکال‌هایی را تولید می‌کند که با SOx و NOx مجدداً واکنش انجام داده و اسیدهای مربوطه شکل می‌گیرد. با وجود آمونیاک این اسیدها به آمونیوم سولفات ($(NH4)_2SO_4$) و آمونیوم نیترات (NH_4NO_3) تبدیل می‌شوند و از طریق ته‌نشین کننده‌های الکترواستاتیکی جمع‌آوری و به عنوان کود شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی فرایند تصفیه گازهای آلوده توسط باریکهٔ الکترونی و همچنین جایگاه شتاب دهندهٔ الکترون در واحدهای صنعتی آلاینده محیط زیست در ایران می‌تواند راهکار مناسبی جهت بر طرف سازی این معضل زیست محیطی باشد.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهندهٔ ذرات، پرتو الکترونی، آلاینده‌های SOx و NOx

۱. مقدمه

امروزه دستیابی به دانش و فناوری سامانه‌های پرتودهی بر اساس رشد جمعیت و افزایش نیاز کشور به تولیدات دامی و کشاورزی، تجهیزات و کالاهای پزشکی، مواد غذایی، محصولات پلیمری و همچنین توجه به محدودیت‌های منابع آبی و خاکی، یک ضرورت محسوب می‌شود. انجام فرایند پرتودهی مناسب که می‌تواند به منظور بهبود مشخصه‌های محصولات پلیمری، استرلیزه کردن محصولات پزشکی و بهداشتی، میکروب زدائی و بالا بردن زمان ماندگاری مواد غذایی، دفع آفات محصولات زراعی و کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار گیرد، در مقایسه با فرایندهای گرمایی و شیمیایی، فواید قابل توجهی را به همراه می‌آورد، به نحوی که با به کارگیری آن میزان مصرف انرژی و همچنین آلودگی محیط زیست تا حدود زیادی کاهش خواهد یافت. طی سال‌های گذشته فناوری شتاب‌دهنده‌های باریکهٔ الکترونی در کاربردهای زیست محیطی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته

است. از جمله کاربردهای زیست محیطی شتاب‌دهنده‌های صنعتی نیز پاکسازی گازهای تولیدی تأسیسات صنعتی می‌باشد. گازهای حاصل از احتراق ذغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی و ... که در نیروگاه‌های برق، تجهیزات گرمایش شهری و کارخانه‌های صنعتی تولید می‌شوند، شامل اکسیدهای نیتروژن و گوگرد (NO_x, SO_x) است. این گازها از طریق واکنش‌هایی با بخار آب، تبدیل به اسید نیتریک و اسید سولفوریک در هوا شده و توسط پرتو UV خورشید فعال می‌شوند و می‌توانند از طریق باران اسیدی مخاطرات زیادی را برای محیط زیست به وجود آورند [۱، ۲]. وضعیت، زمانی بحرانی خواهد شد که سوختی با کیفیت پایین و محتوای گوگرد بالا برای تولید نیرو مورد استفاده قرار گیرد. روش‌های متداولی برای بی اثر کردن مولفه‌های سمی گازهای منتشر شده وجود دارد. پاکسازی گازهای آلوده از طریق روش‌های شیمیایی یا پرتودهی یونیزان وجود دارد اما برخی از روش‌های شیمیایی نیز همچون استفاده از CaO علاوه بر زمانبر بودن، تنها قادر به دفع SO_x بوده و به طور کلی حذف اکسید گوگرد و اکسید نیتروژن در این روش‌ها در یک مرحله امکان‌پذیر نمی‌باشد [۱– ۴].

استفاده از شتاب‌دهندهٔ الکترون برای حذف گازهای SOx و NOx برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ در مؤسسهٔ تحقیقاتی انرژی اتمی ژاپن[۱] و شرکت ابارا[۲] مورد استفاده قرار گرفت [۲]. این درحالی است که بهره‌گیری از فناوری پرتودهی باریکهٔ الکترونی به منظور پاکسازی گازهای ناشی از احتراق، موضوعی است که از اوایل دههٔ ۱۹۷۰ در تأسیسات صنعتی موجود در کشورهای آلمان، ژاپن، کره، لهستان و آمریکا مورد توجه قرار گرفته بود. در حال حاضر نیز بسیاری از این کشورها از چنین دستاوردی در ابعاد صنعتی استفاده می‌کنند. یکی از بزرگ‌ترین تأسیسات مجهز به این فناوری نیز ایستگاه برق قدرت پومورزنی[۳] واقع در لهستان است که ظرفیت شارش گازی معادل ۲۷۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت دارد و دارای سیستم پرتودهی باریکهٔ الکترونی با توان یک مگاوات است [۳].

پرتودهی باریکهٔ الکترونی پرتوان بر گازهای خروجی از طریق شتاب‌دهنده‌های صنعتی الکترون می‌تواند تا ۹۰٪ NOx و ۹۵٪ Sox را با ایجاد واکنش‌هایی حذف کند. آزمایش‌های صورت گرفته سال‌های اخیر در ژاپن، لهستان و اکراین نشان می‌دهد که علاوه بر حذف NOx و SOx، سایر مواد شیمیایی مضر همچون VOC[۴] نیز می‌توانند با به کارگیری پرتودهی باریکهٔ الکترونی به شکل قابل توجهی حذف شوند [۱].

۲. فرایند

اساس واکنش هایی که در پرتودهی گازهای خروجی انجام می‌گیرد، به صورت رابطهٔ (۱) است:

$$NO \xrightarrow{O,OH} NO_2 \xrightarrow{OH} HNO_3 \xrightarrow{NH_3} NH_4NO_3 \quad (1)$$

$$SO_2 \begin{cases} \xrightarrow{O_2} SO_3 \xrightarrow{OH} H_2SO_4 \xrightarrow{NH_3} (NH_4)_2SO_4 \\ \xrightarrow{NH_3} (NH_3)_2SO_2 \xrightarrow{H_2O} (NH_4)_2SO_4 \end{cases}.$$

شکل ۱ طرحی از مراحل انجام واکنش را نشان می‌دهد. همان گونه که مشخص است، اکسیدهای گوگرد و نیتروژن ابتدا در حضور بخار آب و رادیکال‌های آزاد تشکیل شده با استفاده از پرتو الکترونی، به اسید تبدیل شده و در نهایت با آمونیاک ترکیب و نمک‌های سولفات و نیترات آمونیم تشکیل می‌شود.

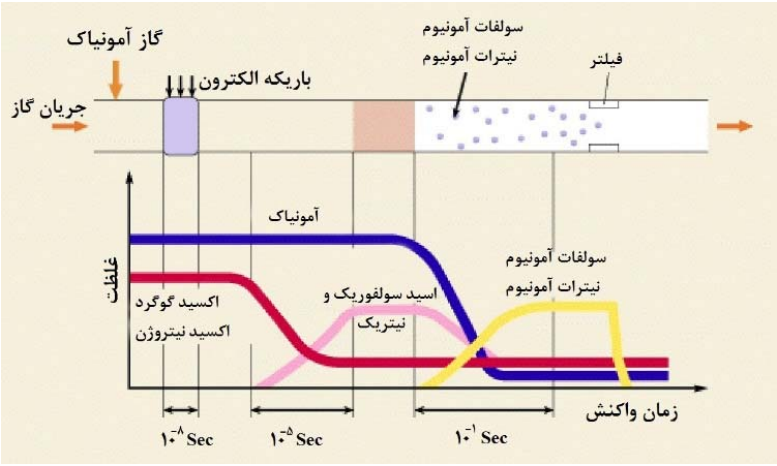
شکل ۲ طرح کلی چنین سامانه‌ای را که در لهستان نصب گردیده است نشان می‌دهد. پرتودهی باریکهٔ الکترونی با توجه به حجم گاز تولیدی می‌تواند در یک کانال یا دو کانال به صورت موازی انجام شود.

واحدهای مورد نیاز برای تأسیس چنین سامانه‌ای به شرح زیر است:

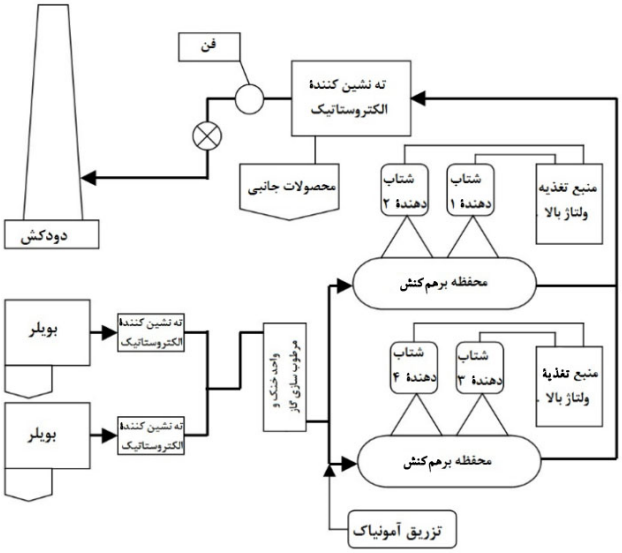
(الف) واحد پاکسازی گاز از ذرات

این واحد متشکل از ته‌نشین کنندهٔ الکترواستاتیک بوده که ذرات معلق در گاز را که همچون خاکستر است، جمع‌آوری می‌کند. شکل ۳ نمای چنین سامانه‌ای را نمایش می‌دهد.

۱. JAERI
۲. Ebara
۳. Pomorzany
۴. Volatile organic compound



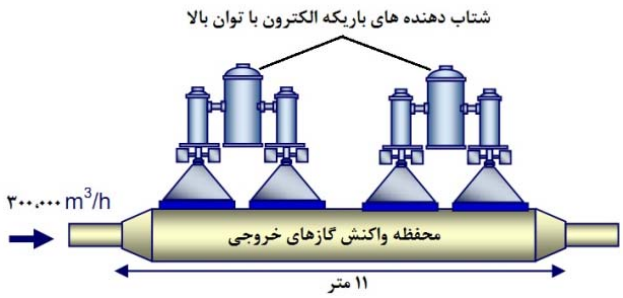
شکل ۱. طرحی از مراحل انجام واکنش جهت حذف آلاینده‌های NO_x و SO_x [۵].



شکل ۲. بخش‌های مورد نیاز برای انجام فرایند پرتودهی بر بخارهای سمی [۶].

شکل ۳. واحد پاکسازی گاز از ذرات معلق که از طریق فیلتر الکترواستاتیک انجام می‌شود.

شکل ۴. برج تبرید واقع در واحد پومورزنی لهستان.



شکل ۵. نمونهٔ واقعی محفظهٔ برهم‌کنش برای پرتودهی گازهای سمی.

(ب) واحد خنک سازی و مرطوب کردن گاز

در این واحد بخار آب به گاز اضافه شده و دمای گاز را بـه ۶۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رساند. شکل ۴ نمای یک برج تبریـد (سرد کننده) را نشان می‌دهد.

(ج) تزریق محلول آمونیاکی

این واحد دارای مخزنی حاوی محلول آمونیاکی بوده که پیش از انجام فرایند پرتودهی به گاز حاصل از مرحله قبل اضافه شده و به خوبی با آن ترکیب می‌شود.

(د) محفظهٔ برهم‌کنش

این واحد به شتاب‌دهنده‌های با محدوده‌های انـرژی چنـد صـد keV تا چند MeV که دارای توان‌هـای بـالا مـی‌باشـند، تجهیـز می‌شود. مقدار شارش گـاز ورودی، عامـل تعیـین کننـده‌ای در تعـداد، تـوان و انـرژی شـتاب‌دهنـده اسـت. در ایـن قسـمت، برهم‌کنش‌های لازم از طریق پرتودهی انجام شده و انواع یون‌ها، رادیکـال‌هـا و ذرات برانگیختـه مـی‌شـوند. شـکل ۵ محفظـهٔ برهم‌کنش را نشان می‌دهد که گازهای حاصل از احتـراق در آن پرتودهی می‌شود.

(هـ) واحد ذخیره سازی محصول

در این واحد نیز یک ته‌نشین کنندهٔ الکترواستاتیکی وجـود دارد کـه جمـع‌آوری محصـول بـه واسـطهٔ آن صـورت مـی‌گیـرد و محصول مورد نظر پس از ذخیره سازی برای مصارف کشاورزی به عنوان کود شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آمونیوم سولفات	۴۵ تا ۶۰ درصد
آمونیوم نیترات	۲۲ تا ۳۰ درصد
آمونیوم کلراید	۱۰ تا ۲۰ درصد
رطوبت	۰/۴ تا ۱ درصد

شکل ۶. مشخصات و شکل محصول به دست آمده از پرتودهی گازهای سمی.

مشخصات محصول به دست آمده از این فرایند در شکل ۶ آورده شده است. میزان تولید این محصولات بر اساس مشخصات تأسیسات متفاوت می‌باشد.

در صورتی که شارش گاز تولیدی در صنایع آلوده کننده،زیاد باشد از چندین شتاب‌دهنده برای پرتودهی محفظهٔ برهم‌کنش استفاده می‌شود. برای مثال طراحی واحد صنعتی اسویلوزا که در شهر سوفیا پایتخت بلغارستان قرار دارد دارای شارش گازی معادل ۶۰۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت است، به گونه‌ای است که با اعمال دز ۴ کیلوگری می‌توان حدود ۸۵٪ گاز SO_2 و ۴۰٪ گاز NOx را پاکسازی کرد. با توجه به حجم گاز تولیدی، چنین تأسیساتی نیازمند شتاب‌دهنده‌ای با توان ۱٫۳ مگاوات می‌باشد که طبیعتاً از طریق یک شتاب‌دهنده میسر نیست. واحد پرتودهی این تأسیسات به گونه‌ای است که ۴ شتاب‌دهنده با محدوده انرژی ۰٫۸ تا ۱ مگا الکترون ولت و توانی معادل ۴۵۰ کیلووات در دو مسیر که در هر یک از مسیرها دو شتاب‌دهنده با هم سری شده‌اند، قرار گرفته‌اند. در کارکرد عادی هر شتاب‌دهنده با توان ۳۵۰ کیلووات مورد استفاده قرار می‌گیرد و در صورتی که شتاب‌دهنده‌ای نیاز به تعمیر و تجهیز داشته باشد به طور موقت از مدار خارج می‌شود و شتاب‌دهنده‌های دیگر با حداکثر توان، معادل ۴۵۰ کیلووات کار می‌کنند تا وقفه‌ای در فرایند پرتودهی به وجود نیاید و نتایج مورد انتظار حاصل شود [۷].

در جدول ۱ مشخصات شتاب‌دهنده با توجه به میزان شارش گاز خروجی در چند کشور نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات و ساز و کار تأسیسات صنعتی بزرگ مجهز به فناوری پرتودهی در دنیا آورده شده است.

۳. وضعیت کشور در کنترل عوامل زیست محیطی با استفاده از شتاب‌دهنده‌ها

کشور ایران در فرایند توسعهٔ پایدار صنعتی، به کنترل آلودگی‌های محیط زیست اهمیت داده و به موجب قوانین و مقررات کشور، آلودگی‌های صنعتی اعم از: جامد، مایع و گاز باید تحت کنترل باشند. رعایت این قوانین و مقررات برای تمامی صنایع ضروری است. به استناد بند (ج) مادهٔ (۱۰۴) و ماده (۱۳۴) قانون برنامهٔ سوم توسعهٔ اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران، تمامی واحدهای صنعتی و تولیدی باید مسائل زیست محیطی را به عنوان یکی از مسائل اقتصادی خود تلقی کنند و هزینه‌های مربوط به حفظ محیط زیست را جزء هزینه‌های درونی خود بدانند. پذیرش هزینه‌های زیست محیطی به عنوان هزینهٔ قابل قبول مالیاتی و اخذ جریمه، در واقع یک راه حل در کنار راه حل فعلی کنترل آلودگی‌ها در کشور است. از واحدهایی که از انجام این امر خودداری کنند و فعالیت‌های آنها باعث آلودگی و تخریب محیط زیست گردد، جریمهٔ متناسب با خسارات وارده اخذ و به درآمد عمومی واریز می‌گردد تا در قالب لوایح بودجه سنواتی برای اجرای طرح‌های سالم سازی محیط زیست هزینه شود [۱۰]. در بندهای مختلف آیین‌نامهٔ مذکور، به عوامل آلایندهٔ آب و هوا و حد مجاز آنها اشاره شده است. از جمله آلاینده‌های مهم که مورد اشاره قرار گرفته است، SO_2 و NOx بوده که میزان مجاز این آلاینده‌ها در

جدول ۱. مشخصات شتاب‌دهنده‌ها و تأسیسات موجود برای انجام فرایند پرتودهی گازهای آلوده [۸].

محل تأسیس	تعداد شتاب‌دهندهٔ نصب شده	انرژی شتاب‌دهنده (MeV)	توان شتاب‌دهنده (kW)	شارش گاز (m^3/h)	SO_2/NO_x (ppm V)
ژاپن- توکیو	۱	۱	۱۲۰ – ۹۰	۸۴ – ۳۶	...
ژاپن- ایبارا	۲	۰٫۷۵ – ۰٫۶	۴۵ – ۱۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰٫۱۸۰
ژاپن- جائری	۱	۱٫۵	۳۰	۰٫۰۹	...
آمریکا-مرکز تحقیقات کنترل	۲	۰٫۸	۸۰	۵۳۰۰	...
آمریکا- ایندیاناپلیس	۲	۰٫۸۸	۸۰	۲۴۰۰۰	۱۰۰۰٫۴۰۰
آلمان- کارلسروحه	۱	۰٫۲	۱۰۰	۱۰۰۰	۵۰٫۵۰۰
آلمان- کارلسروحه	۲	۰٫۳	۹۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰٫۵۰۰
ژاپن- ماتسودو	۱	۰٫۹	۱۵	۱۰۰۰	...
آلمان-بادنورک	۲	۰٫۳ – ۰٫۲۶	۹۰	۲۰۰۰۰	...
لهستان- وارسا	۲	۰٫۷	۵۰	۲۰۰۰۰	۲۵۰٫۲۰۰
لهستان-کائسزین	۲	۰٫۷	۵۰	۲۰۰۰۰	...
ژاپن-فوجیساوا	۱	۰٫۵	۱۵	۱۵۰۰	...
ژاپن- چوبو	۳	۰٫۸	۳۶	۱۲۰۰۰	...
ژاپن- توکیو	۲	۰٫۵	۱۲٫۵	۵۰۰۰۰	...
بلغارستان-مارتیزا	۳	۰٫۷	۱۲٫۵	۱۰۰۰۰	...

جدول ۲. عملکرد پرتودهی در تأسیسات صنعتی بزرگ دنیا [۹].

مشخصات		چنگدو، چین[۱] (۱۹۹۷)	پومورزنی، لهستان (۱۹۹۹)	اسویلوزا، بلغارستان	هنگژو[۲]، چین(۲۰۰۲)	بیجینگ[۳]، چین(۲۰۰۵)
توان دیگ بخار (MW)		۹۰	۱۳۰	۱۶۵	۹۰	۱۵۰
شارش گاز (m^3/hr)		۳۰۰۰۰۰	۲۷۰۰۰۰	۶۰۰٫۰۰۰	۳۰۵۴۰۰	۶۳۰۰۰۰
میزان SO_2/NO_x قبل از واکنش. (ppm)		۱۸۰۰٫۴۰۰	۵۲۵/۲۹۲	۱۶۸۰٫۷۸۰	۹۶۷٫۲۰۰	۱۴۷۰٫۵۸۳
درصد حذف SO_2/NO_x		۸۰٫۱۰	۹۰/۷۰	۹۰٫۴۰	۸۵٫۵۵	۹۰٫۲۰
دز اعمالی (kGy)		۳	۸ تا ۱۲	۴	۴	۴
دمای گاز ورودی (C)		۱۳۲	۱۳۰ تا ۱۵۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۴۶
مقدار محصول تولیدی (ton/hr)		۲٫۳	۰٫۳	۵٫۷	۱٫۷	۴٫۹
شتاب‌دهنده	تعداد	۲	۴	۴	۲	۲
	انرژی(MeV)	۰٫۸	۰٫۸	۱	۰٫۸	۱
	جریان(mA)	۴۰۰	۳۷۵	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰

۱. Chengdu

۲.Hangzhou

۳.Beijing

جدول ۳. حد مجاز آلاینده برای صنایع مختلف طبق قوانین و مقررات محیط زیست ایران.

عوامل آلاینده	منبع آلاینده	واحد	حد مجاز تخلیه درجه۱	حد مجاز تخلیه درجه۲
SO_2	نیروگاه‌ها	ppm	۸۰۰	۸۰۰
	ذوب اولیهٔ مس، روی و سرب	ppm	۸۰۰	۸۰۰
	تهیهٔ گوگرد	ppm	۸۰۰	۱۰۰۰
	تهیهٔ اسید سولفوریک	ppm	۱۰۰۰	۱۲۰۰
	تهیهٔ کاغذ	kg	۴/۵	۱۵
NO_x	پالایشگاه	ppm	۳۵۰	۳۵۰
	تهیهٔ اسید نیتریک	ppm	۳۵۰	۵۰۰

صنایع مختلف در جدول ۳ آورده شده است [۱۰].

پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها، دو منبع عمدهٔ تولید این آلاینده‌ها در کشور ایران بوده که سهم زیادی در ایجاد آلودگی هوا دارند. وجود پالایشگاه نفت در نزدیکی کلان شهرهای تهران، اصفهان، شیراز و تبریز باعث ایجاد معضلات زیست محیطی در این شهرها شده است که شتاب‌دهنده‌ها می‌توانند جهت کاهش آلاینده‌ها در حد استاندارد مورد استفاده قرار گیرند. همچنین با استفاده از این فناوری می‌توان آلودگی نیروگاه‌های اطراف شهرهای بزرگ و صنعتی را کاهش داد.

در پژوهشی که در سال ۱۳۸۴ انجام گرفت، میزان پراکنش اکسیدهای نیتروژن و گوگرد از چهار نیروگاه کشور بررسی و مشخص شد میزان غلظت SO_2 و NOx خروجی از دودکش نیروگاه شهید رجایی قزوین در یک کیلومتری بیشترین غلظت را داراست و از حد استاندارد بالاتر است. نتایج به دست آمده از غلظت‌های یک ساعته در فصل زمستان با سوخت نفت کوره حاکی از حداکثر غلظت SO_2 به میزان ۵۰۰ میکروگرم بر متر مکعب در فاصله ۷ کیلومتری از دودکش است. همچنین میزان غلظت NOx نیروگاه ری در فاصله ۱/۵ کیلومتری از دودکش بالاتر از حد استاندارد است[۱۱]. گزارش‌های به دست آمده در صنعت پالایشگاه‌های سطح کشور نیز آمار بسیار بالایی از تولید آلاینده‌های مذکور را نشان می‌دهد. به عنوان مثال پالایشگاه آبادان با تولید ۲۰۰۰ppm مادهٔ SO_2، سهم مهمی در ایجاد آلودگی هوا داشته که می‌تواند با استفاده از فناوری مطرح شده میزان آلاینده‌های خود را به سطح استاندارد برساند [۱۲].

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از شتاب‌دهنده‌های صنعتی الکترون در تصفیه گازهای حاصل از احتراق، از دهه‌های گذشته در کشورهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مزایای این روش نسبت به روش‌های سنتی متداول، حذف همزمان اکسیدهای گوگرد و نیتروژن است. در ایران نیز با توجه به گسترش روز افزون صنایع و افزایش آلودگی هوا، استفاده از این روش برای واحدهای آلاینده در نزدیکی شهرهای بزرگ و صنعتی پیشنهاد می‌شود. با توجه به میزان شارش گاز آلایندهٔ خروجی از دودکش پالایشگاه‌ها و یا نیروگاه‌های مذکور، می‌توان جهت فرایند پاکسازی گازهای آلوده، توان شتاب‌دهندهٔ مناسب را طبق رابطهٔ (۲) محاسبه و نسبت به تأمین و تجهیز آن اقدام کرد.

$$\mathrm{P(kW)} = \frac{M\left(\frac{kg}{s}\right) * D(\frac{kJ}{kg})}{۳۶۰۰ * F}, \qquad (۲)$$

که در رابطهٔ (۲)، P توان مورد نیاز برای شتاب‌دهنده، M جرم تولیدی، D دز اعمالی و F بازده انتقال انرژی باریکهٔ الکترونی است[۱۳].

در جدول ۴ نمونه‌هایی از شتاب‌دهنده‌های مناسب که عموماً جهت تصفیه آلاینده‌های SO_2 و NO_x مورد استفاده قرار

جدول ۴. شتاب‌دهنده‌های مناسب برای پاکسازی گازهای سمی [۱۴].

شتاب‌دهنده	EPS-۸۰۰-۳۷۵	Dynamitron	ELV - ۱۲
محدودهٔ انرژی (MeV)	۰/۸	۱ – ۵	۰/۶ – ۱
پایداری انرژی	...	٪ ۲	٪ ۱
بیشینه جریان (mA)	۳۷۵	۵۰	۵۰۰
پایداری جریان	...	٪ ۲	٪ ۲
توان باریکه (kW)	۲ × ۳۰۰	۲۵۰	۴۰۰
عرض اسکن (cm)	۲۲۵	۲۰۰	۲۰۰
همگن بودن دز	٪ ۵	کمتر از ٪ ۵	کمتر از ٪ ۵
نحوهٔ عملکرد	پیوسته	پیوسته	پیوسته
تعداد سیستم استخراج باریکه	۲	۱	۳
توان کل (kW)	۶۰۰	۲۵۰	۴۰۰
توان مصرفی (kW)	۶۸۲	۳۵۰	۵۰۰
بازدهٔ الکتریکی	٪ ۸۸	٪ ۷۱	٪ ۸۰
سازنده	ژاپن – NHV	بلژیک – IBA (RDI)	روسیه – BINP و کره – EB Tech

می‌گیرند، آورده شده است که می‌توان با مطالعه و محاسبات از آنها بهره برد.

نویسندگان این مقاله با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌دهند که با بررسی و شناسایی دقیق مراکز آلوده کنندهٔ محیط زیست در اطراف شهرهای صنعتی نظیر تهران، اراک، تبریز، آبادان و... نسبت به امکان سنجی و نصب یک نمونه پایلوت از شتاب‌دهندهٔ مناسب اقدام نموده تا این صنعت بتواند در آینده نزدیک به صورت گسترده در حفظ محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با همکاری جناب آقای دکتر قاسمی تهیه و تنظیم شده است که بدین وسیله از ایشان تشکر می‌شود.

مراجع

1. "*Radiation processing of flue gases*". International Atomic Energy Agency, (2000).
2. A Basfar, *et al*., "*Electron beam flue gas treatment (EBFGT) technology for simultaneous removal of SO2 and NOx from combustion of liquid fuels*", Technical and economic evaluation. in International topical meeting on nuclear research applications and utilization of accelerators. (2009).
3. "Accelerators for America's Future". U.S. Department of energy, (2010).
4. Z Zimek, *Radiation Physics and Chemistry*, (1995).
5. Y K a B H Jinkyu Kim, *Journal of the Korean Physical Society*, (2011).
6. A G Chmielewski, *et al*., "*Industrial Plant for Flue Gas Treatment with High Power Electron Accelerators*",. in AIP Conference Proceedings. (2003).
7. Y K a B H Jinkyu Kim, *Journal of the Korean Physical Society*, (2011).
8. *"Radiation processing of flue gases"*, International Atomic Energy Agency, (2000).
9. Chmielewski, G Andrzej, *Reviews of Accelerator Science and Technology* 4. 01 (2011) 147.

۱۰. جرایم زیست محیطی. *نشریه صنعت خودرو*، ویژه‌نامه محیط زیست، آبان (۱۳۸۸) ۱۹.

۱۱. ع ر کرباسی، ف عتابی، ن اسلامی علیشاه. *علوم و فناوری*

محیط *زیست* ، دوره دهم، شماره دو، تابستان (۱۳۸۷).

۱۲. ن نیک اقبالی سی سخت و دیگران *فصلنامه علمی ترویجی فرایند نو* ۴۶ ۹ (۱۳۹۳) ۷۹.

13. J K Kim, et al,. *International Atomic Energy Agency*, (2009).

14. A G Chmielewski, *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 01 (2011) 147.