

## بررسی آلاینده‌های خروجی دودکش کوره ذوب و برآورد صرفه جویی اقتصادی در صورت استفاده از یک سیستم بازیافت حرارت در یک کارخانه پشم شیشه

هادی نگهداری<sup>۱</sup> \*

[co\\_abnous@yahoo.com](mailto:co_abnous@yahoo.com)

محمد جواد جعفری<sup>۲</sup>

فریده عتابی<sup>۳</sup>

غلامرضا باصری<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۰/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲۰

### چکیده

خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه‌های پشم شیشه در حالی که طیف وسیعی از آلاینده‌های هوا را به محیط منتشر می‌نماید، مقدار قابل توجهی گرما نیز به بیرون منتشر می‌کند. بالا بودن دمای هوای خروجی دودکش کوره ذوب استفاده از پاک کننده‌های ارزان قیمت و مؤثر را دشوار می‌سازد. استفاده از یک سیستم مناسب بازیافت انرژی در عین حالی که مقدار قابل توجهی از هزینه‌های گرمایش را کاهش می‌دهد، امکان استفاده از پاک کننده‌های ارزان قیمت و مؤثر را میسر می‌سازد. در تحقیق حاضر، ضمن اندازه‌گیری و ارزیابی آلاینده‌های هوا در خروجی دودکش کوره ذوب یک کارخانه پشم شیشه، میزان کاهش هزینه‌های خارجی ناشی از به کارگیری یک سیستم بازیافت مورد بررسی قرار گرفته است.

برای این منظور پس از تعیین تعداد نمونه‌ها و محل نمونه برداری، پنج پارامتر مونواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، مونواکسید ازت، دی‌اکسید ازت، اکسیدهای ازت، سرعت جریان هوا و مقدار ذرات معلق اندازه‌گیری شدند. دمای هوای خروجی کوره‌ها نیز توسط داماسنج‌های نصب شده بر روی کوره به صورت خودکار قرائت و ثبت گردید. تعداد ۲۰۴۳ نمونه حرارتی از بین ۹۰۲۹۲۸ داده ثبت شده انتخاب شد. با استفاده از نتایج به دست آمده، میزان انرژی قابل بازیافت و همچنین هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم اقتصادی و اجتماعی محاسبه گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که آلاینده مونواکسید کربن ۱/۴۵ برابر مقادیر مجاز زیست محیطی،  $NO_x$  حدود ۱/۳۸ و

۱- کارشناس ارشد دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران<sup>۱</sup> (مسئول مکاتبات)

۲- دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

۳- استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

۴- مربی گروه مهندسی پلیمر - صنایع پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب.

ذرات معلق  $6/477$  برابر حد مجاز زیست محیطی می‌باشند. همچنین میزان سوخت معادل انرژی قابل بازیافت معادل  $1482254131/2$  متر مکعب گاز در سال برآورد گردید که ارزش سالانه آن  $10^{11} \times 2/44$  ریال می‌باشد. استخراج داده های آماری و آزمون فرضیات پژوهش با استفاده از نرم افزار *Mini Tab 14* صورت گرفت و از آزمون های میانگین جامعه (با واریانس معلوم) و میانگین دو جامعه و همچنین از آزمون *Probability Plot* جهت پیش بینی تغییرات آلاینده ها طی سال های بعد استفاده شد.

**واژه های کلیدی:** کارخانه پشم شیشه، ذرات معلق، بازیافت حرارت، کوره ذوب، هزینه های خارجی.

## مقدمه

کوره ای از جمله کوره های ذوب مجتمع های پشم شیشه به کار برد. مطالعه *Pinelli* عمدتاً بر طراحی کوره تأکید دارد (۱۱). در سال ۲۰۰۸، *Gaffney* و همکارانش خصوصیات ذاتی فرآیندهای احتراق پرداختند و نشان دادند که آزاد سازی گازها و ذرات معلق بر روی استانداردهای اولیه و ثانویه هوا، سلامتی انسان و شرایط آب و هوایی اثر می گذارد. ذرات منتشر شده از سوخت های فسیلی، سوخت های بیولوژیکی، گازی و اثرات اتمسفری آن ها با توجه به قانون رایج گازها مرور دوباره شدند. نتایج نشان داد که آتروسول های اولیه و پیش ماده های آتروسول های ثانویه به اندازه خوبی با قوانین زیست محیطی رایج آلاینده ها تطابق ندارند. تجسس در سوخت ها از قبیل سوخت های گازی، فسیلی، *LPG*، گاز طبیعی به خوبی با سوخت های بیولوژیکی تطابق دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که پتانسیل مهم غیر قابل تنظیم گازها و ذرات معلق، در کیفیت هوا و شرایط آب و هوایی با تمرکز بر روی آلدئید ها و مواد آلی نیترا شده اثر گذاشته است و در نهایت اعلام گردید که بین کیفیت هوا و تغییرات آب و هوایی، لایه ازن و گازهای گلخانه ای و تغییرات آلاینده های مذکور ارتباط بسیار قوی و مهمی وجود دارد (۱۲).

در سال ۲۰۰۸، *Neto* و همکاران برای آنالیز سناریوهای کاهش اثرات زیست محیطی ذرات آلومینیوم در ریخته گری آلومینیوم مدلی به نام *Mikado* را ارائه دادند. این مدل امکان کاهش ذرات و ارزیابی آن را با انتخاب شرایط در دسترس برآورد می نماید. در مدل های قبلی راه حل های کاهش، انتخابی نبود، اما در مدل جدید راه حل های کاهش میزان آلودگی مدنظر قرار گرفته است. نتایج تحقیق فوق ۱۱ راهبرد

به دلیل استفاده از کانی ها و مواد مختلفی که در کوره ذوب کارخانجات پشم شیشه استفاده می شود، دودکش این مجتمع ها طیف وسیعی از آلاینده های هوا را به محیط منتشر می نمایند. از طرفی به دلیل بالا بودن دمای هوای خروجی این کوره ها، امکان استفاده از غبارگیرهای کم هزینه و مؤثر ممکن نیست (۱). بخش عمده ای از آلودگی هوای خروجی کوره های ذوب ناشی از سوخت مصرفی کوره و بخشی دیگری از مواد اولیه مصرف شده در کوره می باشد. تشکیل ذرات معلق به ترکیب بار، دمای کوره ذوب، میزان تولید، مساحت مذاب در کوره و درصد خرده شیشه مصرفی بستگی دارد (۲). در میان این عوامل، میزان تولید، دما و مساحت مذاب شیشه بیشترین تاثیر را در میزان نشر ذرات بر جای می گذارند. از آن جا که این متغیرها همگی به یکدیگر وابسته اند، تعیین تاثیر نسبی هر یک به تنهایی، دشوار است. گرچه به نظر می رسد که دما مهم ترین عامل باشد (۲ و ۳). در اندازه گیری و ارزشیابی آلاینده های هوا در کارخانجات پشم شیشه بیشتر کوشش ها معطوف آلاینده های هوا در محیط های کار (داخل) بوده و کم تر به هوای خروجی از دودکش ها پرداخته شده است (۴ تا ۱۰). فعالیت محققان دیگر معطوف به سنجش اندازه ذرات، فرایندهای احتراق، کنترل کوره های شیشه با استفاده از روش های رایانه ای، وسایل آلودگی هوا، طراحی غبارگیر و بررسی عددی اندازه ذرات معلق بوده است (۲ و ۱۰ تا ۱۹).

در سال ۲۰۰۸ *Pinelli* با استفاده از شبیه سازی سه بعدی، نحوه طراحی پایه برای سیستم های خروجی گاز در نیروگاهها را تحقیق نمود. نتایج بررسی فوق را می توان در هر

انتشار ذرات است، ضمناً نتیجه تحقیق دیگری با استفاده از متد OSHA ID 160<sup>۲</sup> (با در نظر گرفتن آخرین تغییرات سال ۱۹۹۰) FIBER/CC ۰/۵۸ انجام شد که نتایج آن سه برابر حد استاندارد می باشد (۱۶). لیکن در مورد میزان غلظت آلاینده های خروجی از دودکش کوره ذوب این کارخانه تاکنون تحقیق مدونی صورت نگرفته است. کارخانه پشم شیشه مورد مطالعه، با ظرفیت ۵۰ تن در سال، سوخت مصرفی ۴/۹۸۱/۸۱۷ متر مکعب گاز در سال، از سال ۱۳۴۷ مشغول فعالیت می باشد. در این تحقیق فرایند تولید کارخانه پشم شیشه، آلاینده های هوا در خروجی دودکش کوره ذوب، وسایل و روش های نمونه برداری مورد بررسی واقع شد. سپس مباحث آماری، تصحیح حجم و فشار، امکان سنجی طراحی و نصب سیستم بازیافت بررسی شد. در نهایت از نرم افزار Mini Tab 14 و نرم افزار محیط زیست و انرژی جهت استخراج داده های آماری و محاسبه هزینه های خارجی استفاده گردید.

#### مواد و روش ها

در پژوهش حاضر غلظت آلاینده های  $NO$ ،  $NO_x$ ،  $CO$ ،  $CO_2$  و  $PM$  مورد بررسی قرار گرفت. یکی از روش هایی که جهت نمونه برداری آلاینده های هوا در خروجی صنایع توسط EPA پیشنهاد شده است، روش نمونه برداری شماره ۵ است (۱۷). تحقیقاتی که تاکنون جهت تعیین اندازه ذرات در دماهای بالا انجام گرفته است، محدود به دمای  $250^{\circ}C$  و با استفاده از شبیه سازی های نرم افزاری بوده است (۱۸)، در حالی که دمای خروجی دودکش ذوب در مطالعه حاضر حدود  $750^{\circ}C$  می باشد.

تعداد نمونه: این پژوهش در یک کارخانه پشم شیشه طی سال های ۷-۱۳۸۶ در استان فارس انجام شد و تعداد نمونه های مورد نیاز جهت نمونه برداری از خروجی دودکش کوره ذوب، با استناد به انحراف معیار حاصل از مطالعات پیشین و با توجه به رابطه (۱)، تعیین گردید (۱۶، ۱۹).

مختلف را برای کاهش اثرات زیست محیطی، به میزان ۵۰٪<sup>۱</sup> ارایه داده است (۱۳).

در سال ۲۰۰۶، Auchtet کنترل کوره های شیشه را از طریق تکنیک پیش بینی کنترل توسعه دادند. در این روش ابزارهای مختلفی استفاده شد و اجازه داده شد که عوامل بهینه بسیاری در سیستم قابل اجرا باشد. در این مدل پایه، زمان محاسبات و سرعت زیاد مدل نیاز بود. اولین قانون مدل سازی در دسترس، دورنمای سه بعدی بسیار جالبی را در مقایسه با جعبه سیاه مدل، نشان داد و مختصرسازی کافی را برای محاسبات اندک فراهم آورد. در مقاله بالا درباره مدل سازی و سرعت مدل بحث شده است (۱۴).

در سال ۲۰۰۵، Helsen به فناوری های نمونه برداری و وسایل کنترل آلودگی هوا خصوصاً ذرات آرسنیک پرداخت. در این مقاله نویسنده ارزش های بهره وری و کارایی روش های آزمایشگاهی و شرایط واقعی خروجی صنایع را مورد مطالعه قرار می دهد. نتایج این بررسی نشان داد که کنترل فیوم های آرسنیک با اندازه کوچک تر از یک میکرون توسط سامانه های مرسوم کنترل بسیار مشکل می باشد و لازم است جهت بدام اندازی گونه های مختلف آرسنیک روش های کنترلی اعم از دستگاه های کنترل ذرات و کنترل بخار به صورت توأم به کار گرفته شوند (۱۵).

در کارخانه پشم شیشه مورد مطالعه، توسط مسوولان کارخانه، تحقیقاتی در خصوص نحوه کاهش آلاینده های خروجی دودکش کوره ذوب شیشه انجام شده و میزان آلاینده های خروجی تحت متد استاندارد ISO 9096<sup>۱</sup> اندازه گیری شده است و نتایج این اندازه گیری ها نشان می دهد که درجه حرارت خروجی  $700^{\circ}C$  درجه سانتی گراد و غلظت آلاینده ها شامل مونواکسید کربن ( $CO = 610 \text{ ppm}$ ) دی اکسید کربن ( $CO_2 = 9/3\%$ )، مونواکسید نیتروژن ( $450 \text{ ppm}$ )، اکسید های ازت ( $NO_x = 455 \text{ ppm}$ ) و میزان ذرات معلق  $650$  میلی گرم در مترمکعب می باشد که این مقدار حدود  $2/6$  برابر مقادیر مجاز استانداردهای زیست محیطی

به سیستم تهویه صورت پذیرد. گازی که جهت انجام کالیبراسیون استفاده می شود، الزاماً باید دارای گواهینامه معتبر از مراجع مربوط باشد و از طرفی برای دقت بالا میزان غلظت آن باید بین ۷۰-۱۲۵ درصد گازی باشد که اندازه گیری خواهد شد. حساسیت دستگاه TESTO ۰/۵ ± درصد، محدوده اندازه گیری صفر تا ۳۰۰۰ ppm و زمان پاسخ دهی در حدود ۳۰ ثانیه می باشد. دستگاه TCR Tecora دارای کالیبراسیون داخلی، دقت اندازه گیری ۲ ± میلی گرم، و زمان پاسخ دهی در حدود ۱ دقیقه می باشد. دمای هوای کوره توسط سنسورهای که بر روی کوره ها نصب شده است ثبت و قرائت شد. برای ذرات معلق پس از رطوبت گیری فیلترها در آزمایشگاه و وزن سنجی اولیه به دستگاه نمونه برداری انتقال یافت. سپس با استقرار در جایگاه خاص، نمونه برداری هوا انجام گردید. جهت استخراج نمونه، رطوبت سنجی، وزن سنجی ثانویه، تصحیح حجم هوای نمونه برداری شده برای فشار و دما صورت گرفت (رابطه ۳ و ۵). سپس با استفاده از فرمول رابطه (۴)، نسبت به محاسبه حجم هوای نمونه برداری شده اقدام گردید. در فرمول بالا پارامترها عبارت است از  $V$  حجم هوای نمونه برداری (LIT)،  $Q =$  فلوی نمونه برداری ( $lit/min$ ) و  $T =$  مدت زمان نمونه برداری که ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. در ادامه با کسر میانگین اختلاف وزن در فیلترهای شاهد از وزن نهایی هر فیلتر، وزن اصلاح شده هر فیلتر حاصل شد. با تفریق وزن اصلاح شده هر فیلتر از وزن اولیه هر فیلتر با استفاده از رابطه (۶) میزان ذرات معلق بر روی هر فیلتر حاصل می گردد (۲۰، ۲۱ و ۲۲). جهت تجزیه و تحلیل آماری و رسم نمودارهای تغییرات پارامترها از نرم افزارهای MINI TAB 14 و EXCELL استفاده شد.

رابطه (۳)

$$V_s = V_e \times \frac{P_e}{P_s} \times \frac{T_s}{T_e}$$

رابطه (۴)

$$V=QT$$

$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 - \sigma^2}{d^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه  $N =$  تعداد نمونه مورد نیاز،  $d =$  دامنه تغییرات داده ها و  $\sigma =$  انحراف معیار مطابق فرمول رابطه (۲) می باشد.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

همچنین  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  عدد مربوط به حدود اطمینان مورد نظر (از

جداول آماری)،  $x_i$  داده  $i$  و  $\bar{x}$  میانگین داده ها است.

با توجه به روابط فوق تعداد نمونه لازم جهت نمونه برداری ذرات معلق،  $\alpha = 0.05$ ،  $d = 95$ ،  $\sigma = 28/4$ ، نمونه  $8/5$  محاسبه گردید.  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1/645$  محاسبه گردید. تعداد نمونه مورد نیاز برای سایر آلاینده ها نیز به طریق مشابه محاسبه شد. اما با توجه به آن که احتمال داشت تعدادی از نمونه ها در حین نمونه برداری قابل استفاده نباشند، تعداد نمونه ها ۲۵ تا ۳۰٪ بیشتر در نظر گرفته شد. لذا برای هر آلاینده ها تعداد ۱۱ نمونه طی فصول مختلف سال ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ از دهانه خروجی دودکش کوره ذوب که تنها محل قابل دسترس جهت انجام اندازه گیری بود، تهیه گردید. همچنین ۳ نمونه شاهد نیز در نظر گرفته شد.

**محل و مدت نمونه برداری:** با توجه به دستورالعمل EPA نمونه برداری ها از دهانه خروجی دودکش و هر بار به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد (19).

**دستگاه های نمونه برداری:** جهت اندازه گیری، پنج پارامتر  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $NO$ ،  $NO_x$ ،  $NO_2$ ، سرعت جریان هوا و درجه حرارت از دستگاه TESTO 350 XL به صورت قرائت مستقیم استفاده شد. برای سنجش ذرات معلق نیز از دستگاه TCR TECORA ISO STRACK استفاده شد. جهت کالیبراسیون دستگاه TESTO 350 باید از سیلندرها مخصوص دستگاه استفاده شود. این سیلندرها باید برای جلوگیری از حوادث احتمالی طبق ضوابط ایمنی مربوط نگه داری و حمل شوند. کالیبراسیون باید الزاماً در اتاقی مجهز

کاهش دهد و با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده دما و گذر حجمی هوای داغ خروجی از کوره از رابطه (۷) مقدار گرمای بازیافت شده تعیین شد (21 و 22).

$$h = m \cdot c_p \Delta t \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن  $c_p$  گرمای ویژه هوا در فشار ثابت معادل ۰/۲۴۱ ( $Btu/lb.R$ )،  $\Delta t$  = اختلاف دمای ورودی به بازیافت و

خروجی از آن ( $^{\circ}R$ )،  $h$  = آنتالپی حرارتی ( $Btu/min$ )،

$$m = \text{دبی جرمی هوا برحسب } lb/min \text{ می باشد.}$$

**هزینه‌های خارجی:** با در نظر گرفتن ارزش حرارتی هر کیلوگرم گاز که معادل ۱۰۵۰۰ کیلوکالری می‌باشد (23)، حجم گاز صرفه جویی شده در مدت زمان یک سال به دست آمد. سپس با استفاده از بسته نرم افزاری انرژی و محیط زیست، هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های خارجی ناشی از صرفه جویی این مقدار گاز در سال تعیین شد (نمودارهای ۱ و ۲). در آخرین مرحله با استفاده از نتایج اندازه‌گیری شده و همچنین استانداردهای ملی زیست محیطی، مشخصات غبارگیر مناسب تعیین شد. برای تعیین بازده موردنیاز غبارگیر کوره، از رابطه (۸) استفاده شد.

که در روابط فوق  $V_s$  = حجم هوای استاندارد و یا اصلاح شده،  $V_e$  = حجم هوای محیط یا نمونه برداری شده،  $P_e$  = فشار هوای محیط که از فرمول رابطه (۴) بر حسب atm به دست می‌آید،  $P_s$  = فشار هوای استاندارد (برابر یک اتمسفر)،  $T_s$  = دمای هوای استاندارد (برابر ۲۵ درجه سانتی گراد) و  $T_e$  = دمای هوای محیط می‌باشد.

رابطه (۵)

$$P_e = e^{-\frac{M g h}{R T}}$$

که در روابط فوق  $P_e$  = فشار هوای محیط (atm)  $M$  = ملکول گرم (۲۸/۹۶۵ گرم)،  $g$  = شتاب ثقل ( $m/s^2$ ) ۹/۸۱،  $R$  = ثابت گازها ( $N.m/^{\circ}K.mol$ ) ۸/۳۱۴۹،  $T$  = دمای هوای محیط (برحسب  $^{\circ}K$ ) و  $h$  = ارتفاع از سطح دریا است که برای منطقه مورد نظر ۱۵۰۰ متر می‌باشد.

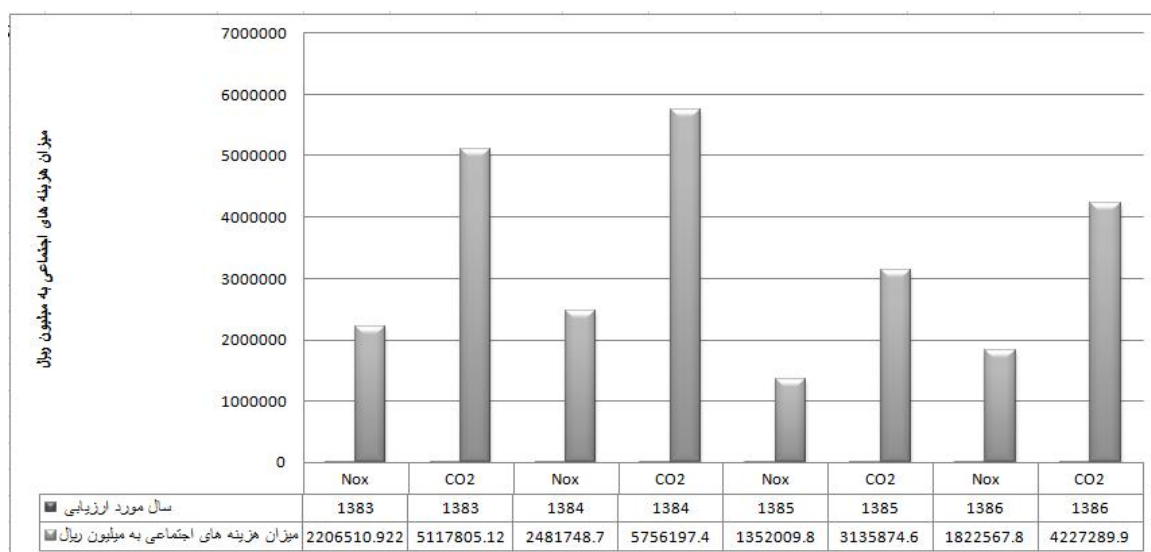
رابطه (۶)

$$TSP = \frac{W_1 - W_2}{V_s} \times 1000$$

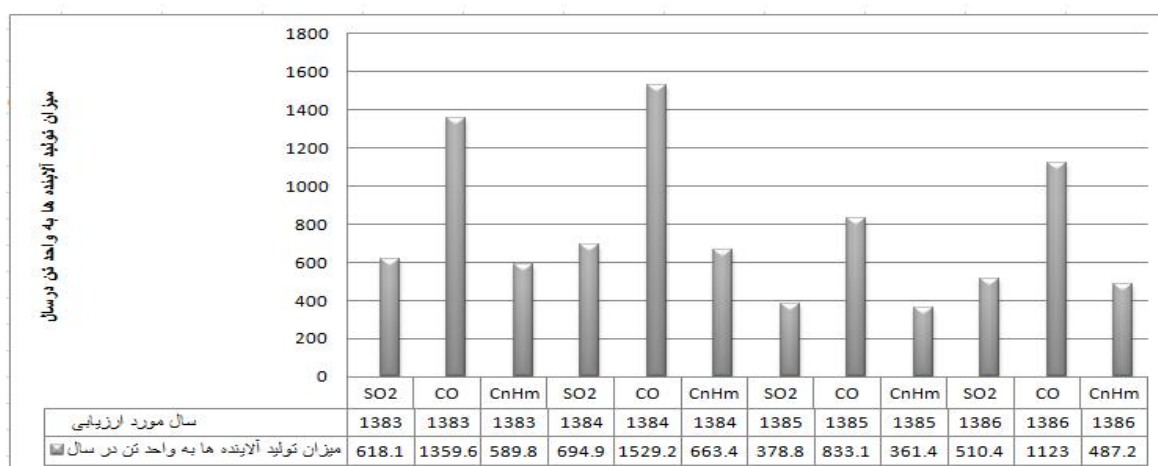
که در رابطه فوق  $TSP$  = کل ذرات معلق ( $mg/m^3$ )،  $W_1$  = وزن اولیه فیلتر،  $W_2$  = وزن اصلاح شده و یا ثانویه فیلتر و  $V_s$  = حجم هوای استاندارد یا اصلاح شده می‌باشد.

**تست‌ها و آزمون‌های انجام شده:** میانگین کلیه نتایج اندازه‌گیری شده با معیارهای زیست محیطی رایج در کشور مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت بررسی وضعیت حرارتی خروجی دودکش با توجه به نتایج قبلی کارخانه، از میان ۹۰۲/۹۲۸ تعداد داده، به کمک نرم افزار Mini Tab 14 و با استفاده از تکنیک Pareto Chart تعداد ۲۰۴۳ نمونه معتبر به صورت تصادفی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت.

**سیستم بازیافت حرارت:** با فرض این که سیستم بازیافت حرارت بتواند دمای هوای خروجی را از  $75^{\circ}C$  به  $150^{\circ}C$



نمودار ۱- برآورد میزان هزینه های خارجی  $CO_2$  و  $NO_x$  (بر حسب میلیون ریال در سال) در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه طی سال های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶



نمودار ۲- برآورد میزان تولید آلاینده های دی اکسید گوگرد، مونواکسید کربن و هیدروکربورها (بر حسب واحد تن در سال) در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه طی سال های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶

است (نمودار ۳). طبق نتایج اندازه‌گیری شده، میزان غلظت CO در محدوده ۲۲۵ تا ۶۳۹ (با میانگین ۴۳۹/۶ ppm) قرار داشت که به مراتب از تراکم مجاز زیست محیطی آن یعنی ۳۰۴ ppm بالاتر است (نمودار ۴). نتایج نشان می‌دهد که میزان تراکم CO<sub>2</sub> در خروجی دودکش در محدوده ۶/۳۲ تا ۹/۶ درصد (با میانگین ۸/۵۴۷ درصد) قرار داشت میزان غلظت PM در خروجی دودکش کوره ذوب در محدوده ۴۶۷/۲ تا ۹۲۷/۲ (با میانگین ۶۴۷/۷) میکروگرم بر متر مکعب قرار داشت که به مراتب از مقادیر غلظت مجاز زیست محیطی ذرات یعنی ۱۰۰ میکرو گرم بر مترمکعب بالاتر است (نمودار ۵). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با اطمینان ۹۹٪ (α = ۰/۰۱)، میانگین غلظت کلیه آلاینده‌های اندازه‌گیری شده از حد استاندارد ملی توصیه شده محیط زیست بیشتر می‌باشد.

رابطه (۸)  $C_{out} = C_{input} (1 - \eta)$   
 در این رابطه،  $C_{out}$  غلظت گرد و غبار (میلی گرم) در خروجی صافی است که باید مساوی و یا کمی کم تر از حد مجاز مقادیر زیست محیطی باشد،  $C_{input}$  غلظت گرد و غبار (میلی گرم) در ورودی فیلتر می‌باشد که مساوی میانگین نتایج اندازه‌گیری شده در نظر گرفته می‌شود و  $\eta$  بازده غبارگیر (درصد) می‌باشد.

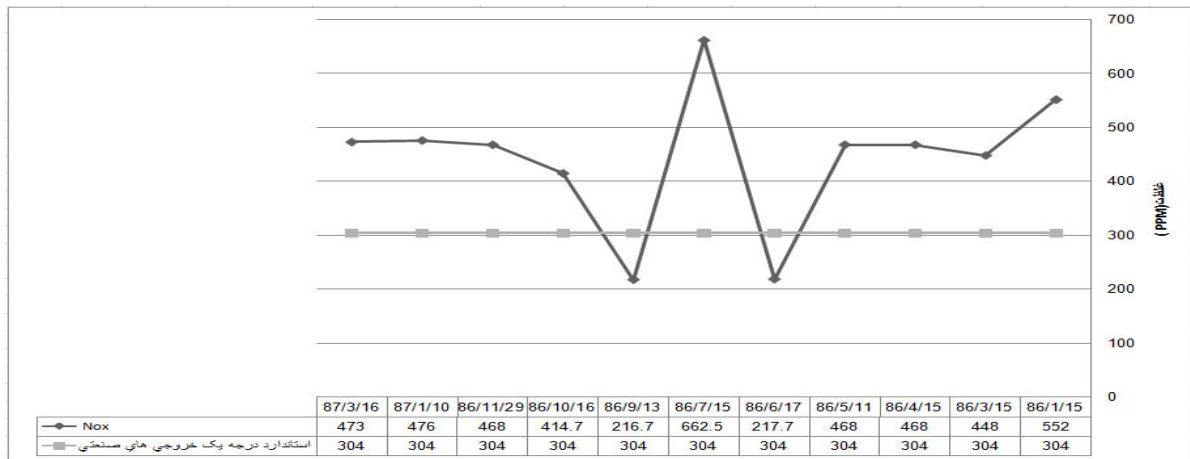
**یافته ها**

**آلاینده‌های هوا:** میزان غلظت NO در خروجی دودکش در محدوده ۱۵۷ تا ۷۰۸ (با میانگین ۴۲۹/۱) ppm قرار داشت (جدول ۱). همان گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، که میزان تراکم اکسیدهای ازت در محدوده ۲۱۶/۷ تا ۶۶۲/۵ (با میانگین ۴۲۲/۲) ppm قرار داشت که به مراتب از مقادیر غلظت های مجاز زیست محیطی آن (۳۵۰ ppm) بالاتر

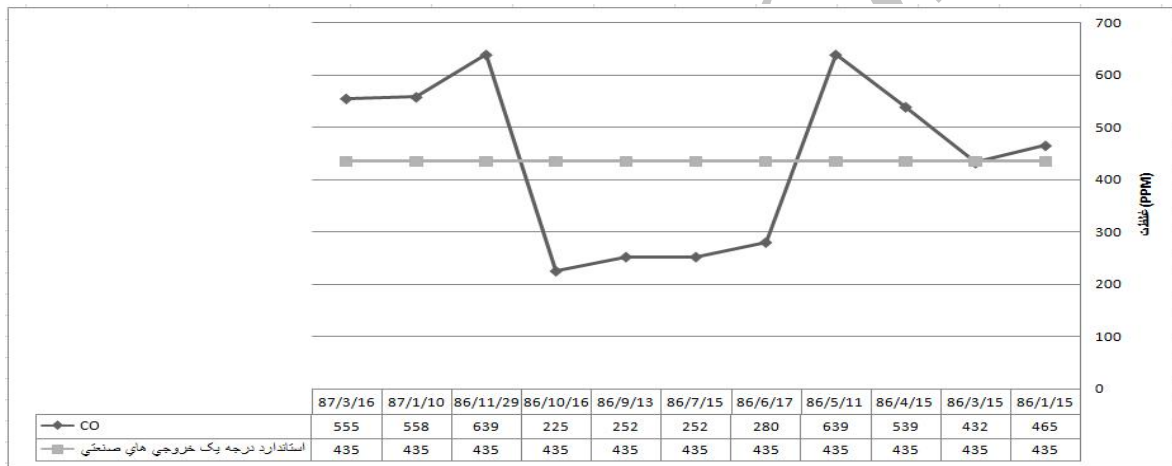
جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا در خروجی کوره ذوب کارخانه پشم شیشه

در استان فارس طی سال های ۸۷-۱۳۸۶

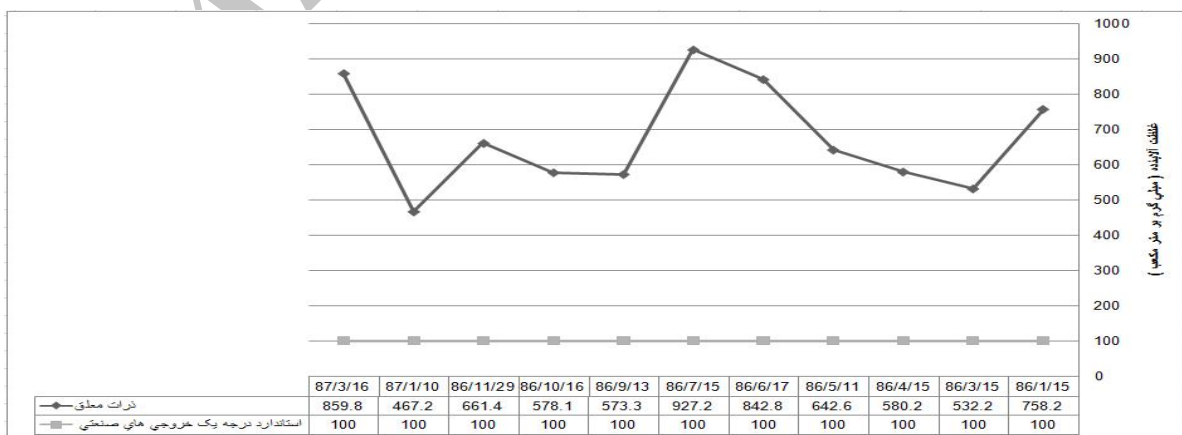
PL	max.	Ave.	min.	SD	$\bar{X}$	n	آلاینده
-	۷۰۸	۴۶۶	۱۵۷	۲۱۵/۱	۴۲۹/۱	۱۱	NO (ppm)
-	۳/۹	۲	۰	۱/۳	۲/۰۶۲	۱۱	NO <sub>2</sub> (ppm)
۳۵۰	۶۶۲/۵	۴۶۸	۲۱۶/۷	۱۲۹/۱	۴۲۲/۲	۱۱	NO <sub>x</sub> (ppm)
۳۰۴	۶۳۹	۴۶۵	۲۲۵	۱۶۲	۴۳۹/۶	۱۱	CO (ppm)
-	۹/۶	۸/۹	۶/۳۲	۱/۱۹۶	۸/۵۴۷	۱۱	CO <sub>2</sub> (%)
۱۰۰	۹۷۲/۲	۶۴۲/۲	۴۶۷/۲	۱۵۰/۴	۶۴۷/۷	۱۱	SPM (μg/m <sup>3</sup> )



نمودار ۳- مقایسه مقادیر حاصل از اندازه گیری NO<sub>x</sub> در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه با مقدار استاندارد درجه یک خروجی های صنعتی ایران طی سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷



نمودار ۴- مقایسه مقادیر حاصل از اندازه گیری مونواکسید کربن در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه با مقدار استاندارد ملی درجه یک خروجی های صنعتی طی سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷



نمودار ۵- مقایسه مقادیر حاصل از اندازه گیری ذرات معلق در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه با مقدار استاندارد ملی درجه یک خروجی های صنعتی طی سال های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷



به ازای ۱۱ نمونه برداری انجام شده طبق جدول ۲ است. در این تحقیق فشار سرعت به طور اتوماتیک توسط دستگاه TCR Tecora اندازه‌گیری شد. فشار استاتیک هوا در نزدیکی خروجی دودکش با مقدار فشار در محیط تفاوت زیادی ندارد و این امر طبیعی است، زیرا این نقطه در مجاورت هوای بیرون قرار دارد.

**سرعت جریان هوا:** در شرایط عادی سرعت جریان هوا در خروجی دودکش کوره ذوب معمولاً ثابت است. در صورتی که تعداد بچ تزریقی (مقدار مواد اولیه تزریقی به کوره) تغییر کند، سرعت جریان خروجی نیز تغییر خواهد کرد. سرعت جریان خروجی دودکش کوره ذوب ۸/۹ تا ۱۴/۵ متر بر ثانیه است (StDev=۲/۳۳۵). تغییرات سرعت جریان هوای خروجی

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری پارامترهای ترمو و آئرو‌دینامیکی در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه در استان

فارس طی سال ۱۳۸۷

پارامتر	n	$\bar{X}$	SD	min.	ave.	max .
دبی ( $m^3/s$ )	۱۱	۶	۰/۸۶۶	۵	۶/۵	۶/۵
فشار (Pa)	۱۱	۸/۹	۲/۸۷	۶/۵	۸/۲	۱۲/۱
سرعت هوا ( $m/s$ )	۱۱	۱۲	۲/۳۳۵	۸/۹	۱۳	۱۴/۵
دما ( $^{\circ}C$ )	۲۰۴۳	۷۵۱/۳	۱۹/۸	۶۸۸	۷۵۳	۸۱۲

۱۶۵ ریال مساوی ۲۴۴۵۷۱/۹ میلیون ریال در سال خواهد شد. ضمناً کاهش میزان سوخت این کارخانه منجر به کاهش آلاینده‌های هوا به مقداری که در جدول ۴ نشان داده شده است، خواهد شد. صرفه جویی اقتصادی ناشی از هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم این آلاینده‌ها به ترتیب مساوی ۲۴۴۵۷۱/۹ و ۱۰۸۶۰۳۴/۷۴۴ میلیون ریال در سال خواهند شد (جدول ۵). در این محاسبات هر دلار آمریکا معادل ۱۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

**محاسبه بازایافت انرژی و هزینه‌های خارجی:** با توجه به نتایج اندازه‌گیری شده از جمله دما و گذر حجمی هوا در خروجی دودکش کوره ذوب (جدول ۲)، در صورتی که در خروجی این کوره‌ها از سیستم بازایافت استفاده شود، می‌توان مقدار قابل توجهی صرفه جویی اقتصادی را انتظار داشت. چنانچه سیستم بازایافت مورد نظر قادر باشد دمای هوا را حدود  $600^{\circ}C$  کاهش دهد، با توجه به دبی هوا مقدار سوخت صرفه جویی شده در طول یک سال معادل  $1482254131/2$  متر مکعب گاز طبیعی خواهد شد (جدول ۳). صرفه جویی مستقیم ناشی از کاهش مصرف گاز بر اساس قیمت هر متر مکعب گاز

جدول ۳- میزان صرفه جویی سالیانه گاز مصرفی در صورت استفاده از سیستم بازایافت حرارتی

کاهش دما ( $^{\circ}C$ )	دبی هوای داغ ( $m^3/s$ )	گرمای بازایافتی ( $kcal/yr$ )	گاز صرفه جویی شده ( $m^3/yr$ )	قیمت واحد گاز (ریال)	قیمت کل گاز (میلیون ریال)
۶۰۰	۶	۱۳۶۱۲۶۶۳۰۷۳/۳	۱۴۸۲۲۵۴۱۳۱/۲	۱۶۵	۲۴۴۰۰۰

جدول ۴ - میزان کاهش سالیانه آلاینده تولیدی در صورت استفاده از سیستم بازیافت حرارتی

SO <sub>3</sub>	SPM	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	آلاینده
۰/۶	۲۵/۶	۵/۵	۱۲/۶	۱۹۷۳۱۴	۰	۳۱۶/۷	مقدار (تن)

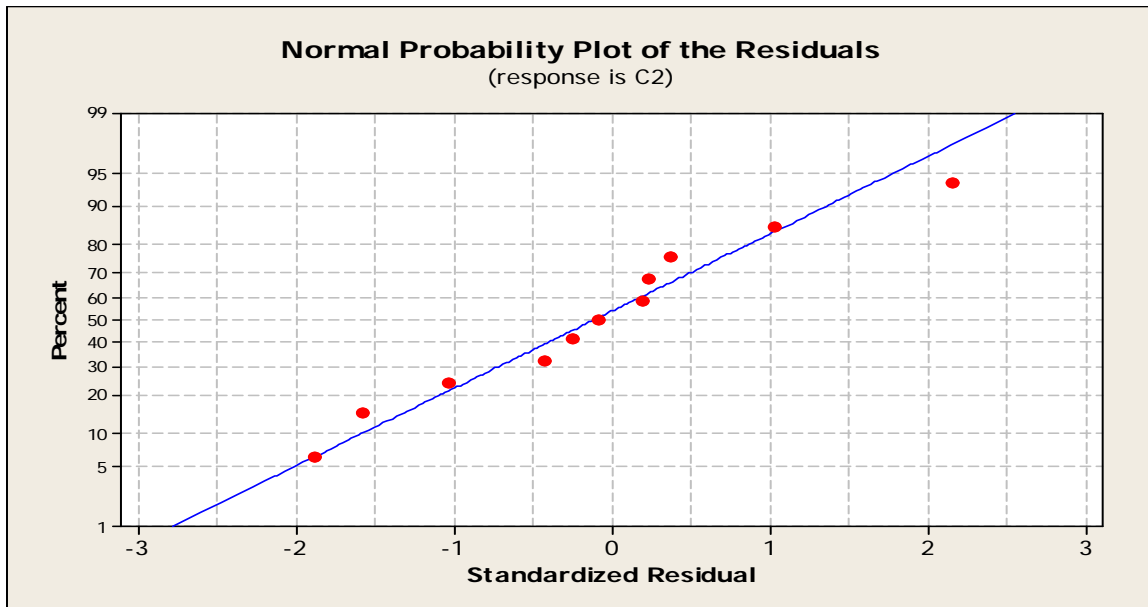
جدول ۵ - میزان کاهش هزینه‌های خارجی سالیانه آلاینده‌ها در صورت استفاده از سیستم بازیافت حرارتی

جمع کل	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	آلاینده
۱۰۸۶۰۳۴/۷۴۴	۷۵۸۷۹۵/۵۲۰	۹۱/۸۳۲	۳۲۱۴۷/۳۹۲	هزینه (میلیون ریال)

### بحث و نتیجه گیری

های برتر در خصوص صنعت پشم شیشه معرفی می نماید (19)، بررسی لازم جهت تعیین نوع غبارگیر در این مطالعه نیز محدود به مقایسه غبارگیرهای فوق گردید. مطابق نمودار ۶، با افزایش تعداد بچ تزریقی به کوره ذوب، مقدار آلودگی افزایش یافته و با کاهش میزان تزریق بچ، میزان آلودگی کاهش می یابد. بررسی نمونه های اندازه گیری شده نیز نشان می دهد که بین تعداد بچ تزریقی و تراکم ذرات اندازه گیری شده در خروجی کوره ذوب همبستگی معنا داری وجود دارد. این نتایج با نتایج پژوهشی که Cheng و همکاران در سال ۲۰۰۷ به منظور بررسی غلظت های ذرات بسیار ریز و انتشار سایز ذرات در کارخانجات ذوب فلز انجام دادند، مطابقت دارد (24).

نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می دهد که میانگین غلظت CO حدود ۱/۴۵ برابر حد مقادیر استاندارد، NO<sub>x</sub> حدود ۱/۳۸ و PM حدود ۶/۴۷ برابر حد مقادیر استاندارد ملی زیست محیطی می باشد (جدول ۱). همچنین با مطالعه تحقیقات انجام شده طی سال های گذشته، مشخص گردید که ۶۷٪ از ذرات معلق خروجی از دودکش کوره ذوب کارخانه های پشم شیشه دارای اندازه ۱ تا ۲ میکرون می باشد (۲). با توجه به اطلاعات فوق، مشکل اصلی این کارخانه ذرات معلق خروجی از دودکش کوره ذوب بوده و ضروری است سیستم های کنترل، استفاده گردند. از آن جا که سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا از بین غبارگیرها، به ترتیب غبارگیر الکتروستاتیک کم ولتاژ، اسکرابر تر فشار متوسط، فیلترهای پارچه ای با پاک سازی اتوماتیک را به عنوان گزینه



نمودار ۶ - همبستگی تعداد بیج تزریقی با میزان آلودگی غبار بر حسب درصد  
در خروجی دودکش کوره ذوب کارخانه پشم شیشه در سال ۱۳۸۷

صورت استفاده از یک سیستم بازیافت حرارت به طور قابل ملاحظه ای صرفه اقتصادی را در پی دارد. استفاده از غبار گیر پارچه ای در ضمن پائین بودن هزینه نصب، هزینه راهبری متوسطی دارد که در صورت استفاده از یک سیستم بازیافت انرژی این هزینه کمتر نیز خواهد شد. لذا با عنایت به نکات فوق غبارگیر پارچه ای به همراه یک سیستم بازیافت حرارت توصیه می گردد. براساس برخی از تحقیقات انجام شده در صورتی که غلظت ورودی غبار به پاک کننده بازده بالا از ۱۱۴۴۰/۵ میلیگرم بر مترمکعب فراتر رود لازم است که از پیش تصفیه کننده استفاده شود(25). با توجه به اینکه غلظت تراکم ذرات در خروجی دودکش کوره ذوب از مقدار فوق فراتر نرفته است، لذا نیازی به پیش تصفیه کننده نمی باشد. با توجه به میانگین تراکم غبار در خروجی دودکش و همچنین تراکم مجاز زیست محیطی ذرات راندمان مورد نیاز پاک کننده مساوی ۹۰ درصد تعیین می گردد.

میزان تراکم اکسیدهای ازت در خروجی دودکش کوره ذوب به عواملی نظیر هوای پیش گرم، گرمای خروجی، هوای اضافه، سرعت اشتعال، رقیق سازی و نوع سوخت بستگی دارند که معمولاً هیچ کدام از این عوامل کنترل نمی شود(5). لذا توصیه می شود به منظور کنترل تراکم این آلاینده ها در خروجی دودکش کوره ذوب عوامل مؤثر بر تولید این آلاینده مورد توجه و کنترل قرار گیرند. اگرچه در صورت استفاده از شستشودهنده های تر می توان انتظار داشت که سایر آلاینده های گازی شکل  $NO_x$  و  $SO_2$  و همچنین گاز مهم گلخانه ای،  $CO_2$  نیز تا حدودی جذب شوند (4 و 7)، اما دمای بسیار بالای هوای خروجی سبب می گردد تا مقدار قابل توجهی از آب پاک کننده تر نیز تبخیر گردد. هزینه اولیه استفاده از رسوب دهنده الکترواستاتیکی بسیار بالا بوده و با توجه به دمای بالای هوا در خروجی دودکش، در صورت استفاده از رسوب دهنده الکترواستاتیکی نیز لازم است دمای آن کاهش یابد. از طرفی با توجه جداول ۳ تا ۵، محاسبات هزینه های خارجی و هزینه های صرفه جویی در میزان مصرف سوخت نشان داد که در

## منابع

10. Dong (2009), Gaseous emissions from the combustion of a waste mixture containing a high concentration of  $N_2O$  (Elsevier), Volume1, Issue1, pp272-276.
11. M. Pinelli (2008), Numerical based design of exhaust gas system in a cogeneration power plant (Elsevier), Volume1, Issue1, pp10-18.
12. Gaffney (2008), The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond (Elsevier) ,Volume43 ,Issue1 , pp23-26.
13. Belmira Neto(2008), Strategies to reduce the environmental impact of an aluminium pressure die casting plant: A scenario analysis (Elsevier), Volume 90 ,Issue2 , pp815-830 .
14. Olivier Auchet (2008), First-principles simplified modelling of glass furnaces combustion chambers (Elsevier), Volume16, Issue12, pp 1443-1456.
15. Helsen, (2005), Sampling technologies and air pollution control devices for gases and particulate arsenic, a review, (Elsevier), Volume137, Issue2, pp305-315.
16. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), 2000, Reference document on Best Available Technique in Glass Manufacturing Industry.
17. EPA, 2003, Emission factor documentation For AP-42 section 11.18 (Formerly 8.16).
18. Kuo (2008), Estimation of fuel burning rate and heating value with highly variable properties for optimum combustion control (Elsevier),Volume 32 ,Issue12 , pp1255-1262 .
۱. تولوی، اف وی، ۱۳۸۰، کتاب صنعت سبز شیشه، انتشارات کارخانه شیشه قزوین، فصول ۱، ۳، ۱۳.
2. M.G. Carvalho, M. Nogueira, 1967, Modelling fluid flow and heat transfer in an industrial glass furnace, in: Annual ESPRIT Conference, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 1990, pp. 530–543.
3. H.Rawson, 2002, Inorganic glass-forming systems, Academic press, London and newyork, pp120-128.
4. Meikap (2008), Performance characteristics of the particulate removal in a novel spray-cum-bubble column scrubber (Elsevier), Volume 87, Issue1, pp109-118.
5. Szego (2008), Scaling of  $NO_x$  emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace (Elsevier), Volume154, Issue1-2, pp 281-295.
6. Banerjee (2008), Model based energy benchmarking for glass furnace (Elsevier), Volume 48, Issue10, pp2718-2738.
7. Veawab (2007), Environmental impacts of absorption-based  $CO_2$  capture unit for post-combustion treatment of flue gas from coal-fired power plant (Elsevier), Volume1, Issue3, pp318-342.
8. Singh (2008), Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations (Elsevier), Volume34, Issue6, pp 685-695.
9. Meikap (2008), Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber (Elsevier), Volume87, Issue1, pp366-387.

- (Elsevier) ,Volume43 ,Issue1 , pp128-141 .
30. Luis I. Díez (2008), Numerical investigation of NO<sub>x</sub> emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation (Elsevier), Volume87, Issue7, pp 1259-1269.
31. Rastko Mladenovic (2007), Effects of air excess control in a heat storage solid fuel-fired household furnace (Elsevier), Volume27, Issue13, pp 2243-2251.
32. Hirofumi. Tsuji (2008), Development of a particle size distribution measurement method at high temperature by use of classification during sampling, (Elsevier), Volume180, Issue1, pp 190-195.
33. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), 2000, Reference document on Best Available Technique in Glass Manufacturing Industry.
۳۴. چوبینه، علیرضا، ۱۳۸۴، روش‌ها و وسایل نمونه برداری از آلاینده‌های هوای محیط کار، انتشارات فن آوران، فصل اول و چهارم (۱۵-۲۵ و ۱۲۳-۱۶۱)، چاپ اول.
35. Hirofumi. Tsuji (2008), Development of a particle size distribution measurement method at high temperature by use of classification during sampling, (Elsevier), Volume180, Issue1, pp 190-195.
36. Standard Lco E, NOV1976, "Oxide substitution effects on the working, characteristics of container glass" the glass industry, p20.
37. B. Golchert, C.Q. Zhou, S.L. Chang, M. Petrick, 2000, Investigation of spectral radiation heat transfer and NO<sub>x</sub> emission in a glass furnace, in:
19. EPA, 2006, Industrial gas cleaning and air pollution control, Chapter 25, pp25-27.
۲۰. عبدالرحمن، بهرامی، ۱۳۷۸، نمونه برداری و تجزیه آلاینده‌ها در هوا، جلد اول، انتشارات بابا طاهر، فصل اول (۴-۴۶).
۲۱. وایلن، گوردن ج ون، ترجمه کاظمی، مازیار، ۱۳۷۸، اصول ترمودینامیک کلاسیک، ویرایش چهارم، انتشارات نورپردازان.
۲۲. ای بولز، میخائیل، ای سنجل، یونس، ترجمه پوستی بهرام، ۱۳۸۷، ترمودینامیک با نگرش مهندسی، ویرایش سوم، انتشارات متفکران.
۲۳. طباطبائی، سید مجتبی، ۱۳۸۳، مهندسی تاسیسات، نشر روزبهان.
24. Yu-Hsiang Cheng (2007), Measurements of ultrafine particle concentrations and size distribution in an iron foundry, Volume158, Issue1, pp 124-130.
۲۵. جعفری، محمدجواد، تهویه صنعتی، جلد اول، انتشارات آشتی، فصل اول (۱-۲)، فصل چهارم (۱-۴).
26. Philip K. Hopke(2008), Contemporary threats and air pollution (Elsevier),Volume43 ,Issue1 , pp87-93.
27. Yoshihiko Nino miya(2008), Effects of coal blending on the reduction of PM<sub>10</sub> during high-temperature combustion 2. A coalescence-fragmentation model (Elsevier), Volume88, Issue1, pp150-157.
28. Fredrik Normann (2008), High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion(Elsevier),Volume87 ,Issue17-18 , pp 3579-3585 .
29. M.R. Ashmore (2008), Personal exposure of children to air pollution

furnace with batch melting process,  
Journal of Non-Crystalline Solids 38–  
39 807–812.

International Mechanical Congress and  
Exposition, Orlando, Florida.  
38. H. Mase, K. Oda, (1980),  
Mathematical model of glass tank

Archive of SID