

## مقایسه غبارگیرهای الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر در صنعت فولاد

پرویز جعفری فشارکی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا جعفری<sup>۲</sup>، غلامرضا نبی‌بهدندی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

۲- دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران. hjafari@ut.ac.ir

۳- استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران. Ghghendi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۲۴

### چکیده

صنعت فولاد یکی از پرمصرف‌ترین میزان مصرف انرژی شناخته شده است که مربوط به بخش کوره‌های ذوب است و منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. هدف از این تحقیق تعیین میزان مصرف انرژی و سرمایه درغبارگیرهای الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر متصل به کوره‌های ذوب با رویکرد اکولوژی صنعتی، برای انتخاب سیستم غبارگیر مناسب و سازگار با محیط‌زیست است. بنابراین در این تحقیق ابتدا سه کوره ذوب الکتریکی ۳، ۶ و ۱۲ تنی در نظر گرفته شد، و بر اساس روش محاسباتی و معادلات حاکم، میزان مصرف انرژی و سرمایه اولیه در دو غبارگیر الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر انجام شد. نتایجی که به دست آمد گویای این مطلب است که میزان مصرف انرژی سالانه در غبارگیر ونتوری متصل به کوره ۱۲ تنی، هجده برابر میزان مصرف انرژی برق در غبارگیر الکترواستاتیکی است. در حالی که این میزان در کوره ۶ تنی به یازده برابر و در کوره ۳ تنی به چهار برابر تقلیل می‌یابد. هزینه‌های سرمایه اولیه در یک غبارگیر الکترواستاتیکی در سه کوره ۳، ۶ و ۱۲ تنی در حدود یک و نیم برابر سیستم غبارگیر ونتوری است. بنابراین مجموع کل هزینه‌های غبارگیر ونتوری اسکرابر در یک کوره ذوب ۱۲ تنی صنعت فولاد در مدت ۲۰ سال تقریباً ۶/۵ برابر مجموع کل هزینه‌های غبارگیر الکترواستاتیکی است. در حالی که در کوره‌های ذوب ۳ و ۶ تنی صنعت فولاد به ترتیب ۱/۶ و ۴ برابر است. با این توصیف می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از غبارگیرهای ونتوری اسکرابر برای کوره‌های کمتر از ۳ تن، به لحاظ پایداری محیط‌زیستی و اکولوژی صنعتی معقولانه و اقتصادی‌تر است.

### کلید واژه

غبارگیرها، صنعت فولاد، انرژی، اکولوژی صنعتی، هزینه

### سر آغاز

در سراسر جهان توجه می‌شود، به تأثیر فراوان آنها در گرم شدن کره زمین پی می‌بریم. که به علت مصرف انرژی در این غبارگیرهاست (Berwick, 2005). مهمترین غبارگیرهای صنعتی استفاده شده برای به دام‌اندازی گرد و غبارات کوره ذوب صنایع فولاد شامل غبارگیرهای ونتوری<sup>۱</sup> و غبارگیرهای الکترواستاتیکی<sup>۲</sup> است (Wayne, 2000). غبارگیرهای الکترواستاتیکی با استفاده از نیروهای الکترواستاتیکی، ذرات و گرد و غبارات را از جریان گاز حامل جدا می‌کنند (Schmatloch, 2005). این دستگاهها با ایجاد اختلاف ولتاژ، گرد و غبارات را به سمت صفحات کشیده و از جریان گاز جدا می‌کنند (James, et al., 2010). کاربردهای صنعتی غبارگیرهای الکترواستاتیکی بیشتر در صنایعی مانند، نیروگاهها، صنایع فولاد، صنایع گچ و سیمان هستند (Cheremisinoff, 2002). همچنین یکی از خواص منفی غبارگیرهای

مصرف انرژی در هر سیستم صنعت، کم و بیش خسارات محیط زیستی را به همراه دارد. بنابراین، ارتقای کارایی مصرف انرژی می‌باید از اولویت بسیار بالایی در طراحی اکوسیستم‌های صنعتی برخوردار شود (Manahan, 1999). صنعت فولاد در مقایسه با سایر صنایع از نظر انرژی مورد نیاز، پرمصرف‌ترین صنعت در جهان به شمار می‌رود. روند رو به زوال منابع طبیعی و انرژی‌های فسیلی و ذخایر گاز، دانشمندان و پژوهشگران این عرصه را واداشته تا به منظور کاهش مصرف انرژی در این صنعت گام بردارند (اعزازی، ۱۳۸۸). در ارزیابی آثار محیط زیستی کارخانه‌ها فولاد که مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرد بیشترین آثار منفی مربوط به آلودگی هوای ناشی از فعالیت کوره ذوب الکتریکی (گرد و غبارها) است (Harley, 2002). همچنین وقتی به صدها هزار غبارگیر نصب شده

این هزینه‌ها، هزینه کل سرمایه‌های غبارگیرها مشخص می‌شود. برای تعیین هزینه‌های انرژی در غبارگیرها نیز ابتدا میزان مصرف انرژی آنها را باید بر اساس سیستم‌های مصرف‌کننده برق که به غبارگیرها متصل شده‌اند مانند هواکش‌ها، ترانسفورماتورها و پمپ‌ها به دست آورده و سپس با استفاده از قیمت واقعی برق و کارکرد سالانه غبارگیرها، هنگامی که کوره‌های ذوب، عملیات ذوب را انجام می‌دهند، هزینه مصرف انرژی سالانه آنها محاسبه کرد. در نهایت می‌باید مجموع هزینه‌های سرمایه و انرژی که در دوره عمر کاری غبارگیرها به دست آمده است، به مقایسه و انتخاب بهینه غبارگیر پرداخت.

### معادلات حاکم بر میزان مصرف انرژی سالانه و سرمایه در

#### غبارگیرهای الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر

برای تعیین میزان مصرف انرژی سالانه در هواکش سانتریفوژ متصل به غبارگیرهای الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر از رابطه (۱) استفاده می‌شود (Mussatti, D.C., 2002).

$$FP = 0.000181 (Q)(\Delta P)(\theta) \quad (1)$$

که در آن FP قدرت الکتروموتور برحسب کیلووات در سال،  $\theta$  مدت زمان کارکرد سالانه برحسب ساعت در سال است و Q میزان ظرفیت مکش برحسب فوت مکعب در دقیقه که بر اساس استانداردهای کمیته انجمن بهداشت صنعتی آمریکا<sup>۳</sup> در انواع فرایندها تعیین می‌شود (ACGIH, 2002).  $\Delta P$  افت فشار سیستم برحسب اینچ آب و میزان آن در غبارگیرهای الکترواستاتیکی معمولاً کمتر از ۰/۵ اینچ ستون آب است (Wayne, 2000) و در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر مطابق رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\Delta P = \frac{V^2 \rho_g A^{0.133} \left(\frac{L}{G}\right)^{0.78}}{1270} \quad (2)$$

که در آن  $\Delta P$  افت فشار ونتوری اسکرابر برحسب اینچ آب،  $\rho_g$  چگالی گاز برحسب پوند بر فوت مکعب،  $v$  سرعت سیال در گلوگاه برحسب فوت در ثانیه،  $L/G$  میزان مایع به گاز برحسب گالن در ۱,۰۰۰ فوت مکعب، و A سطح مقطع گلوگاه ونتوری اسکرابر برحسب فوت مربع هستند. در رابطه (۶) که به معادله هسکچ<sup>۴</sup> معروف است، میزان مایع به گاز در حدود ۳ الی ۱۰ گالن به ازای ۱,۰۰۰ فوت مکعب در نظر گرفته می‌شود (Daniel, 2002).

الکترواستاتیکی‌ها تولید گاز ازن است (Hautanen, 1986, linmao, et al., 2000 Islamov, et al., 2011) و تأثیر مخرب بر سیستم تنفسی انسان و گیاه دارد (Jakober, 2008). غبارگیرهای ونتوری اسکرابر یکی از مهمترین غبارگیرهای تر است که در اثر برخورد آب و گرد و غبارها استفاده می‌شود.

ساز و کار ونتوری اسکرابر به این صورت است که، ابتدا آب با پمپ آب به قسمت همگرای و یا گلوگاه ونتوری وارد می‌شود سپس جریان هوای آلوده که شامل گازها و گرد و غبار است نیز وارد بخش همگرایی ونتوری می‌شود. در اثر اختلاط آب و هوای آلوده، گرد و غبار و گازها شسته شده و در هنگام ورود به بخش واگرایی ونتوری به صورت قطرات آب درآمده و از طریق لوله هادی به قسمت فاضلاب مربوط هدایت می‌شود (Agranovski & Whitcombe, 2000).

با توجه به اهداف اکولوژی صنعتی مبنی بر کاهش مصرف انرژی، سرمایه و مواد، نیاز به تحقیق برای انتخاب سیستم غبارگیر مناسب در صنعت فولاد (کوره ذوب) با اهداف فوق ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس در این مقاله میزان مصرف انرژی و مواد مصرفی سالانه، همچنین هزینه‌های سرمایه‌ای (با در نظر گرفتن نرخ تنزیل) برای غبارگیرهای الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر محاسبه می‌شوند. شایان ذکر است هرچقدر مصرف انرژی بیشتر شود میزان خسارت‌های محیط‌زیستی نیز بیشتر می‌شود برای مثال در نیروگاه‌های گازی به ازای تولید هر کیلو وات ساعت برق در حدود ۹۰ الی ۲۷۰ ریال خسارت زیست‌محیطی وارد می‌شود (کرباسی، ۱۳۸۴).

### روش کار

در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش محاسباتی، به میزان و هزینه‌های مصرف انرژی، هزینه‌های سرمایه اولیه و هزینه‌های کل در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی را بر اساس عمر کارکرد آنها (۲۰ سال) در کوره‌های ذوب الکتریکی ۶/۳ و ۱۲ تنی صنعت فولاد پرداخته و در نهایت با مقایسه یکدیگر، چگونگی انتخاب آنها در صنعت فولاد مشخص می‌شوند. به این نحو که برای تعیین هزینه سرمایه لازم است ابتدا هزینه‌های مربوط به خرید، نصب و راه‌اندازی مربوط به هر کدام از غبارگیرها را به دست آورده و سپس هزینه‌های استهلاک غبارگیرها را بر اساس عمر کارکرد آنها محاسبه کرد و در نهایت با استفاده از نرخ تنزیل و بهره بانکی، سود سالانه هزینه خرید و نصب دستگاهها را به دست آورده، تا از مجموع

### تعیین هزینه‌های سرمایه و انرژی در غبارگیرهای، ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی

هزینه‌های سرمایه در یک سیستم غبارگیر برابر با مجموع هزینه‌های خرید اولیه، نصب، استهلاک و هزینه سود سالانه سرمایه است. حداقل هزینه خرید در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر به‌طور تقریبی به ازای هرفوت مکعب در دقیقه برابر ۱۰,۰۰۰ ریال و هزینه نصب آن ۰/۵۶ هزینه خرید آن است. در حالی که حداقل هزینه خرید در غبارگیرهای الکترواستاتیکی به‌طور تقریبی به ازای هر فوت مکعب در دقیقه ۱۵,۰۰۰ ریال و هزینه نصب آن ۰/۶۷ هزینه خرید آن برآورد می‌شود (Baha, 2005).

برای تعیین هزینه استهلاک سالانه در سیستم‌های غبارگیر لازم است ابتدا نرخ تنزیل را که برابر با اختلاف بالاترین سود بانکی از میانگین نرخ تورم است محاسبه کرد سپس با در نظر گرفتن عمر دستگاه، ضریب فاکتور برگشت سرمایه را مطابق رابطه (۷) به‌دست آورده و در نهایت این ضریب را در هزینه سرمایه اولیه مطابق رابطه (۸) ضرب کرد تا هزینه استهلاک سالانه در غبارگیر به دست آید.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

$$CRC = C \times CRF \quad (8)$$

که در آن CRF ضریب فاکتور برگشت سرمایه،  $i$  نرخ تنزیل،  $n$  عمر سیستم، CRC هزینه استهلاک و  $C$  هزینه سرمایه است. برای به‌دست آوردن هزینه سود سالانه سرمایه لازم است هزینه کل سرمایه اولیه را در نرخ تنزیل مطابق با رابطه (۹) ضرب کرد

$$CB = i \times TC \quad (9)$$

که در آن CB هزینه سود سالانه سرمایه،  $i$  نرخ تنزیل، TC هزینه کل سرمایه اولیه است. برای محاسبه هزینه‌های انرژی می‌باید پس از هدفمندسازی یارانه‌ها به ازای هر کیلو وات ساعت ۴۰۰ ریال هزینه مصرف برق صنعتی را که در کشور جمهوری اسلامی ایران به‌طور متوسط، درمیزان مصرف انرژی سالانه که در رابطه‌های (۱)، (۳) و (۵) به آن اشاره شد ضرب کرد.

برای تعیین میزان مصرف انرژی سالانه ناشی از ترانسفورماتورها در الکترواستاتیکی‌ها مطابق با رابطه (۳) عمل می‌شود (Daniel, 2002).

$$OP = 1.94 \times 10^{-3} A \theta \quad (3)$$

که در آن OP میزان مصرف انرژی برحسب کیلووات ساعت،  $A$  مساحت صفحات در غبارگیر الکترواستاتیکی برحسب فوت مربع  $\theta$  میزان ساعت در سال هستند.

به منظور تعیین مساحت صفحات برای محاسبه مصرف انرژی سالانه ناشی از ترانسفورماتور و سیستم ضربه‌ای در الکترواستاتیکی مطابق با رابطه ۴ عمل می‌شود (EPA, 2002).

$$\eta = 1 - e^{\left(\frac{-wA}{Q}\right)} \quad (4)$$

که در آن  $\eta$  بازده جمع‌آوری ذرات،  $A$  مساحت کل صفحات جمع‌آورنده برحسب مترمربع،  $Q$  میزان دبی گاز برحسب مترمکعب برثانیه،  $e$  عدد نپرین،  $w$  سرعت مهاجرت ذرات برحسب متر برثانیه است. برای محاسبه میزان مصرف انرژی سالانه ناشی از الکتروموتورپمپ در ونتوری اسکرابر لازم است ابتدا افت فشار پمپ را که تابع طول ونتوری اسکرابر است (۱۵/۵) برابر قطر گلوگاه ونتوری را مطابق رابطه (۵) به‌دست آورده، سپس میزان انرژی ناشی از الکتروموتور پمپ را مطابق با رابطه ۶ محاسبه کرد:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

که در آن  $Q$  میزان دبی گاز برحسب فوت مکعب در دقیقه،  $V$  سرعت سیال در گلوگاه برحسب فوت در دقیقه، و  $A$  سطح مقطع گلوگاه ونتوری اسکرابر برحسب فوت مربع است.

$$HP_{pump} = \frac{\Delta P_{pump} \times \frac{L}{G} \times \frac{Q}{1000} \times \gamma}{3952.6 \eta_{pump}} \quad (6)$$

که در آن  $HP_{pump}$  نیروی الکتروموتورپمپ برحسب اسب بخار،  $\eta_{pump}$  بازده پمپ (معمولاً برابر با ۰/۷) افت فشار پمپ برحسب فوت،  $L/G$  نسبت مایع به گاز برحسب گالن در ۱,۰۰۰ فوت مکعب،  $Q$  میزان دبی گاز برحسب فوت مکعب در دقیقه و  $\gamma$  وزن مخصوص مایع در اسکرابر (۱/۱۲) است.

## مصرف انرژی سالانه در الکترواستاتیکی و ونتوری اسکرابر

### متصل به کوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد

برای دستیابی به میزان مصرف انرژی در الکترو فیلتر لازم است میزان مصرف انرژی در هواکش و ترانسفورماتور مربوط به غبارگیر الکترواستاتیکی را محاسبه کرد.

با توجه به استانداردهای کمیته انجمن بهداشت صنعتی آمریکا مربوط به VS شماره ۱۰۵ ظرفیت مکش به ازای هرتن فولاد برابر با ۲۵۰۰ فوت مکعب بر دقیقه است بنابراین میزان مکش برای کوره‌هایی ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد برابر با ۷،۵۰۰، ۱۵،۰۰۰ و ۳۰،۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه (ACGIH, 2002).

برای دستیابی به میزان مصرف انرژی در یک غبارگیر الکترواستاتیکی لازم است میزان مصرف انرژی در هواکش و ترانسفورماتور مربوط به غبارگیر الکترواستاتیکی را محاسبه کرد. حال با قرار دادن میزان افت فشار (۰/۵ اینچ آب)، سرعت مهاجرت ذرات در غبارگیر الکترواستاتیکی (۱۲/۱ سانتیمتر بر ثانیه)، بازده ۹۹ درصد، کارکرد سالانه ۲۹۲۰ ساعت (روزی ۸ ساعت) و رنج الکتروموتورها در بازار جهانی در روابط شماره‌های (۳)، (۴) و (۱) میزان مصرف انرژی سالانه در غبارگیر الکترواستاتیکی متصل به کوره ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد به ترتیب برابر با ۱۰،۴۱۵، ۲۰،۸۶۴ و ۴۱،۷۲۹ کیلو وات ساعت است.

شایان ذکر است که علت انتخاب روزانه ۸ ساعت کارکرد غبارگیرها بر مبنای مرحله عملیات ذوب است. کوره‌های ذوب دائماً در حال کار است، ولی چرخه ذوب که شامل سه مرحله عملیات بارگیری (قراضه و سنگ‌های معدنی)، عملیات ذوب و عملیات تخلیه است، فقط در مرحله عملیات ذوب که آلودگی وجود داشته و لازم است که غبارگیرها مورد استفاده قرار گیرند، و زمان آن تقریباً ثلث کل زمان سیکل ذوب است، انجام می‌گیرد.

برای تعیین میزان انرژی سالانه در سیستم ونتوری اسکرابر لازم است میزان انرژی سالانه ناشی از الکتروموتور هواکش و الکتروموتور پمپ آب با یکدیگر جمع می‌شوند.

حال با توجه به سرعت گاز در گلوگاه ونتوری (۵،۲۹۸ فوت در دقیقه) و قرار دادن آن در روابط (۵)، (۲)، (۱) و (۶) میزان مصرف انرژی سالانه در غبارگیر ونتوری اسکرابر متصل به کوره ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد به ترتیب برابر با ۲۲۷،۲۸۸ و ۷۴۱،۷۳۸ کیلو وات ساعت است.

## هزینه‌های مصرف انرژی سالانه در الکترواستاتیکی و

### ونتوری متصل به کوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد

از آنجایی که هزینه‌های مصرف برق صنعتی در کشور ایران به ازای هر کیلو وات ساعت ۴۰۰ ریال است. بنابراین باتوجه به میزان مصرف انرژی سالانه در سیستم ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۳، ۶ و ۱۲ تنی فولاد که محاسبه شد هزینه‌های مصرف انرژی سالانه در الکترواستاتیکی برای کوره ۳، ۶ و ۱۲ تنی به ترتیب برابر با ۴،۱۶۶،۰۰۰، ۸،۳۴۵،۶۰۰، ۱۶،۶۹۱،۶۰۰ ریال و در غبارگیر ونتوری اسکرابر به ترتیب برابر با ۹،۰۵۲،۰۰۰، ۱۸،۱۰۴،۰۰۰ و ۳۶،۲۰۸،۰۰۰ ریال است.

## هزینه‌های سرمایه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی

### در کوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ تنی صنعت فولاد

حداقل هزینه خرید در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی به‌طور تقریبی به ازای هرفوت مکعب در دقیقه به ترتیب برابر ۱۰،۰۰۰ و ۱۵،۰۰۰ ریال و هزینه نصب آن ۰/۵۶ و ۰/۶۷ هزینه خرید آن است. بنابراین هزینه‌های سرمایه خرید و نصب در ونتوری به ترتیب برابر با ۱۱۷،۰۰۰،۰۰۰، ۲۳۴،۰۰۰،۰۰۰، ۴۶۸،۰۰۰،۰۰۰ و در غبارگیر الکترواستاتیکی برابر با ۱۸۷،۸۷۵،۰۰۰، ۳۷۵،۷۵۰،۰۰۰ و ۷۵۱،۵۰۰،۰۰۰ ریال است. درحالی‌که حداقل هزینه خرید در غبارگیرهای الکترواستاتیکی به‌طور تقریبی به ازای هر فوت مکعب در دقیقه ۱۵،۰۰۰ ریال و هزینه نصب آن ۰/۶۷ هزینه خرید آن برآورد می‌شود. حال با توجه به هزینه‌های سرمایه اولیه طول عمر غبارگیرها که در حدود ۲۰ سال است (Bhasker, 2011). همچنین نرخ تنزیل واقعی معادل ۰/۰۱۱ (برابر با اختلاف بالاترین سود بانکی از میانگین نرخ تورم است که در کشور ایران در سال ۱۳۸۹ به ترتیب برابر با ۲۱/۰۵ و ۱۹/۹ درصد بود)، هزینه‌های استهلاک در غبارگیرهای ونتوری برای کوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ تنی مطابق با روابط شماره (۶) و (۷) به ترتیب برابر با ۱۱،۷۰۰،۰۰۰، ۵،۸۵۰،۰۰۰ و ۲۳،۴۰۰،۰۰۰ ریال و در غبارگیرهای الکترواستاتیکی به ترتیب برابر با ۹،۳۹۳،۷۵۰، ۱۸،۷۸۷،۵۰۰ و ۳۷،۵۷۵،۰۰۰ ریال است. با قراردادن نرخ تنزیل و هزینه کل سرمایه اولیه در رابطه (۸)، هزینه سود سالانه سرمایه در غبارگیرهای ونتوری برابر با ۱۲۸۷،۰۰۰، ۲،۵۷۴،۰۰۰ و ۵،۱۴۸،۰۰۰ ریال و در غبارگیرهای الکترواستاتیکی برابر با ۲،۰۶۶،۶۲۰، ۴،۱۳۳،۲۵۰ و ۸،۲۶۶،۵۰۰ ریال است.

**نتایج**

اسکرابر متصل به کوره‌های ۳ بسیار کمتر از غبارگیر الکترواستاتیکی است. در حالی که در کوره ۱۲ تنی این نسبت کاهش پیدا می‌کند. مقایسه هزینه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۳ تنی در ۲۰ سال (عمر کاری دستگاهها) کارکرد غبارگیرها در نمودار شماره (۱) نشان داده شده و مبین این است که میزان هزینه کل انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۳ تنی پس از گذشت ۵ سال با یکدیگر برابر می‌شود و پس از آن بتدریج هزینه کل غبارگیر ونتوری اسکرابر افزایش پیدا می‌کند.

در نمودار شماره (۲) نیز مقایسه هزینه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۶ تنی نشان داده شده و نشان‌دهنده این است که هزینه کل در دو غبارگیر پس از گذشت ۲ سال با یکدیگر تقریباً برابر می‌شود. در نمودار شماره (۳) نیز این هزینه در همان ابتدای سال اول تقریباً برابر می‌شود.

نتایج به دست آمده از محاسبات مربوط به هزینه‌های سرمایه کل سالانه، شامل خرید، نصب، راه‌اندازی، استهلاک و سود سالانه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی متصل به کوره‌های ۳۶ و ۱۲ تنی صنعت فولاد در جدول شماره (۱) نشان داده شده است و مبین این است که هزینه غبارگیرهای الکترواستاتیکی ۱/۶ برابر غبارگیرهای ونتوری است.

نتایج به دست آمده از محاسبات مربوط به مصرف و هزینه‌های انرژی سالانه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی متصل به کوره‌های ۳/۶ و ۱۲ تنی صنعت فولاد در جداول شماره (۲) و (۴) آورده شده است و نشان‌دهنده مصرف و هزینه چشمگیر انرژی سالانه غبارگیرهای ونتوری نسبت به غبارگیر الکترواستاتیکی است. همچنین میزان هزینه سالانه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی در جدول شماره (۳) ذکر شده است و نشانگر این است که هزینه کل انرژی و سرمایه در غبارگیر ونتوری

**جدول شماره (۱): میزان هزینه سرمایه سالانه غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی (ریال)**

ردیف	نوع غبارگیر	کوره ۳ تنی	کوره ۶ تنی	کوره ۱۲ تنی
۱	ونتوری اسکرابر	۱۲,۴۱۳,۷۰۰	۲۴۸,۲۷۴,۰۰۰	۴۹۶,۵۴۸,۰۰۰
۲	الکترواستاتیکی	۱۹۹,۳۳۵,۳۷۰	۳۹۸,۶۷۰,۷۵۰	۷۹۰,۷۳۴,۱۵۰

**جدول شماره (۲): میزان هزینه انرژی سالانه غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی (ریال)**

ردیف	نوع غبارگیر	کوره ۳ تنی	کوره ۶ تنی	کوره ۱۲ تنی
۱	ونتوری اسکرابر	۱۸,۱۰۴,۰۰۰	۹۰,۹۱۵,۲۰۰	۲۹۶,۶۹۵,۲۰۰
۲	الکترواستاتیکی	۴,۱۶۶,۰۰۰	۸,۳۴۵,۶۰۰	۱۶,۶۹۱,۶۰۰

**جدول شماره (۳): میزان هزینه سالانه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی (ریال)**

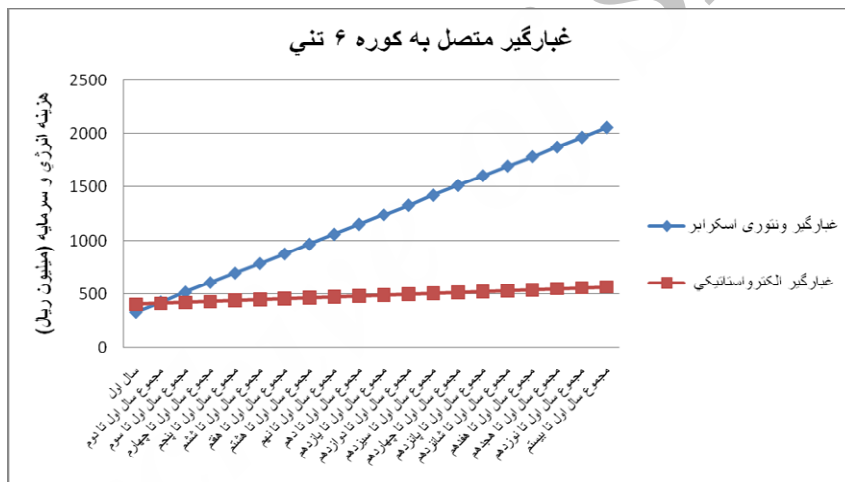
ردیف	نوع غبارگیر	کوره ۳ تنی	کوره ۶ تنی	کوره ۱۲ تنی
۱	ونتوری اسکرابر	۱۴۲,۲۴۱,۰۰۰	۳۳۹,۱۸۹,۲۰۰	۷۹۳,۲۴۳,۲۰۰
۲	الکترواستاتیکی	۲۰,۳۵۰,۱۳۷۰	۴۰,۷۰۱,۶۳۵۰	۸۱۴,۰۳۳,۱۰۰

**جدول شماره (۴): میزان مصرف انرژی سالانه غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی (کیلو وات ساعت)**

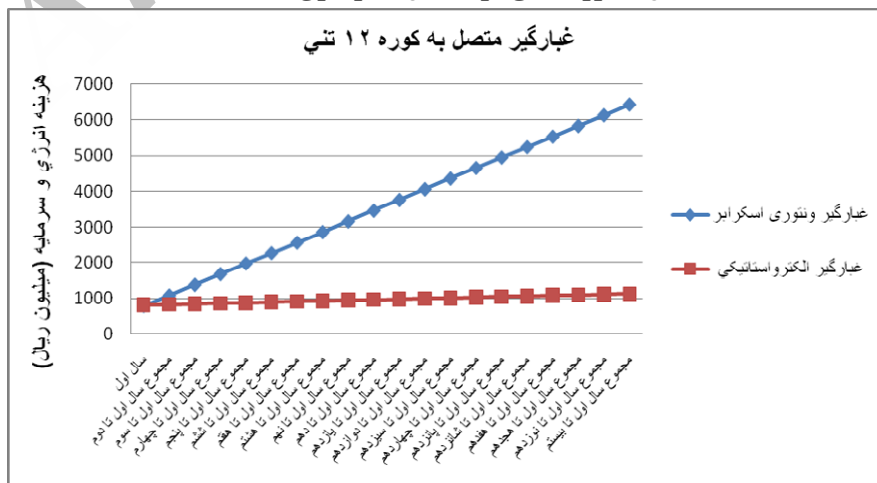
ردیف	نوع غبارگیر	کوره ۳ تنی	کوره ۶ تنی	کوره ۱۲ تنی
۱	ونتوری اسکرابر	۴۵,۲۶۰	۲۲۷,۲۸۸	۷۴۱,۷۳۸
۲	الکترواستاتیکی	۱۰,۴۱۵	۲۰,۸۶۴	۴۱,۷۲۹



نمودار شماره (۱): مقایسه هزینه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۳ تنی در ۲۰ سال (عمر کاری دستگاهها)



نمودار شماره (۲): مقایسه هزینه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۶ تنی در ۲۰ سال (عمر کاری دستگاهها)



نمودار شماره (۳): مقایسه هزینه انرژی و سرمایه در غبارگیرهای ونتوری اسکرابر و الکترواستاتیکی متصل به کوره ۱۲ تنی در ۲۰ سال (عمر کاری دستگاهها)

**بحث و نتیجه گیری**

با توجه به نتایج حاصل از محاسبات و اهداف اکولوژی صنعتی به منظور کاهش مصرف انرژی، سرمایه، و بالطبع کاهش خسارت‌های محیط زیستی، در صورتی که نیاز صنعت فولاد، کوره ۶ تن باشد و تصمیم به استفاده از غبارگیر ونتوری شده باشد، ترجیحاً از دو کوره ۳ تنی استفاده می‌شود، زیرا اگرچه در هزینه سرمایه اولیه تغییر معناداری پیدا نمی‌شود ولی میزان مصرف برق در دو کوره ۳ تنی مجموعاً سالانه در حدود ۹۰,۰۰۰ کیلو وات، در حالی که در یک کوره ۶ تنی در حدود ۱۲۷,۰۰۰ کیلو وات است.

در نتیجه در حدود ۱/۵ برابر در مصرف برق صرفه جویی خواهیم داشت. همچنین خروجی آلاینده‌ها از نیروگاهها ۱/۵ برابر کاهش یافته و در نهایت خسارت‌های محیط زیستی نیز حداقل ۱/۵ برابر کاهش خواهد یافت، زیرا به دلیل عوارض تجمعی آلاینده‌ها، با کاهش خروجی آلاینده‌ها خسارت‌های زیست محیطی به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. در صورتی که نیاز صنعت فولاد، کوره ۶ تن باشد و تصمیم به استفاده از غبارگیر الکترواستاتیکی شده باشد، استفاده از دو کوره ۳ تنی ضروری به نظر نمی‌رسد، زیرا در کلیه هزینه‌ها و مصرف برق تغییری حاصل نمی‌شود. با افزایش تناژ کوره‌های الکتریکی صنایع فولاد، تأثیر هزینه اولیه، هزینه مصرف انرژی سالانه، هزینه کل (مصرف انرژی سالانه و هزینه اولیه) همچنین میزان مصرف انرژی در غبارگیرهای ونتوری و الکترواستاتیکی به این شرح است.

۱) میزان هزینه سرمایه اولیه در غبارگیرهای الکترواستاتیکی نسبت به غبارگیرهای ونتوری در حدود ۱/۶ است.

۲) میزان هزینه مصرف انرژی غبارگیرهای ونتوری نسبت به غبارگیرهای الکترواستاتیکی با سپری شدن زمان، افزایش می‌یابد.

۳) با افزایش ظرفیت کوره‌ها میزان مصرف برق در سیستم غبارگیر ونتوری بشدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال میزان مصرف برق سالانه در غبارگیر ونتوری اسکرابر متصل به کوره ۳ تنی ۴/۵ برابر غبارگیر الکترواستاتیکی است. در حالی که با دو برابر شدن

ظرفیت یعنی کوره ۶ تنی این عدد به یازده برابر و در کوره ۱۲ تنی سالانه تقریباً به هجده برابر غبارگیر الکترواستاتیکی می‌رسد. ۴) مجموع کل هزینه‌های غبارگیر ونتوری اسکرابر در کوره الکتریکی ۳ تنی صنعت فولاد در سال اول تقریباً ۴۰ درصد کمتر از مجموع کل هزینه‌های غبارگیر الکترواستاتیکی است در صورتی که در پایان دوره عمر کاری غبارگیرها (۲۰ سال) هزینه کل غبارگیر ونتوری به بیش از دو برابر غبارگیر الکترواستاتیکی می‌رسد. در حالی که مجموع کل هزینه‌های غبارگیر ونتوری اسکرابر در یک کوره الکتریکی ۶ تنی صنعت فولاد در پایان دوره عمر کاری غبارگیرها (۲۰ سال) چهار برابر غبارگیر الکترواستاتیکی می‌رسد، در کوره ۱۲ تنی به بیش از شش برابر خواهد رسید. در نتیجه با افزایش ظرفیت کوره‌ها مجموع کل هزینه‌های غبارگیر ونتوری اسکرابر نسبت به مجموع کل هزینه‌های غبارگیر الکترواستاتیکی افزایش می‌یابد.

استفاده از غبارگیرهای ونتوری اسکرابر به لحاظ مصرف انرژی زیاد که منجر به تولید انواع گازها از جمله دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، مونواکسید کربن، ترکیبات آلی و ذرات از نیروگاهها می‌شود که باعث آثار زیان بار بر روی انسان‌ها، گیاهان و محیط زیست می‌شود و از طرف دیگر (علیرغم مصرف انرژی کم) به دلیل افزایش ولتاژ، منجر به تولید ازن تروپوسفری می‌شود (Sillanpaa, 2008).

همچنین این گاز نیز باعث آثار زیان بار بر روی انسان، گیاهان و محیط زیست می‌شود، بنابراین اندازه‌گیری این گاز تأثیر بسزایی در انتخاب غبارگیرهای الکترواستاتیکی و غبارگیرهای ونتوری در تناژهای بیش از ۳ تن دارد. از طرفی توجه به نفوذ آبهای آلوده ناشی از ونتوری اسکرابر به سفره‌های آبهای زیرزمینی و تصفیه آن، حایز اهمیت است.

**یادداشت‌ها**

- 1- Electro static precipitator (ESP)
- 2- Venturi Scrubber
- 3- American Conferences Governmental Industrial Hygiene (ACGIH)
- 4- Hesketh

**منابع مورد استفاده**

عزازی، ع. ۱۳۸۸. راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت فولاد کشور. مجموعه مقالات سمپوزیوم فولاد ۸۸. ۱۱ و ۱۲ اسفند ص ۸۳۲ و ۸۳۱.

کرباسی، ع. ۱۳۸۴. مدیریت زیست محیطی نیروگاهها. سازمان بهره‌وری انرژی ایران. وزارت نیرو.

- ACGIH .2002. Industrial ventilation, A manual of recommended practice, Michigan, U.S.A
- Agranovski, J.E and Whitcombe, J.M. 2000. Optimisation of venturi scrubber for the removal of aerosol particle. *J. Aerosol Sci* Vol 31:164-165
- Baha, S. 2005. How Can We Reduce the Energy Consumption of Pulse-jet dust Collectors in order to Reap Economic, Ecological, and Social Benefits. Royal roads university ACGIH, 2002. Industrial ventilation, Michigan. USA
- Berwick, G. 2005. New Technology can drastically reduce Global Warming" Canada. [www.qamanage.com/Files/GlobalWarming.pdf](http://www.qamanage.com/Files/GlobalWarming.pdf)
- Bhasker, C. 2011. Flow simulation in Electro Static Precipitator (ESP) ducts with turning vanes. *Advances in Engineering Software*. doi:10.16/j.advensoft.2011.04.002
- Cheremisinoff, N.P. 2002. Handbook of Air Pollution Prevention and Control. Elsevier Science (U.S.A).
- Harley, P. 2002. Safety and Health in the Iron and Steel Industry. Geneva, International Labour office, pp:236
- Hautanen, J. 1986. Optimization of filtration efficiency and ozone production of the electrostatic precipitator. *Pergamon journals*, vol 17, pp: 622-626
- Jakober, C. 2008. Evolution of ozone emission from portable indoor air cleaners electrostatic precipitators and ionizers, staff technical report.
- Linmao, L., et al. 2000. The effect of wire heating and configuration on ozone emission in a negative ion generator. *Journal of electrostatics*, vol. 48, pp: 81-99
- Manahan, S.E. 1999. Industrial Ecology. Environmental chemistry and hazardous waste. cleaner production. Publisher: Taylor & Francis, Inc.
- Mussatti, D.C. .2002. EPA Air pollution control cost manual " Sixth Edition
- Islamov, R. 2011. A peculiarity of silver-base wire heating on ozone generation. *Journal of electrostatic*. Doi:10.1016/J.elstat.2011.03.015
- Schmatloch, V. 2005. Design and characterization of an electrostatic precipitator for small heating appliances. *Journal of electrostatics*, vol 63, pp:85-100
- Sillanpaa, M. 2008. High collection efficiency electro static Precipitator for in vitro cell exposure to concentrated ambient particulate matter. *Journal of Aerosol science*, vol 39, pp: 335-347
- Wayne, T. 2000. Air pollution Engineering Manual: second edition. John Wiley and sons, INC