

تحلیل انرژی و انرژی بکارگیری سوخت‌های جایگزین در کوره سیمان

محمدرضا علیگودرز

استادیار- دانشگاه شهید رجایی
maligoodarz@yahoo.com

اکرم عوامی

استادیار- دانشکده مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی شریف
avami@sharif.ir

مرتضی زندیه

کارشناس ارشد تبدیل انرژی-دانشگاه شهید رجایی
mortezaandie@yahoo.com

علیرضا رهبری

استادیار-دانشگاه شهید رجایی
ar.rahbari@gmail.com

چکیده

صنعت سیمان از جمله صنایع پرمصرف در حوزه انرژی است. بنابراین کاهش مصرف انرژی در این صنعت از جمله مسائل حائز اهمیت است. مطالعه حاضر، سوخت‌های جایگزین نظیر زیابله‌های جامد شهری و تایرهای فرسوده در کوره‌های سیمان را مدنظر قرار داده است. موازنه جرم و انرژی و انرژی برای بخش‌های مختلف کوره در حالت‌های مختلف برای به‌کارگیری این سوخت‌ها انجام شده است. علاوه بر این، درباره مقدار آلاینده‌های متصاعد شده از کوره نیز مطالعه و بررسی انجام گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سوخت‌های جایگزین رابطه معکوس با دمای گاز خروجی دارد؛ بدین معنا که هر چه درصد جایگزینی سوخت بالاتر می‌رود، دمای گاز خروجی کاهش بیشتری می‌یابد و به دمای محیط نزدیک می‌شود. به طور کلی، احتراق سوخت‌های جایگزین درون کوره سیمان، با تامین همان مقدار انرژی مورد نیاز در صورت استفاده از سوخت‌های فسیلی، آلاینده کمتری تولید می‌کند. بعلاوه پس از افزودن سوخت جایگزین به ترکیب سوخت فسیلی روند کاهش مجموع اتلاف و تخریب انرژی مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: سوخت جایگزین- آلاینده- موازنه انرژی- موازنه انرژی- کوره سیمان.

۱. مقدمه

معضل استفاده سرسام آور از سوخت‌های فسیلی در قرن اخیر و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از به‌کارگیری این گونه منابع انرژی در صنایعی چون نفت و گاز ضروری است. توسعه صنعتی قرن اخیر از طرفی جهان را با خطر کاهش و حتی محدودیت استفاده از منابع سوخت فسیلی روبرو می‌کند و از طرف دیگر سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای از جمله کربن دی‌اکسید و در نتیجه، افزایش دمای میانگین جهانی می‌گردد که می‌تواند منجر به تغییرات اقلیمی چون آب شدن یخ‌های قطبی و بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها شود. این مسائل سبب شده است که روش‌هایی جهت کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌های گلخانه‌ای ابداع شود. از جمله این روش‌ها که به طور همزمان موجب کاهش گازهای گلخانه‌ای، کاهش استفاده از منابع سوخت فسیلی و نیز منافع زیست محیطی می‌شود می‌توان به استفاده از سوخت‌های جایگزین که در واقع سوخت‌های مشتق شده از ضایعات و زباله‌های شهری هستند در صنایعی مانند صنعت سیمان اشاره داشت.

طبق برآورد سازمان بین‌المللی انرژی، با استفاده از ذخایر نفت و گاز خاورمیانه و شمال آفریقا نیاز به انرژی دنیا تا ۲۵ سال آینده و در شرایط بهینه مصرف انرژی تا مدتی طولانی‌تر تامین خواهد شد. رشد سالانه مصرف انرژی‌های فسیلی تا سال ۲۰۳۰ توسط سازمان بین‌المللی انرژی معادل ۶،۱٪ پیش‌بینی شده است. در نتیجه در سال ۲۰۳۰ دنیا نیاز به ۳،۱۶ میلیارد

تن نفت خام دارد. مصرف نفت از ۸۴ میلیون بشکه در سال ۲۰۰۵ به ۹۹ میلیون بشکه در سال ۲۰۱۵ و ۱۱۶ میلیون بشکه در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید. بیش از ۶۷٪ رشد مصرف انرژی دنیا نیز در اثر رشد جمعیت کشورهای در حال توسعه خواهد بود [۱].

کل تولید متعارف و نامتعارف نفت از ۷۷ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۰۲ به ۳،۱۲۱ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. به بیان دیگر، در مدت ۲۸ سال نزدیک به ۳،۴۴ میلیون بشکه در روز بر کل تولید نفت جهان افزوده خواهد شد که ۲،۳۸ میلیون بشکه در روز (۶۹ درصد کل افزایش تولید روزانه نفت) به منطقه خاورمیانه اختصاص خواهد داد.

طبق محاسبات پیش‌بینی شده، رشد سالانه مصرف انرژی در خاورمیانه معادل ۹،۲٪ است که دو برابر شدن مصرف را تا سال ۲۰۳۰ به دنبال خواهد داشت. دو کشور عربستان و ایران همانند امروز در سال ۲۰۳۰ نیز تقریباً ۴۵٪ از مصرف انرژی منطقه را به خود اختصاص خواهند داد.

سهام مصرف انرژی حرارتی در صنعت سیمان ایران ۱۴ درصد سهم مصرف در کل صنایع و ۳ درصد مصرف در کل کشور است. همچنین سهم مصرف انرژی الکتریکی در صنعت سیمان ۱۰ درصد سهم مصرف در کل صنایع و ۳،۵ درصد مصرف در کل کشور است [۲]. از لحاظ مصرف انرژی حرارتی، مقدار متوسط کشور ۸۰۰ کیلوکالری در هر کیلوگرم کلینکر و متوسط جهانی نیز ۷۶۰ کیلوگرم در هر کیلوگرم کلینکر است. همچنین مصرف برق نیز ۱۰۰ کیلووات ساعت بر هر تن برای کشور و ۹۰ کیلووات ساعت بر هر تن برای مقدار متوسط جهانی است [۲].

لذا صنعت سیمان یکی از صنایع انرژی‌بر محسوب می‌شود. با توجه به برنامه توسعه برای افزایش تولید در این بخش در ایران و جهان بررسی راه‌های کاهش مصرف انرژی در این صنعت بسیار حائز اهمیت است.

در مقاله ماسوتراکوس و همکاران در سال ۱۹۹۹ تشکیل کلینکر در کوره سیمان گردان زغال سوز تحت شرایط عملکردی واقعی و با کد دینامیک سیالات محاسباتی تجاری متقارن برای فاز گازی مورد مطالعه قرار گرفت [۳]. در این مقاله از روش مونت کارلو برای تابش، یک کد حجم محدود برای معادله انرژی در دیواره کوره، یک کد جدید برای اجزا و معادلات بقای انرژی شامل واکنش‌های شیمیایی برای کلینکر استفاده شده است. همچنین بین پیش‌بینی‌های دمای فاز گازی، شار گرمایی تابشی و دمای کوره و کلینکر از یک روش تکراری استفاده شده است تا توزیع دمای دیواره داخلی، شامل محاسبه جریان گرما به کلینکر پیش‌بینی شود. در نهایت نیز نتیجه گرفته شده است که حالت غالب انتقال حرارت بین گاز و دیواره کوره به روش تابش است و نیز اتلاف حرارتی از طریق نسوزها به محیط حدود ۱۰٪ گرمای ورودی است و بیش از ۴۰٪ حرارت نیز صرف تولید کلینکر می‌شود.

در مقاله موژومدار و راناده در سال ۲۰۰۶ یک مدل یک بعدی جهت شبیه سازی فرآیندهای اصلی در بستر جامد کوره سیمان بررسی شده است [۴]. در مطالعات آنها واکنش جامد-جامد با تقریب شبه همگن مدل شده و نیز تغییرات ارتفاع بستر و تشکیل مذاب در ناحیه مشعل در درون کوره نیز در این مطالعه لحاظ شده است. معادلات تعادل انرژی شامل جابجایی، هدایت و تابش براساس حالت شبه تعادلی حل شده است. همچنین مدل آنها جهت بررسی امکان تغییر منحنی دما جهت کاهش مصرف انرژی کوره نیز استفاده شده است. این مدل می‌تواند به عنوان مبنایی برای مدلسازی سه بعدی نیز استفاده شود.

در مقاله گاگو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به منظور شبیه سازی ساختار مواد ریزدانه در یک کوره گردان در حالت تعادل، مدلی ارائه شده است [۵]. همچنین جهت پیش بینی ارتفاع بستر، سرعت محوری و زمان ماند متوسط مواد ریزدانه داده‌های تجربی استفاده شده است. برای ارزیابی زمان ماند نیز از فرمول گیرلی و لکنر در این مقاله استفاده شده است. مقایسه‌های انجام گرفته در مطالعات آنها نشان می‌دهد که گرچه فرمول فوق الذکر زمان ماند را پایین می‌آورد، اما شکل رضایت بخشی ارائه می‌دهد. در این مطالعه برای ارتفاع بستر و سرعت محوری از مدل مکانیکی سیمان و برای پیش بینی زمان ماند متوسط نیز از رابطه بر مبنای پدیده‌ها استفاده شده است که تطابق خوبی با داده‌های تجربی یافت شده دارد.

در مقاله چن در سال ۲۰۱۴ مدل ریاضی فرآیند ترمودینامیکی تولید کلینکر با سوختن فشرده کربن تشریح شده است [۶]. جزئیات مهم فرآیند مانند ویژگی‌ها و طول ناحیه انجام فرآیند، زمان ماند ماده و حالت سوختن کربن در هر ناحیه، مسیر واکنش تولید کلینکر و دمای سوخت ماکزیمم تعیین شده است. مشخص می‌شود که حالت سوختن فشرده کربن، احتراق سوخت و انتقال حرارت گاز-جامد را به همراه پیش گرمایش، کلسینه سازی، تولید کلینکر و سرمایه‌ش ریزدانه‌ها ترکیب می‌کند. نتیجه گرفته شده است که شبیه سازی‌های عددی می‌توانند ابزاری مفید برای فهم ایده های فرآیندی جدید باشند و نیز موجب توسعه فنی و بهبود طراحی فرآیند باشد.

در مقاله کاداتز و همکاران در سال ۲۰۱۳ به استفاده از سوخت جایگزین و اثرات آن در تولید سیمان پورتلند پرداخته شده است [۷]. ویژگی‌های ذاتی سیمان ذوب شده این امکان را فراهم می‌سازد که انواع زیادی از سوخت‌ها در کوره سوزانده شود. جهت آزمایش مناسب بودن سوخت، مدلسازی فرآیند و شبیه سازی جهت تعیین اثر نهایی سوخت روی عملکرد کوره و انتشار گاز گلخانه‌ای انجام گرفته است. با یک مدل دقیق و اطلاعات کافی، امکان شبیه سازی برای بازه وسیعی از سوخت‌های جایگزین وجود دارد. در مقاله آنها، شبیه سازی برای سه نوع سوخت جایگزین، یعنی لایی کربنی فرسوده، روانسازهای صنعتی استفاده شده و تایرهای فرسوده انجام شده است و موثرترین و بهترین مورد انتخاب شده است. از بین این سه مورد، از نظر انتشار کربن دی اکسید، روانسازها به عنوان بهترین مورد و لایی کربن به عنوان بدترین مورد انتخاب شده است. برعکس، با استفاده از لایی کربن، خوراک مورد نیاز به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است.

در مقاله ازاد رحمان و ام‌جی رسول، و دیگر همکاران در سال ۲۰۱۵ بر روی کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های زیست محیطی صنعت سیمان با استفاده از سوخت جایگزین و مواد خام مطالعه شده است [۸]. محیط آکالی، دمای بالا و زمان ماند طولانی، به کوره گردان اجازه می‌دهد که طیف وسیعی از مواد زائد و خطرناک در آن سوزانده شود. پیشرفت‌های اخیر در حوزه سوخت جایگزین در صنعت سیمان و مطالعات و تحقیقات گذشته در

مقاله آنها آمده است. همچنین مطالعات مربوط به اثرات سوخت جایگزین بر روی محیط زیست نیز در این مقاله گنجانده شده است. در مورد مطالعه موردی که در مقاله آنها در مورد استرالیا انجام گرفته است، ضایعات گوشت و استخوان با نرخ جایگزینی ۴۰٪ می‌تواند بهترین سوخت جایگزین باشد.

در مقاله بهاره رضا و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعات بر روی بررسی امکان تولید این نوع از سوخت از ضایعات جامد شهری در مترو ونکوور به منظور تولید همزمان در دو کوره سیمان در این منطقه متمرکز شده است [۹]. مقاله آنها اثرات زیست محیطی، هزینه‌ها و سودهای اقتصادی تولید سوخت مشتق از ضایعات را بررسی کرده است. بعلاوه، استفاده از سوخت مشتق از ضایعات به عنوان سوخت جایگزین در کوره‌های سیمان نیز بررسی شده است. تولید سیمان به عنوان یکی از فرآیندهای مخرب محیط زیست شناخته شده است و بنابراین کارخانه سیمان می‌تواند یکی از مقصدهای این سوخت جهت جایگزینی سوخت‌های فسیلی مرسوم باشد. در این مطالعه یک شناسایی زیست محیطی جامع با استفاده از یک فرآیند چرخه حیات انجام گرفته است. بعلاوه، یک تحلیل هزینه-سود جهت مطالعه فاکتورهای اقتصادی انجام شده است. در پایان نیز نتیجه گرفته شده است که تولید و استفاده از سوخت مشتق از ضایعات می‌تواند یک راه حل اقتصادی و زیست محیطی مناسب برای مترو ونکوور باشد.

یکی از روش‌های اصلی برای استفاده از ضایعات، به کارگیری آنها به عنوان منبع انرژی است. اگر این ضایعات دارای محتوای انرژی شیمیایی باشد، تنها برای استفاده به عنوان سوخت مناسب است. این محتوای انرژی اغلب به اندازه کسر قابل احتراق و محتوای رطوبت بستگی دارد. جهت به کارگیری بهتر انرژی شیمیایی موجود در ضایعات، سوخت‌های جایگزین که ترکیبی از ضایعات مختلف است توسعه داده شده است.

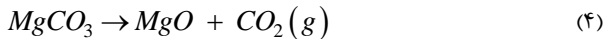
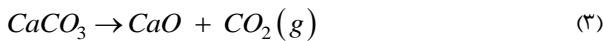
در مقاله موکزیکو و همکاران در سال ۲۰۰۳ برخی از این نوع سوخت‌ها از جمله: RDF مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰]. چندین سال مطالعه بر روی کارخانه‌های سیمان سراسر جهان به وضوح مزایای استفاده از ضایعات را در فرایندهای تولید کلینکر و تولید سیمان نشان می‌دهد. آنها همچنین فاکتورهایی که باعث تسریع استفاده از کوره‌های سیمان برای به کارگیری ضایعات می‌شود را بدین صورت بیان کرده‌اند: دمای احتراق بالا، مساحت سطح زیاد کوره، طول زیاد کوره و طبیعت آکالی درون کوره.

استفاده مناسب از سوخت‌های جایگزین در صنعت سیمان جهت به کارگیری و ارتقای شیوه‌های مختلف کاهش اثرات زیست محیطی، کاهش مصرف انرژی و مواد و کاهش هزینه‌های اقتصادی این صنعت بسیار مهم و ضروری است. به دلیل پتانسیل بالای صنعت سیمان در صرفه جویی انرژی و کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای، مطالعات بسیاری در ارتباط با به کارگیری مواد زائد به عنوان سوخت جایگزین یا مواد خام در فرآیند تولید سیمان در سال‌های اخیر انجام شده است.

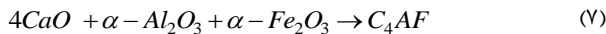
در مقاله آلفونسو اراندا و همکاران در سال ۲۰۱۳، مروری بر این مطالعات انجام گرفته است [۱۱]. تحلیل این مقاله بر روی اثرات زیست محیطی، اقتصادی و فنی استفاده از ۵ نوع از ضایعات جامد است که عبارتند از: ضایعات جامد شهری، ضایعات گوشت و استخوان حیوانات، لجن‌های فاضلاب، زیست توده و تایرهای با عمر باقی مانده کم.

در مقاله ای‌ای. بری و ال‌پی. مک دونالد در سال ۱۹۷۵ احتراق روغن میل لنگ خودرو در کوره سیمان خشک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲].

در مقاله زورک در سال ۲۰۱۲ ویژگی‌های سوخت‌هایی که با استفاده از لجن فاضلاب و دیگر مواد زائد حاصل می‌شود ارائه شده است [۱۳]. امکان کاربرد این سوخت‌ها در فرآیندهای احتراق همزمان زغال و به ویژه در



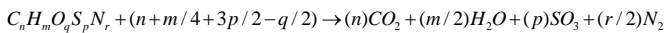
۳. واکنش: در این ناحیه واکنش‌های اصلی تولید فازهای سیمان انجام می‌شود و ترکیباتی مانند بلیت (C_2S) و آلایت (C_3A) تشکیل می‌شود. دمای این ناحیه حدوداً بین ۹۰۰ تا ۱۳۰۰°C است.



۴. ذوب: در این ناحیه که در انتهای پایین کوره قرار دارد، دمای فازها به شدت افزایش می‌یابد و فازها تثبیت می‌شوند. دمای این ناحیه بین ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰°C است.

همچنین در محفظه‌های احتراق نیز دو معادله زیر را داریم:

(۹)



که واکنش اول مربوط به سوختن سوخت جایگزین و واکنش دوم مربوط به احتراق زغال است.

۲-۱ سوخت

سوخت‌های متداول مورد استفاده در کوره سیمان، زغال‌سنگ، مازوت و گاهی گاز طبیعی است. اما در سال‌های اخیر استفاده از سوخت جایگزین در بسیاری صنایع از جمله کارخانه‌های سیمان مورد مناسبی تشخیص داده شده است.

سوخت جایگزین، نوعی از سوخت است که از ضایعاتی مانند زباله‌های شهری، لجن فاضلاب، تایرهای فرسوده و ... حاصل می‌شود. دو مورد سوخت جایگزین متداول برای صنعت سیمان عبارت است از RDF و TDF. سوخت RDF سوخت حاصل از زباله‌های شهری است که ارزش حرارتی بالایی دارد. اما TDF سوخت حاصل از تایرهای فرسوده است.

۲-۲ موازنه جرم

معادله مورد استفاده جهت موازنه جرم در هر حجم کنترل به صورت زیر است:

$$\sum \dot{m}_{in,i} = \sum \dot{m}_{out,i} \quad (11)$$

که در آن \dot{m} نرخ جریان جرمی کوره و زیرنویس‌های in و out در تمامی موارد به ترتیب بیانگر مقادیر ورودی و خروجی هر متغیر است. همچنین زیرنویس i بیانگر ناحیه مورد نظر است. (خشک کن، کلسینه سازی و...) در شکل ۲، شماتیکی از بقای جرم برای کوره سیمان نشان داده شده است.

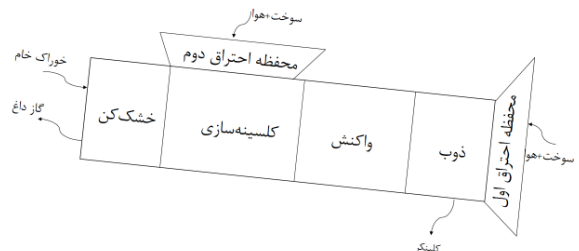
فرآیند تولید کلینکر سیمان نیز تحلیل شده است. جهت تحلیل مقایسه‌ای سه نوع از سوخت‌های مشتق از فاضلاب بررسی شده است: سوختی که با استفاده از لجن فاضلاب و دوغاب زغال به دست می‌آید، سوختی که شامل لجن فاضلاب و ضایعات گوشت و استخوان است و سوختی که در آن لجن فاضلاب با خاک اره ترکیب شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی این سوخت‌ها و به ویژه ارزش حرارتی آنها بررسی شده است.

نتایج نشان می‌دهد که سوخت‌هایی که با استفاده از مواد زائد تولید شده‌اند مقادیر انرژی لازم برای صنعت سیمان را تامین می‌کند. آزمایشات بر روی خواص فیزیکی این نکته را آشکار می‌سازد که چنین سوخت‌هایی می‌توانند در فرآیندهای انتقال و ذخیره سازی در معرض عملیات کنترل مکانیکی نیز قرار گیرند.

در این پژوهش با ارائه مدل تفکیکی تحلیل انرژی و انرژی بکارگیری این سوخت‌ها در کوره صنعت سیمان بررسی شده است. مهمترین نوآوری مقاله حاضر بدست آوردن نحوه بکارگیری بهینه سوخت‌های جایگزین در کوره سیمان با استفاده از مدل مرحله ای کوره سیمان است.

۲. توصیف مدل

کوره گردان سیمان، محفظه‌ای استوانه‌ای با پوسته فولادی است که سرعت گردش آن معمولاً بین ۱ تا ۲ دور بر دقیقه (rpm) است و شبیه بین ۳ تا ۴ درجه دارد. طول آن نیز بستگی به نوع فرآیند دارد و برای فرآیندهای خشک که امروزه متداول تر است طولی بین ۹۰ تا ۱۲۰ متر دارد. معادلات شیمیایی درون کوره بسیار زیاد است؛ اما در این پژوهش تعدادی از مهم‌ترین معادلات شیمیایی درون کوره را مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴].



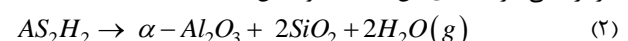
شکل ۱ شماتیکی از کوره گردان سیمان

شماتیک کوره گردان سیمان در شکل ۱ نشان داده شده است. خاک رس، سنگ آهک و دیگر مواد افزودنی از انتهای بالای کوره وارد می‌شود؛ در حالی که سوخت و هوا از انتهای پایین وارد می‌شود. اما بخش‌های داخلی کوره به صورت زیر است:

۱. خشک کن: در این ناحیه تمامی رطوبت سطحی موجود در خاک‌ها و سنگ آهک تبخیر می‌شود و در انتهای ناحیه، خاک‌ها کاملاً خشک هستند. دمای این ناحیه تا ۲۰۰°C است.



۲. کلسینه سازی: در این ناحیه تمامی خاک‌ها به همراه سنگ آهک، به عناصر سازنده خود تجزیه می‌شود و علاوه بر مواد جامد، گاز دی‌اکسید کربن نیز آزاد می‌سازند. دمای این ناحیه حدوداً بین ۲۰۰ تا ۹۰۰°C است.



۲-۴ موازنه انرژی

انرژی در هر ناحیه شبیه به انرژی، اما با معادلات مخصوص به خود محاسبه می‌شود. انرژی کل عبارت است از:

$$Ex = \bar{a}_{f,i}^{ch} + m\Delta\psi \quad (18)$$

که در آن $m\Delta\psi$ انرژی فیزیکی و $\bar{a}_{f,i}^{ch}$ انرژی شیمیایی است. انرژی فیزیکی از رابطه زیر حاصل می‌شود: [۱۶]

$$m\Delta\psi_j = mC_{p,ave,j}\Delta T_j - mT_0\Delta S_j \quad (19)$$

که در آن:

$$\Delta S_j = C_{p,avg,j} \ln \frac{T_j}{T_0} \quad (20)$$

اختلاف آنتروپی بین دمای ماده و دمای محیط است. برای انرژی شیمیایی رابطه زیر را داریم: [۱۷]

$$\bar{a}_{f,i}^{ch} = \sum_{j=1}^n (e_{x,j}^0 y_j + R_u T_0 y_j \ln y_j) \quad (21)$$

که در آن e_x^0 انرژی مولار (kJ/mol)، y_j کسر مولی ماده مورد نظر در کل ترکیب در ورودی یا خروجی حجم کنترل (mol/s)، R_u ثابت جهانی گاز و T_0 دمای محیط (۲۹۸K) است. بعلاوه j بیانگر ترکیب شیمیایی مورد نظر است.

معادله کلی که برای موازنه انرژی در هر حجم کنترل استفاده می‌شود به صورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^m \dot{E}_{in,i} - \sum_{i=1}^m \dot{E}_{out,i} = \sum_{i=1}^m \dot{E}_{dest,i} + \sum_{i=1}^m \dot{E}_{loss,i} \quad (22)$$

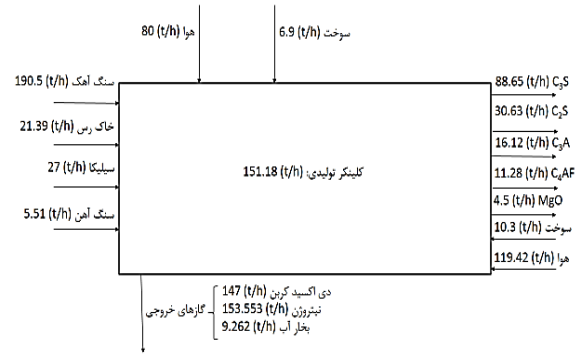
که در آن m بیانگر تعداد نواحی درون کوره است. معادله فوق بدین معناست که اختلاف انرژی ورودی و خروجی در هر حجم کنترل برابر با مجموع اتلاف انرژی و تخریب انرژی است.

۳-۳ نتایج

مجموع اتلاف و تخریب انرژی در نواحی داخلی کوره شامل ناحیه خشک کن، کلسینه سازی، واکنش و ذوب بررسی شده است. سپس با در نظر گرفتن مجموعه کوره به عنوان حجم کنترل، به بررسی مجموع اتلاف و تخریب انرژی کل پرداخته شده است. همچنین تخریب انرژی در محفظه‌های احتراق بررسی و نهایتاً تحلیل دمای گاز خروجی و آلاینده‌های کوره انجام گرفته است.

۳-۱ ناحیه ذوب

در شکل ۳ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه ذوب برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نمایش داده شده است. محور افقی بیانگر میزان جایگزینی سوخت جایگزین به منظور تامین محتوای انرژی مورد نیاز و محور عمودی بیانگر مجموع اتلاف و تخریب انرژی برحسب مگاوات است.



شکل ۲ شماتیکی از موازنه جرم در کوره سیمان

۲-۳ موازنه انرژی

موازنه انرژی برای هر بخش از کوره (خشک‌کن، کلسینه‌سازی و...) انجام شده است. بدین معنا که با انرژی ورودی و خروجی در هر حجم کنترل سروکار داریم. انرژی ورودی به هر حجم کنترل با \dot{E}_{in} و انرژی خروجی از هر حجم کنترل با \dot{E}_{out} نشان داده شده است. علاوه بر این، انواع دیگری از انرژی نیز وجود دارد که با گرمای تشکیل واکنش‌ها ارتباط دارد. اگر واکنش شیمیایی مورد نظر گرماگیر باشد، از داخل حجم کنترل انرژی گرفته و مقدار این انرژی با \dot{E}_{con} و اگر گرماده باشد، به حجم کنترل گرما منتقل کرده و این مقدار انرژی با \dot{E}_{gen} نشان داده می‌شود.

$$\dot{E}_{net,in,i} - \dot{E}_{net,out,i} = \sum_{j=1}^n m\dot{E}_{out,j} h_{out,j} - \sum_{j=1}^n m\dot{E}_{in,j} h_{in,j} \quad (12)$$

$$\dot{E}_i = \sum_{j=1}^n m\dot{E}_j C_{p,ave,j} \Delta T_j \quad (13)$$

که در آن $m\dot{E}_j$ دبی جرمی ماده زام و ظرفیت گرمایی متوسط آن ماده است که تابعی از دما T است و ΔT_j نیز اختلاف دمای ماده با دمای محیط (۲۹۸k) است. توجه داشته باشید که ظرفیت گرمایی متوسط بین دو دمای a و b توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{p,ave,j} = \frac{1}{T_j - 298} \int_{298}^{T_j} C_{p,j}(T) dT \quad (14)$$

که در آن $C_{p,j}(T)$ تابعی از دمای T و به صورت زیر است:

$$C_{p,j} = A_j + B_j t_j + C_j t_j^2 + D_j t_j^3 + E_j / t_j^2 \quad (15)$$

که در آن:

$$t_j = T_j(k) / 1000 \quad (16)$$

ارزش حرارتی بالای RDF و TDF از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(17)$$

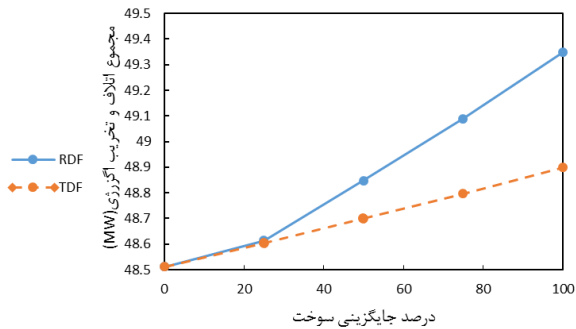
$HHV(MJ / Kg) = 0.336C + 1.419H + 0.94S - 0.145O$ که در آن C, H, S, O به ترتیب درصد کربن، هیدروژن، گوگرد، اکسیژن و نیتروژن موجود در سوخت است [۱۵]. ارزش حرارتی بالای زغال نیز $31 MJ/Kg$ در نظر گرفته شده است [۱۶].

بعلاوه، میزان اتلافات انرژی از بدنه کوره به میزان ۱۰٪ از انرژی ورودی در نظر گرفته شده است [۱۶] که به نسبت طول نواحی و به شکل یکنواخت بین آنها توزیع می‌شود.

ناچیز باشد. از طرفی با توجه به اینکه با افزایش سوخت جایگزین، مقدار انرژی اتلافی از بدنه کوره و در نتیجه مقدار انرژی اتلافی اندکی کاهش می‌یابد، روندی کاهشی (البته با مقدار بسیار کم) در مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه واکنش مشاهده می‌شود.

۳-۳ ناحیه کلسینه‌سازی

در شکل ۵ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه کلسینه‌سازی برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.



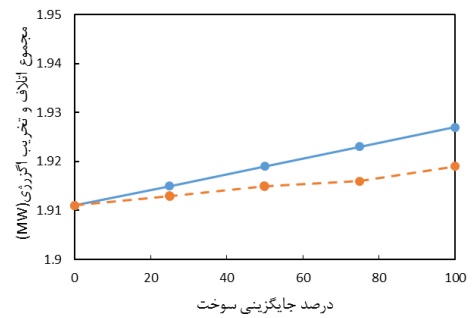
شکل ۵ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه کلسینه‌سازی برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر سوخت‌های جایگزین مجموع اتلاف و تخریب انرژی افزایش می‌یابد. از آنجا که در این ناحیه واکنش اصلی تشکیل سیمان که همان تجزیه سنگ آهک است اتفاق می‌افتد و این واکنش گرماگیر است، افت شدید دمای گازها در این ناحیه تجربه می‌شود. بعلاوه روند اختلاف دما در ورودی و خروجی به گونه‌ای اتفاق می‌افتد که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سوخت جایگزین این اختلاف افزایش و در نتیجه اختلاف انرژی فیزیکی ورودی و خروجی افزایش می‌یابد. البته به دلیل افزایش مقدار گاز کربن دی اکسید (CO_2) در خروجی این ناحیه که ناشی از تجزیه ترکیباتی مانند $CaCO_3$ و $MgCO_3$ است، مقدار اختلاف انرژی شیمیایی گازها در خروجی ناحیه مقداری کاهش می‌یابد که البته بسیار کمتر از افزایش مقدار انرژی فیزیکی است.

اما علت افزایش اختلاف دما با افزایش نرخ سوخت جایگزین در این امر نهفته است که با افزایش درصد جایگزینی، دبی گازهای احتراق کاهش می‌یابد و در صورت دریافت محتوای انرژی تقریباً یکسان، دمای گاز با افزایش درصد جایگزینی افزایش می‌یابد. پس از تبادل حرارتی که با وجود دبی ثابت جامدات، مقداری ثابت است، گازی که دبی کمتری دارد افت دمای بیشتری را تجربه می‌کند و در نتیجه این افت دما، اختلاف انرژی فیزیکی آن در ورودی و نسبت به خروجی افزایش می‌یابد.

۳-۴ ناحیه خشک‌کن

در شکل ۶ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه خشک‌کن را برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ نشان داده شده است.

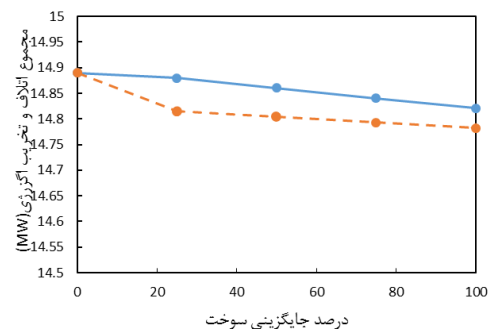


شکل ۳ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه ذوب برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

چنانچه از نمودار فوق قابل مشاهده است، با افزایش مقدار سوخت جایگزین مقدار اتلاف و تخریب انرژی افزایش می‌یابد. این امر ناشی از این مسئله است که با افزایش مقدار سوخت جایگزین، به دلیل بالاتر بودن ارزش حرارتی این سوخت‌ها نسبت به سوخت فسیلی (زغال) مقدار دبی گازهای احتراق کاهش می‌یابد و این امر منجر به افزایش دمای گاز خروجی از محفظه احتراق و ورودی به ناحیه ذوب می‌شود. از طرفی این گازها پس از تبادل مقدار انرژی معین مورد نیاز جهت افزایش دمای جامدات مذاب، با افت دما مواجه می‌شوند. اما این اختلاف دما در ورودی نسبت به خروجی با افزایش جایگزینی سوخت اندکی افزایش می‌یابد، چرا که دمای گاز با افزایش سوخت جایگزین در ورودی ناحیه ذوب افزایش بیشتری نسبت به خروجی می‌یابد و در نتیجه این امر منجر به افزایش اندکی در اختلاف انرژی ورودی و خروجی می‌شود که در واقع همان مجموع اتلاف و تخریب درون ناحیه است.

۳-۴ ناحیه واکنش

در شکل ۴ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه واکنش برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.



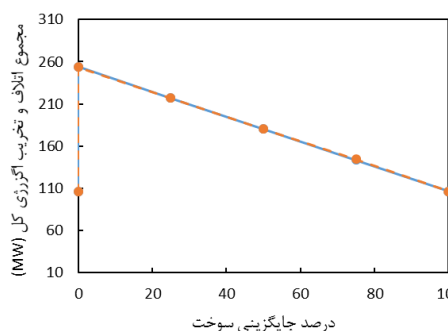
شکل ۴ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه واکنش برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

از نمودار واضح است که با افزایش مقدار سوخت جایگزین مجموع اتلاف و تخریب انرژی کاهش پیدا می‌کند. علت این امر را باید در دماهای ورودی و خروجی ناحیه واکنش برای این دو نوع ترکیب سوختی جستجو کرد. در این ناحیه، اختلاف دمای گاز ورودی و خروجی برای درصدهای مختلف جایگزینی سوخت تقریباً ثابت می‌ماند و انتظار می‌رود که تغییرات انرژی

چنانچه مشاهده می‌شود مجموع اتلاف و تخریب انرژی در هر دو ترکیب سوختی با افزایش نرخ سوخت جایگزین کاهش می‌یابد، اما در ابتدای امر و با افزوده شدن سوخت جایگزین به سوخت فسیلی (زغال خالص)، این مقدار افزایش می‌یابد. علت این افزایش این است که به محض اضافه شدن سوخت جایگزین به سوخت فسیلی، دو جریان سوختی به وجود می‌آید که در نتیجه آن انرژی اختلاط نیز به انرژی‌های ورودی محفظه احتراق افزوده شده و از آنجا که انرژی مولار زغال و سوخت جایگزین بسیار زیاد است، انرژی ورودی افزایش جالب توجهی پیدا می‌کند. در مرحله بعدی و با افزایش مقدار جایگزینی سوخت جایگزین در ترکیب، به دلیل کاهش دبی کل سوخت، این انرژی اختلاط کاهش پیدا می‌کند و موجب روندی کاهشی در مجموع اتلاف و تخریب انرژی محفظه‌های احتراق می‌شود.

۳-۶ اتلاف و تخریب انرژی کل

در شکل ۹ مجموع اتلاف و تخریب انرژی کل کوره برای هر دو نوع ترکیب سوختی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است. از آنجا که با افزایش مقدار سوخت جایگزین دبی گازهای احتراق کاهش می‌یابد، انرژی شیمیایی گازهای ورودی به کوره نیز کاهش می‌یابد که این امر در کاهش انرژی کل ورودی به کوره موثر است. با جمع مقادیر اتلاف و تخریب نواحی داخلی، اتلاف و تخریب کل کوره به دست می‌آید.

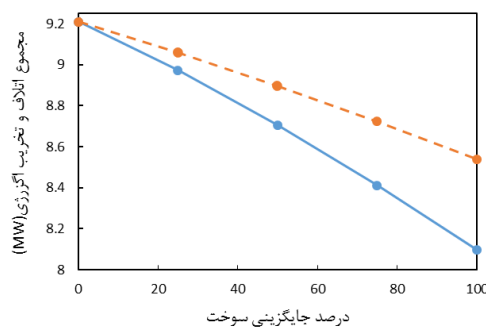


شکل ۹ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در کل کوره برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

روال اتلاف و تخریب انرژی کل نیز مانند روال حاکم بر بخش قبلی است و استدلالی مطابق با بخش قبل دارد که قبلاً توضیح داده شده است. با افزودن سوخت جایگزین، در لحظه اول تخریب انرژی به دلیل وجود انرژی اختلاط افزایش می‌یابد و با افزایش جایگزینی سوخت جایگزین، به دلیل کاهش دبی سوخت، این روال کاهش می‌یابد. همانگونه که قابل مشاهده است این مقادیر برای هر دو نوع ترکیب سوختی بسیار به یکدیگر نزدیک هستند.

۳-۷ دمای گاز خروجی

در شکل ۱۰ دمای گازهای خروجی از کوره برای هر دو نوع ترکیب سوختی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.

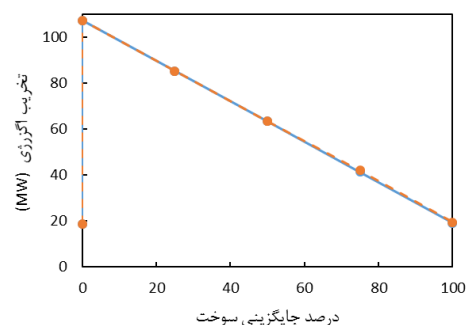


شکل ۶ مجموع اتلاف و تخریب انرژی در ناحیه خشک کن برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

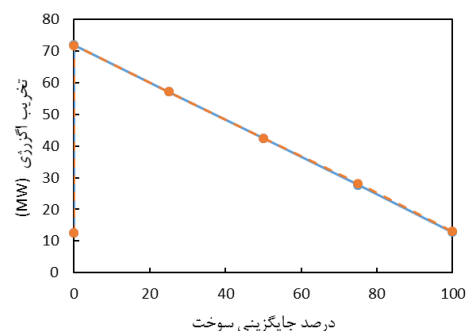
چنانچه مشاهده می‌شود در هر دو ترکیب، با افزایش نرخ جایگزینی مجموع اتلاف و تخریب انرژی کاهش می‌یابد. علت اصلی این امر در انرژی شیمیایی نهفته است. چرا که با افزایش نرخ جایگزینی، مقدار گازهای احتراق کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار انرژی شیمیایی در ورودی و خروجی ناحیه خشک‌کن کاهش یافته و نهایتاً منجر به کاهش اتلافات و تخریب می‌شود.

۳-۵ محفظه‌های احتراق

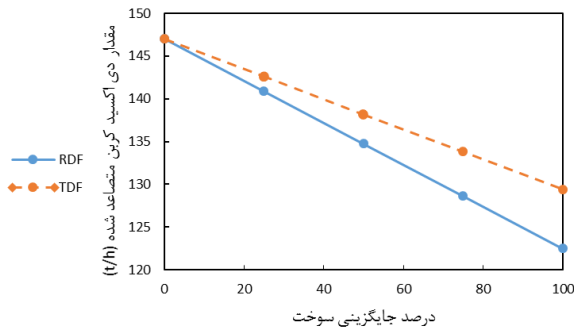
در شکل‌های ۷ و ۸ مقدار تخریب انرژی در محفظه‌های احتراق اول و دوم برای هر دو نوع ترکیب سوختی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.



شکل ۷ تخریب انرژی در محفظه احتراق اول برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪



شکل ۸ تخریب انرژی در محفظه احتراق دوم برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪



شکل ۱۲ مقدار کربن دی اکسید متصاعد شده از دو نوع ترکیب سوختی مورد نظر

چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش نرخ جایگزینی سوخت، مقدار کربن دی اکسید کمتری تولید و از کوره متصاعد می‌شود. علت این امر آن است که زغال سنگ دارای مقادیر بسیار بالایی کربن (C) است (به گونه ای که در این پژوهش زغال سنگ به عنوان کربن خالص فرض شده است). در حالی که RDF و TDF مقادیر کربن کمتری دارند. (به ترتیب ۶۰ و ۷۰٪) در نتیجه در اثر احتراق مقدار CO₂ کمتری تولید می‌کنند که در نمودار فوق مشهود است.

البته لازم به ذکر است که احتراق RDF و TDF مقداری گاز SO₃ نیز تولید می‌نماید که این گاز در احتراق زغال سنگ خالص وجود ندارد، اما مقدار آن به قدری کم است که نمی‌توان از کاهش مقدار CO₂ در اثر احتراق این سوخت‌های جایگزین چشم پوشی کرد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نهایی به دست آمده را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- با جایگزین ساختن سوخت‌های جایگزین به جای سوخت‌های فسیلی مقدار آلاینده‌های مضر زیست محیطی مانند کربن دی اکسید (CO₂) متصاعد شده از کوره کاهش می‌یابد. بعلاوه با توجه به تحلیل چرخه عمر، استفاده از سوخت جایگزین در دراز مدت اثراتی مثبتی مانند کاهش زمین مورد نیاز جهت دفن ضایعات، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی مانند گازهای گلخانه‌ای و منافع اقتصادی مانند صرفه جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی را به دنبال دارد.

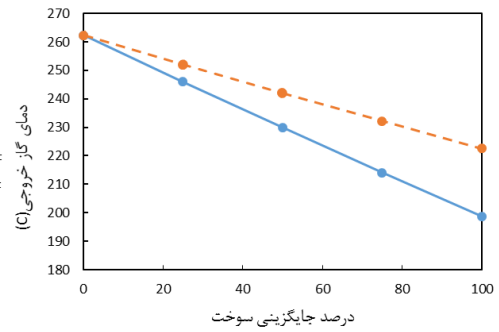
۲- با استفاده از سوخت جایگزین، دمای گازهای احتراق خروجی از کوره کاهش یافته و به دمای محیط نزدیک‌تر می‌شود که این امر نشان دهنده اتلاف حرارتی کمتر این گازها در حین خروج از کوره است.

۳- با استفاده از نتایج بدسه آمده از این مقاله، با بکارگیری سوخت جایگزین، تلفات انرژی در ابتدا به صورت لحظه‌ای افزایش و سپس کاهش یافته و این امر نشان دهنده کاهش بازگشت ناپذیری‌ها درون کوره است که از شرایط مطلوب مورد نظر جهت انجام واکنش هاست.

۴- به ازای مقدار معینی از درصد جایگزینی و برای نسبت هوای اولیه و ثانویه ثابت، مشاهده می‌شود که برای کاهش تلفات و تخریب انرژی باید مقدار هوای اضافه کمتری مصرف شود که این امر از بعد مصرف انرژی مطلوب است.

۵- منبع اصلی تخریب انرژی در کوره، واکنش‌های شیمیایی درون آن هستند، در حالی که منبع اصلی اتلافات انرژی، افت دمای گازهای احتراق در حین عبور از نواحی داخلی کوره است.

۶- علت اصلی کاهش اتلافات انرژی در صورت استفاده از سوخت جایگزین، کاهش دبی گازهای احتراق است که این امر نیز ناشی از کاهش

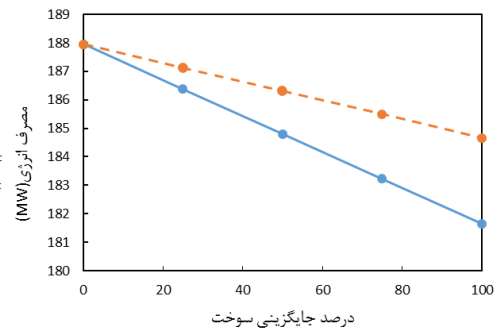


شکل ۱۰ دمای گازهای خروجی از کوره برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

از آنجا که مقدار انرژی ورودی به کوره تقریباً ثابت است، با افزایش مقدار سوخت جایگزین دبی گازهای احتراق کاهش و در نتیجه دمای گازها افزایش می‌یابد. از آنجا که دبی گازها با افزایش مقدار سوخت جایگزین کاهش می‌یابد، اختلاف دمای ورودی و خروجی گازها در اثر تبادل انرژی افزایش می‌یابد و در نتیجه، با افزایش مقدار جایگزینی سوخت، دمای گاز خروجی کوره کاهش می‌یابد.

۳-۸ مصرف انرژی

در شکل ۱۱ مقدار مصرف انرژی کوره برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مقدار مصرف انرژی کوره برای ۱۰٪ هوای اضافه و نسبت هوای اولیه ۳۰٪ و هوای ثانویه ۷۰٪

چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش درصد جایگزینی سوخت، مقدار انرژی مصرفی کوره کمتر می‌شود. علت این امر در مقدار هوای پیش‌گرم و انرژی که این مقدار هوا به سیستم کوره وارد می‌کند نهفته است. از آنجا که با افزایش درصد جایگزینی سوخت، به دلیل بالاتر بودن ارزش حرارتی سوخت جایگزین نسبت به زغال، مقدار دبی سوخت کمتری مورد نیاز است، بنابراین طبقاً مقدار هوای استوکیومتری کمتری نیز مورد نیاز است و همین کاهش هوای استوکیومتری منجر به کاهش مقدار هوای اضافه نیز می‌شود. کاهش مقدار هوا موجب کاهش دبی هر دو هوای اولیه و ثانویه می‌شود. در نتیجه مقدار هوای پیش‌گرم شده کمتر می‌شود و انرژی مصرفی کوره را کاهش می‌دهد.

۳-۹ مقدار آلاینده‌ها

در شکل ۱۲ مقدار کربن دی اکسید متصاعد شده از کوره برای هر دو نوع سوخت ترکیبی شامل ترکیب زغال سنگ و RDF و نیز ترکیب زغال سنگ و TDF نشان داده شده است.

- E.E. Berry , L.P. Macdonald. 1976. Experimental [۱۲] burning of used automotive crankcase oil in a dry-process cement kiln. *Journal of Hazardous Materials* 1: 137-156.
- Małgorzata Wzorek. 2012. Characterisation of the [۱۳] properties of alternative fuels containing sewage sludge. *Fuel Processing Technology* 104:80–89.
- Bodil Hökfors. 2014. Phase chemistry in process [۱۴] models for cement clinker and lime production. Doctoral thesis. Thermal energy conversion department of applied physics and electronics the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the [۱۵] United States of America. 2011. [Webbook.nist.gov/cgi/cbook](http://www.nist.gov/cgi/cbook) (National Institute of Standards and Technology) (accessed 2016/2/4)
- Adem Atmaca, Recep Yumrutas. 2014. Analysis of [۱۶] the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry. *Applied Thermal Engineering* 66:435-444.
- Maria Luiza Grillo Renó, Felipe Martins Torres, [۱۷] Rogério José da Silva, José Joaquim Conceição Soares Santos, Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo. 2013. Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer. *Energy Conversion and Management* 75:98–104.
- دبی سوخت ورودی است. چرا که ارزش حرارتی سوخت جایگزین از سوخت فسیلی بالاتر است و جهت تامین مقدار انرژی مورد نیاز، کوره نیازمند مقدار سوخت کمتری جهت انجام فرآیندهاست.
- مراجع
- [۱] تاجیک، محمودرضا و احمد صدیقی (۱۹ تیرماه ۱۳۸۷). ضرورت استفاده از سوخت‌های جایگزین در صنعت سیمان. بازیابی شده در آذرماه ۱۳۹۴ از http://www.aftabir.com/articles/view/economy_marketing_business/mine_metal
- [۲] نتاجی، وحید و جلیل رکنی زاده. ۱۳۹۲. بررسی فنی و اقتصادی ورود سوخت حاصل از زباله و تاثیر فرسوده در صنایع سیمان ایران. نشریه انرژی ایران. دوره ۱۷: ۱۲۸-۱۱۲
- E. Mastorakos, A. Massias, C.D. Tsakiroglou, D.A. [۳] Goussis, V.N. Burganos, A.C. Payatakes. 1999. CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. *Applied Mathematical Modelling* 23:55-76
- K. S. Mujumdar and V. V. Ranade. 2006. Simulation [۴] of rotary cement kilns using a one-dimensional model. *Chemical Engineering Research and Design* 84(A3): 165–177
- Stephane Ngako , Ruben Mouangue, Sebastien [۵] Caillat, Alexis Kuitche , Ernest Saragba. 2015. Numerical investigation of bed depth height, axial velocity and mean residence time of inert particles in steady state industrial cement rotary kiln: Case of Figuil Plant in Cameroon. *Powder Technology* 271:221–227
- Hanmin Chen. 2014. Modeling and simulation of [۶] cement clinkering process with compact internal burning of carbon. *Applied Thermal Engineering* 73:1285-1308
- K.T. Kaddatz, M.G. Rasul, Azad Rahman. 2013. [۷] Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modeling. *Procedia Engineering* 56:413 – 420
- Azad Rahman , M.G. Rasul, M.M.K. Khan, S. [۸] Sharma. 2015. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel* 145:84–99
- Bahareh Reza, Atousa Soltani, Rajeev Ruparathna, [۹] Rehan Sadiq, Kasun Hewage. 2013. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling* 81:105–114
- Eugeniusz Mokrzycki, Alicja Uliasz- Bochen´ [۱۰] czyk. 2003. Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy* 74:95–100
- Alfonso Aranda Uso´n , Ana M. Lo´pez-Sabiro´n, [۱۱] Germa´n Ferreira , Eva Llera Sastresa. 2013. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23:242–260