بررسی فنی و اقتصادی ورود سوخت حاصل از زباله و تایر فرسوده در صنایع سیمان ایران

جلیل رکنی‌زاده[۱]، وحید نجاتی[۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۷/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۱۷

چکیده:

طبق آمار انجمن صنفی کارفرمایان صنعت سیمان ایران، سهم انرژی در قیمت تمام شده صنعت سیمان، نسبت به روش تولید و سن کارخانه، بالغ بر ۲۵ الی ۳۵ درصد برآورد می گردد و لذا زمینه خوبی جهت انجام اقدامات مدیریت مصرف انرژی و نیز اجرای معیار مصرف بهینه در این صنعت وجود دارد. فرایند تولید سیمان نیازمند انرژی زیادی است و از این جهت علاقه وافری به یافتن سوخت‌های جایگزین و ارزان در بین تولیدکنندگان این ماده در دنیا وجود دارد. بر اساس آمار کارشناسان دفتر صنایع معدنی وزارت صنعت، معدن و تجارت، صنعت سیمان ایران در سال ۱۳۹۱ به ازای تولید ۷۱ میلیون تن، در حدود $۶۱/۷۷\times۱۰^{۱۲}$ کیلوکالری انرژی حرارتی مصرف نموده است. تایر فرسوده تنها می تواند ۱/۶۲ درصد از این نیاز را تامین کند. استفاده از سوخت مشتق شده از زباله که پتانسیل تولید آن در ایران موجود می باشد نیز می تواند ۲۵/۶ درصد از این مقدار انرژی حرارتی را برطرف کند. اگر بطور همزمان از هر دو سوخت در این صنعت استفاده می‌شد، با احتساب کاهش ۲۷/۲۲ درصدی استفاده از سوخت های فسیلی در این صنعت، در سال ۱۳۹۱ حدود دو میلیارد متر مکعب گاز صرفه جویی می گردید که ارزش صادراتی آن برابر یک میلیارد و ده میلیون دلار می باشد. هدف از این مقاله، امکان سنجی و تاثیر استفاده از سوخت های جایگزین در صنایع سیمان ایران می باشد و به روش ها، مشکلات پیش رو و توجیهات فنی و اقتصادی در این زمینه می پردازد.

کلمات کلیدی:

مصرف انرژی در صنعت سیمان، سوخت جایگزین، سوخت حاصل از زباله، سوخت حاصل از تایر، بهینه سازی در صنعت سیمان.

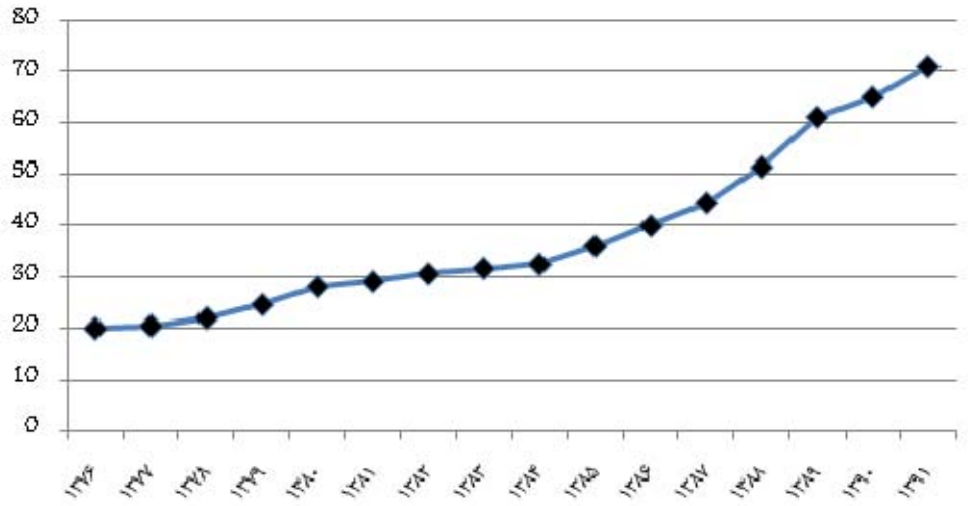
۱ کارشناس ارشد سیستم‌های انرژی ـ تکنولوژی انرژی (نویسنده مسئول) Jalil.rokni@yahoo.com
۲) استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد ، گروه مکانیک و انرژی nejati3744@mshdiau.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

مقدمه

براساس اطلاعات سازمان زمین‌شناسی آمریکا، در پایان سال ۲۰۱۲ ظرفیت تولید سیمان در جهان حدود ۳۷۰۰ میلیون تن بوده که حدود ۱/۷۵ درصد از آن در ایران تولید شده است. چین در سال ۲۰۱۲ میلادی با تولید ۲۱۵۰ میلیون تن بزرگترین تولیدکننده سیمان در جهان لقب گرفت. بعد آن هند با تولید ۲۵۰میلیون تن در رده دوم و آمریکا نیز با ۷۴ میلیون تن، به عنوان سومین تولیدکننده بزرگ سیمان در سال ۲۰۱۲ میلادی معرفی شدند. ایران با ۶۵ میلیون تن تولید، در منطقه خاورمیانه رتبه نخست را به دست آورده است. ترکیه با ۶۰ میلیون تن تولید در جایگاه دوم قرار گرفت. همچنین در رده‌بندی جهانی نیز ایران از نظر تولید سیمان به طور مشترک با ویتنام در رده پنجم قرار گرفت. ایران درسال ۲۰۱۱ به طور مشترک با روسیه در رده ششم بزرگترین تولید کنندگان سیمان دنیا جای گرفته بود[۲۲].

در سال ۱۳۹۱ ایران با تولید حدود ۷۱ میلیون تن سیمان، جهشی ۶ میلیون تنی را نسبت به سال گذشته رقم زد. شکل (۱) روند رو به رشد تولید این محصول را طی سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۷۶ نشان می دهد[۱].



شکل ۱) میزان تولید سیمان ایران برحسب میلیون تن طی سال‌های ۱۳۹۱ـ۱۳۷۶

اگر مانند شکل (۱) نمودار مصرف انرژی را رسم کنیم، تقریبا به شیب یکسانی برخورد خواهیم نمود که این امر رشد صعودی مصرف سوخت های فسیلی را در این صنعت نشان می دهد. با توجه به سیاست‌های جدیدی که دولت در بخش سوخت در پیش گرفته است، به نظر می‌رسد که بسیار ضروری است صنعت سیمان نیز به دنبال سوخت‌های جایگزین و

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

ارزان باشد تا در روند توسعه‌ای آن مشکلی بروز ننماید. (RDF)[1] و یا (TDF)[2] از جمله این سوخت ها می باشند.

به طور کلی، اجزای قابل احتراق جدا شده از زباله شهری جامد (MSW)[3]، تحت عنوان RDF شناخته می شوند. جداسازی اجزای قابل احتراق ازMSW و تبدیل آنها به انرژی با استفاده از روش‌های پیش فراورش[4] و یا روش‌های تبدیلی[5] انجام می شود. این اجزا بیشتر شامل کاغذ و پلاستیک می باشند[۲۲].

تایرها یک سوخت فشرده با رطوبت بسیار کم بوده و دارای مقداری از ترکیبات آهن و روی می باشند که هر دو برای اختلاط با مواد خام سیمان مفید هستند. قابل ذکر است که سوختن تایر در کوره سیمان باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی نخواهد شد، زیرا گزارش‌های سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA)[6] بیانگر آن است که مواد منتشره از این کوره‌ها مشکل ساز نبوده و در بعضی موارد باعث کاهش آلاینده‌های منتشره خواهد شد[۲۱].

ایوجینیوس[7] و آلیسجا اولیاس[8] دو دانشمند لهستانی طی مقاله ای مهمترین عوامل ترویج استفاده از زباله در کوره های سیمان را اینچنین برمی شمارند: ۱- دمای بالای کوره علاوه بر احتراق کامل، مشکل بیماری زا بودن سوخت را نیز حل می کند. (جلوگیری از دفن پسماندهای خطرناک و حفظ محیط زیست). ۲- طول و وسعت قابل توجه کوره که سطح تبادل انرژی را بین مشعل و زباله و نیز زباله و کلینکر به حداکثر می رساند. ۳- محیط قلیایی داخل کوره که قابلیت استفاده از پسماندهای اسیدی و یا آغشته به اسید را فراهم می آورد[۱۳].

شرایط ویژه در کوره دوار سیمان مانند درجه حرارت بالا، سرعت بالای جریان گاز و ذخیره سازی طولانی مدت ذرات خاکستر، تضمین می کند که استفاده از سوخت های جایگزین برای محیط زیست در حد استاندارد قابل قبول می باشد[۱۳].

وضعیت مصرف انرژی در صنایع سیمان ایران

سهم مصرف انرژی حرارتی در صنعت سیمان، ۱۴ درصد سهم مصرف درکل 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[۸].

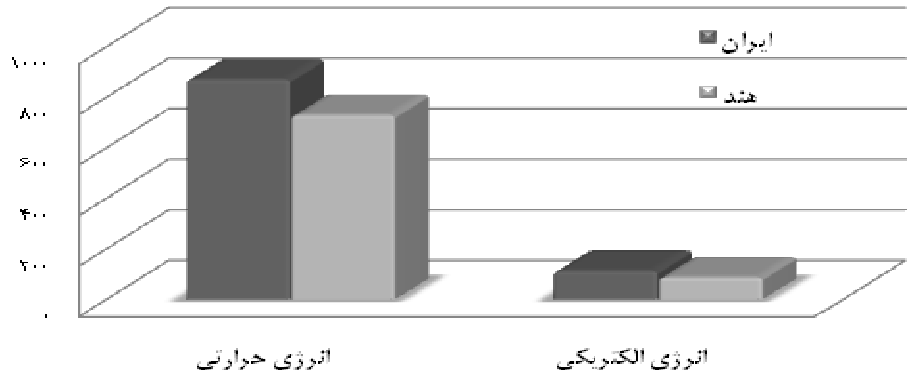
---

1) Refuse-derived fuel
2) Tyres-derived fuel
3) Municipal solid waste
4) Front-end
5) Back-end
6) United States Environmental Protection Agency
7) Eugeniusz Mokrzycki
8) AlicjaUliasz- Bochen´czyk

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

در آزمایشگاه برای تولید هر کیلوگرم کلینکر در حدود ۴۲۰ کیلوکالری انرژی جهت انجام واکنش‌های شیمیایی مورد نیاز است. مقادیر انرژی مصرفی بالاتر از این مقدار در واقع تلفات انرژی هستند که فناوری‌های جدید درصدد کاهش این تلفات می‌باشند[۸].

در شکل (۲) مقایسه‌ای بین کشورهای ایران و هند از نظر میزان مصرف انرژی انجام شده است. در ایران به ازای تولید هر کیلوگرم کلینکر ۸۷۰ کیلوکالری انرژی مصرف می‌شود، این در حالی است که هند ۷۳۰ کیلوکالری مصرف کرده است. انرژی الکتریکی به ازای تولید هر تن سیمان در ایران ۱۱۳ کیلووات ساعت و در هند ۸۸ کیلووات ساعت می‌باشد[۸].



شکل ۲) مقایسه انرژی ویژه حرارتی و الکتریکی ایران و هند در صنعت سیمان

در مجموع، انرژی الکتریکی ایران ۲۸ درصد، انرژی حرارتی ۱۹ درصد و متوسط کل انرژی مصرفی ایران در صنعت سیمان ۲۰ درصد بالاتر از هند می‌باشد.

بر اساس معیارها و قیمت‌های بین المللی ظرفیت صرفه‌جویی در صنعت سیمان در بخش مربوط به انرژی الکتریکی حدود ۳۰ درصد و در بخش مربوط به انرژی حرارتی۲۰ درصد است [۱۰].

با توجه به آمارهای فوق، در صورت استفاده از سوخت های جایگزین، ارزش افزوده حاصل از صرفه جویی سوخت‌های فسیلی می تواند جهت بهبود فناوری و در نتیجه، مصرف بهینه انرژی استفاده گردد.

سوخت مشتق شده از زباله (RDF)

از بخش قابل اشتعال زباله جامد شهری می توان محصولی تولید کرد که نسبت به زباله همگن تر و پایدارتر می باشد.

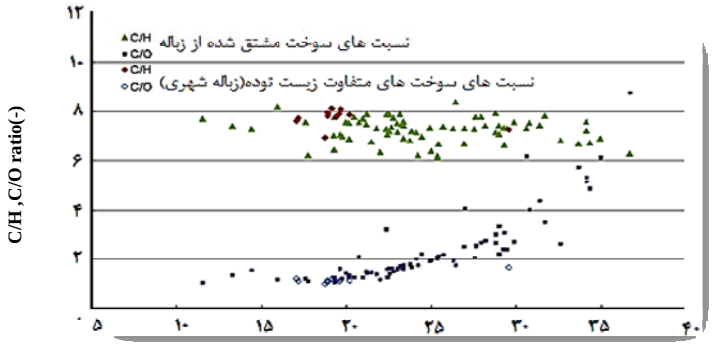
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

این ماده RDF نامیده شده و ترکیبی از تکه های کاغذ، مقوا، پلاستیک، پارچه، چرم و چوب است. سوخت RDF دارای ارزش حرارتی بالا، ترکیب شیمیایی کنترل شده و فاقد بوی تعفن می باشد.

سوخت مشتق شده از زباله به مواد پسماندهای گفته می‌شود که پس از انجام فرایندهای مختلف بازیافت به عنوان سوخت حاصل از MSW تولید می شود. به عبارت ساده، RDF سوخت مشتق از زباله بوده که حاصل جداسازی، خردکردن، شکل دهی مناسب (مثل شکل گلوله ای یا ساچمه ای، آجر، میله سوختی و ...) و فرموله کردن هوشمندانه اجزایی از پسماند جامد در انواع مختلف شهری، صنعتی، کشاورزی و ... می باشد. به طور کل، می‌توان RDF را یک سوخت ثانویه[1] نامید.

در واقع، RDF یک نوع بازیافت مواد در راستای بازیافت انرژی است. نسبت تولید RDF به MSW درحدود ۲۴٪ می باشد، یعنی از یک تن زباله شهری تنها می توان ۲۴۰ کیلوگرم RDF استحصال نمود[۱۷].

ارزش حرارتی این سوخت به ترکیبات عنصری تشکیل دهنده آن بستگی دارد. تحقیقات نشان می دهد که در استحصال سوخت های جایگزین از زباله، نسبت کربن به هیدروژن ثابت بوده و این نسبت کربن به اکسیژن است که افزایش می یابد. در واقع، بازیافت سوخت از زباله جامد شهری باعث تغییرات نسبت کربن به اکسیژن می گردد. شکل (۳) نسبت C/H و C/O سوخت مشتق شده از زباله و سوخت های متفاوت زیست توده و تاثیر آن در ارزش حرارتی را نشان می دهد[۱۶].



شکل۳) نسبت C/H و C/O سوخت مشتق شده از زباله و سوخت های متفاوت زیست توده و تاثیر آن در مقدار ارزش حرارتی(MJ/Kg) [۱۶]

در آزمایشگاه با استفاده از رابطه زیر ارزش حرارتی سوخت مشتق از زباله را تعیین می کنند[۱۶]:

1) secondary fuel

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

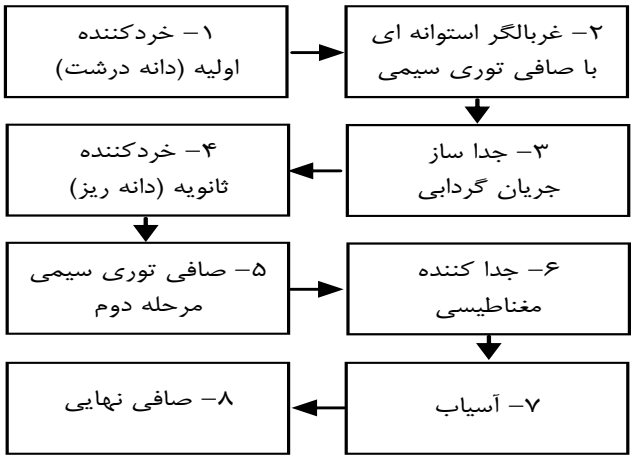
$$LHV^{1} = 45.09\ c - 4.99o - 2.44\ w \quad (LHV \text{ in } MJ\ kg^{-1},\ c,o,w \text{ in } kj\ kg^{-1}) \qquad (۱)$$

میزان کربن، اکسیژن و رطوبت به ترتیب مقادیر c ،o و w را تشکیل می دهند. ارزش حرارتی به دیگر شرایط محیطی، اقلیمی، فصلی و نحوه فراورش سوخت نیز وابسته است، اما حداقل مقدار آن می بایست در حدود ۱٤MJ/kg (۳۳۵۰kcal/kg) باشد[۱۶].

با استفاده از روش‌های پیش فراورش که شامل فرایندهای زیر است، می توانMSW را بهRDF تبدیل کرد[۶].

۱) جداسازی درمبدأ
۲) جداسازی مکانیکی و دسته بندی
۳) کاهش اندازه (خردکردن،آسیاب کردن)
۴) جداسازی و غربال
۵) اختلاط
۶) خشک کردن، دانه بندی، بسته بندی و ذخیره سازی

بسته به نوع زباله (شهری، صنعتی و ...)، نحوه ی جمع آوری و تفکیک، روش های متفاوتی را می توان برای تبدیل MSW به RDF برشمرد. شکل (۴) دیاگرام مکانیزه تبدیل MSW به RDF در روشی دیگر پس از جداسازی در مبدأ را نشان می دهد.



شکل٤) دیاگرام مکانیزه تبدیل MSW به RDF در روشی دیگر پس از جداسازی در مبدأ[۶]

1) Lower heating value

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

به طورکلی، از روش‌های زیر برای تبدیلMSW وRDF به انرژی استفاده می شود[6].

۱) محفظه احتراق بستر متحرک[1]

۲) گازیفیکیشن[2]

۳) گرماکافت[3]

۴) ترکیب با زغال سنگ در بویلرهای تولید بخار

۵) سوزاندن درکوره‌های سیمان

کاربرد RDF ومشکلات استفاده ازآن

همانطورکه قبلا گفته شد، عمده ترین کاربرد RDF استفاده از آن به عنوان سوخت یا سوخت‌های متمم در بویلرها و کوره ها می باشد. استفاده از RDF در بویلرها با مشکلاتی همراه است که شامل موارد زیر است:

۱) درصد هوای اضافی زیادی مصرف می شود.

۲) سوختن ناکامل RDF باعث کاهش ظرفیت حرارتی بویلر و تولید مقادیر زیادی خاکستر به ازای واحد انرژی تولید شده و همچین باعث اضافه ظرفیت در سیستم جابجایی خاکستر می گردد. بعلاوه سوختن ناکامل به طور معکوس روی بازده حرارتی و بازیافت انرژی اثر گذار است. در کوره های دوار به علت زمان ماند بالا این مورد کمتر اتفاق می افتد.

۳) همانطورکه قبلاً گفته شد RDF بیشتر شامل کاغذ و پلاستیک بوده که دارای ارزش حرارتی بالایی نسبت به زغال سنگ می باشند، ولی تقریباً دارای درصد بالایی از خاکستر (۶-۴ برابر بیشتر از زغال سنگ) هستند که می تواند به بویلرها آسیب برساند و همچنین به تجهیزات بیشتر و گرانتری برای حمل و نقل خاکستر نیاز است .

۴) RDF ممکن است شامل کلر باشد و باعث خوردگی تیوبهای داخل بویلرها شود. حضور ذرات بسیار ریز شیشه و فلز موجود در RDF نیز می تواند باعث ایجاد اشکال در احتراق گردد.

با توجه به مشکلات استفاده ازRDF در بویلرها، بهترین مکان مصرف، کوره های دوار در صنایع سیمان خواهد بود.

1) Fluidized bed combustor
2) Gasification
3) Pyrolysis

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

سوخت مشتق شده از تایرهای فرسوده (TDF)

به طور کلی، تایرهای دارای عمر مفید را با دو روش شیاردار کردن و یا روکش مجددا به چرخه مصرف باز می‌گردانند. (شیاردار کردن برای تایر سواری به لحاظ عمق کم آج امکانپذیر نیست)، اما تایرهای مستعمل بدون عمر مفید (تایرهایی که دیگر قابل ترمیم یا روکش گذاری نیستند)دارای حالات زیر هستند:

۱) بازیابی مجدد جهت تولید محصولات دیگر (خرد کردن جهت استفاده در آسفالت و تهیه کفپوش و ...)

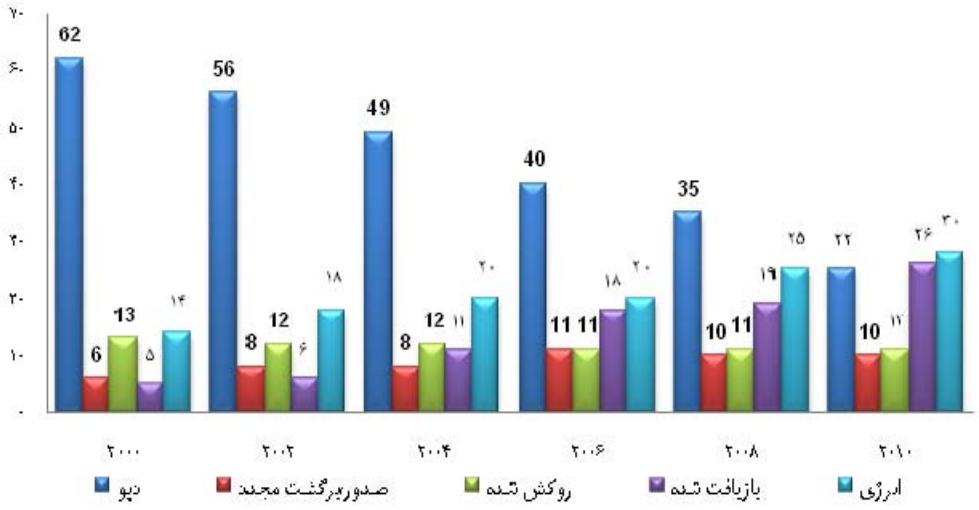
۲) بازیابی مواد اولیه (بازیافت کائوچو، گرانول و ...)

۳) احیای انرژی (به عنوان سوخت)

۴) دفن (در بسیاری از کشورها ممنوع می باشد)

در کشورهای صنعتی در هر سال به ازای هر شهروند یک حلقه تایر مصرف می‌شود و این به معنی سرانه مصرف تقریبی ۹ کیلوگرم تایر برای هر نفر در سال است. در ایران به ازای هر ۵ نفر یک خودرو وجود دارد و طبق آمارهای موجود، جمعیت ۷۷ میلیون نفری ایران نیز در هر سال حدود ۱۳ میلیون حلقه تایر مصرف می‌کنند که این به معنی مصرف بیش از ۲۵۰ هزار تن تایر در سال است. به عبارت دیگر، سرانه مصرف تقریبی لاستیک در ایران حدود ۳/۳ کیلوگرم برای هر نفر است[۲].

شکل (۵) چگونگی مصرف تایرهای فرسوده در راستای احیای انرژی در اتحادیه اروپا را نشان می دهد[۱۱].



شکل۵) چگونگی مصرف تایرهای فرسوده در اتحادیه اروپا

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

امکان تزریق تایر به‌صورت کامل و یا خردشده به کوره‌های سیمان وجود دارد. در اکثر موارد، این تزریق از دهانه فوقانی کوره (محل خوراک دهی) مواد خام انجام می‌شود. قابل ذکر است که کوره‌های مجهز به پیش‌گرمکن، بهترین محیط جهت استفاده از تایرهای کامل و یا خرد شده است. در بهترین شرایط می توان تایرهای خردشده را به قسمت پیش‌گرمکن و تایرهای کامل را به دهانه ورودی کوره تزریق نمود.

در مورد آلایندگی این سیستم نیز باید گفت که سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا اقدام به راه‌اندازی پروژه‌های مختلفی در مورد بررسی آلاینده‌های تولیدی هنگام سوختن تایر در کوره‌های مختلف نمود و این بررسی را در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی و نیز واحدهای صنعتی به اجراء درآورد، حاصل این تحقیقات بیان داشت که آلاینده‌های منتشره از این سوخت مکمل، بیشتر از آلایندگی سوخت‌های اصلی کارخانه‌های سیمان نبوده و در اکثر موارد از میزان NO_X تولیدی نیز کاسته شده است[۲۱].

تجزیه و تحلیل امکان استفاده از تایر در صنعت سیمان ایران

اکسیژن و هیدروژن حدود ۹۰٪ از تایر را تشکیل می‌دهند که این امر باعث احتراق سریع و ارزش حرارتی نسبتا بالای آن می‌شود. حداقل ارزش حرارتی تایرها در حدود ۳۳ MJ/kg (۷۶۵۰kcal/kg) است[۱۲].

در مورد استفاده از تایر به عنوان سوخت در صنعت سیمان می‌توان شرکت لافارج[1]را نام برد که در بیش از ۴۰ کشور جهان دارای کارخانجات تولید سیمان است. این شرکت در پنج کارخانه در آمریکا شمالی و ده کارخانه در اروپا و دو کارخانه در آسیا و یک کارخانه در آمریکای جنوبی از تایرهای فرسوده به‌عنوان سوخت کمکی استفاده می‌نماید و برای سر و سامان دادن به این امر یک شرکت جانبی با عنوان سیستم‌های زیست محیطی[2] را خریداری نموده است تا بهتر بتواند از این مزیت استفاده کند.

یکی از نکات مثبت استفاده از تایر فرسوده آن است که انبار تایرهای فرسوده در اقصی‌نقاط کشور وجود دارند و در مقابل کارخانه‌های سیمان نیز در سراسر کشور توزیع شده‌اند. با یک سازوکار ساده می‌توان تایرها را جمع آوری و در اختیار کارخانه‌های سیمان قرار داد. اساسا الزام‌های موجود برای بکارگیری تایر به عنوان سوخت در صنعت سیمان ایران را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد:

الف) حذف تدریجی یارانه‌ها از سوخت های فسیلی

ب) سخت‌تر شدن استانداردهای دفن زباله و بازیافت

1) Lafarge
2) Environmental System

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

ج) افزایش تولید خودرو و انبارش تایرهای فرسوده درکشور

با توجه به موارد فوق می‌توان سوخت حاصل از تایر را به عنوان سوخت کمکی درکارخانه‌های سیمان ایران نیز مورد استفاده قرار داد.

مشخصات و کیفیت سوخت‌های مطرح در صنایع سیمان

ارزش سوختی پسماند به طور مستقیم با میزان مواد قابل احتراق در آن و به طور معکوس با مقدار رطوبت موجود در آن بستگی دارد. به همین دلیل، قبل از سوزاندن مستقیم یا در هنگام تولیدRDF، باید مواد فسادپذیر که درصد بالایی از رطوبت را دارا هستند از پسماند جدا یا خشک شوند.

جدول۱) مشخصاتRDF و TDFو MSWتولید شده و مقایسه آن با دیگر سوخت های رایج [۵,۹,۱۵,۱۸,۱۹]

نوع سوخت	واحد	ارزش حرارتی	درصد رطوبت	درصد خاکستر
RDF	(kcal/kg)	۳۰۰۰–۳۵۰۰	۱۵ –۲۵	20-22
TDF	(kcal/kg)	۷۵۰۰–۸۵۰۰	۵ –۱۰	۵
MSW	(kcal/kg)	۲۵۰۰–۳۰۰۰	۳۰ –۴۰	۲۵ –۳۵
زغال سنگ	(kcal/kg)	۶۵۰۰–۷۵۰۰	۳ –۷	۷ –۱۲
گاز طبیعی	$(kcal/m^3)$[1]	۸۲۰۰–۸۶۰۰	بسیار ناچیز	بسیار ناچیز
مازوت	$(kcal/L)$[2]	۹۷۹۰	۰/۵	۰/۴
گازوئیل	$(kcal/L)$[3]	۹۲۳۲	۰/۳	۰/۰۱

سوزاندن انواع مختلف زباله نیاز به کنترل دقیق و انطباق فرایندهای فناورانه نسبت به هر نوع زباله دارد. خواص زیر باید قبل از سوزاندن سوخت جایگزین به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد[۲۳]:

۱) حالت فیزیکی سوخت(جامد، مایع،گاز)

۲) محتوای عناصر در چرخه سوخت (سدیم، پتاسیم، کلر، گوگرد)

۳) سمیت (ترکیبات آلی، فلزات سنگین)

---

۱) یک مترمکعب گاز طبیعی حدود ۰/۸ کیلوگرم وزن دارد.

۲) یک مترمکعب مازوت در حدود ۰/۹ کیلوگرم وزن دارد.

۳) یک متر مکعب گازوئیل بین ۰/۸۴ الی ۰/۹۶ کیلوگرم وزن دارد .

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

۴) ترکیبات و محتوای خاکستر

۵) مواد فرار در محتوای سوخت

۶) ارزش حرارتی سوخت

۷) خواص فیزیکی (اندازه، چگالی، یکنواختی یا همگنی)

۸) خصوصیات خردایش و سختی در آسیاب کردن

۹) مقدار رطوبت موجود در سوخت

۱۰) میزان تغییر فناورانه جهت مصرف بهینه سوخت

به عنوان مثال، ارزش حرارتیRDF را می توان با استفاده از غربال‌های مناسب، قبل و بعد از کاهش اندازه، افزایش داد. خارج کردن ذرات خیلی ریز، مواد غیرآلی یا مواد غیر قابل احتراق و مواد آلی مرطوب از RDF می تواند ارزش حرارتی RDF را تا۲۰٪ نسبت به RDF که دارای ذرات خیلی ریز یا مواد آلی مرطوب هستند، افزایش دهد[۶].

به سوخت های دیگری هم می توان اشاره کرد که از ارزش حرارتی مناسبی بر خوردارند، اما به دلیل کم و یا به مقدار کافی در دسترس نبودن، به صورت انفرادی کمتر مورد استفاده قرار می گیرند و بیشتر سعی می شود در مخلوط RDFبه کار روند. به عنوان مثال، کاغذ دارای ارزش حرارتی MJ/Kg ۲۲ـ۱۲/۵ و پلاستیک‌های غیر قابل بازیافت دارای ارزش حرارتی MJ/Kg ۴۰–۲۹/۵ و چوب دارای ارزش حرارتی MJ/Kg ۱۷ـ۱۵ هستند. با توجه به ارزش حرارتی بالای این مواد، در بسیاری از کشورهای صنعتی از این مواد به عنوان سوخت‌های متمم همراه با سایر سوخت‌ها استفاده می‌شود[۲۳].

فناوری استفاده از سوخت های جایگزین در صنایع سیمان

استفاده از سوخت های جایگزین در این صنعت با فناوری‌های مختلفی انجام می شود که در زیر به مهمترین آنها اشاره می شود:

الف) استفاده از مشعل های مولتی برنر[1]

ب) فناوری هات دیسک[2]

ج) استفاده همزمان از هر دو سیستم فوق

لازم به ذکر است که هر یک از موارد فوق نیازمند سیستم انبارش، توزین و انتقال خاص خود می باشد.

1) Multi burner
2) Hot Disc Technology

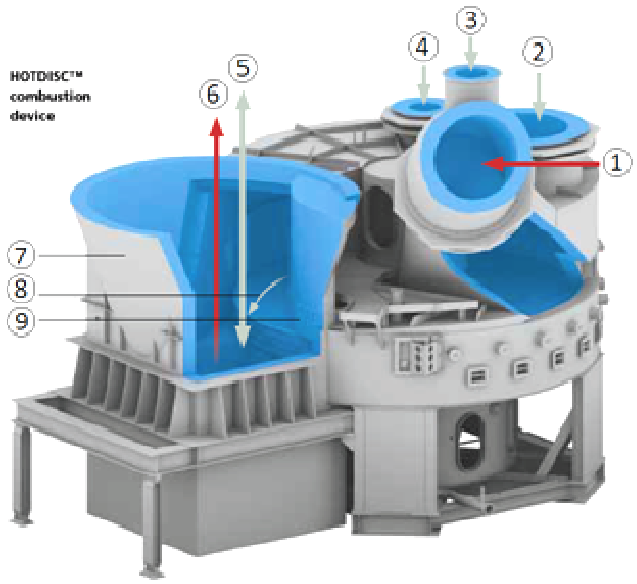
[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

استفاده از مشعل های مولتی برنر

با استفاده از چند مشعل مولتی برنر و حسگرهای حرارتی کوره می‌توان با تزریق سوخت جایگزین به داخل کوره، بدقت دمای سیستم را کنترل نمود. روشن است که در صورت موجود بودن سوخت جایگزین به مقدار فراوان و با ترکیب ثابت، استفاده از فناوری مشعل‌های مولتی برنر از یک طرف موجب ثبات شعله و سهولت در کنترل فرایند و از طرف دیگر، از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه خواهند بود.

فناوری هات دیسک

سیستم هات دیسک بر روی کلساینر[1] نصب شده و به عنوان یک کوره متحرک عمل می کند. نحوه عملکرد هات دیسک به این صورت است که سوخت جایگزین وارد سیستم و توسط هوای داغ پیشگرم شده، سپس روی صفحه دوار به طور کامل سوزانده می شود. گازهای داغ حاصل از احتراق از سیستم خارج و وارد کلساینر می گردد. خاکستر باقیمانده توسط لیسه زداینده از روی صفحه جدا و به محفظه نگهداری خاکستر منتقل می شود[۱۴].



شکل٦) نمایی برشی از یک سیستم هات دیسک[۱۴]

قسمت های مهم سیستم هات دیسک که در شکل (۶) نمایش داده شده اند، عبارتند از :

1) calciner

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

۱) دریچه ورودی هوای داغ
۲) دریچه ورودی سوخت جایگزین
۳) دریچه ورودی پیش گرمکن مواد خام
۴) دریچه اضطراری ورود مواد خام سرد
۵) خاکستر باقیمانده
۶) خروجی گازهای کوره
۷) کانال کوره
۸) صفحه دوار
۹) لیسه زداینده

کنترل احتراق توسط پارامترهایی از قبیل سرعت چرخش صفحه، کنترل ورودی و خروجی هوای داغ، کنترل اکسیژن، کنترل ورودی و خروجی مواد خام و خاکستر و نیز کنترل مشعل های اضطراری صورت می پذیرد[۲۰].

دیدگاه اقتصادی در استفاده از سوخت های جایگزین در صنعت سیمان ایران

هزینه احداث واحد فرآوری پسماند برای دریافت حداکثر ۱۰۰۰ تن زباله در روز که نهایتا منجر به تولید کمپوست و سوخت مشتق شده از زباله شود بالغ بر ۱۵۰ میلیارد ریال[۱] برآورد می‌گردد. همچنین در حال حاضر، هزینه تولید هر کیلو RDF در حدود ۶۰۰ ریال است[۴].

نکته فوق از آن جهت اهمیت می یابد که با توجه به سه برابر بودن ارزش حرارتی مازوت نسبت به RDF، استفاده از آن توسط صنایع سیمان تا هنگامی که قیمت مازوت و گازکمتر از نرخ جهانی باشد، توجیه اقتصادی برای این صنعت نخواهد داشت.

قیمت مازوت ایران در خلیج فارس در حدود ۱۷۰۰۰ ریال در هر لیتر و قیمت گازی که به کشورهای همسایه صادر می‌شود به ازای هر متر مکعب در حدود ۱۵۰۰۰ ریال می باشد و در حال حاضر با اجرای برنامه هدفمندی یارانه ها به ترتیب به میزان ۲۰۰۰ و ۷۰۰ ریال در بازار داخلی رسیده است. البته لازم به ذکر است که از انتهای سال ۱۳۹۱ دولت قیمت مازوت را برای صنایع سیمان برابر قیمت گاز محاسبه می‌کند که با توجه به ارزش حرارتی بالاتر مازوت، صنایع

---

۱) هزینه ها مربوط به ابتدای سال۱۳۹۲می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

سیمان به سمت استفاده هرچه بیشتر از این سوخت خواهند رفت[۳].

از طرفی، قیمت تایر فرسوده در ایران به ازای هر کیلوگرم ۴۰۰-۳۵۰ ریال می باشد که بهای تمام شده آن برای صنایع سیمان با احتساب هزینه حمل و نقل، آماده سازی و خردایش در حدود ۵۵۰-۵۰۰ ریال در هر کیلوگرم خواهد شد. جدول (۲) مقایسه بهتری را بین سوخت های رایج و جایگزین نمایش می دهد.

جدول۲) مقایسه اقتصادی بین مصرف سوخت های رایج و جایگزین

نوع سوخت	واحد	قیمت داخل ایران (ریال)	مقدار مصرف برای تولید ۱تن کلینکر(بر حسب واحد)	هزینه انرژی برای تولید ۱تن کلینکر(ریال)
RDF	kg	۵۵۰ - ۶۰۰	۲۶۰	۱۴۸۵۰۰
TDF	kg	۵۰۰ - ۵۵۰	۱۱۴	۵۹۸۵۰
گاز طبیعی	m^3	۷۰۰	۱۰۴	۷۲۸۰۰
مازوت	L	۷۰۰	۸۹	۶۲۳۰۰

فرض کنید که در یک کارخانه سیمان با استفاده از سوخت جایگزین طی یک دوره مشخص، ارزش حرارتی معادل۱۰۰۰ متر مکعب گاز (kcal $۸/۴*۱۰^۶$) صرفه جویی انرژی صورت گرفته باشد. با در نظر گرفتن قیمت جهانی سوخت های مورد استفاده متداول در این صنعت، درآمد حاصل از صرفه جویی سوخت برای دولت در جدول (۳) به شرح زیر خواهد بود.

جدول۳) مقایسه اقتصادی درآمد حاصل از صرفه جویی سوخت در صنایع سیمان (kcal $۸/۴*۱۰^۶$)

شرح	واحدها	میزان سوخت صرفه جویی شده	درآمد حاصل از صرفه جویی برای دولت (دلار)
گاز طبیعی[۱]	m^3	۱۰۰۰	۵۰۵
مازوت[۲]	Liter	۸۵۸	۴۸۶
زغال سنگ[۳]	kg	۱۲۰۰	۱۲۰
گازوئیل[۴]	Liter	۹۱۰	۷۴۵

۱) قیمت صادراتی۱۰۰۰ متر مکعب گاز ایران ۵۰۵ دلار می باشد.
۲) قیمت هرتن مازوت۲۸۰ ایران تحویل جزیره خارک، ۶۳۰ دلار می باشد.
۳) قیمت جهانی هرتن زغال سنگ کنستانتره کک شور ۱۰۰ دلار می باشد.
۴) قیمت هر تن گازوئیل ایران در خلیج فارس۹۱۰ دلار می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

این در حالی است که با توجه به ارزش حرارتی و قیمت سوخت های جایگزین در ایران، استفاده از آن نه تنها برای این صنعت سودآور نبوده، بلکه هزینه بالای تغییر یا تکمیل فناوری نیز در نگاهی اجمالی، خارج از منطق اقتصادی بازگشت سرمایه می باشد.

با توجه به اینکه در بسیاری از کشورها تحویل RDF به کارخانجات سیمان به صورت رایگان انجام شده و دولت‌ها به منظور حفظ محیط زیست و جلوگیری از دفن پسماندها، مابه‌التفاوت هزینه های آن را به صورت یارانه به تولیدکننده پرداخت می نمایند، اقدامات حمایتی دولت در این مدت (قبل از رسیدن به قیمت جهانی و حتی پس از آن) به منظور جلوگیری از افزایش قیمت تمام شده سیمان، راهگشا خواهد بود.

در نگاهی دیگر، صنعت سیمان ایران در سال ۱۳۹۱ به ازای تولید ۷۱ میلیون تن، در حدود $۶۱/۷۷ \times ۱۰^{۱۲}$ کیلوکالری انرژی حرارتی مصرف نموده است. اگر بخواهیم این انرژی را توسط تایرهای فرسوده تامین کنیم، می‌بایست به میزان $۷/۷۲۱۲۵ \times ۱۰^{۶}$ تن تایر در کوره‌های این صنعت بسوزانیم. با توجه به تولید سالانه ۲۵۰ هزار تنی لاستیک فرسوده در ایران، اگر تنها ۱۲۵ هزار تن آن سوزانده شود، به طور میانگین انرژی در حدود ۱۰۱۲ کیلوکالری آزاد خواهد شد که این رقم تنها ۱/۶۲ درصد از نیاز حرارتی در این صنعت را برآورده خواهد نمود.

در استفاده از سوخت های حاصل از زباله نیز تقریبا همین سناریو حاکم است. طبق آمار دریافتی از سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، هر ایرانی ب طورمیانگین روزانه بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ گرم زباله تولید می کند[7].

همانطور که قبلا ذکر شد، از هرتن زباله شهری می توان حدود ۲۴۰ کیلوگرم RDF استحصال نمود. با توجه به جمعیت ۷۷ میلیون نفری ایران، سالانه در حدود $۴/۷۲۱۶۴ \times ۱۰^{۶}$ تن سوخت مشتق شده از زباله خواهیم داشت. اگر انرژی هر کیلوگرم آن را ۳۳۵۰ کیلوکالری در نظر بگیریم. سالانه در حدود $۱۵/۸۱۷۴۹۴ \times ۱۰^{۱۲}$ کیلوکالری انرژی به واسطه سوزاندن این سوخت خواهیم داشت. این رقم تنها ۲۵/۶ درصد از نیاز حرارتی این صنعت را فراهم می‌آورد.

اگر به طور همزمان از هر دو سوخت در این صنعت استفاده کنیم، با احتساب کاهش ۲۷/۲۲ درصدی استفاده از سوخت‌های فسیلی در این صنعت، سالانه حدود دو میلیارد متر مکعب گاز صرفه جویی خواهد شد که ارزش صادراتی آن برابر یک میلیارد و ده میلیون دلار می باشد. اگر این رقم را بین ۶۷ کارخانه موجود تقسیم کنند، سالانه به هر کدام مبلغ پانزده میلیون دلار تخصیص داده می شود که این افزایش نقدینگی بسیار قابل توجه می باشد. از طرفی، واحد تولیدی در همان سال اول قادر به تغییر فناوری تولید و کاهش نرخ مصرف انرژی در دیگر زمینه ها خواهد بود. البته نباید از این نکته غافل گردید که محاسبات فوق در خوش بینانه ترین حالت بررسی شده و تحقق کامل آن نیازمند دانش و مدیریت پیچیده‌ای است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

نتیجه گیری

با توجه به مصرف بالای انرژی حرارتی و الکتریکی در صنایع سیمان ایران در سال ۱۳۹۱ به ترتیب به میزان $۶۱/۷۷\times۱۰^{۱۲}$ کیلوکالری و $۸/۰۲۳\times۱۰^{۹}$ کیلووات ساعت و افزایش سالانه تولید و مصرف این محصول از یک طرف و قدیمی و کم بازده بودن ماشین آلات تولید و گران بودن فناوری های جدید از طرف دیگر، به نظر می رسد صاحبان این صنعت با همکاری دولت ابتدا باید با استفاده از سوخت های جایگزین، سهم انرژی را در قیمت سیمان حداقل ۱۰٪ کاهش داده و سپس از محل افزایش درآمد حاصل، دست به نوسازی و خرید فناوری‌های جدید تولید سیمان بزنند.

با توجه به الزامات تشریح شده در متن مقاله، صنعت سیمان از شرایط مناسبی برای تعامل با معضل تایرهای فرسوده برخوردار بوده و می‌تواند از مزایای آن کمال استفاده را ببرد. نباید فراموش کرد که تایرهای فرسوده علاوه بر مشکل عدم جذب در طبیعت در معرض خطر آتش‌سوزی در مراکز تجمع تایر نیز قرار دارند که باید مورد مداقه بیشتر قرار گیرد.

طولانی بودن زمان ماند و بالا بودن دمای عملیاتی در کوره‌های پخت سیمان باعث به‌وجود آمدن شرایط ایده‌آلی برای استفاده از تایر به عنوان سوخت کمکی شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی چندین کوره که تایر را به‌صورت کامل یا خرد شده مصرف کرده‌اند، بیانگر آن بوده است که آلاینده‌های منتشره در هوا علاوه بر آنکه تأثیر منفی نداشته‌اند، در بعضی موارد بهبود شرایط را نیز نشان داده‌اند.

از طرفی، به طور متوسط از بازیافت کامل هر تایر سواری، می‌توان حدود یک کیلوگرم فلز، هفت کیلوگرم پودر لاستیک، یک کیلوگرم فیبر نایلونی با کیفیت مطلوب به‌دست آورد. با این حساب، سوزاندن تایر به عنوان سوخت جایگزین و یا بازیافت آن نیز مساله ای است که می بایست از نظر اقتصادی به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد. اینکه کدام یک از این روش ها ارزش افزوده بیشتری برای کشور دارد، تامل برانگیز است.

اگر هزینه ماشین آلات تولید سوخت مشتق شده از زباله از طرف دولت به شهرداری ها به صورت وام پرداخت شود، به نظر می رسد آنها از محل فروش آن قادر به پرداخت وام و سودآوری و اشتغال‌زایی این صنعت می باشند. اما اگر هزینه ماشین آلات سوزاندن این سوخت برای کارخانجات از سوی دولت به صورت وام های کم بهره و طولانی مدت پرداخت شود، صنایع سیمان قادر به پرداخت آن نخواهد بود.

برای صرفه جویی یک متر مکعب گاز می بایست حدود ۲/۵ کیلوگرم RDFسوزانده شود که در مقایسه قیمت یک مترمکعب گاز و ۲/۵ کیلوگرم RDF در می‌یابیم، صنایع سیمان به ازای این صرفه جویی باید حداقل ۷۰۰ ریال بیشتر پرداخت نمایند. از طرفی، این صرفه جویی برای دولت ۱۵۰۰۰ ریال درآمد صادراتی به دنبال خواهد داشت.

به نظر می رسد اگر دولت به جای کاهش قیمت مازوت و سوق دادن صنایع سیمان به استفاده بیشتر از آن، این صنعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

را حداقل در یک سوم از درآمد حاصل از این صرفه جویی شریک نماید، می تواند نقش موثری در جهت نوسازی فناوری و بهینه سازی مصرف سوخت در یکی از صنایع انرژی بر ایران ایفا کند.

منابع

[۱] آمار دفتر صنایع معدنی و کانی های غیرفلزی وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ سال ۱۳۹۲

[۲] انجمن صنفی صنعت تایر جمهوری اسلامی ایران http://ngotire.com/

[۳] انجمن صنفی کارفرمایان صنعت سیمان ایران http://cementassociation.ir/

[۴] بررسی استفاده از سوخت های جایگزین در صنایع سیمان ایران؛ حسن رضویان؛ شرکت سیمان هگمتان؛ ۱۳۹۲

[۵] پایگاه ملی داده های علوم زمین جمهوری اسلامی ایران http://www.ngdir.ir

[۶] روشهای تبدیل پسماند بهRDF ، فاطمه هادی، سومین همایش مدیریت پسماند ۱۳۸۶

[۷] سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد /http://wmo.mashhad.ir

[۸] سازمان بهینه سازی مصرف سوخت ایران http://ifco.ir/industry/industryParts/mine/cement1.asp

[۹] مروری برسوخت مصرفی و شاخص های آن در صنعت سیمان؛حسین چهرگانی، ابراهیم چشم هوزانی؛ ماهنامه علمی- تخصصی فناوری سیمان، شهریور و مهر ماه ۱۳۹۱- شماره ۵۴

[۱۰] معیارها و مشخصات فنی مصرف انرژی الکتریکی وحرارتی و گروههای انرژی در فرآیند تولید سیمان؛ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران۱۳۸۹

[۱۱] وزارت صنایع و معادن، معاونت امور تولید، دفتر صنایع غیر فلزی، گزارش بازیافت لاستیک، سال ۱۳۹۱

[12] C. Ducharme, N. Themelis; "Analysis Of Thermal Plasma – Assisted Waste-to Energy Processes"; Earth and Environmental Engineering and Earth Engineering Center, Columbia University, New York, NY 10027; Proceedings of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference; NAWTEC18; May 11-13, 2010, Orlando, Florida, USA.

[13] E. Mokrzycki, A. Uliasz-Bochen´czyk; Alternative fuels for the cement industry; Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences, Wybickiego 7 Str, 30-950 Krakow 65, PO Box 49, Poland, 2003.

[14] HOTDISC™combustion device; FLSmidth Inc.;www.flsmidth.com; infous@flsmidth.com.

[15] http://www.bp.com/.

[16] M, Beckmann, M, Pohl, D, Bernhardt and K, Gebauer; "Criteria For Solid Recovered Fuels As a Substitute For Fossil Fuels – A Review"; Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Power Engineering, Dresden, Germany; Waste Management & Research; April 2012, vol30, S. 354 - 369.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]

[17] Nath, K.J., "Solid Waste Management in the Present Indian Perspective", proceedings of ISWA 1999 Annual Conference, Jönköping, Sweden, September 1999.

[18] National Iranian Oil Company; International Affairs;http://www.nioc-intl.ir/Bunkers.html.

[19] Philip A Alsop, Hung Chen and HermaTseng, "The Cement Plant Operation Handbook", International Cement Review, 2007.

[20] . Pomberger R, Klampfl-Pernold H, Abl C;"Current issues on the production and utilization of medium-calorific solid recovered fuel: a case study on SRF for the HOTDISC technology"; University of Leoben, Leoben, Austria; April 2012

[21] SEPA : United States Environmental Protection Agency;

http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/industrial/special/ckd/.

[22] USGS : United States Geological Survey;

http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2013-cemen.pdf.

[23] Zhiqi Wang, Haitao Huang, Haibin Li, Chuangzhi Wu, and Yong Chen , "Pyrolysis and Combustion of Refuse-Derived Fuels in aSpouting-Moving BedReactor ", Energy & Fuels 2010, 16, 136-142

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-07-31]