

بکارگیری سوخته‌های ضایعاتی در صنعت سیمان

مهرداد کریمی^۱ - مهدی ثمر^۲، حسن جهان زاده^۳

^۱استاد یار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

^۲مربی آموزشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

^۳مربی آموزشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

چکیده

روش روز افزون مصرف انرژی در جهان و بخصوص در بخش صنعت نیاز برای جایگزین نمودن سوخته‌های غیر فسیلی (ضایعاتی) را افزایش داده است. با توجه به کمبود منابع سوخته‌های فسیلی و همچنین مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید گازهای مختلف به مقدار زاید که سبب ایجاد پدیده های خطرناک گلخانه ای و بارانهای اسیدی گردیده و همچنین هزینه های بالای این نوع سوخته‌ها در نتیجه استفاده از سوخته‌های جایگزین ضایعاتی که در مقایسه با سوخته‌های فسیلی از نقطه نظر هزینه ارزانتر می باشند و همچنین از نظر زیست محیطی آلاینده‌گی کمتری دارند استفاده می شود.

از میان انواع سوخته‌های ضایعاتی موجود که توسط کارخانجات صنعتی و نیروگاه‌های مختلف بعلاوه انواع ضایعات مربوط به مناطق شهری تولید می گردد، مهمترین آنها تایر ها، پلاستیک ها، کاغذ و چوب و فاضلاب های شهری و صنعتی است، که دارای انرژی حرارتی بالایی بوده و خطرات آلاینده‌گی آنها نیز با رعایت استانداردهای مربوط به سوزاندن کمتر است. این سوخته‌های متداول در بیشتر کشورهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. میزان سوختی که توسط تایرهای ضایعاتی جایگزین می شود حدود ۱۵-۱۰ درصد می باشد. همچنین بیشترین مصرف تایرهای ضایعاتی در کوره های سیمان می باشد. ارزش پتانسیل نهفته در ۲۴۲ میلیون حلقه تایر فرسوده در هر سال برابر با انرژی ۱۲ میلیون شبکه نفت خام می باشد. انواع پلاستیکهای کشاورزی بخصوص اگروپلاستیکها نیز بعنوان سوخت جایگزین در صنعت سیمان مورد استفاده قرار می گیرند، زیرا نسبت مواد فرار آنها بین ۷۵ تا ۸۰ درصد بوده و ارزش حرارتی آنها در حدود $8000 \frac{kcal}{kg}$ می باشد.

واژه های کلیدی: انرژی، سیمان، سوخت، سوخته‌های ضایعاتی و محیط زیست

بدون شک در هزاره جدید تمایل زیادی برای جایگزین نمودن سوخته‌های جدید به جای سوخته‌های فسیلی وجود دارد. بطوریکه بتوان از مواد ضایعاتی دارای انرژی حرارتی و زیان آور برای محیط زیست، سوخت جدیدی با آلاینده‌گی کمتر تولید نمود. تکنولوژی دسترسی به مواد ضایعاتی بعنوان سوخت در حال اصلاح است و گسترش این دیدگاه، مشروط به آنکه کارآیی آن برای پاکیزگی محیط زیست موثر باشد و هیچگونه آثار سوئی در محیط زیست ایجاد نکند، برای تولید سوخت و افزودنی‌ها مفید خواهد بود.

با توجه به اینکه این مهم در کشورهای صنعتی و توسعه یافته قانونی است، در این کشورها نوآوری در زمینه باز یافت مواد ضایعاتی مورد تاکید و پا فشاری قرار دارد و رقابت زیادی را در میان تولید کنندگان سیمان ایجاد نموده است.

بسیاری از این ضایعات دارای ارزش حرارتی بالا می باشند و بسیاری نیز شامل مواد معدنی معادل مواد خام سیمان هستند. بنابراین ضایعات اینگونه مواد، قابل جایگزینی با سوخته‌های فسیلی و مواد خام در جریان تولید سیمان می باشد، چرا که اکنون دیگرفن ضایعات به عنوان متداولترین روش، کافی و اقتصادی به نظر نمی رسد. در استفاده از ضایعات باید تعیین گردد، که هدف سوازندن و از بین بردن آنهاست یا استفاده از انرژی آنها مد نظر قرار دارد. هر چند استفاده از کوره های سیمان به دلیل دارا بودن محیط قلیایی، نسبت به کوره های زباله سوز از شرایط بهتری برخوردار است، لیکن می توان در مورد استفاده از انرژی اینگونه مواد، بررسی بیشتری را نمود.

ضایعاتی که بعنوان سوخت و برای استفاده از انرژی آنها استفاده می شوند ، شامل تایرهای مستعمل، روغنهای مایع (روغن های سوخته)، حلال های آلی غیر قابل مصرف، چوب و کاغذ، کاه و ضایعات حاصل از غلات، پلاستیک ها، زباله های شهری، لجن فاضلاب شهری، خار و خاشاک حاصل از طبیعت، لجن کاغذ، مشتقات سوختی، کربن نرم، پارافین، کود حیوانات اجزاء و پسماندهای حیوانات، کک نفت خام، رسوب اسید، واکس ها، رسوبات روغنی و می باشد.

در ذیل به توضیح مختصری در ارتباط با تعدادی از سوخته‌های ضایعاتی و جایگاه آنها در صنعت سیمان می پردازیم:

۱- تایر مستعمل

صنایع سوخت سازی و کسب انرژی از تایرهای زاید، بیشترین مقدار تایرهای زائد را به مصرف می‌رسانند. مطالعات متعددی نشان داده است که روش با صرفه در استفاده از حجم های زیاد تایر فرسوده، استفاده از آنها به عنوان سوخت می باشد. ارزش حرارتی هر تایر به طور متوسط در حدود 300000Btu می باشد که با توجه به آمارهای مربوط به گزارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، انرژی پتانسیل موجود در ۲۴۲ میلیون حلقه تایر فرسوده در هر سال، برابر با انرژی ۱۲ میلیون بشکه نفت خام (۹/۰ درصد انرژی مورد نیاز آمریکا) برای آن کشور است. مقدار مصرفی در صنعت سیمان مطابق گزارشهای سال ۱۹۹۴ برابر ۷ میلیون حلقه تایر می باشد و پیش بینی رشد روز افزونی می‌گردد.

از تایرهای فرسوده بیشتر به عنوان سوخت کمکی استفاده می کنند و ترکیب سوخته‌های مورد استفاده و میزان پاکیزگی آنها اهمیت دارد. از طرف دیگر آمارهای مصرف انرژی در صنعت سیمان آمریکا نشان می دهد که اگر تمامی تایرهای فرسوده به صنایع سیمان سازی اختصاص یابد، تنها ۱۱ درصد از کل سوخت مورد نیاز این صنعت را تامین خواهد کرد. در استفاده از تایرهای فرسوده برای صنعت سیمان موارد زیر قابل ذکر می باشد:

- خاکستر ناشی از سوختن تایرهای فرسوده بر کیفیت سیمان اثر مثبتی دارد.
- مقداری از اکسیدهای نیتروژن و سولفور آزاد می شود و مقدار خاکستر به جا مانده کمتر از معادل همان مقدار برای زغال سنگ است.
- این مواد اثر مثبتی در ترکیب مواد خام برای تولید سیمان دارد بعنوان مثال ، دارای مقدار زیادی آهن در ترکیب خود می باشند.

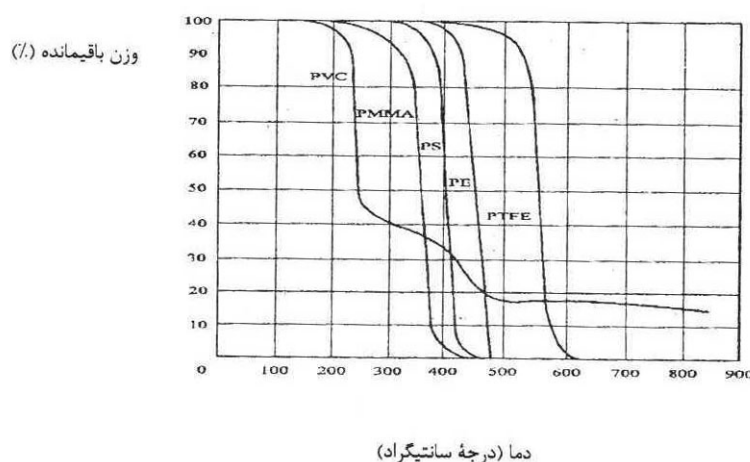
استفاده از سوخته‌ها به صورت توده ای اصولاً مشکل است . زیرا آنها یک یا چند فرایند برای رسیدن به سوختن در نقطه استاندارد، احتیاج دارد. اگر از تایر استفاده شود، به دلیل سایش زیادی که در سیستم های خرد کننده و آسیابها به وجود می آورد و همچنین در ضایعات چوب با وجود کنترل دقیق، فلزات و کانی های معدنی که به سادگی آسیاب نمی شوند، کاربرد آنها مفید خواهد بود.

در آلمان حدود ۲۰۰۰۰۰ تن تایلر مستعل در کوره های سیمان سوزانده می شود. این تایلرها به طور کامل وارد کوره می شوند و پس از طی مسیری در داخل کوره می سوزند. وقتی که این مواد به منطقه دمای حدود رسیدند، الیاف و سیمهای درون آن به تشکیل کلینکر شرکت می کنند. میزان سوختی که توسط تایلرهای کامل جایگزین می شود حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد می باشد.

۲- پلاستیکها

حدود ۲۰ درصد از پلاستیکهای تولید طی یک سال به مواد ضایعاتی تبدیل می گردند، درحالیکه بعد از ۵ تا ۵۰ سال تنها ۶۵ درصد از آنها دور ریخته می شوند پلاستیکهایی که باید طی یکسال دور ریخته شوند، عمدتاً مربوط به بسته بندی است. اساساً پلاستیکها از نظر کاربردهای حرارتی با سوخته های فسیلی متفاوت می باشند، مثلاً تمامی پلاستیکها در اثر حرارت نرم می شوند و می توانند طی حمل و نقل مشکلاتی را ایجاد نمایند. با این وجود، استفاده از پلاستیک به عنوان سوخت در کلساینر به دلیل تجزیه کامل آن در حرارت پایین و نداشتن نیتروژن، مناسب می باشد. شکل ۱ نتایج گرماسنجی پلاستیکهای مختلف را نشان می دهد.

شکل (۱) - بررسی های گرماسنجی چندین نوع پلاستیک



همانگونه که در این شکل ملاحظه می گردد، آزاد شدن مواد فرار بسته به نوع پلاستیک در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد آغاز شده و (به جزء در مورد PTFE) در دمای ۵۰۰°C به پایان می رسد. به دلیل وجود مواد فرار بسیار زیاد، احتراق پلاستیکها با احتراق سوخته های پودری تفاوت زیادی دارد، در حالیکه واکنشهای مربوط به آن، عمدتاً واکنشهای فاز گازی است. در جدول (۱) ترکیب شیمیایی ضایعاتی خاص، باید مراقب انتشار بیش از حد مجاز فلزات سنگین در گازهای خروجی بود، هر چند در عمل انتشار واقعی فلزات سنگین به طور طبیعی کمتر از محدوده مجاز است و با استفاده از سوخته های ثانویه تغییر زیادی نمی یابد. در جدول (۲) مقایسه ای بین مقادیر فلزات سنگین سوخته های مختلف و

خاک اره ارائه شده است. پلاستیک مورد نظر در مقایسه با سوخته‌های طبیعی دارای کادمیم و سرب زیادی است. بنابراین در انتخاب پلاستیکها، میزان فلزات سنگین آنها باید به دقت بررسی شود.

جدول (۱) اطلاعات مقایسه ای مربوط به سوخته‌های پلاستیکی مهم و زغال سنگ

اجزای تشکیل دهنده	واحد	زغال سنگ (GFK)	پلاستیک (PP)	پلاستیک (PS)	پلاستیک (PET)
ذرات ناپایدار	درصد وزنی	۳۰/۷۳	۱۰۰/۰۰	۹۹/۵۸	۹۳/۷۹
سوخت جامد	درصد وزنی	۶۱/۲۸	صفر	۰/۴۲	۶/۲۱
میزان آب	درصد وزنی	صفر	صفر	صفر	صفر
میزان خاکستر	درصد وزنی	۷/۹۹	صفر	صفر	صفر
کربن	درصد وزنی	۷۸/۵۰	۹۲/۵۲	۸۵/۸۳	۵۹/۴۷
هیدروژن	درصد وزنی	۴/۶۷	۷/۴۸	۱۴/۱۷	۳/۵۳
اکسیژن	درصد وزنی	۶/۰۷	صفر	صفر	۳۷/۰۰
نیتروژن	درصد وزنی	۱/۶۵	صفر	صفر	صفر
گوگرد	درصد وزنی	۱/۱۲	صفر	صفر	صفر
انرژی حرارتی	kJ/kg	۳۱۰۴۷	۳۹۷۹۳	۴۳۷۲۷	۱۹۵۹۵

جدول (۲) میزان فلزات سنگین حاصل از سوخته‌های مختلف و خاک طبیعی (بر حسب mg/kg)

نوع مواد	علامت	زغال سنگ	لیگنیت	انواع پلاستیک	خاک
آرسنیک	As	۱ تا ۱۳	۰/۲ تا ۰/۴	۰/۶	۲۰
سرب	Pb	۲۷ تا ۵	۱/۵ تا ۰/۷	۴۰۷	۱۰۰
کادمیم	Cd	۰/۷۱ تا ۰/۰۷	۰/۱ تا ۰/۰۶	۸۹	۱
کروم	Cr	۵۰ تا ۱	۶/۱ تا ۲/۳	۸۱	۵۰
جیوه	Hg	۰/۶۱ تا ۰/۰۵	۰/۱۴ تا ۰/۰۱	۰/۶۵	۰/۵
تالیم	Tl	۱/۲ تا ۰/۲	۰/۳ تا ۰/۱	-	-
روی	Zn	۱۵۰ تا ۲۰	۲۲	۳۸۶	۱۵۰

پلاستیکهای کشاورزی بر اساس ماده اولیه ای که در ساخت آنها مورد استفاده قرار می گیرد به دو دسته تقسیم می شوند: پلاستیکها که از ماده اولیه وینیل کلراید ساخته می شوند و پلاستیکهایی که ماده اولیه شان پلی اتیلن می باشد. به منظور جلوگیری از اثرات نامطلوب کلر بر روی کیفیت سیمان و فرایند تولید آن، تنها از پلاستیک هایی که ماده اولیه شان پلی اتیلن است استفاده می شود که این نوع پلاستیکها را «آگروپلاستیک» می گویند.

فوائد بازیافت آگروپلاستیکها و استفاده از آن بعنوان یک سوخت برای تولید سیمان

۱- از آنجا که سنگ آهک در دمای 1450°C در کوره گداخته شده و به کلینکر سیمان تبدیل می شود. جذب و خنثی سازی گازهای سمی و خروجی و تامین حرارت مورد نیاز کوره با استفاده از آگروپلاستیک ها موجب به صرفه شدن و سالم بودن این روش برای از بین بردن این مواد می باشد.

۲- گل و لای چسبیده به سطح آگروپلاستیکهای مستعمل به عنوان ماده خام مورد نیاز در تولید سیمان، مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، آگروپلاستیک ها را می توان بدون بر جای گذاشتن هر نوع ماده زائد ثانوی بازیافت کرد.

۳- مقادیر زیادی سوخت در یک کارخانه سیمان مصرف میشود. بنابراین مقداری آگروپلاستیکهای باز یافتی می تواند به عنوان یک سوخت جایگزین مورد استفاده قرار گیرد.

همان گونه که شرح داده شد، با مدیریت مناسب و پیش آماده سازی و سوزاندن آگروپلاستیکها، بازیافت حرارتی آنها با موفقیت صورت می پذیرد و ضمن اینکه روشی سالم، پایدار و ارزان می باشد، موجب می گردید که از آنها به عنوان بخشی از سوخت جایگزین زغال سنگ در صنعت تولید سیمان استفاده شود. در حال حاضر دو کارخانه سیمان در **Kanto, Tohoko** این روش را به کار برده اند و کارخانه های دیگر نیز در آینده نزدیک به دریافت آگروپلاستیک ها از کشاورزان و جایگزین کردن آن به عنوان بخشی از سوخت مصرفی روی خواهند آورد.

۳- زباله های خانگی

با توجه به حجم بالای این گونه زباله ها در جوامع بشری و مفید بودن برخی از اجزاء آن جهت سوخت بایستی در بکارگیری صحیح این گونه ضایعات جهت تولید سوخت توجه خاصی صورت گیرد. در این رابطه باید توجه داشت که ۳۰ تا ۵۰٪ از زباله اولیه برای سوزاندن مفید است و باقیمانده آن باید به مصارف دیگری برسد.

مواد مضر زباله قبل از ذخیره سازی در فرایند جداسازی و آشغالهای درشت نیز قبل از سیستم خردایش جدا می شوند. بخش قابل احتراق بعنوان سوخت مشتق شده از زباله معروف بوه و از خواص مناسبتری برخوردار است (ارزش حرارتی بین $16\frac{\text{Mj}}{\text{Kg}}$ - ۱۳). چنانچه اینگونه فرایند جداسازی صورت نپذیرد بعلت یکنواختی کم، محتوای کلر بین ۱-۵٪ و دانستیه کم انرژی حرارتی کمی را تولید خواهد کرد.

۴- چوبهای ضایعاتی

استفاده از چوبهای ضایعاتی در زمره شناخته ترین طرحها در خصوص استفاده از سوختهای جایگزین محسوب می گردد. برای بکار گیری اینگونه ضایعات بایستی اقداماتی نظیر کنترل تحویل، خرد کردن اولیه، جداسازی، آسیاب کردن و خشک کردن بر روی آن صورت گیرد تا بصورت خاک اره بتوان از آن استفاده نمود. بعنوان نمونه کارخانه **Rekingen** از اینگونه سوخت از سال ۱۹۹۴ بعنوان

سوخت در کارخانه استفاده نمود. جهت انجام این پروژه هزینه تأمین چوب ضایعاتی باید از پیش ارزیابی گردد.

۵- لجن فاضلاب

یکی از سوخته‌های ضایعاتی لجن فاضلاب می باشد ، که این تجربه توسط صنعت سیمان سوئیس بررسی شده است. بکارگیری فاضلابها با توجه به درصد بالای رطوبت (۸۵٪) آنها سبب اثراتی بر روی سیستم کوره می گردد. برای این منظور بایستی میزان این رطوبت را تا حدود ۲۵٪ کاهش داد که این امر نیز سبب مصرف مقدار بالایی از آن در صنعت سیمان می گردد. در خصوص استفاده از لجنهای فاضلابی باید این نکته را توجه داشت ، که بر خلاف سوخته‌های ضایعاتی دیگر این سوخت در انتشار آلاینده هایی نظیر CO_2 ، Hg ، P_2O_5 و Pb و Zn موثر می باشد. ولی در انتشار NO ، Ni ، Cr ، Mn و As ، تالیم و کادمیم نقش کمتری را داشته و حتی گاهی نقش منفی دارد. همچنین استفاده از آن تاثیری بر کیفیت سیمان نخواهد داشت.

۶- کک نفتی

کک نفتی محصول جنبی صنایع نفت است که معمولاً ارزانتر از زغال و دیگر سوخته‌های مرسوم مصرفی در صنایع سیمان می باشد. مقدار سولفور این نوع سوخت قابل توجه است، که جهت استفاده از آن باید مقدار آن را کاهش داد تا از خطر گرفتگی سیستم پخت توسط SO_3 جلوگیری بعمل آید. امروزه جهت آماده سازی کک نفتی بیشتر از آسیابهای غلطکی یا گلوله ای برای خردایش استفاده می شود.

۷- کود و ضایعات حیوانی

استفاده از کود و ضایعات حیوانی به عنوان سوخت سابقه دیرینه ای داشته و حتی در کشور خودمان هنوز در مناطق روستایی دیده می شود. البته سوزاندن این مواد در پخت سیمان بدلیل وجود فسفات و کلراید موجود در آنها ، محدودیتهایی را سبب می شود. ذکر این نکته لازم است که P_2O_5 در سیمان به مقدار کم سبب افزایش مقاومت می گردد اما درصدد بالای آن سبب کاهش واکنش گیرش و هیدراتاسیون می گردد. در جدول (۳) یک نمونه از آنالیز این نوع مواد مصرفی درج گردیده است . ضایعات حیوانی معمولاً بین ۵ تا ۲۰ درصد از انرژی مورد نیاز مصرفی در کوره های سیمان را سبب می گردد.

جدول (۳) تأکید شیمیایی ضایعات حیواناتی مشتمل بر کود و لاشه حیوانات (بر مبنای خشک)

خاکستر	۲۰ تا ۴۰ درصد
سولفور	۰/۵ تا درصد
کلر	۰/۶ تا ۱/۶ درصد
نیتروژن	تا ۸ درصد
L.O.I	تا ۱۸ درصد
ارزش حرارتی	۱۸ تا ۲۱ MJ/kg

۸- روغنهای ضایعاتی آلوده

سوزاندن روغنهای ضایعاتی در کوره های سیمان ، داستانی طولانی دارد. از پیشگامترین کشورها در این زمینه آلمان واتریش می باشند. آزمایشهای متعددی در بسیاری از کارخانجات از جمله فونیکس (phoenix) آلمان، لاجردورف (Lager dorf) ، جیمانندن (Gmunden) اتریش بر روی سوزاندن این روغنها انجام گرفت و مقدار SO_2 و NO_x ، فلزات سنگین، فلوئور، مواد آلی کلردار، PCB، دیوکسین ها و فوران ها بطور دقیق اندازه گیری شد و نتایج حاصل آلودگی کمی را در نتیجه سوزاندن روغنهای ضایعاتی نشان داد. در بکارگیری روغنهای ضایعاتی بعنوان سوخت ، بایستی به این نکته توجه کرد که ارزش حرارتی ویژه ناشی از آن باید بیشتر از 25000 KJ/kg باشد.

۹- ضایعات خمیری

در محیطهای صنعتی غالباً مقادیر قابل توجهی از مواد ضایعاتی قابل استفاده خمیری یا لجنی حاصل می شود. برخی از این مواد شامل رزین،رنگ، روغن جلا، لجن نفتی حاصل از تمیز کردن تانک ها، باقیمانده برج تقطیر، گریس و صابون که بسیاری از این مواد مضر هستند. استفاده از اینگونه مواد می تواند سبب صرفه جویی در هزینه ها گردد. البته به جهت خطرناک بودن ضایعات خمیری برای سوزاندن ابتدا باید پیش گرم یا تحت احتراق اولیه قرار گیرد و سپس به کوره تغذیه شود. در چنین حالتی بایستی دمای بالا و زمان اقامت کافی برای سوزاندن آن لحاظ گردد. استفاده از مایعات با ویسکوزیته بالا جهت مایع شدن ضایعات خمیری شکل مرسوم می باشد.

۱۰- موارد دیگر

مواد ضایعاتی زیر نیز در برخی کارخانجات بعنوان سوخته های ضایعاتی مورد استفاده قرار گرفته است:

- سوخته های مایع در کارخانه های Obourg و Altkrich

- باقیمانده برج تقطیر و چربی حیوانات در Intervaz

- لجن فاضلاب خشک و کود حیوانی در Intervaz

- خاک اراه در کارخانه Eclepens

- لاستیک خرد شده و فرو کربن در کارخانه Lagerdorf

- خاکستر آزاد در Lagerdorf

استفاده از ضایعاتی در صنعت سیمان بعنوان سوخت مستلزم شرایط خاصی است، که مهمترین آن ها مقدار ارزش حرارتی تولید شده توسط آنها و همچنین عدم تأثیر گذاری بر کیفیت سیمان می باشد.

در جدول (۴) لیستی از سوختهای جایگزین به منظور مقایسه با سوختهای معمول از لحاظ ارزش حرارتی درج گردیده است.

امروزه بکارگیری این سوختها در بسیاری از کشورهای صنعتی متداول می باشد ، که گاهاً در بعضی از آنها تا ۹۰ درصد از سوختهای کارخانجات سیمان را شامل می گردد. جدول ۵ مقدار جایگزینی سوختهای ضایعاتی در ۱۲ کشور اروپایی را نشان می دهد. البته بکارگیری این نوع سوخت ارتباط زیادی به شرایط محلی دارد. در جدول ۶ نمونه ای از این موضوع برای انواع سوختهای مصرفی در یک کارخانه سیمان آلمان نشان داده شده است.

جدول (۴) ارزش حرارتی سوختهای جایگزین و معمول (موارد خط کشی شده سوختهای معمول می باشند)

سوخت	ارزش حرارتی خالص (MJ/kg)
پلی اتیلن خالص	۴۶
نفت سبک	۴۲
نفت سنگین	۴۰
قیر (محصول جانبی)	۳۸
لاستیک خالص (بدون مواد پرکننده)	۳۶
زغال سنگ (انتراسیت)	۳۴
فلز آلومینیم	۳۱
روغنهای ضایعاتی و ضایعات مختلف پالایشگاه	۴۰ تا ۳۰
کک نفتی	۳۳
تایرهای ضایعاتی	۳۲ تا ۲۸
زغال بیتومن (خاکستر کم)	۳۹
زغال بیتومن (خاکستر زیاد)	۳۴
مخلوطهای مایع	۳۰ تا ۲۰
گاز طبیعی	۱۶ تا (۲۰ MJ/Nm ³)
لجن اسیدی، قیر اسیدی (حاصل از فرآیندهای نفتی)	۲۲ تا ۱۶
زغال سنگ قهوه ای (لیگنیت با ۱۰ درصد رطوبت)	۲۱ تا ۱۶
لایه پاتیلهای ذوب آلومینیم	۳۰
پی وی سی	۱۹
پوست خرما (با ۱۰ درصد رطوبت)	۱۹
کیک پرس کردن زیتون	۱۸
چوب خشک، پوست درخت و پوکۀ چوب (با ۱۰ درصد رطوبت)	۱۶
سپوس برنج (با ۱۰ درصد رطوبت)	۱۶
ضایعات اتومبیل مستعمل	۱۵
ضایعات خانگی (با ۱۰ درصد رطوبت)	۱۵
کود حیوانات	۱۵
ضایعات کاغذی	۱۵
پوکۀ اره کشی چوب با رطوبت ۲۵ درصد	۱۲ تا ۱۰
لجن فاضلاب خشک با ۱۰ درصد رطوبت	۱۰
ضایعات حاصل از خالص سازی نفت خام	۱۰
ضایعات خانگی (با ۳۰ درصد رطوبت)	۸/۵
لجن خشک فاضلاب (با ۳۰ درصد رطوبت)	۷/۵
آهن خالص	۷/۵

جدول (۵) نسبت جایگزینی سوخت های جایگزین در اروپا

کشور	مقدار جایگزینی (درصد)	سال ارزیابی
بلژیک	۳۰	۱۹۹۹
دانمارک	۴۰	۱۹۹۹
آلمان	۳۰	۲۰۰۱
فنلاند	۳	۲۰۰۰
فرانسه	۲۷	۱۹۹۹
انگلستان	۶	۱۹۹۸
ایرلند	صفر	۱۹۹۹
هلند	۷۲	۱۹۹۹
اتریش	۲۹	۱۹۹۹
لهستان	۱	۱۹۹۹
پرتغال	۱	۱۹۹۹
سوئیس	۳۴	۱۹۹۹
کشورهای اتحادیه اروپا	۱۲	۱۹۹۸

جدول (۶) توزیع انواع سوختهای جایگزین استفاده شده در صنعت سیمان آلمان (سال ۲۰۰۱)

نوع سوخت جایگزین	مقدار استفاده شده (تن در سال)
تایر و لاستیک	۲۳۴۰۰۰
روغنهای مستعمل	۱۲۸۰۰۰
ضایعات صنعتی و فرآیندی	۴۱۸۰۰۰
ضایعات صنعتی زیان آور و خطرناک	۱۰۲۰۰۰
چربی و کود حیوانات	۲۴۵۰۰۰
چوب خرد شده و خاک اره	۷۲۰۰۰
حلالها	۳۳۰۰۰
Podsel	۲۹۰۰۰
موارد دیگر	۸۰۰۰
کل مصرف	۱۲۶۹۰۰۰

ویژگی استفاده از سوختهای جایگزین

بر اساس بررسیهای انجام شده در سال ۱۹۹۱، در حدود ۳/۳ میلیون تن تقاضا برای مصرف زباله وجود داشته که ۱/۳ میلیون تن از آن در ژنراتورها و بویلرهای صنعتی، ۰/۵ میلیون تن در کوره های ویژه زباله سوز و حدود یک میلیون تن در کوره های سیمان سوزانده شده است. به همین علت هم اکنون بسیاری از آژانس های وضع قوانین علاقمند به کاربرد کوره های سیمان برای استفاده از ضایعات می باشند. زیرا علاوه بر کاربرد مفید ضایعات، آنها را می توان دفع نمود، بعنوان مثال در کارخانه سیمان

Brevik نروژ، تامین ۱۵٪ درصد از انرژی حرارتی مصرفی در سیستم پخت با استفاده از تایرهای مستعمل می باشد که این موضوع سبب کاهش اکسیدهای نیتروژن تا ۵۰ درصد شده است. آنچه که به عنوان سوخت ثانویه مورد اهمیت واقع میشود، هزینه و در دسترس بودن آن می باشد. همچنین میزان کالری سوخته های ثانویه مورد مصرف مهم می باشد. بنابراین تایرهای مستعمل و ضایعات چوب به عنوان سوخته های ثانویه مناسب در دسترس می باشد. در جدول (۷) آنالیز و میزان کالری حاصل در مقایسه با زغال سنگ مصرفی درج شده است.

جدول (۷) مقایسه تایر ، ضایعات چوب و زغال سنگ مصرفی به عنوان سوخت

سوخت	ضایعات چوبی	تایر مصرف شده	زغال سنگ
انرژی حرارتی خالص (MJ/kg)	۱۲/۷	۳۰/۹	۲۶/۵
مقدار خاکستر (%)	۵/۳	۶/۶	۱۴/۰
رطوبت (%)	۱۸/۰	صفر	۱/۸
C (%)	۴۴/۳	۷۱/۳	۷۰/۰
H (%)	۵/۷	۵/۹	۴/۰
O (%)	۴۳/۸	۲/۶	۷/۷
N (%)	۰/۷۹	۰/۲۶	۱/۶۵
S (%)	۰/۱۴	۱/۵	۰/۸
Cl (%)	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۰
Fe (%)	۰/۲۱	۱۲	۰/۴۴
Hg (mg/kg)	۰/۳	-	۰/۵
Zn (mg/kg)	۵۳۵	۱۴۰۰۰	۸۲

همانگونه که از جدول استنباط می گردد، از لحاظ زیست محیطی میزان نیتروژن تایرها و ضایعات چوب کمتر از زغال سنگ است. بنابراین میزان نیتروژن ورودی کاهش یافته و انتشار NO_x کم می شود. به علاوه قابل ذکر است که نوسانات ترکیب اجزاء لاستیکها به دلیل خواص لازم برای ساخت آنها، کم می باشد، نوسانات در ضایعات چوب به دلیل میزان رطوبت بالا، فلزات و مواد معدنی زیاد می باشد. اگر هدف از استفاده ضایعات، تامین انرژی باشد، باید شرایط زیر را دارا باشد:

- باید ارزش حرارتی ضایعات، بدون اختلاط با مواد دیگر، حداقل $1100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ باشد.
- بتوان به کارآیی حرارتی حداقل ۷۵ درصد رسید، یعنی قابلیت احتراق آن باید حداقل به ۷۵ درصد برسد.

- گرمای حاصل از آن قابل استفاده در همان محل یا در محل ثالثی باشد.
- تا آنجا که ممکن است باید ضایعات به جا مانده را بدون آنکه عملیات دیگری بر روی آن انجام شود، مدفون نمود، یا به عبارت دیگر استفاده از ضایعات چشم انداز محیط زیست را به هم نزند.

با توجه به ویژگیهای فوق، استفاده از فاضلاب به صورت ترقابل قبول نیست، در حالیکه استفاده از فاضلاب با رطوبت پایین، گزارش شده است.
مزایا و معایب استفاده از سوخته‌های ضایعاتی
الف) مزایا

۱- قیمت ارزانتر از سوخته‌های فسیلی: برخی از ضایعات بسیار ارزان قیمت می باشد و حتی مواردی از آنها قیمت منفی دارد.

۲- حفظ محیط زیست: تنها جنبه اقتصادی سوخته‌های ثانویه مهم نمی باشد، بلکه استفاده از آنها دارای مزیت های زیست محیطی و اجتماعی می باشند که به شرح ذیل است:

الف- ذخیره سوخته‌های فسیلی موجود: استفاده از سوخته‌های ثانویه مصرف سوخته‌های فسیلی را کاهش می دهد و باعث ذخیره سازی آن می شود. به همین طریق در اروپا تا ۲/۵ میلیون تن در مصرف زغال سنگ جهت صنایع سیمان صرفه جویی شده است.

ب - کاهش میزان انتشار CO_2 : این گاز به عنوان یکی از مهمترین گازهای گلخانه ای می باشد ، که باعث گرم شدن زمین می شود و ناشی از بکارگیری سوخته‌های فسیلی می باشد. یا کاهش مصرف سوخته‌های فسیلی میزان انتشار CO_2 در هر سال ۹/۷ میلیون تن کاهش می یابد.

ج- کاهش انتشار آلاینده های گازی نظیر NO_x و CO_2 : آلاینده های ناشی از استفاده ضایعات در کوره های سیمان از مجموع آلاینده های گازی تولیدی ناشی از سوخته‌های مرسوم و کوره های زباله سوز کمتر است. همچنین گازهای اسیدی نظیر HCL به طور موثری نگهداشته می شوند.

د- امکان سوزاندن در دمای بالا (تا $2000^\circ C$) که سبب تخریب کامل ترکیبات آلی سمی می گردد.

د) حفظ اراضی: بسیار از ضایعات باید دفن شوند. با استفاده از آنها، زمین لازم برای زباله ها کاهش می یابد این موضوع به خصوص در جاهایی که زمین کافی جهت دفن آنها محدود است، اهمیت بیشتری می یابد.

هـ- کاهش هزینه ها نسبت به کارخانجات دفع زباله.

و- خاکستر حاصل از ضایعات غالباً بر کیفیت کلینکر تولیدی اثر مثبت دارد.

ز- ضرورتی برای تامین سرمایه جهت کوره های زباله سوز نیست.

ب- معایب

۱) در برخی موارد میزان انتشار (دیوکسین dioxins) و یا آلودگیهای دیگر افزایش می یابد. جدول (۸) حداکثر مجاز انتشار آلودگیها را (بر اساس حداکثر ۱۰ درصد اکسیژن در مبنای خشک) نشان می دهد.

جدول (۸) حداکثر میزان انتشار آلودگی در صنعت سیمان با سوختن مواد زائد (با واحد mg/m^3)

نوع آلاینده	
کل غبار	۳۰
HCl	۱۰
HF	۱
NO_x برای کارخانجات قدیمی	۸۰۰
NO_x برای کارخانجات جدید	۵۰۰
کادمیم (Cd) و تالیم (Tl)	۰/۰۵
جیوه (Hg)	۰/۰۵
آنتیموان (Sb) و آرسنیک (As) و سرب (Pb)	۰/۵
کروم (Cr) و کبالت (Co) و مس (Cu)	-
منگنز (Mn) و نیکل (Ni)	-
دی اکسیدها	۰/۱ (ng/m^3)
SO_2	۵۰
کل مواد کربنی آلی (TOC)	۱۰

۲) محدودیت انتشار فلزات سنگین به خصوص Hg، Tl، Cr باید مد نظر باشد.

۳) به دلیل چرخه های درونی کوره های سیمان و به ویژه کوره های مجهز به پیش گرمکن سیلکونی جهت استفاده از مواد کلردار دچار محدودیت هستند.

۴) در حالت مصرف برای کوره های تر یا سیستمهای مجهز به کنار گذر، باقیمانده مواد جامد به شکل غبار ممکن است نیاز به دور ریختن داشته باشد.

۵) به دلایل روانی ممکن است برخی از خریداران راغب به خرید چنین سیمانهایی نباشند.

۶) دستیابی به فرهنگ عمومی مناسب و همچنین کسب مجوزهای لازم زمان بر می باشد.

با توجه به مطالب بیان شده و اهمیت بخش انرژی و تامین آن از طرق مختلف و لازمه جایگزینی برخی سوخت‌های با انرژی تولیدی بالا و آلاینده‌گی کم بجای سوخت‌های فسیلی با هزینه زیاد و آلاینده‌گی فراوان و محدودیت منابع، لذا بایستی در این راستا مطالعات گسترده‌ای جهت این مهم به انجام رسیده ، تا علاوه بر صرفه جویی در هزینه های مربوط به سوخت و همچنین حل مشکلات زیست محیطی در رسیدن به این اهداف تمهیداتی صورت پذیرد. در این راستا کشورهای پیشرفته و توسعه یافته همچون آلمان، نروژ، ژاپن، آمریکا و ... با جایگزین نمودن سوخت‌های ضایعاتی مانند تایر، پلاستیک، کاغذ و چوب، زباله های شهری و فاضلاب و ... در صنایع تولید سیمان گاهی موثر در پشبرد این هدف هم برداشته اند.

با توجه به حجم زیاد مواد ضایعاتی تولید توسط بخش های مختلف صنعت، حمل و نقل، شهری و غیره و مشکل دفن زباله آنها که امروزه بعنوان یک معضل جوامع بشری است و ضرورت بر کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از آنها و استفاده بهینه از اینگونه مواد در جهت تولیدات جدید، لذا استفاده از اینگونه مواد ضایعاتی سوختی در کوره های سیمان بعنوان جایگاهی مناسب برای سوزاندن انواع مختلف ضایعات، مفید خواهد بود.

۱- منابع معدنی از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی، ترجمه فرید مر، احمد هرمزی، عبدالمجید یعقوب پور، مؤسسه انتشاراتی ویژه نشر.

۲- معاونت امور انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۴، ترازنامه انرژی، چاپ انتشارات وزارت نیرو، صفحه
فهرست منابع

۱- «منابع معدنی از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی» ترجمه فرید مر، احمد هرمزی، عبدالمجید یعقوب پور، مؤسسه انتشاراتی ویژه نشر.

۲- معاونت امور انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۴، ترازنامه انرژی، چاپ انتشارات وزارت نیرو، صفحه

3-HOLDERBANK CEMENT . CEMINAR , (Alternative . fuels) , world
ceminar , 2000 .

4-K . Mair and M . Rosset , (principles for the utilization of material in
cement works) . ZKG . NO . 1/ 2000 , PP : 14 – 27 .

5-h.Schmidthals , (Investigations into the thermal utilization of Secondary
fuels in Iump from in the cement burning process) , part 1 , ZKG . NO . 2
/ 1999 , PP : 80 – 79

6-E . L . Bastida and et al , (use of heavy eruse oil in cuban cement
kilens) , ZKG . NO . 11 / 1999 , PP : 620 – 623 .

7-A . Schener , (utilization of alternative fuels and raw materials (AERS)
in cement industry) . VDZ Congress , 2002 , pp : 322 – 329 .

8-V . WERNER AND d. Rose , (progress in the gasification of coarse
secondary fuels in the cement industry) , VDZ congress , 2002 pp : 334 –
347 .

9-H . G . case and et al , (us recycling technologies for waste fuels
utilization in cement kilnes) International cement Revieu , the cement
Environmental year book , 1997 , p : 34 .