



راهکارهایی جهت کاهش هزینه تولید در صنعت سیمان

الهام عین افشار^۱، نفیسه عین افشار^۲، زهرا خدادادی پور^۳

۱- دانش آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۳- دانش آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

خلاصه

امروزه سیمان یک کالای استراتژیک و از اصلی ترین مصالح ساختمانی محسوب می‌گردد. از طرفی این صنعت از جمله پرمصرف‌ترین صنایع از لحاظ انرژی نیز محسوب می‌شود. علاوه بر آن به جهت احتراق سوخت‌های فسیلی و تجزیه سنگ آهک برای هر تن سیمان پرتلند، در حدود یک تن دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود که امر سبب می‌شود که به عنوان یکی از اصلی‌ترین منتشرکنندگان گازهای گلخانه‌ای نیز، در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، محدودیت معادن سنگ‌های معدنی، کاهش سوخت‌های فسیلی و هزینه انرژی و نگرانی‌های زیست محیطی، شرکت‌های سیمانی را در سرتاسر جهان ترغیب نموده است، تا در زمینه کاهش مواد معدنی اولیه در تهیه سیمان و سوخت مورد نیاز این صنعت، بررسی و ارزیابی‌هایی داشته باشند. راهکارهای متفاوتی جهت کاهش مصرف این منابع تجدیدناپذیر وجود دارد که یکی از این راه‌ها استفاده از ضایعات تولید شده در صنایع مختلف و بهره‌گیری از آن‌ها در سیمان است. مواد زایدی همچون روغن‌های زباله، مخلوط پلاستیک، کاغذ، تایرهای بازیافت نشده و حتی لجن فاضلاب قابلیت استفاده به عنوان سوخت جایگزین را دارند. استفاده از این ضایعات به عنوان سوخت توسط کارخانجات سیمان هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی قابل توجیه است و از اهمیت بالایی هم برای تولید کنندگان سیمان و هم برای جامعه برخوردار است، زیرا علاوه بر حفظ ذخایر سوخت‌های فسیلی به کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز کمک می‌کند. لذا هزینه‌ها در صنعت سیمان را می‌توان بسته به نوع مواد اولیه و تکنولوژی تولید، کنترل نمود. از طرفی این هدف نیز باید مدنظر باشد که ضمن حفظ کیفیت محصول، فرایند و شرایط تولید را کنترل نموده و آن‌ها را از لحاظ اقتصادی بهینه نماییم.

کلمات کلیدی: سیمان، مواد بازیافتی، بهینه سازی انرژی، سوخت جایگزین.



۱. مقدمه

صنعت سیمان یکی از صنایع پر بازده بوده و ارتباط مستقیمی با رشد اقتصادی و سطح زندگی جامعه دارد و در چند دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است، بطوری که پیش بینی می شود تقاضای جهانی سیمان تا سال ۲۰۲۰ به ۳۰۰۰ میلیون تن برسد، که این امر منجر به ایجاد نرخ رشد ۴,۷ درصدی می شود. در جدول ۱ مقایسه ای بین مناطق مختلف جهان از نظر میزان تقاضای سیمان انجام شده است. در بین مناطق مختلف جهان، آسیا از نرخ رشد بالاتری به جهت تقاضای سیمان برخوردار است که می توان به دلایلی چون توسعه ی شهرها، ساختمان های مدرن، تعمیر زیرساخت ها و توسعه ساخت وساز در این قاره اشاره کرد. به طوری که تخمین زده می شود، نرخ رشد در بازار سیمان بین سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ در آسیا بالاتر از نرخ میانگین جهانی باشد [۱]. بنابراین توجه به این صنعت و چالش های آن، اهمیت زیادی در منطقه و کشورمان دارد. از چالش عمده این صنعت پر هزینه بودن و استفاده زیاد از سوخت های فسیلی در مراحل تولید آن است که باعث افزایش هزینه های اقتصادی و آلودگی منابع زیست محیطی می شود. مدیریت مصرف انرژی در واقع عامل کلیدی است که کلیه فعالیت های مربوط به بهینه سازی و صرفه جویی انرژی را پوشش می دهد. فرایند تولید سیمان نیازمند انرژی فراوانی است و از این جهت تحقیقات زیادی برای یافتن سوخت های جایگزین و ارزان در بین صنایع تولیدکننده سیمان در دنیا وجود دارد. از طرفی دیگر مصرف بیش از حد منابع طبیعی، خطری جدی برای نسل های آینده خواهد بود. تولید سیمان و مصرف بیش از حد آن با افزایش قیمت مواد اولیه و سوخت های فسیلی، غیر اقتصادی به نظر می رسد. تقریباً ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه تولید سیمان شامل سوخت، مواد اولیه و تدارکات است. برای کاهش هزینه در صنعت سیمان، کنترل این سه مورد ضروری است، که منجر به افزایش سودآوری شرکت می شود. یکی از روش های صرفه جویی، کاهش مواد خام اولیه با استفاده از مواد بازیافتی یا مازاد است. استفاده از مواد بازیافتی بیش از گذشته اهمیت یافته است. پژوهشگران سرتاسر دنیا سال های زیادی است که به دنبال استفاده از این مواد در مخلوط سیمانی هستند، که علاوه بر دفع زباله و کاهش ضایعات، کاهش مواد خام اولیه را به دنبال دارد [۲]. راهکار دیگر برای کاهش هزینه تولید، کاهش مصرف انرژی است. سوخت و برق یکی از مهمترین مولفه ها در تولید سیمان است، تولید سیمان در چندین مرحله به سوخت و برق نیاز دارد. یکی از مهمترین رویکردها که می تواند به کاهش هزینه انرژی کمک کند، استفاده از سوخت های بازیافتی جایگزین سوخت های فسیلی چون زغال سنگ یا گاز است [۳]. اغلب کارخانجات دارای ضایعات بوده و موظف به حذف یا دور نمودن این ضایعات از اطراف کارخانه و محیط شهری هستند که این امر هزینه ای را به کارخانه تحمیل می کند. استفاده از این ضایعات در صنعت علاوه بر کاهش آلودگی در محیط زیست، موجب کاهش مصرف منابع طبیعی و نیز صرفه جویی در هزینه های دفع ضایعات می گردد. از سوی دیگر با بهره گیری درست از ضایعات، نیز می توان به حفظ سلامت زیست محیطی کمک شایانی نمود. در این مقاله تلاش گردیده که راهکارهایی برای بهره گیری از مواد بازیافتی و مدیریت پسماند در هزینه مواد اولیه صرفه جویی گردد و پتانسیل های اجرایی موجود در زمینه کاهش مصرف انرژی در صنایع سیمان ارائه شود.

جدول ۱-پیش بینی تقاضای سیمان در سال ۲۰۲۰ میلادی [۱]

تقاضای سیمان	۲۰۱۰	۲۰۲۰	نرخ رشد %
تقاضای جهانی سیمان	۲۸۳۶	۳۰۰۰	۴,۷
اروپای غربی	۲۳۶	۳۵۰	۲,۲
آمریکای شمالی	۲۰۰	۳۰۰	۲,۹
مناطق دیگر	۵۰۰	۶۰۰	۴,۷
آسیا	۱۹۰۰	۲۲۰۰	۵,۲



۲. کاهش مواد خام اولیه با استفاده از مواد بازیافتی

دفع مواد ضایعاتی و استفاده مجدد از آنها، یکی از بحرانی ترین مسائل امروزه محسوب می‌شود. در اکثر کشورها سالانه مقدار فراوانی ضایعات کارخانجات تولید می‌شود، اکثر ضایعات قابل بازیافت نیستند و یا بازیافت آنها با مصرف انرژی زیاد و آلودگی های زیست محیطی همراه است و این مواد خطر جدی را برای محیط اطراف ایجاد می‌کنند. مواد ضایعاتی را می‌توان به عنوان پوزولان در بتن و یا به عنوان جایگزین بخشی از کلینکر سیمان در فرآیند ساخت سیمان مورد بهره برداری قرار داد. استفاده از این مواد جایگزین سیمانی یا مکمل‌های سیمانی، علاوه بر صرفه جویی در مصرف سیمان و همچنین کاهش مصرف انرژی، امکان ارتقاء کیفیت بتن و دست یابی به خواص مورد نظر را ایجاد می‌کند. این مواد دارای خاصیت سیمانی بوده و در صورت استفاده در درصدهای جایگزینی بالا عملکرد مناسبی از جهت دوام بتن را دارا می‌باشد. در این بخش از مواد ضایعاتی رایج قابل استفاده در سیمان به عنوان جایگزین سیمان، اشاره می‌شود.

۱-۲. استفاده از برنج

سالانه حدود میلیون‌ها تن ضایعات کشاورزی در کشور تولید می‌شوند که به صورت محصول زائد در دست کشاورزان باقی می‌ماند، یکی از این ضایعات کشاورزی فراوان در کشور ما، برنج است. برنج به علت تولید زیاد در کشور، محصول اساسی محسوب شده و لذا ضایعات زیادی را ایجاد می‌کند.

به تازگی پژوهشگران موسسه تحقیقات برنج کشور موفق به استفاده از این محصول زائد به عنوان ماده چسبنده‌ای جایگزین بخشی از مواد اولیه سیمان شدند. اجرای این طرح موجب استفاده بهینه از ضایعات برنج و صرفه جویی در مصرف سیمان می‌شود. از یک تن برنج حدود ۲۰۰ کیلوگرم پوسته تولید می‌شود که بعد از سوزاندن ۴۰ کیلوگرم خاکستر به دست می‌آید. خاکستر حاصله مقدار زیادی سلیس در خود دارد که با آهک تشکیل سلیکات کلسیم هیدراته با خاصیت چسبندگی فراوان می‌دهد. سوزاندن در درجه حرارت های مختلف مقدار فعالیت پوزلانی خاکستر برنج را تغییر می‌دهد. از این رو باید دمای سوزاندن در درجه حرارت مناسب اتفاق بیفتد تا حداکثر فعالیت پوزلانی حاصل گردد. خاکستر برنج با حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد سلیس به عنوان پوزلان عمل کرده و باعث پایداری مصالح می‌شود. در تهیه سیمان با استفاده از این مواد، پوسته برنج و آهک را به نسبت وزنی مساوی با هم مخلوط می‌کنند.

۲-۲. استفاده از ضایعات پودر سنگ مرمر

یکی از معادن و کارخانه‌هایی که حجم قابل توجهی از ضایعات را تولید می‌کنند، معادن و کارخانجات سنگ مرمر هستند، که با توجه به اینکه پتانسیل و راهکار مناسبی برای استفاده از پودر مرمر تولید شده وجود ندارد، این ضایعات پودری در فضاهای باز اطراف کارخانجات و یا در محیط زیست ما انباشته می‌شوند و سبب آلودگی محیط زیست می‌گردند. ضایعات پودر مرمر، ماده‌ای بی‌اثر و غیرفعال است که به عنوان محصولی جانبی از فرآیند برش، شکل دادن و پرداخت سنگ مرمر بدست می‌آید و سبب مشکلات زیست محیطی فراوانی می‌شود. بنابراین بسیار حائز اهمیت است که با بهره گیری از این ضایعات در صنعت سیمان، علاوه بر استفاده بهینه از این ضایعات، پیامدهای زیست محیطی آن را کاهش دهیم.

از نقطه نظر فیزیکی، وجود پودر مرمر در خمیر سیمان سخت شده نقش پرکننده را ایفا می‌کند و تخلخل خمیر را کاهش می‌دهد. پودر مرمر ماده‌ای خنثی است و فعل و انفعالات شیمیایی پودر مرمر شامل واکنش بین کربنات کلسیم (اصلی ترین ماده معدنی بلوری پودر مرمر) و خمیر سیمان است که با واکنش بین هیدرو آلومینات کلسیم و یون‌های کربناته منجر به تشکیل کربوآلومینات‌های کلسیم می‌شوند. هیدرات‌های کربوآلومینات‌های کلسیم سطح سنگدانه را در



ناحیه‌ی انتقالی ناهموارتر کرده و پیوند خمیر سیمانی و سنگدانه را تقویت می‌کند. حضور کربنات کلسیم به هیدراتاسیون تری کلسیم سیلیکات شتاب می‌دهد [۴].

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ضایعات پودر مرمر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن صورت گرفته‌است. ارگان^۱ و همکارانش نشان دادند که می‌توان با حفظ خصوصیات مکانیکی بتن، پودر مرمر و دیاتومیت را به ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد به صورت مجزا و یا همزمان جایگزین بخشی از سیمان کرد [۵]. در تحقیقاتی که در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ انجام شده‌است، تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با پودر مرمر بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن مورد بررسی قرار گرفته‌است. تحقیقات نشان می‌دهد که جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰ درصد تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ندارد؛ اما با افزایش درصدهای جایگزینی بیشتر از ۱۰ درصد، خصوصیات مکانیکی و دوام بتن روندی نزولی را دنبال می‌کنند [۶-۸]. در سال ۲۰۱۶ تأثیر فوق روان کننده‌ها بر بتن حاوی پودر مرمر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که می‌توان پودر مرمر را تا ۱۰ درصد جایگزین سیمان نمود و با کمک فوق روان کننده‌ها خصوصیات دوام بتن را حفظ کرد [۹].

۳-۲. استفاده از سرباره کوره بلند، دوده سیلیس و پوزولان های طبیعی

تفاله های خرد شده در کوره‌ها، دود سیلیکا و پوزولان های طبیعی مانند متاکاؤلین، سنگ رسی و خاک رسی سوزانده شده، موادی هستند که می‌توان به عنوان مکمل سیمانی برای بهبود ویژگی های خاص سیمان مانند کاهش فعل و انفعال زیان آور در محیط‌های قلیایی استفاده کرد. امروزه، به خاطر دسترسی ساده به این مواد، تولیدکنندگان بتن میتوانند از دو یا چند نوع از این مواد برای بهینه سازی ویژگی های بتن بهره گیرند.

استفاده از این سه مکمل سیمانی، زغال سنگ، سرباره کوره بلند، خاکستر سبوس برنج یا دوده سیلیس، که ترکیبات سه تایی نامیده می شوند، در صنعت تولید سیمانی متداول تر است. متاکاؤلین یک پیشرو در میان نسل جدید چنین مکمل‌هایی می باشد. متاکاؤلین یک سیلیکات آلومینیم آمورف سفید رنگ می باشد که دارای خواص پوزولانی می باشد. مواد شیمیایی تشکیل دهنده متاکاؤلین بیشتر SiO_2 و Al_2O_3 هستند. ضمناً سفید رنگ بودن متاکاؤلین سبب می‌شود محصولات سیمانی و بتنی سفید یا خاکستری، تیره نشوند. متاکاؤلین به طور کامل قابلیت جایگزینی با پوزولان توانمند (نظیر دوده سیلیس / میکروسیلیس) را دارد. در ضمن کاهش در میزان فوق روان ساز مورد نیاز برای طرح اختلاط حاوی متاکاؤلین در مقایسه با طرح اختلاط حاوی دوده سیلیس وجود دارد. متاکاؤلن نیز به مانند پوزولان‌های دیگر با هیدروکسید کلسیم ایجاد شده بر اثر هیدراته شدن سیمان واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می کند.

۳. بررسی پتانسیل های اجرایی موجود در زمینه کاهش مصرف انرژی

انرژی، یکی از مهمترین پارامترها در بهای تمام شده تولید سیمان است. شاخص مصرف ویژه انرژی به صورت نسبت انرژی مصرفی به ازای تولید یک واحد محصول تعریف می شود. انرژی مصرف شده در صنعت سیمان تقریباً حدود ۳۰ درصد بهای تمام شده را تشکیل می‌دهد. انرژی مصرفی در صنعت سیمان به دو صورت حرارتی و الکتریکی است که از این میزان ۸۰ درصد مربوط به استفاده از سوخت‌های فسیلی نظیر مازوت و گاز است و حدود ۲۰ درصد مربوط به انرژی الکتریکی است. امروزه با توجه به اهمیت موضوع بهینه سازی مصرف انرژی و نگهداشت آن جهت استفاده نسل آینده،

¹ Ergun



روش های زیادی جهت کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان وجود دارد که از آن جمله می توان به استفاده از سوخت های جایگزین، نیروگاههای بازیافت حرارتی و ... نام برد.

۳-۱. استفاده از سوخت جایگزین

سوخت جایگزین، ماده‌ای است که از مواد دوریز یا محصولات جانبی صنایع دیگر به دست آمده و جایگزین منابع طبیعی چون زغال سنگ یا گاز می‌شود. در ایران بیشتر پسماندها دفن می‌گردد و با توجه به افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی و کمبود این منابع در آینده نزدیک، ضرورت ایجاد می‌کند که کشور به سوی تکنولوژی استفاده از سوخت‌های جایگزین پیش رود. در جدول ۲ سوخت های حاصل از زباله و یا سوخت های جایگزین شامل روغن های بازیافتی، تایر های فرسوده، کاغذ و مقوا، لجن فاضلاب ها و تصفیه خانه ها بر اساس فاز آنها (جامد، مایع و گاز) طبقه بندی شده است [۳]. استفاده از این مواد، مشکلات امحاء زباله را کاهش داده و همچنین از معضل نشر آلاینده ها در محیط نیز می‌کاهند.

جدول ۲-انواع سوخت های جایگزین برای صنعت سیمان [۳]

زباله گازی	سوخت های زباله جامد	سوخت های زباله مایع
گازهای دفن زباله	ضایعات پلاستیکی	لجن فاضلاب
گازهای پیرولیز	ضایعات چوبی	دوغاب آسفالت
	تایرهای فرسوده	مواد زاید رنگی
	زباله جامد شهری	کک نفتی
	کاغذهای بازیافتی	زباله های روغن
		ضایعات پتروشیمی

۳-۲. استفاده از تایر های فرسوده

به طور کلی، تایرهای دارای قابلیت استفاده مجدد را با دو روش شیاردار دادن و یا روکش مجدداً به چرخه مصرف باز می‌گردانند و یا با احیای انرژی آن (به عنوان سوخت) از آن بهره می‌گیرند. در بسیاری از کشورها دفن تایرها ممنوع است. سرانه مصرف تقریبی لاستیک در ایران حدود ۳,۳ کیلوگرم برای هر نفر محاسبه شده است که برابر با مصرف بیش از ۲۵۰ هزار تن تایر در سال است. لذا استفاده بهینه از این حجم وسیع از تایرهای فرسوده حائز اهمیت فراوان است [۱۰]. تایرها یک سوخت فشرده با رطوبت بسیار کم بوده و امکان تزریق به صورت کامل و یا خردشده به کوره های سیمان را دارد. تایرها از لحاظ شیمیایی دارای ترکیبات آهن و روی می باشند که هر دو برای اختلاط با مواد خام سیمان مفید هستند. این نکته نیز مهم است که سوختن تایر در کوره سیمان باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی نخواهد شد، زیرا گزارش‌های سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بیانگر آن است که مواد منتشره از این کوره ها مشکل ساز نبوده و در بعضی موارد باعث کاهش آلاینده‌های منتشره خواهد شد [۱۱].

دو دانشمند لهستانی ایوجینیوس^۱ و آلیسجا اولیاس^۲ طی مقاله‌ای اعلام کردند که مهمترین عوامل جهت استفاده از زباله در کوره های سیمان را می‌توان به دلیل دمای بالای کوره دانست، زیرا علاوه بر ایجاد احتراق کامل، مشکل بیماری را بودن سوخت را نیز برطرف می‌کند. از طرفی طول و وسعت بسیار زیاد کوره، سطح تبادل انرژی را بین مشعل و زباله و نیز زباله

¹ Eugeniusz Mokrzycki

² Alicja Uliasz- Bochenczyk



و کلینکر به حداکثر می‌رساند و محیط‌قلیایی داخل کوره استفاده از پسماندهای اسیدی و یا آغشته به اسید را نیز ممکن می‌سازد [۱۲].

۳-۳. سوخت مشتق شده از زباله

می‌توان از بخش قابل اشتعال زباله جامد شهری محصولی تولید کرد که دارای ارزش حرارتی بالا باشد، این محصول RDF نامیده شده و مخلوطی از کاغذ، مقوا، پلاستیک، پارچه، چرم و چوب است و فاقد بوی تعفن می‌باشد. ارزش حرارتی این سوخت به ترکیبات عنصری تشکیل دهنده آن بستگی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که در بازیافت سوخت‌های جایگزین از زباله جامد شهری، نسبت کربن به هیدروژن ثابت بوده و در مقابل نسبت کربن به اکسیژن است که افزایش می‌یابد. عمده‌ترین کاربرد RDF، استفاده از آن به عنوان سوخت یا سوخت‌های مکمل در بویلرها و کوره‌ها می‌باشد نیاز به هوای اضافی یکی از مشکلات استفاده از RDF است. همچنین سوختن ناقص RDF سبب کاهش ظرفیت حرارتی بویلر و تولید مقادیر زیادی خاکستر به ازای واحد انرژی می‌شود. به علاوه این سوختن ناقص به طور معکوس روی بازده حرارتی و بازیافت انرژی اثر می‌گذارد. در کوره‌های دوار به علت زمان ماند بالا این مورد کمتر اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه RDF بیشتر شامل کاغذ و پلاستیک است، دارای ارزش حرارتی بالاتری نسبت به زغال سنگ بوده که می‌تواند به بویلرها آسیب برساند. همچنین RDF ممکن است شامل کلر باشد و باعث خوردگی تیوب‌های داخل بویلرها شود. همچنین وجود ذرات بسیار ریز شیشه و فلز موجود در RDF نیز می‌تواند باعث ایجاد مشکل در احتراق گردد [۱۳]. سوزاندن انواع مختلف زباله به کنترل دقیقی نیاز دارد. خواص، حالت فیزیکی سوخت و محتوای عناصر در چرخه سوخت از جمله، سمیت، ترکیبات و محتوای خاکستر، مقدار رطوبت و مواد فرار موجود در سوخت باید قبل از سوزاندن سوخت جایگزین به طور کامل مورد مطالعه قرار گیرد و در نهایت پارامترهایی چون ارزش حرارتی سوخت، اندازه، چگالی، یکنواختی یا همگنی و میزان تغییر تجهیزات جهت مصرف بهینه سوخت را باید مد نظر داشت.

۴. نتیجه‌گیری

بهره‌وری پایین از منابع و محصولات سبب گردیده است که ایران رکورد دار مصرف انرژی در جهان باشد، میزان مصرف انرژی در ایران دو برابر چین و چهار برابر هند است و به طور کلی پنج برابر متوسط جهانی انرژی مصرف می‌کنیم [۱۴]. لذا مدیریت مصرف به صورت یک موضوع اساسی وجودی در آمده است و یک نگرش بلند مدت می‌تواند منافع بسیاری را برای صنعت و جامعه در بر داشته باشد. لذا بهره‌گیری مناسب از این راهکارها در صنعت سیمان می‌تواند گامی مؤثر در راستای صنعت تولید بتن و توسعه پایدار برداشت. استفاده از سوخت‌های جایگزین، ارزش افزوده حاصل از صرفه جویی سوخت‌های فسیلی می‌تواند جهت بهبود فناوری و در نتیجه، مصرف بهینه انرژی استفاده گردد. برخی از راهکارهای ارائه شده در این مقاله به دلیل هزینه بر بودن فعلاً مقرون به صرفه نمی‌باشد ولی با افزایش قیمت حامل‌های انرژی نه تنها مقرون به صرفه می‌گردد، بلکه از لحاظ کاهش سایر هزینه‌ها نیز توجیه اقتصادی خواهد داشت.



۵. مراجع

- [۱] N.A. Madlool, R. Saidur, M.S. Hossain, N.A. Rahim, A critical review on energy use and savings in the cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 2042-2060.
- [۲] P.L. Maier, S.A. Durham, Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 428-437.
- [۳] N. Chatziaras, C.S. Psomopoulos, N.J. Themelis, Use of waste derived fuels in cement industry: a review, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 27 (2016) 178-193
- [۴] م.قلعه نویی، تاثیر ضایعات پودر سنگ مرمر و میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر دوام بتن، تحقیقات بتن، یازدهم، شماره دوم (۱۳۹۷) ۵۰-۳۵.
- [۵] A. Ergün, Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Construction and building materials*, 25 (2011) 806-812.
- [۶] R. Rodrigues, J. De Brito, M. Sardinha, Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge, *Construction and Building Materials*, 77 (2015) 349-356.
- [۷] A. Rana, P. Kalla, L.J. Csetenyi, Sustainable use of marble slurry in concrete, *Journal of Cleaner Production*, 94 (2015) 304-311.
- [۸] A.A. Aliabdo, A.E.M.A. Elmoaty, E.M. Auda, Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, *Construction and building materials*, 50 (2014) 28-41.
- [۹] M. Sardinha, J. de Brito, R. Rodrigues, Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge, *Construction and Building Materials*, 119 (2016) 45-52.
- [۱۰] ج.رکنی زاده، بررسی فنی و اقتصادی ورود سوخت حاصل از زباله و تاثیر فرسوده در صنایع سیمان ایران، نشریه انرژی ایران، ۱۷ (۱۳۹۳) ۱۱۱-۱۲۸.
- [۱۱] SEPA : United States Environmental Protection Agency; in, <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/industrial/special/ckd/>
- [۱۲] E. Mokrzycki, A. Uliasz-Bocheńczyk, Alternative fuels for the cement industry, *Applied Energy*, 74 (2003) 95-100.
- [۱۳] ف. ابوالقاسی، استفاده از پسماندهای شهری به عنوان سوخت جایگزین گاز طبیعی در کارخانجات سیمان، مجله علمی-تخصصی فناوری سیمان، ۱۱۶ (۱۳۹۶).
- [۱۴] ۱. نظام آذر شب، پارامترهای لازم جهت بالا بردن بهره وری انرژی الکتریکی و کاهش هزینه های مربوطه در صنعت، دوازدهمین کنفرانس ملی کیفیت و بهره وری، ۱۳۹۶.