**علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره شانزدهم، شماره ویژه ۹۳**

# ضرورت بازنگری مصرف انرژی و راه های کاهش آن در صنعت سیمان

**افشار علی حسینی [۱*]**

afsharalihosseini@yahoo.com

**علی رضا عباس زاده [۲]**

**داریوش باستانی [۳]**

**تاریخ دریافت: ۸۸/۳/۳۰** **تاریخ پذیرش:۸۸/۹/۲**

**چکیده**

رشد روز افزون مصرف انرژی و محدودیت منابع فسیلی که اصلی ترین منبع تولید انرژی در ایران و جهان هستند، جوامع صنعتی را برای تامین انرژی مورد نیاز در حال حاضر و آینده به تکاپو وا داشته است. بیش از ۲۶٪ کل انرژی ایران در بخش صنعت به مصرف می رسد. بخش سیمان یکی از زیر بخش های مهم صنعت است که به شدت وابسته به انرژی می باشد، به گونه ای که بیش از ۱۵٪ از انرژی مربوط به بخش صنعت در این زیر بخش به مصرف می رسد. با نگاه به هدفمند کردن یارانه ها و آزاد سازی نرخ انرژی، وضعیت فعلی سیمان در مصرف انرژی به بازنگری جدی نیاز دارد. مدیریت تولید، تغییر در نوع مواد تشکیل دهنده سیمان، یافتن راهکارهای جایگزین انرژی و وارد کردن تکنولوژی جدید می تواند نتایج مناسبی در کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان داشته باشد. در این مقاله ضمن بررسی انرژی مصرفی در ۲بخش الکتریکی و گرمایی در دستگاه های مختلف در یک واحد تولید سیمان، راهکارهای کاهش انرژی در هر بخش از فرایند مورد بررسی قرار می گیرد. آنچه از مطالعات و تحقیقات پژوهشی در واحدهای تحقیق و توسعه فعال در صنعت سیمان درسال های اخیر بدست آمده، نشان از تغییر روش های تولید با اهمیت کاهش مصرف انرژی و افزایش تولید داشته است؛ تغییراتی مانند جایگزینی روش خشک به جای روش تر و یا توسعه پیش گرمکن و پری کلسیناتورها، امروزه در صنعت سیمان علاوه بر تاکید بر کاهش مصرف انرژی در جهت کم کردن هزینه تمام شده محصول،مسایل زیست محیطی هم مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که به ازای ۱kg سیمان تولیدی بیش از۰/۷kg گاز کربن دی اکسید و دیگر آلاینده ها وارد محیط زیست می شود، لذا اگر از سوخت های جایگزینی استفاده شود که تعداد کربن کمتری در فرمول مولکولی خود دارند،علاوه بر کاهش مصرف و کاهش هزینه،آلاینده کمتری به محیط زیست وارد می شود.

**واژه های کلیدی:** سیمان، انرژی، انرژی های جایگزین، توسعه ترکیبات سیمان

۱-گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی،دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز [*](مسوول مکاتبات).

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،دانشگاه ایلام

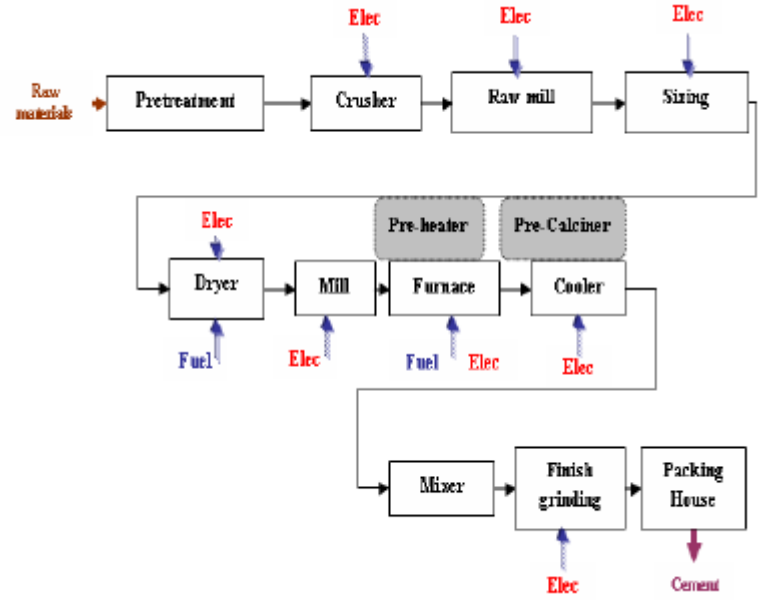
۳- استاد دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی شریف

**مقدمه**

بخش صنعت مقدار قابل توجهی از مصرف انرژی در جهان را بـه خـود اختصاص داده است. سیمان یکی از مهم ترین صـنایع مصـرف کننـده انرژی به ویژه منابع فسیلی است.از این رو تولیـد انـرژی بـا اسـتفاده از سوخت های فسیلی توسعه یافته و انتشار گازهـای آلاینـده در محـیط زیست بیشتر شده اسـت(۱،۲).کـل تولیـد سـیمان در جهـان بـالغ بـر ۲/۹۰۰/۰۰۰/۰۰۰ تن در سال مـی باشـد(۳) و کشـور ایـران بـا رشـد سریعی که در بخـش سـیمان در چنـد سـال اخیـر در زمینـه احـداث کارخانه های جدید و توسعه کارخانه قدیمی در جهـت افـزایش تولیـد داشته است، به مـرز خودکفـایی بـا تولیـد۵۶/۰۰۰/۰۰۰ تـن در سـال رسیده(۴)و با بهره برداری از چند کارخانه دیگر که در سال های آینده وارد چرخه تولید می شوند، بالغ بر ۶۰/۰۰۰/۰۰۰ میلیون تـن سـیمان در سال تولید می شود(۵).به عبارتی ٪۲/۳ از سـیمان جهـان در ایـران تولید می شود(این عدد در ۲دهه گذشته در حدود ٪۰/۰۴بوده اسـت). از نگاه کارشناسانی که در بخش سیمان فعال هستند و رشـد سـالیانه ٪۱۰ که برای این صنعت پـیش بینـی کـرده انـد میـزان تولیـد بـرای سال۱۳۹۰ در حدود ۷۲ میلیون تن پیش بینی شده است امـا بـا نگـاه به اعداد فوق در می یابیم خیلی زودتر از این زمان به عدد پیش بینـی شده دست یافته می شود. صنعت سیمان در جهان مصرف کننـده ٪۲ از کل انرژی تولیدی و ٪۱/۵از کل سوخت مصـرفی مـی باشـد. تولیـد سیمان در بخش های مختلفی صورت می پذیرد که هـر کـدام از آنهـا مقادیر مصارف ویژه انرژی را بـه خـود اختصـاص مـی دهنـد.انرژی در صنعت سیمان به دو صورت الکتریکی و گرمایی به مصرف می رسد که هر کدام از این بخش ها از لحاظ هزینه تولید و تـاثیر بـر قیمـت تمـام شده محصول متفاوت می باشند(۶). مصرف ویژه انـرژی الکتریکـی در کل خط تولید سیمان در کشور حدود ۱۱۹kwh/kg of cement و مصرف ویژه انرژی حرارتی که بخـش اعظـم آن در واحـد پخـت بـا ۷۵۰Kcal/cli kg صـرف مـی شـود،معادل ۱۰۵ lit fuel/ton cli می باشد(۷و این در حالی است کـه میـانگین انـرژی گرمـایی مصـرف شده در جهان ۸۰ lit fuel/ton است.از مقایسه اعـداد گـزارش شـده می توان پی برد که مصـرف انـرژی در بخـش سـیمان در ایـران ۱/۳۱ برابر میانگین مصرف انرژی در جهان می باشد. امروزه تامین کننـدگان عمده تجهیزات سـیمانی در هنگـام عرضـه محصـولات خـویش اعـداد شاخص مقادیر مصرف انـرژی را بـه عنـوان امتیـازات و ویژگـی هـای محصولات خویش معرفی می نمایند. توجه به مقـادیر ویـژه انـرژی در هر دستگاه در ارزیابی عملکرد آن دستگاه موثر بوده و پایین بـودن آن می تواند به عنوان یک امتیاز مورد توجه قرار گیرد. با توجـه بـه بحـث هدفمند کردن یارانه ها که بیشترین بخش آن مربـوط بـه آزاد سـازی نرخ انرژی است، فعالان مجموعه صنعت به ویژه بخـش سـیمان را بـه سمت راهکارهایی در جهت کاهش مصرف انرژی فـرا مـی خواننـد بـا توجه به قیمت پایین هزینه کشورهای تولید کننده سیمان نسبت بـه ایران و در رأس آنها کشور چین کـه بـالغ بـر ۱/۴۰۰/۰۰۰/۰۰۰ تـن سیمان در سال تولید می کند( ۸ ) و هم اکنون حضور فعال در منطقه دارد،لذا باید هر چه زودتر در بخش تحقیق و توسعه با پژوهش در ایـن کشورها و یافتن روش های جایگزین در جهت کـاهش مصـرف انـرژی گام های عملـی برداشـته شـود و گرنـه قـدرت رقابـت صـادراتی ایـن محصول از کشور گرفته می شود.

**توصیف فرایند سیمان**

سیمان محصولی است از ترکیبات شیمیایی سنگ آهک(کلسیم کربنات)، سیلیس، آلومینیوم، آهن و مقادیر کمتری از مواد دیگر که در اثر حرارت بالا به شکل ترکیبی با ویژگی خاص به نام سیمان به دست می آید(۹،۱۰). برای دست یافتن این ترکیب باید مواد خام پس از گذراندن از سنگ شکن و اختلاط کامل با همدیگر در آسیاب مواد خام به صورت پودر عالی درآیند تا بیشترین سطح تماس برای تبادل انتقال حرارت (۱۱) و انجام واکنش های شیمیایی در پیش گرمکن و کوره را داشته باشد. این پودر پس از عبور از منطقه پیش گرمکن در منطقه پخت به وسیله حرارت دادن در دما $1400^{O}C$ به کلینکر تبدیل می شود.با توجه به دمای بالای کلینکر برای خنک کردن آن از خنک کننده استفاده می شود. پس از خنک کردن، در بخش آسیاب سیمان در عمل تبدیل کلینکر به پودر سیمان تا ٪۴ گچ به آن اضافه می شود. عمل افزودن گچ برای دیر گیرش سیمان به کلینکر انجام می گیرد. فرایند تولید سیمان هم اکنون به دو روش خشک و تر انجام می شود، اگرچه با توجه به بازده پایین محصول در فرایند تر و بالا بودن نرخ مصرف انرژی در این روش در سال های اخیر ایجاد و توسعه فرایند تولید به روش خشک انجام گرفته است. شکل(۱)فلودیاگرام تولید سیمان از مواد اولیه در روش خشک را نشان می دهد.در این دیاگرام نوع انرژی مصرفی هر دستگاه فرآیندی مشخص است(۱۲).




**شکل۱- فلو دیاگرام تولید سیمان و نوع انرژی مصرفی در دستگاه های فرآیندی**

**انرژی در صنعت سیمان**

**۱- انرژی مصرفی در صنعت سیمان**

انرژی در صنعت سیمان به دو صورت الف)انرژی الکتریکی ب) انرژی گرمایی مصرف می شود

الف) **انرژی الکتریکی**: عموماً در سراسر فرایند تولید سیمان انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد. برای مثال انرژی الکتریکی مصرف شده جهت خرد کردن سنگ در سنگ شکن، سایش مواد خام در آسیا ب ها، عملیات فن ها و بلور ها در پیش گرمکن و خنک کردن کلینکر، سیستم های انتقال مانند نوار نقاله ها و مقدار کمی انرژی الکتریکی برای چرخش کوره دوار را می توان نام برد. بنابر این انرژی الکتریکی تابعی از گردش مواد به کلینکر و سیمان می باشد،به طور میانگین از لحاظ مقداری برای هر تن سیمان در حدود ۱۱۹ kwh انرژی الکتریکی به مصرف می رسد.

ب) **انرژی گرمایی**: انرژی گرمایی به طور کلی در فرایند پخت در کوره سیمان به مصرف می رسد. برای تبدیل مواد خام به سیمان دو روش اصلی مورد استفاده قرار می گیرد که عبارتند از:۱- روش تر ۲- روش خشک . روش تر یک روش قدیمی است که در آن کوره پخت سیمان بزرگ و بلند می باشد و کوره با مخلوطی از مواد خام در حالت محلول آبی سر و کار دارد که در این فرایند انرژی زیادی برای از دست دادن آب همراه و فرایند کلسیناسیون نیاز است.

روش خشک که در این روش کوره پخت به مراتب کوچک و کم حجم شده و مواد خام به صورت پودر خشک وارد کوره می شوند. به علاوه در جدید ترین روش خشک با اضافه کردن دو قسمت پیش گرمکن و پری کلسیناتور که واکنش کلیسنه شدن و از دست دادن کربن دی اکسید در این قسمت انجام شود به طور مناسبی طول کوره ها کم شده است. روش خشک و روش تر از لحاظ مصرف انرژی و خنک کردن مواد تفاوت قابل ملاحظه ای دارند. در ساده ترین حالت روش تر مقدار انرژی الکتریکی مصرفی کمتری داشته،اما مقدار انرژی مصرفی گرمایی به مراتب بیشتر بوده و بازده پایین تری نسبت به روش خشک دارد، به این دلیل در نسل جدید کارخانه های سیمان از روش خشک بهره گرفته می شود. در روش خشک $۳/۳\times۱۰^{۶}kj$ انرژی گرمایی به زای یک تن کلینکر به مصرف می رسد(۱۳). جدول (۱) و جدول (۲) انرژی الکتریکی و انرژی گرمایی مصرفی در بخش ها تولید در صنعت سیمان را نشان می دهد. شکل (۲) مقایسه انرژی مصرفی در صنعت سیمان و میانگین مصرفی در جهان را نشان می دهد.

یکی از عوامل تعیین کننده مقدار انرژی مصرفی نوع سیمان است که به مواد اولیه و مواد افزودنی به کلینکر سیمان تولیدی مربوط می باشد. بلین یا نرمی سیمان برحسب $gr/cm^2$ گزارش می شود.بلین بالا منجر به سایش بیشتر و در نتیجه انرژی مصرفی بیشترمی گردد. اگر مواد اولیه و مواد افزودنی به کلینکر برای تهیه سیمان از درجه سختی بالایی برخوردار باشند، به انرژی بیشتری برای سایش نیاز دارند.جدول (۳) انرژی مصرفی برحسب نوع سیمان پرتلند (با افزودنی ها و بلین های متفاوت) را نشان می دهد.

**جدول ۱- میزان مصرف انرژی الکتریکی در بخش های مختلف سیمان(۱۴)**

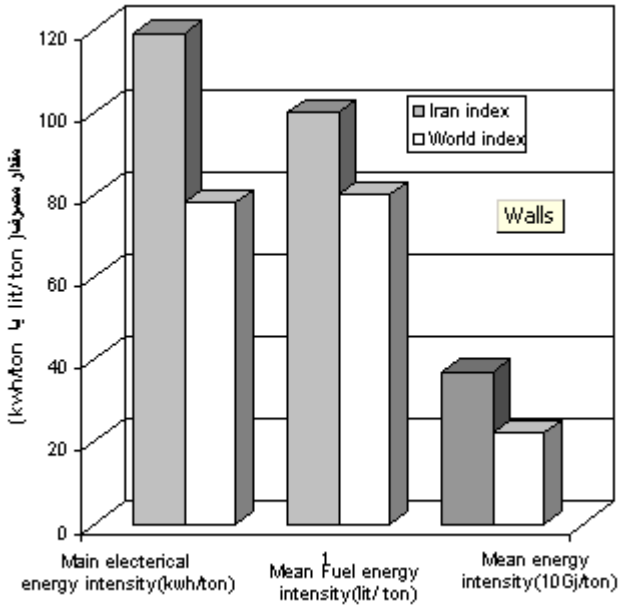
| ردیف | نام بخش | میزان مصرف( kwh/ton) | درصد مصرف |
|---|---|---|---|
| ۱ | معدن- سنگ شکن | ۴ | ۳/۴ |
| ۲ | سالن اختلاط | ۰/۵ | /۴ |
| ۳ | آسیاب مواد خام- سپراتور | ۳۰ | ۲۵/۲ |
| ۴ | سیلوی مواد خام و تغذیه کوره | ۱۵ | ۱۲/۶ |
| ۵ | سیستم پخت | ۲۲ | ۱۸/۵ |
| ۶ | آسیاب سیمان-سپراتور سیمان | ۴۴ | ۳۷ |
| ۷ | بارگیر خانه | ۲ | ۱/۶۸ |
| ۸ | سایر قسمت ها | ۱/۵ | ۱/۲۶ |
| جمع | | ۱۱۹ | ۱۰۰ |

**جدول ۲- میزان مصرف انرژی گرمایی در پخت سیمان**

| ردیف | مورد مصرف | مقدار (kcal/kg cli) | درصد |
|---|---|---|---|
| ۱ | گرمای تلف شده همراه گاز و گردوغبار خروجی پیش گرمکن | ۱۷۵ | ۲۳/۳ |
| ۲ | تلفات حرارتی از بدنه پیش گرمکن | ۴۱ | ۵/۴۶ |
| ۳ | تلفات حرارتی از بدنه کوره | ۲۰ | ۲/۶۶ |
| ۴ | گرمای مورد نیاز برای پخت مواد | ۴۱۵ | ۵۵/۲۶ |
| ۵ | گرمای مورد نیاز برای تبخیر آب آزاد | ۵ | ۰/۶۶ |
| ۶ | تلفات حرارتی در کولر | ۸۸ | ۱۱/۷۱ |
| ۷ | تلفات حرارتی در خنک شدن کلینکر | ۷ | ۰/۹۳ |
| جمع | | ۷۵۱ | ۱۰۰ |

**جدول۳- مقایسه انرژی مصرفی در انواع سیمان**

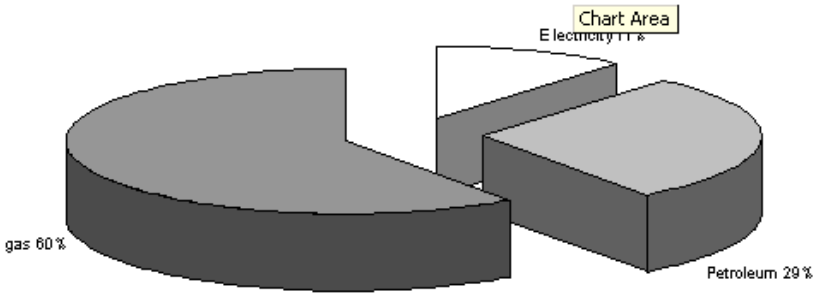
| نوع سیمان | ترکیب درصد | انرژی مصرفی برای تولید کلینکر(Mj/t) | انرژی مصرفی برای سایش در آسیاب سیمان(Mj/t) | انرژی کل (Mj/t) |
|---|---|---|---|---|
| سیمان پرتلند | ۹۴٪ کلینکر و ۶٪ گچ | ۳۳۸۴ | ۳۶۴ | ۳۷۴۸ |
| سیمان پرتلند | ۷۷٪ کلینکر، ۱۸٪ پرکننده و ۵٪ گچ | ۲۷۷۲ | ۴۰۹ | ۳۱۸۱ |
| سیمان پرتلند | ۷۵٪کلینکر، ۲۰٪ پوزولان و۵٪ گچ | ۲۷۰۰ | ۴۰۹ | ۳۱۰۹ |
| سیمان پرتلند | ۶۶٪ کلینکر،۳۰٪سرباره و ۴٪ گچ | ۲۳۷۶ | ۵۰۰ | ۲۸۷۶ |




**شکل ۲- انرژی مصرفی در صنعت سیمان و مقایسه آن با میانگین انرژی مصرفی در جهان( ۷)**

**۲- منبع تولید انرژی در صنعت سیمان**

انرژی مصرفی در بخش صنعت از دو منبع فسیلی و انرژی الکتریکی تامین می شود.شکل (۳) سهم انرژی را در هر بخش نمایش می دهد.




**شکل ۳- سهم منابع تولید انرژی مصرفی در صنعت سیمان(۱۵)**

همان گونه که شکل نشان می دهد سهم انرژی الکتریکی ۱۱٪ و سهم انرژی فسیلی ۸۹٪ است که خود منبع فسیلی از دو زیر بخش گاز طبیعی با ۶۰٪ و محصولات نفتی مانند مازوت،گازوئیل و نفت و... با۲۹٪ تشکیل می شود. ارزش اقتصادی انرژی الکتریکی و انرژی فسیلی که در صنعت سیمان مصرف می شود ۲۸٪ در بخش الکتریکی و ۷۲٪ در بخش فسیلی می باشد. با توجه به این که در حال حاضر صنعت به طور کلی از انرژی با قیمت یارانه ای بهره می برد، لذا کمتر رغبتی به سمت سوخت های دیگر از طرف صنعت مشاهده می شود، در صورتی که در دیگر کشورها به دلیل هزینه بالای انرژی حاصل از منابع فسیلی به سمت سوخت های جایگزین در صنعت گام برداشته اند. این سوخت ها که تحت نام سوخت های ثانویه از آن ها یاد می شود به سوخت هایی اطلاق می گردد که در بازارهای معمول داد و ستد نمی شوند.از مزایای این سوخت ها می توان به موارد زیر اشاره کرد : ۱- ارزش حرارتی آن ها با سوخت های فسیلی معادل است ۲- آلودگی آن ها نسبت به سوخت های فسیلی کمتر می باشد(۱۶) زیرا اغلب این سوخت ها در فرمول ساختاری خود از تعداد کربن کمتری برخوردار هستند.این سوخت ها در حقیقت مواد باقیمانده و دو ریز کارخانجات, نیروگاه ها, ضایعات و پسماندهای

شهری، حتی کارخانه سیمان و .....می باشند. جدول۴ لیستی از سوخت های جایگزین , مقایسه و میزان ارزش حرارتی هر کدام با سوخت های فسیلی را نشان می دهد.

**جدول ۴- مقایسه منابع سوخت های جایگزین و میزان ارزش حرارتی آن ها نسبت به سوخت های فسیلی(۱۷)**

| ردیف | سوخت جایگزین | ارزش حرارتی(Mj/kg) | سوخت فسیلی | ارزش حرارتی(Mj/kg) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | پلی اتیلن | ۴۶ | نفت سبک | ۴۲ |
| ۲ | لاستیک خالص( بدون مواد پرکننده) | ۳۶ | نفت سنگین | ۴۰ |
| ۳ | فلز آلومینیوم | ۳۱ | زغال سنگ (آنتراسیت) | ۳۴ |
| ۴ | روغن های ضایعاتی و ضایعات مختلف پالایشگاه | ۳۰-۴۰ | کک نفتی | ۳۳ |
| ۵ | تایرهای ضایعاتی | ۲۸- ۳۲ | زغال بیتو مین | ۲۴-۲۹ |
| ۶ | لجن اسیدی(حاصل از فرآیندهای نفتی) | ۱۶-۲۲ | گاز طبیعی | ۱۶ |
| ۷ | لایه پاتیل های ذوب آلومینیوم | ۲۰ | زغال سنگ قهوه ای (لیگنیت با ۱۰٪ رطوبت) | ۱۶-۲۱ |
| ۸ | پوست خرما با ۱۰٪ رطوبت | ۱۹ | | |
| ۹ | چوب درخت با ۱۰٪ رطوبت | ۱۶ | | |
| ۱۰ | ضایعات اتومبیل های مستعمل | ۱۵ | | |
| ۱۱ | ضایعات خانگی با ۱۰٪ رطوبت | ۱۵ | | |
| ۱۲ | ضایعات کاغذی | ۱۵ | | |
| ۱۳ | کود حیوانات | ۱۵ | | |
| ۱۴ | لجن فاضلاب خشک با ۱۰٪ رطوبت | ۱۰ | | |
| ۱۵ | لجن فاضلاب خشک با ۳۰٪ رطوبت | ۷/۵ | | |

**۳- اتلاف انرژی در صنعت سیمان**

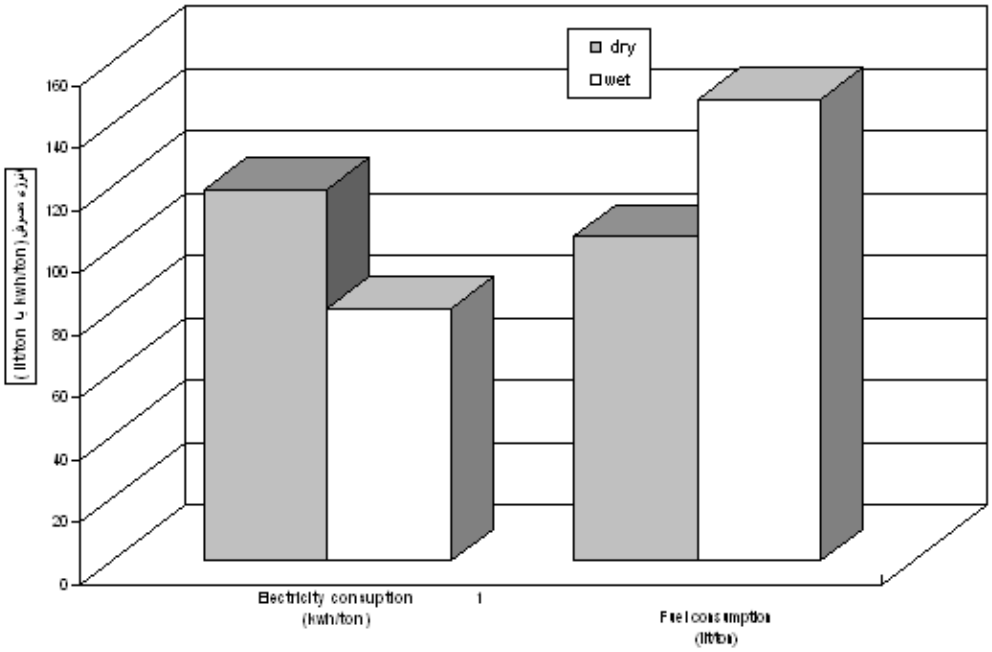
**۱.۳- اتلاف انرژی الکتریکی**

دستگاه های فرآیندی که انرژی الکتریکی را مصرف می نمایند بر حسب نوع دستگاه مقدار قابل توجهی از انرژی را تلف می کنند، از جمله این دستگاه ها می توان به نوع سنگ شکن، نوع آسیاب های مواد خام و سیمان(۱۸) که بیشترین مصرف کننده انرژی الکتریکی می باشند، فن هایی که در قسمت های مختلف فرایند مورد استفاده قرار می گیرند، خنک کننده کلینکر، سیستم های انتقال (ایرلیفت ها، الو تورها، نوار نقاله ها، ایر اسلاید ها و....)، اشاره کرد. با توجه به وزن خود دستگاه فرآیندی مقداری از انرژی مصرفی صرف انرژی مکانیکی در به حرکت درآوردن ماشین انتقال نیرو می شود.هر چه وزن بدنه ماشین سنگین تر باشد، مقدار انرژی مصرفی برای تبدیل واحد محصول بیشتر یا به عبارتی اتلاف انرژی بیشتر می گردد(۱۹). مقایسه نوع دستگاه ها نشان می دهد در دستگاه های جدید به ویژه تغییر آسیاب ها تاثیر قابل توجهی در کاهش انرژی مصرفی در بخش الکتریکی داشته است. بررسی انجام گرفته از مقایسه دستگاه های نصب شده در سالیان اخیر نسبت به دستگاه های قدیمی موجود در صنعت سیمان بیان می کند که با تغییر در نوع دستگاه ها فرآیندی می توان تا kwh/ton cement ۴۲ در مصرف انرژی صرفه جویی کرد.

**۲.۳ -اتلاف انرژی گرمایی**

همان گونه که ذکر شد بیشترین مصرف انرژی گرمایی در صنعت سیمان در سیستم پخت می باشد. روش تر که هم اکنون کمترین رغبت برای استفاده از آن می باشد، بیشترین انرژی مصرفی گرمایی را به خود اختصاص می دهد که در این راه انرژی گرمایی زیادی تلف می شود. شکل (۴) مقایسه انرژی مصرفی در روش تر و روش خشک را نشان می دهد. همان گونه که شکل نشان می دهد،اگرچه در بخش انرژی الکتریکی روش تر نسبت به روش خشک برتری دارد،اما در بخش انرژی گرمایی روش خشک بر روش تر ارجح است و با توجه به بازدهی محصول در روش خشک در نسل جدید کارخانه های سیمان کاملا از روش خشک استفاده می شود.در روش خشک که در ابتدای

ابداع آن بخش عمده ای از وظیفه پیش گرمکن درکوره انجام می گرفت، این عامل باعث ازدیاد طول کوره پخت و مدت زمان مانـدگاری بیشتر مـواد در ایـن کوره می گردید و در نتیجه مصرف انرژی بیشتر می شد. در توسعه روش خشک، پیش گرمکن گسترش پیدا کرد که این عامل منجر به استفاده بیشتر از حرارت تلف شده در سیستم پخت شد که توسط هوای گرم برای رطوبت زدایی مواد در بخش پیش گرمکن انتقـال می یـافت. هم چنیـن در توسعه کارخانه های سیمان در حال حاضر پری کلسیناتور که قسمتی از وظیفه سیستم پخت در بخش واکنش شیمیایی کلسیناسیون مواد خام ورود به کوره را به عهده دارد، به عنوان یکی از سیکلون ها در پایین ترین قسمت پیش گرمکن اضافه شده است. این عامل باعث کوتاه شدن طول کوره و مدت زمان کمتر توقف مواد در کوره شده و به طبع آن انرژی مصرفی کمتری را برای تولید واحد محصول به همراه دارد.




**شکل ۴- مقایسه انرژی مصرفی در دو روش خشک و تر در کارخانه سیمان(۵)**

**نتایج و بحث**

جدول (۱) مقدار مصرف انرژی الکتریکی در قسمت های مختلف خـط تولید سیمان را نشان می دهد، همان گونه که داده های جدول نشـان می دهند در تمام خط تولیـد،انرژی بـه صـورت الکتریکـی در مقـادیر مختلف به مصرف می رسد.کمترین انرژی الکتر یکی مصرفی در سـالن اختلاط با ۰/۴٪ و بیشترین مصرف انرژی الکتریکـی در بخـش سـایش (آسیاب های مواد خام و سیمان) با ۶۲/۲ ٪ انجام مـی پـذیرد. عمومـاً در صنعت سیمان از سه نوع آسیاب به نام های غلطکـی، رول پـرس و گلوله ای استفاده می شود. در ایـن بـین آسـیاب هـای غلطکـی دارای کمترین و آسیاب های گلوله ای دارای بیشترین مقـدار مصـرف انـرژی الکتریکی می باشند. برای مثال مقدار انـرژی الکتریکـی در آسیـــاب هـــای غلطکـی ۱۴/۲Kwh/ton material، آسـیاب هـای رول پـرس ۱۷/۵ Kwh/ton material و در آسـیاب هـای گلولـه ای ۲۰/۶Kwh/ ton material می باشد. آسیاب هـای گلولـه ای بـا توجه به وزن بسیار بالای گلوله ها در محفظه آسیاب بیشترین مصـرف انرژی الکتریکی را نسبت به دیگر سیستم های سایشی دارا می باشند.

میزان مصرف انرژی گرمایی خط تولیـد سـیمان در جـدول (۲) نشـان داده شده است. همان گونه که از جدول مشخص است عمومـاً انـرژی گرمایی در بخش پخت(کوره و پـیش گـر مکـن) کارخانـه سـیمان بـه مصرف می رسد، همچنین داده های جدول نشان می دهد کـه بخـش عمده ای از انرژی حرارتی(بالغ بر ۲۱٪ انرژی حرارتی) در بخش پخـت تلف مـی شـود. بیشـترین مقـدار مصـرف انـرژی گرمـایی در کـوره و کمترین آن در منطقه پیش گرمکن مصرف می گردد. با توجه به ایـن که بیشترین انرژی مورد نیاز پیش گرمکن از خود انرژی کـوره تـامین می شود نمی توان به طـور مسـتقل انـرژی مصـرفی پـیش گـرمکن را محاسبه کرد. اگر انرژی مورد نیاز مناطقی از خـط تولیـد کـه نیـاز بـه انرژی حرارتی دارند از حرارت تلف شده از کوره تامین شود، در قیمـت تمام شده محصول و انرژی مصـرفی صـرفه جـویی مـی گـردد. میـزان ارزش حرارتی سوخت های جایگزین نسبت به سوخت های فسـیلی در جدول (۳) ارائه شده است. همان گونه که جدول نشان می دهد بـیش از ۱۵ سوخت جایگزین به جای سوخت های فسیلی مطرح می باشـد

که ارزش حرارتی آن ها در دامنه ۷/۵ Mj/kg تا ۴۶ Mj/kg قرار دارد. با توجه به لایحه هدفمند کردن یارانه ها و در راس آنها آزاد شدن نرخ انرژی لازم است که صنایع به سمت سوخت های جایگزین گام برداشت. جدول(۳) مقایسه انرژی مصرفی در انواع سیمان های پرتلند با ترکیب درصد های متفاوت را نشان می دهد. در یک نگاه می توان دریافت که انرژی الکتریکی در بخش سایش در آسیاب سیمان با افزودن مواد پرکننده، مواد سرباره و مواد پوزولانی افزایش می یابد اما از آنجایی که مقدار قابل توجهی از انرژی تا مرحله کلینکر صرفه جویی می شود، همان گونه که در ستون آخر جدول مشاهده می شود انرژی تمام شده به ازای واحد محصول کاهش می یابد. علاوه بر آن از استهلاک دستگاه های فرآیندی در این صنعت به طور چشمگیری می توان جلوگیری کرد. در جدول (۴) سوخت هایی با قیمت بسیار پایین مشاهده می شود که با رها شدن در محیط زیست آثار مخربی بر آن وارد می کند از جمله این منابع انرژی می توان به لاستیک های ضایعاتی،روغن های ضایعاتی و ضایعات مختلف پالایشگاهی، ضایعات خانگی،کود حیوانات، لجن های خشک و تر فاضلاب ها اشاره کرد که معمولا در جمع آوری آن ها هزینه های زیادی به شهرداری ها تحمیل می گردد.اگر این منابع به عنوان منابع ثانویه انرژی در صنایع به مصرف برسند تاثیر به سزایی در صرفه جویی انرژی و قیمت تمام شده محصول خواهند داشت. مشابه این روش در کشورهای توسعه یافته و کشورهایی که در جهت دسترسی به منابع فسیلی با محدودیت روبرو هستند مورد استفاده قرار می گیرد. لذا صنایع باید هر چه زودتر وارد این فرایند شوند و تکنولوژی روز برای تبدیل این منابع انرژی به انرژی های قابل تبدیل مورد استفاده قرار گیرند تا هم از محیط زیست و هم از منابع فسیلی حفاظت به عمل آید. شکل (۱) فلودیاگرام خط تولید سیمان را نشان می دهد.با توجه به شکل و داده های حاصل از جداول محل های مصرف انرژی الکتریکی و گرمایی و بالطبع اتلاف انرژی در صنایع سیمان مشخص است.مقایسه انرژی مصرفی در ایران با میانگین مصرف انرژی صنعت سیمان در جهان در شکل (۲) نشان داده شده است. همان گونه که در نمودار نمایان می باشد مصرف انرژی الکتریکی در ایران ۱۱۹ Kwh/ton در صورتی که این مقدار در جهان ۷۸ Kwh/ton می باشد. هم چنین در بخش انرژی حرارتی مورد نیاز، مقدار انرژی گرمایی مصرفی در ایران در حدود ۱۰۰ lit fuel/ton و در جهان کمتر از ۸۰ lit fuel/ton است. از مقایسه این داده ها می توان نتیجه گرفت که ایران بیش از ۵۰٪ انرژی الکتریکی و بیش از ۲۵٪ انرژی گرمایی را نسبت به میانگین انرژی مصرفی در جهان در بخش سیمان مصرف می نماید. شکل(۳) منابع تولید انرژی را نشان می دهد. با توجه به شبکه سراسری گاز در اغلب نقاط کشور صنایع سیمان هم از این منبع استفاده می کنند اگرچه تعدادی از کارخانه های سیمان هنوز به طور کامل از سوخت مازوت استفاده می نمایند ولی به طور میانگین ۲۹٪ انرژی گرمایی از این منبع سوخت،۶۰٪ انرژی گرمایی از گاز طبیعی و ۱۱٪ آن از بخش انرژی الکتریکی به مصرف می رسد. با توجه به ارزش افزوده این منابع در تبدیل محصولات پایین دستی و آزاد شدن نرخ انرژی باید در صنایع به سمت وابستگی کمتر و سوخت های جایگزین قدم برداشت. شکل (۴) مقایسه انرژی گرمایی مصرفی در دو روش خشک و تر را نشان می دهد.این نمودار مشخص می کند که روش تر در بخش انرژی الکتریکی تقریباً ۲۵٪ کمتر از روش خشک اما در بخش انرژی گرمایی حدود ۴۵٪ بیشتر از روش خشک انرژی مصرف می کند. به همین دلیل و با توجه به بازده پایین تولید محصول در سالیان اخیر عموماً روش تر کنار رفته و روش خشک جایگزین شده است.

**نتیجه گیری**

سیمان با بیش از ۱۵٪ از انرژی مربوط به بخش صنعت یکی از زیر بخش های مهم آن است که به شدت وابسته به انرژی می باشد.انرژی در صنعت سیمان در ۲بخش انرژی الکتریکی و انرژی گرمایی به مصرف می رسد. با نگاه به هدفمند کردن یارانه ها و آزاد سازی نرخ انرژی، وضعیت فعلی سیمان در مصرف انرژی به بازنگری جدی نیاز دارد.از جمله راهکارهای صرفه جویی در مصرف انرژی در بخش های مختلف صنعت سیمان می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف)آماده سازی موادخام: بهره برداری از تجهیزات با مصرف انرژی پایین مانند آسیا ب های غلطکی،رول پرس،سپراتورهای راندمان بالا،موتورهای دور متغیر، بهینه سازی دانه بندی در مواد ورودی و محصول آسیا ب ها، اعمال سیستم مدیریت برای بهره برداری بهینه از انرژی و اعمال سیستم تعمیر و نگهداری تجهیزات برای راهبری بهینه آن ها

ب) **سیستم پخت**: مدیریت انرژی و سیستم کنترل فرایند،بهینه سازی سیستم احتراق،کاهش تلفات حرارتی از بدنه، به کارگیری سوخت های ضایعاتی، بهینه سازی گریت کولرها، بازیابی حرارتی بهینه از گازها و مواد، کاهش درجه حرارت و حجم گازهای خروجی از سیستم به وسیله بهینه سازی سیستم و کاهش میزان هوای نشتی، به کارگیری سیکلون هایی با افت فشار کم در پیش گر مکن ها، تبدیل کوره های بلند به کوره های کوتاه مجهز به پری کلسیناتور، مدیریت تولید، تغییر در نوع مواد تشکیل دهنده سیمان،کاهش تلفات حرارتی از بدنه کوره ها و سیستم پخت، به کارگیری پیش گرمکن های ۵ و ۶ طبقه با افت فشار کم، بهینه سازی سیستم احتراق و کاهش هوای اولیه از طریق کاربردهای مدرن، یافتن راهکارهای جایگزین انرژی و وارد کردن تکنولوژی جدید و عوامل تاثیر گذار.

ج) آسیاب های سیمان: مدیریت انرژی و سیستم کنترل فرایند، بهینه سازی شارژ آسیا ب های گلوله ای،بهینه سازی سپراتورها، به کارگیری آسیاب ها از نوع رول پرس، سیستم انتقال مواد موثر، آسیاب های غلطکی و سپراتورهای راندمان بالا

د) تمهیدات کلی: پیاده نمودن سیستم تعمیرات و نگه داری باز دارنده،به کارگیری مو تورهایDC، بهینه سازی سیستم های هوای فشرده، تولید سیمان های مخلوط، تاسیس واحدهای انرژی در هر کارخانه در جهت ثبت مقادیر مصرف انرژی در بخش های مختلف و بررسی روزانه مصارف و تلاش در جهت محدود کردن دایمی آن ها.

**منابع**


1. Vleuten, F.P.Vander., (1994), Cement in Development, Energy and Environment. Netherlands Energy Research Foundation, the Netherlands
2. S. Ellis., (2003), Environment Update for the Cement Industry, Cement Americans. May1,. Internet source. Available at
3. Loreti. Christopher, (2009), Cement sector greenhouse gas emission reduction, California Energy commission, CEC. 600-2009-005

۴. کریمی، م.، افسریان، س م ، جهان زاده، ح، (۱۳۸۶) بکارگیری سوخت های ضایعاتی در صنعت سیمان. کنفرانس بین المللی سوخت در صنعت سیمان، تهران ، ایران

5. A. Avami, S.Sattari, (2007), Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran. International Journal of Energy Issue 3.vol.1. pp1-7
6. Worreler, E. And Galistky,C., (2004), Energy efficiency improvement opportunities for cement making, An energy star Guide for Energy and plant managers, report LBNL- 54036, Lawrence Berkley national laboratory, Berkley

۷. بکائیان منوچهر (۱۳۸۶) نقش فرایند در کاهش مصرف سیمان . کنفرانس بین المللی سوخت در صنعت سیمان، تهران ، ایران

8. Freight Railroads and Greenhouse Gas Emissions, 2008. Association of American Railroads, Policy and Economics Department, February 2008.
9. ASTM (2003), Standard specification for Portland cement, Annual books ASTM standard American society for testing and materials, USA.
10. Mair and M. Rosset, (2002) Principles for the utilization of material in cement works ZKG. NO.1
11. Khurana Shaleen., (2002), balance and cogeneration for a cement plant, applied thermal Engineering, vol.22,pp. 485-494
12. M.Jacott, F.Comunes, C. Reed, (2003); Energy use in the cement industry in North America: Emissions, Waste Generation and Pollution Control, 1990-2001.
13. T.Engin, V. Arl., Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln System –A case study , Energy Conversion and Management , vol.46,pp,551-562
14. G.A. Boyd., (2006), Development of a performance- Based industrial Energy indicator for Cement Manufacturing Plants; Argonne National Laboratory.ANL/DIS-06-3.pp1-34
15. Ernst Worrell, Nathan Marin, Lynn price, (2002) Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry, Energy, 25; 1189-1214
16. Emission of Greenhouse gases in the United State (2001), Energy information Agency, DOE, December 2002, Page31

۱۷. کریمی، م .، افسریان، س م ، جهان زاده، ح. ، (۱۳۸۶) انرژی و محیط زیست در صنعت سیمان. کنفرانس بین المللی سوخت در صنعت سیمان، تهران ، ایران

۱۸. رحمانی، فریدون. یعقوبی، محسن.،(۱۳۸۷) ضرورت کاربرد آسیاب های غلطکی در صنعت سیمان، تهران ، ایران

19. E.Worell, N. Martin L. Price., (2004), Potentials for energy efficiency improvement in the US cement plant, applied thermal engineering.vol.22, pp, 485-494.