

به نام خدا

مروری کوتاه بر عملکرد کوره‌های دوار در صنعت سیمان

سمیرا عابدی^a

^a آزمایشگاه شیمی سیمان گیلان سبز - کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

چکیده

تولید سیمان فرایندی با مصرف انرژی بالاست و کوره دوار مهمترین بخش فرایند می باشد. شناخت این قسمت از تجهیزات می تواند به یافتن راهکارهای جدید برای حل مشکلات آن و بهبود کیفیت سیمان کمک نماید. در این مقاله مروری سعی بر این بوده که ضمن بیان چکیده ای از پخت سیمان در کوره دوار و برخی کارهای انجام شده در راستای پیش بینی و بهبود عملکرد آن، راهکارهایی برای بعضی از مشکلات پیش رو در کوره دوار ارائه شود.

کلید واژه ها: سیمان، کوره دوار، انرژی، خوراک کوره

۱- مقدمه

تولید سیمان، مقدار انرژی (حرارتی و برق) و مواد خام زیادی را مصرف می کند. فرایند تولید آن بسیار پیچیده بوده و شامل تعدادی مواد، تکنیک های فرایند گرمایی، و منابع سوختی (مثل ذغال سنگ، نفت، کک، گاز طبیعی، سوخت نفتی، یا انواع مختلفی از فاضلاب) می باشد [1-3].

مصرف سیمان در کشورها می تواند به عنوان شاخصی از پیشرفتگی آنها در نظر گرفته شود. البته توجه به اقلیم هر کشور، نوع مصارف سیمان و مسائلی دیگر ضروری می باشد. در کشور ما نیز در طی چند سال گذشته نیاز به این ماده ی پر اهمیت مهندسی بیشتر شده است و این نیاز منجر به تأسیس کارخانجات متعددی در سطح کشور شده است. البته از دیدگاهی دیگر کشور ایران به خاطر دارا بودن منابع عظیم نفت و انرژی و دارا بودن ذخایر مواد اولیه ی مصرفی در بخش سیمان، مستعد تولید سیمان نیز می باشد. بنابر تعریف سیمان گردی است نرم، جاذب آب و چسباننده خرده سنگ که اساساً مرکب است از ترکیبات پخته شده و گداخته شده ی اکسید کلسیم با اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم و اکسید آهن. ملات این گرد قادر است به مرور در مجاورت هوا و یا در زیر آب سخت شود، در زیر آب ضمن داشتن ثبات حجم مقاومت خود را نیز حفظ می نماید و در فاصله ی ۲۸ روز در زیر آب ماندن دارای حداقل مقاومت ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می شود. مواد اصلی به کار رفته در سیمان پرتلند در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب درصد مواد خام کلینکر، جزء ابتدایی سیمان پرتلند.

درصد جرمی	منبع	مواد خام
۶۷-۶۰	سنگ آهکی، سرباره آهنی، گچ	آهک
۲۵-۱۷	شن، خاکستر	سیلیس
۸-۲	خاک رس، سنگ رست، خاکستر	آلومینیوم
۶-۰	سنگ آهن	اکسید آهن

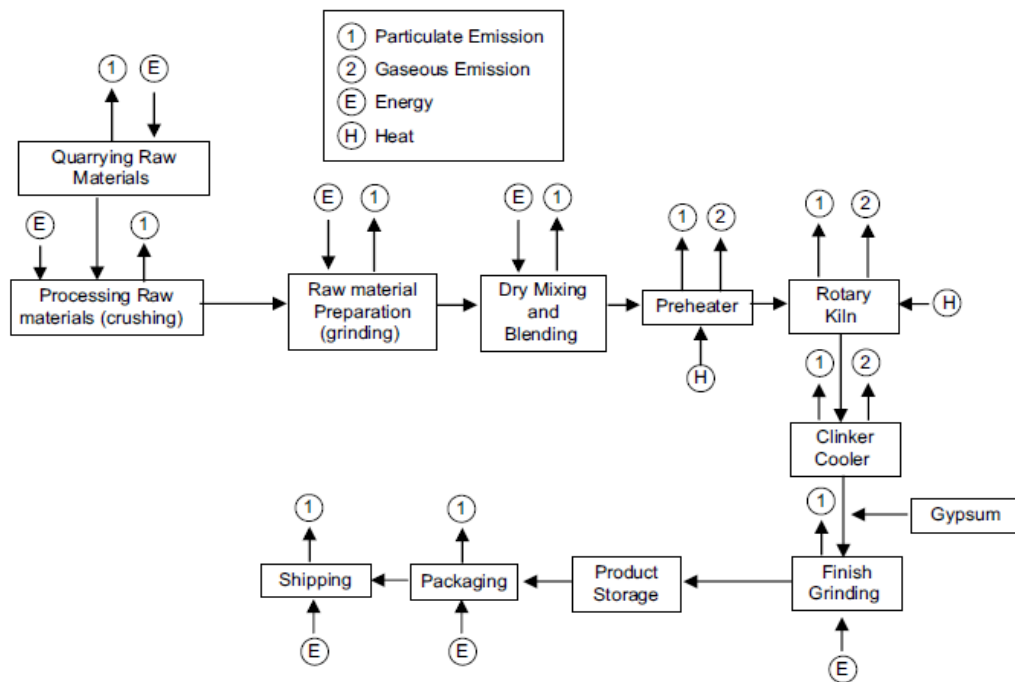
قلب فرایند تولید سیمان، سیستم فرایند گرمایی است. این سیستم، مواد خام را به کلینکر که کلوخه های خاکستری، محکم و کروی به قطر ۰,۳۲ تا ۵,۱ سانتیمتر می باشد، تبدیل می کند. فرایندهای شیمیایی و فیزیکی که این تبدیل را ممکن می سازند کاملاً پیچیده هستند اما می توان آن را به طور مفهومی به صورت زیر دید:

۱. تبخیر آب آزاد
۲. انبساط آب ترکیبی در اجزای خاک رس
۳. کلسیناسیون کلسیم کربنات ($CaCO_3$) به کلسیم اکساید (CaO)
۴. واکنش CaO با سیلیس جهت تشکیل دی کلسیم سیلیکات
۵. واکنش CaO با مواد متشکله ی آلومینیوم و حامل آهن جهت تشکیل فاز مایع
۶. تشکیل کلوخه های کلینکر
۷. تبخیر مواد فرار (مانند سدیم، پتاسیم، کلریدها و سولفات ها)
۸. واکنش CaO اضافی با دی کلسیم سیلیکات جهت تشکیل تری کلسیم سیلیکات

این دنباله از اتفاقات را می توان به چهار مرحله که تابع مکان و دمای مواد درون کوره ی دوار هستند تقسیم نمود:

۱. تبخیر آب غیر ترکیبی مواد خام در حین افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سلسیوس.
۲. بی آب شدن در حین افزایش دمای مواد از ۱۰۰ درجه تا ۴۵۰ درجه سلسیوس و تشکیل اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و آهن.
۳. کلسیناسیون در حینی که کربن دی اکساید از CaO تشکیل می شود، یعنی بین ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس.
۴. واکنش اکسیدها در ناحیه ی سوختن کوره ی دوار و تشکیل کلینکر سیمان در دمای تخمینی ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد.

نمایی کلی از فرایند تولید سیمان در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- شمایی از فرایند تولید سیمان به همراه ورودی و مصرف انرژی و حرارت.

۲- سیر تحول روش‌های تولید

در تولید سیمان کلاً دو روش وجود دارد که به شرح زیر است:
 (۱) روش تر

(۲) روش خشک

در روش تر مواد اولیه به صورت دوغاب در آمده و دوغاب حاصل پس از آسیاب شدن و رسیدن به خواص مطلوب به داخل کوره ای می‌روند که در این کوره ابتدا آب دوغاب خشک شده، سپس واکنش‌های مربوط به زینترینگ انجام می‌شود. البته لازم به توضیح است که در فرآیند تر معمولاً مواد خرد شده، در تانکرهایی آب خور شده و کلاً خواص دوغاب پیش از مرحله ی پخت معین می‌گردد. در روش خشک مواد پس از خرد شدن و آسیاب ابتدا پیش گرم شده، سپس به داخل کوره رفته که طول کوره ی پخت کلینکر در این روش معمولاً بسیار کوتاه تر از حالت تر می‌باشد.

۲-۱- تفاوت‌های روش تر و خشک

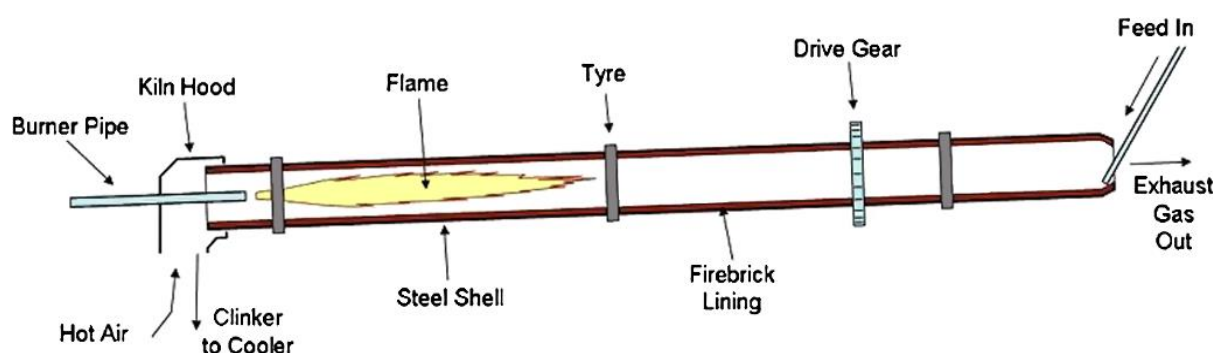
در روش تر، گرد و خاک کمتری تولید شده و برای سلامتی کارگران مناسب تر است، همچنین سیمان تولید شده به روش تر به دلیل اینکه بهتر مخلوط شده است مرغوب تر می‌باشد. اما هزینه ی سوخت پخت

سیمان در روش تر بیشتر است زیرا تبخیر آب در این حالت به انرژی بسیار زیادی نیاز دارد و همچنین خود کوره‌ی تولید کلینکر نیز باید حجم بزرگتری در ازای هر تن کلینکر تولیدی داشته باشد، در نتیجه سیمان تولید شده گرانتر از سیمان تولید شده به روش خشک می باشد، همچنین نگهداری مصالح به روش تر در سیلوها مشکل تر می باشد زیرا دانه های موجد در لجن آسانتر رسوب می کنند و پراکندگی یکنواخت دانه ها با سهولت بیشتری نسبت به روش خشک بهم می خورد، به همین علت سیلوهای نگهداری سیمان به روش تر باید دارای مخلوط کن باشند. در نتیجه، با توجه به تاکید بر حفظ انرژی در صنعت، به نظر می رسد جهان به سمت تولید سیمان به روش خشک پیش می رود [4].

۳- کوره دوار:

کوره های دوار که برای اولین بار توسط فردریک رانسوم در سال ۱۸۸۵ به ثبت رسید، کوره های استوانه ای صنعتی بلند، با طول در حدود ۵۰-۱۲۰ متر و قطر ۳/۵-۶/۵ متر می باشند که با کمی شیب در خط تولید قرار می گیرند. (شکل ۲) این کوره ها در بازه ی بزرگی از صنایع تولید مواد کاربرد دارند. خوراک از قسمت بالایی استوانه به آن خورانده می شوند و همانطور که کوره حول محورش می چرخد، بستر مواد به تدریج به سمت پایین تر جلو می رود و مدام هم می خورد. مواد از انتها خارج می شود تا فرایندهای بعدی روی آنها انجام گیرد. حرارت دادن به کوره باعث پیشرفت واکنش های بستر شده که چه از لحاظ سینتیکی و چه از لحاظ ترمودینامیکی به دمایی بالا نیاز دارند.

کوره دوار شامل اجزاء الف) غلطک ها، ب) غلطک بالابر، ج) سیستم چرخاننده کوره، د) آب بندی سروته کوره، ه) نسوز کاری داخل کوره می باشد.



شکل ۲- شمای کلی از کوره ی دوار با مشعل و خوراک در جهات مخالف. [5]

معمولاً یک سیستم زنجیری در طرف ورودی خوراک در کوره و در ناحیه ی خشک کن یا پیش گرم کن قرار می دهند که از انتقال حرارت از گازهای داغ به مواد جامد جلوگیری شود. در ادامه چرخش کوره باعث افتادن زنجیر داغ به روی مواد سردتر در پایین کوره شده و حرارت را به بار منتقل می نماید. [5,6]

۴- پیشینه تحقیق

اخیرا مدل سازی های نظری میدان جریان و احتراق ذغال سنگ در کوره های سیمان، توسط برنامه ی شبیه ساز CFD انجام شده است که دقت مناسبی را در مقایسه با داده های تجربی و صنعتی از خود نشان داده است اما به تنهایی مفید نیست و باید با داده های تجربی همراه باشد. [7-10]

ماستورا کوس و همکارانش [11]، مدلی مستند و مدولار (شامل سه مدول شعله، دیواره ها و بار) را برای بیشتر فرایندهایی که در کوره ی دوار تولید کلینکر رخ می دهد ارائه نمودند و با کدنویسی CFD مدل را شبیه سازی نمودند. و نشان دادند که بیشتر انتقال حرارت بین گاز و دیواره ی کوره به صورت تشعشعی بوده اما هدر رفت حرارتی از طریق نسوزها به محیط اطراف حدود ۱۰٪ حرارت ورودی است و همچنین واکنش شیمیایی و حرارت دادن به بار، حدود ۴۰٪ انرژی احتراق را جذب می نماید.

هاتزینگر و ایتمون [1]، نشان دادند که می توان با افزودن مواد دارای خاصیت سیمانی مانند خاکستر ذغال سنگ، آهن سرباره، و پوزولان های طبیعی، مقدار کلینکر مورد نیاز برای تولید مقدار مشخصی سیمان را کاهش داد. آنها با بررسی چهار نوع روش تولید سیمان: (۱) پرتلند سنتی، (۲) ترکیبی (با پوزولان های طبیعی و خاکستر)، (۳) پرتلند در صورتی که قسمتی از فرایند مرتبط با گازهای خروجی با استفاده از جداسازی مواد ضایعاتی بازیابی می شود، (۴) پرتلندی که در آن مواد ضایعاتی دوباره به کوره برگشت داده می شود، تاثیر ترکیب مواد را بر روی محیط زیست مخصوصا گرمایش زمین نشان دادند.

همچنین میهلسیچ و همکارانش [12]، نشان دادند که استفاده از پوزولان ها می تواند هزینه را تا حد ۲۵٪ در ازای هر کیسه سیمان ذخیره کند که برای زیرساختارهای جدید از نظر اقتصادی به صرفه می باشد. آنها نشان دادند که با استفاده از پوزولان می توان مقدار کمتری از مواد خام گران قیمت تر را برای تولید مقدار مشخصی سیمان استفاده کرد.

پیزورانی و همکارانش [13]، نشان دادند که با لغزیدن مواد در طول یک کوره ی دوار لایه ای از غبار در سطح جانبی آن تشکیل شده و برخی نقاط مستعد تجمع ذرات هستند که باعث تشکیل رسوب های استوانی ای شکل با ساختارهای کریستالی شده که به حلقه معروفند. با ضخیم تر شدن این حلقه ها سدی ایجاد نموده و مانع از جریان مواد و گازهای دودکشی در طول کوره می شوند. در حقیقت این حلقه ها بیشتر در نزدیکی مشعل تولید شده و احتمالاً با برخورد مستقیم شعله به سطوح جانبی و افزایش بیش از حد دمای موضعی به وجود می آیند. در چنین حالتی کوره ی در حال عملیات غیر قابل دسترسی بوده و مشکل باقی مانده و در ۷۰ درصد مواقع باعث توقف غیر قابل دید عملیات می گردد.

۵- مشکلات عملکردی کوره دوار و راهکارها

بر کسی پوشیده نیست که کیفیت خوب به علاوه‌ی قیمت تمام شده‌ی مناسب یک کالا می‌تواند به بازاریابی بهتر کمک کند. این امر در مورد سیمان نیز صادق است. اگر بتوان با پرس و جو و آمارگیری از نظرات استفاده‌کنندگان و یا عاملین پخش سیمان با خبر شد می‌توان در بهبود کیفیت و یا تصحیح نظرات مشتری‌ها کوشید (گاهی اوقات نظرات مشتری کاملاً با روش سنتی که تا کنون رواج داشته عجین گشته است که ممکن است درست نباشد). اما متأسفانه به دلایل اقتصادی و ... این امر محقق نمی‌شود. زیرا آمار درستی از علت رضایت یا عدم رضایت مشتری‌های سیمان در دست نیست و گاهی اوقات مشتری تنها به قیمت آن توجه می‌کند و کیفیت را فدای هزینه می‌کند. در این جا وظیفه‌ی تمامی تولیدکنندگان سیمان است که با روشنگری و تا حد امکان بالاتر بردن کیفیت و تغییر روش‌ها به زیر ساخت‌های کشور کمک کنند.

یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار بر راندمان تولید سیمان، راندمان کوره دوار و سیستم پخت می‌باشد. بنابراین باید شرایط فرایند پخت را شناخت و در جهت رفع مشکلات آن کوشید.

در پخت سیمان کنترل درجه حرارت منطقه پخت، درجه حرارت عقب کوره و درصد اکسیژن عقب کوره از متغیرهای اساسی کنترل کوره می‌باشند و باید به آنها توجه ویژه نمود. همچنین کنترل سوخت کوره، تغذیه‌ی کوره، گاز خروجی کوره نیز خالی از اهمیت نیستند.

گاهی اوقات در فن کوره مشکل به وجود می‌آید یا در سر کوره گرفتگی ایجاد می‌شود که در آن قسمت فشار مثبت شده و باعث ایجاد خطر برای اپراتورها و آسیب جدی به دستگاه‌های کوره می‌شود. در این صورت باید سریعاً افراد را از منطقه دور نمود و سرعت سوخت رسانی را کم نموده و شدت فن را زیاد کرد.

در ورودی کوره با بررسی فشار منفی موجود بین پایین‌ترین سیکلون و ورودی کوره، باید امکان گرفتگی شدید آن را بررسی نمود و با تشخیص به موقع، از مشکلات ناشی از آن جلوگیری نمود. همچنین با دماسنج‌های خاصی حرارت بدنه‌ی کوره را در زمانهای مختلف و نقاط مختلف سنجید تا بتوانیم ریزش آجرهای نسوز دیواره‌ی کوره را تشخیص دهیم.

ممکن است کوتینگ کوره ریزش کند و بدنه‌ی کوره لکه شود. از علل آن می‌توان به سر شکن شدن و نازکی آجر نسوز، داغ شدن بیش از حد منطقه پخت، تغییرات زیاد ترکیبات خوراک کوره و ... است. اپراتور کوره باید به طور مداوم با آنالیزورهای شیمیایی خوراک کوره در ارتباط باشد. اگر مواد به شکل زود پخت در بیایند، باید چند دقیقه قبل از ورود مواد به ناحیه‌ی پخت، سوخت را کم کرد. و در صورتی که بالعکس این قضیه اتفاق بیفتد باید مقدار سوخت را زیاد نمود. همچنین باید به تدریج کوره‌ی سرد را گرم کرد تا به آجرها آسیب حرارتی نرسد. برای اینکه در ناحیه‌ی لکه دار سریعاً کوتینگ جدید تولید شود باید با دمنده به آن نقطه از بدنه‌ی کوره هوای خنک دمیده شود.

در صورت نامنظم بودن شعله، آجرهای نسوز قسمت نزدیک به شعله آسیب می‌بینند و بدنه‌ی کوره لکه‌های سرخ پیدا می‌کند، در این حالت باید هوای اولیه و موضع شعله را تنظیم دوباره نمود و امکان گرفتگی

خروجی مشعل را بررسی کرد و در صورت دفرمگی خروجی مشعل، نسبت به تعمیر یا تعویض آن اقدام نمود.

اگر کوره به هر دلیلی سرد شود و مواد به صورت نپخته به خنک کن برسند، عمل خنک کردن سخت بوده (زیرا دانه های مواد اولیه ریز تر هستند) و هوای داخل کوره خاک آلود شده و ممکن است مشعل خاموش شود و عملیات درون کوره متوقف گردد. باید در این موارد به شدت بر روی مواد نظارت نمود و اگر مواد نپخته خیلی به منطقه ی پخت نزدیک شده باشند باید طول شعله را کم کرد تا منطقه پخت داغ تر شده و کوره متعادل گردد.

در صورتی که حلقه های مواد تشکیل شده در دیواره ی کوره، به صورت کلوخه هایی به درون مواد دیگر ریزش کند باعث فشار در کوره شده و مقدار زیادی از خوراک کوره به ناحیه پخت مکیده می شود که حتی تا خنک کن هم کشیده می شود و ممکن است به صفحات خنک کن آسیب رسانده و از عملکرد صحیح آن جلوگیری نماید، به طوری که کلینکر سرخ از خنک کن خارج شود. در این حالت باید مقدار سوخت و دور کوره را کم نمود و خنک کن با حداکثر هوا و با کمترین سرعت کار کند و موارد غیر عادی به شدت کنترل شود. برای جلوگیری هم باید ترکیب شیمیایی خوراک کوره را بررسی مجدد نمود. و پس از توقف عملیات حلقه ها را از دیواره ها جدا کرد.

۶- مصرف انرژی

صنعت سیمان به همراه صنعت فولاد، کاغذ و پتروشیمی از جمله صنایع پر مصرف انرژی هستند. درصد قیمت سوخت در تولید سیمان پرتلند ۲۰ تا ۳۰ درصد است. اگر قیمت انرژی کاهش یابد، قیمت تولید کاهش یافته، که نتیجه ی آن افزایش سود کارخانه می باشد.

این صنعت همچنین به خاطر سهم بالای انرژی در هزینه ی کلی تولید نیز مورد توجه است. (درصد بالایی از قیمت کلی یک تن سیمان مربوط به مصرف انرژی آن است). در صنعت سیمان، مقدار محسوسی انرژی را می توان با جلوگیری از خروج انرژی از کوره ها، اصلاح و تعدیل وسایل در جهت بازیافت گرما در پروسه ی تولید، صرفه جویی کرد. (اصلاح و تعدیل وسایل را می توان بواسطه ی اضافه کردن بخش های پیش گرم و یا خنک کننده در تولید سیمان انجام داد).

۷- پیشنهادات:

پیشنهاد می شود بررسی بر روی کاهش مصرف سوخت های فسیلی و هزینه های ناشی از آن در دستور کار قرار گیرد. همچنین روش های استفاده از زباله به عنوان سوخت کوره مورد تحقیق بیشتری باشد تا بتوان علاوه بر کاهش هزینه های عملیاتی، به کاهش زباله و امحای آن در ایران کمک نمود. همچنین به نظر می رسد سرمایه گذاری در بخش سیمان پوزولانی به کاهش هزینه های تمام شده ی سیمان کمک شایانی می کند و بهتر است به آن توجه بیشتری شود.

مراجع

- [1] Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., 2009. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *J. Clean. Prod.* 17, 668–675.
- [2] Van Oss, H.G., Padovani, A.C., 2002. Cement manufacture and the environment, part 1: chemistry and technology. *J. Ind. Ecol.* 6, 89–105.
- [3] Van Oss, H.G., Padovani, A.C., 2003. Cement manufacture and the environment, part II: environmental challenges and opportunities. *J. Ind. Ecol.* 7, 93–127.
- [4] AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, 1995
- [5] M Pisaroni¹, R Sadi² and D Lahaye¹, Counteracting ring formation in rotary kilns, *Journal of Mathematics in Industry* 2012, 2:3
- [6] Goshayeshi, H.R. and Poor, F.K. (2016) Modeling of Rotary Kiln in Cement Industry. *Energy and Power Engineering*, 8, 23-33. <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2016.81003>
- [7] N.C. Markatos, Mathematical modelling of single and two-phase flow problems in the process industries, *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 48 (1993) 631.
- [8] T. Avgeropoulos, J.P. Glekas, C. Papadopoulos, Numerical simulation of the combustion aerodynamics inside a rotary cement kiln, in: Pilavachi (Ed.), *Energy Efficiency in Process Technology*, Elsevier, London, 1993, p. 767.
- [9] F.C. Lockwood, B. Shen, T. Lowes, Numerical study of petroleum coke red cement kiln flames, Presented at the Third International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisbon, 1995.
- [10] F.C. Lockwood, B. Shen, Performance predictions of pulverised-coal flames of power station furnace and cement kiln types, *Twenty-Fifth Symposium International on Combustion*, The Combustion Institute, 1994 p. 503.
- [11] E. Mastorakos, A. Massias¹, C.D. Tsakiroglou, D.A. Goussis, V.N. Burganos, A.C. Payatakes. CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. *Applied Mathematical Modelling* 23 (1999) 55±76
- [12] Mihelcic J, Eatmon T, Harris R, Muga H. Engineering sustainable construction materials for the developing world: a meta-discipline approach to engineering education. *The International Journal of Engineering Education* 2007; 23(6): 1116–25.
- [13] M Pisaroni¹, R Sadi² and D Lahaye¹, Counteracting ring formation in rotary kilns, *Journal of Mathematics in Industry* 2012, 2:3
- [15] شرکت سیمان گیلان سبز (دیلمان).