

مدل سازی کوره دوار سیمان بر اساس مدل اسپینگ به منظور بررسی تأثیر سیستم زنجیری بر بهبود انتقال حرارت

حبيب اله فاتح نوبندگان^۱، کیومرث مظاهری^{۲*}

دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس - تهران

(* نویسنده مخاطب: kiumars@modares.ac.ir)

چکیده

کوره‌های دوار سیمان به طور گسترده برای تبدیل خوراک خام به کلینکر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل سازی کوره دوار سیمان با توجه به شرایط حاکم بر آن (شامل انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشع، واکنش‌های شیمیایی بین مواد جامد و جریان گاز و چرخش کوره) دارای معادلات دینامیکی بسیار پیچیده و غیرخطی می‌باشد. در تحقیق حاضر با اعمال مدل یک‌بعدی ساده در حالت پایا مبتنی بر مدل اسپینگ رفتار فرآیندهای درون کوره دوار سیمان تحلیل شده است. تولید گونه‌هایی مانند آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ در فرآیندهای درون کوره حائز اهمیت می‌باشند. همچنین در کار حاضر نقش سیستم‌های زنجیری درون کوره دوار تر با استفاده از مدل یک‌بعدی بررسی شده است. استفاده از سیستم زنجیری باعث افزایش دمای جریان مواد درون کوره می‌شود. با افزایش دمای مواد، سرعت تبخیر آب درون مواد بستر افزایش و در نتیجه واکنش‌های دیگر زودتر رخ می‌دهند. بنابراین امکان کاهش طول کوره دوار تر و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به وجود می‌آید.

واژه‌های کلیدی: کوره دوار سیمان- مدل اسپینگ- سیستم زنجیری- مدل تجربی شعله

۱- مقدمه

کوره‌های دوار از نوع کوره‌های احتراقی می‌باشند که از آن‌ها در صنایع مختلف استفاده می‌شود. ایده اصلی ساخت و طراحی کوره‌های دوار همزمان با سیر پیشرفت بشر در به‌کارگیری مخلوط‌های مورد نیاز در ساخت و سازهای ساختمانی در ذهن بشر شکل گرفته است. با توجه به ظرفیت بالا و انتقال حرارت بالا در کوره‌های دوار، از این کوره‌ها در صنعت سیمان بسیار استفاده می‌شود. به طور کلی کوره‌های دوار سیمان^۳ با توجه به نوع مواد ورودی (درصد رطوبت درون مواد) به سه نوع کوره دوار تر^۴، کوره دوار کوتاه خشک و کوره دوار طولانی خشک^۵ دسته‌بندی می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱- الف مشاهده می‌شود کوره دوار سیمان به طور کلی شامل یک بدنه استوانه‌ای شکل بوده که تحت زاویه‌ای خاص (۳ الی ۴ درجه) نسبت به افق قرار گرفته و با سرعت چرخشی مناسب (۰.۵ الی ۲.۵ rpm) حول محور استوانه (بدنه اصلی) می‌چرخد (۱۲۰-۴۰ متر طول و ۵-۱.۵ متر قطر). مواد ورودی کوره دوار سیمان به صورت دانه دانه می‌باشند که قبل از ورود به کوره خرد و ریز می‌شوند. مواد درون کوره مانند شکل ۱- ب تحت زاویه خاص با توجه به شیب و چرخش کوره در کوره قرار می‌گیرند. با ورود مواد اولیه به کوره گازهای داغ تولید شده توسط مشعل کوره در خلاف جهت حرکت مواد درون کوره به سمت مواد سوق داده می‌شوند.

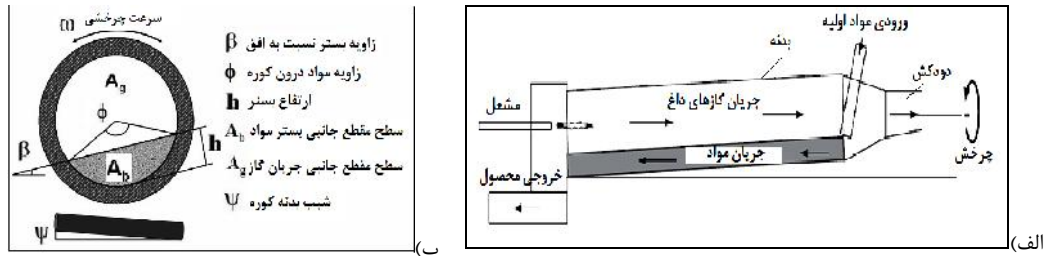
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

^۲ استاد دانشگاه تربیت مدرس

^۳ Rotary cement kiln

^۴ Wet rotary kiln

^۵ Short/Long dry rotary kiln



شکل ۱- الف) طرحواره کوره دوار سیمان و جریان‌های درون آن. ب) سطح مقطع کوره دوار سیمان

مدل‌سازی کوره دوار سیمان با توجه به شرایط حاکم بر آن (شامل انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشع، واکنش‌های شیمیایی بین مواد جامد و جریان گاز و چرخش کوره) دارای معادلات دینامیکی بسیار پیچیده و غیرخطی می‌باشد که بررسی آن را بسیار دشوار کرده است. برای درک رفتار جریان‌ها و فرآیندهای درون کوره دوار سیمان نیاز به مدل‌هایی با ساده‌سازی‌های مناسب می‌باشد که علاوه بر درک مناسب فرآیندها و واکنش‌ها، محدودیت محاسباتی ناشی از پیچیده بودن معادلات را تا حد ممکن برطرف کند. بنابراین برای طراحی و بهینه‌سازی کوره دوار سیمان، لازم است تمامی فرآیندهایی که درون کوره رخ می‌دهد شناخته شود و دید کلی نسبت به توزیع دمایی جریان‌های گاز و جامد و ترکیب مواد گاز و جامد به دست آید. برای به دست آوردن دید کلی از رفتار فرآیند درون کوره استفاده از مدل‌های یک‌بعدی مناسب می‌باشد.

بلومبرگ^۱ [1] در رساله دکترای خود اولین مدل‌سازی کوره دوار سیمان به صورت یک‌بعدی، به منظور بررسی و فرآیند درون کوره را انجام داده است. در مدل بلومبرگ کوره در راستای طول به تعداد مشخص منطقه تقسیم‌بندی می‌شود. در هر ناحیه معادلات مربوط به انرژی جریان گاز، جامد و گونه‌ها حل می‌شود. در این مدل یک دستگاه معادلات جبری غیرخطی به دست می‌آید.

اسپنگ^۲ [2] مدل جامع‌تری نسبت به مدل بلومبرگ ارائه داد که در آن معادلات انرژی برای جریان گاز، جامد و دیواره کوره و همچنین معادلات بقای جرم و گونه برای مواد کوره به کار می‌رود. در این مدل دینامیکی معادلات در حالت ناپایا برای کل میدان کوره در راستای طول نوشته می‌شوند. هدف اصلی در این کار تحلیل رفتارهای جریان گاز و مواد جامد درون کوره بوده است. در این مدل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیر خطی به دست می‌آید.

پترسون^۳ [3] در رساله دکترای خود سیستم زنجیری درون کوره‌های دوار تر را مورد بررسی قرار داد. هدف این کار بررسی اثر سیستم زنجیری درون کوره دوار تر سیمان و اثرات آن بوده است. سیستم‌های زنجیری در ۱۰ الی ۴۰ متر ابتدای کوره دوار تر به منظور بهبود انتقال حرارت از جریان گاز به مواد درون بستر کوره انجام می‌پذیرد.

ویتسل^۴ و همکاران [4] مدل توسعه‌یافته اسپنگ را ارائه دادند. در این مدل توزیع دمای دیواره داخلی و خارجی جداگانه مورد بحث قرار گرفته‌اند.

میتس^۵ و همکاران [5] فرآیند درون کوره‌های دوار تر سیمان را با و بدون وجود سیستم زنجیری بر اساس مدل منطقه‌ای بلومبرگ مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده افزایش سرعت تبخیر آب موجود در مواد ورودی نسبت به حالت بدون زنجیر می‌باشد.

در کار حاضر مدل یک‌بعدی کوره دوار سیمان در حالت پایا مبتنی بر مدل اسپنگ ارائه شده است. با توجه به مدل یک‌بعدی مناسب اسپنگ، با استفاده از فرضیات موجود حل دقیق‌تری برای معادلات ارائه شده است. در نتیجه در گام اول

¹ Blumberg

² Spang

³ Patterson

⁴ Witsel

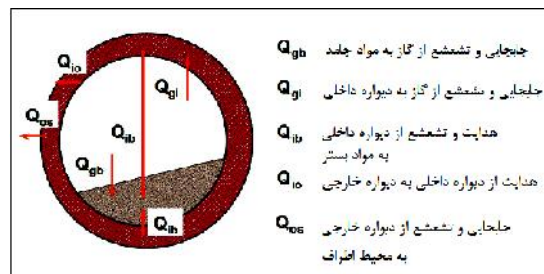
⁵ Mintus

توزیع دمای جریان‌های گاز، جامد و دیواره و مقادیر گونه‌ها درون کوره به دست آمده است. در گام بعد با اعمال تغییراتی در مدل امکان بررسی سیستم‌های زنجیری فراهم شده است و اثر آن‌ها بر توزیع دما و تولید گونه‌ها مورد بحث قرار گرفته است.

۲- فرآیندهای درون کوره دوار سیمان

۱-۲- مکانیزم‌های انتقال حرارت درون کوره

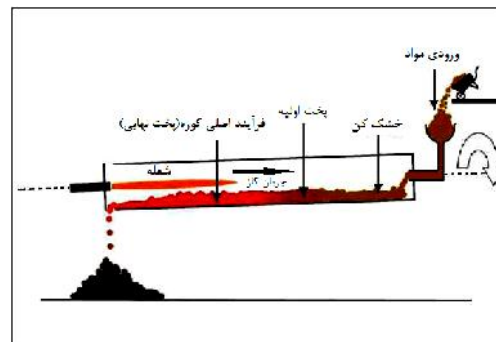
فرآیندهای انتقال حرارت درون کوره دوار سیمان به هر سه صورت هدایت، حرارت و تشعشع صورت می‌پذیرند. انتقال حرارت جابجایی از گازهای داغ به بستر مواد و جداره داخلی بدنه و از جداره خارجی بدنه به محیط بیرون؛ انتقال حرارت هدایت بین بستر مواد و جداره داخلی بدنه و بین جداره داخلی و خارجی بدنه می‌باشد. انتقال حرارت تشعشع نقش اصلی در انجام فرآیند را ایفا می‌کند. در شکل ۲ انتقال حرارت‌های درون این نوع کوره‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- مکانیزم‌های انتقال حرارت درون کوره دوار سیمان [6]

۲-۲- ترکیبات و واکنش‌های شیمیایی درون کوره

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در کوره‌های دوار سیمان سه فرآیند اصلی رخ می‌دهد؛ مرحله خشک‌کن (یا مرحله تبخیر آب و رطوبت درون مواد ورودی به کوره)، مرحله پخت اولیه (یا مرحله پیش‌گرمایش به مواد درون کوره و مرحله پخت اصلی (یا فرآیند اصلی درون کوره دوار)).



شکل ۳- شماتیک کلی مراحل فرآیند درون کوره دوار سیمان [7]

مواد ورودی به کوره دوار سیمان شامل کلسیم کربنات، CaCO_3 ، سیلیکا، SiO_2 ، اکسید آلومینیوم، Al_2O_3 ، اکسید آهن، Fe_2O_3 و آب می‌باشد. این مواد به صورت مخلوط وارد کوره می‌شوند. با اعمال حرارت به آن‌ها واکنش‌های مختلفی درون مواد بستر کوره انجام می‌گیرد. (جدول ۱)

جدول ۱- واکنش‌های درون مواد بستر کوره دوار سیمان** [5]

نام واکنش	فرمول شیمیایی واکنش	انرژی حرارتی واکنش (Kj/Kg)	محدوده دمایی (K)
تبخیر آب (گرماگیر)	$H_2O_{liq} \rightarrow H_2O_{vap}$	+2493	273-373
تجزیه $CaCO_3$ (گرماگیر)	$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$	+1780	823-1233
تشکیل C_2S (گرمازا)	$2CaO+SiO_2 \rightarrow C_2S$	-732	873-1473
تشکیل C_4AF (گرماگیر)	$4CaO+Al_2O_3+Fe_2O_3 \rightarrow C_4AF$	+25	1473-1553
تشکیل C_3A (گرماگیر)	$3CaO+Al_2O_3 \rightarrow C_3A$	+25	1473-1553
تشکیل C_3S (گرماگیر)	$C_2S+CaO \rightarrow C_3S$	+59	1473-1553
تشکیل فاز مایع	$Clinker_{sol} \rightarrow Clinker_{liq}$	+600	>1553

** در صنعت سیمان از علائم اختصار برای معرفی ترکیبات استفاده می‌شود. $CO_2=C$, $CaO=C$, $SiO_2=S$, $Al_2O_3=A$, $Fe_2O_3=F$, $CaCO_3=C$, $CO_2=C$, $C_4AF=C_4AF$, $C_3S=C_3S$, $C_2S=C_2S$, $C_3A=C_3A$ و $H_2O=H_2O$ بنابراین $C_3A=3CaO.Al_2O_3$, $C_2S=2CaO.SiO_2$, $C_3S=3CaO.SiO_2$ و $C_4AF=4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ در این تحقیق تمام مقادیر گونه‌ها نسبت به مقدار CaO نرمال‌سازی شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود گونه‌ها و واکنش‌های مهم صورت گرفته درون کوره دوار هر کدام در محدوده دمایی خاصی انجام می‌پذیرند. برخی از واکنش‌ها گرماگیر و برخی گرمازا هستند که خود باعث افزایش یا کاهش دمای جریان درون کوره می‌شوند.

در یک کوره دوار سیمان سه منطقه دمایی که بیان‌گر سه فرآیند اصلی درون کوره می‌باشند (شکل ۳)، رفتار سیستم را نشان می‌دهند: منطقه پیش‌گرمایش^۱، کلسینه شدن^۲ و منطقه حرارت‌دهی یا پخت^۳. در منطقه پیش‌گرمایش مواد تا نقطه‌ای که واکنش‌های کلسینه شدن شروع شوند حرارت داده می‌شوند که در آن آب درون مواد نیز تبخیر می‌شود. در نتیجه در ابتدا افزایش ناگهانی دما مشاهده می‌شود. در منطقه کلسینه شدن فرآیند تجزیه $CaCO_3$ به CaO شروع می‌شود که به دلیل سرعت کم واکنش تغییرات دمایی در این محدوده کم می‌باشد. منطقه حرارت‌دهی پس از پایان منطقه کلسینه شدن رخ می‌دهد که در آن واکنش‌های تشکیل مواد مذکور در جدول ۱ بر اساس محدوده دمایی رخ می‌دهند [2].

با تجزیه $CaCO_3$ ، علاوه بر تولید CaO مقدار زیادی CO_2 تولید می‌شود. تقریباً به ازای هر کیلوگرم $CaCO_3$ ، نیم کیلوگرم CO_2 تولید می‌شود [8]. این فرآیند بیش‌ترین CO_2 را در صنعت سیمان تولید می‌کند. تولید CO_2 به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تولید سیمان بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

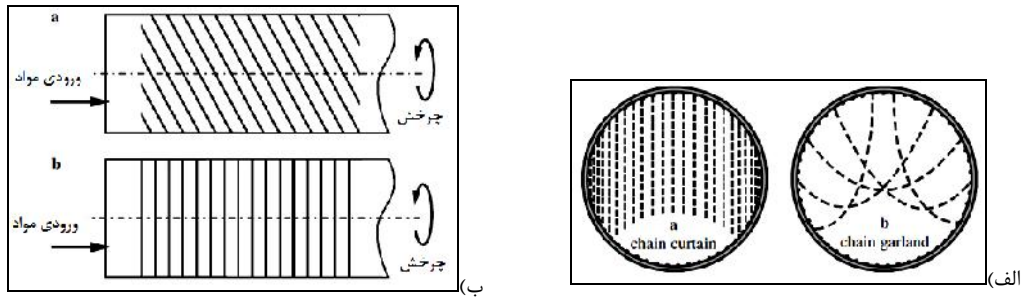
۲-۳- سیستم زنجیری درون کوره دوار سیمان تر

علیرغم اینکه امروزه کوره‌های دوار خشک جایگزین کوره‌های تر شده‌اند ولی در حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد کوره‌های سیمان در جهان از نوع تر می‌باشند. در بعضی از مناطق که مواد استخراجی برای تغذیه کوره دارای درصد رطوبت زیادی هستند، استفاده از کوره‌های دوار تر به صرفه‌تر می‌باشد. همچنین در استفاده از سوخت‌های تلفاتی و ضایعات، کوره دوار تر سیمان مناسب‌تر می‌باشد. سیستم‌های زنجیری در این نوع کوره‌ها برای بهبود انتقال حرارت به مواد و افزایش سرعت تبخیر آب درون مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اولین بار در سال ۱۹۷۲ این نوع سیستم بر روی کوره‌های سیمان مورد استفاده قرار گرفته است [3]. طبق شکل ۴- الف دو نوع قرارگیری این سیستم در کوره‌ها وجود دارد: ۱- حالت یک سر متصل (Curtain) ۲- حالت دو سر متصل (Garland) و طبق شکل ۴- ب در راستای طول کوره به دو صورت خطی یا ستونی و مارپیچ قابل اجرا هستند [3].

¹ Preheat zone

² Calcining zone

³ Burning zone



شکل ۴- الف) نحوه قرارگیری سیستم زنجیری [3]، ب) نحوه قرارگیری سیستم زنجیری در راستای طول کوره (a: ماریچ- b: ستونی) [3]

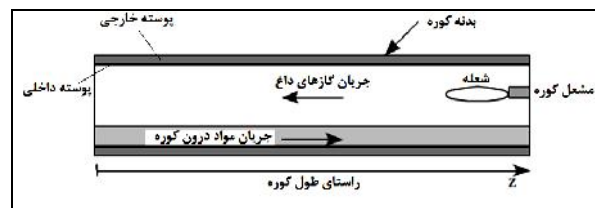
زنجیرهای نصب شده حرارت لازم را از جریان گازهای داغ به وسیله جابجایی و تشعشع دریافت می‌کنند و انرژی کسب شده را به مواد درون بستر به وسیله هدایت و جابجایی می‌دهند. این فرآیند باعث بهبود انتقال حرارت و افزایش سرعت تبخیر آب درون مواد می‌شود (آب موجود در مواد در طول کمتری نسبت به حالت بدون زنجیر تبخیر می‌شوند) [5]. بنابراین واکنش-های دیگر درون کوره زودتر شروع می‌شوند. در مرجع [5] با اِعمال سیستم زنجیری درون کوره افزایش ۱۰ الی ۲۴ درصدی بازده کوره (ذخیره انرژی) به دست آمده است.

۴-۲- چرخش

وجود چرخش در کوره دوار سیمان باعث انتقال حرارت بهتر مواد می‌شود. بدین صورت که با چرخش کوره و حرکت مواد بستر کوره در اثر آن، حرکت سطح زیرین مواد بستر و جابجایی آن، انتقال حرارت در لایه‌های مختلف لایه‌های مواد بستر یکنواخت‌تر صورت می‌گیرد. بهبود اختلاط مواد از دیگر اثرات چرخش در کوره می‌باشد. همچنین سرخت چرخشی کوره در محاسبه ارتفاع مواد بستر کوره نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتفاع مواد بستر در راستای طول کوره تغییر می‌کند و با توجه به اینکه زمان ماند مواد درون کوره به ارتفاع مواد نیز وابسته است، اهمیت چرخش بیش از پیش مشخص می‌شود. در کار حاضر به دلیل ثابت فرض کردن ارتفاع مواد بستر، اثر چرخش کوره در نظر گرفته نشده است.

۳- مدل سازی

در کار حاضر، یک مدل یک‌بعدی و پایا بر اساس مدل اسپنگ [2] که تغییرات در راستای طول را بررسی می‌کند، ارائه شده است. با توجه اینکه از مبانی مدل اسپنگ در مدل‌های سه‌بعدی انجام شده کوره دوار سیمان نیز استفاده می‌شود، این مدل در درک معادلات و رفتار جریان‌های درون کوره، به خصوص در راستای طول کوره، بسیار مناسب می‌باشد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این مدل سیستم کوره دوار سیمان به عنوان یک محفظه در نظر گرفته می‌شود. معادلات برای محفظه که کل فرآیندهای کوره در آن رخ می‌دهد نوشته می‌شوند.



شکل ۵- شماتیک مدل کوره دوار سیمان بر اساس روش اسپنگ

در این مدل با استفاده از فرضیات و ساده‌سازی‌های زیر که در مرجع [2] پیشنهاد شده اند سعی شده است تا با حداکثر ساده‌سازی معادلات و نگه داشتن معادلات دینامیکی ضروری، محدودیت محاسباتی تا حد امکان برطرف شود:

- روابط به کار رفته نمی‌تواند اثر غلظت گونه‌ها را مدنظر قرار دهد ولی مقادیر آن‌ها را در راستای طول محاسبه می‌کند
- نرخ شدت واکنش گونه‌ها با استفاده از قانون آرنیوس^۱ محاسبه می‌شود،
- گرمای ویژه، گرمای نهان و انرژی حرارتی مواد مستقل از دما و موقعیت در راستای طول کوره می‌باشند،
- ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع مستقل از دما و موقعیت درون کوره می‌باشند،
- انتقال حرارت هدایت درون مواد جامد و گاز ناچیز در نظر گرفته شده است، همچنین انتقال حرارت هدایت در راستای طول بدنه کوره نیز ناچیز در نظر گرفته شده است،
- تغییرات شعاعی و زاویه‌ای دمای دیواره (یا بدنه) ناچیز در نظر گرفته شده است،
- احتراق صورت گرفته درون محفظه کامل فرض شده است (تمام کربن‌ها به CO₂ و تمام هیدروژن‌ها به H₂O تبدیل می‌شوند)،
- سرعت و جرم جریان مواد جامد و گازی در راستای طول کوره ثابت فرض شده است و همچنین ارتفاع مواد درون بستر کوره نیز ثابت فرض شده است، بنابراین اثر چرخش در این مدل لحاظ نشده است،
- انتقال حرارت ناشی از انرژی آزاد شده از بخار آب و دی اکسید کربن به جریان گاز به صورت انتقال حرارت جابجایی در نظر گرفته شده است،
- فرآیند ذوب کلینکر جامد به مایع در انتهای کوره در مدل لحاظ نشده است،
- مدل شعله بر اساس یک مدل تجربی مبتنی بر نفوذ اکسیژن در سوخت لحاظ شده است که بر این اساس حرارت ناشی از احتراق در شعله از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [2]:

$$Q_{comb} = \frac{G_F (-\Delta H_F)}{A_g \dots v_g} \left(\frac{0.21 M_C (PM_a)^2}{\dots M_{O_2} (RT_g)^2} \right) k_F d_0 C_F \quad (1)$$

که در آن G_F ، دبی حجمی سوخت، H_F ، آنتالپی واکنش سوخت، v_g و f به ترتیب چگالی گاز و سوخت، v_g ، سرعت جریان گاز، M_C ، M_a و M_{O_2} به ترتیب جرم مولکولی CaO ، هوا و اکسیژن، T_g ، دمای جریان گاز، R ، ثابت جهانی گازها، C_F ، غلظت سوخت، k_F ، نرخ واکنش سوخت، P ، فشار و d_0 درصد اکسیژن موجود می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [2]:

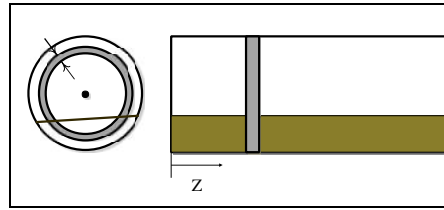
$$d_0 = 1 - \frac{k_F}{[3(0.0538T_g^{1.5}) / r_F^2] + k_F} \quad (2)$$

که در آن r_F ، متوسط شعاع مولکول‌های سوخت می‌باشد.

۳-۱- معادلات حاکم

در این مدل با استفاده از فرضیات مذکور می‌بایست معادلات بقای انرژی برای جریان گاز، جریان جامد و دیواره کوره نوشته شود. همچنین معادلات بقای جرم و گونه‌ها برای گونه‌های مهم در واکنش نوشته می‌شود. این مجموعه معادلات به هم کوپل می‌باشند. برای نوشتن معادله بقای انرژی از رابطه (۳)، که مطابق شکل ۶ انتقال حرارت در المان استوانه‌ای در سطح مقطع را با صرف‌نظر کردن از تغییرات در راستای شعاعی و زاویه‌ای نشان می‌دهد، استفاده می‌شود [2]:

¹ Arrhenius' Law



شکل ۶- المان استوانه‌ای در سطح مقطع کوره (در راستای طولی، شعاعی و زاویه‌ای)

$$kA \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + k \int_{r_1} \frac{\partial T}{\partial n} dy = C_p \dots A \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \dots vA \frac{\partial T}{\partial z} - AQ \quad (3)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی، T دما، C_p ظرفیت حرارتی ویژه، ρ چگالی، A سطح مقطع و Q حرارت خالص تولید یا مصرف شده در واحد حجم می‌باشد. ترم دوم قسمت چپ رابطه (۳) بیان‌گر انتقال حرارت در راستای عمود بر مرز کوره می‌باشد. با اعمال فرضیات در رابطه (۳) برای هر سه فاز جریان گاز، مواد جامد و دیواره روابط بقای انرژی در حالت پایا به ترتیب به صورت روابط (۴)، (۵) و (۶) نوشته می‌شوند که در آن ترم دیفیوژن با صرف نظر از هدایت در راستای طول کوره در بدنه و جریان‌های موجود از بین می‌رود:

$$A_g C_{pg} \dots v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = S_1(T_w - T_g) + S_2(T_s - T_g) + A_g Q_{comb} \quad (4)$$

$$A_s C_{ps} \dots v_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = S_2(T_g - T_s) + S_3(T_w - T_s) + A_s Q_c \quad (5)$$

$$S_1(T_g - T_w) + S_3(T_s - T_w) + S_4(T_a - T_w) = 0.0 \quad (6)$$

که در آن‌ها ($i=1,2,3,4$) به ترتیب ضرایب تجربی انتقال حرارت جابجایی و تشعشع بین گاز و دیواره، بین گاز و مواد جامد، بین مواد جامد و دیواره و بین دیواره و محیط اطراف هستند. این ضرایب تجربی تابعی از دما می‌باشند [2]. A_g و A_s به ترتیب سطح مقطع جریان مواد جامد و گاز (رابطه (۷) [2])، Q_c و Q_{comb} به ترتیب انرژی حاصل از احتراق (رابطه (۱)) و گرمای واکنش درون مواد جامد (رابطه (۸) [2])، T_g ، T_s و T_w به ترتیب دمای جریان مواد جامد، گاز و دیواره، C_{pg} ، C_{ps} به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه گاز و مواد جامد و T_a دمای محیط اطراف می‌باشد.

$$A_g = \frac{r_1^2}{2} (p - \sin p), \quad A_s = \frac{r_1^2}{2} (2f - p + \sin p) \quad (7)$$

$$Q_c = \frac{\dots}{1 + A_i + F_i + S_i} (-\Delta H_c k_c - \Delta H_s R_s - \Delta H_s k_s SC^2 - \Delta H_r k_r CS) \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸)، r_1 شعاع داخلی بدنه کوره، p زاویه قرارگیری مواد بستر، H_i آنتالپی واکنش ماده نام، k_i نرخ واکنش گونه نام، A_i ، S_i و F_i به ترتیب مقدار اولیه گونه‌های S ، A و F در ورودی کوره می‌باشند. و R_w نرخ مصرف گونه H_2O می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_s = \begin{cases} k_s \bar{S} & \bar{S} \leq 0.1 \\ k_s & \bar{S} > 0.1 \end{cases} \quad (9)$$

با استفاده از قانون آرنیوس نرخ واکنش‌ها برای گونه‌های جامد درون مواد و گونه H_2O از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_s}\right), \quad i = c, r, s, x, u, \bar{S} \quad (10)$$



که در آن A_i و E_i به ترتیب ضریب نرخ واکنش^۱ و انرژی فعال سازی^۲ گونه‌ها می‌باشد. نرخ واکنش گونه سوخت نیز از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [2]:

$$k_F = \frac{3}{r_F} A_F \exp\left(-\frac{E_F}{RT_g}\right) \quad (11)$$

که در آن A_F و E_F به ترتیب ضریب نرخ واکنش و انرژی فعال سازی گونه‌ها می‌باشد.

در این مدل روابط بقای جرم و گونه‌های جامد به صورت رابطه (۱۲) و گونه CO_2 به صورت رابطه (۱۳) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i - \sum_s \frac{\partial C_i}{\partial z}, \quad i = S, <, s, r, x, u, F, S, A \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i - \sum_g \frac{\partial C_i}{\partial z}, \quad i = E \quad (13)$$

C_i ، غلظت گونه‌های موجود و R_i ، نرخ تولید یا مصرف گونه نام می‌باشد. با توجه به اینکه معادلات در حالت پایا نوشته شده‌اند، $\partial/\partial t$ صفر می‌باشد.

با توجه به استفاده از مدل تجربی شعله طبق رابطه ۱، برای گونه سوخت در حالت پایا از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial C_F}{\partial z} = -\frac{1}{\dots_g v_g} \left(\frac{0.21 M_C (PM_a)^2}{\dots_F M_{O_2} (RT_g)^2} \right) k_F d_0 C_F \quad (14)$$

در مدل سازی حاضر برای مقادیر پارامترهای مورد نیاز و نرخ تولید یا مصرف گونه‌ها از مرجع [2] استفاده شده است.

۴- روش حل عددی و شرایط مرزی

مشخصات کوره مدل سازی شده در کار حاضر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات کوره دوار سیمان در کار حاضر [2]

کوره دوار سیمان تر با سوخت Oil	طول (متر)	قطر داخلی (m)	قطر خارجی (m)	سرعت جریان گاز (m/s)	سرعت جریان مواد جامد (m/s)	زوایه مواد درون کوره	دمای جریان گاز ورودی (K)	دمای مواد ورودی (K)	دمای محیط (K)
	۱۲۰	۱.۵	۱.۸	۳.۴۶۸۸	۰.۰۱۲۷	۳ / ۲	۹۴۴	۲۹۸	۲۹۸

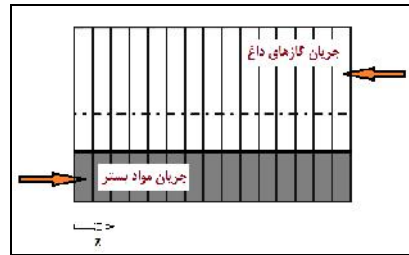
با نوشتن معادلات انرژی و بقای جرم و گونه‌ها در حالت پایا، ۱۴ معادله دیفرانسیل مرتبه اول و یک معادله جبری (برای دیواره) به دست می‌آید. با توجه به اینکه جهت حرکت جریان گاز و مواد جامد خلاف یکدیگر می‌باشد، مقادیر دمای جریان مواد جامد و گونه‌های درون آن در یک سمت و مقادیر گونه سوخت و دی‌اکسید کربن و دمای جریان گاز در طرف دیگر موجود می‌باشد. مقدار دمای دیواره نیز با توجه به مقادیر دمای گاز و مواد جامد به دست می‌آید. برای حل این دستگاه معادلات به دست آمده از روش اختلاف محدود^۳ استفاده شده است. بدین منظور مطابق شکل ۷ تمام مشتق‌ها در معادلات با توجه به جهت حرکت جریان‌های گاز و جامد و شرایط مرزی خاص در کوره (شامل معادلات دیفرانسیل مرتبه یک با شرایط مرزی در

¹ Pre-Exponential factor

² Activation energy

³ Finite difference

یک نقطه) با استفاده از تقریب مرتبه اول رو به عقب گسسته شده‌اند. اگر چه دقت نتایج به دست آمده با نتایج تجربی موجود مناسب می‌باشد، ولی مقایسه حل با تقریب‌های بالاتر می‌تواند در کارهای آینده مورد بررسی قرار گیرد.

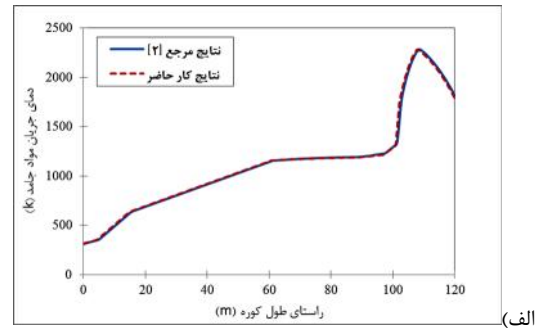
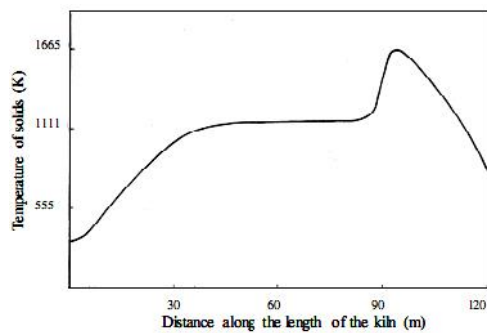


شکل ۷- طرحواره روند گسسته‌سازی معادلات با توجه به جهت حرکت جریان‌ها و مسیر حل معادلات

برای حل معادلات برنامه‌ای با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده است. برای حل از روند سعی و خطا برای به دست آوردن جواب‌ها استفاده شده است. بدین ترتیب که با استفاده از یک حدس اولیه معادلات غیرخطی را خطی کرده و حل شروع می‌شود. در هر تکرار مقادیر با استفاده از تکرار قبل تصحیح می‌شوند و تا زمانی که دقت لازم برای حل معادلات دما و گونه‌ها ارضا شود این روند ادامه می‌یابد. در کار حاضر مقدار خطا برای تمام پارامترها 10^{-4} در نظر گرفته شده است. با توجه به گسسته‌سازی مرتبه اول معادلات، برای هر معادله در راستای طول کوره یک دستگاه دوقطری به دست می‌آید. برای حل این دستگاه حل گر دستگاه دوقطری مبتنی بر روش حذفی گاوس نوشته شده است. با توجه به غیرخطی بودن معادلات (و تشکیل دستگاه معادلات سخت^۱)، حساسیت زیاد به حدس اولیه در روند حل مشاهده می‌شود، بنابراین انتخاب حدس اولیه مناسب در روند صحیح حل بسیار اثرگذار می‌باشد. با بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، تعداد سلول محاسباتی مناسب برای حل ۴۰۰ سلول، گام مکانی ۰.۳ متر، به دست آمده است.

۵- نتایج و بحث

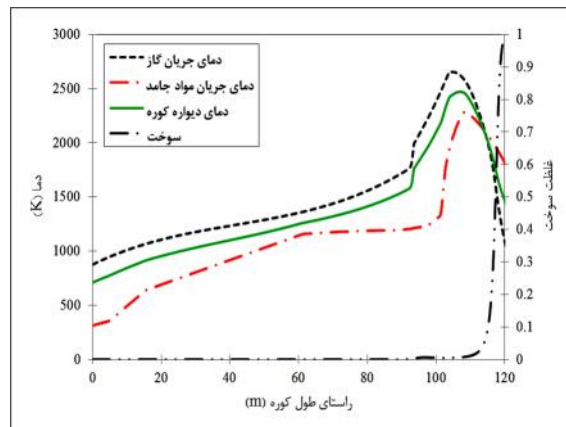
در کار حاضر در ابتدا توزیع دمای جریان مواد جامد محاسبه و صحت روند تغییرات با استفاده از روند توزیع دمای جریان مواد به دست آمده در مرجع [2]، بررسی می‌شود. سپس مقادیر پارامترهای دیگر به دست آورده می‌شوند. در گام بعد با تغییر پارامترهای مشخص تأثیر سیستم زنجیری در کوره دوار سیمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل در دسترس نبودن نتایج تجربی مناسب در شکل ۸- الف صحت‌سنجی حل با مرجع [2] انجام گرفته است. البته در مرجع [4] نتایج کیفی مناسب بر اساس اندازه‌گیری‌های موجود برای دمای جریان مواد جامد رسم شده است (شکل ۸- ب) که صحت روند حل (رفتار درست توزیع دمای جریان مواد جامد) را نشان می‌دهد.



شکل ۸- الف) مقایسه پروفیل دمای جریان مواد جامد در کار حاضر با نتایج مرجع [2] - ب) نتایج کیفی مرجع [4]

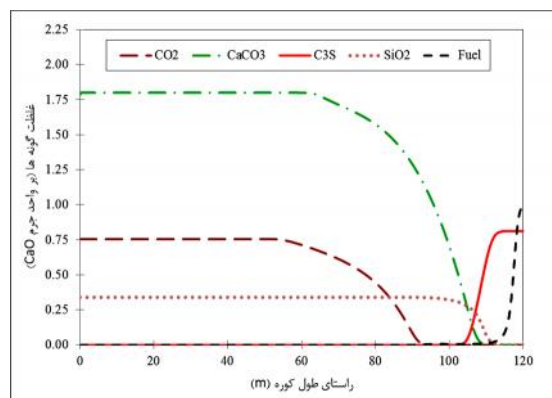
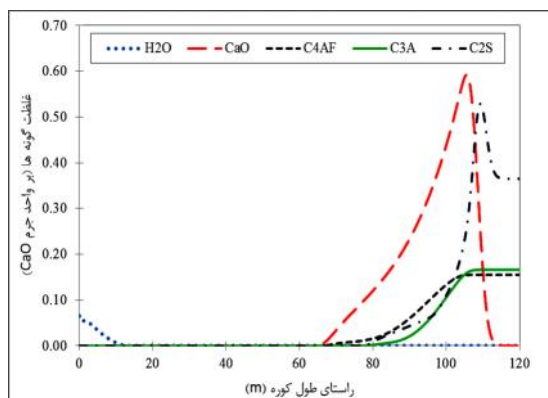
¹ Stiff equation

در شکل ۹ نمودار توزیع دمای جریان گاز، مواد جامد و دیواره و غلظت سوخت رسم شده است. همان طور که در توضیح فرآیندهای درون کوره ذکر شد، علاوه بر تغییرات دمای گاز به دلیل انتقال حرارت با دیواره و مواد بستر، انرژی تولید یا مصرف شده در واکنش‌های مواد درون بستر در روند تغییرات تأثیر می‌گذارد. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود بیشینه دمای به دست آمده در انتهای کوره به دلیل مصرف شدن تدریجی سوخت در آن محدوده و تولید انرژی در جریان گاز می‌باشد. با توجه به اینکه جریان گاز از سمت مخالف وارد کوره می‌شود، با حرکت به سمت پایین دست کوره انرژی جریان گاز به مواد جامد و دیواره منتقل می‌شود. بنابراین یک روند نزولی (از راست به چپ) برای دمای جریان گاز و روند صعودی (از چپ به راست) برای دمای مواد جامد و دیواره پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۹- توزیع دمای جریان گاز، مواد جامد و دیواره در راستای طول کوره

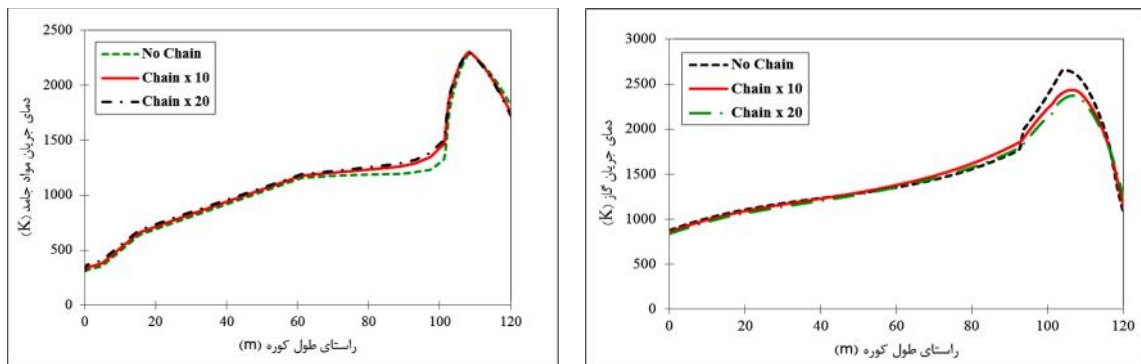
در شکل ۱۰ نمودار تولید و مصرف گونه‌های مختلف در راستای طول کوره رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود تولید یا مصرف هر گونه با توجه به محدوده دمایی مشخص واکنش مرتبط با آن رخ می‌دهد. مقدار تولید کربن دی‌اکسید با توجه به تجزیه CaCO_3 قابل توجه می‌باشد. همان طور که ذکر گردید به ازای ۱ کیلوگرم CaCO_3 ، تقریباً ۰.۵ کیلوگرم CO_2 تولید شده است.



شکل ۱۰- تولید یا مصرف گونه‌های موجود در کوره دوار سیمان

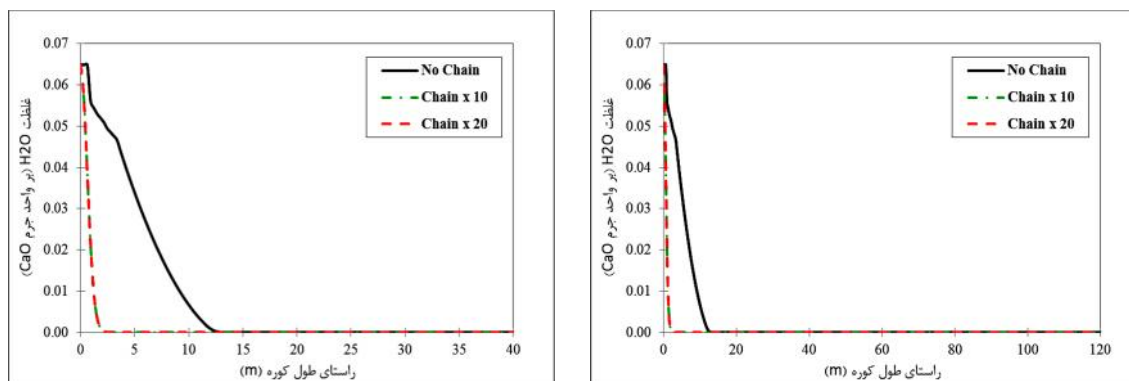
برای بررسی سیستم زنجیری، اثر معادل زنجیره‌های نصب شده با ضرب یک ثابت در ضریب انتقال حرارت تجربی بین دیواره و گاز ($C \times 1$) در مدل لحاظ می‌شود. بدین صورت که با در نظر گرفتن زنجیر به صورت لوله‌های معادل با جنس

مشخص، ضریب حرارت سیستم زنجیری محاسبه می‌شود. با وجود سیستم زنجیری، علاوه بر انتقال حرارت از جریان گاز به دیواره و مواد بستر، انتقال حرارت به زنجیرها نیز انجام می‌شود. بنابراین می‌توان اثر آن را با افزایش انتقال حرارت از گاز به دیواره لحاظ کرد. در مدل‌سازی حاضر، اثر معادل زنجیرها با افزایش ضریب انتقال حرارت تجربی بین گاز و دیواره در معادلات وارد می‌شود. با استفاده از این معادل‌سازی مقدار ثابت برای ضرب در ۱ مشخص می‌شود. در کار حاضر با در نظر گرفتن جنس مشابه با بدنه کوره برای زنجیرها، مقدار ثابت ۱۰ برای سیستم زنجیری در ۱۵ متر ابتدای کوره و مقدار ثابت ۲۰ برای سیستم زنجیری در ۲۱ متر ابتدای کوره بدست آمده است. با اعمال تغییرات در مدل نمودارهای توزیع دمای مواد جریان جامد و جریان گاز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت به حالت بدون زنجیر مقدار انرژی بیش‌تری از جریان گاز به جریان مواد جامد انتقال یافته است [5].



شکل ۱۱- نمودار توزیع دمای جریان گاز و مواد جامد با و بدون استفاده از سیستم زنجیری

تأثیر افزایش دمای جریان مواد جامد بر روی سرعت تبخیر آب موجود در مواد ورودی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. با استفاده از سیستم زنجیری در کوره نسبت به حالت بدون زنجیر، در طول کمتری از ابتدای کوره آب موجود در مواد ورودی کوره تبخیر می‌شود. بدون استفاده از سیستم زنجیری آب درون مواد در ۱۴ متری ابتدای کوره تبخیر می‌شود و لی با استفاده از سیستم زنجیری آب مواد در ۲ متری ابتدای کوره تبخیر شده است. در نتیجه واکنش‌های دیگر درون کوره سریع‌تر نسبت به حالت بدون زنجیر شروع می‌شوند. بنابراین می‌توان با استفاده از سیستم زنجیری در کوره‌های دوار تر سیمان طول این کوره‌ها را کاهش داد و مقدار قابل توجهی در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.



شکل ۱۲- نمودار روند تبخیر آب درون مواد ورودی با و بدون استفاده از سیستم زنجیری

۶- نتیجه گیری

در کار حاضر فرآیندهای درون کوره دوار سیمان با اعمال یک مدل یک‌بعدی بر اساس مدل اسپینگ بررسی گردید. بررسی رفتار فرآیندهای درون کوره با محاسبه پروفیل‌های دمای سه فاز مواد جامد، گاز و دیواره و محاسبه مقادیر گونه‌های درون مواد کوره انجام پذیرفت. همان‌طور که دیده شد مدل یک‌بعدی به خوبی رفتار جریان‌های درون کوره دوار سیمان را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی اثر سیستم‌های زنجیری بر فرآیند درون کوره دوار سیمان پرداخته شد. استفاده از سیستم زنجیری باعث افزایش دمای جریان مواد درون کوره می‌شود و با افزایش دمای مواد سرعت تبخیر آب درون مواد بستر افزایش می‌یابد. بنابراین واکنش‌های دیگر درون کوره زودتر شروع می‌شوند و امکان کاهش طول کوره دوار تر در صورت استفاده از سیستم زنجیری به دست می‌آید. با کاهش طول کوره می‌توان مقدار قابل توجهی در مصرف انرژی کوره‌های دوار سیمان صرفه‌جویی کرد.

همان‌طور که مشاهده شد می‌توان پارامترهای اثرگذار در فرآیندهای کوره دوار سیمان مانند سیستم زنجیری و حتی چرخش را با اعمال اثر معادل آن در قسمت‌های مختلف مدل یک‌بعدی بررسی کرد. همچنین با توجه به اهمیت تولید آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ در کوره دوار سیمان، می‌توان با اعمال مدل سینتیکی شعله به جای مدل تجربی ارائه شده در کار حاضر، مقادیر دقیق‌تری از تغییر گونه‌های مهم مانند CO₂، که در احتراق سوخت نیز وجود دارند، به دست آورد.

مراجع

- 1- Blumberg J. M., "Modeling and control of the cement manufacturing process," The University of Manchester- PhD thesis, 1970.
- 2- Spang H. A., "A Dynamic model of a cement kiln," Int. J. Automatica, Pergamon Press, vol.8, PP.309-323, 1972.
- 3- Patterson M. C., "Chains in wet process rotary cement kilns," Chemical Engineering Department, University of Surrey, Guildford- PhD thesis, 1980.
- 4- Withsel A.C., Renotte C., Remy M., "New dynamic model of a rotary cement kiln," Control Department, Mons, Belgium, 2001.
- 5- Mintus F., Hamel S., Krumm W., "Wet process rotary cement kilns: modeling and simulation," Int. J. Clean Techn Environ Policy, no. 8, PP. 112-122, 2006.
- 6- "Rotary kiln simulation," Website of kiln simulation (www.karripentill.com), visited at December 2012.
- 7- Paul W., "Rotary kiln: Transport phenomena and transport process," vol. 1, vancouver, British columbia, October 2007.
- 8- Worrell E., Price L., Martin N., Hendriks C., Media L.O., "Carbon dioxide emissions from the global cement industry," , Int. J. Annu. Rev. Energy Environ, no. 26, PP.3-29,2001.