



مدل‌سازی کوره دوار سیمان بر اساس مدل اسپنگ به منظور بررسی تولید CO₂ در فرآیند تولید سیمان

حبیب اله فاتح نوبندگانی^۱ و کیومرث مظاهری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۲۹

چکیده

کوره‌های دوار سیمان، به طور گسترده برای تبدیل خوراک خام به کلینکر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. 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 پیچیده و غیرخطی است. در تحقیق حاضر با اعمال یک مدل یک‌بعدی در حالت پایا مبتنی بر مدل اسپنگ، رفتار فرآیندهای درون کوره دوار سیمان تحلیل شده است. با توجه به اینکه مدل اسپنگ، بیشینه دمای درون کوره را بالا پیش‌بینی می‌کند، در کار حاضر با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق براساس آن، توزیع دمای جریان گاز درون کوره، دقیق‌تر پیش‌بینی شده است. همچنین با توجه به اینکه تولید گاز گلخانه‌ای CO₂ در فرآیندهای درون کوره (در واکنش‌های مواد بستر و واکنش‌های درون محفظه احتراق) حائز اهمیت است، در کار حاضر، مقدار تولید CO₂ از واکنش احتراق با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان برای سوخت و از واکنش مواد بستر برای سینتیک‌های ۶ و ۷ مرحله‌ای مواد بستر محاسبه و بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تقریباً نیمی از تولید CO₂ از واکنش‌های مواد بستر و نیمی دیگر، از واکنش‌های احتراقی تولید می‌شوند.

کلمات کلیدی: کوره دوار سیمان؛ مدل اسپنگ؛ مدل سینتیک؛ تولید CO₂.

The Modeling of Cement Rotary Kiln Based on Spang Model for Investigation of CO₂ Emission in Cement Production Process

H. Fateh Nobandegani¹, K. Mazaheri^{2,*}

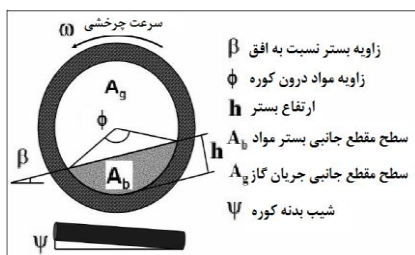
¹ MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat modares Univ., Tehran, Iran

² Prof., Mech. Eng., Tarbiat modares Univ., Tehran, Iran

Abstract

Cement rotary kilns are extensively used to change raw material into clinker. Complex phenomenon is observed in cement rotary kilns resulting from conduction, convection and radiation heat transfer, interactions between bed materials and hot gas flow and kiln rotation. Therefore, the modeling of cement rotary kiln have difficulty due to non-linear and stiff set of equations. Regards to over prediction of the maximum inner temperature of the kiln in Spang model; a one dimensional, steady state model is developed based on Spang model to investigate the operation of a cement kiln. In the present work, temperature distribution of hot gases is predicted using two-step methane kinetic to calculate the heat of combustion. Since the amount of CO₂ emission in cement kiln processes is very important, CO₂ emission generated by both bed material reactions and combustion process are calculated and compared. Modeling results showed that approximately half of CO₂ emission is in result of combustion process and other one is from bed material reactions.

Keywords: Cement Rotary Kiln; Spang Model; Kinetic Model; CO₂ Emission.



شکل ۲- سطح مقطع کوره دوار سیمان

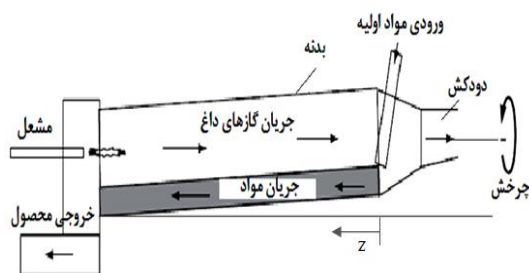
بلمبرگ^۴ [۱] در رساله دکتری خود اولین مدل‌سازی کوره دوار سیمان به صورت یک‌بعدی، به منظور بررسی و کنترل فرآیند درون کوره را انجام داده است. در مدل بلومبرگ، کوره در راستای طول به تعدادی مشخص منطقه تقسیم‌بندی می‌شود. در هر منطقه، معادلات مربوط به انرژی جریان گاز، جامد و گونه‌ها حل می‌شود. در این مدل یک دستگاه معادلات جبری غیرخطی به دست می‌آید که با حل این دستگاه، پروفیل دمایی جریان‌های گاز و بستر مواد جامد به دست می‌آید. اسپنگ^۵ [۲]، 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. در این کار پروفیل دمایی جریان گاز، بستر مواد جامد، بدنه کوره و همچنین تغییرات مقادیر گونه‌های اسپنگ، بیشینه دمای درون کوره بسیار بالا به دست آمده است که با واقعیت موجود درون کوره‌های سیمان تطابق خوبی ندارد. جورج^۶ و همکاران [۳]، انتقال حرارت از شعله درون کوره را با ارائه مدلی برای شعله که به نوع سوخت، دمای هوای ثانویه، مقدار هوای اضافی و دبی جریان سوخت بستگی دارد بررسی کرده‌اند. هدف اصلی در این کار، تصحیح پروفیل جریان گاز در راستای طول کوره بوده است که بیشینه دمای درون کوره را درست پیش‌بینی می‌کند. بوئنتنگ^۷ و همکاران [۴]، مدل ترکیبی ۱ بعدی و ۲ بعدی به

۱- مقدمه

با توجه به ظرفیت و انتقال حرارت بالا در کوره‌های دوار، از این کوره‌ها در صنعت سیمان بسیار استفاده می‌شود. به طور کلی، کوره‌های دوار سیمان^۱ با توجه به نوع مواد ورودی (و درصد رطوبت درون مواد) به سه نوع کوره دوار تر^۲، کوره دوار کوتاه خشک و کوره دوار طولانی خشک^۳ دسته‌بندی می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۱، مشاهده می‌شود کوره دوار سیمان به طور کلی شامل، بدنه استوانه‌ای شکل بوده که تحت زاویه‌ای خاص (۳ الی ۴ درجه) نسبت به افق قرار گرفته، با سرعت چرخشی مناسب (۰.۵ الی ۲.۵ دور بر دقیقه) حول محور استوانه (بدنه اصلی) می‌چرخد (۱۲۰-۴۰ متر طول و ۵-۱.۵ متر قطر). مواد ورودی کوره دوار سیمان، به صورت دانه‌ای هستند که قبل از ورود به کوره خرد و ریز می‌شوند.

در شکل ۲، سطح مقطعی از کوره دوار سیمان با مواد درون آن نشان داده شده است. مواد درون کوره تحت زاویه خاص با توجه به شیب و سرعت چرخشی در کوره قرار می‌گیرند. با ورود مواد اولیه به کوره، گازهای داغ تولید شده توسط مشعل کوره در خلاف جهت حرکت مواد درون کوره جریان می‌یابند.



شکل ۱- طرحواره کوره دوار سیمان و جریان‌های درون آن

⁴ Blumberg

⁵ Spang

⁶ Gorog

⁷ Boateng

¹ Rotary cement kiln

² Wet rotary kiln

³ Short/Long dry rotary kiln

CCM+ انجام شد. نتایج، نشان دادند که تشکیل رسوب مواد بستر به دلیل تولید کلینکر مذاب در منطقه‌ای که بیشینه حرارت تشعشعی از شعله به مواد بستر انتقال می‌یابد، رخ می‌دهد. تمرکز کارهای انجام شده در سال‌های اخیر بیشتر، بررسی کاهش و کنترل آلاینده‌ها و گاز گلخانه‌ای CO₂ در فرآیند تولید سیمان بوده است [۹].

در کار حاضر، مدل یک‌بعدی کوره دوار سیمان در حالت پایا مبتنی بر مدل اسپینگ ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل تجربی اسپینگ برای انرژی احتراق بیشینه دمای درون کوره را درست پیش‌بینی نمی‌کند، در کار حاضر، ارائه مدل مناسب‌تری برای محاسبه انرژی احتراق مدنظر است؛ در نتیجه توزیع دمای جریان‌های گاز، جامد و دیواره و مقادیر گونه‌ها درون کوره نیز به دست می‌آید. تولید گاز گلخانه‌ای CO₂ در فرآیندهای درون کوره دوار سیمان (در واکنش‌های مواد بستر و واکنش‌های درون محفظه احتراق)، حائز اهمیت است. با توجه به اینکه در مدل اسپینگ مقدار تولید CO₂ فقط از واکنش مواد بستر قابل محاسبه است، در کار حاضر با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان، مقدار تولید CO₂ از واکنش احتراق نیز در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین مقدار تولید CO₂ از واکنش احتراق و همچنین از مواد بستر برای دو سینتیک ۶ و ۷ مرحله‌ای مواد بستر محاسبه می‌شود.

۲- فرآیندهای درون کوره دوار سیمان

۲-۱- مکانیزم‌های انتقال حرارت درون کوره

فرآیندهای انتقال حرارت درون کوره دوار سیمان به هر سه صورت هدایتی، جابجایی و تشعشعی 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 هدایتی بین بستر مواد و جداره داخلی بدنه و بین جداره داخلی و خارجی بدنه است. انتقال حرارت تشعشعی، نقش اصلی در انجام فرآیند را ایفا می‌کند که از جریان گاز و بدنه به بستر مواد صورت می‌گیرد. شکل ۳، انتقال حرارت‌های درون کوره دوار سیمان نشان می‌دهد.

ترتیب، برای جریان گازهای داغ و مواد بستر کوره دوار سیمان ارائه دادند. در این کار، مدلی جامع برای انتقال حرارت مواد بستر نیز ارائه شده است. در این مدل، اندرکنش حرارتی بین دو فاز جریان گاز و مواد جامد و پیش‌بینی توزیع دمای درون کوره بررسی شده‌اند. در این کار، توزیع دمای بستر مواد درون کوره و توزیع دمای مواد نسوز به کار رفته در بدنه کوره به دست آمده‌اند. ویتسل^۱ و همکاران [۵]، مدل توسعه‌یافته اسپینگ را ارائه دادند. در این مدل، توزیع دمای دیواره داخلی و خارجی جداگانه مورد بحث قرار گرفته‌اند؛ در نتیجه امکان بررسی دمای دیواره خارجی کوره نسبت به مدل اسپینگ و محاسبه انتقال حرارت از دیواره خارجی به محیط در این کار فراهم آمده است. مینتس^۲ و همکاران [۶]، فرآیند درون کوره‌های دوار تر سیمان را با و بدون وجود سیستم زنجیری بر اساس مدل منطقه‌ای بلومبرگ، مورد بررسی قرار دادند. سیستم زنجیری، تعدادی زنجیر است که در ۲۰ الی ۳۰ متر ابتدای کوره‌های دوار تر قرار می‌گیرند و سبب بهبود انتقال حرارت از جریان گازهای داغ به مواد بستر می‌شوند. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده افزایش سرعت تبخیر آب موجود در مواد ورودی نسبت به حالت بدون زنجیر است. ماجومدار^۳ و همکاران [۷]، مدل یک‌بعدی ترمودینامیکی کوره دوار سیمان با اعمال مدل ارتفاع بستر برای بررسی فرآیندهای شکل‌گرفته در مواد بستر کوره ارائه دادند. در این مدل، ارتفاع مواد بستر در راستای طول کوره تابعی از چرخش، زاویه مواد بستر، شیب کوره و شعاع بدنه کوره در مقاطع مختلف است؛ همچنین در این کار، تأثیر چرخش بر اتلاف انرژی کوره سیمان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد بهتر کوره در سرعت دوران کمتر (۱ الی ۱/۵ rpm) و افزایش نرخ مواد ورودی کوره رخ می‌دهد. از آخرین کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی کوره دوار سیمان، کار گروه تحقیقاتی پیزارونی^۴ و همکاران است [۸]. در این کار، مدل‌سازی احتراق و انتقال حرارت در جریان گاز و دیواره و همچنین تحلیل حرارتی و هیدرودینامیکی مواد دانه‌ای بستر به صورت سه‌بعدی توسط نرم‌افزار STAR-

¹ Witsel

² Mintus

³ Mujumdar

⁴ Pizaroni

جدول ۱- واکنش‌های درون مواد بستر کوره دوار سیمان** [۶]

نام واکنش	فرمول شیمیایی واکنش	انرژی حرارتی واکنش (kJ/kg)	محدوده دمایی (K)
۱ تبخیر آب (گرماگیر)	$H_2O_{liq} \rightarrow H_2O_{vap}$	+2493	273-373
۲ تجزیه $CaCO_3$ (گرماگیر)	$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$	+1780	823-1233
۳ تجزیه $MgCO_3$ (گرماگیر)	$MgCO_3 \rightarrow MgO+CO_2$	+1395	823-1233
۴ تشکیل C_2S (گرمازا)	$2CaO+SiO_2 \rightarrow C_2S$	-732	873-1473
۵ تشکیل C_4AF (گرماگیر)	$4CaO+Al_2O_3+Fe_2O_3 \rightarrow C_4AF$	+25	1473-1553
۶ تشکیل C_3A (گرماگیر)	$3CaO+Al_2O_3 \rightarrow C_3A$	+25	1473-1553
۷ تشکیل C_3S (گرماگیر)	$C_2S+CaO \rightarrow C_3S$	+59	1473-1553
۸ تشکیل فاز مایع	$Clinker_{sol} \rightarrow Clinker_{liq}$	+600	>1553

** در صنعت سیمان از علائم اختصار برای معرفی ترکیبات استفاده می‌شود. $CaO = C$, $SiO_2 = S$, $Al_2O_3 = A$, $Fe_2O_3 = F$, $CaCO_3 = \zeta$, $CO_2 = \psi$, $C_2S = 2CaO.SiO_2$, $C_3A = 3CaO.Al_2O_3$, $H_2O = \omega$ و $MgO = M$. $MgCO_3 = G$, $C_3A = \gamma$, $C_2S = \alpha$, $C_3S = \beta$, $C_4AF = \delta$, $C_2S = 2CaO.SiO_2$, $C_3S = 3CaO.SiO_2$ و $C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ در کار حاضر مقادیر تمام گونه‌ها بر واحد جرم CaO محاسبه شده‌اند.

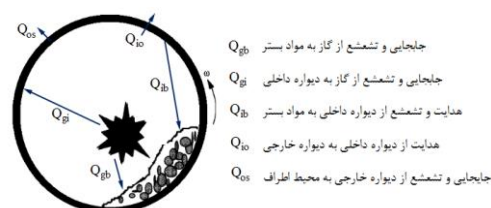
مواد تا محدوده‌ای که واکنش کلسینه شدن (فرآیند تجزیه $CaCO_3$ به CaO) شروع شوند، حرارت داده می‌شوند که در آن آب درون مواد بستر نیز تبخیر می‌شود. منطقه حرارت-دهی، پس از پایان منطقه کلسینه شدن رخ می‌دهد که در آن واکنش‌های تشکیل مواد مذکور در جدول ۱ بر اساس محدوده دمایی رخ می‌دهند [۲].

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 سبب افزایش یا کاهش دمای جریان مواد درون کوره می‌شوند. با توجه به نوع مواد ورودی کوره سیمان، می‌توان سینتیک ۶ یا ۷ مرحله‌ای برای مواد بستر کوره در نظر گرفت. سینتیک ۶ مرحله‌ای بدون در نظر گرفتن واکنش تجزیه $MgCO_3$ و سینتیک ۷ مرحله‌ای با در نظر گرفتن واکنش تجزیه $MgCO_3$ لحاظ می‌شود.

۲-۳- تولید گونه CO_2 در کوره دوار سیمان

گونه CO_2 در کوره‌های دوار سیمان در دو فرآیند تولید می‌شود [۱۲]:

در فرآیند اول، تولید CO_2 در فرآیند تجزیه $CaCO_3$ رخ می‌دهد که در آن طبق واکنش زیر به ازای هر کیلوگرم $CaCO_3$ نیم کیلوگرم CO_2 تولید می‌شود و تقریباً نیمی از تولید CO_2



شکل ۳- مکانیزم‌های انتقال حرارت درون کوره دوار سیمان [۱۰]

۲-۲- ترکیبات و واکنش‌های شیمیایی درون کوره

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 است. این مواد به صورت مخلوط وارد کوره می‌شوند. با گرم کردن آن‌ها، واکنش‌های مختلفی درون مواد بستر کوره انجام می‌گیرد که در جدول ۱ آمده است.

در یک کوره دوار سیمان، سه منطقه دمایی که بیان‌گر فرآیندهای اصلی درون کوره هستند، رفتار سیستم را نشان می‌دهند: منطقه پیش‌گرمایش^۱، منطقه کلسینه شدن^۲ و منطقه حرارت‌دهی یا پخت^۳ [۱۱]. در منطقه پیش‌گرمایش،

^۱ Preheat zone

^۲ Calcining zone

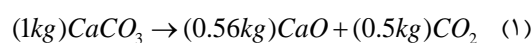
^۳ Burning zone

در این مدل با استفاده از فرضیات و ساده‌سازی‌هایی که در مرجع [۲] پیشنهاد شده‌اند، سعی شده است تا با حداکثر ساده‌سازی معادلات و نگه داشتن معادلات دینامیکی ضروری، محدودیت محاسباتی تا حد امکان برطرف شود. از دیفیوژن مولکولی بین گونه‌های مواد بستر صرف‌نظر می‌شود، 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 هستند، ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع مستقل از دما و موقعیت درون کوره می‌باشند، انتقال حرارت هدایتی درون مواد جامد و گاز ناچیز در نظر گرفته می‌شود، همچنین انتقال حرارت هدایتی در راستای طول بدنه کوره نیز، ناچیز در نظر گرفته می‌شود، تغییرات شعاعی و زاویه‌ای دمای دیواره (یا بدنه)، ناچیز در نظر گرفته می‌شود، احتراق درون محفظه کامل فرض می‌شود، سرعت و جرم جریان مواد جامد و گازی در راستای طول کوره ثابت فرض می‌شود، همچنین ارتفاع مواد درون بستر کوره نیز، ثابت فرض می‌شود، بنابراین اثر چرخش در این مدل لحاظ نمی‌شود، 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 می‌شود و فرآیند ذوب کلینکر جامد به مایع در انتهای کوره در مدل لحاظ نمی‌شود.

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 مواد بستر و محفظه احتراق نوشته می‌شود. این مجموعه معادلات به هم کوپل می‌باشند. مطابق شکل ۵، برای المان استوانه‌ای در کوره، با صرف‌نظر کردن از تغییرات در راستای شعاعی و زاویه‌ای، معادله بقای انرژی طبق رابطه (۲) نوشته می‌شود [۲]:

در صنعت سیمان را در بر می‌گیرد.



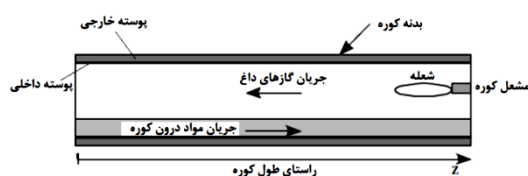
در فرآیند دوم، CO₂ در فرآیند واکنش احتراق سوخت تولید می‌شود که مقدار آن با توجه به نوع سوخت مصرفی متفاوت است. این حالت نیز، تقریباً نیم دیگری از تولید CO₂ در فرآیند تولید سیمان را در بر می‌گیرد. مجموعه فرآیندهای مذکور در کوره دوار سیمان بیش‌ترین CO₂ را در مقایسه با صنایع دیگر تولید می‌کند. از همین رو تولید CO₂، به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای، در فرآیند تولید سیمان بسیار حائز اهمیت است.

۲-۴- دوران کوره

وجود چرخش در کوره دوار سیمان، سبب 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 مواد بستر یکنواخت‌تر صورت می‌گیرد. بهبود اختلاط مواد از اثرات دیگر چرخش در کوره است؛ همچنین سرعت دورانی کوره در محاسبه ارتفاع مواد بستر کوره نیز، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. 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 بدنه کوره در نظر گرفته نشده است.

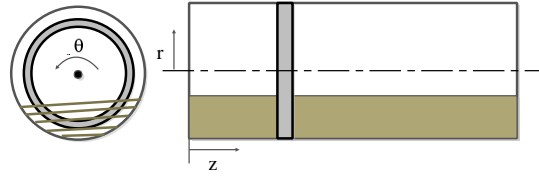
۳- مدل‌سازی

در کار حاضر، مدل یک‌بعدی و پایا براساس مدل اسپینگ [۲] ارائه شده که تغییرات در راستای طول را بررسی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در این مدل سیستم کوره دوار سیمان به عنوان یک حجم معیار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴- طرحواره مدل کوره دوار سیمان بر اساس روش اسپینگ

¹ Arrhenius' Law



شکل ۵- المان استوانه‌ای در سطح مقطع کوره

در رابطه (۶) شعاع داخلی بدنه کوره و Φ ، زاویه قرارگیری مواد بستر (معیاری از پر شدن کوره توسط مواد بستر) است.

در مدل اسپنگ برای محاسبه مقدار انرژی حاصل از احتراق، از رابطه تجربی (۷) مبتنی بر نفوذ اکسیژن در سوخت که توسط اسپنگ ارائه شده است، استفاده می‌شود [۲]:

$$Q_{comb} = \frac{G_F(-\Delta H_F)}{A_g \rho_g v_g} \left(\frac{0.21 M_C (PM_a)^2}{\rho_F M_{O_2} (RT_g)^2} \right) k_F d_0 C_F \quad (7)$$

که در آن G_F ، دبی حجمی سوخت، ΔH_F آنتالپی واکنش سوخت، ρ_F ، چگالی سوخت، v_g ، سرعت جریان گاز، M_C ، M_a و M_{O_2} به ترتیب، جرم مولکولی CaO ، هوا و اکسیژن، R ، ثابت جهانی گازها، C_F غلظت سوخت، k_F ، نرخ واکنش سوخت (رابطه (۸))، P ، فشار و d_0 درصد اکسیژن موجود است که از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲]:

$$k_F = \frac{3}{r_F} A_F \exp\left(-\frac{E_F}{RT_g}\right) \quad (8)$$

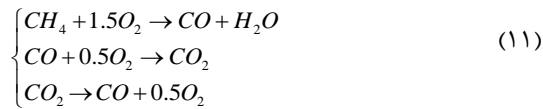
$$d_0 = 1 - \frac{k_F}{[3(0.0538 T_g^{1.5}) / r_F^2] + k_F} \quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹) r_F ، متوسط شعاع مولکول‌های سوخت، A_F و E_F به ترتیب، ضریب نرخ واکنش و انرژی فعال‌سازی گونه سوخت در رابطه تجربی اسپنگ برای انرژی احتراق می‌باشند.

همچنین طبق رابطه (۷) برای معادله بقای گونه سوخت در حالت پایا از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود [۲]:

$$\frac{\partial C_F}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_g v_g} \left(\frac{0.21 M_C (PM_a)^2}{\rho_F M_{O_2} (RT_g)^2} \right) k_F d_0 C_F \quad (10)$$

در کار حاضر با در نظر گرفتن سینتیک دو مرحله‌ای Westbrook-Dryer برای سوخت متان [۱۳]:



انرژی حاصل از احتراق از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$Q_{comb} = \left(-\sum_{k=1}^5 h_k \dot{\omega}_k + \frac{[N_2] h_{s,N_2}}{t} \right) \quad (12)$$

$$k = CH_4, O_2, CO, H_2O, CO_2$$

که در آن h_k ، مجموع آنتالپی محسوس و تشکیل (رابطه (۱۳)) گونه‌های موجود در سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان، t ،

زمان رسیدن کارکرد کوره به حالت پایا و $\dot{\omega}_k$ ، نرخ تولید یا

$$kA \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + k \int_{\Gamma_1} \frac{\partial T}{\partial n} d\gamma = C_p \rho A \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \rho v A \frac{\partial T}{\partial z} - A Q \quad (2)$$

در این رابطه k ، ضریب هدایت حرارتی، T ، دما، C_p ، ظرفیت حرارتی ویژه، ρ ، چگالی، A ، سطح مقطع، v ، سرعت و Q حرارت خالص تولید یا مصرف شده در واحد حجم است. ترم دوم قسمت چپ رابطه (۲)، بیان‌گر انتقال حرارت در راستای عمود بر مرز کوره در راستای طول است. با اعمال فرضیات در رابطه (۲) برای هر سه فاز جریان گاز، مواد جامد بستر و دیواره روابط بقای انرژی در حالت پایا به ترتیب به صورت روابط (۳)، (۴) و (۵) نوشته می‌شوند که در آن‌ها از هدایت حرارتی در راستای طول کوره صرف‌نظر شده است.

$$A_g C_{pg} \rho_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = \beta_1 (T_w - T_g) + \beta_2 (T_s - T_g) + A_g Q_{comb} \quad (3)$$

$$A_s C_{ps} \rho_s v_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \beta_2 (T_g - T_s) + \beta_3 (T_w - T_s) + A_s Q_c \quad (4)$$

$$\beta_1 (T_g - T_w) + \beta_3 (T_s - T_w) + \beta_4 (T_{ref} - T_w) = 0.0 \quad (5)$$

در این روابط $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ به ترتیب، ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع از گاز به دیواره، از گاز به مواد جامد بستر، از دیواره به مواد جامد بستر و از دیواره به محیط اطراف هستند. برای محاسبه این ضرایب تجربی، از روابط مرجع [۲] استفاده می‌شود. A_g و A_s به ترتیب، سطح مقطع جریان مواد جامد و گاز که از رابطه (۶) برای محاسبه آن‌ها استفاده می‌شود [۲]، Q_c و Q_{comb} به ترتیب، انرژی حاصل از احتراق و گرمای واکنش درون مواد جامد، T_w و T_g ، T_s به ترتیب، دمای جریان مواد جامد، گاز و دیواره، C_{ps} ، C_{pg} به ترتیب، ظرفیت حرارتی ویژه گاز و مواد جامد، v_s ، v_g به ترتیب، سرعت جریان گاز و جریان مواد بستر، ρ_s و ρ_g به ترتیب، چگالی گاز و مواد جامد بستر و T_{ref} ، دمای محیط اطراف است.

$$A_g = \frac{r_1^2}{2} (\phi - \sin \phi), \quad A_s = \frac{r_1^2}{2} (2\pi - \phi + \sin \phi) \quad (6)$$

جدول ۲- روابط ظرفیت گرمایی ویژه گونه‌های گازی درون محفظه احتراق [۱۵]

گونه	ظرفیت گرمایی ویژه متوسط ($\bar{C}_p(T)$)
CH_4	$-672.87 + 439.74T^{0.25} - 24.875T^{0.75} + 323.88T^{-0.5}$
O_2	$37.432 + 0.020102T^{1.5} - 178.57T^{-1.5} + 236.88T^{-2}$
CO_2	$-3.7357 + 30.529T^{0.5} - 4.1034T + 0.024198T^2$
CO	$69.145 - 0.70463T^{0.75} - 200.77T^{-0.5} - 176.76T^{-0.75}$
N_2	$39.060 - 512.79T^{-1.5} + 1072.7T^{-2} - 820.4T^{-3}$
H_2O	$143.05 - 183.54T^{0.25} + 82.751T^{0.5} - 3.6989T$

S و F در ورودی کوره می‌باشند. R_w نرخ مصرف گونه H_2O است که به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود [۲]:

$$R_w = \begin{cases} k_w \omega & \omega \leq 0.1 \\ k_w & \omega > 0.1 \end{cases} \quad (16)$$

با استفاد از قانون آرنیوس، نرخ واکنش‌ها برای گونه‌های جامد درون مواد بستر و گونه H_2O موجود در مواد جامد از رابطه (۱۷) و برای گونه‌های گازی درون محفظه احتراق، از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود:

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_s}\right), \quad i = \xi, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \omega, G, M \quad (17)$$

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_g}\right), \quad i = CH_4, O_2, CO, H_2O, \psi \quad (18)$$

که در آن‌ها A_i و E_i به ترتیب، ضریب نرخ واکنش^۱ و انرژی فعال‌سازی^۲ گونه‌ها می‌باشند.

روابط بقای جرم گونه‌های مواد بستر به صورت رابطه (۱۹) [۲] و بقای جرم گونه‌های گازی درون محفظه احتراق به صورت رابطه (۲۰) [۱۴] نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i - v_s \frac{\partial C_i}{\partial z}, \quad i = \omega, \xi, \beta, \alpha, \gamma, \delta, F, S, A, G, M \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i - v_g \frac{\partial C_i}{\partial z}, \quad i = CH_4, O_2, CO, H_2O, \psi \quad (20)$$

که در آن‌ها C_i ، غلظت گونه‌های موجود و R_i نرخ تولید یا مصرف گونه نام است. با توجه به اینکه معادلات در حالت پایا

مصرف گونه‌های موجود در سوخت و محصولات می‌باشند. (۱۳)

$$h_k = h_{s,k} + \Delta h_{f,k}^0, \quad h_{s,k} = \int_{T_{ref}}^T \bar{C}_p(T) dT$$

در رابطه (۱۲) $C_p(T)$ ظرفیت گرمایی ویژه متوسط است که برای محاسبه آن‌ها از روابط موجود در جدول ۲ استفاده می‌شود. در روابط جدول ۲، دما به صورت $(T(Kelvin)/100)$ تعریف می‌شود.

به دلیل عدم وجود نیتروژن در سینتیک دو مرحله‌ای مذکور، تغییرات غلظت گونه نیتروژن در معادلات بقای گونه ظاهر نمی‌شود؛ در حالی که در واقعیت، سهم زیادی از انرژی احتراق توسط گاز نیتروژن انتقال می‌یابد، بنابراین برای در نظر گرفتن سهم انرژی انتقالی توسط نیتروژن مطابق رابطه (۱۲) در معادله انرژی احتراق برای محاسبه حرارت ناشی از واکنش احتراق گونه N_2 لحاظ شده است؛ بدین معنی که گونه نیتروژن به عنوان یک قید برای محاسبه حرارت احتراق وارد معادله انرژی حاصل از احتراق می‌شود که غلظت آن در روند حل تغییر نمی‌کند.

برای محاسبه گرمای واکنش درون مواد جامد، برای سینتیک ۶ مرحله‌ای از رابطه (۱۴) [۲] و برای سینتیک ۷ مرحله‌ای از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$Q_c = \frac{\rho_s}{1 + A_i + F_i + S_i} (-\Delta H_{\xi} k_{\xi} \xi - \Delta H_{\omega} R_{\omega} - \Delta H_{\beta} k_{\beta} S C^2 - \Delta H_{\alpha} k_{\alpha} C \beta) \quad (14)$$

$$Q_c = \frac{\rho_s}{1 + A_i + F_i + S_i} (-\Delta H_{\xi} k_{\xi} \xi - \Delta H_{\omega} R_{\omega} - \Delta H_{\beta} k_{\beta} S C^2 - \Delta H_{\alpha} k_{\alpha} C \beta - \Delta H_G k_G G) \quad (15)$$

که در این روابط، ΔH_i آنتالپی تشکیل ماده نام، k_i ، نرخ واکنش گونه نام، A_i ، S_i و F_i به ترتیب، مقدار اولیه گونه‌های

¹ Pre-Exponential factor

² Activation energy

نوشته شده‌اند، $\partial / \partial t$ صفر می‌شود. در معادلات بقای گونه ها از نفوذ مولکولی صرف نظر شده است.

جدول ۳- مشخصات کوره دوار سیمان تر با سوخت گاز طبیعی در کار حاضر [۲]

طول (متر)	قطر داخلی (m)	قطر خارجی (m)	سرعت جریان گاز (m/s)	سرعت جریان مواد جامد (m/s)	زویه مواد درون کوره (ϕ)	دمای جریان گاز ورودی (K)	دمای مواد ورودی (K)	دمای محیط (K)
۱۲۰	۱.۵	۱.۸	۳.۳۶۸۸	۰.۰۱۲۷	$3\pi/2$	۹۴۴	۲۹۸	۲۹۸

معادلات با توجه به جهت حرکت جریان‌ها

برای حل معادلات برنامه‌ای با استفاده از زبان برنامه نویسی فرتن تهیه شده است که در آن از روند سعی و خطا برای به دست آوردن جواب‌ها استفاده شده است. در کار حاضر، معیار همگرایی 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 دو قطری به دست می‌آید. برای حل این دستگاه، حل گر دستگاه دو قطری مبتنی بر روش حذفی گاوس نوشته شده است. با توجه به غیرخطی بودن معادلات (سخت^۲ بودن دستگاه معادلات)، حساسیت زیاد به حدس اولیه در روند حل مشاهده می‌شود؛ بنابراین انتخاب حدس اولیه مناسب در روند صحیح حل بسیار اثرگذار است. با بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، تعداد سلول محاسباتی مناسب برای حل در تمام حالت‌ها ۴۰۰ سلول، به دست آمده است.

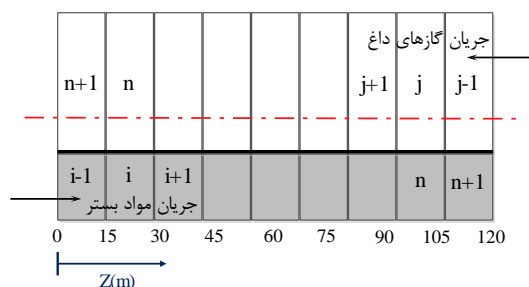
۵- نتایج و بحث

در کار حاضر، در ابتدا توزیع دمای جریان مواد جامد محاسبه و صحت حل با مقایسه توزیع دمای جریان مواد جامد کوره مورد نظر با نتایج مرجع [۲]، بررسی شده است. در شکل ۷- الف، نتایج به دست آمده برای دمای جریان مواد جامد در مدل اسپنگ با نتایج تجربی مرجع [۲] مقایسه شده است. میانگین خطای نسبی نتایج نسبت به نتایج تجربی، تقریباً ۴ درصد است. بیشترین مقدار خطا در محدوده ۸۰ الی ۱۰۰ متر طول کوره، در حدود ۲۳ درصد، مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در این محدوده تغییرات دما به دلیل رخ دادن

۴- روش حل عددی و شرایط مرزی

مشخصات کوره مدل‌سازی شده در کار حاضر، در جدول ۳ نشان داده شده است.

با نوشتن معادلات انرژی و بقای جرم کلی و بقای جرم گونه‌ها در حالت پایا، یک دستگاه معادله دیفرانسیل مرتبه اول و یک معادله جبری به دست می‌آید. با توجه به اینکه جهت حرکت جریان گاز و مواد جامد خلاف یکدیگر می‌باشند، مقادیر دمای جریان مواد جامد و گونه‌های درون آن در یک سمت و مقادیر گونه‌های موجود در سوخت و دی-اکسید کربن و دمای جریان گاز در طرف دیگر در دسترس است. 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^۱ استفاده شده است. بدین منظور، مطابق شکل ۶ 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 یک نقطه) با استفاده از تقریب مرتبه اول رو به عقب گسسته شده‌اند.

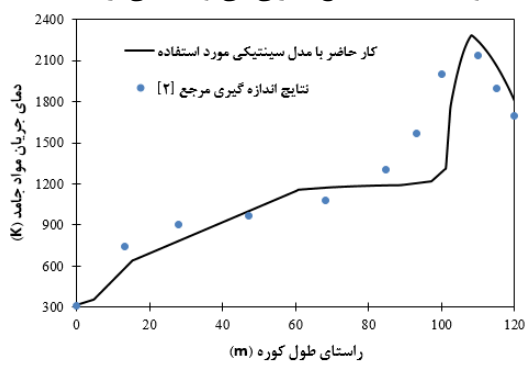


شکل ۶- طرحواره مسیر حل معادلات و روند گسسته‌سازی

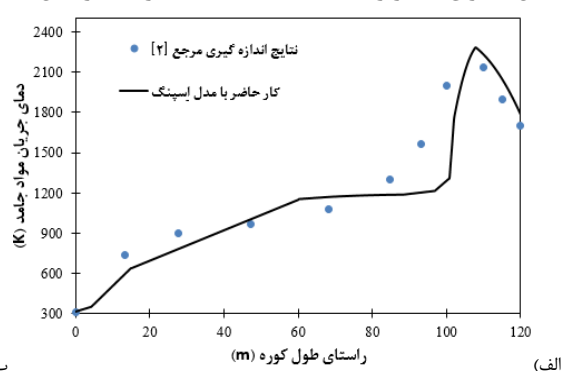
² Stiff equations

¹ Finite difference

محدوده نسبت به نتایج تجربی می‌تواند ناشی از خطای عددی



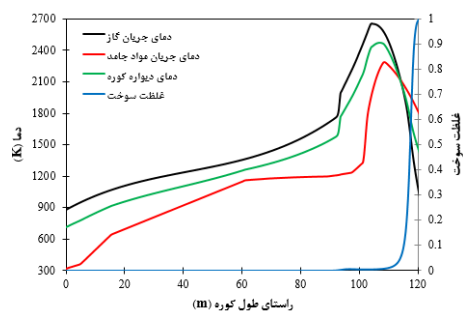
واکنش احتراق بسیار زیاد است، اختلاف دمایی زیاد در این



شکل ۷- الف) مقایسه دمایی مواد بستر با نتایج اندازه‌گیری مرجع [۲] برای مدل اسپینگ (محاسبه انرژی احتراق طبق رابطه تجربی اسپینگ) به منظور راستی آزمایی حل. ب) مقایسه دمایی مواد بستر با نتایج اندازه‌گیری مرجع [۲] برای مدل سینتیکی مورد استفاده (محاسبه انرژی احتراق طبق آنتالپی گونه‌های موجود در واکنش احتراق) به منظور راستی آزمایی حل

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؛ ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل اسپینگ بیشینه دمایی درون کوره را تقریباً ۲۶۰۰ کلوین محاسبه می‌کند. در صورتی که بیشینه دمایی مجاز درون کوره‌های سیمان ۲۴۰۰ کلوین است [۲].

در شکل ۹، نمودار تولید و مصرف گونه‌های مختلف در راستای طول کوره در مدل اسپینگ برای سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر رسم شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، تولید یا مصرف هرگونه با توجه به محدوده دمایی مشخص واکنش مرتبط با آن، که در جدول ۱ ذکر گردید، رخ می‌دهد. مقدار تولید کربن دی‌اکسید با توجه به تجزیه CaCO_3 قابل توجه است؛ همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، به ازای ۱ کیلوگرم CaCO_3 ، تقریباً ۰.۵ کیلوگرم CO_2 تولید شده است.

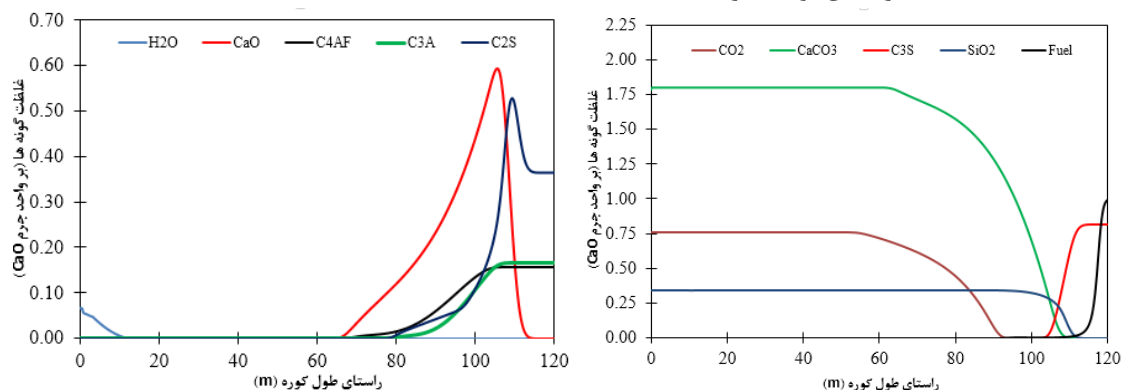


شکل ۸- توزیع دمایی جریان گاز، مواد جامد و دیواره و

در حل این دستگاه معادلات سخت و فرضیات ساده‌کننده در مدل باشد. همچنین این احتمال می‌رود که به دلیل دشواری اندازه‌گیری دمای جریان مواد بستر در کوره دوار سیمان، نتایج تجربی موجود از دقت کافی برخوردار نبوده، این اختلاف ناشی از آن باشد که متأسفانه در مرجع [۲]، اشاره‌ای به خطای اندازه‌گیری نشده است. در شکل ۷-ب نیز، نتایج به دست آمده برای دمای جریان مواد جامد با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق بر اساس آن در مدل با نتایج تجربی مقایسه شده است. متوسط خطای نسبی در حدود ۴.۱ درصد است و بیشترین اختلاف دما با نتایج تجربی نیز در محدوده ۸۰ الی ۱۰۰ متر طول کوره، خطای نسبی ۲۳ درصد، مشاهده می‌شود.

در شکل ۸، نمودار توزیع دمایی جریان گاز، مواد جامد و دیواره و مقدار سوخت با اعمال رابطه تجربی اسپینگ برای انرژی احتراق برای سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر رسم شده است. همان‌طور که در توضیح فرآیندهای درون کوره ذکر شد، علاوه بر تغییرات دمایی 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؛ همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشینه دمایی به دست آمده در انتهای کوره به دلیل مصرف شدن تدریجی سوخت در آن محدوده و تولید انرژی در جریان گاز است. با توجه به اینکه جریان گاز از سمت مخالف وارد کوره می‌شود، با حرکت به سمت پایین دست کوره انرژی جریان گاز به مواد

غلظت سوخت در راستای طول کوره در مدل اسپنگ برای سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر



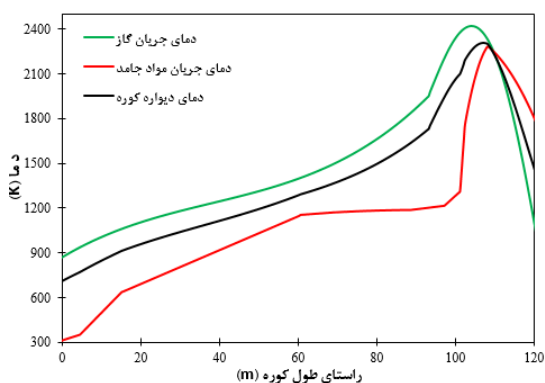
شکل ۹- تولید یا مصرف گونه‌های موجود در کوره دوار سیمان برای سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر در مدل اسپنگ

سینتیک ۶ و ۷ مرحله‌ای مواد بستر کوره در مدل اسپنگ مواد بستر رسم شده است. مشابه با مدل اسپنگ در این مدل نیز، بیشینه دمای به دست آمده در انتهای کوره به دلیل مصرف شدن تدریجی سوخت در آن محدوده و تولید انرژی در جریان گاز است؛ در این حالت، بیشینه دمای درون کوره تقریباً ۲۴۰۰ درجه کلوین به دست آمده است. در این مدل، نسبت هم‌ارزی ۱ برای مخلوط سوخت و هوای مورد استفاده در محفظه احتراق در نظر گرفته شده است.

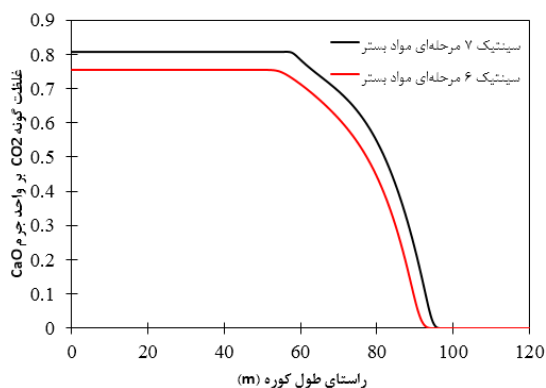
در شکل ۱۲ پروفیل دمای جریان گاز برای مدل اسپنگ و کار حاضر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، کار حاضر در مقایسه با مدل اسپنگ بیشینه

در شکل ۱۰، مقدار تولید CO_2 از واکنش مواد بستر در مدل اسپنگ برای سینتیک‌های ۶ و ۷ مرحله‌ای مواد بستر مقایسه شده است. در سینتیک ۷ مرحله‌ای مواد بستر علاوه بر تولید CO_2 در واکنش تجزیه $CaCO_3$ ، در واکنش تجزیه $MgCO_3$ نیز تولید می‌شود؛ اما با توجه به اینکه درصد وجود $MgCO_3$ نسبت به $CaCO_3$ در مواد ورودی کوره دوار سیمان ۶ به ۷۰ است [۱۶]، می‌بایست مقدار کمی بر CO_2 تولیدی نسبت به سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر افزوده شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با اعمال سینتیک ۷ مرحله‌ای مواد بستر، تقریباً ۷ درصد تولید CO_2 از واکنش مواد بستر کوره افزایش یافته است.

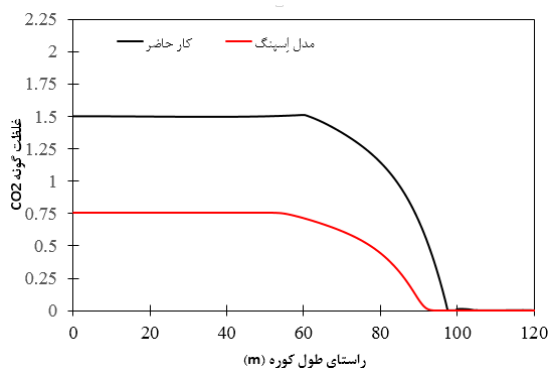
در شکل ۱۱، نمودار توزیع دمای جریان گاز، مواد جامد و دیواره با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق بر اساس آن و برای سینتیک ۶ مرحله‌ای



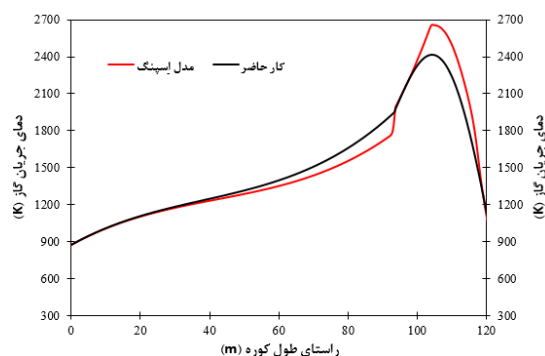
شکل ۱۱- توزیع دمای جریان گاز، مواد جامد و دیواره در راستای طول کوره با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق بر اساس آن



شکل ۱۰- مقایسه مقدار تولید CO_2 از واکنش مواد بستر در



شکل ۱۳- مقایسه مقدار تولید CO₂ در مدل اسپنگ و کار حاضر



شکل ۱۴- مقایسه پروفیل دمای جریان گاز بین دو مدل اسپنگ و کار حاضر

۶- نتیجه گیری

در کار حاضر، فرآیندهای درون کوره دوار سیمان با اعمال یک مدل یک‌بعدی براساس مدل اسپنگ 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 براساس مدل تجربی اسپنگ برای انرژی احتراق، به خوبی رفتار جریان‌های درون کوره دوار سیمان را نشان می‌دهد؛ ولی بیشینه دمای درون کوره را بالا پیش‌بینی می‌کند. با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق بر اساس آن علاوه بر تصحیح توزیع دمای درون کوره، مقدار تولید CO₂ از واکنش احتراق سوخت محاسبه گردید که در مدل اسپنگ قابل محاسبه نبود. با توجه به نتایج، تقریباً نیمی از تولید CO₂ از واکنش‌های مواد بستر کوره دوار سیمان و نیمی دیگر از واکنش‌های محفظه احتراق کوره صورت می‌گیرد. همچنین سینتیک‌های ۶ و ۷ مرحله‌ای مواد بستر به منظور بررسی تولید CO₂ از واکنش مواد بستر، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند با اعمال سینتیک ۷ مرحله‌ای مواد بستر، به دلیل اضافه شدن واکنش تجزیه MgCO₃، تقریباً ۷ درصد تولید CO₂ افزایش می‌یابد.

با توجه به اهمیت تولید CO₂ در فرآیند کوره دوار سیمان و اثر آن بر افزایش درجه حرارت کره زمین، به کارگیری روش‌هایی برای کاهش تولید CO₂، بسیار ضروری است؛ بنابراین بررسی سوخت‌های جایگزین که درصد کربن آن‌ها کمتر است، در صنعت تولید سیمان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش تولید CO₂ داشته باشد. همچنین در کار

دمای درون کوره (جریان گاز داغ) را ۲۴۰۰ کلوین پیش‌بینی می‌کند که نسبت به مدل اسپنگ این مقدار به واقعیت در کوره‌های دوار سیمان نزدیک‌تر است [۲]. با توجه به اینکه در کار حاضر با اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان، انرژی احتراق بر اساس آنتالپی گونه‌های موجود در محفظه احتراق محاسبه می‌شود، مقدار انرژی احتراق با توجه به مقادیر گونه‌ها در راستای طول کوره دقیق‌تر محاسبه می‌شود؛ در حالی که در مدل اسپنگ با استفاده از یک رابطه تجربی انرژی حاصل از احتراق به صورت تقریبی محاسبه می‌شود؛ بنابراین با توجه به تأثیر زیاد انرژی احتراق در معادله انرژی جریان گاز درون کوره، در کار حاضر توزیع دمای جریان گاز درون کوره بهبود بخشیده می‌شود.

در شکل ۱۳، مقدار تولید CO₂ در مدل اسپنگ که فقط ناشی از واکنش مواد بستر (فرآیند تجزیه CaCO₃ به CaO) است و کار حاضر (اعمال سینتیک دو مرحله‌ای کلی متان و محاسبه انرژی احتراق بر اساس آن) برای سینتیک ۶ مرحله‌ای مواد بستر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقریباً نیمی از این CO₂ از واکنش‌های مواد بستر و نیمی دیگر از واکنش احتراق سوخت کوره تولید می‌شود. از جمله راه‌های کاهش تولید CO₂ در کوره دوار سیمان، بهبود مصرف انرژی (افزایش بازده) در کوره با فراهم کردن شرایط احتراق مناسب و استفاده از سوخت‌های با کربن کمتر از جمله سوخت‌های جایگزین است [۱۷].

- [8] Pisaroni M, Sadi R, Lahaye D (2012) Counteracting ring formation in rotary kilns. Springer open Journal of Mathematical in Industry.
- [9] Mikulcic H, Vujanovic M, Fidaros DM, Priesching P, Minic I, Tatschl R, Duic N, Stefanovic G (2012) The application of CFD modeling to support the reduction of CO₂ emissions in cement industry. J Energy (45): 464-473.
- [10] www.karripentill.com (visited at December 2012) Rotary kiln simulation.
- [11] Paul W (2007) Rotary kilns: Transport phenomena and transport process. vancouver, British columbia.
- [12] Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Media LO (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Int J Annu Rev Energy Environ 26(1): 303-329.
- [13] Frassoldati A, Cuoci A, Faravelli T, Ranzi E, Candusso C, Tolazzi D (2009) Simplified kinetic schemes for oxy-fuel combustion. 1st International conference on sustainable fossil fuels for future energy, Italy.
- [14] Turns SR (2000) An introduction to combustion-concepts and application. Chap 6. 2nd edn. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [15] Sonntag RE, Brogknakke C, Van Wylene GJ (1983) Fundamental of thermodynamics. 5th edn. John Wiley & sons INC, New York.
- [16] Kaddatz KT, Rasul MG, Rahman A (2013) Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modeling. Procedia Engineering 56:413-420.
- [17] Mirza Mohammad TA (2012) Composition and phase mineral variation of portland cement in mass factory sulaimani-kurdistan region NE-Iraq. J Basic Appl Sci 12(6): 109-118.
- حاضر، ارتفاع مواد بستر کوره ثابت در نظر گرفته شده است و با توجه به ارتباط مستقیم چرخش کوره به ارتفاع مواد بستر [۴]، دوران کوره در تحلیل حاضر لحاظ نشده است؛ بنابراین با در نظر گرفتن مدل مناسب برای ارتفاع مواد درون کوره، می‌توان اثر دوران کوره در فرآیندهای درون کوره را بررسی کرد.

۶- مراجع

- [1] Blumberg JM (1970) Modeling and control of the cement manufacturing process. PhD thesis. The University of Manchester.
- [2] Spang HA (1972) A Dynamic model of a cement kiln. Int J Automatica 8(3): 309-323.
- [3] Gorog JP, Adams TN, Brimacombe JK (1983) Heat transfer from flames in a rotary kilns. Metall Trans 14(3): 411-424.
- [4] Boateng AA, Barr PV (1996) A thermal model for rotary kiln including heta transfer within the bed. Int J Heta Mass Transfer 39(10): 2131-2147
- [5] Withsel A C, Renotte C, Remy M (2001) New dynamic model of a rotary cement kiln. Control Department, Mons, Belgium.
- [6] Mintus F, Hamel S, Krumm W (2006) Wet process rotary cement kilns: modeling and simulation. Int J Clean Techn Environ Policy 8(2): 112-122.
- [7] Mujumdar KS, Ganesh KV, Kulkarni SB, Ranade VV (2007) Rotary cement kiln simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. Chem Eng Sci 62(9): 2590-2607.