

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Numerical Investigation of Burner Angle Effects on Aluminum Rotary Furnace Performance

Abstract

Aluminum rotary furnace is used to recover aluminum from scrap. Present work considers scrap melting, aluminum burn-off, non-premixed turbulent gas-phased combustion and radiation interaction in a rotating furnace, among many phenomena occurring during the furnace operation. Using CFD, a numerical model of this furnace is proposed that divides furnace into three zones. According to the distinct phenomena happening in each zone, these zones are melt zone, combustion zone and refractory lining. Only heat can be transferred through zones' interfaces and mass transfer through them is not considered in such furnace modeling. Simulating furnace performance with different burner angles revealed that although changing burner angle up to 15° results in higher aluminum melting rate, the burner angles more than 10° are not applicable because of the metallurgical limitations of refractory lining. Besides, changing the burner angle from 0° to 10° increases the furnace thermal efficiency from 65% to 74.7%.

Keywords: Aluminum Rotary Furnace, CFD, Burner Angle, Melting Rate.

بررسی عددی تاثیر زاویه مشعل بر کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم

چکیده

کوره دوار ذوب آلومینیوم برای استخراج آلومینیوم از قطعات قراضه بکار می‌رود. این فرآیند پیچیده شامل پدیده‌های متعددی است که از میان آنها، ذوب آلومینیوم، اکسایش آلومینیوم، احتراق مغشوش و غیرپیش‌آمیخته‌گازی و تشعشع در یک بدنه دوار در تحقیق حاضر لحاظ شده است. با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، یک مدل عددی برای این کوره ارائه شده که کوره را به سه ناحیه ذوب، ناحیه احتراق و لایه دیرگداز تقسیم و معادلات مربوط به پدیده‌های مختص هر ناحیه را به آن اعمال می‌کند. در این مدل، امکان انتقال حرارت بین نواحی فراهم بوده و از انتقال جرم بین نواحی صرف‌نظر شده است. پس از شبیه‌سازی کارکرد کوره با زوایای مختلف مشعل، مشخص شد اگرچه با افزایش زاویه مشعل تا 15° سرعت تهیه مذاب مرتباً افزایش می‌یابد، اما زوایای بیشتر از 10° به دلیل محدودیت‌های فیزیکی لایه دیرگداز و گرم شدن بیش از حد آن مناسب نبوده و در صورت تغییر زاویه مشعل از 0° تا 10° ، بازده حرارتی کوره از ۶۵٪ به ۷۴٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: کوره دوار ذوب آلومینیوم، دینامیک سیالات محاسباتی، زاویه مشعل، نرخ تهیه مذاب.

مقدمه

با توجه به کاربردهای گسترده آلومینیوم بعنوان ماده اولیه صنایع گوناگون، تقاضا برای این فلز به شدت در حال افزایش است. در کنار کاهش ۹۵٪ انرژی مورد نیاز در مقایسه با استخراج آلومینیوم از منابع معدنی، بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه مصرف آب مورد نیاز و تولید آلاینده‌های زیست محیطی را نیز تا حد زیادی کاهش می‌دهد (ژو، یانگ، روتر و بوین^۱، ۲۰۰۶). یک روش مناسب برای بازیافت آلومینیوم استفاده از کوره‌های دوار ذوب فلز است. علیرغم سابقه طولانی و استفاده گسترده از کوره‌های دوار ذوب فلز، تحقیقات به نسبت اندکی روی آنها انجام شده است. بعنوان تحقیقات اولیه روی کوره‌های دوار، واتکینسون و بریماکومب^۲ در سال ۱۹۷۸ انتقال حرارت در یک گرم‌کن دوار را به صورت تجربی بررسی و بیان کردند تشعشع مکانیزم غالب انتقال حرارت در این کوره است. بورجیس، بوی، چارت و کوکافه^۳ (۱۹۸۹) محفظه احتراق یک کوره گازسوز ساکن ذوب آلومینیوم را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده و جریان مغشوش گازهای درون کوره، انتقال حرارت تشعشعی و مدلی ساده شده از شعله را در نظر گرفتند، درحالی‌که از فرآیند ذوب آلومینیوم صرف‌نظر کردند. تحقیق آنها اثر نامطلوب نفوذ هوای محیط بیرون به درون کوره را نشان داد. وو و لاکرویکس^۴ در سال ۱۹۹۵ انتقال حرارت حین فرآیند ذوب آلومینیوم در یک کوره ساکن را به صورت گذرا توصیف و با صرف نظر از تشعشع، از مدل آنتالپی-تخلخل^۵ برای فرآیند ذوب استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش اختلاط ناشی از اثر انتقال حرارت جابجایی در نواحی ذوب شده، فرآیند ذوب را سرعت می‌بخشد. ژو، یانگ، روتر و بوین^۶ (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) شبیه‌سازی عددی را بر یک کوره دوار ذوب آلومینیوم اعمال کرده و احتراق مغشوش و غیرپیش‌آمیخته گازطبیعی و اکسیژن، تشعشع و فرآیند سوزش آلومینیوم^۷ را نیز در نظر گرفتند. در این تحقیق با صرف‌نظر از دوران کوره، بهبود انتقال حرارت ناشی از دوران بدنه با افزایش مصنوعی ضریب انتقال حرارت هدایتی آلومینیوم لحاظ شده بود. نتایج کار ایشان نشان داد نرخ تهیه آلومینیوم مذاب تقریباً مستقل از اندازه و شکل قطعات آلومینیوم قراضه ورودی به کوره است. کارمونا و کورتس^۸ در سال ۲۰۱۴ یک کوره بوته ای ذوب آلومینیوم قراضه را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده و با استفاده از مدل ذوب آنتالپی تخلخل، فرآیند ذوب آلومینیوم و انتقال حرارت درون این کوره را بررسی کردند.

در تحقیق حاضر با هدف بهبود شرایط کارکرد کوره‌های دوار ذوب فلز، شبیه‌سازی عددی یک کوره دوار ذوب آلومینیوم نوعی با استفاده از نرم افزار حلگر دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX 14.5 انجام شده است. مدل ارائه شده برای این کوره علاوه بر فرآیندهای احتراق، انتقال حرارت و ذوب آلومینیوم، دوران کوره و حرکت ایجاد شده در آلومینیوم مذاب را نیز لحاظ کرده است. لازم به ذکر است نرم افزار مورد استفاده فاقد مدلی برای فرآیندهای ذوب است و مدل ذوب آنتالپی-تخلخل (وولر و پراکاش^۹، ۱۹۸۷ و وولر، کراس و مارکاتوس^{۱۰}، ۱۹۸۷) توسط کاربر به آن افزوده شده است.

¹ Zhou, Yang, Reuter and Boin

² Watkinson and Brimacombe

³ Bourgeois, Bui, Charette and Kocaeffe

⁴ Wu and Lacroix

⁵ Enthalpy-Porosity

⁶ Zhou, Yang, Reuter and Boin

⁷ Aluminum Burn-Off

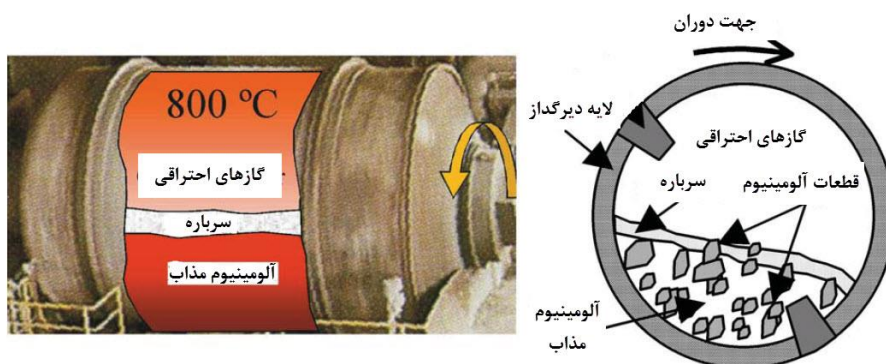
⁸ Carmona and Cortes

⁹ Voller and Prakash

¹⁰ Voller, Cross and Markatos

معرفی کوره دوار ذوب آلومینیوم

کوره دوار ذوب آلومینیوم تشکیل شده است از یک بدنه استوانه ای با پوسته خارجی فولادی و یک لایه دیرگداز^{۱۱} داخلی، که به صورت افقی مهار شده و با استفاده از یک سیستم موتور الکتریکی و چرخ‌دنده، حول محور تقارن خود دوران می‌کند (شکل ۱). در کوره در نظر گرفته شده برای تحقیق حاضر، حرارت لازم درون کوره با استفاده از یک مشعل اکسند-سوخت^{۱۲} با جایگزینی کامل هوای مورد نیاز احتراق گاز طبیعی با اکسیژن تامین می‌شود. این کوره دارای بدنه‌ای با قطر داخلی ۳ متر، قطر خارجی ۳/۶۵ متر، طول مخزن ۵ متر و طول بدنه با احتساب قسمت ورودی شعله و قسمت خروجی دود ۶/۹ متر بوده و بدنه با سرعت ۱/۳۳ دور بر دقیقه دوران می‌کند. ظرفیت این کوره ۱۷ تن است و برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی و اکسیژن استفاده می‌شود. هرنوبت تهیه مذاب توسط این کوره ۴/۵ ساعت طول می‌کشد (ژو و همکاران، ۲۰۰۶).



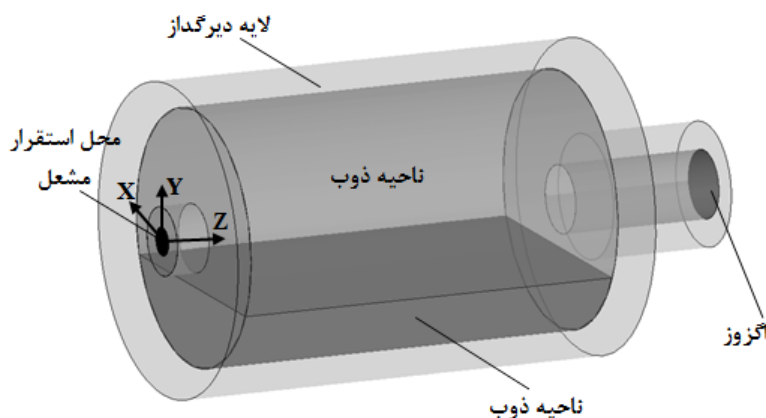
شکل ۱ - کوره دوار ذوب آلومینیوم و مقطع عرضی آن (ژو و همکاران، ۲۰۰۶).

شبیه سازی عددی

کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم فرآیندی پیچیده و شامل پدیده‌های گوناگونی است که احتراق گاز طبیعی، انتقال حرارت تشعشع و جابجایی در فضای داخل کوره، انتقال حرارت هدایت در لایه دیرگداز بدنه دوار، فرآیند ذوب فلز و انتقال حرارت جابجایی در محل تشکیل مذاب مهمترین آنها است. مدل ارائه شده در تحقیق حاضر، با توجه به پدیده‌های مشخصی که در هر قسمت از کوره رخ می‌دهد کوره دوار ذوب آلومینیوم را به سه ناحیه تقسیم می‌کند. این نواحی عبارتند از ناحیه احتراق، ناحیه ذوب و ناحیه لایه دیرگداز (شکل ۲). مرزهای مشترک این نواحی به صورتی تعریف شده‌اند که تنها امکان عبور حرارت را فراهم می‌کنند و تبادل جرم بین نواحی صورت نمی‌گیرد. با این تقسیم‌بندی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX 14.5، معادلات مربوط به هر ناحیه مختص همان ناحیه تعریف و با قید یکسان بودن شار حرارت روی مرز مشترک دوناچه مجاور، حل شده‌اند. شرایط اولیه، همان شرایط محیط اطراف یعنی دمای ۳۰۳K، فشار ۱atm، بدون سرعت و هوا با ترکیب ۲/۲۳٪ جرمی اکسیژن و ۸/۷۶٪ جرمی نیتروژن بوده‌است.

¹¹ Refractory

¹² Oxy-Fuel Burner



شکل ۲ - نواحی تقسیم بندی شده در کوره دوار ذوب آلومینیوم به منظور اعمال معادلات مختص هر ناحیه.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر مساله، با توجه به پدیده‌هایی که در هر ناحیه کوره رخ می‌دهد و به صورت مجزا به این نواحی اعمال و با شرط یکسان بودن شار حرارت گذرنده از مرز مشترک نواحی مجاور، حل می‌شود. در ادامه، این معادلات و شرایط مرزی مربوط به آنها ذکر شده‌است.

ناحیه ذوب، جامد و دوار است و بنابراین تنها معادله انتقال حرارت هدایت با یک جمله چشمه لحاظ کننده دوران بدنه بر آن حاکم است. لایه بیرونی بدنه با محیط بیرون ارتباط دارد و شرط مرزی آن عبارت است از جابجایی حرارت با محیط بیرون روی سطح خارجی بدنه با ضریب جابجایی حرارت $h = 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ و دمای $T = 303 \text{ K}$ (ژو، ۲۰۰۵).

ناحیه احتراق، محل آزاد شدن حرارت حاصل احتراق غیرپیش‌آمیخته گاز طبیعی و اکسیژن است که در تحقیق حاضر، گاز طبیعی با متان تخمین زده شده است. برای معادلات حاکم بر ناحیه احتراق معادلات بقای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر شامل معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتوم، معادله بقای انرژی، و معادلات بقای گونه‌ها به همراه معادله حالت هستند (پوینسوت و وینانته^{۱۳}، ۲۰۰۵). همچنین، در کار حاضر برای مدل‌سازی اغتشاش جریان از مدل SST k- ω (مینتر^{۱۴}، ۱۹۹۳)، برای مدل‌سازی احتراق از مدل اتلاف گردابه^{۱۵} (ماگنسون و هجرتاگر^{۱۶}، ۱۹۷۶)، برای مدل‌سازی تشعشع از مدل DTRM با ۳۲ پرتو^{۱۷} (لاکوود و شاه^{۱۸}، ۱۹۸۱) و برای مدل‌سازی اثر شناوری، از مدل شناوری کامل^{۱۹} (ANSYS، ۲۰۱۲) استفاده شده است. مرزهای ناحیه احتراق عبارتند از: مرز ورودی که محل قرار گرفتن مشعل و ورود شعله است، مرز خروجی که محل خروج گازهای احتراقی است، مرز مشترک با ناحیه لایه دیرگداز

¹³ Poinso and Veynante

¹⁴ Menter

¹⁵ Eddy Dissipation Model (EDM)

¹⁶ Magnussen and Hjertager

¹⁷ Ray

¹⁸ Lockwood and Shah

¹⁹ Full Buoyancy Model

و مرز مشترک با ناحیه ذوب. برای خواص جریان سیال در مرز ورودی از نتایج عددی ژو (۲۰۰۵) استفاده شده و برای مرز خروجی شرط فشارنسبی صفر با قابلیت رخ دادن جریان برگشتی^{۲۰} به کار رفته است. شرط مرزی روی مرز مشترک با ناحیه احتراق به صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور، شرط عدم لغزش و ضریب صدور تشعشعی لایه دیرگداز ۰/۸ (تیاماروف، گاریفولین و داولتبایف^{۲۱}، ۱۹۸۷) در نظر گرفته شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک ناحیه احتراق با ناحیه ذوب به صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور و ضریب صدور تشعشع از سطح آزاد مذاب نیز ۰/۸ در نظر گرفته شده است (ژو، ۲۰۰۵).

برای شبیه سازی ناحیه ذوب، فرآیند ذوب آلومینیوم توسط مدل آنتالپی-تخلخل به نرم افزار افزوده شده است. این مدل توسط وولر و پاراکاش (۱۹۸۷) و وولر و همکاران (۱۹۸۷) توسعه یافته است که با افزودن جملات چشمه مناسب به معادلات بقای جرم و مومنتوم اعمال می شود. همچنین برای لحاظ کردن نیروی شناوری در نواحی مذاب، از تقریب بوزینسک^{۲۲} استفاده شده است. پس از افزودن جملات چشمه به CFX، یک مساله معیار منطبق بر کارهای تجربی گائو و ویسکانتا^{۲۳} (۱۹۸۶) حل و صحت مدل افزوده شده بررسی شده است. مساله مذکور شامل فرآیند ذوب فلز گالیوم^{۲۴} در یک حفره مستطیلی دوبعدی است. مرزهای سمت چپ و سمت راست حفره به ترتیب در دمای ثابت بالا و دمای ثابت پایین بوده و مرز بالایی و پایینی عایق هستند. در ابتدا فضای داخل حفره با دیواره دمایی همدم است. برای آغاز فرآیند ذوب، دیواره سمت چپ ناگهان در دمای T_H قرار می گیرد (شکل ۳). برای حل مساله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه و گام زمانی بررسی شده و مشخص شد شبکه های ریزتر از 128×96 گام های زمانی کمتر از ۰/۱ ثانیه تغییری در حل عددی بوجود نمی آورند. پس از یافتن شبکه و گام زمانی مناسب، راست آزمایی حل عددی انجام شده و نتایج عددی حاصل بانتهای تجربی گائو و ویسکانتا (۱۹۸۶) مقایسه شدند. شکل ۴ تغییرات دما در راستای محوری افقی (X) روی خط مرکزی $Y=0.03175m$ در زمان های مختلف را نمایش می دهد که حاکی از تطابق مناسب حل عددی حاضر با داده های تجربی و کارکرد مناسب مدل آنتالپی-تخلخل افزوده شده به نرم افزار CFX هستند. ناحیه ذوب توسط مرز مشترک با نواحی احتراق و لایه دیرگداز محصور شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک با لایه دیرگداز، به صورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط عدم لغزش بوده و شرط مرزی روی مرز مشترک با ناحیه احتراق نیز به صورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط لغزش آزاد تنظیم شده است.

فرآیند سوزش آلومینیوم

برای کوره دوار در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر که قطعات آلومینیوم قراضه را ذوب می کند، ۲/۱۴٪ جرمی از آلومینیوم به دلیل سوزش از دست می رود که منجر به آزاد شدن $8540 MJ$ انرژی در فضای کوره می شود. قسمت عمده این فرآیند در ۸۱۰۰ ثانیه نخست کارکرد کوره رخ می دهد که به دلیل عدم وجود سرباره کافی روی آلومینیوم است. در کار حاضر از مدل ارائه شده توسط ژو (۲۰۰۵) استفاده می شود که اثر کاهش جرم ناشی از سوزش آلومینیوم را به دلیل اندک بودن آن نادیده گرفته است. ۸۰٪ از این حرارت در ناحیه احتراق و مابقی در ناحیه ذوب آزاد می شود که به صورت جمله چشمه به معادله انرژی در این نواحی وارد می گردد.

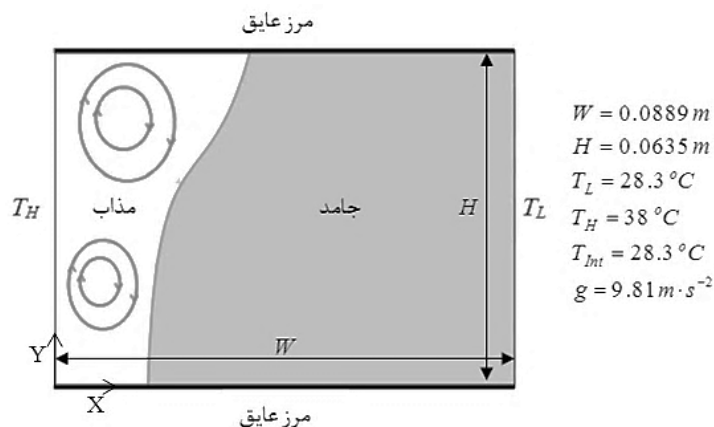
²⁰ Reverse Flow

²¹ Tiamarov, Garifullin and Davletbaeva

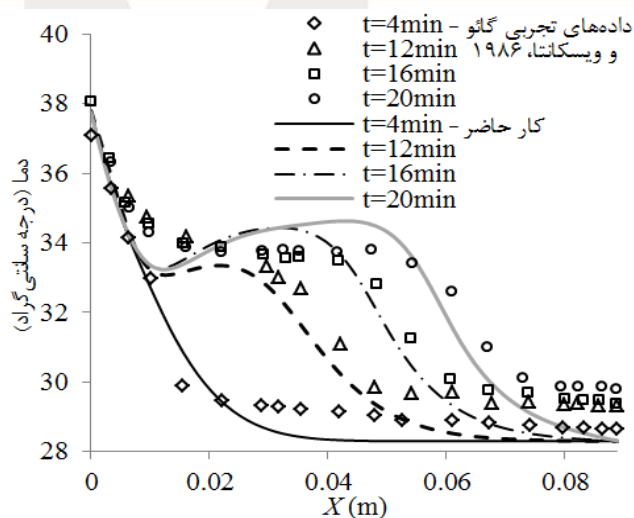
²² Boussinesq Approximation

²³ Gau and Viskanta

²⁴ Gallium



شکل ۳ - مشخصات میدان حل و شرایط مرزی و اولیه مساله ذوب گالیوم در حفره دو بعدی گائو و ویسکانتا (۱۹۸۶) به منظور صحت آزمایشی مدل ذوب افزوده شده به نرم افزار.

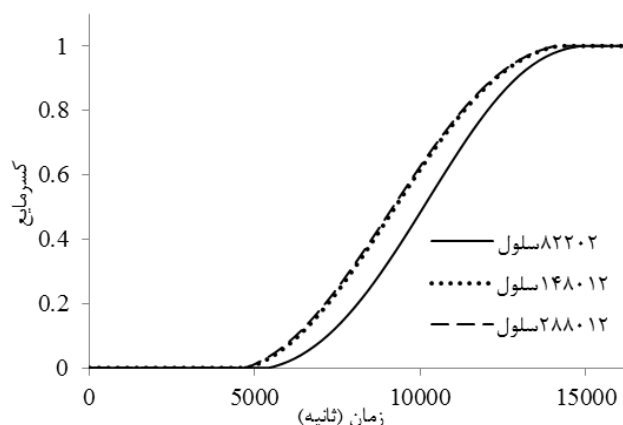


شکل ۴ - نمودار راست آزمایشی مدل ذوب افزوده شده به CFX، نمودار تغییرات دما در راستای محور افقی (X) روی خط مرکزی $Y=0.3175m$ در زمان‌های ۴ دقیقه، ۱۲ دقیقه، ۱۶ دقیقه و ۲۰ دقیقه در مقایسه با نتایج گائو و ویسکانتا (۱۹۸۶).

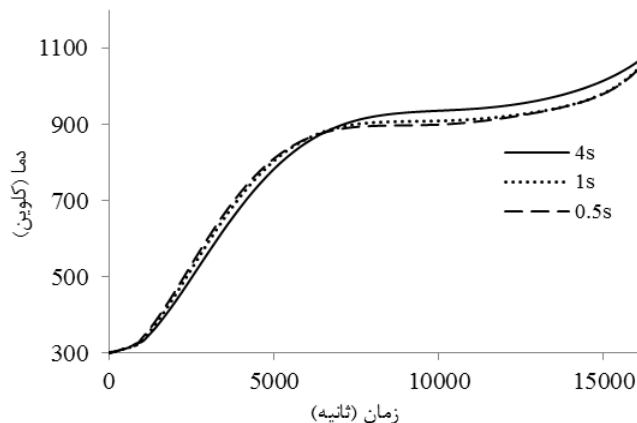
حل عددی مساله

برای حل عددی مساله، لازم است معادلات بیان شده در قسمت‌های قبلی روی سلول‌های شبکه محاسباتی گسسته و حل شوند که برای نواحی ذوب و احتراق از سلول‌های شش‌وجهی و برای لایه دیرگداز از سلول‌های چهاروجهی استفاده شده و در نزدیکی مرزهای ناحیه ذوب، محل قرار گرفتن مشعل و محل خروج محصولات احتراق از سلول‌های محاسباتی ریزتری استفاده شده است. برای بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، سه شبکه با تعداد سلول‌های ۸۲۲۰۲، ۱۴۸۰۱۲ و ۲۸۸۶۰۳ انتخاب و نتایج حل مساله روی هریک از آنها مقایسه شده است. شکل ۵ تاریخچه انتگرال حجمی کسرمایع در ناحیه ذوب بعنوان معیاری از مقدار مذاب تولیدی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود نتایج دو شبکه با ۱۴۸۰۱۲ و ۲۸۸۶۰۳ سلول تفاوت چندانی با هم ندارد. از

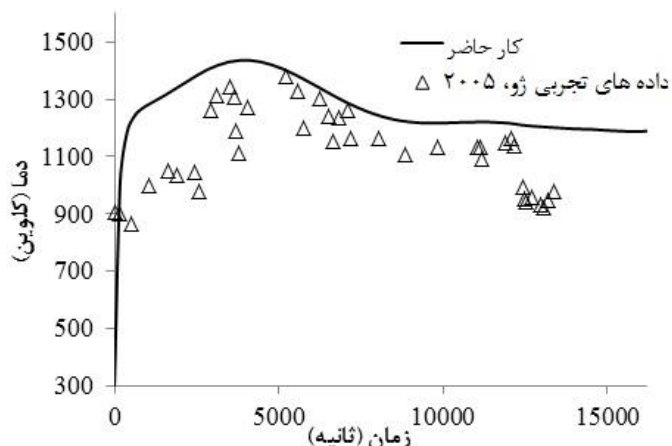
سوی دیگر، با توجه به زمان کارکرد طولانی کوره دوار ذوب آلومینیوم (۴/۵ ساعت برابر با ۱۶۲۰۰ ثانیه)، مقدار گام زمانی در دقایق ابتدایی کارکرد کوره ۰/۲ ثانیه انتخاب شده و طی ۹۶۰ ثانیه ابتدایی کارکرد کوره به تدریج تا مقدار نهایی که بخش عمده محاسبات با آن انجام می‌شود، افزایش می‌یابد. شکل ۶ تغییرات زمانی دمای متوسط ناحیه ذوب حاصل از انجام محاسبات با گام‌های زمانی نهایی ۰/۵ ثانیه، ۱ ثانیه یا ۴ ثانیه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود گام زمانی نهایی ۱ ثانیه با دقت قابل قبولی نسبت به گام ۰/۵ ثانیه نتایج را پیش‌بینی کرده و بنابراین برای شبیه‌سازی‌های بعدی کوره به کار رفته است. داده تجربی در دسترس برای صحت‌آزمایی شبیه‌سازی عددی، دمای گازهای خروجی حین کارکرد کوره است که توسط ژو (۲۰۰۵) گزارش شده است. با مقایسه داده‌های تجربی و عددی در شکل ۷، مشاهده می‌شود دمای متوسط گازهای خروجی محاسبه شده توسط روش عددی بیشتر از داده‌های تجربی است. دلیل این امر استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه در تحقیق حاضر است، چرا که در این مدل واکنش یک مرحله‌ای احتراق کامل اکسیژن و گاز طبیعی بکار رفته و به این ترتیب نسبت به احتراق غیرکامل که در عمل روی می‌دهد، حرارت بیشتری در فضای کوره آزاد شده است. با پذیرفتن این مقدار خطا، می‌توان از مدل ارائه‌شده و تنظیمات عددی مربوط به آن برای مطالعات موردی کوره دوار ذوب آلومینیوم استفاده کرد.



شکل ۵ - نمودار مقدار مذاب تولیدی (انتگرال حجمی کسر مایع) به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به تعداد سلول‌های محاسباتی.



شکل ۶ - نمودار تغییرات دمای ناحیه ذوب به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به اندازه گام زمانی نهایی.

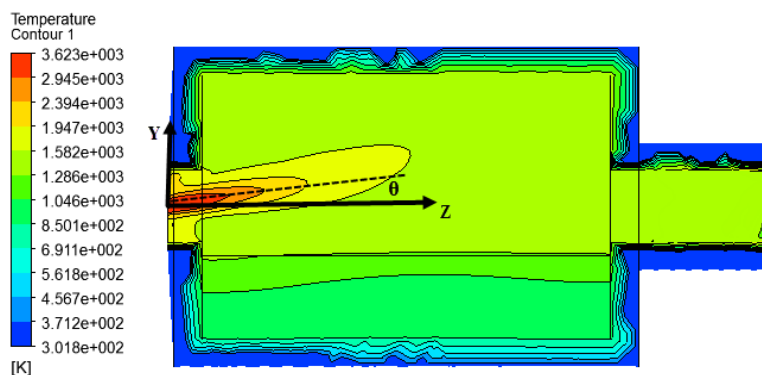


شکل ۷ - مقایسه دمای متوسط مرز خروجی کوره با داده‌های تجربی (ژو، ۲۰۰۵) و صحت‌آزمایی حل عددی کوره‌دوار ذوب آلومینیوم در کار حاضر.

نتایج حل مساله

به منظور بررسی بهبود کارایی کوره، کارکرد کوره با زوایای مشعل مختلف شبیه‌سازی و تاثیر تغییر زاویه مشعل بر نرخ تهیه مذاب بررسی شده است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، زاویه مشعل نسبت به محور مختصات Z و در صفحه $X=0\text{ m}$ تعریف شده است. زوایای انتخاب شده $0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ, 12.5^\circ, 15^\circ$ هستند. در ابتدا مناسب است رابطه ای برای بازده کوره تعریف و بازده کارکرد معمول کوره محاسبه شود. به این منظور، جدول ۱ مشخصات عمده کارکرد کوره را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر گاز طبیعی با متان تخمین زده شده است. با توجه به حجم گاز مصرفی در مدت زمان کارکرد کوره، حرارت حاصل از احتراق $Q_{comb}=16540\text{ MJ}$ محاسبه می‌شود. از ۱۷ تن مواد ورودی به کوره، ۱۰ تن آلومینیوم مذاب با دمای متوسط 1060 K استخراج می‌شود. طبق رابطه (۱)، بازده حرارتی کوره به صورت نسبت حرارت مصرف شده برای تهیه محصول (کسری از هزینه که صرف تهیه آلومینیوم مذاب می‌شود) به حرارت حاصل از احتراق تعریف می‌شود:

$$\eta_l = \frac{Q_{useful}}{Q_{comb}} \times 100 = 65\% \quad (1)$$

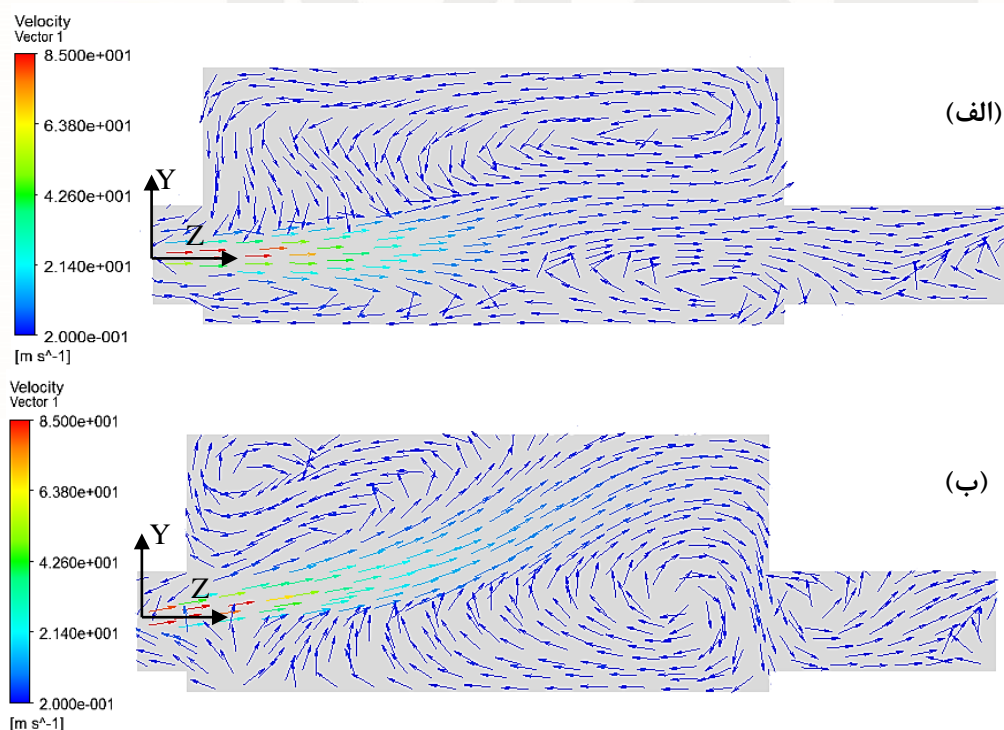


شکل ۸ - نحوه تعریف زاویه مشعل (ورود جت سوخت و اکسند به درون کوره). مبدا مختصات بر محل استقرار مشعل قرار گرفته است.

جدول ۱ - مشخصات کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم (ژو، ۲۰۰۵).

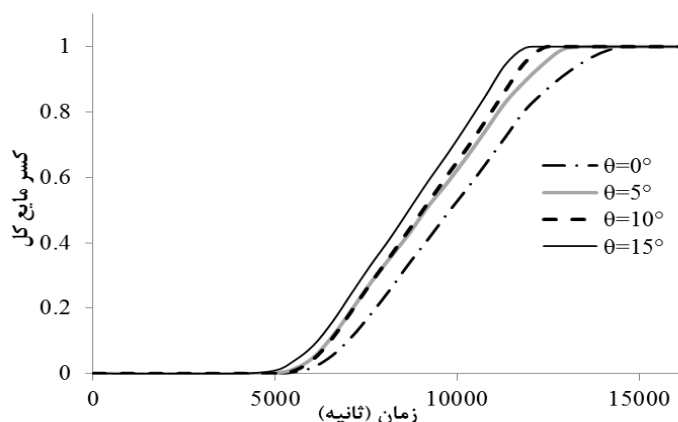
زمان کارکرد	۴/۵ ساعت	نقطه ذوب آلومینیوم	۹۳۳K
مقدار گاز مصرفی	۵۰۹ m ³	ظرفیت حرارتی آلومینیوم	۹۰۳ J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
ارزش حرارتی پایین سوخت	۳۲/۴۵ MJ·m ⁻³	حرارت نهان ذوب آلومینیوم	۳۹۷۰۰۰ J·kg ⁻¹
مقدار قراضه ورودی	۱۷ تن	مقدار آلومینیوم استخراجی	۱۰ تن

به طور کلی افزایش زمان حضور گازهای احتراقی در فضای کوره به بهبود انتقال حرارت در فضای کوره و افزایش کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم منجر می‌شود، چرا که هرچه گازهای احتراقی مدت بیشتری در فضای کوره حضور داشته باشند، فرصت انتقال حرارت از گازهای داغ حاصل از احتراق به مواد درون کوره و در نتیجه دمای کوره افزایش می‌یابد (ترنژ، ۲۰۰۰). همچنین با نزدیک کردن شعله به لایه دیرگداز، دمای سطح داخلی آن بالا رفته و تشعشع از لایه دیرگداز نیز افزایش می‌یابد. بنابراین زاویه دار کردن جت ورودی سوخت و اکسند به درون کوره روشی مطلوب برای افزایش بازده کوره است. شکل ۹ تاثیر زاویه مشعل بر جریان گازهای درون کوره را به صورت بردارهای مماس بر صفحه $X=0m$ در زمان $t=1600s$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه مشعل، گردابه‌های موجود بزرگتر شده و مسیر طی شونده گازهای احتراقی برای خروج از کوره و زمان اقامت آنها در کوره افزایش می‌یابد.

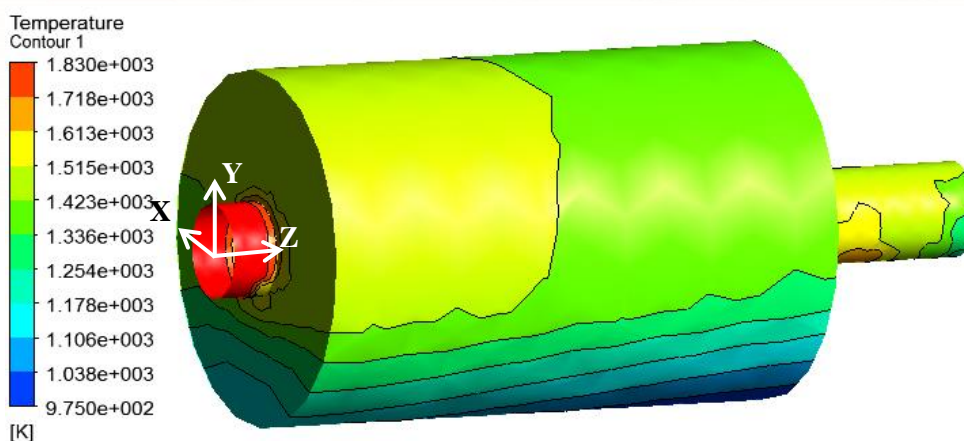


شکل ۹ - تاثیر افزایش زاویه مشعل بر جریان گازهای درون کوره به ازاء الف: $\theta=0^\circ$. ب: $\theta=10^\circ$.

مهمترین پارامتری که حین تغییر زاویه مشعل باید بررسی شود، سرعت تهیه آلومینیوم مذاب است. منحنی‌های تغییرات زمانی انتگرال حجمی کسرهای ذوب بعنوان معیاری از مقدار مذاب تولیدی را برای زوایای مشعل 0° ، 5° ، 10° ، 15° در شکل ۱۰ باهم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه مشعل تا $\theta=15^\circ$ ، سرعت تهیه مذاب افزایش می‌یابد. اما محدودیت‌های فیزیکی لایه دیرگداز عامل محدود کننده افزایش زاویه مشعل است. یکی از پیامدهای افزایش زاویه مشعل، نزدیک شدن شعله به بدنه و افزایش دمای لایه دیرگداز است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، حین کارکرد کوره، قسمتی از لایه دیرگداز اطراف مرز ورودی (محل استقرار مشعل) بیشترین دما را دارد. طبق گزارش برازنان^{۲۶} (۲۰۰۴)، بیشینه دمای قابل تحمل دیرگدازهای با جنس

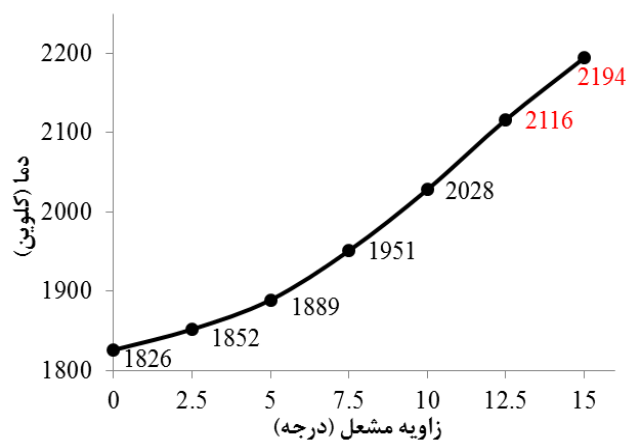


شکل ۱۰ - تاثیر زاویه مشعل بر سرعت تهیه آلومینیوم مذاب.



شکل ۱۱ - توزیع دما روی سطح داخلی لایه دیرگداز (مبدا مختصات بر محل استقرار مشعل قرار دارد).

آلومین-سیلیکات 2070K است و دماهای بیشتر به تغییر شکل و تجزیه دیرگداز منجر می‌شود. پس از محاسبه حداکثر دما در لایه دیرگداز، طبق شکل ۱۲ مشاهده شد به ازاء زوایای 15° ، $12/5^\circ$ از این حد تجاوز می‌شود. بنابراین مناسب ترین زاویه مشعل برای کوره مورد نظر، 10° پیشنهاد می‌گردد. در این حالت کارکرد کوره ۳۵ دقیقه کاهش می‌یابد که طبق جدول ۱ برابر با کاهش 2141MJ حرارت مصرفی است. به این ترتیب طبق رابطه (۱)، بازده حرارتی کوره از ۶۵٪ به ۷۴٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- تغییرات حداکثر دمای لایه دیرگداز به ازاء تغییر زاویه مشعل.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

کوره‌ها از مصرف کنندگان عمده انرژی در صنایع مختلف هستند و به‌سازی آن‌ها می‌تواند تاثیر مستقیمی بر کاهش هزینه‌های تولید داشته باشد. در تحقیق حاضر، به شبیه‌سازی کوره دوار ذوب آلومینیوم جهت بهبود شرایط کارکرد آن پرداخته شد. پس از شناسایی چگونگی عملکرد این کوره و جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، مدلی از کوره دوار ذوب آلومینیوم ارائه شد که علاوه بر پدیده‌های احتراق مغشوش، تشعشع و اکسایش آلومینیوم، فرآیند ذوب آلومینیوم و دوران بدنه را نیز لحاظ می‌کند. در کار حاضر، از مدل احتراقی اتلاف گردابه، مدل اغتشاشی SST k- ω ، مدل تشعشعی DTRM و مدل ذوب آنتالپی-تخلخل استفاده و نتایج حل عددی با دقتی قابل قبول صحت آزمایی و سپس اثر زاویه مشعل بر کارایی کوره بررسی شد. نتایج حل عددی نشان داد اگرچه افزایش این زاویه زمان اقامت گازهای داغ احتراقی و در نتیجه سرعت تهیه مذاب را کاهش می‌دهد، اما به دلیل بالارفتن بیش‌ازحد دمای قسمت‌هایی از لایه دیرگداز که به شعله نزدیک‌تر است، اندازه زاویه مشعل محدود می‌شود. به این ترتیب برای کار حاضر، زوایای بیشتر از 10° به دلیل محدودیت‌های فیزیکی لایه دیرگداز مناسب نیست.

منابع

ANSYS, 2012, ANSYS CFX-Solver Theory Guide (Release 14.5), ANSYS, Inc.

Bourgeois, T., Bui, R.T., Charette, A., Kocafe, Y.S., 1989, Mathematical modeling of an aluminum casting furnace combustion chamber, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20, No. 3, Pp. 421-429.

Brosnan, D.A., 2004, Alumina-Silica brick, in: C.A. Schacht (Editor), Refractories handbook, Marcel Dekker, Inc., New York.

Carmona, M., Cortés, C., 2014, Numerical simulation of a secondary aluminum melting furnace heated by a plasma torch, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, Pp. 334-346.

Gau, C., Viskanta, R., 1986, Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, No. 1, Pp. 174-181.

Lockwood, F.C., Shah, N.G., 1981, A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures, *Paper Presented at the Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, Waterloo, Canada, Pp.1405-1414.

Magnussen, B.F., Hjertager, B.H., 1977, On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, in: *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 16, No. 1, Elsevier, Pp. 719-729.

Menter, F.R., 1993, Zonal two equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows, *Paper Presented at the Twenty Third Fluid Dynamics, Plasmadynamics and Lasers Conference*, Orlando, U.S.A., Pp. 1-21.

Poinsot, T., Veynante, D., 2005, Theoretical and numerical combustion (2nd Edition), Edwards, U.S.A., Pp. 140-142.

Tiamarov, M.A., Garifullin, F.A., Davletbaeva D.Z., 1987, Emissivity of aluminosilicate refractories, *Journal of Engineering Physics*, Vol. 53, No. 3, Pp. 1027-1031.

Turns, S.R. 2000, An introduction to combustion, concepts and applications (2nd Edition), Mc Graw Hill, Singapore.

Voller, V.R., Cross, M., Markatos, N.C., 1987, An enthalpy method for convection/diffusion phase change, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, No. 1, Pp. 271-284.

Voller, V.R., Prakash, C., 1987, A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, Pp. 1709-1719.

Watkinson, A.P., Brimacombe, J.K., 1978, Heat transfer in a direct-fire rotary kiln, II: heat flow results and their interpretation, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 9, No. 2, Pp. 209-219.

Wu, Y.K., Lacroix, M., 1995, Numerical simulation of the melting of scrap metal in a circular furnace, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 22, No. 4, Pp. 517-525.

Zhou, B., 2005, Modeling the melting of post-consumer scrap within a rotary melting furnace for aluminum recycling, PhD Thesis, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, Netherland.

Zhou, B., Yang, Y., Reuter, M.A., Boin, U.M.J., 2005, CFD based process modeling of a rotary furnace for aluminum scrap melting, *Paper Presented at the Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries*, Trondheim, Norway, Pp. 1-8.

Zhou, B., Yang, Y., Reuter, M.A., Boin, U.M.J., 2006, Modeling of aluminum scrap melting in a rotary furnace, *Minerals Engineering*, Vol. 19, No. 13, Pp. 299-308.