

بهبود شرایط کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم با استفاده از شبیهسازی عددی

مجتبی رحیم پور ^۱، کیومرث مظاهری ^۲و سیدحسین سیدین ^۳

nojtaba.rahimpour@modares.ac.ir ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، kiumars@modares.ac.ir ۲- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (نویسنده مخاطب)، seyedein@iust.ac.ir ۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، ۹۳/۳/۴ یذیر ش: ۹۳/۲/۴) (دریافت: ۱۹۹۲/۱۱/۵)، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۳/۳/۳، پذیر ش: ۹۳/۲/۴)

کوره دوار ذوب آلومینیوم برای بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه به کار می رود. کار کرد این کوره فرایندی پیچیده و شامل پدیدههای گوناگونی است که مهم ترین آنها ذوب و اکسایش آلومینیوم، احتراق مغشوش سوخت گازی و تشعشع در یک بدنه دوار است. در تحقیق حاضر، مدلی برای کوره دوار ذوب آلومینیوم ارائه شده است که کوره را به سه ناحیه لایه دیرگداز، ناحیه احتراق و ناحیه ذوب تقسیم می کند. بین این نواحی امکان تبادل جرم وجود نداشته و تنها انتقال حرارت ممکن است. حل عددی مسئله نشان داد تهیه آلومینیوم مذاب کاملا تحت تاثیر دوران بدنه بوده و القای حرکت در آلومینیوم مذاب، باعث تسریع فرآیند ذوب می شود. همچنین، در کنار اهمیت نقش دوران بدنه بر سرعت بخشیدن به فرآیند ذوب آلومینیوم، سرعت دورانی ۱/دوربردقیقه بدنه کوره منجر به حداقل شدن زمان تهیه مذاب می شود. سپس، نقش غالب تشعشع در انتقال حرارت درون کوره در مقابل جابه جایی حرارت بررسی و مشاهده شد ۸۴ درصد از انتقال موارت درون فضای کوره از طریق تشعشع انجام می شود. با افزایش ضریب صدور لایه دیرگداز از ۲/۰ به ۸۵/۰ این مقدار به ۸/۸۱ درصد افزایش و دمای گازهای درون کوره کاهش می یابد که در نتیجه کارایی کوره بهبود یافته و فرایند ذوب به ۸/۸۱ درصد افزایش و دمای گازهای درون کوره کاهش می یابد که در نتیجه کارایی کوره بهبود یافته و فرآیند ذوب به ۲۰/۸۵ درصد افزایش و دمای گازهای درون کوره کاهش می یابد که در نتیجه کارایی کوره بهبود یافته و فرآیند ذوب ۲۰ دقیقه زودتر پایان می یابد.

كليدواژگان: كوره دوار ذوب آلومينيوم، مدلسازي، ديناميك سيالات محاسباتي، جابهجايي اجباري، تشعشع

مقدمه

کورهها از مصرفکنندهگان عمده انرژی در صنایعاند و بهبود شرایط کارکرد آنها مستقیما به کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینههای تولید منجر میشود. بهعنوان جایگزین کورههای خمرهای یا بوتهای، استفاده از کورههای دوار ذوب آلومینیوم^۱ در کارگاههای ریختهگری کوچک و متوسط معمول است[۱]. مزایایی همچون افزایش سرعت تهیه مذاب، کاهش آلایندهها و کاهش مصرف سوخت باعث شده است در کورههای دوار ذوب آلومینیوم مدرن، بهجای هوا، از اکسیژن برای احتراق سوخت استفاده شود[۳۸]. کاربرد این کوره بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه^۲ است[۲].

علی رغم سابقه طولانی و کاربرد گسترده، تحقیقات اندکی روی کورههای دوار ذوب فلز انجام شده است. واتکینسون و همکاران، در سال ۱۹۷۸، با ارائه یک مدل ریاضی برای یک خشک کن دوار و صحتسنجی آن با دادههای تجربی، نشان دادند در مقابل انتقال حرارت تشعشع با سهم ۸۵ درصد از کل انتقال حرارت، انتقال حرارت جابهجایی چندان موثر نبوده و ۱۵ درصد از انتقال حرارت درون کوره را بهعهده دارد [۴]. وو و همکاران، در سال ۱۹۹۵، با استفاده از مدل آنتالپی-تخلخل^۳ فرآیند ذوب فلز در یک کوره ساکن را بهصورت یکبعدی و دوبعدی شبیهسازی کردند و نشان دادند فرض یکبعدی مناسب نبوده و

^{1.} Aluminum Rotary Furnace

^{2.} Scrap

^{3.} Enthalpy-Prosity Model

همچنین سرعت ذوب آلومینیوم بهشدت به انتقال حرارت جابهجایی در قسمتهای ذوبشده بستگی دارد[۵]. خویی و همکاران، در سال ۲۰۰۳، از شبیهسازی عددی سادهشدهای استفاده کرده و با اعمال شرایط مرزی متغیر با زمان بر قسمت بیرونی دیواره کوره، توزیع دمای بدنه کوره را برای سرعتهای مختلف دوران و مکانهای متفاوت شعله بهدست آوردند و بدین ترتیب نشان دادند، با افزایش سرعت دوران، هدایت حرارت در بدنه افزایش می یابد[۶]. ژو و همکاران، در سال ۲۰۰۴، یک کوره دوار ذوب و بازیافت آلومینیوم به ظرفیت ۱۷تن را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بدون لحاظکردن دوران بدنه شبیهسازی کردند. ایشان برای لحاظکردن فرآیند ذوب آلومینیوم، از مدل تعادل تجمعی استفاده کرده و با مشخص كردن توزيع اندازه قطعات آلومينيوم ورودي به كوره، شرايط ذوب يک كره آلومينيومي كوچک را به مجموعه قطعات آلومينيوم تعميم دادند. در اين تحقيق، آلومينيوم مذاب بهصورت فاز جامدي كه تنها هدايت حرارت در آن رخ ميدهد، مدل شده بود. نتایج این شبیهسازی نشان داد اندازه اولیه قطعات آلومینیوم تاثیر چندانی بر شرایط کارکرد کوره مانند توزیع دما و نرخ تهیه مذاب ندارد[۷]. ژو و همکاران، در سال ۲۰۰۵، حل عددی قبلی خود را بهبود بخشیدند و با اعمال گام زمانی ۰/۱ ثانیه در آغاز کارکرد کوره و افزایش تدریجی آن به ۳۰ ثانیه تا ثانیه ۱۳۰۰م، بهعنوان حالت بهینه اعمال گام زمانی، حل عددی را سرعت بخشیدند. همچنین، با مقایسه مدلهای اغتشاشی k-e و RNG k-e تفاوت چندانی در نتایج مشاهده نکردند، حال آنکه مدل تشعشعی DTRM^۲ را، بهدلیل دقت بالاتر، به مدل P1 ترجیح دادند. نتایج حل عددی ایشان نشان داد بازده کوره در این حالت ۶۰ درصد بوده و ۳۶ درصد حرارت حاصل از احتراق سوخت توسط گازهای خروجی از کوره و ۴ درصد آن توسط هدایت حرارت از بدنه به محیط بیرون بههدر میرود[۸]. ژانگ در سال ۲۰۰۸ یک مدل ریاضی برای بیان انتقال حرارت و دمای درون کوره دوار ذوب آهن پیوسته ارائه کرده و با استفاده از دادههای تجربی صحت آن را نشان داد. مدل مذکور سه ناحیه لایه دیرگداز بدنه، ناحیه جریان گازهای احتراقی و ناحیه فلز مذاب را درنظر گرفته و معادله انرژی مناسب هر قسمت را بر آن اعمال کرده است. این سه معادله، که با دمای کوره به هم کوپلاند، مدل ریاضی را تشکیل میدهند. با استفاده از این مدل، یک کوره دوار ذوب آهن پیوسته طراحی شده است که نسبت به کوره قوس الکتریک با ظرفیت مشابه ۴۵ درصد صرفه اقتصادی دارد[۹]. میشرا و همکاران، در سال ۲۰۰۹، با اندازهگیری زمان تولید چدن مذاب و نرخ مصرفسوخت برای سرعتهای دورانی مختلف و میانیابی دادههای موجود، سرعت دوران بهینه یک کوره دوار ذوب چدن با ظرفیت تولید ۲۰۰ کیلوگرم چدن مذاب را ۱/۱ دوربردقیقه گزارش دادند[۱۰]. جین و سین، در سال ۲۰۱۲، با توجه به کارهای مرجع [۱۰] و با لحاظ کردن شرایط حداقل مصرف انرژی، محدودیتهای متالورژیکی و تولید حداقل آلایندهها، سرعت دوران بهینه بدنه کوره مذکور را ۱/۴ دوربردقیقه درونيابي كردند[۱۱].

از میان مدلهای ترمودینامیکی یا عددی مرورشده، تنها مرجع [۶] است که مستقیما اثر دوران بدنه کوره را بررسی کرده، اما از مذاب درون کوره صرفنظر کرده است. در پژوهش حاضر، تلاش شده است، علاوه بر فرآیندهای احتراق و ذوب، اثر دوران بدنه کوره بر مذاب درون کوره و ایجاد حرکت در آن نیز لحاظ شده و نقش سرعت دورانی بدنه در کارایی کوره بررسی شود. به این منظور کوره دوار ذوب آلومینیوم استفاده شده در تحقیقات ژو و همکاران [۲۰،۷۸] انتخاب شده و در تکمیل کار ایشان، شبیه سازی عددی این کوره با لحاظ کردن فرآیند تشکیل آلومینیوم مذاب بهعنوان یک فاز سیال و همچنین دوران بدنه کوره انجام شده است. برای کار حاضر از نرمافزار تجاری حلگر دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX 14.5 استفاده شده است. قابلیتهای مورد توجه این نرمافزار در تحقیق حاضر عبارتاند از توانایی اعمال جداگانه معادلات مختص نواحی با فیزیکهای متفاوت[۱۳] و دارابودن زبان برنامهنویسی داخلی نسبتا ساده LECX برای ایجاد تغییرات مورد نیاز در معادلات حاکم بر مسئله[۱۴]. از آنجا که نرمافزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیند ذوب است، در کار حاضر مدل آنتالپی-تخلخل[۱۷].

1. Population Balance Model

^{2.} Discrete Transfer Radiation Model

معرفى كوره دوار ذوب آلومينيوم

کوره دوار ذوب آلومینوم تشکیل شده است از یک بدنه استوانهای با پوسته فولادی که درون آن با لایهای از ماده دیرگداز^۱ از جنس آلومین-سیلیکات^۲ پوشیده شده است. بدنه توسط سیستم تامین نیرومحرکه دورانی بهصورت افقی مهار شده و حول محور خود میچرخد. دو انتهای بدنه کوره باز بوده و مشعل در یک انتها قرار گرفته است. گازهای حاصل از احتراق نیز از مخزن ۵ متر و طول بدنه با احتساب قسمت ورودی شعله و خروجی دود ۹/۹ متر است. بدنه با سرعت ۱۳۷۳ دور بر دقیقه دوران میکند (شکل ۱). ظرفیت این کوره ۱۷ تن قطعات آلومینیوم قراضه است که از این مقدار، ۱۳۰۰ دور بر دقیقه بازیافت میشود. برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی با اکسیژن توسط مشعل اکسیژن-سوخت⁷ استفاده میشود. برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی با اکسیژن توسط مشعل اکسیژن-سوخت⁷ مخرات درون کوره به محیط اطراف، بهصورت یک بازیاب انرژی¹ عمل کرده و قسمتهایی از آن، که در تماس با شعله گرم شدهاند، حین دوران بدنه با عبور از زیر ناحیه ذوب، حرارت ذخیره شده را به آلومینیوم پس میدهد. بنابراین، دوران بدنه کوره به محیط اطراف، بهصورت این کوره ۲۵



شکل ۱- کوره دوار ذوب آلومینیوم و مقطع عرضی آن [۱۲]

شبيهسازي عددي كوره دوار ذوب آلومينيوم

کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم شامل احتراق غیرپیش آمیخته و مغشوش گاز طبیعی و اکسیژن، انتقال حرارت تشعشع و جابهجایی در فضای داخل کوره، انتقال حرارت هدایت در لایه دیرگداز بدنه دوار، فرایند ذوب فلز و انتقال حرارت جابهجایی در محل تشکیل مذاب است. حضور این پدیدهها در کنار یکدیگر شبیهسازی این کوره را دشوار می سازد. مدلی که در تحقیق حاضر ارئه شده است، برای درنظر گرفتن تمامی پدیدههای ذکر شده، کوره دوار ذوب آلومینیوم را به سه ناحیه با فرآیندهای مجزا تقسیم می کند. این نواحی عبارتاند از ناحیه احتراق، ناحیه ذوب و ناحیه لایه دیرگداز و در شکل ۲ قابل مشاهدهاند. به این ترتیب مرزهای مشترک موجود عبارتاند از سطح مشترک دو ناحیه ذوب و احتراق، سطح مشترک دو ناحیه احتراق و لایه دیرگداز و سطح مشترک دو ناحیه ذوب و لایه دیرگداز. مرزهای مشترک این نواحی به صورتی تعریف شدهاند که تنها امکان عبور حرارت را فراهم می کنند و تبادل جرم بین نواحی صورت نمی گیرد. با استفاده از نرمافزار ANSYS CFX 14.5، می توان معادلات مربوط به هر ناحیه را مختص همان ناحیه تعریف کرده و با قید یکسان بودن شار حرارت روی مرز مشترک دو ناحیه

^{1.} Refractory lining

^{2.} Alumina-Silicate 3. Oxy-Fuel burner

Oxy-Fuel Duff
 A Regenerator

مجاور، آنها را حل کرد[۱۳]. از آنجا که نرمافزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیندهای ذوب است، برای استفاده از آن در کار حاضر مدل ذوب آنتالپی-تخلخل توسط کاربر به آن افزوده شده و پس از صحتآزمایی مورد استفاده قرار گرفته است. شرایط اولیه، همان شرایط محیط اطراف یعنی دمای ۳۰۳K، فشار ۱atm، بدون سرعت و هوا با ترکیب ۲۳/۲ درصد جرمی اکسیژن و ۷۶/۸ درصد جرمی نیتروژن بوده است. در ادامه معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوط به هریک از این نواحی توضیح داده شده است.



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

ناحیه لایه دیرگداز

این ناحیه جامد بوده و معادله انتقال حرارت هدایت به صورت رابطه (۱) بر آن حاکم است:

 $\frac{\partial(\rho c_P T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_S c_P T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \tag{1}$

در رابطه (۱)، ρ ، c_p ، ρ ، C_p و U_s به ترتیب چگالی، ظرفیت خرارتی، ضریب رسانش حرارت، دما و سرعت لایه دیرگدازند. در تحقیق حاضر، اثر دوران بدنه بررسی میشود. بنابراین، لایه دیرگداز به صورت دوار تعریف شده است. جمله ($\rho U_s c_p T$). این ناشی از اعمال دوران بر این ناحیه بوده و بیان کننده حرارتی است که توسط لایه دیرگداز و حین دوران حمل میشود[۱۴]. این ناحیه بین دو مرز لایه بیرونی بدنه و مرز مشترک با نواحی ذوب و احتراق محصور شده است و هنگام تعریف در CFX. به مورت استوانه دواری که حول محور تقارن خود دوران می کند، تعریف میشود. لایه بیرونی بدنه با محیط بیرون ارتباط دارد و شرط مرزی آن عبارت است از جابه جایی حرارت با محیط بیرون روی سطح خارجی بدنه با محیط بیرون ارتباط دارد و شرط مرزی آن عبارت است از جابه جایی حرارت با محیط بیرون روی سطح خارجی بدنه با ¹⁻². سال ۲=۳۰۳K

ناحيه احتراق

ناحیه احتراق محلی است که گاز طبیعی و اکسیژن از دریچه ورودی به آن وارد شده و پس از احتراق و آزادسازی حرارت، محصولات احتراق از طریق مجرای خروجی دود (اگزوز) از آن خارج میشود. همانند بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر، احتراق در کوره دوار ذوب آلومینیوم به صورت غیرپیش آمیخته و مغشوش است. همچنین، تبادل حرارت جابه جایی و تشعشعی بین گازهای درون کوره و لایه داخلی بدنه و سطح آزاد مذاب نیز باید درنظر گرفته شود. معادلات حاکم بر ناحیه احتراق معادلات بقای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر شامل معادله بقای جرم، معادلات بقای تکانه، معادله بقای انرژی و معادلات بقای گونه ها به همراه معادله حالتاند. شکل متوسط گیری شده این معادلات به صورت زیر است (علامت [–] نشان دهنده متوسط گیری زمانی و [–] نشان دهنده متوسط گیری فاور است):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho} \widetilde{u}_i \widetilde{u}_j \right) = 0$$

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho}\tilde{u}_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i}}\left(\overline{\rho}\tilde{u}_{i}\tilde{u}_{j}\right) + \frac{\partial\overline{p}}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}}\left(\overline{\tau}_{ij} - \overline{\rho}\widetilde{u_{i}'u_{j}''}\right) + \overline{G}_{i}$$

$$\tag{(7)}$$

بقای گونه nام:

(٢)

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho}\tilde{Y}_{n}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\overline{\rho}\tilde{u}_{i}\tilde{Y}_{n}\right)}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\overline{\rho D_{n}}\frac{\partial Y_{n}}{\partial x_{i}} - \overline{\rho u_{i}^{"}Y_{n}^{"}}\right] + \overline{\dot{\omega}}_{n} \tag{(f)}$$

بقای انرژی:

$$\frac{\partial \left(\bar{\rho}\tilde{h}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\bar{\rho}\tilde{u}_{i}\tilde{h}\right)}{\partial x_{i}} = \bar{\omega}_{T} + \frac{\overline{Dp}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{\lambda \frac{\partial T}{\partial x_{i}}} - \overline{\rho u_{i}'h''}\right) + \overline{\tau_{ij}\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}} - \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{\rho \sum_{n=1}^{N} V_{n,i}Y_{n}h_{n}}\right)$$

$$\frac{\overline{Dp}}{Dt} = \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_{i}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_{i}} + \overline{u_{i}''\frac{\partial p}{\partial x_{i}}}$$

$$(\Delta)$$

در روابط (۲) تا (۶)، u مولفه سرعت، u نوسانات سرعت، p فشار، τ_{ij} تانسور تنش، $\overline{\rho u_i'' u_j''}$ تنشهای رینولدزی، G نیروی حجمی، Y_n کسر جرمی گونه nام، \overline{m} نرخ تولید گونه \overline{n} ، شار اغتشاشی کسر جرمی گونه nام، \overline{m} نرخ تولید گونه nام، \overline{n} آمار \overline{n} نرخ مولد و n، آنتالیی، $\overline{w_n}$ نرخ حرارت حاصل از احتراق، $\overline{p u_i'' T_n''}$ نرا گرمایی رینولدزی و v_n سرعت نفوذ گونه nام است[۱۸].

برای بستن سیستم معادلات حاکم بر جریان مغشوش، لازم است تنشهای رینولدزی مدل و معادلات مربوط به آنها درنظر گرفته شوند. برای این منظور، در کار حاضر، از مدل ۵-k' SST استفاده شده، که جزو مدلهای اغتشاشی ^۲ RANS دومعادلهای است. این مدل برای هریک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاش، *k*، و فرکانس اغتشاش، *ش*، یک معادله انتقال حل می کند و لزجت اغتشاشی را بهوسیله آن دو متغیر تخمین میزند. به این ترتیب ضعف مدل ٤- لا در نزدیکی مرز جامد در می کند و لزجت اغتشاش، *س* یک معادله انتقال حل می کند و لزجت اغتشاشی را بهوسیله آن دو متغیر تخمین میزند. به این ترتیب ضعف مدل ٤- لا در نزدیکی مرز جامد در می کند و لزجت اغتشاشی سال به می و در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی ۵- لا در نزدیکی مرز جامد در مدل های خانواده ۵- می برطرف می شود[۱۹]. مدل ۵- SST در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی ۵- لا در مواصل دور از مرز مراد از مدل اغتشاشی ۵- لا سی ای مدل ۵- این می می در از مرز مدل می می در می می در می می در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی ۵- لا در محل می می در می می در می می در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی ۵- لا در مراد می می در می می در می در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی ۵- له در مدل بهره می مدل ۱۹ در از مرز مرز مدل اغتشاشی ۵- استفاده می کند و به این ترتیب از دقت مدل ۵- او سرعت مدل ۶- اد در محل مناسب هر مدل بهره می برد. همچنین، این مدل از یک تابع دیواره توسعه یافته برای کاربردهای صنعتی استفاده می کند که برای دقتهای قابل قبول در چنین شبیه سازی هایی نیازی به شبکه خیلی ریز در نزدیکی مرز جامد ندارد[۲۰].

مدل احتراقی اتلاف گردابه ^۲ بهطور گسترده در کابردهای صنعتی استفاده شده (برای مثال در مراجع ۲۱،۱۴،۲و۲۲]) و در تحقیق حاضر نیز این مدل برای احتراق گاز طبیعی و اکسیژن استفاده شده است. مدل اتلاف گردابه فرض می کند واکنشهای شیمیایی خیلی سریعتر از فرآیندهای انتقال رخ میدهند و وقتی سوخت و اکسنده در ابعاد ملکولی با هم مخلوط شوند، بلافاصله واکنش داده و محصولات احتراق تولید میشوند. در این مدل، نرخ واکنش بهطور مستقیم به زمان مشخصه اختلاط ملکولی مربوط بوده و در جریانهای واکنشی مغشوش بهصورت ضریبی از نسبت نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی، ع، به انرژی جنبشی اغتشاشی، *k* تعریف میشود. از آنجا که در جریانهای غیرپیش آمیخته غلظت سوخت و اکسیژن در محفظه احتراق متغیر است، نرخ احتراق توسط نرخ اتلاف گردابههای گونهای کنترل میشود که غلظت متوسط گیری شده کوچکتری داشته باشد. بنابراین، در مدل اتلاف گردابه کمترین مقدار بین نرخهای اتلاف گردابههای سوخت و اکسیدکنده به عنوان نرخ

^{1.}Shear Stress Transport

^{2.} Raynods Averaged Navier-Stocks

^{3.} Eddy Dissipation Model

هدف از حل معادله انتقال مربوط به تشعشع، امحاسبه جمله چشمه تشعشع در معادله بقای انرژی و تعیین شار حرارت تشعشی روی مرزهاست[۱۴]. در تحقیق حاضر، برای شبیهسازی تشعشع از مدل DTRM استفاده شده است. این مدل ترکیبی از مدل های ناحیه ای، مونت کارلو و روش شار حرارتی بوده و نقایص آن ها را نیز تا حد زیادی برطرف کرده است [۲۳]. مدل تشعشعی DTRM بهخوبی قابل اعمال بر محفظههای احتراق با هندسههای پیچیده و بزرگ بوده و باتوجه به تنظیماتی که برای تعیین دقت مورد نیاز کاربر فراهم می کند، تطابق مناسبی بین سرعت و دقت محاسبات بهوجود می آورد [۲۴،۲۳،۸].

در حضور گرانش، هرگاه چگالی گاز تابعی از دما باشد، نیروی شناوری ۱ ایجاد می شود. در این حالت برای جریان گازهای ا درون کوره مدل شناوری کامل بهکاررفته است که نیروی شناوری را براساس تغییرات محلی چگالی، که آنهم طبق قانون گاز کامل به تغییرات دما مرتبط است، محاسبه می کند. این کار با افزودن جمله چشمه شناوری به معادلات بقای تکانه، طبق رابطه (۷)، انجام می شود:

(Y)

 $S_M = (\rho_{gas} - \rho_{ref})g$

در رابطه اخیر، ρ_{gas} چگالی گاز، ρ_{ref} چگالی مرجع و g شتاب گرانش است[۱۴].

مرزهای ناحیه احتراق عبارتاند از: مرز ورودی که محل قرار گرفتن مشعل و ورود شعله است، مرز خروجی که محل خروج گازهای احتراقی است، مرزمشترک با ناحیه لایه دیرگداز و مرز مشترک با ناحیه ذوب. تنظیم کلیه خواص جریان در مرز ورودی شامل توزیع مولفههای سرعت، دما، گونهها، انرژی جنبشی اغتشاش و فرکانس اغتشاش با برازش توابع چندجملهای به دادههای حاصل از شبیهسازی عددی مشعل مورد استفاده در کوره دوار ذوب آلومینیوم[۱۲] و با استفاده از زبان برنامهنویسی داخلی نرمافزار CFX بهنام CEL^۲ انجام شده است. روی مرز خروجی از شرط فشار نسبی صفر با قابلیت رخ دادن جریان برگشتی استفاده شده است، بهطوری که وقتی جریان از مرز خروجی به بیرون رود، فشار استاتیک برابر با صفر قرار داده شده و وقتی روی مرز خروجی جریان برگشتی رخ دهد، فشار کل جریان (براساس مولفه عمود برسطح خروجی جریان) برابر با صفر قرار داده می شود[۱۴]. 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 α=٠/۷ درنظر گرفته شده است[۲۵]. شرط مرزی روی مرز مشترک ناحیه α احتراق با ناحیه ذوب به صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور و ضریب صدور تشعشع از سطح آزاد مذاب نیز α -۰/۸ درنظ گرفته شده است[۱۲].

ناحيه ذوب و مدل آنتاليي - تخلخل

آلومینیوم مذاب محصول کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و مدلسازی فرایند ذوب آن بسیار مهم است. به این منظور، در تحقیق حاضر مدل آنتالیی-تخلخل به نرمافزار CFX افزوده شده است. این مدل براساس کارهای وولر و همکاران توسعه یافته[۱۵-۱۷] و بدون پرداختن به جزئیاتی مانند چگونگی تغییر در ساختار ملکولی، فرایند ذوب را مدل می کند. این مدل ذوب مطابق با الگوی گسستهسازی حجم محدود توسعه یافته است و اعمال آن به معادلات حاکم بهآسانی و با آفزودن جملات چشمه به معادلات بقای تکانه و بقای انرژی امکانپذیر است. از دیگر مزایای مدل ذوب آنتالپی-تخلخل آن است که برخلاف مدل ذوب به کاررفته توسط ژو و همکاران[۱۲،۲]، که فاز مذاب را نیز به صورت جامد فرض می کند، سیال بودن فاز مذاب و امکان القای حرکت از طریق دوران بدنه در فاز مذاب را نیز درنظر می گیرد.

فرآیند ذوب مواد ناخالص (مثلا آلیاژهای فلزی) در یک محدوده دمایی رخ میدهد، بدین ترتیب که ذوب شدن ماده جامد در دمای جامدشدگی ⁽، *T*، آغاز شده و تا رسیدن به مذاب کامل در دمای مایعشدگی ⁽، *T*، ادامه می بابد. در ناحیه بین

^{1.} Buoyancy force

^{2.} CFX Expression Language 3. Solidus temperature

^{4.} Liquidus temperature

^{1.} Mushy zone

درنظر گرفتن تغییرات گرمای نهان، ΔH، قابل بیان است. بدین منظور با جایگذاری رابطه آنتالپی کل در معادله بقای انرژی و استفاده از رابطه پیوستگی، رابطه (۱۴) حاصل میشود:

$$S_{h} = \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \Delta H) \tag{14}$$

که در این رابطه u بردار سرعت است. عبارت چشمه S_B مربوط به نیروی شناوری با استفاده از تقریب بوزینسک، که تغییرات دمایی چگالی را بهصورت خطی مدل میکند، بهصورت رابطه (۱۵) بیان میشود:

$$S_{B} = \rho_{ref} g \beta (T - T_{ref})$$

$$(1\Delta)$$

در رابطه (۱۵)، β ضریب انبساط حجمی است. در صورت مغشوش بودن جریان سیال، یک جمله چشمه به معادله انتقال مربوط به هر متغیر اغتشاشی اضافه میشود. برای متغیر اغتشاشی φ، جمله چشمه بهصورت رابطه (۱۶) بیان میشود[۲۶]:

$$S_{\varphi} = C \frac{(1-F)^2}{F^3} \varphi \tag{19}$$

پس از افزودن جملات چشمه S_h ، S_h و S_b و S_b به CFX، با استفاده از زبان برنامهنویسی داخلی CEL، یک مسئله معیار منطبق بر کارهای تجربی گائو و همکاران[۲۷] با استفاده از نرمافزار CFX حل و صحت مدل افزوده شده بررسی شده است. مسئله مذکور شامل فرایند ذوب فلز گالیوم خالص در یک حفره مستطیلی دوبعدی است. مرزهای سمت چپ و سمت راست حفره مذکور شامل فرایند ذوب فلز گالیوم خالص در یک حفره مستطیلی دوبعدی است. مرزهای سمت چپ و سمت راست دفره مذکور شامل فرایند ذوب فلز گالیوم خالص در یک حفره مستطیلی دوبعدی است. مرزهای سمت چپ و سمت راست حفره به تر تریب در دمای ثابت بالا و دمای ثابت پایین بوده و مرز بالایی و پایینی عایق هستند. در ابتدا فضای داخل حفره با دیواره دمای ثابت بالا و دمای ثابت پایین بوده و مرز بالایی و پایینی عایق هستند. در ابتدا فضای داخل حفره با دیواره دماپایین همدماست $(T_{Int}=T_L)$. برای آغاز فرآیند ذوب، دیواره سمت چپ ناگهان در دمای T_H قرار می گیرد. مشخصات حفره شرایط مرزی مسئله در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- طرحواره مسئله ذوب گالیوم در حفره دوبعدی، مشخصات هندسی و شرایط مرزی و اولیه[۲۷]

برای حل این مسئله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه بررسی شده و بین سه شبکه ۴۸×۴۶، ۲۸×۹۶ و ۹۶×۱۲۸، ۱۲۸ نتایج دو شبکه ۲۱۸×۹۶ و ۱۲۸×۲۸ نزدیک به هم بهدست آمده و شبکه ۲۸×۶۹ انتخاب شد. سپس استقلال حل از گام زمانی نیز بررسی و مشخص شد گامهای زمانی کمتر از ۰/۱ ثانیه تغییری در حل عددی بهوجود نمیآورند. پس از یافتن شبکه و گام زمانی مناسب، راستی آزمایی حل عددی انجام شده و نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی [۲۷] مقایسه شدند. شکل ۴ تغییرات دما در راستای محور افقی (X) روی خط مرکزی ۲۰۹۴۴۴۵m در زمانهای مختلف را نمایش میدهد که حاکی از تطابق مناسب حل عددی حاضر با دادههای تجربی مرجع [۲۷] و کارکرد مناسب مدل آنتالپی-تخلخل افزوده شده به نرمافزار CFX است.

^{1.} Gallium

ناحیه ذوب توسط مرز مشترک با نواحی احتراق و لایه دیرگداز محصور شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک با لایـه دیرگداز، بهصورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط عدم لغزش بوده و شرط مـرزی روی مـرز مشـترک بـا ناحیـه احتراق نیز بهصورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط لغزش آزاد تنظیم شده است.



شکل ۴- صحتسنجی مدل ذوب افزوده شده به CFX، نمودار تغییرات دما در راستای محور افقی (X) روی خط مرکزی ۲=۰/۰۴۴۴۵m در زمانهای ۴دقیقه، ۱۲ دقیقه، ۱۶دقیقه و ۲۰ دقیقه در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۲۷]

فرآيند سوزش آلومينيوم

آلومینیوم فلز فعالی است و بخشی از آن حین کارکرد کوره، با محیط اکسنده درون کوره واکنش داده و حرارت قابل توجهی آزاد میکند. برای کوره دوار درنظر گرفته شده در تحقیق حاضر، که قطعات آلومینیوم قراضه را ذوب میکند، ۲/۱۴ درصد جرمی از آلومینیوم بهدلیل سوزش ازدست میرود که منجر به آزادشدن ۸۵۴۰MJ انرژی در فضای کوره میشود. قسمت عمده این فرایند در ۸۱۰۰ ثانیه نخست کارکرد کوره رخ میدهد که بهدلیل عدم وجود سرباره کافی روی آلومینیوم است. در کار حاضر از مدل ارائهشده توسط مرجع [۱۲] استفاده میشود که اثر کاهش جرم ناشی از سوزش آلومینیوم را بهدلیل اندکبودن آن نادیده گرفته و رابطه (۱۷) را برای مقدار حرارت آزادشده بهخاطر سوزش آلومینیوم در گذر زمان ارائه داده است: (۱۷) $S_{BF} = 1.53 \times 10^{-15} t^2 + 7.45 \times 10^{-8} t^3 + 6.8 \times 10^{-5} t^2 + 0.107 t - 6.5 kW$ برصد از این حرارت در ناحیه احتراق و مابقی در ناحیه ذوب آزاد میشود که بهصورت جمله چشمه به معادله انرژی در این نواحی وارد میشود.

ملاحظات عددی و حل مسئله

برای حل عددی مسئله، لازم است معادلات توضیح داده شده در قسمتهای قبلی روی سلولهای شبکه عددی گسسته و حل شوند. جهت ایجاد شبکه محاسباتی روی این هندسه، برای نواحی ذوب و احتراق از سلولهای ششوجهی^۲ با ساختار با توزیع گرههای یکنواخت در جهت z و غیریکنواخت در جهات x و y استفاده شده است. به این ترتیب، بهدلیل اهمیت پیشبینی رفتار سیال در نزدیکی مرزهای ناحیه ذوب، محل قرار گرفتن مشعل و محل خروج محصولات احتراق، در این قسمتها از سلولهای

^{1.} Burn-Off

^{2.} Hexahedral

محاسباتی ریزتری استفاده شده است. بهدلیل هندسه نسبتا پیچیده، برای لایه دیرگداز از سلولهای چهاروجهی برای تولید یک شبکه بی سازمان استفاده شده است. شایان ذکر است این ناحیه جامد بوده و حل معادله هدایت حرارت حاکم بر آن روی شبکه بیسازمان حساسیتی ایجاد نمیکند. مدلهای استفادهشده عبارتاند از مدل اغتشاشی SST k-۵، مدل احتراقی EDM و مدل تشعشی DRTM با ۳۲پرتو^۲، مدل شناوری کامل برای ناحیه احتراق و تقریب بوزینسک برای نیروی شناوری در ناحیه ذوب. گسستهسازی مکانی معادلات با الگوی دقت بالا^۳ و گسستهسازی زمانی معادلات بهروش اولر مرتبه دو انجام 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 مسئله روی هریک از آنها مقایسه شده است. شکل ۵ تاریخچه مقدار مذاب تولیدی را نشان میدهد. مشاهده می شود نتایج دو شبکه با ۱۴۸۰۱۲ و ۲۸۸۶۰۳ سلول تفاوت چندانی با هم ندارد. با توجه به زمان کارکرد طولانی کوره دوار ذوب آلومینیوم (۴/۵ ساعت برابر با ۱۶۲۰۰ ثانیه) و هزینه بالای محاسبات ناپایا، ضروری است از بزرگترین گام زمانی ممکن استفاده شود. اما زمان مشخصه پدیدههای احتراق و توربولانس کوچک بوده و استفاده از گامهای زمانی بزرگ از ابتدای شبیهسازی باعث واگرایی حل عددی می شود. برای رفع این مشکل، مقدار گام زمانی در دقایق ابتدایی کارکرد کوره کوچک انتخاب شده و بهتدریج افزایش می یابد. پس از آزمون و خطا، افزایش اندازه گامزمانی بهنحوی انجام شده است که مقدار ماندههای کمادلات کمتر از ۲۰۰۲ باقی بماند. در تحقیق حاضر، ۶۰ ثانیه نخست حل عددی با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه، ۶۰ ثانیه دوم با گام ۲/۰۴ ثانیه، ۴ دقیقه بعدی با گام زمانی ۱/۱ ثانیه، ۱۰ دقیقه بعدی با گام زمانی ۵/ ثانیه و زمان باقیمانده با گام زمانی، ۵/۰ یا ۱ یا ۴ ثانیه انجام شده است. شکل ۶ تغییرات زمانی دمای متوسط ناحیه ذوب حاصل از انجام محاسبات با گامهای زمانی نهایی ۵/۰ ثانیه، ۱ ثانیه یا ۴ ثانیه را نشان میدهد. با مقایسه این نتایج، مشاهده می شود گام زمانی نهایی ۱ ثانیه با دقت قابل قبولی نسبت به گام ۵/۰ثانیه نتایج را پیش بینی کرده است. بنابراین، شبکه با ۱۴۸۰۱۲سلول محاسباتی و گام زمانی ۱ ثانیه بهعنوان شبکه و گام زمانی نهایی (بزرگترین) در کار حاضر انتخاب شدهاند. روشهای عددی همواره نیازمند صحتسنجی و مقایسه با دادههای تجربیاند تا از میزان درستی و تطابق آنها با واقعیت اطمینان حاصل شود. داده تجربی در دسترس برای شبیهسازی عددی کوره مورد نظر تحقیق حاضر، دمای گازهای خروجی حین کارکرد کوره است که در مرجع [۱۲] گزارش شده است. مقایسه دادههای تحربی و عددی در شکل ۷ انجام شده است.



شکل ۵ – نمودار مقدار مذاب تولیدی بهمنظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به تعداد سلولهای محاسباتی

- Ray
 High resolution scheme
- 4. Residuals

^{1.} Tetrahedral



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



شکل ۷- مقایسه دمای متوسط مرزخروجی کوره با دادههای تجربی [۱۲] و صحت سنجی حل عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم در کار حاضر

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، مقدار دمای متوسط گازهای خروجی محاسبه شده توسط روش عددی همواره بیشتر از داده های تجربی است. دلیل این امر استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه در تحقیق حاضر است، چرا که در این مدل واکنش یک مرحله ای احتراق کامل اکسیژن و گاز طبیعی به کار رفته و به این ترتیب نسبت به احتراق غیر کامل، که در عمل روی می دهد، حرارت بیشتری در فضای کوره آزاد شده است. از دیگر دلایل اختلاف به وجود آمده می توان به مدل استفاده شده برای سوزش آلومینیوم و مدت زمان اعمال آن اشاره کرد که روی نتایج عددی در زمان های کمتر از ۵۰۰۰ ثانیه اثر گذار بوده است. به این ترتیب، در کار حاضر متوسط درصد خطای نسبی نتایج عددی نسبت به داده های تجربی برابر با ۲۰/۲۴ درصد به دست می آید که با توجه به فرآینده ای پیچیده و متعددی که حین کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم رخ می دهد، مقدار مناسبی به نظر می رسد. با پذیرفتن این مقدار خطا، می توان از مدل ارائه شده و تنظیمات عددی مربوط به آن برای مطالعات موردی

نتایج حل عددی

سرعت تهیه آلومینیوم مذاب مهمترین پارامتر کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم است. بهبود کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم به کاهش سرعت تهیه مذاب و کاهش هزینههای تولید منجر میشود. به این منظور تاثیر دو پارامتر سرعت دوران بدنه کوره و انتقال حرارت تشعشعی در فضای کوره بر سرعت تهیه آلومینیوم مذاب در این بخش بررسی شدهاند.

تاثیر دوران بر کارکرد کوره

دوران بدنه کوره دوار ذوب آلومینیوم، علاوهبر بهبود انتقال حرارت به ناحیه ذوب، از طریق جذب حرارت در ناحیه احتراق و دفع آن به ناحیه ذوب، باعث ایجاد چرخش در مذاب تولیدی در ناحیه ذوب شده و علاوهبر ایجاد انتقال حرارت جابهجایی حرارت، به اختلاط بهتر مذاب و یکدستشدن کیفیت آن نیز کمک میکند. شکل ۸ گردابههای ایجادشده در ناحیه ذوب در مقطع TT=Z در ثانیه ۱۶۰۰۰۶ از انشان میدهد که تمام آلومینیوم جامد موجود در کوره به مذاب تبدیل شده است. بردارهای سرعت مماس بر صفحه TT=Z حاکی از القای سرعت از بدنه دوار به فلز مذاب بوده و ایجاد جریان چرخشی در ناحیه ذوب را نشان میدهد (بدنه ساعتگرد میچرخد).

ازجمله پارامترهای موثر بر مدت زمان تهیه مذاب سرعت دوران بدنه کوره است. بهمنظور شناسایی سرعت دورانی بهینه بدنه، مدت زمان لازم جهت تهیه مذاب با سرعتهای دورانی صفر، ۲/۴، ۱/۳، ۱/۳، ۱/۳، ۱/۶ و ۲ دور بر دقیقه شبیهسازی و نتایج در شکل ۹ با هم مقایسه شدهاند. همانطور که بیان شد، دوران نقش مهمی در سرعت تهیه آلومینیوم مذاب دارد و با القای حرکت در آلومینیوم مذاب، انتقال حرارت به آن را بهبود میبخشد. اما مقدار بهینهای برای سرعت دورانی بدنه وجود دارد، چرا که سرعت دورانی زیاد زمان تماس لایه دیرگداز با آلومینیوم و بنابراین انتقال حرارت از لایه دیرگداز به آلومینیوم را کاهش میدهد و به این ترتیب سرعت تهیه مذاب نیز کاهش مییابد. مطابق با شکل ۹، برای کوره درنظر گرفته شده در تحقیق حاضر، سرعت دورانی ۲/دوربردقیقه مناسبترین سرعت است. شایان ذکر است سرعت معمول دوران بدنه، یعنی ۱/۳۳۳pm، به سرعت ایدئال نزدیک بوده و زمان تهیه مذاب با این سرعت دورانی تنها ۶ دقیقه طولانیتر از سرعت ۲/۱ دوربردقیقه است.



شکل ۸ – بردارهای سرعت مماس بر صفحه Z=۲m در ناحیه ذوب در زمان *t*=۱۶۰۰۰s (بدنه حول محور Z ساعتگرد، دوران می کند)



شکل ۹- منحنی تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی که کاهش زمان تهیه مذاب با افزایش سرعت دوران بدنه و سپس افزایش زمان تهیه مذاب با دورشدن از سرعت ۱/۲rpm را نشان میدهد

بررسی نقش تشعشع در کارکرد کوره

به دلیل دمای کارکرد بالا، هنگام شبیهسازی کورهها لازم است در کنار انتقال حرارت جابهجایی، انتقال حرارت تشعشعی نیز لحاظ شود. تشعشع حرارت بین گازهای درون کوره، لایه دیرگداز و مواد داخل کوره انجام میشود. بهدلیل دمایشعله بالاتر، تشعشع در کورههایی که بهجای مشعلهای هوا-سوخت از مشعلهای اکسیژن-سوخت استفاده میکنند موثرتر است[۳].

بهمنظور بررسی اثر تشعشع در کارکرد کوره، تغییرات زمانی حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب از نتایج حل عددی استخراج و در شکل ۱۰ ترسیم شده است. در این شکل، نقش تعیینکننده تشعشع در کارکرد کوره در مقابل انتقال حرارت جابهجایی مشهود است. همچنین مشاهده می شود در ۸۱۰۰ ثانبه نخست کارکرد کوره حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب زیادتر است که به دلیل آزادشدن انرژی حاصل از سوزش آلومینیوم است. برای توصیف کمّی اثر تشعشع و دستیابی به مقدار حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب، مساحت محصور به منحنیهای آهنگ مصرف انرژی در شکل ۱۰ و محور زمان محاسبه شده است. به این ترتیب تا ثانیه ۱۶۲۰۰ام، که زمان دستیابی به آلومینیوم مذاب با دمای متوسط ۲۰۶K و پایان کارکرد کوره مورد نظر است، ۲۶۸۰MJ حرارت به ناحیه ذوب وارد شده است. انتقال ۸۴ درصد از این مقدار حرارت توسط تشعشع، ۱۰/۶ درصد آن توسط جابهجایی حرارت و مابقی از طریق مرز مشترک با لایه دیرگداز انجام شده است. مقدار قابل توجه تشعشع حرارت نشاندهنده غالب ودن این نوع انتقال حرارت در کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم است.



شکل ۱۰- مقایسه نرخ حرارت ورودی به ناحیه ذوب از طریق تشعشع و جابهجایی از ناحیه احتراق و هدایت از طریق لایه دیرگداز

مشعلهای اکسیژن-سوخت طول شعله کوچکتر و دمای شعله بالاتری دارند و بنابراین استفاده از آنها به گرمایش بیش از حد نقاط نزدیک به شعله منجر میشود. افزایش نقش تشعشع در کورهها هنگام استفاده از این مشعلها بهدلیل کمک به یکنواختتر شدن دما در فضای کوره امری مطلوب است[۳]. این کار میتواند بهوسیله اندودن سطح داخلی دیرگداز با لایهای نازک از پوششهای با ضریب صدور تشعشع بالا^۱ انجام شود. چنین پوششهایی بهراحتی قابل اعمال بر انواع دیرگدازها بوده و ضریب صدور تشعشع از سطح دیرگداز را تا ۲/۹ افزایش میدهند[۲۸]. با استفاده از پوششی با ۲۸۵ه از ساع در گردازها بوده و حل عددی، مشخص شد سهم انتقال حرارت تشعشعی به ۸۸/۵ درصد افزایش و سهم انتقال حرارت جابهجایی به ۵/۵ درصد کاهش یافته است. دلیل کاهش انتقال حرارت تشعشعی به ۵/۸۸ درصد افزایش و سهم انتقال حرارت جابهجایی به ۵/۵ درصد درون کوره است. شکل ۱۱ متوسط دما در مرز خروجی را در دو حالت با و بدون استفاده از پوشش با هم مقایسه کرده است. با افزایش ضریب صدور لایه دیرگداز، انرژی بیشتری از شعله به مذاب منتقل شده و منجر به کاهش دمای گازهای گرم

^{1.} High-emissivity coatings



شکل ۱۱- مقایسه دمای گازهای خروجی از کوره در دو حالت با و بدون استفاده از پوشش تشعشعی برای لایه دیرگداز

جمعبندی و نتیجهگیری

در تحقیق حاضر کوره دوار ذوب آلومینیوم با درنظر گرفتن دوران بدنه، تشکیل فاز مذاب و اثر دوران بر ایجاد حرکت در مذاب بهصورت عددی شبیهسازی شد. سپس، بهعنوان دو پارامتر موثر بر کارکرد این کوره، اثر سرعت دوران بدنه و تشعشع در فضای کوره بررسی شد. نتایج حاصل از حل عددی عبارتاند از:

- ۱- در مقایسه با کوره ساکن، دوران بدنه، بهدلیل ایجاد انتقال حرارت جابهجایی در ناحیه ذوب، فرآیند ذوب را تا حد زیادی بهبود می بخشد.
- ۲- بهدلیل کم شدن زمان انتقال حرارت از لایه دیرگداز به ناحیه ذوب در سرعتهای دورانی بالاتر، برای کارکرد کوره دوار ذوب فلز یک سرعت دورانی بهینه وجود دارد که درمورد کوره دوار ذوب آلومینیوم مورد نظر در تحقیق حاضر، این سرعت برابر با ۱/۲rpm بهدست آمده است.
- ۳- تشعشع، انتقال حرارت غالب در کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و با افزایش ضریب صدور تشعشع لایه دیرگداز از ۰/۷ به ۰/۸۵ درصد افزایش می ابد.
- ۴- با افزایش سهم تشعشع در فضای کوره، دمای شعله کاهش یافته و گارهای خروجی از کوره با دمای پایین تری کوره را ترک میکنند. این موضوع باعث بهبود شرایط کارکرد کوره و کاهش ۲۰ دقیقهای فرآیند ذوب میشود.

منابع

- 1. R. D. Naranjo, J. Kwon, R. Majumdar and W. T. Choate, *Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry*, Technical Report, Columbia (Maryland), US Department of Energy, 2005.
- B. Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter and U. M. J. Boin, "Modelling of Aluminium Scrap Melting in a Rotary Furnace," *Minerals Engineering*, 19, 2006, pp. 299-308.
- 3. C. E. Baukal, Oxygen-Enhanced Combustion, Boca Raton, CRC Press, 1998.
- 4. A. P. Watkinson and J. K. Brimacombe, "Heat Transfer in a Direct-Fire Rotary Kiln: II. Heat Flow Results and Their Interpretation," *Metallurgical Transactions B*, 9, No. 2, 1978, pp. 209-219.
- 5. Y. K. Wu and M. Lacroix, "Numerical Simulation of the Melting of Scrap Metal in a Circular Furnace," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 22, No. 4, 1995, pp. 517-525.
- 6. A. R. Khoei, I. Mastersb and D. T. Gethin, "Numerical Modelling of the Rotary Furnace in Aluminum Recycling Processes," *Journal of Materials Processing Technology*, 139, 2003, pp. 567-572.
- 7. B. Zhou, Y. Yang and M. A. Reuter, "Process Modeling of Aluminum Scrap Melting in Molten Salt and Metal Bath in a Rotary Furnace," in: A. T. Tabereaux (Eds.), *Light Metals*, Charlotte, TMS, 2004.
- 8. B. Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter and U. M. J. Boin, "CFD Based Process Modelling of a Rotary Furnace for Aluminum Scrap Melting," *Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries*, Trondheim, Norway, 2005.
- 9. Y. Zhang, P. V. Barr and T. R. Meadowcroft, "Continuous Scrap Melting in a Short Rotary Furnace," *Minerals Engineering*, 21, 2008, pp. 178-189.
- 10. K. K. Mishra, A. Kumar and A. K. Misra, "A Variant of NSGA-II for Solving Priority Based Optimization Problems," *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Shanghai, China, 2009.

- R. K. Jain and R. Singh, "Modelling, Optimisation and Simulation of Rotational Speed, Fuel Consumption and Melting Rate in Rotary Furnace," *Indian Foundry Journal*, 58, No.3, 2012, pp. 37-43.
- 12. B. Zhou, *Modelling the Melting of Post-Consumer Scrap within a Rotary Melting Furnace for Aluminium Recycling*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, 2005.
- 13. ANSYS CFX Tutorials, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
- 14. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
- 15. V. R. Voller, "A Heat Balance Integration Method Based on an Enthalpy Formulation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, No. 3, 1987, pp. 604-607.
- V. R. Voller, M. Cross and N. C. Markatos, "An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change," International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24, 1987, pp. 271-284.
- 17. V. R. Voller and C. Parakash, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection/Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, No. 8, 1987, pp. 1709-1719.
- 18. T. Poinsot and D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Second Edition, Philadelphia, Edwards, 2005.
- 19. F. R. Menter, "Zonal Two Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows," *The 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics and Lasers Conference*, Orlando, U. S. A., 1993.
- 20. F. R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry, "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," in: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers, (Eds.), *Turbulence, heat and mass transfer 4*, Begell House, Inc., West Redding, 2003, pp. 625-632.
- 21. B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," in *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1977, pp. 719-729.
- 22. C. J. Hoogendoorn, C. L. Koster and J. A. Wieringa, "Computational Modelling of Turbulent Flow, Combustion and Heat Transfer in Glass Furnaces," *Sadhana*, 19, No. 5, 1994, pp. 723-749.
- 23. F. C. Lockwood and N. G. Shah, "A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures," *The 18th Symposium (International) on Combustion*, Waterloo, Canada, 1981.
- 24. A. H. Al-Abbas and J. Naser, "Computational Fluid Dynamic Modelling of a 550 MW Tangential Furnace under Different Operating Conditions," 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Islamic University of Technology, Dhaka, Bangladesh, December 2012.
- 25. M. A. Tiamarov, F. A. Garifullin and D. Z. Davletbaeva, "Davletbaeva, Emissivity of Aluminosilicate Refractories," *Journal of Engineering Physics*, 53, No. 3, 1987, pp. 1027-1031.
- 26. ANSYS Fluent User's Guide, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
- 27. C. Gau and R. Viskanta, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall," *Journal of Heat Transfer*, 108, 1986, pp. 174-181.
- 28. Bureau of Energy Efficiency, Energy Efficiency in Thermal Utilities, Second Edition, Ministry of Power of India, 2005.
- 29. G. J. Heynderickxa and M. Nozawa, "High-Emissivity Coating on Reactor Tubes and Furnace Walls in Steam Cracking Furnace," *Chemical Engineering Science*, 59, 2004, pp. 5657-5662.

English Abstract

Improving the Performance of an Aluminum Rotary Furnace using Numerical Simulation

Mojtaba Rahimpour¹, Kiumars Mazaheri¹ and Seyed Hossein Seyedein²

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (Received: 2014.1.25, Received in revised form: 2014.5.24, Accepted: 2014.5.25)

Rotary aluminum furnace is used to recycle aluminum from scrap. This is a complex process and consists of many different phenomena such as aluminum smelting and burn-off, gas phase turbulent combustion and radiation in a rotary drum. In this research, a model is presented which divides the furnace into three zones, according to the distinct phenomenon happening in each zone. The three zones are refractory lining, combustion zone and melting zone. Only heat can be transferred through zones' interfaces and no mass transfer is allowed. Numerical results indicated that molten aluminum is highly affected by furnace rotation and rotation has a significant effect on aluminum melting time. In addition, the rotational speed of 1.2rpm leads to the minimum melting time. The results also showed that radiation is the dominant heat transfer mechanism inside the furnace and 84% of the total heat flux received by melting zone is due to radiation. This portion of radiation heat transfer increases to 88.5% by increasing radiation emissivity of refractory lining from 0.7 to 0.85. As a result, the temperature of exhaust gases decreases which means better performance of the furnace. Therefore, the furnace operation time decreases by 20 minutes.

Keywords: Aluminum rotary furnace, Modeling, CFD, Forced convection, Radiation