

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

مجتبی رحیم‌پور^۱، کیومرث مظاهری^۲ و سیدحسین سیدین^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، mojtaba.rahimpour@modares.ac.ir

۲- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (نویسنده مخاطب)، kiumars@modares.ac.ir

۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، seyedein@iust.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۳/۳/۳، پذیرش: ۹۳/۳/۴)

کوره دوار ذوب آلومینیوم برای بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه به کار می‌رود. کارکرد این کوره فرایندی پیچیده و شامل پدیده‌های گوناگونی است که مهم‌ترین 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 می‌کند. بین این نواحی امکان تبادل جرم وجود نداشته و تنها انتقال حرارت ممکن است. حل عددی مسئله نشان داد تهیه آلومینیوم مذاب کاملاً تحت تاثیر دوران بدنه بوده و القای حرکت در آلومینیوم مذاب، باعث تسریع فرآیند ذوب می‌شود. همچنین، در کنار اهمیت نقش دوران بدنه بر سرعت بخشیدن به فرآیند ذوب آلومینیوم، سرعت دورانی ۱/۲ دور بر دقیقه بدنه کوره منجر به حداقل شدن زمان تهیه مذاب می‌شود. سپس، نقش غالب تشعشع در انتقال حرارت درون کوره در مقابل جابه‌جایی حرارت بررسی و مشاهده شد ۸۴ درصد از انتقال حرارت درون فضای کوره از طریق تشعشع انجام می‌شود. با افزایش ضریب صدور لایه دیرگداز از ۰/۷ به ۰/۸۵ این مقدار به ۸۸/۵ درصد افزایش و دمای گازهای درون کوره کاهش می‌یابد که در نتیجه کارایی کوره بهبود یافته و فرآیند ذوب ۲۰ دقیقه زودتر پایان می‌یابد.

کلیدواژه‌گان: کوره دوار ذوب آلومینیوم، مدل‌سازی، دینامیک سیالات محاسباتی، جابه‌جایی اجباری، تشعشع

مقدمه

کوره‌ها از مصرف‌کننده‌گان عمده انرژی در صنایع‌اند و بهبود شرایط کارکرد آن‌ها مستقیماً 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 آلایندگی و کاهش مصرف سوخت باعث شده است در کوره‌های دوار ذوب آلومینیوم مدرن، به‌جای هوا، از اکسیژن برای احتراق سوخت استفاده شود [۲، ۳]. کاربرد این کوره بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه^۲ است [۲].

علی‌رغم 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 خشک‌کن 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 به شدت به انتقال حرارت جابه‌جایی در قسمت‌های ذوب‌شده بستگی دارد [۵]. خوبی 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 می‌یابد [۶]. ژو و همکاران، در سال ۲۰۰۴، یک کوره دوار ذوب و بازیافت آلومینیوم به ظرفیت ۱۷ تن را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بدون لحاظ‌کردن دوران بدنه شبیه‌سازی کردند. ایشان برای لحاظ‌کردن فرآیند ذوب آلومینیوم، از مدل تعادل تجمعی^۱ استفاده کرده و با مشخص کردن توزیع اندازه قطعات آلومینیوم ورودی به کوره، شرایط ذوب یک کره آلومینیومی کوچک را به مجموعه قطعات آلومینیوم تعمیم دادند. در این تحقیق، آلومینیوم مذاب به‌صورت فاز جامدی که تنها هدایت حرارت در آن رخ می‌دهد، 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 ۳۰۰م، به‌عنوان حالت بهینه اعمال گام زمانی، حل عددی را سرعت بخشیدند. همچنین، با مقایسه مدل‌های اغتشاشی $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG تفاوت چندانی در نتایج مشاهده نکردند، حال آنکه مدل تشعشی 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 در نظر 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 الکتریکی با ظرفیت مشابه ۴۵ درصد صرفه اقتصادی دارد [۹].

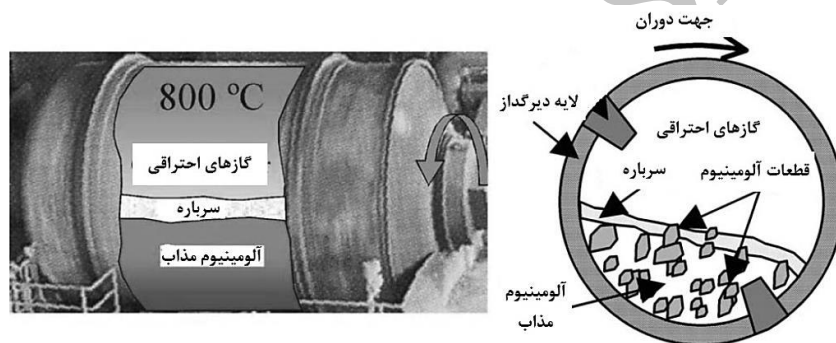
میشرا و همکاران، در سال ۲۰۰۹، با اندازه‌گیری زمان تولید چدن مذاب و نرخ مصرف سوخت برای سرعت‌های دورانی مختلف و میانمایی داده‌های موجود، سرعت دوران بهینه یک کوره دوار ذوب چدن با ظرفیت تولید ۲۰۰ کیلوگرم چدن مذاب را ۱/۱ دوربردقیقه گزارش دادند [۱۰]. جین و سین، در سال ۲۰۱۲، با توجه به کارهای مرجع [۱۰] و با لحاظ‌کردن شرایط حداقل مصرف انرژی، محدودیت‌های متالورژیکی و تولید حداقل آلاینده‌ها، سرعت دوران بهینه بدنه کوره مذکور را ۱/۴ دوربردقیقه درونیابی کردند [۱۱].

از میان مدل‌های ترمودینامیکی یا عددی مرور شده، تنها مرجع [۶] است که مستقیماً 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 [۸، ۷، ۱۲] انتخاب شده و در تکمیل کار ایشان، شبیه‌سازی عددی این کوره با لحاظ‌کردن 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 دارا بودن زبان برنامه‌نویسی داخلی نسبتاً ساده CEL 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 [۱۵-۱۷] به آن افزوده شده است.

1. Population Balance Model
2. Discrete Transfer Radiation Model

معرفی کوره دوار ذوب آلومینیوم

کوره دوار ذوب آلومینیوم 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 نیرو محرکه دورانی به صورت 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 انتهای دیگر کوره خارج می‌شوند. کوره مورد نظر تحقیق حاضر، 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 خروجی دود ۶/۹ متر است. بدنه با سرعت ۱/۳۳ دور بر دقیقه دوران می‌کند (شکل ۱). ظرفیت این کوره ۱۷ تن قطعات آلومینیوم قراضه است که از این مقدار، ۱۰ تن آلومینیوم مذاب بازیافت می‌شود. برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی با اکسیژن توسط مشعل اکسیژن-سوخت^۳ استفاده می‌شود. هرنویت تهیه مذاب توسط این کوره ۴/۵ ساعت طول می‌کشد [۱۲]. لایه دیرگداز، علاوه بر جلوگیری از اتلاف حرارت درون کوره به محیط اطراف، به صورت یک بازیاب انرژی^۴ 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 می‌دهند. بنابراین، دوران بدنه کوره علاوه بر اختلاط بهتر و کمک به تولید مذاب با ترکیب یکنواخت‌تر، باعث بهبود انتقال حرارت به مذاب نیز می‌شود [۷].



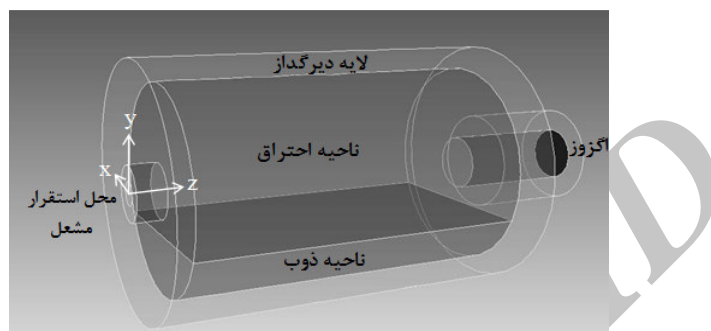
شکل ۱- کوره دوار ذوب آلومینیوم و مقطع عرضی آن [۱۲]

شبیه‌سازی عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم

کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم شامل احتراق غیرپیش‌آمیخته 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 می‌سازد. مدلی که در تحقیق حاضر ارائه شده است، برای در نظر گرفتن تمامی پدیده‌های ذکر شده، کوره دوار ذوب آلومینیوم را به سه ناحیه با فرایندهای مجزا تقسیم می‌کند. 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 می‌کنند و تبادل جرم بین نواحی صورت نمی‌گیرد. با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX 14.5، می‌توان 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
4. 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 303K ، فشار 1atm ، بدون سرعت و هوا با ترکیب $23/2$ درصد جرمی اکسیژن و $76/8$ 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:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_s c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ρ ، c_p ، λ و T و U_s به ترتیب چگالی، ظرفیت حرارتی، 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 $\nabla \cdot (\rho U_s c_p T)$ ناشی از اعمال دوران بر این ناحیه بوده و بیان‌کننده 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 صورت استوانه دواری که حول محور تقارن خود دوران می‌کند، تعریف می‌شود. لایه بیرونی بدنه با محیط بیرون ارتباط دارد و شرط مرزی آن عبارت است از جابه‌جایی حرارت با محیط بیرون روی سطح خارجی بدنه با $h=15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ و دمای $T=303\text{K}$ [۱۲]. شرط مرزی روی مرز مشترک بین ناحیه لایه دیرگداز و نواحی ذوب و احتراق به صورت شار حرارتی یکسان بین نواحی مشترک است.

ناحیه 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 (آگزوز) از آن خارج می‌شود. همانند بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر، احتراق در کوره دوار ذوب آلومینیوم به صورت غیرپیش‌آمیخته و مغشوش است. همچنین، تبادل حرارت جابه‌جایی و تشعشعی بین گازهای درون کوره و لایه داخلی بدنه و سطح آزاد مذاب نیز باید در نظر 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 گونه‌ها به همراه معادله حالت‌اند. شکل متوسط‌گیری شده این معادلات به صورت زیر است (علامت \sim نشان‌دهنده متوسط‌گیری زمانی و $\bar{\sim}$ نشان‌دهنده متوسط‌گیری فاور است):

بقای جرم:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = 0 \quad (2)$$

بقای تکانه:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j'') + \bar{G}_i \quad (3)$$

بقای گونه n ام:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_n)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_n)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{\rho} D_n \frac{\partial \tilde{Y}_n}{\partial x_i} - \bar{\rho} u_i \tilde{Y}_n'' \right] + \bar{\omega}_n \quad (4)$$

بقای انرژی:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h})}{\partial x_i} = \bar{\omega}_T + \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \bar{\rho} u_i \tilde{h}'' \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \sum_{n=1}^N V_{n,i} Y_n h_n \right) \quad (5)$$

$$\frac{D\bar{p}}{Dt} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + u_i'' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (6)$$

در روابط (۲) تا (۶)، u مولفه سرعت، u' نوسانات سرعت، p فشار، τ_{ij} تانسور تنش، $\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j''$ تنش‌های رینولدزی، G نیروی حجمی، Y_n کسر جرمی گونه n ام، D_n ضریب نفوذ گونه n ام، $\bar{\rho} u_i \tilde{Y}_n''$ شار اغتشاشی کسر جرمی گونه n ام، $\bar{\omega}_n$ نرخ تولید گونه n ام، h آنتالپی، $\bar{\omega}_T$ نرخ حرارت حاصل از احتراق، $\bar{\rho} u_i \tilde{h}''$ نرخ شار گرمایی رینولدزی و V_n سرعت نفوذ گونه n ام است [۱۸].

برای بستن سیستم معادلات حاکم بر جریان مغشوش، لازم است تنش‌های رینولدزی مدل و معادلات مربوط به آن‌ها در نظر گرفته شوند. برای این منظور، در کار حاضر، از مدل SST $k-\omega$ استفاده شده، که جزو مدل‌های اغتشاشی RANS^۱ دو معادله‌ای است. این مدل برای هریک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاش، k و فرکانس اغتشاش، ω ، یک معادله انتقال حل می‌کند و لزجت اغتشاشی را به وسیله آن دو متغیر تخمین می‌زند. به این ترتیب ضعف مدل $k-\varepsilon$ در نزدیکی مرز جامد در مدل‌های خانواده $k-\omega$ برطرف می‌شود [۱۹]. مدل SST $k-\omega$ در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی $k-\omega$ و در فواصل دور از مرز جامد از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند و به این ترتیب از دقت مدل $k-\omega$ و سرعت مدل $k-\varepsilon$ در محل مناسب هر مدل بهره می‌برد. همچنین، این مدل از یک تابع دیواره توسعه یافته برای کاربردهای صنعتی استفاده می‌کند که برای دقت‌های قابل قبول در چنین شبیه‌سازی‌هایی نیازی به شبکه خیلی ریز در نزدیکی مرز جامد ندارد [۲۰].

مدل احتراقی اتلاف گردابه^۲ به طور گسترده در کاربردهای صنعتی استفاده شده (برای مثال در مراجع [۲۱، ۱۴، ۲۲]) و در تحقیق حاضر نیز این مدل برای احتراق گاز طبیعی و اکسیژن استفاده شده است. مدل اتلاف گردابه فرض می‌کند 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 به طور مستقیم به زمان مشخصه اختلاط ملکولی مربوط بوده و در جریان‌های واکنشی مغشوش به صورت ضریبی از نسبت نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی، ω ، به انرژی جنبشی اغتشاشی، k ، تعریف می‌شود. از آنجا که در جریان‌های غیرپیش‌آمیخته غلظت سوخت و اکسیژن در محفظه احتراق متغیر است، نرخ احتراق توسط نرخ اتلاف گردابه‌های گونه‌ای کنترل می‌شود که غلظت متوسط‌گیری شده کوچک‌تری داشته باشد. بنابراین، در مدل اتلاف گردابه کمترین مقدار بین نرخ‌های اتلاف گردابه‌های سوخت و اکسیدکننده به عنوان نرخ واکنش انتخاب می‌شود [۲۱، ۱۴].

1. Shear Stress Transport
2. Raynods Averaged Navier-Stocks
3. Eddy Dissipation Model

هدف از حل معادله انتقال مربوط به تشعشع، محاسبه 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 مدل‌های ناحیه‌ای، مونت کارلو و روش شارحرارتی بوده و نقایص آن‌ها را نیز تا حد زیادی برطرف کرده است [۲۳]. مدل تشعشی DTRM به‌خوبی قابل اعمال بر محفظه‌های احتراق با هندسه‌های پیچیده و بزرگ بوده و با توجه به تنظیماتی که برای تعیین دقت مورد نیاز کاربر فراهم می‌کند، تطابق مناسبی بین سرعت و دقت محاسبات به‌وجود می‌آورد [۲۴، ۲۳، ۸].

در حضور گرانش، هرگاه چگالی گاز تابعی از دما باشد، نیروی شناوری^۱ ایجاد می‌شود. در این حالت برای جریان گازهای 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 می‌کند. این کار با افزودن جمله چشمه شناوری به معادلات بقای تکانه، طبق رابطه (۷)، انجام می‌شود:

$$S_M = (\rho_{gas} - \rho_{ref})g \quad (7)$$

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، مرز مشترک 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 بر سطح خروجی جریان) برابر با صفر قرار داده می‌شود [۱۴]. شرط مرزی روی مرز مشترک با ناحیه احتراق به‌صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور، شرط عدم لغزش و ضریب صدور تشعشی لایه دیرگداز $\alpha=0.7$ در نظر گرفته شده است [۲۵]. شرط مرزی روی مرز مشترک ناحیه احتراق با ناحیه ذوب به‌صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور و ضریب صدور تشعشع از سطح آزاد مذاب نیز $\alpha=0.8$ در نظر گرفته شده است [۱۲].

ناحیه ذوب و مدل آنتالپی-تخلخل

آلومینیوم مذاب محصول کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و مدل‌سازی فرایند ذوب آن بسیار مهم است. به این منظور، در تحقیق حاضر مدل آنتالپی-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 می‌کند. این مدل ذوب مطابق با الگوی گسسته‌سازی حجم محدود توسعه یافته است و اعمال آن به معادلات حاکم به‌آسانی و با افزودن جملات چشمه به معادلات بقای تکانه و بقای انرژی امکان‌پذیر است. از دیگر مزایای مدل ذوب آنتالپی-تخلخل آن است که برخلاف مدل ذوب به‌کاررفته توسط ژو و همکاران [۱۲، ۲]، که فاز مذاب را نیز به‌صورت جامد فرض می‌کند، سیال بودن فاز مذاب و امکان القای حرکت از طریق دوران بدنه در فاز مذاب را نیز در نظر می‌گیرد.

فرآیند ذوب مواد ناخالص (مثلاً آلیاژهای فلزی) در یک محدوده دمایی رخ می‌دهد، بدین ترتیب که ذوب شدن ماده جامد در دمای جامدشدگی^۳، T_S ، آغاز شده و تا رسیدن به مذاب کامل در دمای مایع‌شدگی^۴، T_L ، ادامه می‌یابد. در ناحیه بین

1. Buoyancy force
2. CFX Expression Language
3. Solidus temperature
4. Liquidus temperature

دو دمای T_L و T_S ناحیه موسوم به ناحیه خمیری^۱ به وجود می‌آید که ترکیب ماده در آن مخلوطی از فازهای جامد و مایع است [۱۵]. برای اعمال آنتالپی-تخلخل، از مفهوم آنتالپی کل استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۸) مجموع آنتالپی محسوس، h و آنتالپی نهان، ΔH است [۱۶، ۱۵]:

$$H = h + \Delta H \quad (8)$$

آنتالپی محسوس به دلیل اختلاف دمای ماده نسبت به یک حالت مرجع به وجود می‌آید و معیاری از افزایش انرژی داخلی ماده به خاطر جذب انرژی و افزایش دماست و با رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (9)$$

در رابطه (۹)، h_{ref} آنتالپی مرجع و T_{ref} دمای مرجع است. آنتالپی نهان نیز بخشی از انرژی جذب شده توسط ماده است که صرف تغییر فاز می‌شود و با رابطه (۱۰) توصیف می‌شود:

$$\Delta H = f(T)L \quad (10)$$

$f(T)$ تابع دمایی آنتالپی بوده و L گرمای نهان ذوب ماده است. تابع دمایی آنتالپی به نحوی تعریف می‌شود که با تشخیص محل فازهای جامد یا مایع یا خمیری، حرارت لازم برای تهیه مذاب را به رابطه (۸) وارد کند. این کار با توجه به دمای هر نقطه و تعریف کسر مایع به عنوان شاخصی برای حضور فاز مایع، طبق رابطه (۱۱) انجام می‌شود [۱۷، ۱۵]:

$$f(T) = \begin{cases} 1 & , T \geq T_L \\ F & , T_L > T \geq T_S \\ 0 & , T < T_S \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، F کسر مایع بوده و بسته به اینکه نقطه مورد نظر در چه فازی قرار گرفته باشد، مقداری بین ۱ و صفر اختیار می‌کند. وولر رابطه (۱۲) را برای بیان کسر مایع پیشنهاد داده است [۱۷]:

$$F = \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \quad (12)$$

با استفاده از کسر مایع، جمله‌های چاه یا چشمه به نحوی به معادلات حاکم بر مسئله افزوده می‌شوند که پس از تشخیص هریک از نواحی جامد، مذاب یا خمیری، حل مسئله در هر لحظه در سه قسمت انجام شود [۱۵]:

- حل قسمت کاملاً مذاب که در آن معادلات جریان سیال و انرژی کلاسیک بدون تغییر حل می‌شوند.
 - حل ناحیه خمیری که میزان تاثیر فاز جامد موجود در هر نقطه از آن ناحیه توسط کسر مایع مشخص شده و جمله‌های چشمه اثرگذار می‌شوند.
 - حل ناحیه جامد که در آن تنها معادله انرژی به صورت معادله هدایت حرارت حل می‌شود.
- با فرض فلز مذاب به عنوان سیال نیوتونی و تراکم‌ناپذیر، معادلات حاکم بر مسئله ذوب عبارت‌اند از معادله بقای جرم، معادلات بقای تکانه تغییر یافته و معادله بقای انرژی تغییر یافته که تغییر به وجود آمده در معادلات مذکور به صورت افزودن جملات چشمه است [۱۵]. جملات چشمه وارد شده به معادلات بقای تکانه خطی مشابه جمله‌های چشمه در شبیه‌سازی محیط متخلخل‌اند. با الگوبرداری از رفتار سیال در محیط متخلخل و جایگزینی ضریب تخلخل با کسر مایع، جمله‌های چشمه مربوط به معادلات بقای تکانه خطی در ناحیه خمیری به دست می‌آیند:

$$S_n = C \frac{(1-F)^2}{F^3} u_n \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، n اندیس نشان دهنده هریک از جهت‌های اصلی، u_n بیانگر مولفه‌های سرعت در جهت‌های اصلی معادله تکانه و C ثابت ناحیه خمیری است که عددی از مرتبه بزرگی 10^5 است [۱۵]. عبارت چشمه مربوط به بقای انرژی، S_n نیز با

1. Mushy zone

در نظر 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:

$$S_h = \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (u \Delta H) \quad (14)$$

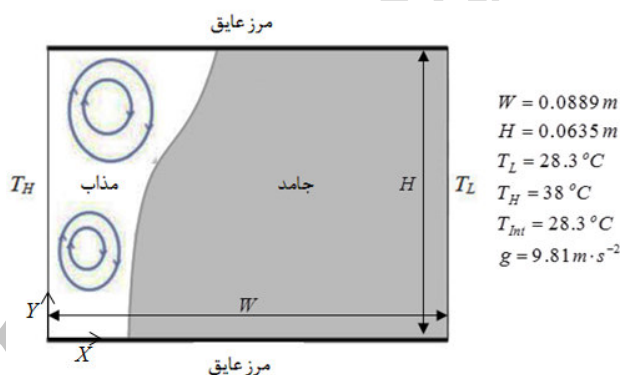
که در این رابطه u بردار سرعت است. عبارت چشمه S_B مربوط به نیروی شناوری با استفاده از تقریب بوزینسک، که تغییرات دمایی چگالی را به صورت خطی مدل می‌کند، به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌شود:

$$S_B = \rho_{ref} g \beta (T - T_{ref}) \quad (15)$$

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 به صورت رابطه (۱۶) بیان می‌شود [۲۶]:

$$S_\phi = C \frac{(1-F)^2}{F^3} \phi \quad (16)$$

پس از افزودن جملات چشمه S_h ، S_B و S_ϕ 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^۱ خالص 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 همدماست ($T_{int}=T_L$). برای آغاز فرآیند ذوب، دیواره سمت چپ ناگهان در دمای T_H قرار می‌گیرد. مشخصات حفره و شرایط مرزی مسئله در شکل ۳ آورده شده است.

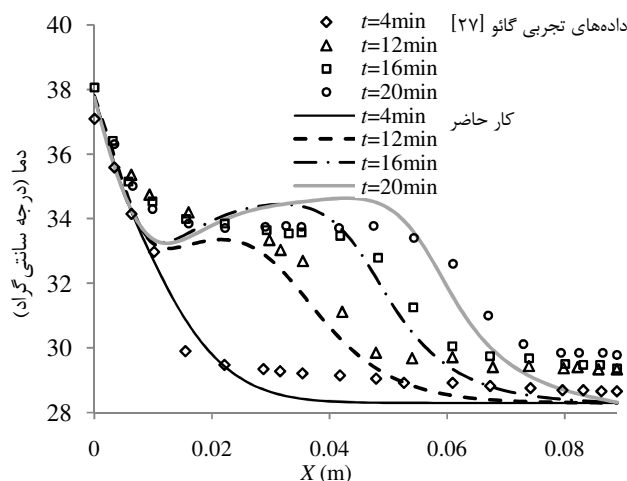


شکل ۳- طرحواره مسئله ذوب گالیوم در حفره دوبعدی، مشخصات هندسی و شرایط مرزی و اولیه [۲۷]

برای حل این مسئله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه بررسی شده و بین سه شبکه 48×64 ، 96×128 و 128×196 ، نتایج دو شبکه 96×128 و 128×196 نزدیک به هم به دست آمده و شبکه 96×128 انتخاب شد. سپس استقلال حل از گام زمانی نیز بررسی و مشخص شد گام‌های زمانی کمتر از 0.1 ثانیه تغییری در حل عددی به وجود 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 $Y=0.04445m$ 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 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.



شکل ۴- صحت‌سنجی مدل ذوب افزوده شده به CFX، نمودار تغییرات دما در راستای محور افقی (X) روی خط مرکزی $Y=0/04445m$ در زمان‌های ۴ دقیقه، ۱۲ دقیقه، ۱۶ دقیقه و ۲۰ دقیقه در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۲۷]

فرآیند سوزش آلومینیوم

آلومینیوم فلز فعالی است و بخشی از آن حین کارکرد کوره، با محیط اکسندۀ درون کوره واکنش داده و حرارت قابل توجهی آزاد می‌کند. برای کوره دوار در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، که قطعات آلومینیوم قراضه را ذوب می‌کند، ۲/۱۴ درصد جرمی از آلومینیوم به دلیل سوزش^۱ ازدست می‌رود که منجر به آزاد شدن $8540 MJ$ انرژی در فضای کوره می‌شود. قسمت عمده این فرایند در ۸۱۰۰ ثانیه نخست کارکرد کوره رخ می‌دهد که به دلیل عدم وجود سرباره کافی روی آلومینیوم است. در کار حاضر از مدل ارائه شده توسط مرجع [۱۲] استفاده می‌شود که اثر کاهش جرم ناشی از سوزش آلومینیوم را به دلیل اندک بودن آن نادیده گرفته و رابطه (۱۷) را برای مقدار حرارت آزاد شده به خاطر سوزش آلومینیوم در گذر زمان ارائه داده است:

$$S_{BF} = 1.53 \times 10^{-15} t^5 - 2.28 \times 10^{-11} t^4 + 7.45 \times 10^{-8} t^3 + 6.8 \times 10^{-5} t^2 + 0.107 t - 6.5 \text{ kW} \quad (17)$$

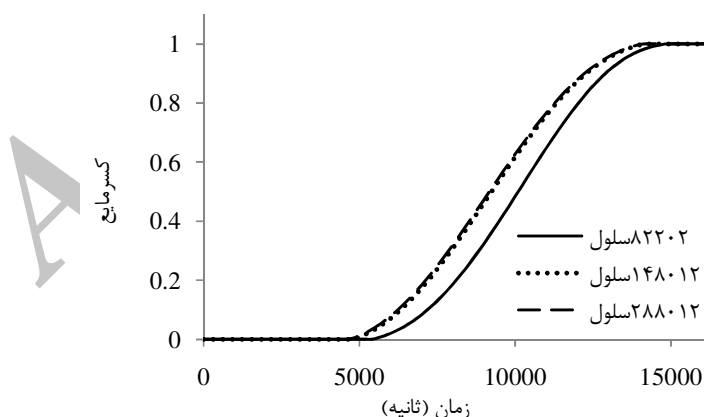
۸۰ درصد از این حرارت در ناحیه احتراق و مابقی در ناحیه ذوب آزاد می‌شود که به صورت جمله چشمه به معادله انرژی در این نواحی وارد می‌شود.

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، به دلیل اهمیت پیش‌بینی رفتار سیال در نزدیکی مرزهای ناحیه ذوب، محل قرار گرفتن مشعل و محل خروج محصولات احتراق، در این قسمت‌ها از سلول‌های

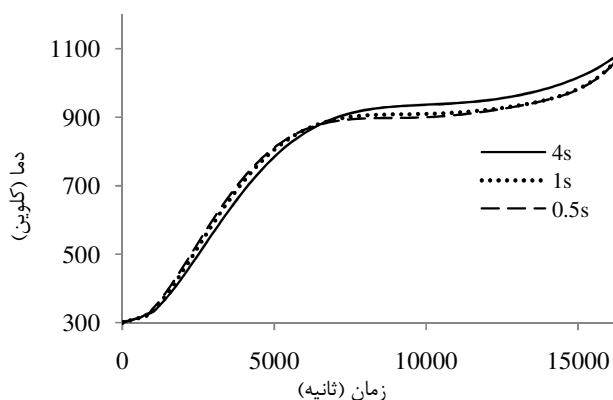
1. Burn-Off
2. Hexahedral

محاسباتی ریزتری استفاده شده است. به دلیل هندسه نسبتاً پیچیده، برای لایه دیرگداز از سلول‌های چهاروجهی^۱ برای تولید یک شبکه بی‌سازمان 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 استفاده شده عبارت‌اند از مدل اغتشاشی SST k- ω ، مدل احتراقی EDM و مدل تشعشی DRTM با ۳۲ پرتو^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 به روش 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 هر یک از آن‌ها مقایسه شده است. شکل ۵ تاریخچه مقدار مذاب تولیدی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود 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 می‌شود. برای رفع این مشکل، مقدار گام زمانی در دقایق ابتدایی کارکرد کوره کوچک انتخاب شده و به تدریج افزایش می‌یابد. پس از آزمون و خطا، افزایش اندازه گام زمانی به نحوی انجام شده است که مقدار مانده‌های^۴ کلیه معادلات کمتر از 10^{-4} باقی بماند. در تحقیق حاضر، ۶۰ ثانیه نخست حل عددی با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه، ۶۰ ثانیه دوم با گام ۰/۰۴ ثانیه، ۴ دقیقه بعدی با گام زمانی ۰/۱ ثانیه، ۱۰ دقیقه بعدی با گام زمانی ۰/۵ ثانیه و زمان باقی‌مانده با گام زمانی ۰/۵ یا ۱ یا ۴ ثانیه انجام شده است. 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. با مقایسه این نتایج، مشاهده می‌شود گام زمانی نهایی ۱ ثانیه با دقت قابل قبولی نسبت به گام ۰/۵ ثانیه نتایج را پیش‌بینی کرده است. بنابراین، شبکه با ۱۴۸۰۱۲ سلول 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 تجربی و عددی در شکل ۷ انجام شده است.

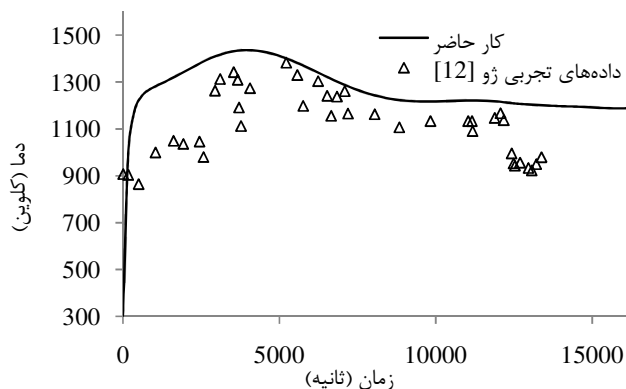


شکل ۵ - نمودار مقدار مذاب تولیدی به‌منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به تعداد سلول‌های محاسباتی

1. Tetrahedral
2. Ray
3. High resolution scheme
4. Residuals



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 [۱۲] و صحت‌سنجی حل عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم در کار حاضر

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار دمای متوسط گازهای خروجی محاسبه‌شده توسط روش عددی همواره بیشتر از داده‌های تجربی است. دلیل این امر استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه در تحقیق حاضر است، چرا که در این مدل واکنش یک‌مرحله‌ای احتراق کامل اکسیژن و گاز طبیعی به کار رفته و به این ترتیب نسبت به احتراق غیر کامل، که در عمل روی می‌دهد، حرارت بیشتری در فضای کوره آزاد شده است. از دیگر دلایل اختلاف به وجود آمده می‌توان به مدل استفاده شده برای سوزش آلومینیوم و مدت زمان اعمال آن اشاره کرد که روی نتایج عددی در زمان‌های کمتر از ۵۰۰۰ ثانیه اثرگذار بوده است. به این ترتیب، در کار حاضر متوسط درصد خطای نسبی نتایج عددی نسبت به داده‌های تجربی برابر با ۱۳/۲۴ درصد به دست می‌آید که با توجه به فرآیندهای پیچیده و متعددی که حین کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم رخ می‌دهد، مقدار مناسبی به نظر می‌رسد. با پذیرفتن این مقدار خطا، می‌توان از مدل ارائه شده و تنظیمات عددی مربوط به آن برای مطالعات موردی کوره دوار ذوب آلومینیوم استفاده کرد.

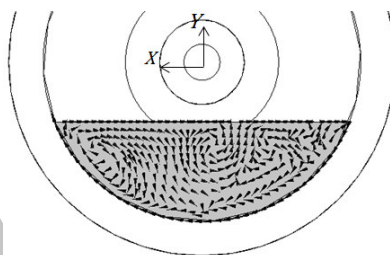
نتایج حل عددی

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.

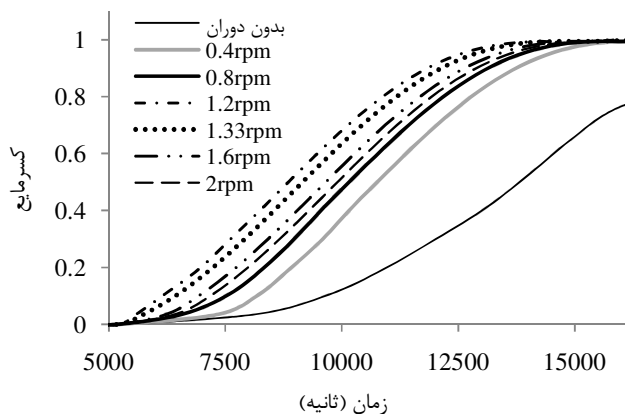
تأثیر دوران بر کارکرد کوره

دوران بدنه کوره دوار ذوب آلومینیوم، علاوه بر 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 علاوه بر ایجاد انتقال حرارت جابه جایی حرارت، به اختلاط بهتر مذاب و یکدست شدن کیفیت آن نیز کمک می کند. شکل ۸ گردابه های ایجاد شده در ناحیه ذوب در مقطع $Z=2m$ در ثانیه $t=16000s$ را نشان می دهد که تمام آلومینیوم جامد موجود در کوره به مذاب تبدیل شده است. بردارهای سرعت مماس بر صفحه $Z=2m$ حاکی از القای سرعت از بدنه دوار به فلز مذاب بوده و ایجاد جریان چرخشی در ناحیه ذوب را نشان می دهد (بدنه ساعتگرد می چرخد).

از جمله پارامترهای موثر بر مدت زمان تهیه مذاب سرعت دوران بدنه کوره است. به منظور شناسایی سرعت دورانی بهینه بدنه، مدت زمان لازم جهت تهیه مذاب با سرعت های دورانی صفر، 0.4 ، 0.8 ، 1.2 ، 1.33 ، 1.6 و 2 دور بر دقیقه شبیه سازی و نتایج در شکل ۹ با هم مقایسه شده اند. همان طور 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 می بخشد. اما مقدار بهینه ای برای سرعت دورانی بدنه وجود دارد، چرا که سرعت دورانی زیاد تماس لایه دیرگداز با آلومینیوم و بنابراین انتقال حرارت از لایه دیرگداز به آلومینیوم را کاهش می دهد و به این ترتیب سرعت تهیه مذاب نیز کاهش می یابد. مطابق با شکل ۹، برای کوره در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، سرعت دورانی 1.2 دور بر دقیقه مناسب ترین سرعت است. شایان ذکر است سرعت معمول دوران بدنه، یعنی 1.33 rpm، به سرعت ایدئال نزدیک بوده و زمان تهیه مذاب با این سرعت دورانی تنها ۶ دقیقه طولانی تر از سرعت 1.2 دور بر دقیقه است.



شکل ۸ - بردارهای سرعت مماس بر صفحه $Z=2m$ در ناحیه ذوب در زمان $t=16000s$ (بدنه حول محور Z ساعتگرد، دوران می کند)

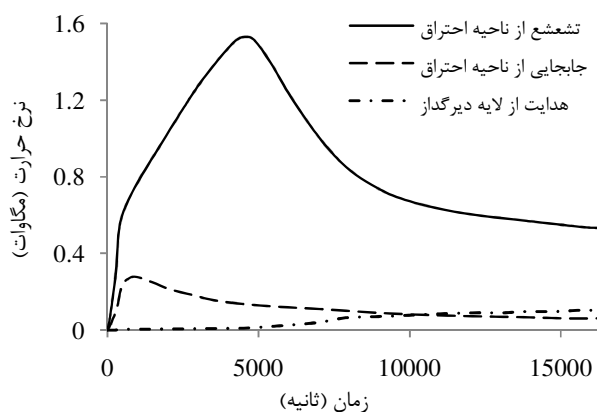


شکل ۹ - منحنی تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی که کاهش زمان تهیه مذاب با افزایش سرعت دوران بدنه و سپس افزایش زمان تهیه مذاب با دور شدن از سرعت 1.2 rpm را نشان می دهد

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. به دلیل دمای شعله بالاتر، تشعشع در کوره‌هایی که به‌جای مشعل‌های هوا-سوخت از مشعل‌های اکسیژن-سوخت استفاده می‌کنند موثرتر است [۳].

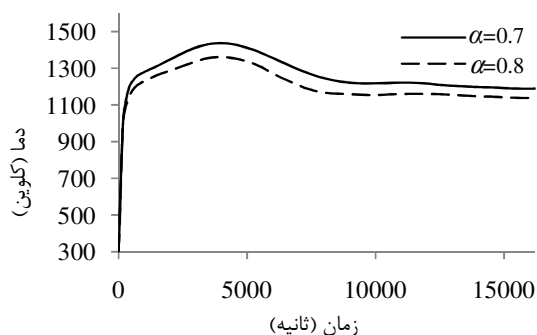
به‌منظور بررسی اثر تشعشع در کارکرد کوره، تغییرات زمانی حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب از نتایج حل عددی استخراج و در شکل ۱۰ ترسیم شده است. در این شکل، نقش تعیین‌کننده تشعشع در کارکرد کوره در مقابل انتقال حرارت جابه‌جایی مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود در ۸۱۰۰ ثانیه نخست کارکرد کوره حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب زیادتر است که به دلیل آزاد شدن انرژی حاصل از سوزش آلومینیوم است. برای توصیف کمی 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 ۱۶۲۰۰م، که زمان دستیابی به آلومینیوم مذاب با دمای متوسط ۱۰۶۰K و پایان کارکرد کوره مورد نظر است، ۱۶۶۸۰MJ 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 بودن 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 به دلیل کمک به یکنواخت‌تر شدن دما در فضای کوره امری مطلوب است [۳]. این کار می‌تواند به وسیله اندودن سطح داخلی دیرگداز با لایه‌ای نازک از پوشش‌های با ضریب صدور تشعشع بالا^۱ انجام شود. چنین پوشش‌هایی به راحتی قابل اعمال بر انواع دیرگدازها بوده و ضریب صدور تشعشع از سطح دیرگداز را تا ۰/۹ افزایش می‌دهند [۲۸]. با استفاده از پوششی با $\alpha=0/۸۵$ [۲۹] و بررسی نتایج حل عددی، مشخص شد سهم انتقال حرارت تشعشعی به ۸۸/۵ درصد افزایش و سهم انتقال حرارت جابه‌جایی به ۵/۳ درصد کاهش یافته است. دلیل کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی، یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در فضای کوره و کاهش دمای گازهای 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 خروجی از کوره می‌شود. به این ترتیب زمان تهیه مذاب نیز ۲۰ دقیقه کاهش می‌یابد.

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

جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر کوره دوار ذوب آلومینیوم با در نظر گرفتن دوران بدنه، تشکیل فاز مذاب و اثر دوران بر ایجاد حرکت در مذاب به صورت عددی شبیه سازی شد. سپس، به عنوان دو پارامتر موثر بر کارکرد این کوره، اثر سرعت دوران بدنه و تشعشع در فضای کوره بررسی شد. نتایج حاصل از حل عددی عبارتند از:

- ۱- در مقایسه با کوره ساکن، دوران بدنه، به دلیل ایجاد انتقال حرارت جابه جایی در ناحیه ذوب، فرآیند ذوب را تا حد زیادی بهبود می بخشد.
- ۲- به دلیل کم شدن زمان انتقال حرارت از لایه دیرگداز به ناحیه ذوب در سرعت های دورانی بالاتر، برای کارکرد کوره دوار ذوب فلز یک سرعت دورانی بهینه وجود دارد که در مورد کوره دوار ذوب آلومینیوم مورد نظر در تحقیق حاضر، این سرعت برابر با ۱/۲rpm به دست 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، سهم انتقال حرارت تشعشعی از ۸۴ درصد به ۸۸/۵ درصد افزایش می یابد.
- ۴- با افزایش سهم تشعشع در فضای کوره، دمای شعله کاهش یافته و گازهای خروجی از کوره با دمای پایین تری کوره را ترک می کنند. این موضوع باعث بهبود شرایط کارکرد کوره و کاهش ۲۰ دقیقه ای فرآیند ذوب می شود.

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.
2. 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.

11. 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.
16. 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. Poinsoot and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Second Edition, Philadelphia, Edwards, 2005.
19. F. R. Menter, "Zonal Two Equation $k-\omega$ 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