

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

مجتبی رحیم‌پور^{۱*}، کیومرث مظاهری^{۱**}، سیدحسین سیدین^{۲***}

۱- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک

۲- دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

کوره دوار ذوب آلومینیوم برای بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه به کار می‌رود. کارکرد این کوره فرآیندی پیچیده و شامل پدیده‌های گوناگونی است که مهمترین آنها ذوب و اکسایش آلومینیوم، احتراق مغشوش سوخت گازی و تشعشع در یک بدنه دوار هستند. 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 مساله 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 جابجایی حرارت تحقیق و مشاهده شد ۸۴٪ از انتقال حرارت درون فضای کوره از طریق مکانیزم تشعشع انجام می‌شود. با افزایش ضریب صدور لایه دیرگداز از ۰/۷ به ۰/۸۵ این مقدار به ۸۸/۵٪ افزایش و دمای گازهای درون کوره کاهش می‌یابد که در نتیجه کارایی کوره بهبود یافته و فرآیند ذوب ۲۰ دقیقه زودتر پایان می‌یابد.

کلیدواژگان: کوره دوار ذوب آلومینیوم، مدل‌سازی، دینامیک سیالات محاسباتی، جابجایی اجباری، تشعشع.

مقدمه

کوره‌ها از مصرف کننده‌گان عمده انرژی در صنایع هستند و بهبود شرایط کارکرد آن‌ها مستقیماً به کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های تولید منجر می‌شود. بعنوان جایگزین کوره‌های خم‌های یا بوت‌های، استفاده از کوره‌های دوار ذوب آلومینیوم (Aluminum Rotary Furnace) 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 بجای هوا از اکسیژن برای احتراق سوخت استفاده شود [۲ و ۳]. کاربرد این کوره بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه (Scrap) 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 مکانیزم انتقال حرارت تشعشع با سهم ۸۵٪ از کل انتقال حرارت، مکانیزم انتقال حرارت جابجایی چندان موثر نبوده و ۱۵٪ از انتقال حرارت درون کوره را به عهده دارد [۴]. وو و همکاران در سال ۱۹۹۵ با استفاده از مدل آنتالپی-تخلخل (Enthalpy-Prosity Model) فرآیند ذوب فلز در یک کوره ساکن را به صورت یک‌بعدی و دوبعدی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند فرض یک‌بعدی مناسب نبوده و همچنین سرعت ذوب آلومینیوم به شدت به مکانیزم انتقال حرارت جابجایی در قسمت‌های ذوب شده 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

* دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: mojtaba.rahimpour@modares.ac.ir)

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

*** دانشیار (ایمیل: seyedein@iust.ac.ir)

مکان‌های متفاوت شعله به دست‌آوردند 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 لحاظ کردن دوران بدنه شبیه‌سازی کردند. ایشان برای لحاظ کردن فرآیند ذوب آلومینیوم، از مدل تعادل تجمعی (Population Balance Model) 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 به صورت 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 ۳۰۰ ثانیه بعنوان حالت بهینه اعمال گام زمانی، حل عددی را سرعت بخشیدند. همچنین با مقایسه مدل‌های اغتشاشی $k-\epsilon$ و RNG $k-\epsilon$ تفاوت چندانی در نتایج مشاهده نکردند، حال آنکه مدل تشعشعی $DTRM^1$ را به دلیل دقت بالاتر، به مدل PI ترجیح دادند. نتایج حل عددی ایشان نشان داد بازده کوره در این حالت ۶۰٪ بوده و ۳۶٪ حرارت حاصل از احتراق سوخت توسط گازهای خروجی از کوره و ۴٪ آن توسط هدایت حرارت از بدنه به محیط بیرون به هدر 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 کرده‌است. این سه معادله که با دمای کوره به هم کوپل هستند، 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٪ صرفه اقتصادی دارد [۹]. میشر 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 دور بر دقیقه 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 دور بر دقیقه درونیایی کردند [۱۱].

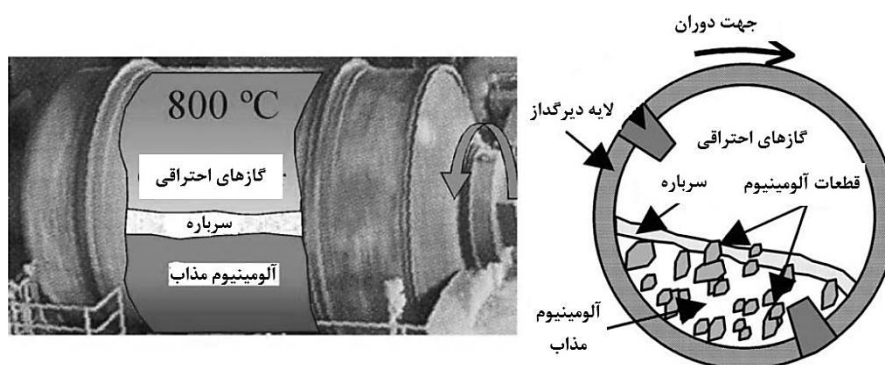
از میان مدل‌های ترمودینامیکی یا عددی مرور شده، تنها مرجع [۶] است که اثر دوران بدنه کوره را با ساده‌سازی بسیار سایر پارامترهای کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم لحاظ کرده است. پژوهش حاضر در ادامه کارهای ژو و همکاران [۷، ۸ و ۱۲] انجام شده و برای تکمیل تحقیقات ایشان، شبیه‌سازی عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم را با لحاظ کردن فرآیند تشکیل آلومینیوم مذاب و همچنین دوران بدنه کوره انجام داده است. برای این منظور از نرم‌افزار تجاری حلگر دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX 14.5 استفاده شده است. از آنجا که نرم‌افزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیند ذوب است، در کار حاضر مدل آنتالپی-تخلخل [۱۳-۱۵] به آن افزوده شده است.

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 (Refractory Lining) از جنس آلومین-سیلیکات (Alumina-Silicat) 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

¹ Discrete Transfer Model

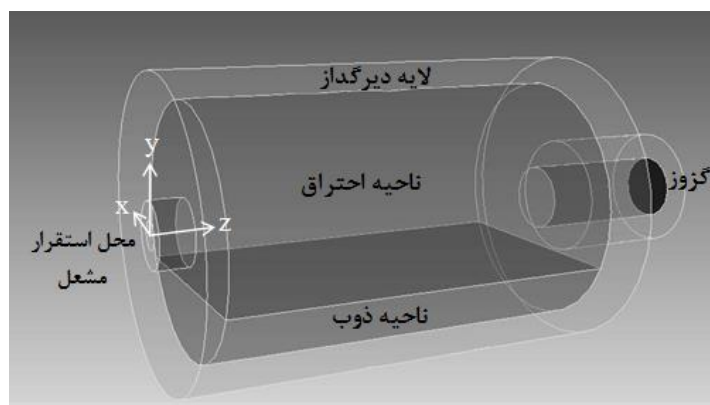
۶/۹ متر است. بدنه با سرعت ۱/۳۳ دور بر دقیقه دوران می‌کند (شکل ۱). ظرفیت این کوره ۱۷ تن قطعات آلومینیوم قراضه است که از این مقدار، ۱۰ تن آلومینیوم مذاب بازیافت می‌شود. برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی با اکسیژن توسط مشعل اکسیژن-سوخت (Oxy-Fuel Burner) استفاده می‌شود. هر نوبت تهیه 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 (Regenerator) 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 یکنواخت تر، 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 جابجایی در فضای داخل کوره، انتقال حرارت هدایت در لایه دیرگداز بدنه دوار، فرآیند ذوب فلز و انتقال حرارت جابجایی 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، کوره دوار ذوب آلومینیوم را به سه ناحیه با فرآیندهای مجزا تقسیم می‌کند. این نواحی عبارتند از ناحیه احتراق، ناحیه ذوب و ناحیه لایه دیرگداز و در شکل ۲ قابل مشاهده هستند. به این ترتیب مرزهای مشترک موجود عبارتند از سطح مشترک دو ناحیه ذوب و احتراق، سطح مشترک دو ناحیه احتراق و لایه دیرگداز و سطح مشترک دو ناحیه ذوب و احتراق. 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 دوناحیه مجاور، آنها را حل کرد [۱۶]. از آنجا که نرم‌افزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیندهای ذوب است، برای استفاده از آن در کار حاضر مدل آنتالپی-تخلخل ذوب 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 ۲/۲۳/۷۶/۸ جرمی اکسیژن و 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:

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

که در رابطه (۱) U_s و T به ترتیب چگالی، ظرفیت حرارتی، ضریب رسانش حرارت، دما و سرعت لایه دیرگداز هستند. جمله $\nabla \cdot (\rho U_s c_p T)$ ناشی از اعمال دوران بر این ناحیه بوده و بیان کننده حرارتی است که توسط لایه دیرگداز و حین دوران حمل می شود [۱۷]. 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 می کند تعریف می شود. 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 $T=303 \text{ K}$ [۱۲]. شرط مرزی روی مرز مشترک بین ناحیه لایه دیرگداز و نواحی ذوب و احتراق به صورت شار حرارتی یکسان بین نواحی مشترک می باشد.

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 (اگزوز) از آن خارج می شود. همانند بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر، احتراق در کوره دوار ذوب آلومینیوم به صورت غیرپیش آمیخته و مغشوش است. همچنین تبادل حرارت جابجایی 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 مومنتوم، معادله بقای انرژی، و معادلات بقای گونه ها به همراه معادله حالت هستند. شکل متوسط گیری شده این معادلات به صورت زیر است (علامت $^-$ نشان دهنده متوسط گیری زمانی و $^-$ نشان دهنده متوسط گیری فاور هستند):

- بقای جرم:

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

- بقای مومنتوم:

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

- بقای گونه h_n ام:

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

- بقای انرژی:

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

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

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 n ام، D_n ضریب نفوذ گونه n ام، $\overline{\rho u_i'' Y_n''}$ 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، $\overline{\rho u_i'' h''}$ نرخ شار گرمایی رینولدزی و V_n سرعت نفوذ گونه n ام هستند [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^v k- ω استفاده شده که جزو مدل‌های اغتشاشی RANS^۳ 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 بوسیله آن دو متغیر تخمین می‌زند [۱۹]. مدل SST k- ω ایرادهای مدل k- ϵ مانند ضعف در پیش‌بینی جریانهای رینولدز پایین مجاور مرز جامد، لزجت اغتشاشی زیاد و عدم کارایی در جریان‌های با چرخش زیاد را رفع کرده و برای جریان‌های داخلی مناسب است [۲۰].

مدل احتراقی اتلاف گردابه (Eddy Dissipation Model) به طور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته (برای مثال در مراجع [۲۱، ۲۲، ۱۷، ۲۱]) 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 مستقیماً به زمان مشخصه اختلاط ملکولی مربوط بوده و در جریان‌های واکنشی مغشوش به صورت ضریبی از نسبت نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی، ϵ ، 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 [۱۷ و ۲۱].

هدف از حل معادله انتقال مربوط به تشعشع، محاسبه جمله چشمه تشعشع در معادله بقای انرژی و تعیین شار حرارت تشعشی روی مرزهاست [۱۷]. در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی تشعشع از مدل DTRM^۴ 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 به خوبی قابل اعمال بر محفظه‌های احتراق با هندسه‌های پیچیده و بزرگ بوده و باتوجه به تنظیماتی که برای تعیین دقت مورد نیاز کاربر فراهم می‌کند، تطابق مناسبی بین سرعت و دقت محاسبات بوجود می‌آورد [۲۳ و ۲۴]. در حضور گرانش، هرگاه چگالی گاز تابعی از دما باشد نیروی شناوری (Buoyancy Force) ایجاد می‌شود. در این حالت برای جریان گازهای درون کوره مدل شناوری کامل بکاررفته است که نیروی شناوری را بر اساس تغییرات محلی چگالی که

^۲ Shear Stress Transport

^۳ Raynods Averaged Navier-Stocks

^۴ Discrete Transfer Model

آن هم طبق قانون گاز کامل به تغییرات دما مرتبط است، محاسبه می‌کند. این کار با افزودن جمله چشمه شناوری به معادلات بقای مومنتوم طبق رابطه (۷) انجام می‌شود:

$$S_M = (\rho_{gas} - \rho_{ref})g \quad (۷)$$

در رابطه اخیر ρ_{gas} چگالی گاز، ρ_{ref} چگالی مرجع و g شتاب گرانش است [۱۷].

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 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 برآزش 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 بنام CEL^۵ انجام شده است. روی مرز خروجی از شرط فشار نسبی صفر با قابلیت رخ دادن جریان برگشتی استفاده شده است، به طوری 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 (بر اساس مولفه عمود بر سطح خروجی جریان) برابر با صفر قرار داده می‌شود [۱۷]. 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 $\alpha=0.7$ در نظر گرفته شده است [۲۵]. 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 $\alpha=0.8$ در نظر گرفته شده است [۱۲].

ناحیه ذوب و مدل آنتالپی-تخلخل

آلومینیوم مذاب محصول کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و مدل‌سازی فرآیند 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 [۱۳-۱۵] و بدون پرداختن به جزئیاتی مانند چگونگی تغییر در ساختار ملکولی، فرآیند ذوب را مدل می‌کند. این کار با افزودن جملات چشمه به معادلات بقای مومنتوم و بقای انرژی انجام می‌شود.

فرآیند ذوب مواد ناخالص (مثلا آلیاژهای فلزی) در یک محدوده دمایی رخ می‌دهد، بدین ترتیب که ذوب شدن ماده جامد در دمای جامدشدگی (Solidus Temperature)، T_S ، آغاز شده و تا رسیدن به مذاب کامل در دمای مایع‌شدگی (Liquidus Temperature)، T_L ، ادامه می‌یابد. در ناحیه بین دو دمای T_S و T_L ناحیه موسوم به ناحیه خمیری (Mushy Zone) به وجود می‌آید که ترکیب ماده در آن مخلوطی از فازهای جامد و مایع است [۱۳]. برای اعمال این روش، از مفهوم آنتالپی کل استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۸) مجموع آنتالپی محسوس، h و آنتالپی نهان، ΔH است [۱۴ و ۱۳]:

$$H = h + \Delta H \quad (۸)$$

آنتالپی محسوس به دلیل اختلاف دمای ماده نسبت به یک حالت مرجع بوجود می‌آید و معیاری از افزایش انرژی داخلی ماده بخاطر جذب انرژی و افزایش دما است و با رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (۹)$$

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

$$\Delta H = f(T)L \quad (۱۰)$$

⁵ CFX Expression Language

$f(T)$ 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 بعنوان شاخصی برای حضور فاز مایع، طبق رابطه (۱۱) انجام می‌شود [۱۳ و 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 [۱۵]:

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

با استفاده از کسر مایع، ترم‌های چاه یا چشمه به نحوی به معادلات حاکم بر مساله افزوده می‌شوند که پس از تشخیص هریک از نواحی جامد، مذاب یا خمیری، حل مساله در هر لحظه در سه قسمت انجام شود [۱۳]:

- 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 ترم‌های چشمه اثرگذار می‌شوند.

- حل ناحیه جامد که در آن تنها معادله انرژی به صورت معادله هدایت حرارت حل می‌شود.

با فرض فلز مذاب بعنوان سیال نیوتونی و تراکم‌ناپذیر، معادلات حاکم بر مساله ذوب عبارتند از معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتوم تغییر یافته و معادله بقای انرژی تغییر یافته که تغییر بوجود آمده در معادلات مذکور به صورت افزودن جملات چشمه است [۱۳]. جملات چشمه وارد شده به معادلات بقای تکانه خطی مشابه جمله‌های چشمه در شبیه‌سازی محیط متخلخل هستند. با الگوبرداری از رفتار سیال در محیط متخلخل و جایگزینی ضریب تخلخل با کسر مایع، ترم‌های چشمه مربوط به معادلات بقای تکانه خطی در ناحیه خمیری بدست می‌آیند:

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

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

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

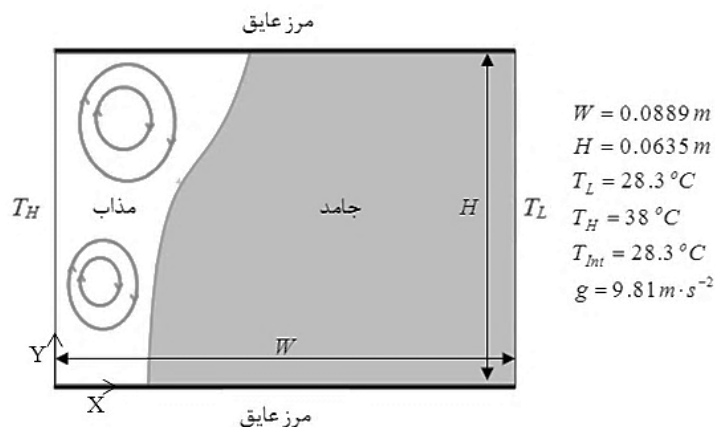
که در این رابطه \mathbf{u} بردار سرعت است. عبارت چشمه S_B مربوط به نیروی شناوری با استفاده از تقریب بوزینسک که تغییرات دمایی چگالی را به صورت خطی مدل می‌کند، رابطه (۱۵)، بیان می‌شود:

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

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 توربولانسی φ ، جمله چشمه به صورت رابطه (۱۶) بیان می‌شود [۲۶]:

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

پس از افزودن جملات چشمه S_h ، S_B و S_ϕ به CFX، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی داخلی CEL، یک مساله معیار منطبق بر کارهای تجربی گائو و همکاران [۲۷] با استفاده از نرم‌افزار CFX حل و صحت مدل افزوده شده بررسی شده‌است. مساله مذکور شامل فرآیند ذوب فلز گالیوم (Gallium) 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 مساله در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳ - طرحواره مساله ذوب گالیوم در حفره دو بعدی، مشخصات هندسی و شرایط مرزی و اولیه [۲۷].

برای حل این مساله 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 بدست 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 بوجود 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 $Y=0.04445 \text{ m}$ 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.

ناحیه ذوب توسط مرز مشترک با نواحی احتراق و لایه دیرگداز محصور شده‌است. 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.

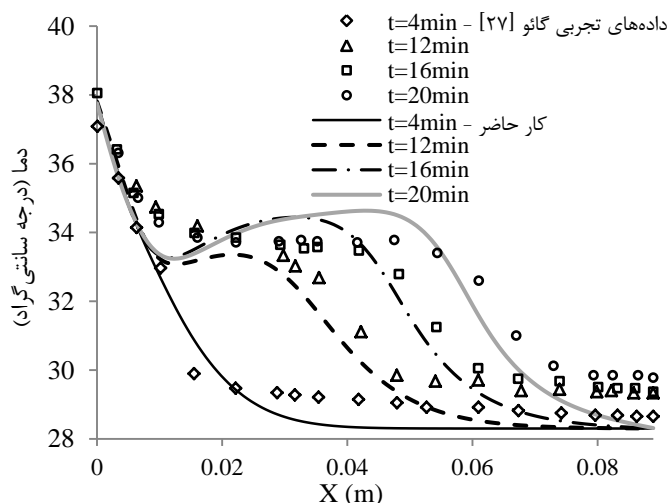
فرآیند سوزش آلومینیوم

آلومینیوم فلز فعالی است و بخشی از آن حین کارکرد کوره، با محیط اکسند درون کوره واکنش داده و حرارت قابل توجهی آزاد می‌نماید. برای کوره دوار در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر که قطعات آلومینیوم قراضه را ذوب می‌کند، $2/14\%$ جرمی از آلومینیوم به دلیل سوزش (Burn-Off) از دست می‌رود که منجر به آزاد شدن 8540 MJ انرژی در فضای کوره می‌شود. قسمت عمده این فرآیند در 8100 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 بخاطر سوزش آلومینیوم در گذر زمان ارائه داده است:

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

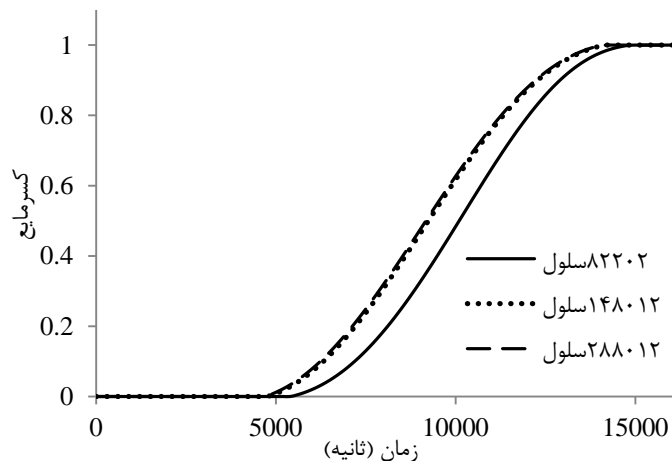
۸۰٪ از این حرارت در ناحیه احتراق و مابقی در ناحیه ذوب آزاد می‌شود که به صورت جمله چشمه به معادله انرژی در این نواحی وارد می‌گردد.



شکل ۴ - راست آزمایی 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].

ملاحظات عددی و حل مساله

برای حل عددی مساله، 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 (Hexahedral) منظم و برای لایه دیرگداز از سلول‌های چهاروجهی (Tetrahedral) نامنظم استفاده شده است. مدل‌های استفاده شده عبارتند از مدل اغتشاشی SST k- ω ، مدل احتراقی EDM و مدل تشعشی DRTM با ۳۲ پرتو (Ray)، مدل شناوری کامل برای ناحیه احتراق و تقریب بوزینسک برای نیروی شناوری در ناحیه ذوب. گسسته سازی مکانی معادلات با الگوی دقت بالا (High Resolution Scheme) و گسسته سازی 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 مساله 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 (Residuals) 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

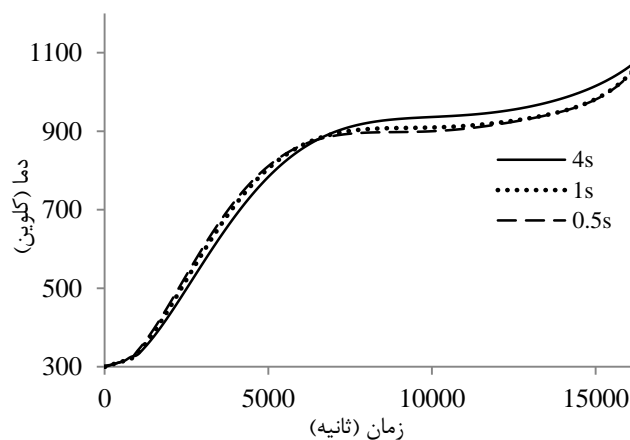


شکل ۵ - نمودار مقدار مذاب تولیدی به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به تعداد سلول‌های محاسباتی.

بعدی با گام زمانی ۰/۱ ثانیه، ۱۰ دقیقه بعدی با گام زمانی ۰/۵ ثانیه و زمان باقی مانده 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 بعنوان شبکه و گام زمانی نهایی مناسب (بزرگترین) در کار حاضر انتخاب شده‌اند. روش‌های عددی همواره نیازمند صحت‌آزمایی و مقایسه با داده‌های تجربی هستند 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. شکل ۷ این نتایج را باهم مقایسه کرده و حاکی از تطابق مناسب داده‌های تجربی و نتایج حاصل از حل عددی می‌باشد. بنابراین می‌توان از مدل ارائه شده و تنظیمات عددی مربوط به آن برای مطالعات موردی کوره دوار ذوب آلومینیوم استفاده کرد.

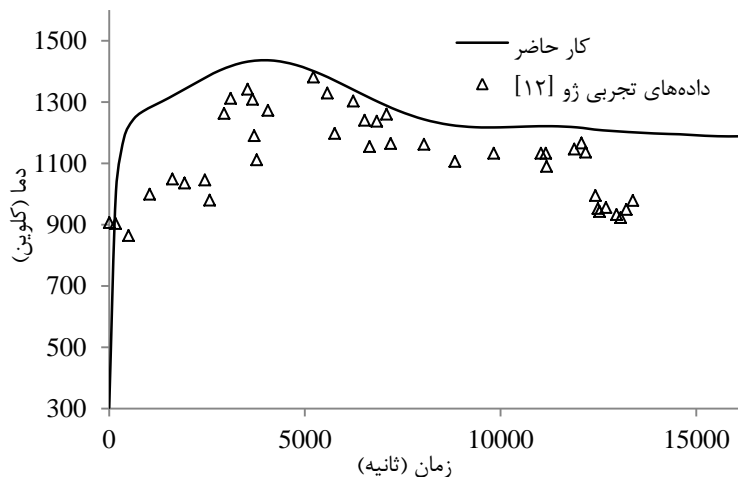
نتایج حل عددی

سرعت تهیه آلومینیوم مذاب مهمترین پارامتر کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم است. بهبود کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم به



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

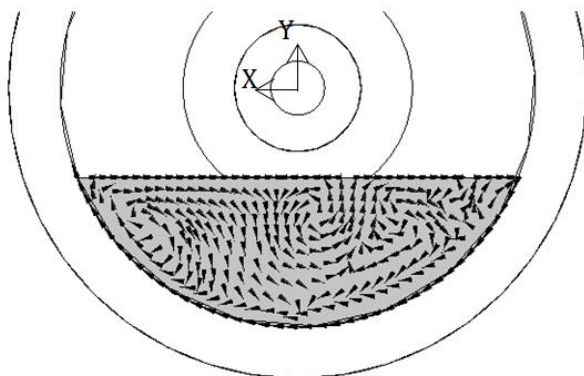
کاهش سرعت تهیه مذاب و کاهش هزینه‌های تولید منجر می‌شود. به این منظور تاثیر دو پارامتر سرعت دوران بدنه کوره و انتقال حرارت تشعشعی در فضای کوره بر سرعت تهیه آلومینیوم مذاب در این بخش بررسی شده‌اند.



شکل ۷ - مقایسه دمای متوسط در مرز خروجی کوره با داده‌های تجربی [۱۲] و صحت‌آزمایی حل عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم در کار حاضر.

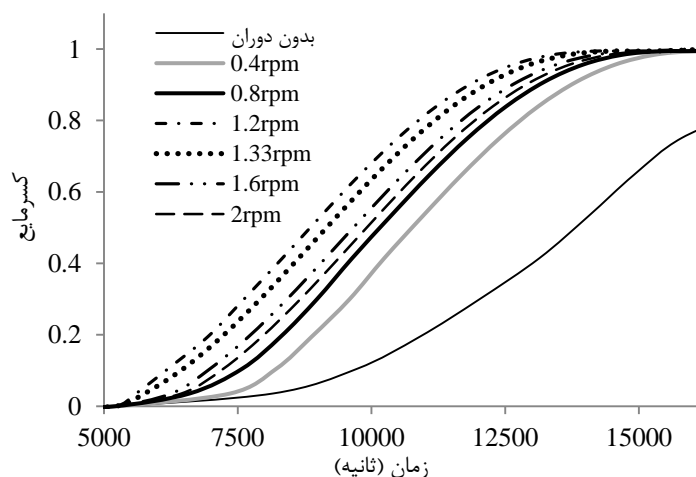
تاثیر دوران بر کارکرد کوره

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 مکانیزم جابجایی حرارت، به اختلاط بهتر مذاب و یکدست شدن کیفیت آن نیز کمک می‌کند. شکل ۸ گردابه‌های ایجادشده در ناحیه ذوب در مقطع $Z=2m$ در ثانیه $t=16000s$ را نشان می‌دهد 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 می‌دهد (بدنه ساعتگرد می‌چرخد).



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

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 سرعت‌های دورانی صفر، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۳۳، ۱/۶ و ۲ دوربردقیقه 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، چراکه 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 در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، سرعت دورانی ۱/۲ دوربردقیقه مناسب‌ترین سرعت است. لازم به ذکر است سرعت معمول دوران بدنه، یعنی ۱/۳۳rpm به سرعت ایده‌آل نزدیک بوده و زمان تهیه مذاب با این سرعت دورانی تنها ۶ دقیقه طولانی‌تر از سرعت ۱/۲ دوربردقیقه است.



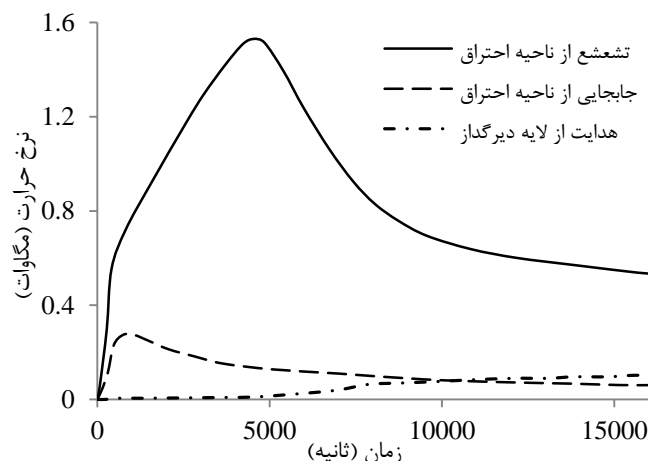
شکل ۹ - منحنی تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی که کاهش زمان تهیه مذاب با افزایش سرعت دوران بدنه و سپس افزایش زمان تهیه مذاب با دور شدن از سرعت ۱/۲rpm را نشان می‌دهد.

بررسی نقش تشعشع در کارکرد کوره

به دلیل دمای کارکرد بالا، هنگام شبیه‌سازی کوره‌ها لازم است در کنار انتقال حرارت جابجایی، مکانیزم 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 بجای مشعل‌های هوا-سوخت از مشعل‌های اکسیژن-سوخت استفاده می‌کنند، به دلیل دمای بالاتر، موثرتر است [۳].

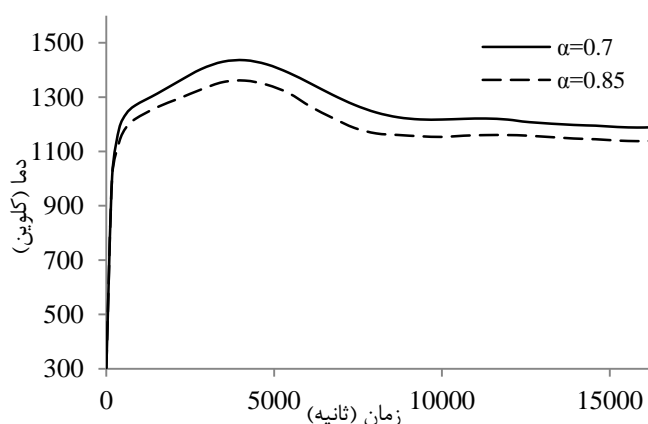
به منظور بررسی اثر تشعشع در کارکرد کوره، تغییرات زمانی حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب از نتایج حل عددی استخراج و در شکل ۱۰ ترسیم شده‌است. در این شکل، نقش تعیین کننده تشعشع در کارکرد کوره در مقابل انتقال حرارت جابجایی مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود در ۸۱۰۰ ثانیه نخست کارکرد کوره حرارت عبوری از مرزهای ناحیه ذوب زیادتر است که به دلیل آزاد شدن انرژی حاصل از سوزش آلومینیوم می‌باشد. 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٪ از این مقدار حرارت توسط تشعشع،

۱۰/۶٪ آن توسط جابجایی حرارت و مابقی از طریق مرز مشترک با لایه دیرگداز انجام شده است. مقدار قابل توجه تشعشع حرارت نشان‌دهنده غالب بودن این مکانیزم انتقال حرارت در کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم است.



شکل ۱۰- مقایسه نرخ حرارت ورودی به ناحیه ذوب از طریق مکانیزم تشعشع و جابجایی 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 شود. افزایش نقش تشعشع در کوره‌ها هنگام استفاده از این مشعل‌ها به دلیل کمک به یکنواخت تر شدن دما در فضای کوره امری مطلوب است [۳]. این کار می‌تواند بوسیله اندودن سطح داخلی دیرگداز با لایه‌ای نازک از پوشش‌های با ضریب صدور تشعشع بالا (High-Emissivity Coatings) 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 $\alpha=0.85$ [۲۹] و بررسی نتایج حل عددی، مشخص شد سهم انتقال حرارت تشعشعی به ۸۸/۵٪ افزایش و سهم انتقال حرارت جابجایی به ۵/۳٪ کاهش یافته است. دلیل کاهش انتقال حرارت جابجایی، یکنواخت تر 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 می‌گردد. به این ترتیب زمان تهیه مذاب نیز ۲۰ دقیقه کاهش می‌یابد.



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 به صورت عددی شبیه‌سازی شده و اثر سرعت دورانی بدنه و تشعشع در فضای کوره بعنوان دو پارامتر موثر بر کارکرد این کوره بررسی شد. نتایج حل عددی نشان داد دوران بدنه به دلیل ایجاد انتقال حرارت جابجایی در ناحیه ذوب، فرآیند ذوب را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. اما به دلیل 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 برای کوره دوار ذوب آلومینیوم مورد نظر در تحقیق حاضر، این سرعت برابر با $1/2$ rpm بدست آمده است. سایر نتایج حل عددی نشان داد تشعشع مکانیزم غالب انتقال حرارت در کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و با افزایش ضریب صدور تشعشع لایه دیرگداز از $0/7$ به $0/85$ ، سهم انتقال حرارت تشعشعی از $84/$ به $88/5/$ افزایش می‌یابد. در نتیجه، دمای شعله کاهش یافته و گازهای خروجی از کوره با دمای پایین‌تری کوره را ترک می‌کنند. این موضوع باعث بهبود شرایط کارکرد کوره و کاهش 20 دقیقه‌ای فرآیند ذوب می‌گردد.

منابع

1. BSC Incorporated, *Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry*, U.S. Department of Energy, Columbia, Maryland, 2005.
2. B. Zhou, Y. Yang, M.A. Reuter, U.M.J. Boin, "Modelling of Aluminium Scrap Melting in a Rotary Furnace", *Minerals Engineering*, Vol. 19, 2006, pp. 299-308.
3. C. E. Baukal, *Oxygen-Enhanced Combustion*, CRC Press, 1998.
4. A. P. Watkinson, J. K. Brimacombe, "Heat Transfer in a Direct-Fire Rotary Kiln: II. Heat Flow Results and Their Interpretation", *Metallurgical Transactions B*, Vol. 9, No. 2, 1978, pp. 209-219.
5. Y. K. Wu, M. Lacroix, "Numerical Simulation of the Melting of Scrap Metal in a Circular Furnace", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 22, No. 4, 1995, pp. 517-525.
6. A.R. Khoei, I. Mastersb, D.T. Gethin, "Numerical Modelling of the Rotary Furnace in Aluminum Recycling Processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, 2003, pp. 567-572.
7. B. Zhou, Y. Yang, 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*, TMS, 2004.
8. Bo Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter, 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, T. R. Meadowcroft, "Continuous Scrap Melting in a Short Rotary Furnace", *Minerals Engineering*, Vol. 21, 2008, pp. 178-189.
10. K. K. Mishra, A. Kumar, 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, R. Singh, "Modelling, Optimisation and Simulation of Rotational Speed, Fuel Consumption and Melting Rate in Rotary Furnace", *Indian Foundry Journal*, Vol. 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. V. R. Voller, "A Heat Balance Integration Method Based on an Enthalpy Formulation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 3, 1987, pp. 604-607.
14. V. R. Voller, M. Cross, N. C. Markatos, "An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, 1987, pp. 271-284.
15. V. R. Voller, C. Parakash, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection/Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, 1987, pp. 1709-1719.
16. *ANSYS CFX Tutorials*, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
17. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
18. T. Poinsot, D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Second Edition, 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. G. Heidarinejad, *An Introduction to Turbulence*, Author's Publication, 2009. (In Farsi)
21. B. F. Magnussen, 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, J. A. Wieringa, "Computational Modelling of Turbulent Flow, Combustion and Heat Transfer in Glass Furnaces", *Sadhana*, Vol. 19, No. 5, 1994, pp. 723-749.

23. F. C. Lockwood, 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, J. Naser, "Computational Fluid Dynamic Modelling of a 550 MW Tangential Furnace under Different Operating Conditions", *5th BSME International Conference on Thermal Engineering*, Procedia Engineering, Elsevier, 2013, pp. 387-392.
25. M. A. Tiamarov, F. A. Garifullin, D. Z. "Davletbaeva, Emissivity of Aluminosilicate Refractories", *Journal of Engineering Physics*, Vol. 53, No. 3, 1987, pp. 1027-1031.
26. *ANSYS Fluent User's Guide*, Release 14.5, ANSYS, Inc., 2012.
27. C. Gau, R. Viskanta, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 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, M. Nozawa, "High-Emissivity Coating on Reactor Tubes and Furnace Walls in Steam Cracking Furnace", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, 2004, pp. 5657-5662.

English Abstract

Improving an Aluminum Rotary Furnace Performance Using Numerical Simulation

Mojtaba Rahimpour¹, Kiumars Mazaheri¹, Seyed Hossein Seyedein²

1- Tarbiat Modares University, School of Mechanical Engineering

2- Iran University of Science and Technology, School of Metallurgy and Materials Engineering

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 melt 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 in furnace space and 84% of total heat flux received by melt 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 the better performance of furnace. Therefore, furnace operation time decreases by 20 minutes.

Keywords: Aluminum Rotary Furnace, Modeling, CFD, Forced Convection, Radiation.