پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲

بررسی اثر دوران بدنه بر کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم با استفاده از شبیه سازی عددی

مجتبی رحیم‌پور[۱a]، کیومرث مظاهری[۲a*]، سیدحسین سیدین[۳b]
[a]دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی.
[b]دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، گروه متالورژی استخراجی.
(* نویسنده مخاطب: kiumars@modares.ac.ir)

چکیده

کوره دوار ذوب آلومینیوم در صنایع بازیافت و ذوب آلومینیوم کاربرد دارد. کارکرد این کوره فرآیندی پیچیده شامل پدیده‌های ذوب فلز، احتراق مغشوش و غیرپیش‌آمیخته و تشعشع در یک بدنه دوار است. مدل ارائه شده در تحقیق حاضر کوره را به سه ناحیه بدنه کوره، محفظه احتراق و ناحیه ذوب تقسیم می‌کند، به طوری که بین نواحی تنها امکان انتقال حرارت وجود دارد. با توجه به یکسان بودن شار حرارت روی مرزهای مشترک بین نواحی و پس از افزوده شدن مدل ذوب فلز آنتالپی-تخلخل و صحت‌آزمایی آن، معادلات حاکم بر هر ناحیه توسط نرم‌افزار تجاری ANSYS CFX 14.5 حل شده‌اند. نتایج حل عددی نشان داد جریان گازها در ناحیه احتراق و حرکت آلومینیوم مذاب در ناحیه ذوب کاملا مغشوش و چرخشی بوده و در کنار اهمیت نقش دوران بدنه بر سرعت بخشیدن به فرآیند ذوب آلومینیوم، اعمال سرعت دورانی 1.2دوربردقیقه بر بدنه کوره منجر به حداقل شدن زمان تهیه مذاب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کوره دوار ذوب آلومینیوم- مدل‌سازی - دینامیک سیالات محاسباتی - دوران - جابجایی اجباری.

۱- مقدمه

کوره‌ها از مصرف کننده‌گان عمده انرژی در صنایع هستند و بهبود شرایط کارکرد آن‌ها مستقیما به کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های تولید منجر می‌شود. بعنوان جایگزین کوره‌های خمره‌ای یا بوته‌ای، استفاده از کوره‌های دوار ذوب آلومینیوم[۴] 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 استفاده‌شود [۱و۲]. کاربرد اصلی این کوره در صنایع‌آلومینیوم، بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه[۵] است [۲].

علی‌رغم سابقه طولانی و کاربرد گسترده، تحقیقات اندکی روی کوره‌های دوار ذوب فلز انجام شده است. دوران بدنه یک ویژگی مشترک کوره‌های دوار است که بررسی اطلاعات موجود درمورد انواع کوره‌های دوار را برای تحقیق حاضر ارزشمند می‌سازد. واتکینسون و همکاران در سال ۱۹۷۸ با ارائه یک مدل ریاضی برای یک خشک‌کن دوار و صحت سنجی 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 [۳]. خویی و همکاران در سال ۲۰۰۳ از شبیه‌سازی عددی ساده‌شده‌ای استفاده کرده و با اعمال شرایط مرزی متغیر بازمان بر قسمت بیرونی دیواره کوره، توزیع دمای بدنه کوره را برای سرعت‌های مختلف دوران و مکان‌های متفاوت شعله به‌دست‌آوردند و بدین ترتیب نشان دادند با افزایش سرعت دوران،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۲- استاد، دانشگاه تربیت مدرس.
۳- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[4] Aluminum Rotary Furnace
[5] Scrap

هدایت حرارت در بدنه افزایش می‌یابد [۴]. 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 لحاظ کردن دوران بدنه شبیه‌سازی کردند. ایشان برای لحاظ کردن فرآیند ذوب آلومینیوم، از مدل تعادل تجمعی[۶] 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 [۵]. ژو و همکاران در سال ۲۰۰۵ حل عددی قبلی خود را بهبود بخشیدند و با اعمال گام زمانی ۰/۱ثانیه در آغاز کارکرد کوره و افزایش تدریجی آن به ۳۰ثانیه تا ثانیه ۳۰۰ام بعنوان حالت بهینه اعمال گام زمانی، حل عددی را سرعت بخشیدند. همچنین با مقایسه مدل‌های اغتشاشی k-ε و RNG k-ε تفاوت چندانی در نتایج مشاهده نکردند، حال آنکه مدل تشعشعی DTRM[۷] را به دلیل دقت بالاتر، به مدل P1 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 [۶]. 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 درنظرگرفته 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 [۷]. 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 ۲۰۰کیلوگرم چدن مذاب را ۱/۱دوربردقیقه گزارش دادند [۸]. جین و سین در سال ۲۰۱۲ با توجه به کارهای مرجع [۸] و با لحاظ کردن شرایط حداقل مصرف انرژی، محدودیت‌های متالورژیکی و تولید حداقل آلاینده‌ها، با استفاده از اندازه‌گیری‌های تجربی خود، سرعت دوران بهینه بدنه کوره مذکور را ۱/۴دوربردقیقه درونیابی کردند [۹].

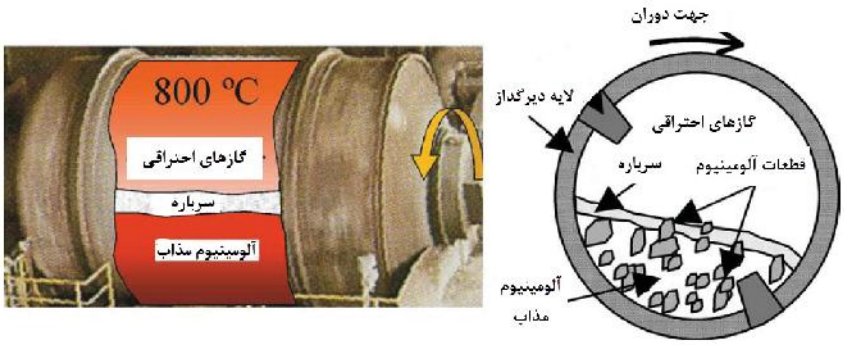
از میان مدل‌های ترمودینامیکی یا عددی مرور شده، تنها مرجع [۴] است که اثر دوران بدنه کوره را با ساده‌سازی بسیار سایر پارامترهای کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم لحاظ کرده است. پژوهش حاضر در ادامه تحقیقات ژو و همکاران [۵و۶و۱۰] انجام شده و برای شبیه سازی عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم، فرآیند ذوب آلومینیوم مذاب و همچنین دوران بدنه کوره و اثر آن بر آلومینیوم مذاب را لحاظ کرده است. برای این منظور از نرم‌افزار حلگر دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX 14.5 استفاده شده است. از آنجا که نرم‌افزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیند ذوب است، مدل آنتالپی-تخلخل[۸] [۱۱،۱۲و۱۳] در کار حاضر به آن افزوده شده است.

۲- معرفی کوره دوار ذوب آلومینیوم

کوره دوار ذوب آلومینوم تشکیل شده است از یک بدنه استوانه‌ای شکل افقی با پوسته فولادی که درون آن با ماده دیرگداز[۹] پوشیده شده است. بدنه توسط سیستم تامین نیرومحرکه دورانی به صورت افقی مهار شده و حول محور خود می‌چرخد. دو انتهای بدنه کوره باز است و مشعل در یک انتها قرار گرفته و گازهای حاصل از احتراق نیز از انتهای دیگر کوره خارج می‌شوند. کوره مورد نظر در تحقیق حاضر، دارای بدنه‌ای با قطر داخلی ۳متر، قطرخارجی ۳/۶۵متر، طول مخزن ۵متر و طول بدنه با احتساب قسمت ورودی شعله و خروجی دود ۶/۹متر بوده و بدنه با سرعت ۱/۳۳دور بر دقیقه دوران می‌کند (شکل ۱). ظرفیت این کوره ۱۷تن است و برای تولید حرارت در فضای درون کوره از احتراق گاز طبیعی و اکسیژن استفاده می‌شود.

---
[6] Population Balance Model
[7] Discrete Transfer Model
[8] Enthalpy-Prosity Model
[9] Refractory

هرنوبت تهیه مذاب توسط این کوره ۴/۵ساعت طول می‌کشد [۱۰]. لایه دیرگداز علاوه بر جلوگیری از اتلاف حرارت درون کوره به محیط اطراف، به صورت یک بازیاب انرژی[10] 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 دستیابی ترکیب یکنواخت تر مذاب، باعث بهبود انتقال حرارت به مذاب نیز می‌شود [۵].



شکل ۱ - کوره دوار ذوب آلومینیوم و مقطع عرضی آن [۱۰].

۳- 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 درکنار یکدیگر شبیه‌سازی این کوره را بسیار دشوار می‌سازد. مدلی که در تحقیق حاضر ارئه 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 (شکل ۲). 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 این تقسیم‌بندی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX 14.5، می‌توان معادلات مربوط به هر ناحیه را مختص همان ناحیه تعریف و با قید یکسان بودن شار حرارت روی مرزمشترک دوناحیه مجاور، آنها را حل کرد [۱۴]. از آنجا که این نرم‌افزار فاقد مدلی برای توصیف فرآیندهای ذوب است، برای استفاده از آن در کارحاضر 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 303K، فشار 1atm، بدون سرعت و هوا با ترکیب 23.2%جرمی اکسیژن و 76.8%جرمی نیتروژن بوده‌است. در ادامه معادلات حاکم و شرایط مرزی مربوط به هریک از این نواحی توضیح داده شده است.

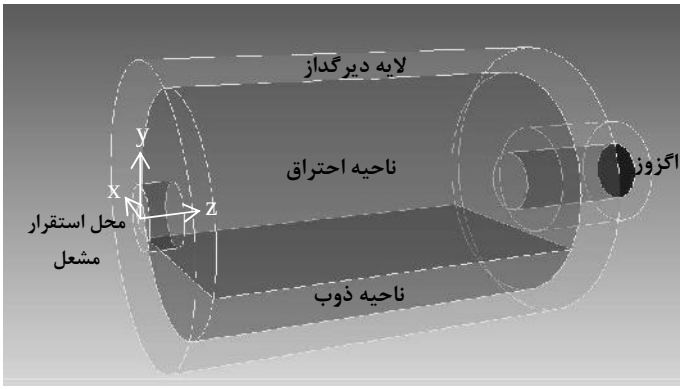
۳-۱- ناحیه لایه دیرگداز

این ناحیه جامد بوده و معادله انتقال حرارت هدایت به صورت زیر بر آن حاکم است:

$$\frac{\partial(^{\circ}C_pT)}{\partial t}+\nabla\cdot(^{\circ}U_SC_pT)=\nabla\cdot(^{a}\nabla T) \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) ρ، C_p، λ، T و U_S به ترتیب چگالی، ظرفیت حرارتی، ضریب رسانش حرارت، دما و سرعت لایه دیرگداز هستند. جمله $\nabla\cdot(^{\circ}U_Sh)$ ناشی از اعمال دوران بر این ناحیه بوده و بیان کننده حرارتی است که توسط دیرگداز و حین دوران

[10] Regenerator



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

حمل می‌شود [۱۵]. 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 جابجایی حرارت با محیط بیرون روی سطح خارجی بدنه با ضریب جابجایی حرارت $h=15W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$ و دمای $T=303K$ [۱۰]. شرط مرزی روی مرز مشترک بین ناحیه لایه دیرگداز و نواحی ذوب و احتراق به صورت شار حرارتی یکسان بین نواحی مشترک می‌باشد.

۳-۲- ناحیه احتراق

ناحیه احتراق محلی است که گازطبیعی و هوا از حفره ورودی به آن وارد شده و پس از احتراق و آزادسازی حرارت، محصولات احتراق از طریق اگزوز خارج می‌گردد. همانند بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر، احتراق در کوره دوار ذوب آلومینیوم به صورت غیرپیش‌آمیخته و مغشوش است. همچنین تبادل حرارت تشعشعی بین گازهای درون کوره و لایه داخلی بدنه و سطح آزاد مذاب نیز باید درنظر گرفته شود.

معادلات حاکم بر ناحیه احتراق عبارتند از معادلات بقای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر که شامل معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتوم، معادله بقای انرژی، معادلات بقای گونه و معادله حالت. همچنین بسته به اینکه چه مدل‌هایی برای توصیف اغتشاش، احتراق و تشعشع در نظر گرفته شده باشد، معادلات مرتبط به این مجموعه افزوده می‌شوند.

برای مدل‌سازی جریان مغشوش از مدل SST[۱۱] k-ω استفاده شده که جزو مدل‌های اغتشاشی RANS[۱۲] 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. مدل SST k-ω ایرادات مدل k-ε مانند ضعف در پیش‌بینی جریانهای رینولدز پایین مجاور مرزجامد، لزجت اغتشاشی زیاد و عدم کارایی در جریان‌های با چرخش زیاد را رفع کرده و برای جریان‌های داخلی مناسب است [۱۶].

برای شبیه‌سازی احتراق از مدل اتلاف گردابه[۱۳] استفاده شده است. این مدل 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 مستقیما به زمان مشخصه اختلاط ملکولی مربوط بوده و در جریان‌های واکنشی مغشوش به صورت ضریبی از نسبت نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی، $\pounds$، به انرژی جنبشی اغتشاشی، k، تعریف

[11] Shear Stress Transport
[12] Reynolds Averaged Navier-Stocks
[13] Eddy Dissipation Model, EDM

می‌شود. از آنجا که در جریان‌های غیرپیش‌آمیخته غلظت سوخت و اکسیژن در محفظه احتراق متغیر است، بنابراین نرخ احتراق توسط نرخ اتلاف گردابه‌ها به گونه‌ای کنترل می‌شود که غلظت متوسط زمانی کمتری داشته باشد. بنابراین در مدل اتلاف گردابه، بین نرخ‌های اتلاف گردابه‌های سوخت و اکسیدکننده، کمترین آنها به‌عنوان نرخ احتراق انتخاب می‌شود [۱۵و۱۷].

هدف از حل معادله انتقال مربوط به تشعشع، محاسبه جمله چشمه تشعشع در معادله بقای انرژی و تعیین شارحرارت تشعشی روی مرزهاست [۱۵]. 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 [۱۸]. مدل تشعشعی 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 [۶و۱۸و۱۹].

در حضور گرانش، هرگاه چگالی گاز تابعی از دما باشد نیروی شناوری ایجاد می‌شود. در این‌حالت برای جریان گازهای درون کوره مدل شناوری کامل بکاررفته است. این کار با افزودن جمله چشمه شناوری به معادلات بقای مومنتوم انجام می‌شود:

$$S_M = (\rho_{gas} - \rho_{ref})g \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق ρ_{gas} چگالی‌گاز، ρ_{ref} چگالی‌مرجع و g شتاب‌گرانش است [۱۵]. به این ترتیب نیروی‌شناوری بر اساس تغییرات محلی چگالی که آن‌هم طبق قانون گاز کامل به تغییرات دما مرتبط است، محاسبه می‌شود.

مرزهای ناحیه احتراق عبارتند 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 [۱۰] و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی داخلی CFX بنام CEL[۱۴] 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 قرارداده شده و وقتی روی مرز خروجی جریان برگشتی رخ دهد فشار کل جریان (بر اساس مولفه عمود برسطح خروجی جریان) برابر با صفر قرار داده می‌شود [۱۵]. 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 0.8 در نظرگرفته شده است [۶]. 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 0.8 درنظر گرفته شده است [۶].

۳-۳- 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 [۱۱،۱۲و۱۳] و بدون پرداختن به جزییاتی مانند چگونگی تغییر در ساختار ملکولی، فرآیند ذوب را مدل می‌کند. این کار با افزودن جمله‌های 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[۱۵]، T_S، آغاز شده و تا رسیدن به مذاب کامل در دمای مایع‌شدگی[۱۶]، T_L، ادامه می‌یابد. در ناحیه بین دو دمای T_L و T_S ناحیه موسوم به ناحیه خمیری[۱۷] به وجود می‌آید که ترکیب ماده در آن مخلوطی از فازهای جامد و مایع است

[14] CFX Expression Language
[15] Solidus Temperature
[16] Liquidus Temperature
[17] Mushy Zone

[۱۱]. برای اعمال این روش، از مفهوم آنتالپی کل استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۳) مجموع آنتالپی محسوس، h و آنتالپی نهان، ΔH است [۱۱و۱۲]:

$$H = h + \Delta H \tag{۳}$$

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 (۴) بیان می‌شود:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT \tag{۴}$$

که در رابطه (۴)، h_{ref} آنتالپی مرجع، T_{ref} دمای مرجع و C_p ظرفیت حرارتی فلز هستند. آنتالپی نهان نیز بخشی از انرژی جذب شده توسط ماده است که صرف تغییر فاز می‌شود و با رابطه (۵) توصیف می‌گردد:

$$\Delta H = f(T)L \tag{۵}$$

$f(T)$ 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 (۳) وارد کند. این کار با توجه به دمای هر نقطه و تعریف کسر مایع بعنوان شاخصی برای حضور فاز مایع، طبق رابطه (۶) انجام می‌شود [۱۱و۱۲]:

$$f(T) = \begin{cases} 1 & , \quad T \geq T_L \\ F & , \quad T_L > T \geq T_S \\ 0 & , \quad T < T_S \end{cases} \tag{۶}$$

در رابطه (۶) ، F کسر مایع بوده و بسته به اینکه نقطه مورد نظردر چه فازی قرار گرفته باشد، مقداری بین ۱ و صفر اختیار می‌کند. وولر رابطه (۷) را برای بیان کسرمایع پیشنهاد داده است [۱۳]:

$$F = \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \tag{۷}$$

با استفاده از کسر مایع، جمله‌های 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 [۱۱]:

- حل قسمت کاملا 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 سیال‌نیوتونی و تراکم‌ناپذیر، معادلات حاکم بر مساله ذوب عبارتند از معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتوم تغییریافته و معادله بقای انرژی تغییر یافته که تغییر بوجود آمده در معادلات مذکور به صورت افزودن جملات چشمه است [۱۱]. جملات چشمه وارد شده به معادلات بقای تکانه خطی مشابه جمله های چشمه در شبیه سازی محیط متخلخل هستند. با الگوبرداری از رفتار سیال در محیط متخلخل و جایگزینی ضریب تخلخل با کسر مایع، جملات چشمه مربوط به معادلات بقای تکانه خطی در ناحیه خمیری بدست می‌آیند [۱۱]:

$$S_n = C\frac{(1-F)^2}{F^3}U_n \tag{۸}$$

در رابطه (۸)، n اندیس نشان‌دهنده هریک از جهت‌های اصلی، U_n بیانگر مولفه‌های سرعت در جهت‌های اصلی معادله مومنتوم و C ثابت ناحیه خمیری است که معمولا عددی از مرتبه بزرگی 10^5 می‌باشد [۱۱]. عبارت چشمه مربوط به بقای انرژی، S_h، نیز با درنظرگرفتن تغییرات گرمای نهان، ΔH، قابل بیان است. بدین منظور با جایگذاری رابطه آنتالپی کل در معادله بقای انرژی و استفاده از رابطه پیوستگی، رابطه (۹) حاصل می‌شود:

$$S_h = \circ \frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \circ \nabla \cdot (\mathbf{u} \Delta H) \qquad (۹)$$

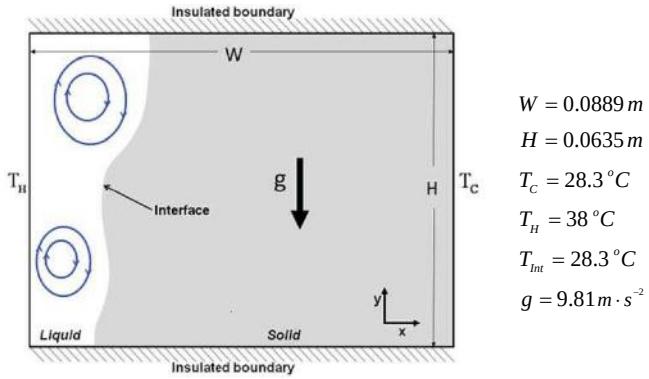
که در رابطه (۹) **u** بردار سرعت است. عبارت چشمه S_B مربوط به نیروی شناوری بوده و با استفاده از تقریب بوزینسک که تغییرات دمایی چگالی را به صورت خطی مدل می‌کند، طبق رابطه (۱۰) بیان می‌شود:

$$S_B = \circ_{ref} g \quad (T - T_{ref}) \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) $\circ_{ref}$ چگالی مرجع، g شتاب گرانش، ضریب انبساط حجمی و T_{ref} دمای مرجع هستند. در صورت مغشوش بودن جریان سیال، یک جمله چشمه به معادله انتقال مربوط به هر متغیر اغتشاشی اضافه می‌شود. برای متغیر توربولانسی فرضی ¨ ، جمله چشمه به صورت رابطه (۱۱) بیان می شود [۲۰]:

$$S_{\ddot{}} = C \frac{(1-F)^2}{F^3} \ddot{} \qquad (۱۱)$$

پس از افزودن جملات چشمه S_n، S_h و $S_{\ddot{}}$ به CFX با استفاده از زبان برنامه‌نویسی داخلی CEL، یک مساله معیار منطبق بر کارهای تجربی گائو و همکاران [۲۱] با استفاده از نرم‌افزار CFX حل و صحت مدل افزوده شده بررسی شده‌است. مساله مذکور شامل فرآیند ذوب فلز گالیوم[۱۸] 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 دماپایین همدماست (T_{Int}=T_L). برای آغاز فرآیند ذوب، دیواره سمت چپ ناگهان در دمای T_H قرارمی‌گیرد. مشخصات حفره و شرایط مرزی مساله در شکل ۲ آورده شده است.

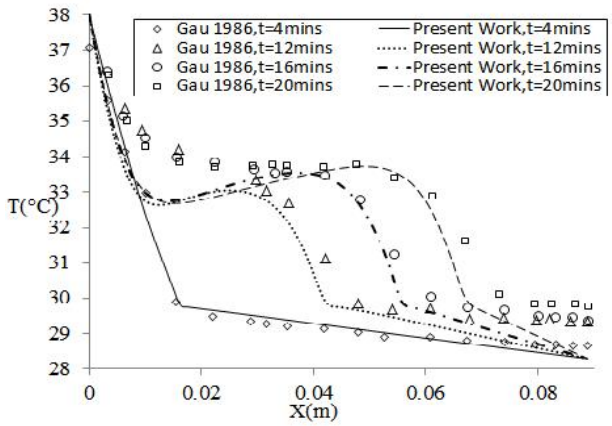


شکل ۲ - مشخصات میدان حل و شرایط مرزی و اولیه مساله ذوب گالیوم در حفره دو بعدی. دیواره های سمت چپ و راست به ترتیب مرز دماثابت دمابالا و دماپایین هستند. دیواره های افقی بالا و پایین عایق هستند [۲۱].

برای حل این مساله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه بررسی شده و بین سه شبکه 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 بانتایج تجربی [۲۱] مقایسه شدند. شکل ۳ تغییرات دما در راستای محورافقی (x) روی خط‌مرکزی y=0.04445m در زمان‌های مختلف را نمایش می‌دهد که حاکی از تطابق مناسب حل عددی حاضر با داده های تجربی مرجع [۲۱] و کارکرد مناسب مدل آنتالپی-تخلخل افزوده شده به نرم‌افزار CFX هستند.

[18] Gallium

ناحیه ذوب توسط مرز مشترک با نواحی احتراق و لایه دیرگداز محصورشده‌است. 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 ۳ - نمودار راست آزمایی مدل ذوب افزوده شده به CFX، نمودار تغییرات دما در راستای محور افقی (X) روی خط مرکزی y=0.04445m در زمان‌های ۴دقیقه، ۱۲ دقیقه، ۱۶دقیقه و ۲۰ دقیقه در مقایسه با نتایج [۲۱].

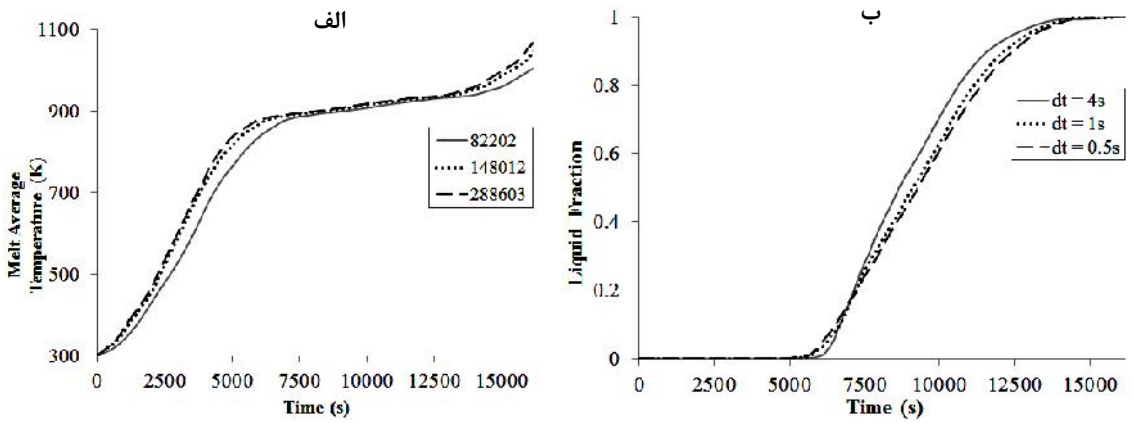
۳-۴- ملاحظات عددی و حل مساله

برای حل عددی مساله، لازم است معادلات توضیح داده شده در قسمت‌های قبلی روی سلول‌های شبکه عددی گسسته و حل شوند. شبکه به‌کاررفته برای دو ناحیه ذوب و احتراق از سلول‌های شش‌وجهی و شبکه تهیه شده برای ناحیه لایه دیرگداز از سلول‌های چهاروجهی تشکیل شده است. برای بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، سه شبکه با تعداد سلول‌های82202، 148012 و288603 انتخاب و نتایج حل مساله روی هریک از آنها مقایسه شده است. شکل ۴-الف تغییرات زمانی دمای متوسط در ناحیه ذوب را نشان‌می‌دهد. مشاهده می‌شود نتایج دو شبکه با 148012 و 288603 سلول تفاوت چندانی با هم ندارد. با توجه به زمان کارکرد طولانی کوره دوار ذوب آلومینیوم (4.5 ساعت برابر با 16200ثانیه) و هزینه بالای محاسبات ناپایا، ضروری است از بزرگترین گام زمانی ممکن استفاده‌شود. اما زمان مشخصه پدیده‌های احتراق، توربولانس و تشعشع 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 انجام‌شده‌است که مقدار مانده‌ها[19]ی کلیه معادلات کمتر از 10^{-4} باقی بماند. در تحقیق حاضر، 60 ثانیه نخست حل عددی با گام زمانی 0.02 ثانیه، 60 ثانیه دوم با گام 0.04 ثانیه، 4 دقیقه بعدی با گام زمانی 0.1 ثانیه، 10 دقیقه بعدی با گام زمانی 0.5 ثانیه و نهایتا 254 دقیقه باقی‌مانده با گام زمانی 0.5 یا 1 یا 4 ثانیه انجام شده‌است. شکل ۴-ب تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی حاصل از انجام محاسبات با گام‌های زمانی نهایی 0.5 یا 1 یا 4 ثانیه را نشان می‌دهد. با مقایسه این نتایج، مشاهده می‌شود گام زمانی نهایی 1 ثانیه با دقت قابل قبولی نسبت به گام 0.5 ثانیه نتایج را پیش‌بینی کرده است. بنابراین شبکه با 148012 سلول و گام زمانی نهایی 1 ثانیه بعنوان شبکه و گام زمانی مناسب در کار حاضر انتخاب شده‌اند.

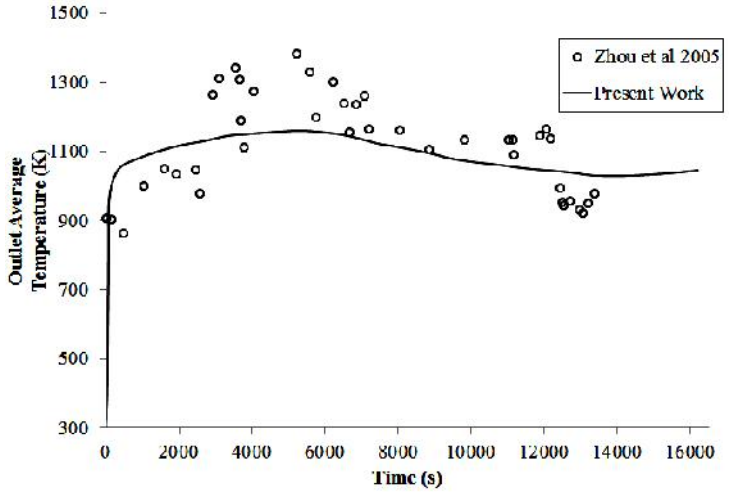
روش‌های عددی همواره نیازمند صحت‌آزمایی و مقایسه با داده‌های تجربی هستند تا از میزان درستی و تطابق آنها با واقعیت اطمینان حاصل‌شود. داده تجربی در دسترس برای شبیه‌سازی عددی کوره موردنظر تحقیق حاضر، دمای گازهای

[19] Residuals

خروجی حین کارکرد کوره است که در مرجع [۱۰] گزارش شده است. شکل ۵ این نتایج را باهم مقایسه کرده و حاکی از تطابق مناسب داده‌های تجربی و نتایج حاصل از حل عددی می‌باشد.



شکل ۴ - الف: مقایسه تغییرات زمانی دمای متوسط در ناحیه ذوب برای بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه محاسباتی، ب: بررسی عدم وابستگی حل عددی به اندازه گام زمانی با مقایسه تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی.



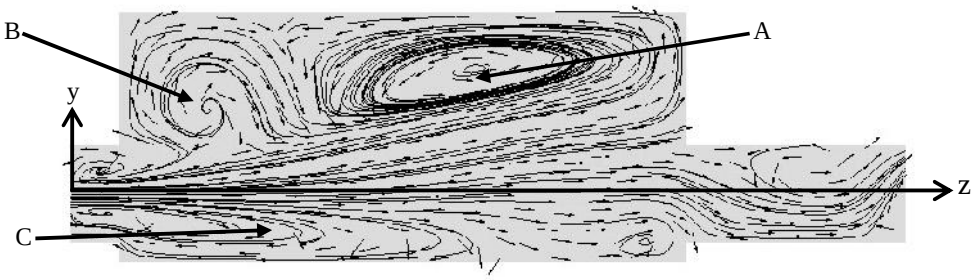
شکل ۵ - تغییرات زمانی دما در مرز خروجی و مقایسه نتایج تجربی و عددی به منظور صحت آزمایی روش عددی به‌کاررفته.

۵- نتایج حل عددی و بحث روی نتایج

کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم فرآیندی پیچیده بوده و شامل پدیده‌های ذوب فلز، احتراق، جریان مغشوش و تشعشع می‌باشد. شبیه‌سازی عددی اطلاعات مفیدی از جزییات کارکرد این کوره در اختیار قرارمی‌دهد که زمان تهیه مذاب، توزیع دما در فضای کوره، جریان گازها در ناحیه احتراق و نحوه حرکت مذاب در ناحیه ذوب از این جمله هستند.

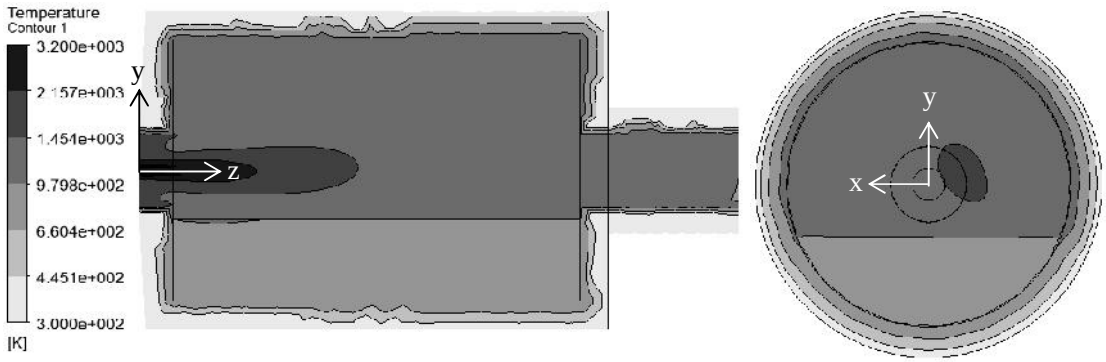
اغتشاش باعث اختلاط بهتر سوخت و اکسنده شده و کیفیت احتراق غیرپیش‌آمیخته را بهبود می‌بخشد. همچنین هرچه جریان گازهای درون کوره چرخشی‌تر باشد انتقال حرارت جابجایی در ناحیه احتراق افزایش می‌یابد [۱۲]. شکل ۶ خطوط جریان و مولفه مماسی بردارهای سرعت روی صفحه $x=0m$ را نمایش‌داده و جریان کاملا مغشوش و چرخشی در ناحیه احتراق را نشان‌می‌دهد. هندسه بدنه کوره دوار و سرعت گازهای ورودی به کوره ذوب آلومینیوم به نحوی است که سه گردابه مشخص روی صفحه $x=0m$ رخ داده و در خروجی کوره نیز جریان برگشتی بوجود آمده است.

مطالعه توزیع دمای کوره می‌تواند به درک نحوه انتقال‌حرارت در کوره دوار ذوب ذوب آلومینیوم کمک کند. با توجه به شکل ۷ که توزیع دما روی دو مقطع طولی (سطح x=0*m*) و عرضی (سطح z=3*m*) در زمان t=10800 ثانیه پس از کارکرد کوره را نشان‌می‌دهد، مشاهده می‌شود دمای قسمت‌های بالایی لایه دیرگداز که با شعله در تماس هستند بالاتر از قسمت‌های پایینی لایه دیرگداز است که با مذاب در تماس است. دلیل این امر دوران بدنه و نقش لایه دیرگداز بعنوان بازیاب حرارت است، به طوری که حین دوران بدنه، قسمت‌هایی از بدنه که قبلا با شعله در تماس بوده و حرارت جذب کرده‌اند حین تماس با آلومینیوم موجود در کوره حرارت خود را از دست‌می‌دهند. همچنین مقطع عرضی در شکل ۷ نشان می‌دهد که در ناحیه احتراق شعله متقارن نبوده و به سمت راست متمایل است که نشان از جریان چرخشی درون کوره دارد.

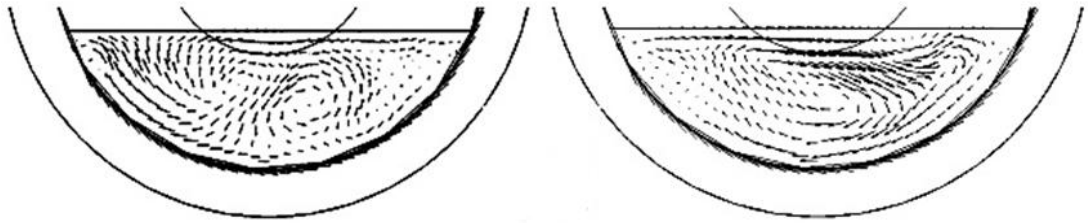


شکل ۶ – خطوط جریان و بردارهای سرعت مماس بر صفحه x=0m در زمان t=10800s پس از کارکرد کوره. گردابه های تشکیل شده در نقاط A و B و C قابل توجه هستند. همچنین برگشت جریان در قسمتی از مرز خروجی نیز مشاهده می‌شود.

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 دو مقطع z=2*m* و z=4*m* در ثانیه t=16000 را نشان می‌دهد. دیده می شود که تمام آلومینیوم جامد موجود در کوره به مذاب تبدیل شده است و حاکی از القای سرعت از بدنه دوار به فلز مذاب و ایجاد گردابه های مشخص در ناحیه ذوب می‌باشد (بدنه ساعتگرد می‌چرخد).



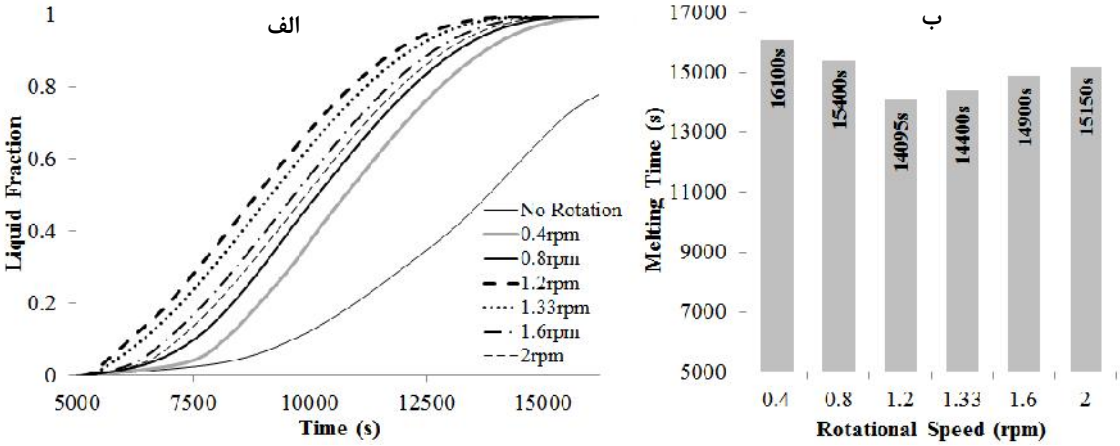
شکل ۷ – توزیع دما روی دو مقطع طولی (سطح x=0*m*)، سمت چپ، و مقطع عرضی (سطح z=3*m*)، سمت راست، در زمان t=10800*s*.



شکل ۸ - بردارهای سرعت مماس بر صفحه در ناحیه ذوب در دو مقطع $z=2m$ (سمت چپ) و $z=4m$ (سمت راست) در ثانیه $t=16000$. بدنه حول محور z- (ساعتگرد) دوران می‌کند.

۵-۱- اثر سرعت دورانی بدنه بر زمان تهیه آلومینیوم مذاب

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 منجرمی‌شود. ازجمله 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 0، 0.4، 0.8، 1.2، 1.33، 1.6 و 2 دوربردقیقه شبیه‌سازی و نتایج در شکل ۹ با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل دوران نقش مهمی در سرعت تهیه آلومینیوم مذاب دارد، اما افزایش بیش از حد سرعت دورانی بدنه نیز باعث افزایش زمان تهیه مذاب می‌شود. دلیل این امر آن است که در سرعت‌های دورانی پایین نقش انتقال حرارت جابجایی اندک بوده و با افزایش سرعت دوران بدنه، انتقال حرارت از بدنه به آلومینیوم و سرعت تهیه مذاب نیز افزایش‌می‌یابد. اما مقدار بهینه‌ای برای سرعت دورانی بدنه وجوددارد، چراکه سرعت‌های دورانی زیاد زمان انتقال حرارت از بدنه به آلومینیوم را کم کرده و به این ترتیب سرعت تهیه مذاب نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود برای کوره درنظرگرفته‌شده در تحقیق حاضر، سرعت دورانی 1.2دوربردقیقه سرعت بهینه است. لازم به ذکر است سرعت معمول دوران بدنه، یعنی 1.33rpm به سرعت ایده‌آل نزدیک بوده و زمان تهیه مذاب با این سرعت تنها 6 دقیقه طولانی‌تر از سرعت 1.2دوربردقیقه است.



شکل ۹ - کاهش زمان تهیه مذاب با افزایش سرعت دوران بدنه و سپس افزایش آن با دورشدن از سرعت 1.2rpm. الف: منحنی تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی و ب: نمودار زمان لازم از ابتدا تا انتهای فرآیند ذوب، با سرعت‌های مختلف دوران بدنه.

۶- جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای کوره دوار ذوب آلومینیوم ارائه شد که بدنه کوره را به سه ناحیه مجزای لایه دیرگداز، ناحیه احتراق و ناحیه ذوب تقسیم و با درنظرگرفتن کوپلینگ حرارتی بین این نواحی، معادلات مربوط به هرناحیه را حل می‌کند. مساله شامل احتراق، جریان مغشوش، تشعشع و ذوب بوده و برای مدل‌سازی فرآیند ذوب از مدل آنتالپی-تخلخل استفاده شده

است. پس از مقایسه با داده‌های تجربی و تطابق مناسب نتایج عددی، از مدل حاضر برای بررسی اثر دوران بدنه بر فرآیند ذوب آلومینیوم در کوره استفاده شده است. دوران بدنه باعث القای حرکت در آلومینیوم مذاب شده و با ایجاد انتقال حرارت جابجایی فرآیند ذوب را سرعت می‌بخشد. همچنین با شبیه‌سازی کوره با سرعت‌های دورانی مختلف، مشخص شد برای کوره درنظر گرفته شده در تحقیق حاضر، استفاده از سرعت دورانی 1.2دوربردقیقه باعث حداقل شدن زمان تهیه مذاب می‌شود.

مراجع

1- *Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry*, Report Prepared for ITP Metal Casting, BCS Incorporated, November 2005.
2- Zhou, B., Yang, Y., Reuter, M.A., and Boin, U.M.J., "*Modelling of Aluminium Scrap Melting in a Rotary Furnac*e", Minerals Engineering, Vol. 19, pp. 299–308, 2006.
3- Watkinson, A.P. and Brimacombe, J.K., "*Heat Transfer in a Direct-Fired Rotary Kiln: II. Heat Flow Results and Their Interpretation*", Metallurgical Transactions B, Vol. 9B, pp. 209-219, 1978.
4- Khoei, A.R., Masters, I. and Gethin, D.T., "*Numerical Modelling of the Rotary Furnace in Aluminium Recycling Processes*", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 567–572, 2003.
5- Zhou, B., Yang, Y., and Reuter, M.A., "*Process Modeling of Aluminum Scraps Melting in Molten Salt and Metal Bath in a Rotary Furnace*", Light Metals 2004: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee, TMS, pp. 919-924, 2004.
6- Zhou, B., Yang, Y., and Reuter, M.A., "*CFD Based Process Modelling of a Rotary Furnace for Aluminium Scrap Melting*", Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries, 2005.
7- Zhang, Y., Barr, P.V., and Meadowcroft, T.R., "*Continuous Scrap Melting in a Short Rotary Furnace*", Minerals Engineering, Vol. 21, pp. 178-189, 2008.
8- Mishra, K.K., Kumar, A., and MISRA, A.K., "*A Variant of NSGA-II for Solving Priority Based Optimization Problems*", IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 612-615, 2009.
9- Jain, R.K., Singh, R., "*Modelling, Optimisation and Simulation of Rotational Speed, Fuel Consumption and Melting Rate in Rotary Furnace*", Indian Foundry Journal, Vol. 58, 37-43, 2012.
10- Zhou, B., "*Modelling the Melting of Post-Consumer Scrap within a Rotary Melting Furnace for Aluminium Recycling*", Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2005.
11- Voller, V.R., Prakash C., "*Fixed Grid Numerical Modeling Methodology for Convection Diffusion Mushy Region Phase Change Problems*", International journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30 pp. 1709-1719, 1987.
12- Voller, V.R., Cross M., Markatos N.C., "*An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change*", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, p.p. 271-284, 1987.
13- Voller, V.R., "*A Heat Balance Integral Method Based On an Enthalpy Formulation*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, pp. 604-607, 1987.
14- "*ANSYS CFX-Pre User's Guide*", Release 14.5, ANSYS Inc., 2012.
15- "*ANSYS CFX-Solver Theory Guide*", Release 14.5, ANSYS Inc., 2012.
۱۶- حیدری نژاد، قاسم، مقدمه ای بر توربولانس، نشر مولف، ۱۳۸۸.
17- Magnussen, B.F., And B.H., Hjertager, "*On Mathematical Modeling of Turbulenct Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 16, pp. 719-729, 1976.
18- Lockwood, F.C., And Shah, N.G., "*A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures*", 18th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1405-1414, 1981.
19- Al-Abbas, L.H., Naser, J., "*Computational fluid dynamic modelling of a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions*", 5th BSME International Conference on Thermal Engineering, Procedia Engineering, Vol. 56, pp. 387-392, 2013.
20- "*ANSYS FLUENT User's Guide*", Release 14.5, ANSYS Inc., 2012.
21- Gau, C., Viskanta, R., "*Citing and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall*", Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 174-181, 1986.