



## مطالعه عددی اثر تغییر زاویه مشعل بر نرخ تهیه مذاب در کوره دوار ذوب آلومینیوم

مجتبی رحیم پور<sup>۱</sup>، کیومرث مظاهری<sup>۲\*</sup>، سیدحسین سیدین<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، kiumars@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۹ مرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۵ مهر ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

کوره دوار ذوب آلومینیوم

دینامیک سیالات محاسباتی

اختلاط

نرخ تهیه مذاب

در کار حاضر، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی اثر تغییر زاویه مشعل بر کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم بررسی شده است. مدل عددی ارائه شده از این کوره فرآیندهای احتراق مغشوش و غیرپیش آمیخته گاز طبیعی و اکسیژن، تشعشع، دوران بدنه، ذوب آلومینیوم و اکسایش آلومینیوم را در نظر می گیرد. در این مدل با توجه به پدیده هایی که در قسمت های مختلف کوره دوار ذوب آلومینیوم رخ می دهد، کوره به سه ناحیه لایه دیرگداز، ناحیه احتراق و ناحیه ذوب تقسیم شده است. بین این نواحی امکان تبادل جرم وجود نداشته و تنها انتقال حرارت ممکن است. نتایج حل عددی نشان داد با افزایش زاویه مشعل از  $0^\circ$  تا  $15^\circ$  به دلیل اختلاط بیشتر سوخت و اکسند و افزایش زمان اقامت گازهای داغ در ناحیه احتراق، کارایی کوره بهبود یافته و نرخ تهیه آلومینیوم مذاب مرتباً افزایش می یابد. اما نزدیک شدن شعله به لایه دیرگداز و گرم شدن بیش از حد آن باعث می شود استفاده از زاویه های مشعل بیشتر از  $10^\circ$  عملی نباشد. به این ترتیب با تغییر زاویه مشعل از  $0^\circ$  به  $10^\circ$ ، زمان کارکرد کوره ۳۵ دقیقه کاهش و بازده حرارتی کوره از ۶۵٪ به ۷۴٪ افزایش می یابد.

## Numerical Study of the Effect of Burner Angle on Melting Rate in an Aluminum Rotary Furnace

Mojtaba Rahimpour<sup>1</sup>, Kiumars Mazaheri<sup>2\*</sup>, Seyed Hossein Seyedein<sup>1</sup>

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

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

3- Department of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, kiumars@modares.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 August 2014  
Accepted 27 September 2014  
Available Online 08 November 2014

## Keywords:

Aluminum Rotary Furnace  
CFD  
Mixing  
Melting Rate

## ABSTRACT

Using CFD, the effect of burner angle on an aluminum rotary furnace performance is investigated in the present study. Turbulent non-premixed combustion of natural gas and oxygen, radiation, furnace rotation, aluminum smelting and aluminum burn-off are considered in the proposed numerical model. According to the distinct phenomena occurring in an aluminum rotary furnace, the model divides the furnace into three zones: refractory lining, combustion zone and melt zone. Only heat can be transferred through interfaces of zones and mass transfer through them is not considered in such furnace modeling. Numerical simulations regarding burner angles from  $0^\circ$  to  $15^\circ$  revealed that the higher burner angles enhance the fuel and oxygen mixing and increase the resident time of combustion gases in the furnace atmosphere, which consequently improves the furnace performance and lowers the aluminum melting rate. However, the simulation results also showed that burner angles more than  $10^\circ$  are not applicable due to refractory lining overheat. It was shown that eventually, changing burner angle from  $0^\circ$  to  $10^\circ$  decreases furnace operation time by 35 minutes and increases furnace thermal efficiency from 65% to 74.7%.

## ۱- مقدمه

حین کارکرد کوره های ذوب، پدیده های مختلفی رخ می دهد که احتراق،

اغتشاش، تشعشع و ذوب محصول مهم ترین آن ها هستند. شبیه سازی عددی کوره ها به انتخاب مدل های مناسب برای این پدیده ها می پردازد. به عنوان مثال، بورجیس و همکاران [۲] یک کوره ۷۲ تنی ذوب آلومینیوم گازسوز ساکن را با ادغام یک کد حجم محدود جریان سیال و روش ناحیه ای شبیه سازی کرده و برای اغتشاش جریان از مدل  $k-\epsilon$ ، برای تشعشع از مدل ناحیه ای<sup>۱</sup> و

در مقایسه با استخراج آلومینیوم از منابع معدنی، بازیافت آلومینیوم از قطعات قراضه<sup>۱</sup> بسیار به صرفه بوده و مزایایی همچون کاهش درخور توجه مصرف انرژی و آب مورد نیاز و نیز کاهش تولید آلاینده ها را به همراه دارد. به عنوان یک روش مناسب، استفاده از کوره دوار ذوب آلومینیوم برای بازیافت آلومینیوم رایج است [۱].

جایجایی، فرآیند ذوب را سرعت می‌بخشد. کارمونا و کورتس [۱۰] شبیه‌سازی دو بعدی یک کوره بوت‌های ذوب آلومینیوم قراضه را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام داده و با استفاده از مدل ذوب آنتالپی-تخلخل، انتقال حرارت هدایت در نقاط جامد و انتقال حرارت جایجایی آزاد در آلومینیوم مذاب را لحاظ کردند. همچنین در این تحقیق، تشعشع و اندرکنش بین نواحی جامد، مایع و گاز نیز در نظر گرفته شده بود. مدل ارائه‌شده برای این کوره برای پیش‌بینی نرخ تهیه مذاب، توزیع حرارت در کوره و اتلاف حرارت به محیط بیرون مورد استفاده قرار گرفت.

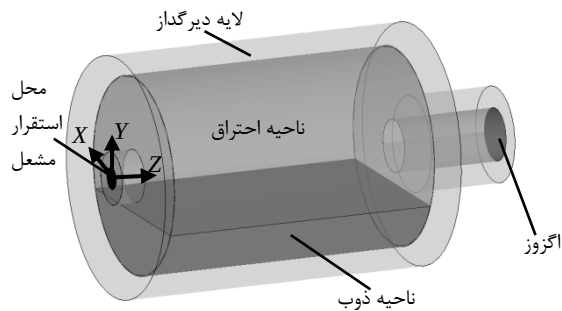
افزایش چرخش جریان سیال در محفظه احتراق کوره‌ها بر انتقال حرارت و تولید آلاینده‌ها بسیار اثرگذار است. به این منظور روش‌های مختلفی مانند تغییر زاویه نازل سوخت و یا نازل هوا، تغییر زاویه مشعل و یا ایجاد چرخش محوری<sup>۸</sup> گازهای ورودی به کوره از سوی محققان بررسی شده است. به عنوان نمونه، تحقیقات تجربی نیشیمورا و همکاران [۱۱] نشان داد تزریق زاویه‌دار سوخت گازی نسبت به هوای ورودی پیش‌گرم شده به کوره منجر به یکنواخت‌تر شدن توزیع دما در فضای کوره و کاهش تولید آلاینده NOx می‌شود. از سوی دیگر خضایی و همکاران [۱۲] با مطالعه تجربی و عددی یک کوره استوانه‌ای سوخت مایع، اثر تغییر زاویه نسبت افقی پاشش سوخت را بر کارکرد کوره بررسی کرده و بیان کردند با افزایش زاویه پاشش سوخت، قطر قطرات سوخت کاهش و سطح تماس سوخت و هوا افزایش می‌یابد که به بهبود احتراق و بالا رفتن دمای کارکرد کوره و افزایش تولید آلاینده NOx منجر می‌شود. لی و همکاران [۱۳] اثر افزایش زاویه ۰° تا ۲۰° هوای ثانویه ورودی به یک بویلر با سوخت پودر زغال‌سنگ را به صورت تجربی بررسی کرده و افزایش دمای متوسط و بازده حرارتی کوره، افزایش تولید آلاینده NOx و کاهش تولید دوده و آلاینده CO را گزارش دادند. با بررسی عددی اثر تغییر زاویه افقی مشعل از ۳۰° تا ۳۰° بر احتراق غیرپیش‌آمیخته گاز طبیعی و هوا در دیگ بخار نیروگاه بندرعباس، معصومی و آبروشن [۱۴] بیان کردند صرف‌نظر از جهت زوایا، افزایش زاویه مشعل باعث افزایش نرخ احتراق در نزدیکی مشعل شده، اما به دلیل هندسه محفظه احتراق توزیع دمای دیگ به ازای زوایای مثبت یکنواخت‌تر است. پورحسینی و همکاران [۱۵] به منظور بررسی اثر چرخش محوری هوای ورودی بر کارایی و تولید آلاینده‌ها، به مطالعه آزمایشگاهی و عددی یک کوره سوخت مایع پرداختند. تحقیقات ایشان نشان داد با افزایش زاویه چرخش هوا از ۰° تا ۴۵°، بازده کوره و تولید آلاینده NO افزایش و تولید آلاینده CO کاهش می‌یابد، حال آنکه افزایش این زاویه تا ۷۵° کاهش بازده و NO تولیدی و افزایش تولید CO را به دنبال دارد.

در پژوهش حاضر یک کوره دوار ذوب آلومینیوم منطبق بر مطالعات ژو و همکاران [۴، ۱] به صورت عددی شبیه‌سازی شده و علاوه بر فرآیندهای احتراق و ذوب، دوران بدنه کوره و حرکت القا شده در آلومینیوم مذاب درون کوره نیز لحاظ شده است. هدف، بهبود شرایط کارکرد کوره با انتخاب زاویه مشعل مناسب است. در کار حاضر به دلیل توانایی اعمال جداگانه معادلات مختص نواحی با فیزیک‌های متفاوت [۱۶] و دارا بودن زبان برنامه‌نویسی داخلی نسبتاً ساده برای ایجاد تغییرات مورد نیاز در معادلات حاکم بر مساله [۱۷]، از نرم‌افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی سی‌اف‌ایکس نسخه ۱۴/۵<sup>۱</sup> استفاده شده است. از آنجا که نرم‌افزار مذکور فاقد مدلی برای توصیف فرآیند ذوب است، مدل ذوب آنتالپی-تخلخل [۸، ۷] توسط کاربر به آن افزوده شده است.

برای احتراق از یک مدل ساده شده شعله استفاده نموده و از فرآیند ذوب آلومینیوم صرف‌نظر کردند. نتایج این تحقیق اثر نامطلوب نفوذ هوای اطراف را بر کارایی کوره نشان داد. به منظور بررسی عددی کارکرد یک کوره ساکن ذوب شیشه، هوگن‌دورن و همکاران [۳] از مدل اغتشاشی k-ε، مدل احتراق تعادلی و مدل تشعشعی انتقال گسسته<sup>۱</sup> استفاده کرده و فرآیند ذوب شیشه را لحاظ نکردند. ایشان اثر تعیین‌کننده اندرکنش اغتشاش و تشعشع را بر تولید دوده و آلاینده NO گزارش نموده و نشان دادند مکانیزم تشعشع ۹۵٪ از کل حرارت انتقالی در فضای کوره را به عهده دارد و با افزایش ضریب صدور تشعشعی لایه داخلی دیرگداز از ۰/۵ به ۰/۹ بازده کوره ۵٪ افزایش می‌یابد. ژو و همکاران [۴، ۱] یک کوره دوار ذوب آلومینیوم را با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε، مدل‌های تشعشعی P1، انتقال گسسته و مونت‌کارلو<sup>۲</sup>، مدل احتراقی اتلاف گردابه<sup>۳</sup> و تابعیت زمانی حرارت آزادشده حاصل از اکسایش آلومینیوم در فضای کوره شبیه‌سازی کرده و به دلیل دقت بالاتر نسبت به مدل P1 و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به مدل مونت‌کارلو، مدل تشعشعی انتقال گسسته را جهت ادامه کار انتخاب نمودند. ایشان همچنین با صرف‌نظر از دوران بدنه و حرکت در نواحی مذاب، مدلی برای ذوب آلومینیوم ارائه دادند که قسمت‌های مذاب را به صورت جامد در نظر گرفته و اثر دوران بدنه در ایجاد جایجایی و بهبود انتقال حرارت در نواحی ذوب‌شده را با افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی آلومینیوم لحاظ می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد نرخ تهیه آلومینیوم مذاب مستقل از اندازه و شکل قطعات آلومینیوم ورودی به کوره است. به منظور بررسی اثر مدل‌های اغتشاشی دومعادله‌ای متوسط‌گیری‌شده رینولدز<sup>۴</sup>، تیان و همکاران [۵] یک محفظه احتراق آزمایشگاهی را با استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه و مدل تشعشعی انتقال گسسته شبیه‌سازی و پارامترهای مختلفی همچون سرعت گازهای احتراقی، دما و کسر جرمی گونه‌های O<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> را مقایسه کردند. نتایج این کار عددی نشان داد مدل‌های اغتشاشی k-ε، k-ω بازنه‌جار شده<sup>۵</sup> و k-ω انتقال تنش برشی<sup>۶</sup> نتایج مناسبی به‌دست می‌دهند، درحالی‌که مدل k-ω کسر جرمی گونه‌های O<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> با خطای زیادی پیش‌بینی می‌کند. نیکله و همکاران [۶] محفظه احتراق یک کوره ساکن ذوب آلومینیوم سوخت مایع را با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε، مدل احتراقی اتلاف گردابه و مدل تشعشعی انتقال گسسته شبیه‌سازی و از فرآیند ذوب آلومینیوم صرف‌نظر کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد تولید دوده به افزایش نقش تشعشع در فضای کوره و کاهش دمای شعله منجر شده و اسپری درشت‌تر قطرات سوخت بازده کوره را کاهش می‌دهد.

برای لحاظ کردن فرآیند ذوب، برخی محققان از روش آنتالپی-تخلخل<sup>۷</sup> در شبیه‌سازی کوره‌ها بهره برده‌اند. این روش مبتنی بر تحقیقات وولر و همکاران [۸، ۷] بوده و امکان بررسی حرکت ایجادشده در نواحی مذاب را فراهم می‌آورد. وو و لاکرویکس [۹] انتقال حرارت حین فرآیند ذوب آلومینیوم در یک کوره استوانه‌ای ساکن را به صورت گذرا توصیف و با صرف‌نظر از تشعشع، از مدل آنتالپی-تخلخل برای فرآیند ذوب استفاده کرده و اثر احتراق را به صورت جمله چشمه به معادله انتقال حرارت افزودند. نتایج این تحقیق نشان داد افزایش اختلاط در نواحی ذوب‌شده ناشی از اثر انتقال حرارت

- 1- Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
- 2- Monte Carlo Radiation Model
- 3- Eddy Dissipation Model (EDM)
- 4- Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)
- 5- Renormalization Group (RNG) k-ε
- 6- Shear Stress Transport (SST) k-ω
- 7- Enthalpy-Porosity Method



شکل ۲ تقسیم‌بندی کوره دوار ذوب آلومینیوم به نواحی مجزا جهت اعمال معادلات مختص هر ناحیه. مبدأ مختصات بر محل استقرار مشعل قرار گرفته است.

نواحی صرف‌نظر شده است.

شرایط اولیه برای شبیه‌سازی، آغاز کار کوره از حالت ساکن در شرایط محیط اطراف، یعنی دمای اولیه ۳۰۳ کلوین و فشار اولیه ۱۰۱ کیلوپاسکال و هوای داخل کوره با ترکیب ۲۳/۲٪ جرمی اکسیژن و ۷۶/۸٪ جرمی نیتروژن است.

### ۳-۱-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در مدل ارائه‌شده با توجه به پدیده‌هایی که در هر ناحیه کوره رخ می‌دهد، معادلات حاکم به صورت مجزا به این ناحیه‌ها اعمال و با شرط یکسان بودن شار حرارت گذرنده از مرز مشترک نواحی مجاور، حل می‌شود. در ادامه معادلات حاکم و شرایط مرزی هریک از ناحیه‌های محاسباتی توضیح داده شده است.

### ۳-۱-۱- لایه دیرگداز

لایه دیرگداز، جامد و دوار بوده و تنها معادله انتقال حرارت هدایت بر آن حاکم است. طبق رابطه (۱) داریم:

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

در رابطه (۱)  $\rho$ ،  $c_p$ ،  $T$  و  $U_s$  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 بیان‌کننده حرارتی است که توسط لایه دیرگداز و حین دوران حمل می‌شود [۱۷]. این ناحیه در نرم‌افزار به صورت استوانه‌ای 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 ۱۵ وات بر مترمربع برکلوین و دمای محیط بیرون ۳۰۳ کلوین [۱]. شرط مرزی روی مرز مشترک بین ناحیه لایه دیرگداز و نواحی ذوب و احتراق به صورت شار حرارتی یکسان بین نواحی مشترک است.

### ۳-۱-۲- ناحیه احتراق

ناحیه احتراق، محل آزاد شدن حرارت حاصل احتراق گاز طبیعی و اکسیژن است. در تحقیق حاضر، گاز طبیعی با متان تخمین زده شده است. همانند بسیاری از کاربردهای صنعتی دیگر، احتراق در کوره دوار ذوب آلومینیوم به صورت غیرپیش‌آمیخته و مغشوش است.

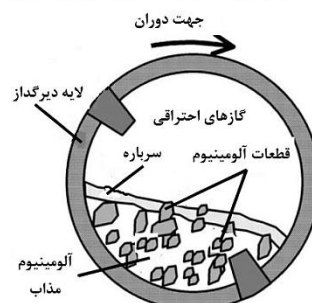
معادلات حاکم بر ناحیه احتراق معادلات بقای سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر شامل معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتوم، معادله بقای انرژی، و

## ۲- 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<sup>۱</sup> از جنس آلومین-سیلیکات<sup>۲</sup> پوشیده شده است. بدنه توسط سیستم تأمین نیرومحرکه دورانی به صورت افقی مهارشده و حول محور خود می‌چرخد. دو انتهای بدنه کوره باز بوده و مشعل در یک انتها قرار گرفته است و 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 (شکل ۱). بدنه با سرعت ۱/۳۳ دور بر دقیقه دوران می‌کند. 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 اکسند-سوخت<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. هر نوبت تهیه مذاب توسط این کوره ۴/۵ ساعت طول می‌کشد [۱].

## ۳- شبیه‌سازی کوره دوار ذوب آلومینیوم

کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم شامل پدیده‌های گوناگونی است که احتراق مغشوش و غیرپیش‌آمیخته گاز طبیعی و اکسیژن، تشعشع و جابجایی حرارت در فضای احتراق، هدایت حرارت در بدنه جامد، فرآیند ذوب و جابجایی حرارت در نواحی مذاب مهم‌ترین آن‌ها است. در کار حاضر با توجه به پدیده‌های مشخصی که در هر قسمت از کوره رخ می‌دهد، کوره به سه ناحیه تقسیم شده است: لایه دیرگداز، ناحیه احتراق و ناحیه ذوب (شکل ۲). مرزهای مشترک نواحی به نحوی تعریف شده‌اند که امکان انتقال حرارت را فراهم می‌کنند. به دلیل وجود لایه‌ای از سرباره روی مذاب و نیز به دلیل آنکه لازم است لایه دیرگداز خواصی مانند عدم واکنش با مواد درون کوره و مقاومت در برابر سایش داشته باشد، در مدل ارائه شده از انتقال جرم بین این



شکل ۱ کوره دوار ذوب آلومینیوم درحال کار (شکل بالا)، طرحواره مقطع کوره دوار ذوب آلومینیوم (شکل پایین) [۱].

1- Refractory Lining  
2- Alumina-Silicate  
3- Oxy-Fuel Burner

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. [۲۱].

در کار حاضر برای شبیه‌سازی تشعشع از مدل انتقال گسسته استفاده شده است. این مدل 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 به وجود می‌آورد [۲۲]. به منظور انتخاب تعداد پرتوهای کافی برای هر سلول محاسباتی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی کوره با ۱۶، ۳۲ و ۶۴ پرتو باهم مقایسه شدند که به دلیل اختلاف اندک بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ۳۲ و ۶۴ پرتو، تعداد ۳۲ پرتو برای کار حاضر انتخاب شد. همچنین به دلیل وجود گونه‌های  $H_2O$  و  $CO_2$  در محصولات احتراق، از مدل مجموع وزنی چند گاز خاکستری<sup>۳</sup> برای لحاظ کردن رفتار تشعشعی گازهای موجود در ناحیه احتراق استفاده شده است [۱۷].

برای جریان گازهای درون کوره مدل شناوری کامل بکاررفته است که نیروی شناوری را بر اساس تغییرات محلی چگالی که آن هم طبق قانون گاز کامل به تغییرات دما مرتبط است، محاسبه می‌کند. این کار با افزودن جمله چشمه شناوری به معادلات بقای مومنوم طبق رابطه (۷) انجام می‌شود:

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

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

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. با توجه به مرجع [۲۳]، مشعل مورد استفاده در این کوره از نوع غیر پیش‌آمیخته و بدون ایجاد چرخش در گازهای احتراقی بوده و حین کارکرد کوره از پیش‌گرمایش اکسیژن و یا سوخت ورودی به مشعل استفاده نشده است. همچنین حجم کل گاز طبیعی و اکسیژن ورودی به مشعل به ترتیب برابر با ۵۰۹ مترمکعب و ۹۳۳ مترمکعب در دمای محیط (۳۰۳ کلوین) بوده که با توجه به زمان کارکرد ۴/۵ ساعته کوره، دبی جرمی گاز طبیعی و اکسیژن ورودی به مشعل و نیز نسبت هم ارزی به ترتیب برابر با ۰/۲۱ کیلوگرم بر ثانیه، ۰/۷۷ کیلوگرم بر ثانیه و  $\phi=1/0.9$  هستند. مرز ورودی حفره‌ای دایروی به شعاع ۰/۱۷ متر بوده و تنظیم کلیه خواص جریان روی آن شامل توزیع مؤلفه‌های سرعت، دما، گونه‌ها، انرژی جنبشی اغتشاش و فرکانس اغتشاش با برازش توابع چندجمله‌ای به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی قبلی مشعل مورد استفاده در این کوره دوار ذوب آلومینیوم توسط [۲۳] و با استفاده از زبان داخلی نرم‌افزار انجام شده است. لازم به ذکر است با توجه به توزیع شعاعی سرعت، سرعت متوسط گازهای احتراقی ورودی به کوره برابر با ۴۴/۸ متر بر ثانیه محاسبه می‌شود. روی مرز خروجی از شرط فشار نسبی صفر با قابلیت رخ دادن جریان برگشتی<sup>۴</sup> استفاده شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک با ناحیه احتراق به صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور، شرط عدم لغزش و ضریب صدور تشعشعی لایه دیرگداز  $\alpha=0.7$  [۲۴] در نظر گرفته شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک ناحیه احتراق با ناحیه ذوب به صورت شار حرارت یکسان برای دو ناحیه مجاور و ضریب صدور

معادلات بقای گونه‌ها به همراه معادله حالت هستند. شکل متوسط‌گیری شده این معادلات به صورت زیر است (علامت □ نشان‌دهنده متوسط‌گیری زمانی و ~ نشان‌دهنده متوسط‌گیری فضاوری هستند):

• بقای جرم:

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

• بقای مومنوم:

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

• بقای گونه  $h$ :

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

• بقای انرژی:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{h})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{h})}{\partial x_i} = & \bar{\omega}_T + \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \bar{\rho} u_i'' h'' \right) \\ & + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} \sum_{n=1}^N V_n Y_n h_n \right) \end{aligned} \quad (5)$$

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

در روابط (۲) تا (۶)،  $u$  مؤلفه سرعت،  $u'$  نوسانات سرعت،  $p$  فشار،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش،  $\bar{\rho} u_i'' u_j''$  تنش‌های رینولدزی،  $G$  نیروی حجمی،  $Y_n$  کسر جرمی گونه  $h$ ،  $D_n$  ضریب نفوذ گونه  $h$ ،  $\bar{\rho} u_i'' Y_n''$  شار اغتشاشی کسر جرمی گونه  $h$ ،  $\bar{\omega}_n$  نرخ تولید گونه  $h$ ،  $h$  آنتالپی،  $\bar{\omega}_T$  نرخ حرارت آزاد شده ناشی از احتراق،  $\bar{\rho} u_i'' h''$  نرخ شار گرمایی رینولدزی و  $V_n$  سرعت نفوذ گونه  $h$  هستند [۱۸].

برای شبیه‌سازی اغتشاش جریان از مدل دومعادله‌ای  $k-\omega$  با انتقال تنش برشی استفاده شده است. این مدل برای هریک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاش،  $k$ ، و فرکانس اغتشاش،  $\omega$ ، یک معادله انتقال حل می‌کند و لزجت اغتشاشی را به وسیله آن دو متغیر تخمین می‌زند. به این ترتیب ضعف مدل  $k-\epsilon$  در نزدیکی مرز جامد در مدل‌های خانواده  $k-\omega$  برطرف می‌شود [۱۹]. مدل  $k-\omega$  با انتقال تنش برشی در نزدیکی مرز جامد از مدل اغتشاشی  $k-\omega$  و در فواصل دور از مرز جامد از مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  استفاده می‌کند و به این ترتیب از دقت مدل  $k-\omega$  و سرعت مدل  $k-\epsilon$  در محل مناسب هرمدل بهره‌می‌برد. همچنین این مدل از یک تابع دیواره توسعه یافته برای کاربردهای صنعتی استفاده می‌کند که برای دقت‌های قابل قبول در چنین شبیه‌سازی‌هایی به شبکه خیلی ریز در نزدیکی مرز جامد نیاز ندارد [۲۰].

مدل احتراقی اتلاف گردابه به طور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته و در تحقیق حاضر نیز از این مدل استفاده شده است. مدل اتلاف گردابه فرض می‌کند واکنش‌های شیمیایی بسیار سریع‌تر از فرآیندهای انتقال رخ می‌دهند و وقتی سوخت و اکسنده در ابعاد ملکولی باهم 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،  $\epsilon$ ، به انرژی جنبشی اغتشاشی،  $k$ ، تعریف می‌شود. از آنجا که در

2- Ray

3- Weighted Sum of Gray Gases Model (WSGGM)

4- Reverse Flow

1- Favre Averaging

تشعشع از سطح آزاد مذاب نیز  $\alpha = 0.8$  در نظر گرفته شده است [۴].

### ۳-۱-۳ ناحیه ذوب

آلومینیوم مذاب محصول کوره دوار ذوب آلومینیوم بوده و مدل سازی فرآیند ذوب آن بسیار مهم است. به این منظور در تحقیق حاضر مدل آنتالپی-تخلخل به نرم افزار سی اف ایکس افزوده شده است. این مدل براساس کارهای وولر و همکاران توسعه یافته [۸،۷] و بدون پرداختن به جزئیاتی مانند چگونگی تغییر در ساختار ملکولی، فرآیند ذوب را مدل می کند. این مدل ذوب مطابق با الگوی گسسته سازی حجم محدود توسعه یافته و اعمال آن به معادلات حاکم به آسانی و با افزودن جملات چشمه به معادلات بقای مومنوم و بقای انرژی امکان پذیر است. از دیگر مزایای مدل ذوب آنتالپی-تخلخل آن است که برخلاف مدل ذوب بکاررفته توسط ژو و همکاران [۴،۱] که فاز مذاب را نیز به صورت جامد فرض می کند، سیال بودن فاز مذاب و امکان القای حرکت از طریق دوران بدنه در فاز مذاب را نیز در نظر می گیرد. جملات چشمه وارد شده به معادلات مومنوم طبق رابطه (۸) عبارتند از:

$$S_n = C \frac{(1-F)^2}{F^3} u_n \quad (8)$$

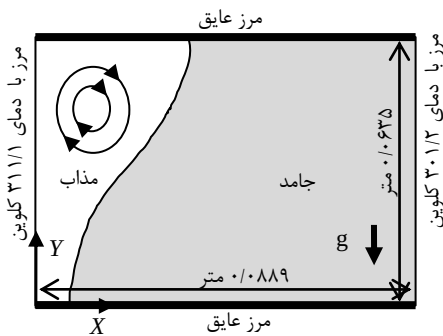
در رابطه (۸)،  $n$  اندیس نشان دهنده هریک از جهتهای اصلی،  $u_n$  بیانگر مؤلفه های سرعت در جهتهای اصلی معادله مومنوم،  $F$  کسر مایع و  $C$  عددی ثابت از مرتبه بزرگی  $10^{-5}$  است [۸]. کسر مایع، تابع دما بوده و با توجه به توزیع دما در دامنه حل، نواحی مذاب و جامد را بیان می کند، به نحوی که مقدار آن برای قسمت های ذوب شده ۱، برای قسمت های جامد صفر و برای مرز بین این دو ناحیه به صورت خطی بین صفر تا ۱ متغیر است [۷]. جمله چشمه مربوط به بقای انرژی نیز به صورت رابطه (۹) است:

$$S_h = \rho \frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (u \Delta H) \quad (9)$$

که در این رابطه (۹)،  $u$  بردار سرعت و  $\Delta H$  تابع دمایی آنتالپی نهان ذوب است که به صورت رابطه (۱۰) توصیف می شود:

$$\Delta H = FL \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $L$  آنتالپی نهان ذوب ماده است. همچنین برای لحاظ کردن نیروی شناوری در نواحی مذاب، از تقریب بوزینسک<sup>۱</sup> استفاده شده است. پس از افزودن جملات چشمه به نرم افزار، یک مساله معیار منطبق بر کارهای تجربی گائو و ویسکانتا [۲۵] حل و صحت مدل افزوده شده بررسی شده است. مساله مذکور شامل فرآیند ذوب فلز گالیوم<sup>۲</sup> خالص در یک حفره مستطیلی دوبعدی است. مرزهای سمت چپ و سمت راست حفره به ترتیب در دمای ثابت ۳۱۱/۱ کلوین و دمای ثابت ۳۰۱/۲ کلوین و مرز بالایی و پایینی عایق هستند. در ابتدا فضای داخل حفره با دیواره دما پایین همدماست. مشخصات حفره و شرایط مرزی مساله در شکل ۳ آورده شده است. برای حل مساله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه و گام زمانی بررسی شده و مشخص شد شبکه های ریزتر از  $128 \times 96$  گام های زمانی کمتر از ۰/۱ ثانیه تغییری در حل عددی به وجود نمی آورند. پس از یافتن شبکه و گام زمانی مناسب، راستی آزمایی حل عددی انجام شده و نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی [۲۵] مقایسه شده اند. شکل ۴ تغییرات دما در راستای محور افقی ( $X$ ) روی خط مرکزی  $Y=0.3175m$  در زمان های مختلف را نمایش می دهد که حاکی از تطابق مناسب حل عددی حاضر با داده های تجربی و کارکرد مناسب



شکل ۳ مشخصات میدان حل و شرایط مرزی و اولیه مساله ذوب گالیوم درحفره دوبعدی به منظور صحت آزمایی مدل ذوب افزوده شده به نرم افزار

مدل آنتالپی-تخلخل افزوده شده به نرم افزار هستند.

ناحیه ذوب توسط مرز مشترک با نواحی احتراق و لایه دیرگداز محصور شده است. شرط مرزی روی مرز مشترک با لایه دیرگداز، به صورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط عدم لغزش بوده و شرط مرزی روی مرز مشترک با ناحیه احتراق نیز به صورت یکسان بودن شار حرارت بین دو ناحیه و شرط لغزش آزاد تنظیم شده است.

### ۳-۱-۴ 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 می نماید. برای کوره دوار در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر که قطعات آلومینیوم قراضه را ذوب می کند،  $2.14\%$  جرمی از آلومینیوم به دلیل سوزش<sup>۳</sup> از دست می رود که منجر به آزاد شدن  $8540$  مگاژول انرژی در فضای کوره می شود. قسمت عمده این فرآیند در  $81.00\%$  ثانیه نخست کارکرد کوره رخ می دهد که به دلیل عدم وجود سرباره کافی روی آلومینیوم است. در کار حاضر از مدل ارائه شده توسط مرجع [۲۳] استفاده می شود که اثر کاهش جرم ناشی از سوزش آلومینیوم را به دلیل اندک بودن آن نادیده گرفته و رابطه (۱۱) را برای مقدار حرارت آزاد شده به خاطر سوزش آلومینیوم در گذر زمان ارائه داده است:

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

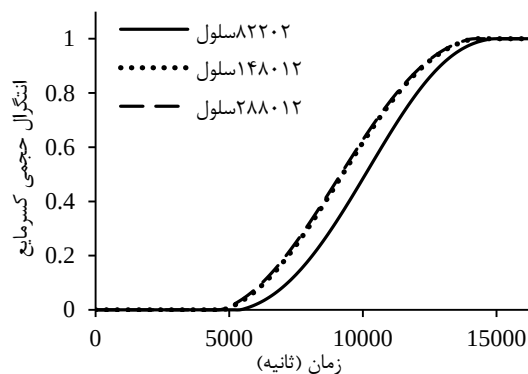
همچنین پس از سعی و خطا و آزمودن نسبت های مختلف، مرجع [۲۳] گزارش داده است بعنوان مناسب ترین حالت،  $80\%$  از این حرارت در ناحیه احتراق و مابقی در ناحیه ذوب آزاد می شود که به صورت جمله چشمه به معادله انرژی در این نواحی وارد می گردد.

### ۳-۲ ملاحظات حل عددی

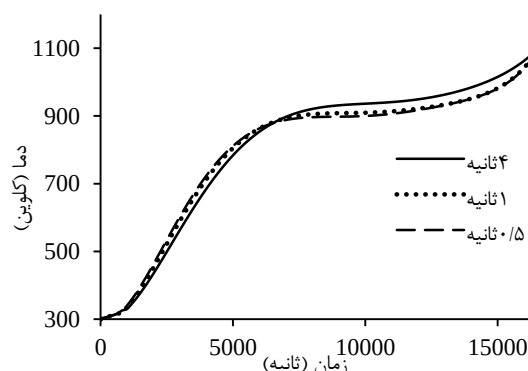
برای حل عددی مساله لازم است معادلات توضیح داده شده در قسمت های قبلی روی سلول های شبکه عددی گسسته و حل شوند. جهت ایجاد شبکه محاسباتی روی این هندسه، برای نواحی ذوب و احتراق از سلول های شش وجهی<sup>۴</sup> با ساختار با توزیع گره های یکنواخت در جهت  $Z$  و غیر یکنواخت در جهت های  $X$  و  $Y$  استفاده شده است. باتوجه به اهمیت پیش بینی رفتار سیال در نزدیکی مرزهای ناحیه ذوب، محل قرار گرفتن مشعل و محل خروج محصولات احتراق، در این قسمت ها از سلول های محاسباتی ریزتری استفاده

3- Burn-Off  
4- Hexahedral Cells

1- Boussinesq Approximation  
2- Gallium



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

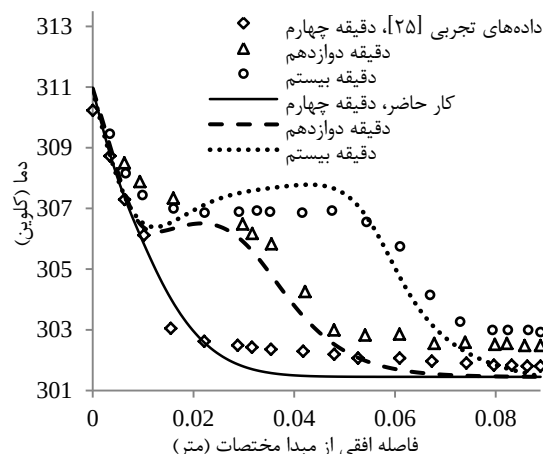


شکل ۶ نمودار تغییرات دمای ناحیه ذوب به منظور بررسی عدم وابستگی حل عددی به اندازه گام زمانی نهایی.

با واکنش یک مرحله‌ای در کار حاضر است، به این ترتیب فرض شده احتراق اکسیژن و گاز طبیعی کامل باشد. در نتیجه نسبت به احتراق غیرکامل که در عمل روی می‌دهد، حرارت بیشتری در فضای کوره آزاد می‌شود. از دیگر منابع اختلاف به وجود آمده مدل مورد استفاده برای سوزش آلومینیوم است که در زمان‌های کمتر از ۵۰۰۰ ثانیه روی نتایج عددی اثرگذار بوده است. در کار حاضر، متوسط درصد خطای نسبی نتایج عددی نسبت به داده‌های تجربی کمتر از ۱۳٪ است 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 ارائه‌شده و تنظیمات عددی مربوط به آن برای مطالعات موردی کوره دوار ذوب آلومینیوم استفاده کرد.

#### ۴- نتایج حل مساله

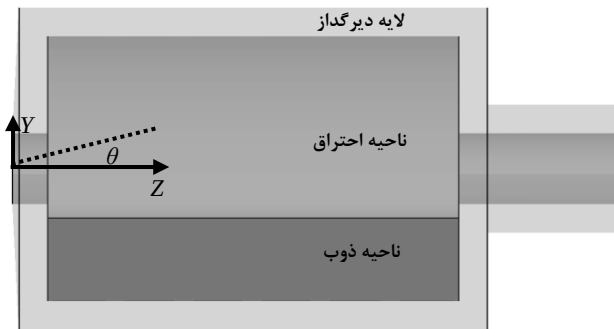
هدف از تحقیق حاضر ارائه راهکاری برای بهبود کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم و افزایش بازده حرارتی آن است. بنابراین به عنوان شاخصی برای تعیین کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم، اثر افزایش زاویه مشعل بر نرخ تهیه مذاب بررسی می‌شود. هرچه نرخ تهیه مذاب بیشتر باشد، زمان کارکرد کوره و مصرف سوخت کاهش می‌یابد. نرخ تهیه مذاب در هر لحظه از کارکرد کوره به وسیله انتگرال حجمی کسرمایع،  $F$ ، در ناحیه ذوب قابل محاسبه است. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تغییر زاویه مشعل در صفحه  $X=0$  و نسبت به محور  $Z$  انجام می‌شود. در کار حاضر تغییر زاویه مشعل از  $0^\circ$  تا  $15^\circ$  بررسی شده است.



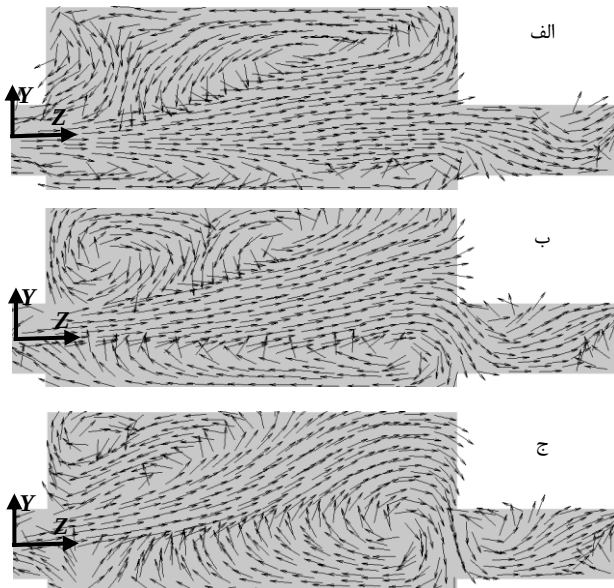
شکل ۷ راستی آزمایشی مدل ذوب افزوده شده به نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس. نمودار تغییرات دما در راستای محور افقی ( $X$ ) روی خط مرکزی  $Y=0.3175m$  در زمان‌های ۴دقیقه، ۱۲دقیقه، ۱۶دقیقه و ۲۰دقیقه در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۲۵].

شده است. به دلیل هندسه نسبتاً پیچیده، برای لایه دیرگداز از سلول‌های چهار وجهی<sup>۱</sup> برای تولید یک شبکه بی‌سازمان استفاده شده است. لازم به ذکر است این ناحیه جامد بوده و حل معادله هدایت حرارت روی یک شبکه بی‌سازمان حساسیتی ایجاد نمی‌کند. گسسته‌سازی مکانی معادلات با الگوی دقت بالا<sup>۲</sup> [۱۷] 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 مساله روی آن‌ها با هم 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) ضروری است از بزرگ‌ترین گام زمانی ممکن استفاده شود. اما استفاده از گام زمانی بزرگ از ابتدای حل مساله باعث واگرایی حل عددی می‌شود. برای رفع این مشکل، مقدار گام زمانی در شبیه‌سازی دقایق ابتدایی کارکرد کوره کوچک انتخاب‌شده و به تدریج افزایش می‌یابد. افزایش اندازه گام زمانی به نحوی انجام‌شده است که مقدار مانده‌های<sup>۳</sup> 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، ۴دقیقه بعدی با گام زمانی ۰/۱ ثانیه، ۱۰دقیقه 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 به عنوان شبکه و گام زمانی نهایی در کار حاضر انتخاب‌شده‌اند. داده تجربی در دسترس برای شبیه‌سازی عددی کوره مورد نظر تحقیق حاضر، تاریخچه دمای گازهای خروجی حین کارکرد کوره است که در مرجع [۴] گزارش شده است. مطابق شکل ۷، مقدار دمای متوسط گازهای خروجی محاسبه‌شده توسط روش عددی همواره بیشتر از داده‌های تجربی است. دلیل این امر استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه

1- Tetrahedral Cells  
2- High Resolution Scheme  
3- Residuals



شکل ۸ تعریف زاویه مشعل،  $\theta$ ، در صفحه  $X=0\text{m}$  و نسبت به محور مختصات  $Z$

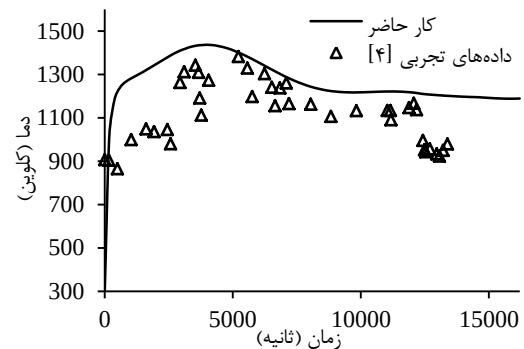


شکل ۹ تأثیر زاویه مشعل بر جریان گازها در ناحیه احتراق. بردارهای سرعت یکدست شده مماس بر صفحه  $X=0\text{m}$  و  $16000$  ثانیه پس از کارکرد کوره به ازاء الف:  $\theta=0^\circ$ ، ب:  $\theta=5^\circ$ ، ج:  $\theta=10^\circ$  (مبدأ مختصات بر محل استقرار مشعل قرار گرفته است).

$$\eta = \frac{Q_{\text{Usfl}}}{Q_{\text{Comb}}} \times 100 \quad (12)$$

جدول ۱ مشخصات عمده کارکرد کوره را نشان می‌دهد. با توجه به حجم گاز مصرفی طی کارکرد معمول کوره و ارزش حرارتی گاز طبیعی، مقدار حرارت آزاد شده برای یکبار تهیه مذاب از حاصل ضرب این دو کمیت قابل محاسبه است که مقداری برابر با  $16540$  مگاژول بدست می‌آید. از سوی دیگر با زاویه دار کردن مشعل به اندازه  $\theta=10^\circ$ ، آلومینیوم مذاب  $35$  دقیقه زودتر تهیه می‌شود و حرارت مورد نیاز و مصرف سوخت نیز به همین نسبت کاهش می‌یابد. در این حالت حرارت احتراقی مورد نیاز برابر با  $14390$  مگاژول محاسبه می‌شود. همچنین حرارت مفیدی که صرف تهیه  $10$  تن آلومینیوم مذاب با دمای متوسط  $1060$  کلوین می‌شود نیز برابر با  $10750$  مگاژول بدست می‌آید. بنابراین با استفاده از رابطه (۱۲)، تغییر زاویه مشعل از  $\theta=0^\circ$  به  $\theta=10^\circ$  باعث می‌شود بازده کوره دوار ذوب آلومینیوم مورد مطالعه از  $65\%$  به  $74.7\%$  افزایش یابد.

به منظور بررسی نقش هریک از مکانیزم‌های انتقال حرارت در کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم، شار حرارت تشعشی و جابجایی ورودی از مرز مشترک نواحی ذوب و احتراق و شار حرارت هدایتی ورودی از مرز مشترک نواحی ذوب و لایه دیرگداز به ناحیه ذوب از نتایج حل عددی استخراج و



شکل ۷ مقایسه دمای متوسط در مرز خروجی کوره با داده‌های تجربی [۴] و صحت آزمایشی حل عددی کوره دوار ذوب آلومینیوم در کار حاضر.

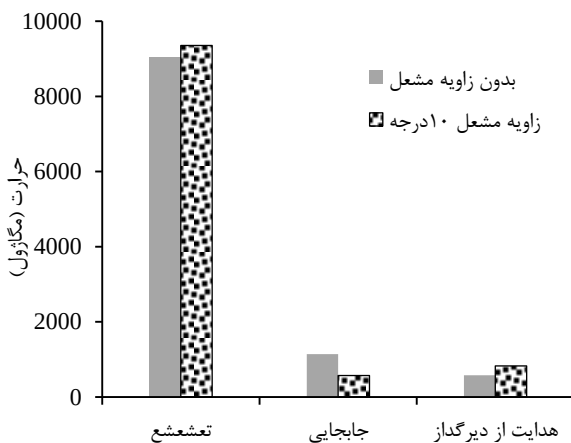
افزایش زمان اقامت<sup>۱</sup> گازهای احتراقی در فضای کوره به بهبود انتقال حرارت در فضای کوره و افزایش کارایی کوره دوار ذوب آلومینیوم منجر می‌شود. هرچه زمان ماند گازهای احتراقی بیشتر باشد، فرصت انتقال حرارت از گازهای داغ حاصل از احتراق به مواد درون کوره و بنابراین دمای کوره افزایش می‌یابد که سهم تشعشع از شعله را نیز افزایش می‌دهد [۲۶]. این کار با زاویه‌دار کردن مشعل و ایجاد چرخش بیشتر گازها در فضای کوره قابل اجرا است. از سوی دیگر، با زاویه‌دار کردن مشعل در جهت مثبت الگوی شکل ۸، شعله به لایه دیرگداز نزدیک شده و دمای لایه دیرگداز را بالا می‌برد. به این ترتیب تشعشع از لایه دیرگداز افزایش می‌یابد که امری مطلوب است [۲۷]. بنابراین زاویه‌دار کردن جت ورودی سوخت و اکسنده به درون کوره روشی مناسب برای بهبود کارکرد کوره است. شکل ۹ تأثیر زاویه مشعل بر جریان گازهای درون کوره را برای زوایای مختلف و با نمایش بردارهای سرعت یکدست شده<sup>۲</sup> مماس بر صفحه  $X=0\text{m}$  در ثانیه  $16000$  ام کارکرد کوره نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه مشعل، گردابه‌های موجود بزرگتر شده و گازهای احتراقی بجای آنکه مستقیماً از کوره خارج شوند، وارد گردابه‌های تشکیل شده می‌گردند که در نتیجه زمان اقامت آنها در کوره افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ نمودارهای تغییرات زمانی مقدار مذاب تولیدی را برای زوایای مشعل  $0^\circ$ ،  $5^\circ$ ،  $10^\circ$ ،  $15^\circ$  باهم مقایسه کرده است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه مشعل تا  $\theta=15^\circ$ ، سرعت تهیه مذاب مرتباً افزایش می‌یابد. اما در این میان محدودیت‌های فیزیکی لایه دیرگداز عامل محدودکننده افزایش زاویه مشعل است. یکی از پیامدهای افزایش زاویه مشعل، افزایش دمای لایه دیرگداز است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، حین کارکرد کوره، قسمتی از لایه دیرگداز که اطراف مرز ورودی را فراگرفته بیش‌ترین دما را دارد. طبق گزارش [۲۸]، بیشینه دمای قابل تحمل دیرگدازهای با جنس آلومین-سیلیکات  $2070$  کلوین است و دماهای بیشتر به تغییر شکل و تجزیه دیرگداز منجر می‌شود. پس از اندازه‌گیری حداکثر دما در لایه دیرگداز، مشاهده شد به ازاء زوایای  $15^\circ$ ،  $12.5^\circ$  از این حد تجاوز می‌شود (شکل ۱۲). بنابراین مناسب‌ترین زاویه مشعل،  $\theta=10^\circ$  پیشنهاد می‌گردد که با استفاده از آن زمان کارکرد کوره  $35$  دقیقه کاهش می‌یابد.

به عنوان معیاری برای مقایسه کارکرد کوره در دو حالت معمول و کار با زاویه مشعل  $\theta=10^\circ$ ، رابطه (۱۲) بازده حرارتی کوره را به صورت نسبت حرارت مصرف‌شده برای تهیه محصول،  $Q_{\text{Usfl}}$ ، به حرارت حاصل از احتراق،  $Q_{\text{comb}}$ ، تعریف کرده است:

1- Residence Time  
2- Normalized Velocity Vectors

جدول ۱ مشخصات کارکرد کوره دوار ذوب آلومینیوم [۲۳].

| پارامتر کارکرد کوره      | مقدار                       |
|--------------------------|-----------------------------|
| زمان کارکرد              | ۴/۵ ساعت                    |
| مقدار گاز مصرفی          | ۵۰۹ مترمکعب                 |
| ارزش حرارتی پایین سوخت   | ۳۲/۴۵ مگاژول بر مترمکعب     |
| مقدار قراضه ورودی        | ۱۷ تن                       |
| نقطه ذوب آلومینیوم       | ۹۳۳ کلوین                   |
| ظرفیت حرارتی آلومینیوم   | ۹۰۳ ژول بر کیلوگرم بر کلوین |
| حرارت نهان ذوب آلومینیوم | ۳۹۷ کیلوژول بر کیلوگرم      |
| مقدار آلومینیوم استخراجی | ۱۰ تن                       |

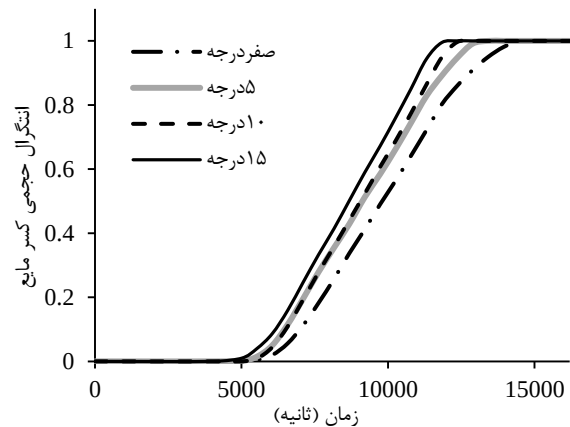
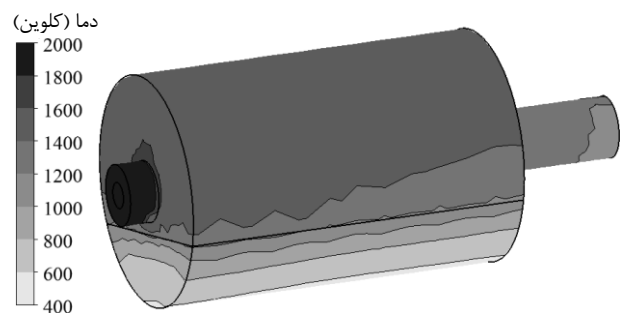
شکل ۱۳ تأثیر افزایش زاویه مشعل از  $\theta=0^\circ$  تا  $\theta=10^\circ$  بر سهم هریک از مکانیزم‌های انتقال حرارت به ناحیه ذوب.

#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در کار حاضر مدلی برای شبیه‌سازی عددی یک کوره دوار ذوب آلومینیوم ارائه شد که فرآیندهای احتراق مغشوش و غیرپیش‌آمیخته گاز طبیعی و اکسیژن، تشعشع، دوران بدنه، ذوب آلومینیوم و اکسایش آلومینیوم را در نظر می‌گیرد. پس از دستیابی به تطابق مناسب نتایج حل عددی و داده‌های تجربی، مدل مذکور برای بررسی موردی اثر تغییر زاویه مشعل بر بهبود کارایی حرارتی این کوره به کار گرفته شد. نتایج این مطالعه نشان داد اگرچه افزایش زاویه مشعل زمان اقامت گازهای داغ احتراقی در فضای کوره و در نتیجه نرخ تهیه مذاب را افزایش می‌دهد، اما به دلیل نزدیک شدن شعله به بدنه کوره و بالا رفتن بیش‌ازحد دمای قسمت‌هایی از لایه دیرگداز که به شعله نزدیک‌تر است، اندازه زاویه مشعل محدود می‌شود. لازم به ذکر است مدل ارائه‌شده، با تغییرات جزئی می‌تواند برای شبیه‌سازی و بهبود شرایط کارکرد سایر کوره‌های دوار ذوب فلز نیز به کار رود.

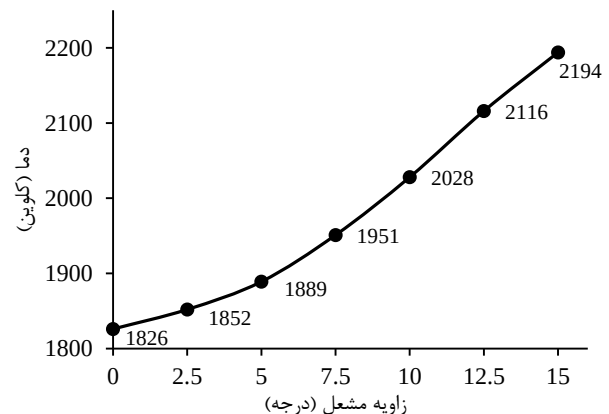
#### ۶- مراجع

- [1] B. Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter, U. M. J. Boin, Modelling of aluminium scrap melting in a rotary furnace, *Minerals Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 299-308, 2006.
- [2] T. Bourgeois, R. T. Bui, A. Charette, Y. S. Kocaefe, Mathematical modeling of an aluminum casting furnace combustion chamber, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20, No. 3, pp. 421-429, 1989.
- [3] 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, pp. 723-749, 1994.
- [4] B. Zhou, Y. Yang, M. A. Reuter, U. M. J. Boin, CFD-based process modelling of a rotary furnace for aluminium scrap melting, in *Fourth International*

شکل ۱۰ مقایسه تاریخچه مقدار مذاب تولیدی برای زاویه‌های مشعل از  $\theta=0^\circ$  تا  $\theta=15^\circ$ .

شکل ۱۱ توزیع دما روی سطح داخلی لایه دیرگداز ۷۲۰۰ ثانیه پس از کارکرد کوره و به ازاء زاویه مشعل ۵ درجه.

سپس از این داده‌ها در گذر زمان انتگرال‌گیری شده‌است. شکل ۱۳ نتایج این محاسبات را در دو حالت بدون زاویه مشعل و با زاویه مشعل  $\theta=10^\circ$  باهم مقایسه کرده است. در این شکل، نقش تعیین‌کننده تشعشع در کارکرد کوره در مقابل انتقال حرارت جایجایی مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش زاویه مشعل از  $\theta=0^\circ$  تا  $\theta=10^\circ$ ، سهم تشعشع از ۸۴٪ به ۸۷٪ افزایش، سهم هدایت حرارت از لایه دیرگداز از ۵/۴٪ به ۷/۷٪ افزایش و سهم جایجایی حرارت از ۱۰/۶٪ به ۵/۳٪ کاهش یافته است. دلیل این امر افزایش دمای کوره در اثر افزایش زاویه مشعل و تأثیرپذیری بیشتر تشعشع از این افزایش دما در مقابل انتقال حرارت جایجایی و نیز افزایش دمای لایه دیرگداز به دلیل نزدیک شدن شعله به آن بوده است.



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



- [15] S. H. Poorhosseini, A. Saeidi, M. Moghiman, Experimental and numerical investigation of the inlet air swirl angle effects on temperature profile and CO, NO pollutants, *Journal of Energy Engineering Management* Vol. 2, No. 1, pp. 31-40, 2012. (In Persian)
- [16] *ANSYS CFX 14.5 tutorials*: ANSYS Inc., 2012.
- [17] *ANSYS CFX-Solver theory guide*: ANSYS Inc., 2012.
- [18] T. Poinso, D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*, Second ed., Philadelphia: Edwards, 2005.
- [19] F. R. Menter, Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows, in *24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, Florida, 1993.
- [20] F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Vol. 4, pp. 625-632, 2003.
- [21] B. F. Magnussen, B. H. Hjertager, On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 16, No. 1, pp. 719-729, 1977.
- [22] F. C. Lockwood, N. G. Shah, A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 18, No. 1, pp. 1405-1414, 1981.
- [23] 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, Netherland, 2005.
- [24] M. A. Taimarov, F. A. Garifullin, D. Z. Davletbaeva, Emissivity of aluminosilicate refractories, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 53, No. 3, pp. 1027-1031, 1987.
- [25] C. Gau, R. Viskanta, Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, No. 1, pp. 174-181, 1986.
- [26] C. E. J. Baukal, *Heat transfer in industrial combustion*, pp. 31-34, New York: CRC Press, 2000.
- [27] A. Adeli Koodehi, S. Valipour Givi, H. Haghighipour, A natural gas burner and combustion system for casy iron rotary furnaces, in *Fourth Iran Fuel and Combustion Conference*, Kashan, Iran, 2012. (In Persian)
- [28] D. A. Brosanan, *Alumina-Silica Brick*, in: C. A. Schacht, *Refractories Handbook*, Eds., pp. 61-62, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries*, Trondheim, Norway, pp. 1-8, 2005.
- [5] Z. F. Tian, P. J. Witt, M. P. Schwarz, W. Yang, Comparison of two-equation turbulence models in simulation of a non-swirl coal flame in a pilot-scale furnace, *Combustion Science and Technology*, Vol. 181, No. 7, pp. 954-983, 2009.
- [6] A. O. Nieckele, M. F. Naccache, M. S. Gomes, Combustion performance of an aluminum melting furnace operating with liquid fuel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 437-444, 2010.
- [7] 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, No. 1, pp. 271-284, 1987.
- [8] V. R. Voller, C. Prakash, 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, pp. 1709-1719, 1987.
- [9] 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, pp. 517-525, 1995.
- [10] M. Carmona, C. Cortés, Numerical simulation of a secondary aluminum melting furnace heated by a plasma torch, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 334-346, 2014.
- [11] M. Nishimura, T. Suzuki, R. Nakanishi, R. Kitamura, Low-NOx combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace, *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 10, pp. 1353-1363, 1997.
- [12] Y. Khazraei, K. Bashirnejad, H. Mohhadi Haravi, E. Abrishamchi, Experimental and numerical investigation of the effect of fuel injection angle on NOx production in a liquid fuel combustion chamber, in *Third Iran Fuel and Combustion Conference*, Tehran, 2010. (In Persian)
- [13] Z. Li, F. Ren, G. Liu, S. Shen, Z. Chen, Influence of angled secondary air on combustion characteristics of a 660-MWe down-fired utility boiler, *Combustion Science and Technology*, Vol. 183, No. 3, pp. 238-251, 2010.
- [14] H. Masoomi, H. Aabroshan, Numerical investigation of burner angles effect on the combustion phenomenon in a selected power plant boiler, *Fuel and Combustion*, Vol. 5, No. 1, pp. 1, 2012. (In Persian)