

بهینه سازی الگوی جریان مذاب در تاندیش فولادسازی به منظور تولید فولاد تمیز و ایجاد حداقل مقدار اختلاط

مهدی علی زاده^{۱*}، حسین ادریس^۲

^۱ پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته - پژوهشگاه مواد و انرژی

^۲ دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ ثبت اولیه: ۹۰/۱۲/۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۸/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۸/۲۶

چکیده اساساً شرایط برای حذف بهتر ناخالصی‌های غیر فلزی و همچنین کنترل اختلاط در تاندیش و کاهش مقدار اختلاط عمدتاً تابع نوع الگوی جریان سیال در تاندیش می باشد. در این رابطه نوع طراحی و شکل هندسی تاندیش از جمله موارد تأثیر گذار بر رفتار جریان مذاب در تاندیش می باشد. در این پژوهش برای دستیابی به یک تاندیش با ایجاد کمترین مقدار اختلاط و امکان بیشترین حذف ناخالصی، طراحی‌های مختلفی در نظر گرفته شده است. برای این منظور ابتدا با ترکیب سازی وسایل کنترل جریان مانند کاهنده اغتشاش (Turbo Stopper)، موانع (weir)، سدها (dam) و baffle حالت‌های مختلفی برای ساختار داخلی تاندیش پیشنهاد شده است. برای تاندیش مورد نظر یک مدل ریاضی اختلاط طراحی، و پارامترهای آزاد مدل مربوط به هر یک از حالات در نظر گرفته شده، توسط یک سیستم مدل آبی با مقیاس یک-چهارم تاندیش واقعی کالیبره شده است. سپس با رسم منحنی‌های توزیع زمان اقامت سیال (RTD) و پیش بینی‌های حاصل از مدل ریاضی، مشخصه‌های الگوی جریان سیال برای طرح‌های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت با مقایسه منحنی‌های RTD مربوط به حالات مختلف، بهترین حالت برای تاندیش با امکان حذف بیشترین ناخالصی و ایجاد کمترین مقدار اختلاط در فولاد مذاب استفاده از کاهنده اغتشاش و یک جفت سد به عنوان یک طرح بهینه پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: اختلاط، تاندیش، ناخالصی‌های غیر فلزی، مدل ریاضی اختلاط، وسایل کنترل جریان

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: -، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۷، پیام‌نگار: mehdializadeh@merc.ac.ir

Optimization of fluid flow pattern of molten steel in the steelmaking tundish for clean steel production and optimum intermix amount

Mehdi Alizadeh¹, Hossain Edris²

*Nanotechnology and advanced materials Department, Materials and Energy Research Center
Materials Engineering Department, Isfahan University of Technology*

Abstract Principally, fluid flow pattern in the tundish has important character during the operational conditions such as removing non-metallic inclusions and mixing control. Type of design and geometrical shape of tundish are effective parameters on fluid flow pattern of molten steel in the tundish. In this research, different designing of tundish configuration are considered for achievement to a tundish configuration with optimization of intermix and removing inclusions. With combination of different fluid control devices such as: weir, dam, baffle and turbo stopper, different configuration are suggested for tundish. Furthermore, a mathematical mixing model is designed and free parameters of the model related to each configuration of tundish are determined by a physical model of tundish with one quarter of real scale. Then, residence time distribution curve of each configuration is plotted and characterization of fluid flow pattern is investigated by the mathematical model prediction results. With comparison of RTD curves of different tundish configuration, the best case for fluid flow pattern when is used turbo stopper with a pair of dams as both maximum flotation of inclusions and minimum amount of intermix are evidenced.

Keywords: Tundish, Intermix, Non-metallic inclusions, Mixing model, Fluid control devices.

۱- مقدمه

در تاندیش، امکان کاهش حجم فولاد مخلوط شده بین دو ذوب متوالی در طی عملیات تغییر جنس فولاد فراهم خواهد شد. در خصوص نحوه مطالعه و ارزیابی تاندیش های با پیکربندی های مختلف، علاوه بر مدل های فیزیکی و مدل های ریاضی سه بعدی مربوط به حل معادلات حاکم بر جریان سیال می توان از مدل های اختلاط برای پیش بینی منحنی های RTD^2 در راکتورها نیز استفاده نمود [۲]. از آنجایی که عملکرد تاندیش شبیه یک راکتور بوده لذا می توان از این مدل ها برای آن نیز استفاده نمود. اساساً دو مدل راکتور با جریان قالبی^۳ و راکتور با اختلاط کامل^۴ خاص راکتورهای با جریان های ایده آل بوده و پایه و اساس مدل های اختلاط در جریان های واقعی را نیز تشکیل می دهند [۳]. یکی از شاخصه های مهم این مدل ها سرعت پاسخ دهی بسیار بالای آن ها به لحاظ یک بعدی بودن معادلات حاکم می باشد. اصولاً در معادلات دیفرانسیلی این مدل ها تعدادی پارامترهای مجهول وجود دارد که لازم است این پارامترهای مجهول توسط نتایج یک مدل آبی و یا توسط نتایج یک مدل ریاضی سه بعدی کالیبره گردند. در این پژوهش ابتدا سعی شده با طراحی یک مدل اختلاط راکتوری مناسب، بین رفتار الگوی جریان سیال در تاندیش و پاسخ مدل ریاضی یک تناظر و تطابق قابل قبولی برقرار گردد. سپس با در نظر گرفتن انواع تجهیزات کنترل جریان در تاندیش و تغییر الگوی جریان سیال، مقادیر مربوط به هر یک از پارامترهای مجهول مدل اختلاط که برای هر نوع تاندیش مقادیر ویژه و خاصی می باشند، توسط برازش با داده های مدل فیزیکی (آبی) تعیین گردند. سپس با تجزیه و تحلیل نتایج، بهترین حالت به لحاظ کمترین حجم فولاد مخلوط شده بین دو ذوب و بیشترین مقدار حذف ناخالصی ها از مذاب در تاندیش بدست خواهد آمد.

مسئله حضور جریان های گردابی و مغشوش بودن جریان در تاندیش می تواند میزان شناور شدن ذرات ناخالصی در فولاد مذاب را بشدت تحت تأثیر خود قرار دهد. از آنجایی که بوجود آمدن جریان مغشوش و تشکیل گردابه های چرخشی در محل هایی از تاندیش اجتناب ناپذیر می باشد، لذا شناور شدن ذرات ریز تابع الگوی جریان سیال در تاندیش خواهد بود. در این راستا با نصب تجهیزات کنترل جریان در تاندیش امکان کنترل الگوی جریان سیال در تاندیش فراهم می گردد. بطوری که می توان با بهینه سازی الگوی جریان مذاب در تاندیش امکان شناور سازی و حذف بهتر ناخالصی ها در تاندیش را فراهم نمود. در این رابطه محققان بسیاری با به کار بردن انواع وسایل کنترل جریان مذاب در تاندیش و تغییر موقعیت آن ها، بهترین شرایط را با استفاده از مدل سازی فیزیکی و ریاضی جریان مذاب در تاندیش پیش بینی نموده اند [۱].

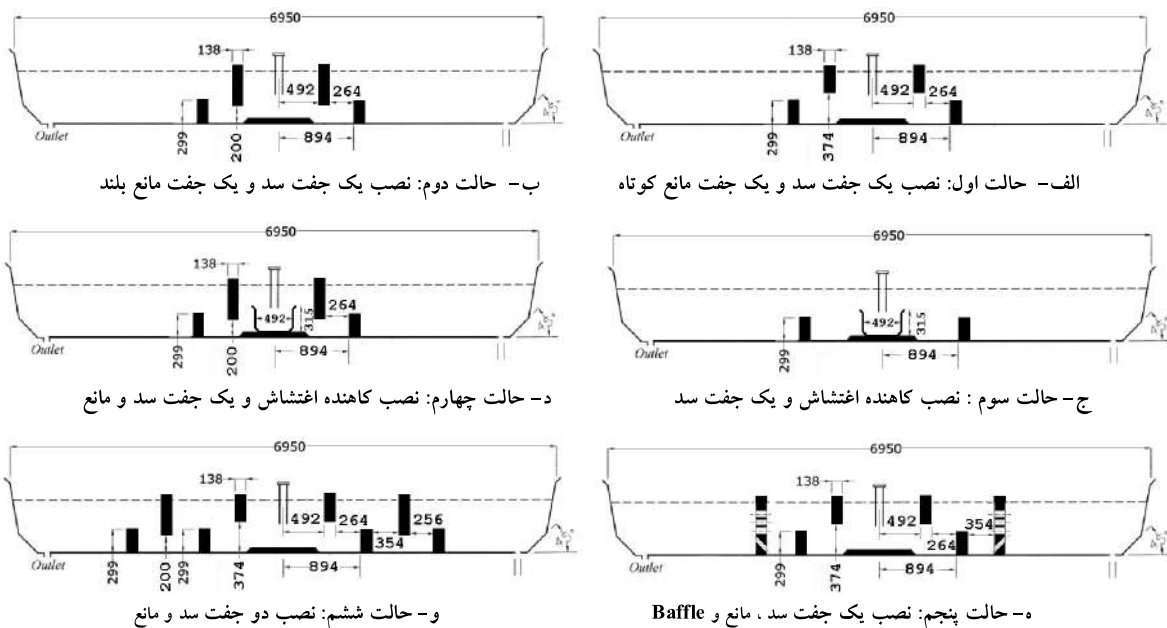
از طرف دیگر نوع طراحی وسایل کنترل جریان و موقعیت قرارگیری آنها در تاندیش و همچنین نحوه ترکیب سازی آنها با یکدیگر از مهمترین عوامل موثر در کاهش حجم فولاد مخلوط شده بین دو ذوب متوالی در تاندیش، طی عملیات تغییر جنس فولاد در فرایند ریخته گری مداوم فولاد نیز بشمار می رود. در این موارد تولید کنندگان فولاد بخشی از محصول را که اختلاط در آن رخ داده است را شناسایی و به عنوان قراضه و یا فولاد با کیفیت پائین از فرایند تولید خارج می کنند. با توجه به این که این موضوع به لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت می باشد، لازم است به هنگام عملیات تغییر نوع فولاد^۱ راه کارهای مناسب جهت بهینه کردن سیستم به منظور تولید حداقل مقدار فولاد مخلوط شده در تاندیش به کار گرفته شود. کنترل الگوی جریان سیال یکی از راه های کاهش حجم اختلاط بین دو ذوب در تاندیش را تاحدودی فراهم می نماید. با توجه به اثر محسوس استفاده از تجهیزات کنترل جریان بر تغییر الگوی جریان سیال

² Residence Time Distribution

3- Plug Flow Reactors (PFR)

4- Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR)

¹ Transition grade



شکل ۱. انواع حالت های در نظر گرفته شده برای کنترل جریان سیال در تاندیش.

۲- روش تحقیق

به منظور انتخاب بهترین ساختار برای شکل هندسی داخل تاندیش ابتدا مطابق شکل (۱) طرح های مختلفی در نظر گرفته شده است. انتخاب حالت های ذکر شده حاصل جمع بندی فاکتورهای مختلفی از جمله: آزمون های تجربی انجام شده بصورت سعی و خطا، تحقیقات انجام شده قبلی توسط سایر محققین و ترکیب سازی دو یا چند حالت با یکدیگر بوده است [۱، ۴ و ۵]. جهت مطالعه الگوی جریان سیال برای هر یک از موارد انتخابی علاوه بر استفاده از مدل آبی از مدل های ریاضی نیز برای تعیین برخی از شاخصه های جریان در تاندیش بهره گرفته شده است. سیستم مدل آبی ساخته شده برای این منظور دارای یک مدل فیزیکی از تاندیش واقعی با مقیاس یک-چهارم بوده است. برای انجام آزمون ها ابتدا با تزریق محلول نمکی کلرید پتاسیم (ماده ردیاب) با غلظت 20 kg.m^{-3} به جریان ورودی به تاندیش تغییرات هدایت یونی آب در خروجی تاندیش با استفاده از دستگاه هدایت سنج اندازه گیری شده است. با عبور جریان سیال از داخل لوله خروجی تاندیش، مقاومت الکتریکی

جریان آب عبوری توسط دو حسگر از طریق پتانسیل اعمال شده بین آن ها و توسط دستگاه هدایت سنج اندازه گیری می شود. پس از ثبت تغییرات هدایت آب در خروجی تاندیش و استفاده از منحنی های کالیبراسیون (توسط آن ها ارتباط بین هدایت و غلظت نمک در آب بیان می شود) تغییرات غلظت بدون بعد در مقابل زمان بدون بعد (منحنی های RTD) در خروجی تاندیش برای سیال گذر کرده از تاندیش ترسیم شده است. برای بدون بعد کردن زمان و غلظت از روابط زیر استفاده شده است [۶].

$$\bar{t} = \frac{\sum_0^{\infty} t_i c_i \Delta t}{\sum_0^{\infty} c_i \Delta t} \quad \theta = \frac{t}{\bar{t}}$$

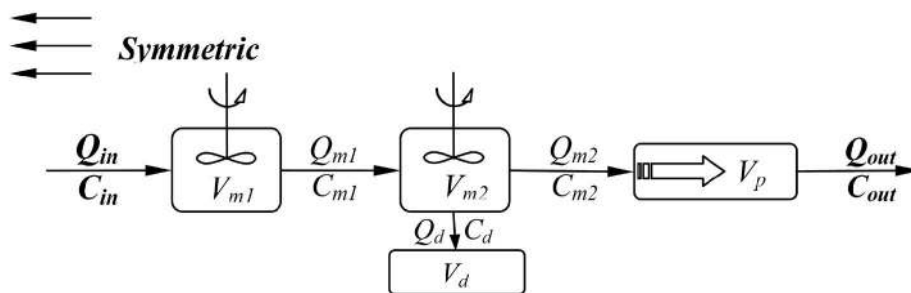
$$C_{(\theta)} = \frac{c_{(\theta)}}{\sum_0^{\infty} c_i \Delta \theta}$$

در روابط فوق θ زمان بدون بعد، $C_{(\theta)}$ غلظت بدون بعد، \bar{t} متوسط زمان اقامت سیال در تاندیش و c_i غلظت ماده ردیاب در خروج در لحظه t_i است.

بدلیل تقارن در تاندیش، نصف حجم تاندیش با ترکیب سازی مدل های PFR و CSTR به همراه حجم ناحیه مرده

مدل سازی شده است. در شکل (۲) مدل اختلاط پیشنهادی به صورت شماتیک نشان داده شده است. با ارضای قانون بقای جرم برای هر کدام از مدل های جریانی، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدل اختلاط به صورت زیر بدست خواهند آمد [۷]:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{m1}}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_{m1}}(C_{in} - C_{m1}) \\ \frac{dC_{m2}}{dt} &= \frac{Q_{m1}}{V_{m2}}(C_{m1} - C_{m2}), \quad C_{out} = C_{m2}(t-t_p) \\ V_i &= f_i \cdot V_T \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۲. مدل عمومی اختلاط تاندیش.

در روابط فوق Q_{in} و C_{in} غلظت بدون بعد شده و دبی حجمی سیال ورودی به تاندیش، Q_{out} و C_{out} غلظت بدون بعد شده و دبی حجمی سیال خروجی از تاندیش می باشد که بر روی شکل (۲) نیز نشان داده شده است. همچنین Q_i و C_i بعنوان غلظت بدون بعد شده و دبی حجمی سیال خروجی از باکس i در مدل اختلاط در نظر گرفته شده است. t_p یک زمان تأخیری بوده و مربوط به عبور سیال از ناحیه جریان قالبی می باشد. در روابط فوق پارامتر f_i (کسر حجمی هر کدام از راکتورها) مجهول می باشد که توسط داده های مدل آبی تعیین خواهد شد. مقادیر اولیه و شرط مرزی لازم برای حل معادلات به صورت زیر تعریف می شوند:

$$C_i(t=0) = 0 \quad C_{in}(t \geq 0) = 1 \quad (2)$$

معادلات دیفرانسیل ارائه شده در رابطه (۱) از نوع معمولی مرتبه اول بوده و از روش رانگ- کوتای مرتبه چهار برای حل این معادلات با مقدار اولیه استفاده شده است [۸].

سپس مدل اختلاط پیشنهادی برای مقادیر مختلفی از کلیه پارامترهای f_i به طور متوالی اجرا گردیده است. در هر بار اجرا پاسخ مدل اختلاط با نتایج مدل آبی مقایسه گردیده و مجموع اختلاف بین داده های تجربی و نتایج مدل ریاضی محاسبه گردیده است. با حداقل شدن مقدار اختلاف در بین اجراهای صورت گرفته، بهترین مقادیر برای هر یک از پارامترهای مجهول بدست خواهد آمد. مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مجهول به عنوان شاخصه های منحنی RTD مربوط به تاندیش با شکل هندسی مورد بررسی منظور شده است. این دستورالعمل برای هر یک از طرح های پیشنهادی که در راستای کنترل الگوی جریان سیال صورت گرفته، انجام پذیرفته است.

جهت محاسبه اختلاط بوجود آمده بین دو ذوب متوالی با ترکیب شیمیایی مختلف در تاندیش از نمودار تغییرات غلظت بدون بعد ذوب جدید (ذوب دوم) نسبت به زمان استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از نتایج حل عددی مدل اختلاط منحنی RTD شاخص مربوط به تاندیش مورد نظر پیش بینی شده است. سپس با استفاده از رابطه زیر نمودار افزایش

غلظت ذوب جدید نسبت به زمان تخلیه پاتیل ذوب جدید به داخل تاندیش رسم گردیده است:

$$F(\theta) = \int C(\theta) d\theta \quad (\text{معادله ۳})$$

هر دو تابع $C(\theta)$ و $F(\theta)$ چگونگی توزیع ماده ردیاب در داخل مخزن را بیان می نمایند با این تفاوت که اگر افزودن ماده ردیاب به جریان سیال در یک مدت زمان کوتاه صورت گرفته باشد، تابع C بیان کننده تغییرات غلظت ماده ردیاب در خروجی سیستم خواهد بود و اگر افزودن ماده ردیاب به جریان ورودی سیستم بصورت مداوم انجام شده باشد تابع بدون بعد F بیانگر آن می باشد. در این راستا با تعیین حدود بالا و پائین (حدود مجاز اختلاط) بر روی نمودار غلظت، مقدار فولاد مخلوط شده در خروجی تاندیش محاسبه شده است. میزان اختلاط بین حدود تعریف شده تعیین کننده آن حجم از ذوب مخلوط شده خواهد بود که ترکیب شیمیایی آن به هیچ کدام از دامنه های مجاز ترکیب شیمیایی ذوب های قدیم و جدید تعلق نخواهد داشت.

۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) نتایج برخی از آزمون های تجربی انجام شده توسط مدل فیزیکی تاندیش برای یک شکل هندسی مشخص بطور نمونه نمایش داده شده است. آزمونها برای یک گستره نسبتاً وسیعی از دبی های جریانهای مختلف و حجم سیالهای متفاوت در تاندیش، تحت شرایط کاملاً پایا صورت گرفته است. همانطور که ملاحظه می شود منحنی های RTD در شرایط مختلف عملیاتی (دبی های جریانهای مختلف و حجم ذوب های متفاوت) بر هم منطبق شده اند. مطالعات انجام شده توسط دیگر محققان نشان داده است، در سیستم های تاندیش با جریان مغشوش برای یک محدوده وسیعی از تغییرات دبی سیال و اندازه تاندیش، معیار تشابه برابری عدد بدون بعد رینولدز

مغشوش^۱ می باشد، که با توجه به نتایج بدست آمده این عدد برای گستره نسبتاً وسیعی از متغیرهای مختلف در تاندیش ثابت خواهد بود. همچنین مطالعات انجام شده توسط سینگ و کوریا نشان می دهد در تاندیش های با جریان مغشوش جمله ρLU متناسب با ویسکوزیته مؤثر (μ_{eff}) تغییر خواهد کرد، لذا عدد رینولدز مغشوش ثابت خواهد ماند [۹]. بنابراین در مدل های آبی با جریان مغشوش علاوه بر شبیه سازی هندسی بایستی از معیار برابری عدد رینولدز مغشوش بین مدل و نمونه واقعی استفاده شود. همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می شود این موضوع در شرایط آزمون های انجام شده صحت داشته و نمودار RTD برای آزمون های مختلف بر هم منطبق شده است. نتایج نشان می دهد این پدیده برای کلیه تاندیش ها صادق بوده و لذا هر تاندیش با شکل هندسی مشخص دارای یک منحنی شاخص RTD خواهد بود. بنابراین با مطالعه و تجزیه و تحلیل منحنی شاخص RTD برای هر کدام از تاندیش ها می توان آنها را با یکدیگر مقایسه نموده و از بین چندین مورد تاندیش با شکل ساختاری و حالت های متفاوت در نظر گرفته شده، تاندیش با بهترین عملکرد را انتخاب و پیشنهاد نمود.

الف- ارزیابی عملکرد تاندیش های مختلف در حذف و شناورسازی ذرات ناخالصی

تاندیش نشان داده شده در شکل (۱-الف) یکی از حالت های در نظر گرفته شده است که در آن با جایگذاری همزمان یک جفت سد^۲ و مانع^۳ در مجاورت ورودی به تاندیش نحوه حرکت جریان سیال در آن کنترل شده است. در حقیقت در این نوع تاندیش، گردابه های چرخشی ناشی از جریان مغشوش ورودی به تاندیش ابتدا توسط مانع کنترل شده و سپس با برخورد جریان به دیواره سد، جریان سیال به سمت سطح آزاد تاندیش هدایت خواهد شد و در نتیجه فرصت بیشتری را برای

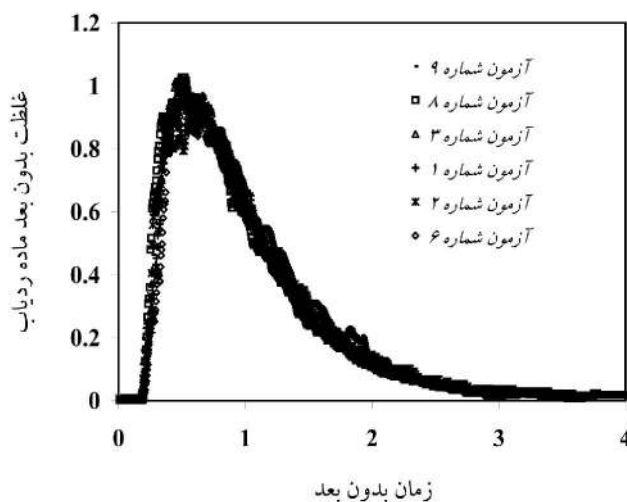
1 - Turbulent Reynolds - $Re_t = \frac{\rho LU}{\mu_t}$

2 - Weir

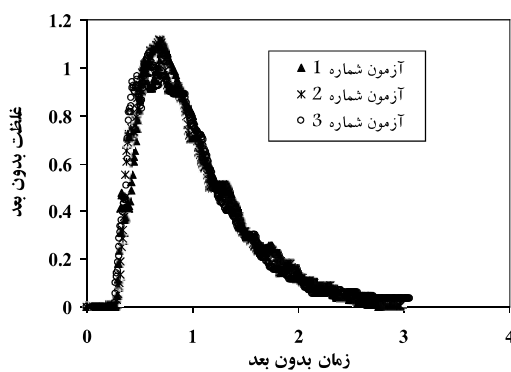
3 - Dam

شناورسازی ذرات ناخالصی فراهم می‌آورد. با پردازش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری غلظت ماده ردیاب، منحنی‌های توزیع زمان اقامت در خروجی تاندیش برای هر کدام از آزمون‌های تجربی ترسیم گردیده است شکل (۴). ملاحظه می‌شود در این

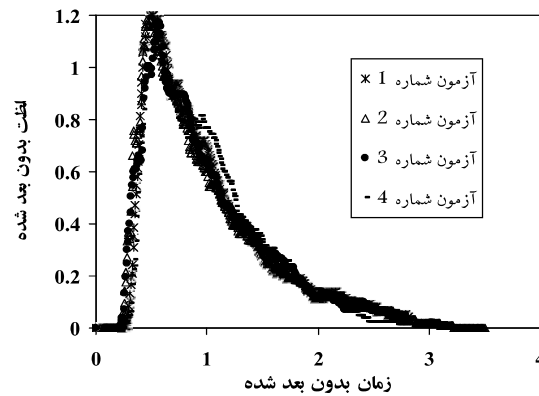
حالت نیز موقعیت منحنی‌های RTD در نمودار تقریباً ثابت بوده و مستقل از دبی جریان عبوری از تاندیش و همچنین حجم سیال داخل تاندیش بدست آمده است.



شکل ۳. نمایش نتایج آزمون‌های انجام شده توسط مدل آبی تاندیش تحت شرایط مختلف عملیاتی.



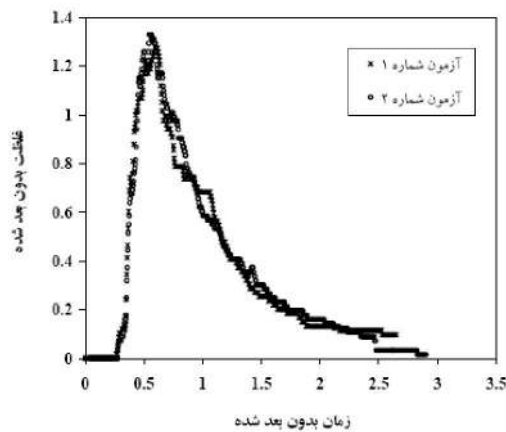
شکل ۴. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-الف).



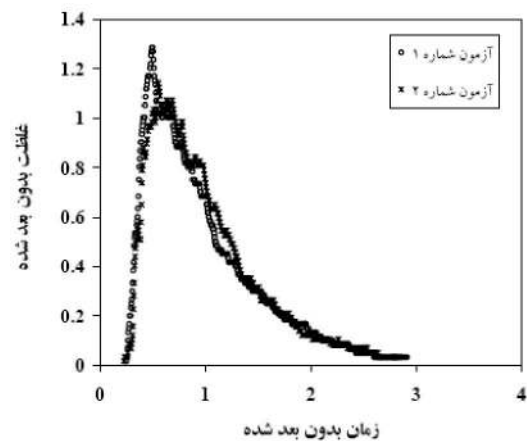
شکل ۵. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-ب).

گرفته است. برای این حالت نیز کلیه مراحل و دستورالعمل‌های مربوط به ترسیم، شناسایی و تعیین الگوی جریان سیال در تاندیش انجام گرفته است. بطوریکه نتایج مربوط به آن در شکل (۵) رسم گردیده است.

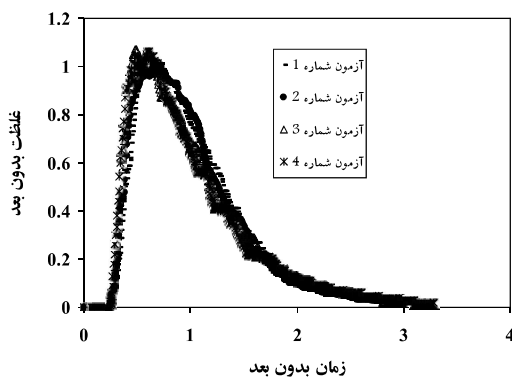
در حالت دیگر در نظر گرفته شده در شکل (۱-ب)، تنها ارتفاع مانع در مقایسه با حالت قبلی بلندتر شده و سایر مشخصه‌های فنی و ابعادی کاملاً مشابه با حالت دوم است. در حقیقت در این حالت اثر ارتفاع دیواره مانع بر روی مستهلک کردن انرژی جنبشی حاصل از جریان مغشوش مورد ارزیابی قرار



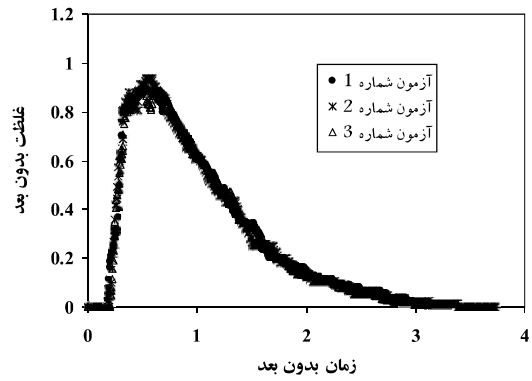
شکل ۷. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-د).



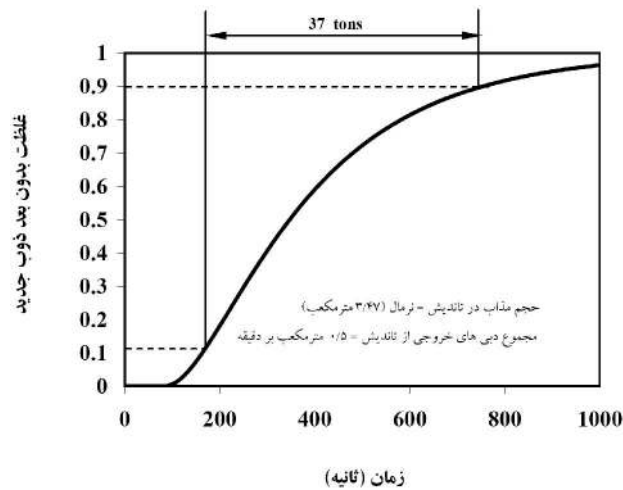
شکل ۶. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-ج).



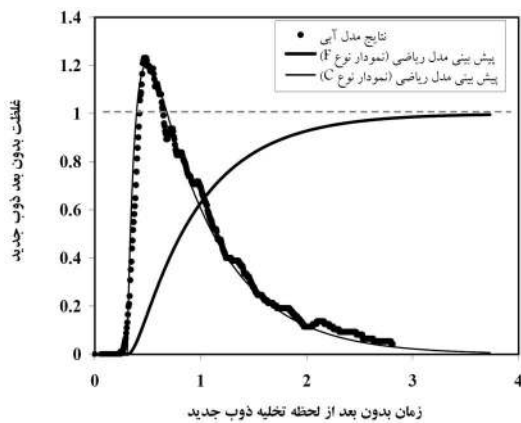
شکل ۹. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-و).



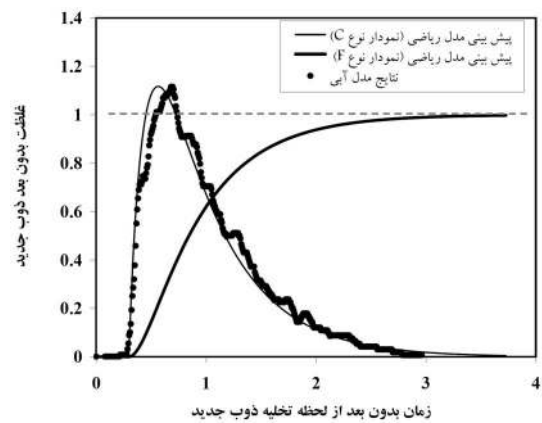
شکل ۸. نتایج آزمون‌های مدل آبی در تاندیش (۱-ه).



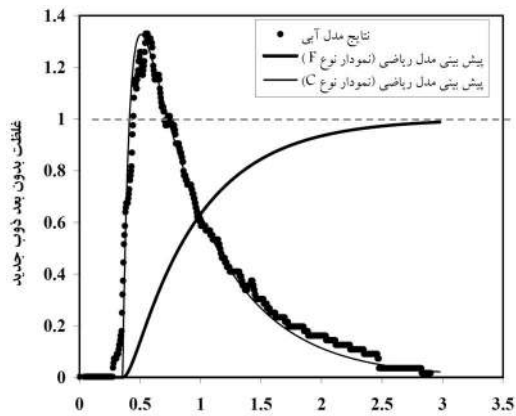
شکل ۱۰. نحوه محاسبه مقدار فولاد مخلوط شده در تاندیش با استفاده از پیش بینی مدل اختلاط و حدود تعریف شده.



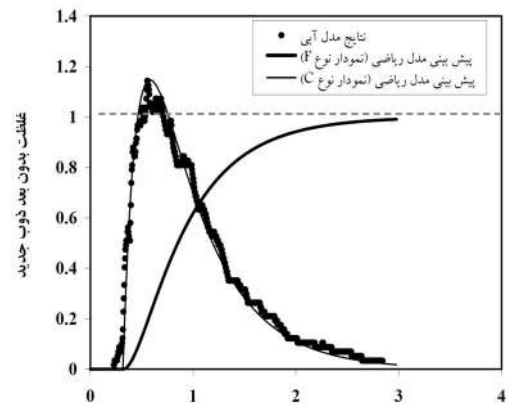
ب- حالت دوم: نصب یک جفت سد و یک جفت مانع بلند



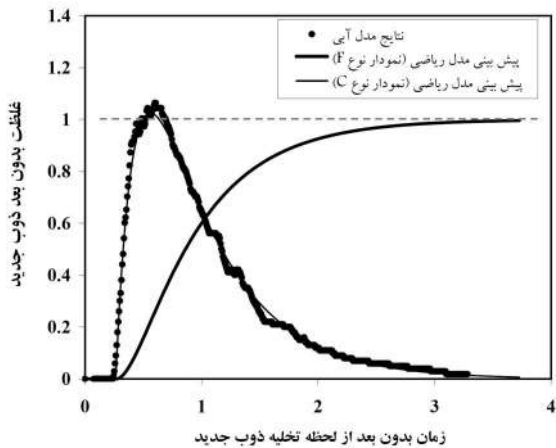
الف- حالت اول: نصب یک جفت سد و یک جفت مانع کوتاه



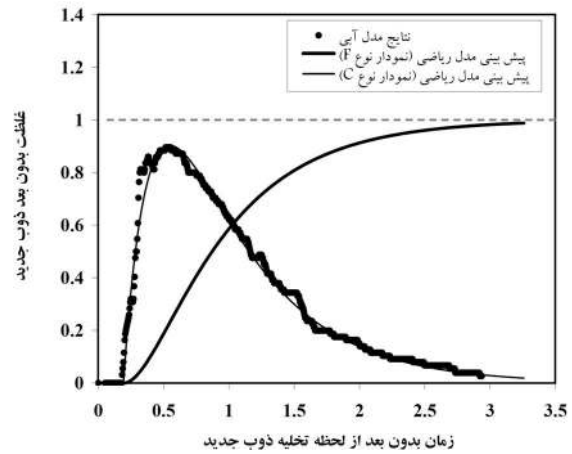
د- حالت چهارم: نصب کاهنده اغتشاش و یک جفت سد و مانع



ج- حالت سوم: نصب کاهنده اغتشاش و یک جفت سد

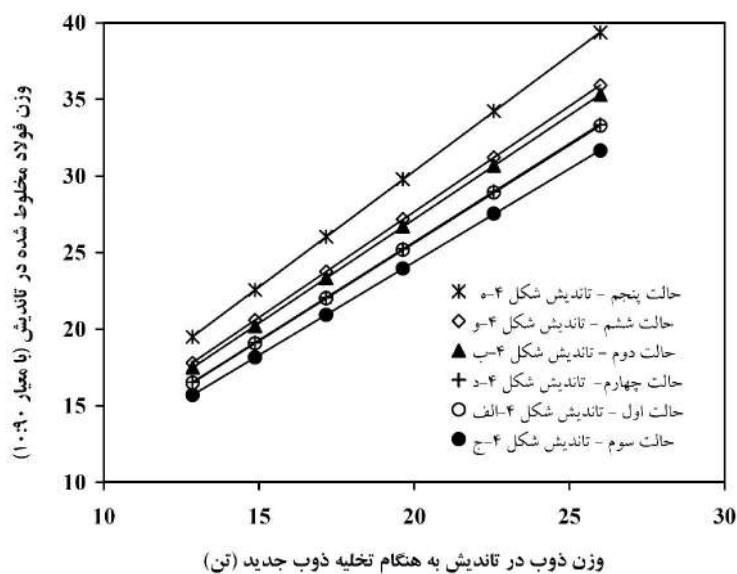


و- حالت ششم: نصب دو جفت سد و مانع



ه- حالت پنجم: نصب یک جفت سد، مانع و Baffle

شکل ۱۱. رفتار اختلاط بین دو ذوب متوالی، در تاندیش های با ساختار متفاوت.



شکل ۱۲. مقادیر اختلاط برای حالت های مختلف تاندیش و با وزن ذوب های متفاوت.

حاصل از اندازه گیری غلظت ماده ردیاب در جریان خروجی از تاندیش، منحنی های توزیع زمان اقامت برای هر کدام از آزمون ها ترسیم گردیده است (شکل ۸). در اینجا نیز ملاحظه می شود که موقعیت منحنی های RTD در نمودار تقریباً ثابت بوده و مستقل از دبی جریان عبوری از تاندیش و همچنین مستقل از ارتفاع سطح سیال در تاندیش بدست آمده است.

در حالت بعدی (شکل ۱-ب) دو جفت سد و مانع در تاندیش نصب شده است. به منظور ارزیابی این طرح و نحوه اثرگذاری آن بر الگوی جریان سیال، کلیه مراحل قبلی برای این حالت نیز تکرار شده است. برخی از نمودارهای RTD حاصل از انجام آزمونهای تجربی در شکل (۹) ترسیم گردیده است.

در جدول (۱) اطلاعات مربوط به مشخصه های منحنی RTD برای حالت های مختلف در نظر گرفته شده در تاندیش مدل خلاصه شده است. با توجه به این که با افزایش حجم منطقه جریان قالبی در تاندیش و یا کاهش حجم ناحیه اختلاط کامل، مدت زمان اقامت سیال در تاندیش بدون حضور در گردابه های جریان چرخشی افزایش می یابد لذا فرصت بیشتری برای شناور شدن ذرات ناخالصی در تاندیش فراهم می شود و در نتیجه امکان حذف ذرات از مذاب و پیوستن آن ها به سرباره

به منظور مطالعه اثر استفاده از کاهنده اغتشاش^۱ به همراه سد و مانع بر کنترل الگوی جریان سیال در تاندیش دو حالت مختلف در شکل های (۱-ج) و (۱-د) در نظر گرفته شده است. با انجام آزمون های مربوطه بر روی مدل های تاندیش مورد نظر، تأثیر استفاده از کاهنده اغتشاش بر هدایت سیال به سمت سطح آزاد تاندیش و مقایسه آن با دیگر تجهیزات مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمودارهای RTD تجربی مربوط به دو حالت اخیر در شکل های (۶ و ۷) نشان داده شده است.

همچنین اثر حضور Baffle بر تغییر الگوی جریان سیال به همراه سد و مانع در شکل (۱-ه) مورد آزمون قرار گرفته است. در بافلهای نصب شده دو نوع سوراخ وجود دارد که محور یکسری از سوراخ ها به موازات سطح آزاد تاندیش می باشد و محور سری دیگر آنها با سطح آزاد تاندیش زاویه ۴۵ درجه می سازد. بطوریکه سوراخ های اخیر جریان سیال را از کف تاندیش به سمت بالا هدایت می کند. استفاده از این نوع بافل ها در جهت شناورسازی و حذف بهتر ناخالصی ها بسیار متداول می باشد. مشابه حالت های قبلی با پردازش داده های

تاندیش میزان فولاد مخلوط شده بین دو ذوب افزایش یافته است. ثانیاً کمترین مقادیر اختلاط مربوط به تاندیشی است که در آن از کاهنده اغتشاش و یک جفت سد (مطابق شکل ۱-ج) برای کنترل الگوی جریان سیال استفاده شده است. نکته قابل توجه این که شیب نمودار (افزایش حجم اختلاط در برابر افزایش حجم ذوب در تاندیش) مربوط به این تاندیش در شکل (۱۱) کمتر از شیب نمودار مربوط به سایر تاندیش ها نیز می باشد. در حقیقت در این تاندیش شیب نمودار F پیش بینی شده توسط مدل، بیشترین شیب را در مقایسه با سایر موارد دارا بوده است که توانسته کمترین حجم اختلاط را بین دو ذوب در تاندیش ایجاد نماید.

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه مربوط به ارزیابی شرایط مناسب برای حذف بهتر ناخالصی ها در تاندیش های مختلف (جدول ۱)، ملاحظه می شود تاندیش های با مشخصات ارائه شده در شکل های (۱-د) و (۱-ج) به ترتیب اهمیت، شرایط مناسب تری را برای شناورسازی و حذف بهتر ناخالصی ها از فولاد مذاب فراهم می نماید. همچنین نتایج اخیر در شکل (۱۱) حاکی از آن است که تاندیش های پیشنهادی در شکل های (۱-ج) و (۱-الف) به ترتیب اهمیت بهترین شرایط را برای کنترل جریان سیال به منظور کاهش حجم اختلاط بین دو ذوب متوالی را خواهد داشت. بنابراین با در نظر گرفتن دو فاکتور افزایش میزان تمیزی فولاد و کاهش میزان حجم اختلاط بین ذوبهای متوالی و ارزیابی کمی و کیفی این دو فاکتور در تاندیش های مختلف می توان چنین اظهار نظر نمود که تاندیش با مشخصات فنی ارائه شده در شکل (۱-ج) به عنوان یک تاندیش با طرح بهینه از بین موارد در نظر گرفته شده معرفی نمود.

نتیجه گیری

۱- نتایج آزمون های مدل آبی برای تاندیش های با حالت های مختلف نشان می دهند برای گستره نسبتاً وسیعی از متغیرها در بین آزمون های مختلف، برای هر تاندیش با ساختار مشخص منحنی RTD یکسان و ثابت می باشد، به طوری که معیار تشابه

افزایش خواهد یافت. حال با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) و همچنین مقایسه منحنی های نشان داده شده در شکل های (۴) الی (۹) می توان چنین اظهار نظر نمود که از بین حالت های در نظر گرفته شده برای ساختار شکل داخلی تاندیش حالت دوم بهترین شرایط را در مقایسه با سایر حالت ها به لحاظ عبور فولاد مذاب با کمترین ناخالصی را دارا می باشد.

جدول ۱. مقدار پارامترهای مجهول مدل اختلاط تاندیش برای حالت های مختلف.

شماره حالت تاندیش	\bar{f}_d	\bar{f}_{m2}	\bar{f}_{m1}	\bar{f}_p
الف	۰/۰۸	۰/۴۷	۰/۱۵	۰/۳۰
ب	۰/۱۱	۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۳۱
ج	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۳۲
د	۰/۰۸	۰/۵۰	۰/۰۶	۰/۳۶
ه	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۶۳	۰/۲۰
و	۰/۱۰	۰/۴۶	۰/۱۷	۰/۲۷

ب) ارزیابی عملکرد تاندیش های مختلف در کاهش حجم اختلاط بین ذوب ها

در شکل (۱۰) نمودار تغییرات غلظت ذوب جدید در یک تاندیش با سطح ذوب کامل (پر) نشان داده شده است. در این شکل نحوه محاسبه میزان اختلاط برای حدود تعریف شده بر روی نمودار نشان داده شده است. در ادامه با تعریف حدود مجاز اختلاط فرضی (۱۰ : ۹۰) بر روی هر یک از منحنی های شاخص تاندیش های مختلف شکل (۱۱)، مقدار اختلاط توسط مدل ریاضی اختلاط پیش بینی شده است. محاسبات برای شرایط مختلف عملیاتی در تاندیش تکرار و مقادیر اختلاط برای هر یک از حالات در نظر گرفته شده تعیین شده است. اطلاعات مربوط به پیش بینی های صورت گرفته در شکل (۱۲) نشان داده شده است. ملاحظه می شود میزان اختلاط صورت گرفته برای مقادیر مختلف ذوب اولیه در تاندیش (به هنگام تخلیه ذوب جدید) محاسبه شده است. همانطور که داده های بدست آمده نشان می دهد اولاً در تمامی موارد با افزایش حجم ذوب در

- Tundish Systems", ISIJ International. 39 (1999) 524-547.
2. J. Szekely, and O.J. Ilegbusi, "The Physical and Mathematical Modeling of Tundish Operations". New York (1988) Springer-Verlag.
 3. E.B. Nauman, and B.A. Baffham, "Mixing in Continuous Flow System" New York, NY, John Wiley & Sons Inc (1983).
 4. [4] R. Schwarze, F. Obermeier, and D. Janke, "Numerical Simulation of Fluid Flow and Disperse Phase Behavior in Continuous Casting Tundishes", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. [9] (2001) 279-287.
 5. S. Sinha, K.M. Godiwalla, and C.S. Sivaramakrishnan, "Fluid Flow Characterisation in Twin Strand Continuous Casting Tundish Water Model", Ironmaking and Steelmaking. 20 [6] (1993) 485-492.
۶. م. علی زاده، ح. ادریس و ع. شفیعی، "شبیه سازی الگوی جریان فولاد مذاب در تاندیش ریخته گری مداوم با استفاده از مدل آبی"، سمپوزیوم فولاد ۸۵، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵، ص. ۱۰۰۱-۱۰۱۰.
۷. م. علی زاده، ح. ادریس و ع. شفیعی، "مدلسازی اختلاط به هنگام عملیات تغییر جنس فولاد در فرایند ریخته گری مداوم تختال"، نشریه علمی پژوهشی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۲، اسفند ۱۳۸۷.
8. J.H. Ferziger, and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics". Berlin Springer (1997).
 9. S. Singh, and S.C. Koria, "Tundish Steel Melt Dynamics with and without Flow Modifiers through Physical Modelling", Ironmaking and Steelmaking. 23 [3] (1996) 255-262.

برای هر حالت مشخص برابری عدد رینولدز مغشوش بوده است.

۲- مقایسه نمودارهای RTD شاخص برای هر یک از حالات در نظر گرفته شده در تاندیش نشان می دهد، در بین طرح های ارائه شده برای کنترل جریان سیال در تاندیش، استفاده از کاهنده اغتشاش به همراه یک جفت سد و مانع در نزدیکی محل ورود جریان سیال به داخل تاندیش، بهترین شرایط را به لحاظ کمک به شناورسازی ذرات ناخالصی خواهد داشت.

۳- ترکیب مدل اختلاط طراحی شده برای تاندیش در تمامی حالات در نظر گرفته شده برای نصب تجهیزات کنترل جریان صادق بوده و تنها مقدار کسر حجمی هر یک از جعبه مدلها بین آنها تفاوت داشته است.

۴- پیش بینی مدل اختلاط نشان داده است در بین حالات مختلف در نظر گرفته شده برای ساختار داخلی تاندیش، استفاده از کاهنده اغتشاش و یک جفت سد در تاندیش منجر به کاهش حتی الامکان اختلاط در خروجی تاندیش خواهد گردید.

۵- با در نظر گرفتن هر دو عامل، بیشترین حذف ناخالصی و کمترین مقدار اختلاط در تاندیش، ساختار تاندیش پیشنهادی بصورت استفاده از کاهنده اغتشاش و یک جفت سد به عنوان یک طرح بهینه تعیین شده است.

مراجع

1. D. Mazumdar, and R.I.L. Guthrie, "The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting