دانشگاه شهید چمران اهواز
انجمن آهن و فولاد ایران
گروه ملی صنعتی فولاد ایران

سمپوزیوم فولاد ۸۷
۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷
اهواز - دانشگاه شهید چمران

استفاده از وسایل کنترل جریان در تاندیش به منظور کاهش Intermix

مهدی علی‌زاده[1]، سید خطیب الاسلام صدرنژاد
پژوهشگاه مواد و انرژی

چکیده

کنترل اختلاط در تاندیش و کاهش مقدار Intermix یکی از اهم موارد در افزایش بهره‌وری تولید بوده و به لحاظ اقتصادی نیز بسیار حائز اهمیت است. در این رابطه کنترل الگوی جریان سیال در تاندیش می تواند در میزان کاهش حجم فولاد مخلوط شده موثر واقع شود. در این پژوهش برای دستیابی به یک تاندیش با کمترین مقدار Intermix، ابتدا با ترکیب سازی وسایل کنترل جریان مانند Turbo Stopper، موانع (weir)، سدها (dam) و baffle حالتهای مختلفی برای ساختار داخلی تاندیش در نظر گرفته شده است. همچنین برای تاندیش مورد نظر یک مدل ریاضی اختلاط طراحی، و برای هریک از حالات در نظر گرفته شده در تاندیش، پارامترهای آزاد مدل توسط یک سیستم مدل آبی کالیبره شده است. سپس توسط پیش‌بینی‌های حاصل از مدل ریاضی، وزن فولاد مخلوط شده بین دو ذوب متوالی با ترکیب شیمیایی مختلف در خروجی تاندیش پیش بینی شده است. در ادامه با مقایسه مقدار اختلاط‌های بدست آمده برای هر یک از حالات در نظر گرفته شده بهترین حالت برای داشتن کمترین Intermix در تاندیش پیشنهاد گردیده است.

کلمات کلیدی: Intermix، تاندیش، مدل ریاضی اختلاط، وسایل کنترل جریان، فولاد مخلوط شده.

[1] phdalizadeh@yahoo.com

مقدمه

اساساً در طی فرآیند ریخته گری مداوم و در حین عملیات تعویض پاتیل مواردی پیش خواهد آمد که نوع درخواست فولاد تولیدی تغییر خواهد نمود. با توجه به این‌که فولاد مذاب در تاندیش و ماشین ریخته‌گری به صورت مداوم جریان خواهد داشت، از مخلوط شدن دو مذاب با ترکیب شیمیایی مختلف نمی‌توان اجتناب کرد. لذا در محل‌های تاندیش و حوضچه مذاب داخل شمش بین دو فولاد مذاب اختلاط صورت خواهد گرفت. 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 می‌کنند. با توجه به این که این موضوع به لحاظ اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، لازم است به هنگام عملیات تغییر نوع فولاد[1] راه‌کارهای مناسب جهت بهینه کردن سیستم به منظور تولید حداقل مقدار فولاد مخلوط شده در تاندیش به کار گرفته شود. در این راستا نصب تجهیزات کنترل جریان در تاندیش به منظور بهینه‌سازی الگوی جریان مذاب در تاندیش یکی از روش‌هایی است که استفاده از آن امکان کاهش حجم اختلاط بین دو ذوب در تاندیش را تا حدودی فراهم می‌نماید. در این رابطه محققان بسیاری با به‌کار بردن انواع وسایل کنترل جریان مذاب در تاندیش (مانند: سدها، بندها، موانع و ...) و تغییر موقعیت آن ها در تاندیش‌های مختلف، بهترین شرایط را با استفاده از مدل سازی فیزیکی و ریاضی جریان مذاب در تاندیش پیشنهاد نموده‌اند. با توجه به اثر محسوس استفاده از تجهیزات کنترل جریان بر تغییر الگوی جریان سیال در تاندیش، امکان کاهش حجم فولاد مخلوط شده بین دو ذوب متوالی در طی عملیات تغییر جنس فولاد فراهم خواهد شد. 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 مقدار Intermix در تاندیش بشمار می رود.

در خصوص نحوه مطالعه و ارزیابی تاندیش های با پیکربندی های مختلف، علاوه بر مدل‌های فیزیکی و مدل‌های ریاضی سه بعدی مربوط به حل معادلات حاکم بر جریان سیال می‌توان از مدل‌های اختلاط برای پیش بینی منحنی‌های RTD[2] در راکتورها نیز استفاده نمود [۱]. از آنجایی که عملکرد تاندیش شبیه یک راکتور بوده لذا می‌توان از این مدل‌ها برای آن نیز استفاده نمود. اساساً دو مدل راکتور با جریان قالبی[3] و راکتور با اختلاط کامل[4] خاص راکتورهای با جریان‌های ایده‌ال بوده و پایه و اساس مدل‌های اختلاط در

[1] Transition grade
[2] Residence Time Distribution
[3] Plug Flow Reactors (PFR)
[4] Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR)

جریان‌های واقعی را نیز تشکیل می دهند [۲]. یکی از شاخصه‌های مهم این مدل‌ها سرعت پاسخ دهی بسیار بالای آن ها به لحاظ یک بعدی بودن معادلات حاکم می‌باشد. اصولاً در معادلات دیفرانسیلی این مدل‌ها 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 هریک 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، در خروجی تاندیش بدست آید.

روش تحقیق

طبق نقشه ارائه شده در شکل ۱ حجم آن قسمت از تاندیش که با خط چین بر روی شکل نشان داده شده است حدود $۳/۵\ \mathrm{m}^3$ محاسبه شده است. قسمت خط چین بر روی شکل حداکثر سطح مذاب در تاندیش را برای شرایط معمول نشان می دهد. این حجم از تاندیش تقریباً ۲۵ تن فولاد مذاب را شامل خواهد شد. در شرایط معمول، دبی ورودی به تاندیش با مجموع دبی‌های خروجی از تاندیش با هم برابر می‌باشند، در این حالت ارتفاع مذاب از کف تاندیش تقریباً برابر ۷۰ سانتی‌متر و ثابت می‌باشد. بدلیل تقارن در تاندیش، نصف حجم تاندیش با ترکیب سازی مدل‌های PFR و CSTR به همراه حجم ناحیه مرده مدل‌سازی شده است. در شکل ۲ مدل اختلاط پیشنهادی به صورت شماتیک نشان داده شده است. با ارضای قانون بقای جرم برای هر کدام از مدل‌های جریانی، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدل اختلاط به صورت زیر بدست خواهند آمد [۳]:

$$\frac{dC_{m1}}{dt}=\frac{Q_{in}}{V_{m1}}\left(C_{in}-C_{m1}\right),\qquad \frac{dC_{m2}}{dt}=\frac{Q_{m1}}{V_{m2}}\left(C_{m1}-C_{m2}\right),\qquad C_{out}=C_{m2(t-t_p)},\quad V_i=f_i\cdot V_T \tag{۱}$$

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

$$C_i(t=0)=0 \qquad C_{in}(t\geq 0)=1 \qquad (۲)$$

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 [۴].

به منظور انتخاب بهترین ترکیب سازی از تجهیزات کنترل جریان در تاندیش، چندین حالت مختلف برای تاندیش در نظر گرفته شده است (شکل ۳). در این حالات از وسایلی مانندDam، Turbo Stopper، Weir، Baffle استفاده شده است که به صورت تکی و یا ترکیب با یکدیگر در موقعیت های خاصی از تاندیش مدل نصب گردیده است. سپس با انجام آزمون های مدل آبی بر روی مدل هر یک از طرح های پیشنهادی و تعیین پارامترهای مجهول مدل اختلاط، منحنی های شاخص RTD برای هر کدام از موارد معرفی شده است[۵].

بدین منظور ابتدا توسط مدل آبی آزمون های مختلف با تغییر دبی جریان ورودی به تاندیش و همچنین سطوح مختلف آب در تاندیش (برای هر کدام از حالات سطح سیال در تاندیش ثابت در نظر گرفته شده است) انجام گرفته است. جهت تعیین منحنی RTD سیال در هر یک از حالات پیشنهادی از روش تزریق ماده‌ردیاب استفاده شده است. در این روش با تزریق محلول نمکی کلریدپتاسیم (ماده‌ردیاب) به جریان ورودی به تاندیش تغییرات هدایت یونی آب در خروجی تاندیش با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شده است. پس از ثبت تغییرات هدایت آب درخروجی تاندیش، با استفاده از منحنی‌های کالیبراسیون که توسط آن‌ها ارتباط بین هدایت و غلظت نمک در آب بیان می‌شود، مقادیر هدایت به مقادیر غلظت نمک تبدیل شده است. 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.

نتایج و بحث

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:

$$F_{(\theta)} = \int C_{(\theta)} d\theta$$

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. حال با توجه به ورود مداوم ذوب جدید در تاندیش و اختلاط آن با ذوب اولیه موجود در تاندیش، لذا محاسبه مقدار فولاد مخلوط شده در خروجی تاندیش بایستی با استفاده از تابع نوع F انجام پذیرد. در این راستا با تعیین حدود بالا و پائین (حدود مجاز اختلاط) بر روی نمودار غلظت، مقدار فولاد مخلوط‌شده در خروجی تاندیش محاسبه شده است. میزان اختلاط بین حدود تعریف شده تعیین کننده آن حجم از ذوب مخلوط شده خواهد بود که ترکیب‌شیمیایی آن به هیچ کدام از دامنه‌های مجاز ترکیب‌شیمیایی ذوب‌های قدیم و جدید تعلق نخواهد داشت.

جهت بحث و بررسی نتایج مدل، محدوده فرضی به صورت ۱۰ : ۹۰ در نظر گرفته شده و مقدار فولاد مخلوط‌شده توسط مدل بر اساس این حدود محاسبه گردیده است. در شکل ۴ نمودار تغییرات غلظت ذوب جدید در یک تاندیش با سطح ذوب کامل (پر) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نحوه محاسبه میزان اختلاط برای حدود تعریف شده بر روی نمودار نشان داده شده است.

در ادامه با تعریف حدود مجاز اختلاط (۱۰ : ۹۰) بر روی هر یک از منحنی های شاخص نوع F مربوط به تاندیش های مختلف در نظر گرفته شده در شکل ۳، مقدار Intermix توسط مدل ریاضی اختلاط پیش بینی شده است. محاسبات برای شرایط مختلف عملیاتی در تاندیش تکرار و مقادیر Intermix برای هر یک از حالات در نظر گرفته شده تعیین شده است. اطلاعات مربوط به پیش بینی های صورت گرفته در شکل ۵ 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 تاندیش میزان فولاد مخلوط شده افزایش یافته است. ثانیاً کمترین مقادیر اختلاط مربوط به تاندیشی است که در آن از Turbo Stopper و یک جفت Dam (مطابق شکل ۳- 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 ۵ کمتر از شیب نمودار مربوط به سایر تاندیش ها نیز می‌باشد. 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.

نتیجه‌گیری

۱- 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.

۲- در راستای کنترل الگوی جریان سیال، اثر هر یک از تجهیزات نصب شده در تاندیش مورد آزمون قرار گرفته و منحنی شاخص RTD مربوط به آن با استفاده از آزمون مدل آبی و پیش بینی مدل ریاضی تعیین گردیده است.

۳- پیش بینی مدل اختلاط نشان داده است در بین حالات مختلف در نظر گرفته شده برای ساختار داخلی تاندیش، استفاده از Turbo Stopper و یک جفت Dam در تاندیش منجر به کاهش حتی الامکان Intermix در خروجی تاندیش خواهد گردید.

مراجع

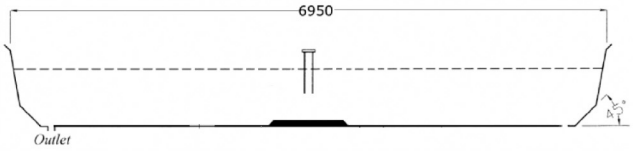
[1] D. Mazumdar, and R. I. L. Guthrie, "The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Tundish Systems", ISIJ International, 1999, Vol. 39, pp. 524-547.

[2] E. B. Nauman, and B. A. Baffham, "Mixing in Continuous Flow System", 1983, New York, NY, John Wiley & Sons Inc.

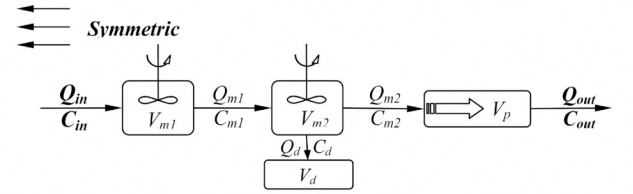
[۳] م. علی زاده، "مدلسازی اختلاط بین دو ذوب متوالی به هنگام تغییر نوع فولاد در فرایند ریخته گری مداوم تختال"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸.

[4] J.H. Ferziger, and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics", 1997, Berlin, Springer.

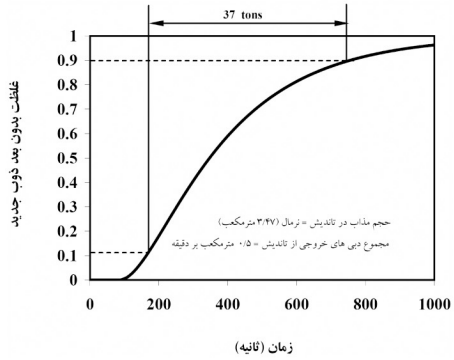
[۵] م. علی‌زاده، ح. ادریس و ع. شفیعی، "شبیه سازی الگوی جریان فولاد مذاب در تاندیش ریخته گری مداوم با استفاده از مدل آبی"، سمپوزیوم فولاد ۸۵، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵، ص.۱۰۰۱-۱۰۱۰.



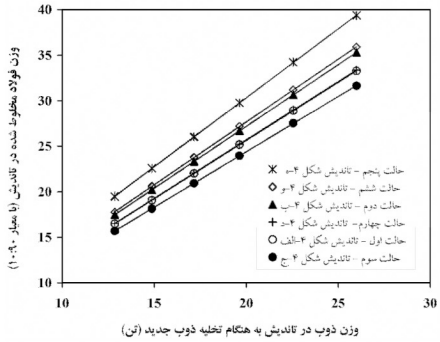
شکل ۱. ابعاد و شکل بدنه تاندیش.



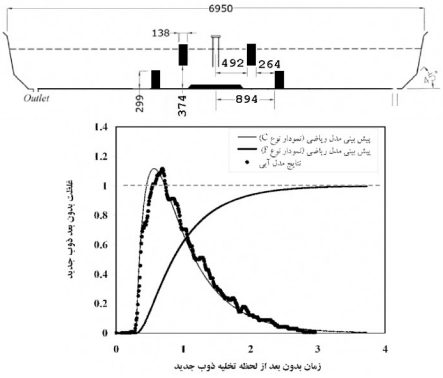
شکل ۲. مدل عمومی اختلاط تاندیش.



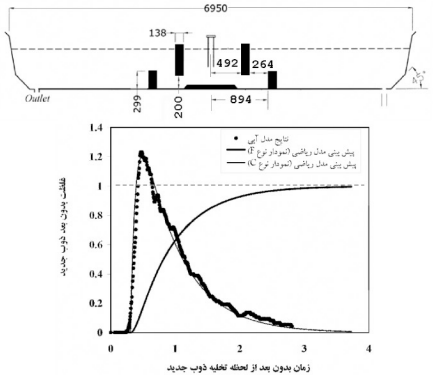
شکل ۴ . نحوه محاسبه مقدار فولاد مخلوط‌شده در تاندیش با استفاده از پیش بینی مدل اختلاط و حدود تعریف شده.



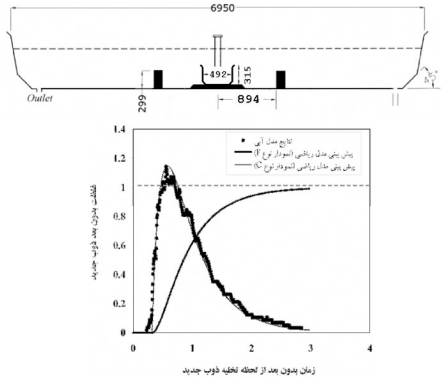
شکل ۵. مقادیر Intermix برای حالت های مختلف تاندیش و با وزن ذوب های متفاوت.



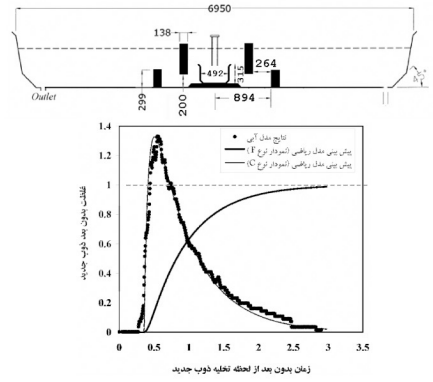
الف- حالت اول: نصب یک جفت Dam و یک جفت Weir کوتاه



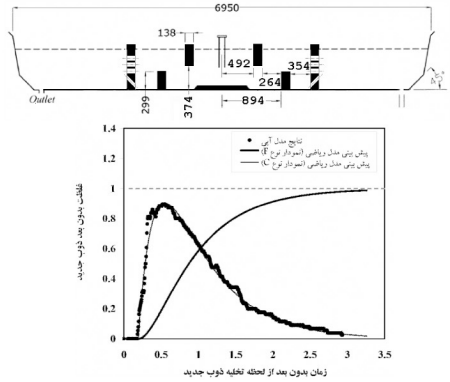
ب- حالت دوم: نصب یک جفت Dam و یک جفت Weir بلند



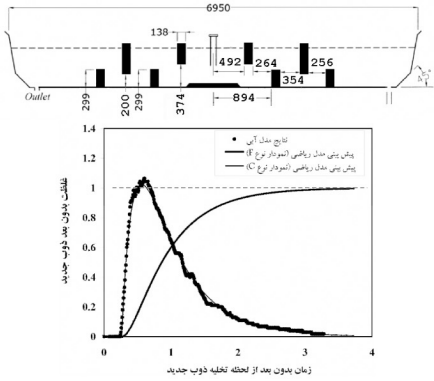
ج- حالت سوم : نصب Turbo Stopper و یک جفت Dam



د- حالت چهارم: نصب Turbo Stopper و یک جفت Dam و Weir



ه- حالت پنجم: نصب یک جفت Dam ، Weir و Baffle



و- حالت ششم: نصب دو جفت Dam و Weir

شکل ۳. رفتار اختلاط بین دو ذوب متوالی، در تاندیش‌های با ساختار متفاوت.