



Experimental and Numerical Simulation of Fluid Flow and Inclusion Removal in the Steel Continuous Casting Tundish

M. Mosalman Yazdi, A. Faghih Khorasani*, S. Talebi

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Review History:

Received: 27/12/2018
Revised: 06/02/2019
Accepted: 05/05/2019
Available Online: 18/05/2019

Keywords:

Numerical simulation
Experimental simulation
Tundish
Fluid flow
Inclusion removal

ABSTRACT: During the steel continuous casting process, the tundish is the last metallurgical actuator in which there will be an opportunity for removal of impurities present in the melt. Therefore, improving of the fluid flow phenomena inside the tundish, including the type of fluid flow pattern, increasing of inclusion residence time in the tundish, decreasing of volume of stagnant fluid and increasing of fluid flow in the rotation, can improve the process of separation of the inclusion and absorbing them into slag and the preparation of clean steel. In the mathematical method, the FLUENT software is used and in the experimental method, by manufacturing of the glass tundish in 1:4 scale and molten flow physical simulation, the effect of applying the dam in the tundish, as well as the change in the height of the melt on the behavior of the flow has been investigated, and it has been determined that decreasing of the molten height in the tundish increases the separated inclusion from the molten and inclusion residence time in the tundish. Also, using the dam at the inlet nozzle with a tall dam on the sides of the tundish leads to the removal of the inclusion and improving the molten flow.

1. INTRODUCTION

In several studies, the flow of the molten steel in continuous-casting tundish has been simulated by experimental or mathematical modeling. In most experimental studies, simulations have been performed by the use of water at ambient temperature and under isothermal and steady-state conditions.

Mickey and Thomas [1] have provided a mathematical model for analysis of flow in a tundish with a specific geometry. They used the k-ε turbulence model to simulate the flow of molten steel and temperature variations in the tundish in both steady and unsteady state conditions and used a lagrangian particle tracking model for particle motion analysis. In this study, residence time, and density of particles of different sizes were studied.

In other studies, the effects of flow control devices on inclusion removal were investigated by mathematical and physical modeling. In these studies, turbulent flow was simulated by k-ε model. In physical simulation, reduced-scale models of tundish were used to investigate the flow behavior under various experimental conditions. [2-4]

Iran Alloy Steel Company has always struggled with the problem of filtration of inclusions from molten steel so to produce a clean high-quality product. Iran Alloy Steel Company uses a unique type of tundish, so in this study, the reduced-scale model of this tundish is modeled and then used to investigate the flow behavior and melt purification process in this particular piece of equipment. The main objective

of this study is to improve the production speed as well as product quality.

2. METHODOLOGY

The physical study of flow pattern and inclusion removal in a steel continuous-casting tundish requires a model built at full or reduced scale. When using a full-scale model, the researcher has to use the Reynolds number and Froude number similitude criteria for nondimensionalization, but when using a reduced-scale model, the Froude number similitude criteria can be utilized for this purpose. Fluid velocity and discharge in a reduced-scale tundish model based on the Froude number similitude criteria are expressed with Eqs. (1) and (2) [5]:

$$U_m = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} U_p \quad (1)$$

$$Q_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.5} Q_p \quad (2)$$

In this study, 1:4 scale model of the tundish was built with glass. 8-mm thick glass was used for the model's bottom and 6-mm thick glass was used for the walls. The water used for experiments was at ambient temperature and had isothermal conditions. The tundish model had a final size of 250×291×1076 mm and had one inlet nozzle and four outlets (Fig. 1).

*Corresponding author's email: faghih@yazd.ac.ir



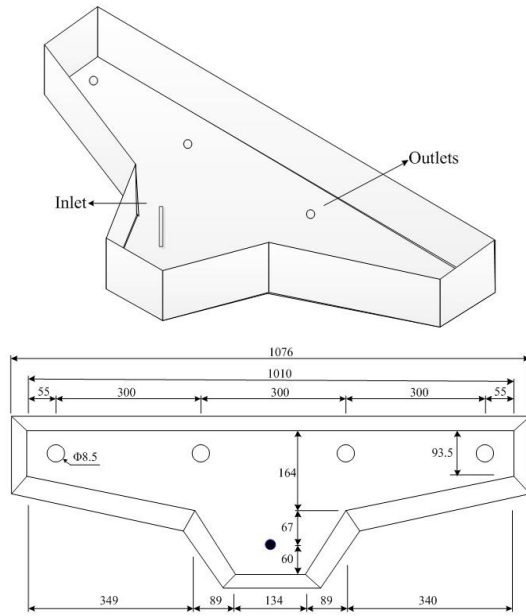


Fig. 1. Geometry and physical dimensions of the model tundish

The flow pattern and inclusion removal were examined in two states: I) simple model (ST), II) tundish with Inlet Dam and Tall Dam (ID+TD). Furthermore, the effect of water level in the tundish with inlet dam and the tall dam was studied at four water levels of 15, 17.5, 20 and 22.5 cm.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the inclusion removal experiments conducted with water levels of 15, 17.5, 20, and 22.5 cm are weighted, respectively, 1.33, 1.55, 1.8, and 2 grams of perlite and then mixed it with water. The inclusion-water mixture was then injected at the inlet.

In this study, residence time was determined by the use of saturated salt solution (NaCl). For this purpose, 50 cc of saturated salt solution with a concentration of 200 gr/L was injected for 5 seconds at the inlet and then using the HORIBA EC meter, the concentration of water from the farthest outlet to the inlet nozzle was measured at different time intervals.

According to the Residence Time Distribution (RTD) curve of the simple tundish, in this tundish, the minimum residence time of the injected saturated salt solution is short, and concentration suddenly increases at the outlet. Information of the RTD curves of the simple tundish and the tundishes with ID+TD (Table 1) shows that using dam has decreased the volume of stagnant fluid and increased the $R_{p/d}$ and $R_{pm/d}$ ratios. In comparing with simple tundish, the stagnant fluid volume was decreased to 77.3% in the tundish with dam.

Table 1: Experimental results of RTD in different tundishes

tundish	t_{min} (s)	t_{max} (s)	t_s (s)	V_d (m ³)	V_p (m ³)	V_m (m ³)	$R_{p/d}$	$R_{pm/d}$
simple	28	40	334	0.22	0.10	0.68	0.45	3.54
ID+TD	78	385	334	0.05	0.69	0.26	13.8	19

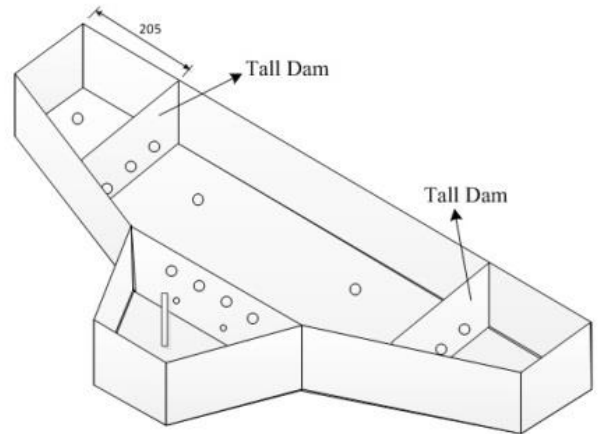


Fig. 2. Geometry of the tundish with inlet dam and tall dam

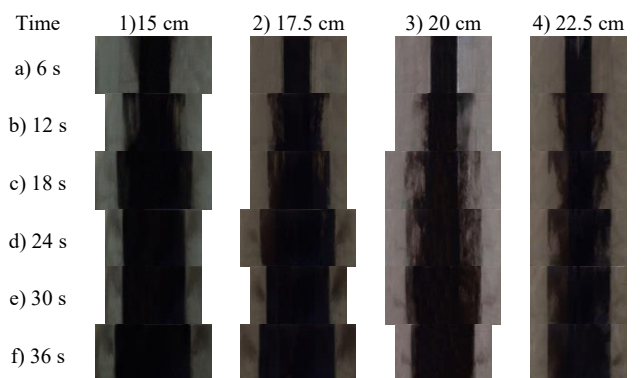


Fig. 3. Ink flow patterns in tundish with ID and TD in different water heights

Fig. 3 shows the flow pattern in tundish with dam after injection of the ink for different water levels and at different time intervals. It can be seen that in all cases, the ink moves around the tundish top and near the water surface simultaneously downward in a circular motion. But with lower water levels, the ink moves faster toward and into the outlet and the upward circular motion is reduced.

4. CONCLUSION

The results obtained from water and numerical modeling of the steel continuous casting tundish and the investigations of the flow pattern, residence time distribution curves, and removal of inclusions of different sizes in a simple tundish and tundish with dam are summarized as follows:

1- Presence of a dam, improves the flow pattern and causes the flow path to approach the melt surface, and this contributes to the filtration of inclusions in the form of top slag.

2- Changing the water level in the tundish dam show no effect on the flow pattern and only alters the flow speed. Examination of the shooting images of injecting ink shows that the tundish with higher water level has a lower movement speed.

3- The tundish with a dam with a higher water level exhibits a better inclusion removal performance and has a

lower inclusion pass rate. Also, by increasing the diameter of the inclusions, the rate of absorption into the slag increases and the amount of inclusion going out of the tundish decreases. As percentage of outgoing inclusion from the tundish at water height of 22.5 cm compared with height of 15 cm decreased for diameter of 63 and 595 μm to 12% and 29.4%, respectively.

4- Consequently, using a dam at the tundish inlet and tall dam and increasing the liquid level in the tundish improve the flow behavior in this reactor and its ability to filter inclusions and provide clean steel.

REFERENCES

- [1] Y. Miki, B.G. Thomas, Modeling of inclusion removal in a tundish, Metallurgical and materials transactions B, 30(4) (1999) 639-654.
- [2] C. Aguilar-Rodriguez, J. Ramos-Banderas, E. Torres-Alonso, G. Solorio-Diaz, C. Hernández-Bocanegra, Flow Characterization and Inclusions Removal in a Slab Tundish Equipped with Bottom Argon Gas Feeding, Metallurgist, 61(11-12) (2018) 1055-1066.
- [3] S. Yang, L. Zhang, J. Li, K. Peaslee, Structure optimization of horizontal continuous casting tundishes using mathematical modeling and water modeling, ISIJ international, 49(10) (2009) 1551-1560.
- [4] A. Cwudzinski, Mathematical simulation and water modelling of liquid steel interaction with an argon bubble curtain in a one-strand continuous casting tundish, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 118(5) (2018) 545-554.
- [5] A. Mabentsela, G. Akdogan, S. Bradshaw, Numerical and physical modelling of tundish slag entrainment in the steelmaking process, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117(5) (2017) 469-483.



بررسی تجربی و عددی جریان سیال و جداسازی آخال در تاندیش ریخته‌گری مداوم فولاد

محمدرضا مسلمان یزدی، احمدرضا فقیه خراسانی^{*}، شهرام طالبی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۶
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۸

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی عددی
بررسی تجربی
تاندیش
الگوی جریان
جداسازی آخال

خلاصه: در طی فرآیند ریخته‌گری مداوم فولاد، تاندیش آخرین عمل‌کننده متالورژیکی است که در آن فرصتی برای حذف ناخالصی‌های موجود در مذاب فراهم خواهد شد. بنابراین بهبود پدیده‌های مربوط به جریان سیال در داخل تاندیش ریخته‌گری مداوم از جمله نوع الگوی جریان، افزایش مدت زمان ماندگاری آخال در تاندیش، کاهش حجم سیال راکد و همچنین افزایش جریان سیال در حال چرخش در تاندیش می‌تواند باعث بهبود فرآیند جداسازی آخال از مذاب و تهیه فولادی تمیز گردد. در این تحقیق با شبیه‌سازی عددی و تجربی، رفتار جریان در تاندیش ریخته‌گری مداوم فولاد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در روش عددی از نرم‌افزار فلوئنت جهت شبیه‌سازی جریان استفاده گردیده و در روش تجربی با ساخت تاندیشی از جنس شیشه با مقیاس ۱:۴ و شبیه‌سازی فیزیکی جریان سیال، تأثیر بکارگیری مانع در تاندیش، همچنین تغییر ارتفاع مذاب بر رفتار جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که کاهش ارتفاع مذاب در تاندیش، سبب افزایش آخال جدا شده از مذاب گردیده و زمان ماندگاری آخال در تاندیش را افزایش می‌دهد. همچنین بکارگیری مانع در محل ورودی جریان به تاندیش همراه با مانع بلند در طرفین تاندیش، باعث بهبود الگوی جریان و افزایش آخال جدا شده از مذاب می‌گردد.

۱- مقدمه

ریخته‌گری پیوسته یکی از روش‌های نوین تولید در صنایع فولاد می‌باشد که امروزه به دلیل ایجاد سرعت بالا در تولید دارای اهمیت می‌باشد. در این روش، مذاب از پاتیل وارد تاندیش شده و پس از جدا شدن ذرات غیرفلزی معلق در آن، به قالب راه می‌یابد. تاندیش به عنوان یک عمل‌کننده متالورژیکی مداوم، فولاد را برای قالب^۱ ریخته‌گری پیوسته با نرخ جریان مطلوب، دمای ثابت، ترکیب شیمیایی یکنواخت و آخال^۲ کم فراهم می‌کند. با مطالعات متالورژیکی تاندیش و بکارگیری اصول و مفاهیم مکانیک سیالات می‌توان علاوه بر افزایش کیفیت فولاد، سبب افزایش راندمان تولید، کاهش سایش ماده نسوز، افزایش توالی ریخته‌گری و کنترل اغتشاشات گردید [۱]. برای کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول، مهندسين و متخصصین به دنبال یافتن راه‌حلی جهت بررسی مشکلات در فرآیند

ریخته‌گری پیوسته برآمدند. به علت شرایط کاری پیچیده و خطرات کار کردن با فولاد مذاب، امروزه استفاده از تکنیک‌های شبیه‌سازی فیزیکی به عنوان ابزاری قدرتمند در دست متخصصان برای رفع این مشکلات قرار گرفته است تا بتوانند به فولادی تمیز و فولادی که دارای مقدار کمی آخال با قطر میانگین کمتر از ۵ میکرومتر می‌باشد، دست یابند [۲].

تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران بر روی شبیه‌سازی جریان داخل تاندیش ریخته‌گری مداوم فولاد^۳ به صورت مدل‌سازی عددی و یا تجربی صورت گرفته است. اکثر محققین در روش تجربی جهت شبیه‌سازی از آب در دمای محیط و به صورت هم‌دم^۴ و در حالت جریان دائم استفاده نموده‌اند [۱، ۳-۵]. میکی و توماس [۳] به مدل‌سازی عددی برای تحلیل جریان در یک تاندیش با هندسه‌ای خاص پرداخته‌اند. آن‌ها جریان سه‌بعدی فولاد مذاب و تغییرات دمایی

- 1 Mould
- 2 Inclusion

- 3 Steel Continuous Casting Tundish
- 4 Isothermal

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: faghih@yazd.ac.ir



آن را در تاندیش در هر دو حالت دائم و غیردائم با استفاده از مدل اغتشاش کا-پسیلون^۱ شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای تحلیل حرکت ذرات از مدل ردیابی لاگرانژی^۲ استفاده کردند. در این تحقیق، زمان ماندگاری^۳ و دانسیته تعداد ذرات با اندازه‌های مختلف آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیق درباره تأثیر بکارگیری تجهیزات کنترل جریان^۴ در بهبود الگوی جریان^۵ و جداسازی آخال^۶ در یک تاندیش، توسط لئو و همکاران [۴] انجام گرفت. آن‌ها با ساخت تاندیش مدل با مقیاس ۲/۵: ۱ و استفاده از مانع^۷ و مهارکننده اغتشاش^۸ در موقعیت‌های مختلف از تاندیش، به بررسی رفتار جریان پرداختند. آن‌ها جهت تحقیق بر روی جداسازی آخال، از ذرات پلی‌استایرن^۹ به قطر ۱ میلی‌متر استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از وسایل کنترل جریان سبب افزایش جذب ذرات ناخالصی به سرباره و تصفیه بهتر مذاب می‌گردد.

در تحقیقی که بر روی یک تاندیش ده رشته^{۱۰} به صورت مدل‌سازی فیزیکی صورت گرفت، مشخص شد که در میان ده مجرای خروجی تاندیش، آن خروجی که دارای حداقل زمان ماندگاری بوده و ظهور ردیاب^{۱۱} در آن زودتر مشاهده می‌گردد، دارای بدترین عملکرد در جداسازی آخال می‌باشد. همچنین توزیع تعداد آخال میان رشته‌ها برای هر اندازه از آخال یکسان بوده و ترتیب نزولی تعداد آخال بر اساس ترتیب نزولی زمان ماندگاری متوسط میان رشته‌ها می‌باشد [۵].

در تحقیق‌های دیگری با استفاده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی، تأثیر بکارگیری تجهیزات کنترل جریان بر جداسازی آخال بررسی شده است. در این تحقیق‌ها از مدل کا-پسیلون برای شبیه‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است. در شبیه‌سازی فیزیکی، تاندیش مدل با مقیاس کاهشی ساخته شده و با آزمایش‌های مختلف، رفتار

جریان بررسی شده است [۱، ۶-۹].

مارتینز و همکاران [۱۰]، با استفاده از شبیه‌سازی تجربی به کمک مدل آبی، به بررسی جریان سیال و جداسازی آخال در تاندیش ریخته‌گری مداوم پرداختند. آن‌ها جهت ترسیم منحنی زمان ماندگاری، از تزریق محلول پرمنگنات پتاسیم^{۱۲} و برای شبیه‌سازی جداسازی آخال، از ذرات کروم توخالی شیشه‌ای^{۱۳} استفاده کردند. تأثیر چگالی ردیاب روی خصوصیات جریان مذاب در تاندیش ریخته‌گری مداوم دیگر تحقیقی می‌باشد که با مدل‌سازی فیزیکی و عددی صورت گرفت. در مدل‌سازی فیزیکی این تحقیق، برای ترسیم منحنی زمان ماندگاری^{۱۴} از محلول اشباع شده پتاسیم کلراید^{۱۵} و برای بررسی الگوی جریان از رنگ آبی متیلن^{۱۶} به عنوان ردیاب استفاده شد [۱۱].

بررسی جریان سیال و پدیده جداسازی آخال در تاندیش ریخته‌گری فولاد زنگ‌نزن به کمک تجهیزات کنترل جریان توسط فان و همکاران [۱۲] انجام گرفت. آن‌ها تأثیر اندازه آخال را در جداسازی از مذاب مورد بررسی قرار داده و دریافتند که آخال با قطر بیشتر جذب بسیار خوبی به سرباره دارند و با کاهش اندازه آخال، جذب آن‌ها به سرباره کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری به بررسی شاخص‌های شبیه‌سازی جریان مذاب با آب و جداسازی آخال در تاندیش‌های ریخته‌گری پیوسته، پرداخته شده است. در این تحقیق از مدل‌سازی فیزیکی و عددی استفاده شده است. محققین در این بررسی دریافتند که در شبیه‌سازی آبی با مقیاس واقعی، باید از معیار مشابهت عدد رینولدز^{۱۷} و عدد فرود و در مقیاس کاهش یافته از معیار مشابهت عدد فرود^{۱۸} استفاده شود. همچنین باید نسبت دانسیته آخال به سیال در تاندیش مدل و اصلی مشابه باشد [۱۳].

شرکت فولاد آلبازی ایران به عنوان یکی از شرکت‌های بزرگ تولیدکننده فولاد در خاورمیانه با مشکل جداسازی آخال از مذاب و تهیه فولاد تمیز روبرو می‌باشد. وجود بیش از اندازه آخال در مذاب و همچنین وجود آخال با قطر زیاد در مذاب خروجی از تاندیش، سبب

12 Potassium Permanganate

13 Hollow Glass Microsphere

14 Residence Time Distribution

15 Potassium Chloride (KCL)

16 Methylene Blue Dye

17 Reynolds Number

18 Froude Number

1 k-ε

2 Lagrangian Particle Tracking Method

3 Residence Time

4 Flow Control Equipment

5 Flow Pattern

6 Inclusion Removal

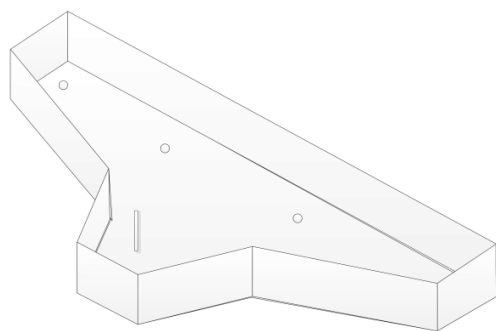
7 Dam

8 Turbulence Inhibitor

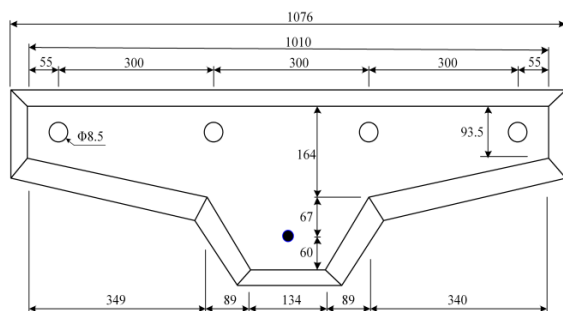
9 Polystyrene

10 Ten Strand Tundish

11 Tracer



الف) تاندیش ساده



شکل ۱: هندسه و ابعاد فیزیکی تاندیش مدل

Fig.1: Geometry and physical dimensions of the model tundish

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و پارامترهای عملکرد تاندیش واقعی و تاندیش مدل

Table 1: Physical properties and operating conditions in the actual tundish and water model

تاندیش مدل	تاندیش واقعی	پارامتر
آب	فولاد مذاب	سیال
۱۱/۲۵	۴۵	قطر نازل ورودی (mm)
۸/۵	۳۴	قطر نازل خروجی (mm)
۵/۳	۱۷۰	دبی حجمی ورودی (lit/min)
۰/۸۹۵	۱/۷۹	سرعت جریان ورودی (m/s)
۲۰۰	۸۰۰	عمق سیال در تاندیش (mm)
۹۰	۳۶۰	عمق نفوذ نازل در تاندیش (mm)
۱۰۰۰	۷۰۰۰	چگالی (kg/m ³)
۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	ویسکوزیته (kg/m.s)

بررسی الگوی جریان و جداسازی آخال بر روی تاندیش مدل در دو حالت ساده و تاندیش با مانع در محل ورود جریان همراه با مانع بلند انجام گرفته است. همچنین تأثیر تغییر ارتفاع آب در تاندیشها برای چهار ارتفاع ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ سانتی متر مورد بررسی قرار

نامنظم شدن فرآیند انجماد و در برخی موارد باعث تنگ شدن و یا مسدود شدن مسیر خروجی تاندیش می شود که این امر اختلال در فرآیند تولید و کاهش راندمان تولید را به دنبال دارد. نوع تاندیش شرکت فولاد آلیاژی ایران در مقایسه با تاندیشهای مورد استفاده در دیگر کارخانجات فولاد، از نظر شکل هندسی، ابعاد و ظرفیت ذوب گیری، محل ورود مذاب فولاد به تاندیش و تعداد مجراهای خروجی کاملاً متفاوت می باشد لذا در این تحقیق تاندیش این شرکت در ابعاد کوچک تر مدل سازی شده و رفتار جریان و تصفیه مذاب در تاندیش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بررسی تجربی

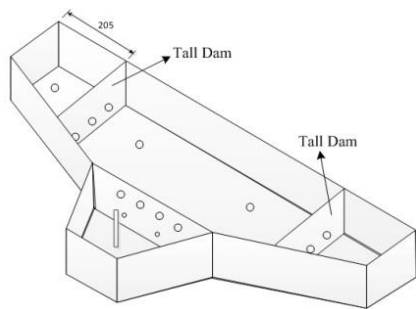
به منظور بررسی فیزیکی الگوی جریان و جداسازی آخال در فرآیند ریخته گری مداوم فولاد تاندیش مدل در مقیاس واقعی و یا به صورت کاهش یافته ساخته می شود. در صورتی که از مقیاس واقعی جهت ساخت تاندیش مدل استفاده شود، معیار مشابهت عدد رینولدز و عدد فرود برای بی بعدسازی پارامترها بکار گرفته می شود و در صورتی که از مقیاس کاهشی استفاده گردد، معیار مشابهت عدد فرود بکار می رود. تعیین سرعت و دبی سیال در تاندیش مدل با مقیاس کاهش یافته بر اساس معیار مشابهت عدد فرود به صورت روابط (۱) و (۲) است [۱۳-۱۵]:

$$U_m = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} U_p \quad (1)$$

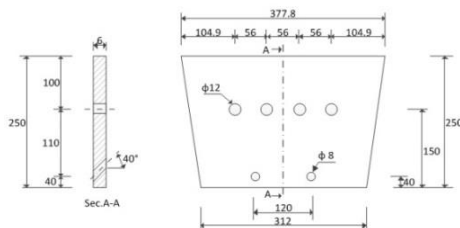
$$Q_m = \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{2.5} Q_p \quad (2)$$

در این تحقیق، تاندیش مدل از جنس شیشه با مقیاس ۱:۴، با ضخامت کف ۸ میلی متر و ضخامت دیواره های ۶ میلی متر ساخته شده و از آب در دمای محیط و شرایط هم دما استفاده شده است. تاندیش مدل به ابعاد ۱۰۷۶×۲۹۱×۲۵۰ میلی متر مکعب دارای چهار مجرای خروجی و یک نازل ورودی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

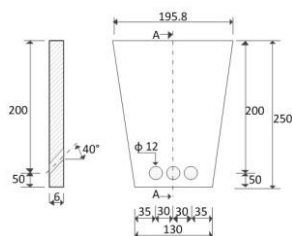
در تاندیش صنعتی، اندازه قالب ریخته گری با مقطع مربعی ۱۵۰ میلی متر و سرعت ریخته گری ۱/۹ متر بر دقیقه است. با توجه به شرایط عملکرد تاندیش واقعی و با در نظر گرفتن مقیاس ۱:۴ برای تاندیش مدل، شرایط عملکرد تاندیش مدل آبی (جدول ۱) تعیین می گردد.



الف) تاندیش با مانع در محل ورود جریان همراه با مانع بلند



ب) هندسه و ابعاد مانع در محل ورودی جریان



ج) هندسه و ابعاد مانع بلند

شکل ۲: هندسه و ابعاد فیزیکی مانع بلند

Fig.2: Geometry and physical dimensions of the tall dam

۲-۱-۲- تعیین غلظت آخال تزریقی

غلظت ذرات آخال اکسیدی در فولاد مذاب می‌تواند با استفاده از غلظت کل اکسیژن مذاب تخمین زده شود [۱۴]. غلظت کل اکسیژن مذاب برابر با مجموع اکسیژن محلول در فولاد مذاب و اکسیژن موجود در آخال غیرفلزی معلق در مذاب است. هنگامی که فولاد مذاب، سرد شده و جامد می‌گردد، حلالیت اکسیژن در مذاب کاهش می‌یابد. برای فولاد تمیز، غلظت اکسیژن باید کمتر از ۳۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد. با فرض این که اکسیدها، آلومینا هستند، نسبت جرمی اکسیژن در آخال تقریباً ۵۰ درصد است. بنابراین غلظت آلومینا در فولاد مذاب با غلظت اکسیژن کل ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر برابر ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر خواهد بود [۱۴].

حال قرار است در این تحقیق، شبیه‌سازی غلظت ذرات آخال در مدل آبی صورت گیرد. با توجه به ابعاد تاندیش مدل و سطح حمام

گرفته است. سوراخ‌های پایینی مانع (شکل ۲)، برای جلوگیری از ایجاد منطقه راکد در پشت مانع و ایجاد حرکت رو به بالا در جریان، تحت زاویه ۴۰ درجه و سوراخ‌های بالای مانع به منظور جلوگیری از ایجاد اغتشاش در سرباره، به صورت افقی طراحی شده‌اند.

۲-۱- شبیه‌سازی آخال

در فرآیند فولادسازی، ناخالصی‌هایی درون فولاد باقی می‌ماند که عمدتاً به شکل اکسیدها، سولفیدها، و ترکیبات آن‌ها مانند CaO ، SiO_2 ، MgO ، Al_2O_3 و غیره هستند. این مواد به دلیل وزن مخصوص کمتر از فلز مذاب به صورت ذرات معلق در جریان مذاب وجود دارند. جهت شبیه‌سازی آخال باید جنس، قطر و غلظت آخال به منظور تزریق به تاندیش مدل آبی مشخص گردد.

۲-۱-۱- انتخاب نوع آخال

در شبیه‌سازی تاندیش ریخته‌گری مداوم فولاد و بررسی تجربی جداسازی آخال، انتخاب نوع آخال اهمیت زیادی دارد. سه پارامتر در تعیین آخال باید مورد توجه قرار گیرد. نخست دانسیته آخال انتخابی کمتر از چگالی آب باشد تا نیروی شناوری فعال بوده و آخال قادر به تشکیل سرباره نباشد. دوم آن که نسبت دانسیته آخال واقعی به مذاب برابر با نسبت دانسیته آخال مدل به آب باشد. سوم آنکه ذرات دارای اندازه میکرونی بوده و یا قابلیت تبدیل شدن به آن را داشته باشند [۱۴].

آلومینا^۱ به عنوان مهم‌ترین و موثرترین آخال در مذاب [۱۴] دارای چگالی ۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مذاب فولاد دارای چگالی ۷/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. لذا نسبت چگالی آلومینا به مذاب $(\rho_A/\rho_s = ۰/۴۵)$ باید در انتخاب آخال مد نظر قرار گیرد [۱۴]. از میان مواد مورد بررسی جهت انتخاب آخال، ماده پرلیت به عنوان آخال تزریق شده به آب انتخاب گردیده است. این ماده دارای بافت شیشه‌ای است و اشکال کروی در آن ایجاد شده است. پرلیت دارای چگالی ۰/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده که کمتر از چگالی آب است و همچنین نسبت چگالی پرلیت^۲ به آب تقریباً برابر با نسبت چگالی آلومینا به مذاب است. $(\rho_p/\rho_w = ۰/۵۸)$

- | | |
|---|-------------------------|
| 1 | Al_2O_3 |
| 2 | Perlite |

بوسیله روش حجم محدود^۲ با سیستم شبکه جابجاشده به صورت عددی حل شده‌اند. حل معادلات بر اساس الگوریتم سیمپل^۳ به حل همزمان معادلات انفصال می‌پردازد.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد از بین مدل‌های ارائه شده، مدل کا-پسیلون از مدل‌های کارآمد جهت تعیین ضریب ویسکوزیته توربولانس در تاندیش می‌باشد.

معادله بقای جرم یا پیوستگی عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

که در آن u ، v و w به ترتیب مولفه‌های سرعت در راستای x ، y و z هستند. چگالی موضعی و t زمان است. معادله کلی پیوستگی را برای حالت جریان تراکم ناپذیر و دائم، می‌توان به شکل رابطه (۱۰) ساده کرد.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

معادلات ممنتوم که از قانون دوم نیوتن، برای جریان سیال به دست می‌آیند به معادلات ناویر-استوکس معروف هستند و به شکل روابط (۱۱) می‌باشند.

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (11)$$

در این جا F نیروی حجمی و تنش‌های نرمال و برشی می‌باشد. در شبیه‌سازی صورت گرفته به کمک نرم‌افزار فلوئنت، در قلمروی فیزیکی حدود 43.0639 المان ایجاد گردیده است. در تولید شبکه سعی شده تا محل‌های با گرادیان‌های سرعت بالا، دارای المان‌های کوچکتری باشند. به منظور بررسی استقلال از شبکه با تحلیل عددی در تاندیش ساده، در چند حالت شبکه‌بندی حل شده و به مقایسه سرعت پرداخته شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج موجود در جدول ۲، بهترین گزینه برای رسیدن به حل مستقل از شبکه و در عین حال کم‌ترین زمان محاسبات، شبکه ۳ انتخاب گردید. شکل ۳ شبکه تولید شده در تاندیش ساده را نشان می‌دهد.

آب ۲۰ سانتی‌متر، حجم تقریبی آب درون تاندیش برابر 0.29538 مترمکعب است. بنابراین $1/8$ گرم از پرلیت در این حجم از آب، معادل غلظت 60 میلی گرم بر لیتر (رابطه (۳)) می‌باشد که این میزان غلظت، در محدوده فولاد پاک قرار دارد.

$$\frac{1.8 \text{ gr}}{0.029538 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ gr}} = 6 \times 10^{-5} \frac{\text{gr}}{\text{gr}} = 60 \frac{\text{mgr}}{\text{L}} \quad (3)$$

۳-۱-۲- تعیین قطر آخال تزریقی

یکی از پارامترها در شبیه‌سازی آخال تزریقی به مدل آبی، تعیین نسبت قطر آخال در مدل آبی به قطر آخال واقعی است. سرعت ذرات آخال در مذاب فولاد در تاندیش واقعی به کمک قانون استوکس^۱ (رابطه (۴)) قابل محاسبه می‌باشد [۱۳ و ۱۴].

$$U_{R-p} = \frac{d_{p-s}^2}{18\mu_s} g (\rho_s - \rho_A) \quad (4)$$

سرعت ذرات آخال در آب در تاندیش مدل آبی نیز به کمک قانون استوکس برابر است با:

$$U_{R-m} = \frac{d_{p-w}^2}{18\mu_w} g (\rho_w - \rho_p) \quad (5)$$

بر اساس معیار مشابهت عدد فرود (رابطه (۱))، نسبت سرعت‌ها در دو تاندیش واقعی و مدل، رابطه مستقیم با مجذور مقیاس دارد. لذا به کمک روابط (۱)، (۴) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت [۱۳ و ۱۴]:

$$\frac{d_{p-s}^2 (\rho_s - \rho_A) \mu_w}{d_{p-m}^2 (\rho_w - \rho_p) \mu_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \quad (6)$$

$$\frac{d_{p-s}^2 (7.05 - 2.80) \times 0.001}{d_{p-m}^2 (1.00 - 0.58) \times 0.007} = \sqrt{4} \quad (7)$$

$$d_{p-m} = 0.85 d_{p-s} \quad (8)$$

بنابراین برای تاندیش مدل آبی با مقیاس ۱:۴، نسبت قطر آخال پرلیت به قطر آلومینا در مذاب باید 0.85 باشد.

۳- شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی عددی تاندیش از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. معادلات انرژی، پیوستگی و ممنتوم به همراه شرایط مرزی،

2 Finite Volume

3 Simple

1 Stoke's Law

(شکل ۴)، مشاهده می‌شود که در هر چهار حالت از ارتفاع آب در تاندیش، حرکت جوهر به صورت خزشی و نزدیک به کف تاندیش بوده و همزمان با حرکت دورانی و با سرعتی بسیار کمتر از حرکت خزشی، به طرف بالا نیز در حرکت می‌باشد. با مقایسه زمان الگوها مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع آب، سرعت حرکت جوهر و خروج آن از تاندیش بیشتر و میزان حرکت دورانی و رو به بالای آن کمتر شده است.

شکل ۵ الگوی جریان در تاندیش با مانع را پس از تزریق جوهر برای ارتفاع‌های مختلف آب در زمان‌های متوالی و متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که در تاندیش با مانع برای ارتفاع‌های گوناگون آب، حرکت جوهر در محدوده بالای تاندیش و نزدیک به سطح آب می‌باشد و سپس به آرامی و با حرکت دورانی به سمت پایین و کف تاندیش حرکت می‌کند. با مقایسه زمان الگوها مشاهده می‌شود، با کاهش ارتفاع آب، سرعت حرکت جوهر کاهش یافته و مدت زمان خروج آن از تاندیش افزایش می‌یابد.

۴-۲- بررسی منحنی زمان ماندگاری

جهت تعیین زمان ماندگاری^۱، از محلول اشباع نمک^۲ استفاده شده است. به این منظور ۵۰ میلی‌لیتر محلول اشباع نمک با غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر با سرنگ از مسیر ورودی آب به تاندیش در مدت ۵ ثانیه تزریق و سپس توسط دستگاه هدایت‌سنج^۳ مدل هاریبا^۴، میزان غلظت آب خروجی از دورترین مجرای خروجی تا نازل ورودی تاندیش در هر لحظه اندازه‌گیری شده است. با استفاده از مقادیر غلظت به دست آمده و به کمک روابط (۱۲) تا (۱۵) منحنی غلظت بی‌بعد-زمان بی‌بعد ترسیم می‌گردد [۷ و ۱۶].

$$C = \frac{C_i - C_0}{\bar{C}} \quad (12)$$

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i}{n} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad (14)$$

$$\bar{t} = \frac{\sum C_i t_i}{\sum C_i} \quad (15)$$

1 Residence Time Distribution (RTD)

2 NaCl

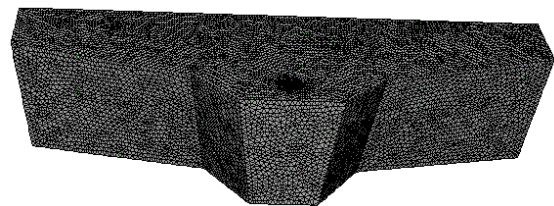
3 Electrical Conductivity Meter

4 Horiba

جدول ۲: بررسی سرعت ورودی بر حسب تعداد سلول‌ها

Table 2: Investigation of the inlet speed by cells number

شبهه	تعداد سلول	سرعت خروجی (m/s)
۱	۲۷۸۵۳۴	۰/۸۸۷
۲	۳۷۰۲۳۸	۰/۸۸۹
۳	۴۳۰۶۳۹	۰/۸۹۵
۴	۵۱۰۲۴۵	۰/۸۹۶



شکل ۳: شبکه تولید شده در تاندیش ساده

Fig. 3: Created mesh in the simple tundish

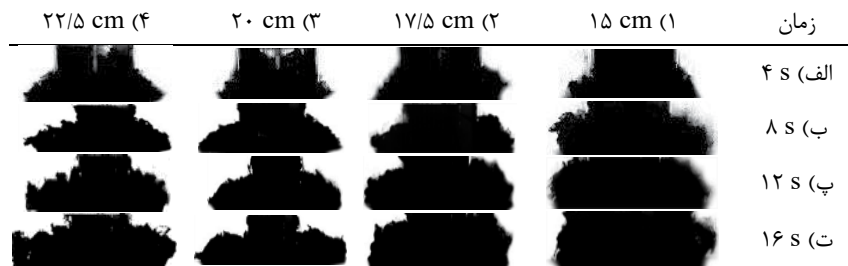
۴- نتایج بررسی تجربی

در این تحقیق تأثیر تغییر ارتفاع آب در تاندیش بر روی الگوی جریان و جداسازی آخال برای چهار ارتفاع ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ سانتی‌متر بررسی گردیده است. همچنین با بکارگیری مانع در تاندیش، به بررسی و مقایسه رفتار جریان و تصفیه مذاب در تاندیش ساده و تاندیش با مانع پرداخته شده است. جهت بررسی رفتار جریان در تاندیش، از تزریق جوهر به جریان ورودی و برای تعیین حداقل زمان ماندگاری از تزریق محلول اشباع نمک استفاده شده است. به منظور بررسی و مقایسه درصد جداسازی آخال، از تزریق پرلیت با قطر و مقدار مشخص استفاده شده که در ادامه، شرح آزمایش‌ها داده خواهد شد.

۴-۱- بررسی الگوی جریان

جهت بررسی الگوی جریان و تشخیص مسیر حرکت سیال از لحظه ورود به تاندیش تا لحظه خروج از آن، از جوهر سیاه استفاده شده است. به این منظور مقدار ۵ میلی‌لیتر جوهر سیاه توسط سرنگ از مسیر ورودی آب به تاندیش در مدت ۳ ثانیه تزریق و سپس از مسیر حرکت جوهر در داخل تاندیش و نحوه پخش شدن آن، فیلمبرداری و در زمان‌های متوالی و مساوی عکس‌برداری شده است.

با مقایسه الگوی جریان در زمان‌های مختلف در تاندیش ساده



شکل ۴: الگوی جریان جوهر در تاندیش ساده با ارتفاع‌های مختلف آب

Fig. 4: Ink flow patterns in the simple tundish with different water heights

$$V_d = 1 - \theta_{ave} \quad (20)$$

$$V_p = \frac{\theta_{max} + \theta_{min}}{2} \quad (21)$$

$$V_m = 1 - V_p - V_d \quad (22)$$

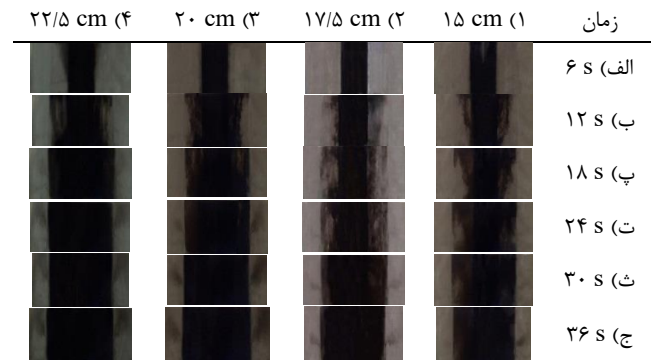
$$V_{pm} = V_p + V_m \quad (23)$$

$$R_{p/d} = V_p / V_d \quad (24)$$

$$R_{pm/d} = V_{pm} / V_d \quad (25)$$

با توجه به منحنی زمان ماندگاری تاندیش ساده برای ارتفاع آب ۲۰ سانتی‌متر (شکل ۶ الف)) مشاهده می‌شود، حداقل زمان ماندگاری محلول اشباع نمک تزریق شده کوتاه می‌باشد و پس از آن به صورت ناگهانی در خروجی تاندیش غلظت بالا می‌رود و سپس با افت شدیدی روبرو می‌شود. منحنی زمان ماندگاری برای تاندیش با مانع (شکل ۶ ب))، نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان ماندگاری، میزان غلظت در خروجی بیشتر می‌شود و پس از آن با گذشت زمان، میزان غلظت تدریجاً کاهش می‌یابد.

از مقایسه منحنی‌های زمان ماندگاری تاندیش ساده و تاندیش با مانع (شکل ۷)، مشاهده می‌شود که در تاندیش ساده، حداقل زمان ماندگاری کمتر بوده و غلظت حداکثر با مقدار زیادی در یک لحظه وجود دارد که این امر نشان‌دهنده عبور سریع جریان از مسیر ورودی به خروجی در این تاندیش است. در تاندیش با مانع، حداکثر غلظت دارای مقداری بسیار پایین‌تر بوده و بعد از آن نیز منحنی با شیب ملایم و یکنواختی ادامه می‌یابد که این امر بیانگر سرعت کند محلول اشباع نمک تزریق شده و توزیع یکنواخت آن در تاندیش است. حداقل زمان ماندگاری محلول اشباع نمک در تاندیش ساده ۲۸ ثانیه و در



شکل ۵: الگوی جریان جوهر در تاندیش با مانع برای ارتفاع‌های مختلف آب

Fig. 5: Ink flow patterns in the tundish with dam for different water heights

از منحنی‌های زمان ماندگاری، حداقل زمان ماندگاری t_{min} ، زمان حداکثر غلظت t_{max} و زمان ماندگاری متوسط t_{ave} تعیین می‌گردد. حجم مناطق راکد^۱، پلاگ^۲ و مخلوط^۳ و با استفاده از آن‌ها، نسبت حجم پلاگ به حجم راکد $R_{p/d}$ و نسبت حجم فعال به حجم راکد $R_{pm/d}$ از روابط (۱۶) تا (۲۵) محاسبه می‌شود [۴، ۷، ۱۷]:

$$t_s = \frac{V}{Q_m} \quad (16)$$

$$\theta_{ave} = \frac{\bar{t}}{t_s} \quad (17)$$

$$\theta_{max} = \frac{t_{max}}{t_s} \quad (18)$$

$$\theta_{min} = \frac{t_{min}}{t_s} \quad (19)$$

- 1 Dead Zone
- 2 Plug Zone
- 3 Mixed Zone

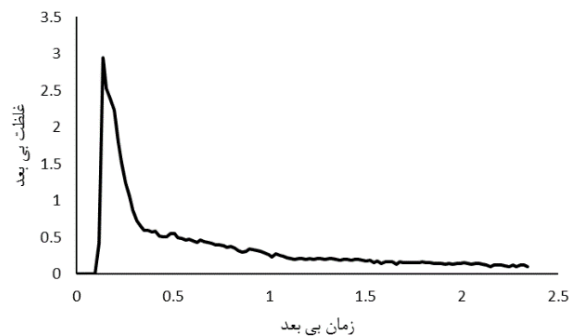
تانندیش با مانع در جدول ۳، نشان می‌دهد که با بکارگیری مانع در مسیر ورودی جریان و دو مانع بلند در طرفین تانندیش، حجم سیال راکد در تانندیش کاهش یافته و مقادیر $R_{p/d}$ و $R_{pm/d}$ افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند سبب بهبود رفتار جریان گردد.

۴-۳- بررسی جداسازی آخال

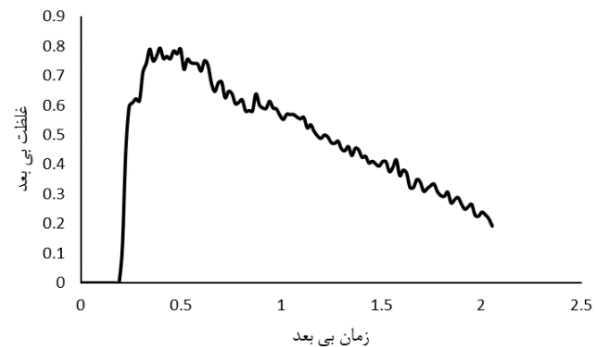
به منظور بررسی میزان جداسازی آخال در تانندیش، انتخاب جنس، قطر و میزان آخال تزریقی اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق از پرلیت به عنوان آخال در آزمایش‌ها استفاده شده است. مقدار آخال تزریقی به تانندیش در ارتفاع آب ۲۰ سانتی‌متر برابر ۱/۸ گرم و نسبت قطر آخال در مدل به آخال آلومینای موجود در مذاب برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. لذا پرلیت بعد از آسیاب شدن، به پودر تبدیل شده سپس توسط الک‌هایی در اندازه‌های متفاوت، غربال گردیده تا قطرهای مورد نظر جداسازی شوند. چهار اندازه آخال به قطرهای ۶۳، ۱۰۵، ۱۷۷ و ۵۹۵ میکرومتر با مقدار خطای ± 10 میکرومتر جهت تزریق به آب و بررسی میزان جداسازی آن‌ها انتخاب شده که معادل قطرهای ۷۴، ۱۲۴، ۲۰۸ و ۷۰۰ میکرومتر در مذاب می‌باشد. از میان چهار قطر در نظر گرفته شده، انتخاب قطر ۵۹۵ میکرومتر به منظور بررسی و مقایسه تأثیر افزایش ناگهانی قطر آخال بر جداسازی آن‌ها بوده است.

در آزمایش مربوط به تزریق آخال، توسط ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم، مقدار ۱/۳۳، ۱/۵۵، ۱/۸ و ۲ گرم از آخال برای ارتفاع‌های ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ سانتی‌متر، توزین شده و سپس همراه با آب وارد سرنگ CC ۶۰ میلی‌لیتر می‌شود. سپس مخلوط آب و آخال واقع در سرنگ، از مسیر تعبیه شده در لوله ورودی آب، در مدت ۱۰ ثانیه تزریق می‌شود. آخال خروجی از تانندیش توسط فیلترهای واقع در مسیرهای خروجی جدا شده و پس از خشک شدن، توزین می‌شوند. با توجه به مقدار آخال تزریق شده و مقدار آخال خارج شده از تانندیش، عملکرد تانندیش در جداسازی آخال مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

با بررسی و مقایسه درصد آخال خروجی از تانندیش ساده با ارتفاع‌های مختلف آب (جدول ۴) مشخص می‌شود که با افزایش قطر آخال، میزان خروج آن‌ها از تانندیش کمتر و جذب به صورت سرباره بیشتر می‌شود. ولی با مقایسه درصد آخال خروجی برای هر قطر در



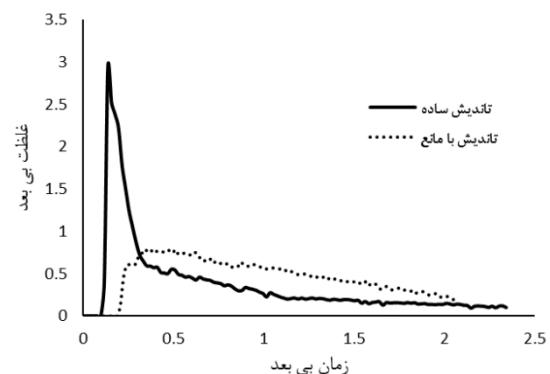
الف) تانندیش ساده



ب) تانندیش با مانع

شکل ۶: منحنی زمان ماندگاری برای تانندیش‌های مختلف با ارتفاع آب ۲۰ سانتی‌متر

Fig.6: Residence time curves for different tundishes with 20 cm water height



شکل ۷: مقایسه منحنی‌های زمان ماندگاری تانندیش‌های مختلف برای ارتفاع آب ۲۰ سانتی‌متر

Fig.7: Comparison of residence time curves for different tundishes with 20 cm water height

تانندیش با مانع ۷۸ ثانیه و زمان رسیدن غلظت به مقدار حداکثر در تانندیش ساده ۴۰ ثانیه و در تانندیش با مانع ۳۸۵ ثانیه می‌باشد. اطلاعات منحنی‌های زمان ماندگاری برای تانندیش ساده و

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی از منحنی‌های زمان ماندگاری در تاندیش‌ها

Table 3: Experimental results of RTD in tundishes

تاندیش	t_{min} (s)	t_{max} (s)	t_s (s)	V_d (m ³)	V_p (m ³)	V_m (m ³)	$R_{p/d}$	$R_{pm/d}$
ساده	۲۸	۴۰	۳۳۴	۰/۲۲	۰/۱۰	۰/۶۸	۰/۴۵	۳/۵۴
با مانع	۷۸	۳۸۵	۳۳۴	۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۲۶	۱۳/۸	۱۹

جدول ۴: درصد آخال خروجی با قطرهای مختلف از تاندیش ساده با ارتفاع‌های متفاوت آب

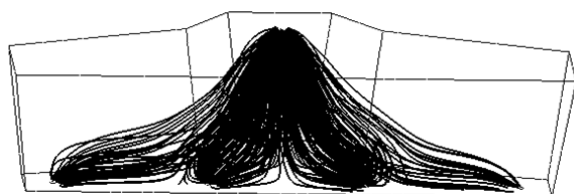
Table 4: Output inclusion percentage with different diameters from the simple tundish for water different heights

ارتفاع (cm)	۶۳ μm	۱۰۵ μm	۱۷۷ μm	۵۹۵ μm
۱۵	۲۱/۸	۲۳/۳	۲۳/۳	۴/۵
۱۷/۵	۲۰/۶	۲۰	۱۱/۶	۳/۹
۲۰	۳۰	۲۷/۲	۲۴/۴	۷/۲
۲۲/۵	۳۴	۳۱/۵	۱۸/۵	۳/۵

جدول ۵: درصد آخال خروجی با قطرهای مختلف از تاندیش با مانع با ارتفاع‌های متفاوت آب

Table 5: Output inclusion percentage with different diameters from the tundish with dam for water different heights

ارتفاع (cm)	۶۳ μm	۱۰۵ μm	۱۷۷ μm	۵۹۵ μm
۱۵	۲۰/۵	۱۸/۹	۱۷/۵	۲/۴
۱۷/۵	۲۶/۷	۲۰/۵	۱۸/۳	۲/۸
۲۰	۲۲/۱	۲۱/۹۳	۱۷/۴	۲/۷
۲۲/۵	۲۳/۳	۲۲/۵	۲۰/۳	۳/۴



شکل ۸: خطوط جریان سیال در تاندیش ساده

Fig. 8: Fluid flow lines in the simple tundish

دست آمده در بررسی تجربی، جریان سیال پس از ورود به تاندیش به سمت پایین و نزدیک به کف تاندیش رفته و با حرکت خزشی و رو به جلو، به سمت مجاری خروجی حرکت می‌نماید (شکل ۸) که این امر سبب خروج بیشتر آخال از تاندیش و ورود به محفظه قالب می‌گردد. در تاندیش با مانع (شکل ۹)، پس از عبور از موانع، دارای حرکت چرخشی رو به بالا بوده که ضمن افزایش زمان ماندگاری آخال در تاندیش، به جداسازی آن‌ها از مذاب و جذب به سرباره موثر می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی تجربی تاندیش ریخته‌گری مداوم فولاد و انجام آزمایش‌ها جهت بررسی و مقایسه الگوی جریان، منحنی زمان

ارتفاع‌های مختلف آب، مشاهده می‌گردد که با کاهش ارتفاع آب از ۱۷/۵ به ۱۵ سانتی‌متر، در همه قطرهای درصد آخال خروجی افزایش یافته و شرایط برای جداسازی و حذف آخال نامناسب‌تر شده است. این امر در کاهش ارتفاع آب از ۲۲/۵ به ۲۰ سانتی‌متر برای ذرات با قطرهای بزرگتر نیز مشاهده می‌گردد. در حالی که برای ذرات ریزتر، درصد آخال خروجی کاهش یافته است.

هم‌چنین با مقایسه درصد آخال خروجی از تاندیش با مانع در ارتفاع‌های مختلف آب (جدول ۵) مشخص می‌شود که با افزایش قطر آخال، میزان خروج آن‌ها از تاندیش کمتر شده و جذب آن‌ها به سرباره افزایش می‌یابد. ولی با مقایسه درصد آخال خروجی برای هر قطر در ارتفاع‌های مختلف آب، مشاهده می‌گردد که با کاهش ارتفاع آب به ۱۵ سانتی‌متر، درصد آخال خروجی کاهش یافته ولی تاندیش با ارتفاع آب ۱۷/۵ سانتی‌متر دارای عملکرد بهتری در جداسازی آخال با قطرهای ریز به صورت سرباره داشته است.

۵- نتایج شبیه‌سازی عددی

با شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سیال در تاندیش ساده و تاندیش با مانع، مشخص گردید که در تاندیش ساده، مشابه نتایج به

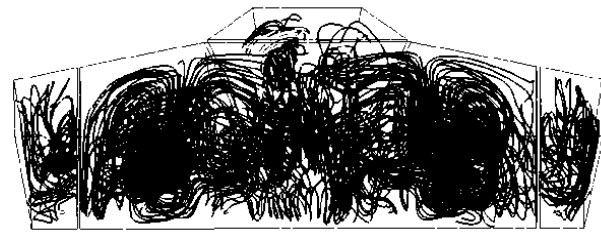
فهرست علائم

علائم انگلیسی

غلظت اولین نمونه	C_0
غلظت میانگین	$\bar{C}$
غلظت بی بعد	C
غلظت نمونه‌ها	C_i
قطر آخال مدل، m	d_{p-m}
قطر آخال واقعی، m	d_{p-s}
شتاب گرانش، m/s^2	g
طول مشخصه تاندیش واقعی، m	L_p
طول مشخصه مدل آبی، m	L_m
تعداد نمونه‌ها	n
دبی حجمی تاندیش واقعی lit/min	Q_p
دبی حجمی مدل آبی، lit/min	Q_m
نسبت حجم پلاگ به حجم راکد	$R_{p/d}$
نسبت حجم فعال به حجم راکد	$R_{pm/d}$
زمان ماندگاری متوسط، s	$\bar{t}$
زمان ماندگاری تئوری، s	t_s
زمان غلظت حداکثر، s	t_{max}
زمان ماندگاری حداقل، s	t_{min}
سرعت در تاندیش واقعی، m/s	U_p
سرعت در مدل آبی، m/s	U_m
سرعت ذرات در مدل آبی، m/s	U_{R-m}
سرعت ذرات در فولاد مذاب، m/s	U_{R-p}
حجم پلاگ، m^3	V_p
حجم مخلوط، m^3	V_m
حجم تاندیش، m^3	V
حجم راکد، m^3	V_d
حجم فعال، m^3	V_{pm}

علائم یونانی

زمان بی بعد	θ
نسبت t_{min} به t_s	θ_{min}
نسبت t_{max} به t_s	θ_{max}
حجم غیر راکد، m^3	θ_{ave}
ویسکوزیته آب، kg/m.s	μ_w



شکل ۹: خطوط جریان سیال در تاندیش با مانع
Fig.9: Fluid flow lines in the tundish with dam

ماندگاری و جداسازی آخال با قطرهای مختلف برای تاندیش ساده و تاندیش با مانع در محل جریان ورودی به همراه دو مانع بلند در طرفین و همچنین تغییر ارتفاع سطح آب به ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۲/۵ سانتی‌متر در هر دو نوع تاندیش، نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با تزریق جوهر و بررسی الگوی جریان مشخص گردید که بکارگیری مانع در تاندیش، سبب بهبود الگوی جریان شده و مسیر جریان را به سطح مذاب نزدیک می‌نماید که این امر به جداسازی آخال به صورت سرباره کمک می‌کند.

۲- با تغییر ارتفاع آب در تاندیش ساده و همچنین در تاندیش با مانع، الگوی جریان دچار تغییر نگردیده است. با کاهش ارتفاع آب سرعت حرکت جریان کمتر و زمان ماندگاری افزایش می‌یابد که این امر سبب ایجاد فرصت بیشتر به منظور جداسازی آخال می‌باشد.

۳- بکارگیری مانع در تاندیش، سبب افزایش حداقل زمان ماندگاری شده که باعث بهبود فرآیند جداسازی آخال از مذاب می‌گردد.

۴- در تاندیش با مانع، کاهش ارتفاع آب سبب بهبود فرآیند جداسازی آخال گردیده و میزان آخال خروجی از تاندیش را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش قطر آخال میزان جذب به سرباره، افزایش می‌یابد. درصد آخال خروجی از تاندیش با مانع در ارتفاع آب ۲۲/۵ سانتی‌متر در مقایسه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر برای قطر ۶۳ میکرومتر به میزان ۱۲ درصد و برای قطر ۵۹۵ میکرومتر به اندازه ۲۹/۴ درصد افزایش می‌یابد.

۵- در مجموع، استفاده از مانع و کاهش ارتفاع آب در تاندیش، سبب بهبود رفتار جریان و بهبود عملکرد تاندیش در جداسازی آخال و فراهم نمودن فولاد تمیز می‌شود.

- fluid flow and residence time distribution in a four-strand tundish for enhancing inclusion removal, ISIJ international, 48(1) (2008) 38-47.
- [9] L. Zhang, S. Taniguchi, K. Cai, Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish, Metallurgical and Materials Transactions B, 31(2) (2000) 253-266.
- [10] E. Martinez, M. Maeda, L.J. Heaslip, G. Rodriguez, A. Mclean, Effects of fluid flow on the inclusion separation in continuous casting tundish, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 26(8) (1986) 724-731.
- [11] C. Damle, Y. Sahai, The effect of tracer density on melt flow characterization in continuous casting tundishes—a modeling study, ISIJ international, 35(2) (1995) 163-169.
- [12] C. Fan, R. Shie, W.S. Hwang, Studies by mathematical and physical modelling of fluid flow and inclusion removal phenomena in slab tundish for casting stainless steel using various flow control device designs, Ironmaking & Steelmaking, 30(5) (2003) 341-347.
- [13] Y. Sahai, T. Emi, Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes, ISIJ international, 36(9) (1996) 1166-1173.
- [14] J. Rogler, L. Heaslip, M. Mehrvar, Physical modelling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling, Canadian metallurgical quarterly, 44(3) (2005) 357-368.
- [15] D.Y. Sheng, C.S. Kim, J.K. Yoon, T.C. Hsiao, Water model study on convection pattern of molten steel flow in continuous casting tundish, ISIJ international, 38(8) (1998) 843-851.
- [16] S. Singh, S.C. Koria, Model study of the dynamics of flow of steel melt in the tundish, ISIJ international, 33(12) (1993) 1228-1237.
- [17] S. Zheng, M. Zhu, Optimisation of baffles in six strand round bloom continuous casting tundish: a physical modelling study, Ironmaking & steelmaking, 33(5) (2006) 398-406.

μ_s	ویسکوزیته فولاد مذاب، kg/m.s
ρ_A	چگالی آلومینا، kg/m ³
ρ_p	چگالی پرلیت، kg/m ³
ρ_w	چگالی آب، kg/m ³
ρ_s	چگالی مذاب، kg/m ³

مراجع

- [1] S. Lopez-Ramirez, J. Palafox-Ramos, R. Morales, J. Barreto, D. Zacharias, Modeling study of the influence of turbulence inhibitors on the molten steel flow, tracer dispersion, and inclusion trajectories in tundishes, Metallurgical and Materials Transactions B, 32(4) (2001) 615-627.
- [2] M. Alizadeh, H. Edris, Optimization of molten flow pattern in steel making tundish for cleanliness steel productin and minimum mix production Journal of Advanced Materials and Technologies, 3(2) (2013) 11-23. (in Persian)
- [3] Y. Miki, B.G. Thomas, Modeling of inclusion removal in a tundish, Metallurgical and materials transactions B, 30(4) (1999) 639-654.
- [4] J.G. Liu, H.C. Yan, L. Liu, X. H. Wang, Water modeling of optimizing tundish flow field, Journal of iron and steel research, International, 14(3) (2007) 14-20.
- [5] S.G. Zheng, M.Y. Zhu, Y.L. Zhou, S. Wang, Flow characteristics and inclusion removal in a ten-strand continuous casting tundish: Physical Modelling and Industrial Trials, Journal of Iron and Steel Research, International, 23(2) (2016) 92-97.
- [6] P.K. Jha, P.S. Rao, A. Dewan, Effect of height and position of dams on inclusion removal in a six strand tundish, ISIJ international, 48(2) (2008) 154-160.
- [7] S. Yang, L. Zhang, J. Li, K. Peaslee, Structure optimization of horizontal continuous casting tundishes using mathematical modeling and water modeling, ISIJ international, 49(10) (2009) 1551-1560.
- [8] A. Kumar, D. Mazumdar, S.C. Koria, Modeling of

