



## سمپوزیوم فولاد ۴۰۰

۲۳ الی ۲۵ آذرماه ۱۴۰۰

کیش - مرکز همایش‌های بین‌المللی



### شبیه‌سازی جریان سیال و تعیین تأثیر انتقال حرارت بر توزیع زمان ماند تاندیش‌های ۴۰ و ۶۰ تنی مجتمع فولاد مبارکه

سعید حسن پور<sup>۱</sup>، امین سعیدی پور<sup>۱</sup>، سیدعباس عسگری<sup>۱</sup>، محمودرضا عقیلی<sup>۲</sup>، منصور سنایی نژاد<sup>۲</sup>، قاسم خوشدل پور<sup>۲</sup>، محمدعلی شفیعی<sup>۲</sup>، محمد حدادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> اصفهان، اصفهان، شهرک علمی تحقیقاتی - شرکت رایان تحلیل سپاهان

<sup>۲</sup> اصفهان، مبارکه، مجتمع فولاد مبارکه، ناحیه فولادسازی

<sup>۳</sup> اصفهان، مبارکه، مجتمع فولاد مبارکه، واحد تحقیق و توسعه

#### چکیده

امروزه به دلیل اهمیت اطلاع از رفتار ناخالصی‌ها جهت تعیین عوامل مؤثر و اتخاذ راهکارهای اصلاحی در تاندیش‌های میانی، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در شناسایی و بهبود فرآیندهای تولید فولاد با اقبال روزافزونی مواجه است. در این مقاله تاندیش‌های مورد استفاده در فرآیند ریخته‌گری پیوسته‌ی مجتمع فولاد مبارکه از نظر الگوی جریان، رفتار ناخالصی‌ها و تأثیر انتقال حرارت بر توزیع زمان ماند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد برای تاندیش ۴۰ تنی، لحاظ کردن تلفات حرارتی مذاب تأثیر چندانی بر روی توزیع زمان ماند ندارد، درحالی‌که برای تاندیش ۶۰ تنی این تأثیر محسوس است.

**کلمات کلیدی:** تاندیش میانی، الگوی جریان مذاب، توزیع زمان ماند (RTD)، انتقال حرارت، رفتار ناخالصی

<sup>1</sup> Hassanpour.Saeid@gmail.com

## مقدمه

تولید فولاد با کیفیت از ماشین ریخته گری به پارامترهای زیادی از جمله مشخصات پاتیل، تاندیش و عملیات ریخته گری وابسته است، تاندیش که وظیفه آن انتقال مذاب از پاتیل به قالب هاست به عنوان یک پل ارتباطی مهم بین فرآیندهای پاتیل و قالب شناخته می شود. از این رو کنترل الگوی جریان و انتقال حرارت درون تاندیش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش های انجام گرفته به کمک مدل های محاسباتی بیشتر در حالت ایزوترمال (دما ثابت) بررسی شده اند، بر این اساس عمده محققین فرض می کنند که نیروهای بویانسی حرارتی در مقایسه با دیگر نیروها ناچیز و قابل صرف نظر است. از سوی دیگر در برخی از پژوهش ها علاوه بر معادلات حاکم بر جریان سیال معادله انرژی (انتقال حرارت) نیز در نظر گرفته شده است. برای مثال پاردشی و همکاران بر اساس حل همزمان جریان سیال و انتقال حرارت، مدلی سه بعدی برای عملیات تاندیش شبیه سازی کردند که دینامیک فرایند گذرا را نیز در بر می گیرد [۱]. در پژوهشی دیگر سان و همکاران مدل محاسباتی گذرا و کوپلی برای یافتن میدان های دما و جریان توزیع زمان ماند و بازده حذف آخال ارائه دادند [۲]. مورالس و همکاران با مدل سازی جریان سیال و انتقال حرارت فولاد مذاب در یک تاندیش با دو خروجی برای سه مورد مختلف شامل تاندیش ساده، تاندیش به همراه یک جفت بند و یک جفت بافل و نهایتاً تاندیش با توربواستاپر و یک جفت بافل، دریافتند که حالت سوم یعنی تاندیش شامل بافل و توربواستاپر بهترین حالت برای خصوصیات جریان به دلیل کاهش چشمگیر اغتشاشات و افزایش زمان ماند و ایجاد جریان یکنواخت تر می باشد [۳]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ تاندیش مجهز شده به بند و دام را شبیه سازی و نمودار توزیع زمان ماند را به وسیله شبیه سازی با وجود انتقال حرارت بررسی کردند [۴].

## روش تحقیق

### معادلات حاکم و شرایط مرزی

در مدل سازی های عددی از معادلات ناویر استوکس جریان آشفته برای شبیه سازی و حل میدان جریان مذاب در تاندیش استفاده می شود. علاوه بر معادلات ناویر استوکس، به دلیل ماهیت جریان در تاندیش نیاز است تا یک مدل مناسب توربولانسی برای اغتشاش جریان در تاندیش در نظر گرفته شود. معادله پیوستگی با نوشتن بالانس جرم بر روی یک حجم کنترل سیال بدست می آید:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad (1)$$

به طور مشابه، معادله ی حرکت با نوشتن بالانس مومنتوم بر روی یک حجم کنترل نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) = -(\nabla \cdot \rho v v) - \nabla p - (\nabla \cdot \tau) + F_b \quad (2)$$

یکی از موارد ضروری در بررسی ناخالصی ها مدل کردن آن بصورت عددی درون تاندیش می باشد، که این موضوع معمولاً به دو روش مدل ردیابی ذره و حل معادله غلظت انجام می گیرد. البته در مقالات بیشتر از روش اول یعنی مدل ردیابی ذره استفاده شده است.

### مدل ردیابی ذره

ردیابی ذره با انتگرال گیری از بالانس نیرویی (شامل اینرسی آخال به همراه درگ هیدرودینامیکی و نیروی جاذبه) برپایه ی روش ردیابی ذره ی لاگرانژ برای هر ذره در حین حرکت در میدان جریان مذاب بیان می شود که  $u_{in}$  (سرعت آخال) مجموع نوسانات لحظه ای و متوسط سرعت محلی و  $u_m$  سرعت مذاب می باشند، البته باید توجه داشت که برای حصول نتایج قابل توجه باید چندین هزار ذره با نقاط شروع مختلف مورد بررسی قرار گیرند. روابط این مدل به شرح زیر است.

$$\frac{du_{in}}{dt} = F_d (u_m - u_{in}) + \frac{\rho_{in} - \rho}{\rho_{in}} g_i \quad (۳)$$

$$F_d = \frac{18\mu_1}{\rho_{in}d_{in}^2} * \frac{C_d Re}{24} (u_m - u_{in}) \quad (۴)$$

### نتایج و بحث

بعد از شبکه بندی و اطمینان از درستی شرایط مرزی فرض شده، شبیه سازی جریان مذاب در تاندیش های ۴۰ و ۶۰ تنی به صورت سه بعدی و به وسیله ی نرم افزار Ansys Fluent در حالت های پایا و گذرا و جریان آرام و مغشوش انجام شد. الگوی جریان در حالت گذرا و مغشوش روی یکی از صفحات تقارن برای تاندیش های ۴۰ و ۶۰ تنی به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده اند. طبق این نتایج مشخص است که جریانی گردابه ای در توربو استاپر موجود در هر دو تاندیش ایجاد می شود و این توربو استاپر موجب کاهش سرعت جریان ورودی شده و در ادامه اغتشاش جریان کاهش می یابد. به طور خاص در تاندیش ۴۰ تنی که ابزار کنترل جریان بیش تری نسبت به تاندیش دیگر دارد جریان پس از گذر از فاصله ی بین بافل و دام شتاب گرفته و پیش از رسیدن به خروجی گردابه ای قابل توجه را ایجاد می کند. هم چنین ابتدا شبیه سازی ها در حالت دما ثابت و سپس با در نظر گیری انتقال حرارت در تاندیش بررسی شدند. سپس جهت حصول اطمینان و اعتبار سنجی حل حرارتی انجام شده، مقایسه ای با مقالات موجود انجام شد و این امر تایید گردید. با اتمام شبیه سازی الگوی جریان، گام بعدی بررسی حرکت ذرات ناخالصی در جریان گذرای مغشوش با در نظر گیری انتقال حرارت برای دو تاندیش است. با توجه به پیشنهادات منابع مختلف، ذرات ناخالصی با روش فازهای گسسته در درون دامنه حل بصورت پالسی تزریق و تعقیب شدند و ناظری فرضی در خروجی زمان و تعداد خروج این ذرات را ثبت می کند که از این داده ها در نهایت توزیع زمان ماند ذرات در تاندیش بدست می آید. آن چنان که در شکل های ۳ و ۴ مشخص است تفاوت چندانی بین توزیع زمان ماند تاندیش

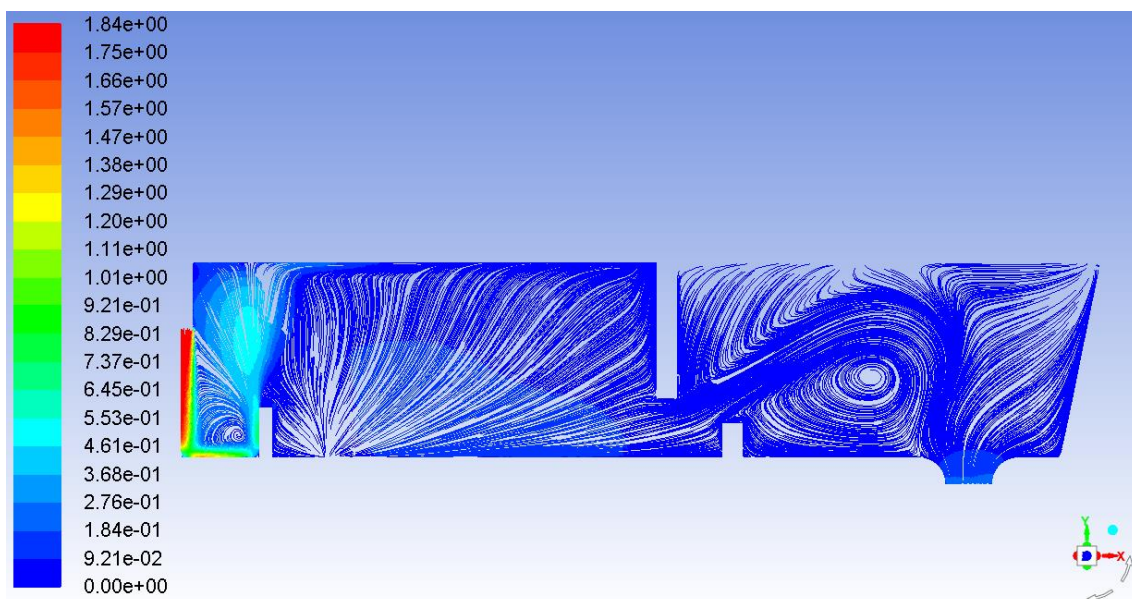
۴۰ تنی در حالت دما ثابت و دما متغیر وجود ندارد، درحالی که برای تاندیش ۶۰ تنی این تفاوت قابل ملاحظه است و نمی توان از تأثیر انتقال حرارت در شبیه سازی این تاندیش چشم پوشی کرد.

### نتیجه گیری

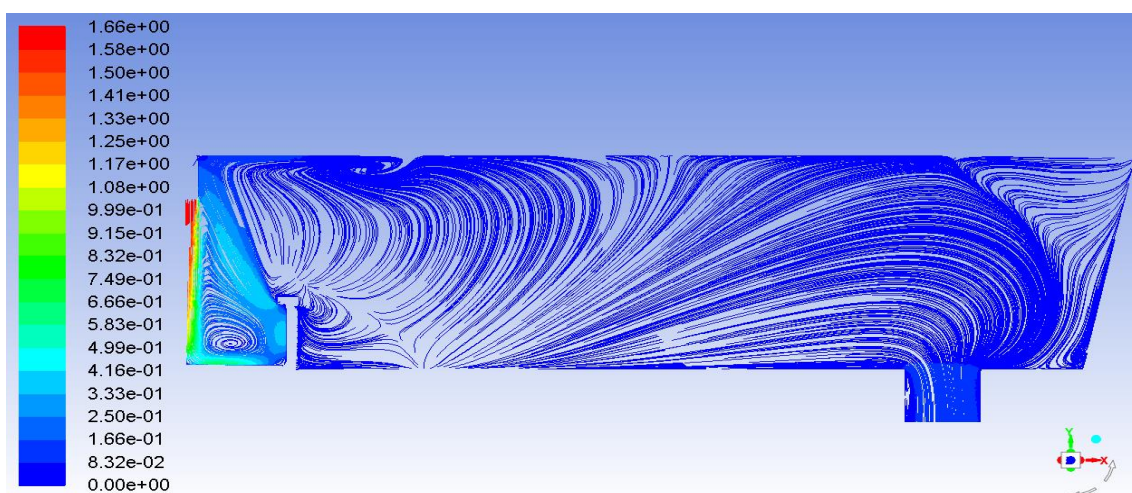
در پژوهش حاضر با تزریق پالسی ماده ردیاب به جریان درون تاندیش، نتایج مورد نظر از جمله الگوی جریان و نمودار توزیع زمان ماند بدست آمده است. درحالی که بیش تر پژوهش ها انتقال حرارت موجود در تاندیش را نادیده می گیرند در این مقاله تأثیر در نظر گیری انتقال حرارت روی توزیع زمان ماند تاندیش بررسی شده است و نتایج شبیه سازی ها از تأثیر گذاری انتقال حرارت به خصوص برای تاندیش ۶۰ تنی که به جز توربو استاپر ابزار کنترل جریان دیگری ندارد حکایت دارد، هر چند برای تاندیش ۴۰ تنی که به جز توربو استاپر دارای بند و بافل نیز هست تفاوت عمده ای ملاحظه نشده است.

### مراجع

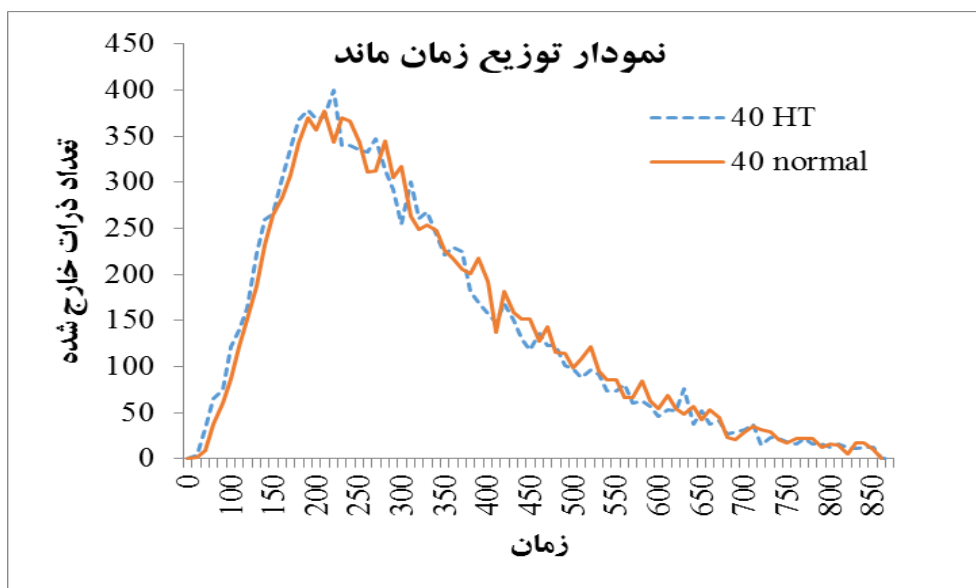
- [1] R. Pardeshi et al., "Mathematical modeling of the tundish of a single-strand slab caster," ISIJ Int., 2004, vol. 44, no. 9, pp. 1534–1540.
- [2] H. bo Sun and J. quan Zhang, "Effect of Actual Cooling Rate of Ladle Stream on Persistent Metallurgical Performance of a Given Tundish," J. Iron Steel Res. Int., 2014, vol. 21, no. 10, pp. 915–922.
- [3] R. D. Morales, S. López-Ramírez, J. Palafox-Ramos, and D. Zacharias, "Numerical and modeling analysis of fluid flow and heat transfer of liquid steel in a tundish with different flow control devices," ISIJ Int., 1999, vol. 39, no. 5, pp. 455–462.
- [4] L. cai Zhong, R. chao Hao, J. zhe Li, and Y. xiong Zhu, "Molten Steel Flow in a Slab Continuous-casting Tundish," J. Iron Steel Res. Int., 2014, vol. 21, no. SUPPL.1, pp. 10–16.



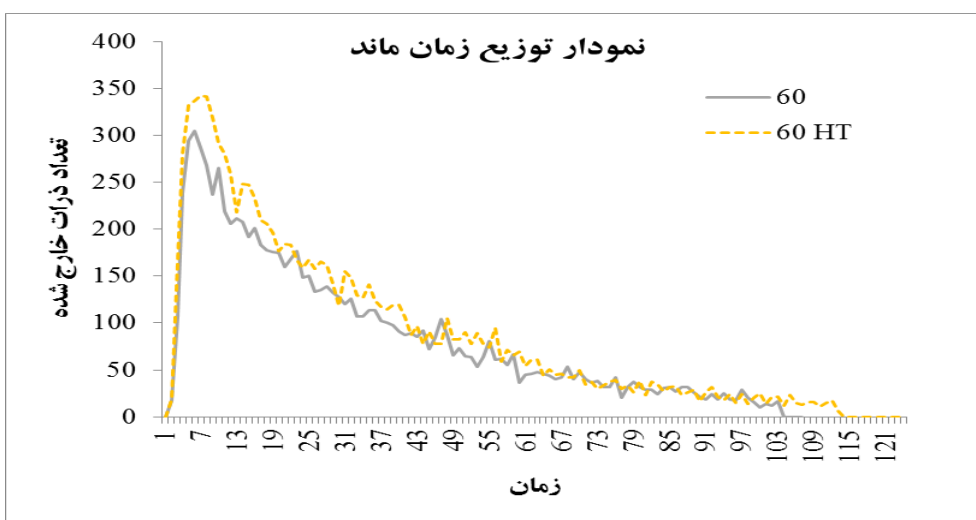
شكل ۱- الگوى جريان مغشوش عبورى از درون تاندیش ۴۰ تنى با دام و بافل.



شكل ۲- الگوى جريان مغشوش عبورى از درون تاندیش ۶۰ تنى.



شکل ۳- مقایسه‌ی توزیع زمان ماند تاندیش ۴۰ تنی در حالت‌های بدون در نظر گیری و با احتساب انتقال حرارت.



شکل ۴- مقایسه‌ی توزیع زمان ماند تاندیش ۶۰ تنی در حالت‌های بدون در نظر گیری و با احتساب انتقال حرارت.