



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

## بررسی تاثیر سرعت دوران در مدلسازی ریخته‌گری تسمه

نعمت اله اصلانی<sup>۱</sup>، احمد صابونچی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

ریخته‌گری تسمه<sup>۳</sup> به دلیل کاهش هزینه تولید (۴-۱۰ برابر کمتر)، کاهش مصرف انرژی و تولید ورق‌های باریک (۱-۳ میلی‌متر)، در سال‌های اخیر مورد توجه صنایع تولید ورق قرار گرفته است. در کار حاضر ریخته‌گری تسمه، به کمک نرم‌افزار FLUENT حل شده است. مدل پایا، دوبعدی و آرام انتخاب شده است. تاثیر سرعت دوران بر پروفیل‌های جریان، انجماد و دما بررسی شده است. مدلسازی نشان داده است که در این روش گرادیان دمای بالایی در نزدیکی غلتک رخ می‌دهد که در سرعت‌های دورانی بالاتر این گرادیان دما بیشتر می‌شود. بنابراین نیروی فشاری و تماسی بیشتری به غلتک‌ها وارد می‌شود و امکان آسیب‌رسانی به غلتک بیشتر می‌شود. همچنین، با افزایش سرعت دورانی عرض ناحیه جامد شده کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت زاویه‌ای طول ناحیه چرخشی موجود در فاز مایع افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** ریخته‌گری باریکه، انجماد، سرعت دوران، سرعت ورودی، FLUENT.

<sup>1</sup>- nemataslani@gmail.com

<sup>2</sup>- ahmadsab@cc.iut.ac.ir

<sup>3</sup>- Strip Casting

## مقدمه

در روش ریخته گری تسمه فولاد مذاب پس از عبور از نازل به روی غلتک هایی ریخته می شود. غلتک ها با سرعت دوران مشخصی در حال حرکت هستند و از داخل توسط مایع خنک می شوند. مایع در تماس با غلتک ها انرژی گرمایی خود را از دست می دهد و بتدریج به جامد تبدیل می شود. ورق جامد شده پس از خروج از غلتک ها یک مرحله نورد دیگر را طی می کند و در نهایت به صورت ورق باریک درمی آید. جامدسازی در ریخته گری تسمه نسبت به موارد دیگر ریخته گری، زمان کوتاه تری طول می کشد و محصولات باریک تر می باشند.

میازاوا [۱] روش ریاضی برای بررسی سرعت دوران ارائه کرد و نتیجه گرفت که فقط در یک محدوده معین از سرعت دوران، ورقها کیفیت مناسبی دارند. کارابین [۳ و ۲] مدل ریاضی - حرارتی برای پیش بینی برخی پارامترها ارائه کرد. چانگک [۴] یک مدل ریاضی برای بررسی تاثیر سرعت دوران بر روی جریان مذاب ارائه کرد و به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت دوران ناحیه چرخش داخل جریان مذاب بزرگتر می شود. در کار حاضر یک مدل هندسی برای ریخته گری باریک به کمک نرم افزار FLUENT حل شده است. تاثیر افزایش سرعت دوران بررسی شده است و مقدار نیروی وارد بر غلتک و مقدار جرم ورودی محاسبه شده است.

## روش تحقیق

روش آنتالپی - پروسیتی در FLUENT برای مدل سازی انجماد مورد استفاده قرار می گیرد. معادلات حاکم به قرار زیر هستند:

معادله بقای جرم

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

عبارت  $S_m$ ، جرم اضافه شده به فاز پیوسته از فاز دوم منتشر شده می باشد.

معادله بقای مومنتم

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \frac{(1-\beta^2)}{(\beta^2 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (2)$$

که  $P$  فشار استاتیک،  $\bar{\tau}$  تانسور تنش،  $\beta$  (کسر مایع)،  $A_{mush}$  ثابت منطقه ابریشم،  $\rho \bar{g}$  (نیروی جسمی گرانشی)،  $\varepsilon$  (یک عدد کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج)،  $\vec{v}_p$  (سرعت جامد) می باشند، که در آن  $\bar{\tau}$  و  $\beta$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\bar{\tau} = \left[ \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{v} I \quad (3)$$

$$\beta = 0 \quad \text{if } T < T_{\text{solidus}}$$

$$\beta = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \quad \text{if } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \quad (4)$$

$$\beta = 1 \quad \text{if } T > T_{\text{liquidus}}$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{(1-\beta^2)}{(\beta^2 + \epsilon)} A_{\text{mush}}(\bar{v} - \bar{v}_p) \quad (5)$$

معادله جامدسازی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho [\beta \bar{v}_{\text{liq}} Y_{i,\text{liq}} + (1-\beta) \bar{v}_p Y_{i,\text{sol}}]) = \nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \quad (6)$$

که در آن  $J_i$  (شارپخششی از گونه‌های  $J_i'$ )،  $Y_i$  (میانگین کسر جرم نوع  $i$  ام در سلول)،  $\bar{v}_{\text{liq}}$  (سرعت

مایع) و  $Y_{i,\text{liq}}$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{J}_i = -\rho [\beta D_{i,m,\text{liq}} \nabla Y_{i,\text{liq}} + (1-\beta) D_{i,m,\text{sol}} \nabla Y_{i,\text{sol}}] \quad (7)$$

$$Y_i = \beta Y_{i,\text{liq}} + (1-\beta) Y_{i,\text{sol}} \quad (8)$$

$$Y_{i,\text{sol}} = K_i Y_{i,\text{liq}} \quad (9)$$

$$\bar{v}_{\text{liq}} = \frac{(\bar{v} - \bar{v}_p (1 - \beta))}{\beta} \quad (10)$$

حل دما اصولاً یک تکرار بین معادله انرژی و معادله کسر مایع است. استفاده مستقیم از معادله

کسر مایع معمولاً دارای همگرایی ضعیف می‌باشد.

هندس مساله در شکل ۱، پارامترهای فیزیکی در جدول ۱ و خواص فیزیکی در جدول ۲ آمده است.

توابع  $G(u)$  و  $F(T)$  که در جدول ۱ و ۲ آمده‌اند، به صورت زیر می‌باشد:

$$G(u) = \frac{3}{2} \frac{Q}{h} \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$F(T) = \mu_s = \frac{1}{3} 718.92 \times e^{63716344 / T} \bar{\epsilon}^{-4.2857 \times 10^{-6} \times 0.0088775 \times T - 5.225} \quad (12)$$

## نتایج و بحث

نتایج شبیه سازی انجماد برای سرعت دوران  $\omega = 2.5$  rpm در شکل ۲ آمده است. در این شکل منحنی-

های کسر مایع به عنوان متغیر رسم شده است. کسر مایع صفر به معنای ورق جامد بیان می‌شود. این

نتایج با نتایج کار چانگک [۴] (خط پر رنگ) تطابق مناسبی دارد.

شکل ۲ نشان می‌دهد که روی غلتک لایه نازکی از جامد ایجاد شده است. این لایه نازک در تماس مستقیم با غلتک (برخلاف دیگر انواع ریخته‌گری) ایجاد تنش‌های فیزیکی کرده و پس از مدت زمانی کیفیت سطح غلتک از بین خواهد رفت. بنابراین نظارت بر کیفیت سطح غلتک‌ها ضروری به نظر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی جریان برای سرعت‌های دورانی مختلف در شکل ۳ آمده است. شکل‌های سمت راست مربوط به کار حاضر و شکل‌های سمت چپ مربوط به کار چانگ [۴] می‌باشد. یک ناحیه چرخشی کوچک در فاز مایع تشکیل شده است. این ناحیه چرخشی به دلیل جابه‌جایی اجباری بوجود آمده است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، با افزایش سرعت زاویه‌ای طول ناحیه چرخش افزایش یافت. شکل‌ها روند مشابهی دارند ولی تفاوت‌هایی نیز وجود دارد که دلیل عمده آن این است که در FLUENT ضریب هدایت گرمایی نمی‌تواند به صورت تابع تعریف شود. این درحالی است که در کار چانگ این ضریب به صورت تابع می‌باشد.

اگر نرخ جرم ورودی در سرعت دورانی‌های مختلف مقایسه شود (جدول ۳)، افزایش سرعت دوران به افزایش نرخ جرم ورودی و نیروی وارد شده بر غلتک منجر می‌شود.

با مقایسه اعداد می‌توان گفت که با افزایش سرعت دوران از ۲/۵ تا ۳/۲ rpm، نیروی وارد بر غلتک ۲۵٪ و نرخ جرم ورودی ۱۵٪ افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت دوران از ۲/۵ تا ۳/۸ rpm، نیروی وارد بر غلتک ۳۴٪ افزایش و نرخ جرم ورودی ۲۵٪ افزایش خواهند یافت.

در شکل ۴، نتایج کار حاضر در شبیه‌سازی دما با کار چانگ مقایسه شده است. در این شکل منحنی‌های دما رسم شده است. نتایج کار چانگ در سمت راست بر حسب درجه سانتیگراد و نتایج کار حاضر در سمت چپ، بر حسب درجه کلوین رسم شده است. گرادیان دمای بالایی در نزدیکی غلتک اتفاق افتاده است. این واقعیت نشان می‌دهد که در این روش غلتک‌ها تحت تاثیر گرادیان دمایی بالا و در نتیجه نیروهای بزرگ قرار دارند، که باعث فشار زیاد روی غلتک‌ها و امکان از دست رفتن کیفیت غلتک‌ها می‌شود. به همین دلیل نظارت دقیق بر کیفیت غلتک‌ها در حین فرآیند ضروری به نظر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی دما برای سرعت‌های دورانی مختلف در شکل ۵ آمده است. شکل‌های سمت راست مربوط به کار حاضر و شکل‌های سمت چپ مربوط به کار چانگ [۴] می‌باشد. محدوده دمایی بین غلتک و صفحه‌تقارن با کاهش سرعت زاویه‌ای کاهش می‌یابد. این رفتار سبب کاهش چرخش و کوچک شدن ناحیه چرخش می‌شود. از طرفی می‌توان گفت، با افزایش سرعت دوران گرادیان دما روی سطح غلتک افزایش می‌یابد. و در نتیجه نیروهای دمایی وارده بر غلتک با افزایش سرعت زاویه‌ای افزایش می‌یابد. یعنی در سرعت زاویه‌ای بالاتر امکان خرابی غلتک بیشتر می‌شود. آنچه از نتایج برمی‌آید آن است که پروفیل سرعت تاثیر مستقیم و فراوانی روی پروفیل دما دارد.

نتایج شبیه سازی انجماد برای سرعت‌های دورانی مختلف در شکل ۶ آمده است. با افزایش سرعت زاویه‌ای محل جامد شدن به سمت خروجی می‌آید. به دلیل این که، با کاهش سرعت زاویه‌ای، سرعت خروج لایه جامد شده روی سطح کاهش می‌یابد. و به دلیل این که ضریب هدایت گرمایی جامد نسبت به مایع، در این ماده بیشتر است و زمان انتقال حرارت افزایش می‌یابد، انتقال حرارت بیشتر شده و عرض ناحیه جامد شده بیشتر می‌شود.

### نتیجه گیری

افزایش سرعت دوران گرادیان دما روی سطح غلتک افزایش می‌یابد. و در نتیجه نیروهای دمایی وارد بر غلتک با افزایش سرعت زاویه‌ای افزایش می‌یابند. با افزایش سرعت زاویه‌ای محل جامد شدن به سمت خروجی می‌آید و ضخامت ناحیه جامد شده کاهش می‌یابد.

افزایش سرعت دوران، طول ناحیه چرخش در داخل مذاب را افزایش می‌دهد. و نیروی وارد بر غلتک افزایش پیدا می‌کند، به طوری که با افزایش سرعت دوران از ۲/۵ تا ۳/۲ rpm، و از ۲/۵ تا ۳/۸ rpm، نیروی وارد بر غلتک به ترتیب ۲۵٪ و ۳۴٪ افزایش می‌یابند و همین طور نرخ جرم ورودی به ترتیب ۱۵ و ۲۵٪ افزایش می‌یابند. بنابراین در سرعت‌های دورانی بالا نظارت دقیق‌تر بر کیفیت غلتک‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

در کل با افزایش سرعت دوران نیروی وارد بر غلتک‌ها افزایش یافته و ضخامت ناحیه جامد شده کاهش می‌یابد، ولی از طرف دیگر سرعت تولید ورق افزایش می‌یابد. معرفی سرعت دوران بهینه برای این فرآیند نیاز به مطالعات بیشتر و از جمله کارهای عملی می‌باشد.

### مراجع

- [1] K. Miyazawa and J. Szekely, "A mathematical model of splat cooling process using the twin-roll technique", Metallurgy Transactions, 1981, 12, pp. 1047-1057.
- [2] M.E. Karabin, and R. E. Smelser, "A simplified thermomechanical model of roll casting", ASME Winter Annual Meeting, Miami Beach, Florida, 1985, pp. 17-21.
- [3] R. J. O'Malley, M. E. Karabin, and R. E. Smelser, "The roll casting process: numerical and experimental results", Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1994, 3, pp. 59-72.
- [4] JEE-GONG CHANG and CHENG-I WENGt. "Analysis of flow and heat transfer in twin-roll strip casting process., J. Heat Mas Transfer. Vol. 41, No. 2, 1998, pp. 475-487.,

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی فرایند ریخته‌گری تسمه [۴].

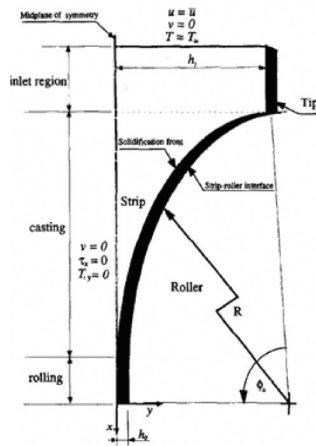
پارامتر	مشخصه	مقدار	واحد
قطر غلتک	R	۴۴/۵	cm
زاویه تماس	$\phi$	۴۱	deg
نصف ضخامت ورق	h	۰/۰۱۶	cm
طول ناحیه ورودی	Inlet region	۱۰	cm
سرعت ورودی	$u_{in}$	G(u)	m.s <sup>-1</sup>
دمای ورودی	$T_{in}$	۱۷۰۰	k
سرعت غلتک	$\omega$	۰/۳۶	rad.s <sup>-1</sup>

جدول ۲. خواص فیزیکی مذاب فولاد [۴].

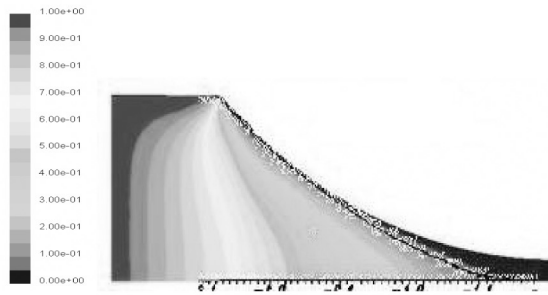
خواص	مشخصه	مقدار	واحد
هدایت گرمایی جامد	$k_s$	۳۱/۹	W m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
هدایت گرمایی مایع	$k_l$	۲۰	W m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
گرمای ویژه	$c_p$	۶۷۰	kJ kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
چگالی	$\rho$	۷۴۰۰	kg m <sup>-3</sup>
گرمای نهان ذوب	L	۲۷۲۲۰۰	J kg <sup>-1</sup>
ویسکوزیته مایع	$\mu_l$	۰/۵۶	N.s.m <sup>-2</sup>
ویسکوزیته جامد	$\mu_s$	F(T)	N.s.m <sup>-2</sup>

جدول ۳. تغییرات نرخ جرم ورودی و نیروی وارد بر غلتک.

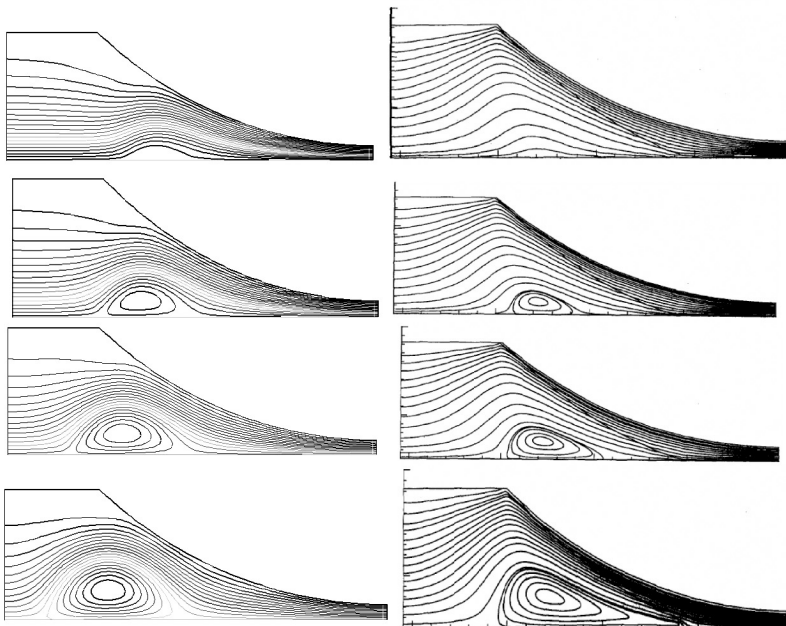
نرخ جرم ورودی kg.s <sup>-1</sup>	نیرو وارد بر غلتک N	سرعت دوران- rpm
۳۲۴۵/۳۱۱	۹۸۱/۳۵۱	۲/۵
۳۳۸۱/۱۲۸۴	۱۰۶۹/۲۵۳۶	۲/۷
۳۵۱۶/۹۴۸۶	۱۱۰۴/۴۷۶۵	۲/۹
۳۷۲۰/۶۷۳۶	۱۲۲۰/۶۸	۳/۲
۳۹۲۴/۴۰۰۱	۱۲۶۲/۵۳۸۱	۳/۴
۴۰۶۰/۲۱۸	۱۳۱۱/۲۱۷۲	۳/۶



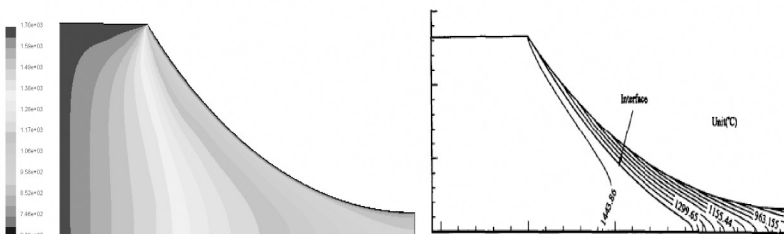
شکل ۱. هندسه فرایند ریخته‌گری تسمه [۴].



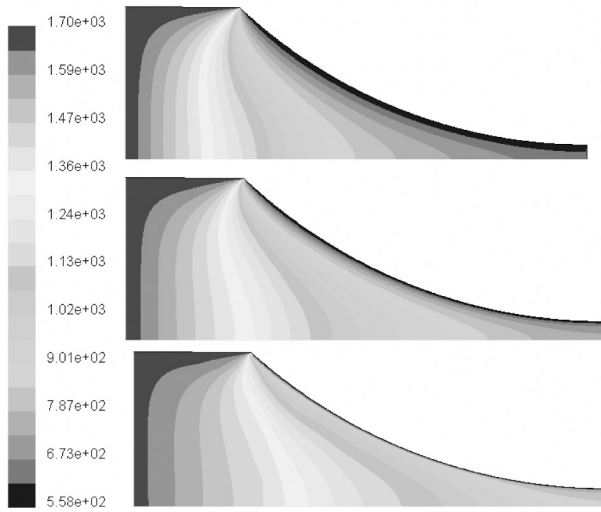
شکل ۲. مقایسه شبیه‌سازی انجام‌د با با نتایج کار چانگ [۴].



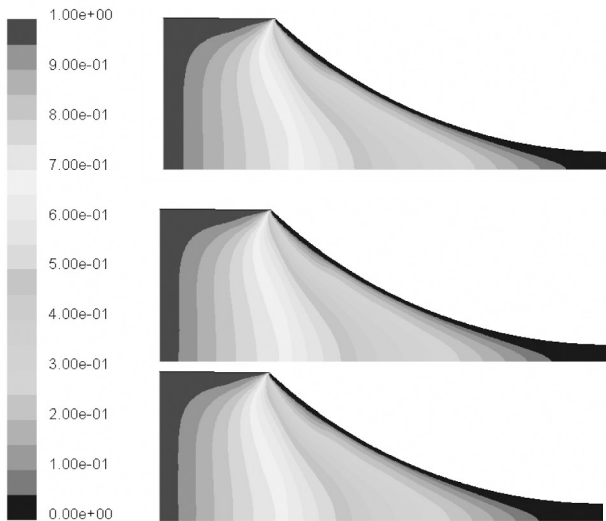
شکل ۳. مقایسه شبیه سازی پروفیل سرعت برای  $\omega=2.5, 2.7, 2.9$  و  $3.4$  rpm با کار چانگ [۴].



شکل ۴. مقایسه شبیه سازی دما با نتایج کار چانگ [۴].



شکل ۵. پروفیل شبیه سازی دما برای  $\omega = 2.5$  و  $2.9$  و  $3.4$  rpm



شکل ۶. پروفیل شبیه سازی انجماد برای  $\omega = 2.5$  و  $2.9$  و  $3.4$  rpm