

شبیه سازی عددی جریان مذاب در ریخته گری پیوسته فولاد و ردیابی آخال در آن

آرش حاجی پور^۱، محمود مرآتیان^{۲*}، محمد خدائی^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، مرکز تحقیقاتی مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* meratian@cc.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۲۱، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲)

چکیده

ریخته گری پیوسته فولاد، بخش عظیمی از تولید قطعات فولادی به روش ریخته گری را تشکیل می دهد. کیفیت محصول نهایی در این نوع محصول اهمیت شایانی دارد زیرا عمده تاً فرایندهای شکل دهی بعدی نیز بر آن انجام خواهد شد. بررسی دقیق منابع آخال و ردیابی آنها و بررسی پارامترهای سیلان مذاب فولاد در قالب، اهمیت ویژه ای در به حداقل رسانیدن این عیب دارند. یکی از تکنیک های مورد استفاده جهت بررسی دقیق رفتار حرکتی آخال ها در مذاب، شبیه سازی عددی است. در این روش معادلات نویراستوک، گسسته سازی شده و سپس به روش جبری حل می شوند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلونت، حرکت ذرات آخال در جریان مذاب فولاد در قالب ریخته گری پیوسته مدل شده است. همچنین برای صحت گذاری بر حل معادلات، پاسخ جریان سیال با مدل فیزیکی آبی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش سرعت ریخته گری و یا افزایش اندازه ذرات آخال، احتمال به دام افتادن آنها توسط سرباره سطح آزاد مذاب در قالب، افزایش یافته و تولید با کیفیت تری حاصل خواهد شد.

واژه های کلیدی:

ریخته گری پیوسته، ردیابی آخال، شبیه سازی عددی، شبیه سازی فیزیکی.

۱- مقدمه

همچنین بهبود و یا رفع عیب از سیستم های موجود به کار گرفته می شود که اصولاً روشهای عددی از جامعیت بیشتری برخوردار است.

در فرآیند ریخته گری مداوم، فولاد مذاب در یک قالب آب گرد از جنس مس با تشکیل یک پوسته جامد آغاز می شود. این پوسته بصورت مداوم رشد و با سرعتی برابر با سرعت

به دلیل پیچیدگی های فرآیند تولید شمش به روش ریخته گری پیوسته، دمای بالا و عدم امکان انجام برخی تحقیقات در خط تولید و نیز بنابر برخی دلایل اقتصادی، پژوهش های آزمایشگاهی در زمینه ریخته گری مداوم را غیر ممکن ساخته است. از این رو بیشترین توجه محققین این صنعت به استفاده از روشهای مختلف شبیه سازی ریاضی و مدل سازی فیزیکی فرآیند معطوف شده است. معمولاً این روش ها در طراحی سیستمهای جدید و

روش‌های اویلر و لاگرانژ مورد مطالعه قرار گیرد که انتخاب روش با توجه به معیارهای متفاوتی می‌باشد [۴]. در روش اول معادلات انتقال توده ذرات پیوسته در یک ناحیه اویلری حل می‌شود و در روش دوم حرکت منفرد هر یک از ذرات دنبال می‌گردد. هر دو روش بطور وسیعی در مسائل ساده دارای جریان با ذرات زیاد مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. شبیه‌سازی جریان سیال در یک قالب استوانه‌ای شکل ریخته‌گری مداوم با یک نازل مستقیم اولین بار توسط Szekely و همکارانش در سال ۱۹۷۰ انجام گرفت [۶] که در آن جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده بود. سپس در سال ۱۹۷۵ این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن یک مدل توربولانس کامل‌تر شد [۷]. Yao و همکارانش اولین شبیه‌سازی سه بعدی جریان سیال در قالب ریخته‌گری مداوم را در سال ۱۹۸۵ انجام دادند که بعد از آن کارهای مشابه زیادی توسط افراد دیگر انجام گرفت [۸]. در سال ۱۹۹۰ Thomas و همکارانش تأثیر شرایط ورودی نازل را روی الگوی سیلان قالب بررسی کردند [۹].

Xu و همکاران اثر هندسی نازل را بر سرعت آخال‌ها در ریخته‌گری پیوسته فولاد و نیمه پیوسته آلومینیوم مدل‌سازی عددی نموده و نتایج را با مدل آبی صحنه‌گذاری کردند، طبق نتایج ایشان هندسه نازل تأثیر مهمی بر رفتار مذاب و سرعت آخال در قالب دارد [۱۰]. Liu و همکاران ریخته‌گری پیوسته فولاد پرکربن را در میدان مغناطیسی مدل‌سازی عددی کردند، ایشان چگالی جریان و فرکانس بهینه برای جلوگیری از جدایش در مرکز شمش را حین ریخته‌گری تعیین نمودند [۱۱].

هدف از تحقیق حاضر بررسی الگوی سیلان مذاب در قالب ریخته‌گری تختال نازک با استفاده از نرم افزار فلونت (Fluent 6.3.26) جهت درک بهتر حرکت و تمرکز آخال در آن با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی و بدست آوردن پارامترهای مؤثر بر بهبود الگوی سیلان مذاب جهت توزیع مناسب‌تر آخال در قالب می‌باشد. با بدست آوردن معادلات حاکم بر سیلان و اعمال شرایط اولیه و مرزی ابتدا نتایج بدست آمده با یک سیستم فیزیکی مدل آبی [۱۲] اعتبار بخشی یا صحنه‌گذاری شده و سپس

ریخته‌گری به سمت پایین کشیده می‌شود. در منطقه حوضچه مذاب قالب، فولاد مذاب در حالت چرخش است. اگر چرخش به سمت بالا^۲ بگونه‌ای باشد که آخال را به سطح هدایت کند ممکن است توسط لایه پودر قالب به دام بیفتد، در غیر اینصورت توسط جبهه انجماد به دام افتاده و باعث ایجاد عیوب در محصول نهایی خواهد شد. کاهش عیوب از طریق کاهش آخال ورودی به قالب موجب بهبود خواصی از قبیل حداقل استحکام، عمر خستگی، کیفیت سطحی و افزایش بازدهی و راندمان انرژی بدلیل کاهش دورریز می‌گردد.

سیلان مذاب در حوضچه مذاب متلاطم است و یک الگوی پیچیده وابسته به زمان دارد [۱]. این سیلان مغشوش نقش مهمی در انتقال آخال دارد. اگر مذاب یک نوسان سطحی شدید داشته باشد و یا دمای مذاب غیرمناسب در سطح بالایی وجود داشته باشد، بیشتر آخال قبل از اینکه بتوانند به لایه سرباره مذاب وارد شوند توسط منیسک^۱ در حال انجماد به دام می‌افتند.

مطالعات نشان می‌دهد ذراتی که در نزدیکی منیسک (کوژی یا کاوی سطح سیال در تماس جداره جامد) به دام افتاده و وارد شمش محصول می‌شود، ممکن است منجر به ورقه شدن سطح و ترک‌های سطحی شوند [۱]. ذراتی که توسط سیلان مذاب وارد منطقه چرخش رو به پایین می‌شوند می‌توانند به چرخش خود ادامه داده و توسط جبهه انجماد به دام بیفتند و منجر به عیوب گوناگونی از جمله ترک‌های داخلی، زخمک‌ها و پوسته شدن در محصول نورد نهایی شوند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده کیفیت محصول وابستگی قابل توجهی به جریان سیال وابسته به زمان و حوضچه مذاب دارد [۲].

یکی از روش‌های کاهش عیوب ناشی از آخال، بهبود الگوی سیلان مذاب می‌باشد، که یکی از راه‌های آن طراحی مناسب نازل غوطه‌ور انتقال مذاب از تاندیش به قالب ریخته‌گری می‌باشد [۳]. با توجه به دمای بالا در ریخته‌گری مداوم، مدل‌سازی ریاضی یکی از عملی‌ترین ابزارها برای مطالعه، بررسی و بهبود جریان سیال و حرکت ذرات در این فرآیند پیچیده است. مدل‌سازی ریاضی حرکت ذرات می‌تواند توسط

جدول (۱): ضرایب مدل‌های متلاطم

ضریب	مدل رینولدز بالا
C_1	۱/۴۴
C_2	۱/۹۲
C_μ	۰/۰۹
σ_ε	۱/۳
σ_k	۱/۰

۲-۲-۲- روش حل معادلات

در تحقیق حاضر برای حل معادلات حاکم از روش تفکیکی استفاده شده است. کلیه معادلات انتگرال گیری شده به صورت ضمنی، خطی شدند. برای میان‌یابی فشار از روش بالادست مرتبه دوم^۲ استفاده شد. برای در نظر گرفتن اغتشاش از مدل $K-\varepsilon$ استفاده شد. ضریب تخفیف برای فشار ۰/۳ و مومنتوم ۰/۷ منظور گردید. روش جفت کردن فشار-سرعت^۳ با استفاده از الگوریتم سیمپل^۴ انجام گرفت و معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتوم برابر 10^{-6} در نظر گرفته شد. از نرم افزار فلونت (Fluent) برای حل معادلات حاکم استفاده شده که معادلات را در ناحیه حل، بصورت موازی حل می‌شوند. برای این شبیه‌سازی از کامپیوتر با پردازنده Core i7 استفاده شد.

۲-۳- شرایط مرزی حاکم

در فرآیند ریخته‌گری مداوم مذاب از پاتیل به تاندیش سیلان یافته و سپس از طریق نازل وارد قالب می‌شود، لذا ناحیه حل متشکل از نازل و قالب در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ نمایی از ناحیه حل نشان داده شده است. به دلیل اینکه معادلات حاکم بیضوی هستند، باید شرایط مرزی روی مرزهای موجود برای تمام متغیرها معین باشد. بنابراین چهار گروه شرایط مرزی به شرح زیر در نظر گرفته شد:

تعداد ۱۵۰۰۰ آخال به سیستم اضافه و توزیع آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تأثیر پارامترهایی چون سرعت ریخته‌گری و اندازه آخال بر روی رفتار سیلانی آخال در مذاب مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، قالب ریخته‌گری مداوم تختال نازک دوبعدی که جریان مذاب در آن مغشوش می‌باشد، شبیه‌سازی شده است. آخال جامد به قالب وارد شده و تحت اثر سیلان مغشوش مذاب به حرکت در می‌آیند. معادلات و شرایط مذکور مربوط به سیستم ریخته‌گری تختال نازک مجتمع فولاد سبا در شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان می‌باشد.

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف اغتشاش در مدل برای جریان دوبعدی دائم، بصورت زیر می‌باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad \text{معادله (۱): معادله پیوستگی}$$

معادله (۲): معادله مومنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i}$$

جائیکه در رابطه فوق، مجموع ویسکوزیته دینامیکی و ویسکوزیته متلاطم می‌باشد.

معادله (۳): معادله انرژی جنبشی اغتشاش

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon$$

معادله (۴): معادله نرخ اتلاف اغتشاش

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon)$$

که در رابطه فوق، G و بصورت زیر تعریف می‌شوند (جدول ۱).

۲-۳-۳- دیوارهای کناری

با توجه به سیستم واقعی قالب شیب این دیوارها ۱ درجه است که ناشی از انجماد پوسته در حال انجماد است. این دیوارها با سرعت ثابتی رو به پایین حرکت می‌کنند.

مدل استاندارد $K-\epsilon$ برای نواحی نزدیک دیوار دقت مناسبی ندارد، در نواحی که عدد رینولدز کوچک باشد این مدل کارایی کمتری داشته و لذا باید از تابع دیوار^۶ و یا از مدلی که برای سیلان با رینولدزهای^۷ کم قابل اعمال باشد استفاده گردد. در اینجا از تابع دیوار که توسط لاندرو و اسپالدینگ^۸ تعریف شده استفاده می‌گردد [۱۴].

در این مدل y^+ فاصله بدون بعد می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{yu_{\tau}}{\nu} \quad \text{معادله (۵)}$$

u_{τ} سرعت اصطکاکی دیوار می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_{\tau} = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad \text{معادله (۶)}$$

مطابق این مدل:

اگر $y^+ \leq 11.225$ سرعت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U^* = y^* \quad \text{معادله (۷)}$$

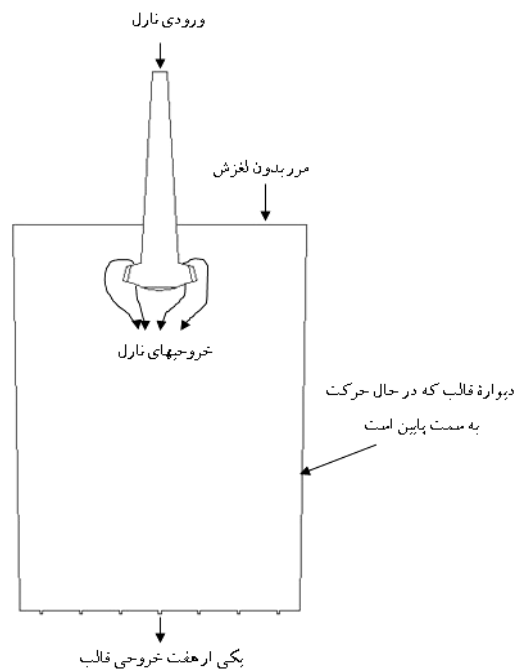
و اگر $y^+ > 11.225$ باشد:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln[Ey^*] \quad \text{معادله (۸)}$$

$$y^* = \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad \text{معادله (۹)}$$

در جایی که:

κ ثابت فون کارمن بوده و برابر ۰/۴۲ در نظر گرفته می‌شود، E پارامتری تجربی و برابر با ۹/۸۱ است، k_p انرژی جنبشی اغتشاش در نقطه P ، y_p فاصله نقطه P از دیواره و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است [۱۳].



شکل (۱): نمای دوبعدی قالب ریخته‌گری مداوم تختال نازک مورد بررسی

۲-۳-۱- مرز ورودی

سرعت ورودی برای تمام نقاط موجود در مرز ورودی بصورت یکنواخت در نظر گرفته شد. برای k و ϵ نیز شرایط مرزی ورودی را بصورت زیر تعریف شده است:

$$k = 0.05 U^2, \quad L = 0.07 L_D, \quad \epsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{L}$$

که در رابطه فوق U سرعت متوسط ورودی، L_D طول مشخصه ورودی است که برابر با قطر دهانه ورودی نازل یعنی 0.08 m می‌باشد. C_D یک ثابت است که برابر با 0.04 در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

۲-۳-۲- مرز خروجی

این مرز متشکل از ۷ قسمت جداگانه است و خروجی در اثر فشار^۵ در نظر گرفته شد. آخال‌های برخورد کننده با این مرز از قالب خارج می‌شوند.

۲-۳-۴- دیواره بالایی

مداوم موجود در مجتمع فولاد سبای شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان (ارتفاع، عرض و ضخامت قالب به ترتیب: ۱۲۵۰ و ۱۸۰۰ و ۶۰ میلیمتر و سرعت ریخته گری و دبی آب به ترتیب ۳/۵ تا ۴/۵ متر بر دقیقه و ۰/۳-۰/۵ مترمکعب بر دقیقه) [۱۲] مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین مساله با اعمال آخال با اندازه های ۴۰ و ۱۰ میکرون مورد مطالعه قرار گرفت. از مقایسه نمونه های تاندیش و نمونه های قالب میزان آخال به دام افتاده توسط پودر قالب نیز بدست آمد و با نتیجه بدست آمده از مدل سازی ریاضی با تزریق ۱۵۰۰۰ آخال آلومینا مقایسه شده است.

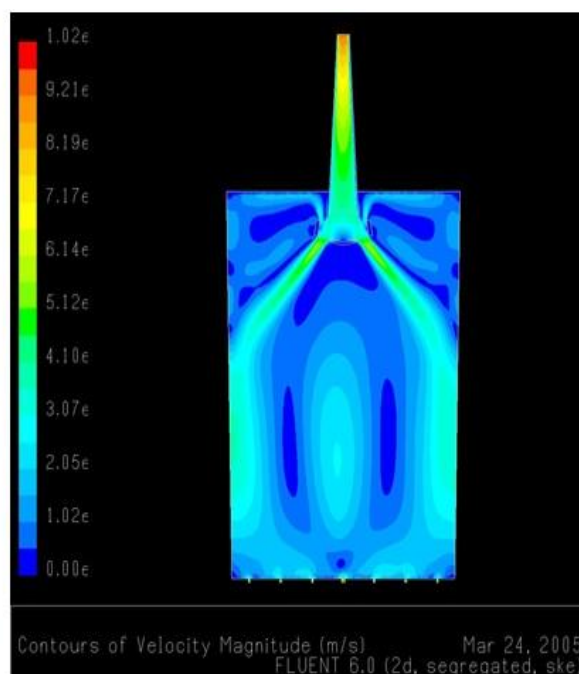
۳- نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی مدل نتایج مدل آبی و مدل ریاضی را در عمق غوطه وری نازل ۳۰ سانتی متر مقایسه شده است. در شکل (۲)، سمت راست نتایج حاصل از شبیه سازی ریاضی و تصاویر سمت چپ مربوط به مدل آبی می باشند.

در عمل این دیواره یک سطح آزاد است که برای ممانعت از ورود هوا به مذاب از طریق این سطح بر روی آن پودر قالب می ریزند. برای اینکه دیواره در نظر گرفته شده هیچ تأثیری بر الگوی سیلان نداشته باشد، این دیواره بدون لغزش^۹ در نظر گرفته شده است. لذا مؤلفه های مماسی و عمودی سرعت صفر قرار داده می شود. در این پژوهش برای شبکه بندی میدان حل از نرم افزار گمبیت (Gambit 2.4.6) استفاده شد. با استفاده از این نرم افزار هندسه مسئله طراحی و شبکه بندی شد. بدلیل پیچیدگی شکل نازل برای شبکه بندی از مشهای مثلثی استفاده شد. شبکه بندی به صورتی انجام گرفت که قسمتهای حساس تر مثل خروجی نازل مش های ریزتری داشته باشند. الگوی سیلان با استفاده از مش هایی با ۷ سائز مختلف محاسبه شد تا اندازه مش بحرانی (اندازه ای که شبکه به آن حساس نباشد) بدست آید.

۲-۴- مدل فیزیکی

برای اعتبار بخشی مدل سازی از مقایسه مدل سازی ریاضی با نتایج بدست آمده از مدل آبی (فیزیکی) سیستم ریخته گری



شکل (۲): مقایسه و صحت گذاری نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی با مدل فیزیکی (گردش آب در قالب)

$$\rho_L = 7020 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_L = 6/69 * 10^{-3} \frac{kg}{m.s}$$

نتایج بررسی‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲): نحوه توزیع آخال آلومینا با قطر ۱۰ و ۴۰ میکرومتر

اندازه آخال (میکرومتر)	۱۰	۴۰
درصد آخال به دام افتاده توسط پودر قالب	۳۱/۶	۳۱/۹
درصد آخال به دام افتاده توسط دیواره‌های جانبی	۳۴/۷	۳۳/۸
درصد آخال باقی‌مانده در مذاب	۳۳/۷	۳۴/۳

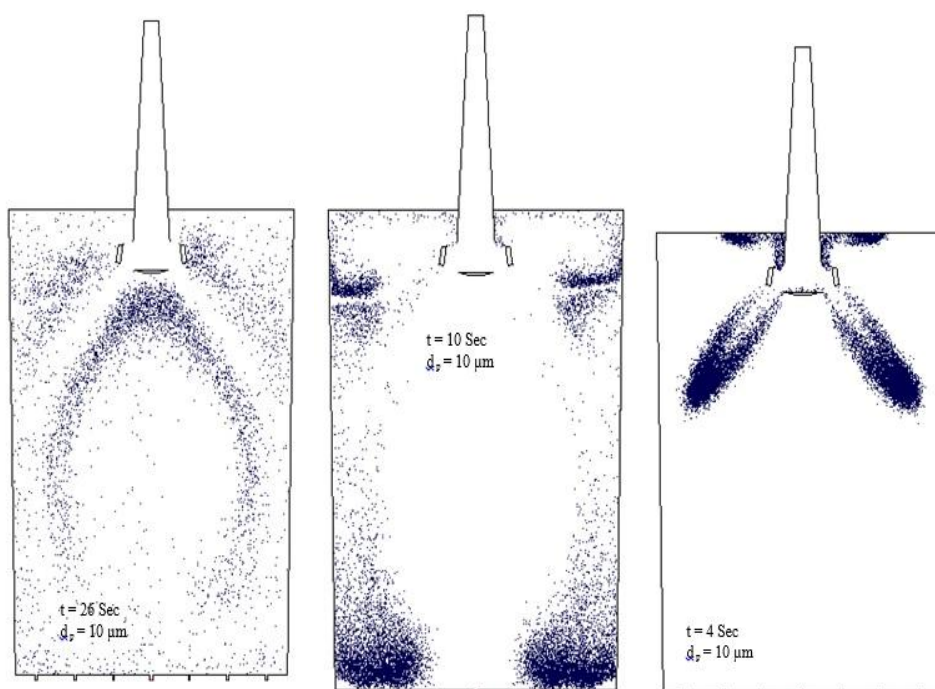
در شکل ۳ نتایج توزیع آخال در قالب ریخته‌گری مداوم تختال نازک در سرعت ریخته‌گری $4/5 \text{ m/min}$ و عمق غوطه‌وری ۳۰ سانتی‌متر نشان داده شده است. در تصاویر شکل ۳، آخال 15000 میکرومتر آلومینایی از طریق ورودی نازل به قالب تزریق شده است. هر شکل توزیع آخال را در زمان ذکر شده بر روی آن نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو مدل رفتار سیلانی مشابهی وجود دارد. وجود دو جریان قوی‌تر سیلان مذاب به سمت پایین قالب از سوراخ‌های زیرین نازل غوطه‌ور و دو جریان ضعیف‌تر به سمت بالا از سوراخ‌های بالایی نازل در دو مدل بطور مشابه وجود دارد. نکات قابل ملاحظه یکسان بودن سیلان مذاب در جریانهای بالایی در هر دو مدل است که به دلیل گرم نگه داشتن مذاب در سطح قالب و جلوگیری از پل زدن و انجماد کلی مذاب در این سطح می‌باشد که این موضوع را می‌توان از مزایای این نازل در نظر گرفت. نتایج تأثیر پارامترهای سرعت ریخته‌گری و اندازه آخال بر روی رفتار سیلانی آخال در مذاب به شرح زیر ارائه می‌شود.

۳-۱- اثر اندازه آخال بر روی توزیع آخال در قالب

برای بررسی تأثیر اندازه آخال بر روی حرکت آخال، 15000 میکرومتر آلومینایی با چگالی $2700 \frac{kg}{m^3}$ و قطرهای $10 \mu m$ و $40 \mu m$ به صورت جداگانه به مذاب تزریق شدند. پارامترهای در نظر گرفته شده در این بررسی بصورت زیر می‌باشند [۱۳].

$$V_L = 4/5 \text{ m/min}$$



شکل (۳): توزیع آخال در قالب در زمان‌های ۴ و ۱۰ و ۲۶ ثانیه پس از شروع ریخته‌گری برای آخال با اندازه ۱۰ میکرومتر

جدول (۳): نحوه توزیع آخال آلومینا با قطر $10\mu m$ در سرعت های ریخته گری مختلف

سرعت ریخته گری (m/min)	۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۲
درصد آخال به دام افتاده توسط پودر قالب	۱۶/۶	۱۷/۸	۱۸/۶	۱۸/۸
درصد آخال به دام افتاده توسط دیواره های جانبی قالب	۳۱/۹	۳۱/۴	۲۹/۹	۲۹/۶
درصد آخال باقی مانده در مذاب	۵۱/۵	۵۰/۸	۵۱/۵	۵۱/۶

جدول (۴): نحوه توزیع آخال آلومینا با قطر $40\mu m$ در سرعت های ریخته گری مختلف

سرعت ریخته گری (m/min)	۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۲
درصد آخال به دام افتاده توسط پودر قالب	۱۷/۹	۱۹/۱	۱۹/۷	۲۰
درصد آخال به دام افتاده توسط دیواره جانبی قالب	۳۰/۹	۳۰/۴	۲۹/۹	۲۸/۸
درصد آخال باقی مانده در مذاب	۵۱/۲	۵۰/۵	۵۰/۴	۵۱/۲

شکل (۴) درصد اندازه های مختلف آخال به دام افتاده توسط پودر قالب را در سرعت های ریخته گری مختلف نشان می دهد.

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود آخال های درشت تر، بیشتر توسط پودر قالب به دام می افتند.

در مورد آخال با قطر $10\mu m$ حدود ۶۸/۴ درصد از آخال در محصول نهایی باقی مانده و در مورد آخال با قطر $40\mu m$ حدود ۶۸/۱ از آخال در محصول نهایی باقی می ماند لذا در شرایط مناسب که عمق غوطه وری حداقل باشد باز هم کسر بالایی از آخال وارد شده به قالب در محصول نهایی باقی خواهد ماند. لذا مناسب ترین راه کاهش آخال جلوگیری از ورود آن به قالب و تا حد امکان استفاده از مذاب تمیز می باشد.

در این طرح نازل درصد آخال بیشتری را در مقایسه با نازل هایی که ابتدا جریان به پوسته برخورد می کند، از ذوب خارج می شود. وقتی از این نازل استفاده می شود به دلیل وجود دو خروجی در قسمت بالایی نازل، جریان رو به بالا ابتدا با پودر قالب تماس می نماید و سپس با دیواره تماس می نماید.

۳-۲- اثر سرعت ریخته گری روی توزیع آخال

برای بررسی سرعت ریخته گری بر رفتار حرکتی آخال، ۴ سرعت ریخته گری ۳/۵، ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۲ متر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی ۱۵۰۰۰ آخال آلومینا با چگالی $2700 \frac{kg}{m^3}$ و قطر $10\mu m$ و $40\mu m$ به صورت جداگانه به مذاب تزریق شد. پارامترهای در نظر گرفته شده در این بررسی بصورت زیر هستند.

$$Cm = 30 = \text{عمق غوطه وری نازل}$$

$$\rho_L = 7020 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_L = 6/69 * 10^{-3} \frac{kg}{m.s}$$

نتایج بررسی ها در جدول های (۳) و (۴) آمده است.

۱- شبیه‌سازی جریان مذاب فولاد در ریخته‌گری پیوسته با استفاده از مدل $K-\epsilon$ مناسب تشخیص داده شد، که صحت گذاری با استفاده از مدل آبی تاییدی بر این قضیه است.

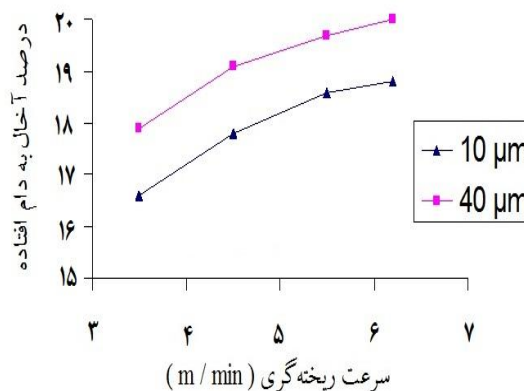
۲- میزان به دام افتادن آخال‌های بزرگتر توسط پودر قالب بیشتر از آخال کوچکتر است زیرا میزان شناوری ذرات بزرگتر، افزایش یافته است.

۳- با افزایش سرعت ریخته‌گری، میزان آخال به دام افتاده توسط پودر قالب (میزان حرکت ذرات آخال به سمت سطح آزاد مذاب) افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش سرعت ریخته‌گری میزان آخال به دام افتاده در پوسته در حال انجماد (حرکت ذرات آخال به سمت جداره قالب) کاهش می‌یابد و لذا احتمال ایجاد عیوب سطحی ناشی از آخال داخلی کاهش خواهد یافت. لیکن بدلیل افزایش سرعت ریخته‌گری، اغتشاش در سطح قالب افزایش یافته و می‌تواند منجر به وارد شدن پودر قالب به حوضچه مذاب شود.

۵- مراجع

- [1] Q. Yuan, B. G. Thomas & S. P. Vanka, "Study of Transient Flow and Particle Transport during Continuous Casting of Steel Slabs, Part 1. Fluid Flow", Metal. & Material Trans, Vol. 35B, No. 4, pp. 685-702, 2004.
- [2] Q. Yuan, B. G. Thomas & S. P. Vanka, "Study of Transient Flow and Particle Transport during Continuous Casting of Steel Slabs, Part 2. Particle Transport", Metal. & Material Trans, Vol. 35B, No. 4, pp. 703-714, 2004.
- [3] B. G. Thomas, "Chapter 14: Fluid Flow in the Mold", in The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, Casting Volume, A.W. Cramb, ed, The AISE Steel Foundation, pp. 24. 2003.
- [4] K. D. Squire & J. K. Eaton: "Particle Response and Turbulence Modification in Isotropic Turbulence", Physics of Fluids, Vol. 2, No. 7, pp. 1191-203, 1990.
- [5] Q. Wang & K. D. Squire: "Large Eddy Simulation of Particle Deposition in a Vertical Turbulent



شکل (۴): مقایسه درصد آخال به دام افتاده توسط پودر قالب برای دو قطر مختلف آخال آلومینایی

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش سرعت ریخته‌گری، میزان آخال به دام افتاده توسط پودر قالب افزایش می‌یابد که بدلیل افزایش اغتشاش قالب و همچنین نوع نازل و الگوی سیلان مذاب در قالب می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت ریخته‌گری میزان آخال به دام افتاده در پوسته در حال انجماد کم شده و لذا احتمال ایجاد عیوب سطحی ناشی از آخال داخلی کاهش خواهد یافت لیکن بدلیل افزایش سرعت ریخته‌گری، اغتشاش در سطح قالب افزایش یافته و می‌تواند منجر به وارد شدن پودر روانساز قالب به حوضچه مذاب شود. پودر وارد شده به عنوان آخال عمل کرده و منجر به عیوب در محصول نهایی می‌شود.

همچنین سرعت ریخته‌گری در مقایسه با عمق غوطه‌وری نازل تأثیر چندانی بر میزان آخال به دام افتاده توسط پودر قالب ندارد. لذا برای به حداکثر رساندن میزان به دام انداختن آخال توسط پودر قالب بهتر است عمق غوطه‌وری را تغییر داده و اغتشاش سطح قالب نیز در نظر گرفته شود به نحوی که پودر قالب به حوضچه مذاب وارد نشود.

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جریان مذاب در ریخته‌گری پیوسته فولاد توسط نرم افزار فلونت انجام شده و با بررسی اثر اندازه ذرات آخال، نتایج زیر حاصل شده است:

Experimental Study of F-EMS for Continuously Cast Billet of High Carbon Steel”, Journal of Iron and Steel Research, Vol. 21, pp. 51–55, 2014.

[۱۲] ش. مؤتمن، " مدل سازی آبی الگوی سیلان فولاد مذاب در نازل و قالب ریخته گری مداوم تختال نازک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، ۱۳۸۲.

[۱۳] م. معیری، " مکانیک سیالات " انتشارات دانشگاه شیراز"، ۱۳۷۰.

[14] Fluent 6. 3. 26, fluid flow/particle tracing Documentation Notes.

۶- پی نوشت

- [1] Meniscus
- [2] Second Order Upwind
- [3] Pressure Velocity Coupling
- [4] Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)
- [5] Pressure Outlet
- [6] Wall Function
- [7] Low Reynolds Number Model
- [8] Launder and Spalding
- [9] Free Slip

Channel Flow”, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, No. 4, PP. 667-683, 1996.

- [6] J. Szekeley & V. Stanek, “On Heat Transfer and liquid Mixing in Continuous Casting of Steel”, Metall. Trans, Vol. 1, No. 1, PP. 119, 1970.
- [7] S. Asai & J. Szekeley, “Turbulent Flow and Its Effects in Continuous Casting”, Ironmaking Steelmaking, Vol. 3, pp. 205, 1975.
- [8] Brian G. THOMAS, Quan YUAN, Sivaraj SIVARAMAKRISHNAN, Tiebiao SHI, S. P. VANKA & M. B. ASSAR: “Comparison of Four Methods to Evaluate Fluid Velocities in a Continuous Slab Casting Mold”, ISIJ International, Vol. 41, pp. 1262–1271, 2001.
- [9] L. Zhang & B. G. Thomas: “Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting”, ISIJ International, Vol. 41, pp. 1181–1193, 2001.
- [10] D. Xu, W. K. Jones Jr, J. W. Evans, D. P. Cook, “Mathematical and physical modeling of systems for metal delivery in the continuous casting of steel and DC casting of aluminum”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 22, Issue 11, pp. 883–893, 1998.
- [11] S. LUO, F. Y. PIAO, D. B. JIANG, W. L. WANG & M. Y. ZHU, “Numerical Simulation and