

# بررسی اثر پاشنه راهگاه بارریز بر پدیده ماسه شویی به کمک شبیه سازی عددی جریان مذاب در فرایند ریخته گری با قالب ماسه‌ای

سید محمد حسین میرباقری<sup>۱</sup>

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر طراحی اجزای سیستم راهگاهی، خصوصاً پاشنه راهگاه بر پدیده ماسه شویی طی فرایند ریخته گری چدن ها در قالب ماسه ای خشک است؛ بدین منظور ابتدا مدلی به شکل یک صفحه نازک، طراحی و سپس در قالب ماسه‌ای؛ که یکی از سطوح آن از شیشه ساخته شده بود، قالب گیری؛ سپس یک سیستم راهگاهی فشاری برای آن طراحی شد. در مرحله بعد با حذف و اضافه کردن پاشنه راهگاه به سیستم راهگاهی مذکور، با یک نرم افزار شبیه سازی ریخته گری با تکنیک (SOLA-VOF) Solution Algorithm-Volume of Fraction و به روش حل عددی اختلاف محدود، که قبلاً نویسنده و همکاران توسعه داده بودند، الگوی جریان و مومنتم ایجاد شده در اثر برخورد مذاب به دیواره های قالب ماسه‌ای در هر دو نوع طراحی، باپاشنه و بدون پاشنه راهگاه، بررسی شد. در قدم بعد، مکان های مستعد به ماسه شویی و تجمع ماسه های وارد شده در قالب، بر اساس الگوهای جریان به دست آمده از نتایج شبیه سازی مشخص شدند. در انتها با ریخته گری مذاب چدن در قالب ماسه‌ای طراحی شده با یک وجه شیشه‌ای، برای شرایط منظور شده در اجزای شبیه سازی، روند پرشدن قالب، فیلم برداری شد و سپس با خاتمه انجام، پس از برش دادن صفحه چدنی، به جستجوی ذرات ماسه در مکان‌های مستعد به تجمع ماسه؛ که از نتایج شبیه سازی به دست آمده بود، پرداخته شد. تصاویر به دست آمده از تجمع ماسه‌ها در قطعه نشان می‌دهد وجود پاشنه راهگاه می‌تواند از میزان نرخ ماسه شویی بشدت بکاهد.

کلمات کلیدی :

ماسه شویی، پاشنه بارریز، شبیه سازی عددی، ریخته گری

## *Effect of Well-Sprue on the Sand Erosion by Fluid Flow Simulation in the Sand Casting Process*

S. M. H. Mirbagheri

### ABSTRACT

In this investigation a computational model has been developed for the simulation of melt flow in mould cavity. The simulation of flow with free surfaces into the cavity is based on the SOLution Algorithm-Volume of Fraction (SOLA-VOF) numerical algorithm, utilizing the finite difference method. Then effect of well-sprue on the flow pattern and sand-erosion was investigated. In order to verify the computational results, the casting of a Grey Iron within a transparent mould has been carried out and the sand-erosion at different times has been

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی - دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تلفن: ۰۲۱-۶۴۰۴۲۹۶۱-۲۱، Email: smhmirbagheri@aut.ac.ir

recorded. Two kinds of gating systems were designed, one of them, without well-sprue and the other with well-sprue. They were attached to the cavity mould, which front face was transparent window (Pyrex glass), separately. Then both of them were used to take into account the effect of the well-sprue on the flow pattern, and the amount of sand-erosion, using a photograph technique. The comparison between the experimental and the simulation results of sequence filling shows a good level of consistency that confirms the accuracy of the model. After the cast process and solidification of the cast, it was machined in order to observe the sand-erosion defect. Results showed that the sand-erosion in gating system without the well-sprue is more than with the well-sprue.

#### KEYWORDS:

Sand erosion, Well-sprue, Numerical simulation, Casting

می‌شوند (مانند گلوبی راهگاه، باریک شدن ناگهانی مقطع قالب و غیره). بنابراین اطلاع یافتن از این مناطق موضعی؛ که شدیداً تابع هندسه قالب هستند، می‌تواند در کاهش این پدیده بسیار مؤثر باشد. از این رو، معرفی یکی از ابزارهای مهم در این زمینه، می‌تواند بسیار سودمند باشد و آن چیزی نیست جز کدهای شبیه سازی جریان مذاب یا همان نرم افزارهای شبیه سازی فرایند ریخته گری [۴] - [۶] در واقع، طراح می‌تواند با استفاده از این کدهای شبیه سازی، ابتدا با معرفی و وارد کردن ابعاد و هندسه سیستم راهگاه و قالب در برنامه و سپس حل معادلات حاکم بر فرایند ریخته گری، به شبیه سازی الگوی جریان به پردازد و مناطق موضعی که در آنها گردابه‌های جریان و یا مناطقی که به عنوان سد و یا مانع در برابر حرکت مذاب عمل می‌کنند و یا باعث جذب مومنت مذاب می‌شوند، پیش بینی را پیش بینی و عنوان مناطق مستعد به ماسه شویی به طراح ارایه کند. در این صورت، طراح می‌تواند با تقویت ماسه و چسب مصرفی در این مناطق و یا حتی تغییر طراحی، این حالت بحرانی را حذف و از بروز پدیده ماسه شویی جلوگیری کند و یا آن را به حداقل به رساند. بنابراین، بررسی علل ماسه شویی ناشی از طراحی نامناسب قالب و سیستم راهگاهی هنوز مورد بحث و تبادل آرای محققین است و مدل‌های مختلفی برای جلوگیری از علل پدیده مذکور ارایه می‌شود [۶]، [۷]. لذا در پژوهش حاضر ابتدا صفحه نازکی به همراه یک سیستم راهگاهی فشاری طراحی شد و با اضافه و حذف کردن پاشنه راهگاه به این سیستم، شبیه سازی جریان سیال با نرم افزاری که نویسنده و سایر همکاران توسعه داده اند [۷]، [۴] انجام شد. سپس با انجام آزمایش‌های عملی و ریخته‌گری چدن خاکستری، پس از اتمام انجماد، مکان‌های که مستعد به تجمع ماسه بودند، برش و تراشکاری شد تا از وجود یا عدم وجود ماسه در این مناطق مطمئن شویم.

#### ۱- مقدمه

یکی از علل مهم ضایعات قطعات چدنی، وجود ذرات ماسه در داخل قطعه است. که عموماً در طی ماشینکاری مشخص می‌شود و با لطمه باعث هزینه بری در تولید این قطعات می‌شود. از جمله علل اصلی این عیب می‌توان به کمبود چسب ماسه، عدم تراکم مواد قالبگیری و یا نامناسب بودن ماسه مصرفی اشاره کرد؛ اما امروزه به کمک آزمایش‌های متعدد به راحتی می‌توان میزان چسب مصرفی و کیفیت ماسه را کنترل کرد و منشأ این علل را برطرف کرد؛ اما باز در هنگام تراشکاری قطعات ریخته گری، ذرات ماسه در داخل قطعه ریختگی، یافت می‌شود که باعث مردود شدن قطعه می‌شود؛ ولی منشأ اصلی آن، نمی‌تواند فقط عوامل اشاره شده در فوق باشد؛ بلکه وجود ضربه یا مومنت ناگهانی مذاب به دیواره قالب، ناشی از الگوی نامناسب جریان مذاب نیز می‌تواند یکی از منشأ های اصلی پدیده ماسه شویی باشد. خود این مطلب نیز ناشی از عدم کنترل سرعت مذاب به هنگام ورود به سیستم راهگاهی و سپس محفظه قالب است؛ بنابراین به نظر می‌رسد حتی با پیروی از الگوهای سرعت بحرانی؛ مذاب که توسط محققین زیادی ارائه شده است [۱]، [۲] باز جلوگیری از پدیده ماسه شویی، در بیشتر موارد ناکارآمد بوده است؛ زیرا طراحی این سرعت‌های بحرانی، بیشتر بر اساس جلوگیری از ورود ناخالصی و یا مخلوط شدن پوسته‌های اکسیدی سطح مذاب به داخل مذاب، محاسبه و اندازه گیری شده اند و به طور مستقیم به علت کاهش عدد رینولدز مذاب و ایجاد جریان‌های آرام، می‌توانند نرخ ماسه شویی را کاهش دهند. آنچه حائز اهمیت است این است که این پدیده؛ موضعی است و در مکان‌های خاص به وجود می‌آید [۳] و عمدتاً در مکان‌هایی هستند که ضربه ناشی از مومنت مذاب را خنثی می‌کنند (مانند پاشنه راهگاه، ماهیچه روبروی مدخل ورودی مذاب و دیواره های جلوی ورودی مذاب به قالب) و یا مکان‌های هستند که در اثر تغییر سطح مقطع جریان مذاب با افزایش سرعت مذاب در دبی ثابت، باعث ماسه شویی

جدول (۱): ترکیب شیمیایی چدن مصرفی در پژوهش حاضر

جنس	ترکیب شیمیایی
چدن	0.02, < 0.01, P < C=2.3, Si=2.2, Mn=0.75, S

به منظور بررسی وجود یا عدم وجود ماسه، قسمت فوقانی صفحه چدنی؛ که به علت سبک بودن ماسه نسبت به مذاب چدن، به تجمع ماسه مستعد است؛ به طرف پایین تراشکاری شد و در هر پاس تراش تصویر مقطع فوقانی بازرسی چشمی شد. این عملیات کف تراشی تا عمق ۰.۱ سانتی متری ارتفاع قالب (۱۲ میلی متر) انجام گرفت. تمامی مراحل فوق برای طراحی قالبی که پاشنه راهگاه مکعبی به ابعاد ۱۰×۲۰×۲۰ میلی متر دارد انجام گرفت تا بامقایسه نتایج بازرسی چشمی از مقاطع کف تراشی صفحه‌های چدنی در هر دو طرح با پاشنه و بدون پاشنه راهگاهی، کیفیت و کمیت پدیده ماسه شویی تحلیل شود.

ب) آزمایش های شبیه سازی عددی

به منظور شبیه سازی فرایند پر شدن قالب، ابتدا بایستی معادلات حاکم بر سیستم را تعیین کرد. از آنجا که فرایند ریخته گری پدیده ای زمانمند و توام با انتقال حرارت و جرم است، پس معادلات حاکم، همان معادلات بقای مومنتم (ناویر-استوک) جرم و انرژی است. این معادلات در فضای ۳ بعدی به ترتیب به قرار زیر است [۸]، [۱۲].

الف) معادله بقای مومنتم برای سیال جاری تک فاز:

$$\frac{D \vec{v}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + g + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

$$\vec{v} = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k}$$

ب) معادله بقای جرم برای سیال جاری و خمیری (سیال در حین تبدیل از فاز مذاب به جامد):

$$\frac{\rho_L - \rho_S}{\rho} \left[ \frac{\partial f_L}{\partial t} + (\vec{v}) \cdot \nabla f_L \right] + \nabla \cdot (\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$f_L + f_S = 1, \text{ and } \rho = \rho_S f_S + \rho_L f_L$$

ج) معادله بقاء انرژی حرارتی برای سیال جاری و تک فاز:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C_P \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} \quad (3)$$

د) معادله بقای انرژی حرارتی برای سیال جاری و دو فازی در طی انجماد (مخلوط جامد و مذاب):

$$\rho \Delta H_f \frac{\partial f_L}{\partial t} = -\rho \Delta H_f \vec{v} \cdot \nabla f_L - \nabla \cdot \vec{q} \quad (4)$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

در این تحقیق ابتدا آزمایش‌های عملی طراحی و سپس به آزمایش‌های شبیه سازی عددی طراحی و محاسبه می‌شود و در انتها با ارایه نتایج شبیه سازی، هر دو گروه از نتایج عددی و عملی مقایسه و تحلیل می‌شود.

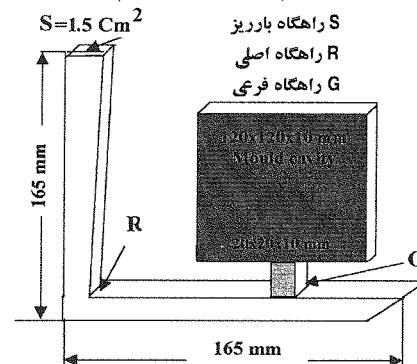
در مرحله بعد، با حذف پاشنه راهگاه، دوباره جریان مذاب در همین شرایط انجام شد تا با مقایسه آنها به اختلاف الگوی جریان ناشی از وجود پاشنه راهگاه پی برده شود.

نتایج عملی نشان می‌دهند مکان های پیش بینی شده با نرم افزار شبیه سازی، پر از ذرات ماسه است؛ بنابراین کد شبیه سازی حاضر از دقت خوبی در پیش بینی مناطق مستعد به ماسه شویی برخوردار است.

الف) آزمایش های عملی

مطابق شکل (۱) محفظه قالبی به صورت صفحه نازک به ابعاد ۱۰×۱۲×۱۲۰ mm در قالب ماسه‌ای با عدد ریزی AFS: 50 و حداقل چسب، طراحی و قالبگیری شد. نحوه طراحی به این صورت است که یکی از وجوه بزرگ قالب از شیشه نسوز انتخاب و طراحی شد به طوری که بتوان روند پر شدن قالب را مشاهده و از مراحل پر شدن قالب فیلم برداری کرد. در این صورت می‌توان از روی الگوی پر شدن قالب، مناطق مستعد به تجمع ماسه و حتی ماسه شویی را مشخص کرد، بنابراین با استفاده از دوربین ۶۴ فریم بر ثانیه؛ نحوه پر شدن قالب، ضبط و با شکستن فیلم به فریم‌های با توالی زمان ۱/۲۴ ثانیه، عکس‌هایی از روند پر شدن قالب تهیه شد. مذاب مورد مصرف در این پژوهش، چدن خاکستری با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۱) است که در کوره القایی ذوب و با دمای ۱۲۵۰ ± ۵ °C پس از خشک کردن قالب ماسه ای با ۵٪ بنتونیت، ریخته گری شد.

نسبت سیستم راهگاهی  
(S=1:R=1.1:G=2)



شکل (۱): شماتیکی از ابعاد و هندسه قلب طراحی شده در کار حاضر

(و) تابع ردیابی سطح آزاد مذاب در داخل قالب [۱۲]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} F = 0 \quad (5)$$

در معادلات فوق،  $P$ : فشار،  $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ : بردار سرعت،  $\mu$ : ویسکوزیته سیال،  $f_L, f_S$ : به ترتیب کسر حجمی جامد و مذاب هر المان،  $\rho_L, \rho_S$ : به ترتیب دانسیته جامد و مذاب،  $T$ : دما،  $t$ : زمان،  $C_p$ : ظرفیت حرارتی،  $k$ : ضریب هدایت حرارتی،  $\Delta H$ : گرمای نهان انجماد و  $F$ : کسر حجمی از المان، که به وسیله سیال اشغال یا پر شده است.

به منظور حل معادلات فوق از روش حل عددی حجم محدود برای جداسازی معادلات حاکم و تبدیل آنها به فرم معادلات جبری استفاده شده است. حل معادلات جبری به دست آمده، به وسیله روش صریح انجام گرفته است. در این روش با حدس میدان فشار، با معادلات بقاء مومنتم (ناویر-استوک) میدان های سرعت حدسی به دست می آید و سپس با جایگذاری در معادله پیوستگی (معادله ۲)، صحت سرعت های حدسی کنترل می شود؛ یعنی اگر طرف راست معادله پیوستگی به وسیله سرعت های حدسی صفر شد، این سرعت ها واقعی است؛ در غیر این صورت از رابطه ای موسوم به رابطه پنالتی یا رابطه تصحیح فشار، یعنی معادله (۶-۶) الف) که از معادله پواسون به دست آمده است، برای تصحیح میدان فشار حدسی داخل مذاب و از معادله (۶-۶) ب) برای تصحیح فشار در سطح آزاد مذاب، استفاده می شود [۱۰]، [۱۲]:

$$\mathcal{P}_{i,j,k} = D_{i,j,k} \left[ \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{1}{\Delta x_f} + \frac{1}{\Delta x_r} \right) + \frac{1}{\Delta y} \left( \frac{1}{\Delta y_f} + \frac{1}{\Delta y_b} \right) \right) \right]^{-1} \quad (6-f)$$

$$\delta P_{i,j,k} = (1-\eta)P_N + \eta P_S - P_{i,j,k} \quad (6-b)$$

در معادلات فوق،  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ : به ترتیب ابعاد المان در جهات محورهای مختصات سه گانه هستند که بسته به ابعاد سیستم مورد تحلیل مقادیر آنها از روی تجربه تعیین می شوند،  $\delta P_{i,j,k}$ : مقدار فشار تصحیحی،  $D_{i,j,k}$ : مقدار حاصل از جایگذاری میدان سرعت ها در معادله بقای جرم یا پیوستگی،  $\delta t$ : گام زمانی،  $\eta$ : ضریب درونیابی بین المان های موجود در سطح آزاد مذاب و همسایه های زیر آن می باشد،  $P_S$ : فشار سطح آزاد،  $P_N$ : فشار المان همسایه و  $P_{i,j,k}$ : فشار مذاب موجود در المان سطحی است. در مرحله بعد، میدان های سرعت جدید  $(\vec{V}_{i,j,k}^{n+1})$ ، به کمک

مقدار فشار  $(\delta P_{i,j,k})$  به دست آمده از معادلات (۶) در فضای سه بعدی و مقادیر میدان های سرعت حدسی قدیم  $(\vec{V}_{i,j,k}^n)$  محاسبه و به وسیله دسته معادلات (۷) تصحیح می شوند. در معادلات مذکور، بالانویس های  $n, n+1$  به ترتیب، به مقادیر قدیم و جدید مربوط است که با تکرار تا رسیدن به جواب های دقیق، این عملیات ادامه می یابد. حال سرعت های جدید؛ که از دسته معادلات (۷) به دست می آیند، دوباره در معادله پیوستگی (معادله ۲) قرار داده می شوند تا با صفر شدن آن صحت سرعت های جدید کنترل شود:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \delta P_{i,j,k}^n \quad (7-f)$$

در الگوریتم برنامه حاضر ابتدا میدانهای فشار و سپس میدانهای سرعت از روابط (۷-ب) محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t \delta P_{i,j,k}^n}{\Delta x}; \\ v_{i,j,k}^{n+1} &= v_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t \delta P_{i,j,k}^n}{\Delta y}; \\ w_{i,j,k}^{n+1} &= w_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t \delta P_{i,j,k}^n}{\Delta z}; \end{aligned} \quad (7-b)$$

در صورت صفر نشدن معادله (۲)، این فرایند (تغییر فشار) آنقدر ادامه می یابد تا معادله پیوستگی ارضا شود. در این صورت، سرعت ها صحت دارند و از دقت لازم برخوردارند. اکنون می توان به گام زمانی بعدی رفت و روند حل مسأله را تکرار کرد. خلاصه ای از الگوریتم حل فوق در روندنمای شکل (۲) ارائه شده است؛ ولی آنچه مهم است این است که بعد از به دست آمدن میدان های سرعت و دما، بایستی مقدار جابجایی و ورود مذاب در قالب (بالا آمدن مذاب در قالب)، به کمک معادله (۵) با معلوم بودن میدانهای فوق تعیین شود. در واقع، متغییر  $F_{i,j,k}$  در معادله (۵) برای هر حجم محدود، بیانگر مقدار کسر فلز موجود در آن است. پس وقتی که  $F_{i,j,k} = 1$  شود این حجم کنترلی پر از مذاب است، یعنی این حجم کنترلی به فضای مذاب داخل قالب متعلق است. اگر  $F_{i,j,k} = 0$  شود حجم کنترلی خالی از مذاب خواهد بود و این حجم کنترلی به فضای بالای سر مذاب داخل قالب متعلق است؛ اما اگر  $0 < F_{i,j,k} < 1$  شود حجم کنترلی ناقص پر شده است؛ یعنی این حجم کنترلی در سطح آزاد مذاب قرار دارد و مقداری از آن از مذاب پر و بقیه آن خالی است. به این ترتیب با محاسبه  $F_{i,j,k}$  از مقادیر عددی آن، می توان سطح آزاد

### ۳- نتایج

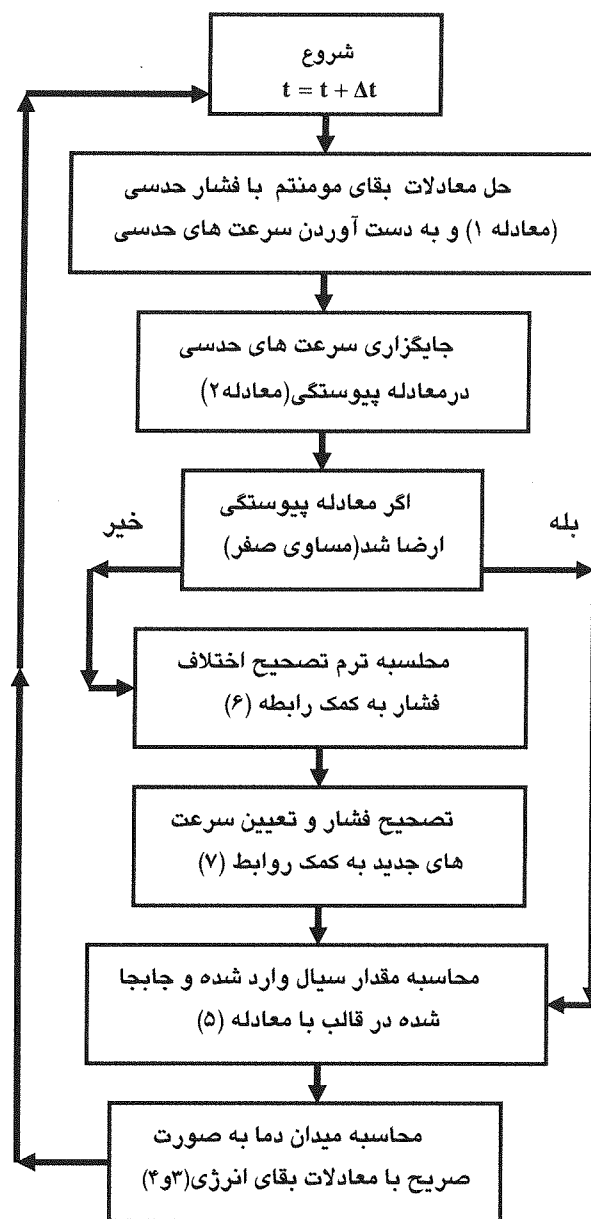
تصاویر سمت راست شکل (۳) و شکل (۴) نتایج عملی روند پر شدن قالب بدون پاشنه راهگاهی را، با مذاب چدن، نشان می‌دهد. تصاویر سمت چپ شکل های (۳) و (۴)، نتایج به دست آمده از شبیه سازی همین قطعه را بر اساس داده‌های شبیه سازی درج شده در جدول (۲) نشان می‌دهد. شرایط مرزی و اولیه سیستم مورد بررسی در این جدول نیز بیان شده است.

جدول (۲): داده های لازم برای شبیه سازی ریخته گری قالب مورد نظر با مذاب چدن خاکستری

مقادیر	خواص چدن
$T_{cast} = 1350 \pm 5$	دمای بارریزی [°C]
$k_{sand} = 0.001, k_s = 0.07, k_l = 0.07$	هدایت حرارتی [cal/s.cm °C]
$\Delta H_f = 49.76$	گرمای نهان ذوب [cal/gr.]
$\mu = 0.02368$	ویسکوزیته [cm <sup>2</sup> /sec.]
$C_p^{sand} = 0.26, C_p^s = 0.21, C_p^l = 0.22$	ظرفیت حرارتی [cal/gr. °C]
$\rho_{sand} = 1.6, \rho_s = 7.3, \rho_l = 7.2$	دانشیته [gr./cm <sup>3</sup> ]
$T_s = 1151, T_L = 1270$	دمای تحول فلزی [°C]
N=1454280	تعداد المان
$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.014$	ابعاد المان [cm]
29	زمان محاسبات شبیه سازی [min]
شرایط مرزی	
دیواره های داخلی قالب: بدون لغزش سیال فشار ورودی در سر راهگاه: 15mbar	
شرایط اولیه	
دمای قالب: ۵۵ درجه دیواره داخلی قالب: بدون لغزش سیال	

از آنجاکه روش حل معادلات حاکم در پژوهش حاضر صریح است سعی شده است فریم های زمانی تصاویر واقعی نزدیک به فریم های زمان های مربوط به نتایج شبیه سازی انتخاب شوند تا بتوان الگوی جریان مذاب را در هر دو حالت مقایسه کرد. به منظور بررسی پدیده ماسه شویی، چسب ماسه قالبگیری عمداً کمتر گرفته شد تا این پدیده مشهودتر ظاهر شود. لذا بعد از انجماد صفحه نازک چدنی، قسمت بالایی آن، به علت سبک بودن ۲ تا ۴ برابری ماسه از مذاب، تراشکاری شد. شکل (۵- الف و ب) تصاویر کف تراشی لبه فوقانی صفحه نازک چدنی ریخته شده با سیستم راهگاهی بدون پاشنه راهگاه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در شکل (۵) سوراخ های متعددی وجود دارد که با بزرگنمایی بالاتر می‌توان در تمامی آنها ذرات ماسه را مشاهده کرد. در واقع، صعود ماسه‌ها یا حفرات پر شده با ماسه،

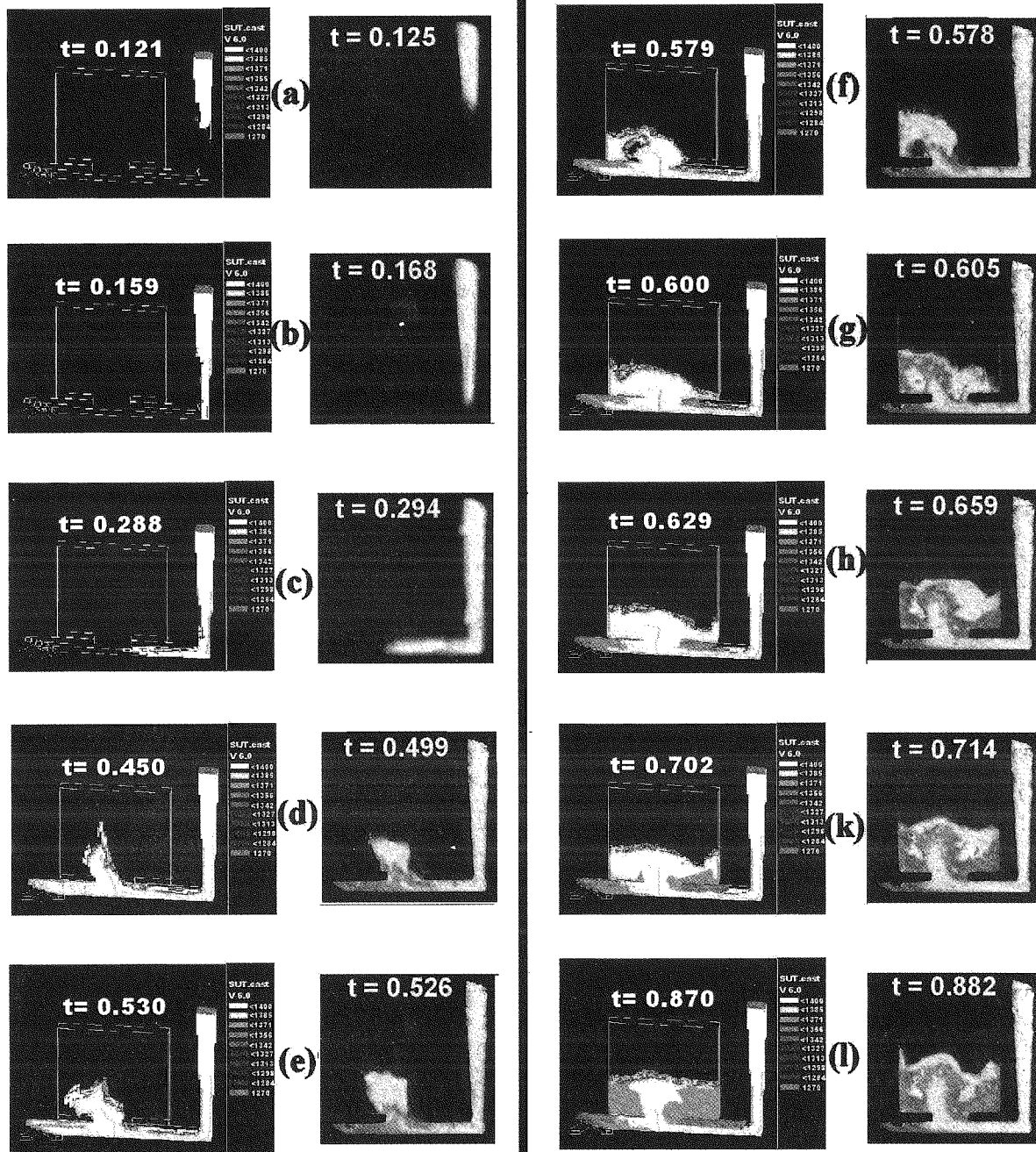
یا جبهه پیشروی و بالا آمدن مذاب در قالب را تعیین کرد. به عبارتی ساده تر، هر جا  $F_{i,j,k}$  عددی بین صفر و یک (عدد اعشاری) باشد آنجا سطح آزاد مذاب- هوا در داخل قالب است [۱۱-۱۴]. اکنون، با داشتن موقعیت سطح آزاد مذاب، میدان های دما و سرعت، به راحتی می‌توان روند پر شدن قالب را در هر لحظه رسم کرد و شبیه آنچه در عمل اتفاق می‌افتد پیش بینی و نمایش داد. اکنون با تحلیل نتایج شبیه سازی می‌توان مناطق بحرانی و مستعد به ماسه شویی را تعیین کرد و با تغییر طراحی به سمت طراحی مناسبی؛ که حداقل عیوب احتمالی را داشته باشد، حرکت کرد.



شکل (۲): خلاصه روند حل صریح معادلات حاکمه فرایند ریخته گری

مذکور نشان داد شده است. به وضوح می‌توان ذرات ماسه را در این حفره های مذکور خالی از جرم ماسه (حفره انقباضی یا گازی) نباشند، در تصویر شکل (۵-ب) نمایی نزدیک تر حفرات

در سطح بالایی همان پدیده ماسه شویی هستند و برای اطمینان از اینکه حفره های مذکور خالی از جرم ماسه (حفره انقباضی یا گازی) نباشند، در تصویر شکل (۵-ب) نمایی نزدیک تر حفرات



شکل (۳) نتایج واقعی (عملی) و شبیه سازی روند پر شدن قالب با طراحی حذف پاشنه راهگاهی در مسیر جریان ورودی مذاب. تصاویر سمت چپ: نتایج شبیه سازی، تصاویر سمت راست: نتایج واقعی.

سمت چپ، نتایج شبیه سازی همین قطعه را بر اساس داده‌های فیزیکی، حرارتی و هندسی و همچنین شرایط اولیه و مرزی اشاره شده در جدول (۲) را نشان می‌دهد.

در طراحی دوم؛ سیستم راهگاه مجهز به پاشنه راهگاهی شد، نتایج متفاوت بودند. تصاویر سمت راست شکل (۶) و شکل‌های (۷) نتایج عملی یا واقعی روند پر شدن قالب با طراحی سیستم راهگاهی پاشنه دار را از مذاب چدن نشان می‌دهد و تصاویر



شکل (۴): ادامه شکل سه

صفحه نازک چدنی ریخته شده؛ سیستم راهگاهی به همراه پاشنه راهگاه را نشان می‌دهد.

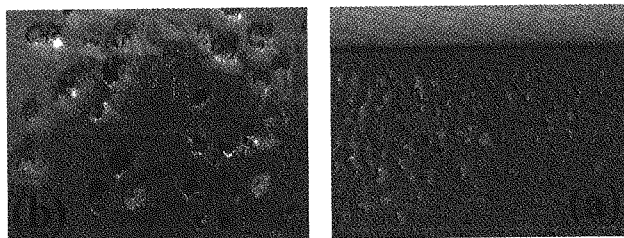
شکل (۸-الف) نمایی واقعی از وقوع ماسه شویی را به تصویر کشیده است. در شکل (۸-ب) نمای همان مقطع شکل (۸) ارائه شده است؛ به وضوح می‌توان دید ماسه شویی بشدت

تنها تفاوت در تصاویر مذکور حضور پاشنه راهگاهی، در مسیر جریان ورود به محفظه قالب است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود الگوی جریان و زمان پر شدن محفظه قالب در این نوع طراحی سیستم راهگاهی متفاوت از طرح قبلی است.

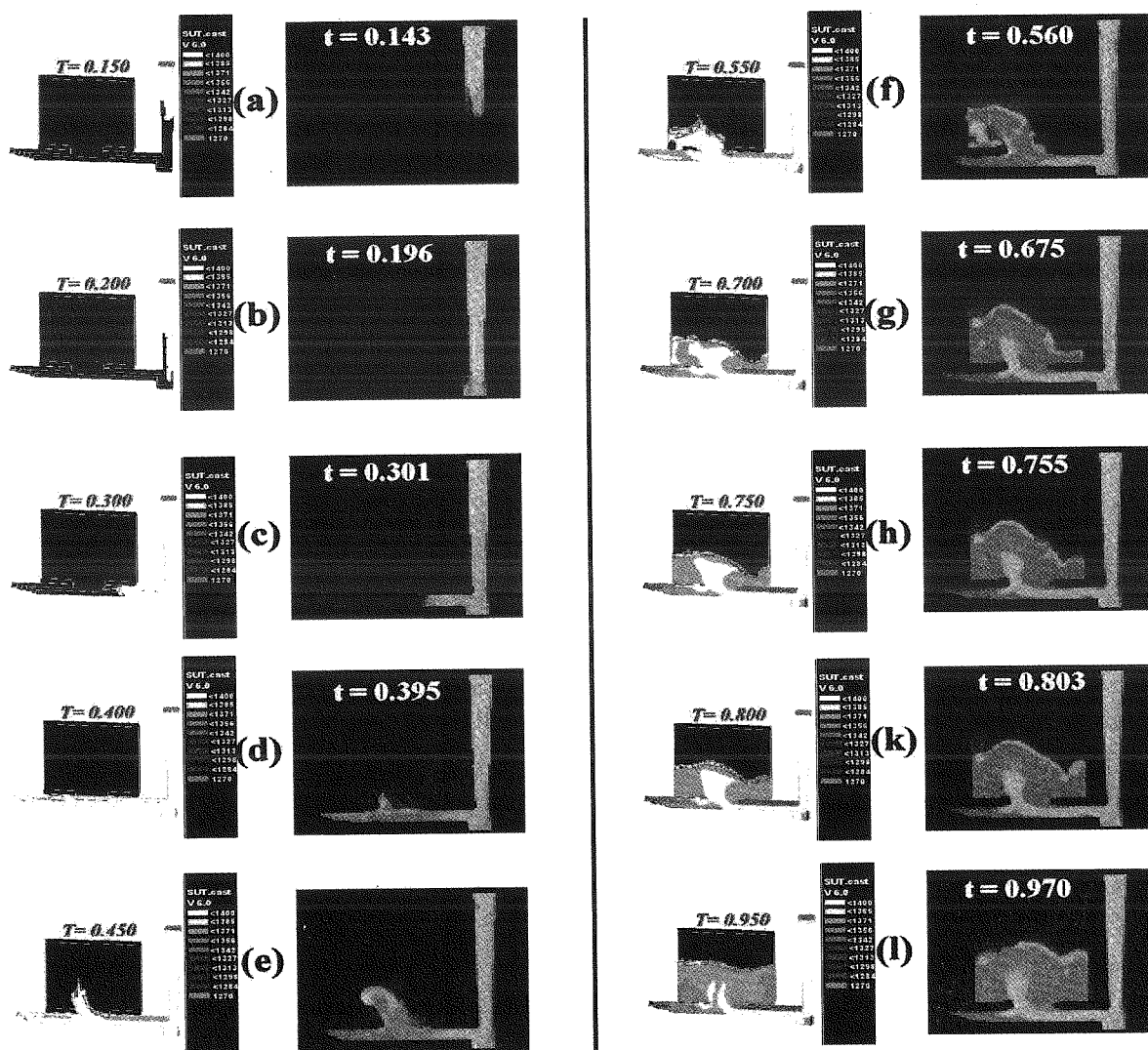
شکل (۸-الف و ب) تصاویر کف تراشی سطح (لبه) فوقانی

با تجربه قابل پیش بینی نیست بایستی حتما با نرم افزار شبیه سازی ریخته گری، رفتار مذاب داخل قالب چک شود و با رسم خطوط هم جریان مناطق گردابه ای مضر معین و سپس با تغییر طراحی هندسه پاشنه راهگاه آن ها را حذف نمود

کاهش یافته است که تأیید کننده اهمیت وجود پاشنه راهگاهی مناسب، در طراحی سیستم راهگاهی برای تکنولوژی تولید قطعات ریخته گری است. مسلم است هر نوع طراحی پاشنه راهگاهی به کاهش ماسه شویی منجر نخواهد شد؛ زیرا تابع الگوی جریانی است که از این نوع طراحی در قالب ایجاد می شود و چون این الگو

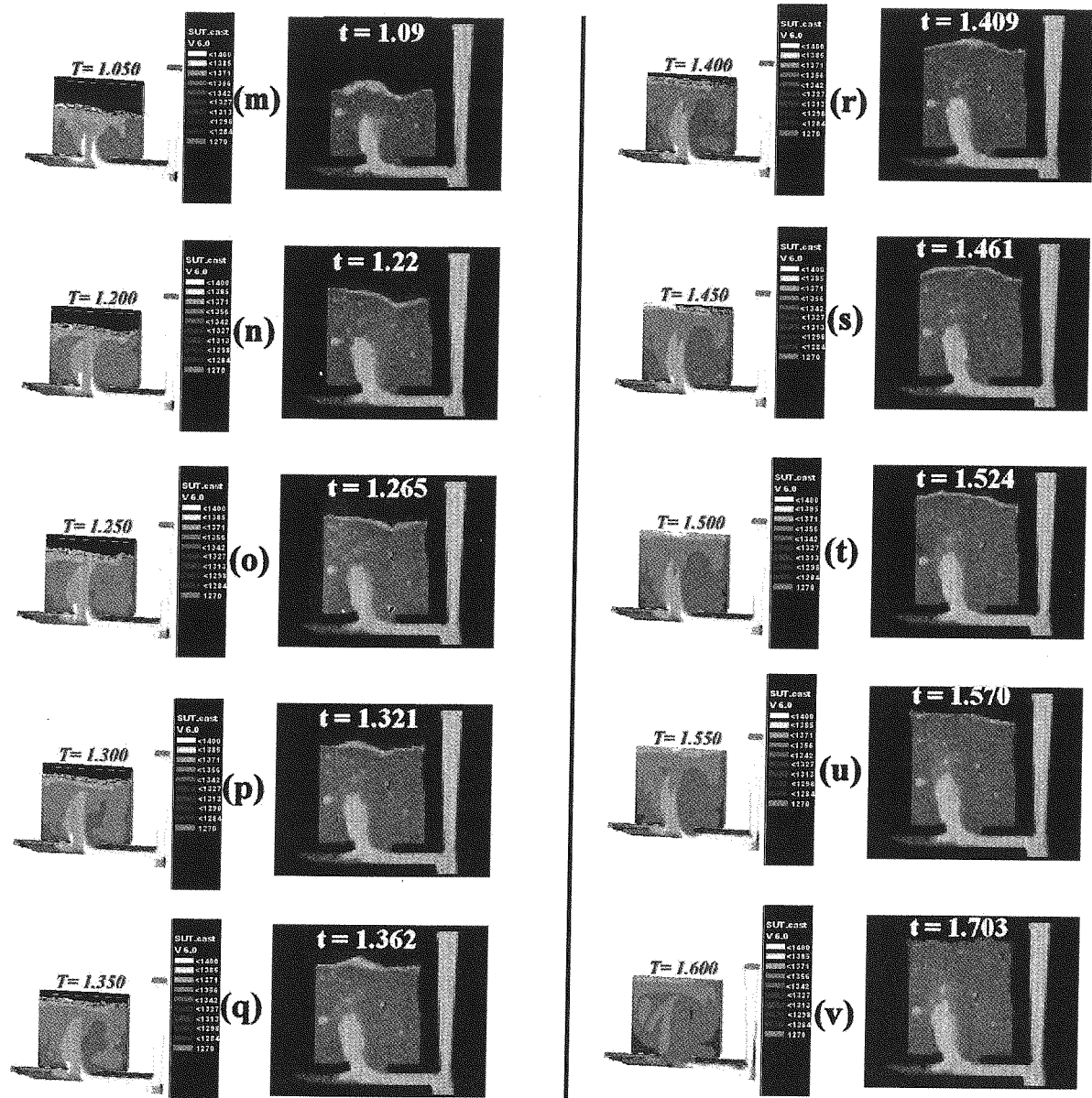


شکل (۵): وجود پدیده ماسه شویی در قطعه ای که با حذف پاشنه راهگاه ریخته گری شده؛ پس از تراشکاری قسمت بالای آن، (a) بزرگنمایی طبیعی، (b) بزرگنمایی ۲۰ برابر

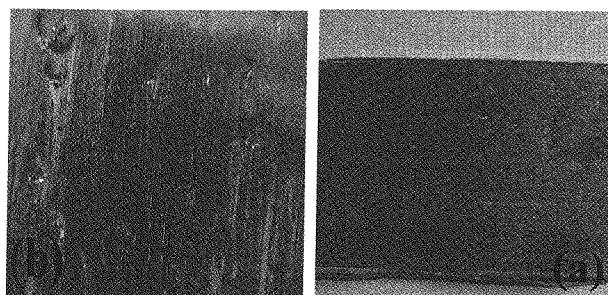


شکل (۶): نتایج واقعی (عملی) و شبیه سازی روند پر شدن قالب با طراحی پاشنه راهگاهی در مسیر جریان ورودی مذاب چدن؛ تصاویر سمت چپ: نتایج شبیه سازی، تصاویر سمت راست: نتایج واقعی





شکل‌های (v): ادامه شکل شش



شکل (۸): تراشکاری قسمت بالای قطعه ریختگی حاضر که با طراحی پاشنه راهگامی ریخته شده است، به منظور بررسی وجود پدیده ماسه شویی (a) بزرگنمایی طبیعی؛ (b) بزرگنمایی ۲۰ برابر

جدول (۳) نتایج مقایسه تصاویر شبیه سازی و واقعی در دو نوع طراحی با حذف پاشنه راهگاه و همراه با پاشنه راهگاهی را؛ که از تصاویر شکل (۳) و شکل (۴) با شکل (۶) و شکل‌های (۷) استخراج شده است، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بر خلاف انتظار معمول در سیستم راهگاه پاشنه دار، به علت اصطکاک کمتر مذاب با مذاب حاصل از حرکت چرخشی داخل پاشنه (نه فقط اصطکاک مذاب با دیواره راهگاه) زمان پرشدن قالب کوتاه و حدود ۱۵ درصد از سیستم راهگاهی بدون پاشنه کمتر است، که علت آن وجود جریان کاملاً اغتشاشی در ته راهگاه باریز یا محل اتصال راهگاه مذکور به محفظه قالب (تغییر ناگهانی زاویه ۹۰ درجه در جریان مذاب) بوده است. به عبارتی ساده تر قالب با پاشنه زودتر از بدون پاشنه پر می‌شود و نتایج شبیه سازی نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

جدول (۳): مقایسه زمان پرشده قالب شکل (۱) در دو طرح بدون و همراه پاشنه راهگاهی (زمان برحسب ثانیه)

درصد اختلاف	اختلاف	با پاشنه راهگاه	بدون پاشنه راهگاه	زمان (ثانیه)
٪۱۵/۱۲	۰/۱۰۷	۱/۷۰۳	۲/۰۱۲	زمان ریخته گری واقعی
٪۱۹/۲	۰/۲۸۸	۱/۶۰۰	۱/۹۸۸	زمان شبیه سازی

به احتمال زیاد، این اختلاف زمان به طور مستقیم به نحوه یا روند پرشدن قالب بستگی دارد. مثلاً تعداد دفعات برخورد مذاب با دیوارها (گرفتن اینرسی مذاب) و ریزش مذاب روی مذاب می‌تواند بر الگوی پر شدن قالب و در نتیجه بر اصطکاک بین لایه‌ای سیال و در نهایت بر تغییر دبی پرشدن قالب اثر قابل ملاحظه‌ای بگذارد؛ لذا می‌توان از نتایج شبیه سازی با کدهای ریخته گری (نه کدهای انجماد) نتیجه گرفت که افزایش اجزای سیستم راهگاهی اگرچه می‌تواند روی ضریب تخلیه یا اصطکاک دیواره‌ها اثر بگذارد، ولی اگر این طراحی بتواند الگوی جریان را به نحوی تغییر دهد که از کاهش دبی جریان بکاهد (با کاهش افت انرژی سیال) می‌تواند زمان بارریزی را با حد اقل کردن تلفات انرژی داخلی سیال، افزایش دهد. در طراحی سیستم راهگاهی بدون پاشنه، در اثر سقوط مذاب و برخورد آن به انتهای راهبار بارریز، مومنت مذاب کاملاً به ماسه منتقل و با تغییر ۹۰ درجه‌ای جهت جریان، باعث افت شدید جریان و افزایش افت شدید انرژی سیال (و همچنین شستن ماسه از این منطقه) می‌شود که این مطلب خود باعث کاهش دبی مذاب

ورودی به قالب می‌شود؛ لذا زمان پر شدن این قالب کمی طولانی تر از طراحی سیستم با پاشنه راهگاهی است.

از طرفی دیگر، مقایسه تصاویر تراشکاری از لبه فوقانی و سمت چپ صفحه چدنی برای دو طراحی سیستم راهگاهی بدون پاشنه و با پاشنه، در شکل (۵) و شکل (۸) نشان می‌دهد که در نمونه بدون پاشنه، میزان ماسه شویی بسیار شدید است. علت این امر ناشی از سقوط آزاد مذاب در راهگاه بارریز و برخورد مذاب به کف راهگاه و انتقال شدید مومنت مذاب به ماسه است که خود باعث کنده شدن ماسه و حمل آن با جریان مذاب به داخل قالب می‌شود. در این نوع طراحی، در انتهای راهگاه بارریز، دیگر مذاب با مذاب برخورد نمی‌کند؛ بلکه مذاب به طور مداوم با ماسه برخورد و ماسه شویی می‌کند که خود باعث گود شدن نامتقارن و نامناسب در کف راهگاه بارریز شده و بر شدت ماسه شویی، مغشوش شدن جریان و افت انرژی سیال می‌افزاید. به علت وجود طراحی سیستم راهگاهی فشاری گود شدن کف راهگاه بارریز در اثر ماسه شویی پدیده خلأ یا مکش هوا به داخل مذاب هیچگاه رخ نخواهد داد. (تصاویر الف و ب) در شکل (۵) کاملاً این تئوری را تأیید می‌کند؛ اما در طرح همراه با پاشنه راهگاه، می‌توان مشاهده کرد که با سقوط مذاب در پاشنه راهگاه بارریز و ایجاد منطقه مرده، جریان مذاب‌های بعدی دیگر به کف راهگاه برخورد نکرده است. به عبارت دیگر؛ سقوط مذاب روی مذاب انجام می‌گیرد که این مطلب باعث کاهش مومنت و جذب ضربه (انرژی) سیال به وسیله ماسه و همچنین کاهش افت ضربه سیال می‌شود. شاید علت اصلی این کاهش مومنتوم وجود جریان کاملاً چرخشی در داخل پاشنه باشد. یعنی جریان سیال از حالت تصادمی مستقیم (تنش نرمال) یا ضربه‌ای به دیواره‌های پاشنه راهگاه، به جریان کاملاً چرخشی بدون هیچ ضربه مستقیم (تبدیل تنش نرمال به تنش برشی بر دیواره ماسه‌ای پاشنه) تبدیل می‌شود. با کاهش شدید مومنت ضربه‌ای حاصل از برخورد مذاب با ماسه (حداقل جذب اینرسی) عیب ماسه شویی به حداقل خود می‌رسد. تصاویر الف) و ب) در شکل (۸) این مطلب را در مقایسه با تصاویر ماسه شویی شکل (۵) کاملاً تأیید می‌کند؛ زیرا در شکل (۸) میزان ماسه شویی شدیداً کاهش یافته است. علت انتخاب سمت فوقانی و چپ صفحه چدنی برای عملیات تراشکاری و تراشکاری براساس نتایج شبیه سازی در شکل (۳) و شکل (۴) با شکل (۶) و شکل‌های (۷) بود؛ زیرا همان طور که از تغییر الگوی کانتورهای دما دیده می‌شود در قسمت فوقانی قالب و کمی به سمت چپ، حالت گردابه یا چرخش کانتورها به وضوح قابل تشخیص است. لذا این منطقه بعلت سبک بودن ماسه‌ها می‌تواند محل تجمع ماسه باشد.

- [۱] J. Campbell, Cracked liquid metals create defective castings, *Ingenia*, 1(4), 2000, 35-39.
- [۲] J. Campbell, Castings, Butterworth publication, Oxford university, second edition, 2003.
- [۳] Metals handbook, Castings, ASM publisher, 9edition, Vol:15.
- [۴] S.M.H. Mirbagheri, Dadashzadeh, S. Serajzadeh, A. K. Taheri and P. Davami, Modeling the effect of mould wall roughness on the melt flow simulation in casting process, *Applied Mathematical Modeling*, vol.28(11), pp. 933-956, 2004.
- [۵] C.P. Hong, Computer modeling of heat and fluid flow in materials processing, IOP publication, Yensei university, Korea, 2004.
- [۶] T.J. Smith, Modeling the flow and solidification of metals, Martinus nijhoff publisher, Cambridge, UK, 1297.
- [۷] S. M. H. Mirbagheri, M. Shrinparvar, H. Ashory and P. Davam, Simulation of surface roughness on the flow pattern in the casting process, *Materials & Design*, vol. 25(8), pp. 55-661, 2004.
- [۸] C.W. Wang, "Computer modeling of fluid flow and heat transfer in metal casting", Ph.D. Thesis, Pittsburgh, university, USA, 1990.
- [۹] M. .D. Torrey, L.D. Cloutman and C.W. Hirt, "NASA-VOF2D: A computer program for incompressible flows with free surfaces", Technical Report LA10642-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, 1985.
- [۱۰] D. M. Torrey, R.C. Mjolsness and L.R Stein, "NASA-VOF3D: A three-dimensional computer program for incompressible flow with free surface", Technical Report LA11009-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, 1987.
- [۱۱] C.W. Hirt and B.D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries" *J. of comput. Phys.* 1981; 39: 201-225.
- [۱۲] Naoki Takada, Masaki Misawa and Akio Tomiyama, "A phase-field method for interface-tracking simulation of two-phase flows" *Mathematics and Computers in Simulation*, 72 (2006) 220-226.
- [۱] در پژوهش حاضر با بررسی و شبیه سازی اثر دو نوع طراحی سیستم راهگامی بدون پاشنه و با پاشنه بر پدیده ماسه شویی طی فرایند ریخته گری چدن خاکستری در قالب ماسه‌ای خشک می‌توان نتایج زیر را ارایه کرد:
- ۱- نرم افزار شبیه سازی توسعه داده شده در پژوهش حاضر می‌تواند ابزار خوبی برای پیش بینی مکان‌های با جریان مغشوش و گردابه‌ای باشد که احتمال ماسه شویی و تجمع ماسه‌ها در این مکان‌ها بسیار زیاد است. همچنین به کمک نرم افزار حاضر می‌توان، مکان جریان‌های مغشوش و گردابه‌ای را با تغییر الگوی ایزوترم‌های حرارتی، در طی پر شدن قالب براحتی تشخیص داد.
- ۲- وجود پاشنه راهگام به شرط ایجاد جریان چرخشی در پاشنه، به طوری که بتواند مومنتوم‌های ضربه‌ای را به مومنتم مماسی تبدیل کند، می‌تواند با کاهش اصطکاک بین مذاب و دیواره‌های راهگام، از پدیده ماسه شویی جلوگیری کند.
- ۳- کاهش اصطکاک، بین مذاب و دیواره‌های ماسه، در سیستم راهگام پاشنه دار می‌تواند زمان پر شدن قالب را بر خلاف سیستم راهگامی بدون پاشنه، کاهش دهد.
- ۴- در سیستم بدون پاشنه راهگام، به علت وجود ضربه مستقیم مذاب با ماسه و عدم تبدیل اینرسی‌های ضربه‌ای به مماسی و از طرفی، کاهش چسب ماسه، پدیده ماسه شویی شدید رخ می‌دهد.
- ۵- نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که گردابه‌های موجود در قالب، برای سیستم راهگامی پاشنه دار، در سمت چپ و بالای قالب و برای راهگام بدون پاشنه تقریباً در وسط و بالای آن به وجود می‌آید. لذا این مکان‌ها به علت سبک بودن ماسه؛ می‌توانند مراکز تجمع ماسه‌های شسته شده باشند.
- ۶- نتایج تجربی از نمونه برداری از قسمت فوقانی صفحه ریختگی و سپس تراشکاری آنها، وجود ماسه شویی در نواحی فوق را فقط برای سیستم بدون پاشنه راهگام تأیید می‌کند.

## ۶- تشکر و قدر دانی:

نویسنده مقاله از گروه شبیه سازی دانشگاه صنعتی شریف و مرکز پژوهش رازی خصوصاً جناب آقای دکتر پرویز دوامی، و آقای مهندس حامد اسماعیلی تشکر می‌کند.