

بررسی تأثیر شیب و تغییر سطح مقطع راه‌بار بر فشار و رفتار سیال به کمک شبیه‌سازی عددی حجم محدود*

مجتبی برزگری^(۱)سید محمد حسین میر باقری^(۲)

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر هندسه‌ی راه‌بار در مجموعه‌های راه‌گاهی فشاری در فرایند ریخته‌گری با قالب ماسه‌ای است. عدم طراحی مناسب هندسه‌ی راه‌بار می‌تواند منجر به وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی در فرایند ریخته‌گری شود. با این هدف، ابتدا مدلی به شکل یک صفحه‌ی نازک دو بعدی طراحی شد، و با تغییر شیب راه‌بار و سطح مقطع آن به‌طور منظم، تأثیر فشار در راه‌بار به‌روش حل عددی اختلاف محدود شبیه‌سازی شد. سپس، عامل فشار بدون بعد C_{np}^i که نسبت شیب تغییرات فشار به انرژی جنبشی در طول یک کانال جریان است، برای طرح‌های مختلف مقطع طولی کانال راه‌بار با استفاده از نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد تا به این ترتیب، تأثیر متغیرهای شیب و سطح مقطع راه‌بار در آن‌ها مشخص شود. در مرحله‌ی دوم، با ریخته‌گری مذاب آلومینیم در قالب‌های ماسه‌ای که یک طرف آن شیشه‌نسوز قرار داده شده بود، تأثیر تغییر مقطع راه‌بار و شیب آن در پدیده‌ی ماسه‌شویی به‌کمک روش عکس‌برداری و نیز تراش‌کاری سطح فوقانی صفحه‌ی آلومینیمی بررسی شد. نتایج نشان دادند که هرگونه تغییر در مقطع راه‌بار که بتواند منجر به تغییر در مقدار عامل C_{np} شود، به‌طور هم‌زمان می‌تواند با افزایش تنش برشی بر روی دیواره‌های درونی راه‌بار، منجر به ماسه‌شویی شود. مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج به‌دست آمده از عکس‌برداری، درستی مدل به‌کار رفته را به‌خوبی تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که در زاویه‌های راه‌باری ۵۶ و ۷۱ درجه و یا کاهش سطح مقطع راه‌بار به میزان یک چهارم سطح مقطع اولیه، بیش‌ترین مقدار ماسه‌شویی در ریخته‌گری رخ داد.

واژه‌های کلیدی ماسه‌شویی، سطح مقطع راه‌بار، عامل فشار بدون بعد، شبیه‌سازی عددی، جریان سیال، ریخته‌گری ماسه‌ای.

Assessment of the Slope and Cross-Section of In-Gate on the Pressure and Flow Pattern Using Finite Volume Method

M. Brzegari

M.H. Mirbagheri

Abstract

In this investigation, the effect of gating system geometry during sand casting process has been studied. Sand erosion is one of the most important defects, which is caused due to the incorrect design of the gating system. In this study, a thin plate bench-mark was designed, and the pressure field was simulated for the cases of different slopes and cross-sections of the in-gate using Finite Volume Method (FVM). The dimensionless pressure parameter C_{np}^i for the in-gate was calculated with the help of the simulation results. In the second stage, aluminium was molded in a sand mold with a Pyrex glass face. Then, the sand erosion phenomenon was examined using the photography technique, and through machining the upper surface of the aluminum thin plate. The results indicated that the maximum sand erosion during the casting process occurred for the in-gates having the slopes of 56 or 71 degree with a cross section experiencing a reduction of 25% from the initial cross-section.

Key Words Sand erosion, In-gate cross-section, Dimensionless pressure parameter, Numerical simulation, Fluid flow, Sand casting.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۱/۲۳ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۱/۱۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی مهندسی مواد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(۲) نویسنده‌ی مسؤل: استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

مقدمه

پاشنه‌ی راه‌گاه، ماهیچه‌ی روبروی مدخل ورودی مذاب و دیواره‌های جلوی آن، و یا مکان‌هایی هستند که در نتیجه‌ی تغییر سطح مقطع جریان مذاب با افزایش سرعت مذاب به‌ازای دبی ثابت، باعث ماسه‌شویی می‌شوند (مانند گلویی راه‌گاه، باریک‌شدگی ناگهانی مقطع قالب، و نظیر آن). بنابراین، اطلاع از مکان این مناطق موضعی که شدیداً تابع هندسه‌ی قالب هستند، می‌تواند در کاهش اثرات این پدیده بسیار مؤثر باشد. به‌این دلیل، شبیه‌سازی جریان مذاب با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی فرایند ریخته‌گری ابزار بسیار قدرتمندی خواهد بود که در دست طراحان قطعات ریخته‌گری قرار دارد [5-7]. در واقع طراح می‌تواند ابتدا با معرفی ابعاد و هندسه‌ی مجموعه‌ی راه‌گاه و قالب و وارد کردن آن‌ها در برنامه و سپس حل معادله‌های حاکم بر فرایند ریخته‌گری، به شبیه‌سازی الگوی جریان پردازد و به‌دنبال آن، مناطق موضعی که در آن‌ها گردابه‌های جریان وجود دارند، و یا مناطقی که در برابر حرکت مذاب به‌عنوان مانع عمل می‌کنند و یا باعث جذب اندازه حرکت مذاب می‌شوند را پیش‌بینی و آن‌ها را به‌عنوان مناطق مستعد برای ماسه‌شویی مطرح سازد [8-10]. در این صورت، طراح خواهد توانست با تقویت ماسه‌ی مصرفی در این مناطق و یا تغییر طراحی، حالت بحرانی به‌وجود آمده را حذف و از بروز پدیده‌ی ماسه‌شویی جلوگیری کرده و یا آن را به‌حداقل میزان خود برساند. بررسی علت‌های وقوع ماسه‌شویی ناشی از طراحی نامناسب محل اتصال مجموعه‌ی راه‌گاهی به محفظه‌ی قالب هنوز مورد بحث و تبادل آرای محققین قرار دارد، و مدل‌های مختلفی برای جلوگیری از وقوع این پدیده ارائه شده‌اند [7,11].

در شبیه‌سازی جریان مذاب در کانال ماسه‌ای، اثر اصطکاک سطح قالب با مذاب به‌صورت تابع‌هایی تجربی و یا بر اساس نمودارهای مودی (Moody) مورد توجه قرار گرفته است [12]. از جمله این روش‌ها

یکی از علت‌های مهم ایجاد ضایعات در قطعات ریخته‌گری، حضور ذرات ماسه درون قطعه است. این ضایعات عموماً حین ماشین‌کاری تشخیص داده شده و بالطبع این باعث تحمیل هزینه‌ی اضافی در تولید قطعات می‌شود. از جمله علت‌های اصلی بروز این عیب می‌توان به کمبود چسب ماسه، عدم تراکم مواد قالب‌گیری و نامناسب بودن ماسه‌ی مصرفی اشاره کرد [1]. امروزه به‌راحتی می‌توان با انجام آزمون‌های مختلف، میزان چسب مصرفی و کیفیت ماسه را کنترل کرده و به این ترتیب، ضایعات فوق را برطرف نمود. با این حال، در هنگام تراش‌کاری قطعات ریخته‌گری ذرات ماسه درون آن‌ها یافت می‌شود، و این باعث غیر قابل استفاده شدن آن‌ها می‌شود. منشأ اصلی آن نمی‌تواند تنها عوامل فوق باشند، بلکه ضربه یا برخورد ناگهانی مذاب به دیواره‌ی قالب که ناشی از الگوی نامناسب جریان مذاب است نیز می‌تواند یکی از دلیل‌های اصلی وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی باشد [2]. ایجاد این عیب نیز ناشی از عدم کنترل سرعت مذاب در لحظه‌ی ورود به مجموعه‌ی راه‌گاهی و پس از آن، محافظه قالب است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که حتی با پیروی از الگوهای سرعت بحرانی مذاب که توسط محققان زیادی ارائه شده است [3]، جلوگیری از وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی در بیش‌تر موارد ناکارآمد بوده است. این به دلیل آن است که طراحی سرعت‌های بحرانی بیش‌تر بر مبنای جلوگیری از ورود ناخالصی به درون آن و یا مخلوط شدن پوسته‌های اکسیدی سطح درون مذاب محاسبه و اندازه‌گیری شده‌اند، و به‌طور مستقیم می‌توانند به‌دلیل کاهش عدد ری‌نولدز مذاب و ایجاد جریان‌های آرام، نرخ ماسه‌شویی را کاهش دهند. نکته‌ی مهم این است که پدیده‌ی فوق موضعی است و در مکان‌های خاصی رخ می‌دهد [4]. این مکان‌ها آن‌هایی هستند که ضربه‌ی ناشی از تحرک مذاب توسط دیواره‌ی قالب یا راه‌گاه را خنثی می‌کنند (مانند

انتظار می‌رود، نشان می‌دهد [۸ و ۹]. این واقعیت بر طراحی مکان تغذیه تأثیر می‌گذارد. با این حال، در مورد هندسه‌ی راه‌گاه از نقطه نظر مقطع آن و ضریب اصطکاک منابع مختلفی وجود دارند. در این منابع، ضرایب به صورت تجربی تعیین شده و سپس در مدل وارد می‌شوند. به این ترتیب، معادله‌هایی بر اساس رابطه‌ی برنولی اصلاح شده ارائه شده که به کمک آن‌ها، مجموعه‌های راه‌گاهی فشاری و یا غیرفشاری طراحی می‌شوند [۱۵ و ۱۶]. با این حال، تأثیر هم‌زمان شیب راه‌گاه فرعی و تغییرات مقطع بر توزیع جریان داخل راه‌گاه و خصوصاً فشار درون راه‌باره که عامل اصلی ماسه‌شویی است، بررسی نشده است [۱۷]. در این پژوهش، ابتدا صفحه‌ی نازکی همراه با یک مجموعه‌ی راه‌گاهی فشاری طراحی شد، و با تغییر سطح مقطع راه‌باره به قالب و نیز تغییر شیب راه‌باره، تأثیر تغییر جریان و فشار درون کانال راه‌باره بررسی شده است. پس از آن، با انجام آزمون‌های عملی پس از پایان انجماد، مکان‌هایی که در نتایج شبیه‌سازی دارای خطوط جریان چرخشی و گردابی شدید بودند، برای ماسه‌شویی مستعد شناخته شدند. به منظور تشخیص صحت نتایج شبیه‌سازی، مکان‌های فوق از نمونه‌های ریخته‌گری بریده شدند، و سپس لایه‌هایی به ضخامت ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی‌متر از روی آن‌ها تراشیده شدند تا از وجود ذرات ماسه درون فلز اطمینان حاصل شود.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا مطابق شکل (۱) محفظه‌ی قالب به شکل صفحه‌ای نازک طراحی شد، و بررسی‌های عملی و شبیه‌سازی انجام شدند. در مرحله‌ی تحقیقات عملی، ریخته‌گری آلومینیوم در پشت صفحه‌ی شیشه‌ای انجام شد، و از آن برای پی بردن به روند پر شدن قالب و پدیده‌ی ماسه‌شویی به طور مداوم تصویربرداری شد. در مرحله‌ی شبیه‌سازی، ابتدا برنامه‌ای به روش حجم محدود در فضای دو بعدی نوشته شد. این برنامه که بر

می‌توان به روش استفاده از عامل بدون بعد γ اشاره کرد که مقدار آن بین صفر و یک، به ترتیب برای حالت اصطکاک کامل و بدون اصطکاک، تغییر می‌کند [۱۳]. گروهی از محققان با توجه به عدد ریزی ماسه و تنش برشی بر روی دیواره‌ی قالب، مقدار γ را تقریب زده‌اند [۵]. مقدار γ به عنوان یک ضریب در شرایط مرزی سرعت در الگوریتم مربوط به برنامه‌ی شبیه‌سازی عددی به کار می‌رود. با در نظر گرفتن یک سری سلول در مرز بین قالب و مذاب به عنوان سلول‌های مجازی، می‌توان به کمک عامل بدون بعد γ کاهش یا افزایش مؤلفه‌های سرعت در حالت سه بعدی را تنظیم کرد. اما این تغییرات می‌باید همواره قانون بقای جرم را ارضاء کند، در غیر این صورت ممکن است که باعث تجمع یا کاهش جرم سیال به صورت مجازی شود که این خود یک خطای عددی ناخواسته است.

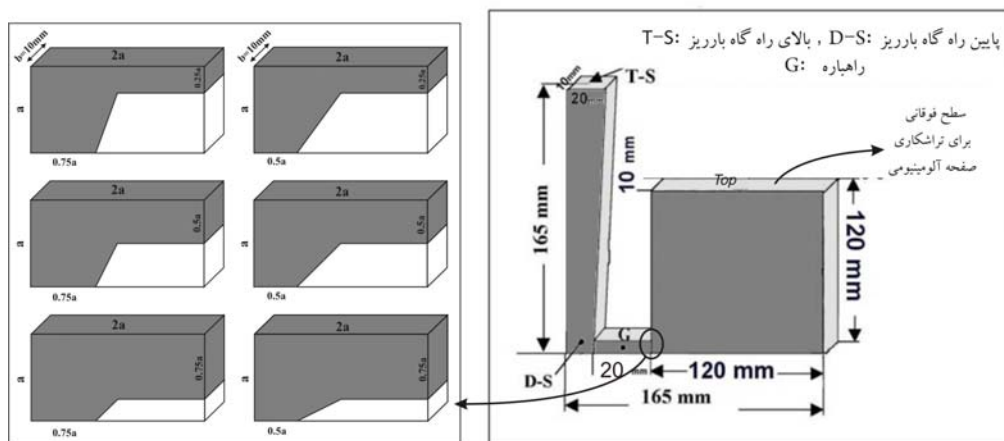
مدل کوت (Koute) یکی از مدل‌هایی است که برای بررسی تأثیر اصطکاک در دیواره‌های جامد به کار می‌رود. در این مدل، از عامل بدون بعد زبری نسبی (ε) استفاده می‌شود و در آن، عامل γ بر اساس دامنه‌ی تکرار هر برآمدگی و فرورفتگی تعریف شده و توزیع تنش به صورت یک رابطه‌ی نمایی که توان آن با تغییر زبری تغییر می‌کند، بیان می‌شود [۱۴]. کاربرد مدل‌های مختلف برای توزیع شیب تنش در نزدیکی دیواره‌های جامد می‌تواند در هر گام زمانی در حل معادله‌های ناویر استوک بر روی میدان سرعت تأثیر گذاشته و اندازه حرکت به درون مذاب انتقال یابد. بنابراین، در تصویرهای شبیه‌سازی جریان سیال خطوط هم پتانسیل از نظر مقداری کاملاً بین حالت اصطکاک کامل و بدون اصطکاک تغییر می‌کنند. افزون بر این، میدان‌های سرعت در نتیجه‌ی اصطکاک دیواره تغییر می‌کنند. گزارش بعضی از محققان نشان می‌دهد که حتی مکان اتصال راه‌گاه به قالب به علت تغییر الگوی جریان و نیز الگوی اصطکاک دیواره‌ی قالب، بر توزیع دمای درون قالب اثر گذاشته و مناطق داغ را کاملاً متفاوت از آنچه

توالی زمانی ۱/۲۴ ثانیه عکس‌هایی از روند پر شدن قالب تهیه شد. مذاب مورد مصرف در این پژوهش آلومینیم خالص بود که در کوره‌ی القایی ذوب شد، و در دمای $720 \pm 5^\circ\text{C}$ پس از خودگیری قالب ماسه‌ای با ۴ درصد سیلیکات سدیم توسط دمش گاز CO_2 ریخته‌گری شد.

پس از انجماد و سرد شدن صفحه‌ی نازک آلومینیومی، بخش بالایی صفحه‌ی ریختگی (این صفحه به‌علت سبکی ماسه در مقایسه با مذاب، نسبت به تجمع ماسه مستعد است) برای بررسی وجود یا عدم وجود ماس به سمت پایین تراش کاری شد. در هر مرحله از تراشکاری، تصویر مقطع فوقانی مورد بازرسی چشمی قرار گرفت. عملیات کف‌تراشی تا عمق ۱ سانتی‌متری از ارتفاع قالب انجام شد. تمامی مراحل فوق برای قالبی که طرح هندسه‌ی راه‌بار در آن هر بار مطابق با تصاویر سمت چپ شکل (۱) تغییر می‌کرد، انجام گرفت. با مقایسه‌ی نتایج بازرسی چشمی از مقاطع کف‌تراشی مربوط به صفحه‌های ریختگی، می‌توان از وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی در هر یک از طرح‌های راه‌بار (تغییر شیب و مقطع آن‌ها) اطلاع پیدا کرد.

اساس مدل‌سازی عددی خطوط پتانسیل جریان نوشته شد، قادر است با تغییر شیب راه‌بار به‌طور منظم از سطح مقطع راه‌بار کاسته و تأثیر جریان بر توزیع فشار درون آن را برای مجموعه‌های راه‌گاهی غیرفشاری شبیه‌سازی کند.

الف) آزمون‌های عملی. مطابق با شکل (۱)، محفظه‌ی قالب به‌شکل صفحه‌ی نازک به ابعاد $10 \times 120 \times 120$ میلی‌متر درون قالب ماسه‌ای با عدد ریزی AFS:50 و حداقل میزان چسب (۴ درصد وزنی سیلیکات سدیم)، طراحی و قالب‌گیری شد. سپس جداره‌ی قالب به‌وسیله‌ی پوشان نسوز با مش ۲۷۰ رنگ شد تا تأثیر زبری سطح ماسه کاملاً حذف شود [18]. چگونگی طراحی به این صورت بود که یکی از وجوه بزرگ قالب از شیشه‌ی نسوز انتخاب شد و در جداره‌ی قالب ماسه‌ای کار گذاشته شد، به‌گونه‌ای که روند پر شدن قالب قابل مشاهده بوده و بتوان از مراحل پر شدن قالب فیلم برداری کرد. در این حالت، مناطق مستعد به تجمع ماسه و ماسه‌شویی به‌کمک الگوی پر شدن قالب قابل تشخیص خواهد بود. به این ترتیب، با استفاده از دوربینی با قدرت برداشت ۶۴ قاب بر ثانیه نحوه‌ی پر شدن قالب ثبت شد، و با تقسیم فیلم به قاب‌هایی با



شکل ۱ تصویر شماتیک از هندسه‌ی قالب طراحی شده در این تحقیق

دوتایی را می‌توان بر مبنای گستره‌ی انجماد $(T_L - T_S)$ و با استفاده از ظرفیت حرارتی معادل (C^{eq}) بیان کرد [6]:

$$\frac{\Delta H_m}{T_L - T_S} = C_p = C^{eq} \quad (ب-۴)$$

با به‌دست آوردن حاصل ضرب مشتق کسر مذاب (رابطه‌ی (۴-الف)) در گرمای نهان انجماد (ΔH_m) در گستره‌ی انجماد، خواهیم داشت:

$$\Delta H_m df_L = \Delta H_m \frac{dT}{T_L - T_S} \quad (پ-۴)$$

$$\rightarrow \Delta H_m df_L = C_p dT$$

حال اگر در رابطه‌ی (۳) به‌جای عبارت $(C \cdot \partial T)$ ، معادل آن از رابطه‌ی (۴-پ) را قرار دهیم، معادله‌ی (۵) برای تعیین میدان دما در ناحیه‌ی دو فازی مخلوط جامد- مذاب (بین دو دمای T_S و T_L) به‌دست می‌آید:

$$\rho \Delta H_f \frac{\partial f_L}{\partial t} = -\rho \Delta H_f \vec{v} \cdot \nabla f_L - \nabla \cdot \vec{q} \quad (۵)$$

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

(۴) تابع ردیابی سطح آزاد مذاب درون محفظه‌ی قالب:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} F = 0 \quad (۶)$$

در این رابطه‌ها، q میزان حرارت، T دما، C ظرفیت حرارتی، ρ چگالی، ΔH_f گرمای نهان ذوب، k ضریب رسانایی حرارتی، \vec{v} بردار سرعت، f_L کسر مذاب، F تابع متغیر سطح آزاد، و t زمان می‌باشد. برای حل معادله‌های فوق، از روش حل عددی حجم محدود به‌منظور گسسته‌سازی معادله‌های حاکم و تبدیل آنها به معادله‌های جبری استفاده شد. حل معادله‌های جبری به‌روش صریح انجام گرفت. نکته‌ی مهم این بود که پس از تعیین میدان‌های سرعت و دما، میزان جابجایی مذاب در قالب (بالا آمدن مذاب در قالب) به‌کمک معادله‌ی (۶)، با معلوم بودن میدان‌های فوق، تعیین شود. در واقع متغیر $F_{i,j,k}$ برای هر حجم محدود، بیان‌گر میزان کسر فلز موجود در آن است. بنابراین اگر $F_{i,j,k} = 1$ باشد، حجم کنترلی پر از مذاب

(ب) شبیه‌سازی عددی. برای شبیه‌سازی فرایند پر شدن قالب، لازم است ابتدا معادله‌های حاکم بر مجموعه را تعیین کرد. از آنجا که فرایند ریخته‌گری پدیده‌ای وابسته به زمان بوده و توأم با انتقال حرارت و جرم است، معادله‌های حاکم از نوع بقای اندازه حرکت (ناویر- استوک)، جرم و انرژی است. این معادله‌ها در فضای سه بعدی، به‌شکل زیر هستند [6,12-13]:

(۱) معادله‌ی بقای اندازه حرکت برای سیال جاری تک فاز:

$$\frac{D \vec{v}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + g + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (۱)$$

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

(۲) معادله‌ی بقای جرم یا پیوستگی برای سیال جاری و خمیری (یعنی سیال در حال تبدیل از فاز مذاب به جامد است) [6]:

$$\frac{\rho_L - \rho_S}{\rho} \left[\frac{\partial f_L}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) f_L \right] + \nabla \cdot (\vec{v}) = 0 \quad (۲)$$

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

(۳) معادله‌ی بقای انرژی حرارتی برای سیال تک فاز [12]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} \quad (۳)$$

(د) معادله‌ی بقای انرژی حرارتی برای سیال دو فازی حین انجماد (یعنی مخلوط جامد و مذاب) [6]:

این معادله را می‌توان با در نظر گرفتن توازن گرمای نهان انجماد با حاصل ضرب ظرفیت حرارتی معادل (C^{eq}) و اختلاف دمای گستره‌ی انجماد (فاصله‌ی عمودی بین خطوط گداز و انجماد)، و به‌کمک معادله‌های (۴-الف) تا (۴-پ) به‌دست آورد. کسر مذاب با استفاده از نمودارهای فازی، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$f_L = \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \rightarrow df_L = \frac{dT}{T_L - T_S} \quad (۴-الف)$$

افزون بر این، گرمای نهان انجماد یک آلیاژ

پتانسیل برای کانال راه‌بار تقریب زد. به‌علت وجود تقارن، این معادله در فضای دو بعدی به‌شکل زیر تعیین می‌شود [12,17].
معادله‌ی پیوستگی برای یک سیال تک فاز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

$$\vec{v} = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k} \quad (7)$$

این معادله برای سیال تراکم‌ناپذیر در فضای دو بعدی ساده می‌شود:

$$\psi(x,y), \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

یعنی تابع پتانسیل جریان داخل کانال راه‌بار را می‌توان به‌شکل زیر تعریف کرد، زیرا مماس‌های مشترک بین خطوط جریان به‌عنوان الگویی از سرعت نقطه‌ای می‌توانند دامنه‌ی جریان را تقریب بزنند:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = 0 \quad (9)$$

در این رابطه، ψ به‌صورت تابع‌های زیر تعریف می‌شود:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (10-الف)$$

$$V = i \frac{\partial \psi}{\partial y} - j \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (10-ب)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \quad (11)$$

یکی از مهم‌ترین کاربردهای معادله‌های فوق در مجموعه‌ی راه‌گاهی قطعات ریخته‌گری است، زیرا در این مجموعه جریان سیال با فرض قابل قبولی دو بعدی است. بنابراین، می‌توان معادله‌ی (۱۱) را به شکل معادله‌ی زیر برای راه‌بار به‌کار برد:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (12)$$

این رابطه از نوع یک معادله‌ی لاپلاس درجه دو

است، یعنی این حجم کنترلی متعلق به فضای مذاب درون قالب است. اگر $F_{i,j,k} = 0$ باشد، حجم کنترلی خالی از مذاب بوده و متعلق به فضای بالای سر مذاب درون قالب خواهد بود. اما اگر $0 < F_{i,j,k} < 1$ باشد، حجم کنترلی به‌میزان ناقص پر می‌شود، یعنی حجم کنترلی در سطح آزاد مذاب قرار داشته و تنها مقداری از آن از مذاب پر شده است. به‌این ترتیب، با محاسبه‌ی $F_{i,j,k}$ از مقادیر عددی آن، سطح آزاد یا جبهه‌ی پیشروی و بالا آمدن مذاب در قالب را می‌توان تعیین کرد. به عبارتی ساده‌تر، هر جایی که برای آن مقدار $F_{i,j,k}$ بین صفر و یک (یعنی عدد اعشاری) باشد، آن محل سطح آزاد بین مذاب و هوا درون قالب خواهد بود [13]. حال با داشتن سطح آزاد مذاب و میدان‌های دما و سرعت به‌راحتی می‌توان روند پر شدن قالب را در هر لحظه رسم کرد، و شبیه به آن‌چه در عمل اتفاق می‌افتد، آن را پیش‌بینی و نمایش داد. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی، مناطق بحرانی و مستعد به ماسه‌شویی را می‌توان تعیین کرد و به این ترتیب با تغییر طراحی، به سمت نوعی از طراحی مناسب با کم‌ترین عیب‌های احتمالی حرکت کرد. معادله‌های (۱) تا (۶) به‌روش حجم محدود در فضای دو بعدی حل می‌شوند، در حالی‌که الگوریتم معادله‌های جریان (ناویر-استوک) به‌روش شبه صریح (Semi-explicit) حل شده‌اند و معادله‌ی ردیابی سطح آزاد (معادله‌ی ۶) با الگوریتم سُلَا (SOLA) حل شده است [6,11,13]. پس از پایداری جریان، داده‌های به‌دست آمده به‌شکل آرایه ذخیره شده و به وسیله‌ی بخش دوم برنامه فراخوانی می‌شوند. با استفاده از داده‌های فوق در این بخش، تابع‌های پتانسیل جریان بر مبنای میدان‌های سرعت و فشار و به‌کمک عامل بدون بعد فشار محاسبه و رسم می‌شوند.

از آنجا که دبی جریان کانال‌های راه‌گاه‌های اصلی و فرعی تا پایان فرایند ریخته‌گری تقریباً ثابت می‌ماند، معادله‌های حاکم را می‌توان به‌خوبی با تابع

رابطه‌ی $A_0V_0 \approx A(x)V(x)$ تقریب زده شده است). بنابراین، به راحتی می‌توان الگوی جریان در راه‌باره‌ها را در هر یک از طرح‌های موجود در سمت چپ شکل (۱) رسم کرد. افزون بر این، می‌توان با رسم مقادیر C_{np}^i آن را شبیه به آنچه در عمل اتفاق می‌افتد، پیش‌بینی و نمایش داد. در این مرحله، با تحلیل نتایج شبیه‌سازی و جای‌گذاری آن‌ها در عامل فشار بدون بعد C_{np}^i ، می‌توان راه‌باره‌هایی را که منجر به ایجاد مناطق بحرانی و مستعد به ماسه‌شویی می‌شوند را با استفاده از معادله‌های (۱۴-الف و ب) طراحی کرد و با تغییر طراحی آن، به سمت طراحی مناسب با کم‌ترین عیب‌های احتمالی حرکت کرد.

نتایج و بحث

تصویر سمت راست در شکل (۲)، نتایج شبیه‌سازی جریان مذاب آلومینیم Al-11%Si را نشان می‌دهد و در تصویر سمت چپ، نتایج حاصل از عکس‌برداری برای دیواره‌ی طولی راه‌باره‌ای به ابعاد $a \times 2a$ و عمق ۱۰ میلی‌متر (مطابق با تصویر سمت چپ در شکل (۱)) مشاهده می‌شود. در این تصویر، شیب راه‌باره ۲۶ درجه و ارتفاع آن در محل اتصال به محفظه‌ی قالب ۰٫۷۵ و ارتفاع اولیه‌ی آن می‌باشد (به عبارت دیگر $h = 0.75a$ و $\theta = 26^\circ$). این به دلیل آن است که تغییر شیب راه‌باره با تغییر سطح مقطع آن وابسته است، و دلیل آن هم ثابت بودن طول راه‌باره (2a) و ضخامت ۱۰ میلی‌متری آن در تمامی طرح‌های شکل (۱) است. همان‌گونه که دیده می‌شود، الگوی جریان و روند پر شدن قالب در نتایج شبیه‌سازی و عملی تقریباً یکسانند، و این دلیلی بر صحت و دقت برنامه‌ی شبیه‌سازی جریان سیال است. مکان‌های نشان داده شده به شکل پیکان در تصویرهای سمت چپ، همان‌طور که در تصویرهای شبیه‌سازی نیز دیده می‌شوند، مکان‌های مستعد به ماسه‌شویی به دلیل ایجاد جریان داخلی گردابی و مغشوش هستند. این مناطق که در

است که به راحتی با روش‌های حل عددی حجم محدود حل می‌شود. اکنون با داشتن میدان‌های سرعت و به کمک ضریب توزیع فشار مطابق با معادله‌های (۱۳) و (۱۴)، تغییرات فشار دیواره در کانال راه‌باره را می‌توان محاسبه کرد [14]:

$$P_R + \frac{1}{2}\rho V_R^2 = P_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 \quad (13)$$

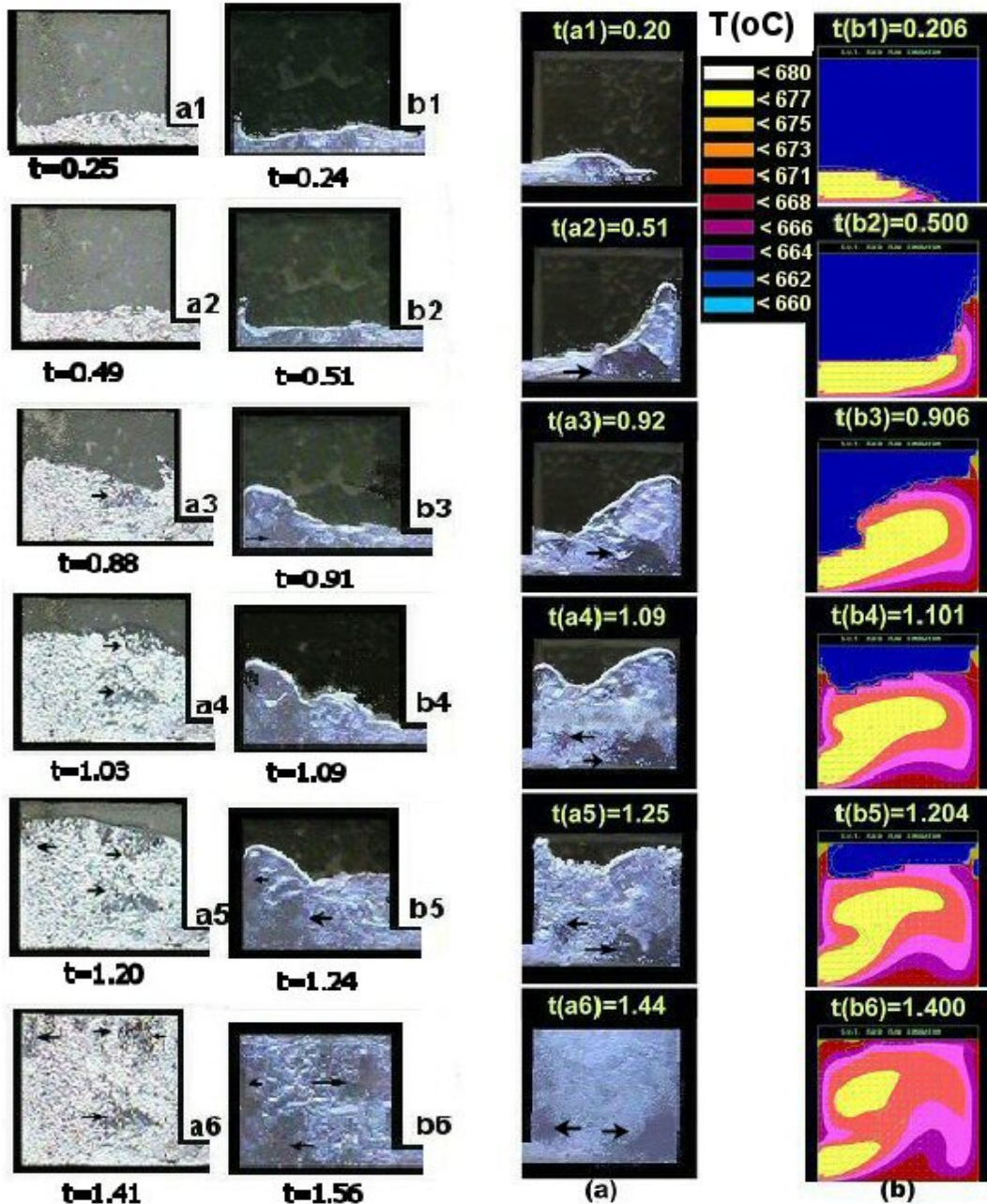
$$C_{np}^i = \frac{P_R - P_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = 1 - \left(\frac{V_R}{V_0}\right)^2 \quad (14-الف)$$

$$C_{np} = 1 - \left(\frac{A_{in}}{A_{out}}\right)^2 \quad (14-ب)$$

که در آن‌ها، V_R سرعت در هر نقطه درون راه‌باره و V_0 سرعت در دهانه‌ی ورودی راه‌باره و یا سرعت معادل در پاشنه‌ی راه‌گاه می‌باشد. به دلیل اصطکاک بین دیواره‌ی قالب با مذاب، این سرعت توزیع سهمی از درجه‌ی ۰٫۱۴ برای مذاب آلومینوم در نظر گرفته شد. افزون بر این، P_0 فشار در ورودی راه‌باره، P_R فشار در هر نقطه یا مقطع داخل راه‌باره، A_{in} و A_{out} به ترتیب مساحت سطح مقطع ورودی و خروجی راه‌باره، C_{np}^i عامل فشار بدون بعد مربوط به کانال راه‌باره (در این عامل، بالانویس i می‌تواند c یا w باشد، و یا وجود نداشته باشد)، هستند. در این صورت، مقادیر C_{np}^c و C_{np}^w به ترتیب با استفاده از سرعت‌های بیشینه در مرکز راه‌باره و سرعت‌های کمینه در کف (یا دیواره‌ی ماسه‌ای) راه‌باره محاسبه می‌شوند. اگر بالانویس وجود نداشته باشد، مقدار عامل فشار بدون بعد C_{np} بر حسب مساحت سطح مقطع ورودی و خروجی راه‌باره محاسبه می‌شود (در معادله‌ی (۱۴-ب)، به جای مساحت سطح مقطع خروجی از مساحت سطح مقطع در هر نقطه استفاده شده است تا نمودار تغییرات C_{np} به دست آید. این معادله با استفاده از

تصویرهای شکل (۳)، نتایج عملی را برای دو طرح مختلف از راه‌بارهای شکل (۱) نشان می‌دهند.

تصویرهای عکس برداری شده کدر هستند، به احتمال بسیار زیاد به دلیل تحمل تنش‌های برشی ناشی از جریان گردابی حاوی ذرات ماسه می‌باشند.



شکل ۳ مناطق ماسه‌شویی در دو طراحی نامناسب راه‌بار

$$a1 - a6: [\theta = 56^\circ, h = 0.25a]$$

$$b1 - b6: [\theta = 71^\circ, h = 0.25a]$$

شکل ۲ شبیه‌سازی جریان مذاب برای تعیین صحت نرم‌افزار مورد

استفاده. پیکان‌ها مناطق ماسه‌شویی را نشان می‌دهند

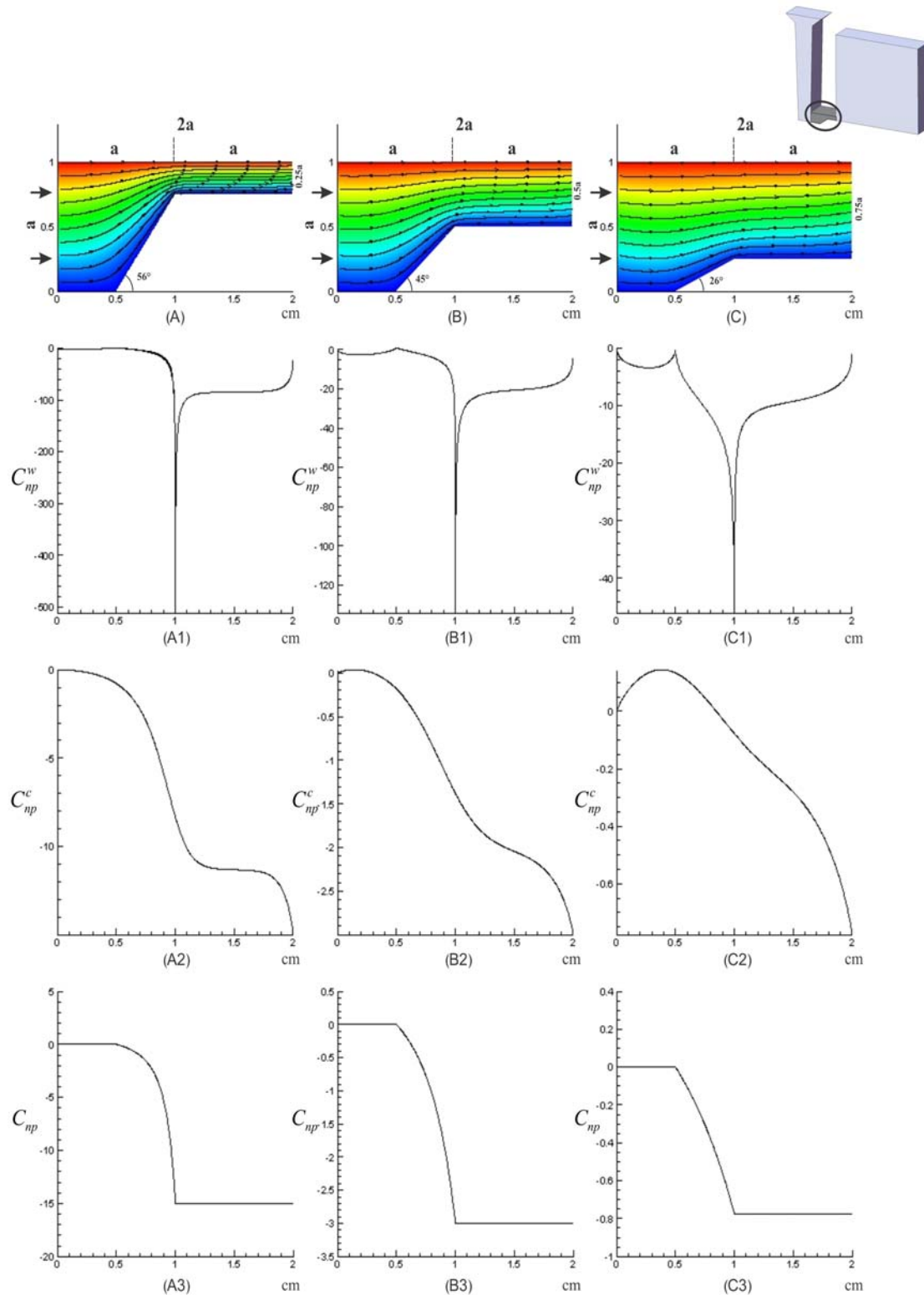
$$[\theta = 26^\circ, h = 0.75a]$$

فشار بدون بعد (C_{np}^i) رخ می‌دهد با افزایش شیب و کاهش مقطع راه‌بار تغییر می‌کند. همان‌گونه که در سه نمودار (A3)، (B3) و (C3) در شکل (۴) و سه نمودار (D3)، (E3) و (F3) در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقدار فشار بدون بعد مقطع راه‌بار، C_{np} ، در هر یک از طرح‌ها به ترتیب از ۱۵- به ۳- و ۰.۸- تغییر می‌کند. بنابراین، کاهش سطح مقطع در اعمال فشار به دیواره‌های کانال راه‌بار بسیار موثر خواهد بود. این تأثیر در صورت کمبود میزان چسب ماسه و کاهش استحکام آن، منجر به وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی می‌شود. مقدار عددی تغییرات فشار بدون بعد دیواره‌ی راه‌بار (C_{np}^w) مربوطه به سه طرح (A)، (B) و (C) با میزان آن برای سه طرح (D)، (E) و (F) کاملاً متفاوت است، در حالی که مقدار فشار مقطع راه‌بار (C_{np}) برای این دو طرح تقریباً یکسان است. این نتایج در نمودارهای شکل (۶) و (۷) دیده می‌شوند. مقدار C_{np}^w برای طرح (A) به حدود ۵۰۰- و برای طرح (D) به حدود ۸۰۰- می‌رسد، در حالی که عامل C_{np} مربوط به مقطع در این دو نمودار مقدار تقریباً ثابت ۱۵- را داشته است.

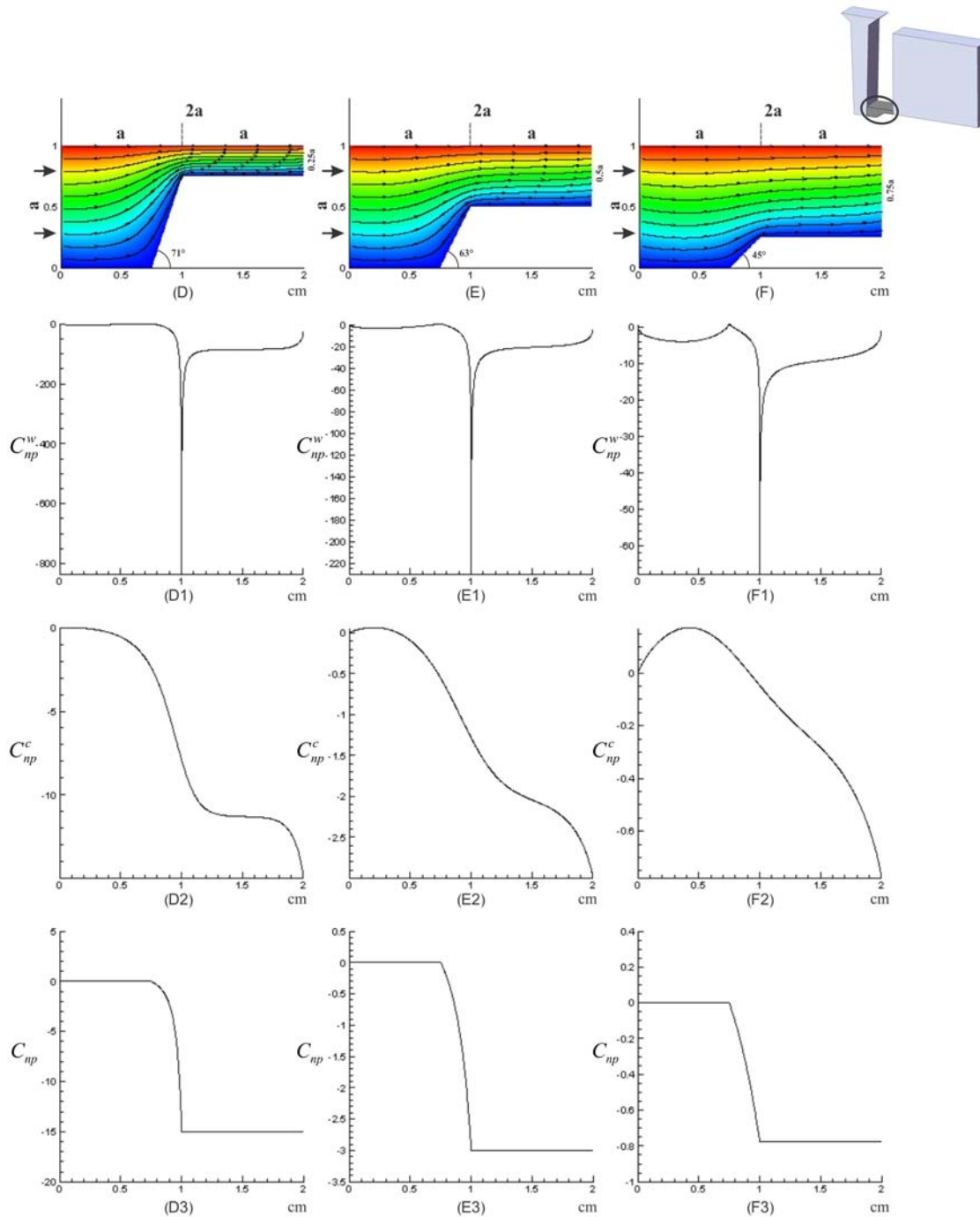
مقدار عددی تغییرات فشار بدون بعد راه‌بار (C_{np}) برای سه طرح (A)، (B) و (C) با میزان آن در طرح‌های (D)، (E) و (F) تفاوتی ندارد. این واقعیت در نمودارهای شکل (۶) و (۷) دیده می‌شود. با این حال، مقادیر سطح زیر منحنی C_{np}^c بر حسب فاصله در طول راه‌بار در شکل (۶) از طرح (A) به (C)، و در شکل (۷) از طرح (D) به (F)، افزایش یافته‌اند، و این در حالی است که در آن‌ها عامل C_{np} مربوط به مقطع مقدار تقریباً ثابت ۱۵- را داشته است. اگر این نتیجه را به اصطکاک دیواره‌ی راه‌بار ارتباط دهیم، وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی در دو طرح (A) و (D) که بیش‌ترین شیب و کم‌ترین مقطع خروجی را دارند، دوباره تأیید می‌شود. نتایج عملی مربوط به این دو طرح در شکل (۳) نشان داده شده‌اند (تصویرهای a1 تا a6 و b1 تا b6).

تصویر سمت راست در شکل (۳) مربوط به طرحی است که در آن راه‌بار داری شیب ۵۶ درجه است و ارتفاع مقطع خروجی (محل اتصال به محفظه‌ی قالب) $0.25 \times a$ ، $h = 0.25 \times a$ مقطع ورودی است (ارتفاع مقطع راه‌بار قبل از باریک شدن می‌باشد). تصویر سمت چپ نیز مربوط به طرحی است که در آن ارتفاع راه‌بار هنگام اتصال به محفظه‌ی قالب 0.75 ارتفاع اولیه ($h = 0.75 \times a$) و شیب راه‌بار ۲۶ درجه است. در این حالت، دهانه گشادتر و شیب ملایم‌تر است. به نظر می‌رسد که با افزایش شیب و کوچک شدن دهانه‌ی راه‌بار، میزان ماسه‌شویی و تعداد مناطق مشخص شده با پیکان افزایش یافته و الگوی جریان مذاب در قالب آشفته‌تر است. در شکل (۴)، نتایج شبیه‌سازی خطوط جریان در سه طرح مختلف راه‌بار، مربوط به طرح‌های (A)، (B) و (C) که به ترتیب دهانه‌ی اتصال راه‌بار به محفظه‌ی قالب در آن‌ها گشادتر شده و شیب آن کاهش می‌یابد، مشاهده می‌شود. در زیر هر طرح، تغییرات عامل فشار بدون بعد C_{np}^i بر مبنای رابطه‌های (۱۴- الف و ب) در طول کانال راه‌بار نشان داده شده‌اند. در همه‌ی این طرح‌ها، جهت جریان از سمت چپ راه‌بار به سمت راست آن، یعنی محل اتصال راه‌بار به محفظه‌ی قالب، می‌باشد.

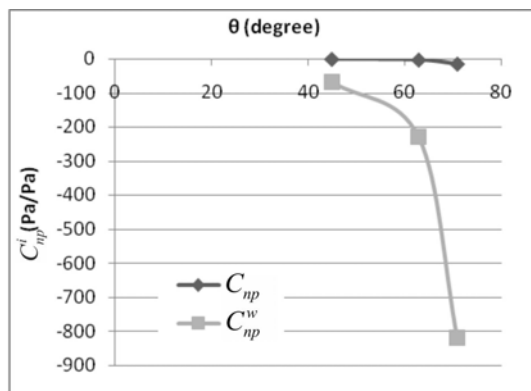
در شکل (۵)، نتایج شبیه‌سازی خطوط جریان در سه طرح مختلف راه‌بار، مربوط به طرح‌های (D)، (E) و (F) که به ترتیب دهانه‌ی اتصال راه‌بار به محفظه‌ی قالب در آن‌ها گشادتر شده و شیب آن کاهش می‌یابد، نمایش داده شده‌اند. طول کل راه‌بار در همه‌ی طرح‌های (A) تا (F) ثابت و دو برابر ارتفاع آن است، و بنابراین کاهش شیب راه‌بار طول کل آن را تغییر نمی‌دهد. به عبارت دیگر، طول گلوبی شدن افزایش یافته و طول ناحیه‌ی صاف قبل از گلوبی شدن کاهش می‌یابد، در حالی که طول پس از ناحیه‌ی گلوبی شدن همواره ثابت و برابر با ارتفاع راه‌بار باقی خواهد ماند. در همه‌ی طرح‌ها، طول منطقه‌ای که در آن تغییرات



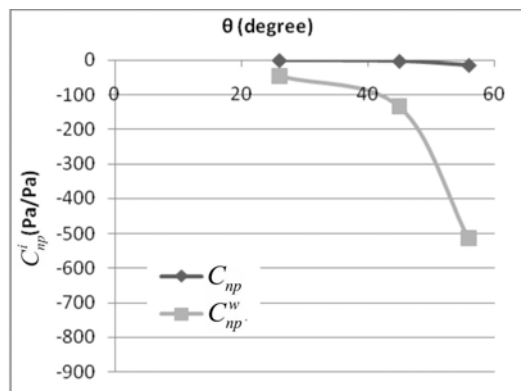
شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی خطوط جریان و عامل بدون بعد فشار دیواره‌ی پایینی (C_{np}^w)، بالایی (C_{np}^c) و مقطع راه‌بار (C_{np}) برای سه طرح راه‌بار؛ (A): $[\theta = 56^\circ, h = 0.25a]$ ، (B): $[\theta = 45^\circ, h = 0.5a]$ و (C): $[\theta = 26^\circ, h = 0.75a]$.



شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی خطوط جریان و عامل بدون بعد فشار دیواره‌ی پایینی (C_{np}^w)، بالایی (C_{np}^c) و مقطع راه‌بار (C_{np}) برای سه طرح راه‌بار (D) $[\theta = 71^\circ, h = 0.25a]$ ، (E) $[\theta = 63^\circ, h = 0.5a]$ و (F) $[\theta = 45^\circ, h = 0.75a]$



شکل ۷ تأثیر شیب راه‌بار بر عامل فشار بدون بعد برای دیواره‌ی پایینی، به‌دست آمده از اطلاعات موجود در شکل (۵)

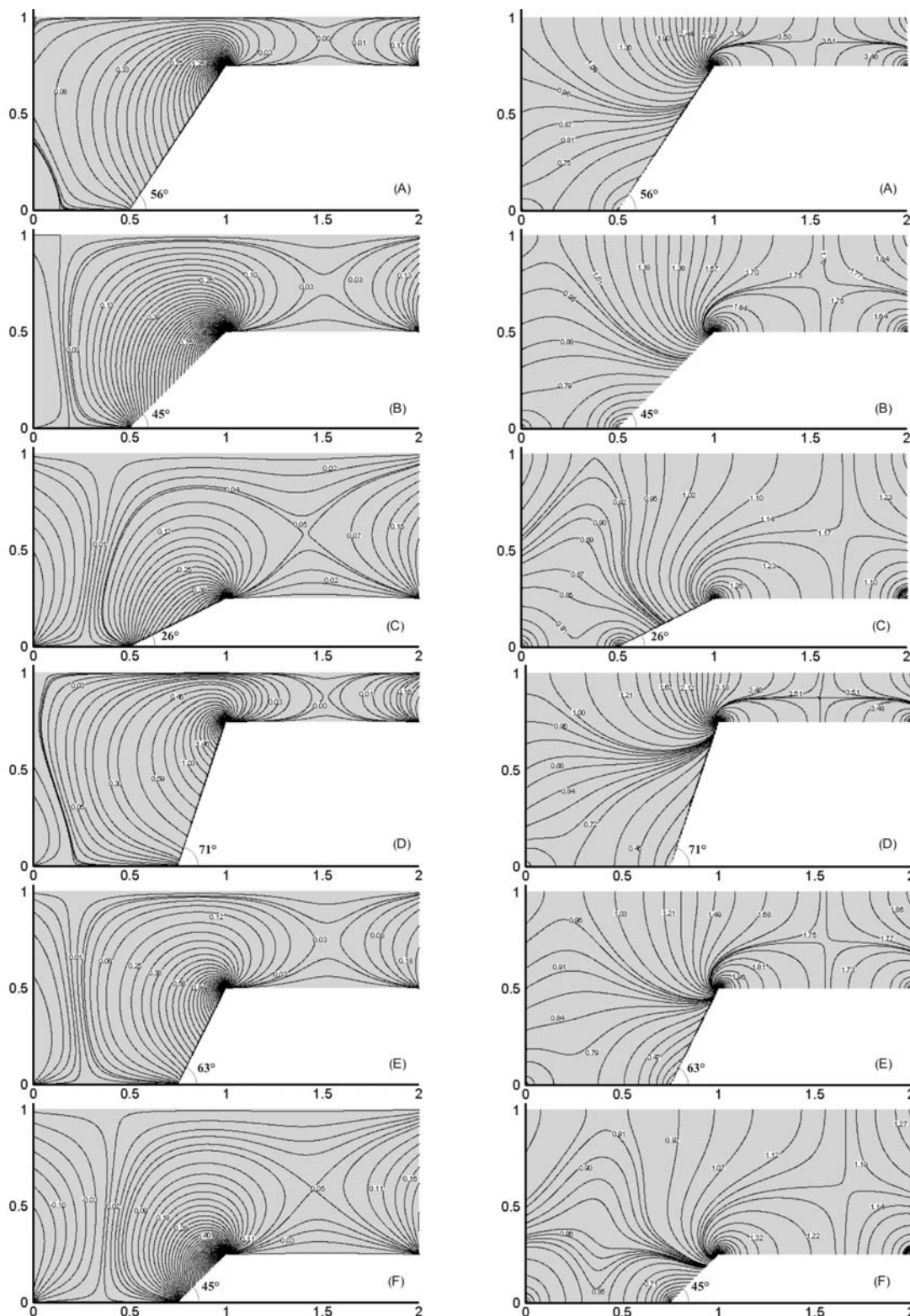


شکل ۶ تأثیر شیب راه‌بار بر عامل فشار بدون بعد برای دیواره‌ی پایینی، به‌دست آمده از اطلاعات موجود در شکل (۴)

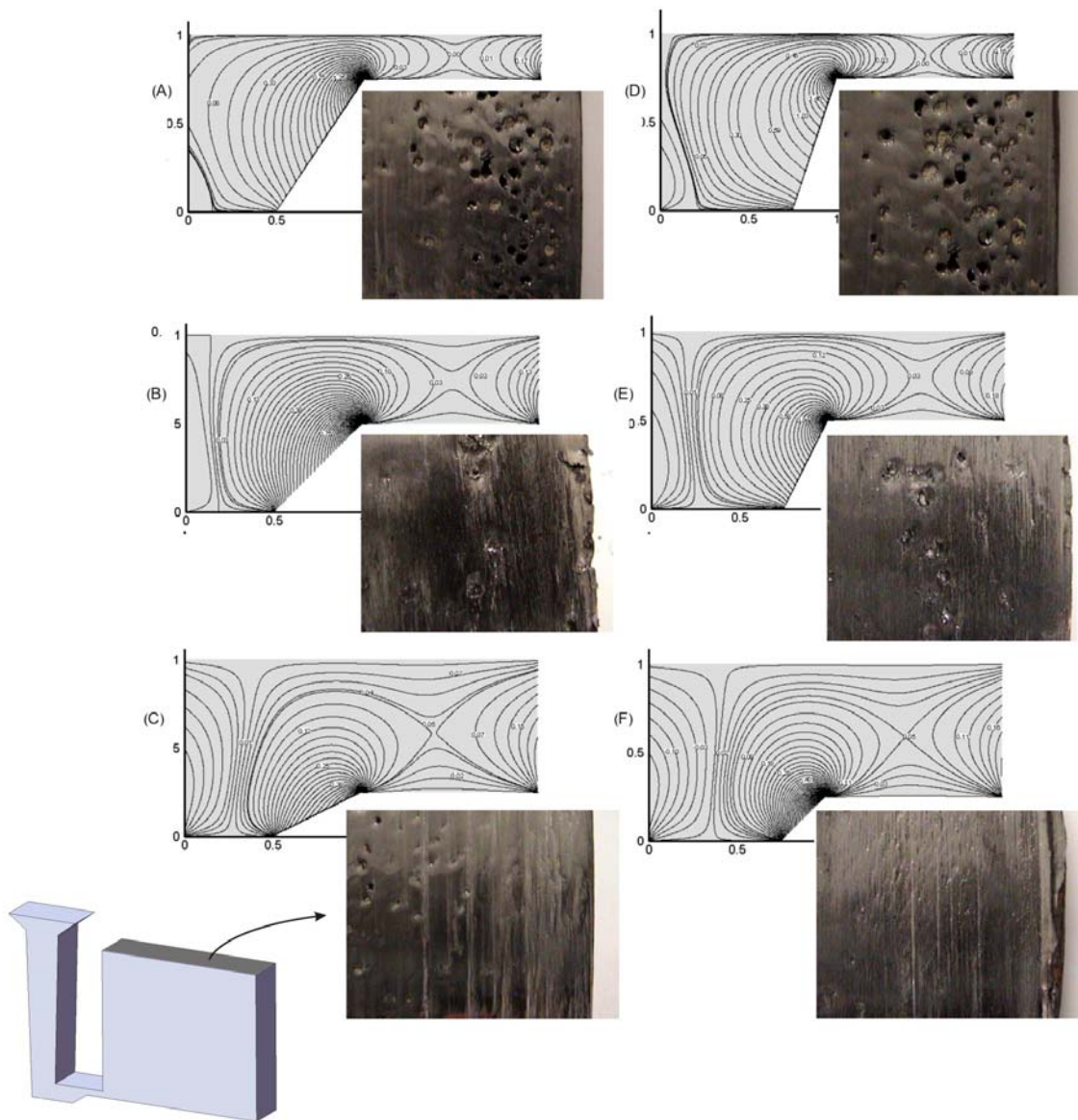
هر نوع طراحی راه‌بار به کاهش ماسه‌شویی منجر نمی‌شود، زیرا کاهش ماسه‌شویی تابع الگوی جریان است که از نوع طراحی انجام شده در قالب نتیجه می‌شود. از آن‌جا که این الگو به‌روشن‌تر قابل پیش‌بینی نیست، رفتار فشار مذاب درون راه‌بار می‌باید به‌کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ریخته‌گری تعیین شود و پس از آن، با تغییر طراحی هندسه‌ی شیب و مقطع راه‌بار و کنترل عامل‌های بدون بعد C_{np} و C_{np}^w ، پدیده‌ی ماسه‌شویی به کم‌ترین میزان ممکن کاهش داده شود.

در شکل (۹)، مقاطع تراش‌کاری شده از صفحه‌ی نازک آلومینیومی متعلق به طرح‌هایی که شبیه‌سازی آن‌ها را بحرانی تشخیص داده است، نشان داده شده‌اند. با تمرکز در تصویرهای عملی و شبیه‌سازی می‌توان دریافت که در راه‌بارهایی با زاویه‌ی شیب ۷۱ و ۵۶ درجه، با کاهش سطح مقطع خروجی مذاب راه‌بار (محل اتصال آن به محفظه‌ی قالب) به‌میزان یک چهارم سطح مقطع ورودی یا اولیه‌ی راه‌بار، بیش‌ترین مقدار ماسه‌شویی در صفحه‌ی نازک ریخته‌گری رخ خواهد داد. این پدیده ناشی از مقدار بیشینه‌ی تغییرات C_{np}^w می‌باشد. بنابراین، طراحی راه‌بار با طرح‌های نوع A و D کاملاً غیر اصولی و غیر مهندسی است، و نمی‌باید از آن‌ها در تکنولوژی طراحی قطعات ریخته‌گری استفاده کرد.

نتایج بررسی میدان‌های سرعت در جهت‌های x و y به‌ترتیب در شش تصویر سمت راست و چپ شکل (۸) ارائه شده‌اند. در این شکل، هر تصویر از بالا به پایین به‌ترتیب مربوط به طرح‌های (A) تا (F) می‌باشند. همان‌گونه که مشخص است، بیش‌ترین تمرکز مربوط به نوک تیز زاویه شیب راه‌بار است. نتایج عملی هم بیش‌ترین سایش ماسه‌ها را در این نقاط نشان می‌دهند. به این ترتیب واضح است که نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با مشاهدات تجربی دارند. برای بررسی پدیده‌ی ماسه‌شویی، میزان چسب ماسه‌ی قالب‌گیری عمداً کم‌تر در نظر گرفته شد تا وقوع این پدیده واضح‌تر به نظر آید. بنابراین، پس از انجام صفحه‌ی نازک آلومینیومی، بخش بالایی آن به‌دلیل سبکی ماسه نسبت به مذاب تراش‌کاری شد. شکل (۹) تصویرهایی از کف تراشی لبه‌ی فوقانی این صفحه‌ی ریخته‌گری شده با شش طرح (A) تا (F) برای راه‌بارهای به طول ۲۰ میلی‌متر، و ارتفاع و عمق ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طرح‌های (C) و (F) کم‌ترین میزان ذرات ماسه وجود دارند، در حالی‌که طرح‌های (A) و (D) بیش‌ترین مقدار ذرات ماسه را دارند. همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، دلیل این پدیده شیب تند و کوچکی مقطع تماس راه‌بار به قالب می‌باشد. واضح است که



شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی میدان‌های سرعت u (تصویرهای سمت راست) و v (تصویرهای سمت چپ) به ترتیب در جهت‌های X و Y . این نتایج مربوط به طرح‌های (A) تا (F) به ترتیب از بالا به پایین هستند.



شکل ۹ مقاطع تراش‌کاری شده از بالای محفظه‌ی قالب آلومینیومی به ارتفاع ۱۲ میلی‌متر به سمت پایین، حاوی ذرات ماسه و حباب‌هایی که در درون آن‌ها ماسه وجود دارد (برای هر یک از طرح‌های مربوط به راه‌بارهای A تا F)، به همراه نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به میدان مؤلفه‌ی عمودی سرعت

به کمک این نرم‌افزار می‌توان وقوع جریان‌های آشفته و گردابی حین پر شدن قالب را تشخیص داد.

۲- نتایج به دست آمده نشان دادند که طرح‌های A:

$$[\theta = 71^\circ, h = 0.25a] \text{ و } [D = 0.25a]$$

به ترتیب مربوط به راه‌بارهایی با شیب

۵۶ و ۷۱ درجه و با سطح مقطع خروجی برابر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بررسی و شبیه‌سازی تأثیر شش طرح راه‌بار با طول و ارتفاع مساوی بر پدیده‌ی ماسه‌شویی، نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- نرم‌افزار شبیه‌سازی به کار رفته در پژوهش حاضر می‌تواند ابزار خوبی برای پیش‌بینی احتمال ماسه‌شویی و تجمع ذرات ماسه در قالب باشد.

تغییرات تا حدودی می‌توان از اثرات زیان‌بار نوک تیز آن‌ها در وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی جلوگیری کرد.

۴- نتایج نشان دادند که برای کاهش میزان ماسه‌شویی، شیب راه‌بار نباید بیش از ۲۶ درجه باشد. افزون بر این، بهتر است که کاهش سطح مقطع راه‌بار بیش از ۲۵ درصد نباشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمات‌های گروه شبیه‌سازی دانشگاه صنعتی شریف و مرکز پژوهش‌های رازی، به خصوص جناب آقای دکتر دوامی و هم‌کارانشان، برای تهیه‌ی برخی از تصاویرهای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

با یک چهارم سطح مقطع ورودی، به دلیل برخورداری از بیش‌ترین شیب و کم‌ترین مقطع راه‌بار در محل اتصال به محفظه‌ی قالب، دارای بیش‌ترین میزان ماسه‌شویی هستند. اما طرح‌های C: $[\theta = 26^\circ, h = 0.75a]$ و D: $[\theta = 45^\circ, h = 0.75a]$ به ترتیب مربوط به راه‌بارهایی با شیب ۲۶ و ۴۵ درجه و با سطح مقطع خروجی برابر با سه چهارم سطح مقطع ورودی، مناسب‌ترین طرح‌های راه‌بار از نقطه نظر عدم وقوع پدیده‌ی ماسه‌شویی هستند.

۳- مکان شیب تند راه‌بار در محل گلویی شدن به دلیل تمرکز بالاترین عامل بدون بعد فشار و نیز وجود گردابه‌ی جریان (شیب تغییرات سرعت)، مستعدترین محل برای ماسه‌شویی است. بنابراین، با انحنا دادن به مکان‌هایی از راه‌بار با شیب تند

مراجع

1. Richard W. Heine, Carl R. Loper, Philip C. Rosenthal, "Principles of Metal Casting", McGraw-Hill Publications, 2nd edition, (1967).
2. Campbell, J., Castings, Butterworth publication, Oxford University, second edition, (2003).
3. Campbell, J., Cracked liquid metals create defective castings, *Ingenia*, 1(4), 35-39, (2000).
4. H. Hu, B., Tong, K.K., Niu, X. P., Pinwill, I., "Design and optimisation of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, pp.128-133, (2000).
5. Mirbagheri, S.M.H., Dadashzadeh, S., A. K. Serajzadeh., Taheri and Davami, P., "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).
6. Wang, C.W., "Computer modeling of fluid flow and heat transfer in metal casting", Ph.D. Thesis, Pittsburgh, university, USA, (1990).
7. Kermanpur, A., Mahmoudi, Sh., Hajipour, A., "Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, pp. 62-68, (2008).

۸. میرباقری سیدمحمدحسین، دوامی پرویز، "مدل سازی افت اصطکاکی مذاب در داخل سیستم راه گاهی"، دومین کنگره سالانه مهندسی متالورژی ایران، صفحه ۹۷، (۱۳۷۷).

۹. منصور آبادی، میرباقری، وراهرام، دوامی، "بررسی اثر سیستم راه‌گاهی بر روی نحوه پر شدن قالب در ریخته‌گری به روش فوم فداشونده"، دهمین کنگره سالانه مهندسين متالورژی ایران، (۱۳۸۵).
۱۰. میرباقری، محرمی، دوامی، "مدل سازی جریان مذاب در سیستم راه‌گاهی در ریخته‌گری به روش فوم فداشونده"، سمپوزیوم فولاد، صفحه ۴۱۰، (۱۳۷۹).
11. Mirbagheri, S.M.H., Shrinparvar, M., Ashory, H., and Davami, P., "Simulation of surface roughness on the flow pattern in the casting process", *Materials & Design*, Vol. 25(8), pp. 55-661, (2004).
12. White, F.M., *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Publications, 4th edition, (1998).
13. Elliot, S.D., "Fluid flow aspects of solidification modeling; simulation of low pressure die casting", Ph.D. Thesis, University of Queensland, (1999).
14. Herrmann Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, Springer Publications, 8th edition, (2000).
۱۵. دوامی پرویز، "مبانی تغذیه‌گذاری در قطعات ریختگی"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، (۱۳۶۰).
۱۶. خسروی رحمان، "اصول طراحی سیستم‌های راه‌گاهی و تغذیه‌گذاری چدن‌ها"، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، (۱۳۶۸).
17. Vijayaram, T.R., S. Sulaiman, A.M.S. Hamouda, M.H.M. Ahmad, Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, pp. 29-33, (2006).
18. *The Foseco Foundryman's handbook*, 9th edition, Pergamon Press, (1982).