

# مدلسازی انتقال حرارت در فصل مشترک مذاب و قالبهای فولادی H13 و چدن خاکستری در دمای پیشگرم قالب

سید محمد حسین میرباقری<sup>i</sup>؛ مرتضی شیرین پرور<sup>ii</sup>

## چکیده

در پژوهش پیشرو، ضریب انتقال حرارت بین قطعه ریختگی و قالبهای فولاد H13 و چدن خاکستری بدون حضور پوشش برای آلیاژهای آلومینیوم A356 اندازه گیری شد. به منظور بررسی اثر فشار در شرایطی مانند آنچه در ریخته گری تحت فشار کم حاکم است، توسط یک قالب مجهز به پیستون، فشار مناسب به مذاب اعمال شد. به منظور برقرار کردن شرایط انتقال حرارت یک بعدی قالب استوانه ای گچی تهیه و سطوح بالا و پایین قالب گچی یکبار توسط فولاد H13 و بار دیگر توسط چدن خاکستری قالبگیری شد. سپس تغییرات مقاومت حرارتی فصل مشترک قالب - ریختگی با زمان به کمک یک سیستم ثبت اطلاعات در کامپیوتر ذخیره شد و با استفاده از روش 'معکوس حرارتی' این ضریب، مدلسازی شد. در پایان، شبیه سازی انتقال حرارت با استفاده از مدل ارائه شده؛ به کمک روش عددی اختلاف محدود برنامه نویسی شد سپس نتایج شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه ریختگی برای هر دو قالب، مورد مقایسه قرار گرفت و برای هر کدام بعلاوه تفاوت ذاتی خواص آنها، مدل جداگانه ای ارائه شد. مقایسه نتایج بدست آمده از کد شبیه سازی حاضر با اندازه گیریهای تجربی انجام شده دقت برنامه شبیه سازی حاضر را مناسب ارزیابی می کند

کلمات کلیدی: فصل مشترک ریختگی - قالب، ضریب انتقال حرارت، ریخته گری تحت فشار کم، شبیه سازی عددی

## *Modeling of Heat Transfer at the Interface of the Metal-Mould for H13 Steel and Gray Iron Moulds at Mould Preheat Temperature*

S.M.H. Mirbagheri, M. Shrinparvar

### ABSTRACT

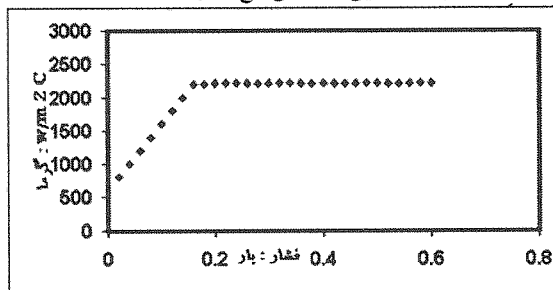
In this paper, the heat transfer coefficient on the A356 alloy metal-mould interface for H13 steel and Gray Iron moulds was measured and modeled. Conditions as same as the low-pressure casting conditions were imposed by adding a piston, into the sprue channel. In order to establish one dimensional heat transfer condition, a cylindrical chalky sleeve was placed around of the mould cavity, and then metallic chills (H13 and Gray Iron) are placed at the bottom and the top of the mould cavity. Once pouring, the time-temperature (T-t) curves at the interface of chill-mould were saved and plotted by a data acquisition system. Then a mathematical model was introduced for the heat transfer coefficient of the metal mould interface based on the experimental data by utilizing of "inverse heat problems" method. A simulation code of heat transfer was developed by finite difference method (FDM) that it could simulated distribution of heat transfer into at the mold and the cast part. The results of this code showed a sufficient agreement between the simulation and the experimental data.

**KEYWORDS:** metal-mould interface, heat transfer coefficient, low pressure casting, Numerical simulation

<sup>i</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر - Email: smhmirbagheri@aut.ac.ir

<sup>ii</sup> - کارشناس ارشد مهندسی مواد - واحد تضمین کیفیت شرکت ذوب آهن اصفهان

نیروی که آنها در پژوهش خود اعمال کردند در محدوده ۲۵۰ کیلوگرم تا ۳۰ تن بوده است که با توجه به تجهیزات مورد استفاده معادل ۲/۱ تا ۳۷۴/۵ بار می‌باشد. همین موضوع در ریخته گری ثقیل توسط Davies بررسی شد [۵]. وی اتفاقاتی که حین انجماد در فصل مشترک رخ می‌دهد را به سه مرحله تقسیم کرده است: ۱- فلز مذاب در تماس با پوشش قالب. ۲- فلز منجمد در تماس با پوشش قالب. ۳- پوسته جامد تشکیل شده که با انقباض خود از قالب فاصله می‌گیرد. به عقیده وی اثر فشار مذاب روی فصل مشترک بسیار مهم است به طوری که ضریب انتقال حرارت در مرحله سوم برای حالتی که ستون مذاب آلومینیوم خالص  $17/5 \text{ cm}$  است (معادل  $0/04$  بار) برابر با  $1100 \text{ W/m}^2\text{C}$  است در حالی که اگر ارتفاع به  $74 \text{ cm}$  یا  $0/16$  بار) برسد این مقدار به  $2200 \text{ W/m}^2\text{C}$  می‌رسد. مطابق شکل (۱) از نظر او با افزایش بیشتر فشار، دیگر افزایشی در مقدار ضریب جابجایی حرارتی رخ نخواهد داد.



شکل ۱- نمودار ضریب انتقال حرارت - فشار در فصل مشترک آلومینیوم خالص - قالب چدنی [۲]

اما مشخص نیست نتایج به دست آمده توسط Davies مربوط به سقف، کف یا دیواره قالب است. Sharma و Krishnan دو مدل فیزیکی برای بررسی ضریب جابجایی حرارتی در سقف و کف قالب طراحی کردند [۶]. اما حداکثر فشاری که به کاربرد شده  $15 \text{ cm}$  ستون مذاب آلومینیوم LM۲۴ معادل  $0/04$  بار بود. Berry و Woodbury نیز انتقال حرارت در فصل مشترک را در کف و سقف بررسی کردند [۷]. آنها بر خلاف Sharma و Krishnan به این نتیجه رسیدند که هدایت تماسی در سقف بیشتر است، که نشان می‌دهد تاثیر انتقال حرارت به روش جابجایی بیشتر از آن چیزی است که تصور می‌شود. در پژوهش حاضر از آنجا که در ریخته گری low pressure قالبها بیشتر  $H13$  و یا چدن خاکستری بوده لذا تحقیق حاضر به نوعی بررسی مقاومت تماسی این دو نوع قالب رایج در صنعت ریخته گری Low pressure را مورد ارزیابی قرار داده و برای هر کدام از قالب های گفته شده یک مدل ضریب انتقال حرارت در سطح تماس قالب - مذاب ارائه داده است که قابل اتصال روی کدهای شبیه سازی انجماد بوده. اعمال این مدل می‌تواند دقت

سرعت سرد شدن یا تاریخچه حرارتی یک قطعه ریخته گری تعیین کننده نوع ریز ساختار و خواص آن پس پایان فرایند انجماد است. نرخ خروج حرارت از مذاب توسط خواص قالب کنترل می‌شود. در این میان نقش جنس قالب در شکل گیری یک فاصله هوایی بین مذاب و قالب در کنترل نرخ انتقال حرارت بسیار حائز اهمیت است. این فاصله هوایی در اثر اندرکنش بین انقباض ریخته گری و انبساط قالب و حبس شدن هوا و گاز در فصل مشترک سطوح خارجی ریخته گری و سطوح محفظه قالب به وجود می‌آید. سرعت انتقال حرارت در این فاصله که ممکن است از هوا، هیدروژن، بخار و گازهای دیگر، پر شده باشد بسیار آهسته تر از سرعت هدایت حرارت در داخل جرم یک فلز می‌باشد. بنابراین در ریخته گری در قالب های فلزی شکل گیری فاصله یاد شده بسیار مهم و در ریخته گری در قالب های ماسه ای تقریباً قابل چشم پوشی است [۱]. جنس و دمای پیشگرم قالب، نوع و ضخامت پوشان، فشار، و نوع آلیاژ از عوامل دیگری هستند که بر انتقال حرارت در فصل مشترک ریخته گری - قالب اثر می‌گذارند. کیفیت انتقال حرارت در فصل مشترک و میزان تاثیر عوامل یاد شده بر آن توسط پارامتری به نام ضریب انتقال حرارت معادل فصل مشترک، توصیف می‌شود. Pehlke [۱] و Chiesa [۲] روش های برای تخمین آن ارائه کرده اند. Hwang تاثیر ضخامت و جنس پوشش را بر ضریب جابجایی حرارتی بررسی کرده است [۳]. او نشان داد که ضریب اشاره شده تنها به خواص حرارتی پوشش بستگی ندارد بلکه تحت تاثیر شرایط حاکم بر فصل مشترک همچون میزان چسبندگی پوشش و جنس قالب نیز تغییر می‌کند. در مورد تاثیر ضخامت پوشش به جز موارد اندکی، نتایج تحقیقات همه محققان بیانگر کاهش انتقال حرارت با افزایش ضخامت پوشش است. افزایش فشار به مذاب توسط افزایش ارتفاع مذاب در سیستم راهگاه و همینطور افزایش فشار توسط نیروهای خارجی (مانند روش ریخته گری تحت فشار) روند شکل گیری فاصله هوایی در فصل مشترک را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین فشار ستون مذاب در ریخته گری ثقیل، فشار هوا یا گاز خنثی در ریخته گری تحت فشار کم و فشار پیستون در ریخته گری تحت فشار زیاد می‌تواند بر مقدار ضریب جابجایی حرارتی مورد بررسی و مدلسازی ریاضی قرار گیرد. Nishida و Matsubara تاثیر فشار بر انتقال حرارت فصل مشترک را در محدوده فشارهای مربوط به ریخته گری تحت فشار بالا بررسی قرار دارند [۴]. آنها نشان دادند انتقال حرارت در فصل مشترک با به کارگیری فشار به مقدار محسوسی بهبود می‌یابد.

زمان انجماد را ۰-۷۵٪ نسبت به واقعیت، افزایش دهد.

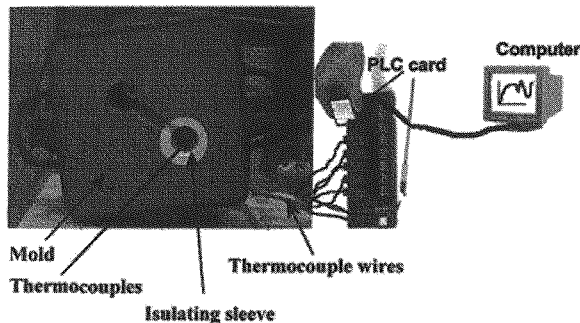
## ۲- روش تحقیق

### ۱-۲- آزمایشهای عملی

در این تحقیق برای اندازه گیری ضریب جابجایی حرارتی (h) در فصل مشترک (قالب - ریختگی) از آلیاژ A۳۵۶ استفاده شد. مطابق شکل ۲ یک قالب گچی استوانه ای به همراه یک سیستم راهگامی کف ریز شامل پیستونی که قادر است با حرکت در داخل راهگام بار ریز، فشار مورد نظر را به مذاب اعمال نماید طراحی و ساخته شد. به منظور بررسی اثر جنس قالب بر ضریب انتقال حرارت در کف و سقف قالب در آزمایش اول از دو قطعه (مبرد) فولادی H۱۳ به عنوان وجه بالا و پایین قالب و در آزمایش بعدی از چدن خاکستری استفاده شد. زیرا این دو فلز، معمولی ترین ماده برای ساخت قالب های ریخته گری تحت فشار کم هستند. اما دیواره استوانه ای قالب از جنس گچ عایق انتخاب شد تا انتقال حرارت در محور استوانه بصورت یک بعدی قابل تحلیل باشد. سپس در کنار مبردهای فلزی از یک المنت حرارتی برای پیشگرم نمودن سقف و کف قالب استفاده شد. به منظور تغییر مقدار فشار وارده بر سقف ریختگی از یک سیستم هیدرولیک اعمال فشار در راهگام استفاده شد. این سیستم روی سه ارتفاع فشار ۱۰، ۳۰ و ۵۰ تنظیم شد، که بلافاصله بعد از پر شدن قالب، قادر به اعمال فشارهای یاد شده بر مذاب بود.

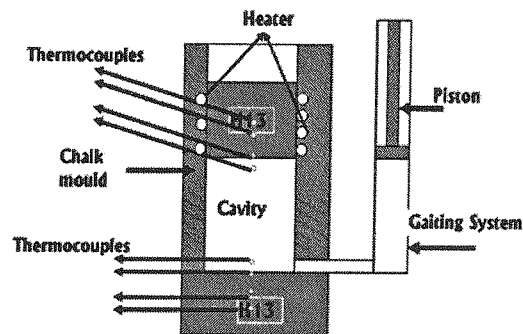
آنالوگ به دیجیتال (A/D) با قدرت پردازش HG۸۵۰ PLC متصل شد و این کارت خود به یک کامپیوتر برای ثبت داده ها وصل می شد. سپس با کمک نرم افزار Genie داده های حرارتی به صورت منحنی های دما - زمان در کامپیوتر رسم و ضبط می شدند. در همه سیستم های طراحی شده، وجوه فلزی قالب توسط یک گرمکن الکتریکی مجهز به یک پوشش سرامیکی احاطه شده بودند. قالب ها قبل از نوب ریزی پیشگرم می شدند و سپس مذاب آلیاژ A۳۵۶ ریخته گری می شد. بسته به هر آزمایش، فشار خارجی مورد نظر توسط سیستم هیدرولیک (تنظیم ارتفاع راهگام بار ریز) بر مذاب داخل قالب اعمال می شد.

از طرفی دیگر برای بکارگیری روش بسیار کارآمد "معکوس حرارتی" با ایجاد جداسازی مکانی فصل مشترک قالب - مذاب، با به حداقل رساندن اختلاف فاصله بین ترموکوپل ها، دماهای اندازه گیری شده توسط سیستم ثبت اطلاعات بر اساس روش عددی اختلاف محدود (که در بخش شبیه سازی توضیح داده شده است) به ضریب انتقال حرارت معادل فصل مشترک (یا h معادل) تبدیل شد. شکل (۳) نمایی از مقطع قالب در سطح درجه زیری را به همراه کارگذاری ترموکوپلها در قالب و اتصال آنها به کارت ثبت کننده داده ها نشان می دهد.



شکل ۳- نمایی از کارگذاری ترموکوپلها در قالب و اتصال آنها به سیستم ثبت کننده داده ها.

آزمایشهای ریخته گری با سه ارتفاع راهگامهای بار ریز متفاوت ۱۰، ۳۰ و ۵۰ cm طراحی شدند. در هر آزمایش نوب ریزی آلیاژ A۳۵۶ در دمای  $775^{\circ}C$  و پیشگرم قالب فلزی تا دمای  $500^{\circ}C$ ، بتدریج برای دو قالب چدنی و فولادی H۱۳ انجام شد. سپس بر اساس داده های ثبت شده در کامپیوتر، منحنی های دما - زمان برای هر نمونه توسط روش "معکوس حرارتی" و مشتق گیری از داده ها بر اساس روش ریاضی اختلاف محدود، مقادیر مقاومت حرارتی معادل فصل مشترک مدلسازی ریاضی گردید و پس از سنجش درستی مدل ارائه شده، از آن برای تعیین مقدار ضریب مقاومت حرارتی فصل مشترک در برنامه شبیه سازی حرارت و انجماد، به عنوان یک برنامه جانبی استفاده شد. در اصل برنامه شبیه



شکل ۲- طرح قالب برای بررسی ضریب انتقال حرارت معادل در فصل مشترک قالب فولادی H۱۳ و مدلسازی اثر فشار بر آن. فاصله ترموکوپلها در قالب ۲ mm در مذاب ۱ mm از فصل مشترک. ارتفاع قالب فولادی بالا و پایین ۴۰ mm. قطر قالب فولادی بالا ۵۰ mm و قطر پایینی ۷۰ mm. قطر خارجی دیواره گچی قالب ۷۰ mm و ارتفاع آن ۱۲ mm.

از طرفی دیگر ۴ ترموکوپل کروم-آلومل داخل منافذ ایجاد شده در قالب و دو ترموکوپل در محفظه قالب مطابق شکل (۲) و (۳) کار گذاشته شد. سر دیگر ترموکوپلها توسط یک کارت

سازی گسترش داده در پژوهش حاضر، می‌تواند اثر مقاومت حرارتی فصل مشترک در حل معادلات انتقال حرارت را به طور دقیق در نظر بگیرد و خطاهای محاسباتی نرم افزارهای بدون مدل‌سازی مقاومت فصل مشترک را برطرف سازد.

#### ۲-۲- مدل‌سازی ریاضی مقاومت حرارتی فصل مشترک

هنگام تماس دو سطح با همدیگر به علت وجود زبری سطح تماس، هیچگاه سطح تماس واقعی برابر سطح تماس هندسی (یا ظاهری) نبوده. بلکه مطابق شکل (۴) فقط برآمدگی‌های موجود در سطح ظاهری با هم تماس کامل دارند و همین مطلب باعث مقاومت در انتقال حرارت بین این دو سطح می‌شود. در فرایند ریخته‌گری وضعیت حادثه بوده و به محض تماس مذاب با سطح قالب، با تشکیل پوسته منجمد شده اولیه و انقباض آن، سطح تماس واقعی کاهش و حتی در مواردی تماس بین دیواره قالب و پوسته منجمد شده، قطع می‌شود و یک فاصله هوایی بین سطوح تماسی رخ می‌دهد. در این حالت مقاومت حرارتی فصل مشترک تماسی به حداکثر خود می‌رسد. زیرا حرارت ابتدا بایستی از پوسته منجمد شده اولیه، به اتمسفر گازی موجود در این شکاف هوایی منتقل شود، سپس حرارت از طریق اتمسفرگازی اشاره شده به جداره قالب منتقل شود. پس این شکاف هوایی، راه انتقال حرارت به طریق تماسی یا هدایتی را می‌بندد. به عبارتی دیگر با تشکیل فاصله هوایی، سازوکار کنترل انتقال حرارت در فصل مشترک از حالت هدایت (تماسی) به حالت جابجایی تبدیل می‌شود. در اینصورت معادله انتقال حرارت در فصل مشترک به صورت معادله (۱) خواهد بود [۸]:

$$q = h_i S (T_{ic} - T_{im}) \quad (1)$$

که در آن  $h$ : ضریب جابجایی حرارتی فصل مشترک،  $S$ : سطح ظاهری تماس فصل مشترک،  $T_{ic}$ ،  $T_{im}$  بترتیب دماهای فصل مشترک در سطح قطعه، قالب و  $q$  متوسط شارحرارت انتقال یافته از فصل مشترک می‌باشد.

همانطور که در مقدمه گفته شد ضریب انتقال حرارتی فصل مشترک،  $h$ ، در واقع یک ضریب معادل است که شامل ضرایب انتقال حرارت تشعشع، هدایت و جابجایی می‌باشد. لذا اندازه گیری تجربی آن بسیار آسان تر از محاسبه فیزیکی - ریاضی آن می‌باشد. از اینرو بسیاری از محققین با استفاده از روش حرارتی معکوس تلاش در مدل‌سازی ریاضی آن به صورت تابعی از زمان نموده اند [۷]-[۸]. در پژوهش حاضر نیز از این روش برای مدل‌سازی  $h$  استفاده شده است. به این منظور با شکستن زمان انتقال حرارت به گامهای زمانی بسیار کوچک، با استفاده از تابع مفعولی شماره ۲،  $\tau(h_i)$ ، رفتار ریاضی  $h$  به کمک انجام فرایند تکرار، بین نتایج آزمایشگاهی (حرارتی) بدست آمده از ترموکوپلها) و نتایج محاسباتی (حل معادله انتقال حرارت) تعیین می‌شود.

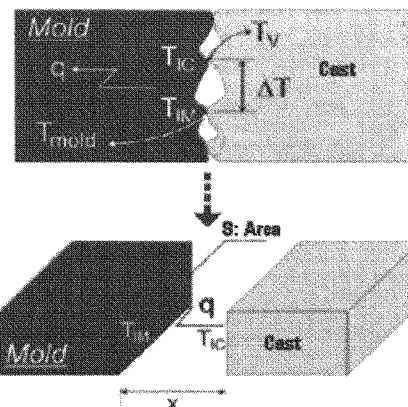
$$\tau(h_i) = \sum_{j=1}^n [T_{cal}(h_i)_j - T_{exp}]^2 \quad (2)$$

در رابطه ۲  $T_{cal}(h_i)$ : دمای محاسباتی اولیه،  $T_{exp}$ : دمای واقعی اندازه گیری شده توسط ترموکوپلها و  $n$  تعداد تکرار تا رسیدن به دقت لازم برای مقدار  $h$  است. هنگامی که  $\tau(h_i)$  به حداقل خود برسد (تزدیک به ۱٪) مقدار  $h$  قابل قبول خواهد بود. سپس با محاسبه ضریب حساسیت  $\Omega$  برای داده های محاسباتی و داده های تجربی مقدار  $h$  جدید بر اساس مقدار قبلی آن محاسبه شده و این فرایند آنگدر تکرار می شود تا نسبت تغییرات  $\Delta h_i / h_i < 0.01$  شود. از اینرو برای هر گام زمانی تغییر رفتار  $h$  بر حسب زمان تعیین و ثبت می‌شود. در انتها با داشتن داده های  $h_i - t$  می‌توان با رسم منحنی آن تابع ریاضی که رفتار اشاره شده را بیان می‌کند، تعیین نمود.

$$\Omega = \frac{T_{cal}(h_i + \Delta h_i) - T_{cal}(h_i)}{\Delta h_i} \quad (3)$$

$$h_i^{m+1} = h_i^m \pm \Delta h_i \quad (4)$$

در رابطه ۴ اندیس  $m$  مربوط به فرایند تکرار تا برآورده شدن معیار  $\Delta h_i / h_i < 0.01$  است. خلاصه‌ای از مراحل تعیین تابع  $h_i - t$  در روندنمای شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- نمایی از سطح تماسی فصل مشترک قالب - مذاب

با جایگذاری معادله (۱۱):  $H_{mo} = H_{i,j-1}$  در معادله (۱۰):

$$C_p \rho_{i,j} \left( \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \right) = \quad (12)$$

$$\left[ H_{i,j-1} k_{i,j} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + k_{i,j+1} \frac{(T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n)}{\Delta y} \right] \frac{S}{\Delta y * S}$$

که در آن  $k$  مانند رابطه (۱) همان سطح مقطع عمود بر جهت انتقال حرارت است و اندیسهای  $n, n+1$  به ترتیب بیان کننده زمانهای جدید و قدیم در هر گام زمانی هستند که توسط ترموکوپلها قرائت می‌شوند. با قرار دادن دماهای اندازه گیری شده در معادله ۱۲، مقدار  $\dot{h}$  در هر گام زمانی تعیین می‌شود که به کمک آنها می‌توان منحنی تغییرات  $\dot{h}_i - t$  را رسم و تابع ریاضی آنرا استخراج نمود. حال از این تابع برای تهیه برنامه رایانه ای شبیه سازی فرایند انجماد فلزات استفاده می‌شود.

### ۳-۲- شبیه سازی انتقال حرارت طی انجماد

شبیه سازی فرایند انجماد در پژوهش حاضر بر اساس روش اختلاف محدود، بعلت تقارن قالب استوانه ای در فضای ۳ بعدی انجام گرفته است. در اصل با شبیه سازی انتقال حرارت در صفحه موازی با محور استوانه و دوران آن حول محور اشاره شده می‌توان توزیع حرارت را براحتی در فضای ۳ بعدی تعیین نمود. لذا معادله انتقال حرارت حاکم بر سیستم در فضای ۳ بعدی به صورت رابطه ۱۳ است [۹]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q} + q^* \quad (13)$$

که در آن:

$$\vec{q} = - \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + k \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + k \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (14)$$

$$q^* = \rho \Delta H_m \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

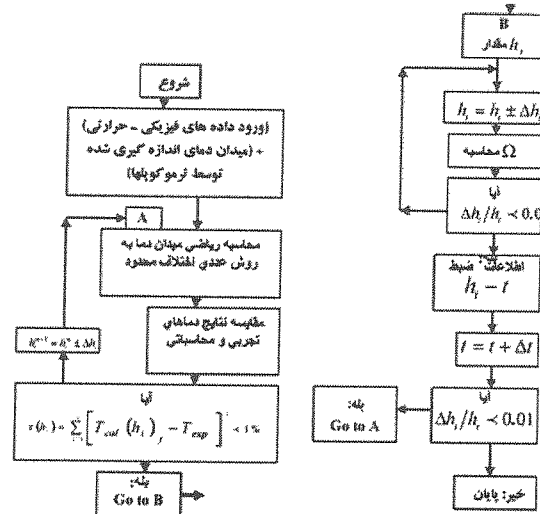
با توجه به اینکه مذاب مورد نظر در کار حاضر آلیاژ آلومینیم می‌باشد و قالب فولاد و چدن است. بعلت انتقال حرارت بالای قالب فلزی، انجماد غیر تعادلی بوده و همراه با جدایش غلظتی می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر اثر جدایش غلظتی در تغییرات دمایی مذاب آورده شده است. از اینرو طبق قانون Scheil [۶]:

$$C_s = k_E C_L (1 - f_s)^{k_E - 1} \quad (17)$$

$$\frac{C_s}{k_E C_L} = \frac{T_m - T}{T_m - T_L} \quad (18)$$

$$f_s = 1 - \left( \frac{T_m - T}{T_m - T_L} \right)^{\frac{1}{k_E - 1}} \quad (19)$$

با جایگذاری معادلات ۱۷-۱۹ در معادله (۱۶):



شکل ۵- روند نما محاسبه تغییرات ضریب معادل انتقال حرارت فصل مشترک قالب - مذاب با زمان

حال با توجه به رابطه (۵) مقدار  $\dot{h}$  به ازای واحد سطح مقطع در راستای انتقال حرارت (محور استوانه ریخته گری) در حالت یک بعدی از روی مکان سه ترموکوپل، به ترتیب، ترموکوپل واقع در فصل مشترک ( $i$ ) و مکان پشت سر آن ( $i-1$ ) در قالب و جلوی آن ( $i+1$ ) در مذاب، قابل محاسبه است [۹]

$$T_{me} - T_{mo} = q \left( \frac{1}{2k_{mo}} + \frac{1}{h_g \Delta y} + \frac{1}{2k_{me}} \right) = q \left( \frac{1}{h_g} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\dot{h}_g$ : ضریب جابجایی حرارتی فصل مشترک، یا همان فاصله هوایی است و اندیسهای  $me, mo$  به ترتیب بیان کننده خصوصیات فیزیکی-حرارتی قالب و فلز می‌باشند. از آنجاکه  $h_i = k_{me} / \Delta y$  می‌باشد می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{\Delta y h_i} = \left( \frac{1}{2k_{mo}} + \frac{1}{h_g \Delta y} + \frac{1}{2k_{me}} \right)^{-1} \frac{1}{k_{me}} \quad (6)$$

$$h_i \Delta y^{-1} = H_{mo} k_{mo} \quad (7)$$

$$H_{mo} = \frac{2k_{me} h_g \Delta y^{-1}}{h_g \Delta x (k_{mo} + k_{me}) + 2k_{mo} k_{me}} \quad (8)$$

با توجه به اینکه فاصله بین ترموکوپلها آنقدر کوچک است که می‌توان معادله انتقال حرارت یک بعدی را از حالت پاره ای به صورت جبری نوشت، پس معادله (۹) با فرض مساوی بودن ابعاد المانها، بصورت معادله (۱۰) جداسازی مکانی می‌شود.

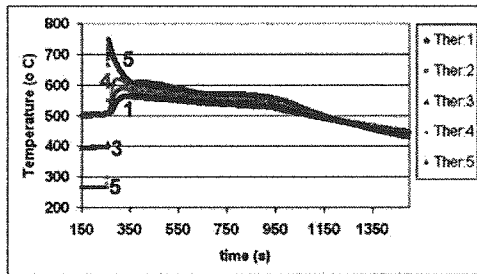
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

$$\rho_{i,j} C_{p,i,j} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = k_{i,j} \left( \frac{k_{i,j+1} T_{i,j+1}^n - k_{i,j} T_{i,j}^n}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j} T_{i,j}^n - k_{i,j-1} T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) \quad (10)$$

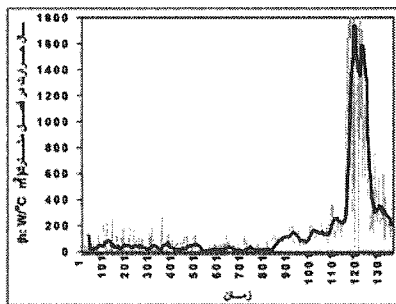
شکل جبری جداسازی مکانی شده  $H_{mo}$  به صورت رابطه ۱۱ می‌باشد.

$$H_{i,j-1} = \frac{2k_{i,j-1} h_g \Delta y}{h_g \Delta y (k_{i,j-1} + k_{i,j}) + 2k_{i,j-1} k_{i,j}} \quad (11)$$

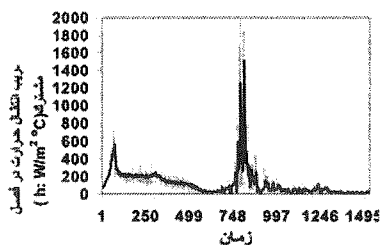
سازی توزیع دما را برای قالب فولادی در دو حالت بدون مقاومت حرارتی و با مقاومت حرارتی فصل مشترک نشان می‌دهد.



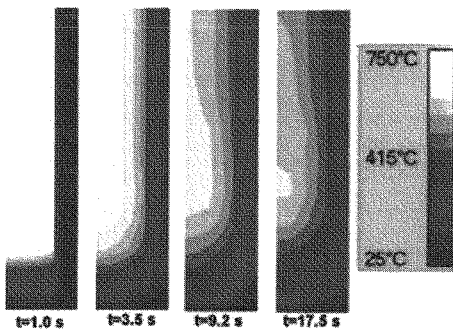
شکل ۶- منحنی تغییرات دما - زمان برای فصل مشترک قالب فولادی ترموکوپل های ۳ و ۵ در مذاب و ۱ و ۲ در قالب پیشگرم با دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۷- منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب زمان در قالب فولادی H1۳، ارتفاع راهگاه: ۳۰ Cm



شکل ۸- منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت مذاب - قالب بر حسب زمان، برای قالب چدن خاکستری، ارتفاع راهگاه: ۳۰ Cm



شکل ۹- شبیه سازی توزیع دما در قالب فولادی H1۳ بدون در نظر گرفتن مدل مقاومت فصل مشترک در ارتفاع راهگاه: ۳۰ Cm

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{1}{(T_e - T_L)(k_B - 1)} \left( \frac{T_m - T}{T_e - T_L} \right)^{\left( \frac{2 - k_B}{k_B - 1} \right)} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

بدین ترتیب همه جملات معادله (۲۰) بر حسب دما قابل جداسازی مکانی خواهد بود. پس از جداسازی مکانی معادله ۲۰ با اعمال شرایط مرزی جابجایی در فصل مشترک بر اساس معادله (۱) و با داشتن تابع  $h_f(t)$  که پیشتر بر اساس روند نمای شکل (۵) مدلسازی ریاضی شده بود، در هر گام زمانی محاسبات شبیه سازی به صورت نیمه صریح انجام می‌گیرد. برای اجرای برنامه نوشته شده حاضر، شرایط مرزی و خواص فیزیکی سیستم بر اساس داده های جدول (۱) در برنامه اعمال شد و نتایج ذیل بدست آمد.

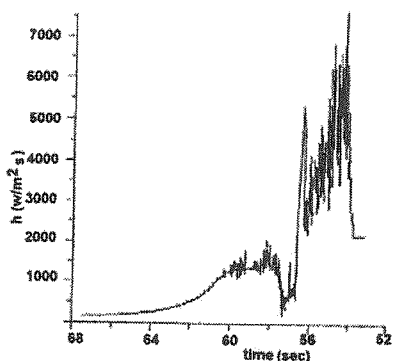
جدول (۱) داده های مورد نیاز برای اجراهای شبیه سازی

سیستم شکل (۳) در پژوهش حاضر

خواص	قالب کچی	قالب فولادی	مذاب
دمای بار oC	-	-	۷۷۵
هدایت حرارتی J/sec. m oC	۰/۰۰۱	مذاب - ۰/۷	۰/۴۲
		جامد - ۰/۰۶۹	۰/۴۲
گرمای نهان J/kg	-	-	۰/۴۱۸۶
ظرفیت حرارت J/kg oC	-	جامد - ۷۸۹۰۰	۱۱۳۰ - جامد
		مذاب - ۹۶۳۰۰	۱۰۹۰ - مذاب
چگالی kg/m3	۱۶۱۰	۷۳۰۰	جامد - ۲۶۰۰
			مذاب - ۲۵۰۰
دمای حد ذوب و انجماد oC	-	-	جامد - ۵۷۵
			مذاب - ۶۱۵

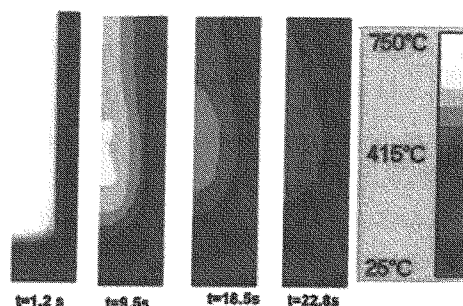
### ۳- نتایج

با شروع ذوب ریزی در قالب هایی که وجوه فولادی آنها تا دمای  $500^{\circ}C$  داغ شده بود منحنی های دما - زمان، بصورت شکل (۶)، توسط سیستم سخت افزاری ثبت اطلاعات رسم شد. سپس منحنی های دما - زمان به عنوان ورودی برنامه موجود، برای استخراج و مدلسازی تغییرات  $h-t$  استفاده شد. آزمایشها و مدلسازی ها برای دو نوع قالب چدن خاکستری با کربن معادل ۴/۵ و قالب فولادی H1۳ انجام شد. شکل (۷) نمودار  $h-t$  را برای قالب فولادی H1۳ و شکل (۸) نمودار  $h-t$  را برای قالب چدنی نشان می‌دهد. سپس با استفاده از تابع ریاضی که تغییرات  $h-t$  را مدلسازی نموده بود، یک برنامه جانبی برای اتصال به کد برنامه شبیه سازی حاضر نوشته شد تا اثر مقاومت حرارتی فصل مشترک نیز در طی انتقال حرارت شبیه سازی شود. شکل‌های (۹) و (۱۰) شبیه



شکل ۱۱- نمودارهای  $T-t$  و  $h-t$  (آلیاژ: A۳۵۶، قالب: مس آبگرد) [۶]

اما با ادامه یافتن انتقال حرارت از ریختگی به قالب پوسته‌ای جامد در فصل مشترک شکل گرفته و از شدت انتقال حرارت کاسته می‌شود. سپس فاصله هوایی این پوسته را از قالب دور می‌کند که اثر تشکیل این فاصله در حالاتی که میزان فشار وارده کافی باشد (ارتفاع ۳۰ سانتیمتر مذاب) در نمودار  $h-t$  دیده می‌شود. اما با نگاه به اشکال (۷) و (۸) پس از پایان دقایق اولیه، یک افزایش ناگهانی در مقدار ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود. این افزایش توسط Hwang و Krishnan نیز گزارش شده است [۳ و ۶]. در تحقیق وی ضریب انتقال حرارت فصل مشترک ریختگی - قالب برای آلیاژ A۳۵۶ در مجاورت قالب مسی آبگرد بدست آمده است. وی اظهار می‌دارد: "دلیل این افزایش نامعلوم است ولی شاید فشار متالواستاتیک وارد بر مذاب باعث گردیده پوسته جامد دوباره به سطح قالب بچسبد." حین برقراری تماس دوم بین ریختگی و مبرد ضریب هدایت حرارتی A۳۵۶ از  $86/9 \text{ W/mK}$  در  $700^\circ\text{C}$  به حدود  $200 \text{ W/mK}$  رسیده است که این خود تا اندازه ای می‌تواند باعث افزایش  $h$  حین تماس دوم شود. با این حال این مطلب نیازمند توجه و تحقیقات بیشتری است. پس از این مرحله در پایان با ادامه سرد شدن فاصله ای پایدار، بین ریختگی و قالب، شکل می‌گیرد و ضریب انتقال حرارت تا پایان سرد شدن قطعه، کاهش می‌یابد. با توجه به این که مقدار ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک ریختگی - قالب در دقایق اولیه بارریزی از اهمیت بیشتری برخوردار است. می‌توان گفت مهم ترین تفاوت در مقایسه مبرد فولادی و چدنی، پایداری بیشتر  $h$  در دقایق اولیه در قالب فولادی و ناپایداری محسوس  $h$  در قالب چدنی است. با توجه به نمودارهای به دست آمده در این تحقیق دومنحنی طرحواره به صورت شکل (۱۲) و (۱۳) برای ضریب انتقال حرارت در شرایط مشابه این تحقیق برای فولاد و چدن پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۰- شبیه سازی توزیع دما در قالب فولادی H۱۳ با در نظر گرفتن مدل مقاومت فصل مشترک در ارتفاع راهگاه: ۳۰ Cm

## ع- بحث و نتیجه گیری

همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود دمای ترموکوپلهای ۲ و ۴ به علت پیشگرم قالب از دمای  $500^\circ\text{C}$  شروع می‌شوند و ترموکوپلهای ۳ و ۵ که در محفظه قالب هستند از دمای پایین تری شروع می‌شوند و به محض تماس مذاب با آنها، دما به نزدیک دمای بارریزی می‌رسد. سپس با گذشت زمان و سرد شدن مذاب دما افت پیدا می‌کند. اما نمودارهای شکل های (۷) و (۸) منحنی تغییرات  $h-t$  را به ترتیب برای قالب‌های طراحی شده از جنس فولاد H۱۳ و چدن خاکستری نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در این نمودارها منحنی با رنگ زمینه روشن نتایج داده های سیستم ثبت اطلاعات را نشان می‌دهد و منحنی با رنگ سیاه توپر حالت مدلسازی شده (یعنی تابعی بهینه‌ای که از این نتایج تجربی بدست آمده) را نشان می‌دهد. در مورد قالب فولاد H۱۳ همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود، میانگین ضریب انتقال حرارت در دقایق اولیه، کم و توام با پایداری داده ها است لذا تغییرات محسوسی در این محدوده زمانی دیده نمی‌شود. در واقع آنچه که در پژوهش های مرسوم در این زمینه باعث می‌شود مقدار ضریب انتقال حرارت در دقایق اولیه افزایش یابد، تفاوت دمایی بین مذاب و قالب (یا مبرد) است اما در اینجا به دلیل دمای بالای پیشگرم و ضریب هدایت حرارتی کم فولاد H۱۳، اختلاف دمایی و به دنبال آن شار حرارت بین قطعه ریختگی و قالب به سرعت کاهش می‌یابد. این باعث می‌شود افزایش اولیه در مقدار ضریب انتقال حرارت که در پژوهش‌های سایر محققین ثبت شده است (شکل ۱۱) در تحقیق حاضر مشاهده نشد. اما در مورد قالب چدن خاکستری وضعیت اندکی تغییر می‌کند. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، رشد اولیه ضریب انتقال حرارت فصل مشترک، مانند نمودارهای Sharma و Krishnan در شکل (۱۱) است [۶]. در واقع در این موارد ضریب هدایت حرارتی بالاتر چدن خاکستری تا اندازه ای اثر دمای بالای پیشگرم را جبران می‌کند و باعث افزایش محسوس شار حرارت در دقایق اولیه می‌شود.

جنس چدن خاکستری (گرافیت + زمینه فلزی) نسبت داد. اما نتایج مدل‌های ارائه شده مقاومت حرارتی در برنامه شبیه سازی در تصاویر شکل های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که با اعمال مقاومت حرارتی فصل مشترک در شبیه سازی انجام، زمان انجماد تفاوتی آشکار و نزدیک به ۲ برابر نسبت به حالتی که اثر مقاومت حرارتی را در نظر گرفته نشود، نشان می‌دهد یعنی زمان انجماد از ۱۷/۵ ثانیه به ۲۲/۴ ثانیه افزایش می‌یابد. لذا بایستی در کدهای شبیه سازی اثر مقاومت حرارت تماسی در نظر گرفته شود تا نتایج از درستی و دقت لازم برخوردار باشند. بنابراین از نتایج تحقیق حاضر می‌توان نتایج ۱-۴ را بدست آورد:

۱- در صورت افزایش مقدار پیشگرم قالب ۱۳ H تا  $500^{\circ}\text{C}$ : الف) مقدار ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک نسبت به نتایج دیگر محققین کاهش محسوسی خواهد یافت. ب) شکل گیری فاصله هوایی در فصل مشترک بر نمودار h-t اثر چندانی ندارد.

۲- در صورت افزایش پیشگرم قالب چدن خاکستری تا  $500^{\circ}\text{C}$ : الف) مقدار ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک کاهش چندانی ندارد. ب) شکل گیری فاصله هوایی در فصل مشترک بر نمودار h-t اثر قابل ملاحظه ای دارد.

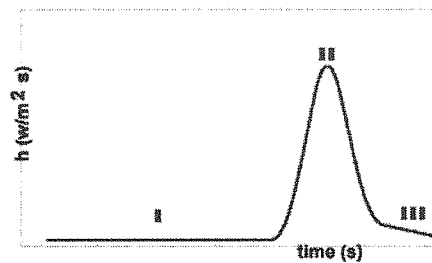
۳- با توجه به اینکه در شرایط حاکم بر فصل مشترک در این تحقیق در مورد مبرد فولادی مقدار ضریب انتقال حرارت در فصل مشترک در دقایق اولیه پایدار بود، می‌توان برای شبیه سازی ریخته گری در شرایطی مشابه مقدار ضریب انتقال حرارت را به صورت یک ورودی ثابت به برنامه شبیه سازی معرفی کرد ولی در مورد مبرد چدنی ناپایداری آن در دقایق اولیه این امکان را از بین می‌برد.

۴- یک تغییر ناگهانی در مقدار ضریب انتقال حرارت پس از شکل گیری فاصله هوایی اتفاق می‌افتد که پیش از این نیز توسط Hwang گزارش شده بود [۲]. در این تحقیق مشخص شد که این افزایش ناگهانی به شدت تابع میزان فشار وارده بر فصل مشترک است که بدین ترتیب احتمال تماس دوباره ریختگی - قالب در اثر نیروی متالواستاتیک تایید می‌شود.

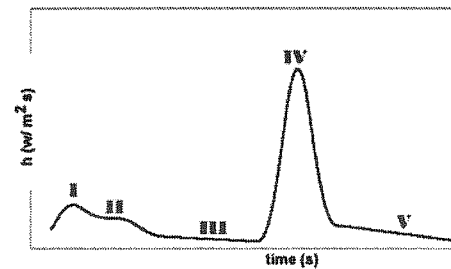
۵- اعمال مدل مقاومت حرارتی فصل مشترک می‌تواند دقت زمان پیش بینی انجماد را به میزان ۵۰٪ افزایش دهد.

## ۵- تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر در دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران انجام گرفته است. همچنین نویسندگان کمال تشکر خود را از آقای مهندس ذاکر هندوآبادی در انجام پاره ای از آزمایشهای تجربی ابراز می‌نمایند.



شکل ۱۲- نمودار نمونه وار h-t برای فصل مشترک مبرد H۱۳- ریختگی A۳۵۶ در سقف



شکل ۱۳ نمودار نمونه وار h-t برای فصل مشترک مبرد چدنی - ریختگی A۳۵۶ در سقف

بر اساس نمودار شماتیک شکل (۱۲) تغییرات h برای فصل مشترک H۱۳-A۳۵۶ به سه مرحله تقسیم شده است که مرحله دوم بیش از هر سه مرحله تحت تاثیر مقدار فشار وارده بر فصل مشترک است. همانطور که دیده می‌شود شکل گیری فاصله هوایی بر مرحله اول این نمودار تاثیر محسوسی ندارد. سازوکار آن را می‌توان چنین توجیه نمود که در مرحله اول به علت همگن بودن خواص حرارتی مبرد فولادی اتصال مذاب (یا پوسته جامد اولیه) با قالب حفظ شده است. در مرحله دوم به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی قالب و پوسته، فاصله هوایی تشکیل شده و با گرم شدن گاز موجود در این فاصله و افزایش جنبش مولکولهای گاز، آنقدر ضربه و تماس مولکولی بالا می‌رود که یک نوع اتصال بین مولکولی را می‌توان داخل فاصله هوایی در این لحظه در نظر گرفت (شبیه هدایت نه جابجایی) پس در این مرحله (مرحله ۲) باز مقاومت فصل مشترک افت می‌کند. اما برای فصل مشترک A356-چدن خاکستری، همان طوریکه در شکل (۱۳) دیده می‌شود افزایش اولیه و سپس کاهش در اثر شکل گیری فاصله باعث ناپایداری ضریب انتقال حرارت می‌شود. در این حالت تغییرات h را با زمان در پنج مرحله می‌توان تقسیم بندی کرد که در این بین مرحله اول و چهارم بیش از بقیه تحت تاثیر فشار وارد بر فصل مشترک خواهد بود. سازوکار مراحل اول و دوم در این نمودار نسبت به نمودار شکل (۱۲) را می‌توان به غیریکنواخت بودن



## ۶- مراجع

- V. de L. Davies, "Heat Transfer in Gravity Die casting", British Foundryman, Vol. 73, P 331(1980). [۵]
- M. Krishnan, D. G. R. Sharma, "Determination of Heat Transfer Coefficient Between casting and Chill in Uni-directional Heat Flow", Trans. AFS, Vol. 102, p 769 (1994) [۶]
- J. R. Shenefelt, R. Luck, R. P. Taylor, J. T. Berry and K. A. Woodbury, "New Technique to obtain Heat Flux and Thermal Contact Conductance for Sand cast A356 Plates", Trans. AFS, Vol. 108, p 171(2000) [۷]
- José Eduardo Spinelli, Ivaldo Leão Ferreira, Amauri Garcia, "Evaluation of heat transfer coefficients during upward and downward transient directional solidification of Al-Si alloys" 16th World Congresses of Structural and multidisciplinary Optimization Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil, [۸]
- K. Ho, R. D. Pehlke, "Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer", Trans. AFS, p 689, 1983. [۱]
- Van F. Chiesa, "Measurement of the Thermal Conductance at the Mold/Metal Interface of Permanent Molds", Trans. AFS, p 193, 1990.. [۲]
- J. H. Kuo, F. L. Hsu, W. S. Hwang, J. L. Yeh and S. J. Chen "Effect of Mold Coating and Mold Material on the Heat Transfer Coefficient of A356 Aluminum Alloy" Trans. AFS, vol. 109, P61, 2001. [۳]
- Y. Nishida and H. Matsubara, "Effect of Pressure on Heat Transfer at the Metal Mold-Casting Interface", British Foundryman, p 274 (1976).. [۴]

## ۷- زیر نویس ها

<sup>1</sup> Air gap

<sup>2</sup> Sensivity coefficient