

سیستم راهگاهی

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل، از فراگیر انتظار می‌رود که بتواند:

- ۱- قوانین برنولی، تریچلی و پاسکال را بداند و روابط آن‌ها را در محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی به کار گیرد.
- ۲- اهمیت اصول علمی و عملی محاسبات را در سیستم‌های راهگاهی بیان کند.
- ۳- محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی را انجام دهد.

۷- سیستم راهگاهی

۷-۱- اصول علمی محاسبات سیستم‌های راهگاهی

یکی از شرایط لازم در تولید قطعات ریختگی سالم، طرح صحیح سیستم‌های راهگاهی می‌باشد. در درس اصول متالورژی ریختگی مبانی سیستم راهگاهی به تفصیل بیان شده است لذا لازم است در این کتاب جنبه‌های علمی در طراحی سیستم راهگاهی و به عبارت دیگر مبانی محاسبات سیستم‌های راهگاهی نیز مورد مطالعه قرار گیرند. قابل ذکر است که هرچند در عمل، در طی جریان بارریزی و نیز توقف فلز مذاب در قالب، سیالیت و گرانروی آن دائماً در حال تغییر است و به همین دلیل نیز از نظر فیزیکی نمی‌توان آن را یک سیال کامل (ایده‌آل) تلقی نمود، با این حال، بسیاری از قوانین مربوط به مکانیک سیالات را می‌توان در مورد جریان مذاب در سیستم راهگاهی و نیز مذاب درون قالب مورد استفاده قرار داد. به همین دلیل، درک بهتر اصول محاسبه سیستم‌های راهگاهی، مستلزم مطالعه بعضی از این قوانین و اصول مهم علمی می‌باشد.

۷-۱-۱- قانون برنولی^۱: براساس این قانون، در یک سیستم بسته (محیطی که کاملاً منفرد است و با محیط بیرون کار و گرما مبادله نمی‌کند). برای مایعات ایده‌آل، جمع جبری انرژی، همواره مقدار ثابتی است. درون این سیستم بسته، امکان تبدیل صورت‌های مختلف انرژی به یکدیگر وجود دارد. در حالی که جمع جبری انرژی‌های موجود در آن ثابت می‌ماند. به‌طور کلی، هر مایع در حال جریان، درون یک سیستم بسته دارای سه نوع انرژی می‌باشد که عبارتند از:

الف - انرژی پتانسیل (U): این انرژی مطابق شکل ۷-۱، عبارت است از انرژی وزن معینی از مایع که در ارتفاع h از یک صفحه مبنا (مثلاً کف قالب) قرار گرفته است. مقدار این انرژی را می‌توان به صورت رابطه ۷-۱ بیان کرد.

$$U = Wh = mgh \quad (7-1)$$

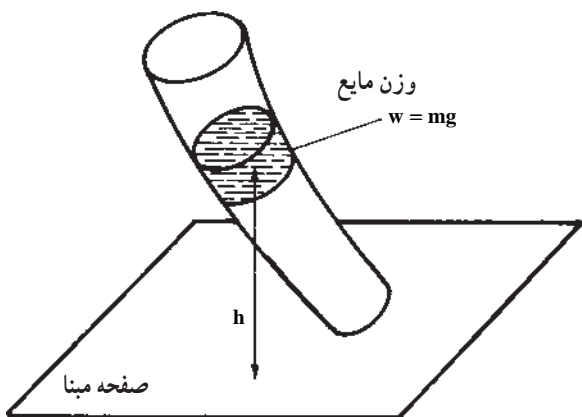
که در آن، W وزن مایع و g شتاب ثقل زمین است. این انرژی به ازای واحد وزن مذاب، برابر است با:

$$U = h \quad (7-2)$$

که در آن:

U = انرژی پتانسیل به ازای واحد وزن (برحسب متر)

h = ارتفاع (برحسب متر)



شکل ۷-۱- انرژی پتانسیل مایع

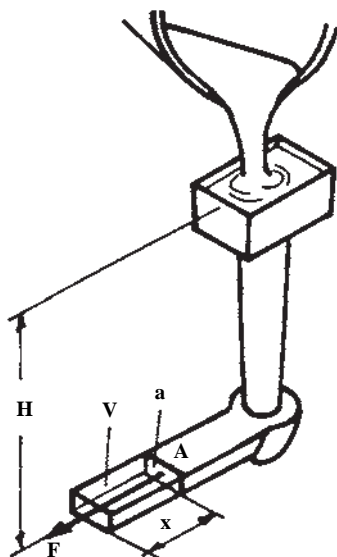
ب- انرژی فشاری (E_{Pr}): این انرژی، ناشی از نیروی فشار ستونی از مایع است که به سطح مقطع حجم معینی (مثلاً حجم قسمتی از مایع (مذاب) در داخل راهبار) وارد می‌شود و می‌تواند باعث جابه‌جایی و حرکت آن گردد. مطابق شکل ۷-۲ برای محاسبه این انرژی می‌توان به صورت زیر عمل نمود:

فشار در نقطه A که باعث حرکت مقداری از مایع به حجم V می‌گردد، برابر است با:

$$P_A = \rho \cdot g \cdot H$$

که در آن ρ چگالی مذاب و H ارتفاع ستون مذاب می‌باشد. این فشار می‌تواند نیروی F را بر سطح a (سطح مقطع عمود بر امتداد نیرو در نقطه A) اعمال کند.

$$F = P_A \cdot a \Rightarrow \text{سطح} \times \text{فشار} = \text{نیرو}$$



شکل ۷-۲- محاسبه انرژی فشاری

این نیرو می‌تواند حجم V را به اندازه x تغییر مکان دهد. انرژی حاصل از این جابه‌جایی همان انرژی فشاری است که مقدار آن برابر است با:

$$E_{Pr} = F \cdot x = P_A \cdot a \cdot x \quad (7-3)$$

با توجه به این که $a \cdot x = V$ (حجم مذاب جابه‌جا شده)، رابطه ۷-۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{Pr} = P_A \cdot V$$

از آنجا که $V = \frac{W}{\rho \cdot g}$ ، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{Pr} = P_A \cdot \frac{W}{\rho \cdot g} = W \cdot \frac{P_A}{\rho \cdot g}$$

که در نهایت، مقدار این انرژی به ازای واحد وزن مایع جابه‌جا شده، برابر است با:

$$E_{Pr} = \frac{P_A}{\rho \cdot g} \quad (7-4)$$

که در آن:

E_{Pr} = انرژی فشاری به ازای واحد وزن (برحسب متر)

P = فشار (برحسب نیوتن بر متر مربع)

ρ = چگالی (برحسب کیلوگرم بر متر مکعب)

g = شتاب جاذبه برحسب $(\frac{N}{kg})$

ج- انرژی جنبشی (K): این انرژی، ناشی از سرعت خطی ذرات مایع است که به صورت رابطه

۷-۵ بیان می‌شود:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7-5)$$

با توجه به این که $m = \frac{W}{g}$ ، رابطه اخیر به صورت زیر درمی‌آید.

$$E_k = \frac{Wv^2}{2g}$$

و بالاخره، به ازای واحد وزن مایع، مقدار انرژی جنبشی برابر است با:

$$K = \frac{v^2}{2g} \quad (7-6)$$

که در آن:

K = انرژی جنبشی به ازای واحد وزن (برحسب متر)

v = سرعت خطی مایع (برحسب متر بر ثانیه)

g = شتاب ثقل ($9/81$ متر بر مجذور ثانیه)

با توجه به روابط یاد شده، قانون برنولی را می‌توان به صورت رابطه ۷-۷ بیان نمود:

$$E = h + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{مقداری ثابت} \quad (7-7)$$

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (7-8)$$

۷-۱-۲ قانون تریچلی^۱: این قانون که در حدود یکصد سال پیش از قانون برنولی ارائه گردید، در حقیقت یکی از کاربردهای خاص قانون برنولیست. در ظرفی مطابق شکل ۷-۳ مایعی به ارتفاع h_1 قرار دارد و در ته ظرف، سوراخی برای خروج مایع (در سطح $h = 0$) تعبیه شده است. براساس قانون برنولی (چنانچه مایع خروجی از ته ظرف به طور مداوم از بالا به این ظرف اضافه شود) می توان نوشت:

$$(h = h_1) : E = \frac{P_a}{\gamma} + h_1 \quad (V = 0)$$

$$(h = 0) : E = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma} \quad (V = V_2)$$

(که P_a ، فشار اتمسفر برحسب نیوتن بر متر مربع می باشد).
با توجه به تساوی دو رابطه اخیر، رابطه ۷-۹ نتیجه می شود:

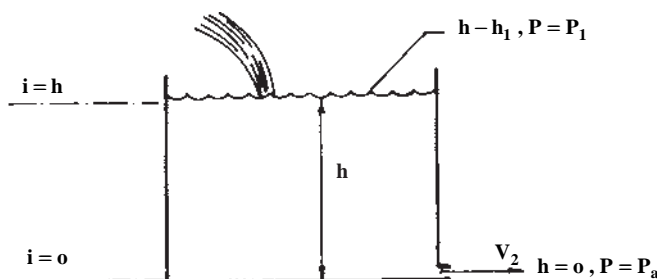
$$h_1 = \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2gh_1} \quad (7-9)$$

که در آن:

v_2 = سرعت خروج مایع از ته ظرف (متر بر ثانیه)

g = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)

h_1 = ارتفاع مایع در ظرف (متر)



شکل ۷-۳- سرعت خروج مایع از انتهای یک ظرف با ارتفاع ثابت h

رابطه ۷-۹ بیان کننده قانون تریچلی است که نتیجه کاربرد قانون برنولی در شرایط خاص

می باشد.

^۱ Torricelli's Theorem

۷-۱-۳ قانون تداوم^۱ یا پیوستگی: براساس این قانون، حجم مذاب یا مایع جاری در هر مقطع، در واحد زمان مقدار ثابتی است، به عبارت دیگر:

$$Q = \frac{V}{t} = \text{مقداری ثابت} \quad (۷-۱-۰)$$

که در آن:

Q = دبی (بده) (مترمکعب بر ثانیه)

V = حجم مذاب (متر مکعب)

t = زمان عبور حجم مذکور از مذاب (ثانیه)

با توجه به این که حجم (V) را می توان به صورت حاصل ضرب مساحت (A) در ارتفاع l بیان کرد، از این رو، رابطه^{۰ ۷-۱} را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A.l}{t} = A \cdot \frac{l}{t} = A \cdot v$$

که در آن:

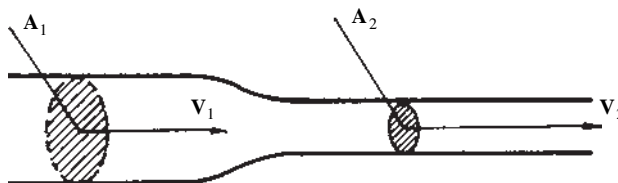
v = سرعت خطی مایع (مذاب) (متر بر ثانیه)

A = مساحت سطح مقطعی که مذاب با سرعت مذکور از آن عبور می کند. (مترمربع)

بنابراین، قانون تداوم برای دو نقطه مختلف از یک سیستم بسته به صورت رابطه^{۱۱-۷} می باشد:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (۷-۱۱)$$

براساس رابطه اخیر، در اثر کاهش سطح مقطع یک لوله، سرعت سیال افزایش می یابد و حال آن که افزایش سطح مقطع، موجب کاهش سرعت سیال می گردد (شکل ۴-۷).



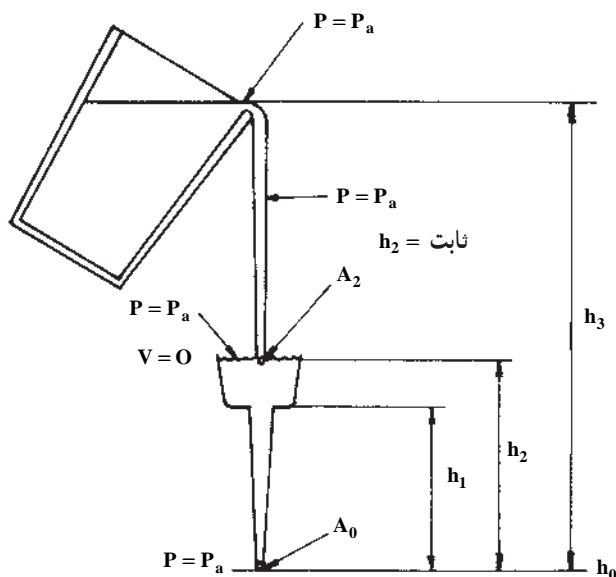
شکل ۴-۷- سرعت سیلان مایع در یک کانال با سطوح مقاطع غیریکنواخت

به کمک دو قانون اخیر (تریچلی و تداوم) می‌توان تأثیر ارتفاع ریختن مذاب را بر سرعت پر شدن قالب (و در نتیجه مدت ریختن بار) محاسبه کرد. در شکل ۵-۷ مقدار بار خروجی از پاتیل بارریز (سطح ۳) باید معادل مقدار مذاب خروجی از انتهای راهگاه بارریز (سطح صفر) باشد. براساس قانون تریچلی:

$$v_0 = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_2}$$

v_0 سرعت خروج مذاب از انتهای راهگاه بارریز می‌باشد و مقدار خروج مایع از سطح مقطع A_0 برابر است با:

$$Q_0 = v_0 A_0 = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_2} \times A_0$$



شکل ۵-۷ میزان ریزش مذاب از لبه پاتیل در ارتباط با جریان مذاب از انتهای تحتانی راهگاه بارریز

در نتیجه، برای آن‌که مقدار h_2 ثابت بماند لازم است همواره سیستم راهگاهی از مذاب پر نگه داشته شود. در این حالت دبی (بده) در تمام سطوح مقطع یکسان خواهد بود. به عبارت دیگر:

$$Q_0 = Q_2 = v_2 A_2 = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_3 - h_2} \cdot A_2 \quad (\text{مترمکعب بر ثانیه})$$

Q_2 و v_2 به ترتیب دبی جریان و سرعت جریان ورودی به حوضچه هستند.

از رابطهٔ اخیر می‌توان نتیجه گرفت :

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{h_1}{h_2 - h_1}}$$

که در آن مقدار $h_2 - h_1$ فاصلهٔ بین دهانهٔ پاتیل تا سطح فوقانی حوضچه می‌باشد. فشار در تمام سطوح صفر و ۲ و ۳ مساوی و برابر فشار اتمسفر است.

هرچند ریختن مذاب از پاتیل به داخل حوضچه، باعث افزایش موضعی فشار در حوضچه می‌گردد، با این حال این فشار به دلیل موضعی بودن تأثیری بر روی مقدار مذاب خروجی از قسمت تحتانی راهگاه (سطح با ارتفاع معادل صفر) ندارد. بنابراین شخص بارریز می‌تواند ریختن مذاب را به دلخواه به وسیلهٔ ارتفاع h_2 یا میزان خم کردن پاتیل کنترل کند. به عبارت دیگر، سرعت پر کردن قالب از مذاب، مستقل از ارتفاع لبهٔ پاتیل تا حوضچه می‌باشد.

۴-۱-۷- قانون پاسکال^۱:

براساس این قانون :

الف - در داخل ظروف مرتبط (نظیر قالب پر شده از فلز مذاب) فشار در همهٔ نقاط ظرف که در روی یک سطح افقی قرار دارند، یکسان است.

ب - فشار هر نقطه از درون مایع، برابر است با فاصلهٔ آن نقطه تا سطح آزاد مایع ضربدر وزن مخصوص مایع به اضافهٔ فشار خارجی که بر مایع اعمال می‌شود. با توجه به این که فشار خارجی روی مایع معمولاً فشار اتمسفر است، می‌توان رابطهٔ زیر را نوشت :

$$P = P_a + \rho \cdot g \cdot h \quad (۷-۱۲)$$

که در آن :

P = فشار در هر نقطه از یک سطح افقی (نیوتن بر متر مربع)

P_a = فشار اتمسفر (نیوتن بر مترمربع)

ρ = چگالی مذاب (کیلوگرم بر مترمکعب)

h = فاصلهٔ عمودی نقطه تا سطح آزاد مایع (متر)

چون فشار هوای خارجی، در تمام نقاط قالب معادل فشار اتمسفر است، بنابراین فشار مطلق

که بر یک نقطه در درون مایع در تمام جهات وارد می‌شود، برابر است با :

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

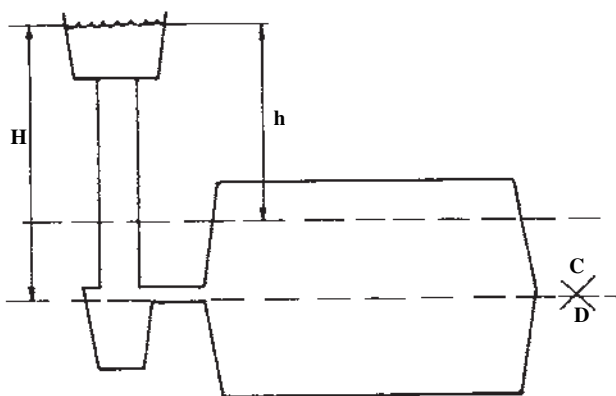
^۱ - Pascal's law

در شکل ۶-۷ فشار هیدرواستاتیکی (فشار وارد بر هر نقطه درون مذاب در حالت سکون مذاب) وارد بر بعضی از نقاط قالب و راهگاه نشان داده شده‌اند.
با توجه به شکل مذکور، فشار در هر نقطه از قالب که در ارتفاع دلخواه X نسبت به سطح آزاد مذاب قرار دارد، برابر است با :

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

به همین ترتیب، فشار وارد بر هر نقطه از مذاب که در سطح جدایش قرار دارند، برابر است با :

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$



شکل ۶-۷- نمایش شماتیکی قطعه ریختگی / راهگاه‌هایی که از فلز مذاب پر گردیده‌اند.

۵-۱-۷- جریان آرام و اغتشاشی مایع (مذاب): به طور کلی، جریان هر مایعی درون یک کانال می‌تواند به دو صورت آرام یا اغتشاشی انجام گیرد. طبق تعریف، جریانی آرام نامیده می‌شود که سرعت آن در یک کانال، از دیواره کانال تا مرکز آن به تدریج افزایش یابد. برای مثال، سرعت آب در حال جریان در کناره یک لوله و یا مذاب در حالت حرکت در مجاورت دیواره‌های راهگاه بسیار کم است و تدریجاً تا رسیدن به مرکز لوله به حداکثر مقدار خود می‌رسد. از نظر تئوری، براساس این تعریف، می‌توان سرعت جریان مذاب را در دیواره‌های راهگاه‌ها صفر در نظر گرفت، درحالی که در مرکز سطح مقطع این سرعت در حداکثر مقدار خود می‌باشد. به عبارت دیگر، لایه‌های مایع در حال جریان باید با سرعت‌های متفاوتی روی یکدیگر حرکتی لغزشی داشته باشند. چنین رفتاری از قانون طبیعت پیروی می‌کند. درحقیقت، چنین جریانی از مایع با حداقل اصطکاک ممکن

انجام می‌پذیرد.

هنگامی که مقدار متوسط سرعت مایع افزایش یابد، در حدّ معینی میزان لغزش لایه‌های آن روی یکدیگر از مقدار استحکام برشی مایع تجاوز می‌کند. در این حالت، ادامه جریان آرام و یک‌جهتی مایع دیگر مقدور نیست و در نتیجه، مایع به صورت چند جهتی یا اغتشاشی جریان خواهد یافت. تبدیل حرکت آرام مایع به جریان اغتشاشی توسط رینولدز^۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس مطالعات این شخص، کیفیت جریان از نظر آرام یا ناآرام بودن با عدد بدون بُعدی به نام عدد رینولدز، R_e ، طبق رابطه ۷-۱۳ بیان می‌شود:

$$R_e = \rho \cdot D \cdot V \cdot \frac{1}{\eta} \quad (7-13)$$

که در آن:

R_e = عدد رینولدز (بدون بُعد)

ρ = جرم مخصوص مایع (کیلوگرم بر متر مکعب)

$$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

D = قطر کانال (متر)

$$[m]$$

V = سرعت جریان مایع (متر بر ثانیه)

$$[m/s]$$

η = ویسکوزیته دینامیکی مایع [کیلوگرم بر (متر \times ثانیه)]

$$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right]$$

قابل ذکر است که برای مقاطع غیردایره‌ای D ، قطر معادل است که از رابطه ۷-۱۴ به دست

می‌آید:

$$D_e = \frac{\text{مساحت مقطع} \times 4}{\text{محیط مقطع}} \quad (7-14)$$

توجه داشتن به کیفیت جریان مذاب (در نظر گرفتن عدد رینولدز) در محاسبات مربوط به سیستم‌های راهگاهی، از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا ایجاد جریانی آرام و با حداقل آشفتگی، برای دستیابی به قطعاتی سالم و بدون تخلخل‌های گازی و ذرات سرباره‌ای، در آزمایشات مختلف به اثبات رسیده است.

نتایج آزمایشات انجام شده، نشان می‌دهد که چنانچه عدد رینولدز از ۳۰۰۰ کمتر باشد، جریان سیال کاملاً آرام و بدون حرکت اغتشاشی و در لایه‌های موازی انجام می‌گیرد (شکل ۷-۷-الف). هرگاه عدد مذکور از مقدار یاد شده بیشتر باشد، تلاطم آغاز می‌گردد. در ریخته‌گری، چنانچه عدد رینولدز در حد آرام در نظر گرفته شود، سرعت خطی و قطر راهبار به اندازه‌ای کوچک خواهد شد که عملاً ریخته‌گری غیرممکن می‌شود. این موضوع در مثال زیر بخوبی قابل درک است.

مثال: مذابی از آلومینیم با جریانی آرام ($Re = 2000$) در راهگاه اصلی یک سیستم راهگاهی با مقطع مستطیل شکل به ابعاد ۲ و ۳ سانتی متر جاری شده است. با توجه به این که گرانروی دینامیکی و جرم مخصوص مذاب آلومینیم به ترتیب برابر با 0.3 g/cm^3 و 2.45 g/cm^3 (پواز) و 2.45 g/cm^3 گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشند، سرعت خطی مذاب را محاسبه کنید.

حل: با توجه به رابطه رینولدز، ابتدا باید قطر معادل کانال (مجرا) محاسبه گردد:

$$D_e = \frac{4 \times A}{C} = \frac{4 \times 2 \times 3}{2 \times (2 + 3)} = \frac{24}{5} = 2.4 \text{ cm} = 0.024 \text{ m}$$

از طرفی، مقادیر مربوط به گرانروی دینامیکی و جرم مخصوص در سیستم بین‌المللی واحدها (SI) برابر خواهند شد با:

$$\eta = 0.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm.s}} (\text{پواز}) = 0.3 \times \frac{0.001 \text{ kg}}{0.01 \text{ m.s}} = 0.03 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$\rho = 2.45 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 2.45 \times \frac{0.001 \text{ kg}}{(0.01 \text{ m})^3} = 2.45 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2450 \text{ kg/m}^3$$

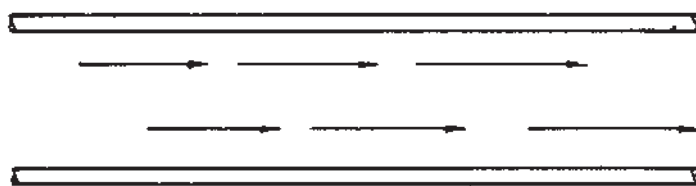
حال با توجه به اطلاعات داده شده و رابطه رینولدز، سرعت مذاب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$v = \frac{\eta \cdot Re}{\rho \cdot D_e} = \frac{2000 \times 0.03}{2450 \times 0.024} = 0.1 \text{ m/s} \approx 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

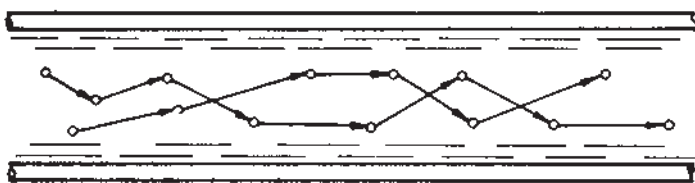
قابل ذکر است که سرعت به دست آمده، از مقدار واقعی آن در شرایط عملی ریخته‌گری برای چنین مذابی به مراتب کمتر است و بنابراین، عدد رینولدز باید بیش از ۲۰۰۰ باشد. به عبارت دیگر جاری شدن مذاب به صورت آرام، در عمل امکان‌پذیر نیست.

از نظر ریخته‌گری و با توجه به تفاوت فاحش دمای مذاب و قالب، مشخص شده است که چنانچه عدد رینولدز در مقادیر کمتر از ۳۰۰۰ باشد، یک لایه نسبتاً غیرآشفته و آرام در فصل مشترک مذاب - قالب پدید می‌آید که موجب کاهش عوامل فرسایشی دیواره و جذب سطحی هوا از

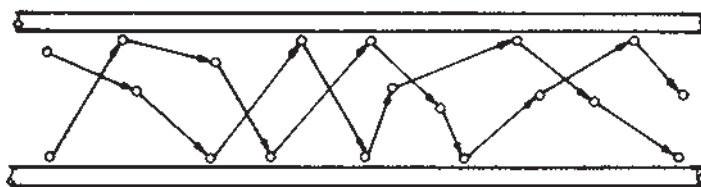
قالب می‌شود؛ در حالی که در مرکز جریان، نوعی آشفتگی وجود دارد (شکل ۷-۷ ب). براساس مطالعات انجام شده توسط افرادی دیگر^۱، جریان فوق نسبتاً غیرمضر است و امکان داخل شدن هوا (به دلیل یکپارچگی سطحی) کاهش می‌یابد، در چنین حالاتی با توجه به تغییرات، حدود ۱۰ برابر در مقادیر یاد شده، شرایط عملی به طور نسبی برقرار شده، از این نظر می‌توان آن را جریان آرام سطحی و یا «جریان آرام ریخته‌گری» نامید. در هر حال، تجاوز از اعداد فوق، جریان را کاملاً آشفته و قطعات ناسالم با مک‌های گازی و آخال تولید می‌کند (شکل ۷-۷ ج).



(الف) $N_r < 3000$ — جریان آرام



(ب) $N_r = 3000 - 30,000$ — جریان آرام ریخته‌گری



(ج) $N_r > 30,000$ — جریان آشفته

شکل ۷-۷ — رابطه میان عدد رینولدز و میزان آشفتگی جریان مذاب

۷-۲- اصول عملی محاسبات سیستم راهگاهی (طراحی و محاسبه سطح مقطع تنگه)

همان گونه که در قسمت های قبلی بدان اشاره گردید، بین سطوح مقاطع اجزای یک سیستم راهگاهی، نسبت معینی تحت عنوان نسبت راهگاهی وجود دارد. کوچکترین سطح مقطع در یک سیستم راهگاهی براساس نسبت یاد شده، گلوبی یا تنگه^۱ نامیده می شود. بنابراین در سیستم های راهگاهی فشاری، منظور از تنگه همان مجموع سطوح مقاطع راهباره ها می باشد؛ در حالی که در سیستم های راهگاهی غیرفشاری، سطح مقطع پای راهگاه بارریز به عنوان تنگه عمل می کند. به هر حال، براساس قانون تداوم (ثابت بودن دبی جریان) سرعت خطی مذاب در این مقطع، از تمام مقاطع سیستم راهگاهی بیشتر است. طبیعی است در صورتی که این سرعت به طور متوسط از حد معینی کمتر باشد، امکان انجماد زود هنگام در راهگاه ها و محفظه قالب وجود خواهد داشت. از طرف دیگر، اگر سرعت متوسط مذاب در این مقطع از حد معینی تجاوز کند، جریانی ناآرام همراه با جذب گاز و ایجاد سرباره تولید خواهد شد. از این رو، اساس محاسبات (یکی از روش های معمول) سیستم های راهگاهی نیز بر محاسبه سطح مقطع تنگه استوار است. قابل ذکر است که به دلیل مشخصات خاص فلز مذاب، در مقایسه با مایعات ایده آل (کامل) و در نتیجه پیچیده تر شدن قوانین حاکم بر مایعات در مورد آن، مطالعه اصول محاسباتی سیستم راهگاهی و به طور کلی جریان فلز مذاب با استفاده از روش های تجربی با در نظر گرفتن اصول علمی مربوط، نتایج مطلوب تری را به دنبال خواهد داشت. البته روشن است که با استفاده از چنین روشی، برای محاسبه هر قطعه، روابطی اختصاصی به دست خواهد آمد که خاص همان قطعه است. به همین دلیل این روابط و معادلات، توسط طراحان و متخصصین مربوط به صورت دستورالعمل هایی در کتاب های مربوط به قطعات ریختگی ثبت شده اند. در این منابع، اغلب، طراحی و محاسبه سیستم راهگاهی و نیز تغذیه گذاری مربوط به انواع متداول قطعات ریختگی با رسم منحنی ها و روابط تجربی مربوط ارائه شده است. در این قسمت نیز محاسبه سطح مقطع تنگه، در راستای چنین روندی صورت می گیرد.

براساس قوانین تشریح شده در قسمت های گذشته، حجم مذاب (V) که با سرعت (v) از مقطع کانالی به مساحت (A) عبور می کند، پس از گذشت زمان t (زمان بارریزی) برابر است با:

$$V = A \cdot v \cdot t$$

^۱ _Choke

اگر جرم این مذاب (m) و جرم مخصوص آن ρ باشد و سطح مقطع مذکور نیز به عنوان تنگه در نظر گرفته شود، آنگاه :

$$V = \frac{m}{\rho} = A_C \cdot v \cdot t$$

و از آنجا :

$$A_C = \frac{m}{\rho \cdot t \cdot v} \quad (7-15)$$

که در آن m برحسب گرم (gr)، ρ برحسب گرم بر سانتی متر مکعب (gr/cm^3)، t برحسب ثانیه (s)، v برحسب سانتی متر بر ثانیه (cm/s) و در نتیجه A_C برحسب سانتی متر مربع (cm^2) می باشد. براساس رابطه ۷-۱۵، محاسبه سطح مقطع تنگه، مستلزم تعیین سرعت مذاب و زمان بارریزی است.

۷-۲-۱- تعیین سرعت خطی مذاب: نکته قابل توجه در رابطه یاد شده آن است که سرعت مذاب (v) که سرعت واقعی نامیده می شود با سرعتی که به طور تئوری از رابطه تریچلی به دست می آید، برابر نیست. این موضوع در حقیقت از عدم تطبیق کامل مشخصات و شرایط فلز مذاب با مایعات ایده آل ناشی می گردد؛ زیرا اصولاً در مورد مایعات واقعی (مانند آب و به ویژه مذاب فلزات و آلیاژها) بین ذرات مایع با یکدیگر و نیز ذرات مایع با جداره هر کانال و مجرا، اصطکاک وجود دارد. بنابراین، مقداری از کار نیروهای خارجی مذاب متحرک، صرف جبران کار ناشی از نیروهای اصطکاک می شود. به علاوه، به دلیل موانع متعدد دیگری (غیر از نیروهای اصطکاک) که به شکل هندسی سیستم راهگاهی (نظیر طول، شکل و مقطع مجراها و کانال ها، وجود تغذیه ها و صافی ها در سیستم راهگاهی، تعداد و تقاطع کانال ها، صاف و خشن بودن سطوح داخلی مجراهای راهگاهی) مربوط می شود و نیز دخالت عوامل مربوط به طبیعت فیزیکی مذاب و قالب، مانند وزن مخصوص، سیالیت و گرانروی مذاب در درجه حرارت ریختن، وجود گازها و هوا در محفظه قالب و فشار ناشی از آن ها، بدیهی است که دبی واقعی مذاب و در نتیجه آن، سرعت واقعی مذاب باید کمتر از مقدار تئوری آن از رابطه تریچلی باشد. به همین دلیل، این سرعت در عمل به صورت رابطه ۷-۱۶ بیان می گردد :

$$v_{\text{تئوری}} = \sqrt{2gh} \quad \mu < 1 \quad v_{\text{واقعی}} \quad (7-16)$$

در این رابطه، μ ضریبی بدون واحد است و ضریب تلفات، ضریب تخلیه یا ضریب ریختگی نامیده می‌شود. این ضریب، به‌طور تجربی به‌دست می‌آید: بدین صورت که ابتدا دبی (بده) واقعی را به کمک حجم محفظه قالب (V) و زمان بارریزی (t) تعیین کرده، سپس مقدار دبی واقعی را بر دبی تئوری تقسیم می‌نمایند. به عبارت دیگر:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{V \text{ (حجم محفظه قالب)}}{t \text{ (زمان بارریزی)}} \quad \text{(دبی واقعی)} \\ Q &= A\sqrt{2gh} \quad \text{(دبی تئوری)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{Q \text{ واقعی}}{Q \text{ تئوری}} = \frac{V}{At\sqrt{2gh}} \quad (7-17)$$

که در این رابطه h ارتفاع بار (ارتفاع استاتیکی مذاب) و A اندازه سطح مقطع تنگه می‌باشد. انتخاب مقدار مناسب از این ضریب برای یک سیستم راهگاهی، در تهیه قطعات ریختگی سالم و عاری از عیب، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا افزایش آن از یک حد معین، موجب ایجاد جریانی ناآرام از مذاب در محفظه قالب می‌شود که این امر نیز به تولید قطعه‌ای معیوب و ناسالم منتهی می‌گردد. از طرف دیگر با کاهش مقدار این ضریب از حدی معین، زمان پر شدن قالب طولانی می‌شود و در نتیجه خطر انجماد زود هنگام پیش می‌آید. در جدول ۷-۱ حدود تقریبی ضریب ریختگی μ برای آلیاژهای مختلف درج شده است.

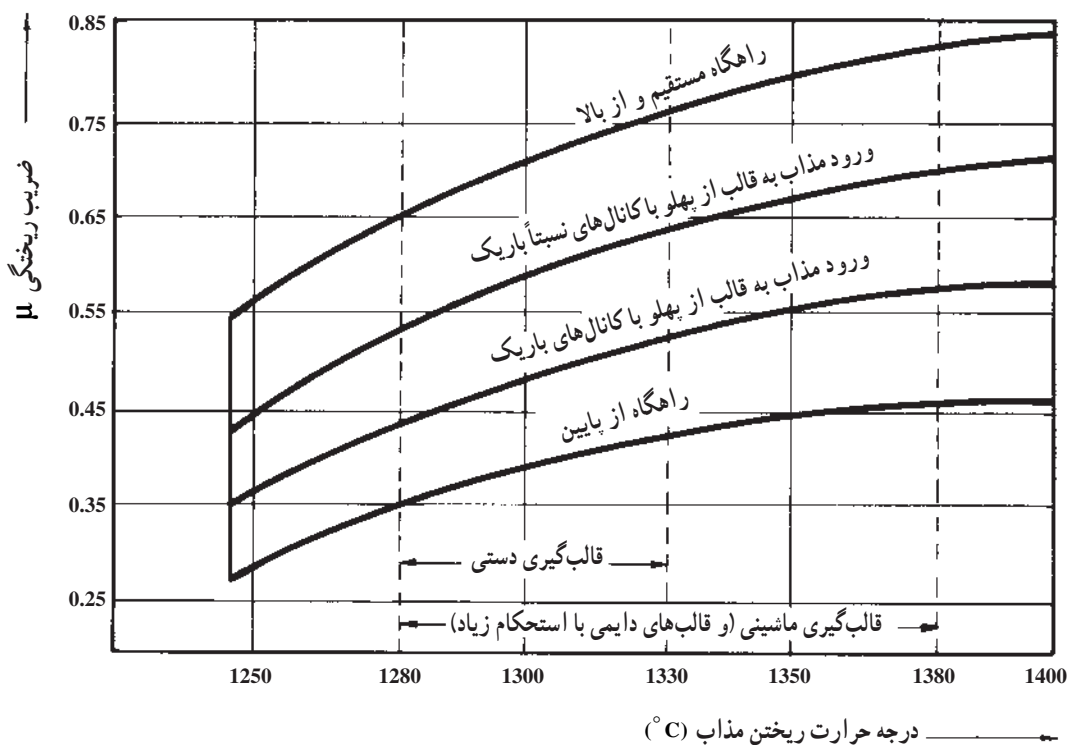
جدول ۷-۱- حدود تقریبی ضریب ریختگی برای آلیاژهای مختلف

آلیاژ	ضریب ریختگی μ
چدن‌ها	$0.27 - 0.55$
فولادها	$0.3 - 0.45$
فلزات و آلیاژهای غیرآهنی	$0.6 - 0.7$

علاوه بر نوع آلیاژ، عوامل دیگری همچون شیوه و نوع ریختن مذاب و نیز درجه حرارت ریخته‌گری به‌طور مؤثری در تعیین ضریب ریختگی دخالت دارند. این موضوع در جدول ۷-۲ و شکل ۸-۷ به خوبی مشاهده می‌شود.

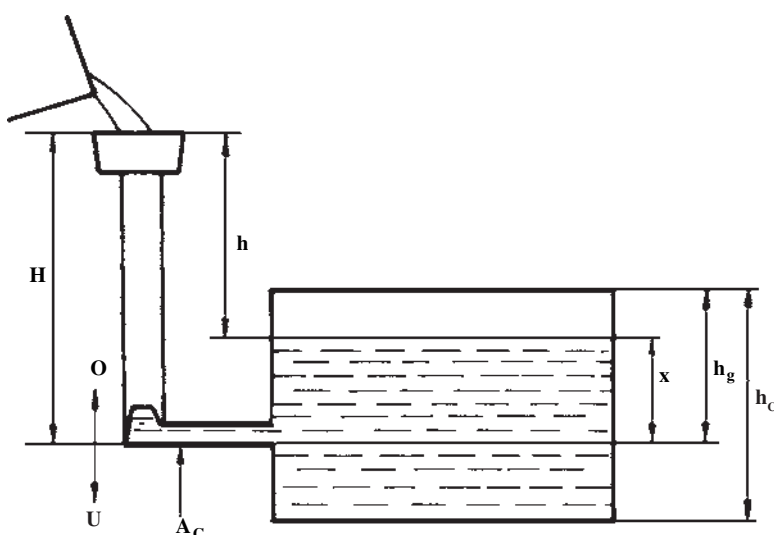
جدول ۲-۷- ضریب μ برای فولادهای ریختگی نسبت به نوع سیستم راهگاهی (تحقیق توسط: Bidulya و Dubitsky)

نوع سیستم راهگاهی	ضریب ریختگی (μ)
ساده (شامل یک یا دو کانال در سطح جدایش)	$0.4 - 0.5$
معمولی و متوسط (با راهگاه‌های پله‌ای یا انشعایی)	$0.3 - 0.4$
درهم و پیچیده (شامل صافی‌ها، تغذیه‌ها، راهگاه‌های گردابی و غیره)	$0.25 - 0.3$



شکل ۸-۷- تعیین ضریب ریختگی چند برحسب درجه حرارت ریختن و نوع سیستم راهگاهی

بر اساس رابطه تریچلی، سرعت واقعی مذاب خروجی از سطح مقطع تنگه، به ارتفاع بار h (ارتفاع استاتیکی مذاب) نیز بستگی دارد. با توجه به این که به منظور سهولت محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی، دبی جریان ثابت در نظر گرفته می‌شود، بنابراین لازم است تا سرعت مذاب و در نتیجه ارتفاع بار h نیز ثابت باشد. در صورتی که تمام محفظه قالب در درجه پایینی قرار داشته باشد، این ارتفاع ثابت همان ارتفاع درجه بالاییست. اما چنین شرایطی، با توجه به شکل و ابعاد و وزن قطعات ریختگی، همواره برقرار نمی‌باشد، به گونه‌ای که غالباً وضعیت سیستم راهگاهی را نسبت به قطعه ریختگی، می‌توان به صورت شکل ۷-۹ نشان داد.

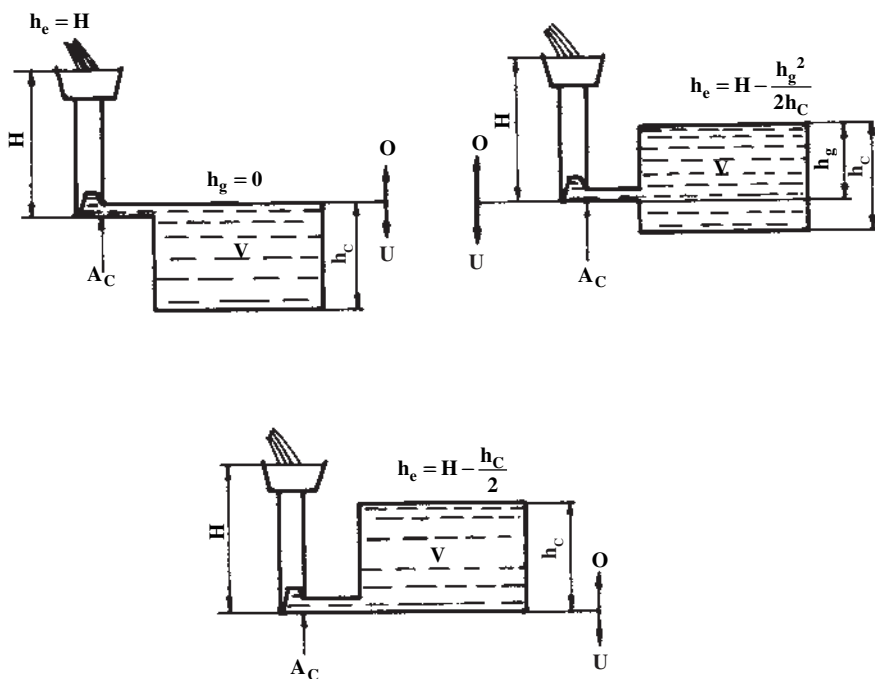


شکل ۷-۹- نمایش شماتیکی یا قالب در برش

با توجه به شکل مذکور، طبیعی است تا زمانی که قسمت پایینی محفظه قالب پر نشده است، مذاب با سرعتی ثابت تحت ارتفاع ثابت H از مقطع تنگه (A_c) عبور می‌کند. پس از آن که سطح مذاب در محفظه قالب به بالای سطح جدایش رسید، به دلیل کاهش تدریجی اختلاف میان سطح مذاب در درون قالب و سطح مذاب در حوضچه بارریز، دیگر سرعت مذاب نیز در تنگه A_c ثابت نیست و به صورت لحظه‌ای تغییر می‌یابد (طبق قانون ظروف مرتبط). تحت چنین شرایطی، سرعت لحظه‌ای در نقطه‌ای به فاصله x از سطح جدایش را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان نمود:

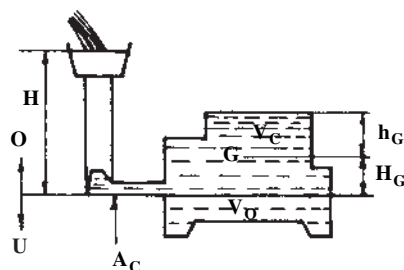
$$v = \sqrt{2g(H-x)} \quad (7-18)$$

با توجه به این که $(H - x)$ در حقیقت ارتفاع لحظه‌ای می‌باشد که در نتیجه آن سرعت مذاب نیز دیگر نمی‌تواند ثابت بماند، از این رو، لازم است تا به منظور تحقق یافتن فرض ثابت بودن دبی، متوسط ارتفاع‌های لحظه‌ای h که مقدار ثابتی است تعیین گردد. این ارتفاع متوسط ثابت، ارتفاع مؤثر^۱، h_e ، نام دارد و با قرار دادن آن در رابطه تریچلی، سرعت مؤثر و ثابتی حاصل می‌گردد. با توجه به مشخصات قطعات ریختگی و شرایط ریخته‌گری، ارتفاع مؤثر h_e برای قطعاتی با سطح مقطع یکنواخت، مطابق شکل ۷-۱۰ می‌باشد.



شکل ۷-۱۰ تعیین ارتفاع مؤثر در حالت‌های مختلف از تعبیه راهگاه

در صورتی که سطح مقطع افقی قطعات ریختگی یکنواخت نباشد، ارتفاع مؤثر، به ارتفاع مرکز ثقل قسمت فوقانی قالب بستگی دارد. در چنین مواردی، ارتفاع مؤثر در حالت کلی نشان داده شده در شکل ۷-۱۱ را می‌توان به شرح زیر محاسبه نمود:



شکل ۷-۱۱- تعیین ارتفاع مؤثر در حالت کلی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ارتفاع مؤثر برای قسمت پایینی قالب همان ارتفاع استاتیکی بار یعنی H می‌باشد، ولی در قسمت بالایی قالب، مقدار این ارتفاع متغیر است. در این مورد، ثابت شده است که ارتفاع مؤثر (ارتفاع متوسط ثابت) برابر با ارتفاع مرکز ثقل قسمت بالایی قالب تا سطح آزاد مذاب (h_G) می‌باشد. از این رو، در حالت کلی، با در نظر گرفتن نسبت حجم‌های قسمت بالایی (V_C) و قسمت پایینی (V_D) به حجم کل محفظه قالب (V) می‌توان رابطه زیر را نتیجه گرفت:

$$h_e = \frac{V_C}{V} \times h_G + \frac{V_D}{V} \times H$$

با توجه به این که $V_D = V - V_C$ و $h_G = H - H_G$ فاصله مرکز ثقل حجم قسمت بالایی قالب تا سطح جدایش دو درجه است.)، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$h_e = \frac{V_C}{V} \times (H - H_G) + \frac{V - V_C}{V} \times H$$

و در نتیجه، رابطه کلی زیر برای محاسبه ارتفاع مؤثر به دست می‌آید:

$$h_e = H - \frac{V_C}{V} H_G \quad (7-19)$$

از آن‌جا که تعیین ارتفاع مؤثر برای قطعات پیچیده به دلیل طولانی بودن محاسبات مربوط به مرکز ثقل قطعه (به‌ویژه برای قطعات غیر متقارن) وقت‌گیر است و کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد، از این رو، در شکل ۷-۱۲ روابط مربوط به ارتفاع مؤثر چند نوع شکل ساده و متداول، داده شده است که با مقایسه آن‌ها و شکل مورد نظر، می‌توان حدود تقریبی این ارتفاع را به دست آورد.

مثال: قطعه‌ای استوانه‌ای شکل به قطر ۱۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر به‌طور عمودی قالب‌گیری شده است. در صورتی که ارتفاع استاتیکی مذاب ۴۰ سانتی‌متر و راه‌بار در قسمت پایین (کف استوانه) تعبیه شده باشد، ارتفاع مؤثر را به دست آورید.

حل: براساس اطلاعات داده شده در مسأله :

$$h_C = 32 \text{ cm}$$

$$H_G = \frac{h_C}{4} = 8 \text{ cm}$$

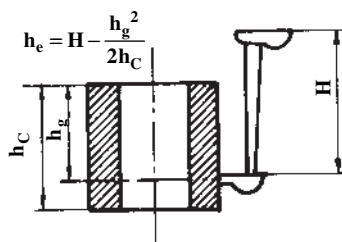
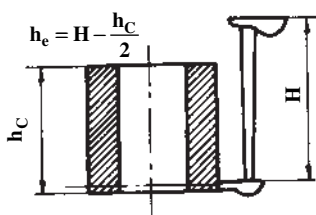
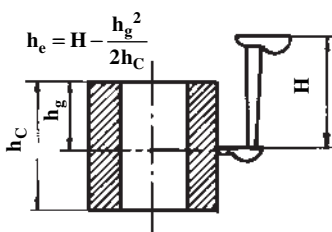
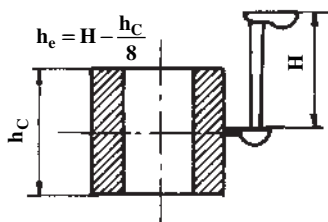
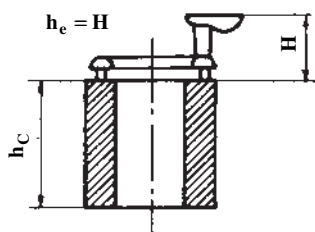
$$H = 40 \text{ cm}$$

با توجه به رابطه کلی ۷-۱۹ ارتفاع مؤثر به صورت زیر به دست می آید :

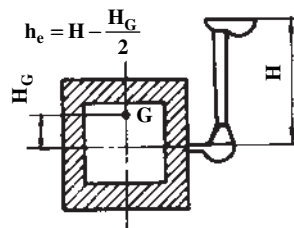
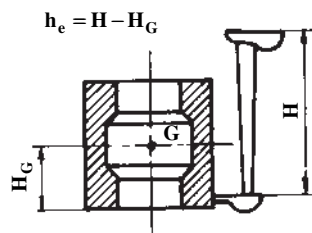
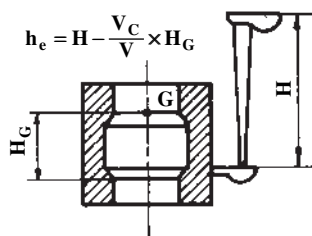
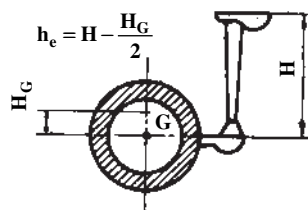
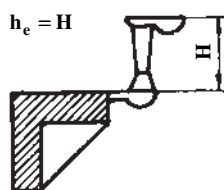
$$h_e = H - \frac{V_C}{V} H_G$$

$$h_e = 40 - (1 \times 8) = 32 \text{ cm}$$

قطع‌ات با مقاطع افقی یکنواخت



قطع‌ات با مقاطع افقی غیر یکنواخت



شکل ۱۲-۷- روابط مربوط به ارتفاع مؤثر برای چند نوع شکل ساده و متداول

۷-۲-۲- تعیین زمان بارریزی: پس از تعیین ضریب تخلیه (μ) و ارتفاع مؤثر (h_e)، با تعیین زمان بارریزی، سطح مقطع تنگه به دست می‌آید. زمان بارریزی، اصولاً به طریق تجربی به دست می‌آید و معیار اصلی در تعیین این زمان، در حقیقت سلامت قطعه ریختگی می‌باشد. بدین معنی که برای پر شدن مناسب یک قالب و در نتیجه تولید قطعه‌ای با حد مطلوبی از سلامت، تنها یک زمان معین و مناسبی وجود دارد، به گونه‌ای که پر شدن قالب در زمان‌های بیشتر و یا کمتر از زمان مذکور، منجر به تولید قطعه‌ای ناسالم می‌گردد. در جدول ۷-۳ زمان بارریزی در قالب‌های ماسه‌ای و برای آلیاژهای متداول و در ریخته‌گری با کمک روابط تجربی مربوط داده شده است.

مثال: زمان بارریزی قطعه‌ای از آلیاژ مس با سیالیت پایین ($s = 1/5$)، به وزن 5° کیلوگرم و به ضخامت متوسط 2° میلی‌متر چقدر می‌باشد؟

حل: با توجه به جدول ۷-۳ برای محاسبه زمان بارریزی قطعه مذکور، از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد:

$$t = s \sqrt[3]{\delta G}$$

بر اساس اطلاعات مسأله، یعنی: $G = 5^\circ \text{kg}$ و $\delta = 2^\circ \text{mm}$ و $s = 1/5$

$$t = 1/5 \sqrt[3]{2^\circ \times 5^\circ} = 1/5 \times 1^\circ = 15 \text{ ثانیه}$$

پس از تعیین زمان بارریزی t با استفاده از روابط تجربی داده شده در جدول ۷-۳، مساحت تنگه A_C با استفاده از رابطه ۷-۲۰ به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$A_C = \frac{m}{\rho \cdot t \cdot \mu \sqrt[3]{2gh_e}} \quad (7-20)$$

که در آن:

$$m = \text{برحسب گرم (gr)}$$

$$\rho = \text{برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب (gr/cm}^3\text{)}$$

$$t = \text{برحسب ثانیه (s)}$$

$$g = \text{برابر با } 981 \text{ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه (cm/s}^2\text{)}$$

$$h_e = \text{برحسب سانتی‌متر (cm)}$$

$$A_C = \text{برحسب سانتی‌متر مربع (cm}^2\text{)}$$

می‌باشند.

جدول ۳-۷- تعیین زمان بارریزی به کمک روابط تجربی مربوط برای آلیاژهای متداول در ریخته‌گری در قالب‌های ماسه‌ای

نوع آلیاژ	رابطه تجربی برای محاسبه زمان بارریزی	توضیحات
چدن‌های خاکستری	$t = S\sqrt{G}$ $t = \frac{\lambda}{\sqrt[3]{\delta}} (1/41 + 0.07\delta) \sqrt{G}$ $t = \frac{\lambda}{\sqrt[3]{\delta}} (1/41 + 0.07\delta)^2 \sqrt{G}$ $t = K\left(\frac{\delta}{\gamma}\right)^2 = \frac{K}{\gamma} \delta^2 = K'\delta^2$	<p>برای قطعات پیچیده با دیواره‌های نازک (۱۵-۲/۵ mm) و به وزن تا ۴۵۰ کیلوگرم</p> <p>S = ضریبی که به ضخامت دیواره‌ها بستگی دارد و مقدار آن از جدول (۴-۷) به دست می‌آید.</p> <p>G = وزن قطعه ریختگی (کیلوگرم)</p> <p>t = زمان بارریزی (ثانیه)</p> <p>برای قطعاتی با وزن ۴۵۰ کیلوگرم و با هر اندازه ضخامت دیواره‌ها (نازک یا ضخیم)</p> <p>λ = سیالیت (سانتی‌متر) از آزمایش سیالیت به دست می‌آید.</p> <p>δ = ضخامت متوسط (میلی‌متر)</p> <p>برای قطعاتی با وزن بیشتر از ۴۵۰ کیلوگرم</p> <p>برای قطعاتی با دیواره‌های نازک (با استفاده از رابطه چورنیف)</p> <p>مانند صفحات و دیواره‌های نازک</p> $K = 0.3 \left[\frac{\text{ثانیه}}{\text{میلی‌متر مربع}} \right]$ <p>برای قطعاتی به وزن (۱۰۰۰-۴۵۰) کیلوگرم</p> <p>S مطابق جدول (۵-۷) تعیین می‌شود.</p>
چدن‌های نشکن	$t = K\sqrt{G}$	<p>برای قطعات ریخته‌گری شده در قالب‌های پوسته‌ای به طور عمودی</p> <p>G = وزن قطعه ریختگی (کیلوگرم)</p> <p>K = ضریبی که به ضخامت پوسته قالب بستگی دارد و مقدار آن به صورت زیر است:</p> <p>برای ضخامت‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر</p> $K = 1/4$

نوع آلیاژ	رابطه تجربی برای محاسبه زمان بارریزی	توضیحات
چدن های نشکن		برای ضخامت های بین ۱۰ تا ۲۵ میلی متر $K = 1/8$ برای ضخامت های بیشتر از ۲۵ میلی متر $K = 2$
	$t = S\sqrt{\delta G}$	برای قطعاتی به وزن (۴۵۰-۱۰۰۰) کیلوگرم S مطابق جدول (۵-۷) به دست می آید.
فولادهای ریخته گری	$t = S\sqrt{G}$	برای قطعاتی به وزن تُن ۵۰-۵۰۰ kg $0/4 \leq S \leq 1/2$
	$t = K\delta^2$	برای صفحات و دیواره های نازک $K = 0/09 \left[\frac{\text{ثانیه}}{\text{میلی متر مربع}} \right]$
	$t = S\sqrt{\delta G}$	برای قطعاتی به وزن (۴۵۰-۱۰۰۰) کیلوگرم S مطابق جدول (۵-۷) به دست می آید.
آلیاژهای مس	$t = S\sqrt{\delta G}$ $t = K\delta^2$	آلیاژهای مس با سیالیت پایین $S = 1/3 - 1/8$ آلیاژهای مس با سیالیت خوب $S = 1/9 - 2/8$ ↓ ↓ برتر قلع برنج ها برای صفحات و دیواره های نازک از جنس برنج $K = 0/046 \left[\frac{\text{ثانیه}}{\text{میلی متر مربع}} \right]$

چنانچه جرم مذاب برحسب کیلوگرم، زمان بارریزی t برحسب ثانیه انتخاب شوند، در مورد فلزات آهنی (با وزن مخصوص تقریبی ۷) رابطه ۲-۷ را می توان به صورت زیر مورد استفاده قرار داد :

$$A_C = \frac{1000m}{\sqrt{2g \cdot t \cdot \mu} \sqrt{h_e}} = \frac{m}{\frac{\sqrt{2 \times 981}}{1000} \cdot t \cdot \mu \sqrt{h_e}}$$

$$\Rightarrow A_C = \frac{m}{0.0316 t \mu \sqrt{h_e}}$$

پس از محاسبه سطح مقطع تنگه (A_C) به طریقی که اشاره گردید، با معلوم بودن نسبت های راهگاهی ($A_s:A_r:A_g$) به آسانی می توان سطوح مقاطع راهبار و راهگاه بارریز (یا راهباره) را نیز تعیین نمود.

جدول ۴-۷- ضریب S برای محاسبه زمان بارریزی

ضریب S	ضخامت دیواره برحسب میلی متر
۱/۶۸	۲/۵ - ۳/۵
۱/۸۵	۳/۵ - ۸
۲/۲	۸ - ۱۵

جدول ۵-۷- ضریب S برای محاسبه زمان بارریزی
آلیاژهای آهنی برحسب ضخامت متوسطه قطعه

δ ضخامت برحسب میلی متر	$< 1^\circ$	2°	4°	$\geq 8^\circ$
S	$1/^\circ$	$1/35$	$1/5$	$1/7$

تمرین

۱- برای یک قطعه چدنی به ضخامت ۱۲ سانتی متر، نیمی از قالب در درجه بالایی و نیمی دیگر در درجه پایینی تعبیه شده است. ارتفاع لوله راهگاه و حوضچه روی هم ۱۸ سانتی متر است. در صورتی که چگالی این چدن $\frac{g}{cm^3}$ باشد، فشار متالواستاتیکی (فلز ایستایی) وارد بر سطح بالایی محفظه قالب را برحسب کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع و نیز برحسب نیوتن بر متر مربع حساب کنید.

$$(g = 9.81 \text{ m/s}^2)$$

۲- در یک سیستم راهگاهی برای چدن ریزی، سطح مقطع تنگه (در راهگاه فرعی و در نزدیکی سطح جدایش قالب) ۵ سانتی متر مربع و وزن قطعه ریختگی ۸۴ کیلوگرم می باشد. در صورتی که زمان بارریزی ۲۴ ثانیه و ضریب ریختگی مناسب برای این سیستم راهگاهی ۵/۰ باشد، اولاً ارتفاع مؤثر (he) و ثانیاً سرعت واقعی مذاب (V_a) در تنگه را حساب کنید. چگالی چدن مذاب $\frac{g}{cm^3}$ و شتاب ثقل زمین به طور تقریبی 10 m/s^2 فرض می شود. (از زمان پر شدن سیستم راهگاهی و نیز اختلاف چگالی چدن جامد و مذاب صرف نظر می شود).

۳- مطلوب است تعیین نسبت سرعت های جریان مذاب در دو کانال با مقاطع یکنواخت، یکسان و همتراز، یکی با مقطع مستطیل به ابعاد $15 \times 1/47$ میلی متر و دیگری با مقطع دایره. فرض می شود که جرم مخصوص و ویسکوزیته (گرانروی) مذاب در هر دو کانال برابر و ثابت بوده، حرکت مذاب آرام و بدون اغتشاش باشد.

۴- فولاد مذاب در یک کانال به قطر مؤثر $1/2$ سانتی متر به طور نیمه آرام ($N_R = 1200$) حرکت می کند. در صورتی که ویسکوزیته مذاب $7/0^\circ$ پواز و جرم مخصوص آن 7 گرم بر سانتی متر مکعب باشد، مطلوب است:

الف: تعیین سرعت مذاب در این کانال برحسب سانتی متر بر ثانیه

ب: تعیین ارتفاع مؤثر بار برحسب سانتی متر در صورتی که ضریب ریختگی $37/0^\circ$ و شتاب ثقل زمین تقریباً 1000 سانتی متر بر مجذور ثانیه باشد.

۵- مطلوب است تعیین زمان بارریزی یک قطعه چدنی به وزن $G = 144 \text{ kg}$ با ضخامت متوسط 36 mm و با سیالیت 100 cm با کمک رابطه زیر:

$$t = \frac{\lambda}{1/41 + 0.7\delta} \sqrt{G}$$

δ و λ برحسب سانتی متر، G برحسب کیلوگرم و t زمان بارریزی برحسب ثانیه است.

۶- برای ریخته‌گری یک قطعه از آلیاژ مس (برنز آلومینیم) با سیالیت خوب ($s = 2$) به وزن $G = 72/9 \text{ kg}$ و به ضخامت متوسط $\delta = 10 \text{ mm}$ ، زمان بارریزی لازم چند ثانیه است. از رابطه (ثانیه) $t = s\sqrt[3]{\delta G}$ استفاده کنید (G برحسب کیلوگرم و S برحسب میلی متر است).

پاسخ تمرینات کتاب

فصل اوّل

۱) $Q = 1280 \text{ cal}$

۲) $K = 0.57 \text{ cal/cm}^\circ \text{Cs}$

۳) $K = 0.82755 \text{ cal/cm}^\circ \text{Cs}$ $\bar{K} = 1/1622 \frac{W}{m^\circ \text{C}}$

۴) $K = 0.6 \frac{W}{m^\circ \text{C}}$

۵) الف) $6000 \frac{^\circ \text{C}}{m}$ ب) $d = 14/2 \text{ mm}$

۶) اولاً) $d = 11/4 \text{ cm}$

ثانياً) $K = 0.516 \frac{\text{kcal}}{m^\circ \text{Chr}}$, $K = 0.0014 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^\circ \text{Cs}}$

۷) $\theta = 81^\circ \text{C}$

۸) اولاً) $\theta = 2/5 \frac{W}{m^\circ \text{C}}$ و $R = 0.4 \frac{m^\circ \text{C}}{W}$

ثانياً) $q_e = 1750 \frac{W}{m^2}$

۹) الف) $K_{eq} = 1/168 \times 10^{-3}$

ب) $Q = 59/49 \text{ kcal}$

ج) $q = 519/94 W$

د) $q_e = 2599/72 \frac{W}{m^2}$

۱۰) $d = 4/5 \text{ cm}$

۱۱) الف) $Q = 19333 \text{ kcal}$

ب) $\theta_r = 765/24^\circ \text{C}$

۱۲) $Q = 28 \text{ kcal}$

۱۳) اولاً) $Q = 414623/2 \text{ J}$

ثانياً) $\theta_r = 457^\circ \text{C}$

فصل دوم

۱) $L_r = 100.1/6 \text{ mm}$

۲) $\Delta D = 0.0225 \text{ mm}$

۳) $\alpha = 1/5 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

۴) $\%S = 1/95$ (الف)

ب) $d_m = 61/17 \text{ mm}$ و $D_m = 244/68 \text{ mm}$

۵) $\%S = 1/76$

۶) $\%S = 0.237$ (الف)

ب) $\Delta D = 0.2654 \text{ mm}$

فصل سوم

۱) $\frac{M_{a_r}}{M_{a_l}} = 2/5$

۲) $\frac{M_{a_r}}{M_{a_l}} = 2/5$

۳) $\%100$ (الف)

ب) $\%65$

۴) $284/9 \text{ m}^3$ (اولاً)

ثانياً $9/5 \text{ m}^3/\text{kg}$

۵) 112 m^3

۶) $191/037 \text{ m}^3$

۷) C_2H_4 (اولاً)

ثانياً $12/37 \text{ m}^3$

۸) $q_m = 1014 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

۹) $q_m = 7532 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

فصل چهارم

۱) $\text{نیکل} = ۶/۳۱۶\text{kg}$ و $\text{کرم} = ۳/۱۲۵\text{kg}$

۲) $\text{شارژ} = ۱۲\text{ton}$ و $\text{برگشتی} = ۶۰۰\text{kg}$

۳) $\text{از شمش A} = ۱۵۷/۹\text{kg}$ و $\text{از شمش B} = ۹۲/۱\text{kg}$

۴) $۴/۷۶\text{kg}$

۵) $\text{قلع} = ۵/۴۳\%$ و $\text{روی} = ۷/۴۶\%$ و $\text{مس} = ۸۷/۱\%$

۶) $\text{Al} \Rightarrow ۵۵۵/۱۷\text{kg}$ و $\text{Al-Mg} \Rightarrow ۴۱/۲\text{kg}$

$\text{Al-Cu} \Rightarrow ۲۵/۲۵\text{kg}$ و $\text{Al-Si} \Rightarrow ۳۸۸/۴۶\text{kg}$

۷) الف) $V_C = ۳/۰۶\text{dm}^۳$

ب) $m_M = ۱/۸۷\text{kg}$

ج) $m_M = ۲۵/۴\text{kg}$

د) $m_M = ۵/۶\text{kg}$

۸) الف) $m_C = ۹۹/۴\text{kg}$

ب) $m_C = ۹۵/۷۱۴\text{kg}$

ج) $\Delta m_C = ۳/۶۸۶\text{kg}$ و $\Delta m_C = ۳/۷\%$

۹) $W_C = ۱۳۶/۱۶\text{kg}$

۱۰) $\%S = ۰/۳۳۵$

۱۱) الف) $R_C = ۸۲/۳۵\%$

ب) $R_t = ۵۹/۵۲\%$

ج) ۲۳kg

۱۲) $R_t = ۶۰\%$ و $\text{ضایعات} = ۴۰\%$

۱۳) الف) $R_C = ۶۶/۶۷\%$

ب) $\text{درصد عیوب} = ۱۰/۷۷\%$ و $\text{تعداد قطعات معیوب} = ۳۲$

۱۴) $H_r = ۴/۳۹\text{dm} = ۴۳۹\text{mm}$

فصل پنجم

۱) الف) $F_N = 5877 / 65N$

۲) $F_{A_1} = 409 / 5N$ و $F_{A_2} = 1706 / 25N$

۳) $F_S = 944 / 622N$

۴) $F_B = 7853 / 328N$ و $F_N = 4939 / 2N$

۵) الف) $F_B = 9569 / 559N$ و $F_N = 7781 / 47N$

ب) $F_B = 21962 / 77N$ و $F_N = 18088 / 243N$

ج) $F_B = 1764 / 163N$ و $F_N = 1387 / 07N$

د) $F_B = 13994 / 4N$ و $F_N = 11792 / 34N$

۶) الف) $F_A = 179 / 01N$ و $W_k = 42 / 768N$ و $W'_k = 136 / 242N$

ب) $F_A = 172 / 873N$ و $W_k = 43 / 313N$ و $W'_k = 129 / 56N$

ج) $F_A = 464 / 95N$ و $W_k = 90 / 66N$ و $W'_k = 374 / 29N$

د) $F_A = 1069 / 81N$ و $W_k = 239 / 89N$ و $W'_k = 829 / 92N$

۷) الف) $F_A = 131 / 44N$

ب) $F_A = 166 / 71N$

۸) $F_A = 179 / 416KN$

۹) $\frac{W'_k}{2} = 65 / 526KN$

۱۰) $\frac{W'_k}{2} = 171 / 21N$

۱۱) $\frac{W'_k}{\lambda} = 91N$

۱۲) $F_W = 1 / 5KN$

$$۱) H = D \begin{cases} \text{الف) } ۱/۲ \quad M_C = ۲۹/۳۹ \text{mm}, M_r = ۳۵/۲۶۸ \text{mm} \\ \text{ج) } D_r = ۲۱۱/۶ \text{mm}, H_r = ۲۱۱/۶ \text{mm} \\ \text{د) } V_r = ۷۴۳۷/۳۲۳ \text{cm}^3 \end{cases}$$

$$H = ۱/۵D \{ D_r = ۱۸۸ \text{mm}, H_r = ۲۸۲ \text{mm}, V_r = ۷۸۲۴/۱۰ \text{cm}^3$$

$$۲) H = D_r ۱۷۶/۳۴ \text{mm}, H_r = ۱۷۶/۳۴ \text{mm}$$

$$۳) \text{الف) } D_r = ۴۱/۷۶ \text{cm}, H_r = ۴۱/۷۶ \text{cm}$$

$$\text{ب) } D_r = ۵۹/۹۸ \text{cm}, H_r = ۵۹/۹۸ \text{cm}$$

$$۴) \text{الف) } V_r = ۷۵ \text{cm}^3, D_r = ۸/۶ \text{cm}, H_r = ۱۲/۹ \text{cm}$$

$$\text{ب) } V_r = ۲۴ \text{cm}^3, D_r = ۶/۷۴ \text{cm}, H_r = ۶/۷۴ \text{cm}$$

$$۵) R_r = ۱۶\%$$

$$۶) D_r = ۱۸/۲۸ \text{cm}, H_r = ۲۷/۴۲ \text{cm}$$

$$۷) a \approx ۸ \text{cm}, b = ۱۲ \text{cm}, H = ۱ \text{cm}$$

فصل هفتم

$$۱) P = ۰/۱۱۵۵ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}, P = ۱۱۳۳۰/۵۵ \text{ N/m}^2$$

$$۲) \text{ا) } h_e = ۲۰ \text{ cm} \quad \text{و} \quad \text{ثانياً} \quad v_a = ۱۰۰ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$۳) \frac{v_{\square}}{v_{\circ}} = ۱/۳۲$$

$$۴) \text{الف) } v = ۱۰۰ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad \text{ب) } h_e = ۳۶/۵۲ \text{ cm}$$

$$۵) t = ۱۹/۹۴۴ (\text{s})$$

$$۶) t = ۱۸ (\text{s})$$

مآخذ

در تدوین این کتاب از برخی مطالب، شکل‌ها و تمرین‌های کتاب‌های زیر استفاده شده است :

سال انتشار	ناشر	نام نویسنده	نام کتاب
۱۹۸۶	Mir Publishers	G- Abramov	۱- Foundry Practice for young Workers
۱۹۸۴	Rolf Roller	Karl Bachhofner	۲- Fachkenntnisse Technologie
۱۹۸۴	Mir Publishers	O.V.Chernyak	۳- Basic Hydraulics and Heat Engineering
۱۹۸۲	Mir Publishers	R.A.Gladkova	۴- Physics Problems for Technician
۱۹۷۵	Mir Publishers	I.T.Shvets	۵- Hea Engineering
۱۹۶۷	John Wiley and Sons, INC.	W. Trinks	۶- Industrial Furnaces
۱۹۸۲	Came lotpress Southampton	P.R.Beeley	۷- Foundry Technology
۱۹۶۷	McGraw-Hill Book Company	Phillip C. RO - Senthall	۸- Principles of Metal casting
۱۳۷۰ شمسی	وزارت آموزش و پرورش	جلال حجازی - پرویز دوامی سیاوش نظم‌دار - علی اکبر عسکریزاده	۹- حساب فنی سال سوم و چهارم رشته ذوب فلزات و ریخته‌گری

