





دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی مواد

## بهینه سازی جریان مذاب در تاندیش ریخته گری مداوم در جهت حذف آخال ها

رساله دکتری مهندسی مواد

علیرضا اعلائی

اساتید راهنما

دکتر حسین ادريس

دکتر ابراهیم شیرانی

آذر 89



## فهرست مطالب

	<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
	فهرست مطالب	
هفت		
1	چکیده	
2	<b>فصل اول: مقدمه</b>	
2	1-1- اهمیت ریخته گری مداوم	
3	2-1- فعالیت های انجام گرفته	
3	3-1- اهداف تحقیق	
4	4-1- توسعه تحقیق	
5	<b>فصل دوم: مطالعات مروری</b>	
5	1-2- مقدمه	
8	2-2- منشاء ناخالصی های اکسیدی در فولاد	
8	1-2-2-1- آخال ها با منشاء خارجی	
9	2-2-2-2- آخال ها با منشاء داخلی	
9	3-2- مدل سازی تاندیش و طراحی	
10	1-3-2- مدل سازی فیزیکی	

- 12 2-3-2- حالت های مشابهت
- 18 4-2- مدل سازی ریاضی جریان سیال در تاندیش
- 18 1-4-2- معادلات حاکم
- 20 2-4-2- شرایط مرزی
- 21 3-4-2- روش حل معادلات
- 24 4-4-2- حل عددی
- 33 5-2- نحوه ارزیابی الگوی جریان سیال در تاندیش
- 34 6-2- مقیاس ساخت مدل فیزیکی تاندیش
- 40 7-2- مدل کردن جریان در تاندیش
- 41 8-2- معادلات حاکم بر فاز سیال در جریان های دو فازی و شرایط
- 42 1-8-2- معادله پیوستگی
- 43 2-8-2- معادله بقای ممنتوم
- 43 9-2- روش های مختلف حل جریان های مغشوش
- 43 1-9-2- روش های تجربی
- 43 2-9-2- روش انتگرالی
- 43 3-9-2- روش های شبیه سازی گردابه های بزرگ
- 44 4-9-2- روش حل عددی مستقیم
- 44 5-9-2- روش متوسط گیری
- 44 10-2- مدل های جریان مغشوش
- 44 1-10-2- مدل  $K-e$  استاندارد
- 46 2-10-2- مدل  $K-e$  اصلاح شده
- 47 3-10-2- مدل جبری تنش های رینولدز

52	1-3- مقدمه
54	2-3- توابع شهودی (واقعی) انتخابی و محدودیت های از آنالیز CFD
54	1-2-3- منحنی RTD
55	2-2-3- حذف آخال
55	3-2-3- طول اختلاط
56	4-2-3- دما
56	5-2-3- سرباره
56	6-2-3- فروریزی شرشره
56	3-3- سایر محدودیتها
57	4-3- مدل سازی کاهش آخال در تاندیش
57	1-4-3- شرح تاندیش واقعی
59	2-4-3- تاندیش مدل سازی
60	3-4-3- پیکر بندی مدل آبی
63	5-3- مدل سازی جریان مذاب در تاندیش با نرم افزار فلوئنت
63	1-5-3- معادلات حاکم
64	2-5-3- تولید شبکه
65	فصل چهارم: شبیه سازی عددی جریان های با سطح مشترک
65	1-4- مقدمه
66	2-4- معادلات حاکم
66	1-2-4- معادله پیوستگی
66	2-2-4- معادله ممنتوم
67	3-4- شبیه سازی عددی جریان های با سطح مشترک
67	4-4- روش های دنبال کننده سطح
68	5-4- روش های تسخیر کننده سطح
69	6-4- روش جابجایی پیوسته

70	7-4- روش لولست
70	8-4- روش ردیابی حجم
74	9-4- بازسازی و انتقال سطح در روش PLIC در جریان های دو به
74	1-9-4- مرحله بازسازی در جریان های دو بعدی
78	2-9-4- مرحله انتقال در جریان های دو بعدی
81	10-4- بازسازی و انتقال سطح در روش PLIC در جریان های سه
82	<b>فصل پنجم: ردیابی ذرات</b>
82	1-5- مقدمه
83	2-5- روش اویلری - لاگرانژی
84	3-5- روش اویلری - اویلری
85	1-3-5- مدل VoF
85	2-3-5- مدل Mixture
85	3-3-5- مدل اویلری
85	4-5- معادله لاگرانژی حرکت ذره
86	1-4-5- نیروی درگ
87	2-4-5- نیروی مگنوس
87	3-4-5- نیروی لیفت سافمن
89	4-4-5- جرم مجازی
89	5-4-5- گرادیان فشار
89	6-4-5- نیروی براونی
92	5-5- انتخاب مدل ره گیری ذرات
92	1-5-5- اثر میزان بارگیری ذرات، }
93	2-5-5- عدد استوکس
93	6-5- انتخاب مدل مناسب

94	7-5- تکنیک های رد یابی در مدل های فیزیکی
94	1-7-5- تکنیک LDA
94	2-7-5- تکنیک DPIV
97	<b>فصل ششم: نتایج و بحث</b>
97	1-6- مقدمه
98	2-6- وضعیت سطح مذاب
98	1-2-6- وضعیت سطح مذاب با استفاده از حل عددی
105	2-2-6- وضعیت سطح مذاب با استفاده از مدل آبی
105	3-6- ردیابی آخال ها
105	1-3-6- ردیابی آخال ها با استفاده از حل عددی
113	4-6- معیارهای مشابهت
115	1-4-6- معیار مشابهت فرود
119	2-4-6- معیار مشابهت رینولدز
122	<b>فصل هفتم: نتیجه گیری</b>
122	1-7- جمع بندی کلی نتایج
123	2-7- پیشنهادات
125	<b>پیوست ها</b>
126	پیوست شماره 1
131	پیوست شماره 2
136	پیوست شماره 3
140	<b>مراجع</b>



## فهرست اشکال

صفحه	فصل اول:
3	شکل 1-1: ویژگی های مهم در تولید فولاد
	<b>فصل دوم:</b>
6	شکل 2-1: نمایش شماتیکی فرآیند ریخته گری مداوم
8	شکل 2-2: محیط اطراف تاندیش
8	شکل 2-3: انواع فرآیندهای ریخته گری مداوم
11	شکل 2-4: تاندیش های معمول مورد استفاده در واحدهای ریخته گری مداوم
15	شکل 2-5: توصیف شماتیکی سرعت آخال و جریان سیال در تاندیش و مدل آبی
18	شکل 2-6: برخی از پدیده های موجود در سیستم تاندیش
24	شکل 2-7: خلاصه ای از تحقیقات انجام شده بر روی تاندیش فولادسازی
34	شکل 2-8: حرکت اجزاء سیال در یک مخزن
40	شکل 2-9: شماتیکی از یک سیستم مدل آبی تاندیش
40	شکل 2-10: پیش بینی منحنی های آر-تی-دی برای خروجی های تاندیش توسط مدل ریاضی
40	شکل 2-11: منحنی های آر-تی-دی رسم شده برای خروجی های تاندیش توسط مدل آبی
41	شکل 2-12: مدل توزیع زمان اقامت طراحی شده در تاندیش مورد نظر توسط توماس
42	شکل 2-13: مقایسه بین پیش بینی مدل و اندازه گیری های انجام شده در شرکت آرمکو در خروجی تاندیش بزرگ
42	شکل 2-14: مقایسه بین پیش بینی مدل و اندازه گیری های انجام شده در شرکت آرمکو در خروجی تاندیش کوچک
	<b>فصل سوم:</b>
57	شکل 3-1: ابعاد داخلی تاندیش ریخته گری مداوم مورد استفاده در واحد فولادسازی شرکت فولاد مبارکه اصفهان

60 شکل 2-3: الف) یک تاندیش با یک شرود عصایی بطور شماتیکی (ب) یک شرود عصایی (ج) نمایش دو بعدی مدل آبی

61 شکل 3-3: تاندیش با تجهیزات جانبی و تشکیل مناطق مرده

62 شکل 4-3: پیکربندی سیستم مدل آبی

64 شکل 5-3: تولید شبکه دو بعدی مدل آبی

#### فصل چهارم:

71 شکل 4-1: نمونه ای از توزیع تابع F در حوالی سطح مشترک

73 شکل 4-2: تولید سطح مشترک یک قوس دایره ای توسط روش SLIC

73 شکل 4-3: تولید سطح مشترک یک قوس دایره ای توسط روش SOLA

74 شکل 4-4: تولید سطح مشترک یک قوس دایره ای توسط روش PLIC

75 شکل 4-5: بازسازی سطح با به کارگیری یک استتسیل 9 سلولی

76 شکل 4-6: حالات مختلف قرارگیری سطح در سلول های سطحی، ناحیه ی تیره رنگ سیال 1 و ناحیه سفید رنگ سیال 2

78 شکل 4-7: سه حالت ممکن قرارگیری سطح برای یک n مشخص

79 شکل 4-8: نمایش سطح در مختصات محلی سلول

79 شکل 4-9: جابجایی سطح در راستای x

#### فصل پنجم:

88 شکل 5-1: صورت شماتیک نیروی لیفت سافمن

90 شکل 5-2: حرکت یک ذره در اثر نیروی براونی

95 شکل LDA 5-3: شماتیک نحوه عملکرد در تکنیک

96 شکل 5-4: شماتیک نحوه عملکرد در تکنیک DPIV

#### فصل ششم:

101 شکل 6-1: بررسی سطح آزاد به روش VoF

12

104

شکل 6-2: کانتورهای زاویه سرعت جریان

104

شکل 6-3: کانتورهای انرژی جنبشی اغتشاش جریان

107

شکل 6-4: رد یابی آخال ها با استفاده از نرم افزار فلونت

116

شکل 6-5: توصیف شماتیکی ابعاد طولی و اندازه آخال در تاندیش و مدل آبی

118

شکل 6-6: ارتباط  $\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}$  با معیار مشابهت فرود  $\gamma$

118

شکل 6-7: ارتباط  $\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}$  با معیار مشابهت فرود  $\lambda$

119

شکل 6-8: ارتباط  $\gamma$  با معیار مشابهت فرود  $\lambda$

121

شکل 6-9: ارتباط  $\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}$  با معیار مشابهت رینولدز  $\lambda$

## فهرست جداول

صفحه	فصل دوم:
12	جدول 1-2: مشخصه های فیزیکی آب در دمای $20^{\circ}\text{C}$ و فولاد در دمای $1600^{\circ}\text{C}$
18	جدول 2-2: گروه های بدون بعد مربوط به تاندیش
21	جدول 3-2: مقادیر ثوابت تجربی مدل $k - e$
23	جدول 4-2: برخی از مشخصات بررسی های عددی انجام شده توسط محققان
36	جدول 5-2: مدل های آبی مختلف تاندیش که توسط محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است
	فصل سوم:
61	جدول 1-3: برخی اطلاعات تاندیش ریخته گری مداوم و مدل آبی
	فصل پنجم:
87	جدول 1-5: مقدار ضریبی استوکس - کانینگهام برای چند ذره مختلف $\lambda = 0/07 \mu\text{m}$
	فصل ششم:
100	VoF جدول 1-6: اطلاعات حل عددی به روش
106	Phase discrete جدول 2-6: اطلاعات مربوط به ردیابی آخال ها با روش

### فهرست نمادها و علائم اختصاری

غلظت بدون بعد شده ماده ردیاب در سیال	$C$
ظرفیت گرمایی فولاد ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$C_p$
ضریب ویسکوزیته گردابه ای	$C_\mu$
ضریب تصحیح استوکس - کانینگهام	$C_C$
ضریب درگ ذره کروی	$C_D$
جمله پخش	$D_{ij}$
ضریب دیفوزیون مولکولی ( $\text{m}^2 \text{sec}^{-1}$ )	$D_0$
ضریب دیفوزیون پراکندگی موثر ( $\text{m}^2 \text{sec}^{-1}$ )	$D_{eff}$
تسور نرخ تغییر شکل متوسط	$\bar{d}_{ij}$
تابع مشخص کننده ی فاز	$F$
نیروی درگ	$F_{Darg}$
نیروی مگنوس	$F_{Magnus}$
نیروی لیفت سافمن	$F_{saff}$
نیروی براونی	$F_{Brownian}$
نیروی الکتریکی	$F_{Electrical}$
نیروی گرانشی	$F_{Gravity}$
نیروی اعمالی به ذره در اثر گرادیان فشار	$F_{P.G.}$
نیروی جرم مجازی	$F_{Virtual}$
فرکانس دوپلر	$f_D$
نیروی اینرسی	$F_i$
نیروی گرانشی	$F_g$
نیروی ویسکوزی	$F_\mu$
نیروی اینرسی در مدل	$F_{i,m}$
نیروی اینرسی در تاندیش	$F_{i,p}$
نیروی گرانشی در مدل	$F_{g,m}$
نیروی گرانشی در تاندیش	$F_{g,p}$
نیروی ویسکوزی در تاندیش	$F_{\mu,p}$
نیروی ویسکوزی در مدل	$F_{\mu,m}$
عدد فرود	$Fr$
عدد فرود مدل	$Fr_m$
عدد فرود تاندیش	$Fr_p$
شتاب ثقلی ( $\text{m s}^{-2}$ )	$g$
ابعاد طولی مدل (cm)	$H_1$
ابعاد طولی مدل (cm)	$H_2$
آنتالپی کل فولاد ( $\text{J kg}^{-1}$ )	$H$
آنتالپی محسوس فولاد ( $\text{J kg}^{-1}$ )	$H_s$

$H_l$	آنتالپی نهان ذوب فولاد ( $\text{j kg}^{-1}$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت ( $\text{j m}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$J$	جاکوبین
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$k$	ثابت بولتزمن = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
$k$	ثابت سافمن = $2/594$
$k_o$	ضریب هدایت حرارتی مولکولی ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$k_{air}$	ضریب هدایت حرارتی هوا ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$k_{eff}$	ضریب هدایت حرارتی موثر فولاد ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$k_{steel}$	ضریب هدایت حرارتی فولاد ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$k_{water}$	ضریب هدایت حرارتی آب خنک کننده ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$L_1$	ابعاد طولی مدل (cm)
$L_2$	ابعاد طولی مدل (cm)
$L_3$	ابعاد طولی مدل (cm)
$L_4$	ابعاد طولی مدل (cm)
$L_f$	گرمای نهان ذوب فولاد در نقطه ذوب ( $\text{j kg}^{-1}$ )
$L_m$	اندازه طولی مدل آبی
$L_p$	اندازه طولی تاندیش (مدل واقعی)
$\dot{m}_p$	دبی جرمی ذره
$N$	تعداد ذرات
$p^*$	فشار بدون بعد
$Pr$	عدد بدون بعد پرنلد
$Pr_t$	عدد بدون بعد پرنلد مغشوش
$Re$	عدد رینولدز
$Re_m$	عدد رینولدز مدل
$Re_p$	عدد رینولدز تاندیش
$Re_T$	عدد بدون بعد رینولدز مغشوش
$Re_p$	عدد رینولدز ذره
$R(\tau)$	تابع ارتباط خودی
$R_{uu}(\tau)$	تابع فوریه معکوس تابع طیف قدرت
$St$	عدد استوکس
$S_m^p$	جمله چشمه ناشی از انتقال جرم بین دو فاز
$S_{u_i}^r$	جمله چشمه ناشی از حرکت ذرات جامد در فاز سیال
$S$	نسبت دانسیته ذره به دانسیته سیال
$Sc_t$	عدد بدون بعد اشמיד مغشوش
$S_{uu}(\omega)$	طیف قدرت سرعت ذرات

$T$	درجه حرارت (K)
$T_o$	دمای اولیه سیال در تاندیش (K)
$T_{in}$	دمای سیال ورودی به تاندیش (K)
$T_{out}$	دمای سیال خروجی از تاندیش (K)
$T_{water}$	متوسط دمای آب در گردش خنک کننده قالب مسی (K)
$Tu$	عدد بدون بعد ریچاردسون تاندیش
$t$	زمان (sec)
$\bar{t}$	متوسط زمان اقامت سیال (sec)
$t^*$	زمان بدون بعد
$V^*$	سرعت بدون بعد
$\bar{u}$	سرعت شعاعی
$u_i^f$	سرعت ذره ای سیال
$u^p$	سرعت ذره
$\bar{w}$	سرعت مماسی
$x(t)$	موقیت ذره
$x^*$	طول بدون بعد
$\varepsilon$	نرخ اتلاف ویسکوزیته
$\left(\frac{e}{k}\right)$	زمان مشخصه لاگرانژی توربولانس
$e$	متوسط ضریب نشر سطح فولاد = 0/8
$l$	ضریب انبساط حرارتی خطی فولاد $= 3/61 \times 10^{-6} = (C^{-1})$
$m_b$	ضریب ویسکوزیته مولکولی $(kg\ m^{-1}\ sec^{-1})$
$m_{eff}$	ضریب ویسکوزیته مؤثر $(kg\ m^{-1}\ sec^{-1})$
$m_t$	ضریب ویسکوزیته مغشوش $(kg\ m^{-1}\ sec^{-1})$
$q$	زمان بدون بعد
$r$	دانسیته فولاد $(kg\ m^3)$
$r_g$	دانسیته گاز $(kg\ m^3)$
$r_l$	دانسیته مایع $(kg\ m^3)$
$\vec{\omega}_p$	چرخش ذره
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی $(m^2/s)$
$\nu_T$	ویسکوزیته سینماتیکی گردابه ای مغشوش $(m^2/s)$
$\tau$	زمان آسایش ذره
$f_{ij}$	کرنش فشار
$\mathbf{V}$	تنسور متوسط چرخش
$\dot{\gamma}$	نرخ برشی

## چکیده

در فرآیند ریخته‌گری مداوم، بهینه‌سازی الگوی جریان مذاب در تاندیش نقش به‌سزایی در کنترل میزان حذف آخال‌ها و در نهایت کیفیت فولاد تولید شده دارد. هدف این رساله ارائه یک مدل مناسب در الگوی جریان فولاد مذاب در تاندیش است به گونه‌ای که آخال‌ها بتوانند در تاندیش از جریان اصلی مذاب جدا و به سرباره پیوندند. این طراحی بدون تجهیزات جنبی مانند Weir، Pad، Turbo Stopper و Dam انجام گرفت که موجب افزایش حجم مفید تاندیش، کاهش حجم مناطق مرده و یکنواخت‌تر شدن جریان شد. سبکی آخال‌ها نسبت به فولاد مذاب و از طرفی الگوی جریان باعث می‌گردد که جریان رو به بالای فولاد مذاب در تاندیش بتواند در هدایت آخال‌ها به سوی سرباره مؤثر واقع شود. روش کار به دو صورت حل عددی و مدل‌سازی فیزیکی انجام شده که تأکید اصلی بر بخش عددی است. در بخش عددی بدلیل وجود تقارن در توزیع جریان مذاب داخل تاندیش، تنها یک دوم آن در حالت دو بعدی، مدل‌سازی ریاضی شد، همچنین در مدل‌سازی فیزیکی با در نظر گرفتن معیارهای مشابهت در حد امکان، مدل آبی با مقیاس 1:4 آماده شد. با بکارگیری نرم‌افزار مختصاتی و هندسی GAMBIT هندسه مدل تاندیش شبکه بندی و در شرایط ویژه قرار داده شد و آماده ورود به فضای دینامیک سیالات محاسباتی (DFC) که برای آنالیز کردن، طراحی و متدلوژی بهینه جریان سیال و دیگر کاربردهای انتقال گرما بکار می‌رود، گردید. در این پژوهش با توجه به مقتضیات الگوی پیشنهادی برای جریان مذاب به دو مقوله یکی وضعیت سطح آزاد در فصل مشترک آب- هوا و دیگری ردیابی ذرات آخال در هنگام ورود به مدل تاندیش و پیمایش آنها به سمت سطح پرداخته شد و با استفاده از مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی کامپیوتری و اعتبار حل عددی با بکارگیری مدل آبی بررسی گردید. برای این منظور ابتدا وضعیت سطح آزاد مدل تاندیش با فرض شرایط همدما، معادلات دیفرانسیلی حاکم به روش اختلاف محدود در شرایط ناپایدار و در نظر گرفتن جریان مغشوش با مدل  $k-\epsilon$  و احتساب شرایط مرزی و اولیه با استفاده از منطق جریان‌های دو فاز (فاز اولیه هوا و فاز ثانویه آب) در قالب روش کسر حجمی سیال (FoV) تعیین شد. این مدل یک تکنیک ره‌گیری سطح است که در یک مش ثابت اویلری اعمال می‌گردد و برای دو یا چند سیال آمیخته نشدنی که موقعیت سطح مشترک بین سیال‌ها مورد توجه است، طرح شده است. در این روش تابع مشخص‌کننده‌ی فاز در هر یک از سیال‌ها منظور و به کمک این تابع چگالی و لزجت در کل دامنه حل تعریف و با بکارگیری از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT حل عددی و نتایج بصورت کانتورهای کسر حجمی فاز‌ها در زمان‌های مختلف آماده گردید و به موازات آن با ساخت یک شroud عصبی شکل در مدل آبی وضعیت سطح آزاد پی‌گیری گردید که نتایج حاکی از یک سطح آزاد نسبتاً هموار بود. در مرحله بعدی با توجه به فیزیک مسئله در حرکت آخال‌ها تنها به نیروهای شناوری، درآنگ و وزن آخال‌ها داده شد. فرضیاتی از قبیل کروی بودن ذرات و یکنواختی اندازه ذرات استفاده شد. ردیابی ذرات به روش لاگراژی صورت گرفت و به لحاظ اندازه و دبی جرمی ورودی ذرات به مدل تاندیش این بار در فضای جریان‌های دو فاز، روش فازهای گسسته (Discrete Phase) مورد مطالعه قرار گرفت. معادلات دیفرانسیلی در شرایط ناپایدار و در نظر گرفتن حرکت استوکسی برای آخال‌ها با نرم‌افزار فوق حل عددی گردید و نتایج به شکل کانتورهای ردیابی ذرات برحسب اندازه سرعت و زمان توقف آنها در زمان‌های مختلف ثبت شد که در نتیجه هدایت آخال‌ها به سمت سرباره را به دنبال داشت.

**کلمات کلیدی:** تاندیش ریخته‌گری مداوم، حذف آخال، حل عددی، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌سازی فیزیکی، جریان دو فاز، کسر حجمی سیال، فازهای گسسته، جریان رو به بالا، معیارهای مشابهت



## فصل اول

### مقدمه

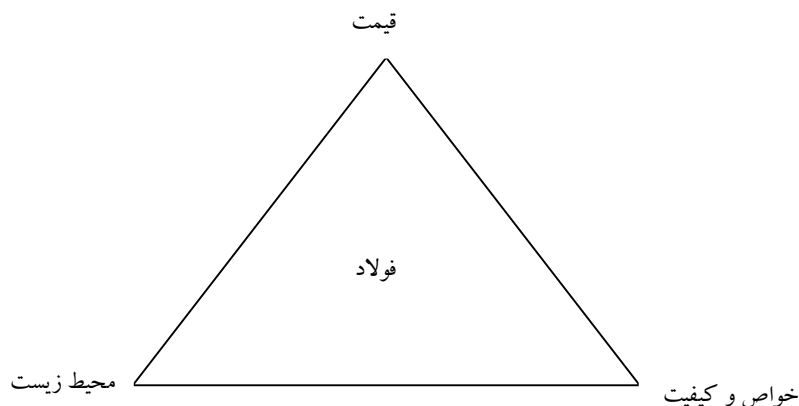
#### 1-1- اهمیت ریخته گری مداوم

آهن و فولاد از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. از کاربردهای آن می توان در جنگ و صلح، کشاورزی و صنعت، حمل و نقل هوایی، زمینی و دریایی، ساخت انواع سازه ها و مواد متنوع دیگری نام برد. میزان تولید فولاد در حال حاضر از مرز یک میلیارد تن در سال گذشته است. در حالی که میزان تولید آلومینیوم و مس در سال به ترتیب حدود بیست و ده میلیون تن است. علت این اختلاف عمده در مقدار تولید را می توان در شکل 1-1 دنبال کرد. فولاد در قرن جدید به عنوان فلز سبز<sup>1</sup> مطرح گردیده است [1].

ریخته گری مداوم مواد یک فرآیند قدیمی در فرآیند کارخانه ای نمی باشد. فرآیند ریخته گری مداوم توسط شخصی به نام هنری بسمر<sup>2</sup> در سال 1858 میلادی ارائه شد اما در دهه 1960 میلادی توسعه یافت. به هر حال فرآیند ریخته گری مداوم از آن زمان تا کنون به صورت گسترده رشد و توسعه یافته است [2]. در حال حاضر بیشتر مواد فلزی با تولید انبوه از پروسه ریخته گری مداوم استفاده می کنند. در سال 1992 ریخته گری مداوم برای تولید بیش از 90% فولاد جهان استفاده شده که شامل فولاد کربنی، آلیاژی و گریدهای فولاد ضد زنگ می شد [3].

<sup>1</sup> عنوان فلز سبز بواسطه تولید و بازیافت فولاد با کمترین آلودگی زیست محیطی نسبت به دیگر مواد مهندسی می باشد. از اینرو حدود نیمی از تولید فولاد در کشورهای توسعه یافته از قراضه می باشد.

<sup>2</sup> Henry Bessemer



شکل 1-1: ویژگی های مهم در تولید فولاد [1]

### 2-1- فعالیت های انجام گرفته

طراحی تاندیش ریخته گری مداوم به صورت سنتی با توجه به آزمایش های متنوع تجربی و یا به صورت مدرن در چند دهه اخیر با بکارگیری تکنیک های شبیه سازی کامپیوتری و یا استفاده از مدل فیزیکی یا همان مدل آبی<sup>1</sup> با تجهیزات پیشرفته از جمله تجهیزات تصویر برداری و رد یابی ذرات، ارائه شده است. با توجه به طبیعت و ویژگی فرآیند دست یابی به میدان جریان واقعی در تاندیش ریخته گری مداوم بسیار مشکل است. اندازه گیری های غیر مستقیم مانند ردیابی آخال ها و اثر جذب اکسیژن به دست یابی زمان توقف<sup>2</sup> و حضور ذرات آخال در تاندیش ریخته گری مداوم می انجامد. از طرف دیگر مدل آبی در وضعیت پایدار<sup>3</sup> با معیارهای مشابهت عدد رینولدز<sup>4</sup> و عدد فرود<sup>5</sup> بیشترین شباهت در خصوصیات پارامترهای جریان و آمیختن در تاندیش ریخته گری مداوم ارائه می کند [6,5,4,7]. همچنین مدل آبی اثرات حرارتی، نیروی شناوری<sup>6</sup> و جابجایی آزاد را می تواند با یک سری تعدیل سازی های مناسب اندازه گیری کند [8و9].

با ظهور ابر کامپیوترها و نرم افزارهای مدل سازی جریان سیال، "دینامیک سیالات محاسباتی"<sup>7</sup> (CFD) ابزار موثری برای تشخیص تفاوت ها در طراحی های تاندیش ریخته گری مداوم شد. نه تنها آثار گرمایی بلکه هر تغییر جزئی در میدان جریان را می توان مورد بررسی قرار داد [10,11,12].

### 3-1- اهداف تحقیق

اهداف این مطالعه عبارتند از:

<sup>1</sup> Water Modelling

<sup>2</sup> Residence Time

<sup>3</sup> Steady-State

<sup>4</sup> Reynolds Number

<sup>5</sup> Froud Number

<sup>6</sup> Buoyancy Force

<sup>7</sup> CFD(Computational Fluid Dynamics)

- توسعه یک متدلوژی برای طراحی بهینه الگوی جریان<sup>1</sup> در تاندیش ریخته گری مداوم
- به کاربردن متدلوژی برای طراحی در تاندیش ریخته گری مداوم موجود در شرکت فولاد مبارکه اصفهان

#### 1-4- توسعه تحقیق

در این تحقیق تمرکز روی بهبود طراحی الگوی جریان فولاد مذاب در جهت حذف آخال ها در یک تاندیش بدون تجهیزات جانبی می باشد. در این تحقیق در تاندیش ریخته گری مداوم به ابعاد تاندیش ریخته گری مداوم شرکت فولاد مبارکه اصفهان توجه گردیده است. بطور مختصر می توان فعالیت انجام گرفته در این پایان نامه را به شرح زیر بیان کرد.

در ابتدا یک مطالعه مروری در زمینه عنوان پایان نامه آماده گردید. در ادامه فعالیت در سه موضوع زیر انجام گردید.

1- بررسی معیارهای مشابهت در ارتباط با حذف آخال و دست یابی به روابط جدید با توجه به اعداد بدون بعد

فرود و رینولدز در مدل آبی و تاندیش ریخته گری مداوم

2- حل عددی دو بعدی جریان های چند فازی به روش کسر حجمی برای بررسی کیفیت سطح آزاد در مدل

آبی و سپس مشاهده دیداری در مدل فیزیکی

3- حل عددی دو بعدی جریان های چند فازی به روش فاز گسسته برای ردیابی ذرات آخال در هنگام ورود به

مدل آبی تا رسیدن به سرباره

در پایان نیز به بحث و نتیجه گیری پرداخته شد.

---

<sup>1</sup> Flow Pattern

## فصل دوم

### مطالعات مروری

#### 2-1- مقدمه

یک ارائه گرافیکی از فرآیند ریخته گری مداوم در شکل 2-1 نمایش داده شده است [14 و 15]. همچنین در این شکل می توان قسمت های مختلف موجود در فرآیند ریخته گری مداوم را مشاهده نمود. این قسمت ها عبارتند از:

- پاتیل و نازل
- تاندیش ریخته گری مداوم یا پاتیل میانی
- نازل زیرسطحی<sup>1</sup> و قالب
- سرد کننده ثانویه و تختال<sup>2</sup>

اکنون به شرح فرآیند ریخته گری مداوم می پردازیم [16]. محصول مذاب در فرآیند فولادسازی (هم در روش هایی بر پایه کنورتور اکسیژنی و هم کوره های قوس الکتریکی) به بالای قسمت ریخته گری مداوم منتقل می شود. فرآیند های مختلف متالورژیکی بر روی فولاد بعد از کوره، قبل از رفتن به پاتیل ریخته گری مداوم انجام می شود. اکسیژن اضافی در یک خلاء از فولاد مذاب حذف می شود و مراحل متالورژی ثانویه ترکیب مورد نیاز فولاد مذاب را تضمین می کند. فولاد مذاب با استفاده از یک پوشش کشیده شده روی آن به نام سرباره از هوای اطراف محافظت می شود.

---

<sup>1</sup> SEN (submerged entry nozzle)

<sup>2</sup> Slab