

# بررسی تأثیر پارامترهای فرایند ریخته ریزی (PFC) بر مشخصات ابعادی فویل‌های آمورف آلیاژ پایه کبالت یونیتیکا

علی جزایری قره باغ، سیما میرزایی\*، حمید ارونی حصارى و بهزاد بینش  
گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۲/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۲/۱۴)

(PFC)

چکیده -  
 $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$

CoFeSiB Unitika

واژگان کلیدی :

## Effect of planar flow casting parameters on the dimensional specifications of amorphous Co-based Unitika foils

A. Jazayeri Gharehbagh, S. Mirzaei, H. Arouni Hesari and B. Binesh

ACECR, Technology Development Institute (TDI), 13445-1668, Tehran, Iran

**Abstract:** *The effect of Planar Flow Casting (PFC) parameters on dimensional specifications of amorphous soft magnetic  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  foils was investigated. PFC experiments were carried out under an argon atmosphere and the relationship between the main processing parameters, such as linear wheel velocity, nozzle-wheel gap distance and ejection pressure, with the resulting foil thickness was studied. It was found that there are linear relationships between the foil thickness and reciprocal of wheel speed, fourth root of nozzle-wheel gap and square root of ejection pressure. It was also shown that obtained results are in good agreement with the equation proposed by Fiedler.*

**Keywords:** *Planar Flow Casting Process, Amorphous Foils, Unitika, CoFeSiB, Rapid Solidification*

\* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s\_mirzaeil@yahoo.com

## ۱- مقدمه

فناوری انجماد سریع فرایندی تک مرحله‌ای است که به کمک آن می‌توان محصولاتتی به شکل سیم، نوار، فویل و غیره را به طور مستقیم از مذاب تولید کرد. در این فرایند، سرعت سرد شدن مذاب معمولاً در محدوده‌ی  $10^3-10^9$  °C/s قرار دارد [۱]. در بین روش‌های مختلف انجماد سریع، کارآمدترین و متداول‌ترین روش‌ها برای تولید نوارها و فویل‌های پیوسته و طویل‌آمورف و نانوبلوری، به ترتیب فرایند مذاب ریسی با دیسک مبرد<sup>۱</sup> (CBMS) برای تولید نوارهای نازک با پهنای کمتر از ۲ میلی‌متر و فرایند ریخته ریسی<sup>۲</sup> (PFC) برای تولید فویل‌های با پهنای بیش از ۲ میلی‌مترند. در فرایند PFC که طرح شماتیک و تصویر آن در شکل (۱) نشان داده شده است، با اعمال فشار گاز خنثی بر سطح فوقانی مذاب، فلز مذاب از شکاف مستطیل شکل کف نازل خارج شده و حوضچه مذابی بین دیسک مبرد و سطح پایینی نازل که در فاصله کمی از دیسک قرار دارد تشکیل می‌شود شکل (۲). به محض تماس مذاب با دیسک سردی که در زیر حوضچه می‌چرخد گرمای مذاب به سرعت به دیسک انتقال یافته و انجماد در سطح دیسک آغاز می‌شود. با حرکت جبهه انجماد به درون حوضچه و چرخش دیسک مبرد، لایه نازک منجمد شده از زیر حوضچه مذاب خارج شده و در اثر نیروی گریز از مرکز، از دیسک جدا می‌شود [۲ و ۳].

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود حوضچه مذاب از طرف پایین به سطح مبرد و از طرف بالا به سطوح پایینی جداره‌های اول و دوم شکاف نازل محدود می‌شود. حوضچه مذاب دارای دو انحنا در طرفین است؛ یک انحنا در فصل مشترک هوا و مذاب بالا دست<sup>۳</sup> که در اثر اعمال فشار گاز بر سطح فوقانی مذاب و سیلان آن به فاصله بین سطح مبرد و جداره اول (عقبی) نازل برقرار می‌شود و انحنا دوم که در انتهای مذاب پایین دست<sup>۴</sup> و در فاصله بین جداره‌ی دوم (جلویی) نازل و مذاب انجماد یافته پدید می‌آید. نرخ سیلان در منطقه جریان بالا دست صفر است، ولی در منطقه

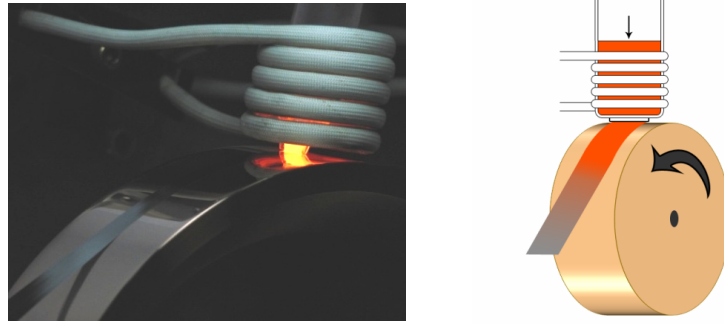
جریان پایین دست، در تعادل با نرخی است که مبرد، مذاب را از زیر حوضچه به طرف بیرون می‌کشد [۵].

در فرایند ریخته ریسی تولید فویل با مشخصات و کیفیت مطلوب وابسته به شکل و پایداری حوضچه مذاب تشکیل شده بین سطوح پایینی نازل و سطح دیسک مبرد است. دستیابی به فویل پیوسته، تنها زمانی که تعادل دینامیکی در حوضچه برقرار باشد امکانپذیر است [۶]. پارامترهای مختلفی بر ابعاد، مورفولوژی سطحی و کیفیت ظاهری فویل‌های آمورف تولید شده به روش ریخته ریسی تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به سرعت خطی دیسک، میزان فوق‌گذاذ، فاصله بین نازل تا دیسک، اتمسفر محفظه، فشار تزریق، پهنای شکاف و غیره اشاره کرد.

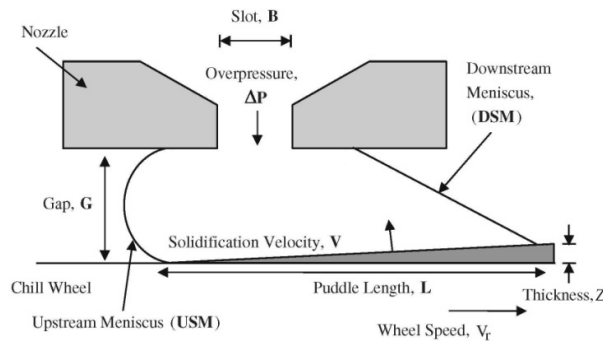
در سال‌های اخیر، پس از طراحی و ساخت دستگاه مذاب ریسی تحت گاز محافظ<sup>۵</sup> در جهاد دانشگاهی صنعتی شریف در سال ۱۳۸۳ و بومی سازی کامل فرایند مذاب ریسی با دیسک مبرد، تحقیقات گسترده‌ای در داخل کشور در زمینه مشخصه یابی نوارهای آمورف و میکرو/نانوبلوری آلیاژهای مختلف با پهنای حدود ۱ میلی‌متر صورت گرفته است؛ ولی در زمینه تولید نوارهای آمورف و نانوبلوری پهن (فویل‌های آمورف) به روش ریخته ریسی که از جهت کاربردی از اهمیت بسیار بیشتری برخوردارند، گزارشی ارائه نشده است. در این مقاله به تولید موفقیت آمیز فویل‌های آمورف پایه کبالت یوتیکا با پهنای ۵ میلی‌متر و ضخامت ۳۰-۲۰ میکرومتر توسط فرایند ریخته ریسی برای اولین بار در داخل کشور پرداخته شده است و تأثیر پارامترهای فرایند از قبیل سرعت خطی دیسک، فشار تزریق مذاب و فاصله نازل تا دیسک بر ضخامت فویل‌های آمورف تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- روش انجام آزمایشات

عملیات ذوب و آلیاژسازی شمش آلیاژ یوتیکا با وزن تقریبی ۶۰ گرم و ترکیب شیمیایی  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  به روش القایی تحت اتمسفر آرگن با استفاده از عناصر با



شکل ۱- طرح شمایی و تصویر فرایند ریخته ریسی [۴].



شکل ۲- طرح شمایی حوضچه مذاب و جبهه انجماد در فرایند ریخته ریسی [۷].

سطح دیسک در دستگاه نصب شد. طراحی سطوح پایینی جداره‌های اول و دوم شکاف نازل طوری بوده است که با نصب نازل به صورت عمود در جایگاه خود، سطح پایینی جداره اول شکاف نازل با افق زاویه ۵ درجه داشته و سطح پایینی جداره دوم شکاف نازل موازی با سطح دیسک می‌برد قرار می‌گیرد. قبل از انجام عملیات ریخته ریسی، هوای داخل محفظه توسط پمپ روتاری تا فشار حدود  $3 \times 10^{-2}$  mbar تخلیه شده و گاز آرگن با خلوص بالا (۹۹/۹۹۹٪) درون محفظه دمیده شد. در ادامه، محفظه مجدداً با پمپ روتاری تا فشار  $3 \times 10^{-2}$  mbar تخلیه شده و گاز آرگن به داخل محفظه وارد شد. پس از آن کوره القایی روشن شده و ولتاژ آن به تدریج افزایش داده شد تا شمش آلیاژی ذوب شده و به دمای فوق ذوب مورد نظر برسد. پس از رسیدن دمای مذاب به فوق ذوب معین و به منظور

خلوص بالا انجام گرفت. بدین منظور پس از رسیدن فشار محفظه توسط پمپ دیفوزیونی به  $5 \times 10^{-5}$  mbar، گاز آرگن تا فشار یک اتمسفر به درون محفظه دمیده شده و عملیات ذوب با نگهداری کوره به مدت ۲ دقیقه در حداقل توان (به منظور پیش گرم کردن بوته و مواد اولیه و جلوگیری از وارد شدن شوک حرارتی به بوته)، آغاز شد. در ادامه توان منبع انرژی متناسب با افزایش دمای مواد اولیه به تدریج افزایش می‌یافت به طوری که در طی حدود ۱۰ دقیقه مواد اولیه به‌طور کامل ذوب و در هم حل شوند. پس از ذوب کامل، ۲ دقیقه دیگر نیز زمان داده شد تا در اثر نیروی القا، مذاب متلاطم شده و از یکنواختی ترکیب آن اطمینان حاصل شود.

برای تولید فویل‌های آمورف آلیاژ یونتیکا به روش ریخته ریسی، تکه‌های کوچکی (۱۲-۱۳ گرم) از شمش آلیاژی داخل نازل نیتريد بور قرار داده شده و نازل در فاصله کمی از

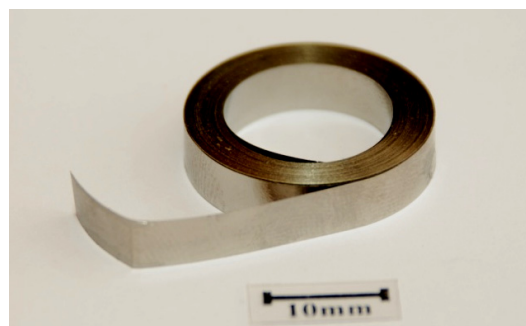
جدول ۱- پارامترهای فرایند ریخته ریزی با استفاده از نازل نیتريد بور با طول شکاف ۵/۱۱ میلیمتر.

فاصله کف نازل تا سطح دیسک (mm)	فشار تزریق مذاب (mbar)	سرعت خطی دیسک (m/s)	پارامترهای فرایند نمونه
۰/۱۵	۴۵۰	۲۰	U-1
۰/۱۵	۴۵۰	۲۲/۵	U-2
۰/۱۳	۴۵۰	۲۵	U-3
۰/۱۵	۴۵۰	۲۵	U-4*
۰/۱۵	۴۵۰	۲۵	U-5*
۰/۱۸	۴۵۰	۲۵	U-6
۰/۲۱	۴۵۰	۲۵	U-7
۰/۱۵	۴۹۰	۲۵	U-8
۰/۱۵	۵۲۵	۲۵	U-9
۰/۱۵	۴۴۵	۲۷/۵	U-10
۰/۱۵	۴۵۰	۳۰	U-11
* انجام دو آزمایش در شرایط یکسان			

شده و حوضچه مذابی را بین سطح خارجی دیسک مبرد مس کروم زیرکونیومی به قطر ۲۴cm در حال چرخش (با سرعت خطی در بازه ۲۰-۳۰m/s)، تشکیل دهد. با انجماد لایه نازکی از مذاب در سطح دیسک، نوار پیوسته‌ای به ضخامت ۲۰-۳۰µm و پهنای حدود ۵mm در اثر چرخش دیسک از زیر حوضچه خارج شده و از دیسک جدا می‌شود. ضخامت فویل‌های تولید شده، توسط میکرومتر و در نقاطی به فاصله ۱ متر از یکدیگر اندازه‌گیری شد.

شرایط انجام آزمایشات ریخته ریزی انجام گرفته بر روی آلیاژ یونتیکا با استفاده از نازل نیتريد بور، در جدول (۱) ارائه شده و در شکل (۳) فویل آلیاژ یونتیکا با پهنای ۵ میلیمتر تولید شده در این پژوهش نشان داده شده است.

برای اطمینان از آمورف شدن ریزساختار نوارهای انجماد سریع یافته، از روش پراش اشعه X استفاده شد. آزمون XRD



شکل ۳- نمونه‌ای از فویل ۵ میلیمتری تولید شده به روش ریخته ریزی که به شکل حلقوی پیچیده شده است.

بررسی تأثیر پارامترهای فرایند، گاز آرگن با فشاری در محدوده ۴۴۵-۵۲۵mbar بر روی سطح فوقانی مذاب اعمال شد تا مذاب از شکاف مستطیل شکل کف نازل (با سطح مقطع  $۵/۱۱ \times ۰/۳۸۵ \text{mm}^2$ ) که در فاصله کمی در بازه ۰/۲۱-۰/۱۳ میلیمتر از سطح دیسک قرار گرفته بود خارج

جدول ۲- مشخصات ابعادی فویل‌های ریخته ریزی شده پایه کبالت Unitika.

پهنای میانگین (mm)	ضخامت میانگین (μm)	مشخصات نمونه
۵/۰۱±۰/۰۱	۳۰/۹±۰/۸	U-1
۴/۹۹±۰/۰۱	۲۹/۵±۰/۸	U-2
۵/۰۱±۰/۰۲	۲۳/۴±۰/۷	U-3
۴/۹۳±۰/۰۱	۲۳/۷±۰/۹	U-4*
۵/۰۲±۰/۰۱	۲۴/۱±۰/۳	U-5*
۴/۹۵±۰/۰۲	۲۸/۵±۱/۰	U-6
۴/۹۷±۰/۰۱	۳۱/۶±۱/۱	U-7
۵/۰۲±۰/۰۱	۲۹/۲±۰/۷	U-8
۴/۹۵±۰/۰۱	۳۳/۲±۱/۶	U-9
۴/۸۹±۰/۰۱	۲۲±۰/۵	U-10
۴/۹۷±۰/۰۲	۲۰/۷±۰/۹	U-11

\*انجام دو آزمایش در شرایط یکسان.

مختلف، زمان نگهداری پس از شروع ذوب یکسان و برابر با ۷۵ ثانیه در نظر گرفته شد. بدین منظور علاوه بر ثابت نگه داشتن وزن شارژ اولیه و اعمال سیکل حرارتی یکسان، زمان نگهداری پس از شروع ذوب و قبل از اعمال گاز برای تمامی آزمایشات یک مقدار ثابت در نظر گرفته شد.

### ۳-۱- تأثیر سرعت خطی دیسک

بررسی‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که در فرایند ریخته ریزی با افزایش سرعت خطی دیسک مبرد،  $V_f$ ، طول حوضچه مذاب تشکیل شده بین کف نازل و دیسک کاهش یافته و به تبع آن زمان سکنی مذاب<sup>۱</sup> (زمانی که ماده در حوضچه مذاب سپری می‌کند،  $t=L/V_f$ ؛  $L$ : طول حوضچه مذاب و  $V_f$  سرعت خطی دیسک) کاهش می‌یابد و با توجه به ارتباط مستقیم ضخامت فویل با ریشه دوم زمان سکنی، ضخامت فویل تولیدی کاهش یافته و سرعت سرد شدن مذاب افزایش می‌یابد [۳ و ۸]. از طرف دیگر، در سرعت‌های دیسک بالا، حرکت لایه گاز مرزی پیرامون دیسک باعث ناپایداری و متلاطم شدن حوضچه مذاب و حبس هوا (گاز) در فاصله بین نازل و حوضچه مذاب می‌شود که این امر علاوه بر پایین آوردن کیفیت سطحی فویل‌ها، کاهش سرعت سرد شدن مذاب را به دنبال دارد. همچنین مشخص شده است که در سرعت‌های دیسک بالاتر از ۳۳m/s، به دلیل کاهش زمان موجود برای انجماد و لذا کاهش ارتفاع جبهه انجماد، فویل نازک و متخلخلی با ضخامت کمتر از ۲۰μm تولید می‌شود؛ به خصوص اگر فرایند در اتمسفری غیر از خلاء انجام شود [۲].

ارتباط سرعت خطی دیسک با ضخامت نوارهای ریخته ریزی شده آلیاژ یونیتکا در شکل (۴) نشان داده شده است. در آزمایشات انجام گرفته، فشار تزریق مذاب و فاصله نازل تا دیسک به ترتیب در مقادیر ۴۵۰mbar و ۰/۱۵mm ثابت نگه‌داشته شده و سرعت خطی دیسک در

با استفاده از دستگاه فیلیپس مدل X'pert PW3040/60 انجام گرفت. منبع تولید اشعه ایکس کاتد مسی بود و هر دو سطح آزاد و در تماس با دیسک فویل از زاویه  $\theta=30^\circ$  تا  $\theta=90^\circ$  مورد آزمایش قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول (۲) ضخامت و پهنای میانگین فویل‌های تولید شده تحت شرایط مختلف فرایند ریخته ریزی ارائه شده است. در پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای فرایند بر ضخامت فویل‌ها که مشخص کننده سرعت سرد شدن مذاب است، بررسی شده است. ضمناً پهنای فویل‌ها در شرایط پایدار فرایند، که انتخاب محدوده پارامترهای مورد بررسی بر اساس آن انجام گرفته است، تقریباً برابر با طول شکاف نازل است. لازم به ذکر است در آزمایشات ریخته ریزی انجام شده در این پژوهش به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری دمای مذاب و به منظور ثابت نگه‌داشتن دما در آزمایشات

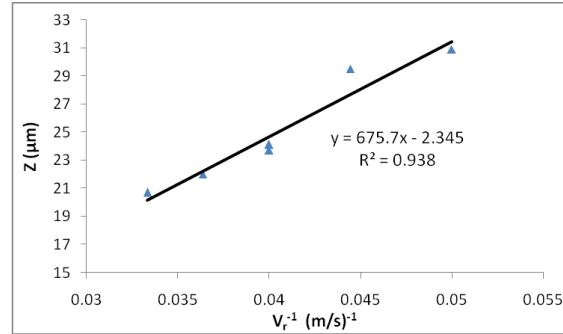
فویل‌های ریخته‌ریسی شده در سرعت‌های دیسک بالا نسبت داده شود. به عبارت دیگر، در سرعت‌های بالای دیسک، شتاب شعاعی فویل تولیدی قادر به غلبه بر پیوند بین فویل و سطح دیسک نمی‌باشد [۲].

### ۳-۲- تاثیر فاصله بین نازل تا دیسک

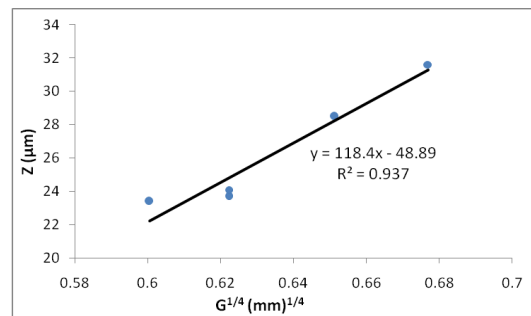
فاصله بین کف نازل و سطح دیسک مورد از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر هندسه فویل ریخته‌ریسی شده و به ویژه ضخامت فویل است. به طور کلی با افزایش فاصله نازل تا دیسک، ضخامت فویل ریخته‌ریسی شده افزایش یافته و با نفوذ لایه گاز مرزی به فاصله بین حوضچه مذاب و دیسک مبرد، سرعت سرد شدن مذاب کاهش می‌یابد [۸]. از طرف دیگر با کاهش فاصله نازل تا دیسک کیفیت سطحی فویل‌ها بهبود می‌یابد ولی به دلیل افزایش شدید تلفات اصطکاکی ناشی از تغییر سطح مقطع جریان مذاب، احتمال منجمد شدن مذاب و مسدود شدن شکاف نازل وجود دارد.

در شکل (۵) ارتباط بین فاصله نازل تا دیسک،  $G$ ، و ضخامت فویل‌های ریخته‌ریسی شده آلیاژ یونیتیکا ارائه شده است. در این آزمایشات، سرعت خطی دیسک و فشار تزریق مذاب به ترتیب در مقادیر  $25\text{ m/s}$  و  $45\text{ mbar}$  ثابت نگه‌داشته شده و فاصله نازل تا دیسک در بازه  $0/21\text{ mm}$ – $0/13\text{ mm}$  در آزمایشات مختلف تغییر داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشابه آنچه توسط فیدلر [۹] برای فویل‌های آمورف پایه آهن  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$  گزارش شده است، ضخامت فویل پایه کبالت ریخته‌ریسی شده یونیتیکا با ریشه‌ی چهارم فاصله نازل تا دیسک رابطه خطی دارد.

فاصله بین نازل و سطح دیسک علاوه بر ضخامت نوار، تأثیر چشمگیری بر کیفیت سطحی فویل نیز دارد. با کاهش فاصله نازل تا دیسک علاوه بر کاهش ضخامت فویل ریخته‌ریسی شده، تا حد زیادی از نوسانات حوضچه مذاب و در نتیجه ناهمواری سطح فویل کاسته شده و عملیات ریخته‌ریسی در شرایط پایدارتری انجام می‌گیرد. بنابراین هرچه این



شکل ۴- ارتباط ضخامت فویل ریخته‌ریسی شده آلیاژ یونیتیکا با سرعت خطی دیسک مبرد در شرایط فشار تزریق مذاب، فاصله نازل تا دیسک و دمای مذاب ثابت.



شکل ۵- ارتباط ضخامت فویل ریخته‌ریسی شده آلیاژ یونیتیکا با فاصله نازل/دیسک در شرایط سرعت خطی دیسک، فشار تزریق و دمای مذاب ثابت.

آزمایشات مختلف در بازه  $20\text{ m/s}$ – $30\text{ m/s}$  تغییر داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت فویل ریخته‌ریسی شده ( $Z$ ) با معکوس سرعت خطی دیسک رابطه خطی دارد.

سرعت خطی دیسک مبرد بر زمان جدا شدن فویل از سطح مبرد نیز تأثیرگذار است. مدت زمانی که فویل در تماس با دیسک است با افزایش سرعت خطی دیسک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این امر علاوه بر افزایش دمای سطح دیسک به دلیل افزایش تعداد برخوردهای هر نقطه از سطح دیسک با مذاب، می‌تواند به نازک و سبک بودن

خروج مذاب از زیر جداره‌های شکاف نازل، فویل تولید نشود [۸ و ۱۱].

در شکل (۶) تاثیر فشار تزریق مذاب بر ضخامت فویل‌های ریخته ریزی شده آلیاژ یونتیکا نشان داده شده است. در این آزمایشات، سرعت خطی دیسک و فاصله بین نازل تا دیسک به ترتیب در مقادیر ۲۵m/s و ۰/۱۵mm ثابت نگه داشته شده و فشار تزریق در محدوده ۴۴۵-۵۲۵mbar در آزمایشات مختلف تغییر داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشابه آنچه توسط فیدلر [۹] برای آلیاژهای پایه آهن  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$  و  $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}B_2$  گزارش شده است، در مورد آلیاژ پایه کبالت یونتیکا نیز ضخامت فویل‌های ریخته ریزی شده با ریشه‌ی دوم فشار تزریق مذاب رابطه خطی دارد.

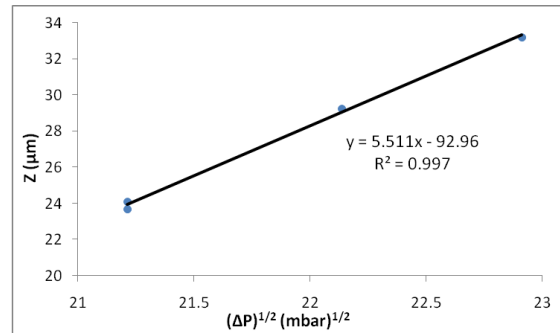
### ۳-۴- بررسی تاثیر ترکیبی پارامترهای فرایند بر ضخامت فویل

به منظور بررسی تأثیر ترکیبی کلیه پارامترهای فرایند ریخته ریزی بر ضخامت فویل، فیدلر و همکارانش رابطه‌ی را زیر را ارائه داده‌اند [۹]:

$$Z = \frac{2}{3} \left( \frac{G}{B} \right)^{1/4} \frac{B}{V_f} \left( \frac{2P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

در این رابطه  $Z$  ضخامت فویل،  $G$  فاصله نازل تا دیسک،  $B$  پهنای شکاف نازل،  $V_f$  سرعت خطی دیسک،  $P$  فشار تزریق مذاب و  $\rho$  چگالی مذاب است [۹].

نتایج حاصل از آزمایشات ریخته ریزی انجام شده در این پژوهش بر روی آلیاژ یونتیکا در شکل (۷) ارائه شده است. در این شکل،  $Z_{ex}$  ضخامت اندازه‌گیری شده و  $Z_{cal}$  ضخامت محاسبه شده از رابطه فیدلر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب خط منطبق شده بر نقاط نمودار ۰/۹۷۴ است که بسیار نزدیک به ۱ است که نشان می‌دهد نتایج به‌دست آمده ارتباط منطقی خوبی با رابطه فیدلر داشته و تنها مقدار بسیار جزئی پراکندگی دارند.



شکل ۶- ارتباط ضخامت فویل ریخته ریزی شده یونتیکا با فشار تزریق مذاب در شرایط سرعت خطی دیسک، فاصله نازل تا دیسک و دمای مذاب ثابت.

فاصله کمتر باشد، کیفیت سطحی فویل‌های تولیدی بهبود یافته و یکنواختی ضخامت بهتر خواهد شد [۹].

### ۳-۳- تاثیر فشار تزریق مذاب

هدف از اعمال فشار گاز خنثی بر سطح فوقانی مذاب، خروج مذاب از شکاف کف نازل و سیلان آن بر روی سطح مبرد است، ولی مشخص شده است که فشار تزریق مذاب بر ابعاد فویل ریخته ریزی شده نیز تأثیر می‌گذارد. با افزایش فشار تزریق، دبی مذاب خروجی از شکاف نازل افزایش یافته و با گسترش حوضچه مذاب، ضخامت و پهنای فویل ریخته ریزی شده بیشتر می‌شود [۱۰]. همچنین افزایش فشار تزریق مذاب، منجر به افزایش نیروی برخورد مذاب به دیسک مبرد شده و در محدوده سیلان یکنواخت و نامتلاطم مذاب و شرایط پایدار حوضچه مذاب باعث بهبود تماس گرمایی بین مذاب و دیسک مبرد شده و با کاهش نفوذ هوا (گاز) به فاصله بین نازل تا دیسک و در نتیجه با کاهش حفره‌های هوا در سطح تبریدی فویل، باعث بهبود انتقال گرمای مذاب می‌شود. از طرف دیگر، افزایش بیش از حد فشار تزریق مذاب باعث می‌شود تا سطح هلالی پایدار در قسمت بالادست و پایین دست حوضچه مذاب تشکیل نشده و با

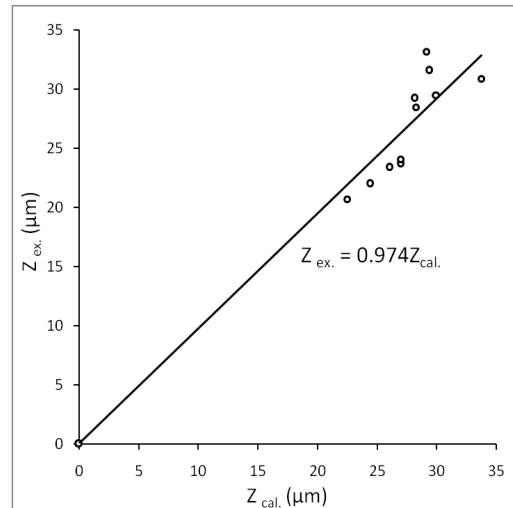
آزمون XRD بر روی هر دو سطح آزاد و سطح تبریدی (سطح در تماس با دیسک مبرد) نمونه‌های U-4 و U-9 و سطح آزاد نمونه U-7 انجام گرفت. مبنای انتخاب نمونه U-4 برای بررسی توسط پراش اشعه X، مشترک بودن این نمونه در بررسی تأثیر کلیه پارامترهای فرایند اعم از سرعت خطی دیسک، فاصله نازل- دیسک و فشار تزریق مذاب است. مبنای انتخاب نمونه‌های U-7 و U-9 نیز بالاتر بودن ضخامت این فویل‌ها در مقایسه با سایر فویل‌هاست. از آنجا که در فرایند ریخته رسی با کاهش ضخامت فویل، سرعت سرد شدن افزایش می‌یابد، آمورف بودن ساختار فویل‌های ضخیم می‌تواند گواهی بر آمورف بودن ساختار فویل‌های با ضخامت کمتر نیز باشد.

در الگوهای پراش اشعه X فویل‌های ریخته رسی شده مورد بررسی شکل (۸)، تنها یک پیک پهن در زاویه  $2\theta \approx 45^\circ$  مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی آمورف بودن کامل ساختار فویل‌های انجماد سریع یافته است.

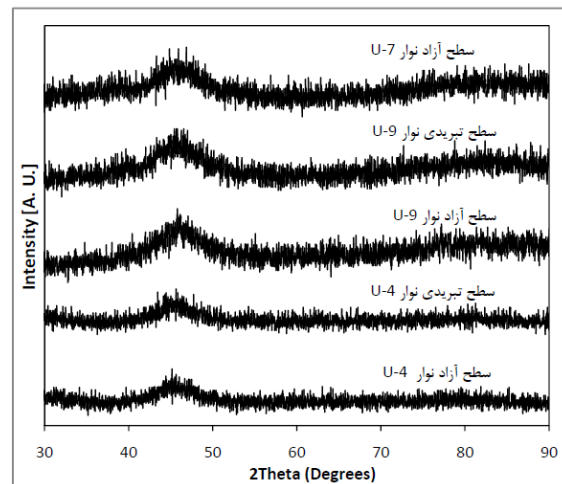
#### ۴- نتیجه گیری

برای اولین بار در کشور، فرایند ریخته رسی به منظور تولید فویل‌های فلزی با ضخامت ۳۰-۲۰ میکرومتر به طور مستقیم از مذاب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و پس از انجام آزمایش‌های فاز صفر و دستیابی به طرح نازل مناسب و شرایط پایدار فرایند برای تولید فویل‌هایی با مشخصات ابعادی و کیفیت سطحی مناسب، تأثیر پارامترهای فرایند بر ضخامت و مشخصات فویل‌های آلیاژ  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  به شرح زیر تعیین شد:

- ۱- با افزایش سرعت خطی دیسک ضخامت فویل‌ها کاهش می‌یابد به طوری که ضخامت با معکوس سرعت دیسک رابطه خطی دارد.
- ۲- ضخامت فویل‌های ریخته رسی شده با ریشه‌ی چهارم فاصله نازل تا دیسک و جذر فشار تزریق مذاب به صورت خطی تغییر می‌کند.
- ۳- ضخامت فویل‌های تولید شده تطابق بسیار خوبی با



شکل ۷- مقایسه نتایج تجربی و محاسبه شده ضخامت فویل‌های ریخته رسی شده آلیاژ یونتیکا.



شکل ۸- الگوهای پراش اشعه X سطوح آزاد و تبریدی نمونه‌های U-4 و U-9 و سطح آزاد نمونه U-7.

#### ۳-۵- بررسی ساختار فویل‌های ریخته رسی شده

به منظور بررسی بلوری یا آمورف بودن ساختار فویل‌های ریخته رسی شده آلیاژ یونتیکا و اطمینان از سرعت بالای سرد شدن مذاب در طی فرایند، از آزمون پراش اشعه X (XRD) استفاده شد. در بررسی ساختار فویل‌های ۵ میلیمتری،



ریخته رسی استفاده کرد.  
۴- ساختار فویل‌های انجماد سریع یافته، آمورف است.

ضخامت محاسبه شده از رابطه‌ی فیدلر دارد و از این رابطه می‌توان با دقت قابل قبولی برای پیش بینی ضخامت فویل‌های تولیدی در شرایط مختلف فرایند

## واژه‌نامه

- |                                      |                                |                   |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1. chill block melt spinning process | 3. upstream flow               | 6. residence time |
| 2. planar flow casting process       | 4. downstream flow             | 7. Fiedler        |
|                                      | 5. protective gas melt spinner |                   |

## مراجع

1. Jones, H., "The Status of Rapid Solidification of Alloys in Research and Application," *Journal of Materials Science*, Vol. 14, pp. 1043-1076, 1984.
2. Narasimhan, M., "Continuous Casting Method for Metallic Amorphous Strips," United States Patent, No. 4221257, 1980.
3. Byrne, C. J., and Kueck, A. M., "In Situ Manipulation of Cooling Rates During Planar-Flow Melt Spinning Processing," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 459, pp. 172-181, 2007.
۴. جزایری قره باغ، ع.، ملا، ج.، اصفهانی، م.، بینش، ب.، کیانی، م.، میرزایی، س.، ارونی، ح.، بختیاری، ر. و پرویزی، س.، "فناوری انجماد سریع و کاربرد آن در تولید مواد آمورف و نانوبلوری"، ص ۲۰۰، انتشارات جهاددانشگاهی صنعتی شریف، ۱۳۹۰.
5. Wilde, P. D., and Matthys, "E. F., Experimental Investigation of the Planar Flow Casting Process: Development and Free Surface Characteristics of the Solidification Puddle," *Materials Science and Engineering*, Vol. A150, pp. 237-247, 1992.
6. Srinivas, M., Majumdar, B., Phanikumar, G., and Akhtar, D., "Effect of Planar Flow Melt Spinning Parameters on Ribbon Formation in Soft Magnetic Fe68.5Si18.5B9Nb3Cu1 Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 42, pp. 370-379, 2011.
7. Theisen, E. A., Davis, M. J., Weinstein, S. J., and Steen, P. H., "Transient Behavior of the Planar-Flow Melt Spinning Process," *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, pp. 3249-3259, 2010.
8. Wu, S. L., Chen, C. W., Hwang, W. S., and Yang, C. C., "Analysis for Melt Puddle in the Planar Flow Casting Process- A Mathematical Modeling Study," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 16, pp. 394-403, 1992.
9. Fiedler, H., Muhlbach, H., and Stephani, G., "The Effect of the Main Processing Parameters on the Geometry of Amorphous Metal Ribbons during Planar Flow Casting (PFC)," *Journal of Materials Science*, Vol. 19, pp. 3229-3235, 1984.
10. Praisner, T. J., Chen, J. S. J., and Tseng, A. A., "An Experimental Study of Process Behavior in Planar Flow Melt Spinning," *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 26B, pp. 1199-1208, 1995.
11. Bedell, J. R., Kavesh, Sh., Hemmat, N. S., Draizen, S. and Smith, R. W., "Contour Control of Metal Ribbon," United States Patent No. 4274473, 1981.