

## تولید چدن نشکن با استفاده از آهن اسفنجی

### چکیده:

در سالهای اخیر که به دلیل اجرای سیاستهای استقلال اقتصادی، ورود بی‌رویه شمش آهن و قراضه فولاد از خارج با دشواریهایی مواجه گشته است، تقریباً تمام واحدهای ریخته‌گری چدن و فولاد با خطر کمبود مواد اولیه مورد نیاز روبرو شده‌اند. جایگزین کردن آهن اسفنجی که محصول احیاء مستقیم گندله‌های سنگ آهن در واحدهای احیاء مستقیم کشور است، به عنوان یک راه حل مطلوب و میسر مورد ارزیابی و تحقیق قرار گرفته است. آزمایشهای انجام شده نه تنها امکان استفاده از این مواد به جای شمشهای وارداتی و آهن قراضه را به اثبات می‌رساند، بلکه امکان ایجاد تحولاتی در فرآیند ذوب را نیز آشکار می‌سازد. این تحولات می‌توانند در جهت رفع مشکلات علمی ناشی از استفاده از آهن اسفنجی و بهبود شرایط کار با کوره‌های الکتسریکی مورد استفاده برای تهیه چدن نشکن سوق داده شوند. حل همزمان معادله‌های انتقال حرارت و جرم با استفاده از روشهای عددی و منایه نتایج حاصل با اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی راه دقیقی است برای دستیابی به اطلاعات نظری لازم برای محاسبه میزان انرژی الکتریکی مصرفی و تأثیر پارامترهای طراحی بر عملیات پهنه کوره‌های تولید چدن نشکن.

### مقدمه

تولید چدن نشکن با استفاده از آهن اسفنجی ایده‌ای نو، در زمینه مهندسی مواد و متالورژی، در سطح جهان به حساب می‌آید. اندیشه ذوب آهن اسفنجی برای تولید محصولات آهنی در پی افزایش روزافزون قیمت آهن قراضه در سالهای اخیر در کشورهای پیشرفته صنعتی مطرح شده است [۱-۷]. در همین راستا و به موازات توسعه مواد مصرف چدن نشکن و نتیجتاً افزایش تقاضا برای آن، بررسی امکان استفاده از آهن اسفنجی برای تولید چدن نشکن در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. معذک به دلیل تولید نسبتاً بالای فولاد قراضه در کشورهای پیشرفته صنعتی و کمبود نسبی میزان تولید آهن اسفنجی در این کشورها، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در این خصوص حاصل نگردیده است. بطوری که علی‌رغم مطرح شدن وجود فوائد محتمل در بار کردن آهن اسفنجی در کوره‌های ذوب چدن و فولاد [۶ و ۸]، اطلاعات کمی ارائه شده در نشریات معتبر علمی در خصوص نتایج حاصل از بار کردن آنها در ساخت چدن‌های نشکن، نسبتاً ناچیز بوده است.

در کشور ما که به دلیل وجوب اجتناب از تخصیص اعتبارات ارزی برای وارد ساختن کالاهای غیر اساسی، انجام هر نوع تحقیق در مورد جایگزین کردن مواد وارداتی با مواد مشابه داخلی به خودی خود توجه شده می‌باشد، انجام تحقیق در خصوص استفاده از آهن اسفنجی برای تولید چدن نشکن که دارای مصارف متعددی منجمله کاربردهای نظامی است، بخصوص با توجه به وفور منابع طبیعی گاز و وجود واحدهای متعدد تولید آهن اسفنجی در کشور، کمبود آهن قراضه و عدم تولید شمش‌های مرغوب داخلی، بوضوح لازم بنظر می‌رسد. گرچه ممکن است در صورت ادامه توقف کار مجتمع فولاد اهواز، با کمبود آهن اسفنجی نیز، پس از اتمام انبارهای موجود مواجه شویم، لکن دستیابی به دانش فنی و بالا رفتن اطلاعات علمی ما در این زمینه، می‌تواند راه‌گشای حل معضلات آینده صنعت تولید فلزات در کشور شده

و به گسترش فعالیتهای تحقیقاتی و رشد مراکز علمی بیانجامد.

در حال حاضر، تنها معدودی از واحدهای ریخته‌گری در کشور ما، قادر به ذوب و ریختن چدن نشکن می‌باشند که از جمله موارد زیر را می‌توان نام برد:

- ۱- کارخانه ذوب فلزات پارس متال واقع در نزدیکی تهران.
- ۲- کارخانجات لوله سازی خوزستان واقع در نزدیکی اهواز.
- ۳- کارخانه لوله و ماشین سازی ایران واقع در نزدیکی تهران.
- ۴- کارخانه لوله و اتصالات چدنی (کلاچ) واقع در شهر صنعتی قزوین.

ماده اولیه مورد استفاده در این واحدها عمدتاً قراضه‌های فولاد و شمش‌های وارداتی است که معمولاً هر دو از درجه مرغوبیت بالائی برخوردارند. استفاده از قراضه‌های معمولی، بدلیل حساسیت خواص محصول نسبت به ترکیب و خلوص مواد مصرفی، امکان پذیر نیست. استفاده از قراضه‌های مرغوب نیز به میزان صد در صد سبب اشکالاتی در فرایند تولید چدن نشکن می‌گردد. بنابراین لازم است در صدی از بار کوره‌های ذوب، به شمش‌های آهنی مرغوب که از لحاظ ترکیب شیمیائی کاملاً شناخته شده و از نظر خلوص و تمیزی از کیفیت بالائی برخوردار می‌باشند، اختصاص یابد. از این روی در اغلب کارگاههای ریخته‌گری داخل کشور که اقدام به تولید چدن نشکن می‌نمایند، از شمش‌های وارداتی ساخت کشورهای کانادا و برزیل بنام شمش سورل Sorrel جهت رقیق ساختن بار کوره از نظر میزان عناصر نامطلوب همراه قراضه، استفاده می‌نمایند.

در سالهای اخیر که به دلیل اجرای سیاستهای استقلال اقتصادی توسط دولت، ورود بی‌رویه شمش و قراضه از خارج با دشواریهایی مواجه گشته است، تقریباً کلیه واحدهای ریخته‌گری، با کمبود مواد اولیه مورد نیاز روبرو شده‌اند. از طرف دیگر

### شرایط اولیه

برای دستیابی به چدن نشکن، لازم است ماده اولیه مورد مصرف دارای شرایط و خواص ویژه‌ای باشد، در صد عناصر همراه باید کاملاً کنترل شده بوده و عناصر مضر و سرگردان **Tramp Elements** در آن وجود نداشته باشند. این مشخصات را میتوان براحتی در آهن اسفنجی یافت. آهن اسفنجی را از لحاظ ترکیب شیمیایی کاملاً کنترل شده و از نظر تمیزی و عدم حضور عناصر مضر و سرگردان ماده‌ای ایده‌آل برای تولید چدن نشکن بحساب می‌آید. در عوض مواد سنگی **Gangue** و اکسیژن موجود در آن می‌تواند سبب ایجاد اشکالات عدیده‌ای در فرایند ذوب شوند. بعلاوه تفاوت قیمت آن در محل مصرف با قیمت قراضه می‌تواند سبب از بین رفتن تمایل مصرف‌کنندگان، به استفاده از آن گردد.

برای رفع اشکالات فنی به فرایند ذوب، لازم است بررسی‌های تحقیقاتی چه بصورت تئوری و چه به لحاظ تجربی در مقیاس آزمایشگاهی و نیز در مقیاس صنعتی انجام گیرد. از طرف دیگر بررسی‌های دقیقی برای یافتن روش‌های ابتکاری متناسب با شرایط محلی برای جایگزین کردن آهن اسفنجی بجای قراضه و شمش باید صورت گیرد. بطوری که هم از نظر روانی و هم به لحاظ اقتصادی، توجیهی منطقی برای مصرف این ماده، در صورت اثبات برتری آن، به مصرف‌کنندگان ارائه دهد. نتیجه تحقیق، هر چه باشد، قطعاً می‌تواند مورد استفاده واحدهای تولیدکننده چدن نشکن و واحدهای تولیدکننده آهن و فولاد بویژه مجتمع‌های تولید فولاد کشور قرار گیرد.

### روش آزمایش

با استفاده از کوره الکتریکی القایی ۱/۵ تنی یکی از واحدهای تولیدکننده چدن نشکن، نحوه بار کردن آهن اسفنجی به جای شمش آهن و قراضه فولاد برای تولید چدن نشکن و مشکلات حاصل بررسی شد. آهن اسفنجی مصرف شده ساخت واحد شماره ۲ مجتمع فولاد اهواز (واحد میدرکس **Midrex**) بود و شکل گندله کروی (**Pellet**) داشت. آزمایش اول با ۳۰۰ کیلوگرم مذاب حاصل از ذوب قراضه و شمش که در نه کوره وجود داشت آغاز شد. آهن اسفنجی بتدریج به وسیله بیل و بطور دستی در کوره بار گردید. به موازات عمل بار کردن، جریان الکتریکی القایی مذاب را بشدت بهم زده و گرم می‌نمود. ضمن بار کردن فلز به بیرون کوره به بیرون می‌پاشید و مشکلاتی را بوجود می‌آورد و بخصوص هنگامی که مقدار زیادی آهن اسفنجی یکجا بار می‌شد (بیل پر) پاشش فلز افزایش می‌یافت، بنظر می‌رسد محل ریختن بار مهم باشد. مثلاً وقتی آهن اسفنجی در وسط کوره که سطح فلز داغ و فاقد پوشش سرباره بود، اضافه می‌شد، میزان پاشش بیشتر بود. برعکس افزایش به سرباره کناری به دلیل کندی فرایند انتقال حرارت باعث پاشش کمتری می‌گردید.

پس از پرسدن کوره، عملیات نمونه برداری و آنالیز مذاب بوسیله کوآنتومتر انجام شد. در ضمن سرباره گیری نیز با دست بعمل آمد و وزن سرباره تعیین گردید. میزان سرباره بیشتر از سرباره

به علت راه نیفتادن تعدادی از واحدهای تولید فولاد در کشور، مقداری کلوخه احیاء شده آهن اسفنجی در داخل کشور موجود است که به کارگیری آنها در صنایع تولید فولاد و چدن کشور نه تنها سبب کاهش مشکل کمبود قراضه خواهد شد، بلکه مسائل و مشکلات عدیده‌ای را نیز که مربوط به نگهداری این مواد در انبارها می‌باشد، مرتفع خواهد نمود. بهمین لحاظ وزارت معادن و فلزات با ارسال لیستی از پروژه‌های تحقیقاتی مورد علاقه واحدهای تحت پوشش خود به دفتر مرکزی ارتباط با صنعت، مطالعه در مورد استفاده از آهن اسفنجی در کنار قراضه به عنوان ماده اولیه کوره‌های ذوب الکتریکی، را نیز به عنوان یکی از موضوعات مورد علاقه خود برای انجام فعالیت‌های تحقیقاتی اعلام نموده است. عناوین این پروژه‌ها طی نامه شماره ۲۶/۱۰۵۹/ مورخ ۲۷/۶/۶۵ دفتر مرکزی ارتباط با صنعت به دانشگاهها ابلاغ گردیده است.

خطر کمبود مواد اولیه، با تقلیل واردات ورق و شمش توسط کارخانه‌های خودروسازی و ریخته‌گری، از اوائل سال گذشته، تا حدی تشدید شده است. اگر چه کاهش میزان تولید قراضه برگشتی و کند شدن آهنگ ورود شمش‌های **Sorrel Metal**، می‌تواند اثرات سوئی برگردش کار و فعالیت‌های تولیدی واحدهای ریخته‌گری داشته باشد، اما امید می‌رود سرآغاز فعالیت‌های تازه‌ای در خصوص یافتن مواد جایگزین گردیده و سبب ایجاد تحرک بیشتر در انجام فعالیت‌های تحقیقاتی در این زمینه در سطح کشور شود. لذا با آنکه آشکار است که انجام این پروژه ولو بطور موفقیت آمیز نمی‌تواند به تنهایی سبب حل کلیه مسائل و مشکلات مربوط به کمبود مواد اولیه مورد نیاز برای تولید چدن نشکن در کشور شود، اما به نظر می‌رسد بتواند بعنوان راه حلی مناسب در خدمت دست‌اندرکاران و مسئولین صنعت کشور قرار گیرد. بعلاوه حل این مسئله خود می‌تواند سرآغاز دستیابی به حل سلسله‌ای از مسائل و مشکلات مشابه گردد.

چنین بنظر می‌رسد که در سالهای آتی نه تنها مشکل کمبود مواد اولیه برای صنایع تولید آهن و فولاد کشور برطرف نخواهد شد، بلکه تا حدودی نیز شدت خواهد گرفت. برای مثال با راه افتادن مجتمع فولاد مبارکه حوالی سالهای آخرده ۱۳۶۰، بدلیل نیاز شدید کارگاه فولاد سازی این مجتمع، در صورت عدم انجام پیش‌بینی‌های لازم، مملکت دچار کمبود قراضه و در نتیجه تشدید مشکل ماده اولیه خواهد شد. براین اساس پیشنهاد انجام پروژه تحقیقاتی در خصوص استفاده از آهن اسفنجی در کنار قراضه به عنوان ماده اولیه کوره‌های الکتریکی ذوب، پیشنهادی منطقی و دوراندیشانه است. اما نهادهای ذیربط که علاقه خود به انجام این پروژه را رسماً اعلام نموده‌اند، تا چه اندازه آمادگی اعمال حمایت‌های لازم برای به ثمر رسیدن هر چه سریعتر تحقیقات در دست اجرا و نیز شروع فعالیت‌های تحقیقاتی جدید را دارند؟ سؤالی است که آنان باید پاسخ دهند.

(بار کردن به وسیله بیل) .

۵- افزایش زمان عملیات .

رفار آهن اسفنجی قبل از پیوستن به فلز مذاب با استفاده از یک کوره القایی آزمایشگاهی با ظرفیت ۲۵ کیلو گرم نیز مورد مطالعه قرار گرفت . آزمایشگاههای انجام شده در مجموع موفق بود و امکان تولید چدن نشکن حتی با استفاده از آهن اسفنجی به میزان ۱۰۰٪ را به اثبات رسانید . لکن با توجه به کوچک بودن ظرفیت کوره و وجود تفاوت‌های زیاد بین محیط کار در آزمایشگاه و صنعت، تصمیم گرفته شد برای رفع مشکلات و مسائلی که در مقیاس صنعتی وجود دارد و نیز جهت درک بیشتر مسئله و تطبیق برداشتهای تئوری با فرایندهای واقعی، تحقیقات بیشتری در این مقیاس انجام شود . در اینجا لازم است اذعان شود که اطلاعات ما در خصوص حرکت فازهای درون کوره (مانند فلز مذاب، سرباره مذاب، و قطعات بار شده در حال ذوب)، چگونگی تبادل حرارت و جرم بین آنها، نحوه اثر میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بر فازها، و مکانیزم ذوب و انحلال آهن اسفنجی در محیط متلاطم کوره‌های الکتریکی القایی بسیار محدود و ناقص است، انجام تحقیق در این موارد، بدون شک برای درک بیشتر فرایندهای عملی ذوب، ضروری می باشد .

### مراحل ذوب

کلوخه‌های آهن اسفنجی پس از بارشدن در کوره القایی به سرعت گرم و سپس ذوب می‌شوند . همزمان با انجام این تحول، واکنشهای احیاء نهایی باعث تولید حجم قابل ملاحظه‌ای گاز می‌شود که بادی نسبتاً زیاد از کلوخه خارج و در محیط اطراف پراکنده می‌شود . دی گاز خروجی تابع مشخصات آهن اسفنجی و دمای کوره است. مثالی از دی اندازه‌گیری شده طی مطالعات قبلی نویسنده [۹]، در (شکل ۲) نمایش داده شده است. این گاز می‌تواند باعث تلاطم شدید، فلز مذاب و پاشش ذرات جامد و مایع به بیرون کوره گردد . در شرایطی که مقداری فراوان از آهن اسفنجی به طور یکجا به داخل کوره باری می‌شود . (بیل پر) این پدیده تشدید شده و باعث ایجاد مشکلات عملی و دشواریهای تکنیکی می‌گردد . در مقابل، در صورت بار کردن تدریجی و یکپارچه کلوخه‌های آهن اسفنجی در سطح فلز مذاب، مشکل پاشش تا حد قابل قبولی کاهش خواهد یافت. خروج حجم بزرگ گاز باعث بهم خوردن فلز مذاب و تسریع در فرایندهای انتقال بین فازهای جامد، مایع و گاز موجود در درون کوره خواهد شد. انرژی جنبشی گازهای خروجی می‌تواند از طریق رابطه‌های ۲ و ۱ باعث ایجاد جریانهای متلاطم سطحی و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت بر اساس رابطه ۳ شود [۱۰]:

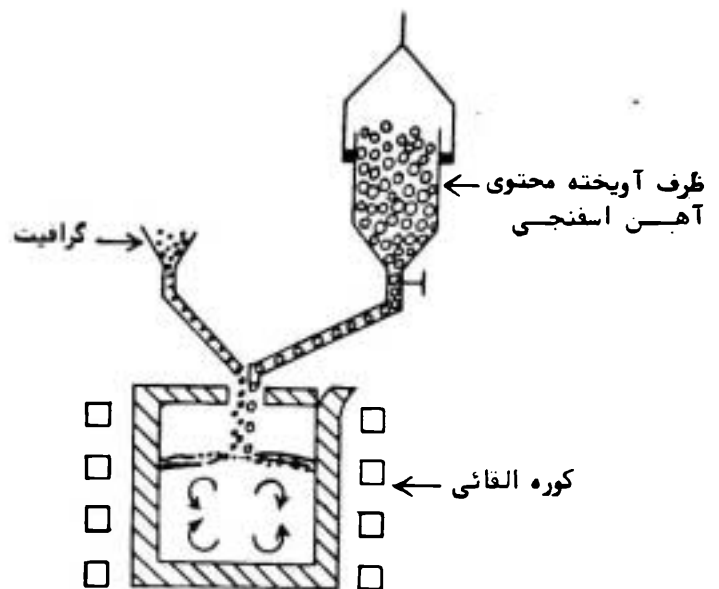
$$KO \equiv \frac{\varepsilon^{1/3} L^{2/3}}{\nu} \quad (1)$$

$$\varepsilon = f_1 P_0 \dot{V}_g \frac{T^\infty}{T_0} \quad (2)$$

$$Nu = 2 + 0.82 Ko^{0.62} pr^{0.36} \quad (3)$$

Ko : عدد کولوموگروف Kolomogroff's Number

حاصل از ذوب آهن قراضه و شمش بود . بنظر می‌رسد سرباره اضافی مربوط به مواد سنگی موجود در آهن اسفنجی، آستر خورده شده کوره و احتمالاً مقادیر جزئی اکسید آهن احیاء نشده باشد . تصحیح آنالیز مذاب با افزودن گرافیت گرانوله (وارداتی) و سپس فروسیلیسیم انجام شد و سپس  $\frac{2}{3}$  بار تخلیه شد . عملیات بعدی ریخته‌گری و تلقیح چدن مذاب به روش معمول انجام گردید. و چون نگهداری مذاب همراه با مذابهای قبلی یکجا انجام می‌شد. امکان بررسی تغییرخواص شیمیایی و فیزیکی قطعات چدنی حاصل وجود نداشت . اطلاعات حاصل از آنالیز محصول، کاهش سیزان ناخالصی را نشان می‌داد که خود سبب حذف ضرورت تصفیه فلز مذاب و نتیجتاً بهبود عملیات می‌گردید .



شکل ۱- بار کردن پیوسته آهن اسفنجی و گرافیت گرانوله در کوره القایی ۱/۵ تنی .

آزمایش دوم شبیه به آزمایش اول بود با این تفاوت که گرافیت گرانوله بتدریج و همراه با آهن اسفنجی بار می‌شد، در میزان سرباره حاصل تغییر چندانی حاصل نشد و سایر نتایج مانند نتایج تست قبل بود .

در آزمایش سوم بار کردن پیوسته آهن اسفنجی به کمک یک ظرف آویخته به جرنقیل سقفی مطابق (شکل ۱) انجام شد . مشکل پاشش فلز مذاب تا حدودی برطرف شد . لیکن سایر نتایج، مشابه تست‌های قبلی بود .

آزمایشهای فون با مشکلاتی نیز مواجه بود که از جمله موارد زیر می‌توان یادآور شد .

۱- افزایش نسبی حجم سرباره .

۲- تغییر روش متداول ذوب و ضرورت کسب مهارت در شیوه جدید .

۳- پاشش فلز مذاب در موقع بار کردن آهن اسفنجی

به خصوص در روش منقطع .

۴- دشواری کار در نزدیکی کوره در هنگام پار کردن منقطع

کلوخه‌ها شده و نتیجتاً بهبود عملیات ذوب را سبب خواهد شد. علاوه بر خروج گاز، حرکت کلوخه‌های اسفنجی تحت تأثیر جریانهای الکترومغناطیسی نیز می‌تواند باعث تشدید فرایند انتقال حرارت شود. اما مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که به علت کوچکی اختلاف بین سرعت جریان مذاب و کلوخه‌های شناور، میزان این اثر در مقایسه با تأثیر فرایند خروج گاز قابل صرف نظر است.

بازدهی فرایند ذوب ارتباط مستقیم با میزان انرژی مصرفی و سرعت ذوب شدن کلوخه‌ها دارد. برای محاسبه این کمیتها لازم است معادله‌های انتقال حرارت و جرم در شرایط گذرا مورد بررسی قرار گرفته و حل شوند. فرم ساده شده معادله انتقال حرارت همراه شرایط حدی به قرار زیر است [۱۰]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$T = T_m, r = L$$

$$Nu(T_\infty - T_m) = \nu L \frac{K}{K_m} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{L^-} - \frac{\Delta H_m \cdot \rho}{L_m} \frac{\partial}{\partial t} (L^2)$$

$$T = T_\infty, r = \infty$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = 0$$

$$L \ll R$$

در رابطه‌های فوق  $T$ ،  $t$  و  $r$  به ترتیب دما، زمان و فاصله

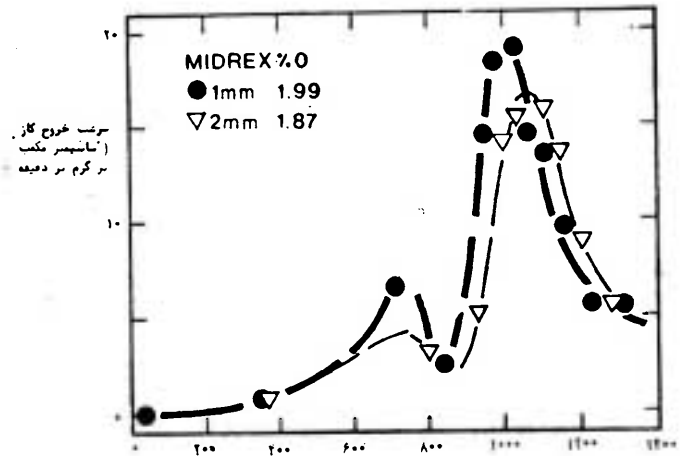
از مرکز کلوخه آهن اسفنجی هستند.  $T$  دمای فلز مذاب،  $Nu$  عدد نوسلت،  $L$  فاصله فصل مشترک جامد با مایع از مرکز کلوخه  $R$  شعاع اولیه کلوخه،  $K_m$  ضریب هدایت حرارتی فلز مذاب و  $\Delta H_m$ ،  $\rho$ ،  $K$ ،  $\alpha$  به ترتیب ضریب نفوذ حرارتی، ضریب هدایت حرارتی چگالی، حرارت نهان ذوب و دمای ذوب کلوخه آهن اسفنجی می‌باشند.

از آنجا که خواص شیمیایی و حرارتی فازهای جامد و مایع طی فرایند ذوب آهن اسفنجی در کوره الکتریکی القایی با زمان تغییر می‌کنند، لذا حل همزمان معادله‌های ۱ تا ۱۰ فوق تنها با استفاده از روشهای عددی و با کمک کامپیوتر امکان پذیر است. لذا مدل ریاضی مورد استفاده در ماخذ ۱۰ برای شرایط موجود در تولید چدن نشکن با استفاده از آهن اسفنجی اصلاح و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. نتایج حاصل در مقاله‌های بعدی مورد بحث قرار خواهند گرفت.

## مراجعه

- [1] Fruehan, «Scrap in Iron and Steelmaking»: Iron and Steelmaker May 1985, 36-42.
- [2] Elliott, «Demand for Solid Metallics for Iron and Steelmaking»: Iron and Steelmaking, April 1981, 32-37.
- [3] Pietsch, «The Use of Sponge Iron in Foundries»:

- E: سرعت پخش انرژی.  
L: قطر کلوخه آهن اسفنجی.  
V: ویسکوزیته سینماتیک.



دما (درجه سانتیگراد)

شکل ۲- دبی گاز خروجی از یک نمونه آهن اسفنجی میدرکس دارای ۱/۷۸ درصد کربن و حدود ۱/۹۰ درصد اکسیژن. سرعت افزایش دمای آهن اسفنجی در تمام مدت اندازه‌گیری ثابت و برابر ۲۵۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه بوده است. اطلاعات مربوط به اندازه دانه‌های آهن اسفنجی مورد آزمایش در شکل ذکر شده است.

$F_g$ : کسر جرمی کلوخه که میتواند در فلز مذاب فرو رود.  
 $P_g$ : فشار محیط.

$V_g$ : دبی گاز خروجی در دما و فشار محیط.

$T$ : دمای فلز مذاب.

$T_a$ : دمای محیط.

$Nu$ : عدد نوسلت.

$Pr$ : عدد پراوندل.

در صورتی که تعداد کلوخه‌های بارشده در واحد زمان و واحد سطح آزاد فلز مذاب به میزانی برسد که فاصله بین کلوخه‌ها از حد معینی کمتر شود، کلوخه‌ها از نظر حرارتی برهم تأثیر گذاشته و سرعت انتقال گرما به آنها کاهش خواهد یافت:

$$Nu = 2 + 0.26 K_o^{0.5} P_r^{0.23} \quad (4)$$

همچنین اگر فاصله بین کلوخه‌ها از مجموع ضخامت‌های لایه‌های مرزی انتقال حرارت کوچکتر شود. امکان ایجاد جزایر دیرگداز شناور و افت شدید سرعت ذوب شدن را به دنبال خواهد داشت [۱۱]. ایجاد این جزایر می‌تواند باعث کاهش سیالیت فلزات مذاب و افزایش حجم سرباره شود. اما در صورتی که از طریق بار کردن مداوم، توزیع یکنواخت کلوخه‌های آهن اسفنجی در سطح فلز مذاب امکان پذیر گردد، افزایش سرعت تغذیه تا حد بسیار بالا و بدون ایجاد جزایر دیرگداز امکان پذیر خواهد بود. خروج حجم نسبتاً زیاد گاز در این حالت باعث تلاطم سطحی فلز مذاب و توزیع یکنواخت تر

- with Spong Iron Charge»: Metallurgical Plant and Technology, 1/1978, 53-61.
- [9] Elliott, Nauman and Sadrnezhaad, «Heating and Melting of D-R Pellets in Hot Slag»: Third International Iron and Steel Congress, Chicago, Ill April 1978, 397-404.
- [10] Sadrnezhaad, «Continuous Melting of Metallized Ore Pellets»: Iron and Steel International, December 1981, 309-314.
- [۱۱] صدر نژاد «چگونگی ذوب آهن اسفنجی در کوره های فولاد سازی»، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، اسفند ۱۳۶۲، ۸۵ - ۹۸.
- Modern Casting, September 1976, 53-56.
- [4] Reddy, «Use of DRI in Steelmaking» Printed in DRI - Tech. and Eco. of Prod. and Use, 1980, 104 - 118.
- [5] Henderson, «Use of DRI in Foundries» Printed in DRI-Tech. and Eco. of Prod. and Use, 1980, 119-127.
- [6] Elliott and Write, «Metallized Ore Practices in Small Arc Furnaces»: Iron and Steelmaker, 1976, 32 - 35.
- [7] Upadhya, «Innovative Iron and Steelmaking»: Journal of Metals, 1986, 46-51.
- [8] Bichlbauer, «Operational Experience in the Use of Refractory Material in Electric Arc Furnaces