

بررسی تأثیر مشخصات پوشان بر حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی چدنی تولیدی به روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده*

عیسی امینی^(۱) جعفر خلیل علافی^(۲) رضا چاره خواه^(۳) زهرا معروفی^(۴)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر مشخصات پوشان شامل نوع، گرانروی و ضخامت آن بر روی مدل‌های اسفنجی، دما و زمان خشک شدن مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک‌کن، بر تشکیل حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی چدنی تولید شده به روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده بررسی شده است. به منظور پیش بینی حفره‌های داخلی در قطعات، مدل‌سازی توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش *Design-Expert* انجام گرفت و در نهایت، مقادیر بهینه‌ی هر مشخصه برای کمینه کردن تعداد حفره‌ها در قطعات تعیین شدند. نتایج آزمایش‌ها بیان‌گر افزایش حفره‌های داخلی با افزایش دمای کوره و کاهش آن‌ها با افزایش گرانروی و ضخامت پوشان بودند. این در حالی است که پوشان A دارای حفره‌های داخلی بیش‌تری نسبت به پوشان B بود. افزون بر این، مشخص شد که در دمای بالای خشک شدن (60°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش و در دمای پایین خشک شدن (40°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند. از طرف دیگر، در گرانروی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک شدن افزایش یافتند، در حالی که در گرانروی کمینه، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن بیش‌تر شدند.

واژه‌های کلیدی ریخته‌گری با مدل از بین رونده، پوشان، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، حفره‌های داخلی، طراحی آزمایش، مدل اسفنجی، چدن خاکستری

Study of Effective Parameters of Coating on Internal Pores in Cast Iron Parts Produced by Lost-Foam Casting

E. Amini J. Khalil Allafi R. Charehkhah Z. Maroofi

Abstract

In this study, the effects of parameters including the type, viscosity and thickness of the coating applied on the foam patterns, drying temperature and drying time of the coated patterns inside the drying oven on the internal pores in cast iron parts produced by Lost-Foam casting were examined. In order to predict the presence of internal pores in the casting parts, DESIGN-EXPERT modeling software was used, and finally, the optimal value of each parameter was determined in order to minimize the number of pores in the casting parts. The results showed that the number of internal pores increases with an increase in drying temperature, and decreases with increasing coating's viscosity and thickness. However, the coating type A showed more internal pores compared to the coating type B. Moreover, internal pores in high drying temperature (60°C) case increased with increasing drying time, whereas for the case where a low drying temperature (40°C) was used, pores decreased with an increase in the drying time. On the other hand, internal pores for the high coating's viscosity case increased with decreasing the drying time, however, internal pores increased as the drying time increased for the case of low coating's viscosity.

Key Words Lost-Foam Casting, Coating, Optimization, Modeling, Internal Pores, Design of Experiment, Foam Model, Gray Cast Iron.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۱۰/۱۱ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۱/۹/۲۶ به دفتر نشریه رسیده است.

- (۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
- (۲) نویسنده‌ی مسئول: دانشیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
- (۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
- (۴) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته و فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

مقدمه

قطعه‌ی پیچیده و قطعه‌ای است که بیش از یک ماهیچه در آن به کار گرفته شده باشد. افزون بر این، قطعه‌ای که در روش‌های متداول تولید آن نسبت وزن ماهیچه به وزن فلز بالا باشد نیز در این مجموعه قرار دارد. در مواردی که ریخته‌گری عمودی نتایج بهتری می‌دهد و یا برای قطعاتی که به دلیل سطح جدایش پیچیده یا نوع آلیاژ هزینه‌ی تمیز کاری زیاد است نیز از این روش استفاده می‌شود [1,3].

پوشان مورد استفاده در این فرایند نقش مهمی را در این تکنولوژی بر عهده دارد. دلیل عدم به‌کارگیری این فناوری در فرایند ریخته‌گری در طول سالیان طولانی بعد از کشف آن توسط شرویر در سال ۱۹۵۸، عدم توسعه‌ی پوشان مناسب برای آن بوده است. پوشان‌های این فرایند باید دارای خصوصیات ویژه‌ای باشند. پوشان پس از اعمال بر روی مدل و خشک شدن آن باید قابلیت تحمل وزن ماسه و نیروهای سایشی حاصل از فلز مذاب را داشته باشد. افزون بر این، دیرگدازی و شوک‌پذیری مناسب را در دماهای بالای فلز مذاب داشته و نفوذپذیری لازم برای خروج گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج را نیز داشته باشد. پوشان استفاده شده در این فرایند معمولاً حاوی مواد دیرگداز، حامل، چسب، عامل تعلیق، عامل پخش کننده‌ی ذرات، مواد تیکسوتروپ (thixotropic) و چند افزودنی دیگر می‌باشد. این ترکیب تقریباً شبیه به پوشش‌های دیرگدازی است که برای پوشش دهی قالب و ماهیچه در انواع روش‌های مرسوم ریخته‌گری استفاده می‌شود. تفاوت اساسی این پوشش‌ها با پوشان‌های فناوری ریخته‌گری با مدل از بین رونده در اندازه و نسبت اجزای مورد استفاده در آنهاست. دیرگداز بودن پوشان مانع از نفوذ مذاب به ماسه شده و از ماسه‌سوزی جلوگیری می‌کند. به این ترتیب، کیفیت سطحی قطعات بهبود می‌یابد. معمولاً از یک یا ترکیبی

در فرایند ریخته‌گری با مدل از بین رونده ابتدا مدلی به شکل قطعه‌ی مورد نظر از جنس اسفنج (یا هر ماده‌ی مناسب دیگر) تهیه می‌شود و با غوطه‌وری آن در یک ماده‌ی پوشان، روکش‌سرامیکی ایجاد می‌شود و سپس درون ماسه‌ی خشک قالب‌گیری می‌شود. در این روش قالب‌گیری، برای ایجاد حفرة‌های داخلی قطعه (بر خلاف روش‌های قالب‌گیری با ماسه‌ی تر) نیازی به استفاده از ماهیچه نیست. پس از قالب‌گیری و با ریختن مذاب درون قالب، اسفنج تبخیر شده و مذاب جای آن را می‌گیرد و در نهایت، قطعه‌ی نهایی تولید می‌شود [1,2].

ریخته‌گری با مدل از بین رونده دارای مزیت‌های بسیار زیادی در مقایسه با روش‌های ریخته‌گری با ماسه‌ی تر می‌باشد. با این حال، همانند هر فرایند دیگری محدودیت‌هایی نیز دارد، با این تفاوت که مزیت‌های فنی این روش از محدودیت‌های آن برتری دارند. کاهش تعداد متغیرهای مؤثر در فرایند، کیفیت سطحی بهتر قطعه، بهبود دقت ابعادی قطعه و کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری، عدم نیاز به مواد افزودنی به ماسه، حذف ماهیچه، انعطاف‌پذیری بسیار در طراحی، و محیط کارگاهی تمیزتر و کم‌صداتر از جمله مزیت‌های فنی این فناوری می‌باشند [1,2].

مزیت‌های به‌کارگیری این فناوری از نظر اقتصادی نیز اهمیت دارند. کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاهش فضای مورد نیاز برای تجهیزات، هزینه‌ی کم‌تر نگه‌داری ماشین‌آلات، میزان کم‌تر ضایعات قطعات، امکان کاهش وزن قطعات و افزایش بهره‌ی ریخته‌گری از مزایای استفاده از این فناوری هستند. اگر قطعه‌ی مناسبی برای ریخته‌گری با این فناوری انتخاب شود، قیمت تمام شده‌ی محصول ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. منظور از قطعه‌ی مناسب

ایجاد می‌شوند. مشکل بعدی از حرکت ناپایدار مذاب ناشی می‌شود، زیرا گازها به‌طور غیرپیوسته و شدید از میان فلز مذاب و پوشان خارج می‌شوند و با هر بار فرار گاز، فشار کاهش پیدا می‌یابد، جبهه‌ی مذاب پیش‌روی کرده و به دیواره‌ی قالب هم‌چون یک پتک ضربه وارد می‌کند. نتیجه‌ی این ضربه‌ها، ایجاد انبساط در قطعه و یا فروریختن ماسه‌ی فشرده به‌داخل حفره‌های مدل می‌باشد [1,5,7,8].

کیفیت سطحی پوشان بر روی مدل‌ها کنترل‌کننده‌ی بسیاری از عیب‌ها می‌باشد. سطح پوشان باید بدون ترک باشد، از این رو عوامل مؤثر بر سیکل خشک شدن پوشان، شامل میزان رطوبت محیط خشک‌کننده، دما و زمان خشک شدن، در کنترل کیفیت سطحی پوشان و عیب‌ها اهمیت دارند [2,9,10].

حفره‌های داخلی یکی از عیب‌های متداول در قطعات ریختگی تولیدی با مدل از بین رونده، به‌خصوص در قطعات چدنی، هستند که یکی از دلایل ایجاد آن‌ها، نفوذپذیری بسیار زیاد پوشان است [7,11,12].

حفره‌های داخلی دارای سطوح صاف و تقریباً کروی هستند که اغلب با سطح قطعه تماسی ندارند. حفره‌های داخلی بزرگ بیش‌تر به‌صورت منفرد و حفره‌های کوچک به‌صورت تجمعی و با اندازه‌های مختلف می‌باشند. این حفره‌ها در ریخته‌گری با مدل از بین رونده در نتیجه‌ی به دام افتادن قطره‌های مذاب مواد حاصل از تجزیه‌ی اسفنج درون فلز مذاب ایجاد می‌شوند. این قطره‌ها با حرارت مذاب تجزیه شده و به گاز تبدیل می‌شوند. سرعت حرکت مذاب تأثیر عمده‌ای بر حفره‌های داخلی دارد. در ریخته‌گری آلومینیم، بهترین سرعت حرکت مذاب $2/3-1/8$ سانتی‌متر بر ثانیه است. اگر سرعت از این بالاتر باشد، حفره‌های داخلی زیادی در قطعه ایجاد خواهند شد [13-15].

در ریخته‌گری با مدل از بین رونده، دو نوع

از چند دیرگداز مانند سیلیس، آلومینا، زیرکونیا و کرومیت استفاده می‌شود تا خاصیت عایق حرارتی مطلوبی به‌دست آید. مخلوط کردن این دیرگدازها تأثیر زیادی بر نفوذپذیری پوشان دارد. دیرگداز مورد استفاده برای تهیه‌ی پوشان بر اساس نوع فلز، دمای ذوب‌ریزی، ضخامت قطعه‌ی ریخته شده و اندازه و شکل ماسه‌ی بدون چسب پیرامون مدل انتخاب می‌شود [4-6].

پوشان مورد استفاده در این فرایند، کنترل‌کننده‌ی اکثر عیب‌های ریختگی قطعات می‌باشد، به‌گونه‌ای که کوچک‌ترین تغییر در مشخصات آن موجب تغییر کیفیت در قطعات نهایی می‌شود. از میان مشخصات پوشان، نفوذپذیری به‌دلیل کنترل خروج محصولات حاصل از تجزیه‌ی مدل اسفنجی، مهم‌ترین عامل در کنترل عیب‌های ریختگی می‌باشد و باید به دقت کنترل شود. به قابلیت پوشان در خروج محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج، نفوذپذیری (permeability) گفته می‌شود. مهم‌ترین عواملی که بر روی نفوذپذیری پوشان مؤثرند عبارتند از نوع پوشان از نظر جنس و ابعاد مواد جامد دیرگداز آن، ضخامت پوشان بر روی مدل‌های اسفنجی و گرانیروی پوشان. نکته‌ی مهم در مورد نفوذپذیری پوشان، به‌دست آوردن مقدار بهینه‌ی آن برای هر قطعه‌ی خاص می‌باشد. اگر نفوذپذیری پوشان بیش از مقدار بهینه باشد، گازهای حاصل از تجزیه‌ی مدل اسفنجی به‌سرعت وارد ماسه‌ی ریخته‌گری می‌شود و در این حالت، به‌دلیل افت فشار در فضای بین مذاب فلز و اسفنج در حال ذوب، پوشان تحمل وزن ماسه را نداشته و ماسه به درون قالب وارد می‌شود. در نتیجه‌ی این حالت، قطعه‌ای سوراخ‌دار یا قطعه‌ای با سطوح چین‌خورده ایجاد می‌شود. در بدترین حالت، قطعه‌ای بی‌شکل به‌دست می‌آید. در صورتی‌که نفوذپذیری کم‌تر از مقدار بهینه باشد، فشار گاز در فضای خالی تا جایی که بر فشار متالواستاتیکی غلبه کند، بالا می‌رود. به‌دلیل افزایش فشار در پشت پوشان و اعمال نیرو به آن، برآمدگی‌هایی بر روی سطح قطعه

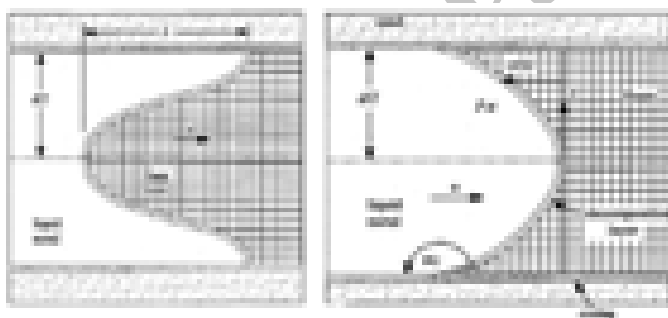
سطح پوشان می‌شود، و حفره‌های سطحی را حین انجماد قطعه بر روی سطح ایجاد می‌کند. برعکس، اگر نفوذپذیری پوشان از حد بهینه‌ی آن بیش‌تر باشد، سرعت حرکت مذاب در نواحی متصل به سطح پوشان افزایش یافته و باعث عدم حرکت یکنواخت جبهه‌ی مذاب و تشکیل جریان مقعر و در نتیجه، حبس محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب حین انجماد و تشکیل حفره‌های داخلی در قطعه‌ی حاصل خواهد شد [۱۶].

مهم‌ترین علل بروز حفره‌های داخلی در قطعات ریختگی تولید شده به‌روش ریخته‌گری با مدل از بین رونده عبارتند از:

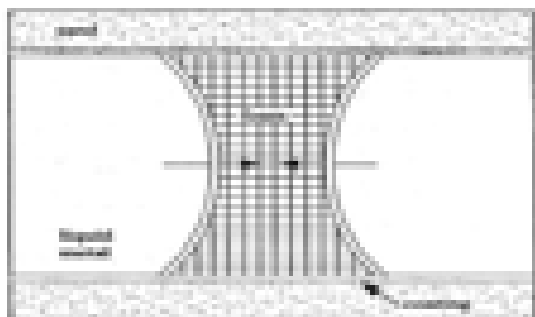
- کم بودن چگالی مدل اسفنجی
- نفوذپذیری زیاد پوشان

جریان محدب و مقعر حین حرکت مذاب در مدل اسفنجی اتفاق می‌افتد. عامل اصلی ایجاد حفره در قطعات ریخته‌گری، تغییر شکل جریان مذاب از حالت محدب به مقعر در مواجهه با اسفنج است. در شکل‌های (۱ و ۲)، شکل‌های محدب و مقعر جریان مذاب مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱)، در حالتی که شکل جریان مذاب محدب باشد و حتی مذاب از دو جهت به سمت اسفنج حرکت کند، احتمال ایجاد حفره بسیار کم است [۱۶].

در ریخته‌گری قطعات با مدل از بین رونده، نفوذپذیری پوشان مهم‌ترین عامل در کنترل عیب‌های حفره‌های سطحی و داخلی می‌باشد، به‌گونه‌ای که نفوذپذیری کم‌تر از حد بهینه‌ی پوشان، شکل جریان حرکت مذاب در قطعه را محدب کرده و باعث تجمع گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در فصل مشترک جبهه‌ی مذاب و



شکل ۱ شکل جریان فلز مذاب، محدب در سمت راست و مقعر در سمت چپ [۱۶]



شکل ۲ حرکت جریان مذاب از دو سمت به طرف اسفنج و ایجاد جریانی به شکل محدب [۱۶]

نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد و با تشکیل جریان مقعر، حفره‌های داخلی قطعه را افزایش می‌دهد [20].

افزایش بیش از حد دمای بارریزی نیز با افزایش سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و ایجاد جریان مقعر، حفره‌های داخلی قطعه را افزایش می‌دهد [20]. هدف اصلی از انجام این تحقیق، کنترل دقیق مشخصات پوشان به‌منظور کمینه کردن عیب حفره‌های داخلی در قطعات می‌باشد.

مواد و روش تحقیق

برای انجام آزمایش‌های مورد نظر در این تحقیق، از یک مدل اسفنجی مطابق با شکل (۳)، استفاده شده است. به‌منظور تهیه‌ی مذاب چدن خاکستری، از یک کوره‌ی القایی بدون هسته با فرکانس شبکه استفاده شد. جدول (۱) محدوده‌ی ترکیب شیمیایی مذاب و ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریخته‌گی را نشان می‌دهد. برای قالب‌گیری، از ماسه‌ی خشک و بدون چسب سیلیسی با عدد ریزی دانه‌ی AFS 33-37 استفاده شد. به‌منظور تولید مدل‌های اسفنجی آزمایشی، از دانه‌های اسفنجی کوبلی مر خام با مشخصات فیزیکی ذکر شده در جدول (۲) استفاده شد.

- ضخامت بسیار کم پوشان

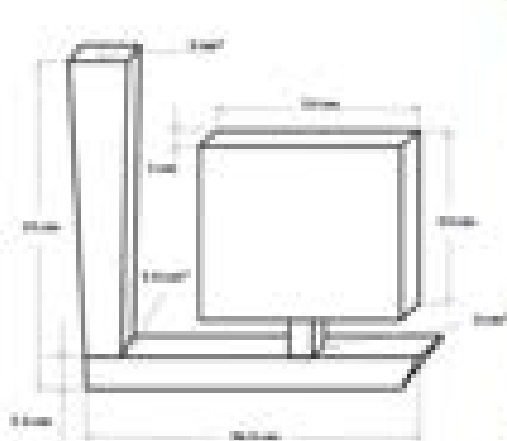
- گرانروی بسیار کم پوشان

- بالا بودن بیش از حد دمای بارریزی

به‌طور کلی، عواملی که سبب افزایش بیش از حد سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و در نتیجه، تشکیل جریان مقعر می‌شوند، به دام افتادن قطره‌های مذاب مواد حاصل از تجزیه‌ی اسفنج درون فلز مذاب و در نتیجه، حفره‌های داخلی را افزایش می‌دهند. با کاهش چگالی مدل اسفنجی، سرعت تجزیه‌ی اسفنج و پر شدن قالب و تشکیل جریان مقعر افزایش یافته و حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند [19 و 16].

از آنجا که فشار برگشتی محصولات حاصل از تجزیه‌ی اسفنج یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده‌ی سرعت پر شدن قالب در ریخته‌گری با مدل از بین رفته است، افزایش بیش از حد نفوذپذیری پوشان سبب خروج سریع‌تر گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج می‌شود و در نتیجه، کاهش این فشار باعث افزایش سرعت حرکت مذاب در نواحی متصل به سطح پوشان قالب و تشکیل جریان مقعر و بنابراین، افزایش حفره‌های داخلی قطعه می‌شود [20].

با کاهش ضخامت و گرانروی پوشان،



شکل ۳ مدل اسفنجی مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱ محدوده‌ی ترکیب شیمیایی مذاب و ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریختگی

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	C	Si	S	P
دامنه	۳/۴-۳/۶	۲/۵-۲/۷	۰/۰۸-۰/۱۲	۰/۱Max
نمونه	۳/۵۲	۲/۵۷	۰/۰۹	۰/۰۸

جدول ۲ مشخصات دانه‌های اسفنجی کوبلی مر مورد استفاده در تولید مدل‌ها

جنس اسفنج	دانه‌بندی اسفنج خام اولیه	چگالی دانه‌های اسفنجی	میزان مواد فرار (%)
کوبلی مر	۰/۰۳-۰/۰۵ mm	۰/۵۳-۰/۶۵ gr/lit	≤ ۷/۵

هواکش‌ها

- بررسی بیرون اندازها (سیستم مکشی برای بیرون آوردن مدل‌های تولیدی از قالب)
- تزریق میزان معینی از دانه‌های اسفنج منبسط و پیرسازی شده به قالب
- تزریق بخار با فشار و دمای معین به قالب
- تزریق آب سرد برای خودگیری مدل اسفنجی و سادگی خروج آن
- باز کردن لنگه‌های قالب و بیرون آوردن مدل به کمک

سیستم مکشی

پوشان‌دهی. در این مرحله، مدل‌های تولیدی با دو نوع پوشان خارجی با مشخصاتی که در ادامه می‌آید، به‌روش غوطه‌وری و مطابق با مشخصات مندرج در جدول (۳)، پوشان‌دهی شدند. مشخصات و سطوح مورد بررسی از پوشان به‌عنوان اطلاعات ورودی در نرم‌افزار Design-Expert7 استفاده شدند، و طراحی آزمایش‌ها به کمک این نرم‌افزار انجام گرفت.

پوشان A:

- پوشان دیرگداز پایه آب (water based) دیرگداز برای ریخته‌گری چدن
- ۵۴ تا ۵۷/۵ درصد وزنی فاز جامد
- چگالی $1/45-1/60 \text{ g/cm}^3$ در دمای 20°C
- درجه‌ی اسیدی (PH) برابر با ۷/۵

لازم به ذکر است که سیکل‌های حرارتی برای عملیات پیش انبساط دانه‌های اسفنجی و پیرسازی مدل‌های اسفنجی برای تمامی نمونه‌های آزمایش یکسان بوده‌اند، و در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

مرحله‌ی پیش انبساط.

برای این منظور، از یک دستگاه پیش انبساط‌دهنده‌ی آزمایشگاهی استفاده شد. ابتدا 1400°C گرم از اسفنج خام مذکور در دستگاه قرار داده شد و انبساط اولیه با دمش بخار با شرایط زیر انجام شد:

- زمان بخاردهی: 50 تا 64 ثانیه

- فشار بخار: $0/53$ تا $0/67$ اتمسفر

- چگالی دانه‌های پیش منبسط شده: 23 گرم بر لیتر

مرحله‌ی پیرسازی.

در این مرحله، دانه‌های اسفنجی حاصل از مرحله‌ی پیش انبساط خشک شدند، و به‌منظور خروج رطوبت و پنتان باقی‌مانده از ذرات اسفنج و رسیدن به پایداری ابعادی لازم، به مدت 8 تا 12 ساعت در سیلوهای مخصوص نگهداری شدند.

مرحله‌ی ساخت مدل.

- در این مرحله، اسفنج‌های پیرسازی شده به‌شرح زیر، برای تولید مدل‌های اولیه برای آزمایش‌ها استفاده شدند.
- بستن قالب‌های آلومینیمی مخصوص با هواکش‌های دمشی کافی در سطوح آن
- شستن قالب با بخار آب به‌منظور بررسی باز بودن

پوشان B:

- پوشان دیرگداز آب پایه برای ریخته‌گری چدن

- ۵۸ درصد وزنی فاز جامد

- چگالی $1/55 \text{ g/cm}^3$ در دمای 20°C

- درجه‌ی اسیدی (PH) برابر با $9/4$

در مرحله‌ی بعدی، مدل‌های پوشان‌دهی شده پس از خشک شدن، مطابق با شرایط ذکر شده در جدول (۶) به مرحله‌ی قالب‌گیری و ریخته‌گری ارسال شد، و عملیات قالب‌گیری و ریخته‌گری مطابق با شرایط ارائه شده در جدول (۴)، انجام گرفت.

قطعات ریخته‌گری پس از مراحل انجام، تخلیه‌ی قالب، خنک شدن و ساچمه پاشی، به‌منظور تشخیص حضور حفره‌های داخلی به‌روش رادیوگرافی اشعه‌ی X بررسی شدند و به این ترتیب، به چهار دسته‌ی قطعات بدون عیب، با حفره‌های داخلی کم، با حفره‌های داخلی متوسط و با حفرات داخلی زیاد تقسیم‌بندی شدند. در این مرحله، به‌منظور کمی‌سازی حفره‌های داخلی در قطعات، عددهای ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰، مطابق با جدول (۵)، در نظر گرفته شدند.

پس از بررسی قطعات ریخته‌گری، عددهای حاصل از نتایج، مطابق با جدول (۶)، در نرم‌افزار فوق‌الذکر استفاده شد، و عملیاتی به‌شرح زیر بر روی آن‌ها انجام شد:

۱- بررسی تأثیر مشخصات مورد مطالعه بر روی حفره‌های داخلی.

۲- مدل‌سازی مشخصات و پیش‌بینی میزان حفره‌ها در

شرایط مختلف استفاده از آن‌ها و رسم نمودارهای دوبعدی و سه بعدی مدل حاصل.

۳- بهینه‌سازی مشخصات مورد مطالعه به‌منظور کمینه کردن تعداد حفره‌ها و رسم نمودارهای سه بعدی در حالت بهینه.

نتایج و بحث

شکل (۴) نمونه‌هایی از تصاویر رادیوگرافی اشعه‌ی X مربوط به حفره‌های داخلی در قطعات مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان حفره‌های داخلی در قطعات متفاوتند.

در شکل (۵) (نمودار پارتو)، اثر هر کدام از مشخصات پوشان بر روی حفره‌های داخلی نشان داده شده است. در این شکل، B ضخامت پوشان، C گران‌روی پوشان، A دمای خشک شدن و D زمان خشک شدن هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، از میان این مشخصات، ضخامت پوشان (B) بیش‌ترین و مدت زمان نگهداری در کوره‌ی خشک‌کن (D) کم‌ترین تأثیر را بر روی عیب مذکور دارند.

آنالیز واریانس مطابق با شکل (۶) و به‌منظور مدل‌سازی، بر روی داده‌ها انجام گرفت.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس، تأثیر متقابل دمای کوره و زمان نگهداری مدل‌های پوشان‌دهی شده در آن (AD) و ضخامت پوشان و زمان نگهداری مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک‌کن (BC) را نشان می‌دهند.

جدول ۳ مشخصات و سطوح مورد بررسی پوشان

مشخصات	نوع پوشان	ضخامت پوشان (تعداد لایه‌ی پوشان بر روی اسفنج)	گران‌روی پوشان (ثانیه)	دمای کوره‌ی خشک‌کن ($^\circ \text{C}$)	زمان نگهداری در کوره‌ی خشک‌کن (ساعت)
سطوح	A و B	۳،۱	۹،۱۳	۴۰، ۶۰	۱/۵، ۲/۵
نقاط مرکزی سطوح	-	۲	۱۱	۵۰	۲

جدول ۴ شرایط قالب‌گیری و ریخته‌گری مدل‌های پوشان‌دهی شده

مدت ارتعاش (ثانیه)	میزان ارتعاش (گرم)	نوع ارتعاش اعمالی	میزان خلاء اعمالی (اتمسفرد)	دمای ذوب‌ریزی (°C)
۳۰-۴۵	۱/۲	افقی	-۰/۵	۱۴۲۰ ± ۵

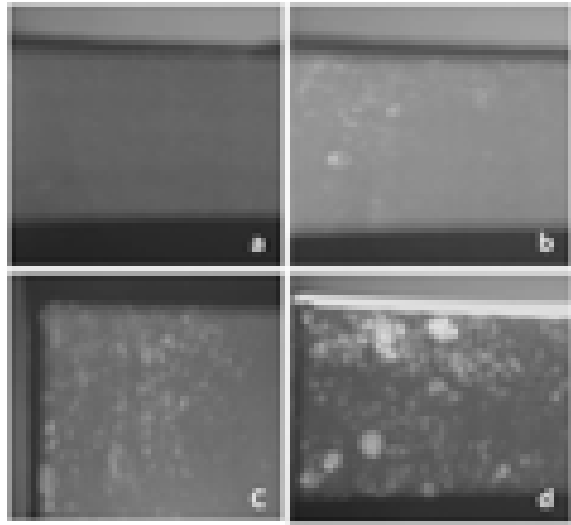
جدول ۵ کمی‌سازی حفرهای داخلی در قطعات مورد آزمایش

۰	۲۰	۴۰	۶۰
حفرات داخلی شدید	حفرات داخلی جزئی	حفرات داخلی متوسط	بدون عیب

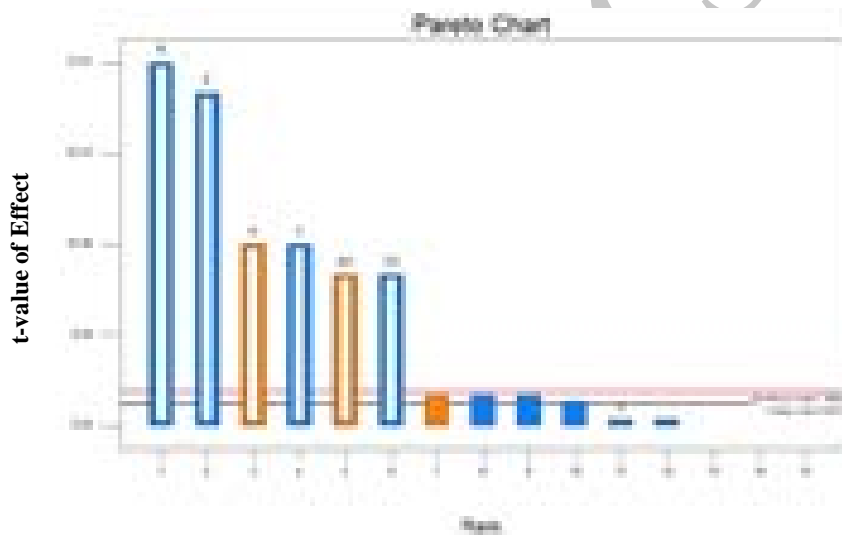
جدول ۶ طراحی آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها توسط نرم‌افزار Design-Expert 7 به روش 2-Level Factorial

با ۸ نقطه‌ی مرکزی، ۲ تکرار و سطح اعتماد ۹۵ درصد

شماره‌ی آزمایش	دمای خشک شدن (°C)	ضخامت پوشان (تعداد لایه)	گران‌روی پوشان (ثانیه)	زمان خشک شدن (ساعت)	نوع پوشان	حفره‌های داخلی
۱	۵۰	۲	۱۱	۲	B	۲۰
۲	۶۰	۳	۹	۱/۵	B	۲۰
۳	۶۰	۳	۱۳	۱/۵	A	۴۰
۴	۶۰	۳	۹	۱/۵	A	۶۰
۵	۴۰	۳	۹	۱/۵	A	۴۰
۶	۴۰	۳	۱۳	۲/۵	A	۰
۷	۵۰	۲	۱۱	۲	A	۴۰
۸	۴۰	۳	۱۳	۲/۵	A	۰
۹	۴۰	۱	۱۳	۲/۵	B	۲۰
۱۰	۶۰	۱	۹	۱/۵	A	۶۰
۱۱	۴۰	۱	۱۳	۱/۵	A	۶۰
۱۲	۵۰	۲	۱۱	۲	B	۲۰
۱۳	۴۰	۳	۱۳	۱/۵	B	۰
۱۴	۶۰	۱	۱۳	۲/۵	A	۶۰
۱۵	۶۰	۱	۹	۲/۵	B	۶۰
۱۶	۴۰	۱	۱۳	۱/۵	A	۶۰
۱۷	۶۰	۱	۱۳	۱/۵	B	۴۰
۱۸	۵۰	۲	۱۱	۲	B	۲۰
۱۹	۵۰	۲	۱۱	۲	B	۲۰
۲۰	۴۰	۳	۱۳	۱/۵	B	۰
۲۱	۶۰	۱	۹	۲/۵	B	۶۰
۲۲	۶۰	۱	۱۳	۲/۵	A	۶۰
۲۳	۶۰	۳	۹	۲/۵	A	۶۰
۲۴	۴۰	۱	۹	۲/۵	A	۶۰
۲۵	۶۰	۱	۱۳	۱/۵	B	۴۰
۲۶	۴۰	۱	۹	۱/۵	B	۴۰
۲۷	۶۰	۳	۹	۱/۵	B	۲۰
۲۸	۴۰	۱	۹	۲/۵	A	۶۰
۲۹	۶۰	۳	۱۳	۲/۵	B	۰
۳۰	۴۰	۱	۹	۱/۵	B	۴۰
۳۱	۴۰	۳	۹	۲/۵	B	۰
۳۲	۶۰	۳	۱۳	۲/۵	B	۰
۳۳	۴۰	۳	۹	۱/۵	A	۴۰
۳۴	۶۰	۳	۹	۲/۵	A	۶۰
۳۵	۵۰	۲	۱۱	۲	A	۴۰
۳۶	۵۰	۲	۱۱	۲	A	۴۰
۳۷	۴۰	۱	۱۳	۲/۵	B	۲۰
۳۸	۴۰	۳	۹	۲/۵	B	۰
۳۹	۶۰	۳	۱۳	۱/۵	A	۴۰
۴۰	۵۰	۲	۱۱	۲	A	۴۰



شکل ۴ تصویرهایی از حفره‌های داخلی در قطعات مورد آزمایش؛ (a) قطعه‌ی بدون عیب، (b) با حفره‌های داخلی کم، (c) با حفره‌های داخلی متوسط (d) با حفره‌های داخلی زیاد



شکل ۵ نمودار پارتو نشان‌دهنده‌ی تأثیر هر یک از مشخصات پوشان بر روی حفره‌های داخلی

$$(I+0.6)^{1.65} = 582.33781 - 25.38828*(T) - 727.25114*(th) + 126.94141*(V) + 83.68958*(t) + 18.14852*(T*t) - 90.74262*(V*t) \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، I حفره‌های داخلی، T دمای کوره‌ی خشک کن، t زمان نگهداری مدل‌های پوشان‌دهی شده در کوره‌ی خشک کن، t_h ضخامت پوشان بر روی مدل‌های اسفنجی، و V گرانروی

مدل‌های به‌دست آمده از آنالیز آنوا (ANOVA) انجام شده بر روی داده‌ها عبارتند از:
برای پوشان A:

$$(I+0.6)^{1.65} = 981.99840 - 25.38828*(T) - 727.25114*(th) + 126.94141*(V) + 83.68958*(t) + 18.14852*(T*t) - 90.74262*(V*t) \quad (1)$$

و برای پوشان B:

حفره‌های داخلی در پوشان A همواره بیش از پوشان B می‌باشد، و این به دلیل نفوذپذیری بیش‌تر آن نسبت به پوشان B می‌باشد.

پوشان می‌باشند. اثر نوع پوشان شکل (۷) نمودار نوع پوشان بر حسب حفره‌های داخلی حاصل از مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل (۷) مشاهده می‌شود، میزان

Response: \bar{y} Internal pores:
Transform: Power Lambda: 1.05 Constant: 0.6

Hierarchical Terms Added after Manual Regression

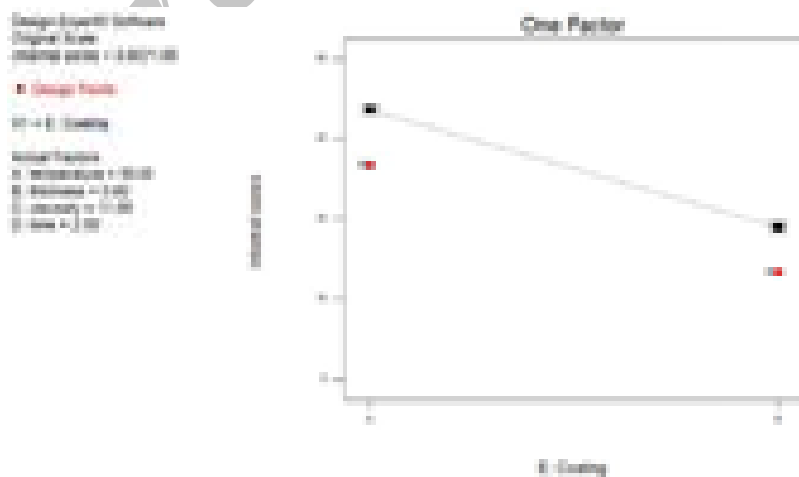
ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table (Partial sum of squares - Type III)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	Prob > F	significant
Model	4.202E+005	7	6.003E+005	453.47	<0.0001	<0.0001	significant
A-temperature	3.802E+005	1	3.802E+005	287.52	<0.0001	<0.0001	
B-thickness	1.522E+005	1	1.522E+005	112.19	<0.0001	<0.0001	
C-viscosity	3.802E+005	1	3.802E+005	287.52	<0.0001	<0.0001	
D-time	267.26	1	267.26	0.20	0.2976	0.2976	
E-Coating	1.272E+005	1	1.272E+005	94.82	<0.0001	<0.0001	
AC	2.622E+005	1	2.622E+005	194.29	<0.0001	<0.0001	
CD	2.622E+005	1	2.622E+005	194.29	<0.0001	<0.0001	
Curvature	1.772E+005	21	84382.19	62.10	<0.0001	<0.0001	significant
Residual	26702.73	30	1324.42				
Lack of Fit	26702.73	8	4949.59				
Pure Error	0.000	22	0.000				
Cor Total	4.477E+005	39					

The Model F-value of 453.47 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

شکل ۶ آنالیز واریانس انجام شده بر روی داده‌ها توسط نرم‌افزار Design-Expert7



شکل ۷ نمودار نوع پوشان بر حسب حفره‌های داخلی

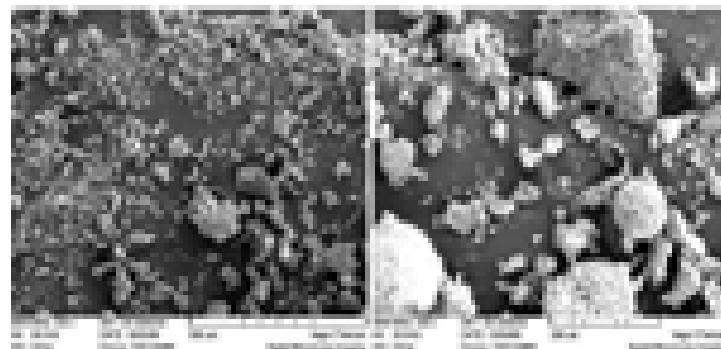
نمودارها، حفره‌های داخلی در زمان‌های کم خشک شدن (۱/۵ ساعت) با افزایش دمای کوره به مقدار جزئی افزایش می‌یابند، زیرا افزایش دمای خشک شدن سبب ترک‌خوردگی سطح پوشان ناشی از افزایش سرعت تبخیر رطوبت آن و بیش‌تر شدن فشار بخار حاصل از آن می‌شود. ترک‌های حاصل با افزایش نفوذپذیری و در نتیجه، با تشکیل جریان مقعر مذاب در قالب سبب به دام افتادن بیش‌تر مواد مذاب حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب و افزایش حفرات داخلی می‌شوند. از طرف دیگر، ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان خشک شدن، شدت افزایش حفره‌های داخلی بیش‌تر می‌شود، زیرا با افزایش زمان خشک شدن تعداد ترک‌های ناشی از افزایش دمای خشک شدن بیش‌تر می‌شود، و این سبب افزایش شدیدتر تعداد حفره‌های داخلی می‌شود.

شکل‌های (۸ و ۹) تصویرهای SEM از پوشان‌های A و B را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این تصویرها مشاهده می‌شود، علت نفوذپذیری کم‌تر پوشان B نسبت به نوع A وجود درصد بالایی از ذرات ریز در آن و در نتیجه، مسدود شدن حفره‌های بین ذرات درشت می‌باشد. نفوذپذیری زیاد پوشان A سبب افزایش سرعت خروج گازهای حاصل از تجزیه‌ی اسفنج شده و با تشکیل جریان مقعر در مذاب، باعث به دام افتادن بیش‌تر مواد مذاب حاصل از تجزیه‌ی اسفنج در مذاب می‌شود و به این ترتیب، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند.

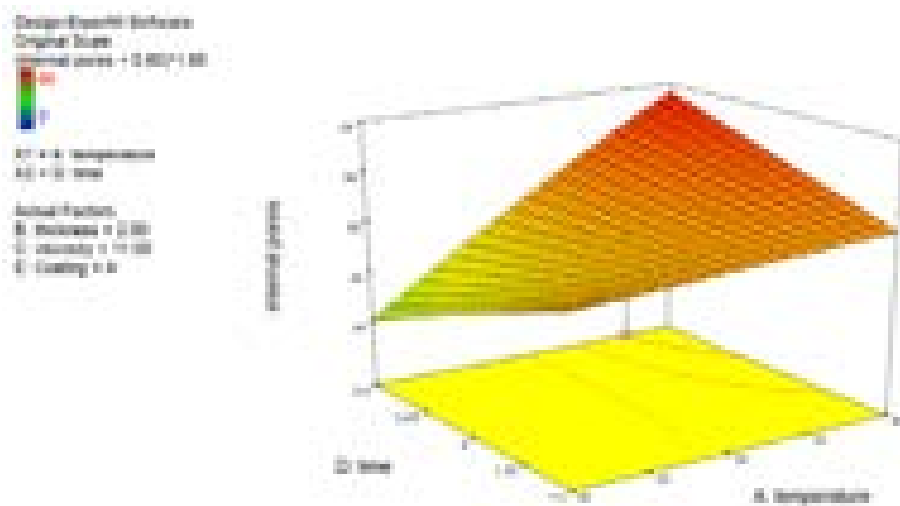
تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن را بر حفره‌های داخلی نشان می‌دهند. مطابق با این



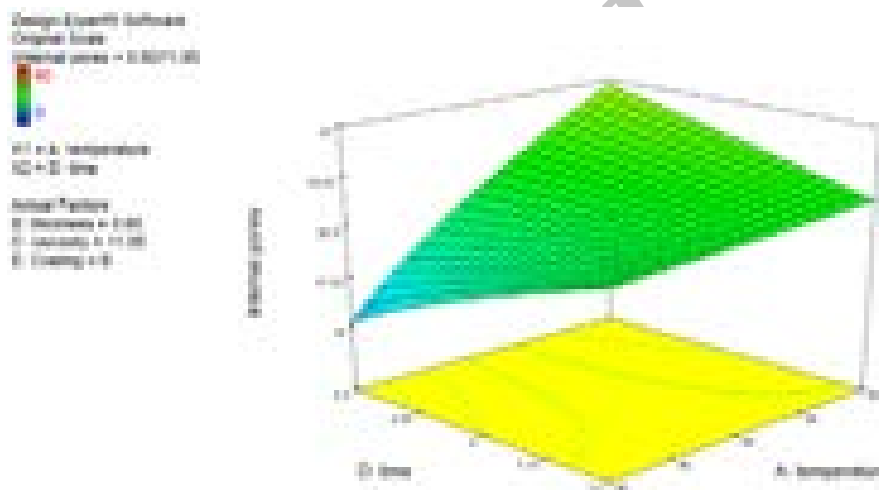
شکل ۸ تصویر SEM از ذرات جامد پوشان A پس از عملیات حرارتی در دمای ۷۰۰°C [۱۶].



شکل ۹ تصویر SEM از ذرات جامد پوشان B پس از عملیات حرارتی در دمای ۷۰۰°C [۱۶].



شکل ۱۰ نمودار تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی



شکل ۱۱ نمودار تأثیر متقابل دما و زمان خشک شدن پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی

ترک خوردگی در سطح پوشان سبب خشک شدن کامل آن می‌شود. در صورتی‌که زمان خشک شدن کم باشد، پوشان کاملاً خشک نشده و رطوبت آن در مرحله‌ی ریخته‌گری و به دلیل دمای بسیار بالای مذاب، به شدت تبخیر می‌شود و به این ترتیب، فشار بخار بالای آن سبب ترک خوردگی سطح پوشان شده و با افزایش نفوذپذیری پوشان و در نتیجه، تشکیل جریان مقعر در

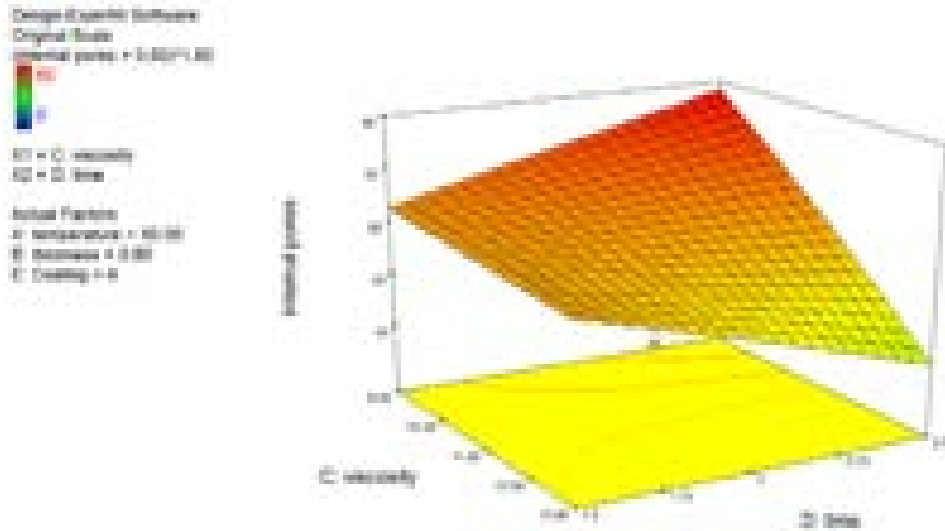
افزون بر این، ملاحظه می‌شود که در دماهای بالای خشک شدن (60°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند، در حالی‌که در دماهای پایین خشک شدن (40°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند، زیرا در دماهای پایین خشک شدن و به دلیل سرعت کم تبخیر پوشان، افزایش زمان خشک شدن بدون ایجاد

قالب، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند.

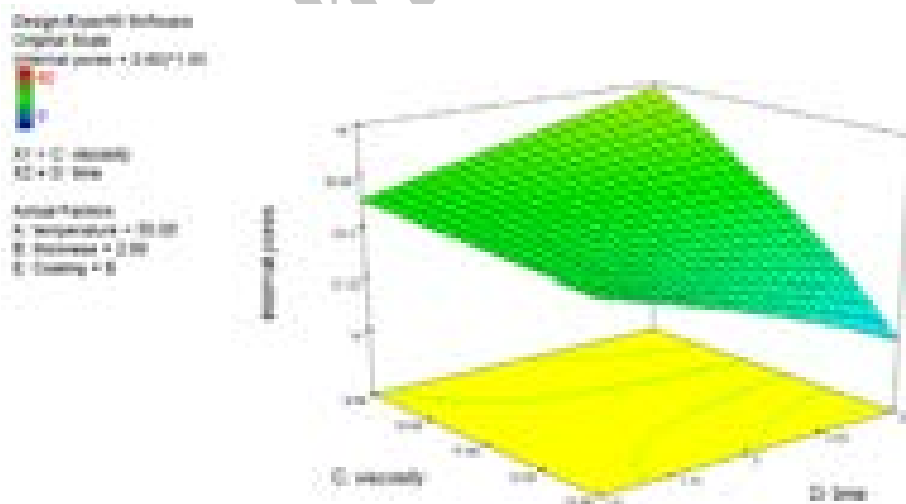
افزایش گرانروی پوشان، حفره‌های داخلی کاهش می‌یابند، زیرا با افزایش گرانروی، نفوذپذیری پوشان کاهش می‌یابد که نتیجه‌ی آن، تشکیل جریان محدب در قالب و در نتیجه، کاهش تعداد حفره‌های داخلی می‌باشد.

تأثیر متقابل گرانروی پوشان و زمان خشک شدن.

شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نمودارهای تأثیر متقابل زمان خشک شدن و گرانروی پوشان‌های A و B بر حسب حفره‌های داخلی را نشان می‌دهند. در این نمودارها، با



شکل ۱۲ نمودار زمان خشک شدن و گرانروی پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی



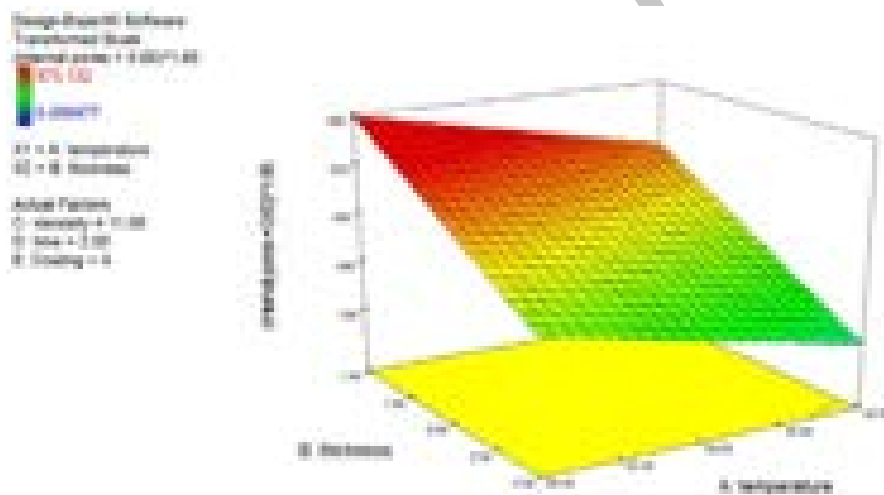
شکل ۱۳ نمودار زمان خشک شدن و گرانروی پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی

ضخامت پوشان را بر دمای خشک شدن نشان می‌دهند. در این نمودارهای، حفره‌های داخلی با افزایش ضخامت پوشان به شدت کاهش یافته‌اند، زیرا افزایش ضخامت پوشان نفوذپذیری پوشان را کاهش می‌دهد و در نتیجه، جریان محذب تشکیل شده و این باعث کاهش تعداد حفره‌های داخلی می‌شود.

بهینه‌سازی داده‌ها. هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن تعداد حفره‌های داخلی در قطعات می‌باشد. جدول ۷ بهینه‌سازی انجام گرفته توسط نرم افزار را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۱۶ تا ۱۸)، نمودارهای سه بعدی حالت بهینه نشان داده شده‌اند.

افزون بر این، ملاحظه می‌شود که در گرانروی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک شدن افزایش می‌یابند، زیرا رطوبت باقی‌مانده در پوشان افزایش می‌یابد، و این رطوبت در مرحله ریخته‌گری و در دمای بسیار بالای مذاب و حضور ترک‌های، سبب افزایش حفره‌های داخلی می‌شود. از طرف دیگر، در گرانروی کمینه و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند. این به دلیل آن است که در این حالت، ترک‌خوردگی‌های سطح پوشان ناشی از دمای بالای خشک شدن افزایش می‌یابد و با افزایش نفوذپذیری آن، جریان مقعر در قالب تشکیل شده و حفره‌های داخلی افزایش می‌یابند.

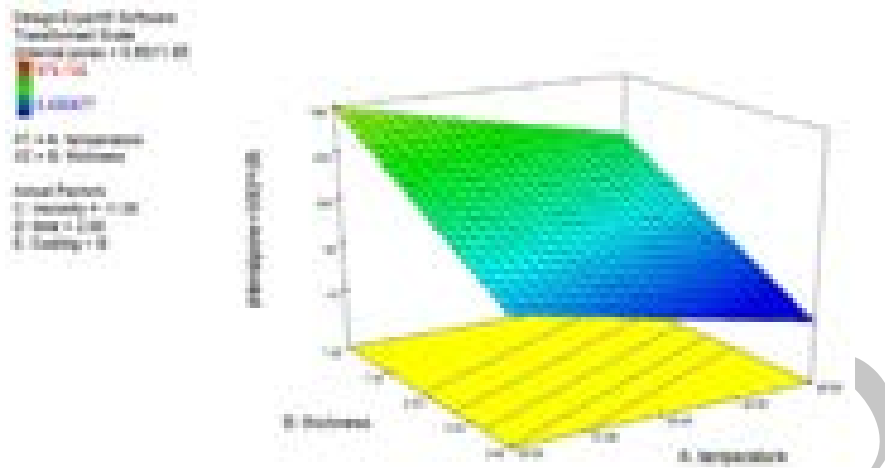
تأثیر ضخامت پوشان. شکل‌های (۱۴ و ۱۵) تأثیر



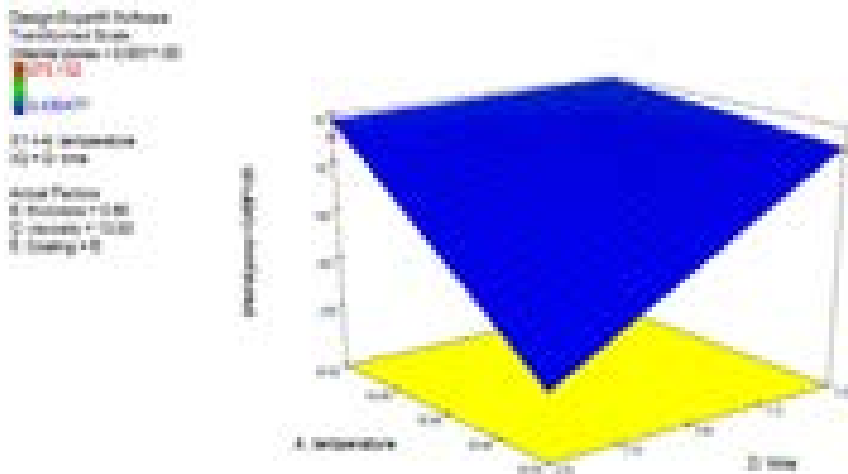
شکل ۱۴ نمودار تأثیر دمای خشک شدن و ضخامت پوشان A بر حسب حفره‌های داخلی

جدول ۷ مشخصات عددی در حالت بهینه

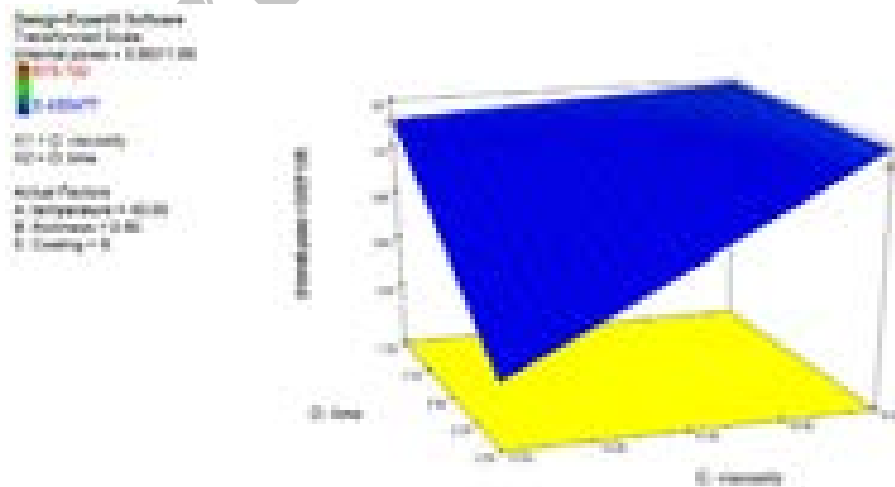
دمای خشک شدن (°C)	ضخامت پوشان (تعداد لایه‌ی پوشان بر روی اسفنج)	گرانروی پوشان (ثانیه)	زمان خشک شدن (ساعت)	نوع پوشان	میزان حفره‌های داخلی
۴۰	۳	۱۳	۲/۵	B	۰



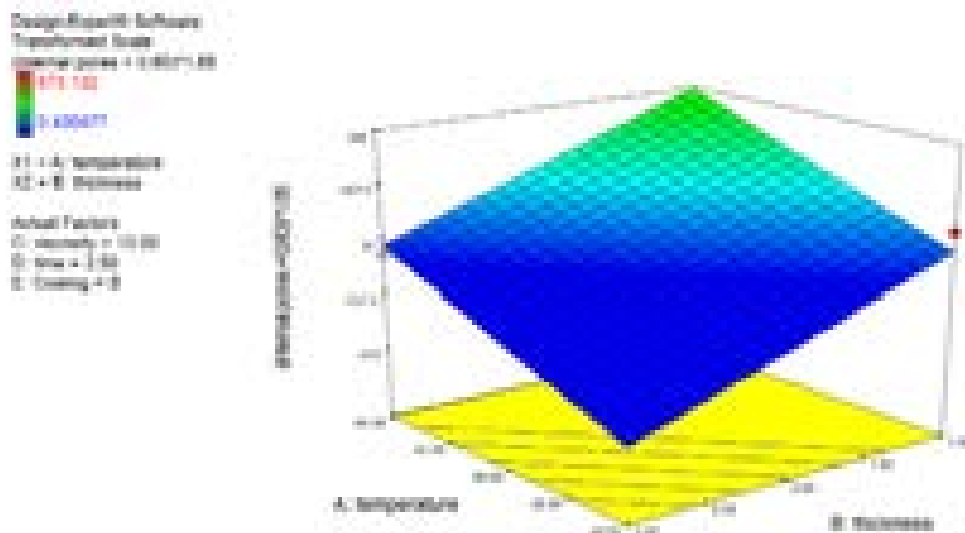
شکل ۱۵ نمودار تأثیر دمای خشک شدن و ضخامت پوشان B بر حسب حفره‌های داخلی



شکل ۱۶ نمودار دما و زمان خشک شدن بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه



شکل ۱۷ نمودار زمان خشک شدن و گرانروی پوشان بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه



شکل ۱۸ نمودار دمای خشک شدن و ضخامت پوشان بر حسب حفره‌های داخلی در حالت بهینه

شدن (40°C)، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن کاهش یافتند.

(۵) در گرانروی بیشینه، حفره‌های داخلی با کاهش زمان خشک شدن افزایش یافتند، اما در گرانروی کمینه، حفره‌های داخلی با افزایش زمان خشک شدن افزایش یافتند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از زحمات بی‌دریغ پرسنل زحمت‌کش شرکت ریخته‌گری تراکتورسازی تبریز، به‌ویژه جناب آقای مهندس خالچی، کمال تشکر و قدردانی را معمول می‌دارند.

نتیجه‌گیری

(۱) از بین مشخصات مورد بررسی، ضخامت پوشان (B) بیش‌ترین و مدت زمان نگهداری در کوره‌ی خشک کن (D) کم‌ترین تأثیر را بر روی حفره‌ها داشتند.

(۲) میزان حفره‌های داخلی در پوشان A همواره بیش‌تر از پوشان B به‌دست آمدند.

(۳) با افزایش دمای کوره، حفره‌های داخلی افزایش یافتند، و با افزایش گرانروی و ضخامت پوشان، حفره‌های داخلی کاهش یافتند.

(۴) در دماهای بالای خشک شدن (60°C) و با افزایش زمان خشک شدن، حفره‌های داخلی افزایش یافتند، در حالی‌که در دماهای پایین خشک

مراجع

1. H. Littleton, B. Miller, D. Sheldon, C. Bates, "Lost foam casting-Process control the precision", AFS Trans., Vol. 104, pp.335- 346, (1996).
2. F. Sonnenberg, "Lost Foam Casting Made Simple", AFS, pp. 123-130, (2009).
3. S. Kumar, P. Kumar, H. S. Shan, "Effect of evaporative pattern casting process parameters on the

- surface roughness of Al-7% Si alloy casting", *J. Material Process Technology*, pp. 615-620, (2007).
4. S. Bakhtiyarov, L. Overfelt, R. A. "Rheology of refractory coating materials used in the lost foam casting process", *J. Elastomers and Plastics*, Vol.32, pp. 73-85, (2000).
 5. G. H. Kocan, "Incorporating permeability into lost foam coating controls", *J.AFS Transactions*.96-99, pp.565-569.
 6. W. A. Marchisin, "Refractory coating selection and control for the lost foam casting process", *AFS Trans.* 2001, pp. 65.
 7. R. A. Bambauer, T. Lee, T. Delong, "Effect of continuous mixing on viscosity and permeability of an iron lost foam coating ; a joint study", *J.AFS Transaction 96-123*, pp. 329- 333.
 8. Q. H. Zhao, S. Wang Biederman, J. S. Jason, D. Parish, "Lost Foam Casting Coating Characterization: Heat and Mass Transfer", *AFS Transactions*, pp. 1-15, (2005).
 9. J. J. Green, C.W. Ramsay, D. R. Askeland, "Formation of surface defects in gray iron lost foam casting", *J.AFS, Transactions*.96-93, pp. 281-289.
 10. J. S. Parish, D. J. Jason, J. L. Meloni, "Practical Control Of Lost Foam Coatings In Foundry Operations", *AFS Transactions*, pp. 1-8, (2003).
 11. R. Venkataramani, C. Ravindran, "Effect of coating thickness and pouring temperature on thermal response in lost foam casting ", *J.AFS, transactions*.96-93, pp. 281-289.
 12. M.W. Hill, "Effects of Silicon Content, Coating material and Gating Design on Casting Lost Foam Casting Defect in the Aluminium", *AFS Research*, pp.443-449.
 13. M. W. Hill, "Effects of Silicon Content, Coating material and Gating Design on Casting Lost Foam Casting Defect in the Aluminium", *AFS Research*, pp.443-449.
 14. S. Bennett, C. W. Ramsay, D. R. Askeland, "Temperature gradients during fill and solidification of Al LFCs", *AFS. Transaction*, 1998, PP. 113.
 15. S. Shikumar, X. Yao, M. Makhlof, "Polymer- melt interactions during casting formation in the lost foam process", *J. Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, PP. 30-46, (1995).
 ۱۶. اکبرزاده ندافی یاسر، " بررسی علل بروز عیوب کربنی در قطعات ریخته چدنی تولیدی به روش لاست اسفنج و ارائه راه حل آن"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، زمستان (۱۳۸۵).
 17. W. Raymond, W. Monrore, "Expendable pattern casting", *American Foundry men's Society, Inc. Des Plaines, IL, USA*, (1992).
 18. A. J. Clegg, "Expanded polystyrene molding", *Foundry trade journal*, PP. 177-187, (1985).
 19. M. Sands, S. Shivkumar, "EPS molecular weight and foam density effects in the lost foam process", *Journal of materials science*, 38, PP. 2233-2239, (2003).

20. G. V. Walford, R. B. Michaels, "Density and Bead Fusion Measurements for Inspection of Lost foam patterns", AFS Trans. Vol. 94, pp 201-205, (2000).

Archive of SID