فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
زمستان ۱۳۸۵، شماره‌ی سی و ششم، ص. ۸۱-۸۵، (یادداشت فنّی)

کاربرد طراحی آزمایش‌ها در تعیین عوامل مؤثر در مشخصه‌های کیفی رگلاتورِ آب

سید تقی اخوان‌نیاکی (استاد)
شاروکین خنانشو (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

قالب آهنگری[1] در فرایند تولید رگلاتور آب به‌دلیل زمان‌بر بودن و هزینه‌ی ساخت بالا، و نیز به‌دلیل اثرگذاری مستقیم بر کیفیت این قطعه، در شرکت‌های رگلاتورسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این نوشتار مسئله‌ی تشخیص عوامل مؤثر بر عملکرد قالب آهنگری و تعیین سطوح مقداری این عوامل، به‌نحوی که قالب عمر طولانی داشته باشد، در چارچوب اهدافی که در طراحی آزمایش‌ها دنبال می‌شوند مطرح و در قالب یک طرح عاملی 2^4 بدون تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

مقدمه

رگلاتور آب که در آبگرمکن‌های دیواری گازی کاربرد دارد، از جنس برنج است و وزن تقریبی آن ۷۲۰ گرم است. این قطعه سه نقش عملکردی مهم در آبگرمکن‌های دیواری دارد. نخست این که با عبور آب از داخل آن مسیر عبور گاز باز می‌شود و در نتیجه آبگرمکن روشن خواهد شد. دوم این که میزان دبی آب در آبگرمکن را تنظیم می‌کند. سوم این که با توجه به میزان دبی آب در آبگرمکن، سوپاپ اصلی گاز در رگلاتور را تنظیم می‌کند. این قطعه خود از قطعاتی نظیر ساقه‌ی سوپاپ آب، شیر احتراق، شیر تنظیم دما، پیچ تخلیه، دیافراگم و غیره تشکیل شده است.

در نظام‌نامه‌ی کیفیت شرکت تولیدی مورد بررسی، فرایند آهنگری بدنه‌ی رگلاتور آب به‌همراه فرایند ریخته‌گری تحت فشار قطعات آلومینیمی آن به‌عنوان فرایندهای خاص طبقه‌بندی شده‌اند (فرایندهایی که کمبودها و نواقص آنها پس از استفاده مشخص می‌شوند.) مثلاً در فرایند ریخته‌گری تحت فشار، حفره‌های هوایی (مک) به وجود آمده در قطعات (که نقص محسوب می‌شوند) بلافاصله پس از تولید قابل رؤیت نیستند و فقط هنگام عملیات ماشین‌کاری این حفره‌ها ظاهر می‌شوند. در فرایند آهنگری بدنه‌ی رگلاتور نیز شبیه این موقعیت وجود دارد. در این فرایند از آنجا که ابتدا ماده‌ی اولیه‌ی آهنگری گرم می‌شود، و سپس عملیات آهنگری اجرا، و در انتها قطعه سرد می‌شود، تغییر ساختار متالورژیکی بر خواص ماشین‌کاری قطعه اثر می‌گذارد و عیب‌هایی نظیر جوش سرد فقط هنگام ماشین‌کاری ظاهر می‌شوند.

در حال حاضر به دلایل یاد شده، طرح‌های بازرسی و نمونه‌گیری محصول نهایی که به‌منظور کنترل کیفیت فرایندهای خاص صورت می‌گیرد، صرفا پس از تولید محصولات کاربرد دارند و قادر به کنترل مناسب فرایندهای تولید این محصولات نیستند. درنتیجه ضرورت به کارگیری روش‌هایی برای تحت کنترل درآوردن فرایند تولید کاملاً احساس می‌شود. هدف از انجام این پروژه، مطالعه، بررسی و تجزیه و تحلیل فرایند آهنگری بدنه‌ی رگلاتور به‌منظور اعمالِ کنترل متغیرهای ورودی تأثیرگذار بر کیفیت محصولات این فرایند در حین تولید است.

از یک طرف مشکلات اصلی مربوط به خاص بودن این فرایند، به دلیل عملکرد قالب مورد استفاده در تولید این قطعات و شکل‌گیری زیرساختار متالورژیکی بدنه‌ی رگلاتور در مرحله‌ی آهنگری لقمه‌ی مذاب برنجی در حفره‌ی قالب، و از طرف دیگر شرایط تعریف شده برای عملکرد بهینه‌ی قالب که بستگی به پارامترهای ورودی (نظیر دمای لقمه‌ی مذاب و فشار دستگاه پرس) دارد، به نظر مهندسین فرایند عمده‌ترین عامل مؤثر بر کیفیت رگلاتور، قالب آهنگری این قطعه تشخیص داده می‌شود.

مسئله‌ی بررسی قالب آهنگری بدنه‌ی رگلاتور از نظر اقتصادی نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. عمر مفید این قالب (تعداد قطعات سالم تولید شده توسط آن) که خود روی یک دستگاه پرس ۱۵۰ تنی نصب می‌شود که ۳ تا ۴ ضربه در دقیقه به آن وارد می‌کند، و لقمه‌های مذاب با دمایی نزدیک ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد روی آن قرار می‌گیرند، محدود است. محدودیت‌های دیگری نظیر برنامه‌ی تولید رگلاتور و هزینه و زمان بالای ساخت قالب، مسئله‌ی ساخت قالب با عمر بیشتر را اساسی‌تر جلوه می‌دهد. درنتیجه تشخیص عوامل مؤثر بر عملکرد قالب آهنگری و تعیین سطوح مقداری آنها به‌نحوی که تعداد قطعات معیوب تولید شده

توسط قالب معقول باشد و قالب عمر بیشتری داشته باشد، حیاتی است. این کار را می‌توان براساس مفاهیم مطرح در طراحی آزمایش‌ها انجام داد. به‌طور کلی انجام پروژه‌ی طراحی آزمایش‌ها مراحل زیر را شامل می‌شود:[۱ و۲]

۱. شناسایی، درک، و بیان مسئله؛

۲. انتخاب عوامل و تعیین سطوح آنها؛

۳. انتخاب متغیر پاسخ؛

۴. انتخاب طرح آزمایش؛

۵. انجام آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها؛

۶. تجزیه و تحلیل داده‌ها؛

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات.

بعد از شناسایی و بیان مسئله، که در فوق به آن اشاره شد، در بخش‌های بعدی به چگونگی روند بقیه‌ی مراحل می‌پردازیم.

انتخاب عوامل و تعیین سطوح آنها

با توجه به شرایط عملیاتی موجود و با استناد به نظرات کارشناسانه، چهار عاملی که هم در ساختار متالورژیکی قطعات تولید شده توسط قالب مؤثرند و هم تأثیر مهمی بر عمر قالب دارند عبارت‌اند از: ۱. نوع و جنس صفحات اصلی که در ساخت قالب به کار می‌روند؛ ۲. سختی حفره‌ی قالب بعد از انجام عملیات حرارتی؛ ۳. دمای لقمه‌های برنجی؛ ۴. نوع دستگاه پرس.

به دلیل شرایط کارکردی (دما و فشار بالا) معمولاً جنس صفحات قالب از فولاد گرم‌کار انتخاب می‌شود. در شرکت مورد نظر فقط ۲ نوع از این فولاد (H۱۲ و H۱۳) قابل تهیه بوده و تجربه‌ی ساخت قالب از آنها وجود داشته است. بنابراین عامل جنس صفحات اصلی قالب با دو سطح در مطالعه مطرح خواهد بود.

سختی قالب‌های آهنگری نیز نقش اساسی در ساختار حفره‌ی قالب، عمر قالب، و کیفیت محصولات تولید شده ایفا می‌کند. برای سخت کردن صفحات اصلی قالب، به طراحی و اجرای فرایند حرارتی خاصی نیاز است که برای شرکت مستلزم هزینه‌ی زیادی است. این محدودیت به همراه مسائلی نظیر محدودیت ظرفیت آزمایشگاه سبب می‌شود که تنها دو سطح مقداری برای این عامل در نظر گرفته شود. با توجه به تجربیات کارشناسان و دانش فنی موجود این دو مقدار برابر ۴۵ و ۴۷ راکول انتخاب شدند.

به‌منظور شکل‌دهی قطعات برنجی در عملیات آهنگری، ابتدا لقمه‌ها را در اندازه‌های مشخص درکوره‌های حرارتی به دمای خاصی می‌رسانند تا تحت ضربه در زمان کوبش به‌صورت سیال به درون حفره‌ی قالب جاری شوند و شکل اصلی قطعه را به خود بگیرند. اگر این دما نامناسب باشد اشکالاتی نظیر پر نشدن کامل حفره‌ی قالب و ترک‌خوردگی دیواره‌های حفره‌ی قالب به وجود می‌آید که باعث تغییر ساختار متالورژیکی قطعه و نیز کاهش عمر قالب می‌شود. کوره‌ی موجود برای گرم‌کردن لقمه‌ها از نوع دیجیتالی است که دو نوع دمای تنظیم شده و دمای لقمه‌ی خارج شده را نشان می‌دهد. اختلاف این دو دما برابر ۶۰ درجه سانتی‌گراد است. این اختلاف به‌دلیل حرکت لقمه در طول ریل داخل کوره است که در مدت زمانی مشخص (بسته به سرعت نقاله‌ی اتوماتیک کوره) انجام می‌شود. محدودیت‌هایی نظیر برنامه‌ی تولید روزانه و محدودیت‌های اقتصادی انجام آزمایش‌ها سبب می‌شود که برای این عامل نیز دوسطح مقداری ۶۵۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تعیین شود.

در عملیات آهنگری میزان و سرعت ضربه بر نحوه‌ی سیلان مواد مذاب در حفره‌ی قالب و جریان حرکت مناسب و یکنواخت در تمامی جوانب حفره‌ی قالب تأثیر به‌سزایی دارد. این فرایند در شرکت مورد بررسی معمولاً توسط دو نوع دستگاه پرس، ضربه‌یی (مکانیکی) و هیدرولیکی، انجام می‌شود. به‌کارگیری هر یک از این دستگاه‌ها بیانگر مجموعه‌ی خاصی از مقدار سرعت و ضربه است. با توجه به این جوانب، در این تحقیق دو عامل میزان و سرعت ضربه در قالب، به‌عنوان یک عامل (نوع دستگاه پرس) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر در مورد عامل چهارم که همانا نوع دستگاه پرس است باید توجه داشت که تنها دو گزینه در شرکت موجود است؛ یعنی عامل چهارم نیز همانند سه عامل دیگر در دو سطح در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب متغیر پاسخ

با توجه به اینکه متغیر پاسخ باید شامل اطلاعات و خصوصیات مهمی از فرایند مورد بررسی باشد؛ و نیز با توجه به تعریفی که از مسئله داشته‌ایم هر یک از گزینه‌های زیر را می‌توان برای متغیر پاسخ انتخاب کرد:

۱. تعداد ضربات قالب آهنگری رگلاتور آب تا مشاهده و شناسایی اولین قطعه‌ی معیوب تولید شده توسط قالب؛

۲. عمر قالب آهنگری برحسب تعداد رگلاتور آب سالم تولید شده از قالب؛

۳. تعداد قطعه‌ی سالم تولید شده توسط قالب.

درگزینه‌های فوق منظور از قطعه‌ی معیوب (ناسالم) وجود هرگونه ترک روی قطعه، وجود حفره‌ی هوایی در قطعه، جمع شدن سرب در یک ناحیه از قطعه، وجود ناپایداری ابعادی در قطعه و یا وجود پلیسه در نقاط کلیدی قطعه است.

انتخاب طرح آزمایش

گام مهم بعدی در انجام تحقیق انتخاب طرحی است که براساس آن باید آزمایش انجام داد. با توجه به نکاتی که در بخش‌های قبلی مطرح شد، یک طرح عاملی 2^4 برای انجام آزمایش مناسب به نظر می‌رسد.[۱-۴] به‌طور خلاصه عوامل و سطوح آنها در این طرح به‌صورت جدول ۱ است.

به‌علاوه، به‌دلیل محدودیت‌های تولیدی و اقتصادی که در بخش‌های قبلی ذکر شد فقط یک تکرار از طرح فوق قابل آزمایش است و به‌همین دلیل در این تحقیق یک طرح عاملی 2^4 بدون تکرار خواهیم داشت، یعنی هر یک از ۱۶ حالت اجرای آزمایش در این طرح فقط با یک نمونه آزمایش می‌شود.

باید توجه داشت که یکی از مهم‌ترین پیش نیازهای بخش تجزیه و تحلیل آماری این طرح انجام تصادفیِ آزمایش‌ها است. بدین‌منظور فرض کنید آزمایش‌ها را به‌صورت جدول ۲ شماره‌گذاری کرده‌ایم.

حال اگر یک عدد تصادفی بین ۱ و ۱۶ اختیار شود (مثلاً ۹) آنگاه آزمایش شماره‌ی ۹ (آزمایشی که در آن لقمه‌های مذاب با دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد روی قالبی با جنس فولاد H۱۲ و میزان سختی

جدول ۱. عوامل و سطوح مقداری آنها.

عامل	اولین سطح	دومین سطح
نوع صفحات	H۱۲	H۱۳
سختی قالب	۴۵ راکول	۴۷ راکول
دمای لقمه	۶۵۰ درجه	۷۰۰ درجه
نوع پرس	مکانیکی	هیدرولیکی

جدول ۲. انتخاب تصادفی آزمایش‌ها.

ترکیب سطوح عوامل	شماره‌ی آزمایش
(۱)	۱
a	۲
b	۳
ab	۴
c	۵
ac	۶
bc	۷
abc	۸
d	۹
ad	۱۰
bd	۱۱
abd	۱۲
cd	۱۳
acd	۱۴
bcd	۱۵
abcd	۱۶

جدول ۳. چارچوب کلی طرح آزمایش.

A / B		H۱۲		H۱۳	
	C / D	۶۵۰ درجه	۷۰۰ درجه	۶۵۰ درجه	۷۰۰ درجه
پرس مکانیکی	۴۵ راکول	(۱)	c	a	ac
	۴۷ راکول	d	cd	ad	acd
پرس هیدرولیکی	۴۵ راکول	b	bc	ab	abc
	۴۷ راکول	bd	bcd	abd	abcd

۴۵ راکول بر روی دستگاه پرس هیدرولیکی کاربرد دارند) ابتدا انجام می‌شود. این فرایند تا زمانی که آزمایش شانزدهم انجام شود ادامه خواهد داشت. با این شیوه تنها محدودیت موجود در تصادفی‌کردن انجام آزمایش این است که ممکن است به این ترتیب آزمایشی که قبلاً انجام شده بار دیگر برای انجام انتخاب شود و این محدودیت قابل اغماض است. در این تحقیق تولید اعداد تصادفی با استفاده از روش هم‌نهشتی آمیخته انجام شده است و یک رشته از اعداد تصادفی به‌صورت ۱۱ و ۶ و ۸ و ۱۴ و ۱۵ و ۱ و ۱۰ و ۳ و ۱۶ و ۴ و ۲ و ۱۳ و ۱۲ و ۹ و ۵ و ۷ که از آن برای ترتیب انجام آزمایش‌ها استفاده خواهد شد به دست آمد.

چارچوب کلی طرح انتخابی در جدول ۳ خلاصه شده است. زمانی که تنها یک تکرار از طرح فوق وجود دارد، تخمین عنصر خطا که رکن اصلیِ آزمون‌های آماریِ مربوط به وجود اثرات است، ناممکن خواهد بود مگر این که فرض شود بعضی از اثرات متقابل (ترجیحاً از مراتب بالا) ناچیزند و از مجموع مربعات و درجه آزادی آنها به‌عنوان مجموع مربعات و درجه آزادی خطا استفاده شود. ولی گاهی اثرات متقابل از درجات بالا نیز در تحلیل معنی‌دارند. یک روش ساده برای انتخاب اثراتی که به‌لحاظ آماری معنی‌دار نیستند ارائه شده است.[۵] در این روش پیشنهاد شده اثراتی که تأثیر ناچیزی دارند از یک توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ثابت برخوردارند و زمانی که نمودار احتمال نرمال برای تخمین خطاها رسم شود اینگونه اثرات نزدیک به خط مستقیم خواهند بود. به این ترتیب با تشخیص اثرات متقابلِ کم‌اثر می‌توان از طریق ادغام آنها در مجموع مربعات خطا، تخمینی از میانگین مربعات خطا که برای آزمون‌های متفاوت نقشی اساسی ایفا می‌کند، استفاده کرد.

انجام آزمایش

بعد از مشخص‌شدن طرح آزمایش و ترتیب انجام آزمایش‌ها نوبت به انجام آزمایش می‌رسد. با توجه به این که دو عامل از چهار عامل مورد بررسی مربوط به جنس و سختی قالب است، برای انجام آزمایش‌ها ابتدا باید ۴ نوع قالب به‌صورت جدول ۴ ساخته می‌شد:

جدول ۴. انواع قالب مورد نیاز برای انجام آزمایش.

جنس صفحات / قالب / سختی قالب	فولاد گرم کار H۱۲	فولاد گرم کار H۱۳
۴۵ راکول	قالب شماره۱	قالب شماره۲
۴۷ راکول	قالب شماره ۳	قالب شماره ۴

جدول ۵. نتایج حاصل از اجرای طرح.

ردیف	عامل				ترکیب سطوح عوامل	عمر قالب
	A	B	C	D		
۱	-	-	-	-	(۱)	۲۹۲۳۲
۲	+	-	-	-	a	۱۸۵۴۷
۳	-	+	-	-	b	۲۱۹۲۴
۴	+	+	-	-	ab	۱۳۵۱۷
۵	-	-	+	-	c	۲۸۹۳۱
۶	+	-	+	-	ac	۱۷۲۰۲
۷	-	+	+	-	bc	۱۰۰۱۲
۸	+	+	+	-	abc	۱۲۸۶۵
۹	-	-	-	+	d	۳۴۸۳۷
۱۰	+	-	-	+	ad	۲۴۵۹۴
۱۱	-	+	-	+	bd	۲۶۱۵۲
۱۲	+	+	-	+	abd	۱۷۹۴۷
۱۳	-	-	+	+	cd	۳۳۶۵۱
۱۴	+	-	+	+	acd	۱۹۰۰۷
۱۵	-	+	+	+	bcd	۲۴۹۰۹
۱۶	+	+	+	+	abcd	۱۴۳۵۷

در انجام آزمایش‌ها بسته شدن هر یک از ۴ نوع قالب فوق روی دستگاه‌های پرس مکانیکی یا هیدرولیکی باعث تغییر سطح عاملی دیگر از طرح می‌شود. با ترکیب سطوح این دو عامل و انتخاب سطوح دو عامل دیگر همه‌ی آزمایش‌ها در مدتی نزدیک به ۵ ماه انجام شد. نتایج به دست آمده برای متغیر پاسخ (عمر قالب بر حسب تعداد قطعه سالم تولید شده) در جدول ۵ خلاصه شده است.

تجزیه و تحلیل آماری

نتایج مربوط به تخمین اثرات مختلف مدل و مجموع مربعات و درجه آزادی آنها در جدول ۶ آورده شده است.

از آنجا که طرح بدون تکرار انجام شده است و تخمینی برای عنصر خطا در آن وجود ندارد، با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان اثرات متقابل کم‌اثر را در خطا ادغام کرد و تخمینی از میانگین مربعات خطا، که برای آزمون‌های آماری حیاتی است، به دست آورد. به‌منظور به‌کارگیری روش دانیل لازم است که ابتدا تخمین اثرات مختلف مدل را برحسب احتمالات نرمال به دست آوریم. خلاصه‌ی این محاسبات در جدول ۷

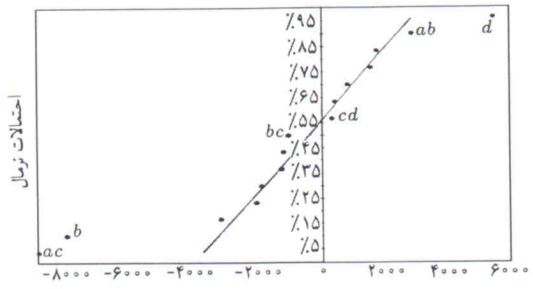
جدول ۶. تخمین، مجموع مربعات و درجه آزادی اثرات مختلف مدل.

ردیف	اثر	تخمین اثر	درجه آزادی	مجموع مربعات
۱	(۱)	۴۳۴۶۱	-	۷۵۵۵۲۶۰۲۴۱
۲	A	-۸۹۵۲	۱	۳۲۰۵۱۷۴۰۹
۳	B	-۸۰۴۰	۱	۲۵۸۵۵۰۳۲۰
۴	AB	۲۸۷۴	۱	۳۳۰۳۳۷۵۶
۵	C	-۳۲۲۷	۱	۴۱۶۵۴۱۱۶
۶	AC	-۴۳۴	۱	۷۵۱۶۸۹
۷	BC	-۱۱۲۲	۱	۵۰۳۷۷۸۰
۸	ABC	۱۷۹۵	۱	۱۲۸۸۴۵۱۰
۹	D	۵۴۰۳	۱	۱۱۶۷۶۹۶۳۶
۱۰	AD	-۱۹۶۰	۱	۱۵۳۵۸۵۶۱
۱۱	BD	۸۵۹	۱	۲۹۴۹۸۰۶
۱۲	ABD	-۱۳۴۱	۱	۷۱۹۵۸۰۶
۱۳	CD	۳۲۶	۱	۴۲۳۸۰۱
۱۴	ACD	-۲۱۲۱	۱	۱۷۹۸۶۰۸۱
۱۵	BCD	۱۶۰۷	۱	۱۰۳۳۳۰۱۰
۱۶	ABCD	-۱۲۸۱	۱	۶۵۶۶۴۰۶

جدول ۷. احتمالات نرمال تخمین اثرات مدل.

ترتیب	اثر	تخمین اثر	احتمال نرمال
۱	A	-۸۹۵۲	۰٫۰۳۳۷
۲	B	-۸۰۴۰	۰٫۱۰۰۰
۳	C	-۳۲۲۷	۰٫۱۶۶۷
۴	ACD	-۲۱۲۱	۰٫۲۳۳۳
۵	AD	-۱۹۶۰	۰٫۳۰۰۰
۶	ABD	-۱۳۴۱	۰٫۳۶۶۷
۷	ABCD	-۱۲۸۱	۰٫۴۳۳۳
۸	BC	-۱۱۲۲	۰٫۵۰۰۰
۹	CD	۳۲۶	۰٫۵۶۶۷
۱۰	AC	۴۳۴	۰٫۶۳۳۳
۱۱	BD	۸۵۹	۰٫۷۰۰۰
۱۲	BCD	۱۶۰۷	۰٫۷۶۶۷
۱۳	ABC	۱۷۹۵	۰٫۸۳۳۷
۱۴	AB	۲۸۷۴	۰٫۹۰۰۰
۱۵	D	۵۴۰۳	۰٫۹۶۶۷

آورده شده است. سپس این احتمالات روی کاغذ نرمال رسم می‌شوند. نمودار حاصل در شکل ۱ آورده شده است. با استفاده از شکل ۱ می‌توان اثرات متقابل AC, AD, BD, ABC, ABCD, ABD را به‌عنوان خطا در نظر گرفت و از مجموع مربعات آنها (۷۴۰۲۵۸۶۹) که ۸ درجه آزادی دارد برای تخمین میانگین مربعات خطا (۹۲۵۳۲۳۳٫۶۲۵) استفاده کرد. درنتیجه جدول تحلیل واریانس به‌صورت جدول ۸ به دست می‌آید. در این جدول نتایج آزمون‌های فرض



شکل ۱. نمودار احتمالات نرمال اثرات مرتب شده.

جدول ۸. جدول تجزیه و تحلیل واریانس.

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره‌ی F	معنی دار؟
A(نوع فولاد)	۳۲۰۵۱۷۴۰۹	۱	۳۲۰۵۱۷۴۰۹	۳۴٫۶۳۸	بله
B(نوع پرس)	۲۵۸۵۵۰۳۲۰	۱	۲۵۸۵۵۰۳۲۰	۲۷٫۹۴۲	بله
C(دمای لقمه)	۴۱۶۵۴۱۱۶	۱	۴۱۶۵۴۱۱۶	۴٫۵۰۲	نه
D(سختی قالب)	۱۱۶۷۶۹۶۳۶	۱	۱۱۶۷۶۹۶۳۶	۱۲٫۶۱۹	بله
AB	۳۳۰۳۳۷۵۶	۱	۳۳۰۳۳۷۵۶	۳٫۵۷۰	نه
BC	۵۰۳۷۷۸۰	۱	۵۰۳۷۷۸۰	۰٫۵۴۴	نه
CD	۴۲۳۸۰۱	۱	۴۲۳۸۰۱	۰٫۰۴۶	نه
E(خطا)	۷۴۰۲۵۸۶۹	۸	۹۲۵۳۲۳۳٫۶۲۵		
T(کل)	۸۵۰۰۱۲۶۸۷	۱۵			

مربوط به وجود اثرات از طریق مقایسه‌ی آماره‌ی F و $F_{\alpha,1,8} = 5/32$ که در آن $\alpha = 0/95$ است در آخرین ستون این جدول آورده شده است. چنان که در جدول ۸ مشخص است، تنها اثرات اصلی عوامل A، B و D معنی‌دارند و این بدین معناست که کیفیت قطعات تولیدی که ناشی از عمر قالب است به نوع فولاد به کار رفته در قالب، نوع دستگاه پرس مورد استفاده (یا میزان و شدت ضربه) و درجه‌ی سختی قالب بستگی دارد و درجه‌ی حرارت لقمه‌ی برنجی در آن مؤثر نیست. در این رابطه درجه‌ی سختی بالاتر (۴۷ راکول)، نوع فولاد H۱۲ و به‌کارگیری دستگاه پرس مکانیکی باعث افزایش عمر قالب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق شرایط عملیاتی قالب آهنگری بدنه‌ی رگلاتور آب از طریق یک طرح عاملی 2^4 مورد بررسی قرار گرفت. چهار عامل این طرح به‌ترتیب با نوع فولاد به‌کار گرفته شده در صفحات اصلی قالب آهنگری (A)، نوع پرس مورد استفاده در تولید قطعات (B)، دمای لقمه مذاب (C)، و میزان سختی حفره قالب (D) هر یک در دو سطح مطرح شدند. با انتخاب تعداد قطعات سالم تولید شده به‌عنوان متغیر پاسخ و با انجام ۱۶ آزمایش، که در مدتی نزدیک به ۵ ماه صورت گرفت، به نتایج مربوط به یک تکرار از طرح فوق دست یافتیم. بعد از فاز بررسی صحت فرضیات مدل، تجزیه و تحلیل آماری نتایج مبین این امر است که تنها اثرات اصلی عوامل A, B, D با ۹۵٪ اطمینان معنی‌دارند، و عامل C و بقیه‌ی اثرات متقابل موجود در مدل معنی‌دار نیستند. در مجموع می‌توان اذعان داشت که بهترین شرایط عملیاتی از نقطه‌نظر تعداد قطعات سالم تولید شده زمانی است که صفحات اصلی قالب آهنگری از جنس فولاد گرمکار H۱۲ انتخاب شود و میزان سختی آن ۴۷ راکول باشد. علاوه بر این برای تولید قطعات قالب روی دستگاه پرس مکانیکی نصب شود. به این ترتیب برای بهبود کیفیت بدنه‌ی رگلاتور آب می‌توان از طرح‌های بازرسی و کنترل برای سه عامل فوق تحت شرایط ذکر شده استفاده کرد. از آنجا که فرایند طراحی آزمایش‌ها فرایندی پویا و با ماهیت تکراری است، با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق لازم است آزمایش‌های دیگری نیز طراحی و اجرا شوند تا تحلیل آماری داده‌ها در طول طراحی و اجرای آنها ما را به نتایج جامع‌تر و مطمئن‌تری برساند. در این راستا افزایش تعداد سطوح مقداریِ عواملی نظیر میزان سختی صفحات اصلی قالب و دمای لقمه‌ی مذاب مطلوب است. همچنین اگر در ترکیبات سطوح عوامل به جای یک آزمایش چند آزمایش انجام شود تخمین عنصر خطا به نحو بهتری به دست می‌آید. اگر بتوان آزمایش‌هایی در مرکز طرح انجام داد نه‌تنها می‌توان تخمینی مستقل از واریانس خطای آزمایش به دست آورد بلکه می‌توان انحنای درجه‌ی دوم احتمالی در تابع پاسخ را آزمود.

پانوشت

1. forging die

منابع

1. Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments, 6th ed., John Wiley and Sons, New York (2005).
2. Montgomery, D.C., Response Surface Methodology, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York (2002).
3. Hicks, C. R. and K. V. Turner, Fundamental Concepts in the Design of Experiments, 5th ed., Oxford University Press, New York (1999).
4. Neter, J, M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and W. Wasserman, Applied Linear Statistical Methods, 4th ed., McGraw-Hill, New York (1996).
5. Daniel, C., Use of Half-Normal Plots in Interpreting Two Level Factorial Experiments, *Technometrics*, **1**, pp.311-342 (1959).