

کاربرد روش سریالی تاگوچی و RSM در پیش بینی و بهینه سازی چند هدفه طرح آزمایش و سطح پاسخ خواص مکانیکی بتن رنگی

حسین فتاحی نافچی^۱، علی حیدری^{۲*}، سید مرتضی هاتفی^۳، معصومه هاشمپور^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

hfatahi635@gmail.com

۲- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران heidari@sku.ac.ir

۳- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

smhatefi@alumni.ut.ac.ir

۴- دانشجوی دکترا، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

m.hashempour@aut.ac.ir

چکیده

حدود یک قرن است که از رنگ دانه ها برای رنگ آمیزی بتن و تولید بتن رنگی استفاده می شود. در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت دست یافتن به مقدار بهینه طرح اختلاط به جهت رسیدن به مقاومت مطلوب و هزینه ساخت معقول، از روش سریالی تاگوچی و روش سطح پاسخ که دو روش قدرتمند در بهینه سازی آزمایش و یافتن نقطه بهینه مطلوب در ساخت بتن هستند، استفاده شد. در این مطالعه از ماسه سیلیسی با افزودن نسبت های وزنی مختلف از ۵ تا ۱۰ درصد وزن سیمان از نوعی خاک زرد و قرمز رنگ بتن رنگی ساخته و مورد سنجش قرار گرفت. بر این اساس طرح ساخت پیشنهادی توسط الگوریتم تاگوچی در چهار سطح و سه فاکتور (نسبت ماسه به سیمان، نسبت آب به سیمان و نسبت رنگ دانه به سیمان) ایجاد شد. پس از ارزیابی مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸ روزه در آزمایشگاه، نتایج حاصل شده با کمک تاگوچی مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد روش تاگوچی با دقت بالا می تواند در پیش بینی مقاومت فشاری سایر نمونه های خارج از طرح آزمایش مورد استفاده مطلوب قرار گیرد. همچنین در ادامه از روش بهینه سازی سطح پاسخ با اعمال بهینه سازی چند هدفه به جهت یافتن دقیق نقطه بهینه مقاومت فشاری و هزینه ساخت استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که روش بهینه سازی سطح پاسخ در محدوده پیشنهادی روش تاگوچی دریافتن نقطه بهینه عمل کرده و مقدار دقیقی از سه فاکتور آب به سیمان، ماسه به سیمان و رنگ دانه به سیمان ارائه می کند که می توان از آن به جهت ساخت دقیق نمونه مطلوب در آزمایشگاه استفاده کرد، به عبارتی این دو روش همپوشانی مناسبی با یکدیگر دارند.

واژه های کلیدی: بتن رنگی، ماسه سیلیسی، مقاومت فشاری، روش تاگوچی، روش بهینه سازی سطح پاسخ (RSM)

۱- مقدمه

کیفیت و کاهش هزینه بوده و رویکرد آن مهندسی محور است (Islam and Pramanik 2016). در ساخت بتن عموماً طرح‌های اختلاط آزمایشگاهی زیاد و تبعاً زمان بالای اجرای آزمایش‌ها از یک‌سو و دست نیافتن به نمونه مناسب و اقتصادی از سوی دیگر باعث شده که عموم کارهای تحقیقاتی در این زمینه قابلیت استفاده در صنعت را نداشته باشد. لذا تحقیق در زمینه کارایی روش تاگوچی و برطرف کردن این مشکل می‌تواند حائز اهمیت تلقی شود. بر اساس آنچه نویسندگان مورد بررسی قرار داده‌اند، تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد روش تاگوچی در بتن انجام شده است. از جمله پژوهشی در سال ۲۰۱۳، با موضوع بهینه‌سازی مقاومت فشاری، بتن با مقاومت بالا (HSC) با استفاده از روش تاگوچی انجام شد. پس از تجزیه و تحلیل نتایج به روش تاگوچی، بهترین سطح مخلوط بهینه‌شده توسط تاگوچی پیش‌بینی شد. سپس ترکیب بهینه ساخته و آزمایش شد. نتایج حاصل نشان داد که پیش‌بینی تاگوچی در مورد سطوح مخلوط بهینه صادق است (Hashemi and Soleymani 2103). پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۸، با موضوع پیش‌بینی خواص مکانیکی و تازه بتن لاستیکی خودمتراکم با استفاده از روش تاگوچی انجام شد. در این مطالعه، از روش تاگوچی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بتن لاستیکی خودمتراکم از نظر مقاومت فشاری و مقاومت در برابر ضربه استفاده شد. نتایج نشان داد که روش تاگوچی برای پیش‌بینی خواص فوق کافی و دقیق بود. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که روش تاگوچی با کاهش تعداد آزمایش‌ها در مصرف انرژی، هزینه و زمان صرفه‌جویی می‌کند (Emara et al. 2018). در کنار مزایای روش تاگوچی، روش بهینه‌سازی RSM نیز جایگاه مهمی در بهینه‌سازی سطح پاسخ نتایج صنعتی و آزمایشگاهی دارد. در مطالعات مرتبط با بتن نیز تحقیقاتی از نحوه کارایی این روش دریافتن بهینه نمونه بتنی صورت گرفته است.

بتن یکی از مصالح رایج ساختمانی است که حجم تولید و مصرف زیادی در صنعت ساختمان دارد (Heidari, Hashempour and Chermahin 2019). بتن یک ماده اصلی ساختمانی است که به دلیل استحکام و دوام خود مشهور است. مدت‌هاست که این ماده از نظر زیبایی‌شناسی دوستانه و کسل‌کننده تلقی می‌شود که باید در زیر لایه‌های گچ و رنگ پنهان شود. بتن پیگمانته نوع نسبتاً جدیدی از بتن است که کیفیت پروژه‌های معماری بالاتری از رنگ را ارائه می‌دهد. با توجه به روند اخیر رنگ شهری باهدف ارائه شهرهایی با طرح‌های رنگی جذاب با استفاده از بافت غنی ارائه‌شده توسط مصالح ساختمانی معمولی، بتن رنگی به یک انتخاب ارجح برای ساختمان‌های بیرونی ساختمان تبدیل شده است. امروزه معماران مشهور از بتن رنگی استفاده می‌کنند که علاوه بر مزایای آن از نظر نگهداری و دوام، از نظر زیبایی و فنی نیز برآورده می‌شود (Ezzeldin 2013). بهینه‌سازی سطح پاسخ، کاهش هزینه‌های آزمایشگاه، بهترین نتایج از جمله سؤالاتی است که عموماً لازم است پیش از اجرای یک سناریوی تحقیقاتی مورد پاسخ قرار داده شوند یکی از روش‌های دستیابی به بهینه‌سازی طرح آزمایش روش تاگوچی است. پیش‌ازاین، برای یافتن بهینه سطح پاسخ از مقادیر متوسط خروجی‌ها استفاده می‌شد. روش تاگوچی از میانگین و تنوع داده‌ها استفاده می‌کند؛ بنابراین انتظار می‌رود که روش تاگوچی نتایج بهتری داشته باشد زیرا بالاترین کیفیت را با حداقل واریانس را تضمین می‌کند. تاگوچی با ارائه نسبت سیگنال به نویز، ابزاری مهمی برای تجزیه و تحلیل کمی در جهت بهینه‌سازی نتیجه یک فرآیند است. تأکید اصلی روش تاگوچی بر طراحی قوی است، به عبارتی ایجاد تغییراتی در تولید و تغییرات محیطی در حین کار، باید متناسب باکیفیت بهینه محصول باشد. تاگوچی روشی مناسب برای بهبود

دست یافتن به طرح اختلاط آزمایشگاهی بهینه می‌تواند به‌خوبی با روش تاگوچی و یافتن نمونه بهینه (خواص مکانیکی و هزینه تولید) با روش RSM صورت گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

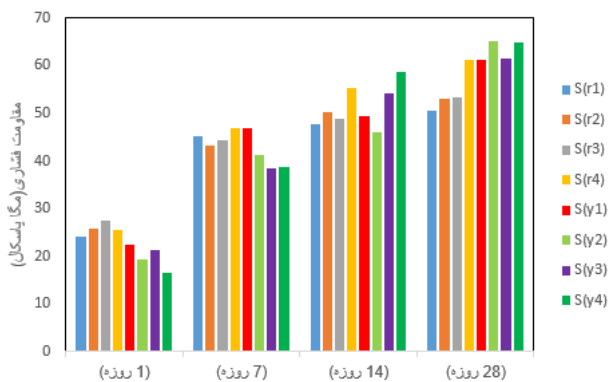
۲-۱- مواد

در محیط آزمایشگاه از مصالحی همچون شن، ماسه سیلیسی، سیمان، آب و روان کننده به میزان ثابت یک درصد وزن سیمان به جهت رسیدن به روانی مطلوب و استفاده کمتر از آب، نوعی خاک قرمز و زردرنگ برای ساخت نمونه‌های بتنی رنگی با ماسه سیلیسی استفاده شد. در این مطالعه مراحل ساخت و آزمایش در آزمایشگاه بتن دانشگاه شهرکرد انجام گرفته است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ کارخانه سیمان شهرکرد بوده است. آب مصرفی نیز آب شرب شهری بوده است. خاک قرمز رنگ، که از منطقه عمومی لردگان در استان چهارمحال و بختیاری برداشت شده است. شکل ظاهری آن به رنگ قرمز و دارای رگه‌هایی از رنگ سفید که احتمالاً به سبب وجود آهک است، در آن دیده می‌شود؛ و همچنین، خاک زردرنگ که از منطقه آبادیه در استان فارس تهیه شده است.

۲-۲- روش کار

به جهت ارزیابی صحیح عملکرد تاگوچی، ابتدا بر اساس سطوح و فاکتورهای مورد نیاز تعدادی طرح اختلاط بتن رنگی با استفاده از دو نوع خاک زرد و قرمز رنگ با عنوان طرح شاهد در آزمایشگاه ساخته شد. بر اساس استاندارد ASTM C192 در ابتدا سیمان و ماسه و خاک رنگی درون همزن به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه مخلوط شدند. سپس ترکیب

از جمله، پژوهشی در سال ۲۰۲۰، با موضوع ارزیابی RSM بر اساس خواص مکانیکی و دوام بتن سنگ‌دانه بازیافت شده حاوی GGBFS و بخار سیلیس انجام شد. مقایسه پیش‌بینی RSM و نتایج آزمایش نشان داد که RSM می‌تواند خواص دوام و مقاومت فشاری را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند (Habibi et al. 2020). پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱، با موضوع مقایسه شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و روش سطح پاسخ (RSM) در پیش‌بینی مقاومت کششی، فشاری و شکستگی بتن تهیه‌شده با ضایعات شیشه و الیاف قوطی قلع انجام شد. نتایج مدل‌های ANN و RSM که توسط داده‌های واقعی ساخته شده‌اند، ثابت کرد که این مدل‌ها برای شبیه‌سازی دقیق خواص مورد بررسی بتن، بالقوه و مفید هستند. نتایج حاصل نشان داد، نتایج پارامترهای آماری مختلف از نظر ضریب همبستگی، ضریب تعیین، ضریب مربع، خطای میانگین مربع، خطای میانگین مربع ریشه، میانگین خطای مطلق و پیش‌بینی خطای استاندارد هر دو روش مدل‌سازی را برای پیش‌بینی مقاومت بتن نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های RSM در پیش‌بینی بهتر از ANN با ضریب تعیین خوب و بالاتر (R²) نزدیک به ۱ هستند (Ray et al. 2021). با توجه به بررسی‌ها و مطالعات انجام شده در پژوهش‌های پیشین، کاربرد هم‌زمان روش بهینه‌سازی تاگوچی و روش RSM در بهینه‌سازی آزمایش طرح اختلاط بتن رنگی و ارزیابی عملکرد مکانیکی آن مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس در این مطالعه، پس از آنالیز تاگوچی و بهینه‌سازی آزمایش حدود سطوح بهینه فاکتورهای مؤثر مشخص شد و همچنین در ادامه به کمک روش بهینه‌سازی RSM نقاط دقیق بهینه فاکتورهای مؤثر همراه با میزان مقاومت فشاری بتن و هزینه ساخت به‌طور هم‌زمان پیش‌بینی و مشخص شد. نتایج حاصل نشان داد که آنالیز تاگوچی و روش بهینه‌سازی RSM با یکدیگر همپوشانی داشته و مکمل یکدیگر می‌باشند. لذا



شکل (۱). مقاومت فشاری نمونه‌های طرح شاهد

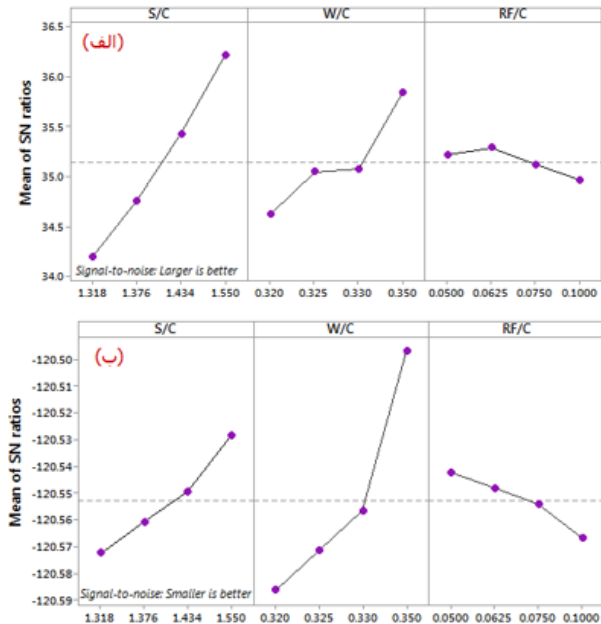
۳- طرح آزمایش با روش تاگوجی

پس از برداشت نتایج در فاز شاهد و دستیابی به فاکتورها و سطوح مناسب، از روش تاگوجی برای طراحی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن سه عامل با چهار سطح و با استفاده از نرم‌افزار Minitab ۱۸ استفاده شد. سه عامل در نظر گرفته شده عبارت‌اند از نسبت S/C (نسبت ماسه به سیمان)، نسبت W/C (نسبت آب به سیمان) و RF/C (نسبت رنگ‌دانه به سیمان). در مجموع ۱۶ طرح اختلاط با استفاده از آرایه L۱۶ تاگوجی تولید شد. اساس کار بهینه‌سازی انجام شده با استفاده از این جدول و ۱۶ طرح اختلاط به دست آمده است. مشخصه کیفیت در روش تاگوجی می‌تواند به یکی از ۳ حالت زیر باشد: هرچه بیشتر بهتر، هرچه کمتر بهتر و هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر، بهتر. در این مطالعه دو حالت هرچه بیشتر بهتر و هرچه کمتر بهتر مورد استفاده قرار گرفته است. شایان ذکر است هرچه بیشتر بهتر و هرچه کمتر بهتر برای بهینه‌سازی دو پارامتر مقاومت فشاری و هزینه ساخت و تولید بتن در نظر گرفته شده است. همانند نمونه‌های شاهد هر یک از این ۱۶ طرح در محیط آزمایشگاه ساخته شده و مقاومت فشاری سنین مختلف به دست آمده است. پس از محاسبه فاکتور هزینه و به دست آوردن مقاومت فشاری نمونه‌ها در

آب و روان کننده اضافه و مجدداً ۳ الی ۵ دقیقه دیگر مخلوط هم زده شد. برای ساخت نمونه‌های با ماسه سیلیسی از قالب‌های مربعی شکل ۵×۵ سانتی‌متر، استفاده شد. جدول طرح اختلاط آزمایش شاهد به صورت جدول ۱ می‌باشد. (در این مطالعه، اندیس S(r) معرف نمونه‌های ساخته شده با ماسه سیلیسی و خاک قرمز و اندیس S(y) معرف نمونه‌های ساخته شده با ماسه سیلیسی و خاک زرد می‌باشند، همچنین اندیس اعداد نشان‌دهنده ۴ نوع طرح اختلاط با نسبت‌های وزنی متفاوت متناسب با جدول ۱ برای هر رنگ می‌باشد). نتایج مقاومت فشاری در سنین مختلف (۱، ۷، ۱۴، ۲۸) روزه توسط جک بتن شکن هیدرولیکی ۲۰۰۰ کیلو نیوتونی در گراف شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱). عوامل و سطوح تنوع نمونه‌های شاهد

طرح	نسبت‌های وزنی		
	ماسه به سیمان	آب به سیمان	رنگ‌دانه به سیمان
S(r1)	۱/۳۱۸	۰/۳۰۵	۰/۰۵
S(r2)	۱/۳۷۶	۰/۳۰۷	۰/۰۶۲۵
S(r3)	۱/۴۳۴	۰/۳۱۰	۰/۰۷۵
S(r4)	۱/۶۵۰	۰/۳۲۰	۰/۱
S(y1)	۱/۳۱۸	۰/۳۲۰	۰/۰۵
S(y2)	۱/۳۷۶	۰/۳۲۵	۰/۰۶۲۵
S(y3)	۱/۴۳۴	۰/۳۳۰	۰/۰۷۵
S(y4)	۱/۵۵۰	۰/۳۵۰	۰/۱



شکل (۲). نمودارهای سیگنال به نویز در تعیین مقدار بهینه مقاومت فشاری (الف) و هزینه (ب) در بتن حاوی ماسه سیلیسی (خاک زرد)

۴-۲- نتایج حاصل از تاگوجی بر روی بتن ساخته شده با ماسه سیلیسی (خاک قرمز)

با توجه به شکل ۳ نمودار (الف)، اگر نسبت ماسه به سیمان و آب به سیمان در سطح چهارم خود و نسبت رنگ دانه به سیمان در سطح سوم خود باشد بیشترین میزان سیگنال به نویز اتفاق خواهد افتاد. در بررسی شکل ۳ نمودار (ب) که مربوط به پاسخ دوم یعنی پارامتر هزینه است اگر نسبت ماسه به سیمان، آب به سیمان و رنگ دانه به سیمان بر روی سطح چهارم خود قرار گیرند، بیشترین مقدار سیگنال به نویز و کمترین هزینه اتفاق می افتد.

سنین مختلف و اندازه گیری شده به وسیله شکستن نمونه ها زیر جک نتایج تحت عنوان دو پاسخ (Response)، R (مقاومت فشاری بر حسب مگا پاسکال) و EXP (هزینه بر حسب تومان) در نرم افزار معرفی شدند. لازم به ذکر است جهت محاسبه هزینه ساخت هر یک از طرح ها مبنای قیمت ماسه سیلیسی کیلویی ۴۰۰ تومان، سیمان کیلویی ۶۰۰ تومان، خاک زرد رنگ کیلویی ۵۰۰ تومان، خاک قرمز رنگ کیلویی ۳۰۰ تومان، روان کننده هر لیتر ۴۲ هزار تومان و آب کیلویی ۱۰ تومان در نظر گرفته شده است (از واحد ریال پول رایج کشور ایران و هزینه های حاضر در این کشور به جهت مطالعه حاضر استفاده شده است). وزن حجمی بتن ساخته شده با ماسه سیلیسی ۲۵۰۰ است. جدول طرح اختلاط تاگوجی برای نمونه های ساخته شده به تفکیک خاک زرد و قرمز رنگ با استفاده از روش تاگوجی در نرم افزار مینی تب ایجاد شد و همانند نمونه های شاهد تمامی طرح ها در محیط آزمایشگاه ساخته و مقاومت فشاری سنین مختلف اندازه گیری شد.

۴-۱- تفسیر نتایج

۴-۱-۱- نتایج حاصل از تاگوجی بر روی بتن ساخته شده با ماسه سیلیسی (خاک زرد)

بر اساس شکل ۲ نمودار (الف)، اگر نسبت ماسه به سیمان و آب به سیمان در سطح چهارم خود و نسبت رنگ دانه به سیمان در سطح اول خود باشد بیشترین میزان سیگنال به نویز اتفاق خواهد افتاد. در بررسی شکل ۲ نمودار (ب)، اگر نسبت ماسه به سیمان و آب به سیمان بر روی سطح چهارم خود و نسبت رنگ دانه به سیمان بر روی سطح اول خود قرار گیرند، بیشترین مقدار سیگنال به نویز و کمترین هزینه اتفاق می افتد.

بوده است. در این سن نسبت های بهینه برابر ماسه به سیمان ۱/۵۵۰، آب به سیمان ۰/۳۵۰ و رنگ دانه به سیمان ۰/۰۵۱۵ می باشد که مقاومت فشاری و هزینه ساخت پیش بینی شده در این سن با استفاده از نسبت های وزنی ذکر شده ۶۸/۴۳ مگا پاسکال و ۱۰۵۵ یک میلیون و پنجاه و پنج هزار تومان برای حجم یک تن بتن می باشد.

۲-۵- نمونه های ساخته شده خاک قرمز رنگ

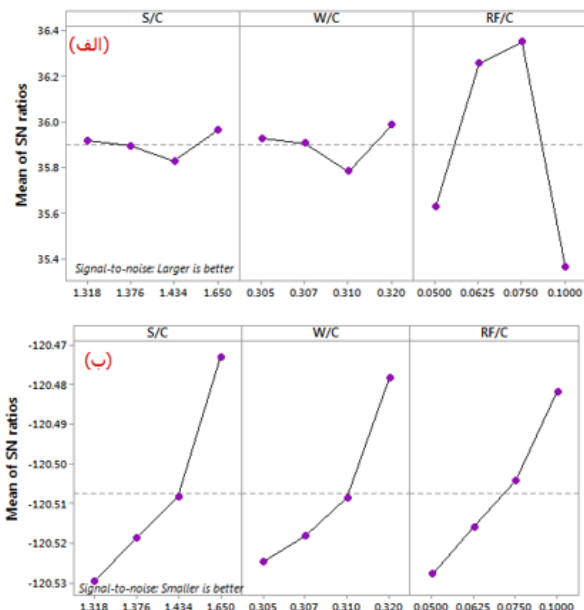
بر اساس نتایج به دست آمده، مقادیر دقیق نقاط بهینه نمونه های ساخته شده مربوط به خاک قرمز رنگ در سن ۲۸ روزه بوده است. در این سن نسبت های بهینه برابر ماسه به سیمان ۱/۶۵۰، آب به سیمان ۰/۳۲۰ و رنگ دانه به سیمان ۰/۰۷۶۶ است که مقاومت فشاری و هزینه ساخت پیش بینی شده در این سن با استفاده از نسبت های وزنی ذکر شده ۶۶/۹۶ مگا پاسکال و ۱۰۵۲ یک میلیون و پنجاه و دو هزار تومان برای حجم یک تن بتن می باشد.

۶- درستی آزمایی و صحت سنجی

به منظور ایجاد اطمینان از نتایج به دست آمده از آنالیز تاگوچی در نرم افزار مینی تب، باید درستی آزمایی و صحت سنجی انجام گردد؛ بنابراین در ادامه از دو روش بررسی کفایت مدل و مقایسه مقاومت فشاری پیش بینی شده توسط تاگوچی و مقاومت به دست آمده در آزمایشگاه، جهت صحت سنجی استفاده شده است.

۶-۱- صحت سنجی مدل با ضریب همبستگی

یکی از شرایط بررسی کفایت مدل بررسی صحت مدل است که با استفاده از آنالیز واریانس و مقادیر ضرایب همبستگی بررسی می شود؛ که به سه دسته ضریب همبستگی، ضریب همبستگی تعدیل شده و ضریب همبستگی پیش بینی تقسیم می شوند. ضریب همبستگی تعدیل شده نسبت به ضریب



شکل (۳). نمودارهای سیگنال به نویز در تعیین مقدار بهینه مقاومت فشاری (الف) و هزینه (ب) در بتن حاوی ماسه سیلیسی (خاک قرمز)

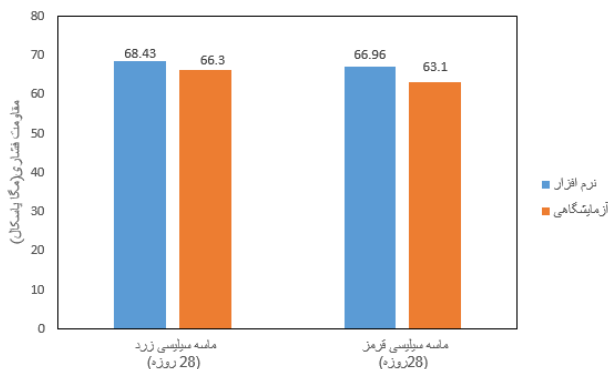
۵- بهینه سازی و یافتن نقاط دقیق بهینه

۵-۱- نمونه های ساخته شده خاک زرد رنگ

پس از آنالیز تاگوچی و مشخص شدن حدود بهینه سطوح فاکتورها و انجام فرآیند بهینه سازی با استفاده از روش RSM در نرم افزار بهینه سازی انجام می شود و نقاط دقیق بهینه برای هر یک از فاکتورهای ماسه به سیمان، آب به سیمان و رنگ دانه به سیمان و همچنین مقادیر دقیق مقاومت فشاری و هزینه ساخت برای هر طرح در سن مقاومت مختلف پیش بینی و مشخص می شود. برخی نقاط بهینه غیر قابل اجرا در آزمایشگاه بوده و از روانی قابل قبولی به جهت قالب گیری برخوردار نمی باشند. لذا این نقاط بهینه حذف شده و آنچه در ادامه مشاهده می شود صرفاً نقاط بهینه قابل قالب گیری در آزمایشگاه است. بر اساس نتایج به دست آمده مقادیر دقیق نقاط بهینه نمونه های ساخته شده با خاک زرد در سن ۲۸ روزه

11th International Conference on Sustainable Development & Urban Construction

مقایسه شد. نتایج حاصل به صورت شکل ۴ نشان داده شده است. لذا مشاهده می گردد اختلاف عددی حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی در محدوده قابل قبول است.



شکل (۴). نمودار مقایسه مقاومت فشاری پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی طرح‌های بهینه

۷- نتیجه گیری

بر اساس آنالیز و بررسی نتایج به دست آمده در این مطالعه نتایج ذیل حاصل می شوند:

- با استفاده از روش تاگوچی می توان بهترین و اقتصادی ترین بتن را با کمترین تعداد نمونه ها و البته با دقت بالاتر تولید نمود. روش تاگوچی باعث صرفه جویی در زمان، به حداقل رساندن تعداد نمونه ها، دست یافتن به نمونه هایی با دقت بالاتر و اقتصادی شدن طرح می گردد.

- بر اساس روش تاگوچی و سطح پاسخ ((RSM در بررسی خاک زرد، بهینه ماسه سیلیسی در سن ۲۸ روزه برابر با نسبت ماسه به سیمان ۱/۵۵۰، نسبت آب به سیمان ۰/۳۵۰ و نسبت رنگ دانه به سیمان ۰/۵۱۵ و همچنین مقاومت فشاری بهینه پیش‌بینی شده ۶۸/۴۳ مگا پاسکال و هزینه ساخت ۱/۰۵۵ یک میلیون و پنجاه و پنج هزار تومان برای حجم یک تن بتن می باشد.

همبستگی، نتایج دقیق تری را نشان می دهد زیرا به جای استفاده از مجموع مربعات از میانگین مربعات استفاده می کند که حسن انجام این کار آن است که درجات آزادی را که نشان دهنده تعداد عوامل می باشد را در محاسبات دخیل می کند. مقادیر دقیق ضرایب همبستگی به دست آمده از نرم افزار به تفکیک دو نوع خاک رنگی استفاده شده در جدول ۲ گزارش شده است که هرچه این میزان به عدد ۱ یا همان ۱۰۰٪ نزدیک تر باشد نشان دهنده صحت مدل بوده و بیانگر آن است که مدل انتخاب شده مدل قابل اطمینانی می باشد. به عنوان مثال مقدار ضریب همبستگی ۹۸/۴۴٪، مقدار بسیار خوبی است و بیانگر آن است که مدل حاصل بیش از ۹۸/۴۴ درصد داده ها رو پوشش داده است.

جدول (۲). مقادیر ضرایب همبستگی

نوع ماسه	ضریب همبستگی (درصد)	ضریب همبستگی تعدیل یافته (درصد)	ضریب پیش بینی (درصد)
ماسه سیلیسی (زرد)	۹۸/۴۴	۹۶/۰۹	۸۰/۳۸
ماسه سیلیسی (قرمز)	۹۹/۵۹	۹۸/۹۰	۸۶/۱۸

۶-۲ ساخت نمونه بهینه در آزمایشگاه و کنترل نتایج

در این روش طرح ها با نسبت های وزنی بهینه به دست آمده با استفاده از نرم افزار مینی تب و روش تاگوچی، در محیط آزمایشگاه ساخته شد و مقاومت فشاری سنین بهینه مشخص شده و مدنظر برای هر یک از ماسه ها اندازه گیری شد. سپس مقدار مقاومت فشاری پیش‌بینی شده توسط نرم افزار با مقادیر مقاومت فشاری به دست آمده در محیط آزمایشگاه

● روش تاگوچی و بهینه سطح پاسخ در پیش‌بینی مشخصات مکانیکی بتن رنگی و رسیدن به نقاط دقیق بهینه با دقت بالا عمل کرده و مناسب‌ترین طرح از نظر بیشترین مقاومت فشاری و کمترین هزینه ساخت را ارائه می‌دهند.

● بر اساس روش تاگوچی و سطح پاسخ (RSM) در بررسی خاک قرمز، نقاط بهینه ماسه سیلیسی در سن ۲۸ روزه برابر با نسبت ماسه به سیمان ۱/۶۵۰، نسبت آب به سیمان ۰/۳۲۰ و نسبت رنگ‌دانه به سیمان ۰/۰۷۶۶ و همچنین مقاومت فشاری بهینه پیش‌بینی شده ۶۶/۹۶ مگا پاسکال و هزینه ساخت ۱/۰۵۲ یک میلیون و پنجاه و دو هزار تومان برای حجم یک تن بتن می‌باشد.

Engineering, Shahjalal University of Science and Technology, Sylhet, Bangladesh.

۹- چکیده انگلیسی

Pigments have been used for about a century to paint concrete and produce colored concrete. In the present study, due to the importance of achieving the optimal amount of mixing design to achieve the desired strength and reasonable manufacturing cost, the Taguchi serial method and the response surface method, which are two powerful methods in test optimization and finding the optimal point in construction Concrete are used. In this study, silica sand was made and evaluated by adding different weight ratios of 5 to 10% by weight of cement from a type of yellow and red colored concrete. Based on this, the proposed construction design was created by Taguchi algorithm in four levels and three factors (sand to cement ratio, water to cement ratio and pigment to cement ratio). After evaluating the compressive strength at the ages of 1, 7, 14, 28 days in the laboratory, the results were measured with the help of Taguchi. The results showed that the Taguchi method with high accuracy can be used optimally to predict the compressive strength of other samples outside the test design. Also, the response surface optimization method was applied by applying multi-objective optimization to find the exact point of compressive strength and manufacturing cost. The results showed that the response surface optimization method performed in the proposed range of Taguchi method to find the optimal point and provides an accurate amount of three factors: water to cement, sand to cement and pigment to cement, which can be used to make Accurate optimal sample used in the laboratory, in other words, these two methods have a good overlap with each other.

۸- منابع

- [1] Emara, M.A., Eid F.M., Nasser A.A., Safaan M.A. (2018). Prediction of Self-Compacting Rubberized Concrete Mechanical and Fresh Properties using Taguchi Method, J. of Civil & Environmental Engineering, 8(2).
- [2] Ezzeldin, A. S. Y. (2103). Properties of Pigmented Concrete, Department of Construction and Architectural Engineering.
- [3] Habibi, A., Ramezaniapour, A. M., Mahdikhani, M., Bamshad, O. (2020). RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume. Construction and Building Materials.
- [4] Hashemi, S.H., Soleymani, A. (2013). Optimization of HSC Compressive Strength by Taguchi Method, Applied Mechanics and Materials, 253-255, pp. 572-575.
- [5] Heidari, A., Hashempour, M. and Chermahini, M.D., "Influence of reactive mgo hydration and cement content on c&dw aggregate concrete characteristics", International Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 7, (2019), 1095-1106.
- [6] Islam, M. N., Pramanik, A. (2016). Comparison of Design of Experiments via Traditional and Taguchi Method, Department of Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3 (2016) 151-160.
- [7] Ray, S., Haque, M., Ahmed, T., Nahin, T. T. (2021). Department of Civil and Environmental

یازدهمین کنفرانس بین المللی توسعه پایدار و عمران شهری



11th International Conference on Sustainable Development & Urban Construction

Keywords: Colored concrete, Aggregate, Compressive strength, Taguchi method, Response surface optimization method (RSM)