

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن متخلخل به منظور کاهش رواناب معابر شهری

محسن جواهری طهرانی^۱، سید فرهاد موسوی^{۱*}، جهانگیر عابدی کوپایی^۲ و حجت کرمی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۸)

چکیده

در چند دهه اخیر، استفاده از بتن متخلخل برای پوشش کف پیاده‌روها و روسازی جاده‌ها به‌عنوان رابطی برای جمع‌آوری رواناب شهری فزونی یافته است. این سیستم از نظر اقتصادی نسبت به دیگر روش‌های کاهش آلودگی رواناب بسیار مقرون به صرفه‌تر است. برای طراحی سیستم کنترل رواناب و کاهش آلودگی آن، نیاز به تعیین خصوصیات هیدرولیکی و دینامیک بتن متخلخل (با و بدون مواد افزودنی) است. در این پژوهش، تأثیر فاکتورهای تیپ سیمان (۲ و ۵)، نسبت آب به سیمان (۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵)، مقدار ریزدانه (صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد)، نوع افزودنی (پوکه معدنی، پوکه صنعتی، پرلیت و زئولیت) و میزان افزودنی افزوده شده (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) بر خصوصیات فیزیکی بتن متخلخل (تخلخل، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری)، هر کدام با سه تکرار، با استفاده از طراحی اثرزدا بررسی شده است. از نرم‌افزار Qualitek-4 نیز برای بحث نتایج استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای به‌دست آوردن بیشترین میزان تخلخل در طرح اختلاط بتن متخلخل، باید نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، صفر درصد ریزدانه، سیمان تیپ ۲ و ۱۵ درصد پوکه صنعتی در نظر گرفته شود. همچنین، نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، صفر درصد ریزدانه، سیمان تیپ ۲ و ۱۵ درصد پوکه صنعتی بیشترین میزان آب‌گذری در بتن متخلخل را به‌دست می‌دهد. در نهایت، نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، ۲۰ درصد ریزدانه، سیمان تیپ ۲، ۵ درصد زئولیت برای حصول حداکثر مقاومت فشاری مورد نیاز است. نتیجه کلی این است که در این پژوهش، بدون طراحی اثرزدا، امکان نتیجه‌گیری منطقی و با کمترین هزینه وجود نداشت.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، طرح آزمایش تاگوچی، جاذب آلودگی، طرح اختلاط بتن

۱- گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fmousavi@semnan.ac.ir

مقدمه

با توجه به حساسیت روزافزون مسائل کیفی آب و مشکلات ناشی از آن، نقش حفاظت و کنترل کیفیت منابع آب از اهمیت بسزایی برخوردار است. امروزه، پالایش آلودگی از راه‌های طبیعی بسیار مورد توجه و علاقه است. در چند دهه اخیر، استفاده از فناوری بتن متخلخل برای کاهش رواناب‌های مخرب و همچنین آلوده به انواع آلاینده‌های مختلف در معابر شهری، مورد توجه و استقبال مسئولین قرار گرفته است. رواناب‌های شهری و تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی آنها به عنوان یک پدیده طبیعی، همچون سایر پدیده‌ها، به کمک برنامه ریزی و مدیریت صحیح، قابل پیش‌بینی و کنترل هستند. به طوری که از یک سو خسارت‌های آنها را می‌توان به حداقل رسانید و از سوی دیگر با احیای آنها، بخشی از نیاز به آب در بخش خدمات شهری را برطرف کرد (۲).

میزان بارش سالانه اکثر شهرهای ایران به‌طور میانگین کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر است. اما با توجه به قرار گرفتن آنها در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بارش‌ها اغلب به‌صورت رگباری با شدت زیاد و مدت کوتاه هستند. این گونه بارش‌ها موجب به‌وجود آمدن رواناب می‌شوند. چنانچه سیستم جمع‌آوری رواناب به‌صورت مؤثر و کاربردی طراحی و بهره‌برداری نشود، شهر در هنگام بارندگی دچار مشکلات فراوانی مانند آبگرفتگی معابر، اختلال در سیستم عبور و مرور، آسیب به بناهای مسکونی، تاریخی و فرهنگی و آلودگی منطقه می‌شود. روش‌های متنوعی برای کنترل دبی اوج رواناب شهری و مدیریت کیفیت و کنترل آلاینده‌های آن وجود دارند که سیستم‌های تزریق و به‌خصوص حوضچه‌های نگهداری و تزریق رواناب به‌صورت حوضچه خشک یا تر بسیار رایج هستند (۲۰). در حوضه‌های شهری که تراکم بافت‌های شهری و تأسیسات وجود دارد، با توجه به محدودیت زمین، امکان استفاده از سیستم تزریق رواناب به صورت حوضچه وجود ندارد. ولی ایجاد ترانشه در حاشیه فضاهای سبز و خیابان‌ها، به‌همراه استفاده از بلوک‌های بتنی متخلخل و مواد جاذب، امکان‌پذیر است.

فناوری بتن متخلخل به‌طور گسترده در کشورهای دارای بارندگی زیاد مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. در ایران هم با توجه به اقلیم آن که دارای بارندگی‌های کم، اما با شدت زیاد است و موجب به‌وجود آمدن حجم زیاد رواناب در مدت بسیار کوتاه می‌شود، استفاده از این فناوری باید مد نظر مدیران شهری قرار گیرد. البته اجرا و نگهداری این نوع تأسیسات نیاز به مدیریت جامع دارد. همچنین، باید در نظر داشت که یکی از مؤثرترین فرایندها برای حذف فلزات سنگین از رواناب، استفاده از بتن متخلخل به‌همراه مواد افزودنی (جاذب) است.

بتن متخلخل نیاز به کانال‌های مختلف جمع‌آوری آب باران را کاهش می‌دهد و اجازه استفاده از مجاری جریان با ظرفیت کمتر را می‌دهد. نمونه‌ای از رواناب ایجاد شده روی سنگفرش معمولی و عدم تشکیل رواناب روی سنگفرش متخلخل در شکل ۱ آورده شده است. در شکل ۲، نمونه‌هایی از زیباسازی منظر با سنگفرش بتنی متخلخل رنگی نشان داده شده است.

مزایای استفاده از سنگفرش بتنی متخلخل عبارتند از: تصفیه رواناب از طریق زدودن آلاینده‌ها، نیاز کمتر به مهار رواناب باران، صرف هزینه کمتر عملیات کنترل سیلاب، بهبود دائمی معابر از لحاظ مقاومت لغزشی، و تغذیه آبخوان‌های محلی. البته مهم‌ترین تهدید استفاده از این روش نیز پرشدن خلل و فرج بتن متخلخل در اثر ذرات ریز منتقل شده توسط آب و باد است که برای مدیریت این مشکل باید بهره‌برداری از این سیستم بسیار اصولی و فنی باشد (۲۴).

تقی زاده و همکاران (۲۱) نشان دادند که می‌توان از بتن متخلخل به‌عنوان فیلتر تصفیه آب استفاده کرد. آنها همچنین گزارش کردند که تصفیه کند افقی با بتن متخلخل به‌دلیل رشد توده‌های بیولوژیک برای از بین بردن باکتری‌ها مناسب است. به طوری که استفاده از بتن متخلخل باعث کاهش ۹۰-۱۰۰ درصدی باکتری‌های کلیفرم شد. سطح مورد نیاز برای دو فیلتر با سطح عمودی ۲/۶ متر مربع ۷۰ درصد کمتر از فضای مورد نیاز



شکل ۱. رواناب ایجاد شده روی سنگ‌فرش معمولی و عدم تشکیل آن روی سنگ‌فرش متخلخل (۲۵)



شکل ۲. نمونه‌هایی از فضا سازی با سنگ‌فرش بتنی متخلخل رنگی (۲۴)

تیموری و همکاران (۲۵) به بررسی خواص فیزیکی و پارامترهای کیفی بتن متخلخل حاوی جاذب‌های پرلیت، پوکه معدنی، لیکا و زئولیت برای کاهش میزان و کیفیت رواناب شهری پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که برای تمام تیمارهای با جاذب‌های مختلف، با افزایش مقدار ریزدانه، مقدار مقاومت فشاری افزایش، و تخلخل و ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین، با افزودن ریزدانه، درصد حذف پارامترهای کیفی رواناب زیاد می‌شود.

در تحقیق دوست‌محمدی و همکاران (۷)، تأثیر جایگزینی سبک‌دانه‌های پومیس، اسکریا و زئولیت با مقادیر حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بتن متخلخل، بر مقاومت فشاری و درصد تخلخل بررسی شد. طبق نتایج، بیشترین میانگین مقاومت فشاری (۱۱/۰۸ و ۱۰/۷۶ مگاپاسکال) در نمونه‌های بتن متخلخل با جایگزینی ۵۰ و ۲۵ درصد اسکریا با سنگدانه مشاهده شد. بیشترین میانگین تخلخل در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد پومیس مشاهده شد که نسبت به تخلخل نمونه

مربوط به فیلترهای کند بود. ضخامت متوسط این فیلتر ۹ سانتی‌متر بود و مصالح مصرفی آن شبیه ۹۰ درصد مصالح مورد نیاز فیلترهای کند بود. افزایش سرعت تصفیه باعث کاهش زمان بهره‌برداری شد. این نوع فیلتر برای جوامع کوچک مناسب است. به‌علاوه، تعمیر و شستشوی آنها نسبت به فیلترهای شنی افقی آسان‌تر خواهد بود.

استفاده از مواد طبیعی که قابلیت جذب فلزات سنگین را دارند در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۹). از جمله این مواد می‌توان به انواع رس، زئولیت، خاکستر، خاک اره، پوست درختان کاج و گردو، زردآلو، خرما، دانه‌های انگور، پوست خرچنگ و زائده‌های برگ چای اشاره کرد.

سقائیان نژاد و همکاران (۲۰)، در تحقیقی، کاهش آلودگی های رواناب شهری را با استفاده از بتن متخلخل جاذب بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن متخلخل حاوی جاذب تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش کدورت آب‌های نامتعارف و رواناب‌های شهری داشته‌اند.

شاهد حدود ۵۶ درصد افزایش داشته است.

کوسیچ و همکاران (۶)، تأثیر دانه‌بندی سنگدانه را روی پنج نوع مختلف بتن متخلخل بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش ریزدانه، مقاومت فشاری نمونه بتنی بیشتر می‌شود. نادى و همکاران (۱۴)، مطالعه‌ای در مورد توانایی بتن متخلخل برای تصفیه رواناب شهری و حذف روغن ناشی از تردد وسایل نقلیه و بازیافت آب ناشی از آن برای استفاده در کشاورزی داشتند. آنها به این نتیجه رسیدند که بتن متخلخل توانایی کافی برای بهبود کیفیت رواناب شهری را دارد. در سال ۱۹۹۸، مینیجر (۱۳) مقاله‌ای در مورد بتن نفوذپذیر بدون ریزدانه برای سنگفرش منتشر کرد. هوانگ و همکاران (۱۰)، اثر استفاده از پوک معدنی جایگزین سنگدانه در بتن متخلخل برای بهبود مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، چگالی و درصد تخلخل را بررسی کردند. نتایج بیانگر این بود که استفاده از پوک معدنی در ترکیب بتن متخلخل باعث افزایش درصد تخلخل، کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بیشتر نسبت به استاندارد ACI می‌شود.

سقائیان‌نژاد (۱۹) از سرباره کوره‌های ذوب آهن به‌عنوان جاذب برای کاهش پارامترهای آلودگی در رواناب‌های شهری استفاده کرد. نتایج نشان داد که بتن متخلخل توانایی کاهش پارامترهای EC و pH در تمامی حالات را داراست و همچنین توانست میزان مطلوبی از COD و TSS را از رواناب شهری حذف کند. پانیمیام و همکاران (۱۵) به بررسی ساخت بتن متخلخل پرداختند تا به ترکیبی دست یابند که دارای نفوذپذیری مناسب و استحکام لازم باشد. آنها استفاده از شن شکسته را در ساخت بتن متخلخل آزمایش کردند. نتیجه این بود که در ساخت بتن متخلخل باید از مکعب‌هایی به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر با نسبت آب به سیمان $0/28$ تا $0/4$ استفاده کرد. کواچ و سیکاکوا (۱۲) به بررسی سرعت نفوذ آب از بتن متخلخل به‌عنوان سنگفرش در مناطق شهری پرداختند. نتیجه این بود که بتن متخلخل توانایی بالایی در زهکشی و خروج آب از سطح زمین را دارد. سرعت نفوذپذیری آب در

بتن متخلخل برابر $0/2$ تا $0/54$ سانتی‌متر بر ثانیه محاسبه شد. همچنین، این محققین ترکیب‌های مختلفی از آب، سیمان و سنگدانه را مخلوط کردند تا به اختلاط مناسبی از آن برای ساخت بتن متخلخل دست یابند. آنها بدین نتیجه رسیدند که با تغییر نسبت آب به سیمان از $0/25$ تا $0/35$ ، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل تغییر می‌یابد. در این آزمایش، محدوده تغییرات هدایت هیدرولیکی از $7/5$ تا $10/2$ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. گروپسا و همکاران (۸) قابلیت زهکشی بتن متخلخل را با استفاده از ترکیبی از دولومیت، دیاباز و سنگ آتشفشانی در دو اندازه متفاوت سنگدانه (۸-۴ و ۱۶-۸ میلی‌متر) با تخلخل ۱۱ تا ۳۵ درصد مورد بررسی قرار دادند. این محققین به دنبال یافتن ضریب نفوذپذیری مناسبی بودند تا بتن متخلخل بتواند آب را به آرامی از خود عبور دهد. ژونگ و همکاران (۲۷) به کاربرد بتن متخلخل به‌عنوان سنگفرش پرداختند. آنها بدین نتیجه رسیدند که بتن متخلخل می‌تواند تأثیرات مثبتی بر محیط زیست داشته باشد. این محققین اعلام کردند که بایستی اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بتن متخلخل بین ۲ تا ۸ میلی‌متر و سرعت نفوذ آب بین ۶-۲ میلی‌متر بر ثانیه باشد. جوشقانی و همکاران (۱۱) طی پژوهشی با عنوان بهینه سازی طرح اختلاط روسازی‌های بتن متخلخل با استفاده از روش تاگوچی اعلام کردند که روش تاگوچی برای شناسایی عوامل مؤثر بر خواص بتن متخلخل مناسب است و بر اساس این روش ارتباط بین مقاومت فشاری و تخلخل برای اندازه‌های مختلف سنگدانه را ارائه کردند. تانلیدی و شاهین (۲۳) با استفاده از روش تاگوچی، مقاومت استاتیک بتن متخلخل همراه با پلیمر را در دمای زیاد بررسی کردند. طبق نتایج، آنها بیان کردند که حداکثر مقاومت با اضافه شدن ۵ درصد فوم سیلیکا به طرح اختلاط در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به دست می‌آید. رحمانی و همکاران (۱۷) تحقیقی به منظور تعیین ترکیب بهینه در تولید بتن سبک نیمه‌سازه‌ای با کمترین وزن مخصوص ممکن و مقاومت فشاری مناسب با سبک‌دانه پومیس انجام دادند. به همین منظور، از روش تاگوچی با چهار عامل تأثیرگذار

تیزگوشه هستند. همچنین، اندازه افزودنی‌ها از اندازه سنگدانه‌ها تبعیت می‌کند. اگرچه اضافه کردن ریزدانه موجب کاهش تخلخل و آبگذری بتن متخلخل خواهد شد، اما افزودن درصدی ریزدانه موجب افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن می‌شود. در صورتی که قصد استفاده از بتن متخلخل در سنگفرش پیاده‌رو باشد، بهتر است کمی ریزدانه به مخلوط بتن افزوده شود تا مقاومت فشاری و کششی آن افزایش یابد. در اینجا، منظور از ریزدانه، مصالح عبور کرده از الک ۴ و مانده روی الک ۱۶ است.

۲-۲- مواد افزودنی

الف) پرلیت

نوعی سنگ آتشفشانی است که در محیط مرطوب تشکیل می‌شود. میزان آب همراه با پرلیت در حدود ۲ تا ۵ درصد است.

ب) پوکه معدنی

دانه‌های سبک حاصل از فعالیت‌های آتشفشانی است. وزن مخصوص بسیار کم، درجه سختی و تخلخل زیاد از مزایای عمده پوکه معدنی نسبت به شن و ماسه است. رنگ این ماده معدنی سفید یا خاکستری مایل به سفید یا زرد است. پوکه معدنی دارای دانه‌بندی‌های متفاوت از ذرات غباری تا قطعات بزرگ با قطر بیش از ۱۰۰ میلی‌متر است. خواص پوکه معدنی عبارتند از: وزن مخصوص کم (۵/۵ تا ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، عایق صدا، گرما و سرما و مقاوم در مقابل آتش‌سوزی.

ج) پوکه صنعتی

پوکه صنعتی (لیکا)، یا دانه رس سبک منبسط شده، از معادن خاک رس تهیه و فرآوری می‌شود. دانه‌های لیکا دارای شکل ظاهری تقریباً گرد با سطح رویه ناهموار هستند. رنگ ظاهری آنها قهوه‌ای روشن، مغز تقریباً سیاه رنگ، با قطر ۱ تا ۲۵ میلی‌متر، هستند.

در سه سطح مختلف استفاده شد و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. براساس این مقایسه، دقت روش طراحی سیستماتیک آزمایش‌های تاگوچی بسیار مناسب ارزیابی شد. اگر متغیرهای زیادی که سطوح متعددی دارند در بررسی یک پدیده هیدرولیکی مؤثر باشند، یافتن ترکیب بهینه از طریق بررسی فاکتوریل کامل ترکیب‌ها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. در بسیاری از علوم، به‌جای روش فاکتوریل کامل، روش تاگوچی برای طراحی مطالعات به‌کار برده می‌شود. این روش، از ترکیب‌های فاکتوریلی جزئی استفاده می‌کند و ضمن کاهش تعداد آزمایش‌ها، مقایسه موزون تمام متغیرها را تضمین می‌کند (۱۸).

هدف اصلی در این تحقیق، بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن متخلخل، همراه با مواد افزودنی، با روش طرح آزمایش تاگوچی، به‌منظور بهبود پارامترهای فیزیکی بتن متخلخل است. در این پژوهش، تأثیر فاکتورهای تیپ سیمان، نسبت آب به سیمان، مقدار ریزدانه و نوع و میزان مواد افزودنی با استفاده از طراحی اثرزدا بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش طی مراحل زیر انجام شد:

۱-۲ تهیه مصالح مورد نیاز

سنگدانه، زئولیت، پوکه معدنی، پوکه صنعتی (لیکا) و پرلیت مصرفی از استان سمنان تهیه شدند. سیمان پرتلند مورد نیاز از نوع تیپ‌های ۲ و ۵ مطابق با استاندارد ASTM C150.C150M-09 (۴) است. سیمان تیپ ۲ پرتلند، در ساخت بتن‌هایی استفاده می‌شود که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و سیمان تیپ ۵ پرتلند ضدسولفات، با مقاومت شیمیایی زیاد، و مناسب استفاده در شرایط محیطی کاملاً خورنده و مرطوب است.

اندازه سنگدانه‌های استفاده شده برای همه نمونه‌ها یکسان و برابر ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر بود. از نظر ظاهری، سنگدانه‌ها

د) ژئولیت

ژئولیت نوعی رس است که بیشتر به رنگ سفید، زرد و سبز است. بهترین انواع آن در نواحی شرقی شهر سمنان پراکنده‌اند. از آنجایی که ژئولیت به شدت آب را جذب می‌کند، لذا دانه‌های آن به رطوبت حساس هستند. ژئولیت، سبک و دارای شکست صدفی، سطح صاف و بدون خاکه است. مقاومت مکانیکی ژئولیت به نسبت زیاد است و به آسانی در بین انگشتان یا با فشار خرد نمی‌شود.

۲-۳- طراحی اثرزدا

تنها راه افزایش کیفیت محصولات، استفاده از فناوری برتر، مواد اولیه گران‌تر (با کیفیت عالی) و نیروی انسانی با تخصص بالا نیست. طراحی محصول با کیفیت بالا و فرایند کم‌هزینه، یک ابزار فناوری و مهندسی محسوب می‌شود. یک راه مؤثر برای دستیابی به این ابزار رقابتی، روش جدید بهینه‌سازی طراحی برای عملکرد، کیفیت و هزینه است. این روش، طراحی اثرزدا (Robust design) نام دارد که شامل رفع حساسیت عملکرد محصول نسبت به تغییرات مواد خام، مقاوم کردن طراحی‌ها در برابر انحرافات تولید و در نتیجه کاهش هزینه نیروی انسانی و مواد برای دوباره‌کاری و ضایعات، تهیه طرح‌هایی با حداقل حساسیت در مقابل تغییرات محیطی و در نتیجه بهبود قابلیت دوام و کاهش هزینه‌های عملیاتی و استفاده از یک فرایند توسعه یافته جدید است؛ به گونه‌ای که از زمان به صورت مؤثرتری استفاده شود (۱۶). یکی از اصول اساسی طراحی اثرزدا، بهبود کیفیت محصول از طریق کاهش دادن اثرات تغییرات علت، بدون کنترل خود علت است که این اتفاق با بهینه کردن طراحی محصول، خدمات و یا فرایند حاصل می‌شود.

عوامل مؤثر بر محصول یا فرایند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند، که در آن Y پاسخ محصول است. پاسخ، می‌تواند خروجی محصول یا سایر مشخصات آن باشد. پاسخ مطلوب برای بهینه‌سازی در یک آزمایش یا طرح اثرزدا، مشخصه کیفی نامیده می‌شود. بعضی از پارامترها می‌توانند مشخصه کیفی را

تحت تأثیر قرار دهند. این پارامترها به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- فاکتور مطلوبیت (M): این فاکتور، پارامتری است که توسط مصرف کننده محصول، برای بیان مقدار مورد نظر پاسخ تعیین می‌شود.

۲- فاکتور بدی کارکرد (X): بعضی از پارامترهای خاص نمی‌توانند توسط طراح کنترل شوند، که فاکتورهای بدی کارکرد (اختلال یا نویز) نامیده می‌شوند.

۳- فاکتور کنترل (Z): این فاکتورها می‌توانند به صورت آزاد توسط طراح تعیین شوند. هر فاکتور کنترل مقادیر مختلفی موسوم به سطوح را به خود می‌گیرد.

۲-۳-۱- نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد

هدف روش طراحی اثرزدا رسیدن مقدار میانگین به مقدار هدف و کاهش تغییرات در متغیر پاسخ است. بنابراین، تابع هدف ویژه‌ای که دو هدف بیان شده را در برگیرد، برای روش طراحی اثرزدا شناسایی شده است. این تابع هدف، نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (Signal/Noise) نامیده می‌شود و برای مشخصات کیفی متفاوت، تغییر می‌کند. بنابراین، طراحی اثرزدا یک فرایند بهینه‌سازی است که در آن تابع هدف، نسبت S/N است. این تابع هدف یک رابطه ریاضی است که اثرزدایی طراحی را محاسبه می‌کند. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، اثرزدایی عملکرد بیشتر می‌شود. این نسبت در سه حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف) مسئله نوع کوچک‌تر - بهتر

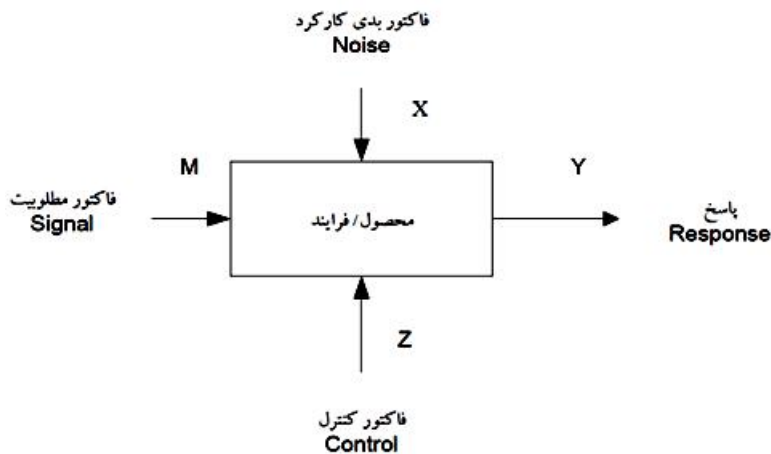
در این گونه مسائل، مشخصه کیفی پیوسته و غیرمنفی است؛ یعنی می‌تواند هر مقداری را از صفر تا بی‌نهایت به خود بگیرد و مطلوب‌ترین حالت آن صفر است.

ب) مسئله نوع اسمی - بهتر

در این گونه مسائل، مشخصه کیفی پیوسته و غیرمنفی است. مقادیر تابع هدف آن نیز غیرصفر و محدود است.

ج) مسئله نوع بزرگ‌تر - بهتر

در این مسائل، همانند مسئله نوع اول، مشخصه کیفی پیوسته و



شکل ۳. پارامترهای مؤثر بر طراحی یک فرایند یا محصول (۱۶)

جدول ۱. طرح اختلاط بتن متخلخل معمولی

تخلخل (%)	نسبت آب به سیمان (W/C)	سیمان (kg/m^3)	مقدار سنگدانه (kg/m^3)
۲۶	۰/۳۵	۳۳۰	۱۴۰۰

آرایه‌ها از تکنیک‌های مهم طراحی اثرزدا هستند (۱۶).

۲-۴- طرح اختلاط بتن متخلخل

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل معمولی، طرح اختلاط اولیه‌ای به صورت جدول ۱ در نظر گرفته شد:

فاکتورهایی که در این تحقیق در نظر گرفته شدند تا با تغییر در سطوح مختلف آنها، پارامترهای فیزیکی نمونه‌های بتن متخلخل بررسی شوند شامل نوع سیمان، درصد ریزدانه، نسبت آب به سیمان، درصد افزودنی از هر افزودنی و نوع افزودنی بود (جدول ۲).

بر اساس جدول ۲، و توجه به تعداد فاکتورها و سطوح آنها، تعداد آزمایش مورد نیاز در حالت معمول با ضرب فاکتورها و سطوح آنها و ۳ تکرار برای هر حالت، ۸۶۴ مورد خواهد بود. ولی با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی و بهینه‌سازی آن، آزمایش‌های مورد نیاز به شرح جدول ۳ به دست آمد. طرح تاگوچی مورد استفاده L₁₆ استاندارد است.

غیرمنفی بوده و هدف بزرگ کردن آن تا جایی ممکن است. این مسئله با معکوس کردن مشخصه کیفی، به مسئله کوچک‌تر-بهرتر تبدیل می‌شود.

۲-۳-۲- طراحی آزمایش‌های تاگوچی

در روش‌های طراحی، پارامترهای طراحی (فاکتورهایی که باید توسط طراحان کنترل شوند) و پارامترهای بدی کارکرد (پارامترهایی که در کنترل طراحان نیستند) کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این روش، تاگوچی به انتخاب سطوح پارامترهای طراحی و کاهش اثرات فاکتورهای بدی کارکرد پرداخته است (۲۲). آزمایش‌های ماتریسی تاگوچی بدین ترتیب است که با تغییر مجموعه‌ای از پارامترهای فرایند یا محصول، نتیجه آن از یک آزمایش به آزمایش دیگر مطالعه می‌شود. آزمایش‌های ماتریسی با استفاده از ماتریس خاصی انجام می‌شوند که "آرایه‌های متعامد" نامیده می‌شوند. با این آرایه‌ها می‌توان اثرات پارامترهای مختلف را تعیین کرد. استفاده از این

جدول ۲. فاکتورهای در نظر گرفته شده و سطوح هر فاکتور

ردیف	فاکتور	سطح			تعداد
		اول	دوم	سوم	
۱	سیمان (C)	تیپ ۲	تیپ ۵	-	۲
۲	درصد ریزدانه (FSP)	صفر	۱۰	۲۰	۳
۳	نسبت آب به سیمان (W/C)	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۵۵	۳
۴	درصد افزودنی (AP)	۵	۱۰	۱۵	۴
۵	نوع افزودنی (AT)	پوکه معدنی	پوکه صنعتی	زئولیت	پرلیت

جدول ۳. آزمایش‌های مورد نیاز بر اساس طرح آزمایش‌های تاگوچی

شماره آزمایش	C	(%) FSP	W/C	(%) AP	AT
۱	تیپ ۲	۰	۰/۳۵	۵	پوکه معدنی
۲	تیپ ۲	۱۰	۰/۳۵	۱۰	پوکه صنعتی
۳	تیپ ۵	۲۰	۰/۳۵	۱۵	زئولیت
۴	تیپ ۵	۰	۰/۳۵	۲۰	پرلیت
۵	تیپ ۲	۰	۰/۴۵	۲۰	زئولیت
۶	تیپ ۲	۱۰	۰/۴۵	۱۵	پرلیت
۷	تیپ ۵	۲۰	۰/۴۵	۱۰	پوکه معدنی
۸	تیپ ۵	۰	۰/۴۵	۵	پوکه صنعتی
۹	تیپ ۵	۰	۰/۵۵	۱۰	پرلیت
۱۰	تیپ ۵	۱۰	۰/۵۵	۵	زئولیت
۱۱	تیپ ۲	۲۰	۰/۵۵	۲۰	پوکه صنعتی
۱۲	تیپ ۲	۰	۰/۵۵	۱۵	پوکه معدنی
۱۳	تیپ ۵	۰	۰/۳۵	۱۵	پوکه صنعتی
۱۴	تیپ ۵	۱۰	۰/۳۵	۲۰	پوکه معدنی
۱۵	تیپ ۲	۲۰	۰/۳۵	۵	پرلیت
۱۶	تیپ ۲	۰	۰/۳۵	۱۰	زئولیت

۲-۵- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا مواد هر طرح اختلاط مورد نظر آماده شد و سپس برای مخلوط شدن در دستگاه میکسر ریخته شد. پس از اینکه مواد به‌طور کامل مخلوط شدند، آنها را در قالب‌های مورد نظر که قبلاً دیواره آنها با استفاده از روغن چرب شده بود، ریخته و در سه لایه، با کوبه استاندارد و هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شدند.

۲-۶- روش‌های اندازه‌گیری

برای انجام آزمایش هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری یا ضریب آبگذری)، دستگاهی به‌روش بار افتان در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان ساخته شد که نمونه‌های مکعبی بتن متخلخل ساخته شده در آن جای گیرند و آب‌بندی لازم نیز امکان‌پذیر باشد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM 522R (۳) انجام شد. میزان نفوذپذیری مطابق رابطه ۱ محاسبه شد:

$$K = \frac{aL}{At} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

که K نفوذپذیری (میلی متر بر ثانیه)، a سطح مقطع محفظه از جنس پلکسی‌گلاس (میلی متر مربع)، L طول نمونه (میلی متر)، A سطح مقطع نمونه بتنی (میلی متر مربع)، t زمان افت بار آب از h_1 به h_2 (ثانیه)، h_1 ارتفاع اولیه ستون آب (میلی متر) و h_2 ارتفاع نهایی ستون آب (میلی متر) از یک سطح مبنا است.

۲-۷- آزمایش مقاومت فشاری

برای آزمایش مقاومت فشاری، از دستگاه مکانیکی موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان استفاده شد که مطابق با استاندارد ASTM C39 (۵) است. به دلیل نوع دانه‌بندی خاص، آیین‌نامه اجازه استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر را می‌دهد (شکل ۴).

۲-۸- نرم‌افزار Qualitek-4

این نرم‌افزار توسط شرکت Nutek تهیه شده و در محیط ویندوز

نصب و اجرا می‌شود (۲۶). طراحی آرایه‌های متعامد به‌روش تاگوچی بسیار پیچیده است و نیاز به متخصص دارد. اما این نرم‌افزار، آزمایش‌ها را بر اساس عوامل و سطوح مشخص شده توسط کاربر به‌روش تاگوچی به‌صورت اتوماتیک طراحی می‌کند. البته در چند حالت پیش‌فرض، در صورتی که نیاز به یک طراحی پیشرفته باشد، کاربر باید به‌طور شخصی با استفاده از ابزارهای موجود در نرم‌افزار، آزمایش‌ها را طراحی کند. سه مرحله اساسی در تجزیه و تحلیل داده‌ها شامل: ۱- اثر اصلی، ۲- واریانس و ۳- مطالعات بهینه‌سازی وجود دارد. همچنین، می‌توان تجزیه و تحلیل‌ها را با استفاده از نسبت استاندارد یا S/N نتایج برای ویژگی‌های کوچک‌تر، بزرگ‌تر و پویا انجام داد و در نهایت نمایش گرافیکی بسیار مناسبی از تجزیه و تحلیل‌ها در حالت‌های مختلف از نرم‌افزار گرفت (۲۶).

۳- نتایج و بحث

میانگین نتایج حاصل از سه تکرار انجام شده برای هر آزمایش در جدول ۴ آورده شده است.

۳-۱- تخلخل

هدف روش طراحی تاگوچی، رسانیدن مقدار میانگین به مقدار هدف و کاهش تغییرات در متغیر پاسخ است. بنابراین، تابع هدف ویژه‌ای که هدف بیان شده را در برگیرد برای روش طراحی تاگوچی شناسایی شده است. برای مثال، در این تحقیق، تابع هدف مطلوبیت می‌تواند حداکثر کردن مقاومت فشاری، نفوذپذیری و یا تخلخل باشد. این تابع هدف، نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (S/N) نامیده می‌شود. بنابراین، طراحی تاگوچی یک فرایند بهینه‌سازی است که در آن تابع هدف، نسبت S/N است. این تابع هدف یک رابطه ریاضی است که اثرزدایی طراحی را محاسبه می‌کند. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، اثرزدایی عملکرد بیشتر می‌شود. در جدول ۵، نسبت S/N برای هر یک از سطوح متغیرها برای تخلخل نمونه های بتن متخلخل محاسبه شده است. با مقایسه مقدار این نسبت برای سطوح هر فاکتور می‌توان اثرگذاری هر کدام



شکل ۴. نمونه‌های بتن متخلخل ساخته شده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش‌ها

شماره آزمایش	تخلخل (درصد)	نفوذپذیری (mm/s)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)
۱	۲۶/۲۳	۱۵/۰۳	۵/۹
۲	۱۹/۶۷	۱۲/۱۳	۶/۱۰
۳	۱۳/۳۷	۶/۵۷	۸/۸۳
۴	۱۶/۶۷	۱۲/۴۰	۳/۷۳
۵	۲۳/۸۰	۱۴/۶۷	۸/۴۳
۶	۱۵/۳۷	۱۱/۶۰	۴/۶۷
۷	۱۲/۱۰	۶/۶۷	۶/۵۰
۸	۲۳/۴۰	۱۴/۱۷	۶/۵۰
۹	۱۹/۱۳	۱۳/۵۷	۴/۳۰
۱۰	۱۴/۲۰	۱۰/۵۷	۹/۰۷
۱۱	۱۳/۴۳	۸/۱۷	۸/۲۰
۱۲	۲۴/۰۳	۱۶/۲۷	۵/۸۰
۱۳	۲۸/۳۷	۱۶/۴۳	۵/۵۵
۱۴	۱۷/۳۷	۱۰/۳۰	۶/۲۳
۱۵	۱۴/۴۳	۷/۵۳	۵/۲۰
۱۶	۲۱/۳۰	۱۵/۲۷	۷/۶۳

جدول ۵. پاسخ برای نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (S/N) برای تخلخل

فاکتور					نسبت آب به سیمان	سطح
درصد افزودنی	نوع سیمان	نوع افزودنی	درصد ریزدانه	نوع افزودنی		
۲۵/۴۹۷	۲۵/۶۸	۲۵/۶۰۸	۲۷/۰۷	۲۵/۶	۱	
۲۴/۹۳	۲۴/۸۱۳	۲۶/۲۱۷	۲۴/۳۶	۲۵/۰۷۲	۲	
۲۵/۷۲۹	-	۲۴/۹۱۵	۲۲/۴۷۸	۲۵/۷۱۴	۳	
۲۴/۸۳	-	۲۴/۲۴۶	-	-	۴	
۰/۶۶۷	۰/۸۶۷	۱/۹۷۱	۴/۵۹۲	۰/۸۸۶	دلتا	
۵	۴	۲	۱	۳	رتبه	

جدول ۶. آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف برای تغییر در میزان تخلخل

فاکتور F	واریانس	مجموع مربعات	درجه آزادی	فاکتور	ردیف
۰/۸۹۶	۱/۱۳	۲/۲۶	۲	آب به سیمان	۱
۲۴/۰۱۳	۳۰/۲۵۴	۶۰/۵۰۸	۲	درصد ریزدانه	۲
۲/۳۸۱	۳	۳	۱	سیمان	۳
۰/۶۰۲	۰/۷۵۹	۲/۲۷۷	۳	درصد افزودنی	۴
۲/۳۱۲	۲/۹۱۳	۸/۷۴۱	۳	نوع افزودنی	۵
-	۱/۲۵۹	۵/۰۳۹	۴	سایر خطاها	۶
-	-	۸۱/۸۲۷	۱۵	کل	۷

افزودنی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، برای بهبود میزان تخلخل بتن متخلخل، برخلاف تصور، درصد ریزدانه مهم‌ترین فاکتور است (یعنی با افزایش درصد ریزدانه، تخلخل کاهش می‌یابد) و درصد مواد افزودنی، کمترین اثر را دارد.

بر اساس جدول ۶ و مقایسه میزان فاکتور F محاسبه شده، می‌توان به‌وضوح مشاهده کرد که درصد ریزدانه بیشترین مقدار فاکتور F را دارد (۲۴/۰۱۳). همچنین، تغییرات واریانس نیز خود گویای تأثیر قابل توجه ریزدانه بر میزان تخلخل محاسبه شده نمونه‌ها است. نکته قابل توجه اینکه سایر عوامل نیز بر تخلخل نمونه‌ها اثر دارند، از جمله اندازه ذرات درشت‌دانه و ریزدانه، که در این آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت فرض شده است. شاید مقداری از خطای آزمایش به‌همین خاطر باشد.

از متغیرها را بر میزان تخلخل پیش‌بینی کرد. با توجه به نتایج جدول ۵، می‌توان این‌گونه بیان کرد که درصد ریزدانه در سطح اول دارای بیشترین نسبت S/N است (۲۷/۰۷)، که نشان‌دهنده این است که درصد ریزدانه در بتن متخلخل بیشتر تأثیر را بر میزان تخلخل نمونه‌ها دارد. پس از آن نیز بیشترین تأثیر را نوع افزودنی دارد (۲۶/۲۱۷). در جدول ۵، با مقایسه مقدار دلتا، که از تفاضل بیشترین مقدار نسبت S/N با کمترین مقدار آن به‌دست می‌آید، می‌توان متغیرها را بر اساس بیشترین تأثیر بر نسبت S/N رتبه‌بندی کرد. در اینجا، فاکتور درصد ریزدانه دارای بیشترین اثر بر نسبت S/N و درصد افزودنی کم‌ترین اثر را بر این نسبت دارد. یعنی با تغییر درصد ریزدانه، نسبت S/N بیشتر تغییر می‌کند تا زمانی که درصد

جدول ۷. بهترین طرح اختلاط بر اساس نتایج روش تاگوچی

ردیف	فاکتور	توضیح سطح	سطح	میزان توزیع
۱	آب به سیمان	۰/۳۵	۱	۰/۳۵۳
۲	درصد ریزدانه	۰	۱	۱/۸۲۷
۳	نوع سیمان	تیپ ۲	۱	۰/۴۳۳
۴	درصد افزودنی	۱۵	۳	۰/۴۸۲
۵	نوع افزودنی	پوکه صنعتی	۲	۰/۹۷

جدول ۸. پاسخ برای نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (S/N) برای پارامتر نفوذپذیری

رتبه	دلتا	فاکتور				سطح
		نسبت آب به سیمان	درصد ریزدانه	نوع سیمان	درصد افزودنی	
۱	۲۲/۱۴	۲۳/۳۲۵	۲۱/۶۸۴	۲۱/۱۳۹	۲۱/۱۱۹	۱
۲	۲۱/۰۲۶	۲۰/۹۱۳	۲۰/۶۶۴	۲۱/۱۱۶	۲۱/۵۱	۲
۳	۲۱/۳۹	۱۷/۱۳۱	-	۲۱/۵۲۸	۲۰/۹۳۹	۳
۴	-	-	-	۲۰/۹۱۳	۲۰/۹۲۹	۴
	۰/۷۵	۶/۱۹۴	۱/۰۲	۰/۲۰۳	۰/۵۸۱	دلتا
	۳	۱	۲	۵	۴	رتبه

در جدول ۷، بر اساس آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف، بهترین طرح اختلاط بر اساس روش تاگوچی اولیه آورده شده است. براساس جدول ۷، برای به دست آوردن بیشترین میزان تخلخل در بتن متخلخل، باید میزان نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، صفر درصد ریزدانه، سیمان تیپ ۲ و ۱۵ درصد پوکه صنعتی در طرح اختلاط در نظر گرفته شود.

۳-۲- هدایت هیدرولیکی

نسبت S/N برای هر یک از سطوح متغیرها برای هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری) در جدول ۸ ارائه شده است. با مقایسه مقدار این نسبت برای سطوح هر فاکتور می توان اثرگذاری هر کدام از متغیرها بر میزان نفوذپذیری را پیش بینی کرد. با توجه به نتایج جدول ۸، درصد ریزدانه، سطح اول دارای

بیشترین نسبت S/N است (۲۳/۳۲۵)، که نشان می دهد درصد ریزدانه در بتن متخلخل بیشترین تأثیر را بر میزان نفوذپذیری نمونه ها دارد. پس از آن نیز بیشترین تأثیر را نوع سیمان دارد. به عبارت دیگر، می توان گفت اندازه حفرات در میزان پارامتر نفوذپذیری بسیار تأثیرگذار است و عامل دیگر نیز ارتباط بین این حفرات است تا آب بتواند از بتن متخلخل عبور کند. در جدول ۸، با مقایسه مقدار دلتا که از تفاضل بیشترین مقدار نسبت S/N به کمترین مقدار آن به دست می آید، می توان متغیرها را براساس بیشترین تأثیر بر نسبت S/N رتبه بندی کرد. در اینجا، فاکتور درصد ریزدانه دارای بیشترین اثر و درصد افزودنی کمترین اثر بر نسبت S/N است. پس، برای میزان آبگذاری بتن متخلخل، اندازه ذرات شن و مواد افزودنی و سپس نوع سیمان تأثیر بسزایی دارند و نوع افزودنی، یعنی ژئولیت با پوکه صنعتی تفاوتی ندارد. دلیل اصلی این نتیجه آن است که

جدول ۹. آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف برای پارامتر نفوذپذیری

ردیف	فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	فاکتور F
۱	آب به سیمان	۲	۰/۲۸۴	۰/۱۴۲	۰/۵۹۸
۲	درصد ریزدانه	۲	۱۰۲/۶۵	۵۱/۳۲۵	۲۱۶/۴۰۷
۳	تیپ سیمان	۱	۴/۱۶۴	۴/۱۶۴	۱۷/۵۵۹
۴	درصد افزودنی	۳	۰/۷۸۹	۰/۲۶۳	۱/۱۱
۵	نوع افزودنی	۳	۲/۳۲۶	۰/۷۷۵	۳/۲۶۹
۶	سایر خطاها	۴	۰/۹۴۸	۰/۲۳۷	-
۷	کل	۱۵	۱۱۱/۱۶۴	-	-

جدول ۱۰. بهترین طرح اختلاط بر اساس نتایج روش تاگوچی

ردیف	فاکتور	توضیح سطح	سطح	میزان توزیع
۱	آب به سیمان	۰/۵۵	۳	۰/۲۱۶
۲	درصد ریزدانه	۰	۱	۲/۱۵
۳	نوع سیمان	تیپ ۲	۱	۰/۵۱
۴	درصد افزودنی	۱۵	۳	۰/۳۵۳
۵	نوع افزودنی	پوکه صنعتی	۲	۰/۶۳۵

فاکتورهای مختلف بهترین طرح اختلاط طبق روش تاگوچی اولیه آورده شده است.

بر اساس جدول ۱۰، برای به دست آوردن بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در بتن متخلخل باید نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، صفر درصد ریزدانه، سیمان تیپ ۲ و ۱۵ درصد پوکه صنعتی در طرح اختلاط بتن متخلخل باشد.

۳-۳- مقاومت فشاری

در جدول ۱۱، نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (S/N) برای هر یک از سطوح متغیرها برای پارامتر مقاومت فشاری محاسبه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۱۱، سطح سوم فاکتور نوع افزودنی دارای بیشترین نسبت S/N است (۱۸/۵۵۹). این نتیجه نشان می‌دهد که نوع افزودنی در بتن متخلخل بیشتر تأثیر را بر میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد. پس از آن، بیشترین تأثیر را

شیره سیمان سطح رویی ذرات را می‌پوشاند و تفاوت در پارامتر نفوذپذیری را برای افزودنی‌های مختلف به حداقل می‌رساند.

در جدول ۹، آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف آورده شده است.

بر اساس جدول ۹ و مقایسه میزان فاکتور F محاسبه شده، به وضوح می‌توان مشاهده کرد که درصد ریزدانه بیشترین میزان فاکتور F را دارد (۲۱۶/۴۰۷). همچنین، تغییرات واریانس نیز خود گویای تأثیر قابل توجه ریزدانه بر میزان نفوذپذیری محاسبه شده نمونه‌ها است. نکته قابل توجه، میزان تأثیر خطاست که نشان می‌دهد سایر عوامل نیز بر نفوذپذیری نمونه‌ها اثر دارند، از جمله اندازه ذرات، هم درشت‌دانه و هم ریزدانه، که در این آزمایش برای تمامی نمونه‌ها ثابت فرض شده است.

در جدول ۱۰، بر اساس آنالیز آماری نسبت S/N،

جدول ۱۱. پاسخ برای نسبت مطلوبیت به بدی کارکرد (S/N) برای پارامتر مقاومت فشاری

سطح	فاکتور			
	نسبت آب به سیمان	درصد ریزدانه	نوع سیمان	درصد افزودنی
۱	۱۵/۵۲۶	۱۵/۲۶۲	۱۶/۰۶۳	۱۶/۲۸۲
۲	۱۶/۱۰۱	۱۶/۰۲۷	۱۵/۶۸۲	۱۶/۲۷۸
۳	۱۶/۳۳۸	۱۶/۹۴	-	۱۸/۵۵۹
۴	-	-	-	۱۲/۹۴۷
دلنا	۰/۸۱۲	۱/۶۷۸	۰/۳۸۱	۵/۶۱۲
رتبه	۳	۲	۵	۴

جدول ۱۲. آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف برای پارامتر مقاومت فشاری

ردیف	فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	فاکتور F
۱	آب به سیمان	۲	۲/۰۳۳	۱/۰۱۶	۴/۴۹۱
۲	درصد ریزدانه	۲	۷/۶۳۸	۳/۸۱۹	۱۶/۸۷۴
۳	نوع سیمان	۱	۰/۵۸۱	۰/۵۸۱	۲/۵۶۷
۴	درصد افزودنی	۳	۱/۴۱۴	۰/۴۷۱	۲/۰۸۲
۵	نوع افزودنی	۳	۶۳/۸۶۶	۲۱/۲۸۸	۹۴/۰۶
۶	سایر خطاها	۴	۰/۹۰۵	۰/۲۲۶	-
۷	کل	۱۵	۷۶/۴۳۸	-	-

فاکتورهای مختلف بهترین طرح اختلاط طبق روش تاگوچی آورده شده است.

براساس جدول ۱۳، بیشترین میزان مقاومت فشاری در بتن متخلخل، با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، ۲۰ درصد ریزدانه، سیمان تپ ۲ و ۵ درصد زئولیت در طرح اختلاط بتن متخلخل حاصل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر نوع سیمان، درصد ریزدانه، نسبت آب به سیمان، نوع افزودنی و درصد افزودنی در طرح اختلاط بتن متخلخل بر خواص آن شامل میزان تخلخل، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی، با کاربرد طرح اثرزدا مطالعه شد. بر طبق نتایج، افزایش مواد افزودنی به مخلوط سیمان

درصد ریزدانه دارد. با مقایسه مقادیر دلنا، می‌توان متغیرها را براساس بیشترین تأثیر بر نسبت S/N رتبه‌بندی کرد. در اینجا، فاکتور نوع افزودنی دارای بیشترین اثر بر نسبت S/N است و نوع سیمان کمترین اثر را دارد. بیشترین مقاومت را زئولیت و کمترین مقاومت را پرلیت دارد.

در جدول ۱۲، آنالیز آماری نسبت S/N فاکتورهای مختلف برای مقاومت فشاری آورده شده است.

براساس جدول ۱۲ و مقایسه میزان فاکتور F محاسبه شده، می‌توان مشاهده کرد که نوع افزودنی بیشترین میزان فاکتور F را دارد (۹۴/۰۶). همچنین، تغییرات واریانس نیز گویای تأثیر قابل توجه نوع افزودنی بر میزان مقاومت فشاری محاسبه شده نمونه‌ها است.

در جدول ۱۳، بر اساس آنالیز آماری نسبت S/N،

جدول ۱۳. بهترین طرح اختلاط بر اساس نتایج روش تاگوچی برای به دست آوردن بهترین مقاومت فشاری

ردیف	فاکتور	توضیح سطح	سطح	میزان توزیع
۱	آب به سیمان	۰/۵۵	۳	۰/۴۶۴
۲	درصد ریزدانه	۲۰	۳	۱/۰۶۷
۳	نوع سیمان	تیپ ۲	۱	۰/۱۹
۴	درصد افزودنی	۵	۱	۰/۴۰۸
۵	نوع افزودنی	زئولیت	۳	۲/۶۸۶

مقاومت فشاری زیاد شدن میزان تخلخل و هدایت هیدرولیکی و کاهش مقاومت فشاری بتن متخلخل است. افزایش سطح خمیر سیمان می‌تواند به راحتی از طریق کاربرد ریزدانه به دست آید. با این کار، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. اما تخلخل و هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که نوع سیمان تأثیر چندانی بر خصوصیات فیزیکی بتن متخلخل ندارد. نسبت بهینه آب به سیمان در حالتی که قرار است از مواد افزودنی در بتن متخلخل استفاده شود، به دلیل جذب آب توسط جاذب‌ها، ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ است. این نتیجه با نتایج جوشقانی و همکاران (۱۱) مطابقت دارد. مشخصات خمیر سیمان در بتن متخلخل تنوع گسترده‌ای نسبت به بتن معمولی دارد. خمیر سیمان استفاده شده در بتن متخلخل باید چسبندگی و عدم روانی بالایی داشته باشد. با وجود این اطلاعات، به راحتی می‌توان فهمید که فاکتورهای تأثیرگذار زیادی وجود دارند که بر عملکرد کلی مخلوط اثر می‌گذارند. با افزایش اندازه سنگدانه‌ها در بتن متخلخل،

مقاومت فشاری بتن متخلخل در درجه اول به تخلخل نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت بتن متخلخل در درجه اول به تخلخل کل بستگی دارد. مقاومت فشاری به طور معکوس به نفوذپذیری مرتبط است. این نتیجه با نتایج تیموری و همکاران (۲۵) و عابدی کوپایی و همکاران (۲) مطابقت دارد. در این تحقیق، اندازه ذرات مواد افزودنی تغییر داده نشد. پیشنهاد می‌شود که این مسئله در پژوهش‌های آتی مورد تحقیق قرار گیرد. با این حال، تفاوت بین تخلخل، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بین نمونه‌هایی که از جاذب با دانه‌بندی یک اندازه استفاده شده است وجود دارد که نشان‌دهنده تغییر در نوع جاذب است. این نتیجه با نتایج سقاییان نژاد و همکاران (۲۰) و دوست محمدی و همکاران (۷) مطابقت دارد. نفوذپذیری رابطه مستقیم با درصد تخلخل دارد. با افزایش حفرات در بتن متخلخل، میزان عبور جریان آب بیشتر می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abedi-Koupai, J. and S. F. Mousavi. 2009. Adsorption of lead from industrial effluent by rice husk ash. *Water and Wastewater* 17: 48-63. (In Farsi).
2. Abedi-Koupai, J., M. Javaheri Tehrani and K. Behfarnia. 2015. Improvement the quality of wastewater using porous concrete for irrigation. *Journal of Water and Soil Science* 19(71): 93-107. (In Farsi).
3. ACI Committee 522. 2006. Pervious Concrete. Report No. 522R-06, American Concrete Institute. Detroit, USA.
4. ASTM C150.C150M-09. 2009. Standard Practice for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. ASTM C39. 2004. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards.
6. Cosic, K., L. Korat, V. Ducman and I. Netinger. 2015. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials* 78: 69-76.
7. Doostmohamadi, M., S. Farzin, H. Karami and S. F. Mousavi. 2018. Experimental study of the influence of natural lightweight aggregates on some physical properties of porous concrete pavement and providing the relationship

- between compressive strength and porosity. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering* 4(1): 87-99. (In Farsi).
8. Grubesa, N. I., I. Barisic, V. Ducman and L. Korat. 2018. Draining capability of single sized pervious concrete. *Construction and Building Materials* 169: 252-260.
 9. Hesami, S. and S. Ahmadi. 2015. Evaluation of environment-friendly porous-concrete pavement using rice husk ash. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering* 1(2): 63-76. (In Farsi).
 10. Huang, J., C. Valeo, J. He and A. Chu. 2015. The influence of design parameters on stormwater pollutant removal in permeable pavements. *Water, Air, and Soil Pollution* 227: 311. Doi:10.1007/s11270-015-3020-y.
 11. Joshaghani, A., A. Ramezani-pour, O. Ataei and A. Golroo. 2015. Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. *Construction and Building Materials* 101: 317-325.
 12. Kovac, M. and A. Sicakova. 2018. Pervious concrete as an environmental solution pavements: Focus on key properties. *Journal of Environments* 5(11): 1-9.
 13. Meininger, R. C. 1988. No-fines Pervious Concrete for Paving. Concrete International, American Concrete Institute, pp. 20-27.
 14. Nadi, E. O., A. P. Newman, S. J. Coupe and F. U. Mbanaso. 2015. Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. *Journal of Environmental Management* 147: 246-256.
 15. Panimayam, A., P. Chinnadurai, R. Anuradha, M. Rajalingam and A. Raj. 2017. Experimental study of pervious concrete using M-sand. *International Journal of Chemtech Research* 10(8): 186-198.
 16. Phadke, M. S. 1989. Quality Engineering using Robust Design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
 17. Rahmani, H. R., M. Yazdani, M. Yazdani and M. R. Nikudel. 2016. Application of Taguchi method on optimization of semi structural lightweight concrete composed of pumice aggregates. *Sharif Journal of Civil Engineering* 32(2): 101-108. (In Farsi).
 18. RostamAbadi, M. 2017. Determination of the optimum value of depth and position of baffle blocks using studies designed by Taguchi and full factorial methods. *Journal of Hydraulics* 12(2): 35-44. (In Farsi).
 19. Saghaian Nejad, S. 2012. Reduction of urban runoff pollution load using adsorbent porous concrete. Master Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Farsi).
 20. Saghaian Nejad, S., J. Abedi-Koupai, S. Mostafazadeh-Fard and K. Behfarnia. 2017. Treatment of urban storm water using adsorbent porous concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1680/jwama.15.00127>.
 21. Taghizadeh, M. and A. Torabian. 2007. Feasibility study of water purification using vertical porous concrete filter. *International Journal of Environmental Science and Technology* 4(4): 505-512.
 22. Taguchi, G. 1986. Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo.
 23. Tanyildizi, H. and M. Sahin. 2015. Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. *Construction and Building Materials* 79: 97-103.
 24. Teymouri, E. 2016. Improving the quality of urban runoff and effluent of wastewater treatment plant by porous concrete. Master Thesis, Semnan University, Semnan. (In Farsi).
 25. Teymouri, E., S. F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin and M. Javaheri-Tehrani. 2016. Experimental investigation of the effect of different additives on characteristics of porous concrete, applicable in urban runoff system. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering* 2(2): 51-64. (In Farsi).
 26. www.nutek-us.com/wp-q4w.html.
 27. Zhong, R., Z. Leng and C. S. Poon. 2018. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state of the art and state of the practice review. *Construction and Building Materials* 183: 544-553.

Optimization of the Mixing Scheme of the Porous Concrete to Reduce Urban Runoff

M. Javaheri Tehrani¹, S. F. Mousavi^{1*}, J. Abedi-Koupai² and H. Karami¹

(Received: July 28-2018; Accepted: September 30-2019)

Abstract

In the last few decades, the use of porous concrete to cover the sidewalks and pavements as an interface to collect the urban runoff has been increased. This system is economically more efficient than other runoff-pollution reduction methods. To design a runoff control system and reduce its pollution, it is necessary to determine the hydraulic and dynamic properties of the porous concrete (with and without additives). In this research, the effects of cement type (2 and 5), water to cement ratio (0.35, 0.45 and 0.55), fine grains percent (0, 10 and 20%), the type of additive (pumice, industrial pumice, perlite and zeolite), and the added additive percent (5, 10, 15 and 20%) on the physical properties of the porous concrete (porosity, hydraulic conductivity and compressive strength), each with three replications, were investigated using robust design. Qualitek-4 software was also used to discuss the results. The results showed that to obtain the highest porosity in the mixing scheme of the porous concrete, no fine grains, cement type 2 and 15% industrial pumice should be used, and water to cement ratio should be 0.35. Also, the water to cement ratio of 0.55, 0% fine grains, type 2 cement and 15% industrial pumice resulted in the highest value of hydraulic conductivity in the porous concrete. Finally, the water to cement ratio of 0.55, 20% fine grains, type 2 cement and 5% zeolite led to the maximum compressive strength. In general, it was not possible to reach a logical conclusion in this research with the least costs without employing the robust design.

Keywords: Porous concrete, Taguchi experimental design, Pollution adsorbent, Concrete mixing design.

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: fmousavi@semnan.ac.ir