

کاربرد روش تاگوچی در پیش بینی طرح اختلاط بهینه بتن حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس

سید حمید هاشمی*

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

حمیدرضا صدیقی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

چکیده

در این مقاله با بررسی کارآیی روش تاگوچی و توانایی آن در یافتن طرح اختلاط بهینه بتن حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و فاکتورهای مختلف همچون نسبت آب به سیمان (w/c)، سیمان با عیار مختلف ($350, 400, 450 \text{ kg/cm}^3$) در سنین ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از ۹ طرح اختلاط با روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته تا طرح اختلاط بهینه بتن با بیشترین مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی بتن و میلگرد و کمترین میزان جذب آب بدست آید، سپس طرح پیشنهادی روش تاگوچی، در آزمایشگاه ساخته شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته تا بهینه ترین طرح اختلاط بدست آید. در این پژوهش علاوه بر انجام آزمایش های مکانیکی و نفوذپذیری، که در مقیاس ماکرو انجام می شود، آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) نیز در مقیاس میکرو انجام گردید، تا بتوان دلایلی برای اثبات تغییر نتایج حاصل از آزمایش ها، با توجه به افزودن شدن نانوسیلیس و میکروسیلیس به بتن بدست آورد. مقایسه بین نتایج روش تاگوچی و نتایج آزمایشگاهی میزان اعتبار روش تاگوچی در بهینه نمودن طرح های اختلاط بتن را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: روش تاگوچی، مقاومت فشاری، چسبندگی بتن و میلگرد، نفوذپذیری، آرایه های متعامد، آزمایش پراش اشعه ایکس

* نویسنده مسؤل: h-hashemi@araku.ac.ir

۱- مقدمه

بسیار توانمند با حساسیت بسیار کم در برابر عوامل غیرقابل کنترل (عوامل اغتشاش) می‌گردد [۶]. پژوهشگران بسیاری درخصوص تعیین طرح اختلاط مناسب انواع بتن از روش سیستماتیک تاگوچی استفاده کرده‌اند. روش تاگوچی روش عددی است که با استفاده از آرایه‌های متعامد خاصی به پیشگویی حالت‌های بهینه مواد کامپوزیت می‌پردازد. در این مقاله به بررسی کارایی این روش و توانایی آن در یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس جهت حداقل کردن نفوذپذیری و حداکثر شدن مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی پرداخته شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، به منظور بررسی خواص مکانیکی و جذب آب در نمونه‌های بتنی، ۹ طرح اختلاط با استفاده از روش تاگوچی با برنامه آزمایشگاهی ۲۸ روزه در نظر گرفته شد. تعداد نمونه‌های آزمایش شده ۷۱ نمونه بود که تعداد ۵۴ نمونه از ۹ طرح اختلاط برای آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه و بقیه نمونه‌ها برای آزمایش چسبندگی بتن و میلگرد مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش پراش اشعه ایکس نیز در سن ۲۸ روز بر روی نمونه کاملاً پودر شده بتنی انجام گرفت. همچنین مقدار میکروسیلیس و نانوسیلیس به عنوان جایگزینی از سیمان در نظر گرفته شدند.

۳- مصالح مصرفی

مشخصات نانوسیلیس استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. میکروسیلیس مصرفی نیز از شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران واقع در ازنآ که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است، تهیه گردید. سنگدانه‌های ریز مصرفی (ماسه) از نوع طبیعی دوبار شوی و درشت‌دانه مصرفی (شن) از نوع شکسته کوهی که دانه‌بندی با نسبت مساوی مانده روی الک‌های ۱/۲، ۳/۴ و ۴ می‌باشند. سیمان پرتلند استفاده شده در این پروژه از نوع سیمان پرتلند نوع دو می‌باشد و از کارخانه سیمان دلیجان خریداری و مشخصات آن در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. همچنین در این تحقیق برای افزایش کارایی از فوق‌روان‌کننده نسل سوم با نام تجاری

جهت دستیابی به بتنی با تراکم بالا و نفوذپذیری کم، بایستی عوامل مختلف از جمله: دانه‌بندی سنگدانه‌ها، میزان مصرف سیمان و دیگر افزودنی‌ها و مصالح مورد استفاده به طور کامل مورد آزمایش قرار گیرند و مقدار بهینه استفاده از هر کدام مشخص گردد. با توجه به اثرات استفاده از نانوسیلیس در بتن، از جمله بهبود ریزساختار، کاهش نفوذپذیری، کاهش اندازه تخلخل و افزایش مقاومت فشاری می‌توان استدلال نمود که استفاده از نانوسیلیس مفید می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط کولپاردی و همکاران این مسأله را تایید می‌کند [۱]. هدف نهایی از بررسی مواد در مقیاس نانو، یافتن طبقه جدیدی از مصالح ساختمانی با عملکرد بالا می‌باشد، که آنها را می‌توان به عنوان مصالحی با عملکرد بالا و چند منظوره اطلاق نمود. یکی از ویژگی‌های میکروسیلیس که باعث بهبود خواص بتن تازه و سخت می‌گردد، نرمی ذرات آن است. دانه‌های میکروسیلیس که تقریباً ۱۰۰ برابر از سیمان نرم‌تر هستند منافذ بین سیمان را در بتن پر کرده و باعث افزایش مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری آن می‌گردد. ین و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی اثر برخی از افزودنی‌های معدنی همچون میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری بتن پرداختند که نتیجه استفاده از این مواد به مقاومت بسیار مناسب فشاری دست پیدا کرد [۳،۲]. در حالت کلی با افزایش مقدار میکروسیلیس در مخلوط‌های بتنی مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، بیشترین مقاومت فشاری مشاهده شده مربوط به بتن با ۱۰ درصد جایگزینی سیمان به وسیله میکروسیلیس بوده است [۴]. در برنامه آزمایشگاهی از روش سیستماتیک طراحی آزمایش‌های تاگوچی به منظور ساخت نمونه‌ها و تعیین مقدار بهینه مصالح استفاده گردید. یکی از مهمترین مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های معمول آزمایشگاهی علاوه بر کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت، این است که شرایط بهینه، طوری انتخاب می‌شوند که تأثیر فاکتورهای غیرقابل کنترل، باعث ایجاد حداقل تغییرات در عملکرد سیستم و کیفیت محصولات خروجی شود [۵]، به عبارت دیگر، استفاده از این روش ضمن اینکه بسیار اقتصادی بوده، منجر به ایجاد یک طراحی آزمایش

M63 بر پایه ملامین سولفونات با رنگ قهوه‌ای روشن استفاده شده است. آب مصرفی در پروژه، آب شرب شهر اراک می‌باشد.

بدست آوردیم و با استفاده از نرم افزار Qualitek-4 [۷] طرح اختلاط بهینه به دست آمده و طرح پیشنهادی ساخته شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت.

۴- طرح اختلاط

- ۱- عیار سیمان: $450, 400, 350 \text{ kg/cm}^2$
 - ۲- نسبت آب به سیمان (W/C): $0/4, 0/35, 0/3$
 - ۳- نانوسیلیس: $0, 1/5\%, 3\%$ وزن سیمان
 - ۴- میکروسیلیس: $0, 10\%$ وزن سیمان
- ابتدا با استفاده از روش تاگوچی با معرفی نسبت‌هایی از پارامترهای موثر در طرح اختلاط که شامل آب، عیار سیمان، نانوسیلیس و میکروسیلیس می‌باشد نه طرح اختلاط مطابق با جداول ۴ و ۵ بدست آمد. سپس این نه طرح اختلاط را ساخته و بعد از آن نتایج مقاومت فشاری، نفوذ آب و چسبندگی را

جدول ۱- مشخصات نانوسیلیس

شکل ظاهری	وزن مخصوص (g/cm ³)	درصد وزنی SiO ₂	PH	ویسکوزیته	میانگین اندازه ذرات	درصد سیلیس در فاز جامد	سطح ویژه m ² /g
مایع سفید رنگ	۱/۴۰۳	۴۹-۵۱/۵	۹/۱	۱۵Max	۳۴ nm	۹۹/۷٪	۷۰-۱۰۰

جدول ۲- مشخصات میکروسیلیس

وزن مخصوص	افت سرخ شدن	درصد کربن	حداقل سطح ویژه	SiO ₂
۳۰۰-۷۰۰ kg/m ³	۱/۴۲ درصد	۰/۵ درصد	۲۰ m ² /g	۹۴/۰۴ درصد

جدول ۳- مشخصات سیمان مصرفی

سیمان تیپ دو دلجان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	L.O.I	I.R	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	۲۰/۹	۵/۰۰	۴/۳۰	۶۵	۱/۰۲	۱/۸۰	۰/۶	۰/۳۲	۰/۰۱۳	۰/۹۳	۰/۵	۶۰/۸	۱۴/۱	۶/۰	۱۳/۰

جدول ۴- مقادیر هر پارامتر حاصل از روش تاگوچی

نسبت مورد استفاده هر پارامتر طرح				شماره هر پارامتر
۴	۳	۲	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۲
۲	۲	۲	۱	۳
۱	۳	۳	۱	۴
۱	۲	۱	۲	۵
۱	۳	۲	۲	۶
۲	۱	۳	۲	۷
۲	۳	۱	۳	۸
۱	۱	۲	۳	۹

جدول ۵- طرح اختلاط بتن (kg/m^3)

شماره طرح	سیمان	آب	آب به سیمان	شن	ماسه	نانوسلیس	میکروسلیس	سیمان اصلاح شده	فوق‌روان‌کننده
۱	۳۵۰	۱۰۵	۰/۳	۹۷۲/۵	۹۷۲/۵	۰	۰	۰	۸/۷۵
۲	۳۵۰	۱۲۲/۵	۰/۳۵	۹۶۳/۷	۹۶۳/۷۵	۵/۲۵	۳۵	۳۰۹/۷۵	۷
۳	۳۵۰	۱۴۰	۰/۴	۹۵۵	۹۵۵	۱۰/۵	۰	۳۳۹/۵	۷
۴	۴۰۰	۱۲۰	۰/۳	۹۴۰	۹۳۷	۶	۰	۳۹۴	۱۰
۵	۴۰۰	۱۴۰	۰/۳۵	۹۴۰	۹۳۷	۶	۰	۳۸۸	۸
۶	۴۰۰	۱۶۰	۰/۴	۹۲۰	۹۰۰	۰	۴۰	۳۶۰	۸
۷	۴۵۰	۱۳۵	۰/۳	۹۰۷/۵	۸۷۸/۲	۱۳/۵	۴۵	۳۹۱/۵	۱۱/۲۵
۸	۴۵۰	۱۵۷/۵	۰/۳۵	۸۹۶/۲	۸۹۶/۲	۰	۰	۴۵۰	۹
۹	۴۵۰	۱۸۰	۰/۴	۸۸۵	۸۸۱/۶	۶/۷۵	۰	۴۴۳/۲۵	۹

۶ نمونه ساخته شده و نمونه‌ها پس از ساخت، در آب عمل‌آوری شدند. در سنین ۷ و ۲۸ روز پس از عمل‌آوری، ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و در حالت اشباع با سطح خشک براساس استاندارد BS:1881-116 تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نتایج ثبت شدند [۸].

۶-۲- آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها

برای هر طرح اختلاط تعداد ۳ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر ساخته و نمونه‌ها پس از ساخت، در آب عمل‌آوری شدند. سپس آزمایش در سن ۲۸ روز به این شرح انجام گرفت که نمونه‌های مربوط به هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و در گرمکن با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۳ روز (تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها) قرار گرفتند. پس از خشک شدن نمونه‌ها در این مدت، نمونه‌ها از گرمکن بیرون آورده شده و داخل آب قرار می‌گیرند. پس از گذشت ۲۴ و ۴۸ ساعت از قرارگیری در آب، نمونه‌ها از آب خارج شده و وزن آنها اندازه‌گیری و ثبت شد. درصد جذب آب نمونه‌ها مطابق رابطه زیر محاسبه گردید [۹].

$$\text{Water Absorption} = 100 \times (W_2 - W_1) / W_1$$

در این رابطه W_1 وزن اولیه پس از بیرون آوردن از گرمکن، W_2 وزن نمونه پس از قرارگیری در آب است.

۵- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های بتنی

برای ساخت مخلوط‌ها، ابتدا مصالح مصرفی به دقت توزین می‌گردد. آنگاه شن و ماسه توزین شده، ابتدا در داخل مخلوط‌کن الکتریکی کج‌شونده، ریخته شده و در مرحله بعد مخلوط همگن سیمان و میکروسلیس به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط انجام می‌شود. در مرحله بعد نیمی از آب اختلاط با نیمی از فوق‌روان‌کننده بعد از بهم زدن کامل به مخلوط، اضافه و به مدت ۱ دقیقه مخلوط هم زده می‌شود و در مرحله آخر در صورت وجود نانوسلیس در طرح اختلاط، نیمی از آب و فوق‌روان‌کننده باقی مانده به همراه نانوسلیس کاملاً مخلوط و به مخلوط‌کن افزوده و به مدت ۲ دقیقه عملیات اختلاط انجام می‌شود. بلافاصله بعد از پایان یافتن اختلاط، آزمایش‌های اسلامپ بر روی مخلوط انجام می‌گیرد. سپس نمونه‌های قالب‌گیری شده توسط میز لرزان متراکم می‌شوند. برای جلوگیری از تبخیر آب از سطح بتن‌های قالب‌گیری شده، روی قالب‌ها با کاورهای نایلونی پوشانده شده و نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج می‌شوند. نمونه‌ها پس از خروج از قالب بلافاصله در استخر آب با دمای حدود ۱۹ تا ۲۳ درجه نگهداری می‌شوند.

۶- آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق

۶-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

جهت انجام این آزمایش، نمونه‌هایی مکعبی بتنی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر به تعداد طرح‌های اختلاط و برای هر طرح اختلاط،

جدول ۶- نتایج آزمایشات

مقاومت چسبندگی (kg/cm ²)	جذب آب ۲۴ ساعته	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	نمونه
۹۴.۴۱	۱.۶۱	۷۲۶	۵۰۱	۱
۹۱.۷۸	۱.۶۴	۷۳۴	۴۹۴	۲
۷۷.۹۸	۱.۷۹	۶۷۳	۴۲۰	۳
۱۱۵.۴۵	۱.۱۴	۷۱۴	۵۱۷	۴
۱۱۰.۹	۱.۲۷	۶۹۷	۴۶۰	۵
۹۸.۸۸	۱.۴۹	۷۰۳	۴۲۰	۶
۱۲۷.۷۶	۱.۰۶	۷۶۴	۵۳۵	۷
۸۹.۲۵	۱.۴۴	۷۱۱	۴۸۴	۸
۸۵.۶۹	۱.۵۹	۶۵۸	۴۲۳	۹

شکل شماره ۳ و ۴ روند تغییرات مقاومت فشاری ۷، مقاومت فشاری ۲۸، مقاومت چسبندگی بتن و میلگرد و جذب آب را در ۹ طرح اختلاط تاگچی نشان می‌دهد.

با توجه به اشکال ۳ و ۴ می‌توان مشاهده نمود که روند تغییرات در هر ۹ طرح اختلاط یکسان است و این روند را می‌توان با روند تغییرات مقاومت فشاری نسبت داد.

طرح اختلاط بهینه پیشنهادی توسط نرم افزار Qualitek-4 جهت حداکثر شدن مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی و حداقل شدن جذب آب در جدول شماره ۷ ارائه شده است. طرح اختلاط پیشنهادی بهینه و میزان انتظار از نتایج ارائه شده توسط نرم افزار در جدول شماره ۸ مشاهده می‌شود. به منظور اعتبار پیش‌بینی‌های انجام شده که در جداول مشاهده می‌شود، این نمونه تأییدی با سطوح بهینه ساخته شد و نتایج

۳-۶- آزمایش مقاومت چسبندگی بتن به میلگرد

برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتیمتر که یک عدد میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر در وسط نمونه قرار گرفته و ۱۰ سانتیمتر از میلگرد خارج از نمونه می‌باشد. بعد از ۲۸ روز عمل آوری در آب، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش میلگرد طبق استاندارد RILEM/CEB/FIP standard [۱۰] تست شده (شکل ۱) و طبق رابطه زیر، تنش برشی میان میلگرد و بتن محاسبه می‌گردد [۱۱].

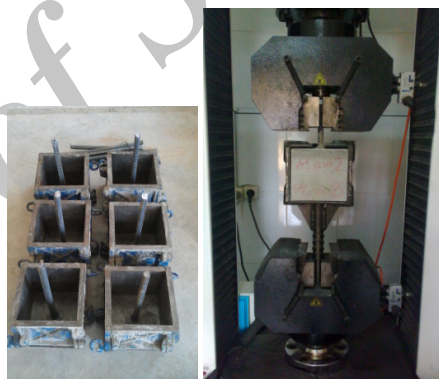
$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

که در آن:

P: نیروی کششی (kg)

d: قطر میلگرد (cm)

l: طول مدفون میلگرد (cm)

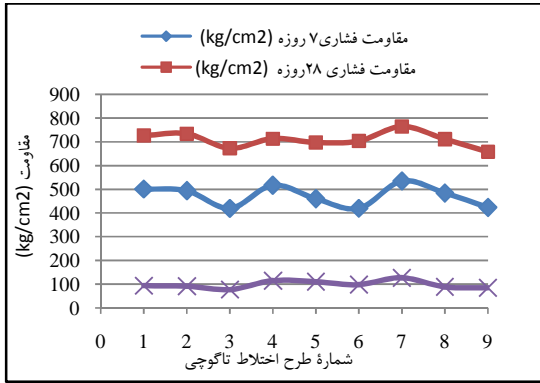


شکل ۱- نحوه قالب‌گیری و دستگاه تست کشش میلگرد

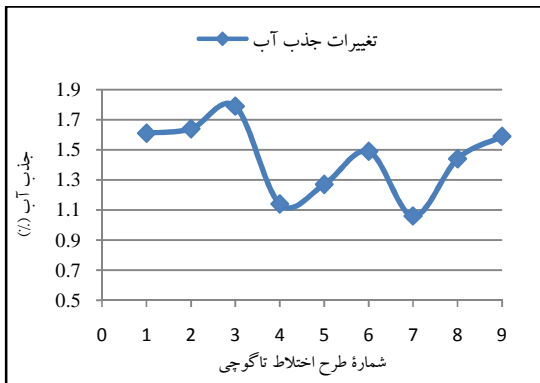
۷- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل تاگچی

بر اساس تست‌های انجام شده، مقدار نتایج از میانگین ۳ نمونه در شرایط یکسان به صورت جدول ۶ می‌باشد.

نتایج بدست آمده وارد نرم افزار (Qualitek-4) شده و میزان تاثیر هر پارامتر بر روی ویژگی‌های مقاومتی و جذب آب توسط تحلیل استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته می‌شود. در شکل ۲، تاثیر سطوح پارامترهای مختلف در بهینه شدن طرح نشان داده شده است.



شکل ۳- روند تغییرات مقاومت در ۹ طرح اختلاط تاگوچی



شکل ۴- روند تغییرات جذب آب در ۹ طرح اختلاط تاگوچی

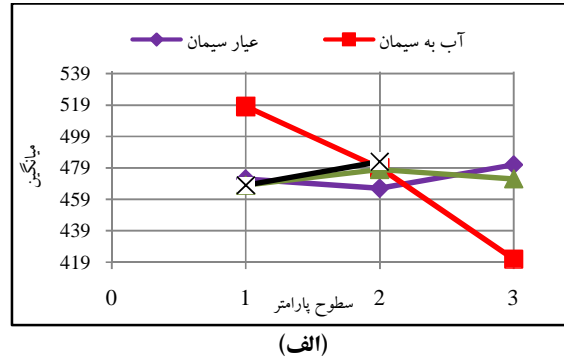
آن و میزان اختلاف طرح آزمایشگاهی و طرح نرم‌افزار در جدول ۹ ارائه شده است. همانگونه که از جدول ۹ مشاهده می‌شود، اختلاف‌های بدست آمده بین نتایج نرم‌افزار و نمونه تست شده آزمایشگاهی بسیار ناچیز است.

جدول ۷- درصد مشارکت پارامترها در بهینه شدن طرح‌های اختلاط

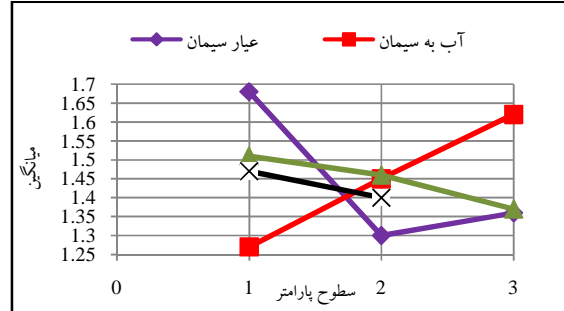
پارامترهای مؤثر	درصد مشارکت هر پارامتر در مقاومت چسبندگی	درصد مشارکت هر پارامتر در مقاومت فشاری	درصد مشارکت هر پارامتر در جذب آب
سیمان	۳۱/۲۵	۰	۵۱/۲
نسبت آب به سیمان (w/c)	۴۶/۹۶	۸۹/۳	۳۸/۴
نانوسیلیس	۹/۹۴	۰	۵/۵
میکروسیلیس	۱۰/۸۸	۱/۶۴	۲/۱

جدول ۸- طرح اختلاط بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار Qualitek-4

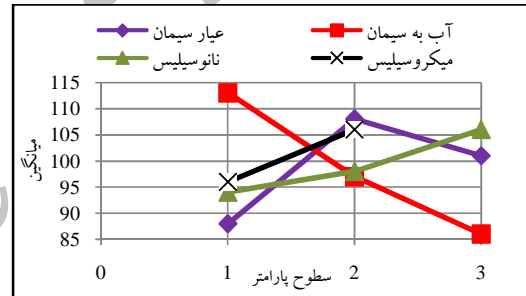
میزان مورد انتظار	درصد میکروسیلیس	درصد نانوسیلیس	نسبت آب به سیمان	عیار سیمان	حد اکثر مقاومت فشاری
۵۴۱/۳۳ kg/cm ³	%۱۰	%۱/۵	۰/۳	۴۵۰ kg/m ³	حد اکثر مقاومت چسبندگی
۱۳۵/۲۶ kg/cm ³	%۱۰	%۳	۰/۳	۴۰۰ kg/m ³	حد اقل جذب آب
%۰/۹۹۴	%۱۰	%۳	۰/۳	۴۰۰ kg/m ³	



(الف)



(ب)



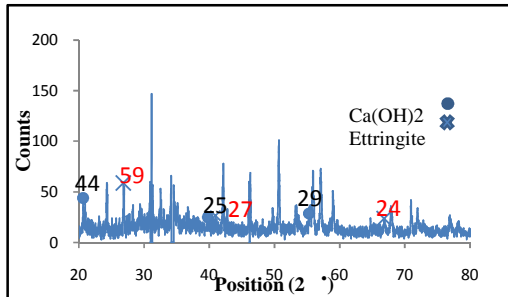
(ج)

شکل ۲- تاثیر پارامترهای اصلی در: (الف) مقاومت فشاری؛ (ب) جذب آب و (ج) مقاومت چسبندگی

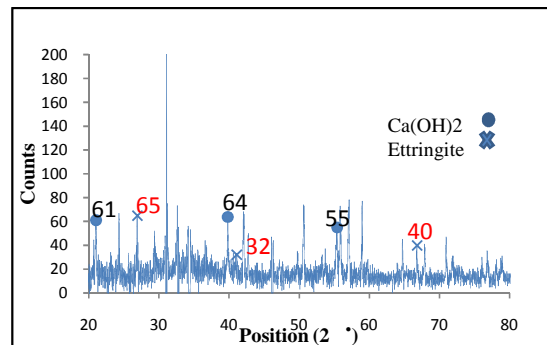
جدول ۹ - مقایسه بین طرح اختلاط بهینه پیشنهادی توسط نرم افزار Qualitek-4 و نمونه ساخته شده در آزمایشگاه

نوع آزمایش	نتیجه نرم افزار	نتیجه آزمایشگاهی	میزان اختلاف نتایج
مقاومت فشاری (۷ روزه)	۵۴۱/۳۳ kg/cm ³	۵۴۵/۴۳ kg/cm ³	٪۰/۷۵
مقاومت چسبندگی	۱۳۵/۲۶ kg/cm ³	۱۳۲/۱۱ kg/cm ³	٪۰/۲۳۳
جذب آب	٪۰/۹۹۴	٪۱/۰۲۶	٪۳/۲۱

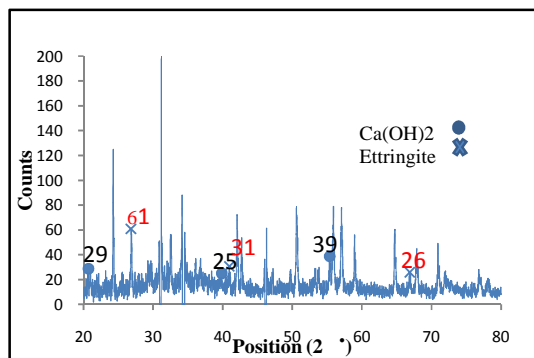
۸- نتایج آزمایش XRD



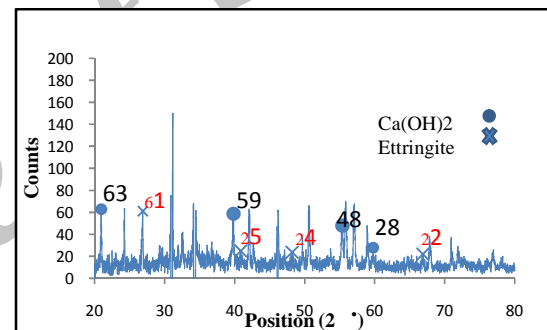
ب: نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۳ درصد نانوسیلیس (W/C=0.3)



الف- نمونه فاقد نانوسیلیس و میکروسیلیس (W/C=0.3)



ب: نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۳ درصد نانوسیلیس (W/C=0.4)



ج- نمونه فاقد نانوسیلیس و میکروسیلیس (W/C=0.4)

شکل ۵- طیف های XRD نمونه های بتنی

میکروسیلیس اندازه کریستال های Ca(OH)_2 را در محل سطح مشترک سنگدانه و ملات (ITZ) کاهش داده و ساختار این ناحیه را به شکل مؤثری ارتقاء می دهد و باعث افزایش مقاومت چسبندگی بتن و میلگرد فولادی می شود.

۹- نتیجه گیری

- ۱- افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری، چسبندگی و کاهش جذب آب در بتن می شود.
- ۲- جایگزینی نانوسیلیس کلئیدی با سیمان در بهبود

تحقیقات بتن، سال پنجم، شماره دوم ۵۱/

در اشکال ۵-الف تا د طیف های نمونه های بتنی مختلف در نسبت های آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۴ نشان داده شده است. همانطور که از اشکال بالا مشخص است، افزودن ۳ درصد نانوسیلیس نسبت به ۱۰ درصد میکروسیلیس تاثیر بیشتری در کاهش شدت پیک های هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه های بتنی دارد. در نتیجه با مصرف شدن و کاهش هیدروکسید کلسیم و تولید ژل متراکم C-S-H ساختمان سیمان متراکم تر شده و مقاومت بتن افزایش و نفوذپذیری آن به شدت کاهش می یابد. همچنین استفاده از نانوسیلیس و

Husk Ash Foamed Concrete, International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE Vol: 9, pp: 121-129, 2004.

[6] Prabir Kumar Chaulia and Reeta Das, "Process Parameter Optimization for Fly Ash Brick by Taguchi Method", Materials Research, Vol. 11, No. 2, p: 159-164, 2008.

[7] automatic design and analysis of taguchi experiments, Nutek, Inc.

[8] British Standards Institution. Testing Concrete, Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, BSI, London, BS 1881- 116, 1983.

[۹] م. جوکار و ح. رحمانی، بررسی خصوصیات مکانیکی

بتن متراکم ساخته شده با میکروسیلیس و نانوسیلیس، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.

[10] Fib, Bulltin 10, Bond of reinforcement in concrete, state of the art Report prepared by Task Group Bond Models, former CEB, Task Group 5.2.CH-1015, 2000.

[11] Yalciner, H., Eren, O. and Sensoy, S., An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level, Cement and Concrete Research, Vol.42, pp: 643-655, 2012.

۲- جایگزینی نانوسیلیس کلونیدی با سیمان در بهبود ویژگی‌های جذب و نفوذپذیری بتن نسبت به خصوصیات مقاومتی بتن مشارکت و تاثیر بیشتری دارد.

۳- نسبت آب به سیمان یکی از پارامترهای مهم در افزایش مقاومت فشاری، چسبندگی و کاهش نفوذ آب می‌باشد که نسبت به دیگر پارامترها تاثیر بیشتری دارد.

۴- مقاومت فشاری یکی از مهمترین خصوصیات مکانیکی بتن است، به طوری که طرح بهینه جهت حداکثر نمودن مقاومت فشاری منجر به حداکثر شدن مقاومت چسبندگی و حداقل شدن جذب آب می‌گردد.

۵- مقایسه بین نتایج روش تاگوچی و نتایج آزمایشگاهی میزان اعتبار روش تاگوچی در بهینه نمودن طرح‌های اختلاط بتن را نشان می‌دهد.

۶- با توجه به نتایج آزمایش XRD، وجود نانوسیلیس و میکروسیلیس در بتن سبب کاهش کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و تولید ژل متراکم C-S-H می‌شود و ریزساختار بتن را بهبود می‌بخشد، در نتیجه موجب کاهش خوردگی ناشی از واکنش سولفات‌ها و هیدروکسید کلسیم و تولید گچ می‌گردد.

۱۰- مراجع

[1] Collepari, M., Ogoumah Olagot, J., Troli, R., Simonelli, F., Combination of Silica Fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes, Enco, Engineering Concrete, Ponzano Veneto, Italy, 2007.

[2] Yen, T. Tsao, H. H. and Yu Wen, L., Influence of class F fly & silica fume on the abrasion- erosion resistance of high-strength concrete, Constructions and Building Materials, 2005.

[3] Razak, H.A. and Wong, H.S., Strength estimation model for high-strength concrete incorporating metakaolin and silica fume, Cement and Concrete Research 35, pp: 688-695, 2004.

[۴] رضانیانپور، ع.ا. و طریقت، ا.ا.، پوزولان‌ها و نقش آن‌ها در بتن سدها، چهارمین کنفرانس سدسازی، ۱۳۸۳.

[5] Nuruddin, M.F. and Bayuaji, R., Application of Taguchi's approach in the optimization of mix proportion for Microwave Incinerated Rice

Optimal Prediction of the Concrete Mixture Design Containing Nano-Silica and Micro-Silica Using Taguchi Method

S. H. Hashemi*

Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Arak University

H. R. Sedighi

MSc. of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Arak University

(Received: 2013/8/3 - Accepted: 2013/11/20)

Abstract

The current study is focused on gaining optimum concrete mixture design which contains nano-silica or micro-silica, by employing different evaluation factors such as water to the cement ratio, cement grade and different age of investigation (7 and 28 days), using a robust predictive method that is called Taguchi. Nine mixture designs are optimized by Taguchi method to achieve maximum compression strength, maximum bonding strength between concrete and rebar and minimum water absorption. Obtained mixture designs are then employed in the laboratory and the results are investigated for the optimization process. In this study the XRD test is used in addition to mechanical concrete tests and permeability test in the macro scale. Obtained results show the reliability of the Taguchi method in the prediction of the concrete mixture design.

Keywords: Taguchi Method, Compression Strength, Concrete and Bar Bonding, Permeability, Orthogonal Arrays, XRD Test.

* Corresponding Author: h-hashemi@araku.ac.ir