

An Investigation on Engineering Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete by Taguchi Method

Shahriar Abdolazade

PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Mahmoud Nili*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
nili36@yahoo.co.uk

Research paper

Abstract

In the present study, due to sustainable development and eco-friendly aims, alkali activated slag and fly ash were used as the geopolymer binder instead of cement in self-compacting concretes. The alkaline solution consisted of sodium hydroxide and sodium silicate solutions. Binder content was between 500-700 kg/m³ and water to binder (W/B) ratio varied from 0.45 to 0.48. Na₂O percentages were in the range of 5 - 7% and three ratios of coarse to fine aggregate (25/75, 30/70, 35/65) were used. Design of experiments was based on orthogonal L9 array of Taguchi methodology. A total of nine main mixes and three validation mixes were prepared. Fresh concrete characteristics and mechanical properties including compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and water absorption were evaluated. The results demonstrated that the binder content and coarse to fine aggregate ratio were the most influential parameters on the mechanical properties. The highest compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity were belonging to the mixture with low W/B ratio and higher binder content by 58 MPa, 4.5 MPa and 32 GPa, respectively. Moreover, Taguchi method has a good capability ($R^2 \geq 0.967$) to analyze and predict the mechanical properties of self-compacting geopolymer concrete.

Keyword: Self Compacting Geopolymer Concrete, Slag, Fly Ash, Modulus of Elasticity, Taguchi Method

*Corresponding Author: Mahmoud Nili

abdolazade, S., Nili, M. An investigation on Engineering properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete by Taguchi Method. Journal of Concrete Structures and Materials, 2022; 7(2): 227-246.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.389867.1313>

© ۲۰۲۱ ۱۵۸۲۸-۲۵۳۸ The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ارزیابی خصوصیات مهندسی بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری با استفاده از روش تاگوچی

شهریار عبدالله زاده

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

محمود نبیلی*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

نویسنده مسئول

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

در پژوهش حاضر در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط زیست، از سرباره و خاکستر بادی فعال شده در محیط قلیایی، به عنوان مواد چسباننده ژئوپلیمری جایگزین سیمان، در ساخت و ارتقا خصوصیات بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری استفاده گردیده است. محلول فعال ساز قلیایی حاوی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع بوده است. عیار مواد چسباننده ۵۰۰-۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به مواد چسباننده ۰/۴۵-۰/۴۸ بوده است. درصد یون سدیم ۵-۷ درصد عیار مواد چسباننده و نسبت سنگدانه درشت به ریز در سه سطح ۲۵/۷۵، ۳۰/۷۰ و ۳۵/۶۵ استفاده گردیده است. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی و براساس آرایه متعامد $L9$ بوده است. ۹ طرح مخلوط اصلی و ۳ طرح مخلوط صحت‌سنجی بتن خودتراکم ژئوپلیمری ساخته شده است. مشخصات بتن تازه و خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت‌های فشاری و کششی دونیم‌شدن، مدول الاستیسیته و جذب آب بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری ارزیابی گردیده است. عیار مواد چسباننده و نسبت سنگدانه درشت به ریز بیشترین اثر را بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های سخت شده، داشته‌اند. حداکثر مقاومت‌های فشاری و کششی دونیم‌شدن ۵۸ و ۴/۵ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۳۲ گیگاپاسکال و حداقل جذب آب ۲/۸ درصد حاصل شده است. خصوصیات مکانیکی بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری با دقت مناسبی $(R^2 \geq 0.967)$ با روش تاگوچی قابل تحلیل و پیش‌بینی بوده است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم ژئوپلیمری، سرباره، خاکستر بادی، مدول الاستیسیته، طراحی آزمایش تاگوچی

امروزه احداث سازه‌های پیچیده به‌منظور توسعه زیرساخت‌های عمرانی در سطح جهان رو به گسترش است. بتن به‌عنوان پرکاربردترین مصالح در پروژه‌های عمرانی، نقش کلیدی در اجرای چنین سازه‌هایی دارا است. بتن خودتراکم یکی از بتن‌های نوین طی دو دهه گذشته در صنعت ساخت بوده است که نیازی به تراکم در حین اجرا ندارد و از این حیث هزینه اجرایی کمتری نسبت به بتن معمولی دارد [۱]. به‌کارگیری بتن‌های خودتراکم در اجزای بتنی با تراکم زیاد میلگرد با کارایی بیشتر و با توجه به کسب مقاومت‌های فشاری و مدول الاستیسیته بیشتر از بتن معمولی، مورد توصیه محققین و پیمانکاران امور اجرایی است [۲-۴]. این نوع بتن دارای سه ویژگی اصلی قابلیت پرکردن، قابلیت عبور کردن و مقاومت در برابر جداسدگی است که کارایی آن را نسبت به بتن‌های معمولی ارتقا داده است [۳، ۶۵].

از سوی دیگر تولید سیمان به‌عنوان یکی از اجزای اصلی بتن موجب تولید ۶-۷ درصدی گازهای گلخانه‌ای جهان می‌گردد که اثرات جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست دارد [۷ و ۸]. طبق آخرین بررسی‌ها در سال ۲۰۲۰ میلادی، به ازای هر تن سیمان حدود ۰/۸۶ - ۰/۹۲ تن کربن‌دی‌اکسید تولید می‌گردد [۹]. مشکلات تولید گازهای گلخانه‌ای، کمبود منابع اولیه و صرف انرژی زیاد در فرایند تولید سیمان، محققین را بر آن داشته است تا به دنبال استفاده از مصالح جایگزین سیمان در بتن باشند [۱۰-۱۵]. ساخت بتن‌های ژئوپلیمری از جمله راه‌کارهای مهندسی است که علاوه بر ارتقا خصوصیات مکانیکی بتن، با توجه به استفاده از مواد زائد صنعتی مانند سرباره و خاکستر بادی، از جنبه حفظ محیط‌زیست نیز بسیار حائز اهمیت است [۱۵]. در بتن‌های ژئوپلیمری، ژئوپلیمراسیون مجموعه فرایندهای جداسازی سیلیس (Si) و آلومینا (Al) از ترکیب مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی مانند سرباره و خاکستر بادی در یک محیط قلیایی و سپس چینش منظم‌تر ترکیبات آلومینوسیلیکاتی (Si-O-) تحت عنوان مونومر و سخت شدن آن‌ها است [۱۰، ۱۱، ۱۷-۱۹]. خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت‌های فشاری و کششی و دوام بتن‌های ژئوپلیمری بسیار مشابه با بتن‌های معمولی و مدول الاستیسیته آن‌ها کمتر از بتن‌های معمولی گزارش شده است [۲۰ و ۲۱]. در نتایج تحقیقات مختلفی مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسکال در بتن‌های ژئوپلیمری گزارش گردیده است که در کنار کسب مقاومت کششی بالا در سنین اولیه، می‌تواند از مزیت‌های به‌کارگیری این نوع بتن در ساخت تیر و ستون‌های بتنی باشد [۲۲-۲۵]. البته عوامل متعددی بر رفتار مکانیکی بتن‌های ژئوپلیمری تأثیرگذارند. مهمترین عامل در کسب مقاومت فشاری، مقدار و نوع ماده اولیه آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده است؛ به طوری که افزودن سرباره به ترکیب ژئوپلیمری حاوی خاکستر بادی، ارتقا مقاومت فشاری بتن خودتراکم ژئوپلیمری را به دنبال داشته است [۲۷ و ۲۸]. همچنین با تغییر نوع مواد فعال ساز از سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید، افت مقاومت فشاری و کارایی گزارش شده است [۲۹]. ضمن آن که تأثیر درصد یون سدیم بر مقاومت فشاری و کششی بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری از اثر آب به مواد چسباننده، بارزتر گزارش شده است [۲۷]. با توجه تحقیقات صورت گرفته، تلاش برای استفاده از مواد ژئوپلیمری در بتن‌های خودتراکم ایده مناسبی است که علاوه بر بهبود شرایط زیست‌محیطی با کاهش تولید کربن‌دی‌اکسید به میزان بیش از ۳۰ درصد نسبت به بتن معمولی، از خصوصیات ویژه خودتراکمی بتن که منجر به ارتقا خصوصیات مکانیکی می‌گردد نیز، بهره می‌گیرد [۷، ۲۶، ۲۹ و ۳۰].

علیرغم نیاز به اجرای سریع و ایمن سازه‌های بتنی با تراکم میلگرد زیاد و لزوم رعایت حفاظت از محیط‌زیست، هنوز به‌کارگیری بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری محدود می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر سعی بر آن است که بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری از طریق فعال‌سازی سرباره کوره بلند آهن‌گدازی و استفاده هم‌زمان از خاکستر بادی ساخته شده و خصوصیات بتن تازه و خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و همچنین نفوذپذیری این نوع بتن ارزیابی گردد.

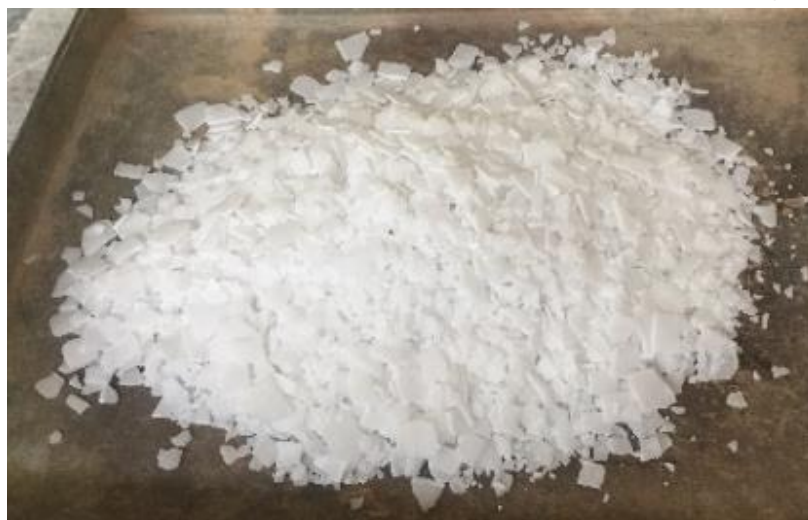
۲- مواد و مصالح

از سرباره کوره بلند آهن‌گذاری ذوب‌آهن اصفهان (سرباره) برای ساخت مخلوط‌های ژئوپلیمری در این پژوهش استفاده گردیده است. بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره، زمان گیرش کوتاهی در پیش‌ساخت‌های آزمایشگاهی داشته‌اند. لذا از خاکستر بادی (FA) کلاس F بر اساس ASTM C618 [۳۳] محصول کشور آفریقای جنوبی، به میزان ۱۵ درصد جایگزین سرباره در هر مخلوط به منظور اصلاح خصوصیات بتن تازه و سخت‌شده استفاده گردیده است. ذرات کروی شکل خاکستربادی، کارایی بتن‌های ژئوپلیمری را افزایش می‌دهد [۳۴]. سطح ویژه سرباره و خاکستربادی به ترتیب برابر با ۴۲۰۰ و ۲۹۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و چگالی سرباره و خاکستربادی نیز به ترتیب ۲/۹۰ و ۲/۳۵ بوده است. ترکیب شیمیایی سرباره و خاکستربادی مورد استفاده بر اساس اطلاعات شرکت‌های تولید کننده، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سرباره و خاکستر بادی (%)

نام	ترکیب شیمیایی	سرباره	خاکستربادی
اکسید کلسیم	CaO	۳۷/۷۷	۰/۷۹
اکسید سیلیسیم	SiO ₂	۳۷/۹۴	۶۲/۸۶
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃	۱۱/۰۱	۲۸/۲۴
اکسید منیزیم	MgO	۹/۰۳	۰/۸۲
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	۰/۴۵	۳/۷۸
اکسید سدیم	Na ₂ O	۰/۶۳	۱/۱۳
اکسید پتاسیم	K ₂ O	۰/۶۶	۰/۱۳
اکسید گوگرد	SO ₃	۰/۲۶	.
افت ناشی از احتراق (LOI)	.	۰/۰۲	۱/۲۰

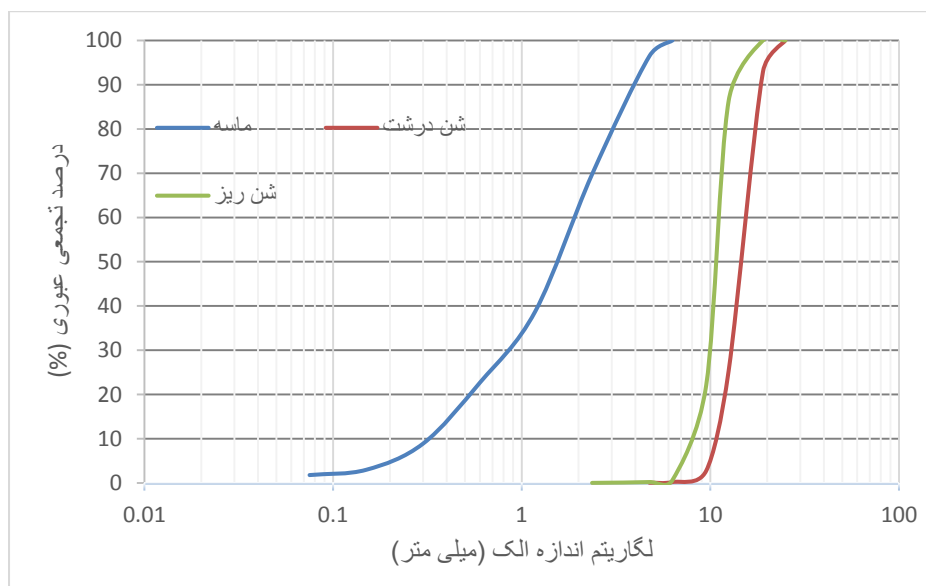
فعال‌سازی شیمیایی سرباره و خاکستر بادی با مخلوطی از سدیم هیدروکسید (NaOH) محلول در آب و سدیم سیلیکات مایع (Na₂SiO₃) به‌عنوان محلول قلیایی، انجام گرفته است. ذرات پولکی شکل NaOH دارای خلوص ۹۹ درصدی بوده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱- ذرات پولکی شکل سدیم هیدروکسید

در این پژوهش، Na₂SiO₃ مورد استفاده، حاوی (۱۴/۴٪ Na₂O + ۳۴/۶٪ SiO₂ + ۵۱٪ H₂O) و دارای چگالی ۱۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. به‌منظور جلوگیری از گیرش سریع و آزادسازی گرمای ناشی از انحلال،

پولک‌های $NaOH$ یک روز قبل از ساخت بتن، در آب حل شده‌اند. مجموع Na_2O موجود در محلول $NaOH$ و محلول Na_2SiO_3 در سه رده ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی عیار مواد چسباننده (سربراره و خاکستر بادی) در نظر گرفته شده است. مدول فعال‌ساز، حاصل نسبت اکسید سیلیس به اکسید سدیم (SiO_2/Na_2O)، در همه مخلوط‌ها برابر ۱ بوده است. نسبت خالص آب به مواد چسباننده در محدوده ۰/۴۵-۰/۴۸ در نظر گرفته شده است. همچنین آب موجود در محلول‌های $NaOH$ و Na_2SiO_3 به‌عنوان بخشی از کل آب در طرح‌های مخلوط در نظر گرفته شده است. از ماسه رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳/۶ و شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر طبق استاندارد $ASTM C33$ [۳۵] به‌ترتیب به‌عنوان سنگدانه‌های ریز و درشت استفاده گردیده است. به‌منظور تأمین لزجت کافی در مخلوط‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری، ۵ درصد وزنی سنگدانه ریز با پودر سنگ آهکی جایگزین گردیده است. نمودار دانه‌بندی مصالح و مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

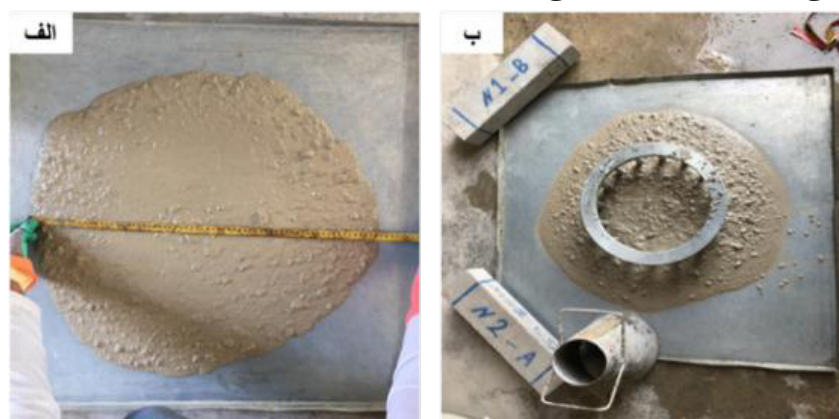
۲- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها جدول

ماسه	پودر سنگ	شن		سنگدانه
		۲/۳۶-۱۲/۵ (میلی‌متر)	۹/۵-۱۹ (میلی‌متر)	
۲/۵۸	۲/۷۱	۲/۶۶	۲/۶۷	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
۲/۴۶	.	۰/۳	۰/۲۵	جذب آب (درصد)

۳- طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری

در این تحقیق تأثیر چهار عامل بر عملکرد بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری در حالت تازه و سخت شده، مورد ارزیابی گردیده است. مجموع مواد چسباننده بتن شامل سربراره و خاکستر بادی ($Binder$)، درصد اکسید سدیم محلول فعال‌ساز (Na_2O)، نسبت آب به مواد چسباننده (W/B) و نسبت وزنی سنگدانه درشت به ریز (C/F)، به‌عنوان تأثیرگذارترین عوامل در رفتار مخلوط‌های خودتراکم ژئوپلیمری در نظر گرفته شده است. همچنین به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و توسعه مخلوط‌های بتنی از روش تاگوچی استفاده شده است [۳۶]. روش تاگوچی یک روش طراحی آزمایش است که با کاهش تعداد آزمایش‌ها، می‌توان اطلاعات مفیدی را با استفاده از نتایج آن

در قطعات بتنی با تراکم آرماتور زیاد را امکان‌پذیر دانست. نسبت آب به مواد چسباننده مؤثرترین عامل بر خصوصیات بتن تازه در مخلوط‌های خودتراکم ژئوپلیمری بوده است. افزایش نسبت W/B از ۰/۴۵ به ۰/۴۸ قطر پخش شدگی را افزایش داده است. البته میزان افزایش بسته به میزان عیار مواد چسباننده و سایر عوامل متغییر بوده است. در طرح‌های حاوی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد چسباننده پخش‌شدگی تغییر بیشتری را داشته است. طرح‌های مخلوط حاوی مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با مقدار ژل بیشتر، توزیع یکنواخت‌تری داشته و اختلاف ارتفاع در آزمایش حلقه جی در این طرح‌ها نسبت به طرح‌های حاوی ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد چسباننده، کاهش داشته است. همچنین نسبت C/F کمتر به دلیل حضور بیشتر ریزدانه در مخلوط بتن تازه، موجب ارتقا قابلیت عبور بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری گردیده است. انسجام مناسب بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری قبل از قالب‌گیری و عدم جداشدگی از جمله خصوصیات مناسب در حالت بتن تازه بوده است. وجود سدیم سیلیکات با توجه به تجزیه بیشتر ذرات سرپاره و خاکستریادی، چسبندگی بیشتری را به دنبال داشته است که می‌تواند عامل مهمی در جلوگیری از جداشدگی باشد.



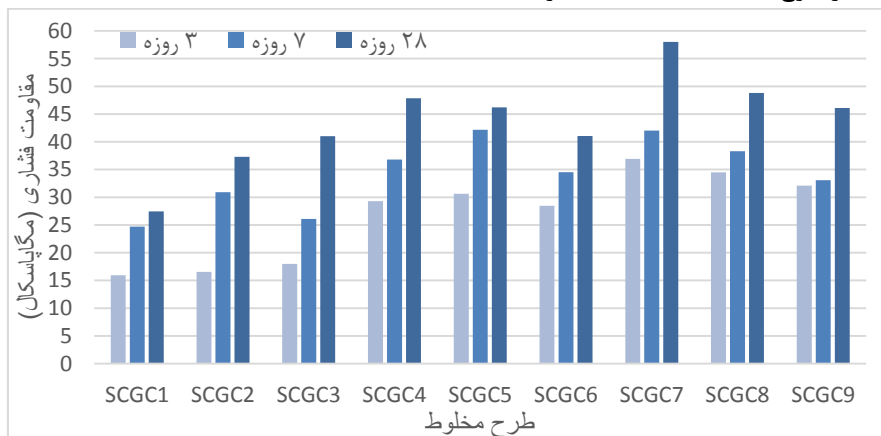
شکل ۳- توزیع یکنواخت بتن تازه خودتراکم ژئوپلیمری (SCGC4)

جدول ۶- نتایج کارایی بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری

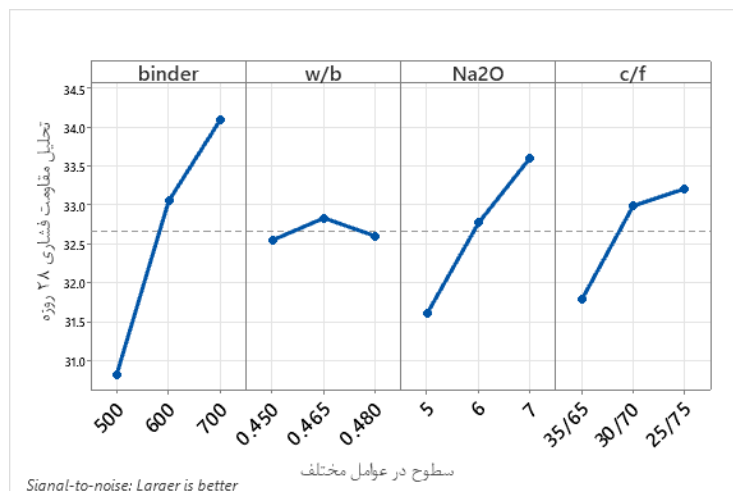
شاخص جداشدگی چشمی	J-ring (میلی‌متر)	T 50 (ثانیه)	Slump flow (میلی‌متر)	طرح مخلوط
۰	۸	۴/۶	۶۷۷	SCGC 1
۰	۸	۴/۲	۶۹۲	SCGC 2
۰	۵	۳/۳	۷۴۵	SCGC 3
۰	۶	۴/۳	۶۸۹	SCGC 4
۰	۷	۳/۷	۶۷۱	SCGC 5
۰	۴	۳/۵	۷۵۶	SCGC 6
۰	۵	۳/۹	۷۰۱	SCGC 7
۰	۴	۴/۲	۷۳۸	SCGC 8
۰	۶	۴/۱	۷۳۱	SCGC 9
۰	۹	۴/۶	۷۰۴	SCGC 10
۰	۷	۴/۲	۷۲۴	SCGC 11
۰	۶	۳/۳	۶۶۸	SCGC 12
	۰-۱۰	۲-۵	۸۰۰-۶۵۰	محدوده EFNARC

۲-۴- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل ۴ نشان داده شده است. مقاومت فشاری به‌خصوص در طرح‌های حاوی عیار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، رشد مناسبی را تا سن ۲۸ روز داشته‌اند. کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری در تحقیقات مختلفی، مناسب گزارش شده است [۴۱ و ۴۲]. ادامه روند صعودی کسب مقاومت فشاری آن‌ها، نیاز به محیط مرطوب بیشتر برای ادامه فرایند ژئوپلیمراسیون در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری را نشان داده است. بیشترین مقاومت فشاری در طرح SCGC7، با عیار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شده است. حجم ژل بیشتر در این طرح نسبت به طرح‌های مخلوط با عیار ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، عامل اصلی کسب مقاومت فشاری ۵۸ مگاپاسکال بوده است. در حجم ژل بیشتر، مقدار بیشتر مواد فعال‌ساز باعث افزایش فعالیت سرباره و خاکسترپادی و در نتیجه تشکیل ساختار متراکم‌تر ژئوپلیمری می‌گردد. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل نرم‌افزاری تأثیر سطوح عوامل مختلف در حالت تحلیل (S/N) بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، تأثیرگذارترین عوامل بر مقاومت فشاری به ترتیب عیار مواد چسباننده ($Binder$)، درصد Na_2O ، نسبت C/F و نسبت W/B ارزیابی گردیده‌اند. همان‌طور که از نتایج شکل ۵ مشخص است، وجود خمیر بیشتر در ترکیب بتنی، عامل اصلی ایجاد چسبندگی و کسب مقاومت فشاری است. همچنین ترکیب ریزتر سنگدانه‌ها ($C/F=25/75$) اثر مثبتی بر کسب مقاومت فشاری داشته است. با توجه به سطح ویژه بیشتر در سنگدانه ریزتر، تماس بیشتری بین خمیر ژئوپلیمری و سطح سنگدانه‌ها برقرار شده و این امر موجب ارتقا مقاومت فشاری در طرح‌های با $C/F=25/75$ گردیده است.



شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری



شکل ۵- بررسی تأثیر سطوح عوامل مختلف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه در تحلیل S/N

نشریه علمی مصالح و سازه‌های بتنی، انجمن علمی بتن ایران سال هفتم، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۱

با تحلیل به روش سیگنال به نویز (S/N)، روابط رگرسیونی به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری و سایر خصوصیات مکانیکی در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری قابل ارائه است [۳۶، ۲۷ و ۴۳]. براساس نتایج تحقیق حاضر مقاومت فشاری سنین ۳ تا ۲۸ روز بر اساس عوامل متغییر با استفاده از روابط ۱ تا ۳ قابل پیش‌بینی است. به منظور ارزیابی دقت معادلات رگرسیونی نیز نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی طرح‌های صحت‌سنجی در جدول ۷ ارائه گردیده است. در روابط ۱-۳، (f_c) مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال در سنین مختلف است. همان‌طور که از روابط ۱-۳ مشخص است مشابه با خصوصیات بتن‌های معمولی افزایش نسبت آب به مواد چسباننده تأثیر منفی بر مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری در سنین مختلف داشته است. مقادیر R^2 در جدول ۷ حاکی از آن است که روابط ارائه شده جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری از دقت مناسبی برخوردار می‌باشند.

$$(1) \quad f_c = -12.1 + 0.0884 \text{ Binder} - 39.6 \text{ W/B} + 1.10 \text{ Na}_2\text{O} - 5.1 \text{ C/F} \quad (\text{روزه } 3)$$

$$(2) \quad f_c = 41.6 + 0.0528 \text{ Binder} - 109 \text{ W/B} + 2.12 \text{ Na}_2\text{O} - 2.4 \text{ C/F} \quad (\text{روزه } 7)$$

$$(3) \quad f_c = 7.9 + 0.07857 \text{ Binder} - 57.4 \text{ W/B} + 4.655 \text{ Na}_2\text{O} - 28.81 \text{ C/F} \quad (\text{روزه } 28)$$

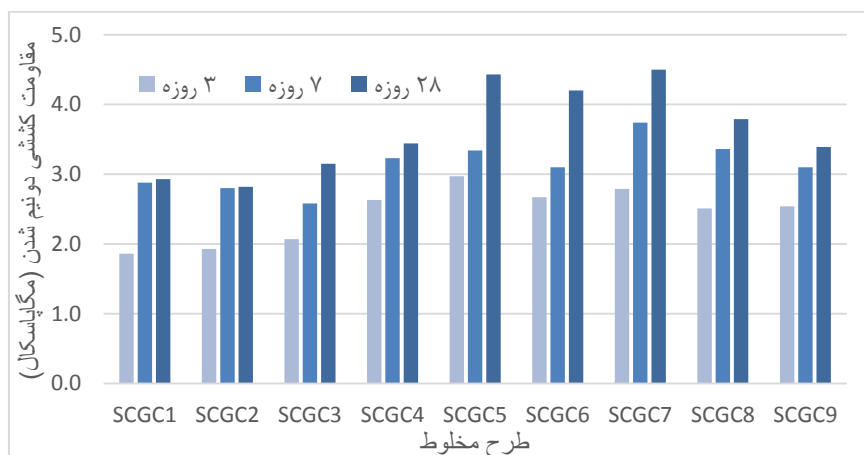
جدول ۷- صحت سنجی روابط پیش‌بینی نتایج مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

مقاومت فشاری ۳ روزه			مقاومت فشاری ۷ روزه			مقاومت فشاری ۲۸ روزه			طرح مخلوط
پیش‌بینی	آزمایشگاه	R^2	پیش‌بینی	آزمایشگاه	R^2	پیش‌بینی	آزمایشگاه	R^2	
۱۵/۸	۱۶/۱		۲۴/۹	۲۵/۵		۲۷/۳	۲۸/۹		SCGC10
۲۶/۹	۲۸/۲	۰/۹۸۹	۳۴/۳	۳۶/۲	۰/۹۸۳	۴۳/۹	۴۲/۳	۰/۹۸۶	SCGC11
۳۷/۹	۳۶/۶		۴۳/۶	۴۲/۹		۶۰/۱	۶۲/۱		SCGC12

۴-۴- مقاومت کششی دونیم‌شدن^۱

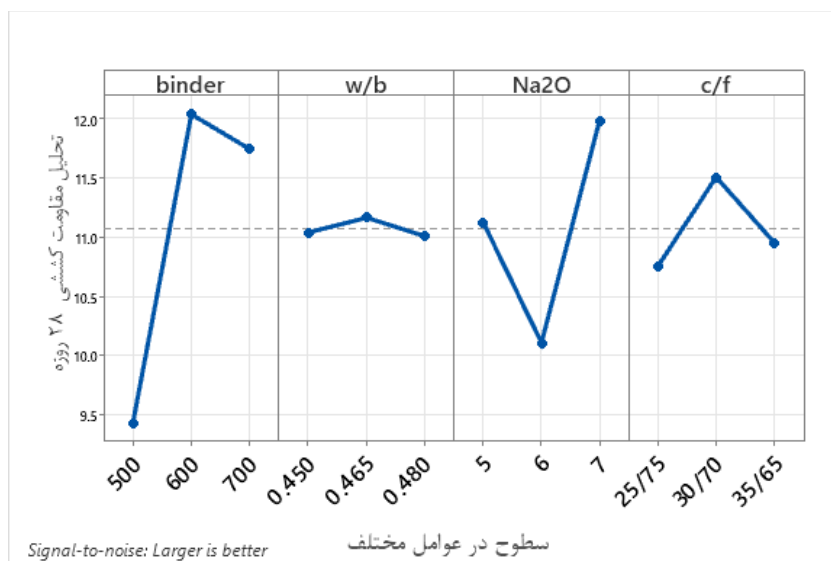
عمده ترک‌خوردگی‌های سطحی در قطعات بتنی مربوط به مقاومت کششی ضعیف بتن است. ترک‌خوردگی می‌تواند دوام و عمر مفید سازه را تهدید کند. لذا مقاومت کششی مناسب بتن با جلوگیری از ترک‌خوردگی و یا کاهش عرض ترک از ویژگی‌های مهم بتن سخت شده است. نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن، که در ادامه مقاومت کششی ذکر گردیده است، بر اساس $ASTM C496$ [۴۳] برای طرح‌های مخلوط در شکل ۶ آمده است. در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری، در سن ۳ روز به دلیل تشکیل سریع ترکیبات ژئوپلیمری کسب مقاومت کششی ۲/۹۷ مگاپاسکال گزارش شده است. بیشترین مقاومت کششی ۴/۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز برای طرح SCGC7 با عیار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و فعال‌ساز با درصد یون سدیم ۷ درصد گزارش شده است. در هر سه عیار مواد چسباننده ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۷ درصد Na_2O برای کسب مقاومت کششی الزامی بوده است. نتایج حاکی از آن است که محیط قلیایی با غلظت بیشتر موجب افزایش فعالیت سرباره و خاکستریادی و در نتیجه ارتقا مقاومت‌های فشاری و کششی گردیده است.

¹ Splitting tensile strength



شکل ۶- مقاومت کششی طرح‌های مخلوط خودتراکم ژئوپلیمری

تحلیل تأثیر سطوح مختلف بر مقاومت کششی نیز ارزیابی و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد نسبت C/F در نتایج مقاومت کششی نسبت به نتایج مقاومت فشاری تأثیر مهم‌تری داشته است. لذا یافتن نسبت بهینه‌ای از دانه‌بندی سنگدانه‌ها در ساخت بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری ضروری به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر طرح‌های با $C/F = ۳۰/۷۰$ بیشترین مقاومت‌های کششی را در پی داشته‌اند. دلیل عمده افت مقاومت کششی در برخی از طرح‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری عدم فعالیت کامل سرباره و خاکستر بادی به دلیل ناکافی بودن محیط قلیایی بوده است. در واقع افزایش عیار مواد چسباننده نمی‌تواند به‌تنهایی عاملی برای کسب مقاومت کششی بیشتر در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری باشد. لذا محیط قلیایی کافی باید برای فعال کردن سرباره و افزایش مقاومت کششی، فراهم باشد [۴۳].



شکل ۷- بررسی تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت کششی ۲۸ روزه

تحلیل استاتیکی پیش‌بینی مقاومت کششی برای طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ژئوپلیمری انجام و نتیجه آن در روابط ۴-۶ آورده شده است. همچنین دقت نتایج پیش‌بینی و آزمایشگاهی نیز در جدول ۸ ارائه گردیده است. مشابه با روابط پیش‌بینی مقاومت فشاری، نقش مفید افزایش خمیر چسباننده و اثر منفی افزایش W/B در کسب مقاومت‌های کششی مشهود است. در روابط ۴-۶، ft مقاومت کششی دونیم‌شدن برحسب مگاپاسکال است.

$$(ft = -0.44 + 0.0033 \text{ Binder} + 0.001 \text{ W/B} + 0.132 \text{ Na}_2\text{O} + 0.25 \text{ C/F}) \quad (4)$$

$$(ft = 6.30 + 0.0032 \text{ Binder} - 11.89 \text{ W/B} + 0.053 \text{ Na}_2\text{O} + 0.218 \text{ C/F}) \quad (5)$$

$$(ft = 0.13 + 0.00463 \text{ Binder} - 1.4 \text{ W/B} + 0.193 \text{ Na}_2\text{O} + 0.54 \text{ C/F}) \quad (6)$$

جدول ۸- صحت سنجی روابط پیش‌بینی نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن (مگاپاسکال)

طرح مخلوط	مقاومت کششی ۲۸ روزه		مقاومت کششی ۷ روزه		مقاومت کششی ۳ روزه	
	R ²	آزمایشگاه	پیش‌بینی	آزمایشگاه	R ²	پیش‌بینی
SCGC10	۳/۱	۳	۲/۳	۲/۶	۱/۹	۲/۰
SCGC11	۰/۹۶۷	۳/۵	۲/۹	۳/۱	۰/۹۸۶	۲/۴
SCGC12	۴/۴	۴/۳	۳/۸	۳/۶	۲/۹	۲/۸

مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته بتن‌ها در سن ۲۸ روز طبق استاندارد *ASTM C469* [۴۵] و بر اساس تنش و کرنش‌های ثبت شده مطابق رابطه ۷ محاسبه و نتایج در جدول ۹ ارائه شده است.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (7)$$

E مدول الاستیسیته، S_1 و S_2 به ترتیب تنش در محل کرنش 0.00005 و تنش در محل 40 درصد مقاومت نهایی و ε_2 مقدار کرنش در محل تنش S_2 است.

جدول ۹- نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)

طرح مخلوط	SCGC1	SCGC2	SCGC3	SCGC4	SCGC5	SCGC6	SCGC7	SCGC8	SCGC9
مدول الاستیسیته	۲۲/۱۲	۲۵/۳۱	۲۶/۷۴	۲۸/۶۵	۲۸/۳۳	۲۶/۱۸	۳۲/۱۹	۲۹/۴۷	۲۹/۴۵

مدول الاستیسیته طرح‌های مخلوط بتنی در محدوده ۲۲/۱۲ - ۳۲/۱۹ گیگاپاسکال است. افزایش عیار مواد چسباننده به ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و محیط فلیایی با ۷ درصد Na_2O در طرح مخلوط *SCGC7* با تشکیل خمیر ژئوپلیمری بیشتر نسبت به سایر طرح‌های مخلوط موجب ارتقا مدول الاستیسیته شده است. همچنین افزایش نسبت آب به مواد چسباننده از ۰/۴۵ به ۰/۴۸ نیز مشابه نتایج مقاومت فشاری و کششی، کاهش مدول الاستیسیته را به دنبال داشته است. مدول الاستیسیته مشخصه مهمی در تحلیل و طراحی سازه‌ها است و در تحقیقات مختلفی مدول الاستیسیته بتن‌های ژئوپلیمری از بتن‌های معمولی کمتر گزارش شده است [۴۶، ۴۷]. به منظور مقایسه نتایج با استفاده از روابط ۸ و ۹ ارائه شده در آیین‌نامه‌های *ACI 318* [۴۸] و *CEB-FIP* [۴۹] نیز مدول الاستیسیته بتن‌های ژئوپلیمری ارزیابی گردیده است.

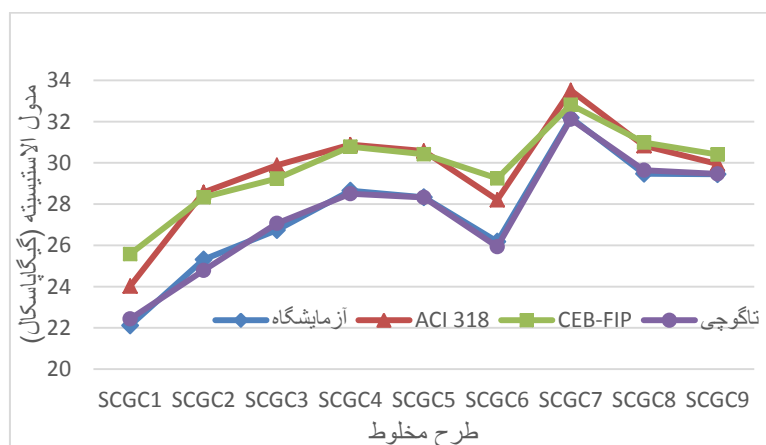
$$E = 0.043 \times Wc^{1.5} \times f_c^{0.5} \quad (8)$$

$$E = 0.85 \times 2.15 \times 10^4 \times \left(\frac{f_c}{10}\right)^{1/3} \quad (9)$$

همچنین با استفاده از تحلیل S/N روش تاگوچی نیز رابطه ۱۰ به منظور پیش‌بینی مدول الاستیسیته ارائه گردیده است.

$$E = 7.66 + 0.02823 \text{ Binder} - 6.6 \text{ W/B} + 1.582 \text{ Na}_2\text{O} - 7.93 \text{ C/F} \quad (10)$$

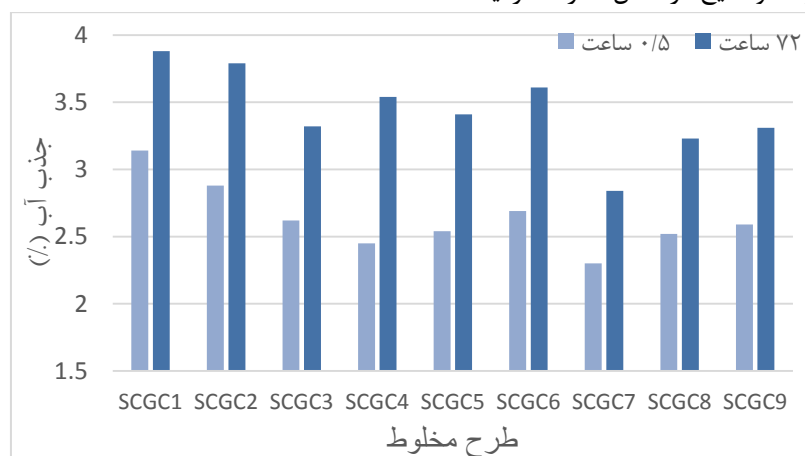
در روابط فوق، (E) مدول الاستیسیته، (f_c) مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن و (W/c) وزن مخصوص بتن می‌باشند. نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی با روش‌های مختلف در شکل ۸ آمده است. بیشترین مدول الاستیسیته در طرح SCGC7 حاصل شده است. در بین عوامل مورد بررسی، ژل چسباننده شامل سربراره و خاکستر بادی فعال شده بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیسیته طرح‌های مخلوط داشته‌اند. حضور یون Si در محیط قلیایی ژل چسباننده حاوی سدیم سیلیکات عامل ارتقا مدول الاستیسیته در طرح‌های مخلوط است [۴۷]. آیین‌نامه‌های $ACI 318$ [۴۸] و $CEB-FIP$ [۴۹] مدول الاستیسیته در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری را به طور متوسط، به ترتیب حدود $7/8$ و $7/4$ درصد بیشتر ارزیابی کرده است. اما مدل پیش‌بینی ارائه شده در رابطه ۱۰ دقت بیشتری ($R^2=0/985$) را داشته است. البته به منظور تعیین دقیق مدول الاستیسیته بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری نیاز به بررسی‌های بیشتری می‌باشد.



شکل ۸- ارزیابی مدول الاستیسیته طرح‌های مخلوط با روابط مختلف و نتایج آزمایشگاهی

۴-۵- جذب آب

جذب آب نقش مهمی در حفظ سرویس‌دهی و دوام قطعات بتنی دارد. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی نفوذپذیری در بتن‌های سخت شده، بررسی میزان جذب آب بر اساس $ASTM C642$ [۵۱] بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی صورت گرفته و نتایج در شکل ۹ ارائه گردیده است.

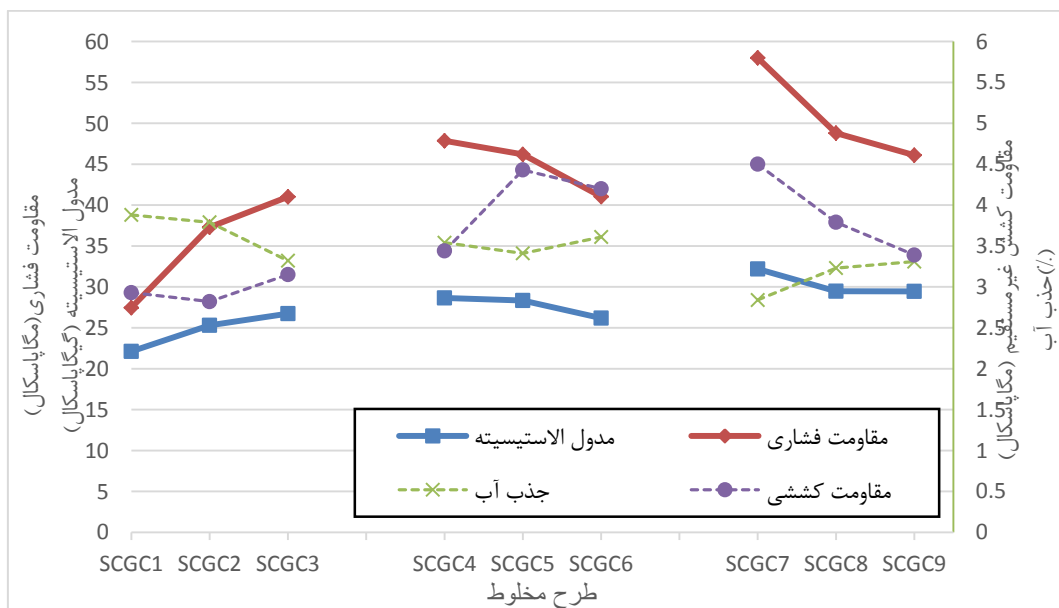


شکل ۹- جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری

طرح SCGC1 حداکثر جذب آب در بین طرح‌های مخلوط را داشته است. افزایش میزان مواد چسباننده بر کاهش تخلخل بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری بسیار مؤثر بوده و به دلیل پر شدن بیشتر حفرات از مواد ژئوپلیمری، میزان جذب آب کاهش یافته است. کمترین جذب آب در طرح مخلوط‌های با عیار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است. در عیار مواد چسباننده ثابت، افزایش درصد یون سدیم فعال‌ساز به دلیل افزایش یون هیدروکسید (OH^-) و فعال‌سازی بیشتر سرباره و خاکستر بادی نقش مهمی در بهبود تخلخل و کاهش جذب آب بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری دارد. طرح مخلوط SCGC7، بهترین نتایج جذب آب را در بین طرح‌های مختلف داشته است. تراکم بالای ساختار ژئوپلیمری که در مطالعات زیادی گزارش شده است، عامل اصلی کاهش جذب آب در طرح SCGC7 است [۵۲-۵۴].

با بررسی نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تحلیل k/N ، بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری به عنوان بتنی مدرن و دوست‌دار محیط‌زیست می‌تواند در سازه‌های بتنی قابل استفاده باشد. نتایج حاصل از مشخصات مکانیکی و جذب آب در تحقیق حاضر، در نمودار شکل ۱۰ به منظور ارتباط بین نتایج بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری ارائه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تغییر مشخصات هر طرح مخلوط میزان تأثیر متفاوتی بر نتایج خصوصیات مهندسی طرح‌های مخلوط داشته است. در طرح‌های مخلوط بتنی، اختلاف بین حداکثر و حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه حدود ۵۲ درصد است. درحالی‌که حداکثر و حداقل مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به ترتیب حدود ۳۱ و ۳۷ درصد اختلاف داشته‌اند. جذب آب طرح‌های مخلوط بتنی روندی مخالف با سایر مشخصات مکانیکی مورد ارزیابی داشته‌اند. جذب آب کمتر حاکی از تخلخل کمتر و ساختار ژئوپلیمری متراکم‌تر و متعاقب آن خصوصیات مکانیکی مناسب‌تر در طرح‌های مخلوط بتنی بوده است. بررسی عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات مهندسی بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری، حاکی از آن است با افزایش عیار مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و افزایش غلظت محیط قلیایی، ذرات فعال‌شده سرباره و خاکستر بادی، ساختار متراکم‌تری در خمیر ژئوپلیمری تشکیل شده که موجب کسب مقاومت‌های فشاری و کششی اولیه بیشتر، مدول الاستیسیته بیشتر و جذب آب کمتر گردیده است. مطابق نتایج شکل ۱۰، خصوصیات مهندسی طرح‌های حاوی عیار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، حساسیت بیشتری به تغییر مشخصات در طرح‌های مخلوط داشته‌اند. کاهش غلظت محیط قلیایی با کاهش درصد یون سدیم از ۵ به ۷ درصد در طرح‌های مخلوط SCGC8 و SCGC9 نسبت به SCGC7، با افت ۲۰ درصدی مقاومت فشاری، ۲۴ درصدی مقاومت کششی و ۸ درصدی مدول الاستیسیته همراه بوده است. این موضوع اهمیت تأمین محیط قلیایی کافی برای فعال‌سازی حداکثری ذرات سرباره و خاکستر بادی را نیز نشان داده است.

با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و ارزیابی نتایج مبتنی بر روش تاگوچی به منظور تأمین خصوصیات مکانیکی مناسب، طرح مخلوط بهینه‌ای در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری، با حداکثر عیار مواد چسباننده (۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و محیط قلیایی کافی (۷٪ یون سدیم)، به همراه حداقل نسبت آب به مواد چسباننده با در نظر داشتن لزوم حفظ کارایی و بافت ریزتر در دانه‌بندی سنگدانه قابل استنتاج است. با توجه تعدد عوامل تأثیرگذار، استفاده از روش تاگوچی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌های ساخت، دقت مناسبی در پیش‌بینی نتایج حاصل شده بر مبنای عوامل در نظر گرفته شده، داشته است.



شکل ۱۰- روند تغییرات خصوصیات مکانیکی طرح‌های مخلوط بتنی

۶-۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر خصوصیات حالت تازه و سخت شده طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی سرباره و خاکستریادی فعال شده، در راستای توسعه پایدار و کمک به حفظ محیط‌زیست با به‌کارگیری طراحی آزمایش به روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل شده، استفاده از این نوع بتن برای اجرای قطعات بتنی امکان‌پذیر است. در قالب مطالعه حاضر نتیجه‌گیری ذیل قابل ارائه می‌باشد:

- خواص روانی کلیه طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ژئوپلیمری مطالعه حاضر در محدوده *EFNARC* بوده است. در این رابطه نسبت آب به مواد چسباننده و نسبت سنگدانه‌های درشت به ریز، بیشترین اثر را بر قابلیت‌های پرکنندگی و عبور بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری داشته‌اند.
- حداکثر مقاومت فشاری و کششی دونیم‌شدن متعلق به طرح‌های حاوی ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مواد چسباننده و محیط قلیایی با میزان یون سدیم ۷ درصد بوده است. نسبت مقاومت کششی به فشاری در محدوده ۷ تا ۱۱ درصد بوده است.
- نسبت آب به مواد سیمانی کمترین اثر و عیار مواد چسباننده بیشترین تأثیر را بین عوامل مختلف بر کسب مقاومت‌های فشاری و کششی دونیم‌شدن و مدول الاستیسیته در بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری داشته است.
- کمترین جذب آب متعلق به طرح حاوی ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد چسباننده و نسبت سنگدانه درشت به ریز (C/F) برابر با ۲۵/۷۵ بوده است. این نتیجه می‌تواند به دلیل میزان خمیر ژئوپلیمری بیشتر و بافت ریزتر بتن باشد.
- روابط رگرسیونی ارائه شده برای پیش‌بینی خصوصیات بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری، دقت مناسبی در پیش‌بینی مشخصات مقاومتی و مدول الاستیسیته نسبت به روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف داشته‌اند.
- به‌کارگیری روش تاگوچی در مطالعه حاضر روشی مناسب جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها، تعیین طرح مخلوط بهینه و پیش‌بینی خصوصیات بتن‌های خودتراکم ژئوپلیمری ارزیابی می‌گردد.

۵- قدردانی

با توجه ساخت و استفاده از امکانات آزمایشگاهی در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن و مواد سازه‌ای دانشگاه بوعلی سینا، ناشران مقاله حاضر، کمال تشکر را از مسئولین محترم آن مجموعه دارند.

1. Suji, D., Adesina, A., & Mirdula, R. (2021). Optimization of self-compacting composite composition using Taguchi-Grey relational analysis. *Materialia*, 15, 101027.
2. De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 279-291.
3. Ghorbankhani, A. H., & Nili, M. (2022). Experimental and numerical assessment of thermal properties of self-compacting mass concrete at early ages. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(16), 8194-8211.
4. Nehdi, M. L. (2013). Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings. *Construction and Building Materials*, 48, 80-90.
5. ACI Committee 237R-07 (2007), *Self-Consolidating Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice.
6. Jau, W. C., & Yang, C. T. (2010). Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 450-460.
7. Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *cement and concrete research*, 37(12), 1590-1597.
8. He, X., Zheng, Z., Ma, M., Su, Y., Yang, J., Tan, H., ... & Strnad, B. (2020). New treatment technology: The use of wet-milling concrete slurry waste to substitute cement. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118347.
9. Prakasan, S., Palaniappan, S., & Gettu, R. (2020). Study of energy use and CO 2 Emissions in the Manufacturing of Clinker and Cement. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101, 221-232.
10. Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
11. Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
12. Adesina, A. (2020). Performance and sustainability overview of alkali-activated self-compacting concrete. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 2(3), 165-175.
13. Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
14. Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press.
15. Shanahan, N., Tran, V., & Zayed, A. (2017). Heat of hydration prediction for blended cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 1279-1291
16. Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements-A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118762.
17. Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Civil engineering dimension*, 6(2), 88-93.
18. Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier. ISBN: 978-1-84569-449-4
19. Komnitsas, K. A. (2011). Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.
20. Khan, I., Xu, T., Castel, A., Gilbert, R. I., & Babae, M. (2019). Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage. *Construction and Building Materials*, 229, 116840.

21. Maranan, G. B., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena, W., & Mendis, P. (2015). Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. *Engineering Structures*, 101, 529-541.
22. Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns. *Journal of materials science*, 42, 3124-3130.
23. Hutagi, A., & Khadiranaikar, R. B. (2016). Flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams. In *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* (pp. 3463-3467). IEEE.
24. Wei, X., Li, D., Ming, F., Yang, C., Chen, L., & Liu, Y. (2021). Influence of low-temperature curing on the mechanical strength, hydration process, and microstructure of alkali-activated fly ash and ground granulated blast furnace slag mortar. *Construction and Building Materials*, 269, 121811.
25. Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42, 729-746.
26. Patel, Y. J., & Shah, N. (2018). Development of self-compacting geopolymer concrete as a sustainable construction material. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 412-421.
27. Manjunath, R., Narasimhan, M. C., Umesh, K. M., Kumar, S., & Bharathi, U. B. (2019). Studies on development of high performance, self-compacting alkali activated slag concrete mixes using industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 198, 133-147.
28. Nagaraj, V. K., & Venkatesh Babu, D. L. (2018). Formulation and performance evaluation of alkali-activated self-compacting concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(8), 1021-1036.
29. Nadoushan, M. J., & Ramezani-pour, A. A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337-347.
30. Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669.
31. Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 191-198.
32. Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K. (2014). Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag paste with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 50, 169-176.
33. ASTM C618. (2012). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials.
34. Sun, Y., Liu, Z., Ghorbani, S., Ye, G., & De Schutter, G. (2022). Fresh and hardened properties of alkali-activated slag concrete: The effect of fly ash as a supplementary precursor. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133362.
35. ASTM C33. (2003). *Standard specification for concrete aggregates*. American Society for Testing and Materials.
36. Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
37. Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
38. EFNARC (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use*.
39. ASTM C403. (2008). *Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance*. American Society for Testing and Materials.
40. ASTM C1611. (2018). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, 1*, 1-6. American Society for Testing and Materials.
41. Nath, P., Sarker, P. K., & Rangan, V. B. (2015). Early age properties of low-calcium fly ash geopolymer concrete suitable for ambient curing. *Procedia Engineering*, 125, 601-607.

42. Asayesh, S., Javid, A. A. S., Ziari, H., & Mehri, B. (2021). Evaluating fresh state, hardened State, thermal expansion and bond properties of geopolymers for the repairing of concrete pavements under restrained conditions. *Construction and Building Materials*, 292, 123398.
43. ASTM C496. (2004). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials.
44. Manjunath, R., & Narasimhan, M. C. (2018). An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes. *Journal of Building Engineering*, 17, 1-12.
45. ASTM C469. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson Ratio of Concrete in Compression*. American Society for Testing and Materials.
46. Ding, Y., Dai, J. G., & Shi, C. J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79.
47. Khan, M. S. H., Castel, A., Akbarnezhad, A., Foster, S. J., & Smith, M. (2016). Utilisation of steel furnace slag coarse aggregate in a low calcium fly ash geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 89, 220-229.
48. ACI Committee. (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. American Concrete Institute.
49. Comité Euro-International du Béton. (1993). *CEB-FIP model code 1990: Design code*. Thomas Telford Publishing.
50. Rakhimova, N. R. (2022). Recent advances in blended alkali-activated cements: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(10), 4596-4618.
51. ASTM C642 (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. American Society for Testing and Materials.
52. Pan, Z., Feng, K. N., Gong, K., Zou, B., Korayem, A. H., Sanjayan, J., ... & Collins, F. (2013). Damping and microstructure of fly ash-based geopolymers. *Journal of materials science*, 48, 3128-3137.
53. Deb, P. S., Sarker, P. K., & Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72, 235-245.
54. Taghvayi, H., Behfarnia, K., & Khalili, M. (2018). The effect of alkali concentration and sodium silicate modulus on the properties of alkali-activated slag concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16(7), 293-305.