



University Of Qom



Effects of NaOH Concentration and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratio on the Performance of Self-Compacted Geopolymer Concrete Containing Scoria

Amir Reza Shamsi¹ , Seyed Yasin Mousavi^{2✉} , Ali Reza Tabarsa³

1. Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: amirreza.shamsi1996@gmail.com
2. Corresponding author, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: y.mousavi@gu.ac.ir
3. Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: a.tabarsa@gu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 24 Sep 2024
Revised 26 Jan 2025
Accepted 15 Feb 2025
Published 17 Feb 2025

Keywords:
Self-Compacted
Geopolymer Concrete,
Scoria,
Alkali-Activators,
Fresh Concrete,
Mechanical Properties.

ABSTRACT

Understanding the key variables that affect the performance of lightweight self-compacting geopolymer concrete (LSGPC) is essential for harnessing its technical and environmental benefits in real-world applications. This study aims to investigate the effect of NaOH concentration (6, 8 and 10M) and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio (0.5, 1.5 and 2.5) on the performance of LSGPC containing scoria. For this purpose, 10 LSGPCs were produced and tested for slump flow, T_{50} , visual stability index, V- funnel and J-ring in the fresh state and compressive strength, splitting tensile strength and water absorption in the hardened state. Results showed that using 100% scoria as a substitution of coarse aggregate reduces slump flow and increases T_{50} and V- funnel times due to the reduction in the weight of the mixture. Moreover, NaOH concentration and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio with a change in the viscosity of the mixture are the factors influencing the fresh state performance of LSGPC. Microstructure observation of LSGPC samples by using SEM images revealed a stronger interfacial transition zone between the geopolymer paste and aggregate which improves the mechanical properties as the NaOH concentration increases from 6M to 10M. Furthermore, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 1.5 in LSGPC mixture had the best performance in terms of increasing mechanical properties and reducing water absorption. In general, considering optimum concentration of NaOH and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, it is possible to produce LSGPC containing 100% scoria with acceptable fresh state properties as well as compressive strength categorized as lightweight structural concrete.

Cite this article: Shamsi AR, Mousavi SY, Tabarsa AR. Effects of NaOH Concentration and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratio on the Performance of Self-Compacted Geopolymer Concrete Containing Scoria. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 35-50. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.11254.1570>



Introduction

Although, using geopolymers in the production of different types of concrete has been proposed by different researchers, lightweight self-compacting geopolymer concrete (LSGPC) has not received the required attention. LSGPC combines the benefits of using lightweight geopolymer concrete with the favorable characteristics of self-compacting concrete. Noted that geopolymer paste is prepared by combining aluminosilicate materials with an alkaline activator and therefore, LSGPC properties mainly depend on the alkali activator's characteristics. In this regard, this study evaluates the effect of NaOH concentration and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (NS/NH) ratio on self-

compacting geopolymer concrete containing scoria aggregate.

Experimental program

To assess the study scope, ten concrete mixtures were produced, as detailed in Table 1. Accordingly, the concrete mixtures are classified into two groups of normal weight (N) and lightweight (L). Each group included three concretes with NaOH concentrations of 6M, 8M, and 10M (NS/NH=1.5) and two mixtures with NS/NH ratio of 0.5 and 2.5. Concrete samples were tested for slump flow, T_{50} , visual stability index, V- funnel, J-ring, compressive strength, SEM analysis, tensile strength and absorption.

Table 1. Mix proportions of concrete

Mix ID.	Slag	NaOH (Kg/m ³)			Na ₂ SiO ₃	Sand	Gravel	Scoria	Extra water	SP
	(Kg/m ³)	10M	8M	6M	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)
N10M1.5NN	550	110	-	-	165	770	612	-	48	38
L10M1.5NN	550	110	-	-	165	770	-	399	48	38
N8M1.5NN	550	-	110	-	165	770	612	-	48	38
L8M1.5NN	550	-	110	-	165	770	-	399	48	38
N6M1.5NN	550	-	-	110	165	770	612	-	48	38
L6M1.5NN	550	-	-	110	165	770	-	399	48	38
N8M0.5NN	550	-	183	-	92	770	587	-	48	38
L8M0.5NN	550	-	183	-	92	770	-	384	48	38
N8M2.5NN	550	-	79	-	196	770	622	-	48	38
L8M2.5NN	550	-	79	-	196	770	-	407	48	38

Results and discussions

The slump flow of the LSGPC is shown in Fig. 1, while Fig. 2 presents the T_{50} and V-funnel times. Accordingly, using scoria in LSGPC decreased the slump flow while increased the T_{50} and V-funnel times. With increasing NaOH concentration, the concrete mixtures become more cohesive which caused a decrease in the slump flow. The viscosity of both lightweight and normal-weight concretes increases with a higher NS/NH ratio.

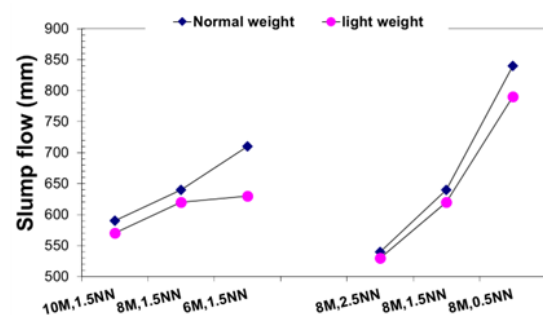


Fig. 1. Slump flow of LSGPCs

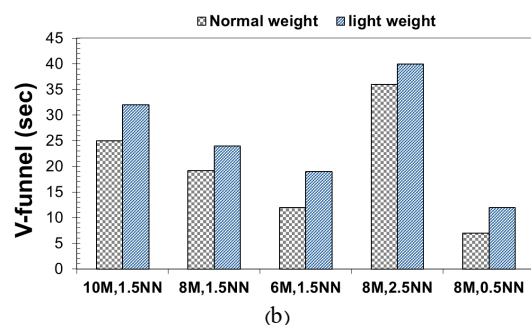
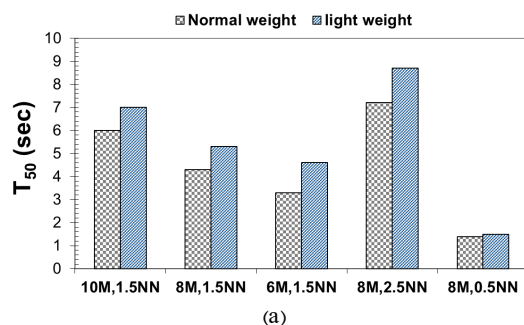
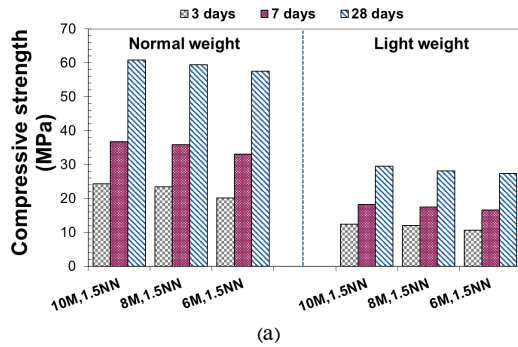


Fig. 2. (a) T_{50} and (b) V-funnel times

The compressive and splitting tensile strengths of all concrete mixtures are given in Figs. 3 and 4. Accordingly, the porous nature



of scoria compared to natural aggregate caused a reduction in the compressive strength of LSCGP samples.

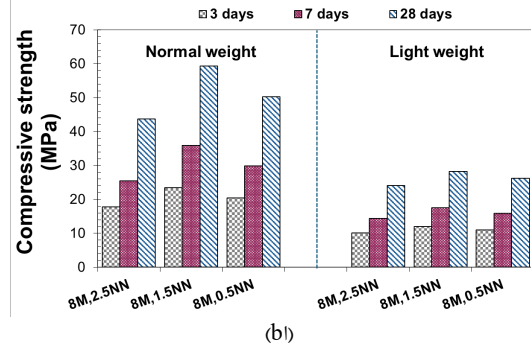


Fig. 3. Compressive strength of concrete mixtures at different (a) NaOH concentrations and (b) NS/NH ratio.

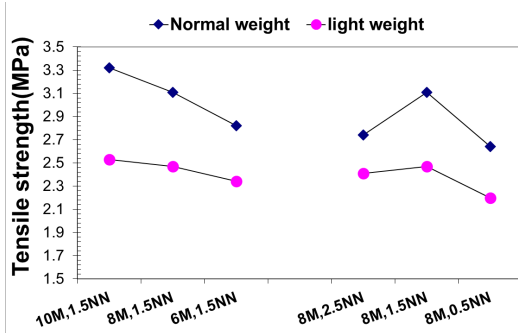


Fig. 4. Splitting tensile strength of concretes

The compressive strength of normal weight and lightweight concrete enhanced by 20.3 and 15.9%, respectively, depending on the curing age, as the NaOH concentration increased from 6M to 10M. A similar trend was also observed in the tensile strength. SEM analysis also shows an improvement in the ITZ and matrix densification in geopolymers concrete prepared with a NaOH concentration of 10M. Increasing the NS/NH ratio from 0.5 to 1.5, increased the compressive and splitting tensile strengths of the normal weight concrete by 20.1% and 17.8%, and the lightweight concrete by 10.1% and 12.3%, respectively, depending on the curing age. As can be seen in Fig. 5, the use of scoria lightweight aggregate increases the water absorption of concrete samples.

Conclusion

This study aims to evaluate the properties of self-compacted geopolymer concrete containing scoria. Results show that the fresh properties of concrete samples were mainly influenced by NaOH concentrations and

NS/NH ratio. Nonetheless, it is possible to produce structural lightweight concrete by 100% replacing natural coarse aggregate with scoria.

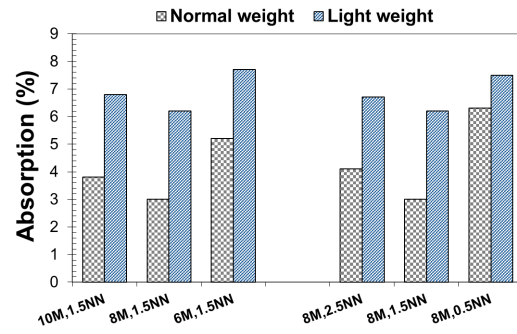


Fig. 5. Water absorption of concrete samples

Funding Statement

This work was supported by Golestan University, Gorgan, Iran.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Amir Reza Shamsi: Data curation; Formal analysis; Investigation; Roles/Writing – original draft.

S. Yasin Mousavi: Conceptualization; Methodology; Project administration; Supervision; Writing – review & editing.

Ali Reza Tabarsa: Conceptualization; Methodology; Project administration; Supervision; Writing – review & editing.



تأثیر غلظت NaOH و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ بر عملکرد بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی اسکوریا

امیررضا شمس‌ی^۱، سید یاسین موسوی^۲، علیرضا طبرسا^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: amirreza.shams1996@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: y.mousavi@gu.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: a.tabarsa@gu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

کلیدواژه‌ها:

بتن خودتراکم ژئوپلیمری،

سبک‌دانه اسکوریا،

فعال کننده قلیایی،

بتن تازه،

خواص مکانیکی.

شناخت عوامل تأثیرگذار بر عملکرد بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری جهت بهره‌گیری از اثرات مثبت زیست محیطی و تکنیکی آن در پروژه‌های عمرانی ضروری می‌باشد. در این مطالعه، تأثیر غلظت NaOH (۶، ۸ و ۱۰ M) و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵) بر عملکرد بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی اسکوریا مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ۱۰ اختلاط بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری تحت آزمایشات جریان اسلامپ، T_{50} ، شاخص پایداری چشمی، زمان عبور از قیف V شکل و حلقه J در حالت بتن تازه و همچنین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب در حالت سخت شده قرار گرفتند. بر طبق نتایج، اسکوریا به علت کاهش وزن مخلوط سبب کاهش میزان جریان اسلامپ و افزایش زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل می‌گردد. همچنین غلظت NaOH و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ، با تغییر در ویسکوزیته مخلوط از عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات بتن سبک تازه خودتراکم ژئوپلیمری می‌باشند. ارزیابی ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از عکس‌برداری SEM تأیید نمود که ناحیه اتصال سبک‌دانه-خمیر ژئوپلیمری قوی‌تر سبب بهبود خواص مکانیکی با افزایش غلظت NaOH از ۶ به ۱۰ M گردیده است. همچنین نمونه‌های بتنی با نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ برابر با ۱/۵ بهترین عملکرد را در افزایش خواص مکانیکی و کاهش جذب آب داشتند. در حالت کلی، با انتخاب میزان بهینه غلظت NaOH و $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ، بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی ۱۰۰ درصد اسکوریا با خواص مطلوب بتن تازه و همچنین مقاومت فشاری در رده بتن سبک سازه‌ای قابل تولید می‌باشد.

استناد: شمس‌ی امیررضا، موسوی سید یاسین، طبرسا علیرضا. تأثیر غلظت NaOH و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ بر عملکرد بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی اسکوریا. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۳۵-۵۰.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.11254.1570>



۱- مقدمه

تولید سیمان مستلزم استخراج میزان بالای مواد طبیعی و همچنین مصرف بالای انرژی می‌باشد که همزمان سبب تولید میزان قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 ، NO_2 و غیره می‌گردد [۱]. برآورد می‌شود که حدود ۷ درصد از CO_2 موجود در اتمسفر بر اثر کارخانجات تولید سیمان و بتن باشد [۲]. بنابراین با هدف ارائه جایگزینی پایدار برای خمیر چسباننده سیمانی در تولید بتن، محققین مختلف سعی نموده‌اند که عملکرد خمیر ژئوپلیمری را بررسی نمایند. خمیر ژئوپلیمری از ترکیب یک ماده آلومینوسیلیکاتی (مانند سرباره و خاکستر بادی) با یک فعال‌کننده قلیایی (معمولاً مخلوطی از سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) و هیدروکسید سدیم (NaOH)) تهیه می‌شود. واکنش بین ماده آلومینوسیلیکاتی و فعال‌کننده قلیایی با نام ژئوپلیمریزاسیون شناخته می‌شود. مکانیزم واکنش ژئوپلیمریزاسیون شامل مرحله حل‌شدن آلومینیوم و سیلیس موجود در پیش ماده اصلی در محیط قلیایی، تشکیل مونومر و سپس تشکیل یک شبکه سه‌بعدی محکم از سیلیس و آلومینیوم می‌باشد [۳].

بهره‌مندی توأماً از خصوصیات بتن ژئوپلیمری به همراه ویژگی‌های منحصربفرد بتن سبک سبب گردیده است که ارزیابی عملکرد بتن سبک ژئوپلیمری و شناسایی عوامل تأثیرگذار بر رفتار آن مورد توجه محققین مختلف قرار گیرد. از جمله این عوامل تأثیرگذار می‌توان به غلظت NaOH و نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (NS/NH) اشاره نمود. در این ارتباط، کوپایی^۱ و همکاران، با بررسی خصوصیات بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستربادی حاوی سبک‌دانه پوسته نخل روغنی تهیه شده با NaOH در غلظت‌های متفاوت ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ مولار، غلظت ۱۴ مولار را برای مطالعات بیشتر پیشنهاد دادند [۴].

همچنین محققان به بررسی رفتار بتن سبک ژئوپلیمری در غلظت‌های متفاوت NaOH (۵، ۱۰ و ۱۵ مولار) و نسبت‌های متفاوت NS/NH (۰/۳۳، ۰/۶۷، ۱، ۱/۵ و ۳) در درصد‌های متفاوت فعال‌کننده قلیایی به چسباننده و همچنین دماهای متفاوت عمل‌آوری پرداختند. آنان نشان دادند که مقاومت فشاری تا نسبت NS/NH برابر یک به علت افزایش میزان سیلیس افزایش می‌یابد و سپس روند کاهشی دارد [۵]. در مطالعه دیگر، تأثیر متغیرهای متفاوتی از جمله غلظت NaOH و نسبت NS/NH بر عملکرد بتن ژئوپلیمری حاوی سبک‌دانه بلوک ضایعاتی جهت کاربرد در دیوارها و پارتیشن مورد مطالعه قرار گرفته است [۶]. نمونه‌های مختلف ملات سبک ژئوپلیمری با تغییر در غلظت NaOH (۶، ۸ و ۱۰ مولار)، نسبت NS/NH (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵) و میزان خاکستر بادی (۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) توسط مرمرداس^۲ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. با به‌کارگیری روش سطح پاسخ، آنان میزان بهینه غلظت NaOH، نسبت NS/NH و میزان خاکستربادی را به ترتیب ۹/۸۹۲ مولار، ۰/۵ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری و کمترین انقباض گزارش نمودند [۷]. از طرفی، اولیوی^۳ و همکاران به بررسی تأثیر غلظت NaOH و نسبت NS/NH بر خواص ملات تازه و سخت شده سبک ژئوپلیمری پرداختند. آنان نشان دادند که افزایش غلظت NaOH از ۸ به ۱۴ مولار سبب افزایش مقاومت و کاهش کارایی و جذب آب نمونه‌ها خواهد شد. بیشتر بودن مقاومت نمونه‌ها ساخته شده بر پایه سرباره با غلظت‌های NaOH و نسبت‌های NS/NH متفاوت، در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده بر پایه خاکستربادی از دیگر نتایج آن مطالعه بود [۸]. همچنین در پژوهشی دیگر، به بررسی تیرهای بتنی ژئوپلیمری سبک در سه غلظت NaOH (۸، ۱۲ و

^۲- Mermerdas

^۳- Oleiwi

^۱- Kupaei

۱۶ مولار) و سه نسبت NS/NH (۱/۵، ۲ و ۲/۵) پرداخته شد. نتایج نشان داد که نمونه ساخته شده با غلظت NaOH برابر با ۱۲ مولار، بیشترین مقاومت فشاری را دارد. از طرفی، افزایش نسبت NS/NH از ۱/۵ به ۲، سهم واضحی در افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی دارد [۹]. در مطالعه‌ای توسط هما و رواثی^۴ نشان داده شد که بیشترین مقاومت فشاری در بتن سبک ژئوپلیمری حاوی لیکا در غلظت NaOH برابر با ۱۲ مولار به دست می‌آید که از نمونه‌های ساخته شده با غلظت NaOH برابر با ۸ و ۱۰ مولار بیشتر است [۱۰]. افزایش مقاومت فشاری با افزایش مولاریته فعال‌کننده قلیایی، افزایش دمای عمل‌آوری و افزایش سن از نتایج مطالعه محققان بر روی بتن سبک ژئوپلیمری با مقاومت بالا بود [۱۱].

با توجه به مطالعات اشاره شده، هرچند ارزیابی غلظت NaOH و نسبت NS/NH در بتن ژئوپلیمری حاوی سبک‌دانه مورد ارزیابی قرار گرفته است، ولی براساس اطلاعات نویسندگان تاکنون توجه بسیار محدودی در ارتباط با تأثیر این پارامترها بر عملکرد بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری صورت پذیرفته است. بتن خودتراکم ژئوپلیمری قادر است که بدون نیاز به لرزاندن خارجی و ایجاد هرگونه جداسدگی، تحت اثر وزن خود اطراف قالب را پر نماید و آرماتورها را دربرگیرد. به جهت رسیدن به چنین عملکردی، ارزیابی متغیرهایی مانند غلظت NaOH و نسبت NS/NH بر رفتار بتن خودتراکم ژئوپلیمری بسیار ضروری است. در این راستا، کومار^۵ و همکاران با بررسی خصوصیات بتن تازه و سخت شده خودتراکم حاوی پودر سرامیک در غلظت‌های متفاوت NaOH، نشان دادند که اختلاط حاوی ۶۰٪ خاکستر بادی، ۳۰٪ سرباره و ۱۰٪ پودر سرامیک با غلظت NaOH برابر با ۱۲ مولار و ۶ درصد فوق روان‌کننده، بیشترین

مقاومت فشاری را به دنبال خواهد داشت [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، محققان نشان دادند که مقاومت فشاری بتن خودتراکم ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی تا ۳۵/۵۸ درصد با افزایش غلظت NaOH از ۸ به ۱۶ مولار افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر غلظت NaOH بر رفتار بتن خودتراکم ژئوپلیمری است [۱۳]. بتن پایدار خودتراکم ژئوپلیمری توسط غفور و فوجیاما^۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که افزایش مولاریته NaOH از ۸ به ۱۶ مولار، بر روی خصوصیات بتن تازه خودتراکم ژئوپلیمری تأثیرگذار است. آنان گزارش دادند که با افزایش غلظت NaOH از ۸ به ۱۶ مولار، جریان اسلامپ از ۷۵۰ میلیمتر به ۶۸۰ میلیمتر کاهش می‌یابد و زمان T₅₀ از ۵ ثانیه به ۱۰ ثانیه افزایش خواهد یافت [۱۴]. نقش تعیین‌کننده مولاریته NaOH و میزان سرباره بر عملکرد بتن خودتراکم ژئوپلیمری در مطالعه ساینی و واتپالی^۷ نیز تأکید شده است [۱۵].

اثرات قابل توجه غلظت NaOH و نسبت NS/NH بر خواص بتن تازه و سخت شده ژئوپلیمری از یک‌سو و همچنین توجه به این نکته که استفاده از سبک‌دانه، باعث کاهش وزن مخلوط بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری می‌گردد که دستیابی به وزن مناسب به جهت حفظ قابلیت تراکم را بسیار مهم و ضروری است از سوی دیگر، باعث می‌گردد که مطالعه این عوامل جهت استفاده از بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری در پروژه‌های اجرایی ضروری گردد. از جمله مطالعات انجام پذیرفته در این راستا می‌توان به مطالعه کناگاراچ^۸ و همکاران اشاره نمود. آنان با بررسی خصوصیات بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی سبک‌دانه لیکا بدین نتیجه رسیدند که افزایش میزان غلظت NaOH و همچنین دمای عمل‌آوری، سبب بهبود خصوصیات مکانیکی طرح‌ها خواهد شد [۱۶].

6- Ghaffor and Fujiyama

7- Saini and Vattipalli

8- Kanagaraj

4- Hema and Revathi

5- Kumar

قرار گرفت. همچنین ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از عکس‌برداری SEM بررسی شد. نتایج این مطالعه می‌تواند جهت استفاده از بتن خودتراکم سبک ژئوپلیمری در پروژه‌های مهندسی توسط محققین صنعت ساخت‌وساز و همچنین پیمانکاران ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

مواد مورد استفاده در این مطالعه شامل سرباره، NaOH ، Na_2SiO_3 ، سنگ‌دانه‌های طبیعی، اسکوریا، فوق روان‌کننده و آب می‌باشد. مواد مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این مطالعه، سرباره به عنوان ماده پایه ساخت بتن ژئوپلیمری از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. همچنین NaOH به صورت تجاری با خلوص بالای ۹۸ درصد به صورت پرک تهیه شد و سپس جهت رسیدن به غلظت‌های متفاوت با آب مخلوط گردید.



شکل ۱- مصالح مورد استفاده در مطالعه حاضر

از انجام طیف‌سنجی فلورسانس پرتوی ایکس^۹ نمایش داده شده است. فوق روان‌کننده مصرفی با نام تجاری sika-viscocrete-3110 IR، که براساس برگه اطلاعات فنی شرکت تولیدکننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با وزن مخصوص 1.025 ± 0.075 بود که مطابق ISIRI ۲۹۳۰ (جدول ۳-۱ و ۳-۲) می‌باشد. آب مورد استفاده از آب شرب شهر گرگان است.

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی تأثیر غلظت NaOH و نسبت NS/NH بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده خودتراکم ژئوپلیمری حاوی سبک‌دانه اسکوریا می‌باشد. معادن قابل‌توجهی از اسکوریا در غرب و شمال غرب کشورمان موجود است که می‌توان به معدن اسکوریا در شهرهای قروه و سلماس اشاره نمود که در تولید بتن سبک مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷ و ۱۸]. این مهم، سطح دسترسی مناسبی را برای اسکوریا به وجود آورده است. همچنین تولید بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از سبک‌دانه اسکوریا در مطالعات گذشته، نوید لازم برای دستیابی به بتن سبک سازه‌ای را با استفاده از سبک‌دانه اسکوریا به وجود می‌آورد [۱۹]. برای رسیدن به اهداف این مطالعه، ۱۰ طرح بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری ساخته شد و توسط آزمایشات جریان اسلامپ، زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر (T_{50})، شاخص پایداری چشمی، زمان عبور از قیف V شکل، حلقه J در حالت بتن تازه و همچنین مقاومت فشاری (در سنین مختلف)، مقاومت کششی و جذب آب در حالت سخت شده مورد ارزیابی

Na_2SiO_3 نیز به صورت تجاری با نسبت $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ برابر با ۲/۱ مورد استفاده قرار گرفته است. سنگ‌دانه‌های طبیعی شامل شن با بزرگترین اندازه دانه ۱۲/۵ میلیمتر و ماسه با دانه‌بندی استاندارد می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ نمایش داده شده است، سبک‌دانه اسکوریا تهیه شده از معادن شهر قروه در استان کردستان با بزرگترین اندازه دانه برابر با ۱۲/۵ میلیمتر می‌باشد. در جدول ۱، ترکیبات تشکیل‌دهنده سبک‌دانه اسکوریا پس

^۹- X-ray fluorescence (XRF)

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سبکدانه اسکوریا

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SrO	BaO	SO ₃	L.O.I
۴۶/۹۹	۱۰/۰۵	۱۳/۸۵	۸/۲۳	۷/۷۴	۵/۲۵	۲/۹۹	۲/۰۱	۱/۵۳	۰/۱۱	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۴۲

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

به این دلیل که استاندارد مشخصی جهت رسیدن به طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری وجود ندارد، در این تحقیق، از مطالعات گذشته به عنوان پایه‌ای برای اختلاط‌های اولیه استفاده شده است [۷ و ۱۶]. بر این مبناء، ۱۰ طرح اختلاط بتن در نظر گرفته شد که جزئیات آن‌ها در جدول ۲ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که تمامی اختلاط‌ها، به صورت حجمی و برای یک مترمکعب بتن طراحی شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، اختلاط‌ها در دو گروه طبقه‌بندی شده‌اند که در گروه اول از سبکدانه اسکوریا استفاده نشده است و در گروه دوم، سبکدانه اسکوریا به عنوان جایگزین ۱۰۰ درصدی درشت‌دانه طبیعی مورد استفاده قرار گرفت. این بدان معنا می‌باشد که درصد حجمی از بتن که توسط سنگدانه اشغال شده است به‌طور کامل با حجم معادل سبکدانه جایگزین گردید. دو گروه حاوی سنگدانه شن و اسکوریا به ترتیب با N و L نامگذاری شده‌اند. در هر دو

گروه، پنج اختلاط بتن خودتراکم ژئوپلیمری قرار گرفته‌اند. سه مورد از آنها با غلظت‌های متفاوت NaOH به میزان‌های ۶، ۸ و ۱۰ مولال (M) و نسبت NS/NH برابر با ۱/۵ ساخته شده‌اند. از اختلاط‌های فوق، جهت ارزیابی تأثیر غلظت NaOH بهره گرفته شده است. همچنین دو اختلاط باقیمانده نیز با نسبت‌های NS/NH برابر با ۰/۵ و ۲/۵ در غلظت NaOH ثابت برابر با ۸M انتخاب شدند. در این دو اختلاط به همراه یک اختلاط که با نسبت NS/NH برابر با ۱/۵ ساخته شده است به بررسی تأثیر نسبت NS/NH بر عملکرد بتن خودتراکم ژئوپلیمری پرداخته می‌شود. اختلاط‌های مورد بررسی در این مطالعه، بر مبنای میزان اسکوریا، غلظت NaOH و نسبت NS/NH نامگذاری شده‌اند. به‌عنوان مثال، L8M1.5NN نشان‌دهنده اختلاط حاوی ۱۰۰ درصد اسکوریا، با غلظت NaOH برابر با ۸M و نسبت NS/NH مساوی با ۱/۵ است.

جدول ۲- جزئیات طرح‌های اختلاط بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری

نام طرح	سرباره (Kg/m ³)	NaOH (Kg/m ³)			Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	اسکوریا (Kg/m ³)	آب اضافه (Kg/m ³)	فوق روان کننده (Kg/m ³)
		۱۰M	۸M	۶M						
N10M1.5NN	۵۵۰	۱۱۰			۱۶۵	۷۷۰	۶۱۲		۴۸	۳۸
L10M1.5NN	۵۵۰	۱۱۰			۱۶۵	۷۷۰		۳۹۹	۴۸	۳۸
N8M1.5NN	۵۵۰		۱۱۰		۱۶۵	۷۷۰	۶۱۲		۴۸	۳۸
L8M1.5NN	۵۵۰		۱۱۰		۱۶۵	۷۷۰		۳۹۹	۴۸	۳۸
N6M1.5NN	۵۵۰			۱۱۰	۱۶۵	۷۷۰	۶۱۲		۴۸	۳۸
L6M1.5NN	۵۵۰			۱۱۰	۱۶۵	۷۷۰		۳۹۹	۴۸	۳۸
N8M0.5NN	۵۵۰		۱۸۳		۹۲	۷۷۰	۵۸۷		۴۸	۳۸
L8M0.5NN	۵۵۰		۱۸۳		۹۲	۷۷۰		۳۸۴	۴۸	۳۸
N8M2.5NN	۵۵۰		۷۹		۱۹۶	۷۷۰	۶۲۲		۴۸	۳۸
L8M2.5NN	۵۵۰		۷۹		۱۹۶	۷۷۰		۴۰۷	۴۸	۳۸

لازم است عنوان گردد که غلظت‌های NaOH و

همچنین نسبت‌هایی از NS/NH که در این مطالعه در

نظر گرفته شدند، براساس اطمینان از حصول مطلوب معیارهای بتن تازه و کسب حداقل خصوصیات بتن سخت شده خودتراکم بود.

۲-۳- آزمایشات

آزمایشات این مطالعه در دو حالت بتن تازه و سخت شده طبقه بندی شده است. بر طبق EFNARC، بتن تازه خودتراکم می بایست دارای چهار مؤلفه جریان پذیری، ویسکوزیته، عبور کنندگی و مقاومت در برابر جداسازی باشد [۲۰]. برای ارزیابی این چهار مؤلفه آزمایشات جریان اسلامپ، T_{50} ، زمان عبور از قیف V شکل، حلقه J و شاخص پایداری چشمی برای بتن تازه خودتراکم در نظر گرفته شدند. میزان قطر بتن پخش شده

در آزمایش اسلامپ در دو جهت عمود بر هم به عنوان جریان اسلامپ جهت ارزیابی جریان پذیری بتن خودتراکم ژئوپلیمری انتخاب گردید. این آزمایش براساس EFNARC انجام پذیرفته است [۲۰]. همانگونه که در جدول ۳ نمایش داده شده است، می توان بتن خودتراکم را براساس میزان جریان اسلامپ در سه رده SF_1 ، SF_2 و SF_3 طبقه بندی نمود. ویسکوزیته به عنوان مقاومت در برابر جریان یک ماده پس از شروع جریان تعریف می گردد که در این مطالعه، جهت توصیف ویسکوزیته بتن خودتراکم ژئوپلیمری از زمان های T_{50} و عبور از قیف V شکل (براساس EFNARC) بهره گرفته شده است. دو رده ویسکوزیته برای بتن خودتراکم در EFNARC وجود دارد که در جدول ۳ نمایش داده شده است [۲۰].

جدول ۳- رده بندی بتن تازه خودتراکم بر طبق EFNARC [۲۰]

جریان اسلامپ (میلیمتر)		رده جریان پذیری
۶۵۰-۵۵۰		رده اول (SF_1)
۷۵۰-۶۶۰		رده دوم (SF_2)
۸۵۰-۷۶۰		رده سوم (SF_3)
زمان عبور از قیف V شکل (ثانیه)	T_{50} (ثانیه)	رده ویسکوزیته
≤ 8	≤ 2	VS1/VF1
۲۵-۹	> 2	VS2/VF2

ارزیابی مؤلفه عبور کنندگی نمونه های بتن تازه خودتراکم ژئوپلیمری با استفاده از آزمون حلقه J (براساس ACI 237R-07) انجام پذیرفت [۲۱]. در این آزمایش اگر تفاوت میزان جریان اسلامپ بدون حضور مانع با میزان جریان اسلامپ در حضور حلقه J (ΔS_j) کمتر از ۲۵ میلیمتر باشد، نشان دهنده توانایی عبور بالا، مابین ۲۵ و ۵۰ میلیمتر نشان از عبور کنندگی متوسط و اگر اختلاف بزرگتر از ۵۰ میلیمتر باشد، نشان از توانایی عبور پایین دارد. از شاخص پایداری چشمی و همچنین توزیع سبک دانه در ارتفاع نمونه سخت شده بتن جهت ارزیابی مقاومت در برابر جداسازی استفاده شد. لازم به ذکر است که شاخص پایداری چشمی اختلاطها بر مبنای جدول ۴ در چهار گروه بین صفر (فوق العاده پایدار) تا سه

(فوق العاده ناپایدار) طبقه بندی می گردد. آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب نیز به جهت ارزیابی بتن سخت شده خودتراکم به ترتیب براساس استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۶۰۸، ASTM C496 و ASTM C642 انجام پذیرفت [۲۲-۲۴]. مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزگی بر روی نمونه های مکعبی ۱۰ سانتیمتری انجام شد. میانگین حداقل سه نمونه برای گزارش مقاومت فشاری در هر سن استفاده شده است. همچنین میزان انحراف اعداد میانگین گیری شده از مقاومت گزارش شده نهایتاً ۱۰ درصد می باشد. مقاومت کششی (شکافت) بر روی نمونه های استوانه ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتری انجام پذیرفته است. همانند مقاومت فشاری، از میانگین سه نمونه برای گزارش

بعد از فاصله‌های زمانی ۱۲ ساعته قابل چشم‌پوشی است، محاسبه گردید. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲، نمای کلی آزمایشات نمایش داده شده است.

مقاومت کششی استفاده شده است. جذب آب بر روی حداقل سه نمونه مکعبی ۱۰ سانتیمتری در سن ۲۸ روزگی انجام شد. برای این منظور، وزن خشک نمونه‌ها بعد از قرارگیری به مدت ۲۴ ساعت در اون و همچنین وزن اشباع با سطح خشک آن‌ها تا زمانی که تفاضل جرم

جدول ۴- طبقه‌بندی اختلاط بتن خودتراکم براساس شاخص پایداری چشمی [۲۵]

شاخص پایداری چشمی	قابلیت تراکم	بررسی وضعیت بتن
صفر	مناسب	علامتی از جداسدگی وجود ندارد. پخش یکنواخت سنگدانه‌ها در سرتاسر بتن به نحوی که درشت‌دانه تا محیط بتن پخش شده رسیده باشد. علامتی از آب‌انداختگی یا جمع‌شدگی ملات در سطح و یا اطراف محیط وجود ندارد.
۱	قابل قبول	شواهد محدودی از جمع‌شدگی ملات و یا آب‌انداختگی. پخش خوب سنگدانه‌ها، هرچند حلقه کوچکی از ملات در لبه‌های محیط پخش شده بتن خودتراکم وجود دارد.
۲	بحرانی	بتن دارای علائمی از ناپایداری و جداسدگی است. میزان مشخص‌تری از جمع‌شدگی ملات و یا پخش نامناسب سنگدانه‌ها انتظار می‌رود.
۳	غیر قابل قبول	اختلاط دارای پخش ضعیف سنگدانه، جداسدگی و آب‌انداختگی زیاد است. جمع شدن درشت‌دانه در مرکز مساحت پخش شده و جدایی ملات در محیط جریان اسلامپ وجود دارد.



شکل ۲- آزمایشات بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری

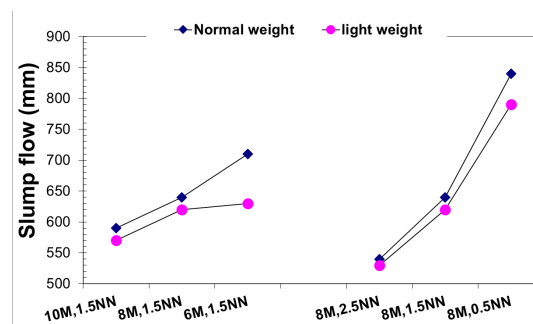
۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بتن تازه خودتراکم

مخلوط، سبب کاهش میزان جریان اسلامپ شده است. میزان این کاهش در جریان اسلامپ با توجه به غلظت NaOH و نسبت NS/NH در محدوده ۱/۸ تا ۱۱/۳ درصد متغیر است. با ارزیابی شکل ۳، همچنین می‌توان بدین نتیجه رسید، میزان جریان اسلامپ نمونه‌ها با افزایش غلظت NaOH کاهش یافته است. به عنوان نمونه، جریان اسلامپ در اختلاط L6M1.5NN به میزان ۶۳۰ میلیمتر به دست آمده است که با افزایش غلظت NaOH به ۸M و ۱۰M به ترتیب ۶۲۰ و ۵۷۰ میلیمتر نتیجه شده است. علت این موضوع را می‌توان به افزایش چسبندگی مخلوط با افزایش غلظت محلول NaOH

خصوصیات بتن تازه خودتراکم در این مطالعه توسط آزمایشات جریان اسلامپ، T_{50} ، زمان عبور از قیف V شکل، حلقه J و شاخص پایداری چشمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج میزان جریان اسلامپ در نمونه‌های بتن خودتراکم در شکل ۳ نمایش داده شد. بر این اساس، میزان جریان اسلامپ نمونه‌ها در محدوده ۵۳۰ تا ۸۴۰ میلیمتر قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، استفاده از اسکوریا عمدتاً به دلیل کاهش وزن

مرتبط دانست [۲۶]. این نتیجه در راستای مطالعه راما^{۱۰} و همکاران می‌باشد که نشان دادند جریان اسلامپ بتن خودتراکم ژئوپلیمری با غلظت NaOH برابر با ۳ مولار از ۷۵۰ میلیمتر به ۶۳۳ میلیمتر در غلظت ۱۱ مولار کاهش پیدا می‌نماید [۲۷].



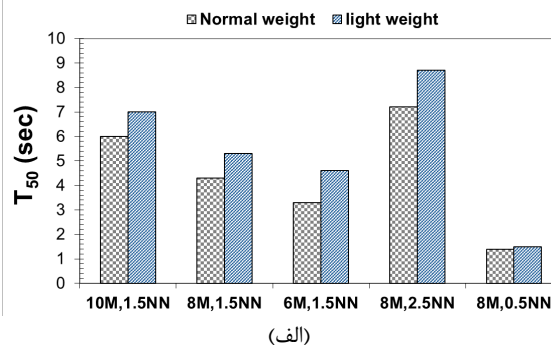
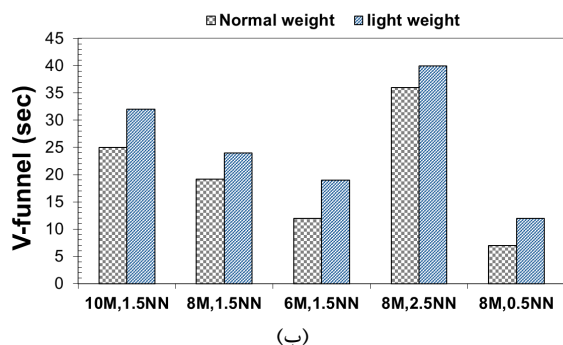
شکل ۳- جریان اسلامپ در بتن خودتراکم ژئوپلیمری

همچنین بر مبنای شکل ۳، در هر دو نوع بتن، بیشترین میزان جریان اسلامپ در اختلاط با نسبت NS/NH برابر با ۰/۵ به دست آمده و افزایش این نسبت به ۱/۵ و ۲/۵، سبب کاهش جریان اسلامپ شده است. در پژوهشی دیگر، کاهش جریان ملات ژئوپلیمری معمولی با افزایش نسبت NS/NH به ویسکوزیته بالاتر Na_2SiO_3 در مقایسه با NaOH مرتبط شده است [۲۸]. از طرفی، ارزیابی نتایج موجود در شکل ۳، نشان می‌دهد که با افزایش غلظت NaOH از ۶M به ۱۰M، جریان اسلامپ در بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی اسکوریا به میزان ۶۰ میلیمتر و در بتن بدون سبکدانه اسکوریا ۱۲۰ میلیمتر کاهش یافته است. این در حالی است که افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۲/۵، جریان اسلامپ را به ترتیب به میزان ۲۶۰ و ۳۰۰ میلیمتر در بتن خودتراکم ژئوپلیمری با و بدون سبکدانه اسکوریا کاهش داده است. این موضوع نشان می‌دهد که پارامتر نسبت NS/NH در مقایسه با غلظت NaOH تأثیر بیشتری بر جریان اسلامپ بتن دارد. میزان زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل نیز برای تمامی اختلاط‌های بتن محاسبه گردید و نتایج در

شکل ۴ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، میزان زمان T_{50} در محدوده ۱/۴ تا ۸/۷ ثانیه و زمان قیف V شکل نیز مابین ۷ تا ۴۰ ثانیه متغیر می‌باشد. از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که حضور سبکدانه اسکوریا سبب افزایش زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل شده است. این موضوع به دلیل کاهش وزن بتن در حضور اسکوریا می‌باشد. روند مشابه در مطالعه ماداندوست^{۱۱} و همکاران برای بتن سیمانی سبک خودتراکم حاوی دانه‌های پلی‌استایرن منبسط شده نیز مشاهده گردیده است [۲۹]. همچنین نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهند که با افزایش غلظت NaOH ویسکوزیته بتن که توسط زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل ارزیابی شده است، افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، زمان T_{50} برای اختلاط N6M1.5NN تهیه شده با غلظت NaOH برابر با ۶M به میزان ۳/۳ ثانیه محاسبه شده است که در صورت افزایش غلظت NaOH به ۸M و ۱۰M به ترتیب به ۴/۳ و ۶ ثانیه افزایش پیدا می‌نماید. در روندی مشابه، محققان گزارش نمودند که با افزایش غلظت NaOH هر دو زمان T_{50} و عبور از قیف V شکل برای بتن خودتراکم ژئوپلیمری روند افزایشی دارد. افزایش ویسکوزیته با افزایش نسبت NS/NH نیز در هر دو سری بتن سبک و بتن با وزن معمولی مشاهده گردید که می‌تواند به دلیل بالا بودن ویسکوزیته Na_2SiO_3 مرتبط باشد. همانند آنچه که در نتایج جریان اسلامپ مشاهده گردید، به نظر می‌رسد که پارامتر نسبت NS/NH در مقایسه با غلظت NaOH تأثیر بیشتری بر زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V دارد. به عنوان مثال، در حالی که زمان T_{50} با افزایش غلظت NaOH از ۶M به ۱۰M برای بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی اسکوریا از ۴/۶ به ۷ ثانیه افزایش یافته است، با افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۲/۵، میزان زمان T_{50} از ۱/۵ به ۸/۷ ثانیه افزایش یافته است.

¹¹- Madandoust

¹⁰- Rama



شکل ۴- (الف) زمان T_{50} و (ب) زمان عبور از قیف V شکل در بتن خودتراکم ژئوپلیمری

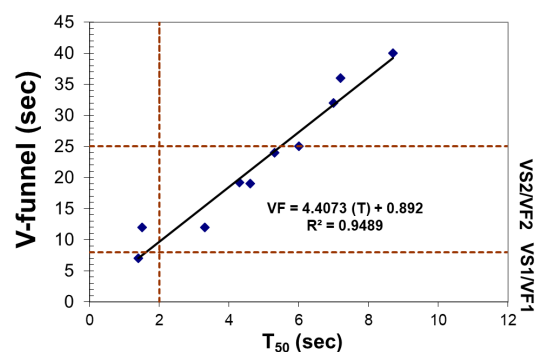
میلیمتر و در اختلاط‌های مشابه سبک وزن به ترتیب ۱۱، ۱۲ و ۱۱ میلیمتر محاسبه گردید. در مابقی نمونه‌ها میزان ΔS_j ناچیز و یا صفر می‌باشد. بر این مبنا، تمامی اختلاط‌های مورد مطالعه دارای ΔS_j کمتر از ۲۵ میلیمتر می‌باشند که نشانه‌ای از توانایی عبور بالای نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در این مطالعه از شاخص پایداری چشمی به عنوان یکی از ساده‌ترین و مشهورترین روش‌ها جهت ارزیابی پایداری و مقاومت در برابر جدایش دینامیکی طرح‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری بهره گرفته شد [۲۵]. براساس اطلاعات موجود در جدول ۳، تمامی اختلاط‌های بتن خودتراکم مورد مطالعه را می‌توان در رده صفر و یک طبقه‌بندی نمود که حاکی از تراکم مناسب اختلاط‌ها است. از طرفی، توزیع قابل‌قبول سبک‌دانه‌ها در نمونه‌های شکسته شده بتن در شکل ۶ می‌تواند نشانه‌ای از مقاومت مطلوب در برابر جدایش استاتیکی در نظر گرفته شود.



شکل ۶- توزیع مناسب سبک‌دانه اسکوریا در نمونه استوانه‌ای

۳-۲- خصوصیات بتن سخت‌شده

همانگونه که در جدول ۳ اشاره شده است، بر طبق EFNARC، ویسکوزیته بتن خودتراکم بر مبنای زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل، در دو گروه $VS1/VF1$ و $VS2/VF2$ تقسیم‌بندی می‌گردد [۲۰]. برای بررسی این موضوع، شکل ۵، زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل در نمونه‌های بتنی را بر مبنای رده‌بندی EFNARC ارائه نموده است. بر این مبنا، پاره‌ای از نمونه‌ها در گروه $VS2/VF2$ طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین رابطه شماره (۱)، با ضریب تعیین ۰/۹۵ برای ارتباط بین زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل ارائه گردیده است.



شکل ۵- رابطه زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل

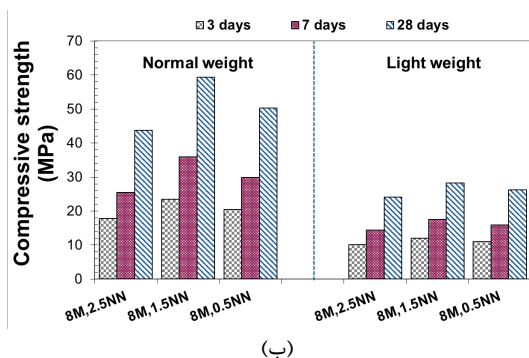
$$VF = 4.41(T) + 0.89 \quad (1)$$

در این رابطه، T و VF به ترتیب زمان‌های T_{50} و عبور از قیف V شکل می‌باشند.

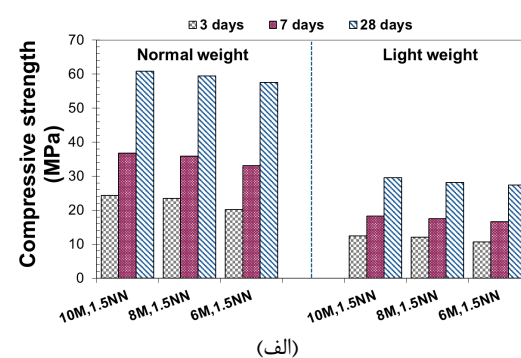
جهت ارزیابی خاصیت عبورکنندگی اختلاط‌های بتن سبک خودتراکم از آزمایش حلقه J استفاده شده است. میزان ΔS_j در اختلاط‌های N10M1.5NN، N8M1.5NN و N8M0.5NN به ترتیب ۱۳، ۱۲ و ۱۵

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری حاوی سبک‌دانه اسکوریا در سنین مختلف ۳، ۷ و ۲۸ روزگی محاسبه گردید که نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت فشاری نمونه‌ها در بازه ۱۰/۱ تا $24/3 \text{ MPa}$ در ۳ روزگی، $14/4$ تا $36/7 \text{ MPa}$ در ۷ روزگی و همچنین در بازه $24/1$ تا $60/8 \text{ MPa}$ در سن ۲۸ روزگی متغیر می‌باشد. با در نظر گرفتن مقاومت فشاری ۲۸ روزگی، تمامی نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد اسکوریا مقاومت

مقاومت فشاری بالاتر از $24/1 \text{ MPa}$ کسب نمودند. چنانچه اعدادی که برای تبدیل مقاومت فشاری مکعبی به مقاومت فشاری استوانه‌ای برای بتن سبک مرسوم است را بتوان برای بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری نیز استفاده نمود، می‌توان نمونه‌های مورد مطالعه را در رده بتن سبک سازه‌ای طبقه‌بندی نمود [۳۰]. از طرفی، به علت تکمیل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها با افزایش سن عمل‌آوری افزایش پیدا نموده است.



شکل ۷- تأثیر (الف) غلظت NaOH و (ب) نسبت NS/NH بر مقاومت فشاری



همانگونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است افزودن سبک‌دانه اسکوریا سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری در تمامی سنین عمل‌آوری شده است که این نتیجه در راستای مطالعه دولتاباد^{۱۲} و همکاران می‌باشد که تأثیر اسکوریا بر بتن خودتراکم معمولی را مطالعه نموده‌اند [۳۱]. بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری بسته به غلظت NaOH و نسبت NS/NH در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزگی به ترتیب ۴۹، ۵۱/۲ و ۵۲/۵ درصد بود. تخلخل ذاتی بالاتر اسکوریا نسبت به سنگدانه معمولی که باعث ضعف بتن در تحمل بارهای فشاری می‌گردد را می‌توان به عنوان علت کاهش مقاومت نمونه‌ها در نظر گرفت [۳۲].

تأثیر غلظت NaOH بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری با و بدون حضور سبک‌دانه اسکوریا در شکل ۷- الف نمایش داده شده است. همانگونه

که ملاحظه می‌گردد، افزایش غلظت NaOH از ۶M به ۱۰M سبب بهبود مقاومت فشاری در تمامی سنین عمل‌آوری شده است. به عنوان نمونه، مقاومت فشاری ۲۸ روزگی در N6M1.5NN به میزان $57/6 \text{ MPa}$ به دست آمد که با افزایش غلظت NaOH به ۸M و ۱۰M این میزان به $59/4 \text{ MPa}$ و $60/8 \text{ MPa}$ افزایش پیدا نمود. افزایش مقاومت فشاری با افزایش غلظت NaOH تا ۱۰M در این مطالعه می‌تواند به انحلال بیشتر Si و Al و شرکت آنان در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون مرتبط دانست [۳۳]. البته این بدان معنی نمی‌باشد که با افزایش بیشتر غلظت NaOH نیز روند افزایش مقاومت فشاری وجود دارد بلکه می‌توان عنوان نمود که NaOH در غلظت کم، قلیائیت کافی را برای تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمری ایجاد نمی‌کند و در غلظت بالا، مخلوط ژئوپلیمری دارای قلیائیت بیشتری می‌باشد که مانع از واکنش‌پذیری می‌شود [۳۴]. جهت بررسی بیشتر تأثیر غلظت NaOH بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری،

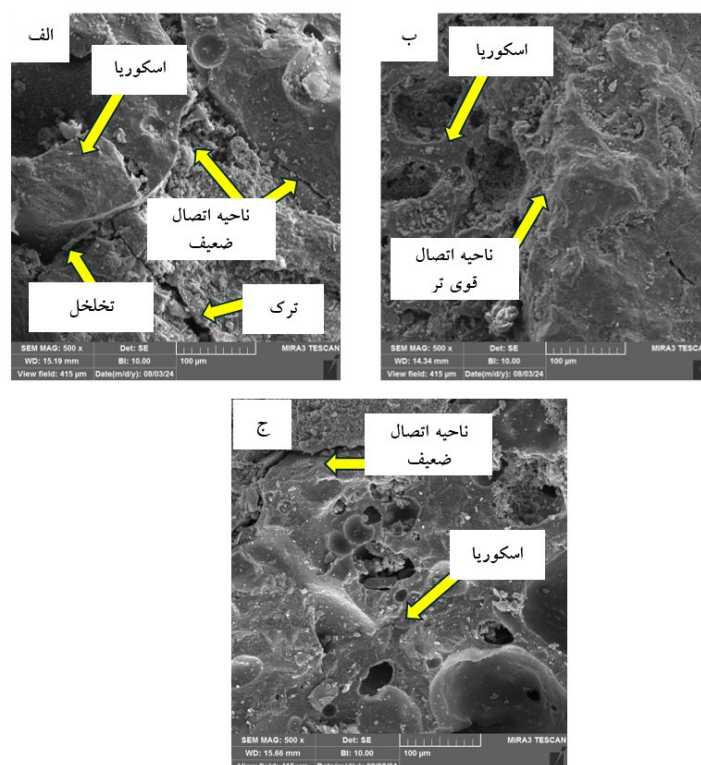
همانگونه که در شکل ۷ قابل مشاهده است افزودن سبک‌دانه اسکوریا سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری در تمامی سنین عمل‌آوری شده است که این نتیجه در راستای مطالعه دولتاباد^{۱۲} و همکاران می‌باشد که تأثیر اسکوریا بر بتن خودتراکم معمولی را مطالعه نموده‌اند [۳۱]. بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری بسته به غلظت NaOH و نسبت NS/NH در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزگی به ترتیب ۴۹، ۵۱/۲ و ۵۲/۵ درصد بود. تخلخل ذاتی بالاتر اسکوریا نسبت به سنگدانه معمولی که باعث ضعف بتن در تحمل بارهای فشاری می‌گردد را می‌توان به عنوان علت کاهش مقاومت نمونه‌ها در نظر گرفت [۳۲].

تأثیر غلظت NaOH بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری با و بدون حضور سبک‌دانه اسکوریا در شکل ۷- الف نمایش داده شده است. همانگونه

¹²- Dolatabad

فشاری با عکسبرداری SEM مورد ارزیابی قرار گرفت.

بعد از ارزیابی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های جدید ساخته شدند و ریزساختار آنان پس از انجام تست مقاومت

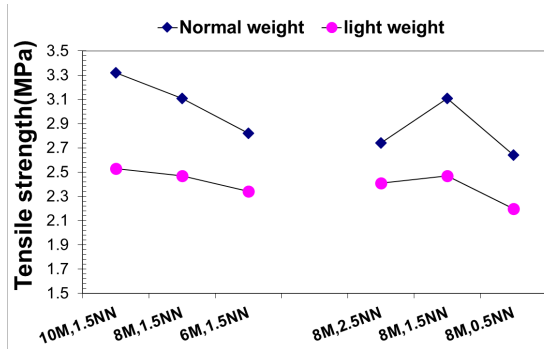


شکل ۸- ریزساختار نمونه‌های (الف) L6M1.5NN، (ب) L10M1.5NN و (ج) L8M0.5NN

افزایش مقاومت فشاری در نسبت NaOH برابر با ۱۰M در نظر گرفت.

شکل ۷- ب، به بررسی تأثیر نسبت NS/NH بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم ژئوپلیمری پرداخته است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با و یا بدون حضور سبک‌دانه اسکوریا بیشترین میزان مقاومت فشاری در تمامی سنین عمل‌آوری در اختلاطهایی با نسبت NS/NH برابر با ۱/۵ به‌دست آمده است. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۱/۵، مقاومت فشاری افزایش یافته و سپس روند کسب مقاومت، کاهشی بوده است. وابسته به سن عمل‌آوری، مقاومت فشاری بتن خودتراکم ژئوپلیمری بدون و با سبک‌دانه، با نسبت NS/NH برابر با ۱/۵ به ترتیب تا ۲۰/۱ و ۱۰/۱ درصد بیشتر از نمونه‌های با نسبت NS/NH برابر با ۰/۵ بود. این میزان برای نمونه‌های بتن معمولی و سبک خودتراکم ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت NS/NH برابر ۱/۵

شکل ۸، نشان‌دهنده تصاویر SEM برای نمونه‌های ساخته شده با غلظت NaOH برابر با ۶M و ۱۰M می‌باشد. بر این مبنا، در نمونه بتن ساخته شده با غلظت NaOH برابر با ۶M، ترک‌های عریض در خمیر ژئوپلیمری به علت عدم تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون به‌وجود آمده است. در حالی که با افزایش میزان غلظت NaOH به ۱۰M، افزایش تراکم ماتریس بتن مشاهده می‌گردد که سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که ناحیه اتصال خمیر ژئوپلیمری و سبک‌دانه اسکوریا در نمونه با غلظت NaOH برابر با ۶M ضعیف می‌باشد و گسترش ترک در این ناحیه اتفاق افتاده است. این در حالی است که با توجه به شکل، ناحیه اتصال در غلظت NaOH برابر با ۱۰M به نسبت، قوی‌تر و متراکم‌تر می‌باشد. این موضوع را می‌توان یکی دیگر از دلایل



شکل ۹- مقاومت کششی بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری

جهت ارزیابی تأثیر غلظت NaOH بر مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری می‌توان به شکل ۹ مراجعه نمود. بر این مبنا، با افزایش میزان غلظت NaOH از ۶ تا ۱۰M میزان مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش پیدا نموده است که میزان افزایش برای بتن با وزن معمولی برابر ۱۷/۷ درصد و برای بتن سبک وزن برابر با ۸/۱ درصد محاسبه شده است. کناگراج^{۱۳} و همکاران نشان دادند که خواص مکانیکی بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری با افزایش غلظت NaOH بهبود می‌یابد [۱۶]. همچنین تأثیر نسبت NS/NH بر مقاومت کششی ۲۸ روزگی نمونه‌های بتنی در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۱/۵ روند افزایشی دارد. میزان افزایش مقاومت کششی در بتن با وزن معمولی ۱۷/۸ و برای بتن سبک وزن ۱۲/۳ درصد بوده است. البته مقاومت کششی با افزایش بیشتر نسبت NS/NH به ۲/۵ (نسبت به NS/NH برابر ۱/۵) در بتن با وزن معمولی ۱۱/۹ درصد و برای بتن سبک وزن ۲/۴ درصد کاهش پیدا نموده است. همانگونه که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، براساس نتایج این مطالعه می‌توان رابطه‌ای به فرم معادله (۲) با ضریب تعیین برابر با ۰/۸۲ برای ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری در نظر گرفت. البته لازم به ذکر است با افزایش تعداد نمونه‌های موجود

نسبت به NS/NH برابر ۲/۵ به ترتیب تا ۴۰/۸ و ۲۱/۵ درصد می‌باشد. روند این نتیجه، در راستای مطالعه محققان در مرجع [۲۸] می‌باشد که اشاره نمودند مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری با افزایش نسبت NS/NH از ۰/۴ به ۱/۵ افزایش پیدا نموده است و سپس روند مقاومت فشاری با افزایش بیشتر، نسبت NS/NH به ۲/۵ کاهش یافته است. بر طبق مطالعات گذشته، با افزایش محتوای Na_2SiO_3 در راستای افزایش نسبت NS/NH، سیلیکات بیشتر با ادغام مقادیر بالاتر Na_2SiO_3 (بیشتر از میزان بهینه) فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را به تأخیر می‌اندازد و مقاومت فشاری کمتری را ایجاد می‌کند. از طرفی در شکل ۸، ناحیه اتصال ضعیف خمیر ژئوپلیمری- سبکدانه در نسبت NS/NH برابر با ۰/۵ را نمایش می‌دهد. گسترش ترک در این ناحیه می‌تواند به علت مقاومت پایین این ناحیه در برابر بارهای فشاری مرتبط باشد که دلیلی بر مقاومت فشاری پایین این طرح اختلاط بتنی دارد.

علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب نمونه‌های بتنی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۹، نمایش‌دهنده مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزگی می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت کششی در محدوده ۲/۲ تا ۳/۳۲ مگاپاسکال متغیر است. همانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی نمونه‌ها نیز با جایگزینی دانه‌های شن با سبک‌دانه اسکوریا کاهش پیدا نموده است. میزان کاهش بسته به غلظت NaOH و نسبت NS/NH در محدوده ۱۲/۰۴ تا ۲۳/۸ درصد متغیر می‌باشد.

به‌نظر می‌رسد می‌توان دلایل و مکانیسم‌هایی که بیشتر در ارتباط با تأثیر سبک‌دانه اسکوریا بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم ژئوپلیمری عنوان شد را اکنون نیز برای کاهش مقاومت کششی در نظر گرفت.

13- Kanagaraj

اسکوریا است [۳۲]. از طرفی بر مبنای نتایج موجود در شکل ۱۱، می‌توان استنباط نمود که غلظت NaOH از عوامل تأثیرگذار بر جذب آب بتن خودتراکم ژئوپلیمری می‌باشد به‌نحوی که افزایش غلظت NaOH از ۶ به ۸M سبب کاهش جذب آب در نمونه‌های بتنی بدون و با حضور سبک‌دانه اسکوریا گردیده است و سپس با افزایش غلظت NaOH به ۱۰M جذب آب افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی میزان جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری در نسبت‌های متفاوت NS/NH که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، می‌توان بدین نتیجه رسید که کمترین میزان جذب آب صرف‌نظر از حضور سبک‌دانه، در نمونه‌های ساخته شده با نسبت NS/NH برابر ۱/۵ به‌دست آمده است. احتمالاً تراکم بالاتر و ناحیه اتصال قوی‌تر در نمونه‌های با نسبت NS/NH برابر با ۱/۵ می‌تواند منجر به جذب آب پایین‌تر گردیده باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر افزودن اسکوریا به عنوان یک سبک‌دانه با منابع قابل‌قبول در کشورمان و همچنین قابلیت بهره‌گیری در تولید بتن با مقاومت بالا، بر عملکرد بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با تغییر در غلظت NaOH (۶، ۸ و ۱۰M) و نسبت NS/NH (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵)، ۱۰ اختلاف بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری با و بدون اسکوریا ساخته شد و تحت آزمایشات بتن تازه شامل جریان اسلامپ، T_{50} ، شاخص پایداری چشمی، زمان عبور از قیف V شکل و حلقه J و همچنین بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب قرار گرفتند. بر مبنای نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

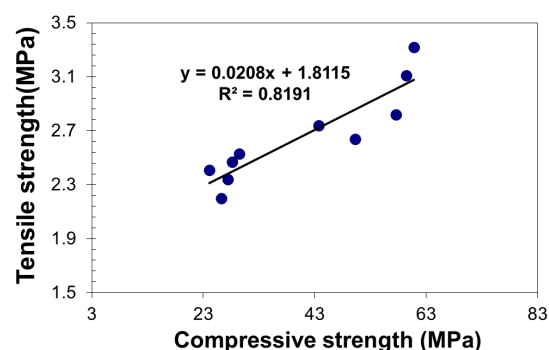
(الف) استفاده از سبک‌دانه اسکوریا به علت کاهش وزن مخلوط سبب کاهش میزان جریان اسلامپ تا ۱۱/۳ درصد و افزایش زمان‌های T_{50} و قیف V شکل به ترتیب تا ۳۹/۴ و ۷۱/۴ درصد شده

می‌توان به تخمین بهتری از رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دست پیدا نمود.

$$F_s = 0.02 \times F_{cu} + 1.81 \quad (2)$$

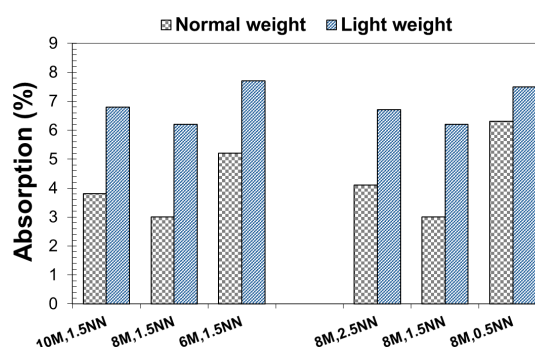
در این رابطه، F_s و F_{cu} به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌باشد.

جذب آب نمونه‌های بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری در سن ۲۸ روزگی محاسبه گردید و نتایج در مقایسه با بتن با وزن معمولی در شکل ۱۱ نمایش داده شد.



شکل ۱۰- رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی

همانگونه که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد، میزان جذب آب در بتن با وزن معمولی در محدوده ۳ تا ۶/۳ درصد متغیر بود که این میزان در بتن سبک وزن در محدوده ۶/۲ تا ۷/۷ درصد نتیجه شده است. بر این مبنای می‌توان عنوان نمود که استفاده از سبک‌دانه اسکوریا سبب افزایش میزان جذب آب بتن می‌گردد.



شکل ۱۱- جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری

این مهم به علت جذب آب بالاتر خود سبک‌دانه اسکوریا در مقایسه با شن می‌باشد که در راستای مطالعات گذشته بر روی بتن سبک خودتراکم ژئوپلیمری حاوی

است. از طرفی، ضعف ذاتی سبک‌دانه اسکوریا در برابر بارهای اعمالی و همچنین تخلخل بالای آن سبب کاهش خواص مکانیکی و افزایش جذب آب در نمونه‌های بتن خودتراکم ژئوپلیمری گردیده است. با این حال همچنان با جایگزینی ۱۰۰ درصدی درشت‌دانه طبیعی با اسکوریا، نمونه‌های مورد مطالعه براساس میزان مقاومت فشاری در رده بتن سبک سازه‌ای طبقه‌بندی می‌گردند.

(ب) با افزایش غلظت NaOH، چسبندگی مخلوط‌های بتنی افزایش پیدا نمود که سبب کاهش میزان جریان اسلامپ و افزایش ویسکوزیته گردید. از طرفی با افزایش غلظت NaOH از ۶ به ۱۰M به علت انحلال بیشتر Si و Al و شرکت آنان در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، مقاومت فشاری بسته به سن عمل‌آوری تا ۲۰/۳ درصد در بتن با وزن معمولی و تا ۱۵/۹ درصد در بتن با وزن سبک افزایش پیدا نموده است. روند مشابه در نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها نیز مشاهده گردید. همچنین نتایج عکسبرداری SEM نشان از بهبود ناحیه اتصال و همچنین تراکم ماتریس در بتن ژئوپلیمری با غلظت NaOH برابر با ۱۰M دارد که از علل بهبود خواص مکانیکی در این نمونه‌ها می‌باشد.

(پ) افزایش نسبت NS/NH به علت ویسکوزیته بالاتر Na_2SiO_3 در مقایسه با NaOH نیز بر خصوصیات تازه بتن خودتراکم موثر بود، به نحوی که افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۲/۵ میزان جریان اسلامپ را در بتن با وزن معمولی از ۸۴۰ به ۵۴۰ میلیمتر و در بتن با وزن سبک از ۷۹۰ به ۵۳۰ میلیمتر کاهش داد. همچنین، میزان

زمان T_{50} را در بتن با وزن معمولی از ۱/۴ به ۷/۲ ثانیه و در بتن با وزن سبک از ۱/۵ به ۸/۷ ثانیه و میزان زمان عبور از قیف V شکل را در بتن با وزن معمولی از ۷ به ۳۶ ثانیه و در بتن با وزن سبک از ۱۲ به ۴۰ ثانیه افزایش داد. افزایش نسبت NS/NH از ۰/۵ به ۱/۵ احتمالاً به علت اینکه Si بیشتری برای ژئوپلیمریزاسیون در اختیار سیستم قرار می‌گیرد، بسته به سن عمل‌آوری مقاومت‌های فشاری و کششی بتن خودتراکم ژئوپلیمری با وزن معمولی را به ترتیب تا ۲۰/۱ و ۱۷/۸ درصد و بتن خودتراکم ژئوپلیمری سبک‌وزن را تا ۱۰/۱ و ۱۲/۳ درصد افزایش داد. با این وجود، افزودن سیلیکات بیشتر با ادغام مقادیر بالاتر Na_2SiO_3 فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را به تأخیر می‌اندازد که سبب می‌گردد هر دو مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت NS/NH از ۱/۵ به ۲/۵ کاهش پیدا نماید.

(ت) این مطالعه می‌تواند با بررسی پارامترهای مربوط به دوام مانند مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر حمله‌های شیمیایی و همچنین ارزیابی میزان نفوذ یون‌های مخرب در آینده ادامه پیدا نماید. از طرفی، مقایسه عملکرد دیگر سبک‌دانه‌ها در برابر اسکوریا بر رفتار بتن خودتراکم ژئوپلیمری برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

این مطالعه، تحت حمایت دانشگاه گلستان انجام پذیرفته است.

References

- [1] Ramezani pour A, Esmaeili K, Ghahari S, Ramezani pour A. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. Construction and building materials. 2014; 73: 187-194. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.072

- [2] Ramezaniapour AA. Cement replacement materials, Properties, Durability, Sustainability. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014.
- [3] Reddy MS, Dinakar P, Rao BH. A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2016; 234: 12-23. doi: **10.1016/j.micromeso.2016.07.005**
- [4] Kupaei RH, Alengaram UJ, Jumaat MZB, Nikraz H. Mix design for fly ash based oil palm shell geopolymer lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2013; 43: 490-496. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2013.02.071**
- [5] Posi P, Ridditirud C, Ekvong C, Chammanee D, Janthowong K, Chindaprasirt P. Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. *Construction and Building Materials*. 2015; 94: 408-413. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2015.07.080**
- [6] Posi P, Teerachanwit C, Tanutong C, Limkamoltip S, Lertnimoolchai S, Sata V, Chindaprasirt P. Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Materials & Design (1980-2015)*. 2013 Dec 1; 52: 580-586. doi: **10.1016/j.matdes.2013.06.001**
- [7] Mermerdaş K, Algin Z, Ekmen Ş. Experimental assessment and optimization of mix parameters of fly ash-based lightweight geopolymer mortar with respect to shrinkage and strength. *Journal of Building Engineering*. 2020; 31: 101351. doi: **10.1016/j.jobe.2020.101351**
- [8] Oleiwi SM, Algin Z, Nassani DE, Mermerdaş K. Multi-objective optimization of alkali activator agents for FA-and GGBFS-based geopolymer lightweight mortars. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018; 43: 5333-5347. doi: **10.1007/s13369-018-3170-x**
- [9] Öztürk O. Engineering performance of reinforced lightweight geopolymer concrete beams produced by ambient curing. *Structural Concrete*. 2022; 23(4): 2076-2087. doi: **10.1002/suco.202000664**
- [10] Hema P, Revathi V. Durability evaluation of GGBS-RHA-based geopolymer concrete along with lightweight expanded clay aggregate using SEM images and EDAX analysis. *Buildings*. 2024; 14(11): 3355. doi: **10.3390/buildings14113355**
- [11] Abbas W, Khalil W, Nasser I. Production of lightweight Geopolymer concrete using artificial local lightweight aggregate. *InMATEC Web of Conferences*. 2018; 162: 02024. doi: **10.1051/mateconf/201816202024**
- [12] Kumar V, Kumar PJ. Self-compacted geopolymer concrete incorporating waste ceramic powder. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2024; 7: 1-16. doi: **10.1007/s41939-024-00510-7**
- [13] Kumar NK, Reddy IR. A study on the effect of NaOH molarity on flyash based self compacting geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2023. doi: **10.1016/j.matpr.2023.03.144**
- [14] Ghafoor MT, Fujiyama C. Mix design process for sustainable self-compacting geopolymer concrete. *Heliyon*. 2023; 9(11). doi: **10.1016/j.heliyon.2023.e22206**
- [15] Saini G, Vattipalli U. Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 12: e00352. doi: **10.1016/j.cscm.2020.e00352**
- [16] Kanagaraj B, Anand N, Praveen B, Kandasami S, Lubloy E, Naser M. Physical characteristics and mechanical properties of a sustainable lightweight geopolymer based self-compacting concrete with expanded clay aggregates. *Developments in the Built Environment*. 2023; 13: 100115. doi: **10.1016/j.dibe.2022.100115**
- [17] Rahmanpour M, Afshin H. The combined retrofitting of reinforced light structural concrete beams in near joint by using of steel plates and CFRP jacket under cycling loads. *Concrete Research*. 2016; 9(1): 71-82. [In Persian]
- [18] Khanzadi M, Chalekaee A. Property improvement of Iranian LWAC: investigation of mechanical properties and stress-strain curve. *Modares Civil Engineering journal*. 2012; 12(4): 79-89. [In Persian]
- [19] Kılıç A, Atiş CD, Yaşar E, Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(10): 1595-1599. doi: **10.1016/S0008-8846(03)00131-5**
- [20] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. Switzerland, 2005.
- [21] ACI 237R-07. Self-Consolidating Concrete. American Concrete Institute Farmington Hills, MI, USA; 2007.
- [22] INSO 1608. Hardened Concrete- Part 3: Compressive Strength of Test Specimens- Test Method. Iranian National Standardization Organization; 2015.
- [23] ASTM C496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [24] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

- [25] Diawara H. Parametric study of self-consolidating concrete, Doctor of Philosophy (PhD) Thesis, University of Nevada, Las Vegas, USA, 2008.
- [26] Arun BR, Nagaraja PS, Srishaila JM. An effect of NaOH molarity on fly ash- Metakaolin-based self-compacting geopolymer concrete. In Sustainable construction and building materials: Select Proceedings of ICSCBM. 2018 Dec 31; 233-244. **doi: 10.1007/978-981-13-3317-0_21**
- [27] Kalyana Rama J, Reshmi N, Sivakumar M, Vasan A. Experimental investigation and numerical validation on the effect of NaOH concentration on GGBS based self-compacting geopolymer concrete. Advances in Structural Engineering: Materials. New Delhi: Springer; 2015. **doi: 10.1007/978-81-322-2187-6_127**
- [28] Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P, Pimraksa K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. Journal of Hazardous Materials. 2009; 168(1): 44-50. **doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120**
- [29] Madandoust R, Ranjbar MM, Mousavi SY. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. Construction and Building Materials. 2011; 25(9): 3721-3731. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.018**
- [30] ACI 213R-03. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. ACI Committee 213. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA; 2003.
- [31] Dolatabad YA, Kamgar R, Tazangi MAJ. Effects of perlite, leca, and scoria as lightweight aggregates on properties of fresh and hard self-compacting concretes. Journal of Advanced Concrete Technology. 2020; 18(10): 633-647. **doi: 10.3151/jact.18.633**
- [32] Mohseni E, Kazemi MJ, Koushkbaghi M, Zehtab B, Behforouz B. Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. Construction and building materials. 2019; 209: 532-540. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.067**
- [33] Shadnia R, Zhang L. Experimental study of geopolymer synthesized with class F fly ash and low-calcium slag. Journal of materials in civil engineering. 2017; 29(10): 04017195. **doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002065**
- [34] Khan KA, Raut A, Chandrudu CR, Sashidhar C. Design and development of sustainable geopolymer using industrial copper byproduct. Journal of Cleaner Production. 2021; 278: 123565. **doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123565**