

# Experimental Study on the Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Porous Concrete

Mahsa Noghabaei

M.Sc., Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Meysam Bayat\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
bayat.m@pci.iaun.ac.ir

## Abstract

Alkali-activated concretes with slag base as new materials could be used to achieve a healthy environment without pollutants such as greenhouse gases and to solve the problems of water shortage and groundwater resources and use by-products produced during the processing of materials such as iron, steel and copper alloys for construction projects. On the other hand, porous concretes have economic and environmental potentials such as preventing flooding, increasing groundwater reserves, decreasing the flow of surface water. Slag-based alkali-activated concretes have been synthesized by natural pozzolans and industrial wastes such as sodium silicate with alkaline silicate and alkali hydroxide solutions. In the current study, the performance of alkali-activated porous concrete with the different amounts of sodium hydroxide molarity and the ratio of sodium hydroxide to sodium silicate has been investigated in terms of mechanical properties such as compressive strength. The flexibility and permeability of the specimens were also investigated. The tests have been performed on 9 series of samples with three values of 8, 12 and 16 Molar of sodium hydroxide and three ratios of sodium silicate to sodium hydroxide 1, 2 and 3 under curing times of 7, 14 and 28 days. The test results show that the alkali-activated porous concrete indicated a higher initial strength compared to conventional porous concretes. The compressive strength at curing time of 14 days and flexural strength at curing time of 7 days were about 75% of its strength at curing time of 28 days which is significant. The compressive and flexural strengths have been increased with the increasing of molarity and the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide about 20 to 25% and 9 to 13%, respectively. However, the permeability decreases with the increasing of molarity of sodium hydroxide solution or the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide.

**Keywords:** Porous Concrete, Activated Alkali, Iron Furnace Slag, Sodium Hydroxide, Sodium Silicate

---

\* Corresponding Author

Noghabaei, M., Bayat, M. Experimental Study on the Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Porous Concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021; 6(2): 152-171.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.319871.1239>

2538-5828/ © 2021 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/>).

# بررسی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل سرباره‌ای قلیا فعال

دریافت مقاله: ۳۰-۰۹-۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۱۷-۰۱-۱۴۰۰

مهسا نقیائی

کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

میثم بیات

استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

[biyat.m@pci.iaun.ac.ir](mailto:biyat.m@pci.iaun.ac.ir)

(نویسنده مسئول)

## چکیده

در راستای رسیدن به محیط زیستی سالم و بدون آلاینده‌هایی همچون گازهای گلخانه‌ای و همچنین حل مشکل کم آبی و کاهش آب‌های زیر زمینی و در جهت استفاده از فرآورده‌های جانبی تولید شده در زمان فرآوری مصالحی همچون آلیاژهای آهن، فولاد و مس و ... از بتن قلیا فعال با پایه سرباره در صنعت ساخت و ساز استفاده می‌شود. بتن متخلخل دارای مزایای اقتصادی و محیط زیستی همچون جلوگیری از بروز آب گرفتگی در معابر به هنگام بارندگی و افزایش ذخایر آبهای زیرزمینی و مواردی دیگر است. بتن قلیا فعال با پایه سرباره از طریق فعال سازی پوزولان‌های طبیعی و پسماندهای صنعتی حاوی سیلیکات سدیم با محلول‌های سیلیکات قلیایی و هیدروکسید قلیایی عمل آوری می‌شوند. در این پژوهش نحوه عملکرد بتن متخلخل سرباره‌ای قلیا فعال با مقادیر متفاوت مولاریته سدیم هیدروکسید و نسبت ترکیب‌های متفاوت سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات که همراه با سرباره کوره بلند آهنگدازی به دست آمده است از لحاظ خواص مکانیکی مورد بررسی قرار می‌دهد بدین صورت که میزان مقاومت فشاری، خمشی و نفوذپذیری نمونه‌ها آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌ها بر روی ۹ سری نمونه با سه غلظت ۸، ۱۲ و ۱۶ مولار محلول هیدروکسید سدیم و سه نسبت ترکیبی سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم ۱، ۲ و ۳ در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گرفت. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این نوع بتن مقاومت اولیه مناسبی کسب کرده است بطوریکه مقاومت فشاری این بتن در سن ۱۴ روزگی و مقاومت خمشی آن در سن ۷ روزگی به ۷۵ درصد از مقاومت ۲۸ روزگی خود رسیده است که دستیابی به این میزان در این سن قابل توجه است. با افزایش مقادیر مولاریته و نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید این بتن با افزایش مقاومت فشاری و خمشی همراه شده است به گونه‌ای که با افزایش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید سبب ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش در میزان مقاومت فشاری و ۹ تا ۱۳ درصد افزایش در میزان مقاومت خمشی شده است. این در حالیست که هرچه مولاریته محلول هیدروکسید سدیم و نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید افزایش یابد باعث کاهش نفوذپذیری بتن شده است.

کلمات کلیدی: بتن متخلخل، قلیا فعال، سرباره کوره آهنگدازی، سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات

سیلاب‌های شهری و تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی آن به عنوان یک پدیده طبیعی به کمک برنامه‌ریزی، قابل پیش‌بینی می‌باشند. به طوری که خسارت‌های آن را می‌توان به حداقل رساند و با احیای آن، بخشی از نیاز به آب را برطرف نمود. با شروع بارندگی بسیاری از آلودگی‌های هوا در قطرات باران حل می‌شوند. در اثر جریان سیلاب آلوده شهری و انتقال طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های مختلف به محیط‌های آبی و خاکی، عدم توازن اکولوژیکی در محیط زیست ایجاد می‌شود. با توجه به این که تصفیه طبیعی آب از طریق خاک ساده‌ترین راه برای مدیریت آلاینده رواناب فاضلاب‌های سطحی است، بهتر است به استفاده از بتن متخلخل روی آورد که می‌تواند باعث نفوذ بخش قابل توجهی از رواناب‌های سطحی، به طور طبیعی شود [1-10].

رشد روز افزون صنعت ساخت و ساز در حوزه‌ی سازه‌های بتن موجب شده است که این ماده به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد در قرن اخیر شناخته شود و افزایش میزان تقاضا برای تولید و مصرف سیمان‌های پرتلند را در پی داشته است. از طرف دیگر، استفاده از ضایعات صنعتی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند علاوه بر اقتصادی بودن پروژه باعث حفظ محیط زیست شود [11-18]. این در حالی است که تولید سیمان‌های پرتلند علاوه بر مصرف منابع طبیعی چون سنگ آهک، مصرف سوخت‌های فسیلی و انرژی الکتریکی، سبب انتشار مقدار قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آلودگی محیط زیست می‌شوند. همچنین با توجه به خواص مکانیکی نامناسب بتن متخلخل و نیاز به کاهش میزان مخاطرات محیط زیستی سیمان و بتن، امروزه با استفاده از مواد جایگزین و افزودنی مناسب می‌توان سبب بهبود خواص مکانیکی و کاهش مخاطرات محیط زیستی شد. از طرف دیگر، در بسیاری از کشورهای صنعتی سرباره فولاد که یکی از فراورده‌های فرعی کارخانه‌ی فولادی است که به علت حجم زیاد، اثرات مخرب محیط زیستی بسیاری ایجاد می‌نماید [19-22]. بنابراین با توجه به تولید روز افزون مصالح فولادی و میزان سرباره‌ی تولید شده کارخانه فولاد، این فراورده‌ی جانبی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان مصرفی در ساخت بتن باشد [13]. ۹۵ درصد وزنی سرباره از اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم، کلسیم و منیزیم تشکیل شده و بقیه آن شامل گوگرد، اکسیدهای آهن و منگنز است. کیفیت سرباره آهن گدازی و فعالیت واکنش‌زایی آن به نسبت وزنی تشکیل دهنده اکسیدهای اصلی بستگی دارد. خاصیت هیدرولیکی روبراره از سرد شدن سریع روبراره مذاب حاصل می‌شود که معمولاً این عمل توسط آب انجام می‌گردد و روبراره به ماده شیشه‌ای با ابعاد کوچکتر از ۴/۷۵ میلی متر تبدیل می‌شود. پس از سرد شدن روبراره را خشک و آسیاب می‌کنند تا ریزی دانه‌های آن به اندازه دانه‌های سیمان شود. چنانچه سرد شدن روبراره تدریجی انجام گیرد، روبراره ترکیب بلوری می‌یابد که خواص سیمانی لازم و کافی ندارد [23,24]. عوامل تعیین کننده خاصیت سیمانی سرباره عبارتند از: ترکیب شیمیایی روبراره، درصد ترکیب شیشه‌ای و آمورف، درجه نرمی روبراره، دمای محیط در مرحله فرآیند آبدگیری و غلظت ترکیبات قلیایی در جریان واکنش [25,26].

در دو دهه‌ی اخیر بتن قلیا فعال با عملکردی بالا و هزینه‌ی ساخت پایین به عنوان دوست دار محیط زیست با قابلیت جایگزینی برای بتن‌های ساخته شده با سیمان معمولی مطرح شده است. از جمله خواص این‌گونه بتن‌ها می‌توان از مقاومت فشاری بالا، مقاومت سایشی بالا، مقاومت در برابر حمله‌های سولفاتی و اسیدی، گیرش سریع، مقاومت در برابر دمای بالا، عدم شرکت در واکنش با سنگدانه‌های مصرفی نام برد. بتن قلیا فعال سرباره‌ای که از طریق فعال سازی سرباره کوره بلند با استفاده از محلول قلیایی تولید می‌شود، یکی از روش‌های تولید بتنی سازگار با محیط زیست است. بنابراین بتن قلیا فعال سرباره‌ای، فراورده‌های ضایعاتی را به محصول مفید تبدیل می‌کند و در جهت کاهش مصرف سیمان و آلودگی محیط زیست، در سازه‌ها به کار می‌روند [8,27-30].

چانگ و همکاران [31] خواص بتن ساخته شده با سرباره کوره قوس الکتریکی و سیمان سرباره فعال شده قلیایی را مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت مکانیکی بتن ساخته شده با سیمان سرباره فعال شده قلیایی بیشتر از مقاومت مکانیکی بتن ساخته شده با سیمان پرتلند است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای بتن ساخته شده با سرباره کوره قوس الکتریکی و سیمان سرباره فعال شده قلیایی از ۳۵ مگاپاسکال فراتر رفته، در حالی که نفوذپذیری آن بالاتر از ۰/۴۹ سانتی متر بر ثانیه است. سان و همکاران [32] اثرات اندازه سنگدانه و نوع مصالح سیمانی را بر روی خواص فیزیکی بتن متخلخل از نظر مقاومت فشاری، چگالی، تخلخل و نفوذپذیری مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مواد فعال قلیایی برای تولید بتن در محل مناسب هستند و خواص مکانیکی و نفوذپذیری بهتری نسبت به بتن ساخته شده با سیمان دارند. در حالت کلی، ژئوپلیمر متاکائولین و سرباره بهترین خواص مکانیکی و نفوذپذیری را برای نمونه‌های بتنی ایجاد کرده‌اند.

در این پژوهش، ساخت بتن متخلخل قلیا فعال سرباره‌ای با استفاده از محلول قلیایی فعال کننده پایه سدیم مورد بررسی واقع شده است که در آن اثر غلظت محلول هیدروکسید سدیم و نسبت ترکیب سیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) به هیدروکسید سدیم ( $\text{NaOH}$ ) مورد بررسی واقع شده است. همچنین نسبت آب به مواد چسباننده در کلیه طرح‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق عمل‌آوری نمونه‌ها به صورت مستغرق در آب در دمای محیط خواهد بود و نمونه‌های هر طرح در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی قرار خواهند گرفت. در طی انجام این تحقیق به بررسی تغییرات خواص مکانیکی اعم از مقاومت خمشی، فشاری و همچنین نفوذ پذیری در حین بررسی اثر تغییرات نسبت محلول سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و تغییر غلظت مولاریته و همچنین میزان عبور آب از نمونه‌ها پرداخته شده است. استفاده از سرباره که از فرآورده جانبی صنایع آهن می‌باشد و همچنین مقرون به صرفه و در دسترس بودن مصالح مورد نیاز ساخت بتن قلیا فعال سبب ایجاد زمینه تحقیق و تولید در زمینه بتن متخلخل قلیا فعال سرباره‌ای می‌شود.

## ۲- مصالح مصرفی

### آب مصرفی

به طور کلی مصرف آب آشامیدنی برای ساخت و عمل‌آوری بتن مناسب است. در این پژوهش از آب لوله کشی شهر اصفهان استفاده شده است. آب مصرفی دارای pH بین ۵ تا ۸/۵ می‌باشد.

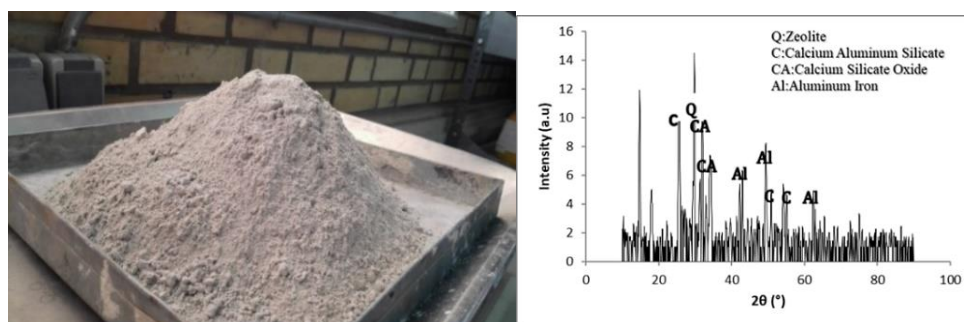
### سرباره‌ی کوره بلند آهن‌گذاری

سرباره‌های کوره‌ی بلند آهن‌گذاری (سرباره‌ی آهن خام) و فولاد سازی، در صنایع آهن و فولاد سازی موجود هستند. از آهن، اکسید منیزیم و آلومین می‌توان به عنوان اجزای مطلوب در سرباره‌ها نام برد. همچنین افزایش قلیاییت سرباره و وجود اکسید آلومینیم در آن، بر کیفیت و مرغوبیت سرباره می‌افزاید. ضعیف بودن واکنش این نوع از سرباره‌ها با آب، با افزودن فعال کننده‌هایی مانند هیدروکسید کلسیم، جبران می‌شود و بدین ترتیب واکنش‌های ترکیبی، همانند سیمان پرتلند ولی با سرعت کمتر رخ خواهند داد. در این پژوهش از سرباره کوره بلند آهن‌گذاری به عنوان منبع سیلیکات آلومینیوم برای افزایش خواص مکانیکی استفاده گردید. این سرباره محصول جانبی شرکت ذوب آهن اصفهان بوده که در کارخانه سیمان سپاهان آسیاب گردیده و به اندازه‌ای برابر با سطح مخصوص ۴۲۰۰ گرم بر سانتی‌متر مربع و وزن مخصوص ۲/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب تهیه شده است. آنالیز شیمیایی این سرباره توسط دستگاه XRF انجام گردیده و در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سرباره مصرفی (در هر ۵ گرم) مطابق آنالیز XRF

مقدار (%)	ترکیب شیمیایی
۳۱.۰۹	SiO <sub>2</sub>
۱۵.۱۴	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱.۵۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۳۸.۲۴	CaO
۸.۶۹	MgO
۰.۴۷	K <sub>2</sub> O
۰.۴۲	Na <sub>2</sub> O
۲.۱۸	SO <sub>3</sub>
۱.۲۳	TiO <sub>2</sub>
۰.۹۹	MnO
۰.۰۲	L.O.I

پراش پرتو ایکس یک روش استاندارد برای بررسی ساختار و خواص ترکیبات مواد مختلف مخصوصا پلیمرها است که برای شناسایی فاز یک ماده بلوری استفاده می‌شود. سرباره کوره بلند ذوب آهن مورد استفاده در این پژوهش به همراه الگوی پراش پرتو ایکس آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. سرباره کوره بلند ذوب آهن و نتیجه XRD بر روی آن

### سدیم سیلیکات

در این پژوهش از سدیم سیلیکات نشان داده شده در شکل (۲) مایع با وزن مخصوص ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نسبت مولی (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) برابر ۲/۶ مورد استفاده شده است و همچنین مشخصات شیمیایی و فیزیکی این ماده در جداول (۲) و (۳) قابل مشاهده است.

جدول (۲) - مشخصات شیمیایی محلول سدیم سیلیکات مورد استفاده

ترکیبات شیمیایی	درصد ترکیبات
SiO <sub>2</sub>	۳۹٪
Na <sub>2</sub> O	۱۵٪
H <sub>2</sub> O	۴۶٪

جدول (۳) - مشخصات محلول سدیم سیلیکات

اسم	نام‌های دیگر	فرمول شیمیایی	جرم مولی gr/mol	شکل ظاهری	دمای ذوب (°C)	حلالیت در آب
سدیم سیلیکات	سدیم متا سیلیکات، شیشه مایع، آب شیشه	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۱۲۲/۰۶	جامد بی رنگ	۱۰۸۸	حلال



شکل ۲. سدیم سیلیکات مایع مورد استفاده در این تحقیق

### سدیم هیدروکسید

در این تحقیق از سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور مصری با فرمول شیمیایی NaOH نشان داده شده در شکل (۳)، ماده‌ای جامد و سفیدرنگ با دمای ذوب ۱۳۹۰ درجه سانتی‌گراد و وزن مخصوص ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است. مشخصات این ماده را در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول (۴) - مشخصات کلی سدیم هیدروکسید

نام شیمیایی	نام‌های دیگر	فرمول شیمیایی	جرم مولی gr/mol	شکل ظاهری	چگالی gr/cm <sup>3</sup>	دمای ذوب (°C)	دمای جوش (°C)	حلالیت در آب
سدیم هیدروکسید	سود سوزآور، سود پرک	NaOH	۳۹.۹۹۷۱	جامد، سفید رنگ، پولکی شکل	۲.۱۳	۱۰۸۸	۱۳۸۸	حلال



شکل ۳. سدیم هیدروکسید

### سنگدانه مصرفی

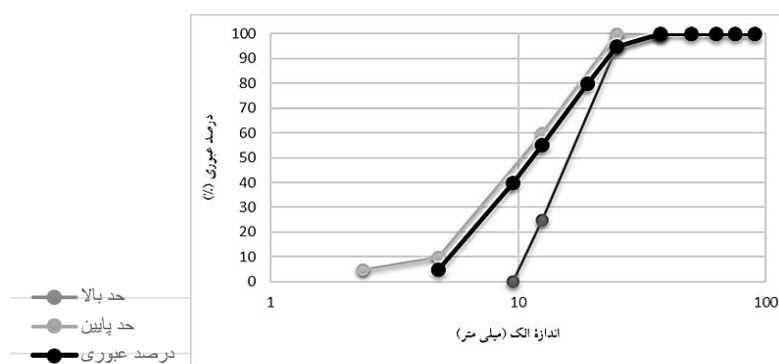
سنگدانه بکار گرفته شده در این پژوهش از مصالح کوهی شهرستان اصفهان با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر بوده که چگالی ظاهری آن برابر ۲/۶۸ gr/cm<sup>3</sup> و وزن مخصوص ظاهری آن برابر ۱۵۵۰ Kg/m<sup>3</sup> است. سنگدانه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین آزمایش دانه‌بندی سنگدانه مصرفی به کمک الک و بر اساس استاندارد ASTM C33 صورت گرفته است که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۵) ذکر شده است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده نیز در شکل (۵) ارائه شده است.

جدول (۵) مشخصات فیزیکی سنگدانه های درشت (شن)

۲۶۹۳	وزن مخصوص ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )
۲/۶۸	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )
۰/۵	رطوبت اشباع با سطح خشک (%)
۱/۲	جذب آب (%)



شکل ۴. سنگدانه مصرفی در آزمایش



شکل ۵. منحنی دانه بندی درشت دانه (شن) مصرفی

### ۳- روش کار

برای انجام آزمون مقاومت فشاری برای هر طرح در هر یک از سنین، ۳ نمونه در نظر گرفته شده است که برای ساخت آن از قالب‌های استوانه‌ای ۲۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شده که جمعا تعداد ۸۱ نمونه‌ی ساخته شده است. همچنین برای آزمون مقاومت خمشی برای هر طرح در هر یک از سنین، ۳ نمونه در نظر گرفته شده است که برای ساخت آن از قالب‌های مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰×۱۰×۵ سانتی‌متر استفاده شده که در مجموع کل طرح‌های مدنظر تعداد ۸۱ عدد نمونه ی خمشی ساخته شده است. برای انجام آزمایش نفوذ پذیری نیز برای هر طرح ۱ نمونه در نظر گرفته جمعا ۹ عدد نمونه ساخته در نتیجه جمع کل نمونه‌ها برابر ۱۷۱ عدد نمونه می‌باشد. برای بررسی و آنالیز سریع‌تر، نام‌گذاری نمونه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و معرف نوع نمونه می‌باشد لذا برای این پژوهش اختصارهایی در نظر گرفته شده است که در جدول (۶) ارائه شده است. پس از آن با کنار هم قرار دادن این اختصارها نوع نمونه، میزان نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و همچنین مولاریته محلول قلیایی مشخص می‌شود.

جدول (۶) نام و اختصار بتن‌ها

اختصار	معادل فارسی	کلمه انگلیسی
M	مولاریته	Molarity
R	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید	Ratio



برای مثال نمونه‌ای که به صورت (M8R1.0) نام‌گذاری شده است، حرف لاتین M از سمت چپ داخل پرانتز نشان دهنده‌ی مولاریته و عدد ۸ نشان دهنده مقدار مولاریته و حرف لاتین R نشان دهنده‌ی نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید است و عدد ۱ نوشته شده بعد از آن نشان دهنده‌ی مقدار این نسبت است. برای انجام آزمون مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری ۹ طرح در نظر گرفته شده است که در جدول (۷) ارائه شده است:

جدول (۷) طرح اختلاط بتن متخلخل سربراه‌ای قلیا فعال

نام طرح	نسبت آب به سربراه	سربراه $\text{Kg/m}^3$	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید	نسبت محلول قلیایی به سربراه	مولاریته سدیم هیدروکسید	آب اضافی $\text{Kg/m}^3$	سدیم سیلیکات $\text{Kg/m}^3$	سدیم هیدروکسید $\text{Kg/m}^3$	سنگدانه $\text{Kg/m}^3$
M8R1.0	۰/۳۸	۳۵۰	۱	۰/۲۳	۸	۹۴	۴۰	۴۰	۱۸۵۰
M12R1.0	۰/۳۸	۳۵۰	۱	۰/۲۳	۱۲	۹۴	۴۰	۴۰	۱۸۵۰
M16R1.0	۰/۳۸	۳۵۰	۱	۰/۲۳	۱۶	۹۴	۴۰	۴۰	۱۸۵۰
M8R2.0	۰/۳۸	۳۵۰	۲	۰/۳۴	۸	۷۹	۸۰	۴۰	۱۸۵۰
M12R2.0	۰/۳۸	۳۵۰	۲	۰/۳۴	۱۲	۷۹	۸۰	۴۰	۱۸۵۰
M16R2.0	۰/۳۸	۳۵۰	۲	۰/۳۴	۱۶	۷۹	۸۰	۴۰	۱۸۵۰
M8R3.0	۰/۳۸	۳۵۰	۳	۰/۴۶	۸	۶۴	۱۲۰	۴۰	۱۸۵۰
M12R3.0	۰/۳۸	۳۵۰	۳	۰/۴۶	۱۲	۶۴	۱۲۰	۴۰	۱۸۵۰
M16R3.0	۰/۳۸	۳۵۰	۳	۰/۴۶	۱۶	۶۴	۱۲۰	۴۰	۱۸۵۰

\* میزان آب مصرفی از مجموع آب آزاد، آب موجود در سدیم سیلیکات و آب موجود در سدیم هیدروکسید محاسبه شده است.

در این پژوهش، به منظور فعال‌سازی از محلول سدیم سیلیکات و محلول سدیم هیدروکسید به نسبت وزنی ۱، ۲ و ۳ استفاده شده است. همچنین براساس جرم مولی سود جامد ( $40 \text{ gr/mol}$ ) برای ساخت محلول قلیایی در این پروژه از محلول ۸، ۱۲ و ۱۶ مولار سدیم هیدروکسید استفاده شده است. در ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها را روغن کاری کرده تا نمونه‌ها به راحتی از قالب خارج شوند. جهت ساخت بتن متخلخل سربراه‌ای قلیا فعال ابتدا بعد از ساخت محلول سدیم هیدروکسید با مولاریته‌های متفاوت، محلول سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات را مخلوط کرده و پس از آن سربراه مورد نظر را به صورت پودر به آن‌ها افزوده شده است، سپس نصف آب مصرفی افزوده و مخلوط شده است. در ادامه با اضافه کردن سنگدانه و مابقی آب به ترکیب، بتن مورد نظر حاصل می‌شود. سپس مخلوط را در قالب‌ها طبق استاندارد 1881 BS ریخته و همگی در سه لایه پر شده و هر لایه با ۲۵ ضربه توسط میله تراکم کوبیده می‌شود پس از پر شدن لایه سوم، با کاردک سطح بتن را صاف می‌شود. برخی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. اتمام مرحله ساخت نمونه‌ها

قالب‌ها پس از پر شدن از مخلوط بتن به مدت ۲۴ ساعت جهت آماده شدن برای عمل‌آوری درون پلاستیک قرار می‌گیرند. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و پس از آن قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها جهت گیرش و عمل‌آوری درون



حوضچه‌ی آب تا رسیدن به زمان آزمایش مربوطه نگهداری می‌شوند. همواره در طول زمان نگهداری در حوضچه دمای آب ثابت نگه داشته می‌شود. همچنین نمونه‌ها به طور کامل درون آب قرار گرفته تا عمل آوری به طور کامل انجام شود. پس از عمل آوری در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، نمونه‌ها از حوضچه خارج شده، در محیط عادی آزمایشگاه قرار گرفته تا آب اضافی آن‌ها خارج گردد. سپس همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، به مدت ۲۴ ساعت درون دستگاه آون با دمای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. علت این کار خارج شدن آب و خشک شدن کامل نمونه‌ها برای انجام هرچه دقیق‌تر آزمایشات مربوطه است، اما باید توجه کرد که حرارت دهی در آون ممکن است به لحاظ شیمیایی بر روی نتایج مقاومت بتن قلیا فعال تاثیر گذار باشد که منجر به ایجاد خطا در نتایج گردد. پس از خروج از آون و رسیدن به دمای معمولی، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری یا خمشی، مطابق شکل (۸) نمونه‌ها داخل دستگاه قرار گرفته‌اند.



شکل ۷. نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری پس از خروج از آون      شکل ۸. نمونه بتن تحت آزمایش مقاومت فشاری و خمشی

روند انجام این پژوهش بدین صورت است که با تغییر در غلظت مولاریته محلول هیدروکسید سدیم به مقادیر ۸، ۱۲، ۱۶ و سه نسبت ترکیبی ۱، ۲ و ۳ سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و ترکیب آن‌ها با سرباره کوره بلند آهنگدازی سبب فعال شدن سرباره شده و پس از تکمیل کامل مراحل ساخت بتن، نمونه‌ها در حوضچه آب تا رسیدن به سن ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نگهداری شده و پس از آن مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

در این تحقیق با بررسی مولاریته محلول قلیایی همچنین نسبت سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات به عنوان عوامل موثر بر مقاومت مکانیکی و نفوذ پذیری بتن متخلخل قلیا فعال سرباره‌ای، با هدف به کارگیری در بتن متخلخل برای استفاده در هدایت جریان آب و سیلاب‌ها، با استفاده از آزمایشات مقاومت فشاری، خمشی و نفوذ پذیری مورد مطالعه قرار گرفتند. تمامی آزمایش‌ها مطابق استانداردهای تایید شده انجام شده است، که مشخصات آن در جدول (۸) ارائه شده است.

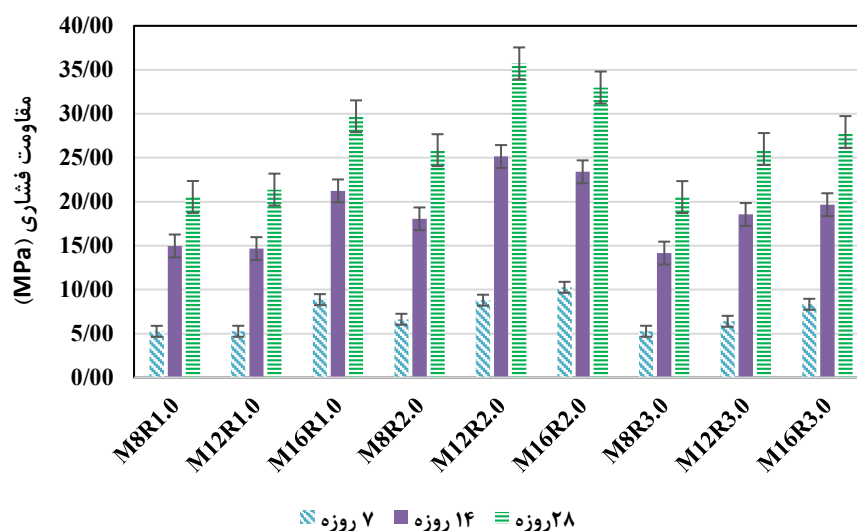
جدول (۸) استانداردهای بکارگرفته شده جهت انجام آزمایش‌ها	
مشخصات استاندارد	آزمایش انجام گرفته
ASTM C39 / M -03	سنجش مقاومت فشاری
ASTM C78	سنجش مقاومت خمشی
BS EN 12390-8	سنجش نفوذ پذیری

#### ۴- نتایج و بحث‌ها

در این مطالعه سعی بر آن شد که با متغیر گرفتن نوع ماده فعالساز (سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید) بررسی جامعی در مورد بتن متخلخل انجام شود. در واقع اینکار با استفاده از نسبت‌های مختلف ترکیب سدیم سیلیکات با سدیم هیدروکسید و همچنین با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید با مولاریته‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ مولار و ترکیب آن‌ها با سرباره به جای سیمان انجام شده است. بدین منظور مقاومت فشاری و خمشی و میزان نفوذ پذیری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39M-03 انجام شده است. برای این منظور از دستگاه بارگذاری با یک فک ثابت و یک فک متغیر استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری در جدول (۹) و شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹. مقایسه میانگین مقاومت فشاری بتن متخلخل سرباره‌ای قلیا فعال در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸

با توجه به شکل (۹) و نتایج به دست آمده از این ۹ طرح در سنین متفاوت می‌توان با دو روش مقایسه یکی مقایسه به صورت مولاریته متفاوت و نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید یکسان و دیگری نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید متفاوت با مولاریته یکسان و در انتها می‌توان به مقایسه کلی نمونه‌های ۲۸ روزه با یکدیگر پرداخت. در مقایسه به روش اول یعنی مولاریته متفاوت و نسبت ترکیب یکسان به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که در هر سه نسبت ترکیب با افزایش مولاریته از ۸ به ۱۲ با افزایش و در نسبت‌های ترکیب ۱ و ۳ با افزایش مولاریته از ۱۲ به ۱۶ با افزایش اما در نسبت ترکیب ۲ با کاهش مقاومت همراه بوده اند. در مقایسه به روش دوم یعنی مولاریته یکسان اما نسبت ترکیب متفاوت به طور کلی مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت ترکیب از ۱ به ۲ با افزایش مقاومت، اما با افزایش نسبت ترکیب از ۲ به ۳ با کاهش مقاومت رو به رو است، ولی این افزایش نسبت ترکیب به نسبت ۳ در مقایسه با نسبت ترکیب ۱ باز هم با افزایش رو به رو است. در انتها با بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۹) می‌توان دید که نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ در مقایسه با نسبت‌های دیگر نتایج بهتری، همچنین از مولاریته ۱۲ در مقایسه با دیگر مقادیر مولاریته بالاترین نتیجه حاصل شده است.

جدول (۹) نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن

شماره طرح	شماره نمونه	مقاومت فشاری (MPa)			درصد تغییرات ۱۴		درصد تغییرات ۲۸	
		۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	روزه		روزه	
					نسبت به ۷ روزه		نسبت به ۷ روزه	
M8R1.0	۱	۵.۱	۱۴.۸	۲۰.۱	%۶۶		%۷۵	
	۲	۵.۲	۱۴.۶	۲۰.۰	%۶۴		%۷۴	
	۳	۵.۵	۱۵.۵	۲۱.۵	%۶۴		%۷۴	
M12R1.0	۱	۵.۱	۱۴.۳	۲۰.۷	%۶۴		%۷۵	
	۲	۵.۳	۱۴.۸	۲۱.۵	%۶۴		%۷۵	
	۳	۵.۴	۱۴.۹	۲۲.۰	%۶۴		%۷۵	
M16R1.0	۱	۸.۵	۱۹.۸	۲۸.۱	%۵۷		%۷۰	
	۲	۹	۲۱.۵	۳۰.۲	%۵۸		%۷۰	
	۳	۹.۱	۲۲.۳	۳۰.۹	%۵۹		%۷۱	
M8R2.0	۱	۶.۳	۱۷.۴	۲۴.۹	%۶۴		%۷۵	
	۲	۶.۵	۱۷.۳	۲۵.۰	%۶۳		%۷۴	
	۳	۷.۱	۱۹.۴	۲۷.۷	%۶۳		%۷۴	
M12R2.0	۱	۸.۵	۲۴.۱	۳۴.۴	%۶۵		%۷۵	
	۲	۸.۸	۲۵.۰	۳۵.۷	%۶۵		%۷۵	
	۳	۹.۱	۲۶.۳	۳۷.۰	%۶۵		%۷۵	
M16R2.0	۱	۹.۵	۲۲.۶	۳۱.۴	%۵۸		%۷۰	
	۲	۱۰.۵	۲۴.۱	۳۳.۱	%۵۷		%۶۸	
	۳	۱۰.۸	۲۳.۵	۳۴.۶	%۵۴		%۶۹	
M8R3.0	۱	۴.۹	۱۳.۳	۱۹.۴	%۶۳		%۷۵	
	۲	۵.۴	۱۴.۴	۲۰.۸	%۶۳		%۷۴	
	۳	۵.۵	۱۴.۸	۲۱.۵	%۶۳		%۷۴	
M12R3.0	۱	۵.۹	۱۷.۲	۲۳.۹	%۶۶		%۷۵	
	۲	۶.۵	۱۸.۹	۲۶.۴	%۶۶		%۷۵	
	۳	۶.۸	۱۹.۶	۲۷.۷	%۶۵		%۷۵	
M16R3.0	۱	۸.۱	۱۸.۸	۲۶.۷	%۵۷		%۷۰	
	۲	۸.۴	۱۹.۸	۲۸.۱	%۵۸		%۷۰	
	۳	۸.۵	۲۰.۳	۲۸.۹	%۵۸		%۷۱	

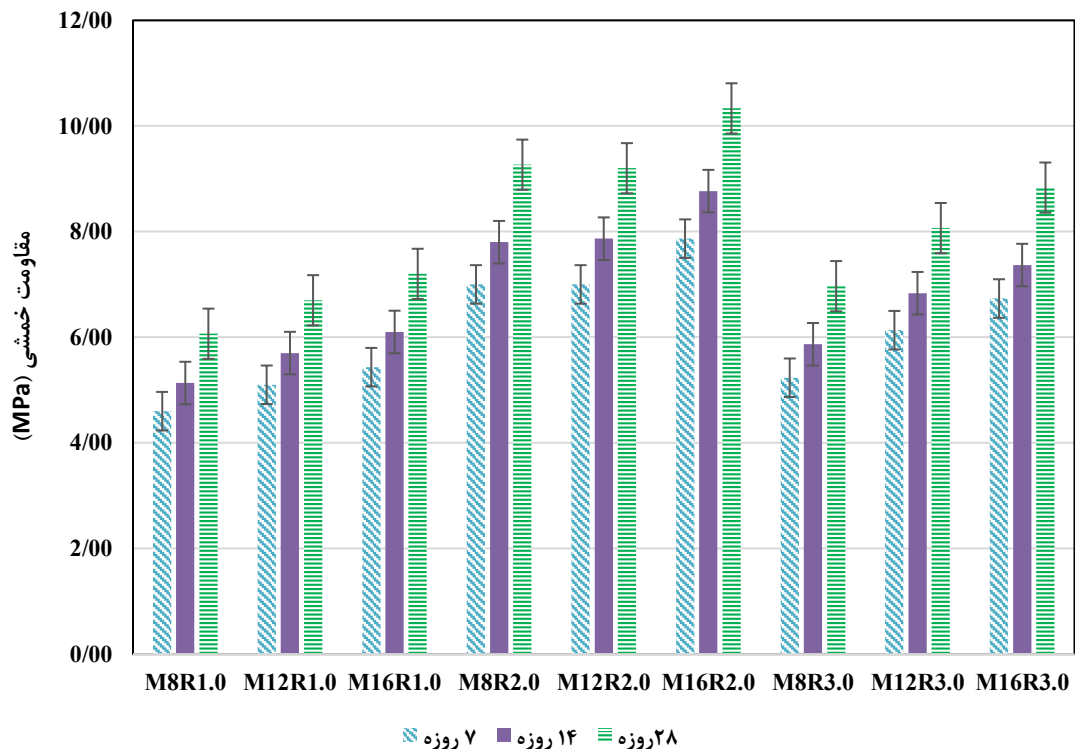
### نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی

برای سنجش مقاومت خمشی، از دستگاه سنجش خیز با سرعت ۲۰۰ (N/s) بر اساس استاندارد ASTM C78، استفاده شده است. نتایج حاصل از آن، در جدول (۱۰) و شکل (۱۰) ارائه شده است. حال با توجه به شکل (۱۰) و جمع بندی نتایج به دست آمده از این ۹ طرح در سنین متفاوت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز می‌توان با دو روش مقایسه‌ای که پیش‌تر در بررسی نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری بیان شده است به مقایسه نتایج پرداخت.

جدول (۱۰) نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های استوانه‌ای تیر خمشی

شماره طرح	شماره نمونه	مقاومت خمشی (MPa)			درصد تغییرات ۱۴ روزه	درصد تغییرات ۲۸ روزه
		۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	نسبت به ۷ روزه	نسبت به ۷ روزه
M8R1.0	۱	۴	۴.۵	۵.۳	%۱۱	%۲۵
	۲	۴.۸	۵.۴	۶.۳	%۱۱	%۲۴
	۳	۵	۵.۵	۶.۶	%۹	%۲۴
M12R1.0	۱	۵	۵.۶	۶.۶	%۱۱	%۲۴
	۲	۵.۱	۵.۸	۶.۷	%۱۲	%۲۴
	۳	۵.۲	۵.۷	۶.۸	%۹	%۲۴
M16R1.0	۱	۵.۲	۵.۸	۶.۹	%۱۰	%۲۵
	۲	۵.۵	۶.۲	۷.۳	%۱۱	%۲۵
	۳	۵.۶	۶.۳	۷.۴	%۱۱	%۲۴
M8R2.0	۱	۶.۹	۷.۷	۹.۱	%۱۰	%۲۴
	۲	۷	۷.۸	۹.۳	%۱۰	%۲۵
	۳	۷.۱	۷.۹	۹.۴	%۱۰	%۲۴
M12R2.0	۱	۶.۸	۷.۷	۸.۹	%۱۲	%۲۴
	۲	۷	۷.۸	۹.۲	%۱۰	%۲۴
	۳	۷.۲	۸.۱	۹.۵	%۱۱	%۲۴
M16R2.0	۱	۷.۷	۸.۶	۱۰.۱	%۱۰	%۲۴
	۲	۷.۹	۸.۸	۱۰.۴	%۱۰	%۲۴
	۳	۸	۸.۹	۱۰.۵	%۱۰	%۲۴
M8R3.0	۱	۵	۵.۷	۶.۸	%۱۲	%۲۶
	۲	۵.۲	۵.۸	۶.۹	%۱۰	%۲۵
	۳	۵.۵	۶.۱	۷.۲	%۱۰	%۲۴
M12R3.0	۱	۶	۶.۷	۷.۹	%۱۰	%۲۴
	۲	۶.۱	۶.۸	۸	%۱۰	%۲۴
	۳	۶.۳	۷	۸.۳	%۱۰	%۲۴
M16R3.0	۱	۶.۵	۷.۳	۸.۵	%۱۱	%۲۴
	۲	۶.۸	۷	۸.۹	%۳	%۲۴
	۳	۶.۹	۷.۸	۹.۱	%۱۲	%۲۴

در مقایسه به روش اول یعنی مولاریته متفاوت و نسبت ترکیب یکسان به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مولاریته از ۸ به ۱۲ و از ۱۲ به ۱۶ نتایج با افزایش مقاومت خمشی مواجه شده است. در مقایسه به روش دوم یعنی مولاریته یکسان اما نسبت ترکیب متفاوت نیز به طور کلی دیده شد که با افزایش نسبت ترکیب از ۱ به ۲ با افزایش مقاومت رو به رو شده است، اما با افزایش نسبت ترکیب از ۲ به ۳ با کاهش مقاومت رو به رو شده است. ولی این افزایش نسبت ترکیب از ۱ به نسبت ۳ باز هم با افزایش مقاومت همراه بوده است. در انتها با بررسی نتایج می‌توان دید که نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ در مقایسه با نسبت‌های دیگر، همچنین از مولاریته ۱۶ در مقایسه با دیگر مقادیر مولاریته، بالاترین نتیجه حاصل شده است. مقایسه نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌های آزمایش شده، مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۱ تا ۳/۵ برابر مقاومت خمشی متناظر با آن است



شکل ۱۰. نمودار مقایسه میانگین مقاومت خمشی بتن متخلخل سرباره‌ای قلیا فعال در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸

### نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری

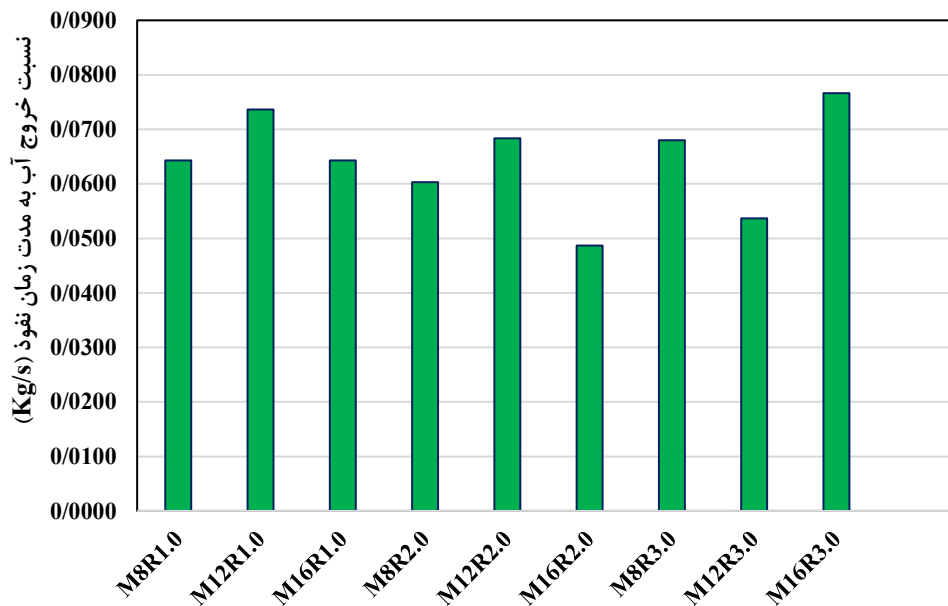
برای سنجش میزان نفوذ پذیری، از نمونه‌های استوانه‌ای شکل با ابعاد  $15 \times 30$  سانتی‌متر استفاده می‌شود که نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها، در جدول (۱۱) و شکل (۱۱) ارائه شده است. با بررسی نتایج نمایش داده شده، می‌توان مشاهده نمود که در طرح‌های با نسبت ترکیب سدیوم سیلیکات به سدیم هیدروکسید برابر ۱ با افزایش مولاریته از ۸ به ۱۲ نسبت نفوذپذیر به مدت زمان افزایش می‌یابد و از افزایش این مقدار از ۱۲ به ۱۶ باعث کاهش نسبت نفوذ پذیری می‌شود. این نتیجه برای نمونه‌های با نسبت ترکیب سدیوم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ نیز به همین صورت است. اما در نسبت ترکیب ۳ اتفاقی کاملاً متفاوت رخ داده است، بدین صورت که با افزایش مولاریته از ۸ به ۱۲ دچار کاهش شدید نفوذ پذیری و با تغییر مولاریته از ۱۲ به ۱۶ مجدداً با افزایش نسبت نفوذ پذیری روبه‌رو است. کاهش نفوذپذیری با افزایش مولاریته از ۸ تا ۱۲ می‌تواند بدلیل کاهش منافذ ایجاد شده بدلیل وارد شدن ذرات ریز به داخل حفرات باشد و افزایش نفوذپذیری با افزایش مولاریته از ۱۲ تا ۱۶ می‌تواند بدلیل تغییر در حجم و اندازه حفرات باشد که در نهایت باعث افزایش نفوذپذیری شده است.

در ادامه‌ی بررسی نتایج به مقایسه نمونه‌ها با مولاریته یکسان اما نسبت ترکیب متفاوت پرداخته شده است که نتیجه به دست آمده به شرح ذیل است: با افزایش نسبت ترکیب از ۱ به ۲ و از ۲ به ۳ برای مولاریته‌های ۸ و ۱۲ نتایج به یک صورت است، در هر دو نسبت نفوذپذیری دچار کاهش می‌شود. همچنین در مولاریته‌ی ۱۶ نیز با افزایش نسبت ترکیب از ۱ به ۲ نیز همین نتیجه قابل مشاهده است اما با افزایش این نسبت از ۲ به ۳ با افزایش نسبت نفوذپذیری روبه‌رو شده است که می‌توان این نتیجه متفاوت را به دلیل خطای آزمایشگاهی لحاظ کرد.

جدول (11) نتایج آزمایش نفوذ پذیری

شماره طرح	وزن نمونه (Kg)	مدت زمان نفوذ آب (S)	آب خروجی (Kg)	نسبت خروج آب به مدت زمان نفوذ (Kg/s)	درصد نفوذ پذیری
M8R1.0	۳.۲۹۲	۱۵.۳۵	۰.۹۶۳	۰.۰۶۳	%۹۶.۳
	۳.۱۶	۱۵.۱۵	۰.۹۷۶	۰.۰۶۴	%۹۷.۶
	۳.۳۵۹	۱۴.۹	۰.۹۸۹	۰.۰۶۶	%۹۸.۹
M12R1.0	۳.۳۷	۱۳	۰.۸۵۱	۰.۰۶۵	%۸۵.۱
	۳.۲۷۶	۱۲	۰.۸۹۸	۰.۰۷۵	%۸۹.۸
	۳.۳۱	۱۱.۶۲	۰.۹۴۵	۰.۰۸۱	%۹۴.۵
M16R1.0	۳.۲۴	۱۴.۲	۰.۸۷۵	۰.۰۶۲	%۸۷.۵
	۳.۲۵	۱۳.۷۹	۰.۸۹۴	۰.۰۶۵	%۸۹.۴
	۳.۲۱۲	۱۳.۹	۰.۹۱۳	۰.۰۶۶	%۹۱.۳
M8R2.0	۳.۳۵۱	۱۴.۹	۰.۸۷۸	۰.۰۵۹	%۸۷.۸
	۳.۰۷۸	۱۴.۷۴	۰.۸۹	۰.۰۶۰	%۸۹.۰
	۳.۲۲	۱۴.۵	۰.۹۰۲	۰.۰۶۲	%۹۰.۲
M12R2.0	۳.۲	۱۳.۸	۰.۹۱۶	۰.۰۶۶	%۹۱.۶
	۳.۰۹۹	۱۳.۵	۰.۹۳۱	۰.۰۶۹	%۹۳.۱
	۳.۰۳	۱۲.۹	۰.۹۰۲	۰.۰۷۰	%۹۰.۲
M16R2.0	۳.۲۴۷	۲۰.۱	۰.۹۱۳	۰.۰۴۵	%۹۱.۳
	۳.۵۹۲	۱۹.۷۹	۰.۹۴۶	۰.۰۴۸	%۹۴.۶
	۳.۱۷۸	۱۸.۵	۰.۹۷۲	۰.۰۵۳	%۹۷.۲
M8R3.0	۳.۱۶۴	۱۴.۱	۰.۸۸	۰.۰۶۲	%۸۸.۰
	۳.۰۵	۱۳.۱	۰.۹۱	۰.۰۶۹	%۹۱.۰
	۳.۱۷۷	۱۲.۹	۰.۹۴	۰.۰۷۳	%۹۴.۰
M12R3.0	۳.۰۴۴	۱۸.۲	۰.۸۹	۰.۰۴۹	%۸۹.۰
	۳.۴۵	۱۷.۳۵	۰.۹۵۲	۰.۰۵۵	%۹۵.۲
	۳.۱۸	۱۷.۱	۰.۹۷۲	۰.۰۵۷	%۹۷.۲
M16R3.0	۳.۱۰۱	۱۲.۹	۰.۸۹۱	۰.۰۶۹	%۸۹.۱
	۳.۲۵	۱۱.۴۹	۰.۹۰۶	۰.۰۷۹	%۹۰.۶
	۳.۰۱۲	۱۱.۲	۰.۹۲۱	۰.۰۸۲	%۹۲.۱





شکل ۱۱. نمودار مقایسه میانگین میزان نسبت خروج آب به مدت زمان از نمونه‌های بتن متخلخل ۲۸ روزه

## ۵- نتیجه‌گیری

- در این تحقیق اثر مولاریته محلول هیدروکسید سدیم و نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید همراه با سرباره کوره بلند آهنگدازی بر خواص مکانیکی بتن متخلخل قلیا فعال بررسی شد، از این تحقیق پس از انجام آزمایشات مختلف نتایج زیر می‌توان به دست آید:
- افزایش مولاریته محلول هیدروکسید سدیم با مقادیر مختلف به طور کلی سبب بهبود خواص مکانیکی نمونه بتن متخلخل از جمله مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می‌شود، اما بهترین میزان مولاریته برای این نوع بتن مولاریته ۱۲ می‌باشد چرا که افزایش بیشتر آن باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود اما همچنان نسبت به نمونه‌های با مولاریته ۸ در هر سه نسبت ترکیب با بهبود خواص همراه بوده‌است.
- از دیگر نتایجی که می‌توان بیان کرد این است که نمونه‌ها پس از سن ۱۴ روزگی به ۷۵ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود رسیده اما در سن ۷ روزگی به ۷۵ درصد از مقاومت خمشی ۲۸ روزه خود دست می‌یابند.
- همچنین نتایج حاکی از این است که افزایش نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید نیز سبب بهبود مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می‌شود و بهترین نسبت این ترکیب برای نمونه‌های با مقادیر ۲ می‌باشد و افزایش بیشتر این نسب به تدریج سبب افت این مقاومت فشاری و خمشی نمونه می‌شود.
- با گذشت زمان، نرخ رشد مقاومت در بتن متخلخل قلیا فعال کند می‌شود.
- از نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها این نتیجه حاصل شد که هرچه مولاریته محلول هیدروکسید سدیم و نسبت ترکیب سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید افزایش یابد با میزان نفوذپذیری این نوع بتن رابطه عکس دارد، چرا که سبب افزایش سیمانتاسیون ذرات بتن به یکدیگر می‌شوند و این سیمانتاسیون در عین حال که سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود سبب بسته شدن خلل و فرج‌های بتن همچنین مسیر خروج آب از نمونه می‌شود که این مسئله خود چالشی برای استفاده از این نوع بتن در زهکشی‌ها می‌باشد.

## ۶- قدردانی

ناشران مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد بخاطر حمایت‌های فنی و آزمایشگاهی، کمال تشکر خود را اعلام می‌دارند.

- [1] G. Xu, W. Shen, X. Huo, Z. Yang, J. Wang, W. Zhang, X. Ji, Investigation on the properties of porous concrete as road base material, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 141–148. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151.
- [2] E.J. Elizondo-Martínez, V.C. Andrés-Valeri, D. Jato-Espino, J. Rodríguez-Hernandez, Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement, *J. Build. Eng.* 27 (2020) 100967. doi:10.1016/j.jobbe.2019.100967.
- [3] X. Yao, W. Wang, M. Liu, Y. Yao, S. Wu, Synergistic use of industrial solid waste mixtures to prepare ready-to-use lightweight porous concrete, *J. Clean. Prod.* 211 (2019) 1034–1043. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.252.
- [4] Y. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, H. Du, Laboratorial investigation on sound absorption property of porous concrete with different mixtures, *Constr. Build. Mater.* 259 (2020) 120414. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120414.
- [5] C. Xie, L. Yuan, M. Zhao, Y. Jia, Study on failure mechanism of porous concrete based on acoustic emission and discrete element method, *Constr. Build. Mater.* 235 (2020) 117409. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117409.
- [6] Y. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, J. Yang, H. Wang, Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete, *Constr. Build. Mater.* 266 (2021) 121074. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121074.
- [7] Y. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, J. Yang, Effect of different factors on sound absorption property of porous concrete, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 87 (2020) 102532. doi:10.1016/j.trd.2020.102532.
- [8] O. Nanayakkara, C. Gunasekara, M. Sandanayake, D.W. Law, K. Nguyen, J. Xia, S. Setunge, Alkali activated slag concrete incorporating recycled aggregate concrete: Long term performance and sustainability aspect, *Constr. Build. Mater.* 271 (2021) 121512. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121512.
- [9] W. Shen, Y. Liu, M. Wu, D. Zhang, X. Du, D. Zhao, G. Xu, B. Zhang, X. Xiong, Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city, *J. Clean. Prod.* 256 (2020) 120244. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120244.
- [10] Y. Hitti, J. Chapelat, B. Sen Wu, M. Lefsrud, Design and Testing of Bioreceptive Porous Concrete: A New Substrate for Soilless Plant Growth, *ACS Agric. Sci. Technol.* 1 (2021) 285–293. doi:10.1021/acscagcitech.0c00065.
- [11] M. Salehi, M. Bayat, M. Saadat, M. Nasri, Experimental Study on Mechanical Properties of Cement-Stabilized Soil Blended with Crushed Stone Waste, *KSCE J. Civ. Eng.* 25 (2021) 1974–1984. doi:10.1007/s12205-021-0953-5.
- [12] M.R. ShahriarKian, S. Kabiri, M. Bayat, Utilization of Zeolite to Improve the Behavior of Cement-Stabilized Soil, *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.* 7 (2021) 35. doi:10.1007/s40891-021-00284-9.
- [13] M.J. Rezaei-Hosseiniabadi, M. Bayat, B. Nadi, A. Rahimi, Utilisation of steel slag as a granular column to enhance the lateral load capacity of soil, *Geomech. Geoengin.* 00 (2021) 1–11. doi:10.1080/17486025.2021.1940315.
- [14] A. Toghroli, M. Shariati, F. Sajedi, Z. Ibrahim, S. Koting, E.T. Mohamad, M. Khorami, A review on pavement porous concrete using recycled waste materials, *Smart Struct. Syst.* 22 (2018) 433–440. doi:10.12989/sss.2018.22.4.433.
- [15] J. Kong, G. Cong, S. Ni, J. Sun, C. Guo, M. Chen, H. Quan, Recycling of waste oyster shell and recycled aggregate in the porous ecological concrete used for artificial reefs, *Constr. Build. Mater.* 323 (2022) 126447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.126447.

- [16] A. Siddika, M.A. Al Mamun, R. Alyousef, Y.H.M. Amran, F. Aslani, H. Alabduljabbar, *Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review*, *Constr. Build. Mater.* 224 (2019) 711–731. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108.
- [17] B. Peceño, C. Arenas, B. Alonso-Fariñas, C. Leiva, *Substitution of Coarse Aggregates with Mollusk-Shell Waste in Acoustic-Absorbing Concrete*, *J. Mater. Civ. Eng.* 31 (2019) 04019077. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002719.
- [18] A. Azad, S.F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin, *Using waste vermiculite and dolomite as eco-friendly additives for improving the performance of porous concrete*, *Eng. J.* 22 (2018) 87–104. doi:10.4186/ej.2018.22.5.87.
- [19] C. Shi, *Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties*, *J. Mater. Civ. Eng.* 16 (2004) 230–236. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:3(230).
- [20] V. Subathra Devi, M. Madhan Kumar, N. Iswarya, B.K. Gnanavel, *Durability of Steel Slag Concrete under Various Exposure Conditions*, *Mater. Today Proc.* 22 (2019) 2764–2771. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.407.
- [21] D.H. Le, Y.N. Sheen, Q.B. Bui, *An assessment on volume stabilization of mortar with stainless steel slag sand*, *Constr. Build. Mater.* 155 (2017) 200–208. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.069.
- [22] W. Cha, J. Kim, H. Choi, *Evaluation of steel slag for organic and inorganic removals in soil aquifer treatment*, *Water Res.* 40 (2006) 1034–1042. doi:10.1016/j.watres.2005.12.039.
- [23] Y. Zandi, M. Abedi, *Evaluation of the effect of magnetic water on the durability of Concrete made of cast iron slag*, *J. Struct. Constr. Eng.* 8 (2021). doi:10.22065/JSCE.2020.204047.1963.
- [24] Z.F. Haza, M.A. Shulhan, K.B. Kadis, A. Arbianto, *Characteristic of melted slag from wrought iron industry as green concrete material*, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Institute of Physics Publishing, 2020: p. 012006. doi:10.1088/1757-899X/767/1/012006.
- [25] J.N. Murphy, T.R. Meadowcroft, P. V. Barr, *Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag*, *Can. Metall. Q.* 36 (1997) 315–331. doi:10.1179/cm.1997.36.5.315.
- [26] P. Zhang, F. Muhammad, L. Yu, M. Xia, H. Lin, X. Huang, B. Jiao, Y.C. Shiau, D. Li, *Self-cementation solidification of heavy metals in lead-zinc smelting slag through alkali-activated materials*, *Constr. Build. Mater.* 249 (2020) 118756. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118756.
- [27] X.-L. Han, N.-J. Jiang, Y.-J. Wang, *Stabilization of Calcareous Sand by Applying the Admixture of Alkali-Activated Slag (AAS) and Biochar*, (2020) 469–475. doi:10.1061/9780784482780.045.
- [28] K. Behfarnia, M. Rostami, *The Effect of Alkaline Solution-to-Slag Ratio on Permeability of Alkali Activated Slag Concrete*, *Int. J. Civ. Eng.* 16 (2018) 897–904. doi:10.1007/s40999-017-0234-3.
- [29] C.S. Thunuguntla, T.D. Gunneswara Rao, *Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete*, *Constr. Build. Mater.* 193 (2018) 173–188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.189.
- [30] F. Puertas, B. González-Fonteboá, I. González-Taboada, M.M. Alonso, M. Torres-Carrasco, G. Rojo, F. Martínez-Abella, *Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behaviour*, *Cem. Concr. Compos.* 85 (2018) 22–31. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.10.003.
- [31] J.J. Chang, W. Yeih, T.J. Chung, R. Huang, *Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement*, *Constr. Build. Mater.* 109 (2016) 34–40. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.049.
- [32] Z. Sun, X. Lin, A. Vollpracht, *Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers*, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 797–803. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067.