

ارزیابی استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی‌های مختلف در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با رویکرد ارزیابی زیست‌محیطی در مقایسه با بتن‌های پرتلندی

یاسر مارابی^۱

احمد فهیمی^{۲*}

fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir

علیرضا بابائیان امینی^۳

علی مجنونی توتاخانه^۴

تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۴

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۴

چکیده

زمینه و هدف: محیط‌زیست به عنوان بستر فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی انسان، نیازمند استفاده حساب شده است تا زمینه برای استفاده پایدار از منابع آن فراهم گردد. از این‌رو، تولید و استفاده از مصالحی مانند بتن با مقاومت بالا و با حداقل آلاینده‌گی محیطی به یک امر کاملاً ضروری تبدیل شده است.

روش بررسی: این پژوهش ضمن بررسی مقاومت بتن‌های ژئوپلیمری، برای اولین بار اقدام به بررسی اثرات زیست‌محیطی این نوع بتن در مقایسه با بتن‌های پرتلندی نموده است. تحقیق حاضر از نوع پژوهش‌های کاربردی بوده و رویکرد آن از نوع تحقیقات کمی و آزمایشگاهی است. در این تحقیق از پودر لاتریت به عنوان یک مصالح آلومینوسیلیکات غنی از آهن پتانسیل بالایی برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شده تا تأثیر سنگ‌دانه مصرفی در مقاومت مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه لاتریت مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، از دو نوع سنگ‌دانه شامل سنگ‌دانه شن و ماسه و سنگ‌دانه یکنواخت استفاده شد. همچنین نمونه‌های مختلف ساخته‌شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در گرمخانه عمل‌آوری شدند.

یافته‌ها: نتایج آزمایش نشان داد که با استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت به دلیل کاهش نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به پودر لاتریت، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مذکور ۲۸،۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه بناب.

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب. * (مسئول مکاتبات)

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب.

۴- مدرس گروه مهندسی معماری، دانشگاه بناب.

مگاپاسکال و حداکثر مقاومت فشاری ۳۴ مگاپاسکال به دست آمد. نتایج بخش دوم پژوهش نشان داد که اثرات آلاینده‌گی کمتر بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن‌های پرتلندی است.

بحث و نتیجه‌گیری: برای ساخت قطعات پیش‌ساخته می‌توان از بتن ژئوپلیمری لاتریتی (با استفاده از سنگ‌دانه یکنواخت) استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: بتن ژئوپلیمری، بتن پرتلندی، سنگ‌دانه، دانه‌بندی یکنواخت و پیوسته، ارزیابی زیست‌محیطی.

Evaluation the Use of Stone Aggregates with Different Aggregates in Compressive Strength of Geopolymer Concrete by Environmental Assessment Approach Compared to Portland Concrete

Yaser Marabi¹

Ahmad Fahmi^{2*}

fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir

Alireza Babaeian³

Ali Majnoui Toutakhane⁴

Admission Date: August 25, 2020

Date Received: February 13, 2020

Abstract

Background and Objectives: The environment, as the platform of human activities, needs to be accounted for in order to provide a sustainable use of its resources. Therefore, the production and use of materials such as high strength concrete with minimum environmental pollution is a necessity.

Method: In this study, for the first time, we investigated the environmental impacts of this type of concrete in comparison with Portland concrete in the geopolymer concrete resistance. The present study is applied research and its approach is quantitative and laboratory research. In this study, lattice powder was used as an iron-rich alum inosilicate material for high potential geopolymeric concrete construction and the effect of the applied aggregate on the mechanical strength of geopolymeric concrete based on laterite was evaluated. For this purpose, two types of aggregates including sand aggregate and uniform aggregate were used. Also, samples made at 70 ° C were processed in the incubator.

Findings: The experimental results showed that the compressive strength of the geopolymer concrete samples were increased by using uniform aggregate rock materials due to decrease in the mass ratio of the activating solution to the laterite powder. The minimum 28-day compressive strength of the samples were 28.5 MPa and the maximum compressive strength was 34 MPa. The results of the second part of the research showed that the pollution effects of geopolymer concrete are less than the Portland concrete.

Discussion and Conclusion: For the manufacture of concrete components, laterite geopolymer concrete has less environmental impact while being more resistant.

Keywords: Geopolymer Concrete, Portland Concrete, Aggregate, Uniform and Continuous Grading, Environmental Assessment.

1- MSc student of Civil engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

2- Departement of Civil engineering, University of Bonab, Bonab, Iran. **(Corresponding Author)*

3- Departement of Civil engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

4- Department of Architecture, University of Bonab, Bonab, Iran.

مقدمه

مراحل اکتشاف و فرآوری از بین می‌رود (۱۵-۱۴-۱۳). در این میان لاتریت به عنوان یک مصالح آلومینوسیلیکات غنی از آهن، پتانسیل بالایی برای ساخت مصالح ساختمانی ژئوپلیمری دارد (۱۶). این ماده در کنار اینکه از میزان آلاینده‌گی بسیار ناچیزی برخوردار است، مقاومت بالایی در برابر فشار نیروهای خارجی دارد (۱۷). تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری بر پایه لاتریت انجام گرفته است (۲۰-۱۹-۱۸). در تحقیق حاضر با ساخت نمونه‌های مکعبی بتن ژئوپلیمری بر پایه لاتریت معدنی. تأثیر سنگ‌دانه مصرفی در مقاومت مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور تأثیر استفاده از دو نوع سنگ‌دانه شامل سنگ‌دانه شن و ماسه و سنگ‌دانه یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. لذا با توجه به طرح مسئله صورت گرفته می‌توان گفت که هدف اصلی پژوهش حاضر یافتن پاسخ علمی به این سؤال است که استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی‌های مختلف در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه لاتریت چه تأثیری دارد و استفاده از این نوع بتن تا چه اندازه منجر به کاهش آلاینده‌گی محیط‌زیست می‌شود؟

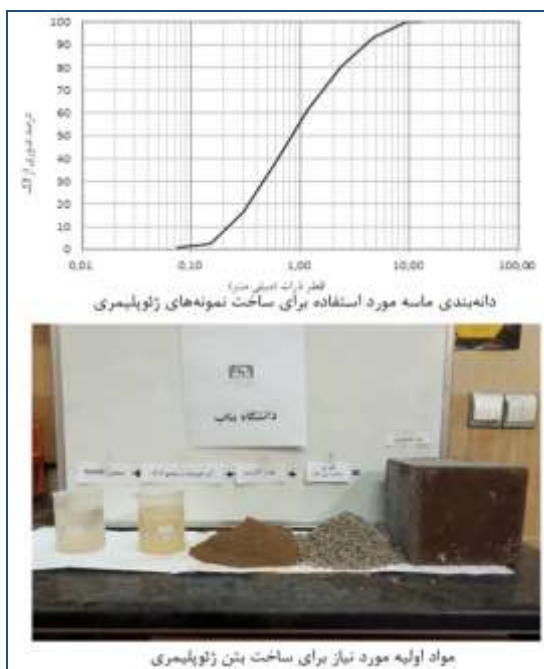
۲. روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر از نوع پژوهش‌های کاربردی بوده و رویکرد حاکم بر آن از نوع تحقیقات کمی و تجربی است. اطلاعات مورد نیاز این تحقیق در دو مرحله میدانی گردآوری شد. در مرحله اول اطلاعات مورد نیاز از طریق انجام آزمایش‌های تجربی در محیط آزمایشگاه به دست آمد و با اطلاعات به دست آمده اقدام به بررسی میزان مقاومت انواع بتن‌ها گردید. اطلاعات مرحله دوم شامل مصاحبه خبرگان بوده تا با استفاده از نظرات کارشناسان و با رویکرد خرد جمعی بتوان میزان آلاینده‌گی دو نوع بتن مورد آزمایش در محیط آزمایشگاه را تحلیل کرد. در مرحله اول و به منظور برای ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در این تحقیق از پودر سنگ لاتریت تهیه‌شده از نهشته‌های لاتریت قاریاغدی میاندوآب و مواد شیمیایی قلیایی استفاده شد. خاک باقی‌مانده از کانی‌های با حلالیت خیلی پائین مانند اکسید آلومینیوم و هیدروکسید آلومینیوم و اکسید آهن غنی شده است. بر اساس

امروزه حفاظت از محیط‌زیست در برابر تولیدات صنعتی، برای رفاه جامعه، سلامت محیط‌زیست بوم و در نهایت توسعه پایدار به موضوع حیاتی تبدیل شده است (۱). به اعتقاد صاحب‌نظران، توسعه متناسب محیط‌زیست در گرو توجه به صنایعی است که با بهره‌برداری اصولی از منابع و تولید محصولات با بهره‌وری زیاد است (۲). از جمله محصولات حیاتی برای توسعه جوامع انسانی، بتن و متعلقات آن است (۳). بتن به عنوان یک کالای استراتژیک برای توسعه تمامی زیرساخت‌های انسانی مانند مسکن، راه‌های ارتباطی، بنادر و فرودگاه‌ها و غیره است، لذا این محصول در تمامی فرایندهای فرآوری خود اعم از استخراج مواد اولیه، فرآوری، بسته‌بندی، انتقال و مصرف می‌تواند در کیفیت محیط‌زیست تأثیرگذار باشد (۴). نتایج بررسی‌های علمی نشان داده است که برای تولید یک تن تولید سیمان پرتلند، نزدیک یک تن دی‌اکسید کربن تولید می‌کند، این در حالی است که بر اساس آمار انتشار یافته سالیانه در حدود ۱٫۹ میلیارد تن سیمان تولید می‌گردد و به تبع آن حجم عظیمی از گاز دی‌اکسید کربن وارد اتمسفر می‌شود (۵). صنعت سیمان به تنهایی تولیدکننده ۵ تا ۷ درصد گاز دی‌اکسید کربن در جهان می‌باشد (۶-۷)

با استفاده از واکنش بین پودر آلومینوسیلیکاتی با مواد شیمیایی قلیایی مانند سدیم هیدرواکسید و آب شیشه، امکان تولید مصالح ساختمانی ژئوپلیمری دوستدار محیط‌زیست وجود دارد. با جایگزینی بخشی از بتن مصرفی مورد نیاز صنعت ساختمان با بتن ژئوپلیمری و کاهش نسی تولید سیمان پرتلند، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد (۹-۸). از فناوری ژئوپلیمریزاسیون می‌توان برای تولید ملات، بتن، آجر و سایر مصالح ساختمانی ژئوپلیمری با مقاومت مکانیکی و دوام بالا استفاده است (۱۲-۱۱-۱۰). مواد مورد استفاده برای تولید ژئوپلیمر می‌تواند شامل منابع طبیعی مانند خاکسترها و پوک‌های آتش‌فشانی، کائولینیت، لاتریت، پودر ضایعات آجر و بتن، خاکستر بادی، سرباره کوره برای تولید مصالح ساختمانی ژئوپلیمری قابل استفاده هستند و از آنجایی که این مواد بدون فرآوری خاصی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، لذا آلاینده‌گی در

جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ یا ۱ انتخاب شد. در نهایت اینکه در بخش نتایج منظور از مقاومت فشاری، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه مشابه از هر طرح آزمایش می‌باشد. برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری لاتریتی مطابق جدول ۲ و جدول ۳ می‌باشد.



شکل ۱- تصاویر مربوط به مواد تشکیل دهنده و درصد

آن‌ها در تولید بتن ژئوپلیمری

Figure 2. Images of the constituents and their percentages in geopolymer concrete production

نتایج آنالیز XRF انجام یافته در این تحقیق، ترکیبات اکسیدی موجود در پودر لاتریت، مطابق جدول ۱ می‌باشد. برای تهیه محلول شیمیایی قلیایی از سدیم هیدرواکسید (سود کاستیک پرک ۹۹٪) و آب شیشه با Ratio ۲/۴ استفاده شد. برای ساخت محلول قلیایی سدیم هیدرواکسید از آب شرب شهر بناب استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های بتن پرتلندی نیز از سیمان تیپ ۲ بوکان و آب شرب شهر بناب استفاده شد. همچنین برای ساخت نمونه‌ها از دو نوع مصالح سنگی استفاده شد. مصالح سنگی نوع اول شامل مصالح با دانه‌بندی یکنواخت (عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۸) می‌باشد. مصالح سنگی نوع دوم شامل ماسه با مدول نرمی ۳/۰۷ و شن با حداکثر قطر دانه ۳۸ میلی‌متر می‌باشد. نمودار دانه‌بندی ماسه و مواد اولیه مورد نیاز برای ساخت بتن ژئوپلیمری مطابق شکل ۱ می‌باشد. وسایل و تجهیزات استفاده‌شده در این تحقیق شامل پن‌میکسر، قالب مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتری پلاستیکی، گرم‌خانه، حوضچه آب و دستگاه جک بتن شکن برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری است. جدول ۱، ترکیب شیمیایی پدرب سنگ لاتریت به کار گرفته شده در آزمایش‌های این پژوهش را نشان می‌دهد.

در فرآیند انجام آزمایش‌ها، ابتدا سنگ لاتریت در دستگاه سنگ‌شکن خرد شده و پودر سنگ لاتریت رد شده از الک نمره ۳۰ به عنوان ماده جامد آلومینوسیلیکاتی جدا شد.

برای این منظور محلول سدیم هیدرواکسید با غلظت‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ مولار و آب شیشه با Ratio ۲/۴ استفاده شد و نسبت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر سنگ لاتریت (درصد وزنی) بر اساس آنالیز XRF

Table 1. Chemical composition of Lattice stone powder (weight percent) based on XRF analysis

SO ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
۰/۱	۰/۱	۰/۵۴	۱/۸۷	۳/۲۹	۳۷/۳۷	۱۹/۰۳	۳۷/۰۳

جدول ۲- برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت

Table 2. Experiment schedule and mix design of geopolymer concrete samples with uniform aggregate stone

ردیف	نام نمونه	نسبت فعال کننده به لاتریت	جرم مواد مصرفی (گرم)				تعداد نمونه
			سنگ‌دانه یکنواخت	پودر لاتریت	محلول سدیم هیدرواکسید	آب شیشه	
۱	GPU 6-1	۰/۳۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۵۷۷/۵	۵۷۷/۵	۳×۲
۲	GPU 6-2	۰/۴۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۸۵	۷۷۰	۳×۲
۳	GPU 10-1	۰/۳۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۵۷۷/۵	۵۷۷/۵	۳×۲
۴	GPU 10-2	۰/۴۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۸۵	۷۷۰	۳×۲
۵	GPU 14-1	۰/۳۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۵۷۷/۵	۵۷۷/۵	۳×۲
۶	GPU 14-2	۰/۴۳	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۸۵	۷۷۰	۳×۲

جدول ۳- برنامه آزمایش‌ها و طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با مصالح سنگی با دانه‌بندی پیوسته

Table 2. Experiment schedule and mix design of geopolymer concrete samples with uniform aggregate stone

ردیف	نام نمونه	نسبت فعال کننده به لاتریت	جرم مواد مصرفی (گرم)					تعداد نمونه
			شن	ماسه	پودر لاتریت	محلول سدیم هیدرواکسید	آب شیشه	
۱	GPW 6-1	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۷۶۳/۱	۷۶۳/۱	۳×۲
۲	GPW 6-2	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۵۰۸/۷	۱۰۱۷/۵	۳×۲
۳	GPW 10-1	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۷۶۳/۱	۷۶۳/۱	۳×۲
۴	GPW 10-2	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۵۰۸/۷	۱۰۱۷/۵	۳×۲
۵	GPW 14-1	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۷۶۳/۱	۷۶۳/۱	۳×۲
۶	GPW 14-2	۱/۳۰	۳۴۸۳	۲۵۳۴	۱۱۷۴	۵۰۸/۷	۱۰۱۷/۵	۳×۲

پودر لاتریت به صورت ثابت بوده و محلول سدیم و آب شیشه متغیر بوده است.

در مرحله آزمایش و طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با مصالح سنگی با دانه‌بندی پیوسته مقادیر نسبت فعال کننده به لاتریت، شن، ماسه و پودر لاتریت به ترتیب برابر با ۱/۳۰،

به عبارتی، مطابق جدول ۲ در طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت، در طی شش مرحله آزمایش، مواد افزودنی (شامل سنگ‌دانه یکنواخت، پودر لاتریت، محلول سدیم هیدرواکسید و آب شیشه) در تعداد نمونه‌های ۳×۲ برای هریک از آزمایش‌ها صورت گرفت. در این آزمایش‌ها نسبت فعال کننده به لاتریت، سنگ‌دانه یکنواخت و

لئوپولد ایرانی، اقدام به بررسی ابعاد فیزیکی و بیولوژیکی این دو نوع بتن گردید. برای این منظور از کارشناسان درخواست گردید که با در نظر گرفتن ۹ نوع از آلاینده‌های احتمالی ناشی از تولید بتن، میزان آلاینده‌های آن را امتیازدهی نمایند. مؤلفه‌های مورد استفاده در این بخش همان فاکتورهای ارائه شده در روش ماتریس لئوپولد ایرانی است. (جدول ۴)

۳۴۸۳، ۲۵۳۴ و ۱۱۷۴ گرم بوده است. همانند آزمایش قبلی در این آزمایش هم تعداد نمونه‌ها ۳×۲ بوده است. همان‌طوری که مطرح گردید هدف دوم این پژوهش عبارت است از بررسی میزان آلاینده‌های بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن‌های معمولی. بدین منظور از طریق طراحی یک پرسشنامه ویژه سنجش کیفیت محیطی با رویکرد ماتریس

جدول ۴- پارامترهای بتن ابعاد اثرگذار بتن بر محیط زیست

Table 4. Impactful dimensions of concrete on the environment

مؤلفه‌ها	ابعاد
آلودگی هوا	اثرات فیزیکی
تراز صدا	
کیفیت آب‌های سطحی	
کیفیت آب‌های زیرزمینی	
آلودگی خاک و فرسایش	
کیفیت زیستگاه‌های جانوری	اثرات بیولوژیکی
کیفیت زیستگاه‌های انسانی	
تراکم گیاهان	
تغییر کاربری اراضی	

امتیازدهی استفاده شد. از آنجایی که اعضای گروه دلفی (خبیرگان یا کارشناسان) در حدود ۱۵ الی ۲۰ نفر است، لذا حجم انتخاب شده مناسب بوده است. جدول ۵ فرایند امتیازدهی در روش ماتریس ایرانی را نشان داده است.

کارشناسان به کار گرفته شده در این پژوهش شامل ۱۷ کارشناس در رشته‌های عمران، محیط‌زیست و شیمی بوده‌اند که با توجه به تجارب کاری و تحقیقاتی در زمینه بتن و ارزیابی زیست‌محیطی، اقدام به امتیازدهی نمودند. انتخاب کارشناسان بدون نمونه‌گیری بوده و از تمامی کارشناسان در دسترس برای

جدول ۵- نحوه امتیازدهی به نتایج ارزیابی‌های زیست‌محیطی در ماتریس ایرانی (۲۲)

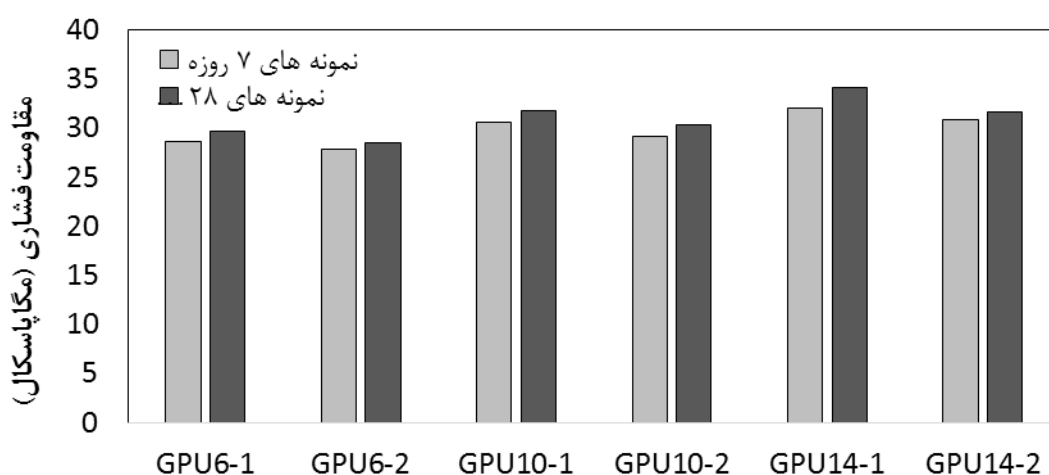
Table 5. Results scoring of environmental assessments in the Iranian Leopold matrix methods (source: 22)

امتیاز	مقدار اثر	امتیاز	مقدار اثر
-۵	اثرات منفی بسیار زیاد	+۵	اثرات مثبت بسیار زیاد
-۴	اثرات منفی زیاد	+۴	اثرات مثبت زیاد
-۳	اثرات منفی متوسط	+۳	اثرات مثبت متوسط
-۲	اثرات منفی کم	+۲	اثرات مثبت کم
-۱	اثرات منفی بسیار کم	+۱	اثرات مثبت بسیار کم

نتایج و بحث

مطابق شکل ۲ و شکل ۳، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از هر دو نوع سنگ‌دانه مصرفی با افزایش غلظت مولی محلول سدیم هیدرواکسید افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ (در مقایسه با مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲) بیشتر است. اما نتیجه مهمی که از این نمودارها به دست می‌آید آن است که مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از سنگ‌دانه با دانه‌بندی یکنواخت (شامل مصالح عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۸) در مقایسه با نمونه‌های بتن ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از سنگ‌دانه با دانه‌بندی پیوسته (شامل شن و ماسه) بیشتر است. مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه تمام نمونه‌های ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از سنگ‌دانه بالای ۲۵ مگاپاسکال است. همچنین اختلاف مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه کلیه نمونه‌های ژئوپلیمری کم بوده و نشانگر آن است که نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در سنین کم بخش قابل توجهی از مقاومت مکانیکی خود را به دست می‌آورند.

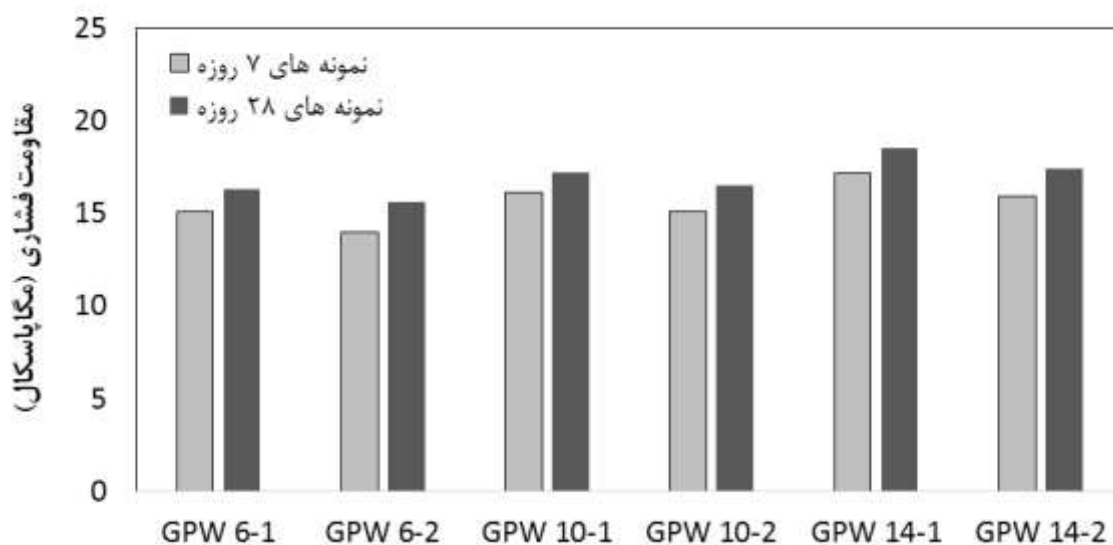
حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مذکور ۲۸.۵ مگاپاسکال و حداکثر مقاومت فشاری ۳۴ مگاپاسکال است. حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید ۶ مولار حاصل شد که برای ساخت قطعات پیش ساخته بتنی با مقاومت فشاری متعارف کافی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گفت که برای ساخت قطعات پیش ساخته بتنی می‌توان از بتن ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از سنگ‌دانه یکنواخت و عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده نمود که به دلیل استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید کم مولار اقتصادی‌تر نیز می‌باشد. از طرفی مقاومت فشاری ۲۸ روزه تمام نمونه‌های ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از سنگ‌دانه پیوسته (غیریکنواخت) زیر ۲۰ مگاپاسکال است. لذا نتیجه می‌شود که در بتن ژئوپلیمری لاتریتی عمل‌آوری شده در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده از شن و ماسه با دانه‌بندی پیوسته (در مقایسه با سنگ‌دانه با دانه‌بندی یکنواخت) منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری شده است. (شکل‌های ۲ و ۳)



شکل ۲- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری لاتریتی ساخته شده با استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی

یکنواخت (عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۸)

Figure 3. 7 and 28-day compressive strengths of laterite geopolymer concrete samples made using uniform aggregate material (crossing sieve score 4 and residue on sieve score 8)



شکل ۳- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری لاتریتی ساخته‌شده با استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی پیوسته (شن و ماسه خوب دانه‌بندی‌شده)

Figure 4. 7 and 28-day compressive strengths of laterite geopolymer concrete samples made using well-graded aggregate material (sand & gavel)

اجتماعی شهروندان و همچنین حیات جانوری می‌شود. علاوه بر این می‌توان گفت که نسبت جرمی مصالح سنگی به پودر لاتریت و نسبت جرمی مصالح جامد (مصالح سنگی و پودر لاتریت) به محلول فعال‌کننده دو نسبت مهم دیگر در تحلیل نتایج هستند. در صورت استفاده از دانه‌بندی یکنواخت، برای ساخت نمونه بتن ژئوپلیمری میزان مصرف جرمی پودر لاتریت بیشتر و میزان مصرف جرمی محلول فعال‌کننده و مصالح سنگی کمتر است. این در حالی است که در صورت استفاده از دانه‌بندی پیوسته، میزان مصرف جرمی پودر لاتریت کمتر و میزان مصرف جرمی محلول فعال‌کننده و مصالح سنگی بیشتر است. قیمت تمام‌شده پودر لاتریت مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ای بتن ژئوپلیمری در صورت استفاده از منابع خاک لاتریت کمتر و در صورت استفاده از منابع سنگ (با در نظر گرفتن هزینه‌های آسیاب) بالاتر خواهد بود. لذا در صورت استفاده از خاک لاتریت برای تأمین پودر لاتریت، استفاده از دانه‌بندی پیوسته برای مصالح سنگی، علیرغم مصرف بیشتر پودر لاتریت، به دلیل مصرف کمتر محلول قلیایی اقتصادی‌تر خواهد بود. به عبارتی می‌توان گفت که در صورت استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری با دانه بندی پیوسته به دلیل استفاده از

یک پارامتر تأثیرگذار مهم در مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به بیندر (L/B) است. با کاهش نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به بیندر، مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری کاهش می‌یابد (۱۹). برای ساخت بتن ژئوپلیمری با کارایی مناسب در این تحقیق، در حالت استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت، نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به پودر لاتریت ۰/۳۳ و در حالت استفاده از مصالح سنگی پیوسته (شن و ماسه)، نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به پودر لاتریت ۱/۳۰ به دست آمد. لذا طبق نتایج تحقیق حاضر، با استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت به دلیل کاهش نسبت جرمی محلول فعال‌کننده به پودر لاتریت، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد و این امر برای استفاده از این نوع بتن در فعالیتهای عمرانی محیط‌های که به دلیل اهمیت و ارزش زیادی دارند و یا شکننده تر هستند (مانند جنگل‌ها، سواحل، دریاها و یا اینکه در مناطق زلزله خیز، طوفان شدید و...) کارایی بیشتری داشته و ضمن آسیب‌رسانی کمتر به محیط زیست از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. این امر نیز در منجر به حفاظت بیشتر از محیط زیست، کاهش هزینه‌های اقتصادی و محافظت از زندگی

جدول ۷ تحلیل مرحله نهایی مدل مربوط به ماتریس ایرانی را در خصوص اثرات زیست‌محیطی بتن‌ها نشان می‌دهد. مطابق یافته‌های این بخش از ماتریس، تأثیرپذیری پارامترهای زیست‌محیطی از بتن‌های ژئوپلیمری برابر با ۴۷- از مجموع کل ۱۳۵- بوده است. همچنین تأثیرپذیری پارامترهای زیست‌محیطی از بتن‌های پرتلندی برابر با ۶۷- می‌باشد. به عبارتی میزان آلاینده‌ی بتن‌های پرتلندی در حدود ۱۴/۸۱ درصد بیشتر از بتن‌های ژئوپلیمری است. البته لازم به توضیح است این میزان بدون در نظر گرفتن میزان مقاومت بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن‌های پرتلندی است و در صورت لحاظ قرار دادن این مورد، میزان آلاینده‌ی بتن‌های پرتلندی بیشتر از بتن‌های ژئوپلیمری خواهد شد.

پودر لاتریت کمتر، قیمت تمام شده بتن به شدت کاهش یافته و همچنین به دلیل به دلیل در دسترس بودن ماسه و شن، نیاز به خاک برداری گسترده نیست. عدم خاک برداری گسترده، بافت خاک دچار تغییر زاد نمی‌شود و این امر نیز منجر به شست شوی کمتر خاک، کاهش میزان آلاینده‌ی ذرات ریز در هوا و کاهش لغزش زمین می‌شود. در مرحله دوم این تحقیق که عبارت بود از ارزیابی اثرات مخرب زیست‌محیطی در بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه لاتریت و همچنین بتن‌های بر پایه سیمان پرتلندی، یافته‌های تحقیق نشان داد که بیشترین اثرات منفی مربوط به بتن‌های پایه پرتلندی و در مرحله استخراج بوده که ظرفیت تخریب آن برابر با ۲۲- از مجموع ۲۵- است. همچنین کمترین میزان تخریب محیط‌زیستی مربوط به بتن‌های ژئوپلیمری در مرحله مصرف با مقدار ۹- به دست آمد. سایر اطلاعات به دست آمده مطابق جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶- امتیازهای اختصاص داده شده به میزان آلاینده‌ی زیست‌محیطی دو نوع بتن ژئوپلیمری و پرتلندی

Table 6. Points for environmental pollution of two types of geopolymer and portland concrete

مصرف		فرآوری و تولید		استخراج مواد اولیه		چرخه حیات بتن‌های ژئوپلیمری و پرتلندی	
						شاخص‌های آلاینده‌ی	
بتن‌های پرتلندی	بتن‌های ژئوپلیمری	بتن‌های پرتلندی	بتن‌های ژئوپلیمری	بتن‌های پرتلندی	بتن‌های ژئوپلیمری		
-۲	-۱	-۵	-۱	-۴	-۴	آلودگی هوا	اثرات فیزیکی
-۲	-۱	-۴	-۳	-۴	-۳	تراز صدا	
-۲	-۱	-۳	-۳	-۴	-۲	کیفیت آب‌های سطحی	
-۲	-۱	-۴	-۳	-۴	-۳	کیفیت آب‌های زیرزمینی	
-۳	-۱	-۳	-۳	-۴	-۱	آلودگی خاک و فرسایش	
-۲	-۱	-۱	-۱	-۲	-۲	کیفیت زیستگاه‌های جانوری	اثرات بیولوژیکی
-۲	-۱	-۲	-۱	-۲	-۱	کیفیت زیستگاه‌های انسانی	
-۲	-۱	-۲	-۱	-۱	-۲	تراکم گیاهان	
-۲	-۱	-۱	-۱	-۲	-۲	تغییر کاربری اراضی	
-۱۹	-۹	-۲۴	-۱۷	-۲۶	-۱۹	جمع نهایی	

جدول ۷- امتیازهای نهایی در خصوص میزان آلاینده‌گی ابعاد فیزیکی و بیولوژیکی بتن‌های ژئوپلیمری و پرتلندی

Table 7. Final scores on the contamination of physical and biological dimensions of geopolymer and portland concrete

مجموع اثرات بیولوژیکی	مجموع اثرات فیزیکی	مجموع اثرات استفاده	مجموع اثرات فرآوری	مجموع اثرات استخراج	مجموع اثرات بتن‌های پرتلند	مجموع اثرات بتن‌های ژئوپلیمری	چرخه حیات بتن‌های ژئوپلیمری و پرتلندی
							شاخص‌های آلاینده‌گی
۷۶		-۳	-۵	-۷	-۹	-۶	آلودگی هوا
							تراز صدا
							کیفیت آب‌های سطحی
							کیفیت آب‌های زیرزمینی
							آلودگی خاک و فرسایش
							کیفیت زیستگاه‌های جانوری
۷۲		-۳	-۳	-۳	-۶	-۳	کیفیت زیستگاه‌های انسانی
							تراکم گیاهان
							تغییر کاربری اراضی
							جمع نهایی
		-۲۵	-۴۱	-۴۵	-۶۷	-۴۷	

به دست آمد که از این مقدار ۱۲- برای بخش بیولوژیکی و ۱۳- برای بخش فیزیکی است.

نتیجه‌گیری

همان‌طوری که در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار گرفت استفاده از بتن‌هایی با مقاومت بالا و میزان آلاینده‌گی کمتر به عنوان یکی از ضرورت‌های اصلی در زمینه ارتقای بهره‌وری با رویکرد حفاظت از محیط‌زیست محسوب می‌شود. در این تحقیق برای اولین بار اقدام به بررسی و آزمایش میزان مقاومت بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن‌های پرتلند و ارزیابی اثرات زیست محیطی این دو گروه از بتن‌ها گردید. نتایج یافته‌های این تحقیق نشان داد که مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه لاتریت ساخته‌شده با استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی یکنواخت در مقایسه با نمونه‌های ساخته‌شده با

نتایج تحلیل‌های مربوط به ماتریس ایرانی نشان داد که مجموع اثرات فیزیکی هر دو گروه از بتن‌ها برابر با ۷۶- و اثرات بیولوژیکی آن برابر با ۷۲- است و در این بین ۳۲- برای بتن‌های ژئوپلیمری و ۴۴- برای بتن‌های پرتلندی است. در رابطه با اثرات بیولوژیکی هم مجموع اثرات منفی برابر با ۷۲- به دست آمد که ۲۰- برای بتن‌های ژئوپلیمری و ۵۲- برای بتن‌های پرتلندی بوده است. در نهایت اینکه می‌توان گفت بیشترین میزان اثرات منفی زیست‌محیطی مربوط به بخش استخراج است که برابر با ۴۵- می‌باشد و از این میان ۱۴- برای اثرات بیولوژیکی و ۳۱- برای اثرات فیزیکی است. مجموع اثرات منفی در بخش فرآوری نیز برابر با ۴۱- به دست آمد که ۱۰- برای اثرات بیولوژیکی و ۳۱- برای اثرات فیزیکی است. همچنین در خصوص اثرات مخرب بخش مصرف نیز مقدار نهایی برابر ۲۵-

2. Yadollahi Saber, R., Ghaffarian Bahram, Gh; Alizadeh, M., Khatibzadeh, M.R. 2009. *Environmental Impact Assessment of Iran Khodro Factory (EIA)*, Journal of Environmental Science and Technology, 21 (7), 123-135
3. Shu, X., & Huang, B. 2014. *Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview*. Construction and Building Materials, 67, 217-224.
4. Mustafa, M., Bakri, A., Mohammed, H., Kamarudin, H., Nizar, K., & Zarina, Y. 2011. *Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement*.
5. Qin, L., Gao, X., & Li, Q. 2018. *Upcycling carbon dioxide to improve mechanical strength of Portland cement*. Journal of cleaner production, 196, 726-738.
6. Turner, L.K. and F.G. Collins. 2013. *Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete*. Construction and Building Materials, 43: p. 125-130.
7. Chan, C., D. Thorpe, and M. Islam. 2015. *An evaluation carbon footprint in fly ash based geopolymer cement and ordinary Portland cement manufacture*. in IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE.
8. Gourley, J. and G. Johnson. 2005. *Developments in geopolymer precast concrete*. in World congress geopolymer, Geopolymer Institute Saint-Quentin, France.
9. Błaszczyszki, T. and M. Król. 2015. *Usage of green concrete technology in*

استفاده از مصالح سنگی با دانه بندی پیوسته، بیشتر به دست است. همچنین بتن های ژئوپلیمری بر پایه لاتریت به خاطر استفاده از مصالح طبیعی و مصرف انرژی کمتر دارای اثرات زیست محیطی کمتری دارند. در این خصوص نتایج یافته ها نشان مجموع نهایی میزان آلاینده گی بتن های پرتلندی در مقایسه با بتن های ژئوپلیمری در حدود ۱۴/۸۱ درصد بیشتر است. نتایج کلی این پژوهش در بخش مقاومت بتن های ژئوپلیمری با نتایج یافته های (۲۴-۲۳-۲۲) همخوانی دارد. در این خصوص پیشنهاد می شود که از طریق ایجاد گرم خانه هایی صنعتی، فرآوری بتن های ژئوپلیمری که از میزان مقاومت زیاد و در نتیجه تخریب و فرسایش کمتری دارند، اقدام گردد. نتایج کلی یافته های بخش دوم این پژوهش در زمینه ارزیابی میزان اثرات زیست محیطی دو نوع بتن مورد استفاده با نتایج یافته های (۲۶-۲۵) همخوانی دارد. در این خصوص پیشنهاد می گردد که از طریق فراهم سازی ادوات و زیرساخت های تولید بتن های ژئوپلیمری و تنظیم ضوابط و تشویق هایی برای استفاده صنعتی از این نو بتن های در کارهای عمرانی و ساختمانی، زمینه برای افزایش میزان مقاومت زیرساخت ها در برابر فشار نیروهای محیط و سازه و همچنین کاهش میزان آلاینده گی محیط زیست فراهم گردد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دفتر انجمن های علمی دانشجویی دانشگاه بناب در خصوص حمایت از دانشجویان عضو انجمن علمی عمران و تأمین بخشی از هزینه های انجام آزمایش های این پژوهش قدردانی به عمل می آید.

References

1. Zaheri, M., & Majnoui-Toutakhane, A. 2019. *Evaluating the mental and emotional effects of Sahand Bonab thermal power plant greenhouse on rural communities, Case study: Rurlas in Bonab*. Journal of Applied researches in Geographical Sciences, 19(53), 75-98. doi: 10.29252/jgs.19.53.75

- mechanical strength and microstructure of iron-rich aluminosilicate (laterite) based-geopolymer cured at room temperature.* Ceramics International, 44(17): p. 21442-21450.
19. Lampris, C., R. Lupo, and C.R. Cheeseman. 2009. *Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants.* Waste Management, 29(1): p. 368-373.
 20. Ahmari, S. and L. Zhang. 2012. *Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization.* Construction and building materials, 29: p. 323-331.
 21. Chindapasirt, P., T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon. 2007. *Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.* Cement and concrete composites, 29(3): p. 224-229.
 22. Rezaie, K., Ramiyani, S. S., Nazari-Shirkouhi, S., & Badizadeh, A. 2014. *Evaluating performance of Iranian cement firms using an integrated fuzzy AHP-VIKOR method.* Applied Mathematical Modelling, 38(21-22), 5033-5046.
 23. Nuaklong, P., Sata, V., & Chindapasirt, P. 2018. *Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens.* Construction and Building Materials, 161, 365-373.
 24. McGrath, T., Cox, S., Soutsos, M., Kong, D., Mee, L., & Alengaram, J. U. 2018. *Life cycle assessment of geopolymer concrete: A Malaysian context.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
 - civil engineering.* Procedia Engineering, 122: p. 296-301.
 10. Kong, D.L. and J.G. Sanjayan. 2010. *Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete.* Cement and concrete research, 40(2): p. 334-339.
 11. Jeyasehar, C.A., et al. 2013. *Strength and durability studies on fly ash based geopolymer bricks.*
 12. Gartner, E. 2004. *Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements.* Cement and Concrete research, 34(9): p. 1489-1498.
 13. Djobo, J.N.Y., et al. 2016. *Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars.* Construction and Building Materials, 124: p. 606-614.
 14. Adam, A. 2009. *Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete.*
 15. Davidovits, J. 1989. *Geopolymers and geopolymeric materials.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 35(2): p. 429-441.
 16. Mbumbia, L., A.M. de Wilmars, and J. Tirlocq. 2000. *Performance characteristics of lateritic soil bricks fired at low temperatures: a case study of Cameroon.* Construction and Building Materials, 14(3): p. 121-131.
 17. Marabi, Y et al. 2019. *"Influence of operating temperature on compressive strength of laterite based geopolymer malt samples"* 3rd International Conference on Applied Research in Structural Engineering and Construction Management, Tehran, Sharif University of Technology, July.
 18. Kaze, C.R., et al. 2018. *Effect of silicate modulus on the setting,*

26. Dubey, A. 2019. *Dimensionally stable geopolymer composition and method: Google Patents.*

25. Mohammed, B. S., Liew, M. S., Alaloul, W. S., Al-Fakih, A., Ibrahim, W., & Adamu, M. 2018. *Development of rubberized geopolymer interlocking bricks. Case studies in construction materials*, 8, 401-408.