

## امکان‌سنجی تولید آجر و ملات ژئوپلیمری از خاک بومی قرمز رنگ روستای توتاخانه به منظور استفاده در حفاظت از بافت معماری ارگانیک

احمد فهمی<sup>۱\*</sup>

[fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir](mailto:fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir)

علیرضا بابائیان امینی<sup>۱</sup>

علی مجنونی توتاخانه<sup>۲</sup>

یاسر مارابی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲

### چکیده

**زمینه و هدف:** معماری بومی هر منطقه برگرفته از امکاناتی است که محیط در اختیار قرار داده است. با به کارگیری روش‌های نوین می‌توان مصالح بومی را فراوری کرده و در ساخت‌وساز همان منطقه استفاده نمود. خاک روستای توتاخانه به صورت بالقوه دارای پتانسیل بالایی برای تولید آجر و ملات ژئوپلیمری است. در این پژوهش امکان‌سنجی ساخت نمونه‌های آجر و ملات ژئوپلیمری بر پایه خاک قرمز روستای توتاخانه با استفاده از سدیم‌هیدرواکسید و آب شیشه صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**روش بررسی:** در این مطالعه، طرح اختلاط تولید بیندر ژئوپلیمری بر پایه خاک قرمز توتاخانه به منظور تولید مصالح ساختمانی مانند آجر مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور مواد اولیه خام شامل خاک قرمز توتاخانه به عنوان آلومینوسیلیکات، سنگدانه عبوری از الک استاندارد شماره ۸ به عنوان فیلر و محلول فعال کننده قلیایی حاوی آب شیشه صنعتی و محلول سدیم‌هیدرواکسید با غلظت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

**یافته‌ها:** طبق نتایج به‌دست آمده، مقاومت فشاری و درصد جذب آب برای آجر ژئوپلیمری بسیار بهینه می‌باشد. لذا آجرهای ژئوپلیمری تولید شده از خاک قرمز توتاخانه دارای ویژگی هزینه کم تولید، مصرف انرژی کمتر و تولید حداقلی دی‌اکسیدکربن است. همچنین میزان مقاومت‌پذیری آجرهای ژئوپلیمری حدود ۳۶۲/۵۵ درصد بیشتر از آجرهای رسی است. میزان شباهت ظاهری ملات ژئوپلیمری با ملات معمولی ۸۳ درصد است.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب. \* (مسئول مکاتبات)

۲- مدرس گروه مهندسی معماری، دانشگاه بناب.

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

**بحث و نتیجه گیری:** نتایج حاصل از این پژوهش می تواند در زمینه مرمت بافت فرسوده، ملات برای سازه های بتنی، نوسازی و مرمت بناهای تاریخی و فرسوده و غیره مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه های کلیدی:** آجر ژئوپلیمری، ملات، خاک قرمز، توتاخانه، معماری بومی.

# **Production of Geopolymeric Bricks and Mortar from the Indigenous Soil of the Village of Toutakhaneh to Protect the Organic Architectural Fabric**

**Ahmad Fahmia<sup>1</sup>\***

[fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir](mailto:fahmi.ahmad@ubonab.ac.ir)

**Alireza Babaeian amini<sup>1</sup>**

**Ali Majnoui Toutakhane<sup>2</sup>**

**Yaser Marabi<sup>3</sup>**

Admission Date: August 20, 2022

Date Received: April 22, 2022

## **Abstract**

**Background and Objective:** The indigenous architecture of each region is derived from the facilities provided by the environment. By using new methods, local materials can be processed and used in construction in the same area. The soil of Toutakhaneh village has a high potential for producing bricks and geopolymer mortar. The advantage of geopolymer bricks and mortars is that while they cost less to produce, they do not need to be baked in a high-temperature oven and therefore play an important role in reducing greenhouse gases.

**Material and Methodology:** In this study, the mixing design of geopolymer binder production based on Toutakhaneh red soil to produce construction materials such as bricks has been evaluated. For this purpose, raw materials including Toutakhaneh red soil as aluminosilicate, aggregate passing through standard sieve No. 8 as filler, and an alkaline activating solution containing industrial glass water and sodium hydroxide solution with different concentrations were used.

**Findings:** According to the results, the compressive strength and water absorption percentage are very optimal for geopolymer bricks. Therefore, geopolymer bricks produced from Toutakhaneh red soil have the characteristics of low production cost, lower energy consumption, and minimal production of carbon dioxide. Also, the strength of geopolymer bricks is about 362.55% higher than clay bricks. The apparent similarity of geopolymer mortar with ordinary mortar is 83%.

**Discussion and Conclusion:** The results of this study can be used in the field of restoration of worn texture, mortar for concrete structures, renovation, and restoration of historic and worn buildings, etc.

**Key words:** Geopolymer brick, Mortar, red soil, Toutakhaneh village, Native architecture.

---

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran. \* (*Corresponding Author*)

2- Lecturer, Department of Architecture, University of Bonab, Bonab, Iran.

3- Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.

## مقدمه

اخیراً به منابع انرژی رو به زوال زمین توجه زیادی معطوف شده و در بین همه ساکنین این کره خاکی، در خصوص ضرورت استفاده کمتر از این منابع اتفاق نظر وجود دارد (۱). راهکارهای استفاده بهینه از منابع انرژی زمین، اندیشمندان اغلب رشته‌های علمی را درگیر کرده و تنوع مطالعات علمی صورت گرفته نیز بیانگر اهمیت و ضرورت استفاده بهینه از منابع انرژی از دیدگاه دانشمندان علوم مختلف است (۲). متخصصان رشته‌های عمران و معماری هم از طریق به کارگیری اصول نوین ساخت و ساز، به دنبال استفاده بهینه از مصالح در راستای کاهش مصرف انرژی هستند. از جمله رویکردهای این متخصصان توجه به اصول معماری ارگانیک، استفاده از منابع بومی محیط و همچنین استفاده از فناوری‌های جدید برای فراوری و بهینه‌سازی منابع بومی است (۳-۴). در واقع هدف اصلی معماری ارگانیک، بررسی عادات‌های انسانی و مصالح موجود در طبیعت است (۵) به نحوی که هم از نظر فنی و هم از نظر فرهنگی بین مصالح و سبک زندگی افراد بومی ارتباط برقرار گردد (۶). به طور خلاصه می‌توان گفت که هدف هم‌گرایی رشته‌های معماری، عمران و محیط زیست در زمینه معماری ارگانیک عبارت است از تفسیری از قوانین طبیعت که در یک سازه به چشم می‌خورد و یک هارمونی منسجم با دنیای اطراف خود ایجاد می‌کند و بر طبیعت احترام می‌گذارد (۴).

اکرمی (۱۳۸۹) در مقاله‌ای با عنوان «رازهای معماری روستایی» زیبایی بومی و ارگانیک معماری روستایی را ناشی از به کارگیری مصالح بومی و همچنین همخوانی این مصالح با سبک زندگی و اقلیم منطقه می‌داند (۷). خاک‌زند و احمدی (۱۳۸۶) ارتباط بین معماری روستایی و طبیعت از جمله خاک را یک رویکرد زیست محیطی، هنری و ریاضی می‌داند که به نحو احسن در محیط روستایی بروز پیدا کرده است (۸). درمحمدی و رحیم نیا (۱۳۹۶) اقدام به ورز دادن خاک به منظور تثبیت آن جهت استفاده در معماری بومی روستایی کرده‌اند (۹). اکرمی و علی پور (۱۳۹۵) نقش استفاده از خاک محلی در کاهش مصرف انرژی در محیط‌های روستایی را بررسی کرده‌اند (۱۰).

تولید مصالح و بتن ژئوپلیمری به عنوان مصالح پایدار و سبز، نقش قابل توجهی در کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای دارد (۱-۳). استفاده از بتن ژئوپلیمری برای تولید مصالح ساختمانی مانند آجر و بلوک‌های مجوف در مناطق روستایی پتانسیل قابل توجهی دارد (۴). تولید آجر و بتن ژئوپلیمری بر پایه خاک رس توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (۵-۱۲). ساخت مصالح ژئوپلیمری با استفاده از منابع آلومینوسیلیکاتی و فعال‌کننده‌های قلیایی مانند سدیم هیدرواکسید و آب شیشه نیز مورد توجه محققین بوده است (۱۳-۱۶).

استفاده از خاک قرمز محلی روستای توتاخانه برای تولید مصالح ساختمانی به منظور بازسازی و احداث ساختمان‌های جدید در این روستا اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به این‌که خاک رس توتاخانه منبع آلومینوسیلیکاتی مناسبی برای تولید مصالح ژئوپلیمری می‌باشد، در این پژوهش امکان‌سنجی ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری بر پایه خاک قرمز روستای توتاخانه با استفاده از سدیم هیدرواکسید و آب شیشه صنعتی مورد ارزیابی قرار گرفته و مقاومت مکانیکی و درصد جذب آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت (۱۷، ۱۸).

همخوانی معماری بومی روستای توتاخانه با مصالح بومی موجود در منطقه از جمله خاک قرمز، منجر به برقراری ارتباط همه-جانبه معماری روستا با بستر طبیعی خود شده است. خاک بومی روستا در معماری قدیمی روستای توتاخانه، دارای کارکرد چند بعدی بوده است که از جمله آن‌ها می‌توان به ظرفیت بالای خاک و جلوگیری از انتقال سرما و گرما در فصول مختلف، چسبندگی زیاد خاک به دیوارها و جلوگیری از نفوذ آب باران در بدنه دیوار، نقش حمایتی از سنگ در برابر سرما و گرما، تأمین راحت و با هزینه کم به جهت فراوانی در محیط پیرامون اشاره کرد. می‌توان با استفاده از شیوه نوین تولید آجر و ملات-های ژئوپلیمری، ضمن کاهش استفاده از انرژی‌های فسیلی، زمینه را برای استفاده از مصالح بومی در معماری روستا فراهم ساخت بدون اینکه هویت معماری روستا از بین رود (۲۲-۱۹). علیرغم مزیت‌های متعددی که برای خاک بومی روستای توتاخانه ذکر شد، ولی بایستی توجه کرد که امروزه ضرورت

برای ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری در این پژوهش، خاک قرمز توتاخانه به عنوان مواد پایه آلومینوسیلیکات مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۱، پودر خاک قرمز توتاخانه (خشک شده در گرمخانه) به عنوان ماده اولیه در دسترس برای تهیه مصالح ساختمانی در روستای توتاخانه شهرستان بناب انتخاب شد. همچنین از سنگ‌دانه‌های معمولی یکنواخت به عنوان فیلر (پرکننده) استفاده شد. منظور از سنگ‌دانه‌های یکنواخت، مصالح عبوری از الک استاندارد نمره ۴ و مانده روی الک استاندارد نمره ۸ می‌باشد. برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی از سدیم هیدرواکسید (سود سوزآور شرکت کلر پارس ۹۹٪) و آب شیشه صنعتی با ریشیو ۲/۴ استفاده شد. برای ساخت محلول قلیایی سدیم هیدرواکسید از آب شرب شهر بناب استفاده شد. وسایل و تجهیزات مورد استفاده شده در این پژوهش شامل گرمخانه، پن‌میکسر، قالب چوبی مکعبی ۵×۵×۵ سانتی‌متری، قالب آجری ۲۰×۱۰×۵ سانتی‌متری، و بیره و ملات‌شکن می‌باشد.

استفاده از فناوری‌های نوین در تولید مصالح اجتناب‌ناپذیر شده و مصالح بومی بدون استفاده از روش‌های نوین به تنهایی توان پاسخ‌گویی به نیازهای ساخت‌وساز روستائیان را ندارند (۲۳، ۲۴). در این میان، ساخت و ساز در روستاهای توریستی به دلیل ارزش‌های طبیعی، تاریخی و فرهنگی می‌بایستی با احتیاط بیشتری صورت گرفته و از هرگونه ساخت و ساز و یا دخالت در بافت روستایی که نتیجه آن تخریب یا کاهش کیفیت معماری روستا شود، خودداری نمود. روستای توتاخانه یک روستای گردشگرپذیر است که در سمت شمالی شهرستان بناب و در دامنه‌های جنوبی کوه سه‌سند قرار گرفته است. این روستا دارای معماری پلکانی بوده و متناسب با رنگ‌دانه‌های خاک این روستا، رنگ ساختمان‌ها قرمز رنگ است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی امکان تولید آجر و ملات ژئوپلیمری در خاک روستای توتاخانه، امکان‌سنجی استفاده از این آجرها و ملات‌ها در حفظ معماری بومی این روستا است.

#### روش بررسی



شکل ۱- پودر خاک قرمز توتاخانه خشک شده در گرمخانه

Figure 1. Toutankhane red powder dried in an oven

#### ۱-۲- فرایند انجام آزمایش

ابتدا محلول فعال‌کننده قلیایی با مولاریته مشخص آماده شد. برای این منظور جرم مشخص از سدیم هیدرواکسید متناسب با مولاریته مورد نظر با آب حل نموده و ۵ دقیقه به هم زده شد. برای ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با فیلر سنگ‌دانه از

محلول سدیم هیدرواکسید ۴، ۸ و ۱۲ مولار استفاده شد. برای تهیه محلول فعال‌کننده قلیایی، نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید با مولاریته مشخص، ۱ و ۲ انتخاب شد. به عنوان مثال نام G-F-12-2 نشان‌دهنده استفاده از

مصالح مذکور در پن میکسر ریخته شده و پس از ۵ دقیقه اختلاط کامل در درون قالب‌های ۵×۵×۵ سانتی‌متری و ۲۰×۱۰×۵ سانتی‌متری چوبی مطابق شکل ۲ ریخته شده و بر روی دستگاه لرزان، ویبره زده شد. نمونه‌های ملات و آجر ژئوپلیمری بدون فیلر دارای نسبت فعال کننده به پوزولان ۰/۴ و نمونه‌های ملات و آجر ژئوپلیمری حاوی فیلر دارای نسبت فعال کننده به پوزولان ۰/۴۵ می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده بعد از درآوردن از قالب به مدت ۳ روز در گرمخانه با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شد. بعد از خروج نمونه‌ها از گرمخانه، درصد جذب آب و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و آجری در سن‌های مختلف اندازه‌گیری شد. همچنین نمونه‌های لوبیایی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی مورد استفاده قرار گرفت و نمونه‌های منشوری برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی با استفاده از روش بارگذاری سه نقطه مورد استفاده قرار گرفت. نمای کلی ساخت نمونه‌های ملات و آجر ژئوپلیمری بر پایه خاک قرمز توتاخانه مطابق شکل ۲ می‌باشد.

محلول سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ می‌باشد. به عنوان مثالی دیگر نام G-F-8-1 نشان‌دهنده استفاده از محلول سدیم هیدرواکسید ۸ مولار و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید برابر با ۱ می‌باشد (۱۳، ۱۶، ۱۷). پودر خاک قرمز توتاخانه رد شده از الک نمره ۱۰۰ به عنوان ماده جامد پایه آلومینوسیلیکات مورد نیاز برای تهیه بیندر ژئوپلیمری انتخاب شد. همچنین سنگ‌دانه عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۸ به عنوان فیلر دوم آماده شد. نمونه ملات ژئوپلیمری بر پایه پودر خاک قرمز توتاخانه با استفاده از فیلر تهیه شده (سنگ‌دانه یکنواخت) ساخته شد. ابتدا برای ساخت نمونه‌های ملات ژئوپلیمری، پودر خاک قرمز توتاخانه به همراه فیلر سنگ‌دانه یکنواخت در ظرف پلاستیکی ریخته شده و محلول فعال کننده قلیایی به آرامی به آن افزوده شده و مخلوط شد. طرح اختلاط نمونه‌های مکعبی بدون فیلر و حاوی فیلر، نمونه‌های آجر بدون فیلر و حاوی فیلر، نمونه‌های لوبیایی و منشوری مطابق جدول ۱ تا جدول ۶ ارائه شده است. سپس

### جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری بدون فیلر (نمونه مکعبی)

Table 1. Mixing design of samples of geopolymer mortar without filler (cubic samples)

| تعداد نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم) |                       |               |                        | نام نمونه | ردیف |
|-------------|----------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------|------|
|             | آب شیشه              | محلول سدیم هیدرواکسید | فیلر سنگ‌دانه | پودر خاک قرمز توتاخانه |           |      |
| ۴×۳         | ۳۸                   | ۳۸                    | ۰             | ۱۹۰                    | 4-1 G     | ۱    |
| ۴×۳         | ۵۰/۶                 | ۲۵/۳                  | ۰             | ۱۹۰                    | G 4-2     | ۲    |
| ۴×۳         | ۳۸                   | ۳۸                    | ۰             | ۱۹۰                    | G 8-1     | ۳    |
| ۴×۳         | ۵۰/۶                 | ۲۵/۳                  | ۰             | ۱۹۰                    | G 8-2     | ۶    |
| ۴×۳         | ۳۸                   | ۳۸                    | ۰             | ۱۹۰                    | G 12-1    | ۷    |
| ۴×۳         | ۵۰/۶                 | ۲۵/۳                  | ۰             | ۱۹۰                    | G 12-2    | ۸    |

نشان می‌دهد.

همچنین جدول ۲ طرح اختلاط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی فیلر (نمونه مکعبی) به کار رفته در پژوهش حاضر را

جدول ۲- طرح اختلاط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری حاوی فیلر<sup>۱</sup> (نمونه مکعبی)

Table 2. Mixing design of samples of geopolymer mortar containing filler (cubic samples)

| تعداد نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم) |                       |               |                        | نام نمونه | ردیف |
|-------------|----------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------|------|
|             | آب شیشه              | محلول سدیم هیدرواکسید | فیلر سنگ‌دانه | پودر خاک قرمز توتاخانه |           |      |
| ۴×۳         | ۲۱/۳۷                | ۲۱/۳۷                 | ۹۵            | ۹۵                     | 4-1 G-F   | ۱    |
| ۴×۳         | ۲۸/۵                 | ۱۴/۲۵                 | ۹۵            | ۹۵                     | G-F 4-2   | ۲    |
| ۴×۳         | ۲۱/۳۷                | ۲۱/۳۷                 | ۹۵            | ۹۵                     | G-F 8-1   | ۳    |
| ۴×۳         | ۲۸/۵                 | ۱۴/۲۵                 | ۹۵            | ۹۵                     | G-F 8-2   | ۶    |
| ۴×۳         | ۲۱/۳۷                | ۲۱/۳۷                 | ۹۵            | ۹۵                     | G-F 12-1  | ۷    |
| ۴×۳         | ۲۸/۵                 | ۱۴/۲۵                 | ۹۵            | ۹۵                     | G-F 12-2  | ۸    |

جدول ۳- طرح اختلاط نمونه‌های آجر ژئوپلیمری بدون فیلر

Table 3. Mixing design of geopolymer brick samples without filler

| تعداد نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم) |                       |               |                        | نام نمونه | ردیف |
|-------------|----------------------|-----------------------|---------------|------------------------|-----------|------|
|             | آب شیشه              | محلول سدیم هیدرواکسید | فیلر سنگ‌دانه | پودر خاک قرمز توتاخانه |           |      |
| ۴×۳         | ۳۰۴                  | ۳۰۴                   | ۰             | ۱۵۲۰                   | 4-1 G     | ۱    |
| ۴×۳         | ۴۰۵/۳                | ۲۰۲/۶                 | ۰             | ۱۵۲۰                   | G 4-2     | ۲    |
| ۴×۳         | ۳۰۴                  | ۳۰۴                   | ۰             | ۱۵۲۰                   | G 8-1     | ۳    |
| ۴×۳         | ۴۰۵/۳                | ۲۰۲/۶                 | ۰             | ۱۵۲۰                   | G 8-2     | ۶    |
| ۴×۳         | ۳۰۴                  | ۳۰۴                   | ۰             | ۱۵۲۰                   | G 12-1    | ۷    |
| ۴×۳         | ۴۰۵/۳                | ۲۰۲/۶                 | ۰             | ۱۵۲۰                   | G 12-2    | ۸    |

۱- فیلر همان سنگدانه‌های به کار رفته در تهیه آجر و ملات هست.

جدول ۳ داده‌های مربوط به طرح اختلاط نمونه آجرهای ژئوپلیمری بدون فیلر را نشان می‌دهد.

#### جدول ۴- طرح اختلاط نمونه‌های آجر ژئوپلیمری حاوی فیلر

Table 4. Mixing design of geopolymer brick samples containing filler

| ردیف | نام نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم)      |                  |                          |         |
|------|-----------|---------------------------|------------------|--------------------------|---------|
|      |           | پودر خاک<br>قرمز توتاخانه | فیلر<br>سنگ‌دانه | محلول سدیم<br>هیدرواکسید | آب شیشه |
| ۱    | 4-1 G-F   | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۷۱                      | ۴×۳     |
| ۲    | G-F 4-2   | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۱۴                      | ۴×۳     |
| ۳    | G-F 8-1   | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۷۱                      | ۴×۳     |
| ۶    | G-F 8-2   | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۱۴                      | ۴×۳     |
| ۷    | G-F 12-1  | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۷۱                      | ۴×۳     |
| ۸    | G-F 12-2  | ۷۶۰                       | ۷۶۰              | ۱۱۴                      | ۴×۳     |

جدول ۴ اطلاعات مربوط به طرح اختلاط نمونه آجرهای

ژئوپلیمری حاوی فیلر را نشان می‌دهد.

#### جدول ۵- طرح اختلاط نمونه‌های لوبیایی ژئوپلیمری (تست کشش)

Table 5. Mixing scheme of geopolymer briquette samples (tensile test)

| ردیف | نام نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم)      |               |                          |
|------|-----------|---------------------------|---------------|--------------------------|
|      |           | پودر خاک<br>قرمز توتاخانه | فیلر سنگ‌دانه | محلول سدیم<br>هیدرواکسید |
| ۱    | 4-1 G     | ۱۲۰                       | ۰             | ۲۴                       |
| ۲    | G 4-2     | ۱۲۰                       | ۰             | ۱۶                       |
| ۳    | G 8-1     | ۱۲۰                       | ۰             | ۲۴                       |
| ۶    | G 8-2     | ۱۲۰                       | ۰             | ۱۶                       |
| ۷    | G 12-1    | ۱۲۰                       | ۰             | ۲۴                       |
| ۸    | G 12-2    | ۱۲۰                       | ۰             | ۱۶                       |

اطلاعات مورد استفاده در طرح اختلاط نمونه‌های لوبیایی

ژئوپلیمری جهت انجام تست کشش آجرهای ژئوپلیمری در

جدول ۵ ارائه شده است.



جدول ۶- طرح اختلاط نمونه‌های منشوری ژئوپلیمری (تست خمش)

Table 6. Mixing design of prismatic geopolymer samples (flexural test)

| ردیف | نام نمونه | جرم مواد مصرفی (گرم)   |               |                       | تعداد نمونه |
|------|-----------|------------------------|---------------|-----------------------|-------------|
|      |           | پودر خاک قرمز توتاخانه | فیلر سنگ‌دانه | محلول سدیم هیدرواکسید |             |
| ۱    | 4-1 G     | ۳۷۰                    | ۰             | ۷۴                    | ۳×۳         |
| ۲    | G 4-2     | ۳۷۰                    | ۰             | ۹۸/۶                  | ۳×۳         |
| ۳    | G 8-1     | ۳۷۰                    | ۰             | ۷۴                    | ۳×۳         |
| ۶    | G 8-2     | ۳۷۰                    | ۰             | ۹۸/۶                  | ۳×۳         |
| ۷    | G 12-1    | ۳۷۰                    | ۰             | ۷۴                    | ۳×۳         |
| ۸    | G 12-2    | ۳۷۰                    | ۰             | ۹۸/۶                  | ۳×۳         |

در ادامه در شکل ۲، تصاویر مربوط به ساخت ملات ژئوپلیمری و آجرهای پلیمری ارائه شده است.

در نهایت در جدول ۶ داده‌های مربوط به طرح اختلاط نمونه‌های منشوری ژئوپلیمری جهت انجام تست خمش ارائه شده است.



شکل ۲- فرایند ساخت ملات ژئوپلیمری و آجرهای پلیمری

Figure 2. The process of making geopolymer mortar and geopolymer bricks

مقاومت آجرها و ملات‌های ژئوپلیمری با آجرها و ملات معمولی مورد مقایسه قرار گیرد.

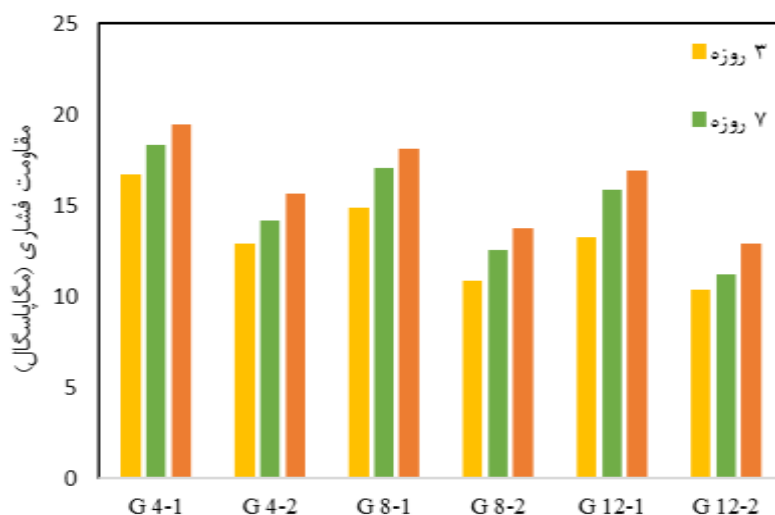
### ۳- یافته‌ها

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده بدون فیلر و حاوی فیلر به ترتیب مطابق نمودار

در ادامه پژوهش، نمونه‌هایی از آجرها و ملات‌های ژئوپلیمری تولید شده از خاک قرمز روستای توتاخانه، با نمونه‌هایی از آجرها و ملات‌های رسی معمولی به کار رفته در مسکن روستا که به صورت سنتی و توسط خود اهالی روستا تولید شده‌اند، مورد مقایسه قرار گرفته تا میزان شباهت آجرها و ملات‌های ژئوپلیمری با آجرهای و ملات معمولی و همچنین میزان

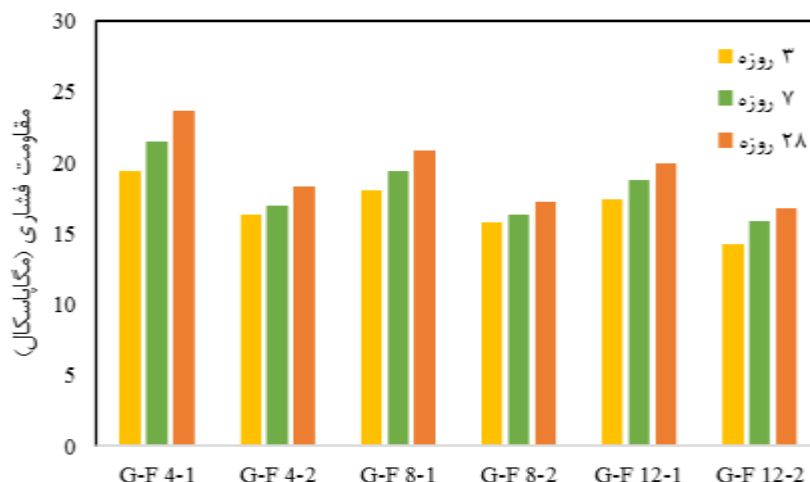
نمونه‌ها با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از فیلر، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری می‌شود، لیکن هزینه تمام شده نمونه‌ها را به مراتب کاهش می‌دهد. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های ژئوپلیمری به ازای استفاده از سدیم هیدرواکسید ۴ مولار در محلول قلیایی با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۱ حاصل شد. کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار در محلول قلیایی با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ حاصل شد.

شکل ۳ و نمودار شکل ۴ ارائه شده است. منظور از مقاومت فشاری، میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه از هر طرح آزمایش می‌باشد. مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۱۰/۴ تا ۱۶/۷ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۴/۲۵ تا ۱۹/۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۱۱/۲ تا ۱۸/۳۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۵/۸۵ تا ۲۱/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۱۲/۹ تا ۱۹/۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۶/۷۵ تا ۲۳/۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مشاهده می‌شود که در تمام



شکل ۳- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده بدون فیلر

Figure 3. Average compressive strength of geopolymer mortar samples made without filler



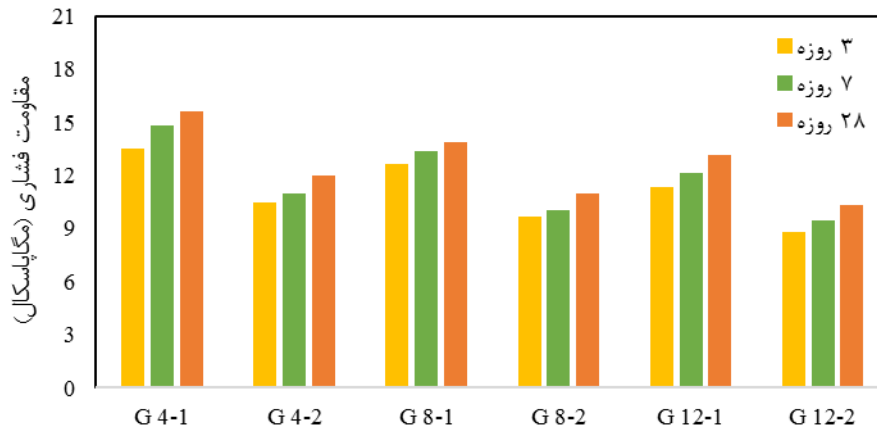
شکل ۴- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده حاوی فیلر

Figure 4. Average compressive strength of geopolymer mortar samples made containing filler

۱۹/۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از فیلر منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری می‌شود، لیکن هزینه تمام شده نمونه‌ها را به مراتب کاهش می‌دهد. بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های ژئوپلیمری به ازای استفاده از سدیم هیدرواکسید ۴ مولار در محلول قلیایی با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۱ حاصل شد. کمترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار در محلول قلیایی با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید برابر با ۲ حاصل شد.

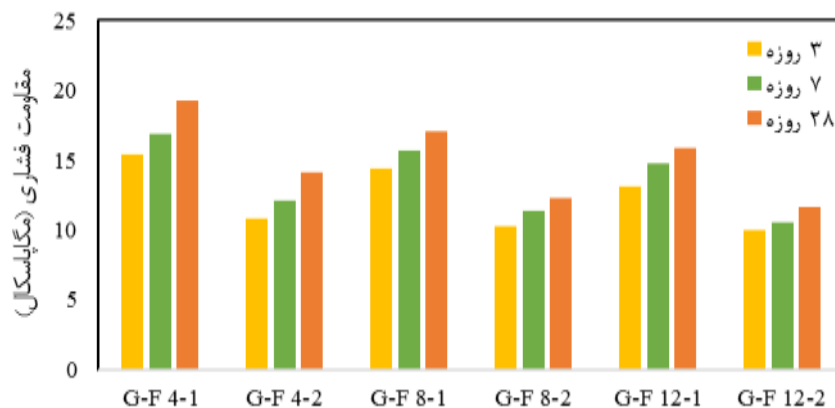
### ۳-۲- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آجر ژئوپلیمری

مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده بدون فیلر و حاوی فیلر به ترتیب مطابق نمودارهای شکل ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. منظور از مقاومت فشاری، میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه از هر طرح آزمایش می‌باشد. مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۸/۸ تا ۱۳/۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۳ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۰/۰۲ تا ۱۵/۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۹/۴۵ تا ۱۴/۸ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۰/۵۵ تا ۱۶/۸۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های فاقد فیلر بین ۱۰/۳ تا ۱۵/۶ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی فیلر بین ۱۱/۶ تا



شکل ۵- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های آجر ژئوپلیمری ساخته شده بدون فیبر

Figure 5. Average compressive strength of geopolymer brick samples made without filler



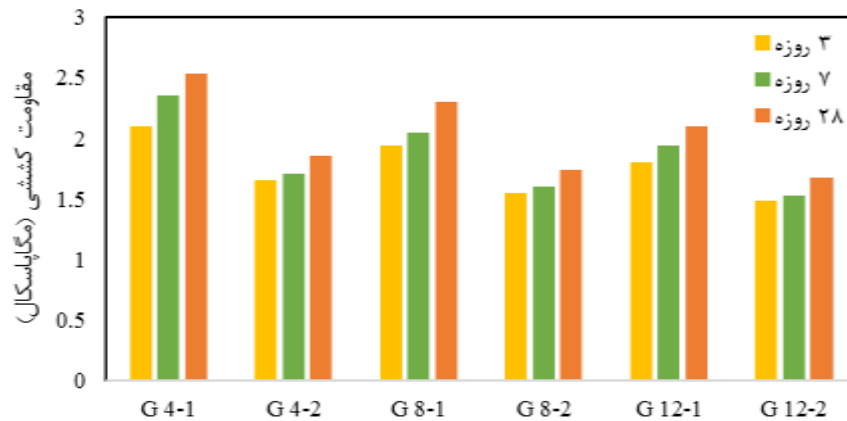
شکل ۶- میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های آجر ژئوپلیمری ساخته شده حاوی فیبر

Figure 6. Average compressive strength of geopolymer brick samples made containing filler

### ۳-۳- نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری

آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر است. حداقل مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۱/۴۸، ۱/۵۳ و ۱/۶۷ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و حداکثر مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۲/۱، ۲/۳۵ و ۲/۵۳ مگاپاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می‌باشد.

مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با آب شیشه Ratio:2.4 مطابق نمودار شکل ۷ ارائه شده است. منظور از مقاومت کششی، همان میانگین مقاومت کششی ۳ نمونه از هر طرح اختلاط است. مطابق نمودار شکل ۷، مقادیر مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده با افزایش غلظت مولی محلول سدیم هیدرواکسید کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ در مقایسه با مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با نسبت جرمی

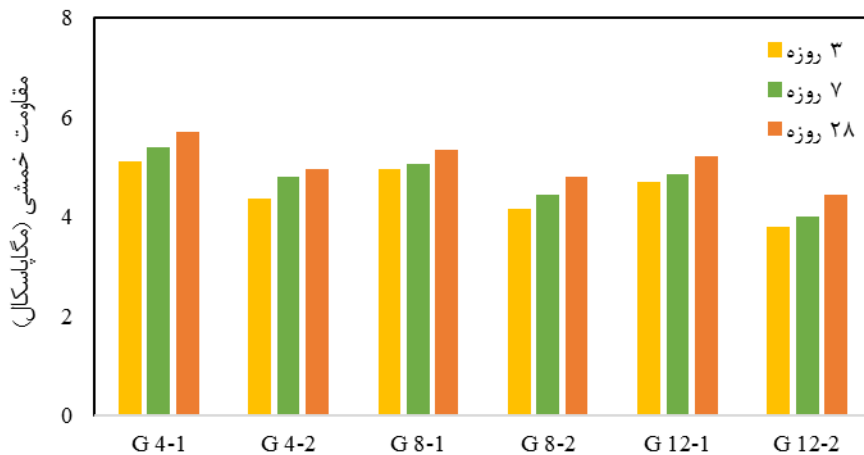


شکل ۷- میانگین مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری

Figure 7. Mean tensile strength of geopolymer samples

#### ۳-۴- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری

مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با آب شیشه Ratio:2.4 مطابق نمودار شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸- میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری

Figure 8. Mean flexural strength of geopolymer samples

مگا پاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و حداکثر مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۵/۱)، (۵/۴) و (۵/۷) مگا پاسکال) مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می‌باشد.

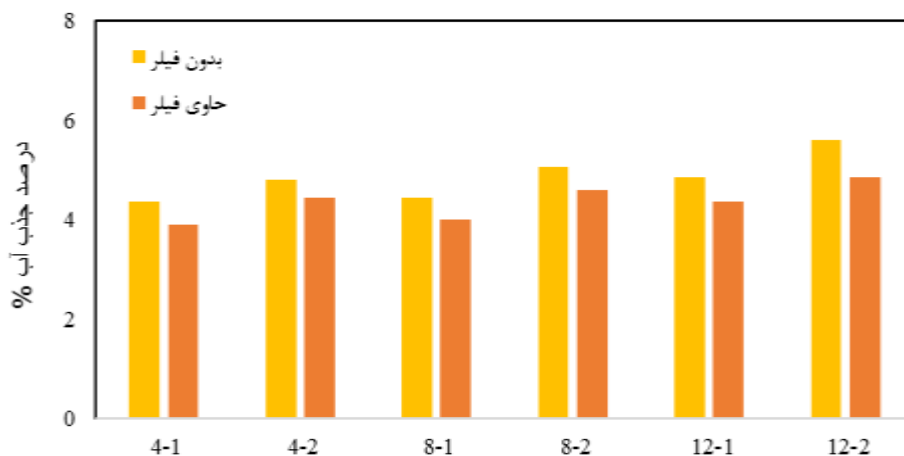
#### ۳-۵- نتایج درصد جذب آب نمونه‌های ژئوپلیمری

در شکل ۹، درصد جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از خاک قرمز توتاخانه بدون فیلر و حاوی فیلر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو سری از

منظور از مقاومت خمشی، همان میانگین مقاومت خمشی ۳ نمونه از هر طرح اختلاط است. مطابق نمودار شکل ۸، مقادیر مقاومت خمشی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده با افزایش غلظت مولی محلول سدیم هیدرواکسید کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ در مقایسه با مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر است. حداقل مقاومت کششی ۳، ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب (۳/۸)، (۴) و (۴/۴۵)

به ازای نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید معادل ۱ در مقایسه با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲، درصد جذب آب نمونه‌ها کمتر است.

نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با افزایش غلظت محلول سدیم هیدرواکسید و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید، درصد جذب آب نیز افزایش یافته است. همچنین

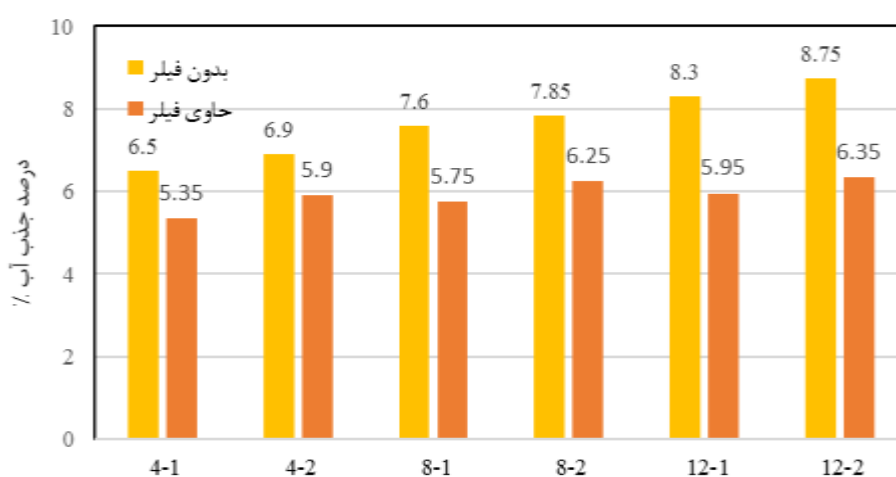


شکل ۹- درصد جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

Figure 9. Percentage of water absorption of geopolymer mortar samples

معادل ۱ در مقایسه با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲، درصد جذب آب نمونه‌ها کمتر است. بیشترین درصد جذب آب نمونه‌های آجر ژئوپلیمری بدون فیلر و حاوی فیلر، مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۲ و کمترین درصد جذب آب مربوط به محلول سدیم هیدرواکسید ۴ مولار با نسبت جرمی آب شیشه به سدیم هیدرواکسید ۱ می‌باشد.

در شکل ۱۰، درصد جذب آب نمونه‌های آجر ژئوپلیمری ساخته شده با استفاده از خاک قرمز توتاخانه بدون فیلر و حاوی فیلر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو سری از نمونه‌های ملات ژئوپلیمری با افزایش غلظت محلول سدیم هیدرواکسید و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید، درصد جذب آب نیز افزایش یافته است. همچنین به ازای نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید



شکل ۱۰- درصد جذب آب نمونه‌های آجر ژئوپلیمری

Figure 10. Percentage of water absorption of geopolymer brick samples

آجرهای ژئوپلیمری برابر با حداکثر بهینه خود، یعنی ۱۹/۵ مگاپاسکال بوده و حداکثر فشارپذیری آجرهای رسی معمولی برابر با ۵/۸ به دست آمده است. نتایج تفصیلی پنج نمونه مورد بررسی در جدول ۷ ارائه شده است. نتیجه نهایی آن است که میزان مقاومت فشاری آجرهای ژئوپلیمری حدود ۳۶۲/۵۵ درصد بیشتر از آجرهای معمولی است.

۳-۶- مقایسه میزان شباهت آجرهای ژئوپلیمری از نظر ویژگی‌های ظاهری (رنگ) و مقاومت مکانیکی و میزان شباهت ملات ژئوپلیمری از نظری چسبندگی (ماندگاری) و ویژگی‌های ظاهری (رنگ) با آجر و ملات معمولی مقایسه میزان مقاومت آجرهای ژئوپلیمری تولید شده از خاک قرمز روستای توتاخانه با نمونه آجرهای معمولی که در ساخت و ساز فعلی روستا موجود است نشان می‌دهد که میزان مقاومت

جدول ۷- مقایسه مقاومت فشاری آجرهای ژئوپلیمری و آجرهای معمولی

Table 7. Comparison of strength of geopolymer bricks and ordinary bricks

| ارقام به دست آمده | آجرهای معمولی                                   | ارقام به دست آمده | آجرهای ژئوپلیمری |
|-------------------|---|-------------------|------------------|
| ۵/۵               | نمونه ۱   | ۱۸/۴              | نمونه ۱          |
| ۵/۳               | نمونه ۲   | ۱۹/۵              | نمونه ۲          |
| ۵/۸               | نمونه ۳   | ۱۹/۱              | نمونه ۳          |
| ۵/۷               | نمونه ۴   | ۱۸/۹              | نمونه ۴          |
| ۵/۶               | نمونه ۵   | ۱۸/۸              | نمونه ۵          |
| ۵/۸۵              | میانگین نهایی                                   | ۱۸/۹۴             | میانگین نهایی    |
| ۳۶۲/۵۵            | نسبت افزایشی مقاومت آجر ژئوپلیمری به آجر معمولی |                   |                  |

معمولی هستند. در حالت عادی میزان ماندگاری ملات‌های عادی در بر روی دیوار در حدود سه سال است ولی میزان ماندگاری ملات‌های ژئوپلیمری در حدود ۳۳ تا ۳۶ سال خواهد بود که هم از نظر هزینه و هم از نظر عدم آسیب به محیط زیست بسیار مناسب هستند.

در ادامه پژوهش، اقدام به بررسی میزان شباهت ملات ژئوپلیمری از نظری چسبندگی (ماندگاری) و ویژگی‌های ظاهری (رنگ) با آجر و ملات معمولی گردیده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان شباهت ظاهری (رنگ) ملات ژئوپلیمری با ملات معمولی در حدود ۸۳ درصد است. همچنین مطابق جدول ۸، بررسی میزان چسبندگی ملات ژئوپلیمری و مقایسه آن با ملات‌های معمولی نشان می‌دهد که چسبندگی ملات‌های ژئوپلیمری به مراتب بیشتر از ملات‌های

جدول ۸- مقایسه چسبندگی ملات ژئوپلیمری با ملات معمولی

Table 8. Comparison of adhesion of geopolymer mortar with ordinary mortar

| ارقام به دست آمده (درصد) | ملات ژئوپلیمری                      |
|--------------------------|-------------------------------------|
| ۸۱/۵                     | نمونه ۱ ژئوپلیمری با نمونه ۱ معمولی |
| ۸۰/۵                     | نمونه ۲ ژئوپلیمری با نمونه ۲ معمولی |
| ۸۲                       | نمونه ۳ ژئوپلیمری با نمونه ۳ معمولی |
| ۸۵/۵                     | نمونه ۴ ژئوپلیمری با نمونه ۴ معمولی |

|    |   |
|----|---|
| ۸۶ | نمونه ۵ ژئوپلیمری با نمونه ۵ معمولی     |
| ۸۳ | درصد میانگین دو ملات ژئوپلیمری و معمولی |

### بحث و نتیجه‌گیری

همانطوری که مطرح شد، معماری گذشته ایران در هر منطقه-ای حاصل تعامل سه جانبه بین معیشت، اقلیم و فرهنگ بوده است. هر کجا این سه عنصر در کنار هم قرار گرفته، نتیجه آن خلق بناهای ماندگاری شده که ریشه در فرهنگ و طبیعت دارد. توجه به این عوامل منجر به این شده که سکونت‌گاه‌های انسانی و مخصوصاً سکونت‌گاه‌های روستایی دارای ارتباط منسجم و ارگانیک با بستر محیطی خود باشند.

یافته‌های پژوهش نشان داد با استفاده از خاک بومی موجود در روستای توتاخانه می‌توان آجر و ملات ژئوپلیمری تولید کرد که از نظر مقاومت چندین برابر مقاوم‌تر از آجر و ملات رسی سنتی هستند. در این خصوص می‌توان گفت که بر طبق نتایج به دست آمده، میزان مقاومت مکانیکی آجرها و ملات ژئوپلیمری با افزایش غلظت مولی محلول سدیم هیدرواکسید کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ در مقایسه با مقاومت کششی نمونه‌های ساخته‌شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر است. همچنین نتایج بررسی‌های در خصوص مقاومت خمشی آجرها و ملات ژئوپلیمری نشان داد که مقاومت خمشی نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته‌شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۱ در مقایسه با مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته‌شده با نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید ۲ بیشتر است. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی در خصوص جذب آب آجر و ملات ژئوپلیمری نشان می‌دهد که با افزایش غلظت محلول سدیم هیدرواکسید و نسبت جرمی آب شیشه به محلول سدیم هیدرواکسید، درصد جذب آب نیز افزایش یافته است. در نهایت، نتایج بررسی‌ها در خصوص میزان شباهت آجرها و ملات ژئوپلیمری تولید شده در محیط آزمایشگاه با آجرها و ملات سنتی به کار رفته در معماری فعلی روستای توتاخانه از نظر تفاوت مقاومت در برابر نیروی وارد

نشان داد که میزان مقاومت‌پذیری آجرهای ژئوپلیمری حدود ۳۶۲/۵۵ درصد بیشتر از آجرهای معمولی است. همچنین میزان شباهت ظاهری (رنگ) ملات ژئوپلیمری با ملات معمولی در حدود ۸۳ درصد است. نتایج یافته‌های این پژوهش با نتایج یافته‌های اکرمی و علی‌پور (۱۳۹۵) در زمینه کاهش هزینه ساخت و کاهش مصرف انرژی، یافته‌های درمحمدی و رحیم نیا (۱۳۹۶) در زمینه مقاومت ساخت (خمشی، کششی و میزان چسبندگی) و نتایج یافته‌های خاک زند و احمدی (۱۳۸۶) در زمینه همگرایی و انسجام میان معماری و طبیعت همخوانی دارد (۲۳-۲۵).

در نهایت بررسی میزان چسبندگی ملات ژئوپلیمری و مقایسه آن با ملات‌های معمولی نشان می‌دهد که ملات‌های ژئوپلیمری در حدود ۱۱ تا ۱۲ برابر بیشتر از ملات‌های معمولی هستند. نتایج تمامی بررسی‌ها نشان می‌دهد که از طریق تولید آجرهای ژئوپلیمری از خاک بومی روستای توتاخانه می‌توان ضمن افزایش میزان مقاومت آجر و ملات، از نظر اقتصادی نیز هزینه تولید را به بیش از نصف کاهش داد. همچنین اهمیت تولید آجرهای ژئوپلیمری از خاک این منطقه ناشی از این است که روستای توتاخانه و روستای صور با فاصله بسیار کمتر از همدیگر، جزو روستاهای نمونه گردشگری هستند و سالیانه تعداد بسیاری گردشگر وارد این روستاها می‌شود. با این وجود مهمترین چالش این دو روستا، تخریب بافت روستا و ساخت مسکن با آجر و بتن است، در حالی که می‌توان به جای استفاده از مصالح شهری در این روستاها، از آجر و ملات بتنی برای ساخت خانه‌های روستایی استفاده کرد که ضمن کاهش هزینه ساخت و ساز، به بافت گردشگرپسند روستا نیز آسیب وارد نشود. برای نیل به این هدف می‌بایستی از طریق بازنگاری در ضوابط ساخت در این دو روستا که توسط بنیاد مسکن مدیریت می‌شود، زمینه برای استفاده از مصالح بومی با ترکیبات ژئوپلیمری فراهم گردد.



## تشکر و قدردانی

مقاله حاضر برگرفته از طرح مطالعاتی با شماره قرارداد ۹۹۰۴ و با عنوان «امکان‌سنجی تولید آجر ژئوپلیمری و ملات با استفاده از خاک قرمز روستای توتاخانه با ماندگاری بالا و ارائه راهکارهای عملی استفاده در معماری بومی» می‌باشد که با حمایت مادی و معنوی دانشگاه بناب صورت گرفته است.

## References

7. Abdullah, M., et al., *Clay-Based Materials in Geopolymer Technology. Cement Based Materials*, 2018: p. 239.
8. Rath, B., et al., *Performance of natural rubber latex on calcined clay-based glass fiber-reinforced geopolymer concrete*. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2020. 21: p. 1051-1066.
9. Mohsen, Q. and N.Y. Mostafa, *Investigating the possibility of utilising low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks*. *Ceramics-Silikaty*, 2010. 54(2): p. 160-168.
10. Ahmad, M. and K. Rashid, *Novel approach to synthesize clay-based geopolymer brick: Optimizing molding pressure and precursors' proportioning*. *Construction and Building Materials*, 2022. 322: p. 126472.
11. Singh, S., M. Aswath, and R. Ranganath, *Performance assessment of bricks and prisms: Red mud based geopolymer composite*. *Journal of Building Engineering*, 2020. 32: p. 101462.
12. Iftikhar, S., et al., *Synthesis and characterization of sustainable geopolymer green clay bricks: An alternative to burnt clay brick*. *Construction and Building Materials*, 2020. 259: p. 119659.
13. Fahmi, A., et al., *Effect of Curing Temperature on the Mechanical Strength of Alkali Activated Laterite Geopolymeric Samples*. *Journal of Engineering Research*, 2021.
14. Darweesh, H., *Geopolymer cements from slag, fly ash and silica fume activated with sodium hydroxide and water glass*. *Interceram-International Ceramic Review*, 2017. 66(6): p. 226-231.
1. Sandanayake, M., et al., *Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction*. *Journal of cleaner production*, 2018. 204: p. 399-408.
2. Das, S., et al., *Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission—A review*. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
3. Sandanayake, M., et al., *Sustainable criterion selection framework for green building materials—An optimisation based study of fly-ash Geopolymer concrete*. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020. 25: p. e00178.
4. Srinivasan, V., et al., *Geopolymer Concrete a Sustainable Building Materials for Rural Housing*. *J. Environ. Nanotechnol*, 2017. 6(2): p. 14-19.
5. Muhammad Faheem, M., et al. *Application of clay-based geopolymer in brick production: A review*. in *Advanced Materials Research*. 2013. Trans Tech Publ.
6. Abbas, R., et al., *Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2020: p. 1-19.

- Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)*. 2019. IEEE.
21. Bajcinovci, B. and F. Jerliu, *Achieving energy efficiency in accordance with bioclimatic architecture principles*. Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 2016. 18: p. 54.
22. Sher, F., et al., *Sustainable energy saving alternatives in small buildings*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019. 32: p. 92-99.
23. Khakzand, M., Ahmadi, A. Interaction of nature & architecture: A glimpse. The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar, 2007. 4, 35-47. (In Persian)
24. Dormohamadi, M., Rahimnia, R, Soil mechanical stabilization and determination of its position in vernacular materials of hot and dry climate. Journal of Architecture in Hot and Dry Climateis, 2017. 5, 29-49. (In Persian)
25. Akrami G, Alipour L. The role of Vernacular Materials in Sustainable Architecture: An Environmental viewpoint. Journal of Housing and Rural Environment, 2017; 35 (156) : 29-48 (In Persian)
15. Zhang, Y., et al., *Environmental impact assessment of pavement road bases with reuse and recycling strategies: A comparative study on geopolymer stabilized macadam and conventional alternatives*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021. 93: p. 102749.
16. Fahmi, A., et al., *Evaluation the Use of Stone Aggregates with Different Aggregates in Compressive Strength of Geopolymer Concrete by Environmental Assessment Approach Compared to Portland Concrete*. Journal of Environmental Science and Technology, 2021.
17. Fahmi, A., et al., *Sustainable and eco-friendly use of clay brick waste as an alumina-silicate base and different fillers for geopolymer brick production*. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022.
18. Mollaei, S., et al., *Laboratory Study of High-Resistance Laterite-Based Geopolymer Bricks*. International Journal of Integrated Engineering, 2022. 14(1): p. 240-250.
19. kumar Nath, U. and R. Sen, *A Comparative Review on Renewable Energy Application, Difficulties and Future Prospect*. 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (52042), 2021: p. 1-5.
20. Ivarez Valera, H.H., et al. *The architecture of kaligreen v2: A middleware aware of hardware opportunities to save energy*. in 2019 Sixth International Conference on