Synthesis, characterization and performance of acidic geopolymer mulch based on industrial waste in sand soils

Zahra Barahooie [a], Somayeh Ghasemi [b1], Somayeh Bakhtiari [c]
[a] *PhD student in Desert Management and Control, Department of Arid and Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran*
[b] *Associate Professor, Department of Arid and Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran*
[c] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Kerman, Iran*

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/08/3 Accepted: 2025/10/14)

Extended abstract

1. Introduction

Wind erosion and dust emission pose significant environmental challenges, particularly in arid and semi-arid regions, affecting over 41 percentage of the Earth's land surface and nearly two billion people, primarily in developing nations (Komaei et al., 2023). Unsustainable agricultural practices, deforestation, and climate change have exacerbated soil degradation, leading to annual dust emissions of up to 3000 million tons, which adversely impact air quality, water resources, and agricultural productivity (de Farias et al., 2020). Traditional soil stabilization methods, such as Portland cement and lime, are energy-intensive and contribute substantially to CO_2 emissions (Shariatmadari et al., 2021). As an eco-friendly alternative, geopolymers—aluminosilicate-based materials activated by alkaline or acidic solutions—have emerged as sustainable binders for soil stabilization (Tchakouté et al., 2017). Acidic geopolymers, particularly those activated by phosphoric acid, exhibit superior mechanical strength and thermal stability due to the formation of Si-Al-P networks (Tchakouté et al., 2017)

Industrial by-products, such as ceramic tile waste (CTW) and iron ore tailings (IOT), are promising precursors for geopolymer synthesis, offering both economic and environmental benefits (Behforouz et al., 2020). CTW, rich in amorphous silica and alumina, and IOT, containing iron oxides and aluminosilicates, are ideal for geopolymer production (Prates et al., 2023). This study investigates the feasibility of using CTW and IOT-based acidic geopolymers for sand dune stabilization, focusing on their compressive strength, microstructure, and ecological impact.

2. Methodology

In this study, phosphoric acid was combined with different ratios of IOT and CTW, and five types of acidic geopolymers were prepared, including CTW_{100}, $CTW_{75}IOT_{25}$, $CTW_{50}IOT_{50}$, $CTW_{25}IOT_{75}$, and IOT_{100}. The compressive strength of sand treated with 10 and 20 percent levels of acidic geopolymers was determined, and finally the polymer with the highest compressive strength was selected for further tests. The surface morphology of the geopolymer selected based on the compressive strength results was obtained by SEM. The chemical composition and mineral phase composition of the geopolymers were also determined using XRF and XRD, respectively. The pH value, electrical conductivity (EC), seed germination, microbial population and wind erosion resistance of the geopolymer-treated sand were also investigated.

3. Results

The results of the compressive strength evaluation for sand treated with 10% and 20% levels of acid-geopolymers synthesized from IOT and CTW showed that in all treatments except CTW_{100}, increasing the geopolymer percentage from 10% to 20% led to a significant increase in compressive strength. At the 20% level, with an increase in the proportion of IOT in the geopolymer composition, the compressive strength

[1] **Corresponding Author:** s.ghasemi@yazd.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

increased significantly. The highest compressive strength values were observed in the $CTW_{25}IOT_{75}$ (2.2 kg/cm²) and IOT_{100} (3.2 kg/cm²) treatments, which were above the minimum standard (2 kg/cm²) set by the Environmental Protection Agency. Accordingly, these two geopolymers were selected for further testing.
X-ray diffraction (XRD) results of the IOT100 geopolymer revealed the formation of antigorite, chlorite, and iron phases. In the $CTW_{25}IOT_{75}$ geopolymer, albite, chlorite, and quartz phases were identified. Scanning electron microscopy (SEM) images confirmed a dense and cohesive structure in both geopolymers, indicating the presence of an aluminosilicate gel and the formation of compact tetrahedral phases with low porosity. These microstructural characteristics are the primary reason for achieving high compressive strength.
The application of both geopolymers resulted in a significant decrease in the pH of the sand compared to the control sample. While the $CTW_{25}IOT_{75}$ geopolymer had no significant effect on EC, IOT_{100} caused a significant increase. However, the values of both parameters remained within the acceptable range of environmental standards. The results of the sorghum seed germination test showed that the application of these geopolymers had no negative effect on the germination percentage. Furthermore, the microbial population of the sand was significantly affected by the geopolymers, with the microbial population increasing by 400% and 275% in the $CTW_{25}IOT_{75}$ and IOT_{100} treatments, respectively, compared to the control. The most significant outcome was the geopolymers' remarkable effect on controlling wind erosion; the wind erosion rate in sand stabilized with either geopolymer was reduced to nearly zero compared to the control sample, which had no resistance.

4. Discussion & Conclusions

The discussion centers on the critical role of acidic activation and precursor composition in developing the cohesive and dense microstructure of geopolymers, which is fundamental to their performance. The formation of a consolidated geopolymer matrix, as observed in SEM micrographs, is attributed to the phosphoric acid-driven reaction that creates aluminosilicate gels, effectively binding sand particles together (Nikolov, 2020). The high reactivity of IOT, characterized by their silica, iron oxide content, and high Si/Al ratio, facilitates the development of dense, compact tetrahedral structures with low porosity through reactions with the acidic activator. This dense structuring is a key factor in achieving excellent mechanical properties and is consistent with the mechanisms described in the literature for acid-based geopolymerization (dos Santos et al., 2019; Lazorenko et al., 2021). The observed microstructural integrity provides a scientific basis for the material's effectiveness, aligning with findings from other studies on acid-activated systems (de Carvalho et al., 2023; Kaze et al., 2021).
The efficacy of the synthesized geopolymers is further discussed in the context of their environmental compatibility and functional performance beyond mere mechanical strength. The significant increase in microbial population in treated sand is theorized to be a direct result of the mulch's ability to retain moisture, thereby creating a more favorable habitat for microorganisms and mitigating moisture stress, which is a critical constraint in arid environments (Długosz et al., 2024; Qu et al., 2023). This highlights a beneficial ecological side effect of the treatment. Furthermore, the near-zero wind erosion rates observed are directly linked to the formation of a resistant and stable surface crust by the geopolymer, which effectively shields the soil from displacement by wind forces (Komaei et al., 2023; Shahnavaz et al., 2017). The absence of a negative impact on seed germination underscores the potential environmental safety of these materials for use in soil stabilization projects, as they do not introduce phytotoxic conditions (Banedjschafie et al., 2021; Abtahi, 2019).

Keywords: Iron waste, Tile and ceramic waste, Compressive strength, Wind erosion resistance.

Cite this article: Barahooie, Z., Ghasemi, S., & Bakhtiari, S. (2026). Synthesis, characterization and performance of acidic geopolymer mulch based on industrial waste in sand soils. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 15 (4):66-87*. http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.66

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.66
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

سنتز، مشخصه‌یابی و عملکرد مالچ ژئوپلیمری اسیدی بر پایه ضایعات صنعتی در خاک‌های شنی

زهرا براهویی: *دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران*

سمیه قاسمی*: *دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران*

سمیه بختیاری: *دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲)

DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.4.66

چکیده

فرسایش خاک و انتشار گرد و غبار در هوا و انتقال ذرات خاک و اثرات مرتبط با آن‌ها، یکی از مشکلات بزرگ زیست محیطی محسوب می‌شوند. راهکارهای مختلفی برای تثبیت خاک و جلوگیری از پدیده گرد و غبار، از جمله تثبیت سطح خاک با استفاده از ژئوپلیمر، مطرح است. ضایعات صنعتی به عنوان پیش‌ساز احتمالی برای تولید ژئوپلیمر برای استفاده سالم‌تر از مواد خام و منابع انرژی، از نظر زیست محیطی و اقتصادی، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. بنابراین در مطالعه حاضر، امکان تولید مالچ ژئوپلیمری با استفاده از محلول اسید فسفریک به عنوان یک فعال کننده اسیدی و ضایعات کاشی و سرامیک (CTW) و باطله معدن آهن (IOT)، به عنوان محصولات جانبی صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. ژئوپلیمر اسیدی با نسبت‌های مختلف CTW و در پنج نوع ژئوپلیمر اسیدی شامل CTW_{100}، $CTW_{75}IOT_{25}$، $CTW_{50}IOT_{50}$، $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} با استفاده از فعال کننده اسید فسفریک سنتز شد. نتایج مقاومت فشاری ماسه تیمار شده با سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد ژئوپلیمرهای اسیدی نشان داد در تمام تیمارها بجز تیمار CTW_{100} افزایش سطح ژئوپلیمر از ۱۰ به ۲۰ درصد باعث افزایش معنی‌دار مقاومت فشاری ماسه شد. همچنین در سطح ۲۰ درصد ژئوپلیمر، با افزایش درصد IOT ، مقاومت فشاری ماسه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در مطالعه حاضر دو ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} که دارای بیشترین مقاومت فشاری بودند برای آزمایش‌های اندازه‌گیری EC و pH خاک، تاثیر برجوانه زنی، جمعیت میکروبی خاک و مقاومت به فرسایش بادی انتخاب شدند. کاربرد ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} در مقایسه با تیمار شاهد باعث کاهش معنی‌دار pH و نرخ فرسایش بادی و افزایش معنی‌دار جمعیت میکروبی ماسه شد و همچنین اثر منفی بر جوانه‌زنی بذرسورگوم نداشتند. بطور کلی نتایج نشان داد از دو ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} می‌توان بعنوان مالچ ژئوپلیمری سازگار با محیط زیست استفاده کرد.

واژگان کلیدی: باطله آهن، ضایعات کاشی و سرامیک، مقاومت فشاری، مقاومت به فرسایش بادی

* نویسندهٔ مسئول: s.ghasemi@yazd.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

۱ـ مقدمه

فرسایش بادی به عنوان یک چالش زیست‌محیطی شایع، عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهد. این مناطق که حدود ۴۱ درصد از سطح خشکی‌های زمین را پوشش می‌دهند، بزرگترین زیست‌بوم‌های خشکی محسوب شده و سکونتگاه بیش از دو میلیارد نفر هستند که از این تعداد، تقریباً ۹۰ درصد در کشورهای در حال توسعه زندگی می‌کنند. (Komaei et al., 2023). علاوه بر زمین‌های خشک، سایر مناطق با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی، مانند معادن روباز و سدهای باطله رها شده نیز، مستعد فرسایش بادی هستند. همچنین، فرسایش بادی نقش مهمی در شکل‌گیری و رشد تپه‌ها، تغییرات ساختاری خطوط ساحلی و فرسودگی بناها دارد (Komaei et al., 2023). علاوه بر این، کشاورزی غیراصولی، تغییر کاربری زمین، جنگل‌زدایی، چرای بی‌رویه، عملیات ساختمانی و تغییرات آب و هوایی در سال‌های اخیر فرسایش بادی را حتی در مناطق غیر خشک جهان تسریع کرده است. انتشار سالانه گرد و غبار جهانی از خاک به جو تا ۳۰۰۰ میلیون تن تخمین زده می‌شود. این پدیده منجر به تغییر اقلیم، بدتر شدن کیفیت هوا و آب و آسیب به مراتع و زمین‌های کشاورزی می‌شود (Komaei et al., 2023; Middleton et al., 2017; Zhao et al., 2022).

تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل فرسایش بادی پیشنهاد شده است. یکی از راهکارهای قدیمی، تثبیت سطح خاک با استفاده از سیمان پرتلند و آهک است. فرآیند تولید این تثبیت کننده‌ها به انرژی زیادی نیاز دارد و همچنین مقدار قابل توجهی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کند که منجر به پیامدهای زیست محیطی قابل توجهی می‌شود (Shariatmadari et al., 2021). بنابراین پیشنهاد روش‌ها و موادی که سازگار با محیط زیست باشند، ضروری است. یک رویکرد نوآورانه برای تثبیت و تصفیه خاک شامل استفاده از مواد فعال شده با قلیا یا ژئوپلیمر است که جایگزینی سازگار با محیط زیست برای روش‌های معمولی ارائه می‌کند (Valente et al., 2022). ژئوپلیمرها مواد معدنی هستند که از طریق فعال‌سازی قلیایی آلومینوسیلیکات‌ها و از طریق واکنش ژئوپلیمریزاسیون تولید می‌شوند. آلومینوسیلیکات‌ها در یک محلول هیدروکسید قلیایی یا سیلیکات بسیار غلیظ، یک ماده بسیار پایدار با ساختارهای پلیمری آمورف یا نیمه‌کریستالی با پیوندهای به‌هم پیوسته Si-O-Al-O-Si به نام ژئوپلیمر تشکیل می‌شوند (de Farias et al., 2020). مطالعات اخیر نشان داده است که محصولات ژئوپلیمری را می‌توان با استفاده از اسید فسفریک به عنوان فعال‌کننده آلومینوسیلیکات‌ها نیز بدست آورد (Tchakouté et al., 2017). ژئوپلیمرهای قلیایی از واحدهای چهار وجهی متقابل AlO4 و SiO4 تشکیل شده‌اند، اما در ریزساختار ژئوپلیمرهای مبتنی بر اسید، SiO4 تا حدی با PO4 جایگزین می‌شود تا یک سیستم اتصال Si-Al-P تشکیل شود که دارای پیوند قوی‌تری است و خواص بهتری از جمله مقاومت فشاری و پایداری حرارتی بالاتر را نشان می‌دهد (de Carvalho et al., 2023). در پژوهشی با مقایسه تأثیر دو فعال کننده اسیدفسفریک و محلول سیلیکات سدیم بر مقاومت فشاری ژئوپلیمر بر پایه متاکائولین نشان دادند که ژئوپلیمر مبتنی بر فسفات مقاومت فشاری بیشتری(۹۳/8مگاپاسکال) نسبت به نمونه سنتز شده در محیط قلیایی (۶۳/۸ مگاپاسکال) دارد (Tchakouté & Ruscher, 2017). در مطالعه‌ای نیز گزارش کردند که ژئوپلیمرهای مبتنی بر اسید فسفریک در مقایسه با ژئوپلیمرهای قلیایی، خواص مکانیکی برتری از خود نشان می‌دهند (Louati et al., 2016).

ژئوپلیمر یک جایگزین مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای مواد سنتی تثبیت خاک است (Komaei et al., 2023). در مقایسه با سیمان، تولید ژئوپلیمر می‌تواند مصرف انرژی را تا حدود ۶۰ درصد و انتشار کربن را ۸۰ تا ۹۰

* نویسندهٔ مسئول: s.ghasemi@yazd.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

درصد کاهش دهد (Polignano et al., 2020). علاوه بر این، استفاده ثانویه از ضایعات جامد صنعتی محقق می‌شود که تأثیر مثبتی بر حفاظت از محیط زیست دارد (Provis, 2018). به این ترتیب، ژئوپلیمرها به‌عنوان یک جایگزین ایده‌آل برای سیمان در نظر گرفته می‌شوند و شاهد استفاده روزافزون در شیوه‌های مختلف ساخت و ساز مهندسی بوده‌اند. استفاده از سیمان فعال شده قلیایی بر پایه خاک رس، می‌تواند برای کنترل گرد و غبار و تثبیت خاک‌های لسی مؤثر باشد (Hanegbi et al., 2020). سیمان فعال شده قلیایی بر پایه خاکستر آتشفشانی می‌تواند فرسایش خاک را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Shariatmadari et al, 2021). با ارزیابی امکان استفاده از سیمان فعال شده قلیایی مبتنی بر متاکائولین برای کنترل گرد و غبار و تثبیت خاک در خاک لومی مناطق نیمه‌خشک، نشان داد که این نوع مواد فعال شده قلیایی، یک رویکرد موثر برای کاهش فرسایش بادی است (Katra, 2022). علاوه بر این، استفاده از سیلیکات سدیم به عنوان تثبیت کننده خاک از طریق فعال‌سازی قلیایی گزارش شده است (Koohestani et al., 2021). نتایج امیدوار کننده این تحقیق نشان می‌دهد که این رویکرد جایگزین می‌تواند به‌طور مؤثر ذرات خاک را متصل کرده و فرسایش بادی را کنترل کند.

با توجه به افزایش تولید محصولات جانبی صنعتی در سال‌های اخیر، علاقه زیادی به استفاده از این ضایعات به عنوان مواد پایه ژئوپلیمری در پروژه‌های ژئوتکنیکی وجود داشته است. این رویکرد دوستدار محیط زیست، توجه قابل توجهی را در زمینه توسعه پایدار، به خود جلب کرده است و کانون مطالعات متعدد اخیر بوده است (Behforouz et al., 2020) ضایعات کاشی و سرامیک (CTW)[1] یک محصول جانبی صنعت کاشی و سرامیک است که در طی صیقل دادن کاشی‌های سرامیکی تولید می‌شود (El-Dieb, 2018). این ضایعات قابل بازیافت در چرخه تولید نبوده و در محل‌های دفن زباله دفع می‌شوند و می‌توانند باعث آلودگی خاک، هوا و آب‌های زیرزمینی شوند. تخمین زده می‌شود که ۳۵ درصد از تولید روزانه سرامیک جهان هدر می‌رود. بنابراین، با توجه به نرخ بالای تولید به دلیل افزایش مصرف و ضایعات قابل توجه این مواد، تمرکز بر استفاده مجدد از آنها ضروری به نظر می‌رسد (Behforouz et al., 2020). CTW به دلیل منابع غنی از سیلیس آمورف و آلومینیوم می‌تواند به عنوان پایه ژئوپلیمر استفاده شود (Kasehchi et al., 2024). باطله‌های معادن سنگ آهن (IOT) نیز، از جمله مهم‌ترین پسماندهای صنعت معدن‌کاری به‌شمار می‌آیند که طی عملیات استخراج و به‌خصوص فرآوری سنگ‌آهن تولید می‌گردند. به ازای هر یک تن سنگ آهن فرآوری شده، حدود ۰/۴ تن باطله تولید می‌شود (Prates et al., 2023). با توجه به حجم زیاد باطله‌های معدنی و اثرات زیست محیطی مربوط به ذخیره‌سازی آنها، مطالعات متعددی با هدف استفاده مجدد از این پسماندها انجام شده است (Prates et al., 2023). IOT ذرات ریزی هستند که حاوی سیلیس، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و سایر مواد معدنی به مقدار جزئی هستند. این ویژگی‌ها، آن را به یک ماده خام عالی برای تولید ژئوپلیمرها تبدیل می‌کند. بنابراین به منظور کاهش فشارهای محیطی و دستیابی به پایداری، یک راه حل ممکن استفاده مجدد از IOT[2] به عنوان مواد پیش‌ساز در تولید ژئوپلیمر است. ژئوپلیمرهای بر پایه IOT که با فعال کننده اسید فسفریک سنتز شدند دارای چگالی و مقاومت فشاری بالایی هستند و می‌توانند در آجرها، پانل‌های پیش‌ساخته و در ساخت پیاده‌روها استفاده شوند (de Carvalho et al., 2023). ژئوپلیمرهای تولید شده با استفاده از IOT

[1] Ceramic Tile Wast
[2] Iron Ore Tailings

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

به عنوان پرکننده و محلول سیلیکات سدیم تولید شده از IOT به عنوان فعال کننده قلیایی دارای خواص فیزیکوشیمیایی عالی، مقاومت فشاری بسیار خوب، (۴۱ تا ۵۸ مگاپاسکال) و کاربردهای بالقوه بسیار متغیر می‌باشند (Prates et al., 2023).

با توجه به بررسی منابع، تحقیقات کمی در مورد تثبیت خاک با استفاده از ژئوپلیمراسیدی بر پایه CTW و IOT انجام شده است و اغلب این مطالعات بر روی مواد پوزولانی طبیعی به عنوان پایه ژئوپلیمری و بهبود خاک‌های رسی متمرکز شده است. در حالی‌که در بسیاری از مناطق امکان دسترسی آسان به مواد پوزولانی استخراج شده از زمین وجود ندارند و استفاده از آنها، منابع طبیعی کره‌زمین را از بین می‌برد. در طی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به عنوان یک روش شیمیایی تثبیت خاک، محصولات جانبی صنعتی که برای محیط زیست مضر هستند، به مواد سازگار با محیط زیست تبدیل می‌شوند. بدین‌ترتیب با توجه به مشکلات و خسارتهای فراوانی که به‌طور مداوم در اثر فرسایش خاک در کشور انجام می‌شود، در این مطالعه به بررسی امکان تثبیت ماسه با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه CTW و IOT و همچنین محلول اسید فسفریک به عنوان یک فعال کننده اسیدی پرداخته شده است. در واقع، این پژوهش با هدف اینکه آیا می‌توان با به‌کارگیری ضایعات صنعتی، مالچ ژئوپلیمری اسیدی سازگار با محیط زیست تولید کرد که نه تنها در تثبیت خاک شنی مؤثر باشد بلکه تأثیر منفی بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک و جوانه‌زنی گیاه نداشته باشد و در عین حال به‌طور چشمگیری نرخ فرسایش بادی را کاهش دهد، انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه شامل بخشی از عرصه‌های بیابانی دشت قلعه‌گنج واقع در جنوبی‌ترین بخش استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۲۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۲۷درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی و ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۴۹ دقیقه طول جغرافیایی بود. این منطقه از کانونهای بحرانی فرسایش بادی کرمان است و با وسعت۴۹۰ کیلومترمربع در فاصله حدودا ۴۵ کیلومتری شهرستان قلعه گنج واقع شده است. میانگین ارتفاع شهر قلعه‌گنج از سطح دریا ۴۵۰ متر است. این منطقه دارای آب و هوای نیمه‌مرطوب و اقلیم بیابانی می‌باشد و حداکثر دما در تابستان ۵۲ درجه سانتی‌گراد و حداقل دما در زمستان ۲ درجه سانتی‌گراد است.

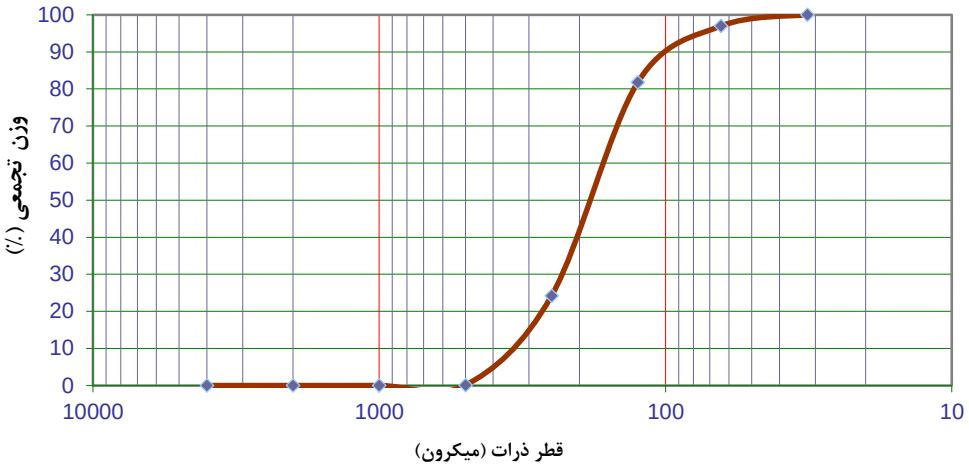
۲-۲- مواد

۱-۲-۲- خاک

در این پژوهش، از خاک شنی بسیار فرسایش‌پذیر برای اهداف تثبیت استفاده شد. نمونه‌های مرکب خاک بصورت تصادفی از عمق ۳۰ سانتی‌متری دشت قلعه‌گنج تهیه شد. شکل (۱) منحنی توزیع اندازه ذرات شن مورد آزمایش را نشان می‌دهد که بر اساس ASTM D422-63 (2007) تعیین شده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک (USCS 1396)، خاک مورد مطالعه در گروه شن با دانه‌بندی ضعیف (SP) قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی نمونه خاک نیز از طریق آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) شناسایی شد و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات خاک مورد آزمایش (درصد عبوری، اندازه ذرات)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ماسه، ضایعات کاشی و سرامیک و باطله آهن

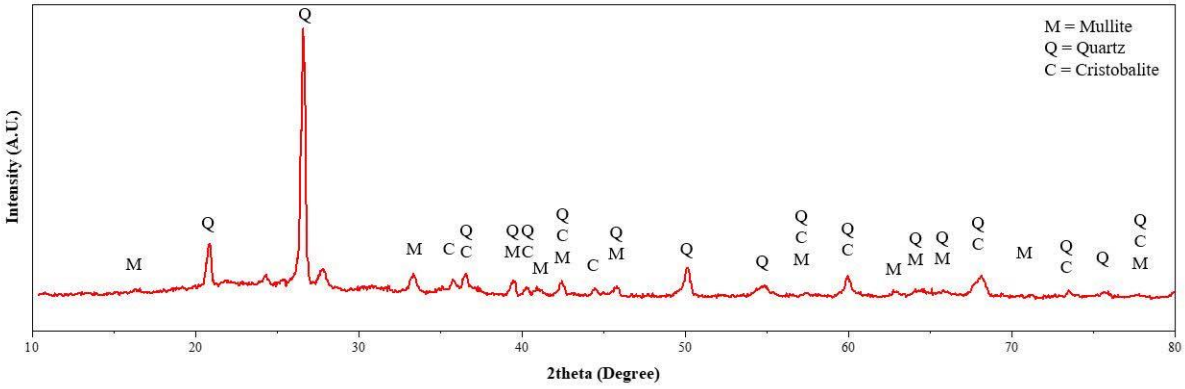
ترکیب شیمیایی (٪)	خاک	ضایعات کاشی و سرامیک	باطله آهن
Al_2O_3	۶/۷۵۹	۱۵/۹۶۴	۸/۳۳
SiO_2	۳۶/۶۳۲	۶۵/۵۴۵	۳۲/۳۸
Fe_2O_3	۵/۹۹۵	۸/۴۸	۲۴/۰۲
CaO	۲۱/۲۸۶	۲/۳۹۱	۶/۰۵
MgO	۳/۱۵۶	۱/۴۳۲	۱۴/۵۳
Na_2O	۱/۷۴۵	۲/۲۲۷	۱/۲۸
SO_3			۵/۱۰
K_2O	۱/۳۳۲	۱/۸۵۲	۱/۲۴
TiO_2	۰/۵۲۹	۱/۰۸۸	۰/۵۵
P_2O_3	۰/۱۰۲	۰/۱۰۵	۰/۳۶
MnO	۰/۱۰۱	۰/۰۴۹	۰/۰۶
BaO			<
Cr_2O_3			<
LOI	۲۰/۴۸	۰/۶۴	۶/۱۰

۲-۲-۲- ضایعات کاشی و سرامیک

ضایعات کاشی و سرامیک مورد استفاده در این تحقیق از شرکت کاشی فخار در اردکان تهیه شد. این ضایعات پس از آسیاب، از الک مش ۳۲۵ عبور داده شد و ذرات با اندازه کوچکتر از ۰/۰۴۵ میلی‌متر به عنوان ماده پایه ژئوپلیمری انتخاب شدند. ماده اصلی کاشی و سرامیک، خاک رس می‌باشد. با توجه به نتایج دستگاه XRD مدل PHILIPS PW1730 باطله کاشی و سرامیک پیک غالب در زاویه حدود ۲۶ درجه مربوط به فاز کوارتز مشاهده شد، پیک‌های کوچک در

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

زوایای دیگر مربوط به فازهای مولایت و کریستوبالایت هستند. عدم وجود پیک‌های پهن و عریض نشان می‌دهد این نمونه بیشتر دارای فاز بلوری می‌باشد (van Riessen et al., 2025). نتایج تجزیه و تحلیل XRF مدل PHILIPS PW1410 (جدول ۱) نیز نشان می‌دهد که ضایعات کاشی و سرامیک با درصد SiO_2 =۶۵/۵۴ و درصد Al_2O_3 = ۱۵/۹۶ منبع غنی از سیلیسیوم و آلومینیوم بوده و برای ساخت ژل‌های آلومینوسیلیکات بسیار مناسب می‌باشند. در دیگر مطالعات نیز درصد های SiO_2 =۶۱/۲۲، درصد Al_2O_3 = ۱۰/۳۳ (Mahmoodi et al., 2021) و درصد SiO2 =۵۷/۵۵، درصد ۱۱/۵۴ = Al2O3 در تائید همین موضوع گزارش شده است (Bhavsar et al., 2022).



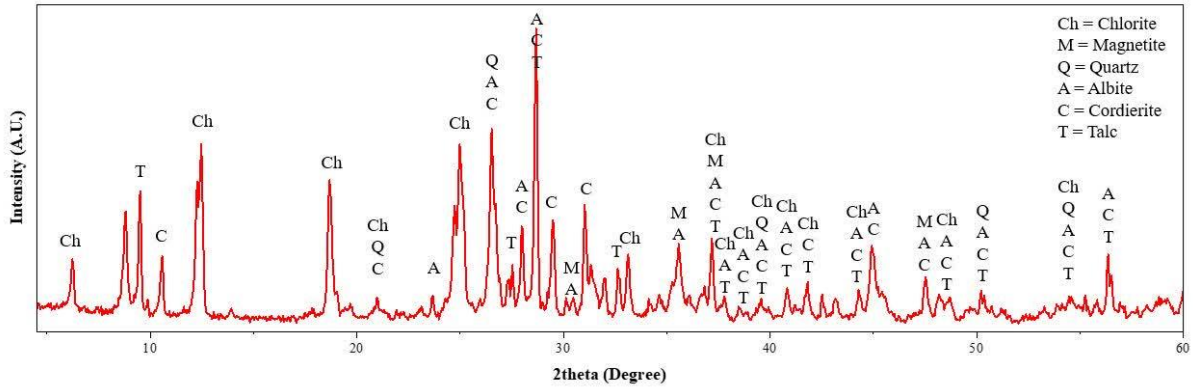
شکل۲- الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) باطله کاشی و سرامیک

۳-۲-۲- باطله آهن

باطله آهن مورد استفاده در این مطالعه از معدن آهن گل گهر واقع در شهر سیرجان جمع‌آوری شد. باطله آهن ابتدا در آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید، سپس به مدت ۳۰ دقیقه در آسیاب گلوله‌ای پودر شده و در نهایت مواد به‌دست‌آمده از الک ۳۲۵ مش (۴۵ میکرومتر) عبور داده شدند. باطله آهن مورد مطالعه با داشتن درصد SiO_2 = ۳۲/۳۸، درصد Al_2O_3 = ۸/۳۳ و Fe_2O_3 = ۲۴/۰۲ بستر مناسبی جهت سنتز ژئوپلیمر می‌باشد. تحقیقاتی با ترکیب شیمیایی متفاوت باطله آهن از جمله درصد SiO_2 = ۳۴-۴۰، درصد Al_2O_3 = ۷ -۱۱، درصد Fe_2O_3 ۰,۳ -۱۳ (Bohlouli et al., 2023)، درصد SiO_2 = ۲۰/۱۱، درصد Al2O3 = ۱۷/۳۵ و درصد Fe_2O_3 = ۴۹/۳۴ (Kaze et al, 2021)، درصد SiO_2 = ۵۷/۱، درصد Al_2O_3 = ۱۶/۷ و درصد Fe_2O_3 = ۲۴/۱ (de Carvalho et al., 2023) نتایج مشابهی را در تائید باطله آهن بعنوان بستر مناسب جهت سنتز ژئوپلیمر ارائه دادند. ترکیبات شیمیایی باطله آهن توسط ذوب قلیایی Icp Agilent 735 و ترکیب فاز معدنی با دستگاه XRD مدل Kw1800 تعیین شد. با توجه به نتایج XRD باطله آهن فازهای کلریت، مگنتیت،کوارتز، آلبیت، کوردینایت و تالک مشاهده شد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]



شکل۳- الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) باطله آهن

۳-۲- سنتز ژئوپلیمر اسیدی

در این تحقیق از اسید فسفریک تجاری (Merk) با غلظت ۱۰ مولار به عنوان محلول فعال کننده اسیدی استفاده شد (Tchakouté et al., 2017). اسید فسفریک با نسبت‌های مختلف باطله آهن و ضایعات کارخانه کاشی و سرامیک با درنظر گرفتن نسبت بهینه ۰/۸ مایع به جامد ترکیب شده و در نهایت منجر به سنتز پنج نوع ژئوپلیمر اسیدی شد. ضایعات صنعتی بر اساس جدول ۲ با درصدهای مختلف ترکیب شده و پس از فعالسازی با محلول اسیدی، به مدت ۵ دقیقه به مخلوط همگن تبدیل شدند. ژئوپلیمرهای اسیدی سنتز شده، پس از خشک شدن در دمای محیط، آسیاب و از الک ۲۰۰ (۷۵ µm) عبور داده شدند.

جدول ۲- درصد ضایعات صنعتی در ترکیب ژئوپلیمرهای اسیدی

ژئوپلیمر	درصد باطله کاشی و سرامیک (CTW)	درصد باطله آهن(IOT)
CTW_{100}	۱۰۰	۰
$CTW_{75}IOT_{25}$	۷۵	۲۵
$CTW_{50}IOT_{50}$	۵۰	۵۰
$CTW_{25}IOT_{75}$	۲۵	۷۵
IOT_{100}	۰	۱۰۰

۴-۲- مقاومت فشاری

سینی‌های فلزی با ابعاد ۰/۰۲×۰/۲۵×۰/۲۵ متر با شن پر شد و سطح آنها کاملا صاف گردید. سپس، ۳۰۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون ژئوپلیمر با دو غلظت ۱۰ و ۲۰ درصد (وزنی/حجمی) به‌طور یکنواخت با پنج تکرار بر روی نمونه‌ها پاشیده شد. نمونه‌ها در دمای محیط قرار داده شدند تا به صورت طبیعی خشک شوند. مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از تست نفوذسنج اندازه گیری شد. یک سوزن فولادی با نوک صاف به قطر ۰/۶ میلی‌متر به صورت عمود بر نمونه، وارد شد و نیروی محوری اعمال شده بر روی سوزن ثبت گردید. هر نمونه تحت پنج تست نفوذ قرار گرفت و میانگین مقدار

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

مقاومت فشاری بدست آمده به عنوان خروجی نهایی گزارش شد. در نهایت پلیمری که دارای بیشترین مقاومت فشاری بود، برای آزمایشات بعدی انتخاب گردید.

۵-۲- روش‌های مشخصه‌یابی ژئوپلیمر

مورفولوژی سطح ژئوپلیمر انتخاب شده بر اساس نتایج مقاومت فشاری، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM با استفاده از آشکارسازهای الکترونی ثانویه به دست آمد. ترکیب شیمیایی و ترکیب فاز معدنی ژئوپلیمرها نیز به ترتیب با استفاده از XRF (جدول ۱) و XRD تعیین شد.

۶-۲- pH و هدایت الکتریکی (EC) خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر

مقدار pH و هدایت الکتریکی (EC) خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر مورد آزمایش، با استفاده از pH متر و EC متر بر اساس روش استاندارد ASTM D4972 اندازه‌گیری شد (ASTM D4972-19 2019). ابتدا نمونه‌ها به‌طور کامل خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس نمونه‌ها با نسبت ۱ به ۱۰ با آب مقطر مخلوط کرده و به مدت یک ساعت در آزمایشگاه قرار گرفتند تا محلول رسوب کند. در نهایت مقادیر pH و EC به ترتیب بر روی صفحه pH متر و EC-متر دیجیتال قرائت شد.

۷-۲- تأثیر ژئوپلیمر بر جوانه‌زنی بذر

در این تحقیق فرض بر این بود که استفاده از مالچ ژئوپلیمری در پروژه‌های تثبیت بیولوژیکی اثر نامطلوبی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه ندارد. بنابراین، به منظور بررسی تأثیر ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} بر جوانه‌زنی سورگوم (به عنوان گیاه مدل)، آزمایش گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد در سال ۱۴۰۳ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سوسپانسیون ۲۰ درصد ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} و تیمار شاهد با چهار تکرار بودند. مقدار ۱۰۰۰ گرم شن در گلدان‌های به قطر ۱۰سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر قرار گرفت و در هر گلدان ۱۰ عدد بذرسورگوم رقم speed feed کاشته شد. بذرهای کاشته شده با تقریباً یک سانتی‌متر خاک پوشانده شد و سپس سوسپانسیون ۲۰ درصد ژئوپلیمرها بر روی سطح خاک اسپری شد. برای تیمار شاهد نیز از آب مقطر استفاده شد. گلدان‌ها در گلخانه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد قرار گرفتند. تعداد بذرهای جوانه زده به صورت روزانه به مدت ۱۰ روز ثبت شد. برای محاسبه درصد جوانه زنی، تعداد کل بذرهای جوانه‌زده بر تعداد بذرهای کاشته شده تقسیم شد.

۸-۲- تأثیر ژئوپلیمر بر جمعیت میکروبی ماسه

قبل از شمارش جمعیت میکروبی، به منظور آماده‌سازی خاک، مقدار ۵۰ گرم از شن‌های تیمار شده با ژئوپلیمر به‌طور جداگانه در لیوان‌های پلاستیکی ریخته شد. سپس رطوبت خاک به ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده شد و به مدت ۷ روز در دمای ۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد انکوباسیون گردید. بدین ترتیب بعضی از گونه‌های میکروبی که ممکن است بر اثر

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

تنش خشکی غیرفعال شده باشند، فعال می‌شوند. پس از آن، یک گرم شن تیمار نشده یا یک گرم شن تثبیت شده با ژئوپلیمر به‌طور جداگانه به ارلن مایر ۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل (10^{-1})، منتقل و در شیکر با ۱۲۰ دور در دقیقه در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شد. سپس سری‌های رقت ۱۰ برابری (از 10^{-2} تا 10^{-6}) تهیه و ۰/۱ میلی‌لیتر از سوسپانسیون در شرایط استریل (درون هود استریل لامینار) بر روی ظروف پتری حاوی محیط کشت نوترینت آگار پخش گردید. تمام پلیت‌ها در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز گرماگذاری شدند. سپس تعداد کلنی‌ها در ظروف پتری مربوط به رقتی از شن که تعداد کلنی‌های آن بیش از ۲۰ و کم‌تر از ۳۰۰ عدد بود در ظرف مدت یک هفته شمارش و بر این اساس جمعیت میکروبی هر نمونه بر حسب $CFU\ g^{-1}$ تعیین شد.

۹-۲- مقاومت به فرسایش بادی

در این مطالعه برای ارزیابی کارایی ژئوپلیمر اسیدی مورد مطالعه در کنترل فرسایش بادی از دستگاه تونل باد واقع در آزمایشگاه مرجع فرسایش بادی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد استفاده شد (شکل۴).

شکل۴ – دستگاه تونل بادی

تونل باد مورد استفاده دارای مشخصاتی به طول ۲/۶۵ متر (فاصله از موتور دمنده تا ابتدای هرم ناقص خروجی)، طول مؤثر ۲ متر، عرض داخلی ۰/۳ متر و ارتفاع بازشدگی ۰/۴ متر می‌باشد. این تونل باد دارای پتانسیل تولید باد با ماکزیمم سرعت ۲۰ متر برثانیه است که با استفاده از یک دستگاه (مدل Gmbh Lambrecht) در امتداد محور عمودی ۲ بادسنج مرکزی تونل در موقعیت ارتفاعی۲۰ سانتی‌متر در بالای سینی‌های خاک، اندازه گرفته شده است. همچنین سرعت باد با استفاده از یک کلید (پیچ) کنترل‌کننده TECO تنظیم می‌شود. سینی‌های فلزی با ابعاد ۰/۰۲×۰/۳×۱ متر با شن پر شد و سطح آنها کاملا صاف گردید. سپس، ۳۰۰ میلی‌لیتر آب یا سوسپانسیون ژئوپلیمر با غلظت ۲۰ درصد به‌طور یکنواخت بر روی نمونه‌ها پاشیده شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای محیط آزمایشگاه، توزین شده و در داخل تونل باد به مدت ۱۵ دقیقه در برابر جریان باد با سرعت ۱۴ متر بر ثانیه قرار گرفتند. برای ارزیابی فرسایش‌پذیری نمونه‌ها، جرم قبل و بعد از آزمون با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه گیری شد. نرخ فرسایش (ER) نمونه‌ها بر اساس جرم شن فرسایش یافته از سطح نمونه‌ها در مدت ۱۵ دقیقه تعیین گردید.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آزمایش بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها در قالب طرح کاملا تصادفی به صورت فاکتوریل با دو فاکتور شامل نوع ژئوپلیمر در پنج سطح و غلظت ژئوپلیمر در دو سطح با سه تکرار اجرا شد. آزمایشات مربوط به بررسی تأثیر ژئوپلیمر IOT_{100} و $CTW_{75}IOT_{25}$ بر برخی ویژگی‌های ماسه نیز در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. داده‌های آزمایش با استفاده از نرم افزار SPSS Statistics 22 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای مقایسه میانگین تیمارها نیز از آزمون دانکن استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

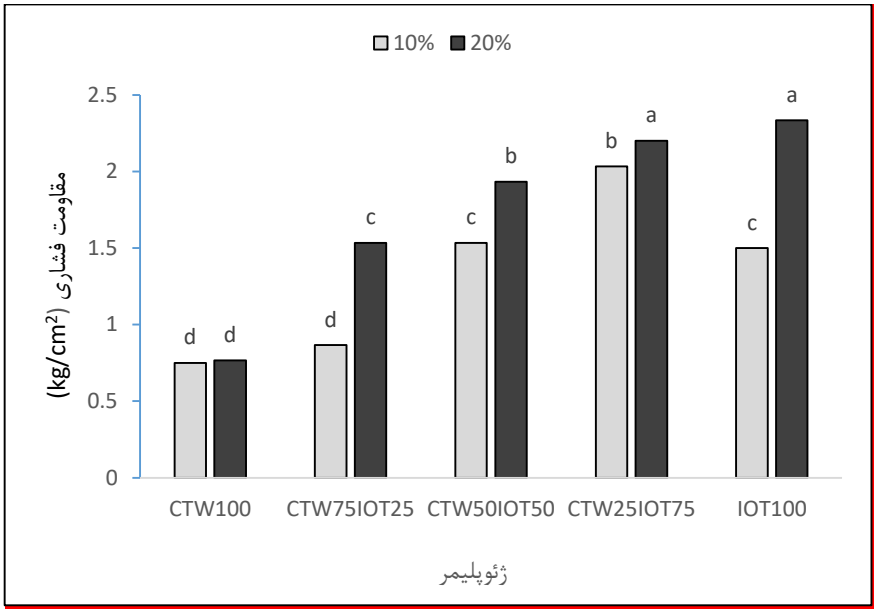
۴-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ماسه تیمار شده با سطوح ۱۰ و ۲۰ درصد ژئوپلیمرهای اسیدی سنتز شده با درصدهای مختلف باطله آهن و ضایعات کاشی و سرامیک نشان داد که در تمام تیمارها بجز تیمار CTW_{100} افزایش سطح ژئوپلیمر از ۱۰ به ۲۰ درصد باعث افزایش معنی‌دار مقاومت فشاری ماسه شد (شکل ۳). همچنین در سطح ۲۰ درصد ژئوپلیمر، با افزایش درصد باطله آهن، مقاومت فشاری ماسه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بر اساس دستورالعمل فنی ارزیابی کارایی تثبیت کننده‌های خاک (Planning and Budget Organization of Iran, 2019)، حداقل مقاومت فشاری مالچ مورد استفاده برای تثبیت خاک ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است (Sharma, 2020). در مطالعه حاضر بیشترین مقاومت فشاری در ماسه تیمار شده با ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ (۲/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع) و IOT_{100} (۲/۳ کیلوگرم بر سانتی-مترمربع) مشاهده شد. بنابراین، این دو ژئوپلیمر برای آزمایشات بعدی انتخاب شدند. در مطالعه‌ای مشابه با مطالعه حاضر، با سنتز ژئوپلیمر اسیدی بر پایه باطله‌های سنگ آهن برزیل نشان دادند که برهمکنش اسید فسفریک با باطله آهن موجب تشکیل فازهای کریستالی حاوی PO_4 و در نهایت باعث افزایش مقاومت ژئوپلیمرها می‌شود. واکنش پلیمریزاسیون ژئوپلیمرهای اسیدی از طریق پیوند بین Al-O فعال در ماده پیش‌ساز، مانند متاکائولن و واحدهای چهاروجهی PO_4 موجود در محلول اسیدی، مانند اسید فسفریک، رخ می‌دهد. در این حالت، بارهای مثبت چهاروجهی PO_4، توسط بارهای منفی چهاروجهی AlO_4 متعادل می‌شوند (de Carvalho et al., 2023). در مطالعه‌ای پژوهشگران نیز با سنتز ژئوپلیمر بر پایه خاک رسی لاتریت و لاتریت غنی از آهن با استفاده از دو فعال کننده سیلیکات سدیم و اسید فسفریک نشان دادند در هر دو ژئوپلیمر معدنی، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. افزایش مقاومت فشاری در ژئوپلیمر اسیدی مربوط به ساختار متراکم و با تخلخل کم و همچنین تشکیل فازهای فسفات آهن و آلومینیوم آمورف، می‌باشد (Kaze et al., 2021). همچنین، در تحقیقی دیگر با بررسی تأثیر افزودن نانوسیلیس و ژئوپلیمر بر پایه پوزولان حاصل از سرباره کوره آهن‌گدازی بر تثبیت خاک ماسه‌ای نشان دادند که افزایش نسبت نانو سیلس به خاک تا حدود یک درصد و همچنین نسبت سرباره آهن به خاک، به علت ایجاد خاصیت پوزولانی و چسبندگی سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری می‌شود (Bohlouli et al., 2023). در مطالعه‌ای دیگر، دریافتند که تثبیت خاک‌های انبساط‌پذیر با استفاده از

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

ژئوپلیمر بر پایه سرباره آهن در مقایسه با روش‌های سنتی تثبیت، مانند سیمان و آهک، مقاومت و دوام بیشتری را حاصل می‌کند (Sahoo et al., 2022).



شکل ۵- تأثیر سطوح مختلف ژئوپلیمرهای سنتز شده با درصدهای مختلف ضایعات کاشی و سرامیک (CTW) و باطله معدن آهن (IOT) بر مقاومت فشاری ماسه

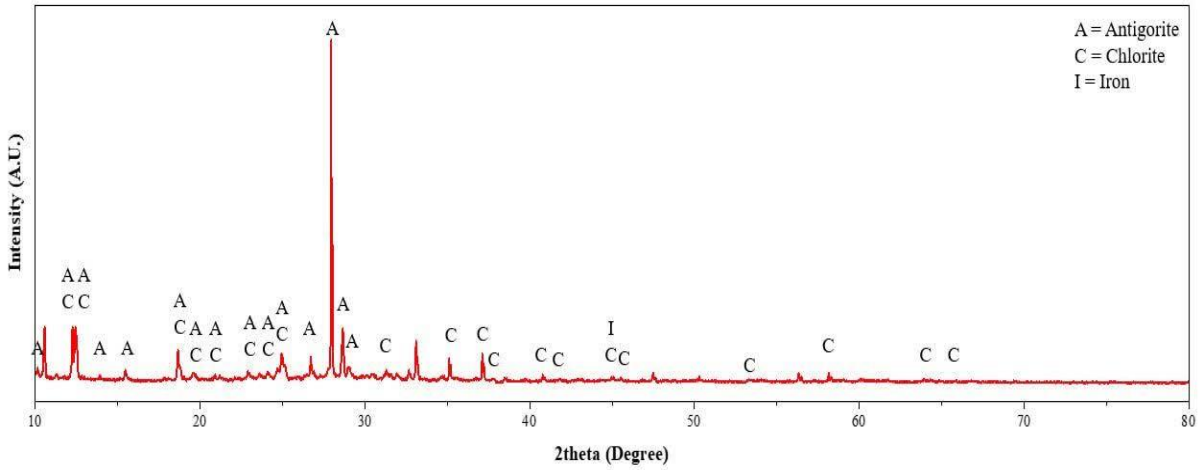
۲-۴- ویژگی‌های ریز ساختاری و ترکیب شیمیایی ژئوپلیمر IOT_{100} و $CTW_{25}IOT_{75}$

۱-۲-۴- پراش سنجی اشعه ایکس (XRD)

نتایج XRD در بازه θ ۲ بین ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شده است. در نتایج XRD ژئوپلیمر IOT_{100} فازهای اصلی شامل آنتی گوریت ،کلریت و آهن مشاهده شد. با توجه به نتایج XRD باطله آهن دارای۵ فاز کلریت، مگنتیت، کوارتز، آلبیت وتالک می‌باشد، بنابراین پس از ترکیب باطله آهن با اسید فسفریک بعنوان فعال‌کننده‌ی اسیدی، تنها در فاز کلریت تغییر ایجاد نشد و چهار فاز دیگر از بین رفتند در نهایت فاز جدید آنتی‌گوریت در ژئوپلیمر اسیدی ۱۰۰ باطله آهن بوجود آمد. هایلی و همکاران (۲۰۲۳) عنوان کردند وجود فازهای کریستالی آلومینوسیلیکاته مانند کلسیلیت (Kalsilite)،کابازیت (Chabazite) و کوارتز (Quartz) را در ساختارهای ژئوپلیمری ملات معمول است (Haily et al., 2023).

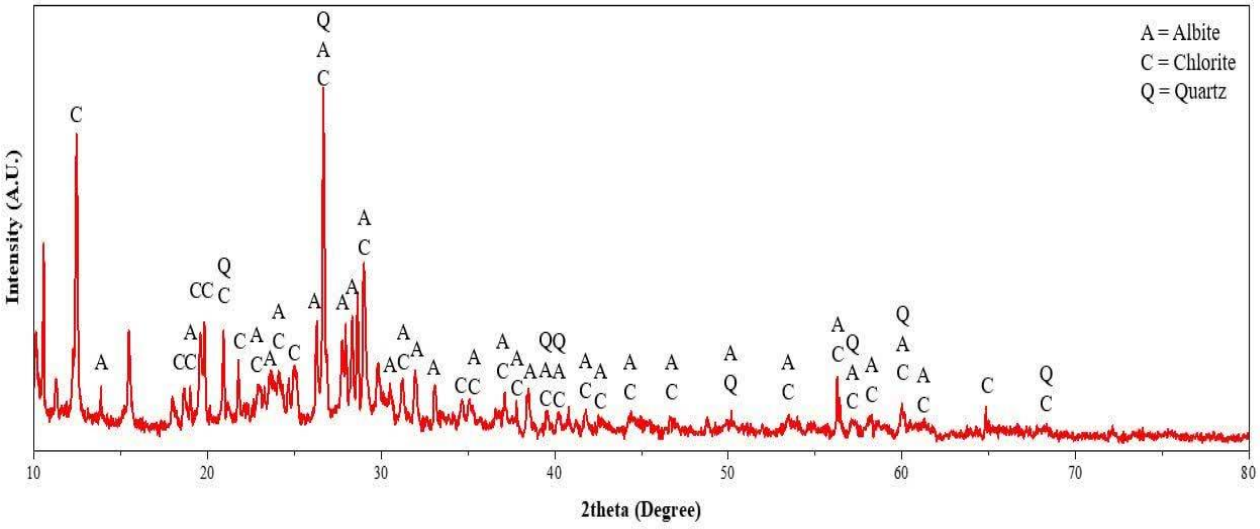
زنگ و همکاران (۲۰۲۴) وجود کوارتز در نمونه‌های ژئوپلیمری را بعد از فعال سازی با اسید فسفریک را گزارش کردند و دلیل این امر را پایدار بودن کوارتز در طول فرآیند ژئوپلیمریزاسیون ذکر نمودند (Zeng et al., 2024). در مطالعه دیهاجی و همکاران (۲۰۲۵) نیز وجود ساختارهای کریستالی کوارتز و مسکویت بعد از ژئوپلیمریزاسیون نشان داده شد. آنها بیان کردند این ترکیبات به عنوان پرکننده عمل می‌کنند و در ساختار ژئوپلیمر بدون شرکت در پیوند شیمیایی و شبکه ژئوپلیمری جاسازی شده‌اند (Dihaji et al., 2025).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]



شکل ۶- الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) ژئوپلیمر IOT_{100}

در سنتز ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$ علاوه بر ۷۵درصد باطله آهن از ۲۵درصد باطله کاشی هم استفاده شد با توجه به اینکه در نمودار XRD باطله کاشی ۳ فاز کوارتز، مولایت و کریستوبالیت مشاهده گردید فازهای متفاوتی در مقایسه با (IOT_{100}) شامل آلبیت، کلریت و کوارتز تشکیل شد. در این سنتز فازهای باطله آهن و همچنین فازهای باطله کاشی شامل مولایت و کریستو بالیت از بین رفتند که احتمالا نشان از مشارکت آنها در فرایند ژئوپلیمراسیون می‌باشد.



شکل ۷- الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$

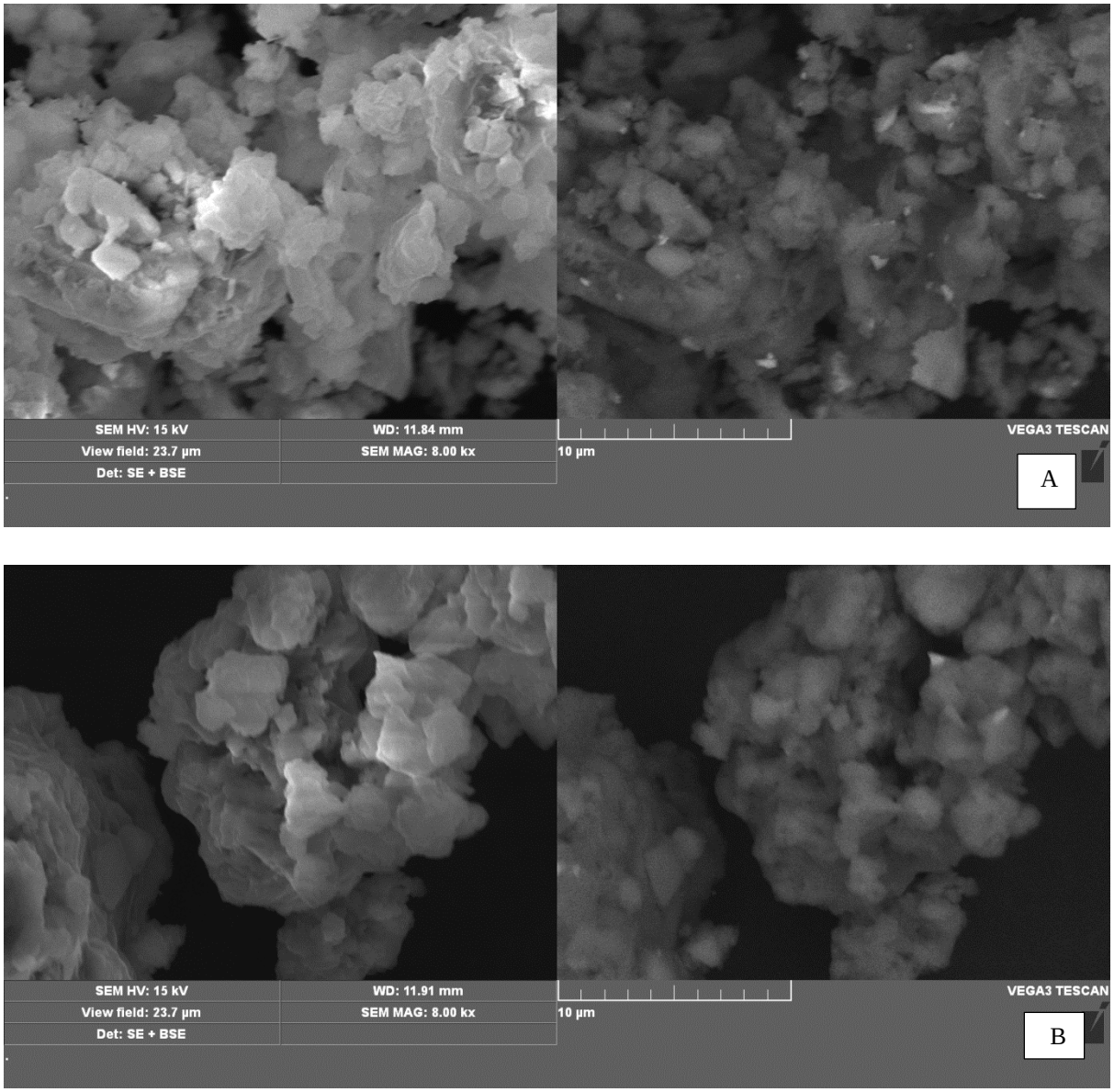
۲-۲-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی ۱۰ میکرومتر مربوط به دو نمونه ژئوپلیمر اسیدی انتخابی در شکل ۷ نشان داده شده است. درهردو ژئوپلیمر مشاهده می‌شود که حضور فعال‌کننده اسید فسفریک، یک ژئوپلیمر با

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

یک سطح منسجم و متراکم تشکیل داده است. نقاط درخشانی که به وضوح دیده می‌شوند، تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی را نشان می‌دهند (Nikolov, 2020). بطوری‌که ژل ژئوپلیمر به وجود آماده دانه‌های خاک ماسه‌ای را بهم می‌چسباند و باعث افزایش مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای می‌گردد. از طرفی نسبت بالای سیلیسیم به آلومینیوم موجود در باطله آهن از طریق واکنش بین اتم‌های Al، Si و Fe با محلول فعال‌کننده‌ی اسیدی باعث ایجاد فازهایی با ساختارهای چهار وجهی متراکم و فشرده با تخلخل کم می‌شود که سبب افزایش واکنش پذیری ژئوپلیمریزاسیون شده است. این تراکم و عدم وجود تخلخل، یک ساختار با خواص مکانیکی عالی و استحکام فشاری بالا تشکیل داده است (dos Santos et al., 2019; Lazorenko et al., 2021).



شکل ۷- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ژئوپلیمر IOT_{100}(A)- ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$ (B)

۳-۴- تأثیر ژئوپلیمر IOT_{100} و $CTW_{75}IOT_{25}$ بر برخی ویژگی‌های ماسه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

۱-۳-۴- pH و هدایت الکتریکی (EC)

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که به علت ماهیت اسیدی ژئوپلیمرهای سنتز شده، pH ماسه تثبیت شده با ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} به‌طور معنی‌داری کمتر از ماسه تثبیت نشده است. با توجه به اینکه در فرآیند سنتز این ژئوپلیمرها از اسیدفسفریک به عنوان فعال‌کننده اسیدی استفاده شده و ژئوپلیمرهای مورد مطالعه اسیدی می‌باشند، این نتیجه مورد انتظار می‌باشد. درمطالعه‌ای نیز گزارش شده است که تأثیر خاکپوش‌ها بر روی pH خاک بستگی به نوع خاکپوش از نظر اسیدی یا بازی بودن دارد (Merrikhpour et al., 2022). همچنین نتایج مطالعه حاضر نشان داد که ژئوپلیمر $CTW_{25}IOT_{75}$ تأثیر معنی‌داری بر EC شن نداشت، اما کاربرد ژئوپلیمر IOT_{100} باعث افزایش معنی‌دار EC شن شد. براساس دستورالعمل فنی ارزیابی کارایی تثبیت کننده‌های خاک (Planning and Budget Organization of Iran, 2019)، حداکثر مقدار قابل قبول هدایت الکتریکی مالچ مورد استفاده برای تثبیت خاک ۴ دسی‌زیمنس بر متر و دامنه pH مورد تأیید ۸-۶ است. لذا با توجه به نتایج جدول ۳، استفاده از ژئوپلیمرهای مورد مطالعه از نظر pH و EC محدودیتی نخواهند داشت.

جدول ۳- تأثیر ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} بر برخی ویژگی‌های ماسه

تیمارها	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	درصد جوانه زنی	جمعیت میکروبی ($CFU\ g^{-1}$)	نرخ فرسایش بادی (kg/m^2h)
ماسه	۷/۸[a]	۰/۱۲۹[b]	۸۶/۶۶[a]	۰/۸×۱۰^۶[c]	۹۳/۵۲[a]
ماسه تثبیت شده با $CTW_{25}IOT_{75}$	۷/۱۵[b]	۰/۲۰۴[b]	۸۶/۶۶[a]	۴×۱۰^۶[a]	۰/۰۹۲[b]
ماسه تثبیت شده با IOT_{100}	۷/۲۱[b]	۰/۳۹۸[a]	۷۵[a]	۳×۱۰^۶[b]	۰/۰۰۶[b]

۲-۳-۴- درصد جوانه‌زنی

نتایج بدست آمده از آزمایش جوانه‌زنی بذر سورگوم نشان داد که کاربرد ژئوپلیمرهای مورد مطالعه در مقایسه با تیمار شاهد از لحاظ آماری هیچگونه اثر منفی بر جوانه‌زنی بذر نداشتند و از این نظر، شاهد با ژئوپلیمرها اثرهای یکسانی را نشان دادند (جدول ۳). مهمترین ویژگی مالچ‌پاشی حفظ رطوبت خاک است (Demo & Asefa Bogale, 2024)، در این روش یک لایه محافظ روی سطح خاک تشکیل می‌شود که مانع از تبخیر سریع آب خواهد شد. این امر به‌خصوص در مناطق خشک که در تابستان دما بالا است و بارش‌ها کم هستند، اهمیت زیادی دارد. گیاهان در صورت حفظ رطوبت خاک می‌توانند در شرایط سخت آب و هوایی، رشد بهتری داشته باشند (El-Beltagi et al, 2022).

در مورد اثر مالچ بر جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاه تحقیقات متعدد با نتایج مختلفی گزارش شده‌است. در مطالعه‌ای با بررسی تأثیر چهار تیمار مالچ نفتی، محلول پلیمر پلی‌لاتیس با آب، مخلوط پلی‌لاتیس -شن و شاهد بر جوانه‌زنی بذر تاغ نشان داد که سه هفته بعد از کاشت، کمترین میزان سبز شدن مربوط به تیمار مخلوط پلی‌لاتیس -شن و بیشینه تعداد سبز شدن مربوط به تیمار مالچ نفتی بود. کمینه و بیشینه تعداد بذرهای سبز شده بعد از ۵۰ روز از تاریخ کاشت نیز به ترتیب

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

در تیمارهای مخلوط پلی‌لاتیس-شن و تیمار شاهد مشاهده شد. کاهش درصد جوانه‌زنی بذرها در تیمار مخلوط پلی-لاتیس-شن، به‌دلیل سله حاصل از مصرف دوغاب پلی‌لاتیس و شن که به ضخامت ۲ تا ۳ میلی‌متر روی بذرها پاشیده شدند، عنوان شد. مالچ نفتی نیز به دلیل فراهم کردن گرمای بیشتر در لایه رویی خاک، تنها تأثیر مثبت در سریعتر جوانه‌زدن بذرها دارد، اما در پایان به دلیل اینکه مانع فیزیکی برای خروج جوانه از خاک ایجاد می‌کند موجب کاهش درصد سبز شدن بذرها می‌شود (Rezaie, 2009). محققان نشان دادند که مالچ غیرنفتی Nucleus (MA-19) هیچگونه عوارض منفی بر روی جوانه‌زنی، زنده‌مانی، ارتفاع و قطر یقه نهال‌های دو گونه تاغ و قره‌داغ ندارد و از این نظر مالچ استفاده شده مانند تیمار شاهد (بدون مالچ) عمل می‌کند (Banedjschafie et al., 2021). چنین نتیجه‌ای درمطالعه‌ای که به بررسی اثر مالچ پلیمر-سلولزی برویژگی‌های خاک و جوانه‌زنی و استقرار گیاهان بیابانی پرداختند، نیز بدست آمد (Abtahi, 2019).

۳-۳-۴- جمعیت میکروبی

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، کاربرد ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} در مقایسه با تیمار شاهد باعث افزایش معنی‌دار جمعیت میکروبی ماسه شد (جدول ۳). جمعیت میکروبی در ماسه تثبیت شده با $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} به ترتیب ۴۰۰ و ۲۷۵ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود که می‌تواند ناشی از نقش مالچ در حفظ رطوبت خاک باشد. ریزجانداران خاک یک شاخص کلیدی از توانایی خاک برای انجام واکنش‌های بیوژئوشیمیایی هستند و اغلب نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی نشان داده‌اند که رطوبت خاک از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار بر جمعیت و فعالیت‌های میکروبی خاک محسوب می‌شود (Długosz et al., 2024; Qu et al., 2023). ریزجانداران دارای غشاهای نیمه‌تراوا هستند و در دسترس بودن رطوبت خاک برای حفظ بقا و فعالیت آنها ضروری است (Qu et al., 2023). در محیط‌های فقیر از آب، تحول جامعه میکروبی کند است و کمبود رطوبت ممکن است منجر به مرگ میکروبی شود. در واقع هر چه رطوبت خاک کمتر شود مقدار آب در منافذ خاک کمتر و متعاقباً با کاهش دسترسی منابع مورد نیاز جمعیت میکروبی خاک، موجب کاهش سرعت تجزیه مواد آلی خاک و کاهش تصاعد دی‌اکسید کربن خواهد شد (Canarini et al., 2021; Quintana et al., 2023). علاوه بر این، خشکی بیش از حد به ویژگی‌های خاک، مانند ساختمان، تخلخل و pH آسیب رسانده و شرایط محیطی نامساعد برای رشد ریزجانداران ایجاد می‌کند. در نتیجه، سوخت‌وساز میکروبی، فعالیت و تولید آنزیم کاهش می‌یابد (Qu et al., 2023).

مالچ‌پاشی یکی از روش‌های موثر و کارآمد در حفظ رطوبت خاک به‌ویژه در مناطق خشک است. استفاده از مالچ به‌عنوان یک لایه محافظتی به‌طور قابل توجهی مانع از تبخیر آب می‌شود و شرایط بهتری برای فعالیت ریزجانداران فراهم می‌کند (El-Beltagi et al, 2022). نتایج مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از مالچ‌های آلی در ساختار و عملکرد جمعیت میکروبی خاک و در نتیجه بهبود کیفیت خاک بسیار مؤثر است (Zhang et al, 2020 & Wang et al, 2020 & Zeng et al, 2024)، اما اطلاعات بسیار کمی در مورد اثر مالچ‌های معدنی بر جامعه میکروبی خاک در دسترس است. در پژوهشی مشخص گردید تیمار مالچ‌پاشی آلی در مقایسه با مالچ‌های معدنی، جمعیت میکروبی بیشتری دارد که ممکن است به دلیل عرضه مقدار زیادی کربن باشد که به عنوان منبع غذایی اصلی برای قارچ‌ها و باکتری‌ها عمل می‌کند

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

(Lalruatsangi et al., 2019). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، به نظر می‌رسد ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} با افزایش رطوبت در ماسه باعث تعدیل شرایط تنش رطوبتی در خاک شده و جمعیت میکروبی را افزایش داده‌اند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رطوبت خاک در حالت طبیعی کم است، میکروب‌های خاک نسبت به تغییرات رطوبت بسیار حساس هستند (Guan et al., 2022).

۴-۳-۴- فرسایش بادی

نتایج آزمایشات فرسایش بادی نشان داد کاربرد ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} باعث کاهش معنی‌دار نرخ فرسایش بادی در ماسه مورد مطالعه شد (جدول ۳) به‌طوریکه ماسه بدون تثبیت کننده تقریبا هیچ‌گونه مقاومتی در برابر فرسایش بادی از خود نشان نداد، اما در مقابل نرخ فرسایش بادی در ماسه تثبیت شده با ژئوپلیمرهای $CTW_{25}IOT_{75}$ و IOT_{100} نزدیک به صفر بود. فرسایش بادی یکی از نتایج بیابان‌زایی است و از جمله فرآیندهای طبیعی است که بیشتر در شرایط خشک و سرعت زیاد باد رخ می‌دهد. در برخی مطالعات به تأثیر مثبت ژئوپلیمرها بر کاهش فرسایش بادی و ریزگردها اشاره شده است. این امر به دلیل تشکیل یک لایه مقاوم و پایدار توسط ژئوپلیمر برروی سطح خاک می‌باشد که باعث کاهش میزان هدررفت خاک در برابر فرسایش بادی می‌شود. در این ارتباط، محققان تأثیر کاربرد دو نوع مالچ پلیمری و مالچ با پایه گیاهی، به عنوان تثبیت کننده خاک، در چهار سطح صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد بر روی سه نوع خاک برداشت شده از کانونهای فرسایش بادی استان خوزستان نشان دادند هدر رفت خاک در خاک‌های تیمار شده با هر دو نوع مالچ، به‌طور معنی‌داری کمتر از خاک شاهد است (Shahnavaz et al., 2017). صبوحی و همکاران (۲۰۲۱) نیز با با بررسی اثر پلیمر ایمن‌آسیا در تثبیت ماسه‌های روان و کاهش فرسایش بادی مشاهده کردند که مالچ‌پاشی باعث تثبیت ماسه و افزایش مقاومت آن در برابر فرسایش بادی شد (Sabohi et al., 1400). همچنین، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ژئوپلیمرهای اسیدی مورد مطالعه می‌توانند مشابه با سرباره فعال شده قلیایی در پژوهش کمایی و همکاران (۲۰۲۳) با تشکیل پوسته‌های محکم، محافظت قابل‌توجهی در برابر فرسایش بادی ایجاد کنند و منجر به کاهش قابل توجهی در فرسایش‌پذیری باد شوند (Komaei et al., 2023).

۵- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه بیانگر پتانسیل بالای ژئوپلیمرهای اسیدی سنتز شده از IOT و CTW برای تثبیت و بهبود ویژگی‌های خاک ماسه‌ای است. بر اساس یافته‌ها، ژئوپلیمر IOT_{100} و $CTW_{25}IOT_{75}$ به عنوان موثرترین تیمارها شناسایی شدند که علاوه بر برآورده کردن معیارهای فنی لازم، اثرات زیست‌محیطی مطلوبی نیز نشان دادند. از نظر مقاومت مکانیکی، افزایش سطح ژئوپلیمر از ۱۰ به ۲۰ درصد، منجر به افزایش معنی‌دار مقاومت فشاری شد. بیشترین مقاومت فشاری در تیمارهای IOT_{100} (۲/۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع) و $CTW_{25}IOT_{75}$ (۲/۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع) مشاهده شد که از حداقل استاندارد تعیین‌شده (۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع) برای تثبیت‌کننده‌های خاک بیشتر بود. این افزایش مقاومت را می‌توان به تشکیل فازهای کریستالی جدید مانند آنتی‌گوریت و همچنین ایجاد یک ساختار متراکم و با تخلخل

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

کم در اثر واکنش پلیمریزاسیون بین آلومینوسیلیکات‌های موجود در مواد اولیه و یون‌های فسفات حاصل از اسید فسفریک نسبت داد. نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) تایید کرد که فرآیند ژئوپلیمریزاسیون منجر به حذف یا دگرگونی بسیاری از فازهای کانی‌شناسی اولیه شده و فازهای جدیدی تشکیل شده‌اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز یک ساختار متراکم و یکپارچه را نشان داد که دانه‌های ماسه را به هم متصل کرده و وجود نقاط درخشان، تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی را تایید کرد. این ساختار فشرده عامل اصلی دستیابی به خواص مکانیکی برتر است.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، اگرچه ژئوپلیمرهای اسیدی مورد مطالعه باعث کاهش pH ماسه شدند، اما مقدار نهایی آن در محدوده قابل قبول (۸-۶) استانداردهای زیست‌محیطی قرار گرفت. همچنین، ژئوپلیمر IOT_{100} باعث افزایش EC شد، اما این افزایش همچنان بسیار کمتر از حد مجاز (۴ دسی‌زیمنس بر متر) بود. بنابراین، از نظر این دو پارامتر، استفاده از این ژئوپلیمرها محدودیتی ایجاد نمی‌کند. مهم‌تر آنکه، این تثبیت‌کننده‌ها هیچ اثر بازدارنده‌ای بر جوانه‌زنی بذر سورگوم نداشتند که نشان‌دهنده سازگاری زیستی آن‌ها است. علاوه بر این، کاربرد این ژئوپلیمرها، منجر به افزایش چشمگیر جمعیت میکروبی خاک شد که نشان‌دهنده ایجاد یک محیط مساعد برای فعالیت‌های بیولوژیکی خاک و پتانسیل این روش برای احیای اکوسیستم‌های تخریب‌شده است.

کاربرد ژئوپلیمرهای اسیدی همچنین تاثیر شگرفی در کنترل فرسایش بادی داشت، به‌طوری که نرخ فرسایش را به نزدیک صفر کاهش داد. این امر می‌تواند ناشی از تشکیل یک پوسته سخت و مقاوم بر سطح خاک باشد که در برابر نیروهای برشی باد مقاومت می‌کند. در نتیجه، سنتز ژئوپلیمرهای اسیدی از ضایعات صنعتی نه تنها یک راهکار موثر برای مدیریت و ارزش‌افزایی این پسماندها ارائه می‌دهد، بلکه محصولی پایدار و سازگار با محیط زیست تولید می‌شود. این فناوری با برخورداری از عملکرد مکانیکی مناسب، سازگاری زیستی و اثرات مثبت بر حیات میکروبی خاک، گامی مهم در راستای توسعه پایدار و مهندسی محیط زیست محسوب می‌شود. برای کاربرد در مقیاس وسیع، انجام مطالعات میدانی بلندمدت برای ارزیابی دوام و پایداری این ژئوپلیمرها در شرایط واقعی پیشنهاد می‌گردد.

فهرست منابع :

1. Abtahi, M. (2019). Investigation of Biodegradable Polymer-Cellulosic Mulch Persistence and Effects on Seed Germination and Establishment of Desert. *Iranian Rangeland and Desert Research*, *26*(3), 517-530. doi:10.22092/ijrdr.2019.119986 (In Persian)
2. Banedjschafie, S., Khosroshahi, M., Kashi Zenouzi, L., & Jafari, A. (2021). Investigation of the effect of Nucleus Mulch (MA-19) on seed germination and seedlings growth of Holoxylon and Qara-Dagh Nitraria. *Iranian Rangeland and Desert Research*, *28*(1), 106-117. doi:10.22092/ijrdr.2021.123877 (In Persian)
3. Behforouz, B., Balkanlou, V., Naseri, F., Kasehchi, E., Mohseni, E., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Investigation of eco-friendly fiber-reinforced geopolymer composites incorporating recycled coarse aggregates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *17*(6), 3251-3260.
4. Bhavsar, J. K., & Panchal, V. (2022). Ceramic waste powder as a partial substitute of fly ash for geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Civ. Eng. J*, *8*, 1369-1387.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

5. Bohlouli, M., Imam, M., & Khaleghi, M. (2023). Stabilization of a dune sandy soil with steel-slag-based geopolymer and nanosilica. *Transportation infrastructure engineering, 9*(3), 119-137. doi:10.22075/jtie.2023.29893.1637 (In Persian)
6. Canarini, A., Schmidt, H., Fuchslueger, L., Martin, V., Herbold, C. W., Zezula, D., . . . Bahn, M. (2021). Ecological memory of recurrent drought modifies soil processes via changes in soil microbial community. *Nature Communications, 12*(1), 5308.
7. de Carvalho, A. R., da Silva Calderón-Morales, B. R., Júnior, J. C. B., de Oliveira, T. M., & Silva, G. J. B. (2023). Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid. *Construction and Building Materials, 403*, 133078.
8. de Farias, L. M., & Marinho, J. L. A. (2020). Construções sustentáveis: Perspectivas sobre práticas utilizadas na construção civil. *Brazilian Journal of Development, 6*(3), 16023-16033.
9. Demo AH and Asefa Bogale G (2024) Enhancing crop yield and conserving soil moisture through mulching practices in dryland agriculture. *Front. Agron. 6:1361697. doi: 10.3389/fagro.2024.1361697*
10. Dihaji, H., Azerkane, D., Bih, L., Essaddek, A., & Haily, E. M. (2025). Comparative study of geopolymers synthesized with alkaline and acid reactants at various liquid-to-solid ratios using Moroccan kaolin clay. *Construction and Building Materials, 468*, 140453.
11. Długosz, J., Piotrowska-Długosz, A., & Breza-Boruta, B. (2024). The effect of differences in soil water content on microbial and enzymatic properties across the soil profiles. *Ecohydrology & Hydrobiology, 24*(3), 547-556.
12. dos Santos, L. F., de Carvalho, J. M. F., Peixoto, R. A. F., & Brigolini, G. J. (2019). Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. *Construction and Building Materials, 220*, 375-385.
13. El-Dieb, A. (2018). From landfill to sustainable concrete. *MOJ Civil Engineering, 4(4), 136-136.*
14. El-Beltagi, H. S., Basit, A., Mohamed, H. I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E. A., ... & Ghazzawy, H. S. (2022). Mulching as a sustainable water and soil saving practice in agriculture: A review. *Agronomy, 12(8), 1881.*
15. Guan, H., Mu, Y., Song, R., Lan, Y., Du, X., Li, J., . . . Sang, W. (2022). Soil microbial communities in desert grassland around rare earth mine: Diversity, variation, and response patterns. *Sustainability, 14*(23), 15629.
16. Haily, E., Ait Ousaleh, H., Zari, N., Faik, A., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2023). Use of a form-stable phase change material to improve thermal properties of phosphate sludge-based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials, 386*, 131570.
17. Hanegbi, N., & Katra, I. (2020). A clay-based geopolymer in loess soil stabilization. *Applied Sciences, 10*(7), 2608.
18. Kasehchi, E., Arjomand, M. A., & Elizei, M. H. A. (2024). Experimental investigation of the feasibility of stabilizing inshore silty sand soil using geopolymer based on ceramic waste powder: An approach to upcycling waste material for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials, 20, e02979.*
19. Katra, I. (2022). A clay-based geopolymer in loess stabilization to water and wind soil erosion. . *In EGU General Assembly Conference Abstracts pp. EGU22-8329.*
20. Kaze, C. R., Lecomte-Nana, G. L., Kamseu, E., Camacho, P. S., Provis, J. L., Duttine, M., . . . Melo, U. C. (2021). Mechanical and physical properties of inorganic polymer cement made of iron-rich laterite and lateritic clay: A comparative study. *Cement and Concrete Research, 140*, 106320.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

21. Komaei, A., Soroush, A., Fattahi, S. M., & Ghanbari, H. (2023). Wind erosion control using alkali-activated slag cement: Experimental investigation and microstructural analysis. *Journal of Environmental Management, 344*, 118633.
22. Koohestani, B., Darban, A. K., Mokhtari, P., Darezereshki, E., & Yilmaz, E. (2021). Geopolymerization of soil by sodium silicate as an approach to control wind erosion. *International Journal of Environmental Science and Technology, 18*(7), 1837-1848.
23. Lalruatsangi, E., Hazarika, B., & Raja, P. (2019). Effect of organic and inorganic mulching on soil microbial population in acid lime (Citrus aurantifolia Swingle). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 8*(7), 2062-2064.
24. Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Shaikh, F., Krishna, R., & Mishra, J. (2021). Utilization potential of mine tailings in geopolymers: Physicochemical and environmental aspects. *Process Safety and Environmental Protection, 147*, 559-577.
25. Louati, S., Baklouti, S., & Samet, B. (2016). Geopolymers Based on Phosphoric Acid and Illito-Kaolinitic Clay. *Advances in Materials Science and Engineering, 2016*(1), 2359759.
26. Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2021). Development of optimized binary ceramic tile and concrete wastes geopolymer binders for in-situ applications. *Journal of Building Engineering, 43*, 102906.
27. Merrikhpour, H., Azimi, S. B., Badamfirooz, J., & Montazami, S. (2022). Investigating the effects of two emulsion mulch types on soil properties: a case study of Aran and Bidgol desert areas. *Desert Ecosystem Engineering, 10*(33), 13-26.
28. Middleton, N., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability, 9*(6), 1053.
29. Nikolov, A. (2020). Alkali and acid activated geopolymers based on iron-silicate fines-by-product from copper industry. *International scientific journal" machines. Technologies. Materials, 14*(1).
30. Planning and Budget Organization of Iran & Department of Environment. (2019). Technical Instruction for Evaluating the Efficiency of Soil Stabilizers (Mulch) (Regulation No. 783). Tehran, Iran. (In Persian)
31. Polignano, M. V., & Lemos, R. S. (2020). Rompimento da barragem da vale em brumadinho: impactos socioambientais na bacia do rio paraopeba. *Ciência e Cultura, 72*(2), 37-43.
32. Prates, C. D., Lima, A. S., Ferreira, I. C., Paula, F. G. d., Pinto, P. S., Ardisson, J. D., . . . Teixeira, A. P. C. (2023). Use of iron ore tailing as raw material for two products: sodium silicate and geopolymers. *Journal of the Brazilian Chemical Society, 34*(6), 809-818.
33. Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research, 114*, 40-48.
34. Qu, Q., Wang, Z., Gan, Q., Liu, R., & Xu, H. (2023). Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity. *Frontiers in plant science, 14*, 1221288.
35. Quintana, J. R., Martín-Sanz, J. P., Valverde-Asenjo, I., & Molina, J. A. (2023). Drought differently destabilizes soil structure in a chronosequence of abandoned agricultural lands. *Catena, 222*, 106871.
36. Rezaie, A. (2009). Comparison between Polylatice polymer and petroleum mulch on seed germination and plant establishment in sand dune fixation. *Iranian Rangeland and Desert Research, 16*(1), 124-136. Retrieved from https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_103249_c944f788f1e0aa9821ea32785793f2c2.pdf (In Persian)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]
[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]

37. Sabohi, R., Heidari Morchekhorti, F., Khodagholi, M., & Salehpour, S. (1400). Investigating the possibility of using Asia's safe polymer to reduce wind erosion and fine dust. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research, 28*(2), 280-295. (In Persian)
38. Sahoo, S., & Singh, S. P. (2022). Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers. *Construction and Building Materials, 328*, 127078.
39. Shahnavaz, M., Nourzadeh Haddad, M., Gholami, A., & Panahpoor, I. (2017). Study of Performance polymer and plant mulch to reduce soil loss in areas prone to wind erosion in Khuzestan. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 48*(3), 651-658.
40. Sharma, S. K. (2020). ~ i~ High Density Planting of Subtropical Fruits-I Litchi An Introduction to Contemporary Orchard Management (Vol. 1). Nitya Publications.
41. Shariatmadari, N., Mohebbi, H., & Javadi, A. A. (2021). Surface stabilization of soils susceptible to wind erosion using volcanic ash–based geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering, 33(12), 04021345.*
42. Tchakouté, H. K., & Rüscher, C. H. (2017). Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: A comparative study. *Applied Clay Science, 140, 81-87.*
43. Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H., Kamseu, E., Djobo, J. N., & Leonelli, C. (2017). The influence of gibbsite in kaolin and the formation of berlinite on the properties of metakaolin-phosphate-based geopolymer cements. *Materials Chemistry and Physics, 199, 280-288.*
44. Valente, M., Sambucci, M., Chougan, M., & Ghaffar, S. H. (2022). Reducing the emission of climate-altering substances in cementitious materials: A comparison between alkali-activated materials and Portland cement-based composites incorporating recycled tire rubber. *Journal of cleaner production*(333), 130013.
45. van Riessen, A., Jamieson, E., Gildenhuys, H., Skane, R., & Allery, J. (2025). Using XRD to Assess the Strength of Fly-Ash-and Metakaolin-Based Geopolymers. *Materials, 18*(9), 2093.
46. Wang, Y., Liu, L., Luo, Y., Awasthi, M. K., Yang, J., Duan, Y., ... & Zhao, Z. (2020). Mulching practices alter the bacterial-fungal community and network in favor of soil quality in a semiarid orchard system. *Science of the total environment, 725, 138527.*
47. Zeng, H., Pu, S., Cai, G., Duan, W., Shen, Z., Xu, B., . . . Xu, Y. (2024). Comparative study on the preparation of phosphate-based geopolymers using different activators. *Construction and Building Materials, 437*, 137000.
48. Zhang, S., Wang, Y., Sun, L., Qiu, C., Ding, Y., Gu, H., ... & Ding, Z. (2020). Organic mulching positively regulates the soil microbial communities and ecosystem functions in tea plantation. *BMC microbiology, 20(1), 103.*
49. Zhao, X., Ma, X., Chen, B., Shang, Y., & Song, M. (2022). Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures. *Resources, Conservation and Recycling, 176*, 105959.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-02-05]

[DOI: 10.61186/jeer.15.4.66]