

Evaluation of Geotechnical Properties in Weak Soils Stabilized by Combined Application of Lime, Fly-Ash, Geopolymer, and Scrap Tires

Mehrdad Aminizade¹, Mehdi Mokhberi^{1*}, Mehdi Momeni Roghabadi²

¹ Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

² Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.

Review History:

Received: Sep. 15, 2023

Revised: Jan. 11, 2025

Accepted: Jun. 26, 2025

Available Online: Jul. 21, 2025

Keywords:

Rubber Powder

Rubber Fibers

Fly Ash

Lime

Weak Soils

ABSTRACT: A lot of civil engineering projects must be constructed on weak or problematic soils. In some cases, road subgrades or building foundations often consist of soft clays or windblown sands that necessitate soil improvement for usability. Lime has served as a conventional stabilizer, with combined lime-fly ash applications further enhancing soil cohesion. These traditional materials are widely used in desert and arid environments to mitigate foundation settlement and strengthen road subgrades. Recently, scrap tires have gained traction in soil stabilization due to their reduced environmental impact. However, the synergistic effects of rubber components (crumb rubber powder and rubber fibers) with traditional stabilizers remain unexplored, primarily because rubber incorporation weakens lime mortar strength. This study examines the influence of combined crumb rubber powder (0–30% at 4% increments) and rubber fibers (0–2%: 0%, 1%, 1.5%, 2%) on the mechanical properties of lime-treated and lime-fly ash-stabilized soils. Results indicate that crumb rubber powder slightly reduces the compressive strength of stabilized soil, whereas rubber fibers significantly improve compressive strength, ductility, failure strain, elastic modulus, bulk modulus, resilience modulus, and shear strength across all curing periods. Furthermore, the optimal combination is achieved with 12% crumb rubber and 1% rubber fibers added to lime-fly ash mixtures.

1- Introduction

In many civil engineering activities, it is often necessary to use locally available weak and problematic soils. Clayey soils and wind-blown sands in desert and arid regions are among the problematic soils in road construction and building projects. As a result, geotechnical engineers seek practical and cost-effective techniques to address these challenges. Stabilizing such soils using various additives is a common practice, as replacing foundation materials with high-quality soils is often expensive. The most widely used additives for stabilizing clayey soils and enhancing their properties, from the past to recent years, have been lime and cement, due to their proven effectiveness in clayey soil improvement. [1, 2].

Growing environmental concerns have recently shifted research focus toward sustainable alternatives, particularly recycled waste materials like tire derivatives. While studies have examined crumb rubber's effects on mechanical properties [3, 4], significant knowledge gaps remain regarding hybrid systems combining traditional stabilizers with recycled components.

The current literature reveals two critical limitations: firstly, insufficient investigation of mechanical performance in lime-fly ash systems incorporating both crumb rubber

and rubber fibers, and secondly, the practical barriers to tire waste implementation due to strength reduction concerns in lime-stabilized soils [5, 6]. These studies address these gaps through an extensive experimental program evaluating includes Multiscale mechanical behavior of lime-treated and lime-fly ash composites, Synergistic effects of crumb rubber, rubber fibers, and Curing time dependencies.

2- Materials and methods

2- 1- Materials

The soil used in the lime stabilization mixture was obtained from the sand and gravel mine in Kerman city, with geographical coordinates 57.380 and 30.289. Based on the ASTM classification standards, the soil is classified as low-plasticity clay (CL) and has 2.47 specific gravity and 33% liquid limit. The lime used in this study is hydrated lime with a high percentage of hydrated elements (C25-19, 2019). The fly ash was obtained from the Zarand factory in Kerman. The fly ash classified as SW-SM, based as ASTM 2487-11 (2011), which had 0.1 Effective size (D_{10}) and a 27% liquid limit.

The rubber particles used were purchased directly from the Baraz Tire Factory in Kerman, with diameters ranging between 0.2 to 2 mm. Additionally, the rubber fibers had a

*Corresponding author's email: mehdi.mokhberi@iaau.ac.ir

diameter of 0.2 mm, a length of 2 to 25 mm, a tensile strength of 180 MPa, and a melting point of 220°C. In accordance with previous research recommendations, tap water was used for molding the specimens, while distilled water was employed for property testing [7, 8].

2- 2- Research methods

Unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted on all specimens. ASTM D5102 provides guidelines for performing uniaxial tests on stabilized soils (ASTM, 1996). The bulk modulus (K) and the shear modulus (G) were used to evaluate the lime-stabilized soil's resistance to deformation using equations (1) and (2)[9].

$$K(\text{MPa}) = \frac{\sigma}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}} = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G(\text{MPa}) = \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yz}} = \frac{\sigma_{xy}}{2\varepsilon_{xy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\gamma_{xy}} = E_s \frac{\text{MPa}}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

Weak clay soil was mixed with different proportions of fly ash, rubber fibers, and waste tire rubber, and the mechanical characteristics of each composite were evaluated. Table 1 shows the mix design for additive materials with the studied soil.

Table 1. The amount of mix materials for studies program (kg/m³).

Mix design	additive amount	Sand	Clay	Lime		polymer
				Test series		
				(1)	(2)	
No additive	0	1000	230	85	170	85
Rubber powder	4	960	230	85	170	85
	8	920	230	85	170	85
	12	880	230	85	170	85
	16	840	230	85	170	85
	20	800	230	85	170	85
	25	750	230	85	170	85
	30	700	230	85	170	85
Rubber fibers	0.5	995	230	85	170	85
	1	990	230	85	170	85
	1.5	985	230	85	170	85
	2	980	230	85	170	85

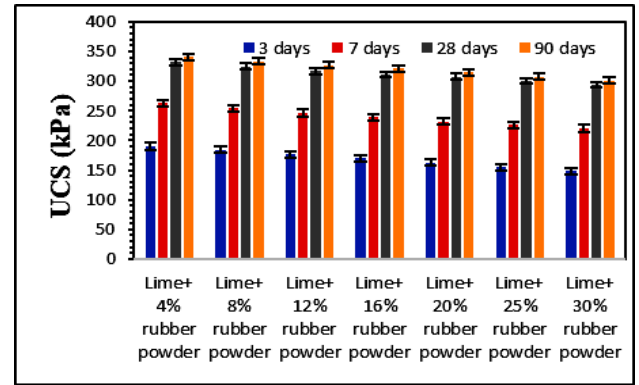


Fig. 1. Effects of adding the rubber powder on the maximum compressive strength of lime concrete samples

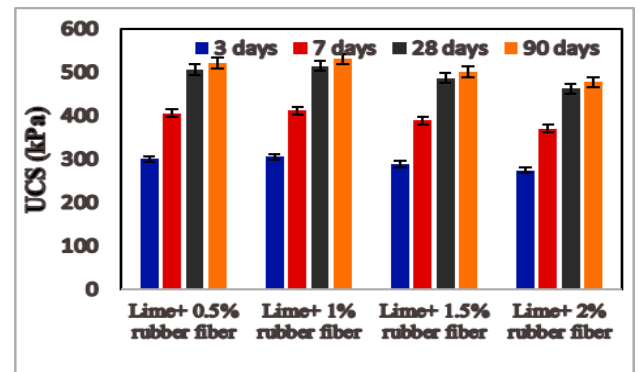


Fig. 2. Effects of rubber fibers on the maximum compressive strength of lime concrete at curing times

3- Discussion

This study has been carried out to evaluate the influence of rubber powder and rubber fiber contents on the mechanical behavior of lime-treated and lime-fly ash-treated soils under different curing periods. It can be concluded that lime-treated specimens demonstrate enhanced mechanical properties due to pozzolanic reactions and cementation phenomena during the curing period. The UCS analysis reveals an inverse relationship between rubber powder content and strength development in lime-stabilized soil across all curing durations. Figures 1 and 2 show the behavior of stabilized weak soils after adding the rubber components. While higher rubber percentages consistently yield lower strength than the control, all mixtures exhibit curing-dependent strength enhancement. The 4% rubber addition demonstrates the least strength reduction, suggesting this proportion offers the best compromise between waste utilization and mechanical performance. The effect of different rubber powder percentages on the failure strain of lime-stabilized soil at various curing times was investigated. The results demonstrate that, across all curing periods, mixtures containing rubber powder exhibit

higher failure strain compared to the pure lime-stabilized soil (control). This indicates enhanced ductility in rubber-modified samples. On the other hand, the incorporation of rubber fibers yields a significant increase in maximum compressive strength compared to both lime-stabilized soil and rubber powder-modified specimens. Optimal strength improvement was observed at 0.5-1% fiber content under identical curing conditions, with strength reduction occurring at higher fiber dosages. This behavior stems from the elastic nature of rubber fibers, enabling effective energy absorption and dissipation of external stresses, formation of stress-transfer chains within the matrix, and improved stress distribution throughout the composite system. In addition, the fiber caused failure strain characteristics. Therefore, rubber fiber-reinforced specimens exhibited superior failure strain compared to control mixtures, indicating reduced material brittleness, enhanced ductility, and improved strain accommodation capacity. On the other hand, chemically, rubber powder exhibits inert characteristics, precluding participation in either pozzolanic reactions or lime hydration processes. The material's inherent softness and flexibility reduce composite stiffness, with progressive rubber addition diminishing lime-soil adhesion and degrading elastic properties (including various moduli).

4- Conclusion

Based on the experimental investigations conducted on lime-stabilized and lime-fly ash-stabilized soil samples with various additives, the following conclusions can be drawn:

- The results indicate that the addition of 0.5% and 1% rubber fibers yielded the maximum enhancement in compressive strength, while higher fiber contents led to strength reduction.
- The inclusion of rubber fibers increased the failure strain and ductility of the soil, potentially improving its flexibility against sudden deformations.
- Rubber fibers reduced sample brittleness and stabilized soil behavior through their elastic properties and uniform stress distribution characteristics.
- Among all investigated mixtures, the lime-fly ash stabilized samples containing rubber fibers exhibited the highest failure strain across all percentages and curing periods, indicating their enhanced ductile behavior.

References

- [1] S. Jahandari, M. Saberian, Z. Tao, S.F. Mojtahedi, J. Li, M. Ghasemi, S.S. Rezvani, W. Li, Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, *J Cold Regions Science Technology*, 160 (2019) 242-251.
- [2] M.R. Malekpoor, M.M. Toufigh, Laboratory study of soft soil improvement using lime mortar-(well graded) soil columns, *J Geotechnical Testing Journal*, 33(3) (2010).
- [3] L. Mohammadifar, H. Miraki, A. Rahmani, S. Jahandari, B. Mehdizadeh, H. Rasekh, P. Samadi, B. Samali, Properties of lime-cement concrete containing various amounts of waste tire powder under different ground moisture conditions, *Polymers*, 14(3) (2022) 482.
- [4] B. Phani Kumar, R.S.J.J.o.G. Sharma, G. Engineering, Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, 130(7) (2004) 764-767.
- [5] C.H. Signes, J. Garzón-Roca, P.M. Fernández, M.E.G. de la Torre, R.I. Franco, Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres, *Applied Clay Science*, 132 (2016) 768-773.
- [6] P. Singh, V.S.N.S. Goli, D.N.J.E.T.R. Singh, Current practices and the way forward in waste rubber utilization for infrastructural and geoenvironmental engineering applications, 12(1) (2023) 2252164.
- [7] A. Afshar, S. Jahandari, H. Rasekh, M. Shariati, A. Afshar, A. Shokrgozar, Corrosion resistance evaluation of rebars with various primers and coatings in concrete modified with different additives, *Construction Building Materials*, 262 (2020) 120034.
- [8] A. Darvishi, H. Vosoughifar, S. Saeidijam, M. Torabi, A.J.I.I.S. Rahmani, An experimental and prediction study on the compaction and swell-expansion behavior of bentonite clay containing various percentages of two different synthetic fibers, 5 (2020) 1-15.
- [9] K.J.J.o.t. Fishman, Testing techniques for measurement of bulk modulus, *Journal of testing evaluation* 22(2) (1994) 161-167.



بررسی خواص ژئوتکنیکی خاکهای مسئله دار ضعیف بهسازی شده در کاربرد همزمان آهک، خاکستر بادی و ضایعات لاستیک

مهرداد امینی زاده^۱، مهدی مخبر^{۱*}، مهدی مؤمنی رق آبادی^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

کلمات کلیدی:

پودر لاستیک

الیاف

خاک ضعیف

خاکستر بادی

آهک

خلاصه: بسیاری از پروژه‌های عمرانی باید بر خاک‌های ضعیف و یا مسئله‌دار احداث شوند. گاهی بستر راه‌ها یا ساختمان‌ها احداث بناها از رس‌های ضعیف و یا ماسه بادی تشکیل شده‌اند که جز با اصلاح خواص آنها قابل استفاده نیستند. از گذشته تاکنون آهک به عنوان یکی از مصالح اصلاح خاک شناخته می‌شده است. گاهی نیز با کاربرد همزمان آهک و خاکستر بادی چسبندگی خاک را افزایش می‌دهند. در مناطق گرم و کویری از این دو مصالح سنتی برای کاهش نشست پی و ایجاد لایه مستحکم در بستر راه‌ها استفاده می‌شود. از طرفی در سال‌های اخیر به دلیل کاهش اثرات منفی زیست محیطی، استفاده از لاستیک‌های فرسوده در بهسازی خاک مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل عملکرد متفاوت افزودنی‌های سنتی با ضایعات لاستیک، بررسی تأثیر همزمان اجزاء لاستیک فرسوده، مصالح سنتی و خاکستر بادی که در مناطق کویری ایران به فراوانی دیده می‌شود، ضرورت پیدا می‌کند. در این تحقیق تأثیر افزودن پودر لاستیک فرسوده و الیاف لاستیک بر روی خواص مکانیکی افزودنی آهک و آهک-خاکستر بادی بررسی شده است. آزمایش‌ها و نتایج نشان می‌دهد که افزودن پودر لاستیک مقاومت فشاری خاک و سایر پارامترهای مقاومتی خاک بهسازی شده را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش پودر لاستیک به مصالح بهسازی شده با مصالح سنتی افزایش شکل پذیری را به همراه دارد. از طرفی استفاده از الیاف لاستیک به طور قابل توجهی مقاومت فشاری، شکل‌پذیری، مدول الاستیک، مدول حجمی (بالک)، مدول برجهنگی و مقاومت برشی را در تمام زمان‌های عمل‌آوری بهبود می‌بخشد، ولی افزایش الیاف باعث کاهش کرنش شکست می‌گردد. بدیهی است که بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک بهسازی شده متناسب با انتخاب بهینه افزودنی و مسلح کننده می‌باشد. در یک نتیجه گیری کلی افزودن ۱۲٪ پودر لاستیک فرسوده و ۱٪ الیاف لاستیک به آهک-خاکستر بادی مناسب ترین نتیجه را برای بهسازی خاک ارائه می‌دهد.

۱- مقدمه

با استفاده از افزودنی‌های مختلف امری طبیعی است زیرا جایگزینی مواد پی با خاک‌های با کیفیت عالی هزینه بر است. پرکاربردترین افزودنی برای تثبیت خاک‌های رسی و بهبود خصوصیات آن‌ها از گذشته تا سال‌های اخیر آهک و پس از آن سیمان می‌باشد. از اولین مطالعات تحقیقاتی بر روی خاک‌های تثبیت شده با آهک، تحقیقاتی است که در سال ۱۹۸۱ برای بهبود خواص خاک‌های ریزدانه انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که درصد آهک مورد نیاز برای افزایش خواص خاک‌های ریزدانه بین ۳٪ تا ۸٪ است. علاوه بر این، شفته آهکی (خاک بهسازی شده با آهک) و ملات آهک به طور گسترده در پروژه‌های ساختمانی مختلف استفاده می‌شود. [۱]. ملک پور و توفیق (۲۰۱۰) گزارش کردند که ستون‌های شفته آهکی حاوی ۲۰٪ آهک و ۲۲٪

در بسیاری از فعالیت‌های عمرانی به ناچار نیاز به استفاده از خاک‌های ضعیف و مشکل ساز محلی است. ملاحظات اقتصادی، در دسترس نبودن مواد با کیفیت و فواصل حمل و نقل اغلب اصلاح و بهبود خاک را توجیه می‌کند. خاک‌های بی کیفیت معمولاً می‌توانند رفتار مهندسی نامطلوبی مانند تورم و انقباض زیاد، ظرفیت باربری کم و حساسیت به رطوبت بالا از خود نشان دهند. خاک‌های رسی و خاک‌های ماسه بادی در مناطق بیابانی و کویری از جمله خاک‌های مشکل ساز در پروژه‌های راه سازی و ساختمانی هستند. بنابراین مهندسان ژئوتکنیک به دنبال روش‌ها و تکنیک‌های کاربردی و اقتصادی برای حل این مشکلات هستند. تثبیت این نوع خاک‌ها

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mehdi.mokhberi@iau.ac.ir



نشان داد که بیشترین مدول الاستیسیته با بیشترین نسبت سیمان به آهک به دست می‌آید. البته میزان بهینه سیمان نباید از ۵٪ بیشتر باشد. ایشان نشان دادند که استفاده از لایه ژئوگرید در مخلوط ماسه و سیمان تحت انرژی ثابت باعث کاهش وزن مخصوص خاک می‌شود [۱۸-۱۶]. جهاندار و همکاران نشان دادند که استفاده از لایه‌های ژئوگرید در خاک‌های تثبیت شده با آهک منجر به افزایش قابل توجه شکل پذیری و کاهش شاخص شکنندگی می‌شود [۲۱-۱۹].

در دسته دیگری از مطالعات تاثیر افزایش درصدهای مختلف پودر لاستیک بر خواص مکانیکی خاک رس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات محمدی فر و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که افزودن پودر تایر تاثیر مثبتی بر کاهش محدودیت‌های اتربرگ، بهبود مقاومت و نفوذپذیری و کاهش پتانسیل تورم و وزن مخصوص خاک دارد. بنابراین می‌توان از آن به عنوان افزودنی برای افزایش خواص خاک استفاده کرد [۲۲]. در سال ۲۰۰۴، کومار و شارما (۲۰۰۴) تاثیر افزودن خاکستر بادی را بر خواص مهندسی خاک‌های متورم شونده از جمله هدایت هیدرولیکی، پلاستیسیته، چگالی، مقاومت بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزودن ۲۰٪ خاکستر بادی، انعطاف پذیری حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که بسته به نوع خاک، میزان موثر خاکستر بادی برای بهبود خواص مهندسی خاک بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ است [۲۳]. تحقیقات آزمایشگاهی داهاله و همکاران (۲۰۱۶) بر روی خاک‌های تثبیت شده با خاکستر بادی و آهک هیدراته نشان داد که خاکستر بادی به طور قابل توجهی خواص مقاومتی خاک رس را تغییر می‌دهد. همچنین افزودن تا ۵۰٪ خاکستر بادی در افزایش خواص مقاومتی خاک موثر است، در حالی که بیش از این مقدار مقاومت کلی خاک را کاهش می‌دهد [۲۴]. سینگز و همکاران مخلوطی از خاک متورم شونده را با ۶٪ خرده لاستیک مختلف به دست آمده از لاستیک‌های فرسوده تهیه کردند. نتایج نشان داد که افزودن خرده لاستیک تا ۵/۲٪ مقاومت فشاری را تا ۴۳۰ kPa افزایش می‌دهد [۲۵].

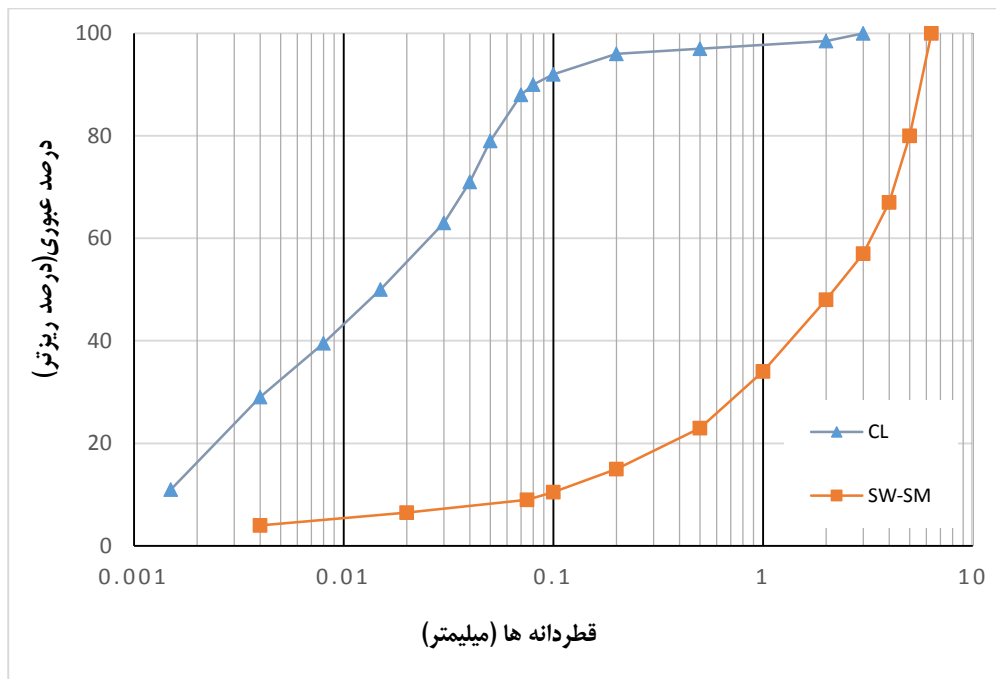
نتایج مطالعات اکبری مهر و اسماعیل افلاکی حاکی از آن است که افزودن پودر لاستیک به خاک‌های رسی تاثیر مثبتی در کاهش حدود آتربرگ، افزایش راندمان و بهبود مقاومت، نفوذپذیری، کاهش تورم و ویژگی‌های نشست و کاهش تراکم خاک دارد. بر اساس آزمایشات سه محوری انجام شده در این تحقیق ایشان مشخص شد که در فشار همه جانبه یکسان و اندازه فیبرهای لاستیکی یکسان میزان کرنش خرابی با افزایش میزان فیبر لاستیک و اندازه آنها کاهش می‌یابد که این مطلب نشان دهنده این

رس، ظرفیت باربری خاک‌های مشکل دار را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد [۲]. استفانیدو و پاپایانی (۲۰۰۵) اثرات مقدار و اندازه سنگدانه بر ویژگی‌های شفته آهکی را بررسی کردند. در این تحقیق مخلوط‌های مختلفی با درصد آهک به سنگدانه و نسبت آب به آهک متفاوت تهیه شد. نتایج نشان داد که مصالح درشت در شفته آهکی تأثیری بر مقاومت ملات ندارد، اگرچه به دلیل تراکم، منافذ موئینی بسیار کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر مقاومت شفته آهکی با کاهش نسبت آهک به سنگدانه با حداکثر اندازه صفر تا ۴mm به دست می‌آید [۳].

صابریان و همکاران (۲۰۱۷) اثر پدیده موئینی و بالا آمدن سفره‌های آب‌های زیرزمینی بر خواص مکانیکی شفته آهکی را با انجام آزمایش و همچنین مدل ریاضی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پدیده موئینی و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی باعث کاهش خواص مقاومتی شفته آهکی می‌شود [۴]. جهاندار و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر چرخه‌های ذوب-یخبندان، درجه اشباع و زمان عمل‌آوری بر پارامترهای ژئوتکنیکی شفته آهکی-سیمانی و شفته آهکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سطح آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع، مقاومت شفته آهکی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. در حالی که اگر به جای شفته آهکی از شفته آهکی سیمانی استفاده شود، افزایش آب زیرزمینی و افزایش درجه اشباع تأثیری بر خواص مقاومتی ندارد [۵].

استفاده از خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و پوسته برنج همراه آهک به منظور توسعه پایدار اکوسیستم و هم چنین برای تثبیت و بهبود مقاومت خاک مشکل دار توسط محققان گزارش شده است. با این حال، استفاده از خاکستر بادی به تنهایی برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رس برای راه سازی و طراحی فونداسیون ممکن است کافی نباشد. بنا براین استفاده از خاکستر بادی همراه با آهک گزینه مناسبی برای بهبود مشخصات خاک استفاده می‌شود که توجه محققین را به خود جلب کرده است [۶]. سیواپولیا و همکاران گزارش کردند که اضافه کردن خاکستر بادی همراه با آهک به خاک موجب افزایش پلاستیسیته خاک می‌شود. هر چند بهبود پلاستیسیته خاک با افزودن ۱٪ گچ به این ترکیب بارزتر است.

از سوی دیگر، توجه روزافزون به چالش‌های زیست محیطی، محققان را تشویق به استفاده از مصالح نوین و یا استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی برای بهبود خواص مهندسی و کاهش نگرانی‌های زیست محیطی کرده است [۷-۱۵]. در سال ۲۰۱۰، تاثیر استفاده از لایه ژئوگرید بر مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی ملات سیمان و آهک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس و ماسه مورد استفاده در تحقیق

Fig. 1. Particle size distribution curve for the coarse-grained and fine-grained soils

لاستیک فرسوده می‌تواند ضمن تأمین مقاومت مورد نیاز صرفه اقتصادی هم به همراه داشته باشد. این تحقیق به طور جامع اثرات افزودن پودر و الیاف لاستیک را بر روی انواع خواص مکانیکی شفته آهکی و شفته خاکستر بادی-آهکی را ارزیابی می‌کند.

۲- مواد و روش آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح

خاک مورد استفاده در شفته آهکی از معدن شن و ماسه اختیار آباد کرمان و خاک رسی ریزدانه از منطقه ای واقع در شهر کرمان با مختصات جغرافیایی ۵۷.۳۸۰ و ۲۸۹/۳۰ از اعماق ۱ تا ۳ متری تهیه شد. برای بررسی رفتار خاک ابتدا آزمایش‌های اولیه بر روی خاک انجام گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک‌ها در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به معیارهای رده‌بندی آیین نامه ASTM، خاک مورد نظر از نوع رس با پلاستیسیته کم و آهک مصرفی در این تحقیق، آهکی هیدراته با درصد بالایی از عناصر هیدراته می‌باشد [۳۷]. خاکستر بادی مورد استفاده برای تولید نمونه‌های شفته خاکستر بادی-آهکی از کارخانه زرنند کرمان تهیه شده است. مشخصات این مصالح در جدول (۲) نشان داده شده است. ذرات

موضوع است که المانهای لاستیکی به عنوان جاذب انرژی عمل میکنند. در نمونه‌های ترکیبی تا محدوده ای خاص، افزایش فشار همه جانبه باعث افزایش مقاومت می‌شود و بعد از آن با افزایش فشار همه جانبه مقاومت برشی کاهش می‌یابد. [۲۹-۲۶]. درسالهای اخیر نیز مطالعات کامل تری بر روی خصوصیات و رفتار خاک‌های بهسازی شده با خرده لاستیک و مصالح جدید و یا سنتی انجام شده است. این مطالعات بر ضرورت استفاده از مصالح بازیافتی برای حفظ و پایداری محیط زیست تأکید دارند. [۳۶-۳۰] نگاهی اجمالی به مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی بر روی خاک تثبیت شده با آهک و شفته آهکی انجام شده است، ولی مطالعات بسیار محدودی برای ارزیابی خواص مکانیکی خاک بهسازی شده با ترکیب مصالح سنتی موجود در استان‌های کویری و مواد بازیافتی موجود در آن مناطق وجود دارد. محققان قبلی بر امکان استفاده از لاستیک‌های زائد در شفته معمولی برای کاهش اثرات منفی زیست محیطی آن‌ها توصیه کرده اند، با این وجود کاربرد لاستیک به دلیل کاهش مقاومت خاک بهسازی شده با آهک به طور گسترده در عمل مورد استفاده قرار نگرفته است. با توجه به اینکه کاربرد شفته آهکی و شفته خاکستر بادی-آهکی به تنهایی برای دستیابی به مقاومت بالا مقرون به صرفه نیست، ترکیب این مصالح با ذرات

جدول ۱. مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Mechanical properties of the studied soils

مشخصات	نتایج	مراجع
خاک ریزدانه		
نوع خاک ریز دانه	CL-ML	ASTM 2487-11
درجه فعالیت خاک	0.47	-
حد روانی	33%	ASTM D423-66
شاخص خمیری	8%	ASTM 4318-D05 A
ماکزیمم وزن مخصوص خشک	18.7 kN/m ³	AASHTO T180
رطوبت بهینه	15%	AASHTO T180
توده ویژه	2.57	ASTM D854-10
خاک درشت دانه		
نوع خاک	SW-SM	ASTM 2487-11
اندازه مؤثر	0.1	ASTM D422-63
ضریب یکنواختی	34	ASTM D422-63
ضریب خمیدگی	1.9	ASTM D422-63
توده ویژه	2.65	ASTM D854-10

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده

Table 2. Chemical features of used fly ash

Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	tio ₂	Cao	V ₂ O ₅	So ₃	K ₂ O
۵۵/۸	۳۷/۹	۷/۰۹	۲/۲۵	۳/۹۶	۰/۰۹	۰/۳۲	۱/۵۵

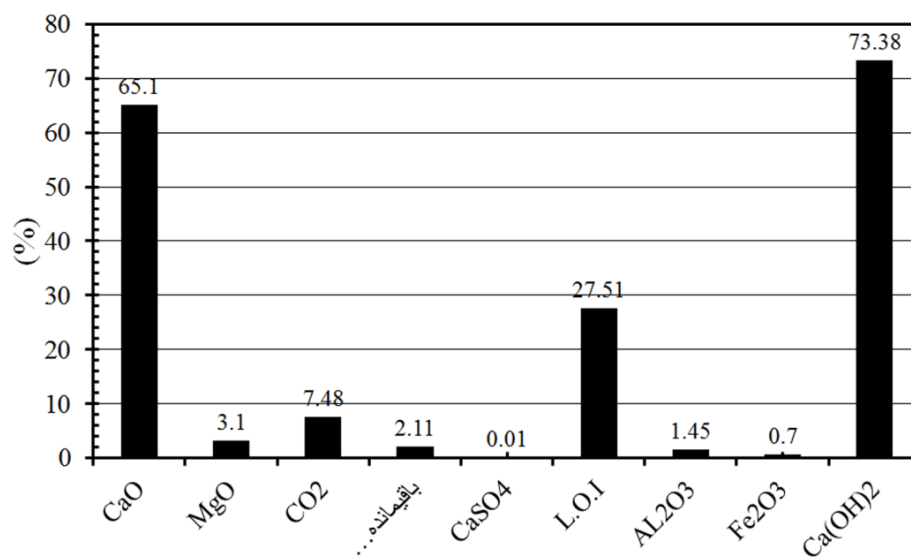
آزمایش‌های تک محوری بر روی شفته‌های آهکی ارائه شده است [۵۰]. بر اساس این استاندارد مقدار کرنش محوری نباید از ۵٪ ارتفاع نمونه بیشتر باشد و همچنین سرعت بارگذاری باید بین ۰/۵ mm/min تا ۲mm/min باشد. در این پژوهش سرعت بارگذاری دستگاه برابر ۱mm/min تنظیم و کنترل شده است. پس از دو روز نمونه‌ها برای عمل آوری از قالب بیرون آمده و درون پلاستیک قرار داده شدند (۲). نمونه‌ها پس از عمل آوری در داخل دستگاه قرار داده می‌شوند. تمامی پارامترها و شرایط ساخت نمونه‌ها طبق تحقیق اخیر توسط جهاننداری و همکاران (۲) انجام شد. آزمایش تک‌محوری پس از کنترل‌های لازم از جهت اعمال دقیق بار به مرکز نمونه و سرعت بارگذاری، انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها، منحنی‌های مقاومت

لاستیک مورد استفاده مستقیماً از کارخانه لاستیک بارز کرمان خریداری شده است. قطر این ذرات بین ۰/۲mm تا ۲mm می‌باشد. همچنین الیاف لاستیک مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۰/۲mm، طول ۲mm تا ۲۵mm، مقاومت کششی ۱۸۰MPa و نقطه ذوب ۲۲۰°C می‌باشد. طبق توصیه‌های مطالعات قبلی، از آب لوله‌کشی برای قالب‌گیری نمونه‌ها و از آب مقطر برای آزمایش‌های خصوصیات استفاده شده است [۹، ۲۱، ۴۹-۳۸]. تصاویر مربوط به مصالح مصرفی در شکل (۲) آورده شده است. هم‌چنین، تجزیه شیمیایی آهک مصرفی در شکل ۳ نشان داده شده است. تست‌های مقاومت فشاری تک محوری (UCS) بر روی تمام نمونه‌ها انجام شد. در استاندارد ASTM D 5102 ضوابطی برای انجام



شکل ۲. تصاویر مصالح مصرفی (الف) خاکستر بادی (ب) پودر لاستیک (ج) الیاف لاستیک

Fig. 2. Used materials (a) fly ash (b) rubber powder (c) rubber fibers



شکل ۳. نتایج تجزیه شیمیایی آهک مصرف شده در این تحقیق

Fig. 3. Results of chemical analysis of lime used in this study

در معادله (۱)، $(\Delta V/V)$ نشان دهنده تغییرات حجمی، σ فشار هیدرواستاتیک، ϵ_{xx} ، ϵ_{yy} و ϵ_{zz} به ترتیب جهت کرنش‌های مستقیم موازی با محورهای x ، y و z ، ν نسبت پواسون است که با توجه به شرایط خاک ۳/۰ در نظر گرفته می‌شود، و E_s ضریب الاستیسیته خاک می‌باشد. به منظور بررسی مقاومت نمونه‌ها در برابر تغییر شکل عرضی، مدول برشی نمونه‌ها طبق معادله (۲) محاسبه شد [۵۲].

تک‌محوری نهایی نمونه‌ها و نیز کرنش محوری متناظر با آن برداشت شد. مدول سکانت برای ارزیابی مقاومت شفته آهک در برابر تغییر شکل استفاده می‌شود. این ضریب با تقسیم ۵۰٪ مقاومت فشاری بیشینه به کرنش محوری مربوطه محاسبه شد [۵۰].

مدول حجمی (K) مقاومت نمونه‌ها را در برابر فشار اندازه‌گیری می‌کند و از طریق رابطه (۱) محاسبه شد [۵۱].

$$G(\text{MPa}) = \frac{\sigma_{xy}}{\epsilon_{xy} + \epsilon_{yz}} = \frac{\sigma_{xy}}{2\epsilon_{xy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$K(\text{MPa}) = \frac{\sigma}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{\sigma}{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}} = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های شفته آهک با و بدون مواد افزودنی

Table 3. Mixing plan for lime concrete samples with and without additive materials

شماره اختلاط	ماده افزودنی	ماسه (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	مقدار آهک (kg/m ³)	ماده افزودنی (%)	آب (kg/m ³)
۱	–	۱۰۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۰	۳۳۶
۲	پودر لاستیک	۹۶۰	۲۳۰	۱۷۰	۴	۳۳۶
		۹۲۰	۲۳۰	۱۷۰	۸	۳۳۶
		۸۸۰	۲۳۰	۱۷۰	۱۲	۳۳۶
		۸۴۰	۲۳۰	۱۷۰	۱۶	۳۳۶
		۸۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۲۰	۳۳۶
		۷۵۰	۲۳۰	۱۷۰	۲۵	۳۳۶
		۷۰۰	۲۳۰	۱۷۰	۳۰	۳۳۶
		۹۹۵	۲۳۰	۱۷۰	۰/۵	۳۳۶
۳	الیاف لاستیک		۲۳۰	۱۷۰	۱	۳۳۶
			۲۳۰	۱۷۰	۱/۵	۳۳۶
			۲۳۰	۱۷۰	۲	۳۳۶
			۲۳۰	۱۷۰	۲	۳۳۶

جدول ۴. طرح اختلاط نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی با و بدون مواد افزودنی

Table 4. Mixing plan for lim- concrete and fly ash samples with and without additive materials

شماره اختلاط	ماده افزودنی	ماسه (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	مقدار آهک (kg/m ³)	خاکستر بادی (kg/m ³)	در صد افزودنی	آب (kg/m ³)
۱	–	۱۰۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۰	۳۳۶
۲	پودر لاستیک	۹۶۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۴	۳۳۶
		۹۲۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۸	۳۳۶
		۸۸۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱۲	۳۳۶
		۸۴۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱۶	۳۳۶
		۸۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲۰	۳۳۶
		۷۵۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲۵	۳۳۶
		۷۰۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۳۰	۳۳۶
		۹۹۵	۲۳۰	۸۵	۸۵	۰/۵	۳۳۶
۳	الیاف لاستیک	۹۹۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱	۳۳۶
		۹۸۵	۲۳۰	۸۵	۸۵	۱/۵	۳۳۶
		۹۸۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲	۳۳۶
		۹۸۰	۲۳۰	۸۵	۸۵	۲	۳۳۶

جدول ۵. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه درصد‌های مختلف پودر لاستیک

Table 5. Geotechnical parameters of lime-concrete samples with different percentages of rubber powder

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل‌آوری (روز)	مقاومت فشاری پیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهنگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک	۳	۲۰۰	۱/۹۲	۵/۲۱	۹۳/۴	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۲۷۰	۱/۷۱	۷/۸۹	۱۰۲/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۸
		۲۸	۳۴۰	۱/۵۲	۱۱/۱۸	۱۱۰/۷۶	۴/۳۰	۹/۳۲
		۹۰	۳۵۰	۱/۲۰	۱۴/۵۸	۱۱۲	۵/۶۱	۱۲/۱۵
	آهک + ۴٪ پودر لاستیک	۳	۱۹۰	۲/۱۰	۴/۵۲	۹۲/۱۶	۱/۷۳	۳/۷۷
		۷	۲۶۳	۱/۹۰	۶/۹۲	۱۰۱/۲۱	۲/۶۶	۵/۷۷
		۲۸	۳۳۲	۱/۶۹	۹/۸۲	۱۰۹/۷۶	۳/۷۸	۸/۱۸
		۹۰	۳۴۱	۱/۳۹	۱۲/۲۷	۱۱۰/۸۸	۴/۷۲	۱۰/۲۲
	آهک + ۸٪ پودر لاستیک	۳	۱۸۴	۲/۱۹	۴/۲۰	۹۱/۴۲	۱/۶۲	۳/۵۰
		۷	۲۵۴	۲/۰۰	۶/۳۵	۱۰۰/۰۹	۲/۴۴	۵/۲۹
		۲۸	۳۲۵	۱/۸۱	۸/۹۸	۱۰۸/۹۰	۳/۴۵	۷/۴۸
		۹۰	۳۳۳	۱/۴۶	۱۱/۴۰	۱۰۹/۸۹	۴/۳۸	۹/۵۰
	آهک + ۱۲٪ پودر لاستیک	۳	۱۷۶	۲/۳۰	۳/۸۳	۹۰/۴۲	۱/۴۷	۳/۱۹
		۷	۲۴۶	۲/۰۸	۵/۹۱	۹۹/۱۰	۲/۲۷	۴/۹۲
		۲۸	۳۱۷	۱/۹۰	۸/۳۴	۱۰۷/۹۱	۳/۲۱	۶/۹۵
		۹۰	۳۲۷	۱/۶۴	۹/۹۷	۱۰۹/۱۵	۳/۸۳	۸/۳۱
	آهک + ۱۶٪ پودر لاستیک	۳	۱۷۰	۲/۴۱	۳/۵۳	۸۹/۶۸	۱/۳۶	۲/۹۴
		۷	۲۳۹	۲/۲۶	۵/۲۹	۹۸/۲۴	۲/۰۳	۴/۴۱
		۲۸	۳۱۱	۲/۰۱	۷/۷۴	۱۰۷/۱۶	۲/۹۸	۶/۴۵
		۹۰	۳۲۱	۱/۷۷	۹/۰۷	۱۰۸/۴۰	۳/۴۹	۷/۵۹
	آهک + ۲۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۶۳	۲/۴۹	۳/۲۷	۸۸/۸۱	۱/۲۶	۲/۷۲
		۷	۲۳۲	۲/۲۷	۵/۱۱	۹۷/۳۷	۱/۹۶	۴/۲۶
		۲۸	۳۰۷	۲/۱۲	۷/۲۴	۱۰۶/۶۷	۲/۷۸	۶/۰۳
		۹۰	۳۱۵	۱/۸۸	۸/۳۸	۱۰۷/۶۶	۳/۲۲	۶/۹۸
۲	آهک + ۲۵٪ پودر لاستیک	۳	۱۵۵	۲/۶۰	۲/۹۹	۸۷/۸۲	۱/۱۵	۲/۵۰
		۷	۲۲۶	۲/۴۰	۴/۷۱	۹۶/۶۲	۱/۸۱	۳/۹۲
		۲۸	۳۰۰	۲/۱۹	۶/۸۵	۱۰۵/۸۰	۲/۶۳	۵/۷۱
		۹۰	۳۰۷	۱/۹۵	۷/۸۸	۱۰۶/۶۷	۳/۰۳	۶/۵۷
	آهک + ۳۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۴۸	۲/۷۴	۲/۷۰	۸۶/۹۵	۱/۰۴	۲/۲۵
		۷	۲۲۰	۲/۵۳	۴/۳۵	۹۵/۸۸	۱/۶۷	۳/۶۲
		۲۸	۲۹۴	۲/۳۰	۶/۳۹	۱۰۵/۰۶	۲/۴۶	۵/۳۲
		۹۰	۳۰۱	۱/۹۹	۷/۵۶	۱۰۵/۹۲	۲/۹۱	۶/۳۰

جدول ۶. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه درصدهای مختلف الیاف لاستیک

Table 6. Geotechnical parameters of lime-concrete samples with different percentages of rubber fiber

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل‌آوری (روز)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهندگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک	۳	۲۰۰	۱/۹۲	۵/۲۱	۹۳/۴	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۲۷۰	۱/۷۱	۷/۸۹	۱۰۲/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۸
		۲۸	۳۴۰	۱/۵۲	۱۱/۱۸	۱۱۰/۷۶	۴/۳۰	۹/۳۲
		۹۰	۳۵۰	۱/۲۰	۱۴/۵۸	۱۱۲	۵/۶۱	۱۲/۱۵
۳	آهک + ۰/۵٪ الیاف لاستیک	۳	۳۰۰	۲/۸۸	۵/۲۱	۱۰۵/۰۸	۲/۰۰	۴/۳۴
		۷	۴۰۵	۲/۶۷	۷/۵۸	۱۱۸/۸۲	۲/۹۱	۶/۳۱
		۲۸	۵۰۶	۲/۴۶	۱۰/۲۸	۱۳۱/۳۴	۵/۱۴	۸/۵۷
		۹۰	۵۲۱	۲/۱۰	۱۲/۴۰	۱۳۳/۲۰	۴/۷۷	۱۰/۳۳
	آهک + ۱٪ الیاف لاستیک	۳	۳۰۵	۳/۳۱	۴/۶۱	۱۰۶/۴۲	۱/۷۷	۳/۸۴
		۷	۴۱۱	۳/۱۱	۶/۶۱	۱۱۹/۵۶	۲/۵۴	۵/۵۱
		۲۸	۵۱۴	۲/۹۵	۸/۷۱	۱۳۲/۳۳	۳/۳۵	۷/۲۶
		۹۰	۵۳۰	۲/۶۵	۱۰	۱۳۴/۳۲	۳/۸۵	۸/۳۳
	آهک + ۱/۵٪ الیاف لاستیک	۳	۲۸۸	۳/۵۱	۴/۱۰	۱۰۴/۳۱	۱/۵۸	۳/۴۲
		۷	۳۸۹	۳/۳۴	۵/۸۲	۱۱۶/۸۳	۲/۲۴	۴/۸۵
		۲۸	۴۸۶	۳/۰۷	۷/۹۱	۱۲۸/۸۶	۳/۰۴	۶/۵۹
		۹۰	۵۰۱	۲/۸۱	۸/۹۱	۱۳۰/۷۲	۳/۴۳	۷/۴۲
	آهک + ۲٪ الیاف لاستیک	۳	۲۷۴	۳/۷۷	۳/۶۳	۱۰۲/۵۷	۱/۳۹	۳/۰۲
		۷	۳۷۰	۳/۵۵	۵/۲۱	۱۱۴/۴۸	۲/۰۰	۴/۳۴
		۲۸	۴۶۲	۳/۳۲	۶/۹۶	۱۲۵/۸۹	۲/۶۸	۵/۸۰
		۹۰	۴۷۷	۳/۰۶	۷/۷۹	۱۲۷/۷۴	۳/۰۰	۶/۴۹

است که هر ماده افزودنی بسته به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خود تأثیرات متفاوتی بر مقاومت، کرنش شکست، و مدول‌های مکانیکی دارد. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به طراحی مخلوط‌های بهینه برای کاربردهای مهندسی و ژئوتکنیکی کمک کند. در این بخش اثرات این افزودنی‌ها به تفکیک بررسی شده است.

طبق AASHTO T307، مدول انعطاف پذیری یک پارامتر برای اندازه‌گیری واکنش الاستیک خاک به تنش است. برخی پارامترهای موثر بر این ضریب شامل نوع خاک (درشت دانه یا ریز دانه)، شرایط بارگذاری، میزان خاک و تراکم خاک می‌شود. این ضریب مطابق معادله (۳) به دست می‌آید [۵۳].

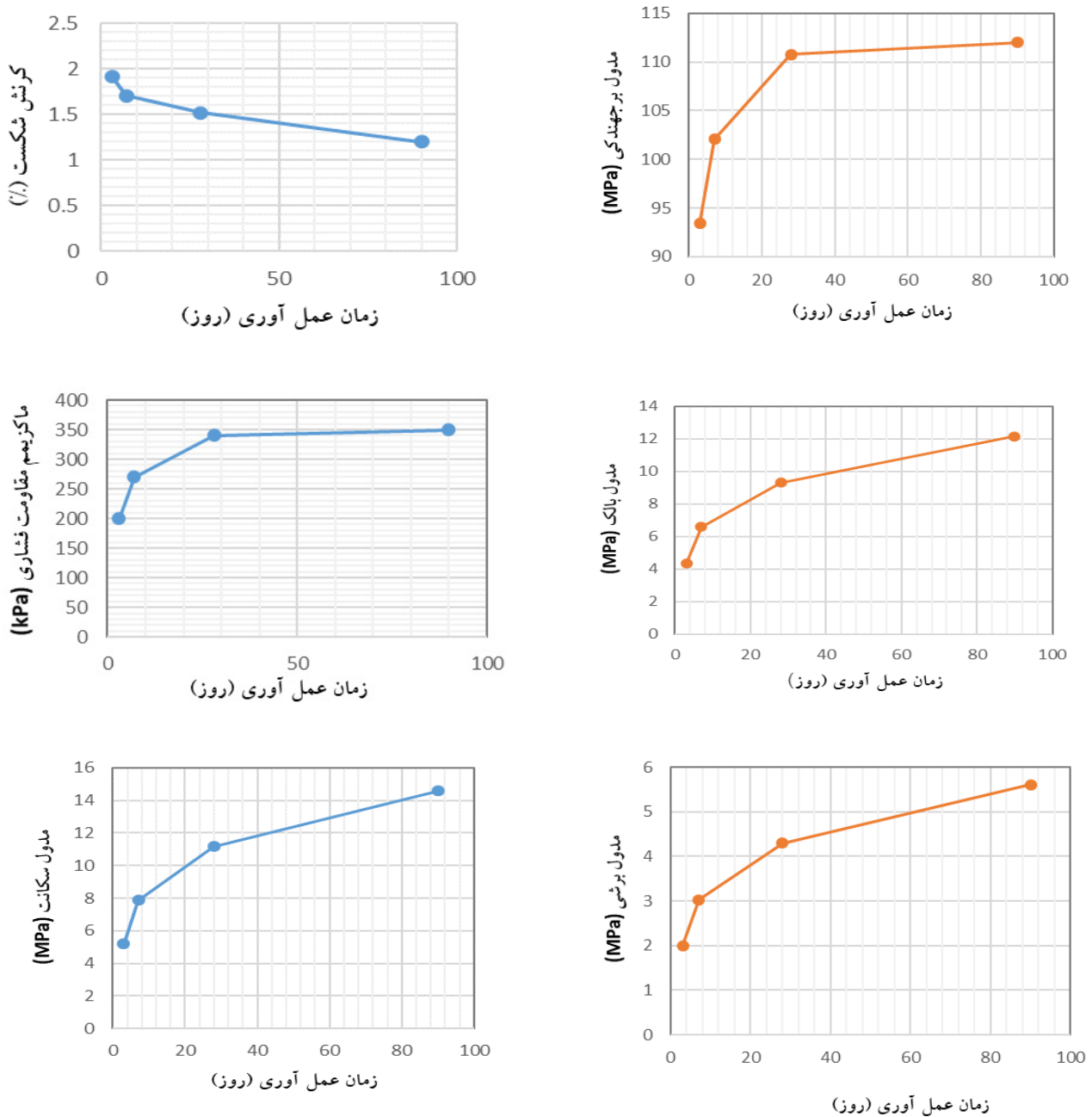
$$M_r \text{ (MPa)} = 0.124 \times \text{UCS (KPa)} + 68.8 \quad (3)$$

۳-۱- بررسی خواص مکانیکی شفته آهکی بهسازی شده

در جدول (۵) خلاصه نتایج اندازه‌گیری پارامترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک به همراه پودر لاستیک و در جدول (۶) پارامترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک با الیاف لاستیک نشان شده است. در اشکال (۴) الی (۱۶) نتایج به تفکیک نشان داده شده است. در شکل (۴) ارتباط بین مقاومت فشاری بیشینه نمونه‌های حاوی شفته آهک اولیه و زمان عمل‌آوری

۳- بحث و بررسی

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی اثرات افزودن درصد‌های مختلف پودر لاستیک و الیاف لاستیک بر خواص مکانیکی شفته آهکی و شفته خاکستر بادی-آهکی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری می‌باشد، نتایج نشان‌دهنده این

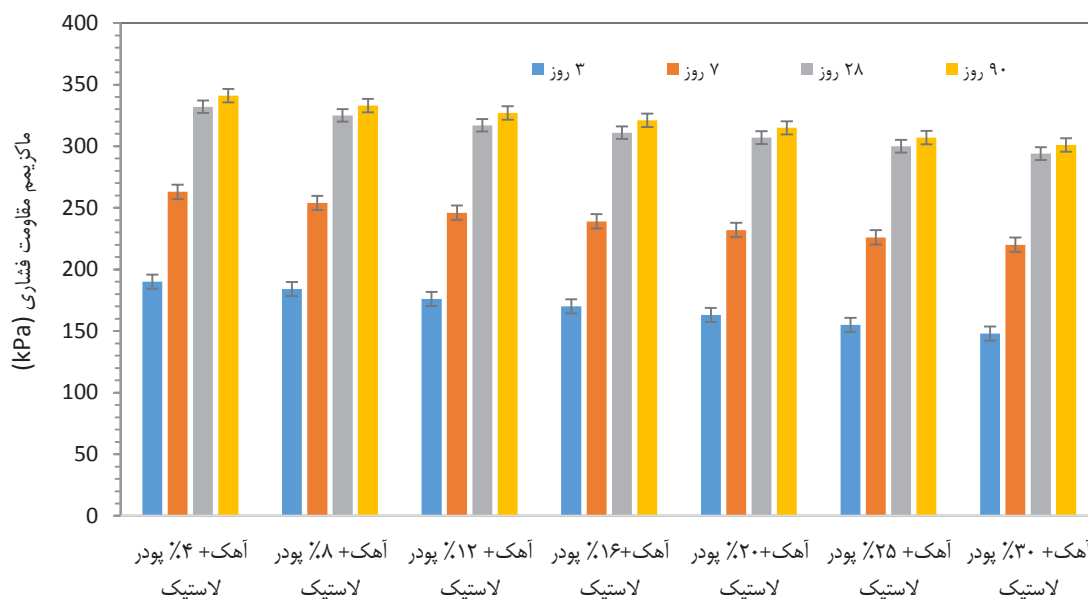


شکل ۴. پارمترهای مکانیکی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری متفاوت

Fig. 4. Mechanical parameters of lime concrete samples at the different curing times

پوزولانی بین هیدروکسید کلسیم (از آهک) و سیلیس/آلومینا در خاک، منجر به تشکیل ژل‌های سیمانی (C-S-H و C-A-H) می‌شود. این محصولات سیمانی به مرور زمان باعث پر شدن منافذ، کاهش تخلخل، و افزایش تراکم خاک می‌شوند که مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند. کاهش نرخ افزایش مقاومت بعد از ۲۸ روز به دلیل کاهش میزان واکنش‌ها و تکمیل نسبی روند تشکیل ژل‌های سیمانی است. در مراحل ابتدایی، واکنش‌ها سریع‌تر انجام

در حالتی که مواد افزودنی به شفته آهک اضافه نشده باشد نشان داده شده است. بر اساس نتایج با افزایش زمان عمل آوری از ۳ به ۹۰ روز، مقاومت فشاری از ۲۰۰ MPa به ۳۵۰ MPa افزایش یافت. با این حال با افزایش زمان عمل آوری از ۲۸ به ۹۰ این افزایش مقاومت حدود ۳٪ می‌باشد که کمترین میزان است. به عبارتی دیگر بعد از ۲۸ روز نرخ افزایش مقاومت کمتر می‌شود. به نظر می‌رسد که در نمونه‌های حاوی آهک، واکنش‌های



شکل ۵. تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مقاومت فشاری بیشینه نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Fig. 5. Effects of the rubber powder on the maximum compressive strength of lime concrete samples

افزایش یافت در حالی که با افزایش زمان عمل آوری از ۲۸ به ۹۰، از $110/8 \text{ MPa}$ به 112 MPa افزایش یافت. همانند مدول سکانت و حجمی، روند مشابهی برای مدول برشی مشاهده می شود. با توجه به نتایج به دست آمده این نمونه ها به عنوان نمونه های مرجع برای مقایسه با سایر نمونه ها که حاوی مواد افزودنی هستند بررسی خواهد شد. به طور کلی می توان گفت که نمونه های حاوی آهک به دلیل واکنش های پوزولانی و پدیده سیمانی شدن در طول زمان عمل آوری، ویژگی های مکانیکی خاک از قبیل مقاومت فشاری، مدول برشی، مدول حجمی و مدول برجهنگی و همچنین سختی را بهبود می بخشد. کاهش نرخ بهبود این ویژگی ها در زمان های طولانی تر به تکمیل فرایند واکنش ها و محدودیت در دسترسی به آب و یون های آزاد مرتبط است. این نتایج اساس خوبی برای مقایسه بهسازی با شفته آهک را با نمونه های حاوی مواد افزودنی دیگر فراهم می کند.

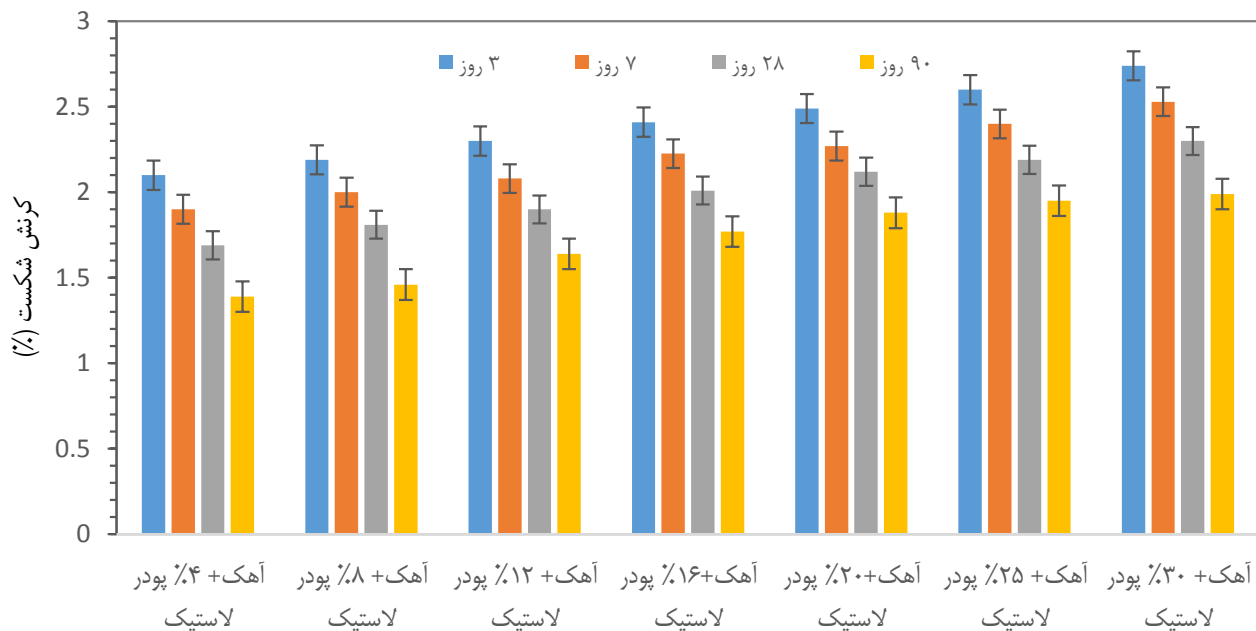
۳-۱-۱- شفته آهکی حاوی پودر لاستیک

شکل ۵ تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک را بر روی مقاومت فشاری بیشینه شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری را نشان می دهد. با افزایش درصد پودر لاستیک در تمامی زمان های عمل آوری، مقاومت فشاری بیشینه کمتر از نمونه شفته آهک بدون پودر لاستیک است. هر چند در تمام نمونه ها با درصدهای مختلف پودر لاستیک مقاومت فشاری

می شوند، اما با پیشرفت زمان و کاهش آب آزاد، روند کاهشی واکنش ها بوقوع می پیوندد.

کرنش شکست مربوط به مقاومت فشاری بیشینه، نیز با افزایش زمان عمل آوری روند کاهشی پیدا می کند. در زمان عمل آوری ۹۰ روز نسبت به زمان عمل آوری ۳ روز، کرنش شکست حدود $37/5\%$ کاهش می یابد. بر اساس شکل (۴) با افزایش زمان عمل آوری مدول سکانت به دلیل افزایش واکنش ها پوزولانی و کاهش آب افزایش می یابد. بیشترین نرخ افزایش مدول سکانت مربوط به افزایش زمان عمل آوری از ۷ به ۲۸ روز است که حدود 41% است. با افزایش زمان عمل آوری از ۲۸ روز به ۹۰ روز 30% افزایش در مدول سکانت مشاهده می شود. افزایش سختی نمونه ها به دلیل رفتار سیمانی شدن خاک و کاهش قابلیت تغییر شکل منجر به کاهش کرنش شکست می شود. این کاهش نشان دهنده رفتار شکننده تر نمونه ها در طول زمان عمل آوری است.

با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین مدول حجمی و سکانت وجود دارد. بنابراین هم چنان که انتظار می رفت مدول حجمی نیز با افزایش زمان عمل آوری افزایش قابل توجهی داشت. از آنجائیکه مدول برجهنگی رابطه ی مستقیم و خطی با مقاومت تک محوری محصور نشده (UCS) دارد، با افزایش زمان عمل آوری این پارامتر نیز افزایش یافت. با افزایش زمان عمل آوری از ۳ به ۷، مدول برجهنگی از $93/4 \text{ MPa}$ به 102 MPa



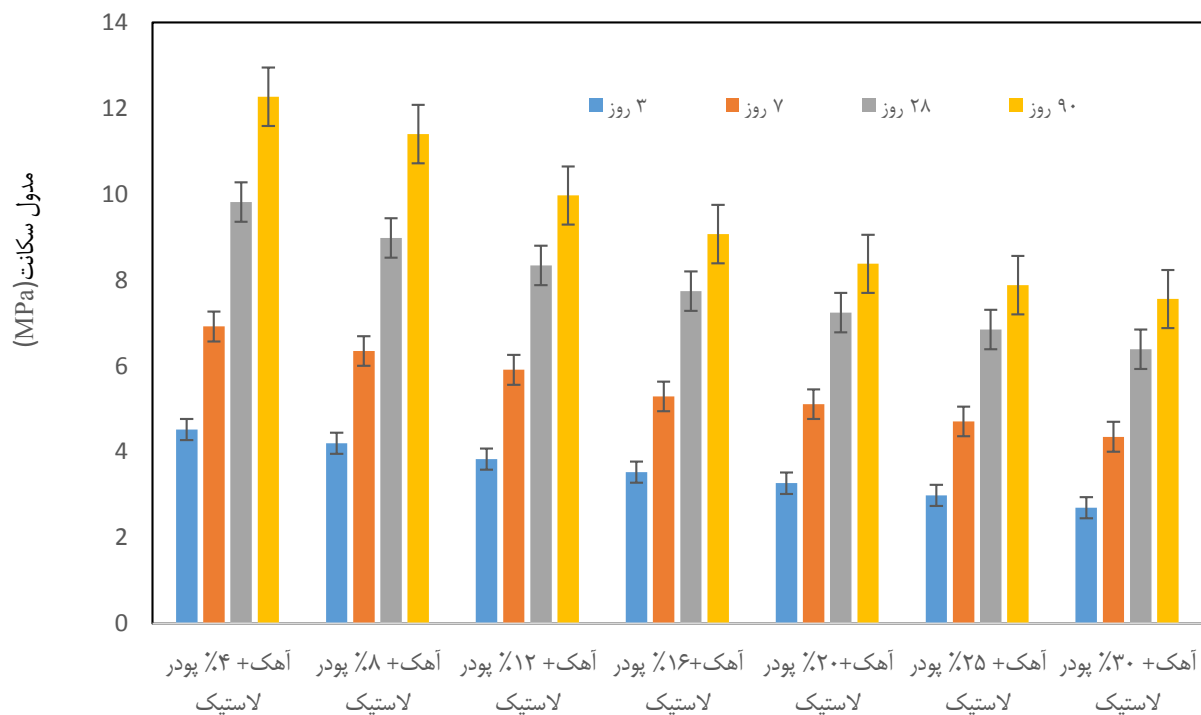
شکل ۶. تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر کرنش شکست نمونه های شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری

Fig. 6. Effects of the rubber powder on the failure strain of lime concrete samples at the curing times

با افزایش زمان عمل آوری افزایش می یابد. به عنوان مثال بیشترین میزان مقاومت در نمونه با ۴٪ پودر لاستیک و زمان عمل آوری ۹۰ روز اتفاق افتاد که حدود 34 MPa گزارش شد که در مقایسه با نمونه مشابه شفته آهک بدون پودر لاستیک و زمان عمل آوری مشابه حدود ۲/۵٪ کاهش یافته است که مقدار ناچیزی است. بنابراین نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک از نظر مقاومت فشاری قابل مقایسه با نمونه شفته آهک بدون پودر لاستیک است. شکل (۷) تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول سکانت شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری نشان می دهد. براساس نتایج مدول سکانت نمونه های حاوی درصد های مختلف پودر لاستیک در تمام زمان های عمل آوری کمتر از مدول سکانت نمونه شفته آهک در زمان های عمل آوری مشابه است. نکته دیگر اینکه افزایش درصد پودر لاستیک در تمام زمان های عمل آوری باعث کاهش مدول سکانت می شود. هر چند افزایش زمان عمل آوری باعث افزایش مدول سکانت در درصد های مختلف می شود. بیشترین مقدار مدول سکانت برای نمونه ی حاوی ۴٪ پودر لاستیک در زمان عمل آوری ۹۰ روز به دست آمد که حدود $12/27 \text{ MPa}$ است که در مقایسه با نمونه شفته آهک در زمان عمل آوری مشابه حدود ۱۶٪ کاهش را نشان داد.

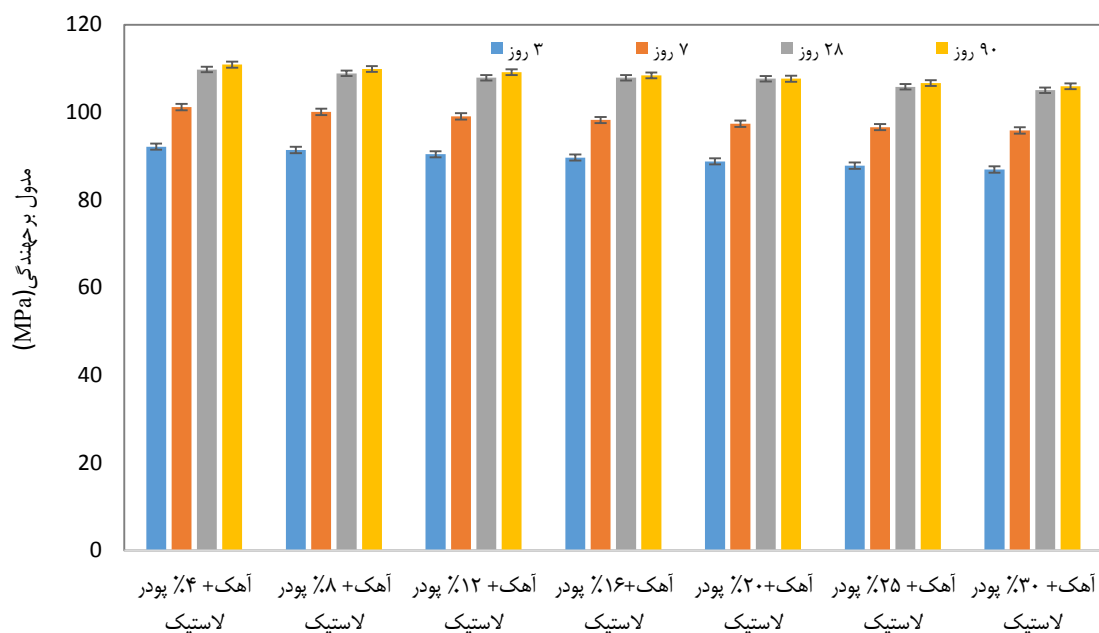
شکل (۸) تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول برجهنگی شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری نشان می دهد. بر اساس نتایج حاصله، مدول برجهنگی نمونه های شفته آهک حاوی پودر

با افزایش زمان عمل آوری افزایش می یابد. به عنوان مثال بیشترین میزان مقاومت در نمونه با ۴٪ پودر لاستیک و زمان عمل آوری ۹۰ روز اتفاق افتاد که حدود 34 MPa گزارش شد که در مقایسه با نمونه مشابه شفته آهک بدون پودر لاستیک و زمان عمل آوری مشابه حدود ۲/۵٪ کاهش یافته است که مقدار ناچیزی است. بنابراین نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک از نظر مقاومت فشاری قابل مقایسه با نمونه شفته آهک بدون پودر لاستیک است. شکل (۶) تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک را بر روی کرنش شکست شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری نشان می دهد. با توجه به نتایج حاصله، کرنش شکست نمونه های حاوی درصد های مختلف پودر لاستیک، در تمام زمان های عمل آوری بیشتر از نمونه ی شفته آهک بدون ماده افزودنی است که گواه شکل پذیری بیشتر نمونه های حاوی پودر لاستیک است. هم چنین با افزایش زمان عمل آوری در تمام نمونه های حاوی درصد های مختلف پودر لاستیک، کرنش شکست کاهش پیدا کرد. نکته دیگر اینکه با افزایش زمان عمل آوری از ۳ به ۷ روز، کرنش شکست ۵٪ الی ۱۰٪ کاهش پیدا کرد، در حالی که با افزایش زمان عمل آوری از ۲۸ به ۹۰ روز کرنش شکست در حدود ۱۰٪ الی ۲۰٪ کاهش را نشان داد. در مورد تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک به شفته آهک، می توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش درصد پودر لاستیک، کرنش



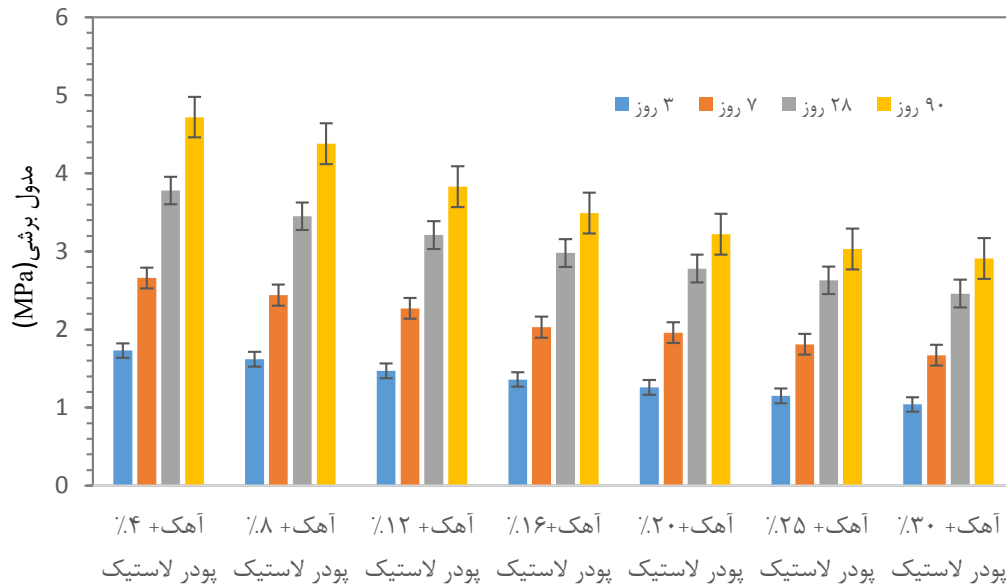
شکل ۷. تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک بر مدول سکانت شفته آهک در زمانهای عمل آوری متفاوت

Fig. 7. Effects of the rubber powder on the secant modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل ۸. تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک بر مدول برجهندگی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری

Fig. 8. Effects of the rubber powder on the resilient modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل ۹. تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک بر مدول برشی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل‌آوری

Fig. 9. Effects of the rubber powder on the shear modulus of lime concrete at the curing times

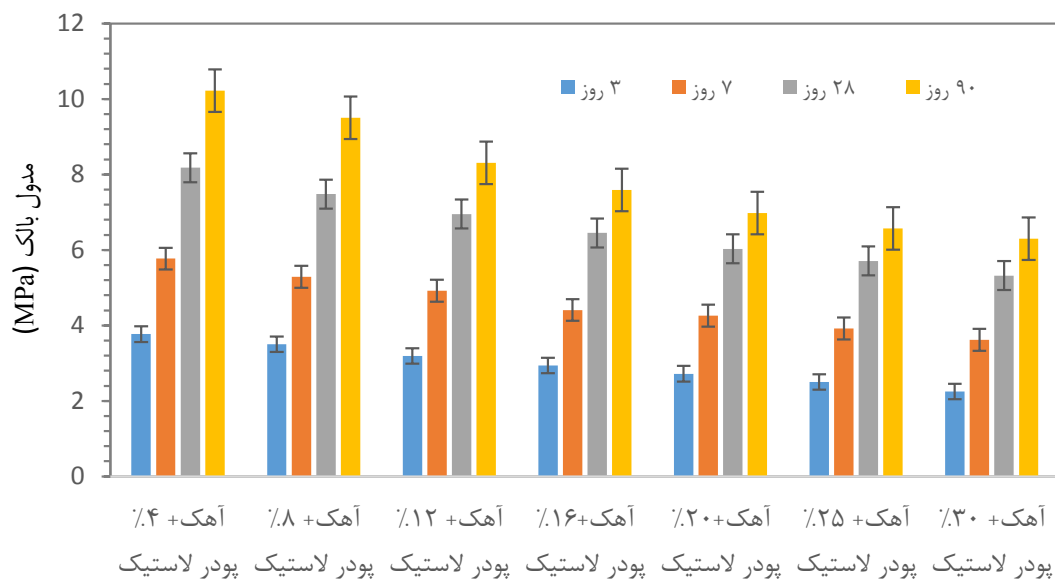
افزایش مدول برشی می‌شود. این نکته قابل توجه است که با افزایش درصد پلاستیک از ۸٪ تا ۳۰٪ نرخ افزایش مدول برجهندگی در بازه ی ۲۸-۹۰ روز، نسبت به افزایش درصد پودر پلاستیک از ۴٪ تا ۸٪ کمتر است.

شکل (۱۰) تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول حجمی شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج مدول حجمی نمونه‌های حاوی ماده افزودنی پودر لاستیک کمتر از نمونه شفته آهک عاری از پودر پلاستیک است. همانگونه که در شکل مشخص است، با افزایش درصد پلاستیک از ۴٪ تا ۳۰٪ مدول حجمی در ابتدا با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و به تدریج این شیب کاهش می‌یابد. هم چنین کمترین و بیشترین مدول حجمی در تمام زمان‌های عمل‌آوری مربوط به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴٪ پودر لاستیک می‌شود. با این حال مقدار مدول حجمی با افزایش زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های با درصدهای مختلف پودر پلاستیک افزایش می‌یابد.

در توجیه فرایند فوق می‌توان گفت که پودر لاستیک ساختاری انعطاف‌پذیر و غیرچسبنده دارد که نمی‌تواند به خوبی با اجزاء آهک پیوند مکانیکی یا شیمیایی قوی ایجاد کند. این امر منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود. همچنین افزودن مقادیر بالاتر پودر لاستیک باعث کاهش تراکم‌پذیری و افزایش فضای خالی در مخلوط می‌شود که پیوندهای ایجاد

لاستیک ۶-۱٪ کمتر از مدول برجهندگی نمونه شفته آهک بدون ماده افزودنی در تمام زمان‌های عمل‌آوری است که نشان از تاثیر نه چندان زیاد پودر لاستیک بر مدول برجهندگی شفته آهک داشت. همانطور که در نمودار مشخص است مدول برجهندگی در درصدهای مختلف پودر لاستیک با افزایش زمان عمل‌آوری با شیب تقریباً ملایم و یکسانی افزایش می‌یابد. هم چنین مدول برجهندگی با افزایش درصد پودر لاستیک و در زمان عمل‌آوری یکسان، کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ۴٪ پودر لاستیک و زمان عمل‌آوری ۹۰ روز گزارش می‌شود.

شکل (۹) تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک را بر روی مدول برشی شفته آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. در این نمودار نشان داده شده است که افزودن پودر لاستیک به شفته آهک موجب کاهش مدول برشی می‌شود. همان گونه که در شکل (۹) مشخص است، کمترین میزان مدول برشی در تمام زمان‌های عمل‌آوری مربوط به آهک حاوی ۳۰٪ پودر لاستیک است و بیشترین مربوط به نمونه حاوی ۴٪ پودر پلاستیک است. بنابراین پر واضح است که افزایش درصد پودر لاستیک باعث کاهش مدول برشی می‌شود و تفاوت مدول برشی در دو درصد مختلف ۴٪ و ۳۰٪ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف حدود ۴۰٪ می‌باشد. هم چنین با توجه به نمودار افزایش زمان عمل‌آوری در تمام درصدها موجب



شکل ۱۰. تاثیر افزودن درصدهای مختلف پودر لاستیک بر مدول حجمی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل آوری متفاوت

Fig. 10. Effects of the rubber powder on the bulk modulus of lime concrete samples at the curing times

زنجیره‌ای (chain effect)، ذرات لاستیکی در مخلوط به صورت مؤثر در انتقال تنش‌ها از یک ذره به ذره دیگر نقش ایفا می‌کنند، که می‌تواند موجب افزایش مقاومت کلی مخلوط شود.

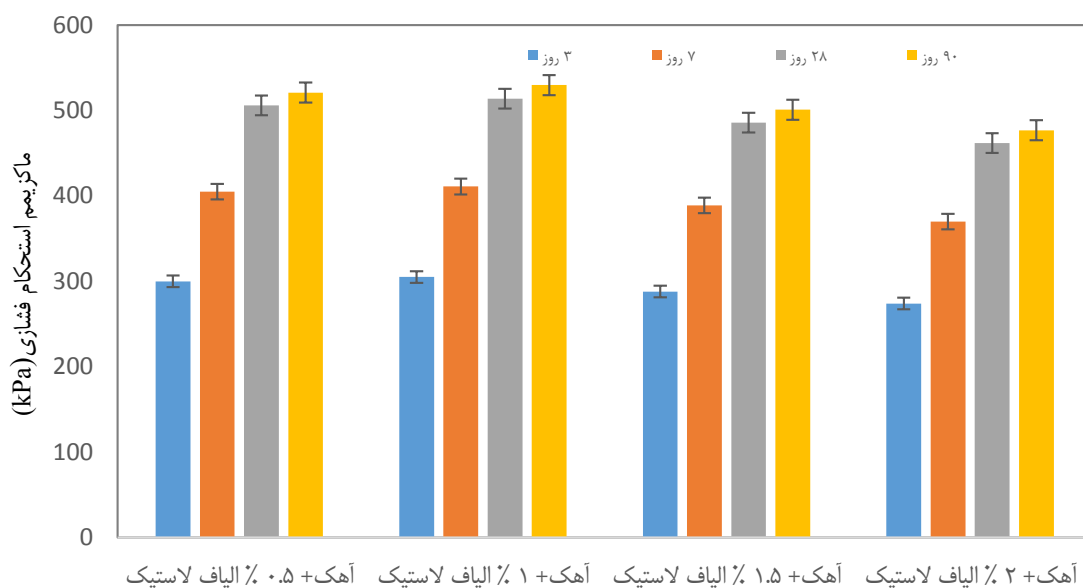
بر اساس شکل (۱۲) کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های ساخته شده ی دیگر است که حاکی از کاهش شکنندگی نمونه‌ها و افزایش شکل پذیری آن‌هاست. افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری ثابت و افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف یکسان به ترتیب موجب کاهش و افزایش کرنش شکست می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به ماهیت الاستیکی پودر لاستیک ربط داد که به مخلوط شفته آهک خاصیت انعطاف‌پذیری می‌دهند که باعث افزایش توانایی مخلوط در جذب کرنش بدون شکست می‌شود. همچنین وجود ذرات لاستیک در مخلوط باعث توزیع تنش‌های اعمالی به صورت یکنواخت‌تر می‌شود که منجر به افزایش کرنش شکست می‌گردد و شکست ناگهانی را به تعویق می‌اندازند.

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که مدول سکانت نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و

شده بین ذرات آهک و خاک را تضعیف می‌کند. همچنین پودر لاستیک از نظر شیمیایی غیر فعال است و در واکنش‌های پوزولانی یا هیدراتاسیون آهک شرکت نمی‌کند. از طرفی لاستیک ماده‌ای نرم و انعطاف‌پذیر است و افزودن آن باعث کاهش سختی کلی مخلوط می‌شود. با افزایش درصد پودر لاستیک، چسبندگی آهک و خاک کاهش یافته و خصوصیات الاستیک (مانند مدول‌های مختلف) تضعیف می‌شود. علاوه بر ذرات لاستیک به عنوان فاز ثانویه غیرچسبنده عمل کرده و باعث کاهش تماس مؤثر بین ذرات خاک و آهک می‌شوند.

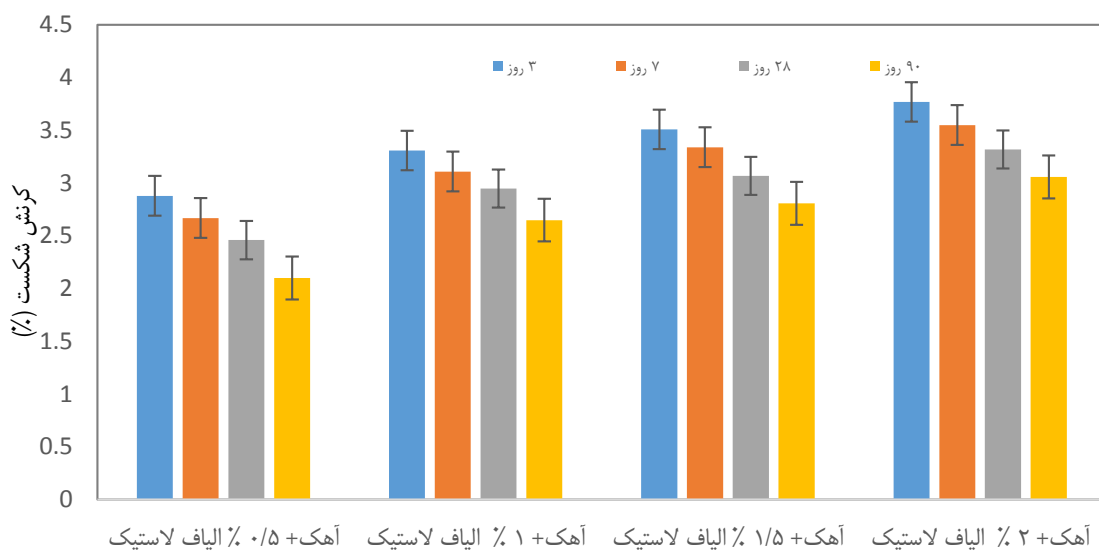
۳-۱-۲- شفته آهکی حاوی الیاف لاستیک

از شکل (۱۱) نتیجه می‌شود که افزودن الیاف لاستیک موجب افزایش نسبتاً زیاد مقاومت فشاری بیشینه در مقایسه با نمونه‌های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک می‌شود. افزودن ۵٪ و ۱٪ الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان، موجب افزایش مقاومت می‌شود و بعد از آن با افزودن مقادیر بیشتر الیاف لاستیک مقاومت فشاری کاهش یافت. این نتایج به دلیل این است که الیاف لاستیک به عنوان یک ماده ارتجاعی در مخلوط عمل می‌کنند و می‌توانند انرژی وارده ناشی از تنش‌های خارجی را جذب کرده و توزیع یکنواخت‌تری از تنش فراهم کنند. از طرفی با ایجاد اثر



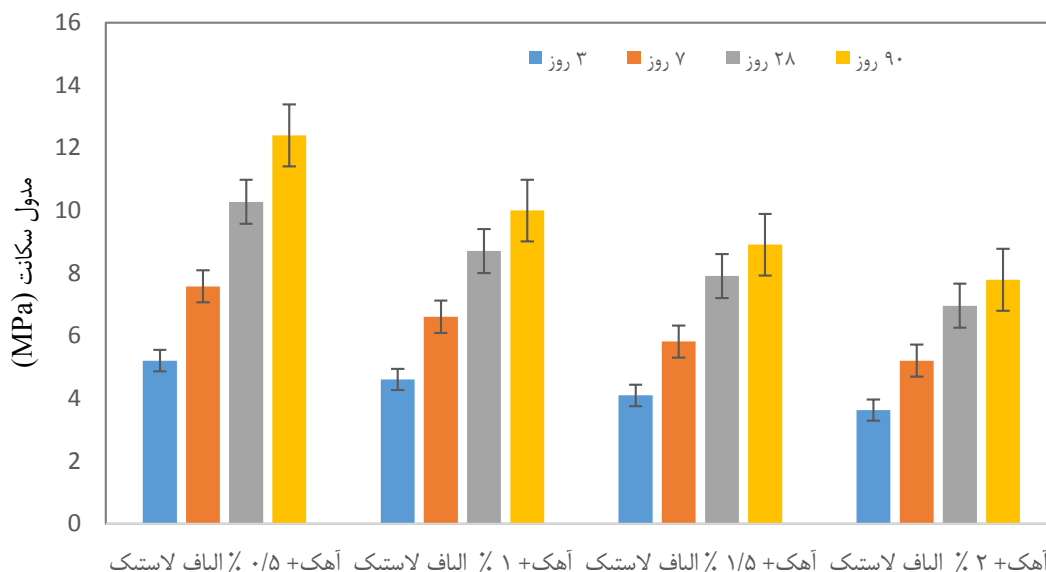
شکل ۱۱. تاثیر افزودن درصد های مختلف الیاف لاستیک بر مقاومت فشاری بیشینه نمونه های شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری

Fig. 11. Effects of tire fibres on the maximum compressive strength of lime concrete samples at the curing times



شکل ۱۲. تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر کرنش شکست نمونه های شفته آهک در زمان های مختلف عمل آوری

Fig. 12. Effects of tire fiber on the failure strain of lime concrete samples at the curing times



شکل ۱۳. تاثیر افزودن درصد های مختلف پودر لاستیک بر مدول سکانت نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Fig. 13. Effects of the tire fiber on the secant modulus of lime concrete samples at the curing times

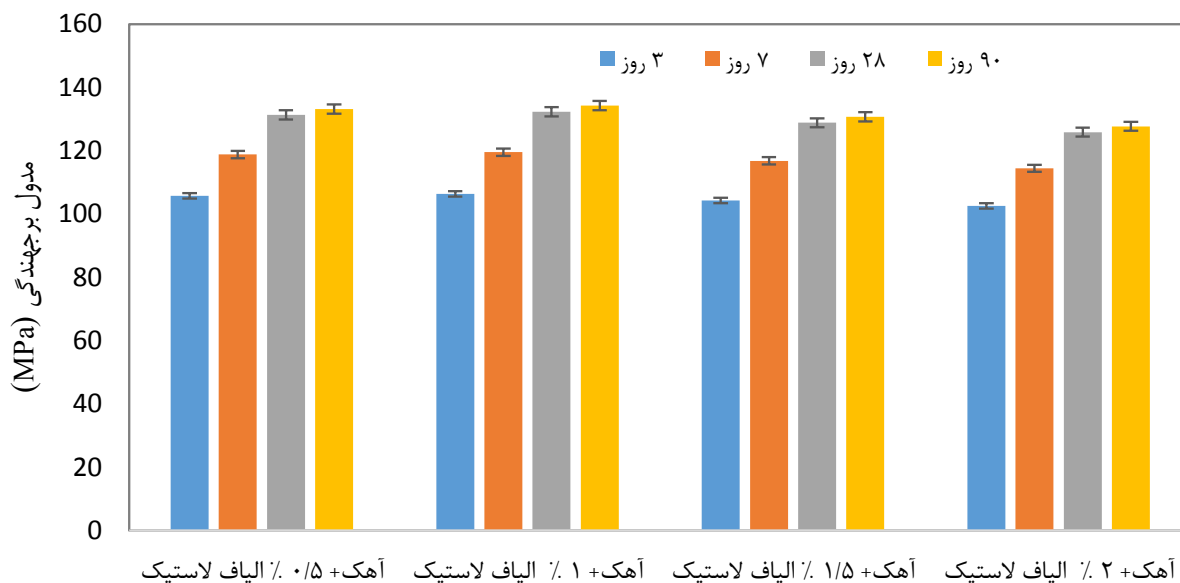
کشسانی-پلاستیکی بهتری نشان می دهند. در نهایت نیز می توان بیان کرد که وجود الیاف لاستیک باعث کاهش انقباض و تغییر حجم می شود که به مخلوط خاصیت پایداری حجمی بیشتری می بخشد.

۳-۲- خواص مکانیکی شفته خاکستر بادی- آهکی با و بدون افزودنی

در جدول (۷) پارامترهای مکانیکی نمونه های شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون مواد افزودنی خلاصه شده اند. نتایج مربوط به کرنش شکست نمونه های شفته آهک- خاکستر بادی حدوداً ۲۰٪ بیشتر از نمونه های شفته آهک است. که نشان از افزایش پلاستیسیته و شکل پذیری نمونه های شفته آهک- خاکستر بادی نسبت به نمونه های شفته آهک دارد. در مورد دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی، مدول سکانت، برجهندگی، برشی و حجمی شفته آهک- خاکستر بادی در تمامی زمان های عمل آوری بیشتر از شفته آهک است. روند تغییر این مدول ها با افزایش زمان عمل آوری مشابه نمونه شفته آهک است. با مقایسه جداول (۵) و (۶) می توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری بیشینه شفته آهک- خاکستر بادی نسبت به شفته آهک بیشتر است و در زمان های عمل آوری بیشتر ۲۸ و ۹۰ روز تقریباً دو برابر است. افزودن خاکستر بادی به شفته آهک باعث افزایش کرنش شکست و پلاستیسیته خاک می شود. دلیل این امر این است که خاکستر بادی شامل

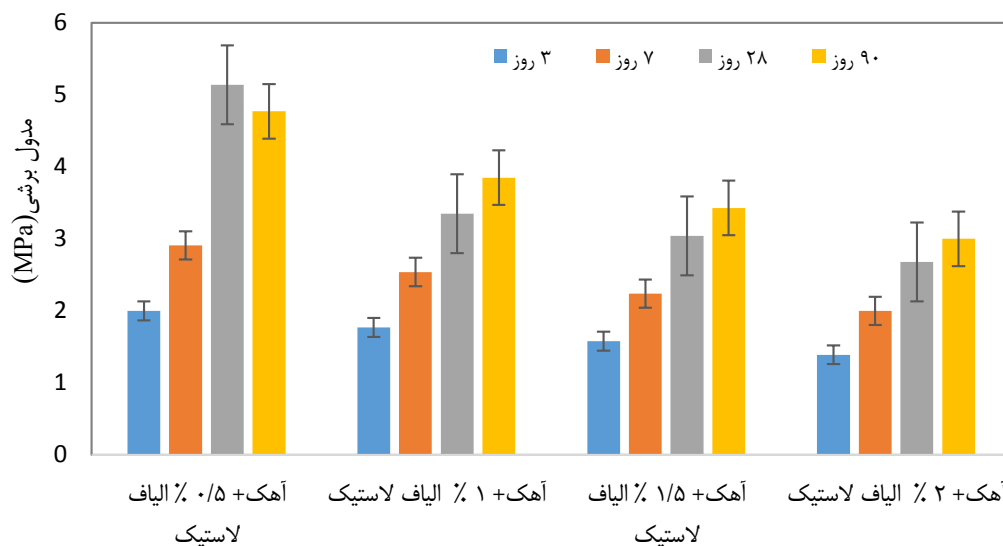
کاهش مدول سکانت می شود. همچنین بر مبنای نتایج شکل (۱۴) مدول برجهندگی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان موجب افزایش و کاهش مدول موجب افزایش و کاهش مدول برجهندگی می شود.

بر اساس شکل (۱۵) مدول برشی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می شود. شکل (۱۶) نشان می دهد که مدول حجمی نمونه شفته آهک حاوی الیاف لاستیک بیشتر از نمونه های شفته آهک با و بدون پودر لاستیک است. با افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف لاستیک ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می شود. افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می شود. افزایش درصد الیاف لاستیک در زمان عمل آوری یکسان به ترتیب موجب افزایش و کاهش مدول برشی می شود. همچنین در برابر بارگذاری چرخه ای مقاومت کرده و رفتار



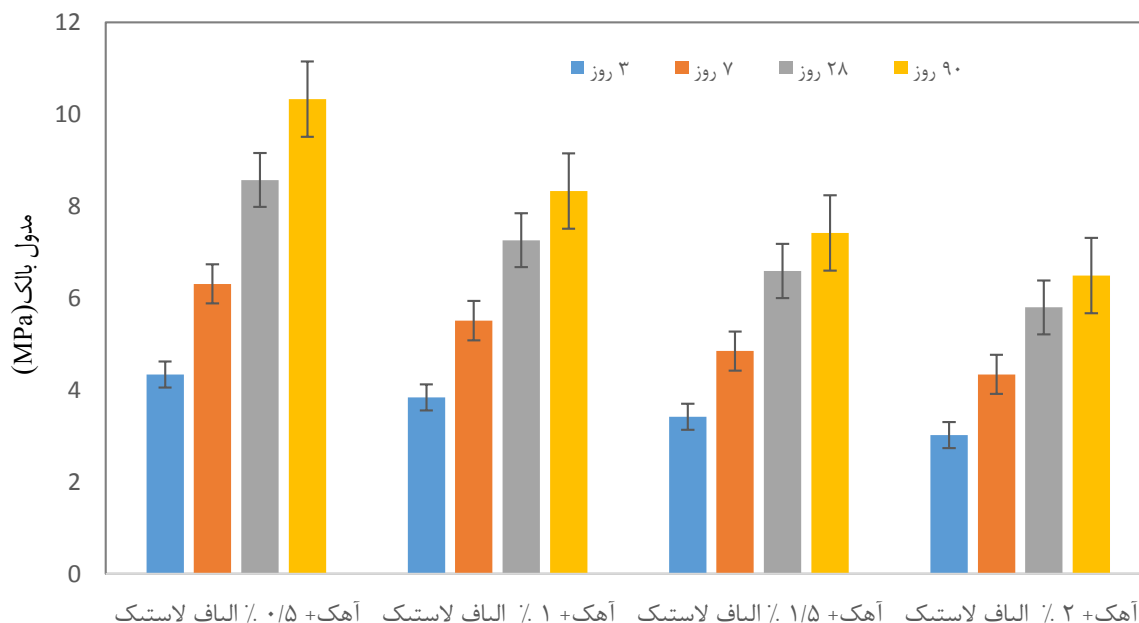
شکل ۱۴. تاثیر افزودن درصد های مختلف الیاف لاستیک بر مدول برجهندگی نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Fig. 14. Effects of the tire fibres on the resilient modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل ۱۵. تاثیر افزودن درصد های مختلف الیاف لاستیک بر مدول برشی نمونه های شفته آهک در زمان های عمل آوری

Fig. 15. Effects of rubber fibres on the shear modulus of lime concrete samples at the curing times



شکل ۱۶. تاثیر افزودن درصدهای مختلف فیبر لاستیک بر مدول حجمی نمونه‌های شفته آهک در زمان‌های عمل‌آوری

Fig. 16. Effects of rubber fibre on the bulk modulus of lime concrete samples at the curing times

افزودن ۱۲٪ پودر لاستیک روند افزایش داشته و پس از آن کاهش می‌یابد. با این حال افزودن پودر لاستیک بیشتر از ۸٪ به شفته آهک-خاکستر بادی موجب افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی بدون ماده افزودنی است. هم چنین افزایش زمان عمل‌آوری باعث کاهش کرنش شکست در تمامی درصدها می‌شود. با این حال، کرنش شکست نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی در تمام درصدها و زمان‌های عمل‌آوری بیشتر از نمونه شفته آهک-خاکستر بادی بدون پودر لاستیک است.

پودر لاستیک به عنوان یک ماده انعطاف‌پذیر و با خاصیت پرکنندگی در منافذ خاک حاوی ماسه بادی عمل می‌کند. در درصدهای پایین تا متوسط، این ماده باعث کاهش تخلخل و بهبود توزیع تنش در ساختار خاک می‌شود و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری تا حد معین (۱۲٪) و سپس کاهش به دلیل اشباع بیش از حد ساختار با مواد غیرواکنشی می‌شود. بعلاوه به دلیل اینکه در طول زمان، واکنش‌های شیمیایی در ساختار خاک ادامه می‌یابد و ساختار سخت‌تر و شکننده‌تر می‌شود. پودر لاستیک، اگرچه کرنش شکست را در مراحل اولیه افزایش می‌دهد، اما با پیشرفت زمان این اثر تعدیل می‌شود و در نتیجه باعث کاهش کرنش شکست با گذشت زمان در

ذرات ریز و واکنش‌پذیر است که در ترکیب با آهک به فرآیند پوزولانی منجر می‌شود. این واکنش‌ها توده‌های سیمانی تولید می‌کنند که منجر به پیوند قوی‌تر بین ذرات خاک می‌شود. حضور این ژل‌ها باعث افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌شود، زیرا در برابر تنش‌های بزرگ‌تر، خاک سیمانی شده مقاومت بیشتری نشان می‌دهد، در نتیجه شکل‌پذیری و کرنش شکست بیشتر در شفته آهک-خاکستر بادی نسبت به شفته آهک را در پی دارد. از طرف واکنش‌های شیمیایی بین آهک و خاکستر بادی (به‌ویژه در حضور سیلیکا و آلومینا در خاکستر بادی) منجر به تشکیل ترکیبات مقاوم‌تر (نظیر کلسیم سیلیکات هیدرات و کلسیم آلومینات هیدرات) می‌شود. این ترکیبات باعث افزایش سختی و مقاومت فشاری نمونه‌ها در طول زمان عمل‌آوری می‌گردند و در نتیجه مدول‌های برجهندگی، برشی و حجمی و همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی بیشتر می‌شود.

۳-۲-۱- شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون افزودنی حاوی پودر لاستیک

در مقایسه مقاومت فشاری بیشینه نمونه‌ها در درصدهای مختلف و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها تا

جدول ۷. پارامترهای مکانیکی شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون پودر لاستیک افزودنی

Table 7. Geotechnical parameters of mixture of lime and fly- ash samples with different percentages of rubber powderr

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل آوری (روز)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهنگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک+ خاکستر بادی	۳	۲۶۱	۲/۳۰	۵/۶۷	۱۰۰/۹۶	۲/۱۸	۴/۷۲
		۷	۴۳۲	۲/۰۴	۱۰/۵۹	۱۲۲/۱۶۹	۴/۰۷	۸/۸۲
		۲۸	۶۷۹	۱/۸۳	۱۸/۵۵	۱۵۲/۸۰	۷/۱۳	۱۵/۴۵
		۹۰	۶۹۸	۱/۴۷	۲۳/۷۴	۱۵۵/۱۵	۹/۱۳	۱۹/۷۸
۲	آهک+ خاکستر بادی + ۴٪ پودر لاستیک	۳	۲۴۹	۲/۵۲	۴/۹۴	۹۹/۴۸	۱/۹۰	۴/۱
		۷	۴۲۲	۲/۲۷	۹/۲۹	۱۲۰/۹۳	۳/۵۷	۷/۷۴
		۲۸	۶۶۰	۲/۰۳	۱۶/۲۵	۱۵۰/۴۴	۶/۲۵	۱۳/۵۴
		۹۰	۶۸۴	۱/۶۶	۲۰/۶۰	۱۵۳/۴۲	۷/۹۲	۱۷/۱۷
	آهک+ خاکستر بادی + ۸٪ پودر لاستیک	۳	۲۴۰	۲/۵۸	۴/۶۵	۹۶/۸۷	۱/۷۹	۳/۸۸
		۷	۴۰۳	۲/۳۹	۸/۴۳	۱۱۸/۵۷	۳/۲۴	۷/۰۲
		۲۸	۶۴۵	۲/۱۶	۱۴/۹۳	۱۴۸/۵۸	۵/۷۴	۱۲/۴۴
		۹۰	۶۸۲	۱/۷۷	۱۹/۲۶	۱۵۳/۱۷	۷/۴۱	۱۶/۰۵
	آهک+ خاکستر بادی + ۱۲٪ پودر لاستیک	۳	۲۲۸	۲/۷۷	۴/۱۱	۹۶/۸۷	۱/۵۸	۳/۴۲
		۷	۳۹۱	۲/۴۸	۷/۸۸	۱۱۷/۰۸	۳/۰۳	۶/۵۷
		۲۸	۶۳۴	۲/۲۹	۱۳/۸۴	۱۴۷/۲۲	۵/۳۲	۱۱/۵۳
		۹۰	۸۲۰	۱/۹۳	۲۱/۲۴	۱۷۰/۲۸	۸/۱۷	۱۷/۷۰
	آهک+ خاکستر بادی + ۱۶٪ پودر لاستیک	۳	۲۱۹	۲/۸۷	۳/۸۱	۹۵/۷۶	۱/۴۶	۳/۱۷
		۷	۳۷۹	۲/۷۱	۶/۹۹	۱۱۵/۶۰	۲/۶۹	۵/۸۲
		۲۸	۶۲۲	۲/۴۴	۱۲/۷۴	۱۴۵/۷۳	۴/۸۹	۱۰/۶۷
		۹۰	۸۰۰	۲/۱۱	۱۸/۹۶	۱۶۷/۸	۷/۲۹	۱۵/۸۰
	آهک+ خاکستر بادی + ۲۰٪ پودر لاستیک	۳	۲۱۲	۲/۹۹	۳/۵۴	۹۴/۸۹	۱/۳۶	۲/۹۵
		۷	۳۷۳	۲/۷۱	۶/۸۸	۱۱۴/۸۵	۲/۶۴	۵/۷۳
		۲۸	۶۱۵	۲/۵۵	۱۲/۰۶	۱۴۴/۸۶	۴/۶۴	۱۰/۰۵
		۹۰	۷۸۷	۲/۲۰	۱۷/۸۹	۱۶۶/۱۹	۶/۸۹	۱۴/۹۰
	آهک+ خاکستر بادی + ۲۵٪ پودر لاستیک	۳	۲۰۰	۳/۱۰	۳/۲۲	۹۳/۴۰	۱/۲۴	۲/۶۸
		۷	۳۶۰	۲/۸۵	۶/۳۱	۱۱۳/۲۴	۲/۴۳	۵/۲۶
		۲۸	۶۰۳	۲/۶۱	۱۱/۵۵	۱۴۳/۳۷	۴/۴۴	۹/۶۲
		۹۰	۷۶۶	۲/۳۴	۱۶/۳۷	۱۶۳/۵۸	۶/۳۰	۱۳/۶۴
	آهک+ خاکستر بادی + ۳۰٪ پودر لاستیک	۳	۱۹۷	۳/۲۶	۳/۰۲	۹۳/۰۳	۱/۱۶	۲/۵۲
		۷	۳۵۵	۳/۰۲	۵/۸۸	۱۱۲/۶۲	۲/۲۶	۴/۹۰
		۲۸	۵۸۷	۲/۷۶	۱۰/۶۳	۱۴۱/۳۹	۴/۰۹	۸/۸۶
		۹۰	۷۵۲	۲/۳۷	۱۵/۸۶	۱۶۱/۸۵	۶/۱۰	۱۳/۲۲

جدول ۸. پارامترهای مکانیکی شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون الیاف لاستیک افزودنی

Table 8. Geotechnical parameters of mixture of lime and fly- ash samples with different percentages of rubber fibers

شماره اختلاط	ماده افزودنی	زمان عمل آوری (روز)	مقاومت فشاری بیشینه (kPa)	کرنش شکست (%)	مدول سکانت (MPa)	مدول برجهنگی (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول حجمی (MPa)
۱	آهک+ خاکستر بادی	۳	۲۶۱	۲/۳۰	۵/۶۷	۱۰۰/۹۶	۲/۱۸	۴/۷۲
		۷	۴۳۲	۲/۰۴	۱۰/۵۹	۱۲۲/۱۶۹	۴/۰۷	۸/۸۲
		۲۸	۶۷۹	۱/۸۳	۱۸/۵۵	۱۵۲/۸۰	۷/۱۳	۱۵/۴۵
		۹۰	۶۹۸	۱/۴۷	۲۳/۷۴	۱۵۵/۱۵	۹/۱۳	۱۹/۷۸
۳	آهک+ خاکستر بادی+ ۵/۰٪ الیاف لاستیک	۳	۳۸۹	۳/۴۰	۵/۷۲	۱۱۶/۸۷	۲/۲۰	۴/۷۷
		۷	۶۴۷	۳/۱۹	۱۰/۱۴	۱۴۸/۸۳	۳/۹۰	۸/۴۵
		۲۸	۱۰۰۷	۲/۹۹	۱۶/۸۳	۱۹۳/۴۷	۶/۴۷	۱۴/۰۲
		۹۰	۱۲۹۰	۲/۵۲	۲۵/۶۰	۲۲۸/۵۶	۹/۸۵	۲۱/۳۳
	آهک+ خاکستر بادی+ ۱٪ الیاف لاستیک	۳	۳۹۵	۳/۹۵	۵/۰۰	۱۱۷/۵۸	۱/۹۲	۴/۱۷
		۷	۶۵۸	۳/۷۳	۸/۸۲	۱۵۰/۱۹	۳/۴۰	۷/۳۵
		۲۸	۱۰۲۴	۳/۵۰	۱۴/۶۳	۱۹۵/۵۸	۵/۶۳	۱۲/۱۹
		۹۰	۱۱۷۹	۳/۱۶	۱۸/۶۵	۲۱۴/۸۰	۷/۱۷	۱۵/۵۴
	آهک+ خاکستر بادی+ ۱۰/۵٪ الیاف لاستیک	۳	۳۷۴	۴/۱۳	۴/۵۳	۱۱۴/۹۷	۱/۷۴	۳/۷۷
		۷	۶۲۰	۳/۹۹	۷/۷۷	۱۴۵/۴۸	۲/۹۹	۶/۴۷
		۲۸	۹۷۱	۳/۶۹	۱۳/۱۶	۱۸۹/۰۰	۵/۰۶	۱۰/۹۷
		۹۰	۱۲۴۹	۲/۴۱	۱۸/۳۱	۲۲۳/۴۸	۷/۰۴	۱۵/۲۶
	آهک+ خاکستر بادی+ ۲٪ الیاف لاستیک	۳	۳۵۶	۴/۵۰	۳/۹۵	۱۱۲/۷۴	۱/۵۱	۳/۲۹
		۷	۵۹۳	۴/۲۶	۶/۹۶	۱۴۲/۱۳	۲/۶۸	۵/۷۷
		۲۸	۹۲۰	۳/۹۸	۷/۴۵	۱۸۲/۶۹	۲/۸۷	۶/۲۱
		۹۰	۱۱۹۱	۳/۶۳	۱۶/۴۰	۲۱۶/۲۸	۶/۳۱	۱۳/۶۷

لاستیک، مقاومت فشاری بیشینه به بالاتر از ۱۰۰۰ kPa نیز رسید. افزایش زمان عمل آوری در درصد الیاف ثابت و افزایش درصد الیاف لاستیک در درزمان عمل آوری ثابت به ترتیب موجب کاهش و افزایش کرنش شکست می‌شود.

مدول سکانت، برشی، برجهنگی و حجمی نمونه‌ها حاوی الیاف لاستیک بیشتر از سایر نمونه‌های این پژوهش گزارش شد و روند تغییر در روند آن‌ها با افزایش زمان عمل آوری و درصد الیاف مشابه نمونه‌های شفته آهک- خاکستر بادی حاوی پودر لاستیک است. هم چنین مقاومت فشاری بیشینه در ترکیب خاک-خاکستر بادی به تنهایی یا در ترکیب با آهک

نمونه‌های حاوی پودر لاستیک می‌شود. بعلاوه حضور الیاف لاستیک باعث تقویت ساختار خاک و کاهش تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. این امر به افزایش مدول‌های برشی، برجهنگی، و حجمی منجر می‌گردد.

۳-۲-۲- شفته آهک- خاکستر بادی با و بدون افزودنی حاوی الیاف لاستیک

افزودن الیاف لاستیک به شفته آهک-خاکستر بادی موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بیشینه و کرنش شکست در مقایسه با تمام نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش می‌شود. در برخی از درصدهای الیاف

- استفاده از ضایعات لاستیکی و خاکستر بادی به عنوان جایگزین مواد سنتی به کاهش زباله‌های صنعتی و هزینه‌های ساخت‌وساز کمک می‌کند.
- ترکیب خاکستر بادی و آهک در درصدهای بهینه، مقاومت فشاری و کرنش شکست نمونه‌ها را بهبود داده و تأثیرات بهتری نسبت به استفاده از این مواد به صورت مجزا داشت.
- تحلیل دقیق اثرات مواد افزودنی در این تحقیق می‌تواند راهنمایی برای طراحی مخلوط‌های بهینه در پروژه‌های ژئوتکنیکی با در نظر گرفتن شرایط محلی و محدودیت‌های اجرایی باشد.
- مقاومت فشاری نمونه ی شفته آهک-خاکستر بادی با افزودن الیاف لاستیک افزایش چشمگیری دارد و در زمان‌های عمل آوری ۹۰ روز در درصدهای مختلف به بالاتر از ۱۰۰۰ kPa می‌رسد.
- نمونه‌های شفته آهک-خاکستر بادی حاوی الیاف لاستیک بالاترین کرنش شکست را در تمام درصدها و زمان عمل آوری نسبت سایر نمونه‌های این تحقیق دارد که حاکی از رفتار شکل پذیرتر آنهاست.

منابع

- [1] J. Mitchell, Soil improvement: state-of-the-art: Department of Civil Engineering, University of California, 1981.
- [2] M.R. Malekpoor, M.M. Toufigh, Laboratory study of soft soil improvement using lime mortar-(well graded) soil columns, J Geotechnical Testing Journal 33(3) (2010).
- [3] M. Stefanidou, I. Papayianni, The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars, Cement Concrete Composites, 27(9-10) (2005) 914-919.
- [4] M. Saberian, S. Jahandari, J. Li, F. Zivari, Effect of curing, capillary action, and groundwater level increment on geotechnical properties of lime concrete: Experimental and prediction studies, Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering, 9(4) (2017) 638-647.
- [5] S. Jahandari, M. Saberian, Z. Tao, S.F. Mojtahedi, J. Li, M. Ghasemi, S.S. Rezvani, W. Li, Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, J Cold Regions Science Technology 160 (2019) 242-251.
- [6] P.V. Sivapullaiah, J. Prashanth, A. Sridharan, Optimization

به صورت جزئی افزایش یافت وقتی ماکزیمم ۴٪ خاکستر بادی استفاده می‌شود. مقاومت با افزودن ۶٪ و زمان عمل‌آوری ۹۰ روز بیشترین مقدار گزارش می‌شود. علت این رفتار را می‌توان چنین بیان نمود که خاکستر بادی در ترکیب با خاک و آهک بهینه‌ترین واکنش‌های پوزولانی را در محدوده خاصی از درصدهای افزودن خاکستر بادی ایجاد می‌کند و افزودن مقادیر بیشتر باعث تضعیف ساختار به دلیل کاهش پیوند مستقیم ذرات خاک شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر همزمان افزودنی‌های سنتی با ضایعات لاستیکی‌های فرسوده و مواد پلیمری بازبافتی بر بهسازی خاک مورد بررسی قرار گرفت. به استناد آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه ای شفته آهک و شفته آهک-خاکستر بادی با مواد افزودنی، نتایج زیر حاصل شده است:

- افزودن آهک، خاکستر بادی، و ضایعات لاستیکی به صورت جداگانه و ترکیبی منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی خاک‌های ضعیف شد و این روش‌ها به عنوان جایگزین اقتصادی و زیست‌محیطی قابل استفاده هستند.
- نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۵٪ و ۱٪ الیاف لاستیکی بیشترین افزایش مقاومت فشاری را ایجاد کرده است، در حالی که افزایش بیش از این مقدار باعث کاهش مقاومت می‌شود.
- حضور الیاف لاستیک در ترکیب، کرنش شکست و شکل‌پذیری خاک را افزایش داده، که می‌تواند موجب افزایش انعطاف‌پذیری خاک در برابر تغییر شکل‌های ناگهانی شود.
- مدول سکانت، برجهندگی، و برشی در نمونه‌های حاوی الیاف لاستیک به طور قابل توجهی افزایش یافت، که نشان‌دهنده توانایی بالای این مواد در تحمل بارگذاری‌های سنگین است.
- با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۹۰ روز، مقاومت فشاری و مدول‌های مکانیکی به دلیل تکمیل واکنش‌های پوزولانی بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کردند.
- الیاف لاستیک با ایجاد خاصیت ارتجاعی و توزیع یکنواخت تنش‌ها، شکنندگی نمونه‌ها را کاهش داده و رفتار خاک را پایدارتر کرده است.
- افزودن مقادیر زیاد پودر لاستیک (بیش از ۴٪) باعث کاهش تدریجی خواص مقاومتی به دلیل کاهش تراکم و افزایش فضای خالی در مخلوط شد.

- [15] S. Jahandari, M. Mohammadi, A. Rahmani, M. Abolhasani, H. Miraki, L. Mohammadifar, M. Kazemi, M. Saberian, M. Rashidi, Mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume and steel fibres, *J Materials* 14(22) (2021) 7065.
- [16] O. Azadegan, G.R. Pourebrahim, Effect of Geogrids on Compressive Strength and Elasticity Modulus of Lime/Cement Treated Soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 15(2010) (2010) 1571.
- [17] V. Farhangi, M. Karakouzian, Effect of fiber reinforced polymer tubes filled with recycled materials and concrete on structural capacity of pile foundations, *J Applied Sciences*, 10(5) (2020) 1554.
- [18] O. Azadegan, G.R. Pourebrahim, Effect of Geogrids on Compressive Strength and Elasticity Modulus of Lime/Cement Treated Soils, *J Electrical Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (2010) 1571-1580.
- [19] S. Jahandari, J. Li, M. Saberian, M. Shahsavarioughari, Experimental study of the effects of geogrids on elasticity modulus, brittleness, strength, and stress-strain behavior of lime stabilized kaolinitic clay, *GeoResJ*, 13 (2017) 49-58.
- [20] S. Jahandari, S.F. Mojtahedi, F. Zivari, M. Jafari, M.R. Mahmoudi, A. Shokrgozar, S. Kharazmi, B. Vosough Hosseini, S. Rezvani, H. Jalalifar, The impact of long-term curing period on the mechanical features of lime-geogrid treated soils, *J Geomechanics Geoengineering*, 17(1) (2022) 269-281.
- [21] S. Jahandari, Z. Tao, M.A. Alim, Effects of different integral hydrophobic admixtures on the properties of concrete, in: *Proceedings of the 30th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia*, Perth, Australia, 2021, pp. 5-8.
- [22] L. Mohammadifar, H. Miraki, A. Rahmani, S. Jahandari, B. Mehdizadeh, H. Rasekh, P. Samadi, B. Samali, Properties of lime-cement concrete containing various amounts of waste tire powder under different ground moisture conditions, *Polymers*, 14(3) (2022) 482.
- [23] B. Phani Kumar, R.S.J.J.o.G. Sharma, G. Engineering, Effect of fly ash on engineering properties of expansive of lime content for fly ash, *Journal of testing and evaluation*, 23(3) (1995) 222-227.
- [7] P. Mehrabi, M. Shariati, K. Kabirifar, M. Jarrah, H. Rasekh, N.T. Trung, A. Shariati, S. Jahandari, Effect of pumice powder and nano-clay on the strength and permeability of fiber-reinforced pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 287 (2021) 122652.
- [8] F. Hanaei, M.S. Sarmadi, M. Rezaee, A. Rahmani, Experimental investigation of the effects of gas oil and benzene on the geotechnical properties of sandy soils, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2) (2021) 1-8.
- [9] M. Rezanian, H. Moradnezhad, M. Panahandeh, M.J.R. Kami, A. Rahmani, B.V. Hosseini, Effects of diethanolamine (DEA) and glass fibre reinforced polymer (GFRP) on setting time and mechanical properties of shotcrete, *Journal of Building Engineering*, 31 (2020) 101343.
- [10] V. Farhangi, M. Karakouzian, Effect of fiber reinforced polymer tubes filled with recycled materials and concrete on structural capacity of pile foundations, *Applied Sciences*, 10(5) (2020) 1554.
- [11] M.M. Roshani, S.H. Kargar, V. Farhangi, M. Karakouzian, Predicting the effect of fly ash on concrete's mechanical properties by ann, *Sustainability*, 13(3) (2021) 1469.
- [12] B. Mehdizadeh, S. Jahandari, K. Vessalas, H. Miraki, H. Rasekh, B. Samali, Fresh, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar incorporating alumina nanoparticles and rice husk ash, *Materials*, 14(22) (2021) 6778.
- [13] S. Jahandari, M. Mohammadi, A. Rahmani, M. Abolhasani, H. Miraki, L. Mohammadifar, M. Kazemi, M. Saberian, M. Rashidi, Mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume and steel fibres, *Materials*, 14(22) (2021) 7065.
- [14] L. Mohammadifar, H. Miraki, A. Rahmani, S. Jahandari, B. Mehdizadeh, H. Rasekh, P. Samadi, B. Samali, Properties of Lime-Cement Concrete Containing Various Amounts of Waste Tire Powder under Different Ground Moisture Conditions, *Polymers*, 14(3) (2022) 482.

- R. Barczewski, M.J.E.S. Barczewski, P. Research, Management of ground tire rubber waste by incorporation into polyurethane-based composite foams, 31(12) (2024) 17591-17616.
- [35] R. Showkat, B. Mir, K.S.J.G. Wani, Geoengineering, Experimental investigation on reuse of dredged soils improved using waste rubber tyre powder (WRTP) and cement as admixtures, (2024) 1-15.
- [36] D. Akbarimehr, S.M.M.M.J.A.J.o.G. Hosseini, Elastoplastic characteristics of the clay soil mixed with rubber waste using cyclic triaxial test results, 15(14) (2022) 1280.
- [37] A. C25-19, Standard test methods for chemical analysis of limestone, quicklime, and hydrated lime, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2019.
- [38] M. Kazemi, M. Hajforoush, P.K. Talebi, M. Daneshfar, A. Shokrgozar, S. Jahandari, M. Saberian, J. Li, In-situ strength estimation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and point load test, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 9(5) (2020) 289-306.
- [39] A. Afshar, S. Jahandari, H. Rasekh, M. Shariati, A. Afshar, A. Shokrgozar, Corrosion resistance evaluation of rebars with various primers and coatings in concrete modified with different additives, Construction and Building Materials, 262 (2020) 120034.
- [40] M. Saberian, M. Mehrinejad Khotbehsara, S. Jahandari, R. Vali, J. Li, Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat, International Journal of Geotechnical Engineering, 12(4) (2018) 347-356.
- [41] A. Toghroli, P. Mehrabi, M. Shariati, N.T. Trung, S. Jahandari, H. Rasekh, Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers, Construction and Building Materials, 252 (2020) 118997.
- [42] H. Rasekh, A. Joshaghani, S. Jahandari, F. Aslani, M. Ghodrat, Rheology and workability of SCC, in: Self-compacting concrete: materials, properties and soils, 130(7) (2004) 764-767.
- [24] P. Dahale, P. Nagarnaik, A. Gajbhiye, Effect OF flyash and lime on stabilization of expansive soil, J Journal on Civil Engineering, 6(2) (2016) 8.
- [25] C.H. Signes, J. Garzón-Roca, P.M. Fernández, M.E.G. de la Torre, R.I. Franco, Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres, Applied Clay Science, 132 (2016) 768-773.
- [26] D. Akbarimehr, E.J.C.E.J. Aflaki, An experimental study on the effect of tire powder on the geotechnical properties of clay soils, 4(3) (2018) 594-601.
- [27] S. Ghareh, F. Akhlaghi, K.J.J.o.R.i.C.E. Yazdani, A Study on the Effects of Waste Rubber Tire Dimensions on Fine-Grained Soil Behavior, 8(3) (2020) 15-33.
- [28] D. Akbarimehr, K.J.S.D. Fakharian, E. Engineering, Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus, 140 (2021) 106435.
- [29] D. Akbarimehr, A. Rahai, A. Eslami, M.J.S. Karakouzian, Deformation characteristics of rubber waste powder-clay mixtures, 15(16) (2023) 12384.
- [30] D. Czarna-Juszkiewicz, P. Kunecki, J. Cader, M.J.M. Wdowin, Review in waste tire management—potential applications in mitigating environmental pollution, 16(17) (2023) 5771.
- [31] A. Eslami, D. Akbarimehr, A. Rahai, M.J.H. Karakouzian, Investigation of constitutive properties of high plasticity clay soils mixed with crushed rubber tire waste, 10(5) (2024).
- [32] S. Gücek, C. Güreş, B. Žlender, M.V. Taciroğlu, B.E. Korkmaz, K. Gürkan, T. Bračko, B. Macuh, R. Varga, P.J.A.S. Jelušič, Use of Lignin, Waste Tire Rubber, and Waste Glass for Soil Stabilization, 14(17) (2024) 7532.
- [33] M.R. Hassan, D.J.S. Rodrigue, Application of Waste Tire in Construction: A Road towards Sustainability and Circular Economy, 16(9) (2024) 3852.
- [34] A. Hejna, P. Kosmela, A. Olszewski, Ł. Zedler, K. Formela, K. Skórczewska, A. Piasecki, M. Maré,

- 100652.
- [48] S. Jahandari, Z. Tao, M. Saberian, M. Shariati, J. Li, M. Abolhasani, M. Kazemi, A. Rahmani, M. Rashidi, Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions, *Road Materials and Pavement Design*, 23(9) (2022) 2057-2075.
- [49] M. Kazemi, M. Daneshfar, Y. Zandi, A. Sadighi Agdas, N. Yousefieh, L. Mohammadifar, A. Rahmani, M. Saberian, A. Mamdough, M.A. Khadimallah, Effects of the Concrete Strength and FRP Reinforcement Type on the Non-Linear Behavior of Concrete Deep Beams, *Sustainability*, 14(7) (2022) 4136.
- [50] ASTM, 5102 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, in: ASTM D, 1996.
- [51] K.J.J.o.t. Fishman, Testing techniques for measurement of bulk modulus, *Journal of testing evaluation* 22(2) (1994) 161-167.
- [52] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, P. Lura, The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete, *Cement and Concrete Research*, 89 (2016) 249-256.
- [53] A. T307-99, Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, in, *American Association of State Highway and Transportation Officials ...*, 2017.
- applications, Elsevier, 2020, pp. 31-63.
- [43] R. Vali, E. Mehrinejad Khotbehsara, M. Saberian, J. Li, M. Mehrinejad, S. Jahandari, A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(3) (2019) 236-248.
- [44] A. Darvishi, H. Vosoughifar, S. Saeidijam, M. Torabi, A. Rahmani, An experimental and prediction study on the compaction and swell–expansion behavior of bentonite clay containing various percentages of two different synthetic fibers, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1) (2020) 1-15.
- [45] F. Sadeghian, S. Jahandari, A. Haddad, H. Rasekh, J. Li, Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2) (2022) 625-636.
- [46] P. Mehrabi, S. Honarbari, S. Rafiei, S. Jahandari, M. Alizadeh Bidgoli, Seismic response prediction of FRC rectangular columns using intelligent fuzzy-based hybrid metaheuristic techniques, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(11) (2021) 10105-10123.
- [47] M. Parsajoo, D.J. Armaghani, A.S. Mohammed, M. Khari, S. Jahandari, Tensile strength prediction of rock material using non-destructive tests: A comparative intelligent study, *Transportation Geotechnics*, 31 (2021)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Aminizade, M. Mokhberi, M. Momeni Roghabadi, *Evaluation of Geotechnical Properties in Weak Soils Stabilized by Combined Application of Lime, Fly-Ash, Geopolymer, and Scrap Tires*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(6) (2025) 911-938.

DOI: [10.22060/ceej.2025.22660.8024](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22660.8024)



