



Ferdowsi Civil Engineering

<https://civil-ferdowsi.um.ac.ir>
Iranian
Concrete
InstitutePavement
Engineering
Association of
Iran

Comparison of the Effect of Lime Additives and Magnesium Oxide-Activated GGBS in Stabilizing a Clay Soil Contaminated with Phenol

Research Article

Meysam Garshasbi¹, Ali Raeesi Estabragh² , Jamal Abdollahi Ali Beik³, Gholamali Vakili⁴DOI: [10.22067/jfcej.2025.91416.1335](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.91416.1335)

1- Introduction

The interaction between clay soils and contaminated matter is higher in comparison to granular soil due to their high specific surface area and cation-exchange capacity. Phenol is one of the organic pollutants that can harm the environment due to its toxicity. It is an aromatic compound with one hydroxyl group attached to a benzene ring. Phenol is very soluble in water and many organic solvents, and its mobility is high. As a result, phenol can easily enter the soil and groundwater as an organic pollutant. Therefore, the stabilization of soils contaminated with phenol is considered one of the important challenges in geotechnical and environmental engineering.

Among conventional soil-stabilization techniques, chemical additives such as lime and cement have long been used due to their availability and acceptable performance in ordinary soils. However, their efficiency decreases in soils contaminated with organic compounds, as such contaminants prevent pozzolanic reactions between lime and clay minerals. Additionally, cement production involves high energy consumption and significant CO₂ emissions, making it environmentally unsustainable. In recent years, ground granulated blast-furnace slag (GGBS) has gained attention as an eco-friendly alternative additive. Chemical activation of GGBS with magnesium oxide (MgO) leads to the formation of cementitious products such as calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H), which can strengthen soil structure and mitigate the adverse effects of organic contamination.

The main aim of this study is to compare the performance of lime and MgO-activated GGBS as sustainable and innovative stabilizers for improving the physical and mechanical behaviors of phenol-contaminated clay soil. The effect of each additive on the

behavior of the contaminated soil was compared for different additive percentages and curing times through a series of experimental tests.

2- Materials and Methods

A clay soil was collected from a local source, and its physical and mechanical properties were determined according to ASTM standards. The results of grain size distribution revealed that the soil was composed of 3% sand, 65% silt, and 32% clay. Based on Atterberg limits and grain size distribution, it was classified according to the USCS as a low-plasticity clay (CL). The specific gravity of solids was 2.7, while the optimum moisture content and maximum dry density of the natural soil were 17% and 18 kN/m³, respectively. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the presence of kaolinite and montmorillonite minerals. The chemical tests were performed on the soil samples and chemical compositions of it are shown in Table 1.

Table 1 - Chemical Properties of Soil

No.	Characteristic	Value
1	pH	7.96
2	EC (dS/m)	2.62
3	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	6.8
4	Cl ⁻ (meq/l)	10
5	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	12.5
6	Ca ²⁺ (meq/l)	9.89
7	Na ⁺ (meq/l)	17.1
8	Mg ²⁺ (meq/l)	0.95

* Manuscript received July 06, 2024, Revised July 12, 2025, Accepted December 20, 2025.

¹ PhD Candidate in Hydraulic Structures, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran

² Corresponding Author: Professor, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran. Email: raeesi@ut.ac.ir

³ Instructor, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran

⁴ Laboratory Supervisor, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran

Contaminated soil was artificially made in laboratory by mixing the soil by 2000 ppm phenol with purity more than 99%. Lime and activated GGBS with MgO by ratio of 3 (GGBS): 1 (MgO). These additives were used as stabilizers at percentages of 4%, 7%, and 10% by dry weight. The natural or contaminated soil was mixed with these additives by hand. Atterberg limits and standard Proctor compaction tests were performed on these soil mixtures. The samples for UCS test were prepared from these materials by static compaction. UCS tests were conducted on samples at curing times of 7, 14, and 28 days according to the ASTM D1632-07. Scanning electron microscopy (SEM) tests were performed on the samples to examine microstructural changes of soil and cementitious phase formation.

3- Results and Discussion

A total of 14 Atterberg limit tests, 14 compaction tests, 114 UCS tests, and 6 SEM tests were performed on samples of uncontaminated and contaminated soils, as well as their mixtures with different percentages of additives, according to the corresponding ASTM standards. A comparison of the Atterberg results of contaminated soil with natural soil shows that the Atterberg limits increased with the addition of phenol. The results showed an increase of 2% and 3% in the LL and PL, respectively, but a 1% reduction was observed in the PI. It was observed that by adding lime and MgO-GGBS to both natural and contaminated soils, the Atterberg limits changed, with the PL increasing as the percentage of additives increased. The results of standard compaction tests on natural and contaminated soils with different percentages of additives are presented in Table 2. As shown in this table, compared to natural soil, the contaminated soil exhibited an increase in optimum moisture content and a decrease in maximum dry unit weight. The results also indicated that the effect of lime and activated GGBS caused both a decrease and an increase in the values of maximum dry unit weight and optimum water content, respectively, for both soils. Therefore, the higher the percentage of additives, the greater the changes in the compaction parameters.

The stress-strain curves for natural and contaminated soils are shown in Fig. 1. The results show that adding phenol to the soil caused a reduction in strength of about 70%.

As shown in Fig. 2, the addition of lime or activated GGBS resulted in the cementation of soil particles, which increased the strength of the soil. The results indicated that the increase in strength and improvement of natural and contaminated soils are a function of curing time and the percentage of additives used. A comparison of the results showed that the additives used were more effective in increasing the strength of contaminated soil compared to natural soil, particularly at 7% and 10% additive levels.

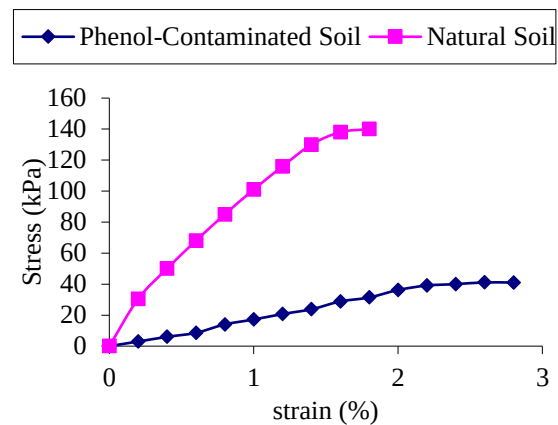


Fig 1 - Stress-Strain Curves of Natural and Contaminated Soil

Table 2 - Standard Compaction Test results

Sample		ω_{opt} (%)		γ_d^{max} (kN/m ³)	
Additive	%	Natural Soil	Contaminated Soil	Natural Soil	Contaminated Soil
-	-	17	19.5	18	16.5
Lime	4	15.5	19.7	17.2	16.4
Lime	7	16.1	20.4	16.8	16.2
Lime	10	19.2	21	16.1	15.9
MgO-GGBS	4	16	20	17.3	16.4
MgO-GGBS	7	16.8	20.5	17	16.2
MgO-GGBS	10	19.1	21.4	16.5	16

SEM images indicated that phenol altered the soil fabric by promoting edge-to-edge and edge-to-face flocculation. In stabilized samples, the formation of cementitious gel and reduced voids were observed. Microstructural improvements were similar for both stabilizers but more pronounced in MgO-GGBS samples, which is consistent with strength results.

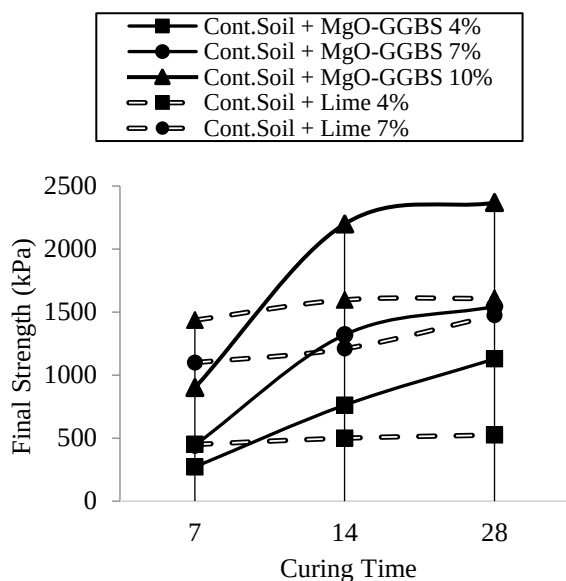


Fig 2- Comparison of the Ultimate Strength of Contaminated Soil Mixed with Lime and MgO-GGBS Additives

4- Conclusion

The stabilization of clay soil contaminated with phenol using different percentages of lime and activated GGBS was investigated through a series of tests, including consistency, compaction, UCS, and SEM. Based on the experimental results, the following conclusions can be drawn:

- 1) Phenol changes the physical and mechanical properties of the soil, particularly its strength.
- 2) Both additives improved the strength of natural and contaminated soils, and this improvement depends on the percentage of additives and curing times.
- 3) At the same percentage of additives and curing time, the strength of contaminated soil improved more than that of natural soil. A comparison of the results showed that the effect of activated GGBS was more effective than lime in improving both soils, particularly at higher percentages of additives and longer curing times.
- 4) SEM results confirmed that the increase in strength and improvement in soil behavior were due to the chemical interaction between the soil and additives.



مقایسه اثر افزودنی های آهک و GGBS فعال شده با منیزیم اکسید در بهسازی یک نوع خاک رسی آلوده به فنل*

مقاله پژوهشی

میثم گرشاسبی^(۱) علی رئیسی استبرق^(۲) جمال عبدالمولی علی بیک^(۳) غلامعلی وکیلی^(۴)

DOI: 10.22067/jfeci.2025.91416.1335

چکیده بهسازی خاک های رسی آلوده به آلانده های آلی، به دلیل اثرات مخرب این ترکیبات بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، از چالش های مهم ژئوتکنیک و مهندسی محیط زیست است. در این کار تحقیقاتی، بهسازی یک خاک رسی طبیعی و آلوده شده به فنل با غلظت ۲۰۰۰ ppm، توسط مواد افزودنی آهک و سرباره (GGBS) فعال شده به وسیله منیزیم اکسید (MgO)، با انجام آزمایشات لازم مورد بررسی قرار گرفت. روی نمونه هایی از خاک های طبیعی و آلوده اختلاط یافته با درصد های ۰، ۴، ۷ و ۱۰ از افزودنی های مذکور، آزمایشات تعیین حدود اتربرگ و تراکم صورت پذیرفت و علاوه بر آن روی نمونه های تهیه شده آزمایش مقاومت تک محوری در زمان های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ انجام گردید. نتایج نشان داد که که مواد افزودنی استفاده شده موجب تغییراتی در مقادیر حدود اتربرگ و پارامترهای تراکمی (وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه) می شوند؛ و از طرف دیگر موجب افزایش مقاومت تک محوری نمونه ها می گردند. به طوری که این افزایش مقاومت تابعی از درصد مواد افزودنی و زمان عمل آوری می باشد؛ همچنین مقایسه نتایج مقاومتی نشان داد که مقاومت خاک آلوده بهسازی شده در درصدی ثابت از مواد افزودنی و زمان عمل آوری یکسان، بیشتر از خاک طبیعی بهسازی شده است. مقایسه نتایج مقاومتی بین دو افزودنی در بحث بهسازی خاک آلوده به فنل نشان می دهد که عملکرد GGBS فعال شده به وسیله منیزیم اکسید به نسبت آهک در درصد و زمان عمل آوری ثابت، بیشتر است. نتایج SEM هم نشان می دهد که افزایش مقاومت، ناشی از تغییرات در ساختمان خاک و تولید نوعی مواد سیمانیه کننده، می باشد.

واژه های کلیدی بهسازی، خاک رسی، خاک آلوده، فنل، آهک، GGBS-MgO

Comparison of the Effect of Lime Additives and Magnesium Oxide-Activated GGBS in Stabilizing a Clay Soil Contaminated with Phenol

Meysam Garshasbi

Ali Raeesi Estabragh

Jamal Abdollahi Ali Beik

Gholamali Vakili

Abstract Soil stabilization of clay soils contaminated with organic pollutants is a significant challenge in geotechnical engineering and environmental engineering due to the detrimental effects of these compounds on the physical and mechanical properties of soil. In this study, the stabilization of a natural clay soil contaminated with phenol at the concentration of 2000 ppm was investigated by using lime and ground granulated blast-furnace slag (GGBS) activated with magnesium oxide (MgO) as additives. The stabilization process was evaluated through conduction a number of experimental tests on samples of both mixture natural and contaminated soils with 0%, 4%, 7%, and 10% of the above additives. Atterberg limits and compaction tests were conducted, and additionally, uniaxial compressive strength tests were performed on the prepared samples at curing times of 7, 14, and 28 days. The results showed that the additives caused changes in the Atterberg limits and compaction parameters (maximum dry unit weight and optimum moisture content), and also increased the strength of samples. The results showed that the increase in strength was a function of the percentage of additives and curing time. Furthermore, a comparison of the strength results revealed that the strength of the stabilized contaminated soil, at a given percentage of additives and curing time, was higher than that of the stabilized natural soil. Comparing the strength results between two additives showed that the using of activated GGBS was superior to that of lime at a given percentages and curing times in the stabilization of contaminated soil. SEM results indicated that the increase in strength was due to the chemical interaction between soil and additives.

Key words Stabilization, Clay Soil, Contaminated Soil, Phenol, Lime, GGBS, MgO.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۹/۲۹ می باشد.

(۱) دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

(۲) استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

(۳) مربی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

(۴) مسئول آزمایشگاه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

مقدمه

آلودگی خاک، یک مفهوم مطلق نیست و به نوع استفاده ای که از خاک مورد نظر است، مربوط می شود. به طور کلی، هر نوع تغییر در خواص خاک و اجزای متشکل آن، به نحوی که استفاده مورد نظر از آن را محدود سازد یا ناممکن گرداند، آلودگی خاک نامیده می شود. آلودگی خاک، زمانی مورد توجه قرار می گیرد که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم، موجب اثر سوء در زندگی انسان یا سایر موجودات شود [1]. هر ماده ای که وارد خاک شود، و مقدار آن در خاک از حد مجاز بیشتر باشد، به نحوی که تعادل طبیعی خاک را برهم بزند، آلاینده محسوب می شود [2]. به طور کلی، آلاینده های خاک را می توان به دو دسته آلاینده های آلی و غیرآلی تقسیم بندی کرد. مهم ترین آلاینده های آلی شامل مشتقات فنل، هیدروکربن های آروماتیک، هیدروکربن های کلردار، بنزین و سایر مشتقات نفتی می باشد؛ و مهم ترین آلاینده های غیرآلی در خاک نیز شامل فلزات سنگین، نیترات ها و ... می شود [1].

فنل، یک هیدروکربن آروماتیک نیمه فرار است که وجود آن در فاضلاب و ضایعات صنایع مختلف از جمله پالایشگاه های نفت، مجتمع های پتروشیمی، واحد های تبدیل زغال سنگ، صنایع نساجی و ... گزارش شده است [3]. این آلاینده به راحتی از طرق مختلف مانند نشت از مخازن ذخیره فنل، فاضلاب پالایشگاه ها و مجتمع های پتروشیمی، و یا آسیب دیدن تاسیسات انتقال مواد هیدروکربنی وارد خاک می شود [4]. همچنین گزارش شده است که فنل در خاک دارای تحرک بالایی است و تبخیر آن از خاک، آسان نمی باشد. فنل با غلظت کم در خاک، قابلیت تجزیه زیستی خوبی دارد؛ اما فنل با غلظت بالا در خاک به سختی تجزیه زیستی می شود [5]. آلاینده ی فنل ممکن است وارد آب های سطحی شده و یا با نفوذ به لایه های زیرین خاک منجر به آلودگی منابع آب زیرزمینی شوند [6].

به طور کلی مواد آلاینده وقتی که وارد خاک می شوند با خاک واکنش نشان می دهند که این واکنش به نوع آلاینده، غلظت آن، نوع خاک و pH محیط بستگی دارد. همچنین نشان داده شده است که هرچه درصد رس در یک خاک بیشتر باشد عمل متقابل آلاینده و خاک بیشتر است [6]. در نتیجه این واکنش ها و اندرکنش بین خاک و آلاینده، آلودگی ناشی از نشت هیدروکربن های نفتی، بر خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک تأثیر می گذارد [7]؛ که خود موجب تغییر در خصوصیات

مکانیکی و ژئوتکنیکی آن می شود؛ که این شدت تغییرات، بستگی به شدت عمل متقابل بین خاک و آلاینده دارد [8].

محققین مختلف گزارش نموده اند که آلوده شدن خاک به هیدروکربن های نفتی، باعث تغییرات در حدود اتربرگ، پارامترهای تراکمی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوری خاک می شود؛ که کاربری خاک را در کاربردهای عمرانی، محدود می نماید [9,10]. فورمن و دانیل (۱۹۸۶) با انجام آزمایش هایی روی خاک های آلوده دریافتند که وجود آلاینده آلی در آنها موجب کاهش حد روانی خاک می گردد؛ آن ها این تغییرات را به ضریب دی الکتریک آلاینده مورد نظر و اثر آن بر ضخامت لایه مضاعف ذرات رس مرتبط دانستند [11]. سریده هاران و همکاران (۲۰۰۰) آزمایش های تراکمی را روی دو خاک از نوع CL (رس با پلاستیسیته کم) و CH (رس با پلاستیسیته زیاد) که آلوده به روغن موتور بودند انجام دادند نتایج آن ها نشان داد؛ که وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک CL کاهش و برای خاک CH نسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد [12]. سریده هاران و راو (۱۹۷۳) گزارش نمودند که مقاومت خاک آلوده افزایش می یابد لیکن السندا و همکاران (۱۹۹۵) کاهش مقاومت را نشان داده اند؛ این اختلاف در نتایج ناشی از نوع خاک آلوده می باشد [13, 14]. رترناور و مگودا (۲۰۰۶) آزمایش مقاومت تک محوری را روی دو نوع خاک رسی آلوده به گلیسرول انجام دادند که نتایج آن ها کاهش مقاومت را نسبت به خاک طبیعی نشان داد [15]. خسروی و همکاران (۲۰۱۳) آزمایش های مختلف برش مستقیم را روی یک خاک رسی آلوده به گازوئیل انجام دادند؛ آن ها نتیجه گیری نمودند هر دو مشخصه مکانیکی خاک یعنی زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک آلوده تغییر می کند و این تغییرات متناسب با درصد گازوئیل مورد استفاده، می باشد [7]. استبرق و همکاران (۲۰۱۶) آزمایش های سه محوری cu روی نمونه هایی از خاک رسی آلوده به گلیسرول و اتانول انجام دادند و دریافتند که زاویه اصطکاک خاک مرتبط با درصد هر دو آلاینده می باشد و با افزایش درصد آلاینده، زاویه اصطکاک خاک هم افزایش می یابد [16].

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین مختلف نتیجه گیری می شود که بعضی از خواص فیزیکی و مکانیکی خاک های آلوده مانند مقاومت، نسبت به خاک طبیعی تغییر می نماید؛ بنابراین اگر این خاک ها به صورت منابع قرضه مورد

استفاده قرار گیرند و یا سازه‌ای روی آن‌ها احداث شود باید قبل از هر اقدام، خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها تعیین شود و در صورت لزوم عملیات بهسازی بر روی آن‌ها انجام گردد تا سازه ساخته شده یا احداث شده از ضریب اطمینان یا پایداری کافی برخوردار باشد. بهسازی انواع خاک‌ها در سال‌های اخیر مورد تحقیق محققین بوده است [17]. به طور مثال رضوانی توچاهی و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که افزودن آهک و به‌ویژه نانوآهک به ماسه ساحلی با افزایش چسبندگی، زاویه اصطکاک و تراکم‌پذیری، سبب بهبود قابل توجه خواص مکانیکی خاک می‌شود؛ که این بهبود ناشی از تسریع واکنش‌های پوزولانی و افزایش سطح تماس در ابعاد نانو است [18].

امروزه بهسازی خاک‌های آلوده به روش‌های مختلف با هدف بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک جهت استفاده از آن‌ها به عنوان منبع قرضه برای اجرای پروژه‌های عمرانی و یا احداث سازه بر روی آن‌ها ضروری می‌باشد. یکی از روش‌های بهسازی، روش شیمیایی است. در این روش مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و یا مخلوطی از آن‌ها با نسبت‌های متفاوت با یکدیگر به خاک اضافه می‌شوند. واکنش‌های شیمیایی که بین ذرات خاک و مواد افزودنی رخ می‌دهد، سبب بهبود خواص خاک می‌شود [19]. محققینی مانند لی و همکاران (۲۰۱۹)، و جهانی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از این روش خاک‌های رسی آلوده را مورد بهسازی قرار دادند؛ و نتایج قابل قبولی گزارش نمودند [20,21]. امینی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی تأثیر منیزیم اکسید بر خاک رسی آلوده به فنانترن نشان دادند که افزودن درصد‌های مختلف MgO موجب بهبود مقاومت فشاری، ضریب کشسانی و کاهش اثرات منفی آلاینده‌های آلی می‌شود؛ به طوری که این بهسازی به واسطه تشکیل محصولات کربناسیونی و بهبود ریزساختار خاک در تصاویر SEM تأیید گردید [22]. جهانی و همکاران (۲۰۲۲) با مقایسه تأثیر سیمان، سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) و سرباره فعال‌شده با MgO بر بهسازی خاک رسی نشان دادند که استفاده از GGBS فعال‌شده می‌تواند با ایجاد مواد سیمانته و افزایش اتصال بین ذرات خاک، مقاومت فشاری و پایداری نمونه‌ها را در طول زمان عمل‌آوری به‌طور مؤثری افزایش دهد؛ ضمن آنکه ارزیابی اقتصادی نیز مزیت این ماده را نسبت به سایر افزودنی‌ها تأیید کرد [23].

بررسی منابع نشان می‌دهد که سیمان پرتلند در نقش ماده

افزودنی، به طور گسترده جهت بهسازی خاک آلوده به آلاینده‌های آلی مورد استفاده قرار گرفته است [9] و [24-27]. با توجه به اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی مرتبط با تولید سیمان و آهک که امروزه به یک مسئله مهم تبدیل شده است. به عنوان مثال، تولید یک تن سیمان منجر به انتشار ۰/۹۵ تن CO_2 و مصرف 5000 MJ انرژی می‌شود و این مقادیر برای آهک ۰/۷۹ تن CO_2 و 3200 MJ است [28]؛ در سال‌های اخیر، استفاده از محصولات جانبی صنایع ذوب فلزات در جایگزینی جزئی یا کامل افزودنی‌های متداول توصیه شده است. یکی از این مواد سرباره دانه‌بندی شده کوره ذوب آهن (GGBS)، محصول جانبی صنعت آهن، که به‌طور گسترده برای بهسازی (اصلاح شیمیایی) خاک استفاده می‌شود. تولید یک تن GGBS تنها باعث مصرف 1300 MJ انرژی و انتشار ۰/۰۷ تن CO_2 می‌شود که در مقایسه با تولید یک تن آهک و یا سیمان ناچیز است [29]. از آنجایی که GGBS یک ماده با خواص سیمانی محدود و کند است؛ معمولاً از سیمان پرتلند برای فعال کردن و تسریع در واکنش‌های سیمانی، و ایجاد خواص ذکر شده GGBS استفاده می‌شود. ممکن است آهک نیز به منظور فعال‌سازی GGBS مورد استفاده قرار گیرد [30]. اخیراً محققین دریافته‌اند که اکسید منیزیم MgO برای فعال کردن GGBS مؤثرتر از آهک است که منجر به مقاومت بالاتر در خاک‌های بهسازی شده به وسیله GGBS می‌شود [31].

فی جین و همکاران (۲۰۱۶) در یک پژوهش، بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی و معدنی توسط افزودنی MgO و GGBS فعال‌شده با MgO را از نظر مقاومتی مورد بررسی قرار دادند؛ نتیجه این مقایسه نشان داد که افزودن MgO اثر ناچیزی در افزایش مقاومت دارد؛ ولی افزودنی GGBS فعال‌شده با MgO ، موجب ایجاد مقاومت بیشتری نسبت به خاک طبیعی، می‌گردد [32].

در ارتباط با تحقیقات پژوهشی صورت گرفته به منظور بررسی اثر افزودنی‌های مختلف بر خاک آلوده به فنل می‌توان به تحقیقات ویپولاناندان و همکاران (۱۹۹۵)، حیدرزاده و تسلیمی (۲۰۱۸) اشاره نمود که ویپولاناندان و همکاران (۱۹۹۵) با بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند افزودن سیمان و رس به خاک رسی آلوده به فنل موجب افزایش مقاومت تک محوری آن می‌گردد [24]. حیدرزاده و تسلیمی (۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های مقاومتی بر روی خاک ماسه ای آلوده به فنل، نشان دادند که

رسی با پلاستیسسه پایین (CL) می باشد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نیز نشان داد که درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) و وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ_{dmax}) آن به ترتیب معادل ۱۷٪ و (kN/m^3) ۱۸ می باشد.

جدول ۱ ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	وزن مخصوص دانه های جامد (G_s)	۲/۷
۲	ماسه (%)	۳
۳	سیلت (%)	۶۵
۴	رس (%)	۳۲
۵	حد روانی (LL) (%)	۲۸
۶	حد خمیری (PL) (%)	۱۷
۷	شاخص خمیری (PI) (%)	۱۱
۸	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	۱۸
۹	رطوبت بهینه (%)	۱۷
۱۰	طبقه بندی خاک	CL

به منظور تعیین کانی های تشکیل دهنده خاک از آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده گردید که نتایج نشان داد کانی های غیر رسی آن شامل کوارتز، همتایت و کانی های رسی آن شامل کائولینیت و مونت موریلونیت می باشد. از مجموع ۳۲ درصد کانی های رسی ۲۵ درصد کائولینیت و ۷ درصد مونت موریلونیت است.

آزمایش های تعیین ویژگی های شیمیایی خاک نیز روی نمونه هایی از آن صورت پذیرفت که نتایج بدست آمده در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲ ویژگی های شیمیایی خاک

ردیف	مشخه	مقدار
۱	pH	۷/۹۶
۲	EC (dS/m)	۲/۶۲
۳	SO_4^{+2} (meq/l)	۶/۸
۴	Cl^- (meq/l)	۱۰
۵	HCO_3^- (meq/l)	۱۲/۵
۶	Ca^{+2} (meq/l)	۹/۸۹
۷	Na^{+} (meq/l)	۱۷/۱
۸	Mg^{+2} (meq/l)	۰/۹۵

افزودن سیمان سفید موجب بهسازی مقاومتی در خاک آلوده به فنل می شود؛ در حالیکه افزودن رس اصلاح شده موجب کاهش مقاومت می گردد [33]. همچنین تحقیقات ویپولاناندان (۱۹۹۵) نشان داد که در خاک رسی آلوده به فنل، مقاومت فشاری و کششی نمونه های بهسازی شده، با افزایش میزان آلاینده فنل، کاهش می یابد [24].

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می دهد که در خصوص بهسازی خاک های آلوده به فنل پژوهش های گسترده ای صورت نگرفته است و در مطالعات قبلی بیشتر از سیمان، آهک و یا افزایش درصد رس برای بهسازی خاک آلوده استفاده گردید؛ در این پژوهش از افزودنی های آهک و GGBS فعال شده با MgO یا MgO-GGBS به منظور بهسازی خاک رسی آلوده به فنل استفاده شده است و اثر این دو افزودنی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده از جمله حدود اتربرگ، پارامترهای تراکمی و مقاومت فشاری محصور نشده مطالعه شد. همچنین به منظور بررسی نقش ریزساختار خاک روی خواص مکانیکی و فیزیکی، روی نمونه های منتخب آزمایش SEM صورت گرفت؛ که موجب تحلیل تکمیلی در نتایج گردد. هدف از این پژوهش مقایسه GGBS فعال شده با MgO به عنوان یک ماده افزودنی جدید و آهک به عنوان یک افزودنی متداول و قدیمی در بهسازی خاک رسی آلوده به فنل می باشد.

مواد و روش ها

مواد مورد استفاده

مواد مورد استفاده در این پژوهش آزمایشگاهی شامل : خاک رسی، ماده آلی فنل به عنوان آلاینده، آهک و MgO و GGBS به عنوان افزودنی می باشند. ویژگی های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی این مواد به طور خلاصه به شرح زیر می باشند.

خاک. خاک رسی مورد استفاده از فروشنده محلی مصالح تهیه گردید؛ و آزمایش های وزن مخصوص ذرات (GS)، دانه بندی، حدود اتربرگ و تراکم بر اساس استاندارد های ASTM روی نمونه هایی از خاک انجام شد؛ که نتایج آن در جدول (۱) درج شده است.

بر اساس نتایج دانه بندی و حدود اتربرگ، مطابق با طبقه بندی متحد همگانی خاک (USCS)، خاک مورد آزمایش از نوع

جدول ۴ مشخصات آهک

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	۲/۲۴
۲	ماسه (%)	۱۴
۳	سیلت (%)	۳۷
۴	رس (%)	۴۹
۵	حد روانی (LL) (%)	۸۸
۶	حد خمیری (PL) (%)	۳۱
۷	شاخص خمیری (PI) (%)	۵۷
۸	حد انقباض (SL) (%)	۱۳
۹	سطح ویژه (m^2/g)	۵۰-۸۵
۱۰	چگالی حجمی (kg/m^3)	۸۸۰-۱۲۰۰
۱۱	قطر ذرات (μm)	۷۵-۵۰۰۰
۱۲	اسیدیته (pH)	۱۰

جدول ۵ مشخصات منیزیم اکسید

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	جرم مولی (g/mol)	۴۰/۳۰
۲	چگالی (g/cm^3)	۳/۵۸
۳	دمای ذوب ($^{\circ}C$)	۲۸۵۲
۴	دمای جوش ($^{\circ}C$)	۳۶۰۰
۵	حلالیت ($g/100mL$)	۰/۰۰۸۶
۶	شکل ظاهری	پودر سفید
۷	سطح ویژه (m^2/g)	۲۵۰-۳۵۰
۸	چگالی حجمی (kg/m^3)	۱۰۰-۲۰۰
۹	متوسط قطر ذرات (μm)	۰/۰۵
۱۰	اسیدیته (pH)	۸-۱۰

فنل. در این پژوهش، فنل به‌عنوان آلاینده آلی خاک در نظر گرفته شد. فنل یک هیدروکربن از گروه آروماتیک‌ها با یک حلقه بنزن می‌باشد که به‌صورت بی‌رنگ، همراه با بوی مخصوص است. فنل ماده‌ای سمی و متلاشی‌کننده نسوج است که در الکل، اترو بنزن و کلروفرم کاملاً محلول است و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، داخل آب نیز به مقدار ۹ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر حل می‌شود. درصد خلوص فنل تهیه شده بیش از ۹۹٪ و از تولیدات شرکت مرک آلمان می‌باشد. جدول (۳)، برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن که توسط تولیدکننده ارائه شده است، را نشان می‌دهد.

جدول ۳ مشخصات فنل در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	فرمول شیمیایی	C_6H_6O
۲	جرم مولی (g/mol)	۹۴/۱۱
۳	چگالی (g/cm^3)	۱/۰۷
۴	دمای ذوب ($^{\circ}C$)	۴۰/۸
۵	دمای جوش ($^{\circ}C$)	۱۸۱/۸
۶	حلالیت (g/L)	۸۴
۷	اسیدیته (pH)	۵
۸	شکل ظاهری	کریستال جامد بی‌رنگ

آهک. آهک هیدراته شده $Ca(OH)_2$ ، که در این پژوهش به‌عنوان ماده افزودنی در بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفت؛ از فروشنده محلی مصالح تهیه شد. بر اساس اطلاعات دریافتی از فروشنده، درجه خلوص آن نزدیک به ۹۵ درصد می‌باشد و خواص آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

منیزیم/اکسید MgO . در این پژوهش از منیزیم اکسید جهت فعال سازی GGBS استفاده شد، که منیزیم اکسید مورد استفاده در این پژوهش برای اختلاط با GGBS، منیزیم اکسید سبک (نانو)، از محصولات شرکت شیمی دارویی نوترون با درصد خلوص ۹۹ الی ۱۰۰ می‌باشد. برخی از خواص آن مطابق با اطلاعات تولیدکننده، در جدول (۵) نشان داده شده است.

سرباره دانه بندی شده کوره بلند GGBS. GGBS استفاده شده در این پروژه، محصولی از مجتمع ذوب آهن اصفهان می‌باشد. بر اساس اطلاعات اخذ شده از شرکت مذکور درصد مواد تشکیل‌دهنده آن در جدول (۶) و مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن نیز در جدول (۷) قابل رؤیت است. برای فعال سازی GGBS با MgO و تهیه مخلوط MgO -GGBS از نسبت ۳ GGBS به ۱ MgO استفاده شده است؛ که مطابق با کار الطبا و همکاران (۲۰۱۵) می‌باشد [34].

جدول ۶ ترکیبات تشکیل دهنده GGBS

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	MgO	۷.۴۸
۲	Al ₂ O ₃	۸.۷۴
۳	SiO ₂	۳۲.۵۸
۴	CaO	۳۹.۷۱
۵	TiO ₂	۴.۶۹

جدول ۷ مشخصات GGBS

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	قطر ذرات (μm)	کوچکتر از ۳۰
۲	اسیدیته (pH)	۱۰-۱۲
۳	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	بیشتر از ۱۰۰۰
۴	دمای جوش ($^{\circ}\text{C}$)	غیر قابل اجرا
۵	حلالیت (g/L)	کمتر از ۱
۶	شکل ظاهری	پودر خاکستری
۷	سطح ویژه (m^2/kg)	۴۵۰-۵۵۰
۸	چگالی حجمی (kg/m^3)	۱۲۰۰-۱۳۰۰

و تسلیمی (۲۰۱۷) از همین غلظت برای آلوده سازی خاک ماسه ای استفاده نمودند [26,32].

خاک آلوده با غلظت ۲۰۰۰ppm توسط انحلال ۲ گرم فنل در ۶۰ میلی لیتر آب مقطر و اضافه نمودن این محلول به روش پاشش بر روی هر کیلوگرم خاک و اختلاط آن حاصل شد. خاک پس از آلوده شدن در ظروف در بسته به مدت ۷ روز نگهداری شد تا عمل متقابل بین خاک و آلاینده به حالت نهایی و پایدار برسد؛ این مدت زمان ۷ روز نیز مشابه تحقیقات رترناور و مگودا (۲۰۰۶) انتخاب گردید که زمان لازم برای عمل متقابل بین آلاینده و خاک را بین ۲ تا ۷ روز گزارش نمودند [15].

آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM D-۶۹۸ بر روی خاک طبیعی و خاک آلوده، خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با افزودنی های آهک و GGBS فعال شده در سه درصد وزنی ۴، ۷ و ۱۰ انجام گردید [36]. با استفاده از نتایج آن، اطلاعات مربوط به تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای هر نمونه تعیین گردید.

آزمایش تعیین حدود اتربرگ

به منظور بررسی اثر افزودن ماده آلی فنل و مواد افزودنی بر روی خواص خمیریایی خاک طبیعی و آلوده، طبق استاندارد ۴۳۱۸ ASTM D- حدود اتربرگ نمونه های ذکر شده تعیین شد [37].

ساخت نمونه های مقاومتی

ساخت نمونه های مقاومتی برای مخلوط های بیان شده فوق به روش استاتیکی صورت گرفت. در این روش خاک با رطوبت بهینه به وزن واحد حجم خشک بیشینه (مربوط به منحنی تراکمی) رسید تا نمونه ساخته شده بیشترین مقاومت خود را داشته باشد [38].

نمونه مورد نظر با استفاده از دستگاه بارگذاری تک محوری در سه لایه و با سرعت ۱/۵ mm/min متراکم گردید؛ مقدار بار وارده به هر لایه جهت حصول $\gamma_{d\max}$ از طریق روش سعی و خطا تعیین گردید و پس از ساخت هر نمونه $\gamma_{d\max}$ کنترل شد. همچنین نمونه ساخته شده دارای قطر و ارتفاع معادل ۵۰ mm و ۱۰۰ mm بود. نمونه های حاوی ماده افزودنی در سه زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در اتاقکی مخصوص، با رطوبت بالای

مراحل اجرای تحقیق و آزمایش ها

مراحل و آزمایش های صورت گرفته شامل: آلوده سازی خاک رسی به آلاینده فنل، اختلاط خاک طبیعی و آلوده با افزودنی های آهک و GGBS فعال شده در سه درصد وزنی ۴، ۷ و ۱۰، تعیین حدود اتربرگ و پارامتر های تراکمی، ساخت نمونه های مقاومتی جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها و انجام آزمایش SEM بر روی نمونه ها می باشد. با توجه تحقیقات گذشته، سه درصد ۴، ۷ و ۱۰ که نزدیک به میزان متداول و بهینه افزودنی در بهسازی خاک ها (۶ الی ۸ درصد) می باشند؛ به منظور بهسازی در این پژوهش انتخاب شده اند [35].

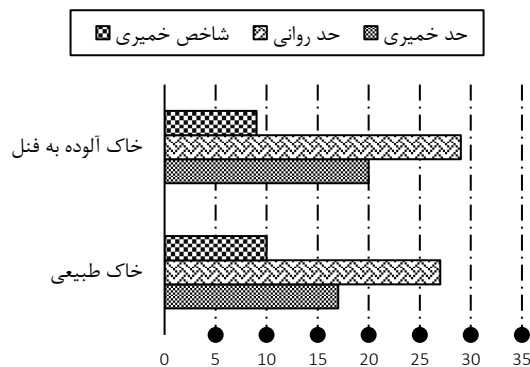
آلوده سازی خاک طبیعی به آلاینده فنل

خاک طبیعی توسط آلاینده فنل با غلظت ۲۰۰۰ppm (۰/۲ درصد) به صورت مصنوعی توسط افشاننده آلوده گردید. این غلظت با توجه به پژوهش های انجام شده بر روی خاک های آلوده به فنل از جمله وپولاناندان (۱۹۹۵) که خاک رسی با خواص خمیری (پلاستیسیته) پایین را مورد آزمایش قرار داد؛ که مشابه خاک مورد استفاده در این تحقیق است؛ انتخاب شد [24]. همچنین حیدرزاده

درصد های مختلف مواد افزودنی انجام پذیرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش های صورت گرفته به شرح زیر می باشد.

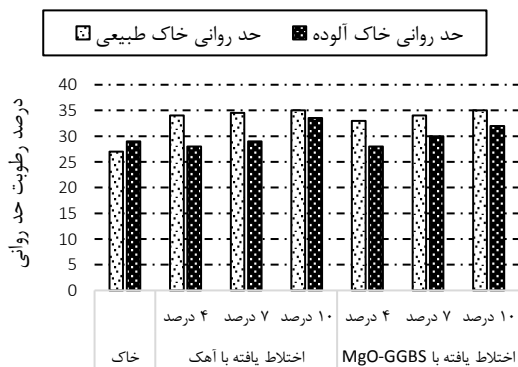
نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ

شکل (۱)، نشان دهنده مقایسه حد روانی و حد خمیری و شاخص خمیری بین خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل می باشد. مقایسه نتایج فوق نشان دهنده تغییرات ناشی از وجود فنل در حدود اتربرگ خاک مورد آزمایش می باشد. مقایسه حد روانی (به ترتیب برابر ۲۷ و ۲۹ درصد) و حد خمیری (به ترتیب برابر ۱۷ و ۲۰ درصد) برای خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل، حاکی از افزایش هر دو عامل و کاهش شاخص خمیری (به ترتیب برابر ۱۰ و ۹) می باشد.



شکل ۱ حدود اتربرگ خاک طبیعی و خاک آلوده

تغییرات حد روانی خاک های طبیعی و آلوده اختلاط یافته با افزودنی های آهک و MgO-GGBS، به صورت مقایسه ای در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ حد روانی خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته

٪ ۹۵ و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. (مطابق با استاندارد ASTM D-۱۶۳۲) [39].

آزمایش مقاومت تک محوری

نمونه های ساخته شده از خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل بلافاصله پس از ساخت و نمونه های عمل آوری شده پس از پایان زمان عمل آوری، مطابق استاندارد ASTM D-۱۶۳۳ تحت آزمایش مقاومت تک محوری قرار گرفتند [40]. سرعت بارگذاری طبق استاندارد فوق برابر ۱ mm/min تنظیم شد و در حین آزمایش نیز میزان بار وارده و تغییر شکل ناشی از اعمال بار، در نمونه ثبت گردید و بارگذاری نمونه تا زمان گسیختگی کامل نمونه، ادامه یافت و با استفاده از داده های برداشت شده منحنی تنش-کرنش برای هر نمونه رسم شد. برای کاهش خطاهای ناشی از ساخت نمونه و انجام آزمایش (افزایش دقت و تکرارپذیری)، از هر مخلوط خاک ۳ نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفتند؛ که در نتایج و محاسبات نهایی از میانگین ۳ نمونه استفاده گردید.

میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM امکان بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه های خاک را در ابعاد میکرونی فراهم می نماید.

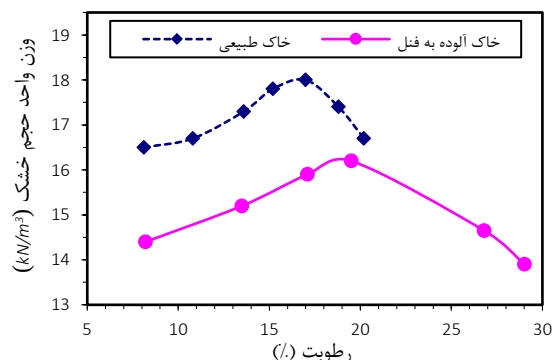
مغزه های نمونه های مقاومتی خاک طبیعی و آلوده، خاک طبیعی و آلوده ۲۸ روزه با ۷ درصد ماده افزودنی برای رسانا شدن، توسط طلا لایه نشانی گردیدند و مغزه ها توسط دستگاه SEM، برای بررسی میکرو ساختار رس در نمونه ها تحت تأثیر آلودگی، مواد افزودنی و ...، در سه بزرگنمایی ۵، ۱۰ و ۲۰ نانومتر قرار گرفتند.

این آزمایش در آزمایشگاه پژوهشگاه مواد و انرژی با روش لایه نشانی طلا انجام گردید.

نتایج

در این کار پژوهشی تعداد ۱۴ آزمایش تعیین حدود اتربرگ، ۱۴ آزمایش تراکم استاندارد، ۱۱۴ آزمایش تعیین مقاومت تک محوری و ۶ آزمایش SEM بر روی نمونه های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنل و همچنین خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با

بیشینه و افزایش رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی می گردد.



شکل ۴ منحنی تراکم خاک طبیعی و آلوده به فنل

در جدول (۸) مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای همه نمونه ها درج شده است. تغییرات مشاهده شده از دو منظر بررسی می شود؛ یکی تغییرات خاک اختلاط یافته با افزودنی نسبت به خاک بدون افزودنی و دیگری تغییراتی که ناشی از اثر افزایش درصد افزودنی در خاک اختلاط یافته رخ می دهد.

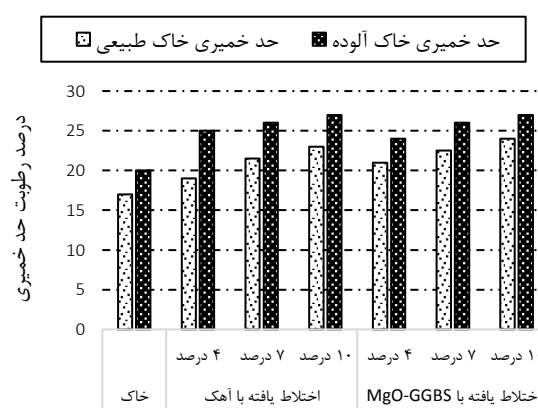
با توجه به نتایج مندرج در جدول (۸) نتیجه گیری می شود که با افزایش درصد آهک در خاک طبیعی اختلاط یافته، وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش و رطوبت بهینه افزایش می یابند. مقایسه مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با آهک نشان می دهد که افزودن آهک به خاک طبیعی، در ابتدا و در مقدار های کم افزودنی آهک (۴ و ۷ درصد) موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می گردد. اما با افزایش آهک در درصد های بیشتر (۱۰ درصد)، موجب افزایش رطوبت بهینه می گردد؛ به طوریکه در درصد های ۴ و ۷ از آهک رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی کمتر و در شرایط ۱۰ درصد آهک، رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی بیشتر است.

در رابطه با خاک آلوده، مقادیر مندرج در جدول (۸) بیانگر افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه ی خاک آلوده به فنل با افزایش میزان آهک اختلاط یافته می باشد.

مقایسه مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک آلوده و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک نشان می دهد که افزودن آهک به خاک آلوده موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه نسبت به خاک آلوده می گردد.

نتایج حاصل از مقایسه حد روانی برای تمام نمونه های خاک طبیعی اختلاط یافته با مواد افزودنی نشان می دهد که، حد روانی نسبت به خاک طبیعی افزایش یافته است؛ در رابطه با خاک آلوده اختلاط یافته با مواد افزودنی نسبت به خاک آلوده، در درصد های کم مواد افزودنی (۴ و ۷ درصد) کاهش حد روانی مشاهده می شود؛ که در اثر افزایش ماده افزودنی به ۱۰ درصد، رفتار خاک آلوده همانند خاک طبیعی شده و حد روانی خاک آلوده اختلاط یافته بیشتر از خاک آلوده می گردد.

تغییرات حد خمیری خاک طبیعی و آلوده در اثر اضافه شدن افزودنی نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ حد خمیری خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته

اختلاط افزودنی های آهک و MgO-GGBS در هر دو خاک طبیعی و آلوده موجب افزایش حد خمیری می شود؛ که این افزایش حد خمیری، در همه ی خاک های اختلاط یافته مورد آزمایش، با افزایش درصد افزودنی، همراه می شود.

نتایج آزمایش تراکم استاندارد

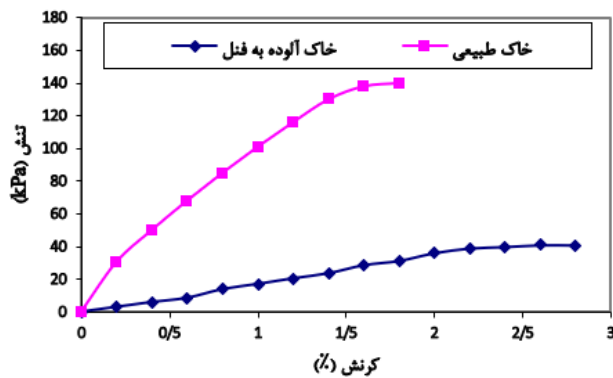
وجود ماده آلی فنل در خاک طبیعی، باعث رخداد تغییراتی در خصوصیات و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک می شود. شکل (۴)، نتایج آزمایش تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل را نشان می دهد.

مطابق با منحنی های تراکم در شکل (۴)، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای خاک طبیعی به ترتیب برابر 18 kN/m^3 و ۱۷٪ می باشد؛ که این مقادیر در مورد خاک آلوده به فنل برابر 16 kN/m^3 و ۱۹/۵٪ می شود؛ این نتایج نشان می دهد که وجود ماده آلی فنل، موجب کاهش وزن واحد حجم خشک

جدول ۸ نتایج آزمایش تراکم استاندارد

ردیف	نمونه		رطوبت بهینه %		وزن واحد حجم خشک بیشینه kN/m^3	
	افزودنی	درصد	خاک طبیعی	خاک آلوده	خاک طبیعی	خاک آلوده
۱	-	-	۱۷	۱۹/۵	۱۸	۱۶/۵
۲	آهک	۴	۱۵/۵	۱۹/۷	۱۷/۲	۱۶/۴
۳	آهک	۷	۱۶/۱	۲۰/۴	۱۶/۸	۱۶/۲
۴	آهک	۱۰	۱۹/۲	۲۱	۱۶/۱	۱۵/۹
۵	MgO-GGBS	۴	۱۶	۲۰	۱۷/۳	۱۶/۴
۶	MgO-GGBS	۷	۱۶/۸	۲۰/۵	۱۷	۱۶/۲
۷	MgO-GGBS	۱۰	۱۹/۱	۲۱/۴	۱۶/۵	۱۶

می گردد.



شکل ۵ منحنی های تنش-کرنش خاک طبیعی و آلوده

در نمودار شکل (۶) مقایسه مقاومت نهایی نمونه های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با آهک در سه درصد ثابت ۴، ۷ و ۱۰ و زمان های عمل آوری متفاوت، نشان داده شده است که نتایج این مقایسه بیانگر آن است که در همه درصد های افزودنی آهک با افزایش زمان عمل آوری مقاومت نهایی نمونه افزایش می یابد.

مقایسه مقاومت نهایی نمونه های اختلاط یافته با آهک نسبت به خاک طبیعی، بیانگر افزایش مقاومت نمونه ها در نتیجه اختلاط با آهک می باشد؛ همچنین نتیجه گیری می شود با افزایش درصد آهک در زمان عمل آوری ثابت، افزایش مقاومت نهایی رخ می دهد؛ مقایسه مقاومت نهایی نمونه های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با آهک در سه درصد ثابت ۴، ۷ و ۱۰ و زمان های

جدول (۸) مقایسه تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای خاک های طبیعی و آلوده به فنل در تمامی درصد های اختلاط با افزودنی های مختلف، را نشان می دهد که در خاک آلوده به فنل، تغییرات رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه با اضافه شدن میزان آهک، بسیار کمتر از خاک طبیعی است.

نتایج بدست آمده از منحنی های تراکمی خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با MgO-GGBS در نسبت (۱:۳) که در جدول (۸) مشاهده می شود؛ روند کاهشی وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایشی رطوبت بهینه مشابه افزودن آهک می باشد.

همچنین مشاهده می شود که تغییرات در خاک اختلاط یافته با MgO-GGBS کاملاً مشابه رفتار خاک اختلاط یافته با آهک می باشد.

نتایج آزمایش مقاومت تک محوری

شکل (۵) منحنی تنش-کرنش خاک طبیعی و آلوده را نشان می دهد؛ همانطور که مشاهده می شود مقاومت نهایی خاک طبیعی در کرنش ۱/۴٪ و تنش معادل ۱۴۰ kPa رخ می دهد و برای خاک آلوده شده به آلایندة فنل، مقاومت نهایی در کرنش ۳٪ و تنش معادل ۴۱ kPa می باشد. اختلاف زیاد در کرنش نهایی این دو نمونه بیانگر رشد ناچیز تنش با کرنش های بیشتر در خاک آلوده به فنل می باشد و از طرفی، وجود آلایندة فنل در خاک، باعث کاهش ۷۰ درصدی مقاومت نهایی در مقایسه با خاک طبیعی

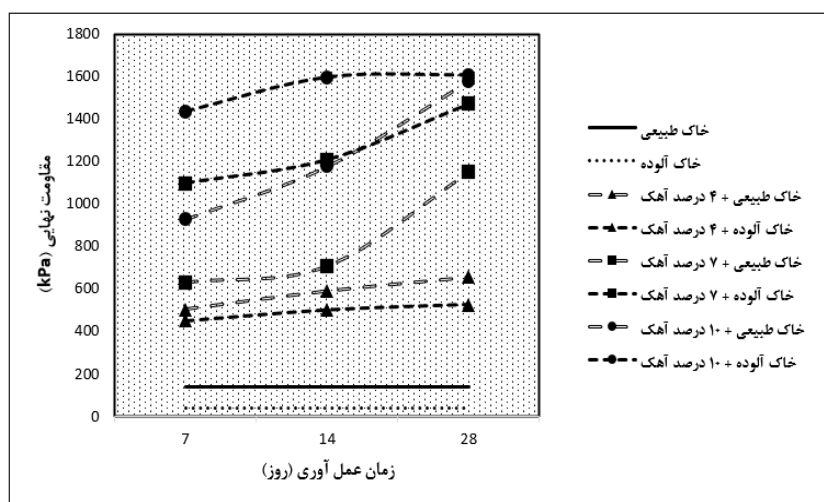
نتایج خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی MgO-GGBS نیز مشابه خاک طبیعی اختلاط یافته با افزودنی MgO-GGBS می باشد و همان روند افزایشی در مقاومت نمونه ها با طولانی تر شدن زمان عمل آوری و افزایش میزان افزودنی مشاهده می گردد و مقایسه منحنی تنش- کرنش خاک آلوده با خاک آلوده اختلاط یافته در شکل (۷)، بیانگر بهبود و افزایش چشمگیر مقاومت در اثر اختلاط با ماده افزودنی می باشد.

همچنین مشاهده می گردد که در زمان های عمل آوری طولانی تر (۱۴ و ۲۸ روزه) و درصد های افزودنی بیشتر از ۴ درصد، مقاومت خاک آلوده اختلاط یافته با MgO-GGBS بیشتر از خاک طبیعی اختلاط یافته با MgO-GGBS می گردد که این امر، در قسمت نتایج نمونه های مقاومتی اختلاط یافته با آهک نیز مشهود بود. (شکل های ۶ و ۷)

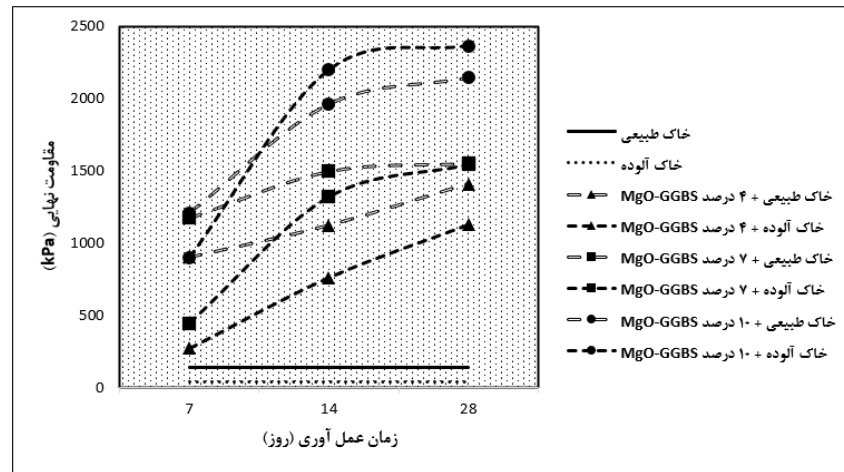
مقایسه مقاومت نهایی خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی در درصد های ۴، ۷ و ۱۰ نیز در شکل (۸) آورده شده است. مقایسه این نتایج نشان می دهد که مقاومت نهایی حاصل از اختلاط ۱۰ درصد افزودنی MgO-GGBS بیشتر از ۱۰ درصد افزودنی آهک می باشد؛ و برای درصد های ۴ و ۷ مقاومت نهایی نزدیک به هم بوده است.

عمل آوری متفاوت نشان می دهد که در درصدهای ۷ و ۱۰ در یک زمان عمل آوری ثابت، مقاومت نمونه های خاک آلوده به فتل اختلاط یافته با آهک از خاک طبیعی اختلاط یافته با آهک بیشتر می باشد. به طوری که در زمان عمل آوری ۱۴ روزه برای خاک آلوده اختلاط یافته با ۱۰ درصد افزودنی آهک مقدار مقاومت نهایی برابر ۱۶۰۰ kPa می باشد و این عدد برای خاک طبیعی اختلاط یافته با ۱۰ درصد افزودنی آهک ۱۱۸۰ kPa گزارش می شود.

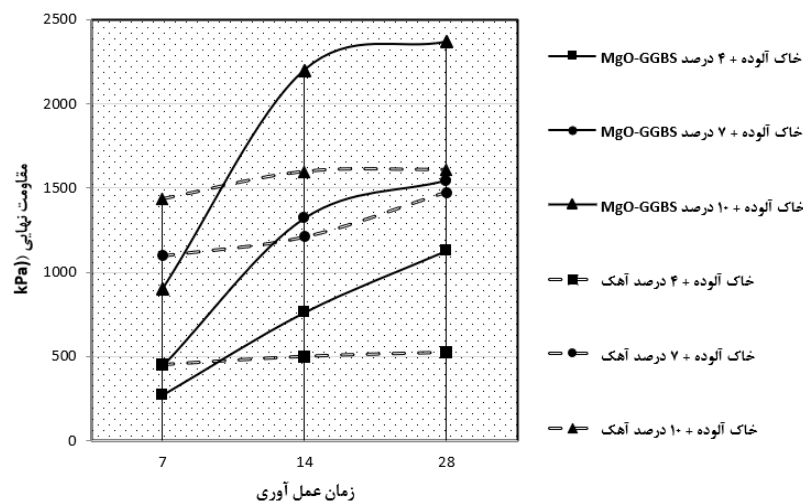
شکل (۷) بررسی تأثیر زمان عمل آوری نمونه ها بر روی مقاومت خاک اختلاط یافته با MgO-GGBS در درصدهای ۴، ۷ و ۱۰ را نشان می دهد؛ از این نتایج استنباط می گردد که در یک درصد ثابت از افزودنی MgO-GGBS با افزایش زمان عمل آوری نمونه ها، مقاومت نهایی نیز افزایش می یابد. همچنین اضافه شدن افزودنی MgO-GGBS، بهبود چشمگیری در مقاومت نمونه های اختلاط یافته نسبت به خاک طبیعی ایجاد می کند؛ لذا می توان نتیجه گرفت که در یک زمان عمل آوری ثابت، با افزایش درصد افزودنی MgO-GGBS، مقاومت نهایی نمونه افزایش می یابد و این افزایش مقاومت با افزایش درصد افزودنی MgO-GGBS در زمان های عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه، افزایش بیشتری دارد.



شکل ۶ مقاومت نهایی خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با آهک در زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و درصد ۴، ۷ و ۱۰



شکل ۷ مقاومت نهایی خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با MgO-GGBS در زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و درصد ۴، ۷ و ۱۰

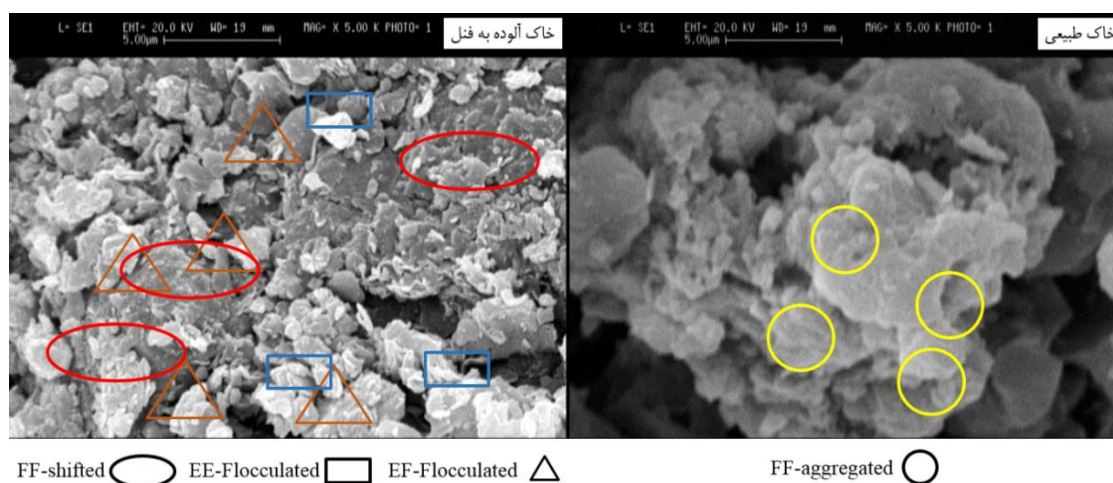


شکل ۸ مقایسه مقاومت نهایی خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی های آهک و MgO-GGBS

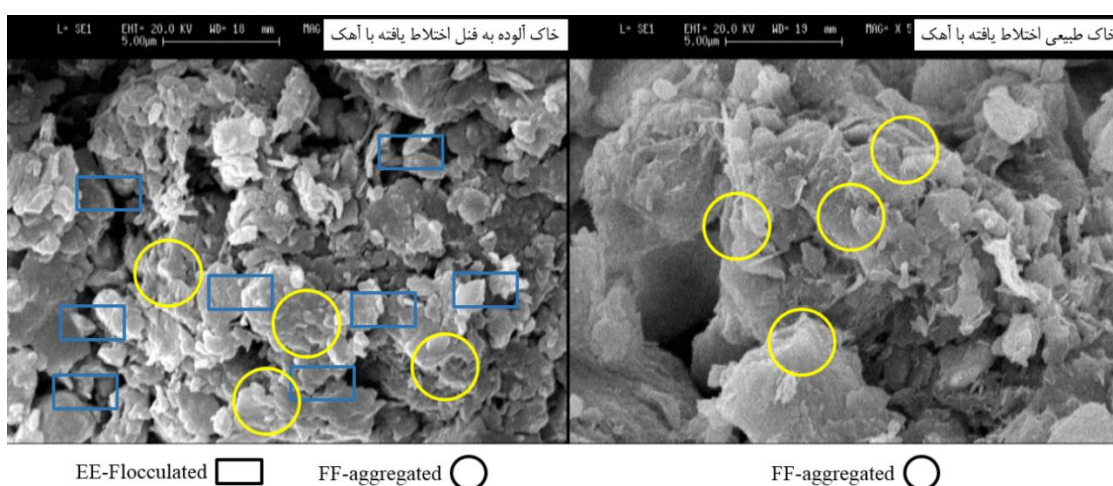
نتایج SEM

یافته با آهک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه را نشان می دهد. در خاک طبیعی اختلاط یافته با آهک، ساختار صفحه به صفحه تجمع یافته می باشد. در مقایسه ریزساختار خاک طبیعی در کنار خاک طبیعی اختلاط یافته با آهک تشکیل ژل های غیر کریستالی بر اثر واکنش های پوزولانی آهک با خاک مشاهده می گردد به طوری که پیوستگی ذرات پس از تشکیل مواد سیمانیه کامل مشهود است. در خاک آلوده اختلاط یافته با آهک، ساختار خاک صفحه به صفحه تجمع یافته است که همچنان ساختار لبه به لبه فولکوله نیز مشاهده می شود اما بسیار کمتر از خاک آلوده می باشد.

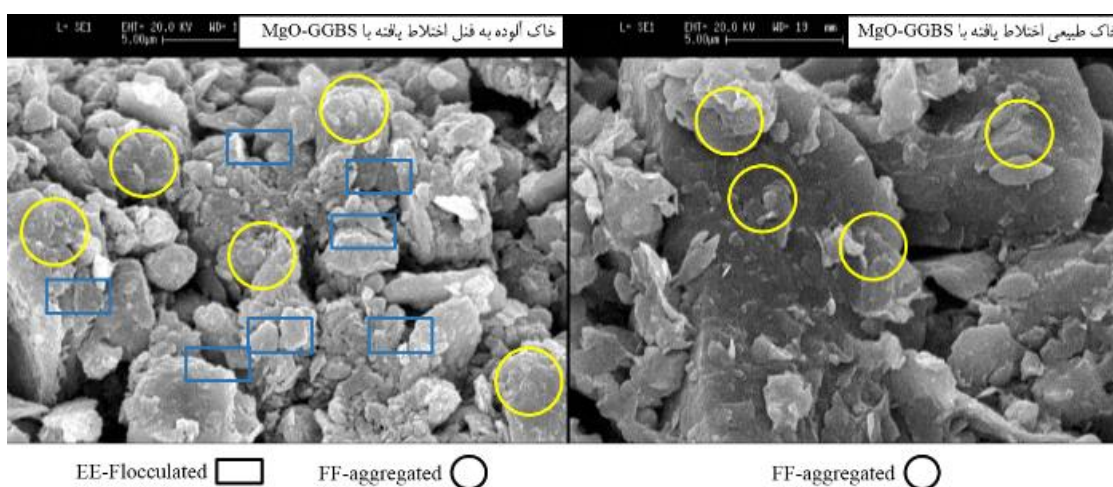
ریز ساختار خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل در شکل (۹) نشان داده شده است؛ مشاهده می شود که ساختار خاک طبیعی به صورت صفحه به صفحه (Face to face – FF) (تجمع شده) (Aggregated) می باشد. در خاک آلوده، تصویر ساختار صفحه به صفحه (تجمع شده) جهت یافته (FF-shifted)، لبه به لبه (Edge to edge – EE) و لبه به صفحه (Edge to face – EF) فولکوله (لخته ای) (Flocculated) تجمع شده را نشان می دهد. شکل (۱۰)، ریز ساختار خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط



شکل ۹ تصاویر ریزساختاری خاک طبیعی و خاک آلوده



شکل ۱۰ تصاویر ریزساختاری خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با آهک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۱ تصاویر ریزساختاری خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با MgO-GGBS

در شکل (۱۱) که مقایسه ریز ساختار خاک طبیعی و خاک آلوده به فنل اختلاط یافته با افزودنی MgO-GGBS مشاهده می شود؛ ریز ساختار خاک آلوده و خاک طبیعی اختلاط یافته با MgO-GGBS مشابه شرایط اختلاط با آهک می باشد. (شکل ۱۰) لذا همان شرایط و توضیحات در حالت اختلاط با MgO-GGBS صدق می کند.

بحث

ساختار خاک رسی متأثر از اثر متقابل بین نیروهای الکتریکی و پدیده های فیزیکی در کانی های رسی است. متغیرهای اثر گذار در ساختار خاک رسی شامل اندازه ذرات، نوع کانی رسی، بار ساختاری یا ذاتی کانی، فعل و انفعالات سیال و تشکیل لایه مضاعف الکتریکی، pH، غلظت یون های سیال منفذی، هندسه ذرات و برهمکنش ذره به ذره می باشد [41]. تغییر ساختار خاک باعث ایجاد تغییراتی در خصوصیات و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی آن می شود.

آلوده شدن خاک رسی به فنل، موجب تغییراتی در متغیرهای اثر گذار ساختار خاک می گردد. که این تغییرات شامل موارد زیر می گردد.

تغییرات pH فنل یک مولکول قطبی می باشد که پس از انحلال در آب، تبدیل به آنیون فنوکسید می شود؛ و یون H^+ را در محیط آزاد می کند. افزایش یون هیدروژن در لایه مضاعف موجب می شود که pH محیط کاهش یابد و محیط اسیدی گردد. این کاهش pH در خاک بیشتر در لایه مضاعف نمود پیدا می کند و تاثیر آن بر کانی رسی خواهد بود؛ زیرا آلاینده به سرعت جذب رس و کاتیون های موجود در لایه مضاعف می گردد و در آن جا با افزایش غلظت یون H^+ ، شرایط برای کانی رسی به سمت محیط ای با pH کمتر خواهد بود. از این رو غلظت کم آلاینده نیز می تواند موجب تغییرات ساختاری در خاک رسی گردد.

تغییرات در بار ساختاری یا ذاتی کانی. مطابق با تحقیقات سابق نشان داده شده است که بار ذاتی ذرات کائولنیت متأثر از pH است (pH dependent) و بار گوشه ها یا لبه های آن (بین ۱۲ تا ۳۴ درصد بار کل ذره رسی) در محیط های اسیدی مثبت می گردد [42]. نتایج برخی از تحقیقات نیز نشان می دهد در محیط

های خیلی اسیدی $pH < 2$ ، به طور کلی بار این کانی در سطح (صفحه) و گوشه ها مثبت می گردد [41]. به همین دلیل می توان بیان نمود که کائولنیت در تغییرات ساختاری خاک مورد آزمایش نقش مؤثری ایفا می کند. اما کانی مونت موریلونیت تغییرات بار الکتریکی متأثر از pH نخواهد داشت.

تغییرات در سیال منفذی و اثر بر لایه مضاعف. طبق تئوری گوی-چپمن در ارتباط با لایه مضاعف، ضخامت لایه مضاعف که در ساختار خاک رسی اثر دارد به ثابت دی الکتریک سیال حفره ای بستگی دارد که رابطه ای مستقیم بین ضخامت لایه مضاعف و ثابت دی الکتریک سیال حفره ای برقرار است؛ از طرفی، ثابت دی الکتریک آب (برابر با ۷۸/۴) حدوداً ده برابر ثابت دی الکتریک فنل (برابر با ۸) می باشد. لذا، کمتر بودن ثابت دی الکتریک فنل نسبت به آب و وجود فنل در سیال حفره ای، باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف می شود. با توجه به همان دلیلی که پیشتر برای اثر بیشتر تغییر pH در لایه مضاعف ذکر گردید؛ تغییرات ثابت دی الکتریک در سیال حفره ای نیز، تحت اثر آلاینده بیشتر در لایه مضاعف رخ خواهد داد و کل سیال متأثر نخواهد بود؛ بنابراین غلظت کم آلاینده نیز موجب تغییرات ثابت دی الکتریک خاک در لایه مضاعف می گردد که در ساختار خاک رسی اثر دارد.

تغییرات در غلظت یون ها و اثر بر لایه مضاعف. افزایش غلظت کاتیون هیدروژن H^+ حاصل از انحلال فنل، طبق تئوری گوی-چپمن موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف می شود.

تغییرات در برهمکنش ذره به ذره. برهمکنش ذره به ذره خاک رسی که موجب تشکیل ساختار خاک رسی می گردد؛ در کانی کائولنیت متأثر از دو متغیر اصلی غلظت یون ها و pH سیال منفذی می باشد محققین نشان داده اند در شرایطی که غلظت کاتیون ها کم باشد (0.15 mol/L)، در $pH < 2$ و $pH > 8$ برهمکنش ذرات به صورت پراکنده (deflocculated-dispersed) خواهد بود و در pH های بین ۲ تا ۸، به شکل لبه به صفحه یا لبه به لبه می شود. و با افزایش غلظت کاتیون در pH های $pH < 2$ و $pH > 8$ برهمکنش ذرات به صورت صفحه به صفحه تجمع شده، و و در pH های بین ۲ تا ۸ برهمکنش به

شکل صفحه به صفحه جهت یافته می باشد [41].

خاک طبیعی مورد تحقیق با توجه به نتایج آزمایش های شیمیایی، غلظت کاتیونی بیشتری از ظرفیت تبادل کاتیونی خود دارد (ظرفیت تبادل کاتیونی خاک طبیعی برابر Cmole/Kg soil ۲۸ و غلظت کاتیون های موجود در خاک Cmole/Kg soil ۱۴) که این موضوع باعث می گردد خاک طبیعی در pH نزدیک به ۸، ساختار تجمع یافته داشته باشد. با توجه به موارد ذکر شده در رابطه با ساختار خاک مورد آزمایش تحت اثر آلاینده فیل و همچنین تصاویر ریز ساختاری SEM نتیجه گیری می شود که خاک آلوده مورد آزمایش ساختار فولکوله لبه به لبه و لبه به صفحه پیدا کند که با توجه به غلظت کاتیون های موجود در خاک این ساختار به شکل تجمع یافته فولکوله یا تجمع یافته جهت یافته نیز مشاهده گردد.

ایجاد ساختار فولکوله در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی که ساختار تجمع یافته دارد؛ باعث پیدایش فضا های خالی بیشتری بین ذرات می گردد؛ که در نتیجه آن افزایش سطح ویژه ذرات رسی و کاهش اصطکاک بین ذرات را موجب می شود. این افزایش سطح ویژه و افزایش فضاهای خالی بین ذرات باعث می شود که در خاک آلوده در حجم ثابت نسبت به خاک طبیعی آب بیشتری در این فضاها قرار گیرد.

در نتایج آزمایش های حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت مشهود است که ساختار فولکوله یا جهت یافته خاک آلوده، سطح ویژه بیشتری نسبت به خاک طبیعی با ساختار تجمع یافته دارد که حجم کلی حفرات بیشتری برای جذب و قرارگیری آب بین ذرات خاک از خود نشان می دهد و در نتیجه آن حدود خمیری و روانی افزایش خواهد یافت.

در شکل (۴) منحنی های تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده نشان داده شده است؛ با توجه به وزن واحد حجم کمتر آب نسبت به ذرات جامد خاک، در خاک آلوده با قرارگیری بیشتر آب در بین فضاها به جای ذرات خاک در مقایسه با خاک طبیعی، وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش پیدا می کند و رطوبت بهینه افزایش یابد. که این موارد، مطابق با نتایج به دست آمده توسط محقیقی مانند حسین و داش (۲۰۱۵)، استبرق و همکاران (۲۰۲۳)، جهانی و همکاران (۲۰۲۲) می باشد [21,43,44].

با توجه به تحقیقات گذشته، نشان داده شده است که هرچه ساختار خاک، بیشتر فولکوله باشد؛ مقاومت تک محوری بهتری

دارد [45]. اما در شکل (۵)، منحنی های تنش- کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده نشان دهنده کاهش مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی می باشد؛ که با توجه به فرضیات فوق، ساختار فولکوله خاک آلوده می بایست موجب افزایش مقاومت نسبت به خاک طبیعی شود. محققین نشان داده اند که اعمال تنش به خاک رسی فولکوله در ناحیه مرطوب منحنی تراکمی (wet side) باعث می شود که ذرات خاک ساختار صفحه به صفحه تجمع یافته یا پراکنده جهت یافته پیدا کنند [46,47]. همچنین مطابق تحقیقات انجام شده، مشاهده گردیده است که آلاینده های آلی در خاک اثر روغن کاری و کاهش اصطکاک بین ذرات دارند که این اثر روغن کاری در خاک های دانه ای اهمیت بیشتری دارد [48]. در آزمایش مقاومت تک محوری به منظور ساخت نمونه به روش تراکم استاتیکی، نمونه در نقطه رطوبت بهینه تحت بارگذاری قرار می گیرید تا به وزن واحد حجم خشک بیشینه برسد؛ به دلیل اینکه وجود فیل در سیال منفذی بین ذرات موجب روغن کاری و کاهش اصطکاک بین ذرات می شود؛ خاک آلوده در رطوبت بهینه، به نوعی در ناحیه مرطوب منحنی تراکمی خود قرار می گیرد و تحت تأثیر تراکم ساختار فولکوله و درهم خود را از دست داده و ساختار جهت یافته پیدا می کند که در نتیجه، کاهش مقاومت نمونه، به دلیل ایجاد ساختار جهت یافته در خاک آلوده بر اثر تراکم استاتیکی مشهود است.

حدود اتربرگ متأثر از خصوصیات فیزیکوشیمیایی و مکانیکی خاک و سیال منفذی است. مگودا و رتناورا عوامل کنترل کننده حدود اتربرگ را مورد مطالعه قرار دادند و آنها اظهار داشتند که اگر از آب به عنوان سیال منفذی استفاده شود، تأثیر عوامل مکانیکی ثابت می ماند. با این حال، اگر به جای آب از یک سیال آلی استفاده شود، آنگاه خواص فیزیکی سیال مانند لزجت بر حد روانی تأثیر می گذارد. ثابت دی الکتریک کم مواد آلی باعث می شود که خاک رس در مجاورت آلودگی آلی، بیشتر شبیه به خاک دانه ای رفتار کند و در نتیجه حد روانی و خمیری را کاهش دهد. خاک رس آلوده به دلیل تشکیل آگلومرا ها (agglomerates) (ذرات تجمع یافته و به هم چسبیده) بیشتر شبیه یک ماده بدون چسبندگی عمل می کند [49].

در کل، میزان تأثیر سیال با لزجت زیاد بر حد روانی و خمیری خاک به ویژگی های خاص خاک و شرایط محیطی آن بستگی دارد. در برخی موارد، حدود اتربرگ ممکن است کاهش

و این موضوع در محیط های قلیایی باعث می شود خاک به صورت کامل در لبه ها و صفحه بار منفی داشته باشد [41].

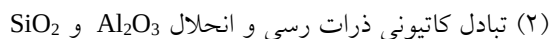
تغییرات در سیال منفذی و اثر بر لایه مضاعف. طبق تئوری و رابطه گوی-چپمن و احتمال کاهش ثابت دی الکتریک سیال حفره ای در اثر انحلال افزودنی ها (آب در بین مواد بیشترین ثابت دی الکتریک را دارد (برابر با ۷۸/۴) و انحلال مواد دیگر در آن ممکن است موجب کاهش ثابت دی الکتریک آن شود.) ضخامت لایه مضاعف کاهش می یابد.

تغییرات در غلظت یون ها و اثر بر لایه مضاعف. افزایش غلظت کاتیون های Ca^{2+} و Mg^{2+} حاصل از انحلال افزودنی ها، طبق تئوری گوی-چپمن موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف می شود.

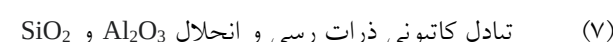
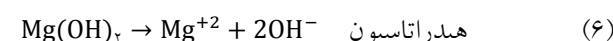
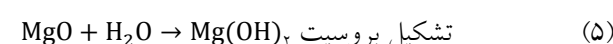
تغییرات در برهمکنش ذره به ذره. در بخش قبل ذکر شد که در کانی کائولنیت دو متغیر اصلی غلظت یون ها و pH سیال منفذی ساختار خاک را تعیین می کنند؛ در وضعیتی که افزایش غلظت کاتیون ها موجب افزایش pH می شود ساختار خاک به صورت صفحه به صفحه تجمع یافته خواهد بود [41].

علاوه بر موارد فوق الذکر، به واسطه افزودنی ها، واکنش های شیمیایی (هیدراتاسیون، تبادل کاتیونی و واکنش های پوزولانی) در خاک شکل می گیرد که این واکنش ها برای هر افزودنی در ادامه تشریح شده است.

واکنش های شیمیایی مذکور برای افزودنی آهک به شکل زیر می باشد:



و برای افزودنی MgO-GGBS نیز شامل واکنش های زیر است:



یابد و در موارد دیگر، افزایش یابد [2,50]. لزجت فنل (حدود ۱.۵ تا ۲.۰ میلی پاسکال ثانیه (mPa.s)) دو برابر لزجت آب (تقریباً ۱.۰۰۲ میلی پاسکال ثانیه (mPa.s)) است؛ پس سیال منفذی در خاک آلوده به فنل، لزجت بالاتری دارد؛ در مجاورت سیالات با لزجت زیاد، خاک ممکن است در برابر تغییر شکل مقاوم تر عمل کند؛ این بدان معناست که برای رسیدن به حالت روان، نیاز به رطوبت بیشتری خواهد بود و حد روانی ممکن است افزایش یابد [51]. همچنین لزجت زیاد سیال ممکن است موجب افزایش خاصیت خمیری (پلاستیسیته) خاک شود. در این حالت، برای رسیدن به حالت خمیری، به رطوبت بیشتری نیاز است، که حد خمیری را افزایش می دهد [51].

مقایسه حدود اتزبرگ خاک طبیعی و آلوده نشان داد که با آلوده شدن خاک، حدود اتزبرگ افزایش می یابد که این امر حاکی از آن است که تحت اثر افزایش لزجت سیال منفذی در خاک آلوده، نیاز به محتوای آب بیشتری برای رسیدن به حد روانی و حد خمیری شده است. همچنین ساختار فولکوله خاک آلوده موجب افزایش سطح ویژه می گردد که این موضوع موجب افزایش فضا های بین ذره ای و جذب آب می شود.

اضافه شدن آهک و MgO-GGBS به خاک موجب انجام واکنش های شیمیایی (هیدراتاسیون، تبادل کاتیونی و واکنش های پوزولانی) بین مواد افزودنی و ذرات رسی خاک می گردد؛ که این واکنش ها امکان تشکیل ترکیبات هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH)، هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) و یا ترکیبات مشابه را فراهم می کنند که در افزایش مقاومت نمونه ها نقش مهمی دارند؛ همچنین ساختار یا فابریک خاک در اثر انحلال مواد افزودنی ممکن است که تغییر کند که در ادامه عوامل مؤثر بر این تغییرات بررسی می شود. این تغییرات در ساختار خاک بیشتر در کوتاه مدت خواهند بود و پس از انجام واکنش های پوزولانی در بلند مدت، محصولات این واکنش ها شرایط را کنترل می کنند.

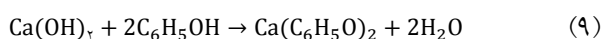
تغییرات در pH انحلال افزودنی ها باعث افزایش کاتیون های فلزات قلیایی در سیال منفذی می شود؛ که در نتیجه آن pH محیط و سیال منفذی افزایش می یابد و محیط قلیایی گردد.

تغییرات در بار ساختاری یا ذاتی کانی. در بخش قبل ذکر شد که بار ذاتی ذرات کائولنیت متأثر از pH است (pH dependent)

به تغییر در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نسبت داده شده است [58]. تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در این دو خاک متفاوت بوده و نتایج غیر یکسان را ارائه می کند.

با وجود اینکه ساختار تجمع یافته موجب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می گردد. (حجم کلی فضا های خالی بر اثر درشت دانه تر شدن ذرات خاک کاهش پیدا می کند [59,60]). اما افزایش درصد آهک و MgO-GGBS در خاک طبیعی، روند افزایشی رطوبت بهینه و روند کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه را به همراه دارد که این روند به دلایل زیر رخ می دهد:

افزایش سطح ویژه خاک احتلاط یافته به دلیل وجود افزودنی های با سطح ویژه زیاد نسبت به خاک، موجب قرارگیری بیشتر آب در فضا بین ذرات خاک، کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می شود. همچنین وزن واحد حجم کمتر مواد افزودنی نسبت به خاک طبیعی نیز مزید بر کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می شود؛ زیرا ذرات افزودنی که جایگزین ذرات خاک می شوند، دارای وزن واحد حجم کمتری می باشند [60]. اما نتایج نشان می دهد که در درصد های کم افزودنی آهک و MgO-GGBS مشاهده می شود که خاک طبیعی احتلاط یافته نسبت به خاک طبیعی کاهش رطوبت بهینه را به همراه دارد که این امر به دلیل تغییر در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تحت اثر افزودنی ها است که در درصد های کم افزودنی کاهش رطوبت بهینه را نسبت به خاک طبیعی همراه دارد. همانطور که در بخش نتایج مقاومتی ذکر شد؛ نمونه های خاک آلوده احتلاط یافته با افزودنی های آهک و MgO-GGBS مقاومت بیشتری نسبت به خاک طبیعی احتلاط یافته با افزودنی های مذکور دارند که این امر به دلیل تشکیل ماده ای سخت به نام فنولات کلسیم یا کلسیم دی فنوکسید با فرمول شیمیایی $C_{12}H_{10}CaO_2$ می باشد که بر اثر واکنش زیر بین افزودنی و آلایند تولید می شود.



تشکیل رسوب فنولات کلسیم یا کلسیم دی فنوکسید در خاک آلوده به فنل بهسازی شده با آهک، توسط محققینی مانند ویپولاندان (۱۹۹۵) و حسنوف (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است که موجب افزایش مقاومت می گردد [24,61].

ترکیبات CAH و CSH، در ابتدا به صورت ژل می باشند؛ که با گذشت زمان سخت می شوند؛ که موجب پیوند محکم بین ذرات و افزایش مقاومت می گردند. هرچه میزان افزودنی بیشتر باشد، انجام واکنش های فوق بیشتر بوده و تولید مواد چسبنده و سیمانیته بیشتر می شود و هرچه زمان عمل آوری بیشتر باشد این مواد چسبنده و سیمانیته کننده سخت تر می شوند [52-55]. که این مواد سیمانیته در تصاویر SEM به صورت پیوستگی بین ذرات مشاهده می گردند. (شکل های ۱۰ و ۱۱) همچنین هیدراتاسیون افزودنی ها منجر به غلظت بالای کاتیون ها در لایه مضاعف الکتریکی می شود که موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف و تشکیل ساختار تجمع یافته می گردد [56]. با گذشت زمان در اثر همین مواد سیمانیته کننده خاک طبیعی و آلوده به فنل در اثر احتلاط با مواد افزودنی، افزایش مقاومت نیز خواهند داشت. نتایج به دست آمده در این شرایط، با نتایج ارائه شده به وسیله راتناویرا و میگودا (۲۰۰۶)، استبرق و همکاران (۲۰۲۳)، استبرق و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد [15,23,25,44,57].

در شکل های (۲) و (۳)، مقایسه نتایج نمونه های احتلاط یافته با مواد افزودنی، افزایش حد روانی و خمیری نسبت به خاک طبیعی است که دلیل آن در افزایش سطح ویژه خاک احتلاط یافته نسبت به خاک طبیعی می باشد.

در آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک احتلاط یافته با افزودنی های آهک و MgO-GGBS، ساختار تجمع یافته ایجاد می گردد؛ اما در تعیین حد روانی و حد خمیری خاک ها، تغییرات سطح ویژه تحت تأثیر افزودنی ها، نقش اصلی را ایفا می کند. با این حال، در درصد های کم (۴ درصد) افزودنی های آهک و MgO-GGBS در خاک آلوده احتلاط یافته، حد روانی نسبت به خاک آلوده کاهش داشته است که این موضوع به دلیل تغییر ساختار خاک به ساختار تجمع یافته می باشد که موجب کاهش سطح ویژه می شود.

در شکل (۲) مشاهده می گردد؛ حد روانی خاک آلوده احتلاط یافته با آهک و MgO-GGBS نسبت به خاک طبیعی احتلاط یافته با آهک و MgO-GGBS کمتر است؛ در حالی که خاک آلوده، نسبت به خاک طبیعی، حد روانی بیشتری دارد. دلیل این موضوع، تفاوت در ساختار اولیه خاک طبیعی و آلوده است؛ تحقیقات نشان داده که افزودن آهک به کائولنیت موجب افزایش حد روانی و افزایش شاخص خمیری می شود. این تغییرات رفتار

نتیجه گیری

در این پژوهش مجموعه‌ای شامل ۱۴ آزمایش تعیین حدود اتربرگ، ۱۴ آزمایش تراکم استاندارد، ۱۱۴ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و ۶ آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنل، و همچنین نمونه‌های بهسازی‌شده با درصد‌های مختلف مواد افزودنی آهک و MgO-GGBS انجام گرفت.

بررسی تغییرات حدود اتربرگ نشان داد که آلودگی خاک به فنل منجر به افزایش حد روانی و حد خمیری و در نتیجه کاهش شاخص خمیری می‌شود. حد روانی از ۲۷٪ در خاک طبیعی به ۲۹٪ و حد خمیری از ۱۷٪ به ۲۰٪ افزایش یافت، در حالی که شاخص خمیری از ۱۰ به ۹ کاهش پیدا کرد. افزودن مواد تثبیت‌کننده، بسته به نوع خاک و درصد مصرف، تأثیرات متفاوتی داشت. در خاک طبیعی، اختلاط با آهک یا MgO-GGBS به طور کلی حد روانی و حد خمیری را افزایش داد. اما در خاک آلوده، درصد‌های پایین مواد افزودنی (۴ و ۷٪) باعث کاهش حد روانی نسبت به خاک آلوده بدون افزودنی شد و تنها در درصد بالاتر (۱۰٪) روندی مشابه خاک طبیعی مشاهده گردید. در همه حالت‌ها، افزایش درصد افزودنی موجب افزایش حد خمیری شد. نتایج آزمایش تراکم نشان داد که وجود فنل باعث کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه از 18 kN/m^3 به 16.2 kN/m^3 و افزایش رطوبت بهینه (از ۱۷٪ به ۱۹.۵٪) می‌گردد. اختلاط خاک با آهک یا MgO-GGBS معمولاً موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود که این اثر با افزایش درصد افزودنی تشدید می‌گردد. با این حال، در برخی مقادیر پایین افزودنی (۴ و ۷٪)، خاک طبیعی کاهش مختصری در رطوبت بهینه نشان داد که احتمالاً ناشی از تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی است. تغییرات در خاک آلوده به فنل نیز مشابه بوده ولی دامنه تغییرات نسبت به خاک طبیعی کمتر بوده است.

آزمایش مقاومت تک‌محوری نشان داد که آلودگی خاک به فنل باعث کاهش شدید مقاومت (حدود ۷۰٪) می‌شود؛ به طوری که مقاومت نهایی از ۱۴۰ kPa در خاک طبیعی به ۴۱ kPa در خاک آلوده کاهش یافت. با این حال، اختلاط با هر دو افزودنی موجب افزایش مقاومت در هر دو نوع خاک شد و این افزایش تابعی مستقیم از درصد افزودنی و مدت زمان عمل‌آوری بود. در هر دو نوع خاک، بیشترین مقاومت مربوط به درصد‌های بالاتر

افزودنی و زمان عمل‌آوری طولانی‌تر (۲۸ روزه) بود. جالب آن‌که در درصد‌های متوسط و بالا (۷ و ۱۰٪)، خاک آلوده بهسازی‌شده مقاومت بالاتری نسبت به خاک طبیعی بهسازی‌شده نشان داد. این امر احتمالاً به دلیل تشکیل ترکیبات سخت و سیمانی نظیر فنولات کلسیم در خاک آلوده است. مقایسه بین دو افزودنی نشان داد که MgO-GGBS در درصد ۱۰٪ مقاومت بیشتری نسبت به آهک ایجاد می‌کند، هرچند در درصد‌های پایین‌تر نتایج دو افزودنی نزدیک به هم است.

تصاویر SEM تغییرات قابل توجهی را در ریزساختار نمونه‌ها نشان داد. خاک طبیعی عمدتاً ساختار صفحه‌به‌صفحه متراکم داشت، در حالی که خاک آلوده ساختاری فولکوله با آرایش لبه‌به‌لبه و لبه‌به‌صفحه پیدا کرده بود که فضای خالی و سطح ویژه بیشتری ایجاد می‌کند. در نمونه‌های بهسازی‌شده با آهک یا MgO-GGBS، تشکیل ژل‌های سیمانی CSH و CAH و پیوندهای بین‌ذره‌ای به وضوح مشاهده شد که بیانگر واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون است. این تغییرات ساختاری باعث کاهش فضای خالی و افزایش پیوستگی ذرات گردیده و بهبود مقاومت مکانیکی را توجیه می‌کند.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که:

۱. فنل موجب تضعیف خواص مکانیکی خاک و تغییر پارامترهای فیزیکی آن می‌شود.
۲. افزودن آهک و MgO-GGBS بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت و برخی خصوصیات فیزیکی ایجاد می‌کند که با افزایش درصد و زمان عمل‌آوری تشدید می‌شود.
۳. خاک آلوده بهسازی‌شده در برخی شرایط مقاومت بالاتری از خاک طبیعی بهسازی‌شده دارد که به دلیل واکنش‌های شیمیایی بین فنل و افزودنی‌هاست.
۴. MgO-GGBS به‌ویژه در درصد‌های بالاتر عملکرد مقاومتی بهتری نسبت به آهک ارائه می‌دهد.

واژه نامه

Soil Stabilization	بهسازی خاک
Clay Soil	خاک رسی
Contaminated Soil	خاک آلوده
Phenol	فنل
Lime	آهک

تقدير و تشكر

- [1] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons New York, 2005.
- [2] J. K. Mitchell, *Fundamentals of Soil Behavior*. Wiley, 1993.
- [3] M. Weber, M. Weber, and M. Kleine-Boymann, "Phenol," in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
https://doi.org/10.1002/14356007.a19_299.pub3
- [4] L. Djokic *et al.*, "Phenol removal from four different natural soil types by *Bacillus* sp. PS11," *Applied Soil Ecology*, vol. 70, pp. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.04.002>
- [5] C. Du, C. Shang, T. Wang, X. Xiao, J. Ruan, D. Ma, Y. Tang, and R. Qiu, "Study of the process and mechanism of the remediation of phenol contaminated soil by plasma vibrated bed," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 37, no. 6, pp. 1635–1653, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11090-017-9850-6>
- [6] R. Yong, *Geoenvironmental Engineering: Contaminated Soils, Pollutant Fate, and Mitigation*. 2000, pp. 1-309.
- [7] E. Khosravi, H. Ghasemzadeh, M. R. Sabour, and H. Yazdani, "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite," *Engineering Geology*, vol. 166, pp. 11-16, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>
- [8] A. Tuncan, "Predicted mechanism of crude oil and marine clay interactions," *Environmental Geotechnology*, 1992.
- [9] A. W. Hago, H. F. Hassan, A. Al Rawas, R. Taha, and S. Al-Hadidi, "Characterization of concrete blocks containing petroleum-contaminated soils," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 952-957, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.04.006>
- [10] S. J. Shah, A. V. Shroff, J. V. Patel, K. C. Tiwari, and D. Ramakrishnan, "Stabilization of fuel oil contaminated soil—A case study," *Geotechnical & Geological Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 415-427, 2003.

<https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.1a>

- [11] E. Foreman David and E. Daniel David, "Permeation of Compacted Clay with Organic Chemicals," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 112, no. 7, pp. 669-681, 1986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:7\(669\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:7(669))
- [12] A. Sridharan, A. El-Shafei, and M. Norihiko, "A study on the dominating mechanisms and parameters influencing the physical properties of Ariake clay," *Lowland Technology International*, vol. 2, no. 2, pp. 55-70, 2000.
- [13] A. Sridharan and G. Rao, "Mechanism controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept," *Géotechnique*, vol. 23, pp. 359-382, 1973. <https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.3.359>
- [14] H. A. Al-Sanad, W. K. Eid, and N. F. Ismael, "Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 121, no. 5, pp. 407-412, 1995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:5\(407\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:5(407))
- [15] Ratnaweera, P. and Meegoda, J.N., "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils," *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), pp.133-140, 2006. <https://doi.org/10.1520/GTJ12686>
- [16] A. R. Estabragh, I. Beytollahpour, M. Moradi, and A. A. Javadi, "Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 503-519, 2016. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1047900>
- [17] N. Boushvaei, M. Jirayee-Shar, and M. Amlaskhi, "Laboratory study of the behavior of clay soil stabilized with calcium lignosulfonate and polyethylene fibers under wetting-drying cycles," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, 2023.
- [18] R. Rezvani Tochahi, M. Azizi, P. Noupars, and A. Nabizadeh, "Investigation of the effect of lime and nano-lime on the compaction and strength characteristics of Chalous coastal sand," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 55-70, 2020.
- [19] Amini, Raeisi Estabraq, Abdollahi, and Jamal, "Effect of magnesium oxide on the improvement of a clay soil contaminated with phenanthrene," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 53-66, 2021.
- [20] W. Li, P. Ni, and Y. Yi, "Comparison of reactive magnesia, quick lime, and ordinary Portland cement for stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soils," *Science of The Total Environment*, vol. 671, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.270>
- [21] a. jahani, A. Raesi Estabragh, h. khajepour, and M. Amini, "Comparison of the effect of Cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and activated GGBS on stabilization of a clay soil," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 89-106, 2022. https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_42698.html?lang=en
- [22] M. Amini, A. Raeisi Estabraq, and J. Abdollahi Alibeyk, "Effect of magnesium oxide on the improvement of a clay soil contaminated with phenanthrene," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 34, no. 3, 2021.
- [23] Jahani, A. Raeisi Estabraq, Khajepour, and M. Amini, "Comparison of the performance of cement, ground granulated blast furnace slag (GGBS), and activated GGBS in the improvement of a clay soil," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 89-106, 2022. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.74908.1115>
- [24] C. Vipulanandan, "Effect of clays and cement on the solidification/stabilization of phenol-contaminated soils,"

- Waste Management*, vol. 15, no. 5-6, pp. 399-406, 1995. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(95\)00041-W](https://doi.org/10.1016/0956-053X(95)00041-W)
- [25] A. R. Estabragh, M. Amini, A. Javadi, and C. Lull, "Remediation of a clay soil contaminated with phenanthrene by using mixture of bentonite and cement," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 42, 2022. <https://doi.org/10.1002/ep.14055>
- [26] N. Heidarzadeh, M. Tayebi Jebeli, and T. Taslimi, "Cement-based solidification/stabilization of phenol-contaminated soil by bentonite and organophilic clay," *Remediation Journal*, vol. 28, pp. 87-96, 2017. <https://doi.org/10.1002/rem.21545>
- [27] Z. Su, J. Liu, Y. Jin, C. Hou, and Y. Nie, "Cement/Activated-Carbon Solidification/Stabilization Treatment of Phenol-Containing Soil," 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Icbbe, 2009, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2009.5162482>
- [28] C. Shi, D. Roy, and P. Krivenko. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis, 2006.
- [29] D. Higgins, "Briefing: GGBS and sustainability," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 160, no. 3, pp. 99-101, 2007. <https://doi.org/10.1680/coma.2007.160.3.99>
- [30] D. Higgins, "Soil stabilisation with ground granulated blastfurnace slag," *UK Cementitious Slag Makers Association (CSMA)*, vol. 1, p. 15, 2005.
- [31] Y. Yi, M. Liska, and A. Al-Tabbaa, "Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS, MgO, Lime, and PC," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, pp. 267-274, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000806](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000806)
- [32] F. Jin, F. Wang, and A. Al-Tabbaa, "Three-year performance of in-situ solidified/stabilised soil using novel MgO-bearing binders," *Chemosphere*, vol. 144, pp. 681-688, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.046>
- [33] n. Headarzadeh and T. Taslimi, "Evaluation of the unconfined compressive strength in solidification and stabilization of a phenol-contaminated soil using ordinary and organophilic clays," *Journal of Engineering Geology*, vol. 11, no. 4, pp. 343-362, 2018.
- [34] Y. Yi, M. Liska, F. Jin, and A. Al-Tabbaa, "Mechanism of reactive magnesia-GGBS soil stabilisation," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 53, no. 5, pp. 773-782, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0183>
- [35] E. A. Basha, R. Hashim, H. B. Mahmud, and A. S. Muntohar, "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement," *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 6, pp. 448-453, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- [36] ASTM International, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ [2,700 kN-m/m³])", ASTM D1557-09, West Conshohocken, PA, USA, 2009.
- [37] ASTM International, "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", ASTM D4318-10, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
- [38] A. R. Estabragh, I. Beytolahpour, and A. A. Javadi, "Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, pp. 969-976, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000252](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000252)
- [39] ASTM International, "Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in

- the Laboratory", ASTM D1632-07, West Conshohocken, PA, USA, 2007.
- [40] ASTM International, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", ASTM D1633-00, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
- [41] A. Palomino and J. Santamarina, "Fabric map for kaolinite: Effects of pH and ionic concentration on behavior [J]," *Clays and Clay Minerals - CLAYS CLAY MINER*, vol. 53, pp. 211-223, 2005.
- [42] Y. H. Wang and W .K. Siu, "Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 43, no. 6, pp. 587-600, 2006. <https://doi.org/10.1139/t06-026>
- [43] M. Hussain and S. Dash, "The influence of lime on the compaction behaviour of soils," *Environmental Geotechnics*, vol. 3, no. 5, 2015. <https://doi.org/10.1680/envgeo.14.00015>
- [44] A. R. Estabragh, A. Shourijeh, K. Rezaei, A. Javadi, and M. Amini, "Stabilization and Solidification of a Clay Soil Contaminated with MTBE by Using MgO and Hydrated Lime," *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, pp. 1-20, 2023. <https://doi.org/10.1080/15320383.2023.2192283>
- [45] J. Mitchell, "Fundamentals of soil behavior," ed: John Wiley & Sons/John Wiley & Sons, LTD, 2005.
- [46] Y.-H. Wang and W.-K. Siu, "Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 43, no. 6, pp. 601-617, 2006. <https://doi.org/10.1139/t06-027>
- [47] H. Cetin, M. Fener, M. Söylemez, and O. Günaydin, "Soil structure changes during compaction of a cohesive soil," *Engineering geology*, vol. 92, no. 1-2, pp. 38-48, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.03.005>
- [48] M. Khamchian, A. H. Charkhabi, and M. Tajik, "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils," *Engineering geology*, vol. 89, no. 3-4, pp. 220-229, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.009>
- [49] N. J. Meegoda and P. Ratnaweera, "Compressibility of contaminated fine-grained soils," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 17 ,no. 1, pp. 101-112, 1994. <https://doi.org/10.1520/GTJ10078J>
- [50] B. M. Das and K. Sobhan, "Principles of geotechnical engineering," 2006.
- [51] V. Murthy, *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press, 2002.
- [52] D. Boardman, S .Glendinning, and C. Rogers, "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes," *Geotechnique*, vol. 51, no. 6, pp. 533-543, 2001. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533>
- [53] R. Parvaresh, R. Dabiri, and S. Ebrahimi Asl, "Effect of nano -cement particles on the geotechnical properties of aeolian sand-bentonite mixtures," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 1-24, 2024. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.82076.1225>
- [54] M. Amiri, A. Asakereh, and A. H. Farokhdel, "The effect of combined nanosilica and lime on the improvement of the marl soil engineering properties," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 35-54, 2019. <https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.73803>

- [55] P. T. Sherwood, "Soil Stabilization with Cement and Lime (TRL State-of-the-Art Review)", London, UK: HMSO, 1995.
- [56] J. K., "B. M. Das, 1983. Advanced Soil Mechanics. xiii + 511 pp. Washington, New York, London: Hemisphere Publishing Corp. Price U.S. \$34.95. ISBN 0-07-015416-3," Geological Magazine, vol. 121, p. 377, 2009.
- [57] A. R. Estabragh, M. Amini, A. Javadi, and M. T. Sanjuan, "Remediation of a clay soil contaminated with phenanthrene with MgO and forced carbonation," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 97, no. 9, 2022. <https://doi.org/10.1002/jctb.7136>
- [58] F. G. Bell, "Lime stabilization of clay minerals and soils," *Engineering Geology*, vol. 42, no. 4, pp. 223-237, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- [59] K. T. Osman, "Physical properties of soil," in *Soils: Principles, Properties and Management*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012, pp. 49–65. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_5
- [60] Shoush Pasha, Eisa, Abbasi, and Molaabbasi, "Investigation of the effect of zeolite and cement on the compaction of Babolsar sandy soil," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 69–78, 2017. <https://doi.org/10.22067/civil.v29i1.43575>
- [61] R. G. Hasanov, G. Hasanov, and V. K. Valiev, "NEUTRALIZATION OF PHENOL-CONTAMINATED SOILS," *Chemical Problems*, vol. 20, pp. 154-163, 2022.