

مطالعه رفتار غیراشباع خاک تثبیت شده ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح شده

احمد کامل ابراهیم ال‌کینانی^۱، علی اخترپور^{۲*}، مصطفی م. عبدالحسین^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

ah.alkinani@mail.um.ac.ir

^{۲*} گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

akhtarpour@um.ac.ir

^۳ گروه مهندسی عمران، دانشگاه کوفه، نجف، عراق

mustafam.alesawy@uokufa.edu.iq



چکیده

این پژوهش به بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و گرد کوره سیمان (CKD) تحت تراکم‌های ۹۰٪ و ۹۵٪ می‌پردازد. آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از تحکیم غیراشباع برای به‌دست آوردن منحنی‌های SWRC و ارزیابی نقش مکش در تراکم‌پذیری و نگهداری آب خاک انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو عامل سیمان و CKD ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داده، اثرات هیستریزیس را کاهش و مقاومت آن در برابر تراکم و تورم را بهبود می‌بخشند. مدل وان گنوختن تطبیق خوبی با منحنی‌های SWRC قبل و پس از تثبیت با سیمان و CKD را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ CKD به ترتیب موجب کاهش هیستریزیس و بهبود منحنی SWRC به‌ویژه در تراکم ۹۵٪ شده است. همچنین، در تراکم ۹۵٪ و مکش ۶۰ کیلوپاسکال، سیمان به ضریب بهبود ۸۳٪ و CKD به ۳۳٪ رسیده است. تجزیه و تحلیل SEM بهبود میکروساختاری ناشی از هیدراسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی CKD را تأیید کرد. این یافته‌ها بر اهمیت تثبیت‌کننده‌ها در بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی و پایداری بلندمدت خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق در محیط‌های مرطوب تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک گچی، منحنی مشخصه SWRC، ماسه گچ‌دار عراق، افزودنی‌های سیمانی، گرد کوره سیمان (CKD)، مکانیک خاک غیراشباع

* علی اخترپور، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
ایمیل: akhtarpour@um.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Study of unsaturated behavior of Iraqi gypsum-rich sand stabilized soil with cement and CKD using a modified consolidation device

Ahmed Kamil Abraheim Alkinani ¹, Ali Akhtarpour ^{2*}, Mustafa M. Abdalhusein ³

¹ Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Email: ah.alkinani@mail.um.ac.ir

^{2*} Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Email: akhtarpour@um.ac.ir

³ Department of Civil Engineering, University of Kufa, Al-Najaf, Iraq
Email: mustafam.alesawy@uokufa.edu.iq

Abstract

This research explores the compaction behaviour of Iraqi gypsum-sand soils stabilized with cement and cement kiln dust (CKD) at varying additive percentages (1%, 3%, 6%, and 9%) under different compaction levels (90% and 95%). Laboratory experiments were conducted using a modified oedometer to obtain Soil Water Retention Curves (SWRC) and assess the impact of matric suction on soil compressibility and water retention. The study reveals that both cement (3%) and CKD (6%) significantly improve the water retention capacity of the soil, reduce hysteresis effects, and enhance its resistance to compaction and swelling. These additives positively influence the soil's water-holding capacity, thereby improving its performance in both saturated and unsaturated conditions. The Van Genuchten model was effectively used to describe the SWRC, demonstrating that cement outperforms CKD in terms of hydraulic behaviour due to the formation of stronger cementitious bonds, which contribute to better soil structure and stability.

Additionally, the improvement analysis highlights that stabilization at higher compaction levels (95%) and under conditions of increased matric suction results in greater effectiveness, with cement-treated soils showing the most significant improvement in performance. This is particularly critical for applications in environments where soil behaviour under varying moisture content is a key factor. Furthermore, Scanning Electron Microscope (SEM) analysis confirmed the microstructural enhancements caused by cement hydration and the pozzolanic reactions of CKD, which help form a more stable and cohesive structure at the particle level.

The results showed that adding 3% cement and 6% CKD reduced hysteresis and improved the SWRC curve, especially at 95% density. Also, at 95% density and 10 kPa suction, cement reached an improvement factor of 83% and CKD reached 33%.

The findings underline the importance of both the type of stabilizing agent and the compaction level in improving the hydraulic properties and long-term stability of Iraqi gypsum-rich sandy soils. This research emphasizes the potential of using cement and CKD for soil stabilization, particularly in regions where moisture variability and soil behaviour are significant challenges. These insights contribute to the development of more durable and sustainable soil stabilization techniques in geotechnical engineering.

Keywords: Gypsum soil stabilization, SWRC (Soil Water Retention Curve), Iraqi gypsum sand, cementitious additives, Cement Kiln Dust (CKD), unsaturated soil mechanics

۱. مقدمه

می‌دهد که علاوه بر افزایش مقاومت خاک، آن را در برابر تورم و انقباض مقاوم‌تر می‌سازد [۲۹-۲۶].

نتایج مطالعات نشان‌دهنده تأثیر مثبت ترکیب سیمان و CKD در بهبود ویژگی‌های فنی و زیست‌محیطی خاک‌های تثبیت‌شده است [۳۴-۳۰]. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، علاوه بر افزایش مقاومت‌های مکانیکی، تغییرات قابل توجهی در کاهش میزان تورم و بهبود ویژگی‌های انقباضی و کششی خاک‌ها مشاهده می‌شود. به‌ویژه در پروژه‌های جاده‌سازی و ساخت‌وسازهای بزرگ، این ترکیب باعث کاهش هزینه‌های پروژه و افزایش دوام ساختارهای خاکی می‌شود. علاوه بر مزایای فنی، استفاده از CKD، که یک محصول جانبی صنعت سیمان است، به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده می‌تواند اثرات زیست‌محیطی مثبتی نیز داشته باشد [۳۵]. استفاده از این ماده زائد به‌جای دفع آن به محیط زیست، منجر به کاهش آلودگی و بهره‌برداری بهینه از منابع صنعتی می‌شود. به‌طور کلی، این روش می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی با کارایی بالا مطرح گردد که هم از نظر فنی و هم زیست‌محیطی و اقتصادی مزایای زیادی دارد [۳۷ و ۳۶].

فراتر از نقش افزودنی‌ها، تراکم و مکش بافتی از عوامل کلیدی در رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع به شمار می‌روند. تراکم با کاهش فضای خالی باعث افزایش سختی خاک می‌شود، در حالی که مکش بافتی ظرفیت نگهداری آب، تراکم‌پذیری و مقاومت برشی خاک را در شرایط غیراشباع کنترل می‌کند [۳۸]. منحنی مشخصه رطوبتی (SWRC) ابزاری بنیادی برای توصیف این روابط است که ارتباط بین مکش بافتی و میزان آب موجود در خاک را برقرار کرده و امکان ارزیابی کمی رفتار خاک در شرایط نوسانات رطوبتی را فراهم می‌آورد [۳۹].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تثبیت خاک باعث تغییر در منحنی SWRC شده، ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد و اثرات پسماند (هیستریزیس) را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه دوام خاک‌های گچی در کاربردهای مهندسی بهبود می‌یابد [۴۳-۴۰]. با این وجود، همچنان نیاز به پژوهشی جامع احساس

خاک‌های غنی از گچ در مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج هستند و نوسانات رطوبتی در این مناطق مشکلات ژئوتکنیکی مانند از دست دادن چسبندگی، نشست بیش از حد و ناپایداری سازه‌ها ایجاد می‌کند [۱-۳]. این خاک‌ها هنگام خیس شدن رفتاری فروریزنده دارند که آن‌ها را برای پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها و بنادر، مشکل‌ساز می‌کند [۴]. انحلال گچ باعث تغییرات حجمی ناگهانی و تغییرشکل‌های شدید می‌شود که خطراتی برای سازه‌ها ایجاد می‌کند.

تثبیت خاک به‌عنوان راه‌حلی مؤثر شناخته می‌شود و سیمان رایج‌ترین ماده افزودنی است [۹-۵]. با این حال، هزینه بالای سیمان پژوهشگران را به جستجوی جایگزین‌های اقتصادی‌تر مانند غبار کوره سیمان (CKD) سوق داده است. این ماده به دلیل وجود آهک زیاد، می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد، هرچند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است [۱۰-۱۲].

در سال‌های اخیر، استفاده از سیمان و CKD به‌عنوان افزودنی‌های تثبیت‌کننده خاک، به‌ویژه خاک‌های غیراشباع، توجه بسیاری از محققان و مهندسان را به خود جلب کرده است. ترکیب این دو ماده می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر ویژگی‌های مکانیکی خاک داشته باشد [۱۴ و ۱۳]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن سیمان و CKD به خاک‌های رسی و غیراشباع، به‌ویژه در شرایط محیطی خشک، منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری بدون محصوریت (UCS) و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود [۱۸-۱۵]. این تغییرات به‌ویژه در افزایش پایداری خاک در برابر بارهای ترافیکی و چرخه‌های تر و خشک اهمیت زیادی دارد [۲۴-۱۹]. یکی از نتایج مهم تحقیقات نشان می‌دهد که سیمان به‌تنهایی می‌تواند موجب تشکیل هیدرات‌های سیمانی شود [۲۵] که ساختار خاک را تقویت می‌کنند، در حالی که CKD نیز به‌واسطه ویژگی‌های پوزولانی خود، در واکنش با سیلیس و آلومینیوم خاک ترکیبات سیمانی جدیدی تشکیل

می‌شود که اثرات سیمان، CKD، تراکم و مکش بافتی را بر رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای - گچی مورد ارزیابی قرار دهد.

برای توسعه مدل‌های جدید در ارزیابی رفتار غیراشباع خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق و مدل‌های مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد می‌شود. این مدل‌ها به‌ویژه در تحلیل ویژگی‌های پیچیده خاک‌های غیراشباع در شرایط مختلف مکش بافتی و تثبیت می‌توانند دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. این تکنیک‌ها قادرند روابط غیرخطی پیچیده میان ویژگی‌های خاک و شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کنند و به این ترتیب ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار خاک تحت شرایط مختلف فراهم آورند. استفاده از این مدل‌های پیشرفته می‌تواند به‌ویژه در ارزیابی عملکرد بلندمدت خاک‌های تثبیت‌شده و بهبود شرایط فنی آن‌ها در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی مفید واقع شود. بنابراین، تحقیقات آتی باید بر روی استفاده از این تکنیک‌ها برای گسترش مدل‌های موجود و ارزیابی دقیق‌تر رفتار خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD تمرکز داشته باشند [۴۴-۴۶].

در سال‌های اخیر، علاوه بر رویکردهای آزمایشگاهی کلاسیک، استفاده از مدل‌های داده‌محور و هوشمند برای تحلیل رفتار خاک‌های غیراشباع و پیش‌بینی پاسخ‌های ژئوتکنیکی گسترش یافته است. برخی مطالعات با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق (DNN) به پیش‌بینی نشست خاک‌های گچ‌دار تحت بارگذاری پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این مدل‌ها توانایی مناسبی در بازتولید روابط غیرخطی پیچیده میان پارامترهای خاک و پاسخ مکانیکی دارند. همچنین، چارچوب‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تخمین مکش بافتی در خاک‌های غیراشباع ارائه شده‌اند که امکان برآورد غیرمستقیم مکش را از طریق داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی فراهم می‌سازند [۴۷].

از سوی دیگر، مدل‌های مبتنی بر منطق فازی نیز در مسائل ژئوتکنیکی و مهندسی روسازی برای

پیش‌بینی عمق آلودگی در خاک‌های ماسه‌ای و ارزیابی عملکرد مدول ارتجاعی مصالح آسفالتی به‌کار گرفته شده‌اند که نشان‌دهنده ظرفیت این رویکردها در مدیریت عدم قطعیت و پیچیدگی رفتار مواد ژئوتکنیکی است. در حوزه بهسازی خاک، پژوهش‌هایی نیز به استفاده از افزودنی‌های نوین نظیر الیاف بازیافتی و نانوذرات برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها بر اهمیت ترکیب اصلاح فیزیکی شیمیایی و مدل‌سازی پیشرفته تأکید دارد. در ارتباط مستقیم با خاک‌های گچ‌دار، مطالعاتی به بررسی رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و بهبود آن‌ها با استفاده از CKD پرداخته‌اند و نقش ابزارهای آزمایشگاهی اصلاح‌شده در تحلیل این نوع خاک‌ها را نشان داده‌اند. همچنین، پژوهش‌هایی درباره اثر pH و کانی‌شناسی گچ بر فرایندهای شیمیایی و زیست‌محیطی انجام شده که بر حساسیت بالای خاک‌های گچ‌دار نسبت به شرایط محیطی دلالت دارد [۴۸-۵۰].

با وجود این پیشرفت‌ها، اغلب مطالعات یادشده یا بر مدل‌سازی داده‌محور بدون استخراج شاخص‌های هیدرومکانیکی آزمایشگاهی تمرکز داشته‌اند، یا به بررسی رفتار آزمایشگاهی بدون اتصال نظام‌مند به چارچوب‌های مدل‌سازی هوشمند بسنده کرده‌اند. از این‌رو، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی دقیق، چندسطحی و مبتنی بر مکش کنترل‌شده برای پشتیبانی و توسعه مدل‌های جدید همچنان احساس می‌شود. پژوهش حاضر با ارائه یک مجموعه داده هیدرومکانیکی جامع شامل منحنی‌های SWRC، هیستریزس، شاخص‌های تراکم‌پذیری و ضریب بهبود تحت اثر همزمان تراکم و مکش، می‌تواند به‌عنوان بستر تجربی قابل اتکا برای توسعه و اعتبارسنجی مدل‌های پیشرفته در مطالعات آتی مورد استفاده قرار گیرد [۴۴-۵۰].

اهمیت پژوهش حاضر در بررسی تأثیر تثبیت خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD، به‌ویژه در شرایط غیراشباع، قابل توجه است. خاک‌های گچی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عراق که تاکنون مورد توجه بسیاری از محققین بوده، با مشکلاتی همچون کاهش ظرفیت نگهداری آب،

حساسیت بالا به تغییرات رطوبتی، و آسیب‌پذیری در برابر تورم و انقباض مواجه هستند. تثبیت این خاک‌ها با سیمان و CKD می‌تواند به‌طور چشمگیری ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی آن‌ها را بهبود بخشد و در نتیجه، پایداری بلندمدت سازه‌ها و زیرساخت‌ها را افزایش دهد. از این رو، این پژوهش به‌عنوان یک گام اساسی در زمینه بهبود رفتار خاک‌های غیراشباع تثبیت‌شده با افزودنی‌های سیمانی، به‌ویژه در مناطق با شرایط اقلیمی مشابه، اهمیت زیادی دارد.

با وجود پژوهش‌های انجام‌شده درباره رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و نیز تلاش برای بهبود این خاک‌ها با افزودنی‌های سیمانی، هنوز یک چالش کلیدی در ادبیات موضوع باقی است: ابهام در تمایز روش‌های ارزیابی هیدرومکانیکی و محدود بودن دامنه ارزیابی‌ها به مجموعه‌ای از شرایط آزمایشگاهی خاص. برخی مطالعات پیشین که به بهبود خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار در شرایط غیراشباع با استفاده از CKD پرداخته‌اند (از جمله پژوهش‌هایی با عناوینی

مشابه «Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and Its Improvement with CKD Material» و «The Improvement of Gypsum Sand Soils in Unsaturated Conditions Using a Modified Oedometer Device») عمدتاً بر کاربرد

دستگاه اصلاح‌شده در یک چارچوب ارزیابی محدود تمرکز داشته و در بسیاری موارد، مقایسه جامع همزمان اثر سطوح تراکم و مکش بافتی بر پاسخ‌های هیدرولیکی- مکانیکی خاک (مانند تغییرات منحنی نگهداری آب، هیستریزیس و شاخص‌های تراکم‌پذیری/ تورم) به‌صورت یکپارچه و کمی ارائه نشده است.

نوآوری روش‌شناختی پژوهش حاضر در این است که ارزیابی رفتار غیراشباع و بهبود خاک ماسه‌ای گچ‌دار عراق را از حالت تک‌بعدی خارج کرده و آن را در یک چارچوب هیدرومکانیکی یکپارچه توسعه می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که (۱) اثر تثبیت‌کننده‌ها نه فقط با CKD بلکه با مقایسه مستقیم سیمان و CKD در شرایط یکسان آزمایشگاهی بررسی می‌شود، (۲) نقش دو سطح تراکم (۹۰٪ و ۹۵٪) به‌عنوان یک متغیر

تعیین‌کننده در کارایی تثبیت به‌صورت صریح وارد تحلیل می‌گردد، و (۳) پاسخ خاک تحت چند سطح مکش کنترل‌شده تحلیل می‌شود تا وابستگی عملکرد تثبیت به شرایط غیراشباع به‌صورت کمی آشکار گردد. در این راستا، علاوه بر استخراج منحنی‌های SWRC در مسیرهای خشک‌اندازی و ترشوندگی و تحلیل هیستریزیس، شاخص‌های Cc و Cs و نیز ضریب بهبود (I) به‌عنوان معیار کمی اثربخشی تثبیت تحت مکش‌های مختلف ارائه می‌گردد و نتایج ماکروسکوپی با شواهد ریزساختاری SEM پشتیبانی می‌شود.

بنابراین، این مطالعه ضمن هم‌راستا بودن با مسیر کلی تحقیقات پیشین در استفاده از ابزار آدومتر اصلاح‌شده برای خاک‌های گچ‌دار غیراشباع، چارچوب ارزیابی را توسعه داده و با وارد کردن همزمان متغیرهای کلیدی (تراکم- مکش- نوع افزودنی) و ارائه شاخص‌های کمی مکمل، تمایز روشن و قابل دفاعی در روش ارزیابی و تبیین نوآوری نسبت به مطالعات گذشته فراهم می‌کند.

از این رو، هدف پژوهش حاضر ارائه یک چارچوب ارزیابی توسعه‌یافته و کمی برای رفتار غیراشباع خاک ماسه‌ای گچ‌دار تثبیت‌شده با سیمان و CKD، تحت اثر همزمان تراکم و مکش کنترل‌شده و تبیین تمایز روش‌شناختی آن نسبت به مطالعات پیشین است.

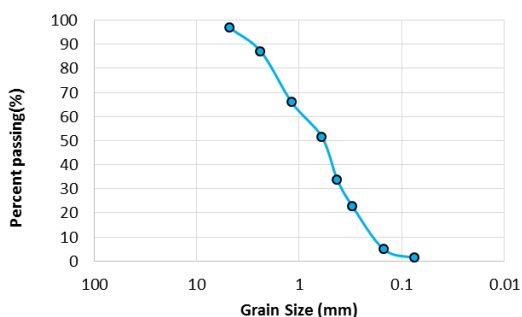
ساختار پژوهش حاضر شامل انجام آزمایش‌های تحکیم غیراشباع برای بررسی رفتار خاک تحت شرایط مکش بافتی مختلف است. این آزمایش‌ها به‌منظور ارزیابی تأثیر افزودنی‌های سیمان و CKD بر ویژگی‌های خاک، مانند ظرفیت نگهداری آب، تغییرات ساختاری و مکانیکی، و ضریب بهبود خاک انجام شده است. علاوه بر این، مدل‌سازی منحنی‌های SWRC و تحلیل میکروسکوپی (SEM) ساختار خاک تحت تثبیت با سیمان و CKD، به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک، بخش دیگری از این پژوهش را تشکیل می‌دهد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. ویژگی‌های خاک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک

| Value | unit | Properties | Test |
|-------|--------------------|---------------------------------------|---------------------|
| ۱.۸۳ | gr/cm ^۳ | Dry density | Proctor test |
| ۲.۰۵ | gr/cm ^۳ | Wet density | |
| ۱۲ | % | Optimal water content | |
| ۱.۸۱۷ | gr/cm ^۳ | Dry density | Field density |
| ۱.۸۶ | gr/cm ^۳ | Wet density | |
| ۳.۷۸ | % | SO _r | Contaminant |
| ۸.۱۲۷ | % | CaSO _۴ · ۲H _۲ O | |
| ۲.۴۵ | | G _s | Physical properties |



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک

۲.۲. مواد افزودنی

دو عامل تثبیت کننده در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند: سیمان و غبار کوره سیمان (CKD). سیمان به دلیل فرآیند هیدراسیون خود که منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می شود، به طور گسترده برای تثبیت خاک استفاده می گردد. این ترکیبات ذرات خاک را به یکدیگر پیوند داده و به طور قابل توجهی مقاومت خاک را افزایش می دهند [۵۲].

غبار کوره سیمان (CKD) که محصول جانبی فرآیند تولید سیمان است، به عنوان جایگزینی مقرون به صرفه مطرح می شود. این ماده حاوی آهک و ترکیبات واکنش پذیر است که می توانند در واکنش های پوزولانی شرکت کنند، موجب کاهش تخلخل شده و مقاومت خاک را بهبود بخشند،

خاک های رسی گچ دار عراق، به ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک این کشور، ویژگی های خاصی دارند که به طور قابل توجهی بر رفتار آن ها در پروژه های عمرانی تأثیر می گذارد. این نوع خاک ها تقریباً ۱۵ تا ۳۰ درصد از مساحت خاک های عراق را تشکیل می دهند و به طور عمده از ترکیب ذرات رسی و بلورهای گچ (کلسیم سولفات) به وجود آمده اند. گچ موجود در این خاک ها باعث کاهش خاصیت نفوذپذیری و تراکم بالا می شود. درصد بالای گچ، که ممکن است در برخی نواحی تا ۳۰ درصد یا بیشتر برسد، ساختار خاک را تحت تأثیر قرار می دهد و می تواند به مشکلاتی نظیر کاهش ظرفیت باربری خاک و پدیده های انقباض و انبساط دما در هنگام تغییرات رطوبت منجر شود.

ساختار این خاک ها معمولاً به صورت دانه های رسی ریز و بلورهای گچ به صورت منشوری یا ورقه ای است که در برخی موارد به صورت لایه های ضخیم در سطح خاک ظاهر می شود. این بلورها معمولاً در محیط های خشک و با تبخیر بالا به وجود می آیند و می توانند تأثیر زیادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ها داشته باشند. ویژگی های خاک های رسی گچ دار عراق شامل افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری و حساسیت به تغییرات رطوبتی است که موجب مشکلاتی در تثبیت و پایدارسازی سازه های عمرانی می شود.

خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه بندر ام القصر در جنوب عراق برداشت شده است؛ منطقه ای که با خاک های ماسه ای گچ دار شناخته می شود. بر اساس سیستم یکپارچه طبقه بندی خاک ها (USCS)، این خاک در گروه SP (ماسه بد دانه بندی شده) قرار می گیرد. جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را ارائه داده و شکل (۱) منحنی توزیع اندازه ذرات را نشان می دهد. وجود مقدار نسبتاً بالای گچ در ترکیب خاک باعث حساسیت آن در برابر تغییرات رطوبتی شده و انتخاب آن را برای مطالعات تثبیت خاک توجیه می کند [۴۷-۵۶].

| | | |
|----------|----|-----|
| PS+۳%CKD | ۳٪ | |
| PS+۵%CKD | ۵٪ | CKD |
| PS+۷%CKD | ۷٪ | |

در این پژوهش، خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار به‌منظور تثبیت با سیمان و CKD تحت فرآیند اختلاط و عمل‌آوری قرار گرفتند. ابتدا، مواد خشک شامل خاک، سیمان و CKD به‌طور یکنواخت در یک مخلوط‌کننده آزمایشگاهی تمیز و خشک آماده شدند. پس از آن، سیمان و CKD به نسبت‌های مشخص به خاک افزوده شدند. ترکیب مواد به‌صورت تدریجی انجام شد، به‌طوری‌که ابتدا سیمان به خاک اضافه شد و سپس CKD به آن افزوده گردید. این ترتیب برای بهبود واکنش‌های یوزولانی و ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات خاک و مواد تثبیت‌کننده در نظر گرفته شد. پس از اتمام این مرحله، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت پایین به‌طور کامل مخلوط گردید تا ترکیب یکنواخت حاصل شود.

در مرحله بعد، پس از اختلاط، نمونه‌ها تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. مدت زمان عمل‌آوری به‌طور عمومی ۷ روز در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در این مدت در شرایط دمای محیطی قرار گرفتند. این مدت زمان برای عمل‌آوری به‌منظور اطمینان از تثبیت مناسب سیمان و CKD و تأثیر کامل آن‌ها بر ویژگی‌های خاک در نظر گرفته شد. این شرایط و مدت زمان عمل‌آوری به‌طور ویژه برای ارزیابی تأثیرات سیمان و CKD بر خواص خاک در شرایط غیراشباع و به‌منظور دستیابی به بهترین نتیجه در بهبود خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی خاک انتخاب شد.

این فرآیند برای هر نمونه به‌طور جداگانه انجام شده و تمامی نمونه‌ها در شرایط مشابه تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند تا اثرات مواد تثبیت‌کننده در شرایط مختلف مکش و تراکم مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴.۲. آزمایش تحکیم غیراشباع

هرچند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است. جدول (۲) ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد [۴۹].

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره سیمان (CKD)

| Content (%) | | |
|-------------|--------|--------------------------------|
| CKD | Cement | Chemical Content |
| ۴۰-۵۰ | ۶۰-۶۷ | CaO |
| ۱۰-۲۰ | ۱۷-۲۵ | SiO _۲ |
| ۲-۶ | ۳-۸ | Al _۲ O _۳ |
| ۱-۴ | ۰.۵-۶ | Fe _۲ O _۳ |
| ۱-۴ | ۰.۵-۴ | MgO |
| ۳۰,۱ | ≤ ۳ | SO _۳ |
| ۱۰-۳۰ | ≤ ۵ | LOI |
| < ۱ | ≤ ۱ | Na _۲ O |
| < ۱ | ≤ ۱ | K _۲ O |
| < ۱ | - | Cl ⁻ |

۳.۲. آماده‌سازی نمونه و تراکم

نمونه‌های خاک از الک شماره ۴ (با اندازه چشمه ۴.۷۵ میلی‌متر) عبور داده شدند تا ذرات درشت حذف گردند. عملیات تراکم در دو سطح ۹۰٪ و ۹۵٪ از بیشینه چگالی خشک (MDD) که بر اساس آزمایش پروکتور استاندارد و طبق ASTM D^{۱۹۸} تعیین شد، انجام گرفت. مواد افزودنی با مقادیر زیر در دو حالت جداگانه به خاک اضافه شدند: ۱٪، ۳٪ و ۵٪ سیمان و ۳٪، ۵٪ و ۷٪ غبار کوره سیمان (CKD) بر حسب وزن خشک خاک. جدول (۳) ترکیب‌های مختلف آماده‌شده برای آزمایش را خلاصه می‌کند. لازم به ذکر است PS منظور نمونه خاک بدون افزودنی است.

جدول ۳. افزودنی‌های نمونه و طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش

| Sample | compaction | Addition | Additive |
|--------|------------|----------|----------|
| PS+۱%C | | ۱٪ | |
| PS+۳%C | ۹۰٪ | ۳٪ | Cement |
| PS+۵%C | ۹۵٪ | ۵٪ | |

شکل ۳. نمای شماتیک از دستگاه آدومتر با کنترل مکش

۵.۲. منحنی مشخصه آب - خاک (SWRC)

منحنی‌های SWRC با اعمال مکش در بازه ۲ تا ۹۰ کیلوپاسکال و با استفاده از روش انتقال محور در داخل آدومتر به دست آمدند. در هر سطح مکش، میزان تعادل محتوای آب حجمی در مسیرهای خشک‌اندازی و ترشدگی اندازه‌گیری شد.

۶.۲. برازش مدل ون گنوختن

داده‌های آزمایشگاهی منحنی SWRC با استفاده از معادله ون گنوختن برازش شدند و پارامترهای هیدرولیکی برازش شامل (α, n, m) استخراج گردیدند. این پارامترها امکان مقایسه کمی تأثیر تراکم و افزودنی‌ها بر رفتار نگهداری آب را فراهم کردند.

۷.۲. تراکم‌پذیری و ضریب بهبود

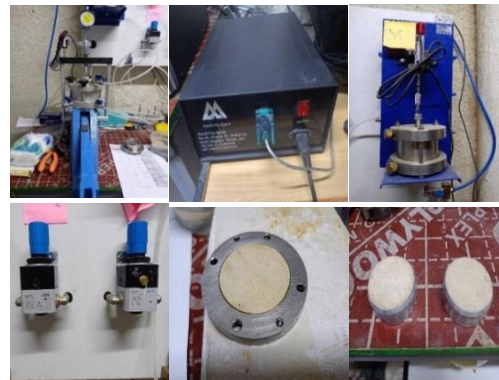
آزمایش‌های تکمیلی تحکیم غیراشباع در سطوح مکش مختلف (۶۰ و ۱۵۳۰ کیلوپاسکال) برای تعیین شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) انجام شدند. همچنین معادله ضریب بهبود (I) برای ارزیابی میزان اثربخشی تثبیت تحت شرایط مختلف تنش و مکش به کار گرفته شد [۱۴، ۱۷ و ۲۴]. ضریب بهبود (I) یک ابزار تحلیلی شناخته شده است که در مطالعات ژئوتکنیکی برای اندازه‌گیری اثربخشی عملیات اصلاح خاک استفاده می‌شود. این معیار به وضوح درصد کاهش نشست حاصل از تکنیک‌های تثبیت خاک را نشان می‌دهد و نقش افزودنی‌ها را در افزایش عملکرد خاک برجسته می‌کند. ضریب بهبود را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$I = \frac{S_{Natural} - S_{Treated}}{S_{Natural}} \times 100 \quad (1)$$

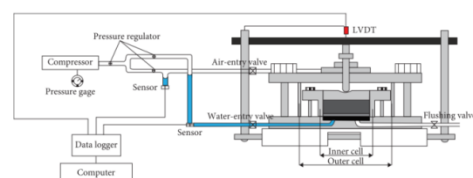
که در آن، $S_{Natural}$ نشست خاک طبیعی (اصلاح نشده) تحت تنش اعمال شده، $S_{Treated}$ نشست خاک اصلاح شده با افزودنی‌های خاص تحت شرایط مشابه می‌باشد.

در برخی مطالعات پیشین، از دستگاه آدومتر اصلاح شده برای بررسی رفتار خاک‌های گچ‌دار در شرایط غیراشباع و نیز ارزیابی بهبود با CKD استفاده شده است. با این حال، کاربرد دستگاه در پژوهش حاضر به صورت هدفمند توسعه یافته تا امکان یک ارزیابی هیدرومکانیکی جامع فراهم شود؛ بدین معنا که آزمایش‌ها به طور همزمان برای دو سطح تراکم (۹۰٪ و ۹۵٪) و تحت سطوح مکش کنترل شده اجرا گردیده و علاوه بر استخراج SWRC در دو مسیر ترشوندگی و خشک‌اندازی، شاخص‌های مکانیکی شامل C_c و C_s و معیار کمی ضریب بهبود (I) نیز به منظور سنجش اثربخشی تثبیت در شرایط غیراشباع گزارش شده‌اند. این توسعه در پروتکل ارزیابی، امکان مقایسه نظام‌مند اثر نوع افزودنی (سیمان و CKD) شرایط تراکم و مکش را فراهم می‌سازد.

از دستگاه تحکیم غیراشباع برای بررسی تراکم‌پذیری خاک، پتانسیل فروریزش و پاسخ هیدرومکانیکی تحت شرایط مکش بافتی کنترل شده استفاده شد (شکل ۲). این دستگاه امکان تنظیم مستقل فشار هوا و فشار آب را فراهم می‌کند [۲۲ و ۲۳] و شرایط غیراشباع مشابه میدان واقعی را شبیه‌سازی می‌نماید (شکل ۳).



شکل ۲. دستگاه تحکیم غیراشباع مورد استفاده در این پژوهش





شکل ۴. فلوچارت روند پژوهش حاضر

۳. نتایج و بحث

۳.۱. منحنی‌های نگهداری آب-خاک (SWRC)

شکل‌های (۵) و (۶) منحنی‌های نگهداری آب-خاک (SWRC) را برای خاک‌های بدون تثبیت و تثبیت‌شده تحت سطوح تراکم ۹۰٪ و ۹۵٪ نشان می‌دهند. نتایج حاکی از آن است که افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ غبار کوره سیمان (CKD) موجب بهبود قابل توجه ظرفیت نگهداری آب در مقایسه با خاک بدون تثبیت شده است. این بهبود به کاهش اندازه حفرات و افزایش یکنواختی ساختار خاک ناشی از اثر ترکیبی افزودنی‌ها و تراکم نسبت داده می‌شود. این امر با نتایج تحقیقات پیشین در توافق خوبی است [۴۳-۴۵]. لازم به ذکر است (S%) در شکل ۵ به معنای درصد اشباع می‌باشد.

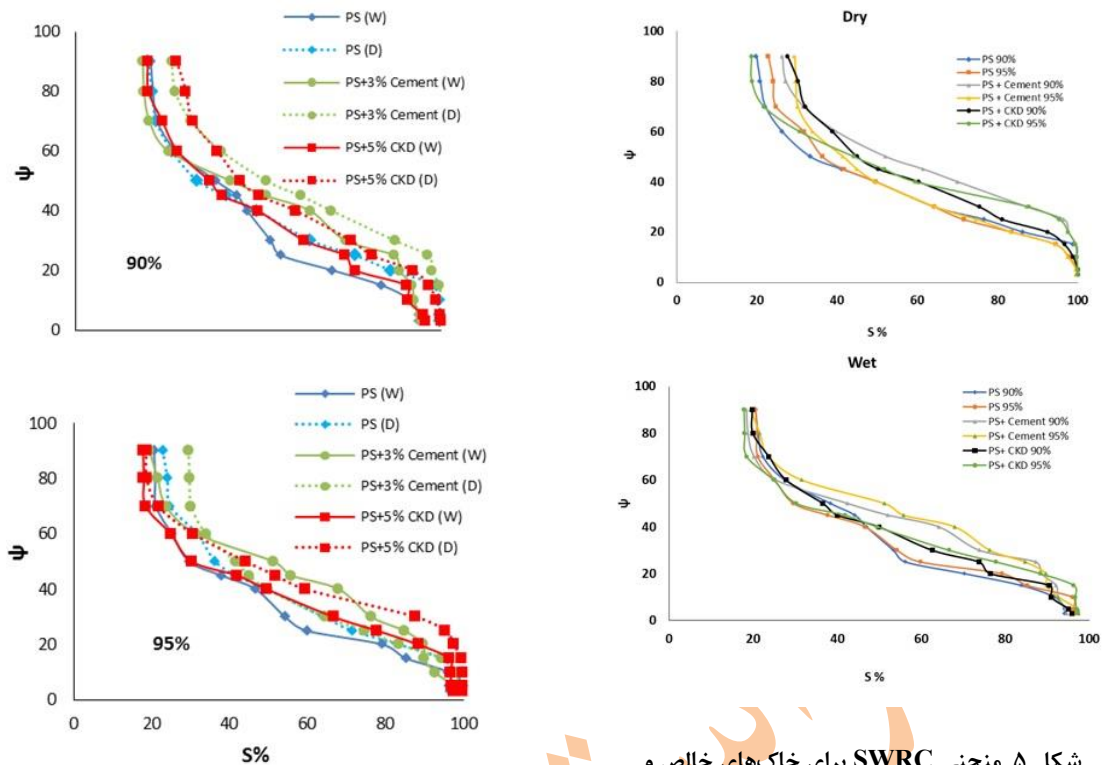
این معادله بر اساس مفهوم شناخته‌شده نسبت بهبود در ادبیات مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک است. ایده اصلی آن، مقایسه عملکرد خاک‌های اصلاح‌شده در مقابل خاک‌های اصلاح‌نشده است. همچنین، ضریب بهبود به صورت کمی، کاهش نشست حاصل از تثبیت را اندازه‌گیری می‌کند. این رویکرد چارچوبی قوی برای مقایسه اثربخشی نسبی افزودنی‌های مختلف تحت شرایط آزمایشگاهی مشابه فراهم می‌کند.

۳.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای تحلیل ریزساختاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. تصاویر SEM برای مشاهده تغییرات میکروسکوپی و بررسی تأثیر افزودنی‌ها (سیمان و CKD) بر ساختار ذرات خاک در شرایط غیراشباع گرفته شدند. نمونه‌های خاک قبل و بعد از تثبیت تحت شرایط مشابه (مکش بافتی مختلف) به‌طور دقیق آماده‌سازی شده و به میکروسکوپ ارسال شدند. شرایط عکسبرداری شامل تنظیمات ولتاژ شتاب‌دهنده به میزان ۲۰ کیلوولت، تنظیمات شدت نور و کنتراست برای افزایش وضوح تصاویر و جلوگیری از تداخل رطوبت بر نتایج بود. تصاویر گرفته شده در مقیاس‌های مختلف، به‌ویژه در نواحی که تغییرات ساختاری واضحی مشاهده می‌شد، ثبت شدند. این تصاویر امکان مقایسه دقیق بین نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD و نمونه‌های غیر تثبیت‌شده را فراهم آورد.

بطور کلی می‌توان بیان داشت، تصویربرداری SEM بر روی خاک بدون افزودنی، خاک تثبیت‌شده با سیمان و خاک تثبیت‌شده با CKD انجام شد تا تغییرات ریزساختاری بررسی گردد. این تصاویر، بینشی دقیق در مورد پرشدگی حفرات، پیوندهای سیمانی و آرایش ذرات از خود ارائه داده و می‌توانند به طور مستقیم از نتایج آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی پشتیبانی نمایند [۳۵].

روش پژوهش حاضر را می‌توان بصورت فلوچارت شکل ۴ نشان داد.



شکل ۵. منحنی SWRC برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده (مسیرهای ترشدگی و خشکاندازی)

شکل ۶. منحنی SWRC در سطوح تراکم مختلف برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده

اثر Ink Bottle در خاک به پدیده‌ای اشاره دارد که در آن، رفتار فیزیکی یا مکانیکی خاک به دلیل وجود حفرات یا فضاهای بزرگ در درون خاک تغییر می‌کند. این اثر معمولاً به‌ویژه در خاک‌های رسی و خاک‌های با دانه‌بندی نامنظم یا خاک‌های با لایه‌های رسی غنی از آب مشاهده می‌شود. اصطلاح Ink Bottle به این دلیل انتخاب شده است که شکل ظاهری این حفرات شبیه به یک بطری جوهر (Ink Bottle) است که در آن فضاهای بزرگ (مانند گردن بطری) در میان ذرات خاک وجود دارد.

باتوجه به نتایج شکل ۶ و ۵، بطری جوهر که با حفره‌های بزرگ‌تر که هیستریزیس را افزایش می‌دهند، مشخص می‌شود، در خاک‌های تصفیه‌نشده، که در آن‌ها تغییرپذیری در اندازه منافذ بیشتر است، بارزتر است. در خاک‌های تصفیه‌شده، توزیع اندازه منافذ یکنواخت‌تر است و منجر به بهبود احتباس آب و کاهش فروپاشی سازه می‌شود.

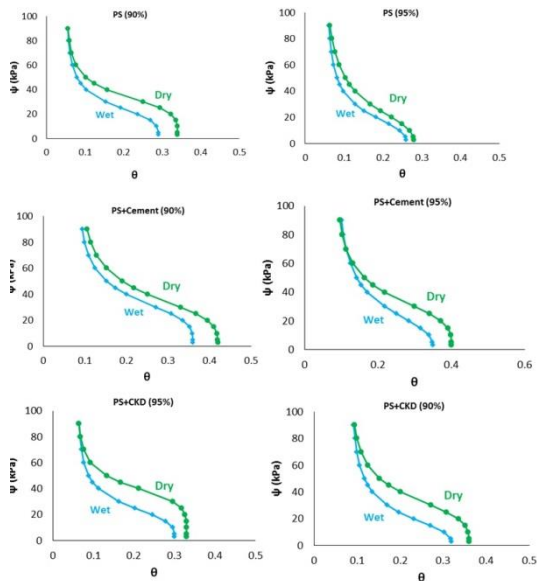
در تراکم ۹۵٪، خاک‌های تثبیت‌شده ظرفیت نگهداری آب بالاتر و هیستریزیس کمتری میان مسیرهای خشک‌شدن و ترشدن نشان دادند. در مقابل، در تراکم ۹۰٪، اندازه بزرگ‌تر حفرات موجب محدودیت در اثربخشی تثبیت، به‌ویژه در حالت استفاده از CKD، گردید. این نتایج تأیید می‌کنند که تثبیت در ترکیب با تراکم بالاتر، عملکرد هیدرومکانیکی خاک‌های گچی را بهبود می‌بخشد [۱۹]. لازم به ذکر است (S%) در شکل ۶ به معنای درصد اشباع می‌باشد. همچنین منحنی‌های W به معنای تراندازی و منحنی‌های D به معنای خشک‌شدن است.

این یافته‌ها بر اهمیت افزودنی‌های تثبیت‌کننده، مانند سیمان و CKD، در ترکیب با سطوح تراکم بالاتر برای بهینه‌سازی عملکرد خاک تأکید می‌کنند. با انجام این کار، می‌توان اثرات نامطلوب هیستریزس در خاک‌های گچی را به حداقل رساند و منجر به زیرساخت‌های پایدارتر و قابل اعتمادتر در محیط‌های با رطوبت متغیر شد.

۲.۳. تحلیل مدل ون گنوختن

داده‌های منحنی SWRC با استفاده از مدل ون گنوختن (۱۹۸۰) برازش شدند و پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول (۴) ارائه شده‌اند. شکل (۷) منحنی‌های برازش‌شده را نشان می‌دهد که بر اساس آن خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر، ظرفیت نگهداری آب بهتری نسبت به خاک‌های تثبیت‌شده با CKD از خود نشان دادند. لازم به ذکر است این امر در تحقیقات گذشتگان نیز بیان شده است [۲۱ و ۱۵ و ۴۳ و ۴۹].

در مورد خاک خالص، پارامتر α نشان‌دهنده نفوذپذیری بالا و ظرفیت پایین نگهداری آب بود؛ در حالی که افزودن سیمان موجب کاهش قابل توجه مقدار α گردید که بیانگر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت است. افزودن CKD نیز موجب بهبود نگهداری شد اما در سطحی کمتر از سیمان. نتایج به‌دست آمده کارایی و دقت مدل ون گنوختن را در شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای گچی تثبیت‌شده تأیید می‌کند [۲۸ و ۲۶ و ۳۳ و ۴۱].



شکل ۷. منحنی‌های ون گنوختن برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده

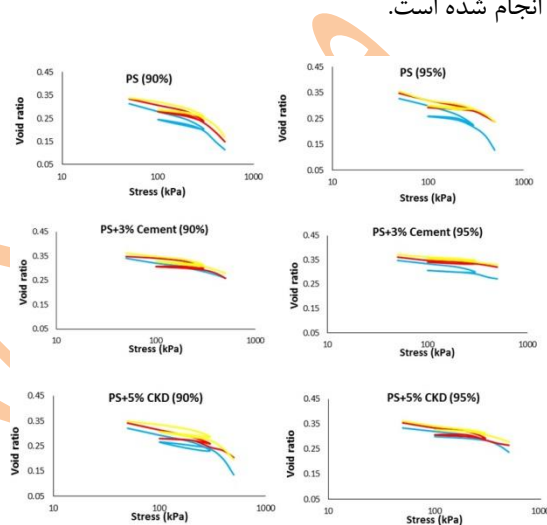
جدول ۴. پارامترهای برازش α ، n ، m برای مسیره‌ای ترشده و خشکاندازی

| Sample | Dry | | | Wet | | | Compaction (%) |
|-----------|------|-----|-------|------|---|------|----------------|
| | m | n | a | m | n | a | |
| PS | ۰.۸ | ۵ | ۰.۰۳ | ۰.۷۵ | ۴ | ۰.۰۴ | ۹۰ |
| | ۰.۶۴ | ۲.۸ | ۰.۰۴ | ۰.۶۶ | ۳ | ۰.۰۵ | ۹۵ |
| PS+Cement | ۰.۷۳ | ۳.۸ | ۰.۰۲۸ | ۰.۷۵ | ۴ | ۰.۰۳ | ۹۰ |
| | ۰.۷۵ | ۴ | ۰.۰۳ | ۰.۶۶ | ۳ | ۰.۰۴ | ۹۵ |
| PS+CKD | ۰.۷۵ | ۴ | ۰.۰۳ | ۰.۶۶ | ۳ | ۰.۰۵ | ۹۰ |
| | ۰.۸۳ | ۶ | ۰.۰۲۵ | ۰.۷۵ | ۴ | ۰.۰۴ | ۹۵ |

۳.۳. تأثیر مکش و افزودنی‌ها بر تراکم‌پذیری

مکش‌ها یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر رفتار خاک‌های غیراشباع هستند که نشان‌دهنده نیروهای کششی هستند که آب را در منافذ خاک نگه می‌دارند [۲۳]. این نیروها نقش مهمی در تعیین خواص تراکم‌پذیری خاک‌ها، به ویژه در خاک‌های گچی که مستعد تغییرات رطوبت هستند، ایفا می‌کنند. شکل ۸ رابطه بین تنش و تغییر نسبت خلل و فرج را نشان می‌دهد که از آزمایش‌های

تجربی انجام شده با استفاده از دستگاه تحکیم غیراشباع به دست آمده است. این آزمایش‌ها با هدف نشان دادن تأثیر مکش بافتی و درجه تراکم خاک بر خواص تراکم‌پذیری خاک انجام گردید. علاوه بر این، آزمایش‌های بیشتری برای بررسی تأثیر مواد افزودنی بر خواص تراکم‌پذیری خاک تحت مکش بافتی ثابت، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، انجام شده است. لازم به ذکر در نتایج شکل ۹ و ۸، آزمایشات تحکیم برای مطالعه اثر تثبیت، ابتدا بر روی خاک تثبیت نشده (خاک طبیعی ماسه گچ‌دار) انجام شده است.



شکل ۸. تأثیر مکش بافتی بر شاخص‌های تراکم‌پذیری (مکش بافتی خط آبی = ۱۵ کیلوپاسکال، مکش بافتی خط قرمز = ۳۰ کیلوپاسکال و مکش بافتی خط زرد = ۶۰ کیلوپاسکال)

این آزمایش چگونگی تأثیر مکش بافتی بر تراکم‌پذیری خاک گچی، اثربخشی سیمان و گرد سیمان در افزایش مقاومت در برابر فشردگی و تورم، و تأثیر سطوح تراکم (۹۰٪ و ۹۵٪) بر رفتار خاک تحت شرایط مکش مختلف را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که افزایش مکش بافتی منجر به کاهش C_c و C_s می‌شود که نشان‌دهنده بهبود مقاومت خاک در برابر فشردگی و تورم است (جدول ۵). این اثر در تراکم ۹۵٪ در مقایسه با ۹۰٪ بارزتر بود. با افزودن ۳٪ سیمان، C_c در تراکم ۹۰٪ به ۰/۰۵۷ و در تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۴۵ کاهش یافت، در حالی که C_s در تراکم ۹۰٪ از ۰/۰۸ به ۰/۰۲۸ و در تراکم ۹۵٪ از ۰/۰۷ به ۰/۰۱۴ کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود

قابل توجه در پایداری خاک است. در سطوح مکش بالاتر از ۳۰ کیلوپاسکال و ۶۰ کیلوپاسکال، کاهش C_c و C_s ادامه یافت و نقش مکش بافتی در افزایش سختی خاک را تقویت کرد [۹]. برای نمونه‌های تیمار شده با ۵٪ CKD، مقادیر C_c و C_s نیز بهبود یافتند اما به میزان کمتری نسبت به تیمار سیمان. در مکش ۱۵ کیلوپاسکال، مقدار C_c برای ۹۰٪ تراکم ۰/۰۹۱ بود که کمتر از خاک تیمار نشده (۰/۱۱) اما بیشتر از خاک تیمار شده با سیمان (۰/۰۵۷) بود. در ۹۵٪ تراکم، مقدار C_c برابر ۰/۰۴۵ بود که نشان‌دهنده بهبود محدود در مقایسه با تیمار سیمان است. این امر نقش پیوند شیمیایی در کاهش تراکم‌پذیری هنگام استفاده از سیمان را در مقایسه با اثر پر کردن حفره فیزیکی CKD برجسته می‌کند. در مکش ۶۰ کیلوپاسکال، مقدار C_c برای خاک تیمار شده با سیمان ۳٪ در تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۲۸ کاهش یافت، در حالی که برای خاک تیمار شده با CKD این مقدار ۰/۰۵۷ و برای خاک تیمار نشده ۰/۰۷ بود، که تأیید می‌کند سیمان موثرترین عامل در بهبود سختی خاک و کاهش تغییر شکل است. علاوه بر این، ترکیب ۹۵٪ تراکم و افزودنی‌ها به طور قابل توجهی عملکرد خاک را افزایش داده و آن را در برابر تغییرات فشار و رطوبت مقاوم‌تر می‌کند [۲۹]. بر اساس این نتایج، توصیه می‌شود برای کاهش خطرات ژئوتکنیکی، حداقل ۹۵٪ تراکم در خاک‌های گچی شنی استفاده شود، در پروژه‌های بهسازی خاک که نیاز به پایداری طولانی مدت دارند، ۳٪ سیمان اضافه شود و از ۵٪ گرد سیمان به عنوان یک جایگزین مقرون به صرفه استفاده شود، در حالی که راندمان پایین‌تر آن در مقایسه با سیمان نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مطالعات بیشتری در مورد تأثیر مکش بافتی در طراحی پی برای خاک‌های غیراشباع باید انجام شود تا ارزیابی دقیقی از تأثیرات رطوبت طولانی مدت بر پایداری سازه حاصل شود.

و در تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال مقادیر پایین‌تری از ضریب بهبود را ثبت نمود.

این یافته‌ها سیمان را به‌عنوان تثبیت‌کننده‌ای کارآمدتر معرفی می‌کنند، در حالی که CKD هرچند جایگزینی اقتصادی و قابل استفاده است، اما پایداری و اثربخشی کمتری دارد. تحلیل ضریب بهبود همچنین نقش کلیدی مکش بافتی و تراکم را در میزان کارایی فرایند تثبیت، تأیید می‌نماید.

جدول ۶. مقادیر ضریب بهبود برای سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) در مکش‌ها و سطوح تراکم مختلف

| Suction (kPa) | Stress (kPa) | ۹۰٪ | | ۹۵٪ | |
|---------------|--------------|------------|------|------------|-----|
| | | Compaction | | Compaction | |
| | | ۳٪ | ۵٪ | ۳٪ | ۵٪ |
| | | Cement | CKD | Cement | CKD |
| ۱۵ | ۱۰۰ | ۴۴ | ۱۱ | ۴۲.۸ | ۱۴ |
| | ۶۰۰ | ۳۹ | ۷.۸ | ۵.۸ | ۴.۴ |
| ۳۰ | ۱۰۰ | ۳۳ | ۱۶.۶ | ۵.۰ | ۲.۵ |
| | ۶۰۰ | ۴۸ | ۲.۴ | ۶.۰ | ۲.۰ |
| ۶۰ | ۱۰۰ | ۶۳.۶ | ۲.۷ | ۸.۳ | ۳.۳ |
| | ۶۰۰ | ۵.۳ | ۱.۳ | ۶۷.۵ | ۳.۰ |

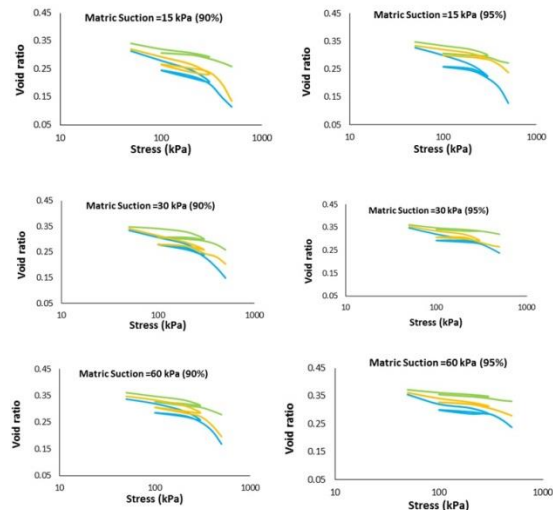
۵.۳. تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل (۱۰) شواهد ریزساختاری را در تأیید نتایج آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی ارائه می‌دهند:

خاک بدون تثبیت: آرایش سست ذرات با حفرات بزرگ که منجر به تخلخل زیاد و مقاومت برشی پایین می‌شود (شکل ۱۰ a).

خاک تثبیت‌شده با سیمان: تشکیل ژل متراکم C-S-H که حفرات را پر کرده و باعث کاهش تخلخل و افزایش پیوند ذرات می‌گردد (شکل ۱۰ b).

خاک تثبیت‌شده با CKD: بهبود نسبی ناشی از واکنش‌های پوزولانی کندتر، همراه با ذرات واکنش‌نداده باقی‌مانده و پیوندهای یکنواخت کمتر. این مشاهدات تأیید می‌کنند که سیمان به دلیل



شکل ۹. تأثیر افزودنی‌های مختلف بر شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) (خط آبی = خاک خالص، خط سبز = خاک خالص + سیمان و خط نارنجی = خاک خالص + CKD)

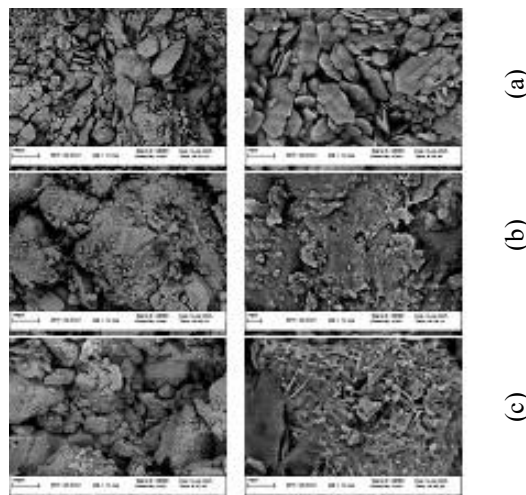
جدول ۵. مقادیر شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) در سطوح مختلف مکش و شرایط تثبیت

| Sample | Com paction (%) | Suction ۶۰ kPa | | Suction ۳۰ kPa | | Suction ۱۵ kPa | |
|--------------|-----------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| | | Cs | Cc | Cs | Cc | Cs | Cc |
| PS | ۹۰ | ۰.۰۵ | ۰.۰۷ | ۰.۰۸ | ۰.۰۹۱ | ۰.۰۸ | ۰.۱۱ |
| | ۹۵ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۷۹ | ۰.۰۱۴ | ۰.۰۷۹ | ۰.۰۷ | ۰.۱ |
| PS+۳% Cement | ۹۰ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۴۵ | ۰.۰۱۴ | ۰.۰۳۴ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۵۷ |
| | ۹۵ | ۰.۰۱۴ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۱۴ | ۰.۰۳۴ | ۰.۰۱۴ | ۰.۰۴۶ |
| PS+۵% CKD | ۹۰ | ۰.۰۴۳ | ۰.۰۵۷ | ۰.۰۴۳ | ۰.۰۹۱ | ۰.۰۷۲ | ۰.۰۹۱ |
| | ۹۵ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۵۷ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۵۷ | ۰.۰۲۸ | ۰.۰۴۶ |

۴.۳. ضریب بهبود

ضریب بهبود (I) در جدول (۶) خلاصه شده است. نتایج نشان می‌دهند که سیمان به‌طور پیوسته مقادیر بالاتری از ضریب بهبود نسبت به CKD به دست آورد، به‌ویژه در شرایطی که تراکم ۹۵٪ باشد. در مکش ۶۰ کیلوپاسکال و تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال، ضریب بهبود سیمان به ۸۳٪ رسید، در حالی که این مقدار برای CKD تنها ۳۳٪ بوده است. CKD نسبت به افزایش تنش، حساسیت بیشتری از خود نشان داد

واکنش‌های هیدراسیون سریع و گسترده، تثبیت برتری را فراهم می‌آورد؛ در حالی که CKD تنها بهبود متوسطی ایجاد می‌کند که عمدتاً ناشی از پرشدگی فیزیکی حفرات و پیوند شیمیایی محدود است (شکل ۱۰ c).



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از (الف) خاک بدون تثبیت، (ب) خاک با ۳٪ سیمان و (ج) خاک با ۵٪ غبار کوره سیمان (CKD)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تغییرات ساختاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD را در مقایسه با خاک‌های غیر تثبیت‌شده به‌طور واضح نشان داد. در تصاویر SEM خاک‌های تثبیت‌شده، تشکیل پیوندهای سیمانی C-S-H و کاهش تخلخل‌های خاک به‌وضوح قابل مشاهده بود. این تغییرات نشان‌دهنده بهبود ساختار ذرات خاک و تقویت پیوندهای داخلی آن‌ها است که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت خاک در برابر تراکم و تورم شود. همچنین، واکنش‌های پوزولانی CKD باعث تشکیل ترکیبات سیمانی جدید در سطح ذرات خاک شد که این امر به‌ویژه در خاک‌هایی که تحت تأثیر تثبیت با سیمان قرار گرفته‌اند، مشهود بود. این تغییرات ساختاری تأثیر مستقیم بر ظرفیت نگهداری آب، مقاومت به فشار و پایداری بلندمدت خاک در شرایط غیراشباع داشتند.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره سیمان (CKD) را تحت شرایط کنترل‌شده مکش بافتی و سطوح مختلف تراکم مورد بررسی قرار داد. یافته‌های اصلی به صورت زیر قابل جمع‌بندی هستند:

۱- دو حالت افزودن ۳٪ سیمان و همچنین ۵٪ CKD موجب بهبود منحنی نگهداری آب- خاک (SWRC) از طریق کاهش اندازه حفرات و بهبود یکنواختی ساختاری گردید. سیمان کارایی بیشتری نشان داد، به‌ویژه در تراکم ۹۵٪ که اثرات هیستریزیس به طور قابل توجهی کاهش یافت.

۲- داده‌های آزمایشگاهی SWRC با موفقیت با مدل ون‌گنوختن برازش شدند. پارامترهای به‌دست‌آمده نشان دادند که خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر توانایی نگهداری آب بیشتری نسبت به خاک‌های تثبیت‌شده با CKD دارند و این امر کارایی مدل را برای خاک‌های گچی تثبیت‌شده تأیید می‌کند.

۳- افزایش مکش بافتی از ۱۵ تا ۶۰ کیلوپاسکال به طور پیوسته موجب کاهش شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) شد. تیمار با سیمان بیشترین کاهش را ایجاد کرد، به طوری که مقدار Cc در مکش ۶۰ کیلوپاسکال و تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۲۸ رسید؛ در حالی که CKD تنها بهبودی متوسط حاصل نمود.

۴- تحلیل ضریب بهبود نشان داد که سیمان در تمامی سطوح تراکم و مکش عملکردی برتر نسبت به CKD دارد. در تراکم ۹۵٪ و مکش ۶۰ کیلوپاسکال، سیمان به ضریب بهبود ۸۳٪ دست یافت، در حالی که این مقدار برای CKD تنها ۳۳٪ بود.

۵- تصاویر SEM تأیید کردند که فرآیند هیدراسیون سیمان منجر به تشکیل ژل‌های متراکم C-S-H شده که حفرات خاک را پر کرده و موجب بهبود چشمگیر ریزساختار می‌گردد. در مقابل، CKD واکنش‌های پوزولانی

ناقص‌تری نشان داد که نتیجه آن تقویت متوسط بود.

بطور کلی میتوان بیان داشت که، سیمان مؤثرترین ماده تثبیت‌کننده برای خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق است و به‌طور قابل توجهی خواص هیدرولیکی و مکانیکی را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه زمانی که با تراکم بالاتر ترکیب گردد. اگرچه CKD جایگزینی اقتصادی‌تر است، اما کارایی کمتری نسبت به سیمان دارد. اثرات ترکیبی تثبیت، تراکم و مکش بافتی برای ارتقای دوام خاک در محیط‌های دارای نوسانات رطوبتی حیاتی است.

با وجود نتایج قابل توجه این پژوهش، برخی محدودیت‌ها وجود دارد که می‌تواند مسیر تحقیقات آینده را روشن‌تر سازد. نخست، این مطالعه بر تحلیل آزمایشگاهی رفتار غیراشباع خاک ماسه‌ای گچ‌دار تثبیت‌شده با سیمان و CKD مبتنی بوده و از مدل‌های داده‌محور نظیر شبکه‌های عصبی عمیق، منطق فازی یا سایر روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی پاسخ خاک استفاده نشده است. این انتخاب آگاهانه با هدف تمرکز بر استخراج شاخص‌های هیدرومکانیکی قابل اعتماد و تفسیر فیزیکی رفتار خاک انجام شده است.

دوم، اگرچه داده‌های حاصل از آزمایش‌های تحکیم غیراشباع و منحنی‌های SWRC اطلاعات جامعی درباره اثر تراکم و مکش ارائه می‌دهند، تعمیم مستقیم نتایج به مقیاس میدانی نیازمند توسعه مدل‌های پیش‌بینی و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های صحرایی است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، از داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه به‌عنوان ورودی برای توسعه مدل‌های هوشمند (نظیر DNN)، سیستم‌های فازی و مدل‌های ترکیبی) به‌منظور پیش‌بینی نشست، تغییر شکل و رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های گچ‌دار در شرایط واقعی استفاده شود.

منابع

۱. Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. ۲۰۲۳. Study of soil reinforcement in the east of mashhad using glass granule. *Materials research express*, 10(۰), ۰۰۰۲۰۲. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd0af>
۲. Bazaz, H.B., Akhtarpour, A. and Baradaran, M.S., ۲۰۲۰, October. High-rise buildings sitting on clayey soils: how the top-down construction style affects their seismic behavior. In *Structures* (Vol. ۸۰, p. ۱۰۹۸۶۱). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.109861>
۳. Mahmood, M. S., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. ۲۰۲۰, February. Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. ۷۳۷, No. ۱, p. ۰۱۲۰۸۰). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012080>
۴. Abdalhusein, M., & Akhtarpour, A. ۲۰۱۹. Effect of wetting process with presence of matric suction on unsaturated gypseous sand soils. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54.
۵. Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. ۲۰۱۹. Effect of soaking on unsaturated gypseous sand soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(۰), pp.۰۰۰-۰۰۰۸.
۶. Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. ۲۰۲۲. Unsaturated behaviour of gypseous sand soils using a modified triaxial test apparatus. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(۶), pp.۷۴۳-۷۰۸. <https://doi.org/10.1080/19386362.2022.2033483>
۷. Alsamia, S., Mahmood, M. S., & Akhtarpour, A. ۲۰۲۰. Estimation of capillary rise in unsaturated gypseous sand soils. *Pollack Periodica*, 15(۲), pp.۱۱۸-۱۲۹. <https://doi.org/10.1006/16.6.2020.1052.11>
۸. Akhtarpour, A., Mahmood, M. S., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. ۲۰۱۸, November. Settlement of gypseous sand upon short-term wetting. In *Proceedings of the International Congress on Engineering and Architecture* pp. ۱۸۰۷-۱۸۲۰.
۹. Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Mahmood, M. S. ۲۰۲۲, May. Investigation of shear strength parameters for gypseous soils using a modified apparatus of triaxial test. In *International Conference on Geotechnical Engineering-IRAQ* (pp. ۳۱۷-۳۳۰). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7358-1_27
۱۰. Abdulameer AlNaddaf, H. Q., Kouzegaran, S., Fattah, M. Y., & Akhtarpour, A. ۲۰۲۴. Effects of cement treatment on water retention behavior and collapse potential of gypseous soils: experimental investigation and prediction models. *Advances in Civil Engineering*, 2024(۱), ۶۶۳۷۹۱۱. <https://doi.org/10.1155/2024/6637911>
۱۱. Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. ۲۰۲۰. Behavior study of the gypsiferous sand soil of alnajaf city with presence of matric suction using unsaturated triaxial device. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(۱۰), pp.۲۴۳۰-۲۴۵۰. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16339.6194>
۱۲. AlNaddaf, H. Q. A., Kouzegaran, S., Akhtarpour, A., & Fattah, M. Y. ۲۰۲۰. Effects of cement treatment on the behavior of unsaturated gypseous soils. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(۰), pp.۱-۳۳. <https://doi.org/10.1007/s40510-020-00602-y>
۱۳. Tareghian, B., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. ۲۰۲۴. The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(۱), ۱۱. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00014-4>
۱۴. Pargar, J., Akhtarpour, A., & Baradaran, M. S. ۲۰۲۴. An unsaturated soil mechanics-based numerical and experimental method to assess soil settlement due to ground water level rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.۱-۲۶. <https://doi.org/10.1007/s40510-024-00422-6>
۱۵. Al-Obaidi, Q. A., Karim, H. H., & Al-Shamoosi, A. A. ۲۰۲۰, February. Collapsibility of gypseous soil under suction control. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. ۷۳۷, No. ۱, p. ۰۱۲۱۰۳). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012103>
۱۶. Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M., & Baradaran, M. S. ۲۰۲۳. Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.۱-۲۴. <https://doi.org/10.1007/s40510-023-00310-0>
۱۷. Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. ۲۰۲۴. Mechanical performance of

- asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case studies in construction materials*, 20, e.۲۷۴۰. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.۲۰۲۳.e۰۲۷۴۰>
۱۸. Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. ۲۰۲۴. Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and building materials*, 449, ۱۳۸۴۲۶. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.۲۰۲۴.۱۳۸۴۲۶>
 ۱۹. Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. ۲۰۲۲. A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(۱۱۰), pp.۵۷-۸۶. <https://doi.org/10.۲۲۰۳۴/ROAD.۲۰۲۱.۲۹۵۶۳۵.۱۹۶۹>
 ۲۰. Baradaran, S., & Ameri, M. ۲۰۲۳. Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(۱۱۴), pp.۵۳-۷۰. <https://doi.org/10.۲۲۰۳۴/road.۲۰۲۲.۳۳۷۹۴۵.۲۰۴۱>
 ۲۱. Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. ۲۰۲۵. Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering*, 25, ۱۰۳۷۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.۲۰۲۴.۱۰۳۷۳۴>
 ۲۲. Baradaran, S., & Ziaee, S. A. ۲۰۲۵. Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering. *Road*.
 ۲۳. Yeganeh, N., Akhtarpour, A., Bazaz, J. B., & Baradaran, M. S. ۲۰۲۴. Analysis of the soil-structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 17(۱).
 ۲۴. Balighi, M., Akhtarpour, A., Baradaran, M. S., Abdallah, M., & RiyahiKhoo, A. ۲۰۲۴. Numerical and experimental study of the interaction between surface swelling soil and gas well casing, based on unsaturated soil mechanics. *Results in Engineering*, 24, ۱۰۳۶۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.۲۰۲۴.۱۰۳۶۴۶>
 ۲۵. Balighi, M., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. ۲۰۲۴. Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 56(۷), pp.۵-۵. <https://doi.org/10.۲۲۰۶۰/ceej.۲۰۲۴.۲۲۶۱۶.۸۰۶>
 ۲۶. Abdolvand, Y., & Sadeghiamirshahidi, M. ۲۰۲۴. Soil stabilization with gypsum: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.۲۰۲۴.۰۲.۰۰۷>
 ۲۷. Zhan, B. J., Li, J. S., Xuan, D. X., & Poon, C. S. ۲۰۲۰. Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: physicochemical interactions between sludge and cement. *Journal of hazardous materials*, 381, ۱۲۱۰۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.۲۰۱۹.۱۲۱۰۳۴>
 ۲۸. Zhang, F., Zhu, H., Wu, Q., Yin, Z., Zhu, Z., & Hua, S. ۲۰۲۴. Research on the strength reduction mechanism of Cement Kiln Dust (CKD)-Portland cement systems from macroscale and nanoscale. *Construction and Building Materials*, 425, ۱۳۵۹۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.۲۰۲۴.۱۳۵۹۹۷>
 ۲۹. Ogila, W. A. M. ۲۰۲۱. Effectiveness of fresh cement kiln dust as a soil stabilizer and stabilization mechanism of high swelling clays. *Environmental Earth Sciences*, 80(۷), ۲۸۳. <https://doi.org/10.1007/s۱۲۶۶۵-۰۲۱-۰۹۵۸۹-۴>
 ۳۰. Niri, S. R., Akhtarpour, A., Daliri, F., & Baradaran, M. S. ۲۰۲۴. Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja). <https://doi.org/10.1139/cgj-۲۰۲۴-۰۰۶۹>
 ۳۱. Jarjusey, A., Hayano, K., Kassa, A. A., Raihan, S., & Mochizuki, Y. ۲۰۲۴. Insights into potential of banana leaf powder as a mud soil stabilizer. *Results in Engineering*, 24, ۱۰۳۱۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.۲۰۲۴.۱۰۳۱۶۶>
 ۳۲. Yang, J., Niu, X., Guo, Q., Wen, Z., & Cao, H. ۲۰۲۳. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy. *Results in Engineering*, 20, ۱۰۱۶۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.۲۰۲۳.۱۰۱۶۳۷>
 ۳۳. Razouki, S. S., & Kuttah, D. ۲۰۲۴. Improving Strength by Increased Compaction of Gypsum—Enriched Soil under Long-Term Soaking Conditions. *Geotechnics*, 4(۷), pp.۴۱۵-۴۲۹. <https://doi.org/10.۳۳۹۰/geotechnics.۲۰۲۴.۲۳>
 ۳۴. Wu, J., Liu, L., Deng, Y., Zhang, G., Zhou, A., & Xiao, H. ۲۰۲۲. Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*

- Engineering*, 14(3), pp.909-921.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.002>
۳۵. Wan, Q., Wang, Z., Huang, T., & Wang, R. ۲۰۲۱. Water retention mechanism of cellulose ethers in calcium sulfoaluminate cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 301, pp.۱۲۴۱۱۸.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124118>
۳۶. Shah, M. M., Shahzad, H. M., Khalid, U., Farooq, K., & Ur Rehman, Z. ۲۰۲۳. Experimental study on sustainable utilization of CKD for improvement of collapsible soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(۴), pp.۵۶۶۷-۵۶۸۲.
<https://doi.org/10.1007/s13379-022-07060-z>
۳۷. Abdalhusein, M. M., Abdullah, F. A., Al-Badran, Y. M., Almahmodi, R. H., & Mahmood, M. S. ۲۰۲۴. Investigation of the collapse potential of gypsum sand soil in unsaturation conditions using a modified oedometer. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 7(۱).
۳۸. Mansoori, M., & Akhtarpour, A. ۲۰۲۴. the effect of matric suction changes on the behavior of Anchored excavations in expansive soil. *Modares Civil Engineering journal*, 24(۲), pp.۱۳۹-۱۵۶.
<http://dx.doi.org/A-۱۰-۱۱۸۴۹-۴>
۳۹. Akhtarpour, A., Soleimanian, N., Ekramifard, A., & Riyahikhoo, A. ۲۰۲۲. Matrix suction effect on the soil stability in unsaturated soil. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(۲), pp.۱-۱۷.
۴۰. Akhtarpour, A., & Mansoori, M. ۲۰۲۴. Numerical study of building damage with surface foundation located on expansive soil caused by matric suction changes. *Modares Civil Engineering journal*, 24(۵), pp.۸۵-۱۰۰.
<http://dx.doi.org/10.22034/24.5.85>
۴۱. Almahmodi, R., Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. ۲۰۲۲. Characterization of collapsible gypsum sand soil with the presence of matric suction using a modified odometer apparatus. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp.۱-۱۳.
<https://doi.org/10.1007/s.0170-022-11476-x>
۴۲. Al-Kawam, F. Q., & Mahmood, R. A. ۲۰۲۲. The Effect of Geotechnical Factors in Road of Basrah, Southern Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, pp.۱۵۷-۱۶۹.
۴۳. Al-Jubair, H. S., & Al-Battat, J. M. ۲۰۲۱. Studying the effects of pile load on negative skin friction in basrah governorate. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 18, pp.۲-۳۳.
۴۴. Álvarez-Ayuso, E., Giménez, A., & Ballesteros, J. C. ۲۰۲۰. Soil ph and mineralogy govern fluoride leaching from flue gas desulfurization gypsum in acidic soils. *Soil & Environmental Health*, ۱۰۰۱۷۸.
۴۵. Shallal, H. H., & Aljanabi, Q. A. ۲۰۲۴, January. Predict settlement of gypseous soil under load by deep neural network. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. ۲۸۶۴, No. ۱, p. ۰۳۰۰۰۵). AIP Publishing LLC.
۴۶. Wang, J., & Vanapalli, S. ۲۰۲۴. A framework for estimating the matric suction in unsaturated soils using multiple artificial intelligence techniques. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 48(۱۱), ۲۸۵۴-۲۸۷۹.
۴۷. Sarli, J.M., Hadadi, F. and Bagheri, R.A., ۲۰۲۰. Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO₂. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(۲), pp.۱۱۵۱-۱۱۶۳.
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01788-7>
۴۸. Himed, K.A., Bolouri, J. and Abdalhusein, M.M., ۲۰۲۴, April. Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and Its Improvement with CKD Material. In *International Conference on Geotechnical Engineering Iraq* (pp. ۳-۱۶). Singapore: Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-997-9376-8_1
۴۹. Alsamia, S., Albedran, H. and Mahmood, M.S., ۲۰۲۳. Contamination depth prediction in sandy soils using fuzzy rule-based expert system. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 14(۱), pp.۸۷-۹۹.
<https://doi.org/10.1007/1848,2022,0440>
۵۰. SHIRMOHAMMADI, H. and HADADI, F., ۲۰۱۷. Application of fuzzy logic for evaluation of resilient modulus performance of stone mastic asphalt. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 95(۱۳).
۵۱. Elbaz, A. A., Aboufotouh, A. M., Dohdoh, A. M., & Wahba, A. M. ۲۰۱۹. Review of beneficial uses of cement kiln dust (CKD), fly ash (FA) and their mixture. *J. Mater. Environ. Sci*, 10(۱۱), pp.۱۰۶۲-۱۰۷۳.
۵۲. Al-Bakri, A. Y., Ahmed, H. M., & Hefni, M. A. ۲۰۲۲. Cement kiln dust (CKD): potential beneficial applications and eco-sustainable solutions. *Sustainability*, 14(۱۲), pp.۷۰۲۲.
<https://doi.org/10.3390/su14127022>
۵۳. Chen, K., He, X., Liang, F., & Sheng, D. ۲۰۲۴. Influences of ink-bottle effect evolution on water retention hysteresis of unsaturated soils: An experimental

