



## Research Note

## Study of Unsaturated Behavior of Stabilized Gypsum Sand Soil from Iraq with Cement and CKD

Ahmed Kamil Abraheim Alkinani<sup>1</sup>, Ali Akhtarpour<sup>1\*</sup>, Mustafa M. Abdalhusein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, University of Kufa, Al-Najaf, Iraq.

\* corresponding author: ([akhtarpour@um.ac.ir](mailto:akhtarpour@um.ac.ir))

### Article Info

#### Article history:

Received: 20 October 2025

Revised: 6 December 2025

Accepted: 10 February 2026

#### Keywords:

SWRC (Soil Water Retention Curve),

Iraqi gypsum sand, cementitious additives, Cement Kiln Dust (CKD), unsaturated soil mechanics.

### 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%, 5%, and 7%) 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 (5%) 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 performance improvement. 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 5% CKD reduced hysteresis and improved the SWRC curve, especially at 95% density. Also, at 95% density and 60 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.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Author Contributions:** All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

### To Cite this article:

Kamil Abraheim Alkinani, A., Akhtarpour, A. and M. Abdalhusein, M. 2026. Study of unsaturated behavior of stabilized gypsum sand soil from Iraq with cement and CKD, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 127-141  
<https://doi.org/10.24200/sjce.2026.68033.3473>



## مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده

احمد کامل ابراهیم الکنانی<sup>۱</sup>، علی اخترپور<sup>۱\*</sup> و مصطفی م. عبدالحسین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

<sup>۲</sup>گروه مهندسی عمران، دانشگاه کوفه، نجف، عراق.

\*نویسنده مسئول ([akhtarpour@um.ac.ir](mailto:akhtarpour@um.ac.ir))

| چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و گرد کوره‌ی سیمان (CKD) تحت تراکم‌های ۹۰ و ۹۵ درصد پرداخته شده است. آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از تحکیم غیراشباع برای به‌دست‌آوردن منحنی‌های SWRC و ارزیابی نقش مکش در تراکم‌پذیری و نگهداری آب خاک انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که هر دو عامل سیمان و CKD ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش و آثار هیستریزس را کاهش می‌دهند و مقاومت آن در برابر تراکم و تورم را بهبود می‌بخشند. مدل وان‌گنوختن، تطبیق خوبی با منحنی‌های SWRC قبل و پس از تثبیت با سیمان و CKD نشان داده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ CKD به ترتیب موجب کاهش هیستریزس 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 کرده است. یافته‌های اخیر بر اهمیت تثبیت‌کننده‌ها در بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی و پایداری بلندمدت خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق در محیط‌های مرطوب تأکید می‌کنند. | تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸<br>تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵<br>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱<br>واژگان کلیدی:<br>تثبیت خاک گچی،<br>منحنی مشخصه‌ی SWRC،<br>ماسه‌ی گچ‌دار عراق،<br>افزودنی‌های سیمانی،<br>گرد کوره‌ی سیمان (CKD)،<br>مکانیک خاک غیراشباع. |

### ۱. مقدمه

خاک‌های غنی از گچ در مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج هستند و نوسان‌های رطوبتی در مناطق مذکور، مشکلات ژئوتکنیکی، مانند: از دست‌دادن چسبندگی، نشست بیش از حد، و ناپایداری سازه‌ها ایجاد می‌کند. [۱-۳] خاک‌های ذکرشده هنگام خیس‌شدن رفتاری فروریخته 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 خطرهایی برای سازه‌ها ایجاد می‌کند.

تثبیت خاک به‌عنوان راه‌حلی مؤثر شناخته می‌شود و سیمان، رایج‌ترین ماده‌ی افزودنی است. [۵-۹] با این حال، هزینه‌ی بالای سیمان، پژوهشگران را به جستجوی جایگزین‌های اقتصادی‌تر، مانند غبار کوره‌ی سیمان (CKD) سوق داده است؛ که به‌دلیل وجود آهک زیاد، می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد، هر چند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است. [۱۰-۱۲]

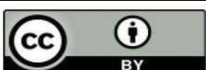
در سال‌های اخیر، استفاده از سیمان و CKD به‌عنوان افزودنی‌های تثبیت‌کننده‌ی خاک، به‌ویژه خاک‌های غیراشباع، توجه بسیاری از پژوهشگران

و مهندسان را به خود جلب کرده است. ترکیب دو ماده‌ی اخیر می‌تواند آثار چشمگیری در ویژگی‌های مکانیکی خاک داشته باشد. [۱۳ و ۱۴] مطالعات مختلف نشان داده‌اند که افزودن سیمان و CKD به خاک‌های رسی و غیراشباع، به‌ویژه در شرایط محیطی خشک، منجر به افزایش قابل‌توجهی در مقاومت فشاری بدون محصوریت (UCS) و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. [۱۵-۱۸] تغییرات اخیر به‌ویژه در افزایش پایداری خاک در برابر بارهای ترافیکی و چرخه‌های تر و خشک اهمیت زیادی دارند. [۱۹-۲۴] یکی از نتایج مهم پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سیمان به‌تنهایی می‌تواند موجب تشکیل هیدرات‌های سیمانی شود، [۲۵] که ساختار خاک را تقویت می‌کنند؛ در حالی که CKD نیز به‌واسطه‌ی ویژگی‌های پوزولانی خود، در واکنش با سیلیس و آلومینیوم خاک، ترکیب‌های سیمانی جدیدی تشکیل می‌دهد، که علاوه‌بر افزایش مقاومت خاک، آن را در برابر تورم و انقباض مقاوم‌تر می‌سازد. [۲۶-۲۹]

نتایج مطالعات نشان می‌دهند که تأثیر مثبت ترکیب سیمان و CKD در بهبود ویژگی‌های فنی و زیست‌محیطی خاک‌های تثبیت‌شده است. [۳۰-۳۴] بررسی‌ها نشان داده‌اند که در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، علاوه‌بر افزایش

استناد به این مقاله:

کامل ابراهیم الکنانی، احمد، اخترپور، علی و م. عبدالحسین، مصطفی، ۱۴۰۵. مطالعه‌ی رفتار غیراشباع خاک تثبیت‌شده‌ی ماسه‌ای گچ‌دار عراق با سیمان و CKD با استفاده از دستگاه تحکیم اصلاح‌شده. مهندسی عمران شریف، ۴۲(۱)، صص. ۱۲۷-۱۴۱. <https://doi.org/10.24200/j30.2026.68033.3473>



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.<sup>[۴۷]</sup>

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 استفاده شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت رویکردهای ذکرشده در مدیریت عدم قطعیت و پیچیدگی رفتار مواد ژئوتکنیکی است. در حوزه‌ی 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 داشته است. در ارتباط مستقیم با خاک‌های گچ‌دار، برخی مطالعات به بررسی رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و بهبود آن‌ها با استفاده از CKD پرداخته و نقش ابزارهای آزمایشگاهی اصلاح‌شده در تحلیل خاک‌های غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار را نشان داده‌اند. همچنین، پژوهش‌هایی درباره اثر pH و کانی‌شناسی گچ در فرایندهای شیمیایی و زیست‌محیطی انجام شده است، که بر حساسیت بالای خاک‌های گچ‌دار نسبت به شرایط محیطی دلالت دارند.<sup>[۴۸-۵۰]</sup>

با وجود پیشرفت‌های اخیر، اغلب مطالعات انجام‌شده 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. لذا، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی دقیق، چندسطحی، و مبتنی بر مکش کنترل‌شده برای پشتیبانی و توسعه‌ی مدل‌های جدید همچنان احساس می‌شود. پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک مجموعه داده‌های هیدرومکانیکی جامع، شامل: منحنی‌های SWRC، هیستریزیس، 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 آبی استفاده شود.<sup>[۴۴-۵۰]</sup>

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 پژوهشگران بوده است، با مشکلاتی همچون کاهش ظرفیت نگهداری آب، حساسیت بالا به تغییرات رطوبتی، و آسیب‌پذیری در برابر تورم، و انقباض مواجه هستند. تثبیت خاک‌های مذکور 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، پژوهش حاضر به‌عنوان یک گام اساسی در زمینه‌ی بهبود رفتار خاک‌های غیراشباع تثبیت‌شده با افزودنی‌های سیمانی، به‌ویژه در مناطق با شرایط اقلیمی مشابه، اهمیت زیادی دارد.

با وجود پژوهش‌های انجام‌شده درباره‌ی رفتار غیراشباع ماسه‌های گچ‌دار و نیز تلاش برای بهبود آن‌ها با افزودنی‌های سیمانی، هنوز یک چالش کلیدی در ادبیات موضوع باقی است: ابهام در تمایز روش‌های ارزیابی هیدرومکانیکی و محدودبودن دامنه‌ی 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

مقاومت‌های مکانیکی، تغییرات قابل‌توجهی در کاهش میزان تورم و بهبود ویژگی‌های انقباضی و کششی خاک‌ها مشاهده می‌شود. به‌ویژه در پروژه‌های جاده‌سازی و ساخت‌وسازهای بزرگ، ترکیب اخیر 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 ماده‌ی تثبیت‌کننده می‌تواند آثار زیست‌محیطی مثبتی نیز داشته باشد.<sup>[۳۵]</sup> استفاده از این ماده‌ی زائد به‌جای دفع آن به محیط‌زیست، منجر به کاهش آلودگی و بهره‌برداری بهینه از منابع صنعتی می‌شود. به‌طور کلی، روش اخیر می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و اقتصادی در پروژه‌های عمرانی با کارایی بالا مطرح شود، که هم از نظر فنی و هم زیست‌محیطی و اقتصادی مزایای زیادی دارد.<sup>[۳۶]</sup>

و<sup>[۳۷]</sup>

فراتر از نقش افزودنی‌ها، تراکم و مکش بافتی از عوامل کلیدی در رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع به‌شمار 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.<sup>[۳۸]</sup> منحنی مشخصه‌ی رطوبتی (SWRC)، ابزاری بنیادی برای توصیف روابط ذکرشده است که ارتباط بین مکش بافتی و میزان آب موجود در خاک را برقرار می‌کند و امکان ارزیابی کمی رفتار خاک در شرایط نوسان‌های رطوبتی را فراهم می‌آورد.<sup>[۳۹]</sup>

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تثبیت خاک باعث تغییر در منحنی SWRC می‌شود، ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد، و آثار پسماند (هیستریزیس) را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه دوام خاک‌های گچی در کاربردهای مهندسی بهبود می‌یابد.<sup>[۴۰-۴۳]</sup> با وجود این، همچنان نیاز به پژوهشی جامع احساس می‌شود، که آثار سیمان، CKD، تراکم، و مکش بافتی را در رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای - گچی ارزیابی کند.

برای توسعه‌ی مدل‌های جدید در ارزیابی رفتار غیراشباع خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، استفاده از روش‌های پیشرفته‌ی هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق و مدل‌های مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد می‌شود؛ که به‌ویژه در تحلیل ویژگی‌های پیچیده‌ی خاک‌های غیراشباع در شرایط مختلف مکش بافتی و تثبیت می‌توانند دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. روش‌های مذکور 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 مدل‌های پیشرفته‌ی مذکور می‌تواند به‌ویژه در ارزیابی عملکرد بلندمدت خاک‌های تثبیت‌شده و بهبود شرایط فنی آن‌ها در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی مفید واقع شود. بنابراین، مطالعات آبی باید بر روی استفاده از روش‌های اخیر برای گسترش مدل‌های موجود و ارزیابی دقیق‌تر رفتار خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD تمرکز داشته باشند.<sup>[۴۴-۴۶]</sup>

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 پرداخته و نشان داده‌اند که مدل‌های مذکور توانایی مناسبی در بازتولید روابط غیرخطی پیچیده میان پارامترهای خاک و پاسخ

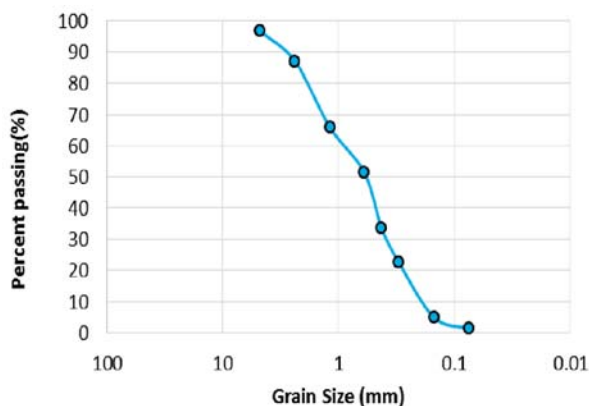
ویژگی‌های خاصی دارند، که به‌طور قابل‌توجهی در رفتار آن‌ها در پروژه‌های عمرانی تأثیر می‌گذارد. خاک‌های رسی گچ‌دار تقریباً ۱۵ تا ۳۰ درصد از مساحت خاک‌های عراق را تشکیل می‌دهند و به‌طور عمده از ترکیب ذرات رسی و بلورهای گچ (کلسیم سولفات) به‌وجود آمده‌اند. گچ موجود در خاک‌های مذکور باعث کاهش خاصیت نفوذپذیری و تراکم بالا می‌شود. درصد بالای گچ، که ممکن است در برخی نواحی تا ۳۰٪ یا بیشتر برسد، ساختار خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند به مشکلاتی نظیر کاهش ظرفیت باربری خاک و پدیده‌های انقباض و انبساط دما در هنگام تغییرات رطوبت منجر شود.

ساختار خاک‌های رسی گچ‌دار معمولاً به‌صورت دانه‌های رسی ریز و بلورهای گچ به‌صورت منشوری یا ورقه‌ای است که در برخی موارد به‌صورت لایه‌های ضخیم در سطح خاک ظاهر می‌شود. بلورهای گچی معمولاً در محیط‌های خشک و با تبخیر بالا به‌وجود می‌آیند و می‌توانند تأثیر زیادی در خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها داشته باشند. ویژگی‌های خاک‌های رسی گچ‌دار عراق، شامل افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری، و حساسیت به تغییرات رطوبتی است، که موجب مشکلاتی در تثبیت و پایداری سازه‌های عمرانی می‌شود.

خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر از منطقه‌ی بندر ام‌القصر در جنوب عراق برداشت شده است؛ منطقه‌ای که با خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار شناخته می‌شود. براساس سیستم یکپارچه‌ی طبقه‌بندی خاک‌ها (USCS)، خاک مذکور در گروه SP (ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده) قرار دارد. در جدول ۱، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه شده است. همچنین، در شکل ۱، منحنی توزیع اندازه‌ی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی خاک.

| Test                | Properties                          | unit               | Value |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------|-------|
| Proctor test        | Dry density                         | gr/cm <sup>3</sup> | 1.83  |
|                     | Wet density                         | gr/cm <sup>3</sup> | 2.05  |
|                     | Optimal water content               | %                  | 12    |
| Field density       | Dry density                         | gr/cm <sup>3</sup> | 1.817 |
|                     | Wet density                         | gr/cm <sup>3</sup> | 1.86  |
| Contaminant         | SO <sub>3</sub>                     | %                  | 3.78  |
|                     | CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O | %                  | 8.127 |
| Physical properties | G <sub>s</sub>                      |                    | 2.45  |



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک.

مشابه «Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and Its Improvement with CKD Material»  
«Improvement of Gypsum Sand Soils in Unsaturated Conditions Using a Modified Oedometer Device»  
کاربرد دستگاه اصلاح‌شده در یک چارچوب ارزیابی محدود تمرکز داشته و در بسیاری موارد، مقایسه‌ی جامع هم‌زمان اثر سطوح تراکم و مکش بافتی در 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 داده است؛ به‌گونه‌ای که:

- ۱) اثر تثبیت‌کننده‌ها نه فقط با CKD، بلکه با مقایسه‌ی مستقیم سیمان و CKD در شرایط یکسان آزمایشگاهی بررسی شده است،
- ۲) نقش دو سطح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) به‌عنوان یک متغیر تعیین‌کننده در کارایی تثبیت به‌صورت صریح وارد تحلیل شده است،
- ۳) پاسخ خاک تحت چند سطح مکش کنترل‌شده تحلیل شده است، تا وابستگی عملکرد تثبیت به شرایط غیراشباع به‌صورت کمی آشکار شود.

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 و نتایج ماکروسکوپی با شواهد ریزساختاری SEM پشتیبانی شده است.

بنابراین، مطالعه‌ی حاضر، ضمن هم‌راستابودن با مسیر کلی برخی مطالعات پیشین در استفاده از ابزار آدومتر اصلاح‌شده برای خاک‌های گچ‌دار غیراشباع، چارچوب ارزیابی را توسعه داده و با واردکردن هم‌زمان متغیرهای کلیدی (تراکم- مکش- نوع افزودنی) و ارائه‌ی شاخص‌های کمی مکمل، تمایز روشن و قابل دفاعی در روش ارزیابی و تبیین نوآوری نسبت به مطالعات پیشین فراهم کرده است.

لذا، هدف پژوهش حاضر، ارائه‌ی 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 بوده است.

ساختار پژوهش حاضر شامل انجام آزمایش‌های تحکیم غیراشباع برای بررسی رفتار خاک تحت شرایط مکش بافتی مختلف بوده است؛ که به‌منظور ارزیابی تأثیر افزودنی‌های سیمان و CKD در ویژگی‌های خاک، مانند ظرفیت نگهداری آب، تغییرات ساختاری و مکانیکی، و ضریب بهبود خاک انجام شده‌اند. 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 پژوهش حاضر را تشکیل داده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. ویژگی‌های خاک

خاک‌های رسی گچ‌دار عراق، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور عراق،

## جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD).

| Content( %)                    |        |       |
|--------------------------------|--------|-------|
| Chemical Content               | Cement | CKD   |
| CaO                            | 60-67  | 40-50 |
| SiO <sub>2</sub>               | 17-25  | 10-20 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3-8    | 2-6   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5-6  | 1-4   |
| MgO                            | 0.5-4  | 1-4   |
| SO <sub>3</sub>                | ≤ 3    | 30.1  |
| LOI                            | ≤ 5    | 10-30 |
| Na <sub>2</sub> O              | ≤ 1    | <1    |
| K <sub>2</sub> O               | ≤ 1    | <1    |
| Cl <sup>-</sup>                | -      | <1    |

## جدول ۳. افزودنی‌های نمونه و طرح اختلاط استفاده‌شده در پژوهش حاضر.

| Sample   | compaction | Addition | Additive |
|----------|------------|----------|----------|
| PS+1%C   |            | 1%       |          |
| PS+3%C   |            | 3%       | Cement   |
| PS+5%C   | 90%        | 5%       |          |
| PS+3%CKD | 95%        | 3%       |          |
| PS+5%CKD |            | 5%       | CKD      |
| PS+7%CKD |            | 7%       |          |

شرایط مشابه تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفته‌اند، تا آثار مواد تثبیت‌کننده در شرایط مختلف مکش و تراکم ارزیابی شود.

## ۴.۲. آزمایش تحکیم غیراشباع

در برخی مطالعات پیشین، از دستگاه آدومتر اصلاح‌شده برای بررسی رفتار خاک‌های گچ‌دار در شرایط غیراشباع و نیز ارزیابی بهبود با CKD استفاده شده است. با این حال، کاربرد دستگاه مذکور در پژوهش حاضر به‌صورت هدفمند توسعه یافته است، تا امکان یک ارزیابی هیدرومکانیکی جامع فراهم شود؛ بدین معنا که آزمایش‌ها به‌طور هم‌زمان برای دو سطح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) و تحت سطوح مکش کنترل‌شده اجرا شده است. همچنین، علاوه بر استخراج SWRC در دو مسیر ترشوندگی و خشکاندازی، شاخص‌های مکانیکی شامل Cc و Cs و معیار کمی ضریب بهبود (I) نیز به‌منظور سنجش اثربخشی تثبیت در شرایط غیراشباع گزارش شده‌اند. توسعه‌ی مذکور در پروتکل ارزیابی، امکان مقایسه‌ی نظام‌مند اثر نوع افزودنی (سیمان و CKD) شرایط تراکم و مکش را فراهم می‌سازد.

از دستگاه تحکیم غیراشباع، که امکان تنظیم مستقل فشار هوا و فشار آب را فراهم می‌کند، برای بررسی تراکم‌پذیری خاک، پتانسیل فروزش، و پاسخ هیدرومکانیکی تحت شرایط مکش بافتی کنترل‌شده استفاده شده است (شکل ۲).<sup>[۲۳ و ۲۲]</sup> همچنین، شرایط غیراشباع مشابه میدان واقعی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳).

ذرات مشاهده می‌شود. وجود مقدار نسبتاً بالای گچ در ترکیب خاک باعث حساسیت آن در برابر تغییرات رطوبتی می‌شود و انتخاب آن را برای مطالعات تثبیت خاک توجیه می‌کند.<sup>[۴۷-۵۶]</sup>

## ۲.۲. مواد افزودنی

دو عامل تثبیت‌کننده در پژوهش حاضر بررسی شده‌اند: سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD). سیمان به‌دلیل فرآیند هیدراسیون خود، که منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می‌شود، به‌طور گسترده برای تثبیت خاک استفاده می‌شود. ترکیب‌های مذکور، ذرات خاک را به یکدیگر پیوند می‌دهند و به‌طور قابل توجهی، سبب افزایش مقاومت خاک می‌شوند.<sup>[۵۲]</sup>

غبار کوره‌ی سیمان (CKD)، که محصول جانبی فرآیند تولید سیمان است، به‌عنوان جایگزینی مقرون‌به‌صرفه مطرح می‌شود. ماده‌ی CKD، حاوی آهک و ترکیب‌های واکنش‌پذیر است، که می‌توانند در واکنش‌های پوزولانی شرکت کنند، موجب کاهش تخلخل شوند، و مقاومت خاک را بهبود بخشند؛ هر چند کارایی آن معمولاً کمتر از سیمان است. در جدول ۲، ترکیب شیمیایی سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD) استفاده‌شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.<sup>[۴۹]</sup>

## ۳.۲. آماده‌سازی نمونه و تراکم

نمونه‌های خاک از الک شماره‌ی ۴ (با اندازه‌ی چشمه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر) عبور داده شده‌اند، تا ذرات درشت حذف شوند. عملیات تراکم در دو سطح ۹۰ و ۹۵ درصد از بیشینه‌ی چگالی خشک (MDD)، که براساس آزمایش پروکتور استاندارد و طبق استاندارد ASTM D ۶۹۸ تعیین شده است، صورت گرفته است. مواد افزودنی با مقادیر: ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان و ۳، ۵، ۷ درصد غبار کوره‌ی سیمان (CKD) بر حسب وزن خشک خاک در دو حالت جداگانه به خاک اضافه شده‌اند. در جدول ۳، خلاصه‌ی ترکیب‌های مختلف آماده‌شده برای آزمایش ارائه شده است. شایان ذکر است منظور از PS، نمونه‌ی خاک بدون افزودنی است.

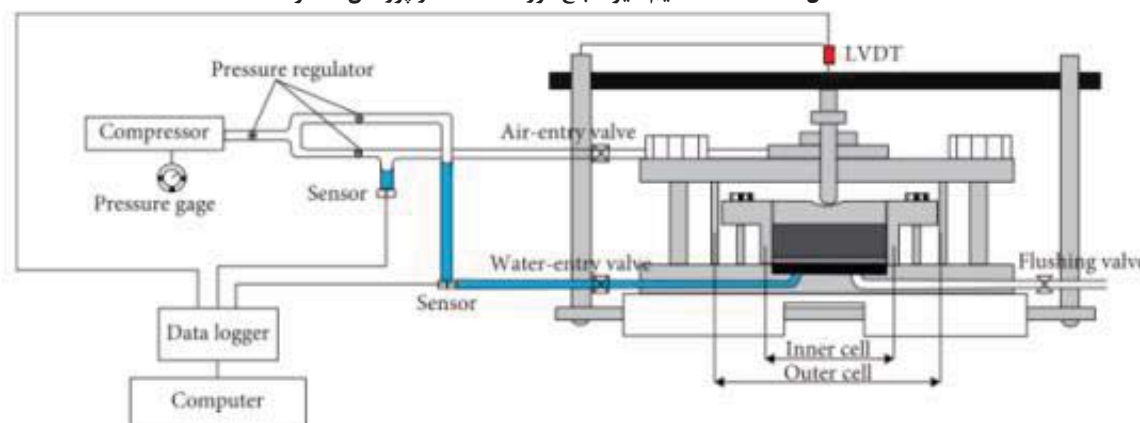
در پژوهش حاضر، خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار به‌منظور تثبیت با سیمان و CKD تحت فرآیند اختلاط و عمل‌آوری قرار گرفته‌اند. ابتدا، مواد خشک شامل خاک، سیمان، و CKD به‌طور یکنواخت در یک مخلوط‌کننده‌ی آزمایشگاهی تمیز و خشک آماده شده‌اند. پس از آن، سیمان و CKD به نسبت‌های مشخص به خاک افزوده شده‌اند. ترکیب مواد به‌صورت تدریجی انجام شده است، به‌طوری‌که ابتدا سیمان و سپس CKD به خاک افزوده شده‌اند. ترتیب اخیر، برای بهبود واکنش‌های پوزولانی و ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات خاک و مواد تثبیت‌کننده در نظر گرفته شده است. پس از اتمام مرحله‌ی اخیر، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت پایین به‌طور کامل مخلوط شده است، تا ترکیب یکنواخت حاصل شود.

در مرحله‌ی بعد، پس از اختلاط، نمونه‌ها به مدت ۷ روز، به‌منظور اطمینان از تثبیت مناسب سیمان و CKD و تأثیر کامل آن‌ها در ویژگی‌های خاک، تحت عمل‌آوری در شرایط دمای محیطی قرار گرفته‌اند. این شرایط و مدت زمان عمل‌آوری به‌طور ویژه برای ارزیابی آثار سیمان و CKD در خواص خاک در شرایط غیراشباع و به‌منظور دستیابی به بهترین نتیجه در بهبود خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی خاک انتخاب شده است.

فرآیند اخیر برای هر نمونه به‌طور جداگانه انجام شده و تمامی نمونه‌ها در



شکل ۲. دستگاه تحکیم غیراشباع مورد استفاده در پژوهش حاضر.



شکل ۳. نمای شماتیک از دستگاه آدومتر با کنترل مکش.

## ۵.۲. منحنی مشخصه‌ی آب- خاک (SWRC)

منحنی‌های SWRC با اعمال مکش در بازه‌ی ۲ تا ۹۰ کیلوپاسکال و با استفاده از روش انتقال محور در داخل آدومتر به‌دست آمده‌اند. در هر سطح مکش، میزان تعادل محتوای آب حجمی در مسیرهای خشکاندازی و ترشدگی اندازه‌گیری شده است.

## ۶.۲. برازش مدل ون‌گنوختن

برازش داده‌های آزمایشگاهی منحنی SWRC با استفاده از معادله‌ی ون‌گنوختن صورت گرفته و پارامترهای هیدرولیکی برازش شامل  $(m, n, \alpha)$  استخراج شده‌اند. پارامترهای اخیر، امکان مقایسه‌ی کمی تأثیر تراکم و افزودنی‌ها در رفتار نگهداری آب را فراهم کرده‌اند.

## ۷.۲. تراکم‌پذیری و ضریب بهبود

آزمایش‌های تکمیلی تحکیم غیراشباع در سطوح مکش مختلف (۱۵۳۰، ۶۰ و کیلوپاسکال) برای تعیین شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) انجام شده‌اند. همچنین، معادله‌ی ضریب بهبود (I) برای ارزیابی میزان اثربخشی تثبیت تحت شرایط مختلف تنش و مکش استفاده شده است. [۱۴، ۱۷، ۲۴] ضریب بهبود (I) یک ابزار تحلیلی شناخته‌شده است، که در مطالعات ژئوتکنیکی برای اندازه‌گیری اثربخشی عملیات اصلاح خاک استفاده می‌شود و به وضوح درصد کاهش نشست حاصل از روش‌های تثبیت خاک را نشان می‌دهد، و نقش افزودنی‌ها را در افزایش عملکرد خاک برجسته می‌کند. ضریب بهبود را می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۱ محاسبه کرد:

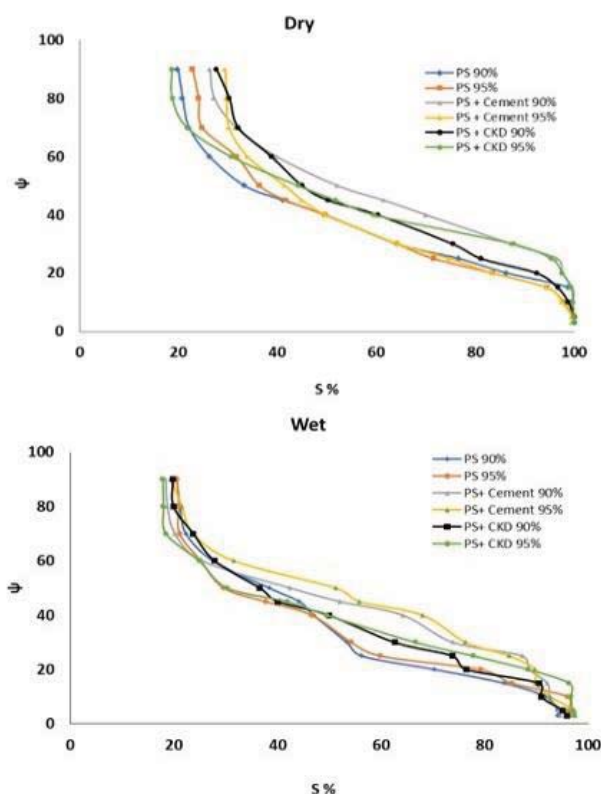
$$I = \frac{S_{Natural} - S_{Treated}}{S_{Natural}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $S_{Natural}$  نشست خاک طبیعی (اصلاح‌نشده) تحت تنش اعمال شده، و  $S_{Treated}$  نشست خاک اصلاح‌شده با افزودنی‌های خاص تحت شرایط مشابه هستند.

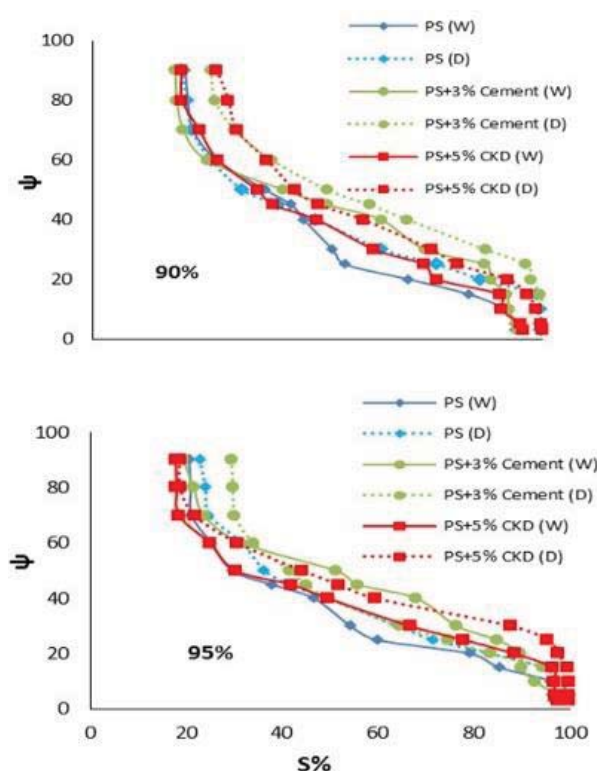
معادله‌ی اخیر براساس مفهوم شناخته‌شده‌ی نسبت بهبود در ادبیات مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک بوده و ایده‌ی اصلی آن، مقایسه‌ی عملکرد خاک‌های اصلاح‌شده در مقابل خاک‌های اصلاح‌نشده است. همچنین، ضریب بهبود به‌صورت کمی، کاهش نشست حاصل از تثبیت را اندازه‌گیری می‌کند. رویکرد ذکرشده، چارچوبی قوی برای مقایسه‌ی اثربخشی نسبی افزودنی‌های مختلف تحت شرایط آزمایشگاهی مشابه فراهم می‌کند.

## ۸.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای تحلیل ریزساختاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. تصاویر SEM برای مشاهده‌ی تغییرات میکروسکوپی و بررسی تأثیر افزودنی‌ها (سیمان و CKD) در ساختار ذرات خاک در شرایط غیراشباع گرفته شده‌اند. نمونه‌های خاک قبل و بعد از تثبیت تحت شرایط مشابه (مکش بافتی مختلف) دقیقاً آماده‌سازی و به میکروسکوپ ارسال شده‌اند. شرایط عکس‌برداری، شامل تنظیم‌های ولتاژ شتاب‌دهنده به میزان ۲۰ کیلوولت، تنظیم‌های شدت نور و کنتراست برای افزایش وضوح تصاویر، و جلوگیری از تداخل رطوبت بر نتایج بوده است. تصاویر گرفته‌شده در مقیاس‌های مختلف، به‌ویژه در نواحی‌یی که تغییرات ساختاری واضحی مشاهده می‌شد، ثبت شده‌اند. تصاویر مذکور، امکان مقایسه‌ی دقیق بین نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و CKD و نمونه‌های غیرتثبیت‌شده را فراهم می‌سازد.



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.

در تراکم ۹۵٪، خاک‌های تثبیت‌شده ظرفیت نگهداری آب بالاتر و هیستریزس کمتری میان مسیرهای خشک‌شدن و ترشدن نشان داده‌اند. در مقابل، در تراکم ۹۰٪، اندازه‌ی بزرگ‌تر حفره‌ها موجب محدودیت در اثربخشی تثبیت، به‌ویژه در حالت استفاده از CKD شده است. این نتایج تأیید می‌کنند که تثبیت در ۱۳۳



شکل ۴. فلوجارت روند پژوهش حاضر.

به‌طورکلی می‌توان بیان داشت، تصویربرداری SEM بر روی خاک بدون افزودنی، خاک تثبیت‌شده با سیمان و خاک تثبیت‌شده با CKD انجام شده است، تا تغییرات ریزساختاری بررسی شود. تصاویر SEM، بینشی دقیق در مورد پُرشدگی حفره‌ها، پیوندهای سیمانی، و آرایش ذرات از خود ارائه می‌دهند و می‌توانند مستقیماً از نتایج آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی پشتیبانی کنند.<sup>[۳۵]</sup> روش پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت فلوجارت مطابق شکل ۴ نشان داد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. منحنی‌های نگهداری آب- خاک (SWRC)

در شکل‌های ۵ و ۶، منحنی‌های نگهداری آب- خاک (SWRC) برای خاک‌های بدون تثبیت و تثبیت‌شده تحت سطوح تراکم ۹۰ و ۹۵ درصد مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، افزودن ۳٪ سیمان و ۵٪ غبار کوره‌ی سیمان (CKD) موجب بهبود قابل‌توجه ظرفیت نگهداری آب در مقایسه با خاک بدون تثبیت شده است. بهبودی اخیر، به کاهش اندازه‌ی حفره‌ها و افزایش یکنواختی ساختار خاک ناشی از اثر ترکیبی افزودنی‌ها و تراکم نسبت داده می‌شود. این امر با نتایج مطالعات پیشین در توافق خوبی است.<sup>[۴۳-۴۵]</sup> این تذکر لازم است که (S%) در شکل ۵، به معنای درصد اشباع است.

تصفیه‌نشده، که در آن‌ها تغییرپذیری در اندازه‌ی منافذ بیشتر است، بارزتر است. در خاک‌های تصفیه‌شده، توزیع اندازه‌ی منافذ یکنواخت‌تر است و منجر به بهبود احتباس آب و کاهش فروپاشی سازه می‌شود.

یافته‌های اخیر 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 آثار نامطلوب هیستریزیس در خاک‌های گچی را به میزان کمینه رساند و منجر به زیرساخت‌های پایدارتر و قابل اعتمادتر در محیط‌های با رطوبت متغیر شد.

### ۲.۳. تحلیل مدل ون گنوختن

برازش داده‌های منحنی SWRC با استفاده از مدل ون گنوختن (۱۹۸۰) صورت گرفته و پارامترهای به‌دست‌آمده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در شکل ۷، منحنی‌های برازش‌شده مشاهده می‌شوند؛ که براساس آن، خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر، ظرفیت نگهداری آب بهتری نسبت به

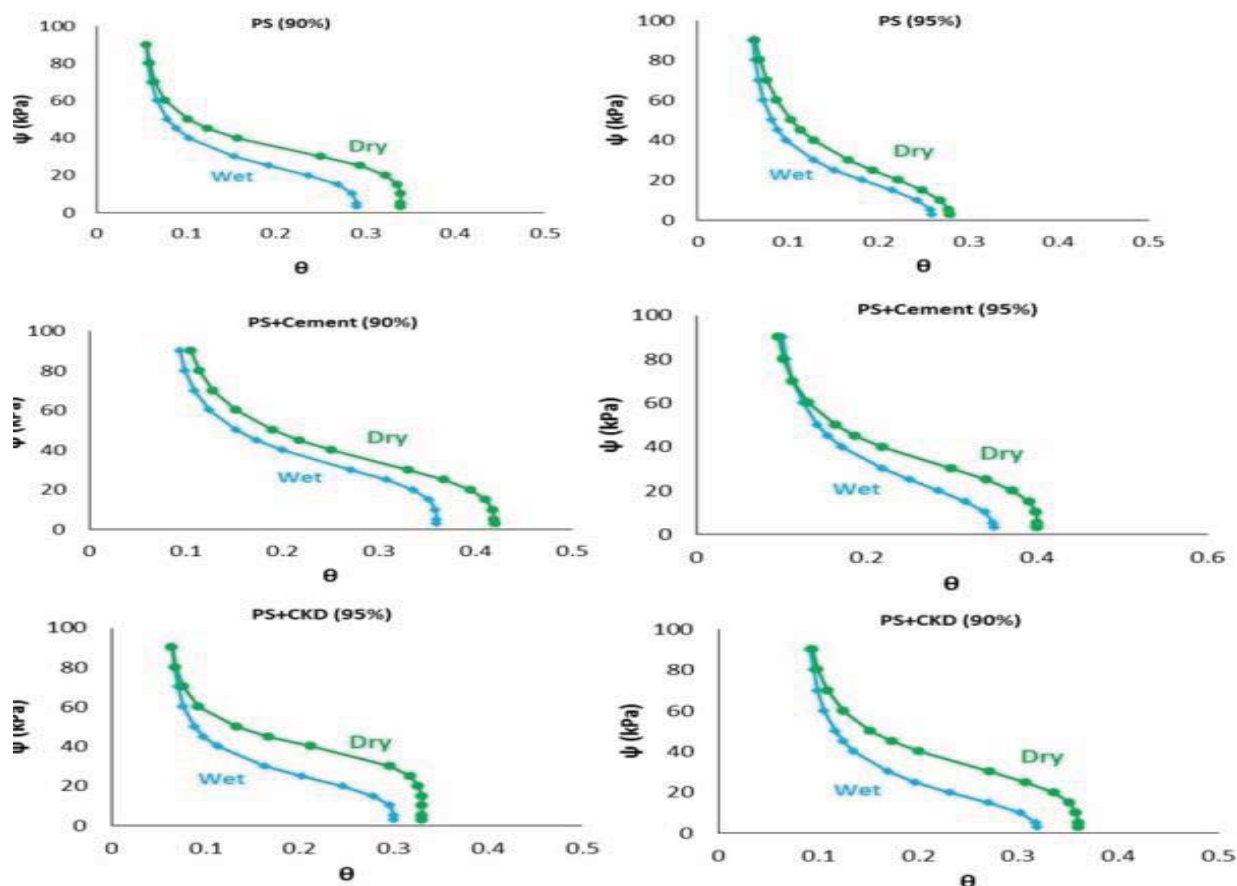
ترکیب با تراکم بالاتر، عملکرد هیدرومکانیکی خاک‌های گچی را بهبود می‌بخشد.<sup>[۱۹]</sup> شایان ذکر است (S%) در شکل ۶، به معنای درصد اشباع است. همچنین منحنی‌های W به معنای تراندازی و منحنی‌های D به معنای خشک‌شدن هستند.

اثر Ink Bottle در خاک به پدیده‌ای اشاره دارد که در آن، رفتار فیزیکی یا مکانیکی خاک به دلیل وجود حفره‌ها یا فضاهای بزرگ در درون خاک تغییر می‌کند؛ که 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 حفره‌های مذکور شبیه به یک بطری جوهر (Ink Bottle) است که در آن فضاهای بزرگ (مانند گردن بطری) در میان ذرات خاک وجود دارند.

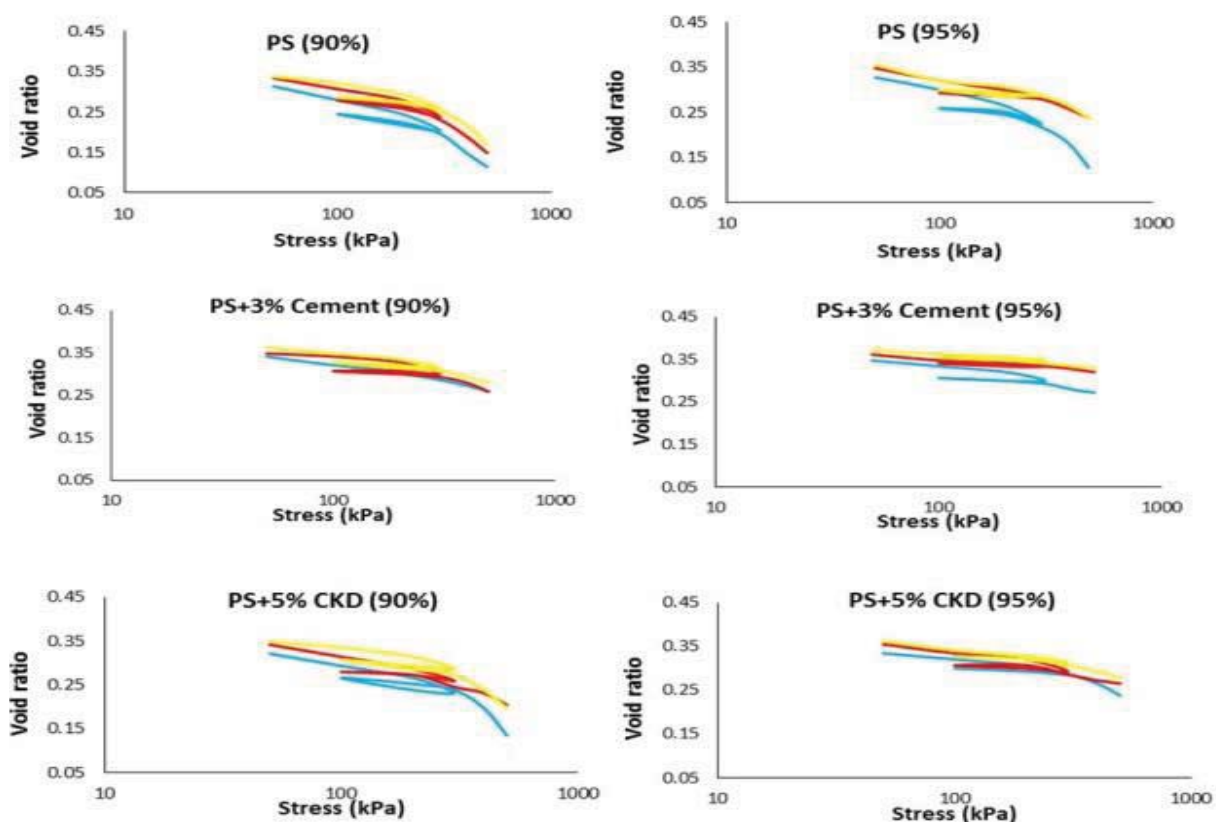
با توجه به نتایج شکل‌های ۵ و ۶، بطری جوهر با حفره‌های بزرگ‌تر، که هیستریزیس را افزایش می‌دهند، مشخص شده است؛ و در خاک‌های

جدول ۴. پارامترهای برازش  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  برای مسیرهای ترشدگی و خشک‌اندازی.

| Sample    | Compaction(%) | Wet  |   |      | Dry   |     |      |
|-----------|---------------|------|---|------|-------|-----|------|
|           |               | a    | n | m    | a     | n   | m    |
| PS        | 90            | 0.04 | 4 | 0.75 | 0.03  | 5   | 0.8  |
|           | 95            | 0.05 | 3 | 0.66 | 0.04  | 2.8 | 0.64 |
| PS+Cement | 90            | 0.03 | 4 | 0.75 | 0.028 | 3.8 | 0.73 |
|           | 95            | 0.04 | 3 | 0.66 | 0.03  | 4   | 0.75 |
| PS+CKD    | 90            | 0.05 | 3 | 0.66 | 0.03  | 4   | 0.75 |
|           | 95            | 0.04 | 4 | 0.75 | 0.025 | 6   | 0.83 |



شکل ۷. منحنی‌های ون گنوختن برای خاک‌های خالص و تثبیت‌شده.



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

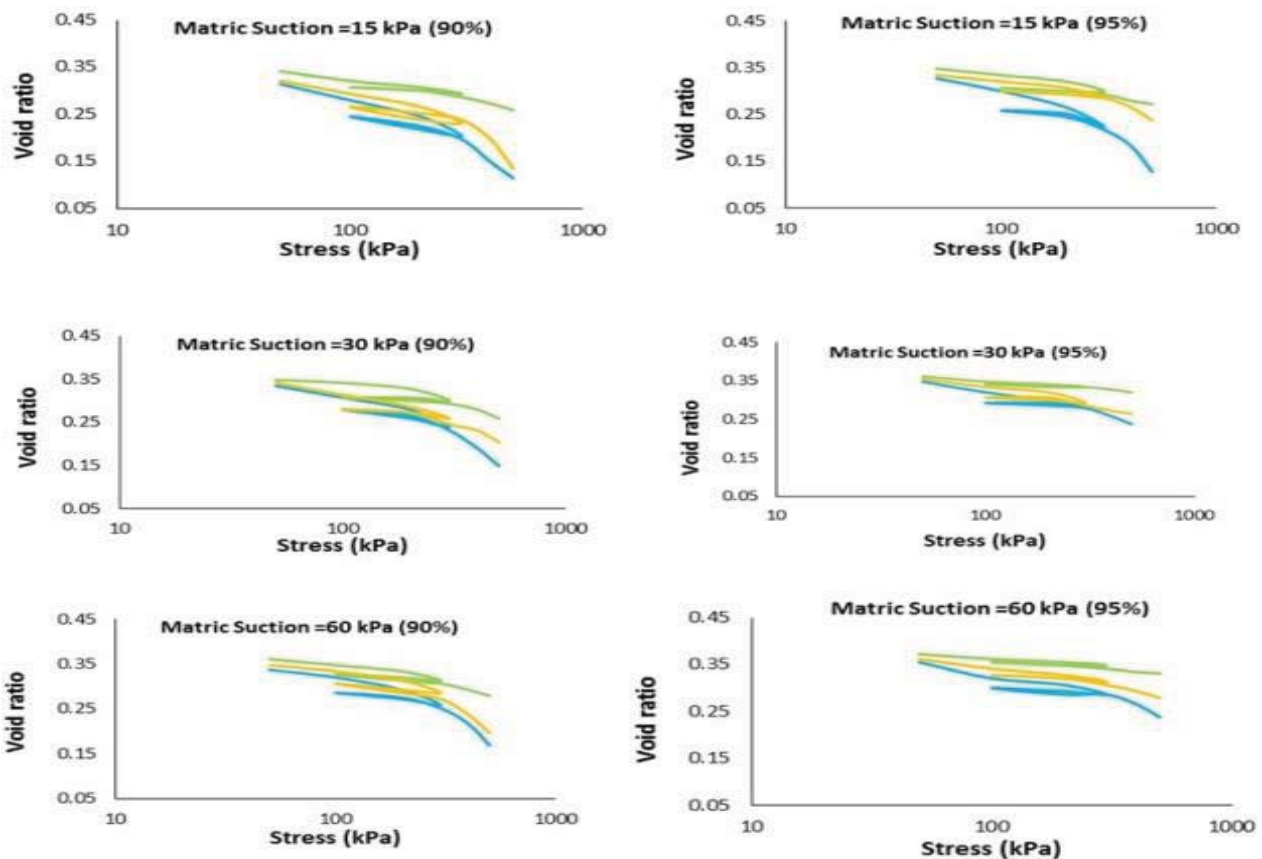
آزمایش مذکور چگونگی تأثیر مکش بافتی در تراکم‌پذیری خاک گچی، اثربخشی سیمان، و گرد سیمان را در افزایش مقاومت در برابر فشردگی و تورم، و تأثیر سطوح تراکم (۹۰ و ۹۵ درصد) را در رفتار خاک تحت شرایط مکش مختلف ارزیابی کرده و نشان داده است که افزایش مکش بافتی منجر به کاهش  $C_c$  و  $C_s$  می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی بهبود مقاومت خاک در برابر فشردگی و تورم است (جدول ۵). این اثر در تراکم ۹۵٪ در مقایسه با تراکم ۹۰٪ بارزتر بوده است. با افزودن ۳٪ سیمان،  $C_c$  در تراکم ۹۰٪ به ۰/۰۵۷ و در تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۴۵ کاهش یافته است؛ 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 یافته است، که نشانگر بهبود قابل‌توجه در پایداری خاک است. در سطوح مکش بالاتر از ۳۰ و ۶۰ کیلوپاسکال، کاهش  $C_c$  و  $C_s$  ادامه یافته و نقش مکش بافتی در افزایش سختی خاک را تقویت کرده است.<sup>[۹]</sup> برای نمونه‌های تیمار شده با ۵٪ CKD، مقادیر  $C_c$  و  $C_s$  نیز به میزان کمتری نسبت به تیمار سیمان بهبود یافته‌اند. در مکش ۱۵ کیلوپاسکال، مقدار  $C_c$  برای ۹۰٪ تراکم ۰/۰۹۱ بوده است، که کمتر از خاک تیمار نشده (۰/۱۱)، اما بیشتر از خاک تیمار شده با سیمان (۰/۰۵۷) بوده است. در تراکم ۹۵٪، مقدار  $C_c$  برابر ۰/۰۴۵ بوده است، که نشانگر 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 پُر کردن حفره‌ی 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 یافته است؛ در حالی که برای خاک تیمار شده با CKD، مقدار  $C_c$  ۰/۰۵۷ و برای خاک تیمار نشده ۰/۰۷ بوده است، که تأیید می‌کند سیمان مؤثرترین عامل در بهبود سختی خاک و کاهش تغییر شکل است. علاوه بر این، ترکیب ۹۵٪

خاک‌های تثبیت‌شده با CKD از خود نشان داده‌اند. این تذکر لازم است که این امر در برخی مطالعات پیشین نیز اشاره شده است.<sup>[۱۵، ۲۱، ۴۳ و ۴۹]</sup>

در مورد خاک خالص، پارامتر  $\alpha$  نشان‌دهنده‌ی نفوذپذیری بالا و ظرفیت پایین نگهداری آب است؛ در حالی که افزودن سیمان موجب کاهش قابل‌توجه مقدار  $\alpha$  شده است، که بیانگر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت است. افزودن CKD نیز موجب بهبود نگهداری، اما در سطحی کمتر از سیمان شده است. نتایج به‌دست‌آمده، کارایی و دقت مدل ون‌گنوختن را در شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای گچی تثبیت‌شده تأیید کرده‌اند.<sup>[۹، ۲۶، ۲۸، ۳۳ و ۴۱]</sup>

### ۳.۳. تأثیر مکش و افزودنی‌ها در تراکم‌پذیری

مکش‌ها، یکی از عوامل کلیدی مؤثر در رفتار خاک‌های غیراشباع هستند، که نشان‌دهنده‌ی نیروهای کششی هستند، که آب را در منافذ خاک نگه می‌دارند.<sup>[۲۳]</sup> نیروهای کششی، نقش مهمی در تعیین خواص تراکم‌پذیری خاک‌ها، به ویژه در خاک‌های گچی، که مستعد تغییرات رطوبت هستند، ایفا می‌کنند. در شکل ۸، رابطه‌ی بین تنش و تغییر نسبت خلل و فرج مشاهده می‌شود، که از آزمایش‌های تجربی انجام‌شده با استفاده از دستگاه تحکیم غیراشباع به‌دست آمده است. آزمایش‌های اخیر با هدف نشان دادن تأثیر مکش بافتی و درجه‌ی تراکم خاک در خواص تراکم‌پذیری خاک انجام شده‌اند. علاوه بر این، آزمایش‌های بیشتری برای بررسی تأثیر مواد افزودنی در خواص تراکم‌پذیری خاک تحت مکش بافتی ثابت (مطابق شکل ۹) انجام شده‌اند. شایان ذکر است که در نتایج شکل‌های ۸ و ۹، آزمایش‌های تحکیم برای مطالعه‌ی اثر تثبیت، ابتدا بر روی خاک تثبیت‌نشده (خاک طبیعی ماسه‌ای گچ‌دار) انجام شده‌اند.



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

جدول ۵. مقادیر شاخص تراکم‌پذیری ( $C_c$ ) و شاخص تورم ( $C_s$ ) در سطوح مختلف مکش و شرایط تثبیت.

| Sample       | Compaction (%) | Suction 15 kPa |       | Suction 30 kPa |       | Suction 60 kPa |       |
|--------------|----------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
|              |                | $C_c$          | $C_s$ | $C_c$          | $C_s$ | $C_c$          | $C_s$ |
| PS           | 90             | 0.11           | 0.08  | 0.091          | 0.08  | 0.07           | 0.05  |
|              | 95             | 0.1            | 0.07  | 0.079          | 0.014 | 0.079          | 0.028 |
| PS+3% Cement | 90             | 0.057          | 0.028 | 0.034          | 0.014 | 0.045          | 0.028 |
|              | 95             | 0.046          | 0.014 | 0.034          | 0.014 | 0.028          | 0.014 |
| PS+5% CKD    | 90             | 0.091          | 0.072 | 0.091          | 0.043 | 0.057          | 0.043 |
|              | 95             | 0.046          | 0.028 | 0.057          | 0.028 | 0.057          | 0.028 |

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

| Suction (kPa) | Stress (kPa) | 90%        |      | 95%        |     |
|---------------|--------------|------------|------|------------|-----|
|               |              | Compaction |      | Compaction |     |
|               |              | 3%         | 5%   | 3%         | 5%  |
|               |              | Cement     | CKD  | Cement     | CKD |
| 15            | 100          | 44         | 11   | 42.8       | 14  |
|               | 600          | 39         | 7.8  | 58         | 44  |
| 30            | 100          | 33         | 16.6 | 50         | 25  |
|               | 600          | 48         | 24   | 60         | 20  |
| 60            | 100          | 63.6       | 27   | 83         | 33  |
|               | 600          | 53         | 13   | 67.5       | 30  |

تراکم و افزودنی‌ها به‌طور قابل‌توجهی عملکرد خاک را افزایش داده و آن را در برابر تغییرات فشار و رطوبت مقاوم‌تر کرده است.<sup>[۲۹]</sup> براساس نتایج اخیر، توصیه می‌شود برای کاهش خطرهای ژئوتکنیکی، دست‌کم ۹۵٪ تراکم در خاک‌های گچی شنی استفاده شود. در پروژه‌های بهسازی خاک نیز، که نیاز به پایداری طولانی مدت دارند، ۳٪ سیمان اضافه شود، و از ۵٪ گرد سیمان به‌عنوان 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 آثار رطوبت طولانی‌مدت در پایداری سازه حاصل شود.

### 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 به‌دست آورده است، به‌ویژه در شرایطی که تراکم ۹۵٪ بوده است. در مکش ۶۰

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

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق تثبیت‌شده با سیمان و غبار کوره‌ی سیمان (CKD) تحت شرایط کنترل‌شده‌ی مکش بافتی و سطوح مختلف تراکم بررسی شده است. یافته‌های اصلی به این صورت جمع‌بندی شده‌اند:

(۱) دو حالت افزودن ۳٪ سیمان و همچنین ۵٪ CKD موجب بهبود منحنی نگهداری آب- خاک (SWRC) از طریق کاهش اندازه‌ی حفره‌ها و بهبود یکنواختی ساختاری شده است. سیمان کارایی بیشتری نشان داده است، به‌ویژه در تراکم ۹۵٪، که آثار هیستریزیس به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.

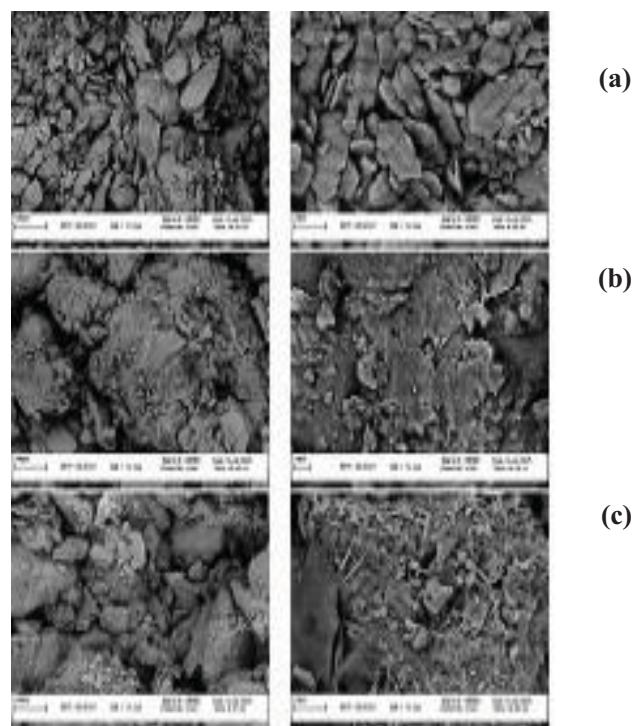
(۲) داده‌های آزمایشگاهی SWRC با موفقیت با مدل ون‌گونوختن برازش شده‌اند. پارامترهای به‌دست‌آمده نشان داده‌اند که خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در سطوح مکش بالاتر توانایی نگهداری آب بیشتری نسبت به خاک‌های تثبیت‌شده با CKD دارند و این امر کارایی مدل را برای خاک‌های گچی تثبیت‌شده تأیید می‌کند.

(۳) افزایش مکش بافتی از ۱۵ تا ۶۰ کیلوپاسکال به‌طور پیوسته موجب کاهش شاخص تراکم‌پذیری (Cc) و شاخص تورم (Cs) شده است. تیمار با سیمان بیشترین کاهش را ایجاد کرده است، به‌طوری‌که مقدار Cc در مکش ۶۰ کیلوپاسکال و تراکم ۹۵٪ به ۰/۰۲۸ رسیده است؛ در حالی که CKD فقط بهبودی متوسط حاصل کرده است.

(۴) تحلیل ضریب بهبود نشان داده است که سیمان در تمامی سطوح تراکم و مکش عملکردی برتر نسبت به CKD داشته است. در تراکم ۹۵٪ و مکش ۶۰ کیلوپاسکال، سیمان به ضریب بهبود ۸۳٪ دست یافته است، در حالی که این مقدار برای CKD فقط ۳۳٪ بوده است.

(۵) تصاویر SEM تأیید کرده‌اند که فرآیند هیدراسیون سیمان منجر به تشکیل ژل‌های متراکم C-S-H شده است، که حفره‌های خاک را پر کرده و موجب بهبود چشمگیر ریزساختار شده است. در مقابل، CKD واکنش‌های پوزولانی ناقص‌تری نشان داده است، که نتیجه‌ی آن تقویت متوسط بوده است.

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که سیمان مؤثرترین ماده‌ی تثبیت‌کننده برای خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار عراق است و به‌طور قابل‌توجهی خواص هیدرولیکی و



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).

کیلوپاسکال و تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال، ضریب بهبود سیمان به ۸۳٪ رسیده است، در حالی‌که این مقدار برای CKD فقط ۳۳٪ بوده است. CKD نسبت به افزایش تنش، حساسیت بیشتری از خود نشان داده و در تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال، مقادیر پایین‌تری از ضریب بهبود را ثبت کرده است.

این یافته‌ها سیمان را به‌عنوان تثبیت‌کننده‌ی کارآمدتر معرفی می‌کنند، در حالی‌که CKD هر چند 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 می‌کند.

#### ۵.۳. تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

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

– **خاک بدون تثبیت:** آرایش سست ذرات با حفره‌های بزرگ که منجر به تخلخل زیاد و مقاومت برشی پایین شده است (شکل ۱۰-ا).

– **خاک تثبیت‌شده با سیمان:** تشکیل ژل متراکم C-S-H، که حفره‌ها را پر کرده و باعث کاهش تخلخل و افزایش پیوند ذرات شده است (شکل ۱۰-ب).

– **خاک تثبیت‌شده با CKD:** بهبود نسبی ناشی از واکنش‌های پوزولانی کندتر، همراه با ذرات واکنش‌نداده‌ی باقی‌مانده، و پیوندهای یکنواخت کمتر صورت گرفته است. مشاهده‌های اخیر تأیید می‌کنند که سیمان به‌دلیل واکنش‌های هیدراسیون سریع و گسترده، تثبیت برتری را فراهم می‌آورد؛ در حالی که CKD فقط بهبود متوسطی ایجاد می‌کند، که عمدتاً ناشی از پُرشدگی فیزیکی حفره‌ها و پیوند شیمیایی محدود است (شکل ۱۰-ج).

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 توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های صحرایی است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه‌ی حاضر به‌عنوان ورودی برای توسعه‌ی مدل‌های هوشمند (نظیر DNN)، سیستم‌های فازی و مدل‌های ترکیبی (به‌منظور پیش‌بینی نشست، تغییرشکل، و رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های گچ‌دار در شرایط واقعی استفاده شود).

مکانیکی را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه زمانی که با تراکم بالاتر ترکیب شود. اگرچه CKD جایگزینی اقتصادی‌تر است، اما کارایی کمتری نسبت به سیمان دارد. آثار ترکیبی تثبیت، تراکم و مکش بافتی برای ارتقاء دوام خاک در محیط‌های دارای نوسان‌های رطوبتی حیاتی است.

با وجود نتایج قابل‌توجه پژوهش حاضر، برخی محدودیت‌ها وجود دارند، که می‌توانند مسیر پژوهش‌های آینده را روشن‌تر سازند. نخست، مطالعه‌ی حاضر 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

## References- منابع

- Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. 2023. Study of soil reinforcement in the east of mashhad using glass granule. *Materials research express*, 10(5), 055202. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
- Bazaz, H.B., Akhtarpour, A. and Baradaran, M.S., 2025, October. High-rise buildings sitting on clayey soils: how the top-down construction style affects their seismic behavior. In *Structures*, 80, p. 109861. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109861>
- Mahmood, M. S., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. 2020, February. Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), p. 012080). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012080>
- Abdalhusein, M., & Akhtarpour, A. 2019. Effect of wetting process with presence of matric suction on unsaturated gypseous sand soils. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54.
- Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. 2019. Effect of soaking on unsaturated gypseous sand soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(5), pp.550-558.
- Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. 2022. Unsaturated behaviour of gypseous sand soils using a modified triaxial test apparatus. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(6), pp.743-758. <https://doi.org/10.1080/19386362.2022.2033483>
- Alsamia, S., Mahmood, M. S., & Akhtarpour, A. 2020. Estimation of capillary rise in unsaturated gypseous sand soils. *Pollack Periodica*, 15(2), pp.118-129. <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.2.11>
- Akhtarpour, A., Mahmood, M. S., Almahmodi, R., & Husain, M. M. A. 2018, November. Settlement of gypseous sand upon short-term wetting. In *Proceedings of the International Congress on Engineering and Architecture* pp. 1807-1820.
- Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Mahmood, M. S. 2022, May. Investigation of shear strength parameters for gypseous soils using a modified apparatus of triaxial test. In *International Conference on Geotechnical Engineering-IRAQ* (pp. 317-330). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-7358-1\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7358-1_27)
- Abdulameer AlNaddaf, H. Q., Kouzegaran, S., Fattah, M. Y., & Akhtarpour, A. 2024. Effects of cement treatment on water retention behavior and collapse potential of gypseous soils: experimental investigation and prediction models. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1), 6637911. <https://doi.org/10.1155/2024/6637911>
- Abdalhusein, M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. 2020. 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(10), pp.2435-2450. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16339.6194>

12. AlNaddaf, H. Q. A., Kouzegaran, S., Akhtarpour, A., & Fattah, M. Y. 2025. Effects of cement treatment on the behavior of unsaturated gypseous soils. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5), pp.1-33. <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00602-y>
13. Tareghian, B., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. 2024. The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00014-4>
14. Pargar, J., Akhtarpour, A., & Baradaran, M. S. 2024. An unsaturated soil mechanics-based numerical and experimental method to assess soil settlement due to ground water level rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.1-26. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00422-6>
15. Al-Obaidi, Q. A., Karim, H. H., & Al-Shamoosi, A. A. 2020, February. Collapsibility of gypseous soil under suction control. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 737(1), p. 012103). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012103>
16. Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M., & Baradaran, M. S. 2023. Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp.1-24. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00315-0>
17. Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. 2024. Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case studies in construction materials*, 20, e02740. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>
18. Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. 2024. 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, 138426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426>
19. Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. 2022. A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(110), pp.57-86. <https://doi.org/10.22034/ROAD.2021.295635.1969>
20. Baradaran, S., & Ameri, M. 2023. Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(114), pp.53-70. <https://doi.org/10.22034/road.2022.337945.2041>
21. Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. 2025. 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, 103734. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103734>
22. Baradaran, S., & Ziaee, S. A. 2025. Review of the mechanical properties of asphalt pavement reinforced with natural plant fibers as an eco-friendly solution in pavement engineering. *Road*.
23. Yeganeh, N., Akhtarpour, A., Bazaz, J. B., & Baradaran, M. S. 2024. Analysis of the soil-structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 17(1).
24. Balighi, M., Akhtarpour, A., Baradaran, M. S., Abdallah, M., & RiyahiKhoo, A. 2024. Numerical and experimental study of the interaction between surface swelling soil and gas well casing, based on unsaturated soil mechanics. *Results in Engineering*, 24, 103646. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103646>
25. Balighi, M., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. 2024. 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(7), pp.5-5. <https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22616.8006>
26. Abdolvand, Y., & Sadeghiamirshahidi, M. 2024. Soil stabilization with gypsum: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.007>
27. Zhan, B. J., Li, J. S., Xuan, D. X., & Poon, C. S. 2020. Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: physicochemical interactions between sludge and cement. *Journal of hazardous materials*, 381, 121034. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121034>
28. Zhang, F., Zhu, H., Wu, Q., Yin, Z., Zhu, Z., & Hua, S. 2024. Research on the strength reduction mechanism of Cement Kiln Dust (CKD)-Portland cement systems from macroscale and nanoscale. *Construction and Building Materials*, 425, 135997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135997>

29. Ogila, W. A. M. 2021. Effectiveness of fresh cement kiln dust as a soil stabilizer and stabilization mechanism of high swelling clays. *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 283. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09589-4>
30. Niri, S. R., Akhtarpour, A., Daliri, F., & Baradaran, M. S. 2024. Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja). <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0069>
31. Jarjusey, A., Hayano, K., Kassa, A. A., Raihan, S., & Mochizuki, Y. 2024. Insights into potential of banana leaf powder as a mud soil stabilizer. *Results in Engineering*, 24, 103166. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103166>
32. Yang, J., Niu, X., Guo, Q., Wen, Z., & Cao, H. 2023. Strength and deformation characteristics of compacted loess with different moisture content and compaction energy. *Results in Engineering*, 20, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101637>
33. Razouki, S. S., & Kuttah, D. 2024. Improving Strength by Increased Compaction of Gypsum—Enriched Soil under Long-Term Soaking Conditions. *Geotechnics*, 4(2), pp.415-429. <https://doi.org/10.3390/geotechnics4020023>
34. Wu, J., Liu, L., Deng, Y., Zhang, G., Zhou, A., & Xiao, H. 2022. 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>
35. Wan, Q., Wang, Z., Huang, T., & Wang, R. 2021. Water retention mechanism of cellulose ethers in calcium sulfoaluminate cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 301, 124118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124118>
36. Shah, M. M., Shahzad, H. M., Khalid, U., Farooq, K., & Ur Rehman, Z. 2023. Experimental study on sustainable utilization of CKD for improvement of collapsible soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), pp.5667-5682. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07565-z>
37. Abdalhusein, M. M., Abdullah, F. A., Al-Badran, Y. M., Almahmodi, R. H., & Mahmood, M. S. 2024. 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(1).
38. Mansoori, M., & Akhtarpour, A. 2024. the effect of matric suction changes on the behavior of Anchored excavations in expansive soil. *Modares Civil Engineering journal*, 24(2), pp.139-156. <http://dx.doi.org/A-10-11849-4>
39. Akhtarpour, A., Soleimanian, N., Ekramifard, A., & Riyahikhoo, A. 2022. Matrix suction effect on the soil stability in unsaturated soil. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(2), pp.1-17.
40. Akhtarpour, A., & Mansoori, M. 2024. Numerical study of building damage with surface foundation located on expansive soil caused by matric suction changes. *Modares Civil Engineering journal*, 24(5), pp.85-100. <http://dx.doi.org/10.22034/24.5.85>
41. Almahmodi, R., Abdalhusein, M. M., Akhtarpour, A., & Mahmood, M. S. 2022. 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.1-13. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10146-x>
42. Al-Kawam, F. Q., & Mahmood, R. A. 2022. The Effect of Geotechnical Factors in Road of Basrah, Southern Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, pp.157-169.
43. Al-Jubair, H. S., & Al-Battat, J. M. 2021. Studying the effects of pile load on negative skin friction in basrah governorate. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 18, pp.2-33.
44. Álvarez-Ayuso, E., Giménez, A., & Ballesteros, J. C. 2025. Soil ph and mineralogy govern fluoride leaching from flue gas desulfurization gypsum in acidic soils. *Soil & Environmental Health*, 100178.
45. Shallal, H. H., & Aljanabi, Q. A. 2024, January. Predict settlement of gypseous soil under load by deep neural network. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2864, No. 1, p. 030005). AIP Publishing LLC.
46. Wang, J., & Vanapalli, S. 2024. 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(11), 2854-2879.
47. Sarli, J.M., Hadadi, F. and Bagheri, R.A., 2020. Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO<sub>2</sub>. *Geotechnical and Geological*

- Engineering*, 38(2), pp.1151-1163.  
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01078-7>
48. Himed, K.A., Bolouri, J. and Abdalhusein, M.M., 2024, April. Unsaturated Conditions of Gypsum Sand Soils and Its Improvement with CKD Material. In *International Conference on Geotechnical Engineering Iraq* (pp. 3-16). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9364-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9364-8_1)
  49. Alsamia, S., Albedran, H. and Mahmood, M.S., 2023. Contamination depth prediction in sandy soils using fuzzy rule-based expert system. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 14(1), pp.87-99. <https://doi.org/10.1556/1848.2022.00445>
  50. SHIRMOHAMMADI, H. and HADADI, F., 2017. Application of fuzzy logic for evaluation of resilient modulus performance of stone mastic asphalt. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 95(13).
  51. Elbaz, A. A., Aboulfotouh, A. M., Dohdoh, A. M., & Wahba, A. M. 2019. Review of beneficial uses of cement kiln dust (CKD), fly ash (FA) and their mixture. *J. Mater. Environ. Sci*, 10(11), pp.1062-1073.
  52. Al-Bakri, A. Y., Ahmed, H. M., & Hefni, M. A. 2022. Cement kiln dust (CKD): potential beneficial applications and eco-sustainable solutions. *Sustainability*, 14(12), pp.7022. <https://doi.org/10.3390/su14127022>
  53. Chen, K., He, X., Liang, F., & Sheng, D. 2024. Influences of ink-bottle effect evolution on water retention hysteresis of unsaturated soils: An experimental investigation. *Engineering Geology*, 330, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107409>
  54. Chen, K., Zhou, A., & Liang, F. 2024. Modelling the evolution of water retention hysteresis loops during soil deformation based on the ink-bottle effect. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 48(5), pp.1309-1322. <https://doi.org/10.1002/nag.3683>
  55. Schaap, M. G., & Leij, F. J. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), pp.843-851. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643843x>
  56. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Genuchten, M. T. V. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9(4), pp.795-820. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>