Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

Civil and Project Journal
http://www.cpjournals.com/

Research Article

Laboratory Investigation of the Effects of Catalytic Waste on the Engineering Properties of Gypseous Soils

Farhad Yavari[1], Ebrahim Nohani [2]*, Hamidreza Holakoei[3]

1- M.Sc. in Civil Engineering – Geotechnical Engineerin, Jahad University Khuzestan, Ahvaz, Iran.
2- Department of Civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.
3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, ACECR Khouzestan Institute of Higher Education, Ahvaz, Iran.

Received: 07 August 2025; Revised: 05 September 2025; Accepted: 13 September 2025; Published: 22 November 2025

Abstract

The objective of the present study is to investigate the effect of catalyst waste on the engineering parameters of gypseous soil. To achieve this goal, standard geotechnical laboratory tests—namely unconfined compression, direct shear, and consolidation tests—were conducted and interpreted. After analyzing the results obtained from testing gypseous soil (containing 20% gypsum powder) treated with catalyst waste, it was observed that the use of catalyst waste is not particularly suitable in cases where improvement of shear behavior is desired. In fact, it may lead to a reduction of more than 60% in shear strength parameters and negatively affect failure characteristics. However, in scenarios where the confined behavior of soil (such as settlement issues) is of primary concern, the use of catalyst waste proved to be effective, resulting in a reduction of over 50% in the soil's volumetric compressibility coefficient. Therefore, it can be concluded that catalyst waste—at least in this specific context—cannot be regarded as a comprehensive solution for the improvement of gypseous soils, although its localized beneficial effects are undeniable.

Keywords: Gypseous soil, Catalyst waste, Soil, Strength parameters
Cite this article as: yavari F., nohani E., Holakoei H. (2025). 'Laboratory Investigation of the Effects of Catalytic Waste on the Engineering Properties of Gypseous Soils', Civil and Project, 7(9), e229206. doi: https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: *ebrahim.nohani@iau.ac.ir*

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

بررسی تاثیر استفاده از پسماندهای کاتالیستی بر خواص مهندسی خاک های گچی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی

فرهاد یاوری[۱]، ابراهیم نوحانی[۲*]، حمیدرضا هلاکویی[۳]

۱- کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک، جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

۲*- استادیار گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی ، دزفول، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۶ مرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۲ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ آذر ۱۴۰۴

چکیده

هدف از پژوهش پیش روی، بررسی اثر استفاده از پسماند کاتالیست بر پارامترهای مهندسی خاک گچی می‌باشد. و برای رسیدن به این مهم از انجام و تفسیر نتایج آزمایشات اصلی خاک مثل تک محوری، برش مستقیم و تحکیم کمک گرفته شد. پس از بررسی نتایج آزمایشات بر روی خاک گچی(٪۲۰ پودر گچ) به همراه کاتالیست، در خصوص رفتار برشی خاک این موضوع را مشخص شد که استفاده از کاتالیست برای مواردی که با ضعف در رفتار برشی مواجه هستیم چندان مناسب نخواهد بود و می‌تواند تا بیش از ۶۰٪ به تضعیف پارامترهای برشی خاک بیانجامد و به طور موازی پارامترهای گسیختگی را نیز با تعدیل منفی مواجه کند، هر چند در مواردی که رفتار مقید خاک(مثل مسئله نشست) مورد توجه است استفاده از کاتالیست به طور موثری کمک کننده خواهد بود و به طور عمومی به کاهش حدودا از ۵۰٪ در ضریب فشردگی حجمی خاک منتج شود. بنابراین به صورت کلی پسماند کاتالیست(حداقل در مورد این نوع) را نمی‌تواند مصالح کاملی برای بهسازی خاک گچی ارزیابی کرد هرچند به صورت موردی برای مسئله نشست اثرات مثبت آن غیر قابل انکار است.

کلمات کلیدی: خاک گچی،پسماند کاتالیست، خاک، پارامتر مقاومت.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: *ebrahim.nohani@iau.ac.ir*

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

۱- مقدمه

سنگ گچ یکی از نمک‌های محلول است که می‌تواند تاثیر زیادی بر سازه‌های آبی و ساختمان‌ها داشته باشد. اگر خاک‌های گچی با آب در تماس باشند حل می‌شوند و ممکن است مشکلات زیادی برای سازه ایجاد کنند. بر اساس این موضوع و همچنین با توجه به گسترش فعالیت‌های عمرانی، مشکلات به وجود آمده با بهره گیری از خاک‌های گچی از مسائل مهم در ساخت سازه‌های آبی تلقی می‌شود و تثبیت این خاک‌ها در پروژه‌های بسیاری به ویژه در پروژه‌های آبی مقرون به صرفه است. با نظر داشتن راهکارهایی برای سازه‌های ساختمانی در خاک‌های مشکل دار از بروز خسارات احتمالی و همچنین بازسازی یا تثبیت نمودن سازه‌های موجود ساخته شده بر گستره این نوع خاک‌ها جلوگیری می‌کند(منصوری کیا و علیزاده، ۱۳۸۶). وجود مواد قابل حل مانند نمک خوراکی و گچ باعث می‌شود که به دلیل تماس این نوع خاک‌ها با آب، مواد ذکر شده در آب حل گشته و بخشی از ذرات جامد توده خاک حل شود. در صورت تداوم این پدیده می‌تواند تخلخل و سست شدن خاک را افزایش داده و در نهایت با ایجاد نشست، باعث تخریب ساختار خاک و ریزش خاک شود(تاتلاری، ۱۳۷۵). لازم به ذکر است که اصلاح خاک با بهره گیری از مواد افزوده شده باید با درصد مشخصی از مواد اصلاحی انجام شود. استفاده از درصدهای بالاتر از مواد افزودنی ممکن است مقاومت خاک را کاهش دهد(رحیمی، ۱۳۹۰).

بررسی خاک‌های که حاوی گچ می باشد از دهه هشتاد میلادی تاکنون مورد توجه بسیاری از دانشمندان و محافل علمی قرار گرفته است. از طرفی مطالعات این خاک‌ها به دلیل آگاهی نسبی از گستردگی این نوع خاک‌ها در ممالکی با مناطق نیمه خشک و خشک جهان افزایش بالایی داشته و از سمت دیگر به خاطر تفاوت معناداری که در ماهیت خاک‌های گچی در مقابل با خاک‌های با کانی‌های سیلیکاته وجود دارد، مطالعه رفتار این نوع از خاک‌ها اهمیت فراوانی پیدا کرده است(محمودی و حیدری[1]). برای نخستین بار در سال ۱۹۲۷ در کشور اسپانیا، خراب نمودن کانال‌هایی که تازه تاسیس شده اند و همچنین مسائل سازه‌های ساخته شده در زمین هایی از نوع گچی در نظر گرفته شد. مشاهدات نشان می دهد که در بیشتر ناحیه ها سازه فوقانی در معرض فرونشست بوده و در بعضی مناطق که آسیب دیده اند یا پوشش کانال تغییر شکل داده است. بعد از این حادثه، تلفات زیاد آب از مخازن سدهای اوکلاهما و نیومکزیکو،خراب شدن سد سنت فرانسیس، ایجاد تونل به دلیل آب شستگی پشت سدهای هوندو، ماکسیمیلیان و ردرک، تخریب کانال سلحبیه. در حوضه فرات و غیره باعث شد که پس از سال ۱۹۲۷ تا حدود ۴۰ سال در مواجهه با هر پروژه‌ای که در نواحی گچی قرار داشت، مکان آن را تغییر داده و یا از اجرای پروژه خودداری کنند(رحیمی، ۲۰۰۰ [2]).

مرور مطالعات گذشته در زمینه بهسازی خاک‌های گچی نشان دهنده این است که در اغلب پژوهش‌ها بر روی خصوصیات رفتاری خاک‌های گچی مطالعه شده و راهکاری جهت بهبود رفتار این نوع خاک‌ها ارائه نشده است. در معدود تحقیقاتی نیز که راهکارهایی ارائه شده است، از مواد ضایعاتی و پسماندی که استفاده از آنها به محیط زیست نیز کمک خواهد کرد، استفاده نشده است و مواد مورد استفاده در این تحقیق‌ها از نظر اقتصادی ممکن است به صرفه نباشند. از همین رو در این تحقیق تصمیم گرفته شد که با استفاده از ضایعات پسماند کاتالیستی که در صنایع پتروشیمی تولید می‌شوند جهت بررسی امکان بهبود خواص خاک‌های گچی استفاده شود.

1 mahmoudi & heidari, 1999
2 Rahimi, 2000

پس از بررسی تحقیقات داخلی و خارجی انجام شده بر روی خاک‌های گچی و تاثیر افزودنی‌های مختلف بر بهبود خواص این نوع خاک، مشاهده شد که چه در خارج و چه در داخل کشور، تحقیقات بسیار کمی در این زمینه انجام شده است و این موضوع با توجه به اهمیت فراوانی که دارد، پژوهش‌های بسیار بیشتری را می‌طلبد. بررسی و مقایسه اثر استفاده از پسماندهای کاتالیستی بر خواص مقاومتی خاک‌های گچی تا به حال توسط هیچ محققی صورت نگرفته است که در این تحقیق به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد.

خاک‌های گچی یکی از چالش‌برانگیزترین خاک‌های گروه خاک‌های مشکل‌ساز هستند که انجام دادن پروژه هایی بر روی این نوع خاک‌ها بدون در نظر داشتن و پیش‌بینی نمودن تغییر شکل‌ها می‌تواند باعث فاجعه شود. از همین رو بررسی خواص مقاومتی این نوع خاک‌ها و همچنین ارائه روشی جهت بهبود خواص آنها امری ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این استفاده از پسماندهای صنعتی جهت بهبود خواص خاک‌ها، از نظر زیست محیطی نیز بسیار حائز اهمیت بوده و باعث عدم دپو شدن این مواد در طبیعت خواهد شد.

در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از پسماندهای کاتالیستی جهت بهبود خواص مقاومتی خاک‌های گچی با استفاده از آزمایش‌های مقاومت برشی تک محوری ، برش مستقیم و تحکیم پرداخته خواهد شد تا اثر استفاده از این مواد پسماند کاتالیستی بر روی خصوصیات مکانیکی(مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک) و پتانسیل نشست خاک گچی بررسی شود.

۲- مرور ادبیات

در بررسی انجام شده توسط عباسی، رضوی‌نژاد و احمدی(۲۰۰۳) ویژگی‌های خاک‌های گچی در منطقه شمال‌غرب استان اصفهان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این منطقه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، شرایط مناسبی برای تشکیل و توسعه خاک‌های حاوی گچ را دارد. در این مطالعه میدانی، پانزده پروفیل خاک در دشت‌های آبرفتی شناسایی و نمونه‌برداری شدند و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی آن‌ها به‌صورت جامع بررسی گردید. پژوهشگران در این مطالعه تلاش کردند تا با استفاده از دو نظام بین‌المللی طبقه‌بندی خاک یعنی WRB[3] و USDA[4]، دسته‌بندی دقیق‌تری از خاک‌های منطقه ارائه دهند. بر اساس طبقه‌بندی WRB، خاک‌هایی که دارای افق گچی با بیش از ۱۵ درصد گچ بودند، در گروه Gypsisols قرار گرفتند. در برخی نمونه‌ها نیز افق سخت‌شده گچی (petrogypsic) شناسایی شد که نشان‌دهنده وجود فرآیندهای تثبیت و انباشت گچ در بستر خاک در گذر زمان است. از سوی دیگر، با توجه به سیستم USDA، همین خاک‌ها در رده Aridisols و زیرگروه Gypsids قرار گرفتند. این دسته‌بندی به‌ویژه برای خاک‌هایی با اقلیم خشک و افق مشخص گچی کاربرد دارد.آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های خاک، وجود مقادیر بالایی از گچ (تا ۳۵٪ وزنی) را در برخی افق‌ها نشان داد. همچنین pH خاک‌ها در محدوده قلیایی (بین ۸ تا ۸٫۵) قرار داشت و در بسیاری از پروفیل‌ها هدایت الکتریکی بالای ۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد که نمایانگر شوری نسبی خاک همراه با گچ است. این ویژگی‌ها نه‌تنها بر حاصل‌خیزی و پتانسیل کشاورزی خاک تأثیرگذارند، بلکه در رفتار مکانیکی خاک نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند؛ چرا که وجود لایه‌های گچی می‌تواند موجب ایجاد پتانسیل نشست، انحلال یا شکنندگی خاک در برابر بارگذاری شود. در مقایسه دو سیستم طبقه‌بندی، مشخص شد که WRB به توصیف دقیق‌تر افق‌های خاک و لایه‌بندی پروفیل‌ها گرایش دارد، در حالی که USDA تمرکز بیشتری بر فرآیندهای پدوژنز و ویژگی‌های ژنتیکی خاک‌ها دارد. این تطبیق‌پذیری، به‌ویژه در شرایط خاک‌های خاص ایران، باعث افزایش دقت در تفسیر رفتار خاک‌ها در مطالعات مهندسی و

3 World Reference Base for Soil Resources
4 United States Department of Agriculture

کشاورزی می‌شود. پژوهشگران تأکید داشتند که تلفیق این نظام‌های بین‌المللی با دانش بومی، راه را برای شناخت بهتر ویژگی‌های خاک‌های خاص مانند خاک‌های گچی هموار می‌سازد. (عباسی و همکاران، ۲۰۰۳).

در مطالعه کومار و همکاران (۲۰۱۵)[5]، رفتار فیزیکی و مقاومتی خاک آهکی با محتوای گچ متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، محتوای آهک و گچ از ۰ تا ۶ درصد برای دوره‌های پخت مختلف تا ۲۸ روز در نظر گرفته شد و به‌منظور بررسی اثرات طولانی‌مدت، مطالعه به ۳۶۵ روز نیز تمدید گردید، به‌ویژه برای مخلوط‌های با ۶٪ آهک و محتوای گچ متغیر. نتایج نشان داد که محدودیت‌های آتربرگ خاک تحت تأثیر تبادل کاتیونی قرار دارد. همچنین، رفتار مقاومت فشاری محصور نشده خاک آهکی با میزان گچ و دوره عمل‌آوری متفاوت است. تغییرات جزئی در استحکام خاک با آهک کمتر (تا ۴٪) و محتوای گچ تا ۶٪ مشاهده شد، اما در مخلوط‌هایی با ۶٪ آهک، افزودن گچ متغیر باعث شتاب در استحکام اولیه در دوره پخت ۱۴ روزه می‌شود. بعد از ۲۸ روز پخت، استحکام کاهش یافته اما پس از آن تا ۹۰ روز دوباره به مقدار اولیه باز می‌گردد. برای دوره‌های پخت طولانی‌تر مانند ۱۸۰ و ۳۶۵ روز، تغییرات در استحکام منحصر به فرد نبوده و بیشتر به محتوای گچ بستگی دارد. این تغییرات بر اساس شکل گچ و ترکیبات واکنش‌داده‌شده مانند (CASHH[6]، CASH[7]، CSH[8] و Etringite) توضیح داده شد. تجزیه و تحلیل حرارتی، مطالعات XRD[9]، SEM[10] و EDAX[11] بر روی مخلوط‌های خاک-آهک-گچ، پشتیبان توضیحات ارائه‌شده در این تحقیق بود.

اراکیلیان و همکاران[12] در مطالعات خود به بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک های گچی پرداخت. بررسی های وی نشان داد که این خاک ها وزن مخصوص کمتری نسبت به خاک های مشابه دارند و در حین شستشو نسبت تخلخل افزایش می یابد و در نتیجه رسوب گذاری رخ می دهد. در خصوص تعیین درصد رطوبت اینگونه خاکها نیز نشان داده شد که اعمال دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد که استاندارد کارهای مکانیکی خاک است باعث خطاهای فاحش در اینگونه خاکها می شود.

رازوکی و همکاران[13] در مطالعات خود تأثیر شستشوی طولانی مدت بر پارامترهای مقاومت برشی یک رس گچ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مدت زمان شستشوی گچ، پارامترهای مقاومت برشی به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

بررسی های جبری[14] نشان داد که با افزایش میزان گچ در نمونه ها، رطوبت بهینه کاهش و حداکثر وزن در واحد حجم خشک نمونه ها افزایش می یابد. با افزایش شوری و املاح خاک، به دلیل کاهش ضخامت دو لایه و افزایش نیروی جاذبه بین ذرات رس در اثر افزایش غلظت آب منفذی، رطوبت بهینه کاهش و حداکثر وزن کاهش می یابد و در واحد حجم خشک افزایش می یابد.

در بررسی رازوکی و همکاران[15] آزمایش تحمل بار را بر روی خاک رسی حاوی ۳۵ درصد گچ انجام داد و نمونه ها را برای دوره های زمانی مختلف شستشو داد. آنها به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری نمونه ها کاهش یافته است.

5 Kumar et al., 2015
6 Calcium Aluminate Silicate Hydrate with Hydration
7 Calcium Aluminate Silicate Hydrate
8 Calcium Silicate Hydrate
9 X-Ray Diffraction
10 Scanning Electron Microscopy
11 Energy Dispersive X-ray Analysis
12 Arkelyan et al., 2018
13 Razouki et al., 2019
14 Al-Gabri, 2019
15 Razouki et al., 2020

در مطالعه ای که توسط نجاح و همکاران[16] انجام شد تأثیر افزودن گچ به خاک‌های ماسه‌ای (SM[17]) و سیلتی (ML[18]) با درصد وزنی ۵ تا ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های حد اتربرگ، تراکم و مقاومت برشی نشان داد که با افزایش مقدار گچ در خاک، حد جریان و حد خمیر افزایش می‌یابد. در عین حال، شاخص خمیری کاهش یافت. همچنین، در نمونه‌های خاک ماسه‌ای، با افزایش مقدار گچ، حداکثر وزن واحد حجم خشک افزایش یافت. اما در خاک سیلتی، این روند ثابت باقی ماند و تغییرات چندانی مشاهده نشد. از طرفی، در مورد پارامترهای مقاومت برشی، هیچ تغییر قابل توجهی با افزایش مقدار گچ در هر دو نوع خاک مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهند که تأثیر گچ بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها به نوع خاک و میزان گچ افزوده شده بستگی دارد.

در بررسی ساموئل و همکاران[19] تأثیر استفاده از آهک و سرباره کوره ذوب آهن بر مقاومت و ویژگی‌های ریزساختاری خاک‌های گچی مورد بررسی قرار گرفت. خاک‌های گچی با محتوای گچ ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد، هم به صورت بهسازی شده و هم بهسازی نشده، تحت چرخه‌های مرطوب-خشک قرار گرفتند. آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری مقاومت فشاری نامحدود (UCS[20])، جذب آب، pH، تغییرات ریزساختاری و تورم بود.

نتایج نشان داد که در چرخه صفر، UCS خاک‌های گچی بهسازی نشده از ۰,۶۲ به ۰,۷۹ مگاپاسکال افزایش یافت و با افزایش مقدار گچ، تورم خاک از ۶۹ به ۲۳ درصد کاهش یافت. با این حال، پس از قرار گرفتن در چرخه‌های مرطوب-خشک، UCS به دلیل انحلال گچ در منافذ خاک از ۰,۱۶ به ۰,۰۸ مگاپاسکال کاهش یافت که موجب کاهش استحکام خاک شد. همچنین، محتوای گچ به دلیل pH خنثی آن، جذب آب خاک را افزایش داد و pH خاک‌های گچی بهسازی نشده را کاهش داد. از سوی دیگر، خاک‌های گچی بهسازی شده با آهک و سرباره به دلیل pH بالای آهک و افزایش محتوای کلسیم، pH بالاتری را در پایان شش دوره تر و خشک نسبت به خاک‌های گچی بهسازی نشده حفظ کردند. تحلیل ریزساختاری با استفاده از SEM نشان داد که ترکیبات سیمانی (CSH) در سنین پایین برای افزایش استحکام خاک‌های گچی بهسازی شده با آهک و سرباره تشکیل می‌شود، که این امر موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک در مقایسه با خاک‌های گچی بهسازی نشده می‌شود.

مقبلی و همکاران[21] بررسی رابطه بین خاک و منظر در ناحیه خشک فاریاب واقع در استان کرمان. نتایج میکرومورفولوژیکی آنها حاکی از وجود عوارض خاکی گچ و آهک (به صورت پوشش و پرکننده)، بلورهای عدسی شکل و صفحات به هم پیوسته پوشش گچ و رسی است. بر اساس نتایج کانی شناسی، آنها فراوانی ایلیت، پالیگورسکیت، کلریت، اسمکتیت، کائولینیت، ورمیکولیت و کوارتز را گزارش کردند. بیشترین میزان پلیگورسکیت در افق های تجمع گچ در واحدهای مخروط تپه ای و آبرفتی مشاهده شد و با حرکت به سمت واحدهای مرکزی دشت از میزان این کانی بسیار کاسته و بر میزان اسمکتیت افزوده می شود.

سهیلا شجاع مقدم و همکاران[22] که بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف و ترکیب آن‌ها بر خصوصیات تحکیم خاک‌های رسی بود. در این مقاله مطالعه‌ای جامع درباره تأثیر افزودن تثبیت‌کننده‌های مختلف مانند خاکستر بادی(FA[23]) ، خاکستر آتشفشانی (VA[24]) ، پودر مرمر(MP[25]) ، سیمان و آهک با درصدهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) و ترکیبات آن‌ها بر رفتار کنسولیداسیون خاک رسی انجام شد. برخلاف مواد صنعتی مانند سیمان و آهک، FA، VAو MP فعالیت و واکنش‌پذیری کافی ندارند. در حالی کهFA و VA عمدتاً سرشار از سیلیس هستند، MP غنی از اکسید کلسیم است. بنابراین، این مواد پایدار نیازمند فرآیندهای تکمیلی مانند ژئوپلیمرسازی یا ترکیب با سیمان و آهک برای ایجاد پیوندهای قوی هستند. سیمان و آهک موثرترین

16 Najah et al., 2020
17 Sandy Mud
18 Silt with low plasticity
19 Samuel et al., 2021
20 Unconfined Compressive Strength
21 Moghbeli et al., 2023
22 Soheila Shoja Moghadam et al.
23 Fly Ash
24 Volcanic Ash
25 Marble Powder

تثبیت‌کننده‌ها بودند، اما نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن‌ها ما را به جستجوی جایگزین‌ها سوق داده است. آزمون‌های استاندارد کمپاکت پروکتور برای مطالعه رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر نمونه‌های مختلف انجام شد، آزمون‌های SEM و EDS برای تحلیل میکروساختار خاک و افزودنی‌ها به کار رفت و آزمایش‌های کنسولیداسیون یک‌بعدی روی نمونه‌های تثبیت‌شده با زمان‌های عمل‌آوری ۷ تا ۹۰ روز برای تعیین ضرایب کنسولیداسیون انجام شد.

آرش رجایی و همکاران[۲۶] در بررسی استفاده نوآورانه از تراشه چوب به عنوان یک ماده جایگزین پایدار در بتن می‌پردازد که هم به چالش‌های زیست‌محیطی و هم ساختاری پاسخ می‌دهد. مطالعه اثرات وارد کردن تراشه چوب در نسبت‌های مختلف (۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪) به مخلوط‌های بتن را بررسی می‌کند، با هدف کاهش انتشار کربن و ترویج ساخت و ساز سبک وزن. با توجه به تأثیر منفی پودر شیشه بازیافتی(WGP[۲۷]) بر مقاومت بتن، این تحقیق دود سیلیس(SF[۲۸]) ، متاکائولین(MK[۲۹]) و پودر مرمر(MP [۳۰]) را به عنوان افزودنی‌های بالقوه برای افزایش مقاومت فشاری و کاهش وزن مخصوص بتن تراشه چوب معرفی می‌کند. افزودن تراشه چوب به طور مداوم چگالی بتن را کاهش داد، به طوری که از ۲۳۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب در نمونه کنترل به ۲۰۹۱ کیلوگرم بر متر مکعب در ۳۵٪ تراشه چوب رسید SF .باعث کاهش بیشتر چگالی شد، در حالی که MK و MP باعث افزایش چگالی شدند. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که استفاده از ۱۰٪ SF یا ۵٪ MK برای بهبود خواص بتن با تراشه چوب بهینه است و تعادلی بین افزایش مقاومت و کاهش وزن ارائه می‌دهد.

۳- روش انجام تحقیق

خواص فیزیکی خاک‌های گچی

خاک‌های گچی از لحاظ فیزیکی دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی هستند. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های این خاک‌ها، تخلخل نسبتاً بالا و چگالی پایین است. مقدار چگالی خشک[۳۱]معمولاً در محدوده‌ی ۱٫۳ تا ۱٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. این مقدار در مقایسه با خاک‌های دانه‌ای معمولی (مثل ماسه یا سیلت) پایین‌تر است، که علت آن وجود حفرات زیاد در ساختار داخلی و نیز چگالی کمتر گچ نسبت به سایر کانی‌های خاک است.

گچ در خاک می‌تواند به‌صورت پراکنده در بین ذرات، به‌شکل پوشش روی ذرات یا به‌صورت بلورهای جداگانه ظاهر شود. بلورهای گچ در برخی خاک‌ها ممکن است اندازه‌های درشتی پیدا کنند که در صورت حل شدن در آب، باعث ایجاد حفرات خالی و افزایش فضای خلل‌وفرج در خاک می‌شوند. این حفرات ممکن است در آینده باعث نشست موضعی یا کلی خاک گردند.

قابلیت جذب آب یکی دیگر از خصوصیات مهم این خاک‌هاست. خاک‌های گچی اگرچه آب را جذب می‌کنند، اما توانایی نگهداری آن به دلیل وجود گچ و پایین بودن درصد رس در بسیاری از موارد محدود است. این موضوع می‌تواند در پایداری حجم خاک در برابر تغییرات رطوبتی نقش مهمی ایفا کند.

26 Arash Rajaee et al.
27 Waste Glass Powder
28 Silica Fume
29 Metakaolin
30 Marble Powder
31 Bulk Density

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

خواص فیزیکی خاک‌های گچی

خاک‌های گچی از لحاظ فیزیکی دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی هستند. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های این خاک‌ها، تخلخل نسبتاً بالا و چگالی پایین است. مقدار چگالی خشک معمولاً در محدوده‌ی ۱٫۳ تا ۱٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. این مقدار در مقایسه با خاک‌های دانه‌ای معمولی (مثل ماسه یا سیلت) پایین‌تر است، که علت آن وجود حفرات زیاد در ساختار داخلی و نیز چگالی کمتر گچ نسبت به سایر کانی‌های خاک است.

گچ در خاک می‌تواند به‌صورت پراکنده در بین ذرات، به‌شکل پوشش روی ذرات یا به‌صورت بلورهای جداگانه ظاهر شود. بلورهای گچ در برخی خاک‌ها ممکن است اندازه‌های درشتی پیدا کنند که در صورت حل شدن در آب، باعث ایجاد حفرات خالی و افزایش فضای خلل‌وفرج در خاک می‌شوند. این حفرات ممکن است در آینده باعث نشست موضعی یا کلی خاک گردند.

قابلیت جذب آب یکی دیگر از خصوصیات مهم این خاک‌هاست. خاک‌های گچی اگرچه آب را جذب می‌کنند، اما توانایی نگهداری آن به دلیل وجود گچ و پایین بودن درصد رس در بسیاری از موارد محدود است. این موضوع می‌تواند در پایداری حجم خاک در برابر تغییرات رطوبتی نقش مهمی ایفا کند.

خواص مکانیکی خاک‌های گچی

خاک‌های گچی از نظر مکانیکی رفتار نسبتاً ضعیفی دارند، مخصوصاً در شرایطی که تحت تأثیر تغییرات رطوبتی قرار می‌گیرند. خواص مکانیکی آن‌ها به‌شدت به مقدار گچ، ساختار خاک، درصد رطوبت و نوع بارگذاری بستگی دارد. در ادامه به برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی این خاک‌ها پرداخته می‌شود:

۱. مقاومت برشی

مقاومت برشی خاک‌های گچی معمولاً در حالت خشک مناسب است، اما به‌محض افزایش رطوبت، به‌شدت کاهش می‌یابد.

۲. فروریزش[۳۲]

پدیده فروریزش یکی از مشکلات اصلی خاک‌های گچی است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که خاکی با ساختار متخلخل و ضعیف، در معرض آب قرار گیرد و به‌طور ناگهانی دچار ریزش ساختار داخلی شود.

۳. ظرفیت باربری

ظرفیت باربری خاک‌های گچی تابعی از درصد گچ، چگالی، ساختار خاک و رطوبت آن است. در بسیاری از موارد، ظرفیت باربری نهایی این خاک‌ها پایین‌تر از خاک‌های غیرگچی است. علاوه بر آن، پدیده فروریزش در صورت اشباع‌شدن خاک می‌تواند این ظرفیت را به‌شدت کاهش دهد.

۴. تورم و انقباض

اگرچه خاک‌های گچی به‌طور طبیعی خاصیت تورم‌پذیری زیادی ندارند، اما در شرایطی که همراه با درصدی از رس باشند، ممکن است در رطوبت‌های بالا دچار تورم شوند. همچنین گچ خود در صورت تماس با رطوبت، می‌تواند کمی انبساط پیدا کند.

32 Collapse

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

۵. چگالی ذرات جامد[۳۳]

وزن مخصوص ذرات جامد در خاک‌های گچی بسته به مقدار گچ می‌تواند از مقدار معمولی (حدود ۲٫۶۵ g/cm^3) پایین‌تر باشد.

خواص شیمیایی خاک‌های گچی

خاک‌های گچی از نظر شیمیایی رفتار خاصی دارند که در کنار خواص مکانیکی، نقش کلیدی در رفتار ژئوتکنیکی آن‌ها ایفا می‌کند. گچ ماده‌ای محلول در آب است و همین ویژگی می‌تواند منشأ بسیاری از مشکلات باشد. در شرایطی که آب به خاک نفوذ کند، گچ به‌تدریج در آب حل می‌شود و از محل خارج می‌گردد. این فرآیند باعث می‌شود که ساختار خاک ضعیف‌تر شده و تخلخل افزایش یابد. همچنین با ادامه این روند، ممکن است مسیرهایی برای نفوذپذیری بیشتر ایجاد شود که باعث افزایش نرخ زهکشی و در نتیجه نشست سریع‌تر شود[۳۴].

از سوی دیگر، گچ می‌تواند روی pH خاک نیز تأثیر بگذارد. این ماده معمولاً باعث کاهش قلیاییت بیش از حد در برخی خاک‌ها شده و تا حدی محیط را متعادل می‌سازد. با این حال، در ترکیب با برخی مواد تثبیت‌کننده مانند سیمان، ممکن است واکنش‌های ناخواسته‌ای اتفاق بیفتد و دوام بلندمدت خاک تثبیت‌شده تحت‌تأثیر قرار گیرد.

مصالح مصرفی

خاک پایه

هدف از انجام آزمایشات آزمایشگاهی استخراج پارامترهای نرمال بوده، صرف نظر از اینکه خاک گچی نقطه تا نقطه ممکن است از هر لحاظ متفاوت باشد، تاریخچه رطوبت آن نیز ممکن است متفاوت باشد، لذا برای کنترل تمامی عوامل قابل کنترل، خاک پایه در آزمایشگاه از ترکیب یه خاک رس متداول در شهر اهواز با ۲۰٪ پودرگچ (ژیپس) تولید شد به کمک این روش مزایای زیر برقرار می‌گردد :

- کنترل ثبات در مقدار گچ
- کنترل تاریخچه رطوبت
- قابلیت نرمالسازی

بنابراین در ادامه هرآنچه که به گذاره خاک پایه اشاره داشته باشد منظور ترکیب خاک رسی به علاوه ۲۰٪(جرم خشک خاک رسی) از پودر گچ بوده که در شرایط خشک کوبیده و مخلوط گردیده است خواهد بود.

کاتالیست مصرفی

برای استفاده از کاتالیست در ترکیبات از دو نوع کاتالیست با نسبت وزنی یکسان استفاده شد.

33 Particle Density
34 Mitchell, J.K. and Soga

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

۱. دانه‌های گرد و زرد-کرم: این‌ها کاتالیست FCC[۳۵] هستند. این نوع کاتالیست معمولاً از جنس زئولیت به همراه بایندرهای آلومینا و سیلیکا ساخته می‌شود. شکل کروی، رنگ کرم و سایز حدود ۰٫۵ تا ۱ میلی‌متر دارد.

۲. تکه‌های سیاه‌رنگ و زاویه‌دار: این‌ها نوعی کاتالیست ریفرمینگ یا هیدروژناسیون هستند که پایه آن معمولاً آلومینا یا سیلیکا است و با فلزاتی مثل نیکل (Ni)، کبالت (Co)، یا مولیبدن (Mo) بارگذاری شده. رنگ سیاه نشان‌دهنده وجود کربن سوخته روی سطح یا حضور فلزات احیاشده است. این نوع بیشتر در فرآیندهایی مثل شکست هیدرولیکی[۳۶] ، گوگردزدایی[۳۷] یا هیدروژناسیون[۳۸] استفاده می‌شود.

برای استفاده از کاتالیست در ترکیبات از دو نوع کاتالیست با نسبت وزنی یکسان استفاده شد.

۱. دانه‌های گرد و زرد-کرم: این‌ها کاتالیست FCC (Fluid Catalytic Cracking) هستند. این نوع کاتالیست معمولاً از جنس زئولیت به همراه بایندرهای آلومینا و سیلیکا ساخته می‌شود.

۲. تکه‌های سیاه‌رنگ و زاویه‌دار: این‌ها نوعی کاتالیست ریفرمینگ یا هیدروژناسیون هستند که پایه آن معمولاً آلومینا یا سیلیکا است و با فلزاتی مثل نیکل (Ni)، کبالت (Co)، یا مولیبدن (Mo) بارگذاری شده.

جدول مشخصات کاتالیست مصرفی

مشخصه	کاتالیست نوع ۱(FCC)	کاتالیست نوع ۲ (Hydrotreating/Hydrocracking)
شکل ظاهری	دانه‌های کروی، زرد-کرم	تکه‌های زاویه‌دار، رنگ سیاه
اندازه دانه‌ها	۰٫۵ تا ۱٫۰ میلی‌متر	۱ تا ۵ میلی‌متر
ترکیب اصلی	زئولیت Y یا ZSM-5 + سیلیکا + آلومینا	آلومینا + (γ-Al_2O_3) فلزات نیکل(Ni) ، کبالت(Co) ، مولیبدن(Mo)
چگالی ظاهری	حدود ۰٫۸ تا ۱٫۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب	حدود ۱٫۲ تا ۱٫۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب
کاربرد صنعتی	کراکینگ نفت سنگین به سوخت سبک	حذف گوگرد، ریفرمینگ، هیدروژناسیون

آزمایش‌های ابتدایی شامل دانه‌بندی و حدود خمیری بر روی خاک پایه انجام پذیرفت و برای آزمایش‌های مقاومتی از قرار زیر عمل شد. تک محوری برش مستقیم : برای این آزمایش ابتدا اثر گچ بررسی گردید، به این صورت که در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نسبت به خاک خشک از پودر گچ استفاده گردید، در تمامی مراحل اختلاط به صورت خشک و در درصد رطوبت ۱۵ نمونه‌سازی انجام شد. همچنین به جهت شبیه‌سازی شرایط واقعی آزمونه به مدت ۷ روز عمل‌آوری شد و شرایط عمل آوری نیز به این صورت بود که به تناوب به سطح آزمونه، آب اسپری می‌گردید. اثرات افزودن کاتالیست نیز با افزودن درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نسبت به خاک خشک پایه بررسی گردید.

35 Fluid Catalytic Cracking
36 Hydrocracking
37 Desulfurization
38 Hydrogenation

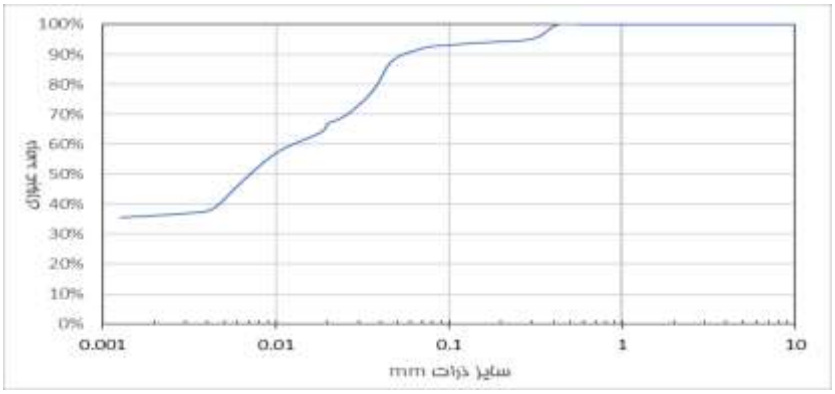
Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

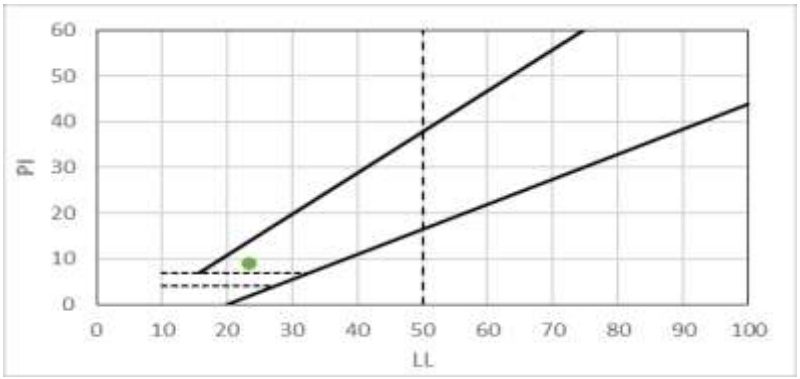
تحکیم : برای شرایط تحکیم شبیه سازی متفاوتی صورت پذیرفت، در حالت تحکیم فرض شد خاکی که تا کنون چندان تحت تاثیر رطوبت نبوده به یکباره تحت تاثیر قرار گرفته و شرایط آن در دو حالت رطوبت طبیعی(۱۵٪) مورد آزمایش قرار گرفت، پس بنابراین اثرات افزایش درصد گچ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در حالت رطوبت طبیعی آزمونه مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین اثرات افزایش درصد کاتالیست بر خاک پایه نیز در ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جرمی خاک پایه مورد بررسی قرار گرفت. برای کنترل تمامی عوامل قابل کنترل، خاک پایه در آزمایشگاه از ترکیب یه خاک رس متداول در شهر اهواز با ۲۰٪ پودرگچ (ژیپس) تولید شد.

دانه‌بندی و حدود اتربرگ خاک پایه

جدول۱-۳. خلاصه نتایج دانه‌بندی خاک پایه

طبقه‌بندی متحد	*PL*	*PI*	*LL*	*D60 (mm)*	*D50 (mm)*
CL	۱۴	۹	۲۳	۰،۰۱۳	۰،۰۰۸۵





نمودار۱-۳. دانه بندی خاک پایه

برای دانه‌بندی از الک و هیدرومتر در کنار نتایج حدود اتربرگ کمک گرفته شد. به صورت کلی خاک ریزدانه با دامنه خمیری محدود را می‌توان تفسیر مناسبی از خاک پایه دانست.

نحوه آماده سازی نمونه ها

تک محوری

یکی از اهداف اولیه این تحقیق بررسی تاثیر میزان گچ بر پارامترهای مقاومتی خاک بوده است، لذا برای سه تیپ خاک با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد اقدام به نمونه سازی شد.

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

جدول۲-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری (٪۱۰ گچ)

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۰۵۰	۱,۰۱	۱,۴۷	۱۴	مرطوب	۱	۹,۰	۴,۰

جدول۳-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری (٪۲۰ گچ)

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۱,۹۸	**۳,۹۶**	**۱,۴۲**	**۱۴**	**مرطوب**	**۱**	**۹,۰**	**٤,۰**

جدول۴-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری (٪۳۰ گچ)

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۱,۵٦	**۳,۱۲**	**۱,٤٤**	**۱۳**	**مرطوب**	**۱**	**۹,۰**	**٤,۰**

برش مستقیم

جدول۵-۳. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک با صرفا ۱۰٪ گچ

جعبه برش	C' (kg/cm2)	Φ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	**۰,۸۱**	**۹,۶**	**۱۷**	**۱,۴۵**

جدول۶-۳. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک با صرفا ۲۰٪ گچ

جعبه برش	C' (kg/cm2)	Φ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	**۲,۳۷**	**۲۹,۶**	**۱۴**	**۱,۴۶**

جدول۷-۳. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک با صرفا ۳۰٪ گچ

جعبه برش	C' (kg/cm2)	Φ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	**۰,۶۶**	**۱۱**	**۱۴**	**۱,۴۹**

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

تحکیم خاک گچی

جدول۸-۳الف) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۱۰٪ گچ

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۴۸	۰,۷۵۹

جدول۸-۳ب) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۱۰٪ گچ

Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۲۵	۰,۶۶۰	۰,۷۵۹	۰,۲۵	۰
۰,۱۰۲۷	۰,۶۱۸	۰,۶۶۰	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۱۲۷۱	۰,۵۱۵	۰,۶۱۸	۱	۰,۵۰
۰,۰۷۶۲	۰,۴۰۰	۰,۵۱۵	۲	۱
۰,۰۰۱۸	۰,۴۰۲	۰,۴۰۰	۱	۲

جدول۹-۳الف) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۲۰٪ گچ

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۵۰	۰,۷۲۹

جدول۹-۳ب) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۲۰٪ گچ

Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۴۶	۰,۶۲۳	۰,۷۲۹	۰,۲۵	۰
۰,۱۰۷۳	۰,۵۸۰	۰,۶۲۳	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۱۲۱۷	۰,۴۸۴	۰,۵۸۰	۱	۰,۵۰
۰,۰۵۹۳	۰,۳۹۶	۰,۴۸۴	۲	۱
۰,۰۰۷۷	۰,۴۰۶	۰,۳۹۶	۱	۲

جدول۱۰-۳الف) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۳۰٪ گچ

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۴۳	۰,۸۲۲

جدول۱۰-۳ب) ریز نتایج آزمایش تحکیم خاک با صرفا ۳۰٪ گچ

Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۵۹	۰,۷۰۴	۰,۸۲۲	۰,۲۵	۰
۰,۱۵۸۵	۰,۶۳۷	۰,۷۰۴	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۱۰۳۷	۰,۵۵۲	۰,۶۳۷	۱	۰,۵۰
۰,۶۵۳	۰,۴۵۰	۰,۵۵۲	۲	۱
۰,۰۲۹۹	۰,۴۹۴	۰,۴۵۰	۱	۲

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

برای انجام این مرحله از آزمایشات و آزمونه‌سازی با افزایش درصد کاتالیست رفته رفته فرآیند قالب‌گیری و آزمونه‌سازی سخت‌تر شد. با اضافه شدن کاتالیست به خاک پایه رفتار ریزشی آن افزایش یافت به گونه‌ای که در ترکیب خاک پایه و ۲۰٪ کاتالیست چندین بار، چه در زمان آزمونه‌سازی چه در زمان جابجایی و... آزمونه تخریب شد.

تک محوری

جدول۱۱-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری خاک پایه و ۱۰٪ کاتالیست

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۰۸۲	۱,۶۵	۱,۴۳	۱۵	مرطوب	۱	۹,۰	۴,۰

جدول۱۲-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری خاک پایه و ۱۵٪ کاتالیست

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۰,۲۹	۰,۵۹	۱,۴۱	۱۲	مرطوب	۱	۹,۰	۴,۰

جدول۱۳-۳. ریز نتایج آزمایش تک محوری خاک پایه و ۲۰٪ کاتالیست

Su (kg/cm2)	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm2)	دانسیته خشک (kg/cm3)	درصد رطوبت	شرایط	نرخ بارگذاری(mm/min)	ارتفاع (cm)	قطر (cm)
۰,۲۵	۰,۵۱	۱,۴۳	۱۳	مرطوب	۱	۹,۰	۴,۰

برش مستقیم

جدول۱۴-۳. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک پایه و ۱۰٪ کاتالیست

جعبه برش	C' (kg/cm2)	ϕ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	۰,۵۸	۳۸,۱	۱۴	۱,۴۳

جدول۱۵-۳. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک پایه و ۱۵٪ کاتالیست

جعبه برش	C' (kg/cm2)	ϕ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	۰,۲۴	۴۲,۶	۱۱	۱,۴۸

جدول۱۶-۴. ریز نتایج آزمایش برش مستقیم خاک پایه و ۲۰٪ کاتالیست

جعبه برش	C' (kg/cm2)	ϕ'(°)	درصد رطوبت	دانسیته خشک (gr/cm3)
دایره به قطر ۵,۷ ارتفاع۲,۱	۰,۱۰	۴۱,۴	۱۴	۱,۴۹

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

تحکیم

جدول۱۷-۳الف) نتایج آزمایش تحکیم خاک پایه و ۱۰٪ کاتالیست

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۴۵	۰,۷۹۰

جدول۱۷-۳ب) نتایج آزمایش تحکیم خاک پایه و ۱۰٪ کاتالیست

Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۴۰	۰,۶۸۳	۰,۷۹۰	۰,۲۵	۰
۰,۰۳۶۴	۰,۶۶۷	۰,۶۸۳	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۰۵۶۱	۰,۶۲۱	۰,۶۶۷	۱	۰,۵۰
۰,۰۴۹۳	۰,۵۴۱	۰,۶۲۱	۲	۱
۰,۰۰۲۲	۰,۵۴۴	۰,۵۴۱	۱	۲

جدول۱۸-۳الف) نتایج آزمایش تحکیم خاک پایه و ۱۵٪ کاتالیست

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۴۶	۰,۷۷۵

جدول۱۸-۳ب) نتایج آزمایش تحکیم خاک پایه و ۱۵٪ کاتالیست

Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۲۱	۰,۶۷۷	۰,۷۷۵	۰,۲۵	۰
۰,۰۵۶۳	۰,۶۵۳	۰,۶۷۷	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۰۴۲۹	۰,۶۱۸	۰,۶۵۳	۱	۰,۵۰
۰,۰۳۰۸	۰,۵۶۸	۰,۶۴۸	۲	۱
۰,۰۰۱۶	۰,۵۷۰	۰,۵۶۸	۱	۲

جدول۱۹-۳الف) نتایج آزمایش تحکیم پایه و ۲۰٪ کاتالیست

قطر(cm)	ارتفاع(cm)	دانسیته خشک(gr/cm3)	نسبت منافذ
۵	۲	۱,۴۹	۰,۷۴۴

جدول۱۹-۳ب) نتایج آزمایش تحکیم خاک پایه و ۲۰٪ کاتالیست

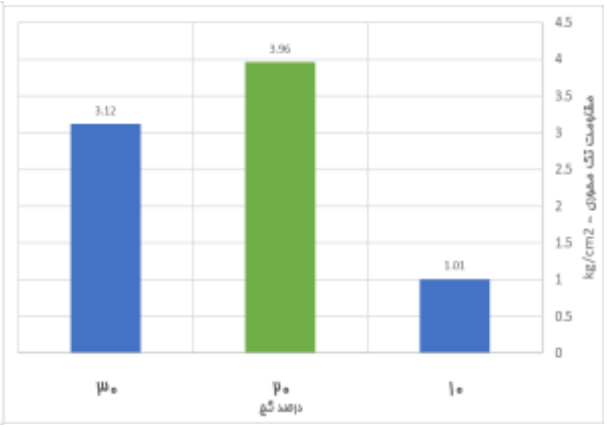
Mv (cm2/kg)	نسبت منفذ ثانویه	نسبت منافذ اولیه	تنش انتهای گام	تنش ابتدای گام
۰,۲۱۵	۰,۶۵۰	۰,۷۴۴	۰,۲۵	۰
۰,۰۴۲۲	۰,۶۳۳	۰,۶۵۰	۰,۵۰	۰,۲۵
۰,۰۱۹۳	۰,۶۱۷	۰,۶۳۳	۱	۰,۵۰
۰,۰۱۷۹	۰,۵۸۸	۰,۶۱۷	۲	۱
۰,۰۰۱۰	۰,۵۹۰	۰,۵۸۸	۱	۲

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

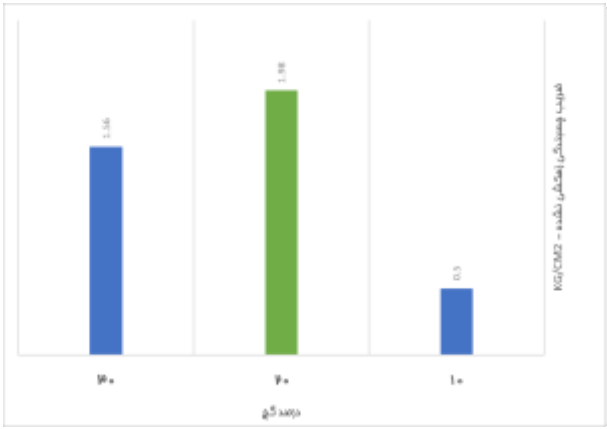
تجزیه و تحلیل داده ها

تک محوری

همانطور که در نتایج نیز مشخص است با افزایش درصد گچ شکست آزمونه به صورت ناگهانی اتفاق افتاده است به طور مشخص در آزمونه با ۱۰٪ گچ پس از رسیدن به قله با افزایش کرنش شاهد ثابت یا افت محدود تنش بوده‌ای اما در دو حالت ۲۰ و ۳۰ درصد گچ، شکست به صورت ناگهانی رخ داده و به سرعت پس از رسیدن به قله مقاومتی با کاهش تنش روبرو بوده‌ایم این امر به سبب افزایش تردشکنی آزمونه با افزایش میزا گچ محتوی است.



نمودار۲-۳. مقایسه اثر صرفا گچ بر مقاومت تک محوری

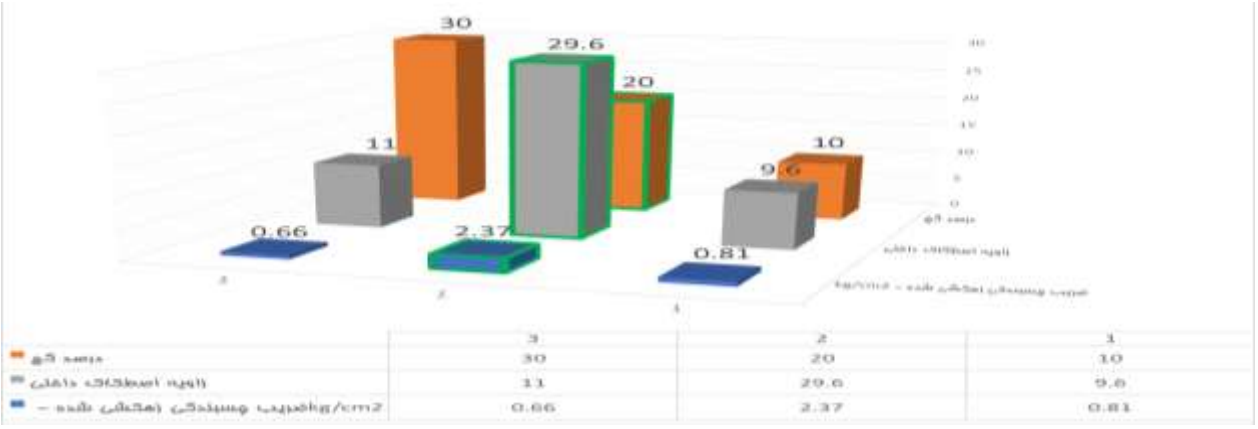


نمودار۳-۳. مقایسه اثر صرفا گچ ضریب چسبندگی زهکشی نشده C_u

ستون میانی اشکال ۳-۳ و ۲-۳ همان خاک پایه(شاهد) ما برای نرمالسای و مقایسه سایر تغییرات خواهد بود، به این معنی که به این ترکیب سناریوهای مختلف اضافه خواهد شده و اثر ترکیبات مختلف پسماند کاتالیست بر آن سنجیده خواهد شد.

برش مستقیم

افزایش گچ محتوی در ابتدا باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک شده است اما با افزایش بی رویه گچ محتوی عملا اثرات مثبت به حداقل رسیده است، به گونه‌ای که برآیند کلی مقاومتی آزمونه با گچ ۱۰ و ۳۰ درصد تقریبا در یک سطح قابل ارزیابی است. در این مورد در تمامی حالات شکست آزمونه به یکباره اتفاق افتاده و به جهت نرمالسازی نتایج کرنش شکست ۲٫۳۵٪ که پر تکرارترین در نتایج بوده است به عنوان مبنا و مقیاس لحاظ شده است.

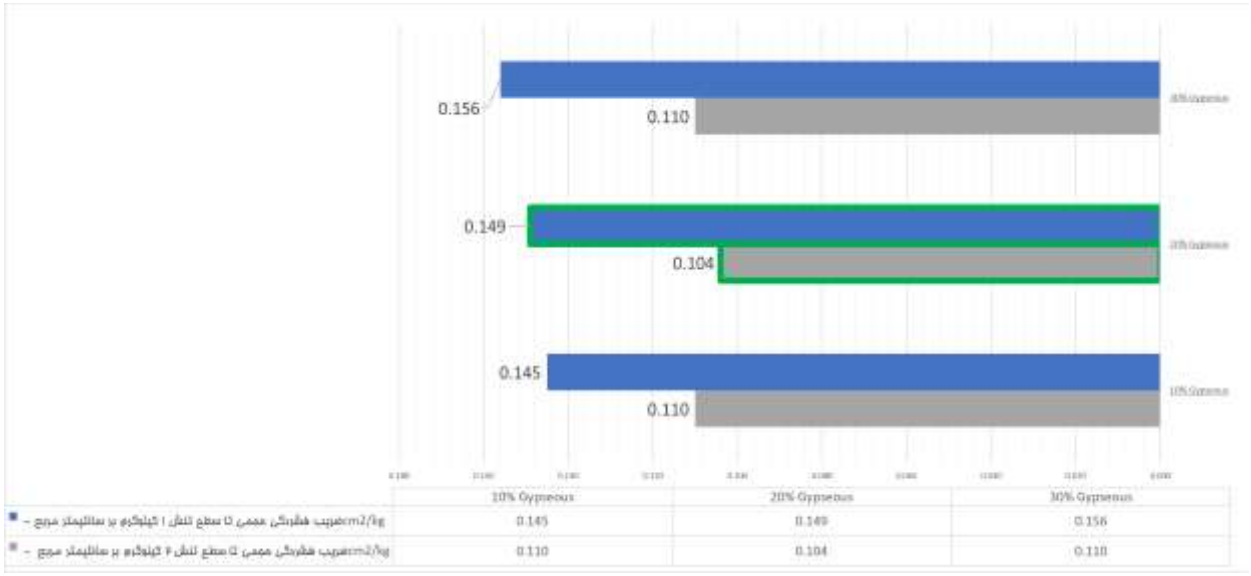


نمودار ۴-۳. مقایسه اثر مقادیر مختلف صرفا گچ بر پارامترهای مقاومت برشی، مقایسه خاک پایه(ستون ۲) و سایر حالات

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

تحکیم

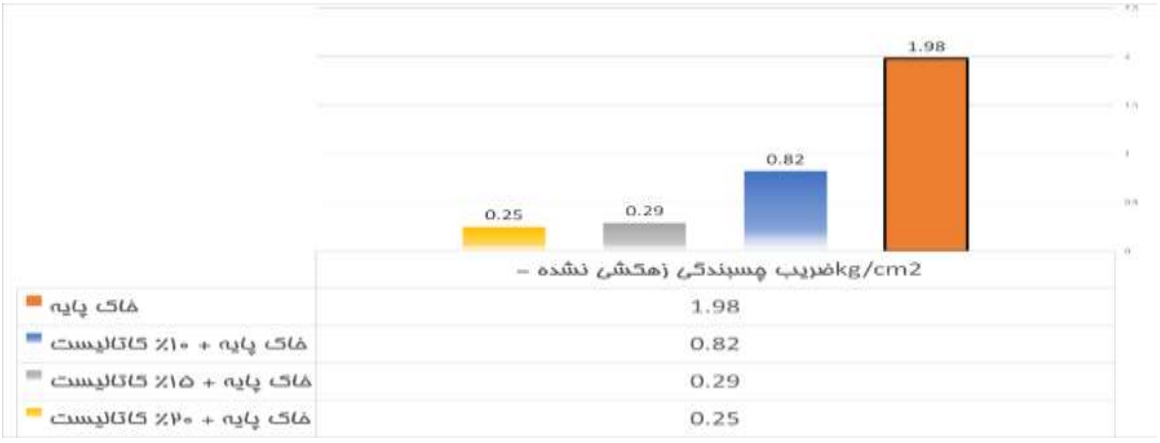
برای بررسی پارامترهای نشست خاک‌های گچی نیز در سه سطح گچ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد آزمونه سازی و آزمایش صورت پذیرفت. وجود گچ در همان ابتدا اثرات خود را نشان داد و پس از بررسی به ضریب فشردگی حجمی بالایی رسیدیم، تفاوت افزایش گچ در درصدهای ۱۰ و ۲۰ بیشتر در زمان باربرداری نمود پیدا کرد. هرچند به وضوح با افزایش درصد گچ به ۳۰٪ ضریب فشردگی حجمی افزایش یافته است.



نمودار۵-۳. نتایج میانگین وزنی ضریب فشردگی حجمی برای سطوح تنش ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، و مقایسه نتایج خاک پایه(٪۲۰ گچ) با سایر حالات

همانطور که از نتایج شکل قبل نیز مشخص شده است برای سطوح تنش بالا (۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) ضریب فشردگی حجمی تفسیر شده حدودا یکسان و برابر ۰,۱۱ است در حالیکه برای سطوح تنش کمتر از ۱ کیلوگرم برسانتی‌متر مربع(بسیار کابردی برای اغلب پروژه‌های مهندسی) با افزایش درصد گچ، ضریب فشردگی حجمی نیز افزایش یافته است. پس از بررسی اثرات گچ لازم بود برای ادامه تحقیق و توجه به اثر کاتالیست، خاکی را به عنوان خاک پایه آزمایش لحاظ کنیم. برای این منظور خاک ۲۰ ٪ گچ مناسب دیده شد، این انتخاب به دلیل رفتار مقاومتی بهینه در آزمایش تک محوری و برش مستقیم بوده است. همچنین این خاک در آزمایش تحکیم نیز به صورت میانگینی از رفتار خاک گچی قابل پذیرش است.

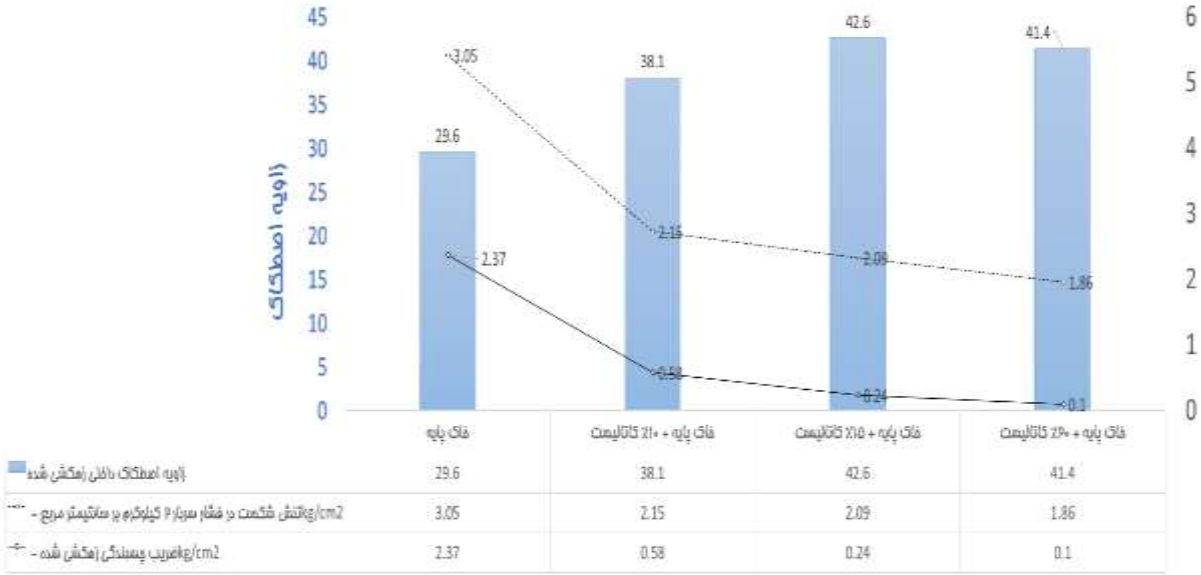
تک محوری



نمودار ۶-۳. اثر استفاده از کاتالیست بر مقاومت زهکشی نشده خاک پایه

همانطور که از شکل قبل نیز برمی‌آید استفاده از کاتالیست به شدت اثر منفی بر پارامترهای تک محوری خاک دارد به گونه‌ای که با اضافه شدن ۱۰٪ کاتالیست به ترکیب خاک پایه تا۶۰٪ کاهش مقاومت زهکشی نشده خاک را شاهد بوده‌ایم. با نگاهی دوباره می‌توان دریافت که با افزودن هر ۵٪ کاتالیست حدودا ۲۵٪ از مقاومت برشی زهکشی نشده خاک کاهش یافته است، این شیب کاهش در ۱۵٪ کاتالیست متوقف می‌شود و دلیل آن نیز باند ثابت تشکیل شده بین ذرات است که خود آن نیز ناشی از چسب ایجاده شده توسط گچ است. این باند دربرابر فشار ممتد تاحدودی مقاوم است اما در برابر ضربات، رفتر تردی از خود نشان می‌دهد.

برش مستقیم



نمودار ۷-۳. اثر استفاده از کاتالیست در خاک پایه بر پارامترهای شکست

از مقایسه نتایج شکل قبل مشخص می‌شود که با افزودن کاتالیست به خاک پایه زاویه اصطکاک داخلی آن افزایش و ترم چسبندگی آن کاهش خواهد یافت اما به صورت میانگین اثرات کاهش چسبندگی غلبه خواهد داشت.

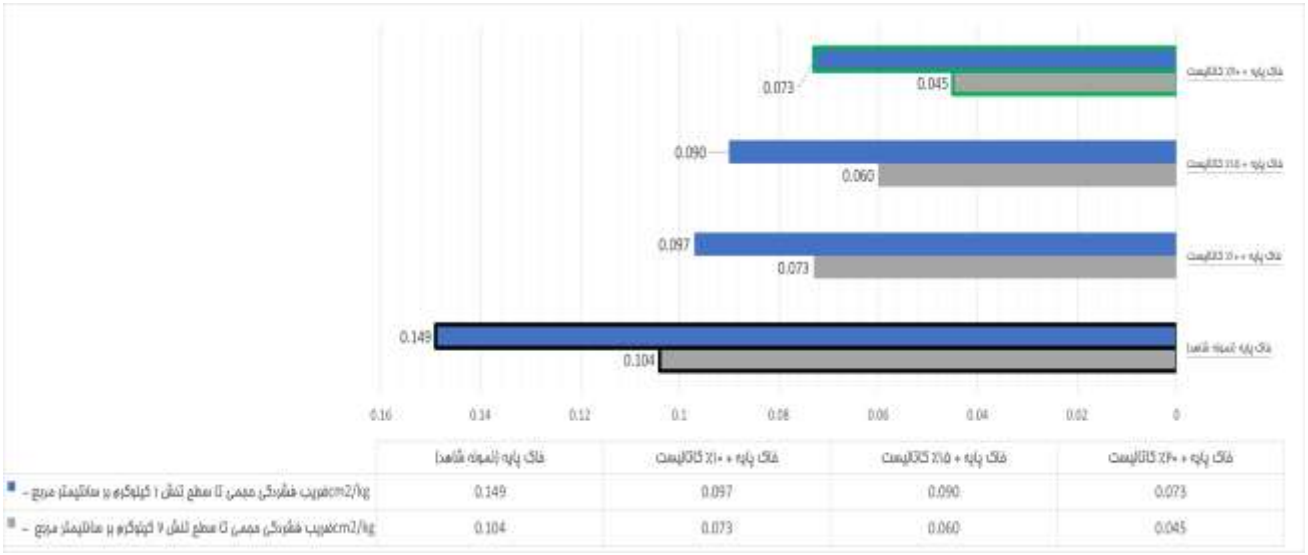
تحکیم

در مواردی که از نبود جریان آب در محیط اطمینان داریم، احتمالا مهمترین مسئله در مورد خاک‌های گچی نشست خواهد بود. برای بررسی این مهم طبیعتا استفاده از آزمایش تحکیم و مقایسه نتایج کمک کننده خواهد بود.

چنانچه از نتایج تنش‌های پائین که به علل مختلف ممکن است دقیقا معرف رفتار خاک نباشند، صرف نظر کنیم در باقی موارد کاهش ضریب فشردگی حجمی و در ادامه آن نشست به وضوح و به مقدار قابل توجهی در مقایسه با حالت نبود کاتالیست کاهش یافته است. به عنوان مثال برای سطوح تنش ۰٫۵-۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در نبود کاتالیست با ضریب فشردگی حجمی ۰٫۱۲ واحد روبرو بودیم در حالیکه پس از اضافه شدن کاتالیست این مقدار در بدترین حالت(۱۰٪ کاتالیست) حداقل به ۰٫۰۵۶ واحد کاهش یافته است.

Civil and Project Journal, 2025, 7(9), 63-84
https://doi.org/10.22034/cpj.2025.545716.1399

در صورت تفسیر وزنی[۳۹] ضریب فشرگی حجمی نیز با افزایش میزان کاتالیست ضریب فشردگی حجمی کاهش خواهد یافت.



نمودار۸-۳. اثر استفاده از کاتالیست بر پارامتر ضریب فشردگی حجمی($\mathbf{m_v}$) و مقایسه با خاک پایه

از میان تمامی سناریوها بهینه ترین حالت استفاده از ۲۰٪ کاتالیست خواهد بود، در صورت استفاده از این ترکیب ضریب فشردگی حجمی بیش از ۵۰٪ کاهش خواهد یافت، که فارغ از صورت مسئله، نشست را به نصف کاهش خواهد داد.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

۱. با افزایش گچ تردشکنی افزایش پیدا می‌کند.

۲. استفاده از کاتالیست در خاک گچی نه تنها نمی‌تواند باعث بهبود خواص برشی خاک گردد، بلکه در موارد عملیاتی مشابه تک محوری و بدون تنش همه جانبه به شدت مخرب نیز می‌تواند باشد(کاهش حداقل ۶۰٪ در مقاومت تک محوری).

۳. با اطمینان خوبی می‌توان گفت استفاده از کاتالیست باعث کاهش نشست خواهد شد. این مورد به صورت کلی می‌تواند برای تمامی حالات مقید خاک قابل بسط باشد.

۴. استفاده از کاتالیست به صورت کلی باعث بهبود موثری بر پارامترهای گسیختگی خاک گچی نخواهد شد.

۵. استفاده از کاتالیست برای بهبود مقاومت برشی خاک گچی نمی‌تواند گزینه موثری باشد چراکه باعث ضعف در پارامترهای مقاومت برشی است، این مورد در حالات بدون تنش همه جانبه(فرضا گودبرداری) تشدید می‌شود.

۳۹ $m_(v-ave) = (\sum \llbracket \Delta\sigma \rrbracket_i \; m_(v-i))/(\sum \llbracket \Delta\sigma \rrbracket_i)$

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

۱. استفاده از انواع دیگر کاتالیست جهت کنترل اثرات مثبت احتمالی بر خاک‌های گچی.
۲. کنترل اثرات فشار جریان آب یا نشت بر پارامترهای نشست خاک گچی بهسازی شده.
۳. بررسی اثر استفاده از گچ پسماند شده در کنار کاتالیست بر پارامترهای مقاومتی خاک سست.

مراجع

بدو، ک.، امدادی، ح.، ۱۳۹۵، استفاده از میکروسیلیس برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی رس نازلو، نشریه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، دوره ۲-۳۲، شماره ۱-۲، شماره پیاپی ۲، صفحه ۱۰۰-۹۱.

تاتلاری، س.، ۱۳۷۵، بررسی رفتار خاک‌های گچی در مجاورت سازه‌های آبی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

توکلی، س.، امین‌فر، م.ح.، هاشم‌زاده، ا.، ۱۴۰۱، بررسی تأثیر میکروسیلیس بر تغییرات مقاومت، حدود اتربرگ و نفوذپذیری در خاک رس تثبیت‌شده با سیمان، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۲-۵۲، شماره ۱۰۷، شماره پیاپی ۱۰۷، صفحه ۶۳-۵۷.

حیدری، آ.، ۱۳۷۴، بررسی چگونگی پیدایش و طبقه‌بندی خاک‌های گچی جنوب غربی گیلان غرب، کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

رحیمی، ط.، ۱۳۹۰، بررسی تأثیر مواد پلیمری بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های گچی به‌کار رفته در دایک‌ها و سواحل رودخانه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

رحیمی، ح.، ۱۳۷۹، مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نامتعارف (مشکل آفرین)، کارگاه فنی- تخصصی ساخت کانال‌ها محدودیت‌ها و راه حل‌ها، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

عابدی کوپایی، ج.، سلطانیان، س.، قیصری، م.، ۱۳۹۴، تأثیر افزودن پامیس، پرلیت و میکروسیلیس بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های گچی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی-علوم آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۷۲، صفحه ۳۴۹-۳۳۷.

منصوری کیا، م. ت.، محمدعلیزاده، م.، ۱۳۸۶، ترمیم ژئوتکنیکی یک کانال ساخته شده درخاک مسئله‌دار، دومین کنفرانس ملی تجربه‌های ساخت تاسیسات آبی و شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران.

Ahmad, F., Said, M. A., and Najah, L. 2012. “Effect of leaching and gypsum content on properties of gypseous soil”. International Journal of Scientific and Research Publications, 2(9), pp. 1-5.

Al-Dabbas, M. A., Schanz, T., and Yassen, M. J. 2010. “Comparison of gypsiferous soils in Samarra and Karbala areas, Iraq”. Iraqi Bulletin of Geology and Mining, 6(2), pp. 115- 126

Al-Daood, A., Bouasker, M., Al-Mukhtar, M., 2018. Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils, Applied Clay Science, (88):39–48.

Al-Gabri, M. K. A., 2019. Collapsibility of Gypseous Soils Using Three Different Methods, M.Sc. Thesis. Building and Construction Engineering Department, University of Technology, Baghdad.

Al-Heeti, A. A. H., 2017. The Engineering Properties of Compacted Gypsified Soil. M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, University of Baghdad.

Arkelyan, E. A. 2018. Characteristics of the determination of the physical properties of gypsum soils. Soil Mech. and Found. Eng. 23 (1): 27-29.

Asghari, S., Ghafoori, M., Tabatabai, S. S., 2017. The evaluation of changes in permeability and cemical composition of gypseous soils through leaching in southern mashhad, Iran, Malaysian Journal of Civil Engineering 26(3):337-348.

FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations), 1993. Agriculture: Toward 2010, Rome, Italy.

Klein, C., Hurlbut, C. S., 1985. Manual of Mineralogy, after J. D. Dana , 20th Edition, John Wiley and Sons, New York.

Kumar, A., Sivapullaiah, P.V., 2015. Susceptibility of strength development by lime in gypsiferous soil—A micro mechanistic study, Applied Clay Science ,115:39-50.

Mahmoudi, Sh. and Heidari, A. 1999. Classification and physicochemical properties of gypsum soils in southwest of Gilanegharb. Iranian J. Agric. Sci. 29(2): 299-308. (in Persian).

Najah., L, Ahmad., F, Said., M. D., Jayed., A., 2020. Effect of additive soils on some geotechnical properties of gypseous soil, International Journal of Scientific & Engineering Research, 4(5): 2282-2286.

Nelson, R. E., L. C. Klameth and W. D. Nettleton. 2021. Determination of soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42: 147-168.Rahimi, H. 2000. Challenges in construction of irrigation canals in anomaly (problematic) soils. Technical Workshop on Canal Construction, Limitations and Solutions. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Jan. 25. Tehran. Iran. (in Persian).

Razouki, S. and S. Kuttah. 2019. Strength erosion of a fine-grained gypsiferous soil during soaking, The Arabian J. for Sci. and Eng. 32(1):147-152.

Razouki, S., S. Kuttah and A. D. Nashat. 2020. Using gypsiferous soil for embankments in hot desert areas, Thomas Telford J. Construction Materials 161(2): 63-71.

Shariatmadari, N., Salami, M., Karimpour Fard, M., 2011. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers, International Journal of Civil Engineering, 9(2): 103-110.

Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., 1976. Identification and nature of dispersive soils, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 120(52): 287-301.

Sherard. J. L, Decker, R. S., 1977. Dispersive Clays, Related Pipings and Erosion in Geotechnical Projects, vol, 623, ASTM International.

Subhi, R. K., 1987. Properties of Salt Contaminated Soils and their Influence the Performance of Roads in Iraq. Ph.D. Thesis, Queen Mary College, University of London.

Taimeh, A. Y., 1992. Formation of gypsic horizons in some arid regions of Jordan, Soil Science, 153(6): 486–498.

Tatlari, S., 1996. Evaluation of Gypseous Soils in Vicinity of Hydraulic structures. (in Persian), (M.Sc. Thesis). University of Tehran, Iran.

Van Hoesen, J., 2000. Pedogenic gypsum in southern New Mexico: genesis, morphology, and stable isotopic signature. [M.Sc. Thesis]: Las Vegas, University of Nevada Las Vegas, 182p .

Vazquez, G., Melgarejo, P., Decal, A., Larena, I., 2013. Persistence, survival, vertical dispersion, and horizontal spread of the biocontrol agent, Penicillium oxalicum strain 212, in different soil types, Applied Soil Ecology, 67: 27–36

Abbey, S. J., Eyo, E. U., Jeremiah, J. J., 2021. Experimental Study on Early Age Characteristics of Lime-GGBS-Treated Gypseous Clays under Wet–Dry Cycles, Geotechnics, 1(2): 402–415.

Najah, L., Ahmed, F. B., Said, M. A. M., 2020. Effect of mixing sandy and silty non-gypseous soils (SM and ML) with gypseous soil on Atterberg limits, compaction characteristics, and shear strength, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18: 1909–1915.

Razouki, S. S., & Kuttah, D. K., 2020. Behaviour of fine-grained gypsum-rich soil under triaxial tests, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials, 174(5): 240–248.

Moghbeli, Z., Sanjari, S., Adhami, E., 2023. Genetic study of soil-landscape relationship in arid region of Faryab, Kerman Province, Water and Soil, 33(2): 333–347.

Impact of various additives and their combinations on the consolidation characteristics of clayey soil. Scientific Reports, 14(1), 31907.

Enhancing the Mechanical Properties of Sawdust Concrete with Silica Fume, Metakaolin, and Marble Powder. Journal of Civil Aspects and Structural Engineering, 2(1), 1-13, 2025.