

Laboratory investigation of dispersivity characteristics and feasibility study of stabilizing dispersive soil using wheat straw protein hydrogel

Ali Neysari Tabrizi¹, Meh Zad Esmaeili Falak^{2*}, Mohammadreza Rasouli²

1- Ph.D. student in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

This study focuses on the dispersive behavior of soils in the Jafariyeh Plain (Qom Province) and evaluates the effectiveness of a novel bio-based stabilizer. Geotechnical sampling included disturbed and undisturbed (cubic) specimens collected from three locations. Laboratory tests, including Atterberg limits and sieve analysis, indicated that all samples are classified as ML (low-plasticity silts). Double hydrometer tests showed dispersivity values ranging from 58% to 80%, with sample No. 3 exhibiting the highest dispersivity (79%). Total dissolved solids (TDS) tests revealed solute concentrations between 1200 and 2800 mg/L, with sample No. 3 again showing the highest value. To reduce soil dispersivity, a protein-based hydrogel derived from wheat straw was applied with 2% boric acid as a cross-linker. A 1% hydrogel mix reduced dispersivity below 40%, while a 7% mix decreased it further to 27%, amounting to a 53% reduction. Unconfined shear strength tests showed continuous improvement with both hydrogel content and curing time, rising from 12.8 kg/cm² (1% mix after 3 days) to 33.5 kg/cm² (7% mix after 28 days). These results confirm that the studied soils possess high dispersive potential and that the proposed bio-stabilizer significantly improves both chemical and mechanical properties. The stabilizer's efficiency, compatibility with the environment, and consistent long-term performance suggest its promising application in geotechnical projects, particularly in arid and semi-arid regions. This approach offers an effective and sustainable alternative to conventional chemical stabilizers such as lime, especially in saline or alkaline soil conditions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 May 2025

Revise Date: 09 July 2025

Accept Date: 26 July 2025

Keywords:

Dispersivity
Cubic Sampling
Wheat Straw Protein
Field Investigations
Soil Improvement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.518834.3705

*Corresponding author: Mahzad Esmaeili falak

Email address: Mahzad.ef@iau.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات واگرایی و امکان‌سنجی تثبیت خاک واگرا با هیدروژل پروتئین کلش گندم

علی نیساری تبریزی^۱، مهزاد اسمعیلی فلک^{۲*}، محمدرضا رسولی^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی رفتار واگرایی خاک‌های دشت جعفریه واقع در استان قم با تمرکز بر استفاده از یک ماده تثبیت‌کننده زیستی جدید می‌پردازد. به منظور تحلیل دقیق پدیده واگرایی، نمونه‌برداری از سه موقعیت انجام شد که شامل نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده به شکل مکعبی بود. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی نشان داد که تمامی نمونه‌ها در گروه ML طبقه‌بندی می‌شوند. آزمایش هیدرومتری دوگانه نشان داد که درصد واگرایی نمونه‌ها بین ۵۸٪ تا ۷۹٪ متغیر است و نمونه شماره ۳ با ۷۹٪ واگرایی، بالاترین مقدار را نشان داد. همچنین، آزمون TDS مقادیر یون‌های محلول را بین ۱۲۰۰ تا ۲۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ثبت کرد که بیشینه آن نیز مربوط به نمونه ۳ بود. برای بهبود رفتار خاک، از هیدروژل پروتئینی استخراج‌شده از کلش گندم همراه با ۲٪ اسید بوریک به‌عنوان کراس‌لینکر استفاده شد. اختلاط ۱٪ از این ترکیب موجب کاهش واگرایی به زیر ۴۰٪ گردید. با افزایش درصد اختلاط تا ۷٪، واگرایی در برخی نمونه‌ها تا ۲۷٪ کاهش یافت (کاهش ۵۳ درصدی). نتایج آزمایش مقاومت فشاری نیز افزایش مداوم مقاومت را از ۱۲/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نمونه شاهد (۱٪ در روز سوم) تا ۳۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نمونه‌های ۷٪ پس از ۲۸ روز نشان داد. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از این هیدروژل زیستی می‌تواند راهکاری مؤثر و پایدار برای تثبیت خاک‌های واگرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد.

کلمات کلیدی: واگرایی، نمونه‌برداری مکعبی، پروتئین کلش گندم، کاوش‌های صحرائی، بهسازی خاک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.518834.3705	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.518834.3705	۱۴۰۴/۰۷/۳۰	۱۴۰۴/۰۵/۰۴	۱۴۰۴/۰۵/۰۴	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۳/۰۱
*نویسنده مسئول: مهزاد اسمعیلی فلک Mahzad.ef@iau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱ - مقدمه

وجود خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌های عمرانی یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. این نوع خاک‌ها، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات رطوبتی یا بارگذاری‌های محیطی، رفتار ناپایدار و غیرخطی از خود نشان می‌دهند [۲, ۱]. یکی از شناخته‌شده‌ترین انواع خاک‌های مشکل‌زا، خاک‌های واگرا و فروریزی هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک شیوع بالایی دارند [۳]. این خاک‌ها دارای ساختار لانه‌زنبوری و متخلخلی هستند که در اثر اشباع شدن، دچار فروپاشی ناگهانی می‌شوند و این موضوع می‌تواند به نشست‌های موضعی و آسیب‌های سازه‌ای گسترده منجر شود [۴]. نتایج حاصل از مطالعات مرتبط با واگرایی خاک‌ها عمدتاً در مناطق گرم و خشک اعتبار بیشتری دارند، چراکه در این اقلیم‌ها به‌دلیل تبخیر بالا و بارندگی کم، تجمع املاح و افزایش یون سدیم در خاک رایج‌تر است و شرایط برای بروز رفتار واگرا فراهم‌تر می‌شود. با این حال، بروز واگرایی صرفاً محدود به اقلیم خاصی نیست و در هر خاکی که ترکیب یونی آن، به‌ویژه نسبت بالای سدیم، شرایط لازم را فراهم کند، احتمال بروز این پدیده وجود دارد. بنابراین، اگرچه اقلیم می‌تواند نقش تشدیدکننده داشته باشد، رفتار واگرایی بیشتر تابع ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک است. در این میان گزارش‌هایی از چین نشان داده‌اند که این نوع خاک‌ها تنها در یک سال باعث تخریب بیش از ۸۰ کیلومتر از خطوط لوله شده‌اند [۵]. همچنین، تأثیر تکرار چرخه‌های خشک‌وتر در تشدید رفتار فروریزی به‌ویژه در اقلیم‌های متغیر، در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است [۶].

نوع دیگری از خاک‌های ضعیف، خاک‌های واگرا هستند که در حضور آب، به دلیل دارا بودن درصد بالای یون سدیم در ترکیب کاتیونی خود، به سرعت دچار شست‌وشوی داخلی و افت استحکام می‌شوند [۷]. شوری خاک و به‌ویژه افزایش نسبت جذب سدیم، یکی از عوامل تشدیدکننده واگرایی در این‌گونه خاک‌ها محسوب می‌شود. حضور غلظت بالای یون سدیم باعث تضعیف پیوندهای بین ذرات و پراکندگی آن‌ها در تماس با آب می‌گردد، که این امر به کاهش انسجام خاک و تسهیل فرسایش داخلی منجر می‌شود. بنابراین، بررسی نقش شوری و ترکیب یونی خاک می‌تواند در پیش‌بینی و کنترل رفتار واگرایی خاک‌ها نقش کلیدی ایفا کند. شناسایی این خاک‌ها به کمک آزمون‌هایی نظیر پین‌هول، کرامب، هیدرومتری و آنالیزهای شیمیایی انجام می‌گیرد [۸]. در شرایطی که اجتناب از استفاده این خاک‌ها ممکن نباشد، روش‌های بهسازی مانند اختلاط با سیمان، پوزولان‌های طبیعی، آهک و ترکیبات شیمیایی پیشنهاد می‌گردند [۹]. هرچند که این روش‌ها ممکن است در بلندمدت اثرات منفی زیست‌محیطی بر جای بگذارند [۱۰]. برای مثال، مطالعه‌ای که بر روی پارامترهای مکانیکی بتن حاصل از سیمان پوزولانی جهت استفاده در پروژه‌های آبیاری و زهکشی انجام شده است، خاکستر بادی و میکروسیلیس با درصد‌های مختلف جایگزینی وزن سیمان بررسی شده و نتایج حاکی از آن است که خاکستر بادی، با وجود کاهش مقاومت اولیه بتن، مقاومت فشاری درازمدت بتن را بهبود می‌بخشد، به‌ویژه در درصد‌های بالاتر جایگزینی. همچنین میکروسیلیس تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت فشاری بتن بعد از ۲ روز دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این افزودنی‌ها به‌ویژه در پروژه‌های آبیاری و زهکشی، می‌تواند منجر به افزایش دوام و مقاومت بتن شود [۱۱].

در کنار راهکارهای نوین مانند استفاده از مواد بایوپلیمری برای بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، روش‌های مکانیکی نظیر ریزشمع‌ها نیز کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های عمرانی دارند. نتایج یک مطالعه موردی نشان داده است که اجرای ریزشمع‌های تزریقی می‌تواند نشست پی سازه‌های بتنی را به طور کامل متوقف کرده و پایداری بستر را بهبود بخشد [۱۲]. از راهکارهای متداول دیگر برای بهسازی این خاک‌ها، استفاده از مواد تثبیت‌کننده شیمیایی مانند سیمان است. افزودن سیمان به خاک، از طریق ایجاد ترکیبات سیمانی اولیه و واکنش‌های پوزولانی ثانویه، موجب افزایش مقاومت فشاری، فشار پیش‌تحکیم و کاهش تراکم‌پذیری خاک می‌شود. نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش درصد سیمان، وزن مخصوص و مقاومت فشاری خاک افزایش یافته و شاخص‌های خمیری نیز تا حدودی افزایش می‌یابد. این بهبودها، به‌ویژه در خاک‌های رسی نرم و کم‌بنیان، می‌تواند نقش مهمی در افزایش پایداری سازه‌ها ایفا کند [۱۳]. در سال‌های

اخیر، استفاده از مواد زیست پایه و طبیعی مانند پلیمرهای گیاهی، جایگزین مناسبی برای مواد شیمیایی در بهسازی خاکها پیشنهاد شده‌اند [۱۴]. هیدروژل پروتئین کلش گندم یکی از این ترکیبات نوظهور است که از پسماندهای کشاورزی تهیه می‌شود و قابلیت ایجاد پیوندهای عرضی بین ذرات خاک را دارد [۱۵]. پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که استفاده از این ماده می‌تواند واگرایی خاک را کاهش داده و چسبندگی و مقاومت برشی آن را بهبود بخشد [۱۶]. همچنین، پروتئین‌های دیگری مانند زئین ذرت و پروتئین سویا نیز به عنوان ترکیبات زیستی مؤثر در بهسازی خاک‌های ریزدانه پیشنهاد شده‌اند [۱۷] و عملکرد آن‌ها در بهبود پارامترهای مقاومت، تغییر شکل و کاهش نفوذپذیری گزارش شده است [۱۸]. این ترکیبات زیست تجزیه پذیر، نه تنها از نظر فنی مؤثرند، بلکه با ملاحظات محیط زیستی نیز همخوانی دارند [۱۹]. بیوپلیمرها از جمله هیدروژل‌های پروتئینی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی، به عنوان مصالحی سبز و جایگزین مواد شیمیایی متداول در بهسازی خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای اصلی استفاده از هیدروژل می‌توان به قابلیت بالای جذب و نگهداری آب، افزایش مقاومت فشاری و پایداری ساختاری خاک، کاهش نفوذپذیری، و ایجاد پیوندهای پایدار بین ذرات خاک اشاره کرد. این مواد همچنین زیست تخریب پذیر و فاقد آثار منفی زیست محیطی در بلندمدت هستند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای تثبیت پایدار خاک در پروژه‌های ژئوتکنیکی تبدیل می‌کند. افزون بر این، قابلیت عملکرد مؤثر در شرایط رطوبتی متغیر یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی این مصالح است که آن‌ها را برای استفاده در مناطق با اقلیم متغیر یا تحت تأثیر نشت و آبیاری، به ویژه در خاک‌های واگرا، بسیار کارآمد می‌سازد.

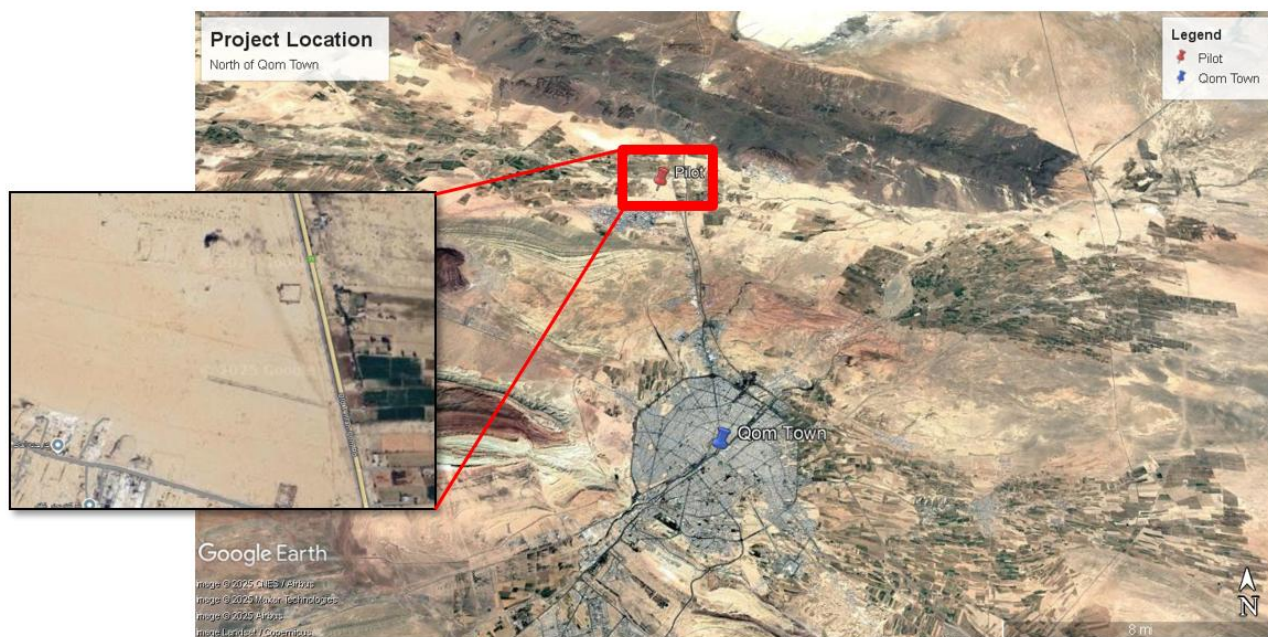
پژوهش‌هایی نیز به بررسی پایداری بلندمدت این مواد در برابر چرخه‌های خشک و تر و فرسایش پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که افزودنی‌های طبیعی می‌توانند رفتار خاک را در برابر تنش‌های تکراری و تغییرات رطوبتی پایدارتر کنند [۲۰، ۲۱]. بیوپلیمرها به عنوان مصالح بهسازی سازگار با محیط زیست، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند و مطالعات نشان داده‌اند که این مواد می‌توانند مقاومت مکانیکی خاک را افزایش داده و نفوذپذیری را کاهش دهند و در میان انواع مختلف بیوپلیمرها، هیدروژل‌های پروتئینی به دلیل توانایی بالا در جذب و نگهداری آب و همچنین ایجاد پیوندهای مؤثر بین ذرات خاک، پتانسیل زیادی برای کاربرد در تثبیت خاک‌های ریزدانه دارند. با این وجود، تأثیر این نوع هیدروژل‌ها بر رفتار مکانیکی و پایداری خاک‌های واگرا تحت شرایط رطوبتی مختلف، به ویژه در شرایط چرخه‌ای (خشک و تر متناوب)، هنوز به صورت جامع و میدانی بررسی نشده است [۲۲].

این پژوهش با هدف بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های واگرا پس از بهسازی با هیدروژل پروتئین کلش گندم انجام شده و به ارزیابی اثر این ماده طبیعی بر مقاومت، پایداری و کاهش پتانسیل واگرایی در شرایط مختلف از جمله خشک، تر و چرخه‌ای می‌پردازد. منظور از شرایط چرخه‌ای، وضعیت‌هایی است که طی آن خاک به صورت متوالی تحت دوره‌های خشک شدن و سپس مرطوب شدن قرار می‌گیرد؛ شرایطی که در بسیاری از مناطق نیمه خشک، خشک و حتی معتدل، به واسطه تغییرات فصلی یا عوامل انسانی نظیر آبیاری و نشت، رایج بوده و تأثیر قابل توجهی بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی خاک‌ها دارد.

۲ - منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، منطقه‌ی مورد مطالعه که موقعیت آن در شکل ۱ نمایش داده شده است، در دشت جعفریه واقع در استان قم قرار دارد. این دشت یکی از نواحی حساس و آسیب‌پذیر از نظر مسائل ژئوتکنیکی در کشور محسوب می‌شود. بر اساس بررسی‌های میدانی و بازدیدهای صحرایی انجام شده، شواهد متعددی از وجود ترک‌های سطحی و فروچاله‌ها در بخش‌های مختلف دشت به ویژه در بستر مناطق مسکونی و در امتداد خطوط انتقال نیرو مشاهده گردیده است. این پدیده‌ها می‌توانند نشانه‌هایی از رفتار واگرای خاک، فرسایش زیرسطحی و نشست‌های ناهمگون باشند که تهدیدات جدی برای پایداری زیرساخت‌ها و ایمنی عمومی ایجاد می‌کنند.

علاوه بر این، بر اساس اطلاعات استخراج شده از داده‌های سازمان هواشناسی کشور، منطقه دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشد. میانگین دمای بالا، بارندگی اندک و تبخیر زیاد از ویژگی‌های بارز این اقلیم هستند. چنین شرایط اقلیمی نه تنها باعث تشدید تبخیر و خشک‌شدگی لایه‌های سطحی خاک می‌شود، بلکه می‌تواند موجب تغییر در ساختار خاک، افزایش پتانسیل واگرایی و در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی خاک گردد. این عوامل در مجموع می‌توانند تأثیرات چشم‌گیری بر نحوه طراحی، اجرا و پایداری پروژه‌های عمرانی در این ناحیه داشته باشند. از این رو، بررسی دقیق رفتار ژئوتکنیکی خاک در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نیاز به مطالعات میدانی و آزمایشگاهی جامع را بیش از پیش نمایان می‌سازد.



شکل ۱: موقعیت مکانی محل مطالعات

در این تحقیق، با توجه به مشاهده نشانه‌هایی از وقوع پدیده‌ی آبخستگی در ناحیه‌ی مورد مطالعه، که نمونه‌هایی از آن در شکل ۲ نمایش داده شده است، برنامه‌ریزی دقیقی برای نمونه‌برداری میدانی از خاک انجام گرفت. هدف اصلی از این نمونه‌برداری، بررسی دقیق‌تر رفتار ژئوتکنیکی خاک در مناطقی بود که علائم ظاهری آبخستگی در آن‌ها مشاهده شده بود. به همین منظور، اقدام به برداشت نمونه‌های خاک از سه نقطه‌ی مجزا در گستره‌ی دشت شد. در انتخاب این نقاط، سعی شد مکان‌هایی انتخاب شوند که در نزدیکی نواحی دارای نشانه‌های فرسایش داخلی و شست‌وشوی خاک قرار داشته باشند تا بتوان با دقت بیشتری شرایط بحرانی خاک را شناسایی کرد.

نمونه‌ها به صورت دست‌خورده و دست‌نخورده تهیه شدند تا امکان انجام طیف گسترده‌ای از آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی فراهم گردد. نمونه‌های دست‌نخورده با دقت بالا و با استفاده از ابزار استاندارد ژئوتکنیکی برداشت شدند تا ساختار طبیعی خاک حفظ شود و داده‌های حاصل از آزمایش‌ها قابل اعتماد باشند. از سوی دیگر، نمونه‌های دست‌خورده نیز با هدف بررسی ویژگی‌های یکنواختی، توزیع دانه‌بندی، و رفتار خاک پس از برهم‌خوردن ساختار طبیعی آن مورد استفاده قرار گرفتند. شایان ذکر است که انتخاب محل‌های نمونه‌برداری نه تنها بر اساس وجود نشانه‌های ظاهری آبخستگی صورت گرفت، بلکه تلاش شد تا این نقاط به گونه‌ای انتخاب شوند که بتوانند نماینده‌ای از شرایط بحرانی منطقه باشند. این انتخاب به محققان اجازه می‌دهد تا با مقایسه‌ی داده‌های به دست آمده از نقاط مختلف، به تحلیل دقیق‌تری از تنوع رفتاری خاک در پهنه‌ی دشت دست یابند و تفاوت‌های احتمالی موجود در خصوصیات ژئوتکنیکی و آسیب‌پذیری خاک نسبت به آبخستگی در نقاط مختلف منطقه را آشکار سازند.



شکل ۲: آثار وقوع آبخستگی

۳- نمونه‌برداری از خاک بستر

در این مطالعه، به منظور انجام بررسی‌های سطحی دقیق در مناطق مورد نظر، نمونه‌برداری‌های دست‌خورده از سه موقعیت مختلف و نمونه‌برداری دست‌نخورده از یک محل مشخص صورت گرفت. روش نمونه‌برداری دست‌نخورده که به شیوه‌ی مکعبی انجام شد، با هدف دستیابی به نمونه‌هایی با کمترین میزان تغییر شکل و حفظ شرایط طبیعی خاک در زمان برداشت انتخاب گردید. روش نمونه‌برداری مکعبی، به ویژه در خاک‌هایی با چسبندگی بالا، به عنوان یکی از روش‌های قابل اعتماد برای استخراج نمونه‌های دقیق ژئوتکنیکی شناخته می‌شود. این روش نه تنها در حفظ ساختار طبیعی خاک مؤثر است، بلکه به کاهش احتمال ایجاد تنش‌های موضعی و تغییر شکل‌های برشی حین فرآیند نمونه‌برداری کمک می‌کند. با این حال، همان‌طور که قنبری (۱۳۸۸) نیز اشاره کرده است، استفاده از روش نمونه‌گیری مکعبی برای خاک‌های نرم با درصد اشباع بالا مناسب نبوده و ممکن است منجر به از دست رفتن انسجام طبیعی خاک یا ایجاد اختلال در

ساختار آن شود. بنابراین، انتخاب این روش تنها در شرایطی انجام شد که مشخصات خاک اجازه برداشت مؤثر و دقیق نمونه را فراهم می‌کرد.

همان‌گونه که در شکل ۳، قسمت‌های الف و ب مشاهده می‌شود، عملیات نمونه‌برداری مکعبی با ایجاد گودالی به ابعاد تقریبی ۲ متر در ۱ متر و با استفاده از ابزارهای دستی آغاز شد. در این مرحله، خاک به صورت مکعب‌هایی با ابعاد تقریبی ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر با دقت بالا استخراج گردید. به منظور حفظ ساختار طبیعی و جلوگیری از آسیب به نمونه‌ها، پس از برش، هر مکعب در چند لایه محافظ شامل پارچه مخصوص، موم آب‌بندی‌شونده و نوار چسب پوشانده شد. این پوشش‌ها نقش حیاتی در محافظت از نمونه در برابر خشک‌شدن، دست‌خوردگی مکانیکی و از دست دادن رطوبت اولیه ایفا می‌کنند. پس از تکمیل بسته‌بندی، نمونه‌ها در جعبه‌های سخت مقاوم قرار داده شدند تا در حین حمل‌ونقل به آزمایشگاه دچار آسیب نشوند. در طول کل فرآیند، مراقبت ویژه‌ای برای جلوگیری از وارد شدن هرگونه ضربه یا تغییر ناخواسته در ساختار نمونه صورت گرفت، چرا که حتی کوچک‌ترین دست‌خوردگی می‌تواند نتایج آزمایشگاهی را دچار خطا کرده و مانع از دستیابی به تحلیل‌های قابل اطمینان شود. همچنین، حفظ رطوبت طبیعی خاک در این مرحله از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که تغییر در درصد رطوبت می‌تواند رفتار مکانیکی خاک را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۳: الف) نمونه‌برداری دستی، ب) نمونه‌برداری مکعبی

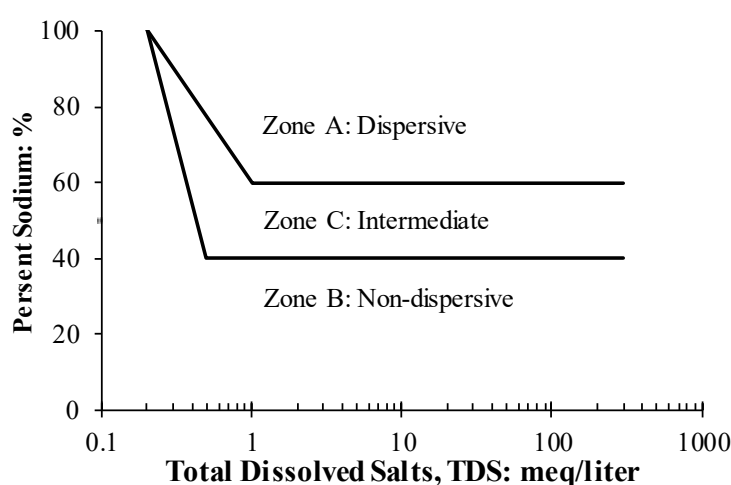
۴- روش شناسی

۴-۱- بررسی واگرایی خاک

در این پژوهش، برای تعیین میزان واگرایی و تثبیت خاک، آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و شیمیایی انجام شده است. روش هیدرومتری دوگانه که ابتدا توسط ولک در سال ۱۹۳۷ به کار گرفته شد، به عنوان نخستین روش آزمایشگاهی برای شناسایی خاک‌های واگرا معرفی شده است. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM D4221 بر روی نمونه‌های دستی از خاک واگرا انجام شد. در این روش، دانه‌بندی خاک ابتدا با استفاده از همزن مکانیکی و هگزامتاسفات سدیم مشخص می‌شود و سپس بر روی نمونه‌ی دیگر بدون استفاده از مواد پراکنده‌ساز آزمایش دیگری انجام می‌گیرد. نسبت درصد ذرات کوچکتر از 0.075 میلی‌متر در آزمایش دوم به همان درصد در آزمایش اول به عنوان درصد واگرایی تعیین می‌شود.

به منظور تثبیت خاک، هیدروژل پروتئین کلش گندم به عنوان ماده افزودنی در نسبت‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی نمونه استفاده شده‌است. این افزودنی به بهبود کیفیت و ویژگی‌های فنی خاک کمک کرده و سرعت اجرایی پروژه‌ها را افزایش می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی بین خاک و این افزودنی نیز به افزایش مقاومت باربری و کاهش قابلیت تراکم و جابجایی خاک کمک می‌کند.

روش‌های شیمیایی به دلیل قابلیت‌های کمی‌سازی عوامل واگرایی مزایای برجسته‌ای نسبت به دیگر روش‌ها دارند. با استفاده از داده‌های شیمیایی خاک، واگرایی بدون نیاز به آزمایش‌های اضافی قابل سنجش است. بر اساس روش شرارد و همکاران (۱۹۷۶)، ابتدا عصاره‌اشباع خاک با آب مقطر مخلوط شده و پس از استراحت چند ساعته، تعادل بین نمک‌های محلول و ترکیبات تبادل کاتیون برقرار می‌شود. آب موجود در خمیر سپس برای تعیین مقادیر کاتیون‌های فلزی مورد آزمایش قرار می‌گیرد و درصد سدیم و TDS^1 نیز تعیین می‌شود.



شکل ۴: معیار ساده شده شرارد و همکاران (۱۹۷۶) به منظور ارزیابی قابلیت واگرایی

۴-۲- ساخت و فرآوری ماده تثبیت کننده

گلش^۲ گندم، پوش برگ خشک و محافظ فلس مانند در بذره‌های بذر غلات یا مواد گیاهی ریز و خشک و فلسی مانند قسمت‌هایی از گل‌ها یا کاه بسیار ریز شده می‌باشد. گلش توسط انسان قابل هضم نیست، اما دام می‌تواند از آن تغذیه بکند و در کشاورزی از آن به‌عنوان علوفه دام استفاده می‌شود، یا ماده زائدی است که در خاک شخم زده یا سوزانده می‌شود. استفاده از ماده در جهت بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک می‌تواند صرفه اقتصادی قابل توجهی داشته باشد. در مرحله فرآوری هیدروژل پروتئین کلش گندم، ابتدا پروتئین کلش گندم که از ضایعات گندم سنتز شده است، به صورت پودر در آب مقطر حل می‌شود تا یک محلول همگن تشکیل شود. به این محلول، پلی‌وینیل الکل^۳ با خلوص ۱۵٪ به عنوان ماده افزودنی اضافه می‌شود. این محلول برای افزایش خواص مکانیکی و ظرفیت نگهداری آب هیدروژل استفاده می‌شود.

در این بخش از تحقیق، به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های زیست‌پایه بر خواص مکانیکی و واگرایی خاک، ابتدا محلولی از پروتئین گیاهی (نظیر پروتئین کلش گندم) و پلی‌وینیل الکل تهیه شد. این دو ماده به‌عنوان اجزای اصلی هیدروژل تثبیت‌کننده، باید تحت هم‌زدن

¹ Total Dissolved Solids

² Wheat Straw

³ PVA

مداوم و یکنواخت در دمای کنترل شده ترکیب شوند تا از حل کامل اجزا در یکدیگر اطمینان حاصل گردد و محلولی همگن و پایدار ایجاد شود. فرآیند اختلاط معمولاً توسط همزن مغناطیسی یا مکانیکی با دور ثابت انجام می‌گیرد و ممکن است تا ۳۰ الی ۶۰ دقیقه ادامه یابد تا از ایجاد گره‌های مولکولی و ته‌نشینی جلوگیری شود.

برای ارزیابی اثر این محلول بر خاک، در ابتدا مجموعه‌ای از نمونه‌های خاک بدون هیچ‌گونه افزودنی تهیه شد. این نمونه‌ها به‌عنوان گروه شاهد^۴ شناخته می‌شوند و در مراحل بعدی به‌عنوان مبنای مقایسه برای بررسی تغییرات رفتاری خاک‌های تثبیت‌شده مورد استفاده قرار خواهند گرفت. سپس، محلول هیدروژل آماده‌شده با نسبت‌های وزنی مختلف شامل ۱٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ (نسبت به وزن خشک خاک) با خاک ترکیب شد. برای ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیره‌های پلیمری و افزایش پایداری ساختار ژل در خاک، بوریک اسید به محلول افزوده شد که نقش عامل کراس‌لینک‌کننده^۵ را ایفا می‌کند.

برای تضمین توزیع یکنواخت هیدروژل در کل حجم خاک، از یک میکسر مکانیکی استاندارد استفاده شد که امکان مخلوط کردن مؤثر مواد را فراهم می‌سازد. مخلوط نهایی باید عاری از گره‌های خشک یا نواحی بدون افزودنی باشد تا اعتبار نتایج آزمایشگاهی حفظ شود. در گام بعد، برای قالب‌گیری نمونه‌های آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری طبق شکل ۵، از قالب‌های فلزی با قطر ۴/۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. مخلوط خاک و محلول تثبیت‌کننده به‌صورت لایه‌ای در داخل قالب فشرده گردید. رطوبت اولیه خاک قبل از کوبش، برابر ۱۸٪ تعیین شده و وزن مخصوص خشک نهایی ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. هر نمونه در پنج لایه مساوی کوبیده شد؛ به‌گونه‌ای که هر لایه شامل ۷۵ گرم خاک مرطوب بوده و تا ارتفاع تقریبی ۲ سانتی‌متر فشرده شد. در نهایت، وزن کل خاک در هر نمونه به ۳۷۵ گرم رسید. این روش نمونه‌سازی با رعایت مشخصات هندسی و وزنی دقیق، امکان تکرارپذیری بالا و همگنی نمونه‌ها را برای اجرای آزمایش‌های مکانیکی و هیدرولیکی فراهم می‌سازد.

برای دسته‌ی نخست از آزمایش‌ها، تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی موردنیاز است که شامل گروه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی سطوح مختلف هیدروژل می‌باشد. چنین طراحی آزمایشی، بستری مناسب برای ارزیابی کمی اثر افزودنی زیستی در بهبود خواص خاک واگرا فراهم می‌آورد و امکان تحلیل آماری دقیق نتایج را میسر می‌سازد.



شکل ۵: قالب‌های ساخت نمونه‌های بهسازی

^۴ Control Group

^۵ cross-linker

مخلوط‌های هیدروژل و خاک در قالب‌های استاندارد قرار داده می‌شوند تا برای انجام آزمایش‌های مکانیکی آماده شوند. این مرحله مهم است چرا که از قالب‌های استاندارد استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که تمام نمونه‌ها در شرایط یکسانی تست می‌شوند. در این مرحله، نمونه‌ها تحت آزمایش‌های استاندارد مختلفی قرار می‌گیرند تا پارامترهای مکانیکی خاک مانند مقاومت فشاری، ظرفیت نگهداری آب و دیگر خواص مرتبط با دوام و پایداری خاک ارزیابی شوند. این آزمایش‌ها کمک می‌کنند تا تأثیر افزودن هیدروژل بر خواص خاک به دقت بررسی و مستندسازی شود.



شکل ۶: هیدروژل پروتئین کلش گندم

۵- نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- نتایج آزمایش‌های شاخص ژئوتکنیکی

نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌های شاخص مهندسی ژئوتکنیک، به همراه استانداردهای مرجع مربوطه، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این آزمایش‌ها با هدف شناسایی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک محل نمونه‌برداری انجام شده‌اند و به‌عنوان مبنایی برای تحلیل رفتار واگرایی و بررسی پتانسیل تثبیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مرحله نخست، آزمایش‌های حدود اتربرگ (شامل حد روانی و حد خمیری) و دانه‌بندی به روش الک انجام شد. نتایج حاصل از این دو آزمایش نشان داد که خاک بستر تمامی نمونه‌ها به طبقه‌بندی ML تعلق دارند؛ یعنی خاک‌هایی با دانه‌بندی ریز و غیرآلی که دارای خاصیت خمیری پایین هستند. این گروه از خاک‌ها معمولاً رفتار مکانیکی خاصی در برابر آب از خود نشان می‌دهند و مستعد تغییر شکل و کاهش مقاومت در شرایط مرطوب هستند.

آزمایش چگالی ویژه نیز با هدف شناسایی دقیق‌تر ویژگی‌های فیزیکی خاک و استفاده در محاسبات مربوط به آزمایش‌های واگرایی مورد استفاده قرار گرفت. چگالی ویژه به‌عنوان یکی از پارامترهای پایه در تعیین رفتار خاک در مواجهه با آب و در تحلیل نتایج آزمایش‌های پراکندگی ذرات، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، از داده‌های چگالی ویژه برای پشتیبانی از تحلیل‌های مربوط به میزان واگرایی ذرات ریز و همچنین مقایسه‌ی تأثیر به‌کارگیری هیدروژل پروتئین کلش گندم بر رفتار خاک استفاده شد. این داده‌ها به‌عنوان یکی

از ورودی‌های اصلی برای تفسیر نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه به کار گرفته شدند و نقش کلیدی در ارزیابی عملکرد تثبیت‌کننده ایفا کردند.

جدول ۱: نتایج آزمایش‌های شاخص ژئوتکنیکی

مشخصات	ASTM	موقعیت نمونه برداری		
		#۱	#۲	#۳
دانه بندی (/)				
ماسه	ASTM D2487	۱۲/۳۶	۱۸/۲۳	۲۸/۲۱
ریزدانه	ASTM D2487	۸۷/۶۴	۸۱/۷۷	۷۱/۷۹
حدود اتربرگ (/)				
حد روانی	ASTM-D4318	۲۰/۱۸	۲۰/۱۸	۲۰/۱۱
حد خمیری	ASTM-D4318	۱۵/۵۲	۱۴/۷۷	۱۵/۱۰
شاخص خمیری	ASTM-D4318	۴/۶۶	۵/۴۱	۵/۰۱
رطوبت اولیه		۷/۲۴	۵/۹۲	۵/۳۹
طبقه بندی در سیستم متحد	ASTM D2487	ML	ML	ML
چگالی ویژه	ASTM D854	۲/۶۷	۲/۷۸	۲/۶۹
وزن مخصوص خشک بیشینه (g/cm^3)	ASTM D698	۱/۷۱	۱/۷۳	۱/۷۵
رطوبت بهینه (/)	ASTM D698	۲۰/۵	۲۱/۸۸	۲۶/۳۱

۵-۲- نتایج آزمایش‌های واگرایی

آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های خاک برداشت شده از محل پروژه، مطابق با استاندارد ASTM D4221 انجام گردید. هدف از این آزمایش، بررسی پتانسیل واگرایی خاک و تعیین درجه حساسیت آن در برابر پراکندگی در تماس با آب بود. در این روش، با مقایسه‌ی درصد ذرات ریز حاصل از دو آزمایش یکی با استفاده از ماده پراکنده‌کننده و دیگری بدون آن درصد واگرایی هر نمونه تعیین گردید. نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بر اساس این نتایج، درصد واگرایی نمونه‌های خاک در بازه‌ای بین ۵۸ تا ۸۰ درصد قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای واگرایی در تمامی نمونه‌های برداشت شده می‌باشد. به طور خاص، خاک مربوط به نمونه شماره ۳ با درجه واگرایی ۷۹ درصد، بالاترین میزان واگرایی را نشان داده و در رده‌ی خاک‌های بسیار واگرا طبقه‌بندی می‌شود. این مقدار بیانگر آن است که ذرات ریز این نمونه در برابر تماس با آب، به شدت مستعد پراکنده شدن هستند و می‌توانند منجر به بروز پدیده‌هایی نظیر فرسایش داخلی، ریزش سازه‌های خاکی و ناپایداری شیب‌ها شوند. در مقابل، نمونه شماره ۲ که از موقعیتی حدوداً ۵۰۰ متر دورتر از محل نمونه ۳ برداشت شده است، با درجه واگرایی ۶۳ درصد، پایین‌ترین مقدار واگرایی را در میان نمونه‌ها داشته، اما همچنان در محدوده‌ی خاک‌های واگرا قرار

می‌گیرد. این اختلاف نسبتاً قابل توجه در درصد واگرایی میان نمونه‌ها، می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط محیطی، نوع رسوبات، ترکیب معدنی و سطح رطوبت محلی باشد.

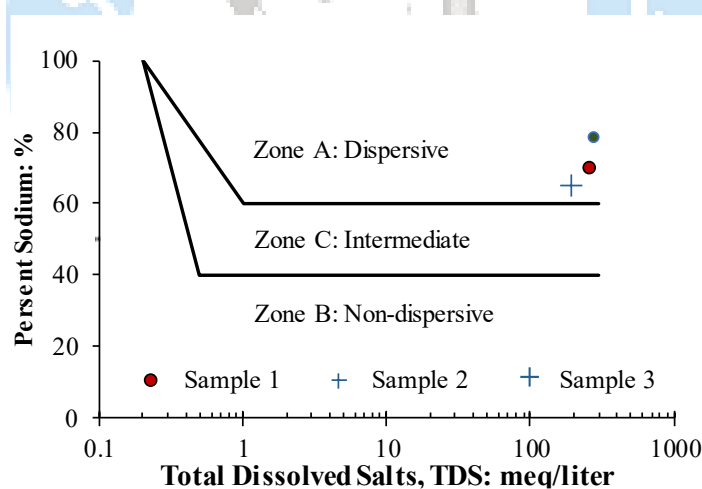
جدول ۲: نتایج بررسی واگرایی خاک با آزمایش هیدرومتری دوگانه

Soil	Sample	ASTM	Degree of dispersion		
			<30%	30% to 50%	>50%
			Non-dispersion	Intermediate	Dispersive
Qom Pilot	#1		-	-	70%
	#2	ASTM D 4221	-	-	63%
	#3		-	-	79%



نتایج حاصل از آزمایش کل مواد جامد محلول (TDS) که بر پایه آزمایش‌های شیمیایی انجام شده بر روی عصاره اشباع خاک نمونه‌های اخذ شده در سه موقعیت است که در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. این آزمایش با هدف بررسی میزان مواد محلول، به‌ویژه یون‌های مؤثر در رفتار واگرایی خاک نظیر سدیم، کلسیم و منیزیم، انجام شده است. مقدار TDS یکی از شاخص‌های مهم در تحلیل کیفیت شیمیایی خاک بوده و در ارزیابی پتانسیل پراکندگی ذرات ریز خاک و تأثیر آن بر پایداری سازه‌های خاکی نقش کلیدی ایفا می‌کند. یافته‌های این آزمایش در راستای نتایج به‌دست آمده از آزمایش هیدرومتری دوگانه قرار می‌گیرند، به‌طوری‌که همگی بر وجود ویژگی‌های واگرایی قابل توجه در نمونه‌های خاک مورد بررسی تأکید دارند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها دارای میزان قابل توجهی از یون‌های محلول، به‌ویژه یون سدیم (Na^+)، هستند که این موضوع می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل پراکندگی و کاهش پایداری سازه‌های خاکی در برابر نفوذ آب شود. در میان نمونه‌ها، خاک بستر مربوط به نمونه شماره ۳ بیشترین میزان سدیم را دارا بوده است. این مقدار بالای سدیم در کنار نتایج حاصل از درصد بالای واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه، نشان می‌دهد که این ناحیه از دشت دارای شرایط ژئوشیمیایی بحرانی‌تری نسبت به سایر نقاط بوده و نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و اقدامات اصلاحی جدی‌تری در مرحله طراحی و تثبیت است. افزایش یون‌های سدیم نه تنها موجب پراکندگی بیشتر ذرات ریز خاک و از هم‌گسیختگی ساختار کلوئیدی آن می‌شود، بلکه با افزایش نسبت جذب سدیم نیز همراه است. نسبت بالای جذب سدیم به معنای جایگزینی یون‌های تک‌ظرفیتی سدیم به جای یون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم یا منیزیم در سطح ذرات خاک است؛ پدیده‌ای که منجر به تضعیف پیوندهای بین ذرات و کاهش پایداری خاک می‌گردد. در نتیجه، ساختار خاک به‌مرور سست شده و مقاومت آن در برابر جریان آب، فرسایش داخلی و تغییر شکل کاهش می‌یابد.



شکل ۷: نتایج آزمایش TDS

۵-۳- نتایج تثبیت خاک واگرا با هیدروژل پروتئین کلش گندم

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و TDS، وجود پدیده‌ی واگرایی در خاک‌های منطقه مورد مطالعه به‌طور قطعی به اثبات رسید. این نتایج نشان می‌دهند که خاک منطقه دارای پتانسیل بالایی برای پراکندگی ذرات ریز در تماس با آب است. در راستای ارزیابی راهکارهای بهسازی و کاهش واگرایی، نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که استفاده از هیدروژل پروتئین کلش گندم به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده زیست‌پایه، توانسته است تأثیر مثبتی بر کاهش میزان واگرایی خاک داشته باشد. در این مطالعه، اختلاط یک درصد

وزنی از این ماده با نمونه‌های خاک، باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در درصد واگرایی شده و آن را به محدوده خاک‌های غیرواگرا یا با واگرایی بسیار کم نزدیک کرده است. با افزایش درصد اختلاط این ماده از ۱ درصد به ۵ درصد، میزان واگرایی به‌طور میانگین حدود ۷ درصد کاهش یافته که نشان‌دهنده‌ی اثر بخشی تدریجی و وابسته به غلظت این ماده در بهبود رفتار خاک می‌باشد.

با این حال، باید توجه داشت که افزایش درصد مصرف مواد بهسازی‌کننده، به‌ویژه در مقادیر بالا، همواره منجر به بهبود عملکرد نخواهد شد و ممکن است در شرایط خاص منجر به بروز عوارض جانبی نامطلوب شود. برای مثال، هیدروژل‌ها با جذب رطوبت و آزادسازی تدریجی آن می‌توانند منجر به تغییر در شیمی خاک شده و میزان شوری یا قلیائیت (pH) را تحت تأثیر قرار دهند. از طرف دیگر، ویژگی‌های ذاتی خاک مانند میزان شوری اولیه، ترکیب معدنی، و pH طبیعی آن نقش تعیین‌کننده‌ای در نوع و میزان پاسخ خاک به مواد بهسازی دارد.

برای مقایسه، موادی نظیر آهک نیز در برخی موارد برای بهسازی خاک‌های واگرا استفاده می‌شوند. آهک با افزایش pH می‌تواند موجب رسوب یون‌های سدیم و کاهش شوری شود. با این حال، در خاک‌هایی که از ابتدا دارای شوری بالا یا pH قلیایی هستند، افزودن چنین موادی ممکن است منجر به افزایش آزادسازی یون‌های سدیم از ذرات خاک شده و در نتیجه مشکل واگرایی را تشدید کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هیدروژل پروتئین کلش گندم، با رعایت نسبت اختلاط مناسب، می‌تواند به عنوان یک گزینه‌ی مؤثر و سازگار با محیط زیست در تثبیت خاک‌های واگرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند استان قم مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳. نتایج تثبیت با درصد‌های مختلف هیدروژل پروتئین کلش گندم در آزمایش هیدرومتری دوگانه

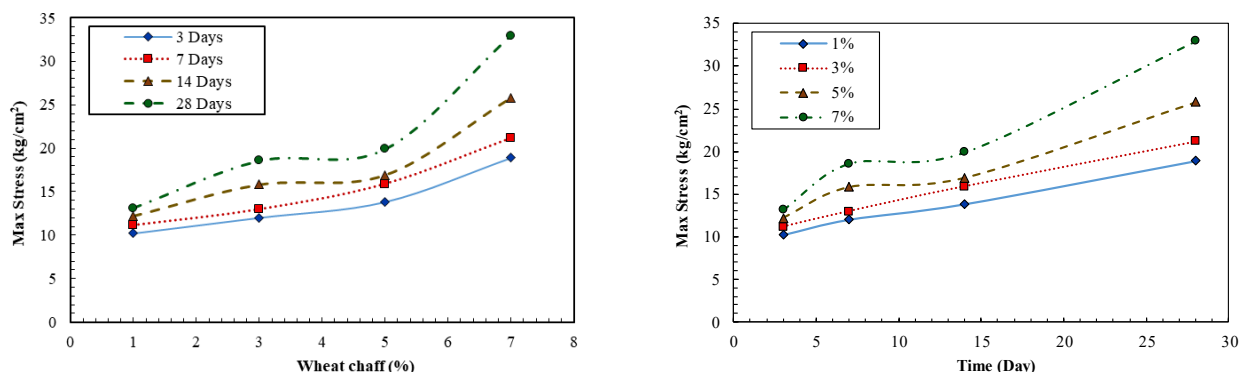
Soil/Sample	Wheat chaff protein hydrogel	ASTM	Degree of dispersion		
			<30%	30% to 50%	>50%
			Non-dispersion	Intermediate	Dispersive
Qom Pilot/#3	1%	ASTM D 4221	28%	-	-
	2%		25%	-	-
	3%		21%	-	-
	7%		39%	-	-

۵-۴- نتایج افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نشان می‌دهد که افزودن هیدروژل پروتئینی استخراج‌شده از کلش گندم تأثیر قابل توجهی در بهبود رفتار مکانیکی خاک دارد. نمودار سمت چپ تغییرات مقاومت فشاری را در درصد‌های مختلف هیدروژل (۱٪ تا ۷٪) و در چهار بازه زمانی (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) نمایش می‌دهد. مطابق داده‌ها، با افزایش درصد هیدروژل، مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌طور پیوسته افزایش یافته است، به‌ویژه در دوره‌های عمل‌آوری بلندمدت که روند رشد مقاومت بارزتر می‌باشد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه حاوی ۷٪ هیدروژل در روز بیست‌وهشتم است که مقدار آن حدود ۳۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع گزارش شده و نسبت به نمونه شاهد (۱٪ در روز سوم) افزایش چشم‌گیری نشان می‌دهد. نمودار سمت راست نیز این روند را تأیید می‌کند و تغییرات مقاومت فشاری را به تفکیک زمان برای هر درصد از هیدروژل نمایش می‌دهد. در این نمودار، مشاهده می‌شود که در تمامی درصد‌ها، مقاومت فشاری با گذشت زمان افزایش یافته و نرخ این افزایش در درصد‌های بالاتر، به‌ویژه ۵٪ و ۷٪، محسوس‌تر است.

این مسئله حاکی از آن است که حضور هیدروژل در درصد‌های بالاتر موجب تقویت پیوند بین ذرات، کاهش تخلخل، و ایجاد ساختاری متراکم‌تر و مقاوم‌تر در خاک شده است. در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که استفاده از هیدروژل پروتئینی کلش گندم، ضمن

ارتقاء قابل توجه مقاومت فشاری در کوتاه مدت، در بلندمدت نیز موجب پایداری و تثبیت بیشتر خاک می گردد. از این رو، می توان آن را به عنوان یک افزودنی زیست پایه مؤثر برای بهسازی مکانیکی خاک های ریزدانه پیشنهاد کرد.



شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های بهسازی شده

۶- نتیجه گیری

- ۱- نتایج پژوهش نشان داد که خاک های منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل واگرایی بالایی هستند و در صورت تماس با آب، به سرعت دچار پراکندگی ذرات و کاهش پایداری می گردند.
- ۲- بررسی های آزمایشگاهی شامل حدود اتربرگ، دان بنددی، چگالی ویژه، TDS و هیدرومتری دوگانه نشان داد که تمامی نمونه ها از نظر ژئوتکنیکی نیازمند بهسازی و اصلاح شرایط می باشند.
- ۳- استفاده از هیدروژل پروتئینی استخراج شده از کلش گندم به عنوان تثبیت کننده زیست پایه مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد موفق در کاهش واگرایی خاک از خود نشان داد.
- ۴- با افزایش درصد اختلاط هیدروژل از ۱٪ به ۷٪، کاهش قابل توجهی در درصد واگرایی و افزایش مداوم در مقاومت فشاری نمونه ها در بازه های زمانی مختلف مشاهده شد.
- ۵- کاربرد این هیدروژل علاوه بر بهبود ساختار اولیه خاک، موجب افزایش پایداری بلندمدت آن نیز گردید.
- ۶- برخلاف برخی تثبیت کننده های رایج مانند آهک که ممکن است در خاک های شور یا قلیایی اثربخشی منفی داشته باشند، هیدروژل پروتئینی به دلیل منشأ طبیعی و سازگاری با محیط زیست، گزینه ای ایمن برای تثبیت خاک در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود.
- ۷- استفاده هدفمند از این ماده می تواند به عنوان یک رویکرد نوآورانه، پایدار و زیست محور در مهندسی ژئوتکنیک، به بهبود عملکرد و پایداری خاک های واگرا کمک نماید.

مراجع

- [1] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley.
- [2] Esmacili-Falak, M., Lotfi Eghlim, A., & Nematzadeh, S. (2019). Improvement of mechanical parameters of concrete yielded from pozzolanic cement for irrigation and drainage projects. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6 (Special Issue 1), 43-58.

- [3] Fedaa, J. (1995). *Constitutive laws for soils with different types of structure*. Amsterdam: Elsevier.
- [4] Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., & Hardcastle, J. H. (1992). Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9), 1376–1394.
- [5] Li, J., Zhang, Y., & Hu, T. (2016). Engineering problems caused by collapsible loess. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 295–305.
- [6] Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (2010). Modelling the mechanical behavior of expansive clays. *Engineering Geology*, 105(1–2), 1–18.
- [7] Sherard, J. L., Decker, R. S., & Ryker, N. L. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 102(1), 69–85.
- [8] Dehghan, A., Ghafouri, M., & Soltani, A. (2011). Assessment of dispersive soil potential using multiple soil tests. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 48(2), 65–72.
- [9] Kolay, P. K., & Tiwari, A. K. (2011). Improvement of soil properties using cement and fly ash. *Applied Clay Science*, 52(3), 393–400.
- [10] Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., & Eskandari, G. H. (2016). Environmental concerns in chemical stabilization of dispersive soils. *Environmental Earth Sciences*, 75(17), 1346.
- [11] Esmacili-Falak, M., Katebi, H., Javadi, A., & Rahimi, S. (2017). Experimental investigation of stress and strain characteristics of frozen sandy soils-A case study of Tabriz subway. *Modares Civil Engineering journal*, 17(5), 13-23.
- [12] Alipour, R., Aminpour, H., & Dehghanzadeh, A. (2023). Investigating the effect of soil improvement by micropile method in marl soil: A case study of Bidboland, Khuzestan. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(12), 925–928.
- [13] Pakbaz, M. S., & Alipour, R. (2012). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied Clay Science*, 67–68, 1–4.
- [14] Chang, I., & Cho, G. C. (2019). Geotechnical behavior of a biopolymer-treated residual soil. *Geomechanics and Engineering*, 17(4), 419–428.
- [15] Kazemi, M., Khavasi, H., & Amini, F. (2020). Use of wheat straw protein hydrogel in soil improvement. *Construction and Building Materials*, 246, 118445.
- [16] Mahdavi, A., Ghasemi, M., & Ramezaniyanpour, A. A. (2021). Laboratory investigation of natural hydrogel effects on soil strength. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(6), 704–712.
- [17] Wang, L., Zhang, B., & Xu, Y. (2022). Soil improvement using corn zein and soy protein. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), 04021456.
- [18] Liu, X., Zhang, Y., & Chen, Y. (2021). Microbial and plant-based polymers for soil stabilization. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127773.
- [19] Gandomi, A. H., Akbarzadeh, M., & Alavi, A. H. (2023). Sustainable soil stabilization using plant-based polymers. *Environmental Geotechnics*, 10(1), 45–58.
- [20] Zhang, C., Zhao, Q., & Wu, J. (2022). Effect of drying-wetting cycles on biopolymer-treated soils. *Engineering Geology*, 298, 106524.
- [21] Kavazanjian, E., Ruy, S., & DeJong, J. T. (2015). Durability of bio-stabilized soils under cyclic conditions. *Geotechnical Special Publication*, 256, 322–331.
- [22] Gu, F., Wang, Y., & Chen, R. (2020). Biopolymers as green binders for soil stabilization. *Geotechnical Engineering Journal*, 35(4), 88–97.