

تأثیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی رس‌ها بر پتانسیل واگرایی و همگرایی خاک

سید حامد موسوی نژاد^۱، مجتبی طه‌وری^۲

کارشناسی ارشد عمران - گرایش راه و ترابری - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود - سمنان - ایران

DBDE^{۸۶}@CHMAIL.IR

کارشناسی ارشد جغرافیای شهری - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد یزد - یزد - ایران

mojtatabatahoori@gmail.com

چکیده

واگرایی خاک‌های رسی پدیده‌ای فیزیکوشیمیایی است که در آن نیروهای دافعه میان ذرات، به‌ویژه در حضور سدیم تبادلی و محلول، بر نیروهای جاذبه غلبه می‌کنند و ذرات رس پس از تماس با آب از یکدیگر جدا و در فاز مایع پراکنده می‌شوند. در مقابل، همگرایی یا فلوکولاسیون به تشکیل آرایش‌های پایدارتر و تجمع ذرات منجر می‌شود و نقش اساسی در حفظ ساختمان خاک، مقاومت در برابر فرسایش داخلی، نفوذپذیری و پایداری سازه‌های خاکی دارد. هدف این مقاله، تحلیل تلفیقی اثر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی رس‌ها بر گذار میان این دو حالت است. مرور حاضر بر منابع علمی منتشرشده در فاصله ۲۰۲۳ تا اوت ۲۰۲۶ متمرکز شده و متغیرهایی نظیر درصد سدیم تبادلی (ESP)، نسبت جذب سدیم (SAR)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، هدایت الکتریکی pH، (EC)، زتاپتانسیل، سطح ویژه، حدود اتربرگ، نوع و مقدار رس و ماهیت کاتیون‌های بین‌لایه‌ای را در کنار کانی‌های مونتموریلونیت، ایلیت، کائولینیت و ورمیکولیت بررسی می‌کند. شواهد جدید نشان می‌دهد که هیچ شاخص منفردی قادر به پیش‌بینی کامل واگرایی نیست؛ با این حال، ESP و SAR بالا، قدرت یونی پایین و فراوانی اسمکتیت سدیمی، به‌ویژه مونتموریلونیت، ترکیبی با ریسک بسیار بالا ایجاد می‌کنند. از سوی دیگر، کاتیون‌های دوظرفیتی مانند Ca^{2+} و Mg^{2+} با فشردن لایه مضاعف پخشیده، کاهش قدر مطلق زتاپتانسیل و ایجاد پل‌های کاتیونی، همگرایی و پایداری تجمعات را افزایش می‌دهند. داده‌های جدید همچنین نشان می‌دهند که pH، نوع آنیون، اندازه ذره، بار لایه‌ای و ساختمان بین‌لایه‌ای رس می‌توانند پاسخ خاک را به‌طور معنی‌دار تعدیل کنند. بر این اساس، مقاله یک چارچوب ارزیابی چندمعیاره پیشنهاد می‌کند که در آن آزمون‌های پین‌هول، خرده‌رس، هیدرومتر دوگانه و اندازه‌گیری‌های شیمیایی با XRD، SEM و در صورت امکان زتاپتانسیل تلفیق می‌شوند. نتیجه اصلی این است که پتانسیل واگرایی و همگرایی محصول برهم‌کنش همزمان «کانی-سطح-کاتیون-محلول منفذی-ساختار» است و ارزیابی مهندسی باید از تکیه بر مرزهای ثابت یک متغیر به سمت تحلیل چندپارامتری و مکانیزم‌محور حرکت کند.

واژگان کلیدی: خاک واگرا؛ همگرایی؛ رس؛ مونتموریلونیت؛ کائولینیت؛ درصد سدیم تبادلی؛ نسبت جذب سدیم

۱. مقدمه

رفتار خاک‌های رسی در تماس با آب تنها تابع اندازه ذرات یا درصد رس نیست، بلکه از مجموعه‌ای از فرایندهای سطحی، الکتروشیمیایی و کانی‌شناختی ناشی می‌شود. در خاک واگرا، ذرات رس که در حالت خشک یا نیمه‌خشک ممکن است ظاهراً متراکم و مقاوم به نظر برسند، پس از تماس با آب کم‌نمک می‌توانند از آرایش تجمعی خارج شوند و به‌صورت ذرات منفرد یا خوشه‌های بسیار کوچک در آب پراکنده شوند. این تفاوت میان ظاهر مکانیکی اولیه و پایداری واقعی در محیط آبی، علت بسیاری از شکست‌های پیش‌بینی‌نشده در خاکریزها، کانال‌ها، هسته سدهای خاکی، شیب‌ها و بستر راه است. مرور نظام‌مند Vakili و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که واگرایی در کشورهای متعدد و به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک مسئله‌ای فراگیر است و استفاده از خاک‌های واگرا بدون شناسایی و اصلاح می‌تواند به فرسایش داخلی و piping منتهی شود [۱].

تفاوت اصلی واگرایی با فرسایش معمولی در این است که جداسدن ذرات در خاک واگرا الزاماً به تنش برشی هیدرولیکی زیاد نیاز ندارد. هنگامی که سطح صفحات رسی بار منفی بالایی دارد و سدیم تک‌ظرفیتی بخش قابل توجهی از کمپلکس تبادل را اشغال کرده است، لایه مضاعف الکتریکی توسعه یافته و فاصله مؤثر میان صفحات افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی آب با قدرت یونی پایین می‌تواند نیروی دافعه را تشدید کند و خاک در برابر جریان‌های کم‌انرژی نیز حساس شود. مطالعه Shah و Mohd Nazer در ۲۰۲۶ این نکته را به‌صورت کمی تقویت کرده است: خاک‌های واگرا در آزمون پین‌هول نرخ جداسدگی بسیار بیشتر و تنش برشی بحرانی بسیار کمتری از خاک‌های غیرواگرا نشان دادند و SAR، ESP و pH از مهم‌ترین پارامترهای خاکی مرتبط با رفتار بودند [۲].

در برابر واگرایی، همگرایی یا فلوکولاسیون حالتی است که در آن ذرات رس به دلیل کاهش دافعه الکترواستاتیکی و افزایش جاذبه‌های بین‌ذره‌ای به یکدیگر نزدیک می‌شوند و ساختارهای لبه-به-سطح، لبه-به-لبه یا سطح-به-سطح تشکیل می‌دهند. این فرایند می‌تواند در اثر افزایش غلظت الکترولیت، حضور Ca^{2+} و Mg^{2+} ، کاهش سدیم تبادلی، تغییر pH یا اصلاح سطح کانی رخ دهد. همگرایی معمولاً با افزایش پایداری خاکدانه‌ها، کاهش رس قابل پراکنش در آب و افزایش مقاومت در برابر فرسایش همراه است، هرچند در برخی سامانه‌های بسیار رسی یا تحت تنش‌های ویژه، فلوکولاسیون لزوماً به معنای افزایش همه شاخص‌های مکانیکی نیست و باید در مقیاس ساختاری و ژئوتکنیکی ارزیابی شود.

کانی‌شناسی در تعیین حساسیت خاک به شیمی آب نقش محوری دارد. مونتموریلونیت به دلیل ساختار ۲:۱، سطح ویژه زیاد، بار لایه‌ای و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، قابلیت هیدراتاسیون و تورم بین‌لایه‌ای بیشتری از کائولینیت دارد. مطالعه Zhang و همکاران در ۲۰۲۵ نشان داد که مونتموریلونیت سدیمی پس از هیدراتاسیون کامل فاصله بین‌لایه‌ای بیشتری از نوع کلسیمی پیدا می‌کند و مقدار بیشتر آب در آن عمدتاً به جذب بین‌لایه‌ای مربوط است [۳]. از سوی دیگر، پژوهش‌های جدید درباره بار لایه‌ای مونتموریلونیت نشان داده‌اند که کاهش بار و تعداد لایه‌های قابل انبساط می‌تواند به‌طور مستقیم رفتار جذب آب، CEC و تورم را تغییر دهد [۴]. بنابراین «نام کانی» به‌تنهایی کافی نیست و حالت کاتیونی و بار ساختاری آن نیز باید مشخص شود.

هدف این مقاله ارائه یک تحلیل یکپارچه از پیوند میان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، کانی‌شناسی و پتانسیل واگرایی/همگرایی است. پرسش محوری آن است که چگونه متغیرهای شیمیایی محلول مغذی و مشخصات سطحی کانی‌ها، در کنار شاخص‌های مهندسی نظیر حدود اتربرگ و توزیع دانه‌بندی، مرز میان خاک پایدار و خاک مستعد پراکنش را تعیین می‌کنند. رویکرد مقاله بر این اصل استوار است که واگرایی یک «حالت سامانه» است نه یک ویژگی ثابت و مستقل خاک؛ یعنی یک نمونه می‌تواند با تغییر کیفیت آب، نوع کاتیون غالب یا وضعیت شیمیایی از حالت نسبتاً همگرا به حالت واگرا منتقل شود.

۲. روش مرور و چارچوب تحلیل

این مقاله از نوع مرور تحلیلی-کاربردی است. برای حفظ به‌روز بودن شواهد، تمرکز اصلی بر مقالات داوری‌شده منتشرشده از سال ۲۰۲۳ تا اوت ۲۰۲۶ قرار گرفت. جست‌وجوی هدفمند بر کلیدواژه‌های clay dispersion، dispersive soil، sodium-rich clay، exchangeable sodium percentage، sodium adsorption ratio، clay internal erosion و mineralogy، zeta potential، montmorillonite، kaolinite، flocculation شد و مقالاتی انتخاب شدند که حداقل یکی از سه محور «شناسایی واگرایی»، «تبیین مکانیزم فیزیکوشیمیایی/کانی‌شناختی» یا «تغییر واگرایی از طریق اصلاح شیمی خاک» را پوشش می‌دادند. مقالات مروری جدید برای ساخت چارچوب مفهومی و مطالعات آزمایشگاهی برای تحلیل روابط کمی استفاده شدند.

به دلیل تفاوت در روش‌های آزمایش، نوع خاک، کیفیت آب و معیارهای طبقه‌بندی، از تجمیع آماری یا فراتحلیل عددی اجتناب شد. در عوض، نتایج بر اساس پنج لایه شواهد مقایسه شدند: نخست، ترکیب کانی‌شناسی و ساختار لایه‌ای؛ دوم، متغیرهای تبادل یونی شامل ESP، CEC و SAR؛ سوم، ویژگی‌های محلول شامل pH، EC و نوع الکترولیت؛ چهارم، شاخص‌های فیزیکی و سطحی شامل اندازه ذره، سطح ویژه، حدود اتربرگ و زتاپتانسیل؛ و پنجم، پاسخ مهندسی شامل پهن‌هول، خرده‌رس، هیدرومتر دوگانه، مقاومت و ریزساختار. این رویکرد امکان می‌دهد تناقض‌های ظاهری میان آزمون‌ها بر اساس تفاوت مکانیزم اندازه‌گیری توضیح داده شود.

۳. مبانی فیزیکوشیمیایی واگرایی و همگرایی

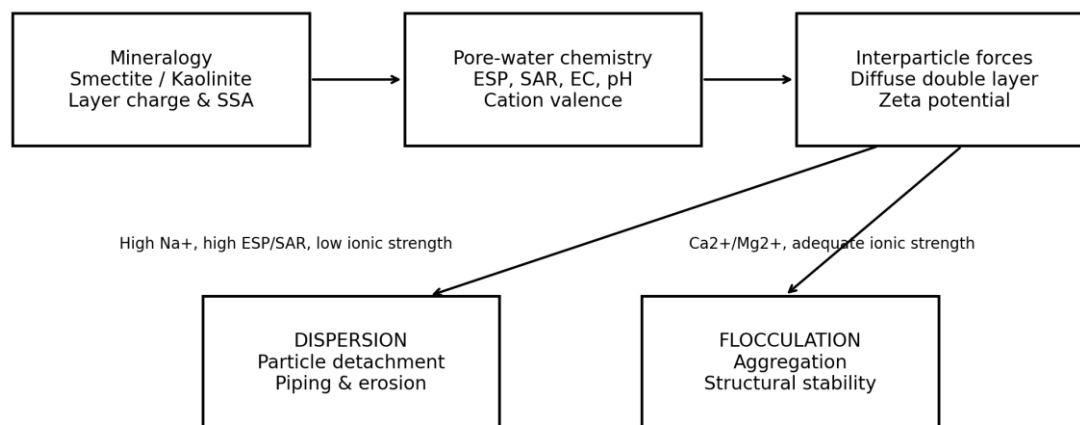
۳-۱. بار سطحی، لایه مضاعف پخشیده و تعادل نیروها

صفحات رسی به دلیل جانمایی هم‌ریخت در شبکه بلوری و نیز واکنش‌های پروتون‌گیری/پروتون‌دهی در لبه‌ها دارای بار الکتریکی هستند. بار منفی سطح، کاتیون‌های محلول را جذب می‌کند و در مجاورت ذره، لایه‌ای از یون‌های جبرانی شکل می‌گیرد. بخشی از این یون‌ها به سطح نزدیک و بخشی در لایه پخشیده توزیع می‌شوند. ضخامت مؤثر لایه مضاعف تابع غلظت الکترولیت، ظرفیت و نوع یون، دما و ویژگی‌های سطح است. در محیط با غلظت الکترولیت پایین و کاتیون تک‌ظرفیتی غالب، دافعه بین صفحات می‌تواند در فواصل بیشتری عمل کند؛ در حالی که افزایش غلظت نمک یا ورود یون‌های چندظرفیتی، لایه را فشرده و امکان نزدیک‌شدن صفحات را بیشتر می‌کند.

از دیدگاه DLVO، پایداری سوسپانسیون رس نتیجه رقابت میان جاذبه واندروالسی و دافعه الکترواستاتیکی است. هرچند خاک طبیعی از نظر شکل ذرات، ناهمگنی بار، مواد آلی، اکسیدها و محدودیت هندسی پیچیده‌تر از سامانه ایده‌آل است، چارچوب DLVO همچنان برای تفسیر روند کلی مفید است. افزایش سدیمی‌شدن معمولاً ارتفاع سد انرژی دافعه را افزایش می‌دهد و جداسدن ذرات را آسان‌تر می‌کند. در مقابل، کلسیم با کاهش ضخامت لایه مضاعف و ایجاد پیوندهای قوی‌تر میان سطوح، احتمال تماس و تشکیل فلوک را افزایش می‌دهد.

زتاپتانسیل شاخص تجربی پتانسیل الکتریکی در صفحه لغزش ذره است و به‌طور مستقیم «واگرایی خاک» را اندازه‌گیری نمی‌کند، اما اطلاعات مهمی از شدت پایداری الکترواستاتیکی سوسپانسیون می‌دهد. Kimura و همکاران در ۲۰۲۵ در چهار اسمکتیت مصنوعی نشان دادند که زتاپتانسیل، اندازه ذره و CEC با ساختار شبکه و رفتار رئولوژیک پراکنه‌ها مرتبط است و افزایش غلظت NaCl قدر مطلق زتاپتانسیل را کاهش می‌دهد [۵]. این یافته توضیح می‌دهد چرا تغییرات کوچک شیمی آب می‌تواند در رس‌های با سطح ویژه زیاد، تغییر بزرگ در رفتار ماکروسکوپی ایجاد کند.

Conceptual framework for clay dispersion-flocculation behavior



شکل ۱. چارچوب مفهومی اثر کانی‌شناسی و شیمی محلول بر واگرایی و همگرایی خاک (برچسب‌های شکل به زبان انگلیسی).

۳-۲. شاخص‌های شیمیایی کلیدی

درصد سدیم تبادلی یا ESP سهم سدیم از ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را بیان می‌کند و به صورت $ESP = (Na_{ex} / CEC) \times 100$ تعریف می‌شود. از نظر مکانیزمی، ESP بالا به معنای اشغال بخش بزرگ‌تری از جایگاه‌های سطحی توسط Na^+ است؛ یون تک‌ظرفیتی که در مقایسه با Ca^{2+} و Mg^{2+} توان کمتری برای فشردن لایه مضاعف و ایجاد پل میان صفحات دارد. بنابراین افزایش ESP اغلب با افزایش رس قابل پراکنش همراه است، ولی مقدار آستانه ثابت برای همه خاک‌ها وجود ندارد، زیرا نوع کانی، CEC و شوری زمینه‌ای پاسخ را تغییر می‌دهد.

نسبت جذب سدیم یا SAR بیشتر وضعیت محلول را بازتاب می‌دهد و معمولاً از رابطه $SAR = Na / \sqrt{Ca + Mg}$ بر حسب غلظت‌های میلی‌اکی‌والان یا میلی‌مول بر محاسبه می‌شود. SAR بالا تمایل سدیم برای غلبه در کمپلکس تبادلی را افزایش می‌دهد. مطالعه Luo و همکاران روی ۴۲ خاک شور-سدیمی در ۲۰۲۴ نشان داد که ESP مهم‌ترین متغیر توضیح‌دهنده نسبت واگرایی رس بود و پس از آن pH، سدیم تبادلی، بی‌کربنات، سدیم محلول، CEC، کربنات و SAR قرار داشتند [۶]. اهمیت این نتیجه در آن است که حتی در خاک‌هایی که از نظر بافت مشابه‌اند، ترکیب شیمیایی می‌تواند نسبت واگرایی را چند برابر تغییر دهد.

هدایت الکتریکی EC نماینده‌ای از غلظت یون‌های محلول و قدرت یونی است. از منظر کلئیدی، EC بالاتر معمولاً لایه مضاعف را فشرده و فلوکولاسیون را تسهیل می‌کند؛ اما این اثر همیشه به معنای بهبود پایدار خاک نیست، زیرا نوع نمک اهمیت دارد و شوری زیاد می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی یا ژئوشیمیایی دیگری ایجاد کند. در خاک سدیمی، ورود ناگهانی آب کم‌نمک، به‌ویژه پس از دوره‌ای از شوری، ممکن است با رقیق کردن الکترولیت‌ها و حفظ سدیم تبادلی، شرایط را برای واگرایی تشدید کند. این همان وضعیتی است که در رخدادهای بارندگی یا آبیگری سازه‌های خاکی می‌تواند بحرانی باشد.

pH بر بار متغیر لبه‌های رس، حلالیت کربنات‌ها و اکسیدها، گونه‌بندی آنیون‌ها و حتی CEC مؤثر است. قلیائیت زیاد اغلب همراه سدیمی‌شدن دیده می‌شود و می‌تواند بار منفی لبه‌ها را افزایش دهد، در نتیجه آرایش‌های لبه-به-سطح که در pH پایین‌تر امکان‌پذیرند تضعیف شوند. با این حال، pH به‌تنهایی شاخص قابل اتکایی برای طبقه‌بندی نیست و باید در کنار EC

و کاتیون‌های تبادلی تفسیر شود. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که آنیون‌ها نیز می‌توانند با تغییر رسوب‌گذاری، کمپلکس‌سازی یا قدرت یونی بر واگرایی اثر بگذارند؛ برای مثال، Heydari و همکاران در ۲۰۲۵ نشان دادند که نوع کود و آنیون همراه آن می‌تواند پاسخ واگرایی خاک‌های رسی پایین‌دست را تغییر دهد [۷].

جدول ۱. مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکوشیمیایی مرتبط با واگرایی و همگرایی

شاخص	معنای فیزیکی/شیمیایی	اثر غالب بر واگرایی	ملاحظه تفسیری
ESP	سهم سدیم تبادلی از کل CEC	افزایش ESP معمولاً واگرایی را تشدید می‌کند	آستانه به کانی‌شناسی و EC وابسته است
SAR	غلبه سدیم محلول نسبت به Ca و Mg	SAR بالا احتمال سدیمی‌شدن و دفعه را افزایش می‌دهد	شاخص محلول است و با ESP یکسان نیست
CEC	توان نگهداشت و تبادل کاتیون‌ها	CEC بالا در حضور Na می‌تواند حساسیت را زیاد کند	نوع کانی و بار لایه‌ای تعیین‌کننده است
EC	غلظت مؤثر الکترولیت‌ها	EC پایین در خاک سدیمی واگرایی را تسهیل می‌کند	نوع و ظرفیت یون‌ها مهم است
pH	وضعیت اسیدی-قلیایی و بار لبه‌ها	قلیائیت زیاد اغلب با واگرایی بیشتر همراه است	به‌تنهایی معیار طبقه‌بندی نیست
ز تا پتانسیل	پتانسیل الکتریکی صفحه لغزش	قدر مطلق زیادتر می‌تواند پایداری پراکنه را افزایش دهد	به غلظت نمک و کانی حساس است
سطح ویژه	مساحت واکنش‌پذیر کانی	سطح زیاد، اثر شیمی سطح را تقویت می‌کند	اسمکتیت‌ها معمولاً سطح ویژه بیشتری دارند

۴. نقش ویژگی‌های فیزیکی در پتانسیل واگرایی

مقدار رس، توزیع اندازه ذرات و ساختار منافذ سه عامل فیزیکی مهم هستند، اما رابطه آنها با واگرایی خطی نیست. افزایش درصد رس تعداد ذرات فعال و سطح ویژه را بالا می‌برد و در خاک سدیمی می‌تواند جرم بیشتری از ذرات قابل پراکنش تولید کند. در مقابل، اگر رس غالب کائولینیته و کمپلکس تبادلی غنی از کلسیم باشد، درصد رس زیاد الزاماً به واگرایی شدید منجر نمی‌شود. از سوی دیگر، وجود سیلت و ماسه چارچوب اسکلتی خاک را تغییر می‌دهد؛ واگرایی بخش ریزدانه می‌تواند باعث مهاجرت ذرات و گرفتگی گلوگاه منافذ شود و کاهش نفوذپذیری ثانویه ایجاد کند.

حد روانی و شاخص خمیری به دلیل وابستگی به سطح ویژه، جذب آب و ماهیت کانی می‌توانند سرنخ‌هایی از فعالیت رسی بدهند. مونتوریلونیت سدیمی غالباً حدود اتربرگ بالا و دامنه پلاستیسیته وسیع دارد. با این حال، خاک واگرا می‌تواند شاخص خمیری متوسط نیز داشته باشد و همبستگی میان پلاستیسیته و واگرایی همیشه مستقیم نیست. کاربرد حدود اتربرگ باید بیشتر برای تفسیر کانی‌شناسی احتمالی، حساسیت به آب و اثر اصلاح‌کننده‌ها باشد نه به عنوان آزمون مستقل واگرایی. Liu و همکاران در ۲۰۲۴ در مطالعه روش‌های اصلاح خاک واگرا، تغییرات پلاستیسیته را در کنار پین‌هول، خرده‌رس، هیدرومتر دوگانه و ESP ارزیابی کردند و نشان دادند که بهبود واقعی زمانی قابل استناد است که چند شاخص همزمان تغییر کنند [۸].

تخلخل و مسیر جریان نیز در تبدیل پراکنش کلونیدی به فرسایش مهندسی نقش دارند. یک خاک ممکن است از نظر شیمیایی مستعد واگرایی باشد، ولی اگر مسیرهای پیوسته جریان تشکیل نشوند، نرخ فرسایش داخلی محدود باقی بماند. در مقابل، ترک‌های انقباضی، ناهمگنی تراکم یا تماس با مصالح درشت‌دانه می‌توانند مسیر اولیه جریان ایجاد کنند و ذرات واگرا را به سرعت از شبکه خارج کنند. بنابراین ارزیابی پتانسیل واگرایی باید به مشخصات تراکم، رطوبت اولیه و ریزساختار نیز توجه کند.

در محیط‌های طبیعی، چرخه تر و خشک شدن، تغییرات فصلی EC و تغییر کیفیت آب باعث می‌شود حالت تجمعی خاک ثابت نباشد. ذراتی که در یک آب با شوری متوسط فلوکوله‌اند، ممکن است پس از شست‌وشوی املاح و کاهش ناگهانی EC پراکنده شوند. این ویژگی برای خاکریزهای مناطق خشک اهمیت زیادی دارد؛ زیرا خاک در دوره ساخت یا خشکی ممکن است پایدار دیده شود اما نخستین آبریزی یا بارش شدید پاسخ متفاوتی ایجاد کند.

۵. نقش کانی‌شناسی رس‌ها

۵-۱. مونتموریلونیت و گروه اسمکتیت

مونتموریلونیت یکی از حساس‌ترین کانی‌ها به شیمی محیط آبی است. ساختار ۲:۱ آن شامل یک ورقه اکتاهدرال میان دو ورقه تتراهدرال است و جانشینی هم‌ریخت موجب بار منفی پایدار در سطح پایه می‌شود. کاتیون‌های تبادلی در فضای بین‌لایه قرار می‌گیرند و آب می‌تواند با هیدراته کردن آنها فاصله بین لایه‌ها را افزایش دهد. هنگامی که کاتیون غالب Na^+ باشد، انرژی هیدراتاسیون و آزادی حرکت بین‌لایه‌ای شرایطی ایجاد می‌کند که تورم و جدایش لایه‌ها نسبت به نوع کلسیمی بیشتر است [۳].

در مونتموریلونیت، CEC بالا و سطح ویژه زیاد سبب می‌شود هر تغییر در ترکیب یونی محلول اثر گسترده‌ای بر برهم‌کنش ذرات داشته باشد. Ma و همکاران در ۲۰۲۵ نشان دادند که دستکاری بار لایه‌ای مونتموریلونیت به تغییر CEC، مقدار آب جذب‌شده، درصد لایه‌های قابل انبساط و رفتار تورمی منجر می‌شود [۴]. از این رو دو خاک با درصد مشابه مونتموریلونیت می‌توانند در صورت تفاوت بار لایه‌ای یا نوع کاتیون بین‌لایه‌ای پاسخ متفاوتی نشان دهند. در عمل، عبارت «مونتموریلونیتی» باید با اطلاعات تکمیلی درباره سدیمی یا کلسیمی بودن، CEC و شرایط آب همراه شود.

مطالعه Shah و Mohd Nazer نیز پیوند مستقیم کانی‌شناسی با فرسایش داخلی را نشان داد. در مقایسه کانی‌های مونتموریلونیت، ایلیت، ورمیکولیت و کائولینیت، خاک‌های غنی از مونتموریلونیت و دارای SAR بالا بیشترین حساسیت به پراکنش داشتند، در حالی که خاک‌های کائولینیتی و ورمیکولیتی تقویت‌شده با کاتیون‌های دوظرفیتی پایداری تجمعی بیشتری نشان دادند [۲]. این نتیجه تأکید می‌کند که اثر کانی و اثر شیمی محلول باید همزمان دیده شوند.

۵-۲. کائولینیت

کائولینیت کانی ۱:۱ با یک ورقه تتراهدرال و یک ورقه اکتاهدرال است. اتصال نسبتاً قوی هیدروژنی میان لایه‌ها مانع تورم بین‌لایه‌ای گسترده می‌شود و CEC و سطح ویژه آن معمولاً بسیار کمتر از اسمکتیت‌هاست. در نتیجه حساسیت آن به تغییر کاتیون بین‌لایه‌ای کمتر است و رفتار همگرایی/واگرایی بیشتر تحت کنترل بار لایه‌ها، pH، غلظت الکترولیت و آرایش ذرات قرار می‌گیرد. به همین دلیل خاک‌های کائولینیتی غالباً در برابر واگرایی سدیمی مقاوم‌تر از خاک‌های مونتموریلونیتی هستند، اگرچه در شرایط سدیمی شدید و EC پایین همچنان امکان پراکنش وجود دارد.

تفاوت هیدراتاسیون کائولینیت و مونتوریلونیت در مطالعه Zhang ۲۰۲۵ و همکاران به روشنی مشاهده شد؛ جذب آب کائولینیت عمده‌تر سطحی است، در حالی که مونتوریلونیت علاوه بر سطح خارجی، فضای بین‌لایه‌ای را نیز درگیر می‌کند [۳]. این تفاوت باعث می‌شود پاسخ حجمی و حساسیت به کاتیون‌ها در مونتوریلونیت شدیدتر باشد. از نظر مهندسی، خاک کائولینیتی با ESP متوسط ممکن است به اندازه خاک اسمکتیتی با همان ESP واگرا نباشد، بنابراین استفاده از یک حد شیمیایی واحد برای هر دو می‌تواند به طبقه‌بندی اشتباه منجر شود.

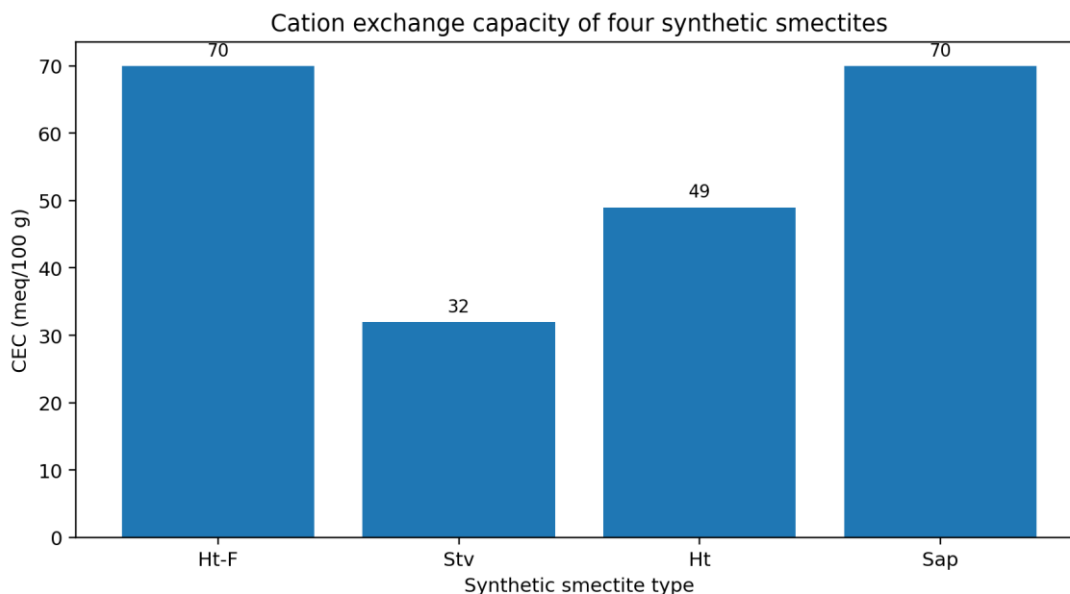
۳-۵. ایلیت، ورمیکولیت و کانی‌های مختلط

ایلیت نیز ساختار ۲:۱ دارد اما پتاسیم بین‌لایه‌ای بخش زیادی از لایه‌ها را به هم متصل می‌کند و قابلیت تورم آن کمتر از اسمکتیت است. CEC ایلیت معمولاً در محدوده میانی قرار دارد و پاسخ آن به شیمی آب بین کائولینیت و مونتوریلونیت است. ورمیکولیت CEC بالا دارد ولی حضور کاتیون‌های دوزرفیتی و شرایط طبیعی تشکیل می‌تواند آرایش نسبتاً پایدار ایجاد کند. در خاک‌های واقعی، فازهای بین‌لایه‌ای و کانی‌های مختلط سبب می‌شوند پاسخ از الگوی ساده یک کانی خالص فاصله بگیرد.

وجود کوارتز، کلسیت، دولومیت، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و مواد آلی نیز بر رفتار رس غالب اثر می‌گذارد. کربنات‌ها می‌توانند منبع کلسیم باشند و در برخی خاک‌های آهکی از تخریب شدید ساختمان جلوگیری کنند. مطالعه Öztürk و همکاران در ۲۰۲۳ روی خاک آهکی و رسی آناتولی نشان داد که اثر مخرب آب سدیمی بر تجمعات در چنین خاکی به دلیل فراوانی رس و آهک تا حدی تعدیل می‌شود، هرچند تخریب در لایه‌های سطحی و تحت دبی بالاتر آب سدیمی همچنان قابل توجه بود [۹]. بنابراین بافت و کانی‌های غیررسی نیز در تفسیر ریسک باید منظور شوند.

جدول ۲. مقایسه کیفی کانی‌های رسی از نظر ویژگی‌های مؤثر بر واگرایی

کانی	ساختار غالب	CEC نسبی	تورم بین‌لایه‌ای	حساسیت معمول به Na و EC پایین	برداشت مهندسی
مونتوریلونیت/اسمکتیت	۲:۱	زیاد	زیاد	بسیار زیاد	ریسک بالا، به‌ویژه در حالت سدیمی
ورمیکولیت	۲:۱	زیاد	متوسط تا زیاد	متغیر	نوع کاتیون بین‌لایه‌ای بسیار مهم است
ایلیت	۲:۱	متوسط	کم	متوسط	پاسخ بین کائولینیت و اسمکتیت
کائولینیت	۱:۱	کم	ناچیز	کم تا متوسط	معمولاً پایدارتر، ولی مصون از واگرایی نیست
کلریت/فازهای مختلط	۲:۱:۱ یا مختلط	کم تا متوسط	کم	وابسته به ترکیب	نیازمند XRD و تحلیل شیمیایی



Source: Kimura, Tanabe & Shinoki (2025)

نمودار ۱. ظرفیت تبادل کاتیونی چهار اسمکتیت مصنوعی بر اساس داده‌های (Kimura et al. ۲۰۲۵). عنوان و محورها به زبان انگلیسی.

۶. برهم‌کنش کانی‌شناسی و شیمی محلول: چرا یک آستانه ثابت کافی نیست؟

یکی از مهم‌ترین نتایج مطالعات جدید آن است که حدهای ثابت برای ESP، SAR یا درصد رس باید با احتیاط استفاده شوند. برای نمونه، ESP یکسان در خاکی با CEC پایین و کائولینیت غالب با خاکی با CEC بالا و اسمکتیت غالب، تعداد مطلق جایگاه‌های اشغال‌شده توسط سدیم و شدت آب‌دوستی سطح را یکسان نشان نمی‌دهد. افزون بر آن، EC بالاتر می‌تواند اثر سدیم را تا حدی پنهان کند و با کاهش ضخامت لایه مضاعف، خاک را در زمان آزمایش پایدار نشان دهد؛ اما پس از شست‌وشوی املاح، همان خاک به حالت واگرا نزدیک شود.

Luo و همکاران در ۲۰۲۴ با استفاده از تحلیل همبستگی، جنگل تصادفی و رگرسیون چندمتغیره نشان دادند که نسبت واگرایی رس با مجموعه‌ای از پارامترها ارتباط دارد و ESP بیشترین نقش توضیحی را داشت [۶]. اهمیت این نتیجه در طراحی ژئوتکنیکی آن است که شناسایی باید بر «پروفایل متغیرها» متکی باشد. خاک با ESP بالا، EC پایین و CEC بالا در حضور اسمکتیت باید حتی اگر یک آزمون فیزیکی نتیجه مرزی دهد، به عنوان خاک پرریسک در نظر گرفته شود.

از سوی دیگر، شیمی آب ورودی بخشی از مسئله است. سازه خاکی ممکن است با آب کارگاه، آب زیرزمینی، بارندگی یا آب مخزن با ترکیب‌های متفاوت مواجه شود. بنابراین آزمایش واگرایی با آب مقطر یا آب استاندارد باید با بررسی کیفیت آب واقعی تکمیل شود. اگر آب بهره‌برداری EC پایین و SAR بالا داشته باشد، خطر واگرایی افزایش می‌یابد. اگر آب حاوی Ca^{2+} باشد، فلوکولاسیون تقویت می‌شود، ولی رسوب‌گذاری و تغییرات طولانی‌مدت نیز باید بررسی شوند.

مفهوم «غلظت بحرانی فلوکولاسیون» نیز در تفسیر رفتار مهم است. برای هر کانی و هر ترکیب یونی، غلظتی وجود دارد که بالاتر از آن برخورد ذرات احتمال بیشتری برای چسبیدن و تشکیل فلوک دارد. این مقدار برای کاتیون‌های چندظرفیتی عموماً بسیار کمتر از کاتیون‌های تک‌ظرفیتی است. بنابراین افزودن مقدار محدود کلسیم می‌تواند اثر بسیار بیشتری از همان

مقدار مولی سدیم بر پایداری داشته باشد. پژوهش‌های اصلاحی جدید که از گچ، PAC، مواد غنی از پتاسیم یا پسماندهای کلسیمی استفاده کرده‌اند، در عمل از همین سازوکار بهره می‌برند.

۷. شواهد تجربی جدید درباره تغییر واگرایی

مطالعات ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ علاوه بر شناسایی عوامل واگرایی، با تغییر عمده شیمی خاک شواهد مکانیزمی مهمی فراهم کرده‌اند. Hassan و همکاران در ۲۰۲۳ با استفاده از خاکستر چوب غنی از پتاسیم گزارش کردند که مقدار بهینه ۱۰ درصد، پتانسیل واگرایی و درصد سدیم را به‌طور چشمگیری کاهش داد و همراه با تبادل یونی، فلوکولاسیون و واکنش‌های پوزولانی سبب افزایش مقاومت و کاهش تراکم‌پذیری شد [۱۰]. در مطالعه دیگری از همین گروه، ماده غنی از یون‌های محلول پتاسیم توانست سدیم را از کمپلکس جابه‌جا کند و پایداری ساختار را از طریق فلوکولاسیون و تجمع افزایش دهد [۱۱].

استفاده از گرد مرمر ریز نیز نشان داد که تأمین کلسیم و ایجاد محصولات سیمانی می‌تواند همزمان واگرایی و فرسایش داخلی را کاهش دهد. Hassan و همکاران در ۲۰۲۳ برای دو خاک سدیم‌دار کاهش قابل توجه پتانسیل واگرایی و سدیم را پس از تیمار گزارش کردند و تصاویر XRD/SEM تشکیل ساختار متراکم‌تر و محصولات سیمانی را تأیید کرد [۱۲]. Fatima و همکاران نیز در همان سال با گرد کوره گچ پاریس کاهش پتانسیل واگرایی از حدود ۷۴ درصد به کمتر از ۹ درصد و افزایش زیاد مقاومت فشاری تک‌محوری را در شرایط بهینه گزارش کردند [۱۳]. این نتایج نشان می‌دهد اصلاح شیمی سطح و ایجاد پیوندهای جدید میان ذرات می‌تواند رفتار کلئیدی و مکانیکی را به صورت هم‌زمان تغییر دهد.

در ۲۰۲۴، Xu و همکاران استفاده از پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) را بررسی کردند و نشان دادند حدود ۱/۵ درصد PAC می‌تواند خاک بسیار واگرا را به طبقه غیرواگرا منتقل کند و همزمان سدیم تبادلی را کاهش دهد و مقاومت را افزایش دهد [۱۴]. مکانیسم پیشنهادی شامل خنثی‌سازی بار، فلوکولاسیون، پرشدگی و سیمانی‌شدن بین‌ذره‌ای بود. در مطالعه Liu و همکاران، ترکیب الکتروکینتیک و افزودنی شیمیایی نسبت به روش‌های منفرد اثر بیشتری در کاهش واگرایی و بهبود مقاومت داشت [۸]. این شواهد تأکید می‌کنند که واگرایی در مقیاس مهندسی قابل کنترل است، اما اصلاح مؤثر باید دقیقاً مکانیزم غالب یعنی سدیمی‌شدن، لایه مضاعف یا ضعف ریزساختار را هدف قرار دهد.

در ۲۰۲۵، Hassan و همکاران ترکیب لاتکس SBR و پودر Chem-lite را بررسی کردند. ترکیب بهینه ۱/۵ درصد SBR و ۳ درصد CCP پس از ۲۸ روز، واگرایی، سدیم و پلاستیسیته را به ترتیب حدود ۶۱/۷، ۳۸ و ۵۰/۴ درصد کاهش داد و خاک را به حالت غیرواگرا منتقل کرد [۱۵]. تحلیل ریزساختاری نشان داد CCP از طریق تبادل یونی و واکنش‌های پوزولانی و SBR از طریق پوشش‌دهی ذرات و تشکیل شبکه پلیمری عمل می‌کند. نکته مهم این است که کاهش واگرایی فقط نتیجه افزایش مقاومت نیست؛ بلکه ابتدا باید پایداری کلئیدی و پیوند بین‌ذره‌ای اصلاح شود.

Heydari و همکاران در ۲۰۲۵ از زاویه متفاوتی به مسئله پرداختند و نشان دادند ورود بلندمدت کودهای شیمیایی می‌تواند خاک رسی غیرواگرا را به سمت واگرایی سوق دهد [۱۷]. افزایش غلظت کودها، ایجاد حفرات جدید، ضعف تماس ذرات و تخریب ریزساختار در SEM مشاهده شد. این یافته برای پروژه‌های مجاور اراضی کشاورزی، زهکش‌ها و کانال‌های انتقال آب اهمیت دارد؛ زیرا ترکیب شیمیایی آب زهکش می‌تواند در طول زمان شرایط ژئوشیمیایی خاکریز را تغییر دهد.

جدول ۳. نمونه‌ای از شواهد جدید ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۶ درباره عوامل یا اصلاح واگرایی

مطالعه	سال	سامانه/متغیر اصلی	یافته مرتبط با واگرایی/همگرایی
Vakili و همکاران [۱]	۲۰۲۴	مرور شناسایی و تثبیت	سدیم تبادلی، سطح ویژه و شیمی آب از عوامل محوری؛ ضرورت چندآزمونی
Luo و همکاران [۶]	۲۰۲۴	۴۲ خاک شور-سدیمی	ESP مهم‌ترین متغیر توضیح‌دهنده نسبت واگرایی رس
Shah و Mohd Nazer [۲]	۲۰۲۶	پین‌هول و کانی‌های مختلف	موتموریلونیت + SAR بالا بیشترین حساسیت؛ پایداری را افزایش داد
Kimura و همکاران [۵]	۲۰۲۵	اسمکتیت‌های مصنوعی	CEC و زئپتانسیل با ساختار شبکه و رفتار رئولوژیک مرتبط‌اند
Xu و همکاران [۱۴]	۲۰۲۴	PAC	حدود ۱/۵٪ PAC خاک واگرا را غیرواگرا کرد و Na تبادلی را کاهش داد
Hassan و همکاران [۱۰]	۲۰۲۳	خاکستر غنی از K	تبادل یونی و فلوکولاسیون؛ کاهش شدید واگرایی و درصد سدیم
Hassan و همکاران [۱۵]	۲۰۲۵	SBR + CCP	کاهش واگرایی، سدیم و پلاستیسیته همراه با تراکم ریزساختار
Heydari و همکاران [۷]	۲۰۲۵	کودهای شیمیایی	افزایش غلظت کودها می‌تواند خاک غیرواگرا را در زمان به حالت ناپایدار ببرد

۸. روش‌های شناسایی و ارزیابی

۸-۱. آزمون خرده‌رس (Crumb test)

آزمون خرده‌رس یکی از سریع‌ترین روش‌های مشاهده کیفی پراکنش است. یک قطعه کوچک خاک در آب قرار داده می‌شود و تشکیل هاله کدورت یا ابری از ذرات رس پیرامون نمونه مشاهده می‌شود. مزیت آن سادگی و سرعت است، اما نتیجه به آماده‌سازی نمونه، خشک‌شدگی، کیفیت آب و قضاوت چشمی حساس است. خاکی که در این آزمون واکنش ضعیف دارد لزوماً غیرواگرا نیست، به‌ویژه اگر شوری محلول منافذ در زمان آزمون مانع پراکنش اولیه شود.

بنابراین خرده‌رس باید به عنوان غربالگری استفاده شود نه آزمون قطعی. مطالعات جدید نیز همین رویکرد را دنبال کرده‌اند و آن را در کنار پین‌هول، هیدرومتر دوگانه و شاخص‌های شیمیایی به کار برده‌اند [۸، ۱۴].

۸-۲. آزمون پین‌هول

آزمون پین‌هول مستقیماً مقاومت نمونه متراکم‌شده را در برابر جریان آب از یک مجرای کوچک ارزیابی می‌کند و از این نظر به پدیده piping نزدیک‌تر است. تغییر رنگ جریان خروجی، افزایش دبی و بزرگ‌شدن سوراخ نشانه‌های رفتار واگرا هستند. پژوهش ۲۰۲۶ نشان داد این آزمون قادر است تفاوت نرخ جداسازی و تنش برشی بحرانی خاک‌های با کانی و شیمی متفاوت را آشکار کند [۲].

با وجود ارزش زیاد پین‌هول، نتیجه آن نیز تابع دانسیته خشک، رطوبت تراکم، گرادیان، نوع آب و شرایط نمونه است. برای طراحی، بهتر است نمونه‌ها در محدوده تراکم واقعی پروژه و با آب‌های نماینده شرایط بهره‌برداری آزمایش شوند. اگر پروژه در معرض آب کم‌نمک پس از دوره شوری قرار دارد، سناریوی شست‌وشو نیز باید شبیه‌سازی شود.

۳-۸. هیدرومتر دوگانه و شاخص رس قابل پراکنش

هیدرومتر دوگانه تفاوت میان مقدار ذرات ریز در حالت پراکنش مکانیکی/شیمیایی کامل و حالت بدون عامل پراکنده‌کننده را می‌سنجد. نسبت حاصل می‌تواند درصد واگرایی را نشان دهد. مزیت روش، عددی بودن نتیجه است؛ محدودیت آن این است که شرایط سوسپانسیون آزمایشگاهی با ساختار متراکم خاک در محل تفاوت دارد. از این رو ممکن است نمونه در هیدرومتر واگرا ولی در پین‌هول پاسخ متوسط نشان دهد یا برعکس. این اختلاف خطا نیست؛ بلکه هر آزمون جنبه متفاوتی از سامانه را اندازه‌گیری می‌کند.

Luo و همکاران مفهوم نسبت واگرایی رس را با شاخص‌های کدورت و زتاپتانسیل مقایسه کردند و نتیجه گرفتند CDR برای پیش‌بینی وضعیت واگرایی خاک‌های شور-سدیمی عملکرد مناسبی دارد [۶]. در پروژه‌های پژوهشی، اندازه‌گیری همزمان رس قابل پراکنش در آب، کدورت و زتاپتانسیل می‌تواند پیوند میان پاسخ فیزیکی و شیمی سطح را روشن کند.

۴-۸. تحلیل شیمیایی، XRD و ریزساختار

اندازه‌گیری CEC، کاتیون‌های تبادلی، ESP، SAR، EC و pH برای تبیین علت واگرایی ضروری است. بدون این داده‌ها، نتیجه آزمون فیزیکی صرفاً طبقه‌بندی است و امکان پیش‌بینی تغییر رفتار در برابر آب دیگر محدود می‌ماند. XRD برای تشخیص مونتموریلونیت، ایلیت، کائولینیت و فازهای غیررسی به کار می‌رود و در نمونه‌های اسمکتیتی می‌توان با تیمارهای مناسب اطلاعات بیشتری از لایه‌های قابل انبساط به دست آورد.

SEM و در صورت نیاز EDS مکمل مناسبی برای مشاهده آرایش ذرات، حفرات، تماس‌ها و محصولات سیمانی هستند. مطالعه Heydari ۲۰۲۵ و همکاران نشان داد ترکیب آزمون‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی نسبت به اتکا به هر کدام به تنهایی، تفسیر دقیق‌تری از تخریب ناشی از مواد شیمیایی فراهم می‌کند [۷]. در مطالعات تثبیت نیز XRD و SEM برای اثبات تشکیل محصولات جدید و تراکم ریزساختار استفاده شده‌اند [۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵].

جدول ۴. مقایسه روش‌های ارزیابی واگرایی

روش	مقیاس پاسخ	مزیت اصلی	محدودیت اصلی	کاربرد پیشنهادی
خرده‌رس	کیفی/کلوئیدی	سریع و کم‌هزینه	حساس به مشاهده و شرایط آب	غربالگری اولیه
پین‌هول	هیدرولیکی/مهندسی	شبیه‌سازی مستقیم‌تر فرسایش مجرای	وابسته به تراکم و گرادیان	طبقه‌بندی اصلی در سازه خاکی
هیدرومتر دوگانه	ذره‌ای/کمی	محاسبه درصد پراکنش	ساختار واقعی خاک را بازنمایی کامل نمی‌کند	مقایسه نمونه‌ها و اصلاحات
ESP و SAR	شیمیایی	تبیین مکانیزم سدیمی‌شدن	آستانه‌های ثابت برای همه کانی‌ها معتبر نیست	تحلیل علت و حساسیت به آب
pH و EC	محلول منفذی	توصیف محیط الکتروشیمیایی	شاخص مستقیم واگرایی نیست	تفسیر همراه ESP/SAR

تعیین زمینه کانی‌شناختی	کمی‌سازی دقیق نیازمند روش مناسب است	تشخیص کانی‌های حساس	کانی‌شناسی	XRD
تأیید مکانیزم و اصلاح	موضعی و نسبتاً پرهزینه	مشاهده تماس‌ها و محصولات جدید	ریزساختار	SEM/EDS
پژوهش پیشرفته و مدل‌سازی	نیازمند آماده‌سازی و تجهیزات	شاخص حساس به بار و الکترولیت	سطحی/کلوئیدی	ز تاپتانسیل

۹. اثر نوع کاتیون و آنیون

ظرفیت یون مهم‌ترین عامل در قدرت فلوکوله‌کنندگی است. Ca^{2+} و Mg^{2+} در مقایسه با Na^{+} بار بیشتری دارند و برای خنثی‌سازی بار سطحی و کاهش ضخامت لایه مضاعف به غلظت کمتری نیاز دارند. کلسیم علاوه بر نقش الکتروستاتیکی می‌تواند در واکنش‌های پوزولانی یا رسوبی شرکت کند و پیوندهای پایدارتر ایجاد کند. Ziskin و همکاران در ۲۰۲۴ در یک باغ زیتون با خاک سدیمی نشان دادند افزودن مواد گچی و CaCl_2 توانست SAR را کاهش دهد و ماده گچی پایدارترین خاکدانه‌ها را ایجاد کرد [۱۶].

پتانسیم تک‌ظرفیتی است، با این حال در برخی خاک‌ها به دلیل شعاع هیدراته متفاوت، جذب اختصاصی‌تر و امکان جانشینی با سدیم، می‌تواند رفتار را نسبت به Na بهبود دهد. مطالعات Hassan و همکاران در ۲۰۲۳ نشان دادند مواد غنی از K محلول قادر به کاهش سدیم و افزایش فلوکولاسیون اند [۱۱، ۱۰]. این نکته نشان می‌دهد ظرفیت یون تنها عامل نیست و ویژگی‌های ویژه جذب، غلظت و واکنش‌های همراه نیز اهمیت دارند.

آنیون‌ها از طریق قدرت یونی، تشکیل کمپلکس، رسوب‌گذاری و تنظیم pH بر سامانه اثر می‌گذارند. کربنات و بی‌کربنات می‌توانند با کلسیم و منیزیم رسوب دهند و به صورت غیرمستقیم نسبت سدیم را افزایش دهند. سولفات در حضور کلسیم می‌تواند منبع مناسب برای اصلاح باشد. کلرید عمده‌الکترولیت محلول باقی می‌ماند. در ارزیابی کیفیت آب، بنابراین تمرکز صرف بر کاتیون‌ها کافی نیست و ترکیب کامل یونی باید بررسی شود.

۱۰. نقش CEC، سطح ویژه و ز تاپتانسیل به عنوان پل میان کانی و رفتار

CEC پلی میان ترکیب کانی و شیمی تبادلی خاک است. اسمکتیت‌ها به دلیل بار ساختاری بیشتر CEC بالاتری دارند و از این رو مقدار بیشتری کاتیون تبادلی را ذخیره می‌کنند. اگر این ظرفیت عمدتاً با Ca^{2+} اشغال شود، امکان تشکیل ساختار فلوکوله بالا است؛ ولی اگر Na^{+} غالب باشد، همان CEC بالا می‌تواند به ذخیره بزرگ سدیم و حساسیت بیشتر به رقیق شدن آب منجر شود. بنابراین CEC بالا ذاتاً «خوب» یا «بد» نیست و باید همراه با درصد اشغال کاتیون‌ها تفسیر شود.

Kimura و همکاران در ۲۰۲۵ در چهار اسمکتیت مصنوعی CEC‌های متفاوتی گزارش کردند و نشان دادند ترتیب قدر مطلق ز تاپتانسیل تا حد زیادی با CEC هم‌راستا است [۵]. نمودار ۱ بخشی از این داده‌ها را نشان می‌دهد. اهمیت مهندسی این یافته آن است که اندازه‌گیری CEC می‌تواند به عنوان شاخصی برای پتانسیل واکنش‌پذیری سطح به کار رود، اما برای فهم حالت واقعی سوسپانسیون، ز تاپتانسیل و EC نیز باید در نظر گرفته شوند.

سطح ویژه هرچه بیشتر باشد، تعداد نقاط تماس آب-کانی و سایت‌های تبادل بیشتر می‌شود. مونتموریلونیت نه فقط سطح خارجی بلکه سطح بین‌لایه‌ای قابل دسترس دارد. این ویژگی توضیح می‌دهد چرا تغییرات کوچک در آب منفذی می‌توانند تغییرات بزرگ در تورم، ویسکوزیته و پراکنش ایجاد کنند. در مقابل، کائولینیت سطح داخلی قابل انبساط ندارد و رفتار آن بیشتر از لبه‌ها و سطح خارجی تأثیر می‌پذیرد.

۱۱. پیامدهای ژئوتکنیکی واگرایی

فرسایش داخلی مهم‌ترین پیامد واگرایی در سازه‌های خاکی است. هنگامی که ذرات رسی جدا می‌شوند، جریان می‌تواند آنها را از مسیر منافذ یا ترک‌ها حمل کند. خروج ذرات سبب بزرگ‌شدن مسیر جریان و افزایش موضعی دبی می‌شود و یک بازخورد مثبت ایجاد می‌کند. در هسته سد، خاکنیز کانال یا دیواره حوضچه، این فرایند ممکن است به piping، نشست موضعی، فروچاله یا شکست پیشرونده منجر شود. مطالعه ۲۰۲۶ نشان داد خاک واگرا حتی در گرا دیان‌های کم، نرخ فرسایش بسیار بیشتری از خاک غیرواگرا دارد [۲].

پراکنش همچنین می‌تواند در مرحله‌ای دیگر موجب کاهش نفوذپذیری شود، زیرا ذرات جدا شده در منافذ کوچک‌تر رسوب و آنها را مسدود می‌کنند. بنابراین اثر واگرایی بر هدایت هیدرولیکی دوگانه است: در برخی مسیرها گرفتگی و کاهش نفوذ رخ می‌دهد، در حالی که در مسیرهای متمرکز یا ترک‌ها، فرسایش و افزایش اندازه مجرا رخ می‌دهد. این ناهمگنی سبب می‌شود استفاده از یک مقدار هدایت هیدرولیکی اولیه برای پیش‌بینی رفتار بلندمدت کافی نباشد.

در بستر راه و شیب‌ها، واگرایی می‌تواند مقاومت سطحی در برابر بارندگی و رواناب را کاهش دهد و به فرسایش شیاری، آبکند و ناپایداری موضعی منجر شود. در کشاورزی، پراکنش رس باعث سله‌بندی، کاهش نفوذ، کاهش تهویه و تخریب خاکدانه‌ها می‌شود. از این رو دانش واگرایی میان ژئوتکنیک، علوم خاک و مدیریت آب مشترک است و نتایج هر حوزه می‌تواند برای دیگری کاربرد داشته باشد.

۱۲. چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی چندمعیاره ریسک

بر اساس شواهد مرور شده، پیشنهاد می‌شود ارزیابی ریسک واگرایی در سه گام انجام شود. گام نخست «غربالگری زمینه‌ای» شامل درصد رس، حدود اتربرگ، pH، EC و XRD است. اگر اسمکتیت قابل توجه، قلیائیت بالا یا EC پایین مشاهده شود، نمونه وارد گام دوم می‌شود. گام دوم «تشخیص شیمیایی-هیدرولیکی» شامل CEC، کاتیون‌های تبادلی، ESP، SAR، خرده‌رس، هیدرومتر دوگانه و پین‌هول است. گام سوم «تحلیل حساسیت» است که در آن کیفیت آب واقعی پروژه، تغییرات فصلی، شست‌وشوی نمک و حالت تراکم بررسی می‌شود.

در این چارچوب، هیچ نتیجه مرزی به تنهایی حکم نهایی نمی‌دهد. برای مثال، اگر پین‌هول نتیجه متوسط ولی XRD اسمکتیت بالا، ESP زیاد و آب بهره‌برداری EC پایین باشد، ریسک باید بالا تلقی شود و آزمایش تکراری تحت سناریوی آب واقعی انجام گیرد. برعکس، اگر ESP متوسط باشد ولی خاک کائولینیتی، غنی از کلسیم و دارای EC مناسب باشد و سه آزمون فیزیکی عدم واگرایی را نشان دهند، احتمال خطر کمتر است.

جدول ۵. یک ماتریس مفهومی ارائه می‌کند. این جدول برای جایگزینی معیارهای استاندارد نیست، بلکه ابزار تصمیم‌یار است و باید با شرایط محلی، اهمیت سازه و عدم قطعیت داده‌ها تنظیم شود.

جدول ۵. ماتریس مفهومی پیشنهادی برای برآورد ریسک واگرایی

وضعیت کانی‌شناسی/شیمیایی	EC محلول	ESP/SAR	نتیجه فیزیکی	آزمون‌های سطح پیشنهادی	ریسک
اسمکتیت زیاد، Na غالب	پایین	بالا	حداقل یک آزمون مثبت	بسیار زیاد	
اسمکتیت متوسط یا ابلیت زیاد	پایین تا متوسط	متوسط تا بالا	نتیجه مرزی/متناقض	زیاد؛ نیازمند آزمون تکمیلی	
کائولینیت غالب، Ca/Mg کافی	متوسط	کم تا متوسط	عمدتاً منفی	کم تا متوسط	
هر کانی با آب بهره‌برداری بسیار کم‌نمک پس از دوره شوری	کاهش سریع	متوسط تا بالا	وابسته به شرایط	ریسک گذار؛ شست‌وشو باید شبیه‌سازی شود	
پس از اصلاح کلسیمی/پلیمری مؤثر	متوسط تا بالا	کاهش یافته	منفی در چند آزمون	کمتر، مشروط به دوام اصلاح	

۱۳. بحث

مرور مطالعات جدید نشان می‌دهد دیدگاه کلاسیک «خاک واگرا = خاک با سدیم بالا» لازم اما ناکافی است. سدیم متغیر محوری است، اما اثر آن از طریق کانی و محلول اعمال می‌شود. در خاک اسمکتیتی با CEC بالا، افزایش سدیم نه فقط بار الکتروستاتیکی بلکه هیدراتاسیون بین‌لایه‌ای و تورم را نیز تقویت می‌کند. در کائولینیت، نبود تورم بین‌لایه‌ای گسترده باعث می‌شود همان تغییر شیمیایی اثر متفاوتی داشته باشد. بنابراین لازم است مفهوم واگرایی به صورت یک تابع چندمتغیره از کانی، بار سطح، کاتیون، قدرت یونی و ساختار تعریف شود.

دومین نکته مهم، وابستگی شدید رفتار به کیفیت آب است. اصطلاح «واگرایی خاک» ممکن است این تصور را ایجاد کند که ویژگی ثابت نمونه است، در حالی که یک خاک سدیمی در محلول نسبتاً شور می‌تواند موقتاً فلوکوله باشد و پس از رقیق شدن محلول پراکنده شود. این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دوچندان دارد، زیرا چرخه‌های تبخیر و بارندگی EC را به‌طور متناوب تغییر می‌دهند. در طراحی سازه‌های آبی، کیفیت آب مخزن و زه‌آب باید جزئی از شناسایی ژئوتکنیکی باشد.

سوم، عدم توافق میان آزمون‌ها لزوماً ضعف روش نیست بلکه بازتاب مقیاس‌های متفاوت است. خرده‌رس پایداری یک کلوخه در آب ساکن، هیدرومتر قابلیت پراکنش ذرات در سوسپانسیون، پین‌هول مقاومت در برابر جریان متمرکز و ESP/SAR زمینه شیمیایی را اندازه می‌گیرند. یک خاک ممکن است در یکی حساس و در دیگری کمتر حساس باشد. از این رو نتیجه قابل دفاع زمانی حاصل می‌شود که شواهد در قالب مدل مکانیزمی کنار هم قرار گیرند.

چهارم، مطالعات تثبیت نشان می‌دهند کنترل واگرایی می‌تواند از چند مسیر حاصل شود: جانشینی Na با Ca یا K، افزایش قدرت یونی، کاهش بار مؤثر، فلوکولاسیون، ایجاد محصولات سیمانی و پوشش‌دهی ذرات. انتخاب ماده اصلاحی باید بر اساس علت غالب باشد. اگر مشکل عمدتاً سدیمی شدن است، منبع کلسیم یا تبادل کاتیونی مؤثر منطقه‌ای تر است؛ اگر خاک علاوه بر

واگرایی ضعف مکانیکی دارد، افزودنی با واکنش پوزولانی یا پلیمر می‌تواند مزیت دوگانه داشته باشد. اما افزایش کوتاه‌مدت EC بدون خروج سدیم ممکن است پایداری ظاهری ایجاد کند و در شست‌وشوی بعدی دوام نداشته باشد.

پنجم، تحلیل ریزساختار در سال‌های اخیر نقش پررنگ‌تری یافته است. SEM، XRD، FTIR و EDS امکان می‌دهند تفاوت میان صرفاً «کاهش کدورت» و «تغییر واقعی ساختار و شیمی» مشخص شود. به‌ویژه در مواد اصلاحی، مشاهده فلوکولاسیون، پرشدگی حفرات و محصولات جدید می‌تواند توضیح دهد چرا مقاومت و دوام افزایش یافته است. این رویکرد باید به مطالعات تشخیصی خاک طبیعی نیز گسترش یابد.

۱۴. توصیه‌های کاربردی برای مطالعات ژئوتکنیکی

(۱) در پروژه‌های سد، کانال و خاکریز، آزمایش واگرایی باید بخشی از برنامه شناسایی خاک‌های ریزدانه باشد، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و مناطقی که آثار سدیمی‌شدن یا شوری مشاهده می‌شود.

(۲) نمونه‌برداری برای تحلیل شیمیایی باید به گونه‌ای انجام شود که نمک‌های محلول و رطوبت طبیعی تا حد امکان حفظ شوند؛ خشک‌کردن یا شست‌وشوی نامناسب می‌تواند EC و ترکیب یونی را تغییر دهد.

(۳) XRD باید همراه با CEC و کاتیون‌های تبادلی تفسیر شود. گزارش صرف «درصد مونت‌موریلونیت» بدون تعیین وضعیت سدیمی/کلسیمی و شیمی آب برای پیش‌بینی واگرایی کافی نیست.

(۴) در نتایج مرزی، آزمون‌ها با آب واقعی پروژه و نیز با آب کم‌نمک به عنوان سناریوی بحرانی تکرار شوند. تغییر رفتار در اثر رقیق‌شدن باید صراحتاً گزارش شود.

(۵) برای خاک‌های با ریسک بالا، از تکیه بر یک ماده اصلاحی فقط بر اساس افزایش مقاومت خودداری شود. کاهش ESP/SAR، بهبود آزمون‌های واگرایی و تغییر ریزساختار باید همزمان تأیید شوند.

(۶) دوام اصلاح پس از چرخه تر و خشک، شست‌وشو و زمان عمل‌آوری ارزیابی شود. بسیاری از واکنش‌های پوزولانی زمان‌برند، در حالی که فشرده‌شدن لایه مضاعف می‌تواند سریع ولی برگشت‌پذیر باشد.

(۷) در مدل‌های عددی فرسایش داخلی، پارامترهای شیمیایی و کانی‌شناسی به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر تنش برشی بحرانی و ضریب فرسایش وارد شوند. رابطه توان گزارش‌شده در مطالعه ۲۰۲۶ میان نرخ جداسازی، تنش برشی و SAR نمونه‌ای از مسیر توسعه مدل‌های مکانیزم‌محور است [۲].

۱۵. محدودیت‌های دانش موجود و مسیرهای پژوهش آینده

نخستین شکاف پژوهشی نبود آستانه‌های جهانی معتبر برای ترکیب ESP، SAR و EC در کانی‌شناسی‌های مختلف است. بیشتر معیارهای موجود بر داده‌های منطقه‌ای یا خاک‌های خاص استوارند. ایجاد پایگاه داده بزرگ شامل XRD کمی، CEC، ESP، SAR، زتاپتانسیل و نتایج چندآزمونی می‌تواند امکان ساخت مدل‌های احتمالاتی یا یادگیری ماشین را فراهم کند، مشروط بر آنکه مدل‌ها از مکانیزم فیزیکی جدا نشوند.

دومین نیاز، بررسی اثر کانی‌های مختلط و فازهای بین‌لایه‌ای است. بسیاری از خاک‌های طبیعی مخلوطی از اسمکتیت، ایلیت و کائولینیت هستند و یک درصد کم اسمکتیت فعال می‌تواند رفتار را بیش از سهم وزنی خود کنترل کند. روش‌های XRD پیشرفته و تحلیل سطح ویژه می‌تواند این اثر را روشن‌تر کند.

سوم، نقش آنیون‌ها و مواد آلی در مطالعات ژئوتکنیکی هنوز کمتر از کاتیون‌ها بررسی شده است. یافته ۲۰۲۵ درباره اثر کودهای مختلف نشان می‌دهد یون‌های همراه و واکنش‌های بلندمدت می‌توانند ریزساختار را تغییر دهند [۷]. پروژه‌های نزدیک آب‌های آلوده، زهکش کشاورزی یا پساب نیازمند توجه ویژه به این مسئله‌اند.

چهارم، باید پیوند میان واگرایی کلئیدی و فرسایش داخلی در مقیاس سازه بهتر کمی شود. آزمون پین‌هول یک ابزار مهم است اما مقیاس آن کوچک است. ترکیب آزمون‌های بزرگ‌مقیاس، تصویربرداری درون نمونه و مدل‌های انتقال ذره می‌تواند انتقال از جداسازی میکروسکوپی به piping را توضیح دهد.

پنجم، تغییرات اقلیمی با افزایش رخدادهای بارش شدید، خشکسالی و تغییر کیفیت منابع آب می‌تواند چرخه EC و رطوبت را تشدید کند. بنابراین ارزیابی واگرایی باید از حالت استاتیک به سناریوهای چرخه‌ای و بلندمدت منتقل شود.

۱۶. نتیجه‌گیری

پتانسیل واگرایی و همگرایی خاک‌های رسی محصول هم‌زمان کانی‌شناسی، بار سطحی، نوع کاتیون‌های تبادلی، قدرت یونی محلول، pH، ساختار منافذ و وضعیت هیدراتاسیون است. در میان متغیرهای شیمیایی، ESP و SAR مهم‌ترین شاخص‌های مرتبط با سدیمی‌شدن هستند و شواهد ۲۰۲۴ و ۲۰۲۶ نقش برجسته آنها را در نسبت واگرایی رس و فرسایش داخلی تأیید می‌کند.

مونتموریلونیت/اسمکتیت به دلیل CEC و سطح ویژه بالا، بار لایه‌ای و قابلیت تورم بین‌لایه‌ای، نسبت به تغییرات شیمی آب حساس‌تر از کائولینیت است. نوع کاتیون بین‌لایه‌ای اهمیت اساسی دارد؛ مونتموریلونیت سدیمی نسبت به نوع کلسیمی آب بیشتری جذب کرده و مستعد جدایش و تورم بیشتر است. بنابراین شناخت کانی بدون شناخت حالت تبادلی ناقص است. EC و ظرفیت یون‌ها تعیین می‌کنند که دافعه سطحی تا چه فاصله‌ای عمل کند. آب کم‌نمک در خاک سدیمی می‌تواند واگرایی را فعال کند، در حالی که Ca^{2+} و Mg^{2+} با فشردن لایه مضاعف و ایجاد پیوندهای قوی‌تر، همگرایی و پایداری تجمعات را تقویت می‌کنند. زتاپتانسیل شاخص ارزشمندی برای اتصال شیمی سطح به رفتار ماکروسکوپی است، به‌ویژه در پژوهش‌های پیشرفته.

هیچ آزمون واحدی برای تشخیص قطعی کافی نیست. ترکیب پین‌هول، خرده‌رس، هیدرومتر دوگانه و شیمی تبادلی با XRD و در صورت امکان SEM و زتاپتانسیل، بهترین مبنا برای تصمیم‌مهندسی است. اختلاف میان آزمون‌ها باید با توجه به مقیاس و مکانیزم آنها تفسیر شود نه اینکه صرفاً یکی از نتایج حذف شود.

در نهایت، رویکرد پیشنهادی این مقاله گذار از طبقه‌بندی تک‌پارامتری به ارزیابی مکانیزم‌محور است. برای هر خاک باید پرسید: کانی فعال چیست؟ چه کاتیونی سطح را اشغال کرده است؟ آب ورودی چه قدرت یونی و SAR دارد؟ ذرات در چه ساختاری قرار گرفته‌اند؟ و آیا شرایط بهره‌برداری می‌تواند شیمی سامانه را تغییر دهد؟ پاسخ هم‌زمان به این پرسش‌ها مبنای قابل‌اعتمادتری برای پیش‌بینی واگرایی، انتخاب روش تثبیت و کاهش خطر فرسایش داخلی فراهم می‌کند.

منابع

۱. Vakili, A.H., Salimi, M., Keskin, İ., & Jamalimoghadam, M. (۲۰۲۴). A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*, ۲۳۹, ۱۰۶۰۳۶. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>
۲. Shah, A.S.N., & Mohd Nazer, N.S. (۲۰۲۶). Clay mineral dispersion as a driver of internal erosion under low-energy seepage: Mechanistic insights from laboratory pinhole tests. *International Soil and Water Conservation Research*, ۱۰۰۶۶۶. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2026.100666>
۳. Zhang, J., Peng, Y., Wang, C., Zhang, W., & Luo, X. (۲۰۲۵). Interlayer water absorption expansion and surface hydration properties of montmorillonite and kaolinite. *Minerals Engineering*, ۲۳۴, ۱۰۹۷۱۳. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109713>
۴. Ma, T., Hao, F., Yu, H., Wei, C., & Zhang, G. (۲۰۲۵). Manipulating layer charge to regulate the hydration and swelling of montmorillonite. *Géotechnique*, ۷۵(۱۱), ۱۴۰۱-۱۴۱۵. <https://doi.org/10.1788/jgeot.24.099v>
۵. Kimura, H., Tanabe, H., & Shinoki, S. (۲۰۲۵). Zeta Potential as a Key Indicator of Network Structure and Rheological Behavior in Smectite Clay Dispersions. *Fluids*, ۱۰(۷), ۱۷۸. <https://doi.org/10.3390/fluids10070178>
۶. Luo, X.J., Zhang, X., Zhang, L., Guo, L.L., Nie, Z.Y., Zhou, J., Wang, R.Z., Zhang, T.Y., Miao, Y., Ma, L., Wang, Z.C., & Yang, F. (۲۰۲۴). Characteristics of clay dispersion and its influencing factors in saline-sodic soils of Songnen Plain, China. *Agricultural Water Management*, ۳۰۳, ۱۰۹۰۳۳. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109033>
۷. Heydari, B., Khayat, N., & Nazarpour, A. (۲۰۲۵). Simultaneous physical, chemical, and microstructural analysis to assess downstream clay soil dispersion with continuous annual use of fertilizers. *Results in Engineering*, ۲۷, ۱۰۶۵۰۷. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106507>
۸. Liu, P., Zhu, R., Zhao, F., & Zhao, Y. (۲۰۲۴). Enhancing Dispersive Soil: An Experimental Study on the Efficacy of Microbial, Electrokinetics, and Chemical Approaches. *Sustainability*, ۱۶(۲۳), ۱۰۴۲۵. <https://doi.org/10.3390/su162310425>
۹. Öztürk, H.S., Deviren Saygin, S., Coptu, N.K., & İzci, E. (۲۰۲۳). Hydro-physical deterioration of a calcareous clay-rich soil by sodic water in Central Anatolia, Türkiye. *Geoderma Regional*, ۳۳, e۰۰۶۴۹. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00649>
۱۰. Hassan, W., Alshameri, B., Jamil, S.M., Maqsood, Z., Haider, A., & Shahzad, A. (۲۰۲۳). Incorporating potassium-rich waste material in a sustainable way to stabilize dispersive clay: A novel practical approach for the construction industry. *Construction and Building Materials*, ۴۰۰, ۱۳۲۷۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132717>
۱۱. Hassan, W., Alshameri, B., Haider, A., Maqsood, Z., Jamil, S.M., & Shahzad, A. (۲۰۲۳). A novel technique for the construction industry to mitigate dispersibility and internal erosion problems of sodium rich clays by using water-soluble potassium rich ions material. *Construction and Building Materials*, ۴۰۰, ۱۳۲۷۸۰. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132780>

۱۲. Hassan, W., Alshameri, B., Maqsood, Z., Haider, A., Jamil, S.M., & Mujtaba, H. (۲۰۲۳). An innovative application of fine marble dust for the construction industry to mitigate the piping, internal erosion and dispersion problems of sodium-rich clays. *Construction and Building Materials*, ۴۰۸, ۱۳۳۸۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133834>
۱۳. Fatima, B., Alshameri, B., Hassan, W., Maqsood, Z., Jamil, S.M., & Madun, A. (۲۰۲۳). Sustainable incorporation of Plaster of Paris kiln dust for stabilization of dispersive soil: A potential solution for construction industry. *Construction and Building Materials*, ۳۹۷, ۱۳۲۴۵۹. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132459>
۱۴. Xu, X., Lei, H., Wang, Q., Yuan, X., Guo, L., & Yu, Z. (۲۰۲۴). Polyaluminum chloride (PAC) modification of dispersive soil: A comprehensive study on dispersivity, mechanical properties, and microscale mechanisms. *Construction and Building Materials*, ۴۲۵, ۱۳۵۸۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135890>
۱۵. Hassan, W., Mujtaba, H., Alshameri, B., Farooq, K., Aamir, T., & Shahzad, A. (۲۰۲۵). Sustainable remediation: The role of styrene-butadiene rubber latex and chem-lite CR powder in stabilizing dispersive clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۱۷(۱۲), ۸۱۳۱-۸۱۴۸. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.06.036>
۱۶. Ziskin, R., Dag, A., Yermiyahu, U., & Levy, G.J. (۲۰۲۴). Different amendments for combating soil sodicity in an olive orchard. *Agricultural Water Management*, ۲۹۹, ۱۰۸۸۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108837>
۱۷. Erenson, C. (۲۰۲۳). Dispersion characteristics of clayey soils containing waste rubber particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۱۵(۱۱), ۳۰۵۰-۳۰۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.023>
۱۸. Yang, T., Chu, C., Zhang, Y., Zhang, Z., & Wan, J. (۲۰۲۵). Molecular Dynamics Simulation of Clay Mineral-Water Interfaces: Temperature-Dependent Structural, Dynamical, and Mechanical Properties. *Water*, ۱۷(۳), ۳۴۷. <https://doi.org/10.3390/w17030347>