بررسی افزایش مقاومت برشی خاک رس واگرا با استفاده از مواد افزودنی

مقاله علمی – پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
سعید مداح، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰
صفحه ۳۸۴-۳۶۱

چکیده

هدف از این مقاله، ارزیابی تأثیر افزودنی‌ها بر تثبیت خاک واریزه‌ای واگرا که دارای خواص ژئوتکنیکی ضعیف است می‌باشد. در این مقاله اولویت خاصی به مصالح مازاد صنعتی از قبیل خاکستر بادی و سرباره کوره ذوب‌آهن داده‌شده و اثر آنها با مواد افزودنی عرف همچون شیره آهک مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بااینکه هزینه شیره آهک نسبت به آهک زنده بیشتر است اما در زمین‌های کشاورزی به جهت بازده بهتر و سهولت در استفاده به آهک زنده ترجیح داده می‌شود. بررسی واگرائی در رس‌ها از آنجا مهم به نظر می‌رسد که به علت ازدیاد و فراوانی آنها در طبیعت، به‌ناچار با کمک تمهیداتی باید بتوان از آنها به‌درستی استفاده نمود. مسلماً از منبع قرضه‌ای در نزدیکی سد خاکی که محتوی خاک‌های واگراست نمی‌توان چشم‌پوشی نمود و از آن در هسته رسی استفاده نکرد. درگذشته تصور می‌شد خاک‌های رسی در مقابل جریان فرسایشی آب از مقاومت بالائی برخوردارند، لاجرم در سال‌های اخیر تعمیم این موضوع محدود گردیده است. زیرا مشاهدات بسیار مؤید آن بوده است که در طبیعت، خاک‌های رسی وجود دارند که در مقابل فرسایش به‌شدت آسیب‌پذیرند. با توجه به وجود چنین خاک‌هایی در اکثر نقاط کشورمان، تمهیدات قائل شده به‌مانند تثبیت خاک واگرا و یا بهسازی آن می‌تواند کمک شایانی به استفاده از این خاک‌ها در پروژه‌های مهندسی بنماید. در این مقاله به شناسایی و بررسی خاک‌های واگرا و پدیده واگرایی و ارزیابی تأثیر افزودنی‌ها بر تثبیت خاک واگرا خواهیم پرداخت.

واژه‌های کلیدی: آهک، سیمانتاسیون، خاک، مقاومت برشی

۱-مقدمه

موارد متعددی از توسعه راه‌ها و ساخت‌وسازها را می‌توان یافت که در مواجهه با زمین‌های شیب‌دار طبیعی و یا مصنوعی قرار دارند. اگر بستر این شیب‌ها ناپایدار باشد معمولاً در اثر حوادث طبیعی و غیر قابل پیش بینی همچون رانش و لغزش زمین، سقوط توده‌ای خاک و سنگ را شاهد خواهیم بود، که علاوه بر وارد شدن خسارات و صدمات در سازه‌ها و شبکه راه‌ها خطرات جانی نیز به همراه خواهد داشت. علاوه به راین به هنگام احداث پروژه‌های عمرانی مانند گودبرداری و حفاری در هر دو حالت کوتاه مدت و بلند مدت پایداری شیب ها می‌بایست کنترل شود.گزارش‌های بسیاری از کشورهای مختلف حاکی از تخریب برخی از سدها و فرسایش پاره‌ای از خاکریزها و لغزش بعضی از توده‌های طبیعی شیب‌دار در اثر رخداد پدیده واگرایی می‌باشد. درگذشته تصور می‌شد خاک‌های رسی در مقابل جریان فرسایشی آب از مقاومت بالائی برخوردارند، لاجرم در سالهای اخیر تعمیم این موضوع محدود گردیده است. زیرا مشاهدات بسیار مؤید آن بوده است که در طبیعت، خاک‌های رسی وجود دارند که در مقابل فرسایش به شدت آسیب پذیرند. با توجه به وجود چنین خاک‌هایی در اکثر نقاط کشورمان، تمهیدات قائل شده به مانند تثبیت خاک واگرا و یا بهسازی آن می‌تواند کمک شایانی به استفاده از این خاک‌ها در پروژه‌های مهندسی بنماید. در این مقاله به شناسایی و بررسی خاکهای واگرا و پدیدهٔ واگرایی خواهیم پرداخت.

۲- شناخت خاک رس واگرا

گزارش‌های بسیاری از کشورهای مختلف حاکی از تخریب برخی از سدها و فرسایش پاره‌ای از خاکریزها و لغزش بعضی از توده‌های طبیعی شیبدار در اثر رخداد پدیده واگرایی می‌باشد. درگذشته تصور می‌شد خاکهای رسی در مقابل جریان فرسایشی آب از مقاومت بالائی برخوردارند، لاجرم در سالهای اخیر تعمیم این موضوع محدود گردیده است. زیرا مشاهدات بسیار مؤید آن بوده است که در طبیعت، خاکهای رسی وجود دارند که در مقابل فرسایش به شدت آسیب پذیرند. کارشناسان امور کشاورزی از دیرباز با پدیده‌ای روبرو می‌گردیدند که اراضی زیرکشت، بویژه برخی از زمین‌هایی را که در طی طرحهای توسعه برای اولین بار آبیاری می‌شدند، تخریب می‌نمود. بدین معنی که آبیاری این اراضی یا موجب فرسایش شدید و ایجاد نقبهای عمیق و وسیع در زمین می‌شده و یا در منطقی که لایه‌های زیرین را زمین‌های متشکل از شن و ماسه قابل نفوذ تشکیل می‌دادند، ذرات خاک رس به درون این لایه‌های نفوذپذیر جاری شده و در نتیجه زمین کشاورزی از بازدهی خارج می‌گشت. ویژگی‌های پدیدهٔ واگرایی در خاک رس ابتدا در حدود ۵۰ سال قبل توسط کارشناسان خاک‌شناسی مورد توجه و بررسی قرار گرفت (بای بوردی،۱۳۷٦) از اوائل دهه ۷۰ بود که مسئله فرسایش سریع خاکریزها در اثر بارندگی و تخریب غیرقابل توجیه سدهای مخزنی کوچک از طریق توسعه پدیده «رگاب» مورد توجه جدی مهندسان عمران قرار گرفت. از آن زمان تحقیقات گسترده‌ای برای یافتن روش‌های شناسایی خاک رس واگرا انجام گرفته است، چرا که روش‌ها و آزمایش‌های متداول خاک از قبیل حدود اتربرگ، توزیع دانه‌بندی و ... قادر به شناساندن این پدیده نبودند. (sherard and Decker,1997)نخستین بار در استرالیا، مسئله تخریب فرسایش و ایجاد حفره‌های بزرگ در بسیاری از سدهای خاکی کوتاه، انجمن حفاظت خاک استرالیا را بر آن داشت تا مطالعات گسترده‌ای در مورد ضایعات، روش حفاظت و جلوگیری از ادامه روند فرسایش ناشی از خاکهای واگرا را آغاز کند. (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران ،۱۳۷۵)بدنبال آن گزارش‌های واصله از موارد مشابه در آمریکا، کانادا، برزیل، مکزیک و ... انجام بررسی‌های همه جانبه و آزمایش‌های دقیق و مطالعه کامل این پدیده نسبتاً جدید را به اثبات رساند. در ایران نیز مطالعات انجام شده در دو دههٔ اخیر، نشان‌دهندهٔ وجود این نوع خاک در نواحی مختلف از جمله خوزستان، آذربایجان، خراسان و مناطق مرکزی بوده است. باتوجه به وجود چنین خاکهایی در اکثر نقاط یاد شده کشورمان، تمهیدات قائل شده به مانند تثبیت خاک واگرا و یا بهسازی آن می‌تواند کمک شایانی به استفاده از این خاکها در پروژه‌های مهندسی بنماید.

۳- شناخت رس از نظر مکانیک خاک

مطابق سیستم‌های طبقه‌بندی خاک، ذرات با قطر کمتر از ۰/۰۰۲ میلی متررا رس می‌نامند. اما بنابر رفتاری که از این خاک متصور می‌باشد این تعریف چندان دقیق به نظر نمی‌رسد. لذا می‌توان ملاک قضاوت در تعریف رس را ترکیبات کانی‌شناسی آن دانست و بطور کلی خاکی را رس محسوب نمود که چسبندگی و خواص خمیری ویژه‌ای را دارا باشد. با این نگرش تمام ذرات به اندازه رس الزاماً کانی رس نمی‌باشند.

خاک‌های رس محصول هوازدگی شیمیایی سنگ‌ها می‌باشند. این فرآیند موجب پیدایش ذرات بلوری به اندازه کلوئیدی (کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر و یا ۲ میکرون می‌شود) که به کانی‌های رس موسومند ذرات کانی‌های رس اغلب صفحه‌ای شکلند و سطح ویژه (نسبت سطح ذره به وزن آن) بزرگی دارند. خصوصیات این ذرات تا حد زیادی به نیروهای سطحی وابسته است. این امر موجب وجود نیروهای الکتریکی بر روی سطوح کانی‌های رس گردیده که از نیروی ثقل بزرگتر است. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦)

٤-کانی‌های رس

کانی‌های رس از انواع سیلیکات‌های آلومینیوم و اکسیدهای آبدار آهن، آلومینیوم، منیزیم و سیلسیم تشکیل شده‌اند.

بهترین واحدهای ساختمانی بیشتر کانی‌های رس عبارتند از:

۱- اکسید سیلسیم (سیلیس) چهار و جهی

۲- هیدروکسید آلومینیوم (آلومین) یا منیزیم هشت وجهی

در ساختمان سیلیس، چهار اتم اکسیژن، یک اتم سیلیسیم را احاطه کرده‌اند. از به هم پیوستن واحدهای بنیانی سیلیس، واحدهای صفحه‌ای سیلیس بوجود می‌آیند. در این صفحات، هریک از سه اتم اکسیژن قاعده هرمها بین دو اتم سیلیسیم در دو هرم مجاور مشترک می‌باشند.

واحد ساختمانی دیگری که در اغلب کانی‌های رس دیده می‌شود، به شکل یک هشت وجهی است که در آنها یک اتم

آلومینیوم یـا منیزیم در میان شـــش یون هیدرواکســـید (OH) محصـــور گردیده اســـت. از ترکیب واحدهای هشـــت وجهی آلومینیوم، صـــفحاتی پدید می‌آیند که به صـــفحات گیبســـات موسومند. اگر کاتیون درون هشت وجهی منیزیم باشد صفحات بوجود آمده را بروسیت می‌نامند(Fell and etal, 1992)

کانی‌های دو صفحه‌ای

واحـد بلور برخی از کانی‌های رس را از کنار هم قرار گرفتن دو صـفحه سـیلیس و آلومین که توسط پیوند هیدروژنی محکم به یکدیگر نگه داشته می‌شوند تشکیل شده است. بدین دسته از کانی‌های رسـی کائولینیت‌ها اطلاق می‌شود که ساده‌ترین گروه رس‌ها هستند.(Fell and et al., 1992)

کانی‌های سه صفحه‌ای

مهمترین کانی‌های رس بوجود آمده از ســـه صـــفحه، مونت موریلونیت وایلت می‌باشـــند. ایلیت‌ها از صـــفحات ســـیلیس- آلومین- سـیلیس تشـکیل شده‌اند. در بین این صفحات معمولاً لایـه یون پتاســـیم قرار دارد. اثر این لایه محدود کردن خواص خیری ایلیـت‌ها می‌باشـــد(Fell and etal, 1992). مونت موریلونیـت مـانند ایلیت‌ها می‌باشـــد. با این تفاوت که در لایه میانی به جای پتاســـیم، مولکولهای آب با یونهای ســـدیم قرار دارد.

مبادلهٔ کاتیونی

سـطح ذرات کانی‌های رس حامل بار منفی اسـت. توانائی رس در جذب یونهای مثبت این مطلب را به خوبی بیان می‌دارد. این بار منفی عمدتاً در اثر جایگزینی اتم‌های سـیلسـیم و آلومینیوم بوســـیلـه اتم‌هـای با ظرفیت کمتر بوجود می‌آید. لذا وجود بار منفی در سطح کانیهای رس باعث جذب یونهای مثبت می‌شود. بـه همین دلیل، کاتیونهای حاصـــل از یونیزاســـیون نمک‌های موجود در آب منفذی خاک در ســـطح رس جذب می‌شـــوند. یونهای مثبت مذکور دارای پیوند قوی نیســـتند و ممکن اســـت بوســـیله یونهای مثبت دیگر جایگزین شـــوند که به این تبادل یونهـای مثبـت، تبـادل کـاتیونی گوینـد. ظرفیـت کـاتیونهـا در جانشینی و تبادل آنها نقش عمده‌ای دارد. هرچه ظرفیت کاتیون بیشـتر باشـد، توانائی جایگزینی آنها بیشـتر است. (Fell and etal, 1992)

مقدار کل یون‌هایی که جذب سـطح ذرات رس می‌شوند بین ظرفیـت تبادل کاتیونی یا میزان بار منفی رس اســـت. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک معمولاً برحسب میلی اکی والان درصد گرم خاک خشـک بیان می‌شود در جدول (۱) ظرفیت تبادل کاتیونی برخی از کانی‌های رس آورده شـده اسـت. (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران،۱۳۷۵)

جدول ۱. سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی کانی‌های مختلف رس (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران،۱۳۷۵)

نام کانی	ترکیب لایه‌ها	سطح ویژه M^2/gr	ظرفیت تبادل کاتیونی میلی اکی و الان در ۱۰۰ گرم
هالویسیت	یک لایه سیلیس یک لایه آلومینیوم	٤٠	۱۲
کائولینیت	یک لایه سیلیس یک لایه آلومینیوم	۱۰-۲۰	۱۳
ارمیکولیت	یک لایه سیلیس دولایه آلومینیوم	٥-٤۰۰	۱٥۰
ایلیت	یک لایه سیلیس دو لایه آلومینیوم	۸۰-۱۰۰	۲٥
مونتموریلونیت	یک لایه سیلیس دو لایه آلومینیوم	۸۰۰	۱۰۰
کلریت	دو لایه سیلیس دو لایه آلومینیوم	٥-٥۰	۲۰

نیروهای بین ذره‌ای در رس‌ها

عموماً ذرات رس در خاک، بین مولکول‌های آب احاطه شده‌اند و در واقع این مولکولها بخشی از ساختمان رس را تشکیل می‌دهند. مولکولهای آب مولکولهایی هستند دو قطبی که از انتهای مثبت می‌توانند جذب سطوح منفی ذرات رس گردند. همچنین بدلیل وجود پیوند هیدروژنی میان مولکولهای آب، مولکولها زنجیروار به یکدیگر متصلند و هرجا بار ذرات، منفی است از انتهای مثبت به سطوح ذرات رسی می‌چسبد. کاتیونهای تبادلی نیز به نوبه خود مقداری آب در اطراف خود دارند. بطور کلی بخش عمده نیروی جاذبه بین سطوح ذرات رس و مولکولهای آب ناشی از پیوند هیدروژنی است که با افزایش فاصله مولکولهای آب از سطح ذرات رس سست‌تر می‌گردد. (Fell and etal, 1992)

لایه دوگانه

سطح ذره رسی با بار منفی و توزیع کاتیونها در اطراف آن به لایه دوگانه موسوم است. آنیونها که دارای بار منفی می‌باشند از سطوح منفی ذرات رس رانده شده و در نتیجه فراوانی نیونها در نزدیکی سطوح رس به کمترین مقدار خود می‌رسد. فشار خصوصیات خمیری خاکهای رسی وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات کانی های آنهاست. ظرفیت و غلظت کاتیونها، تاثیر به سزایی در شعاع عملکرد لایه دوگانه و تشکیل نیروهای دافعه بین ذرات رس دارند. بدین نحو که هرچه ظرفیت کاتیون کمتر بوده و محلول رقیق‌تر باشد، نیروی دافعه بیشتر می‌گردد.

تغییرات نیروهای جاذبه و دافعه بین ذرات رس

همانطوریکه گفته شد لایه‌های دوگانه با بار یکسان همدیگر را دفع می‌نمایند. در مقابل این نیروی دافعه نیروی جاذبه و اندروالسی قرار دارد که تابع خصوصیات لایه دوگانه نیست و با توان سوم و چهارم فاصله بین دو ذره موازی نسبت عکس دارد. نیروهای واندروالسی تابع جرم ذرات کانیهای رس نیز هستند و در صورت کوچک بودن زیاد ذرات، این نیروها تحت شعاع سایر نیروهای بین ذره‌ای قرار می‌گیرند. اگر برآیند نیروها دافعه باشد شکل ساختمانی پراکنده و اگر جاذبه باشد شکل ساختمانی مجتمع می‌باشد(Fell and etal, 1992) .

واگرایی در رس‌ها

خاکهای ریزدانهٔ خاصی در طبیعت وجود دارند که در تماس با آب قابلیت فرسایش داشته و از نظر مکانیکی پایداری کمی دارند. این خاکها از نوع رسی هستند. در خاکهای واگرا پیوند ذرات خاک حتی در آب ساکن نیز به شدت تضعیف شده و محلولی کلوئیدی تشکیل می‌دهد. این درحالی است که بر اثر ضربات ناشی از برخورد مولکولهای آب با ذرات کانی‌های رسی و فائق آمدن نیروهای بین ذرات بر نیروی واندروالسی، محلول کلوئیدی حاصل می‌گردد. بررسی واگرائی در رس‌ها از آنجا مهم به نظر می‌رسد که به علت ازدیاد و فراوانی آنها در طبیعت، بناچار با کمک تمهیداتی باید بتوان از آنها بدرستی استفاده نمود. مسلماً از منبع قرضه‌ای در نزدیکی سد خاکی که محتوی خاکهای واگراست نمی‌توان چشم‌پوشی نمود و از آن در هسته رسی استفاده نکرد. باید در نظر داشت که کیفیت واگرایی با کیفیت مایع گرائی Tixotropic ، خاکهای موسوم به «رس سریع» Quick clay که بر اثر لرزش به حالت مایع در می‌آیند، متفاوت می‌باشد. همچنین برخی از خاکهای غیر چسبنده مانند لای‌ها یا ماسه‌های بسیار ریزدانه نیز قابلیت فرسایش بسیار زیادی دارند، لیکن روند فرسایش این خاکها در اثر جریان آب صرفاً مکانیکی بوده و ارتباطی به پدیده واگرائی که مختص رس‌های ریزدانه است، ندارد.

عوامل مؤثر بر پدیدهٔ واگرایی

مهمترین عامل موثر بر پدیدهٔ واگرایی، غلظت یون سدیم در آب منفذی خاک است که علت آن به طور مشخص یک ظرفیتی بودن کاتیونهای سدیم است. خاکهای حاوی املاح کلسیم، منیزیم، و آلومینیوم، بدلیل بیشتر بودن ظرفیت این عناصر واگرا نیستند. کاتیونهای پتاسیم که نیز یک ظرفیت دارند کوچکتر از آن هستند که بعد از وارد شدن در فضای میان اتمهای تشکیل‌دهندهٔ کانی‌های رسی بتوانند خارج شوند و لذا محبوس می‌گردند. کاتیونهایی چون لیتیم نیز بدلیل بزرگ بودنشان نمی‌توانند در این فضا وارد شوند. منیزیم، روبیدیم و گاه آمونیوم نیز مانند پتاسیم در فضای میان اتمها محبوس می‌شوند و لذا میزان این یونها معمولاً در حدی نیست که سبب واگرایی خاک شوند. بدلیل یک ظرفیتی بودن سدیم، نیروی الکتریکی میان یونهای سدیم و سطح ذرات رس از یونهای دو ظرفیتی کمتر است و لذا تعداد یونهایی که جهت برقراری تعادل

الکترو استاتیکی، جذب ذرات رس می‌گردند، دو برابر یون‌های ظرفیتی است. بنابراین ازدیاد یونهای مزبور باعث بیشتر شدن ضخامت لایه دوگانه شده و در نتیجه نیروی جاذبه میان ذرات خاک کمتر می‌شود. همچنین مکانیرمی تحت عنوان خاصیت اسمزی نیز که باعث تفرق در ذرات رس می‌شود، در خاکهای واگرا دارای نقش قابل توجهی می‌باشد.

بطور مثال حالتی را در نظر بگیرید که در اثر آن آب مخزن یک سد خاکی از داخل ترکهای موجود در هسته رسی واگرا، وارد آب منفذی موجود در هسته شده که دارای غلظت یونی بیشتر می‌باشد. مطابق خاصیت اسمزی اگر دو محلول با غلظت‌های نامساوی در مجاورت هم قرار بگیرند با فرض آنکه یک غشاء با نفوذپذیری کم مانع اختلاط سریع این دو محصول گردد، در صورت عدم پتانسیل آبی بین طرفین این دو محفظه آب از محلول رقیق‌تر وارد محلول غلیظ‌تر می‌گردد تا اینکه دو محلول به غلظت مساوی برسند. نتیجه آنکه آب وارد به هسته رسی از غلظت آب منفذی کاسته و نیروی دافعه زیادتر می‌شود و نهایتاً ذرات خاک از یکدیگر جدا می‌شوند. البته این را زمانی مجاز دانسته و خاک هسته را واگرا می‌گوئیم که غلظت املاح محلول در آب منفذی از حد شخصی بیشتر باشد. شرارد ثابت کرده است که اگر غلظت املاح محلول در آب منفذی از یک میلی اکی والان گرم در لیتر کمتر باشد آن خاک واگرا نیست. (sherard and etal, 1972). بدین ترتیب میزان تاثیر خاصیت اسمزی با غلظت و به عبارت دیگر با تعداد یونهای موجود در خاک نسبت مستقیم دارد و باتوجه به آنچه در مورد فراوانی یونهای سدیم در خاکهای حاوی این عنصر که همانا خاکهای واگرا می‌باشند بیان گردید. می‌توان ابراز داشت که شدت خاصیت اسمزی در این خاکها بیشتر است. بنابراین وجود سدیم در خاکها سبب افزایش پتانسیل اسمزی و کاهش نیروی جاذبه واندروالسی بین ذرات و در نتیجه باعث واگرایی خاک رس می‌شود.

خصوصیات شیمیایی آب در تماس با سطح خاک

مطابق با آنچه بیان شد با کاهش میزان املاح محلول در آب پشت سد احتمال آب شستگی افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که مقدار کل املاح محلول در آب پشت سد بیشتر سدهای تخریب شده از ۵ میلی اکی والان در لیتر کمتر بوده است.

نکته مهم آنکه هرچه میزان املاح آب کمتر باشد تاثیر نوع املاح نیز کمتر می‌گردد. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦)

ترک خوردگی

شسته شدن خاکهای واگرا مستلزم شرایطی است که یکی از آنها وجود ترکها یا منافذ در خاک است بطور کلی علت بروز ترکها را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

الف: ترکهای انقباضی: براساس تجربیات بدست آمده، در خاکهای واگرا میزان رطوبت حد انقباض بسیار کمتر از رطوبت اشباع می‌باشد، بطوری‌که کاهش رطوبت در این خاکها منجر به کاهش حجم و ایجاد ترکهای فراوان در سطح خاک می‌شود. لذا در صورت توقف عملیات ساختمانی خاکریزهای رسی به مدت چند روز در ایام گرم و خشک سال و عدم حفاظت از سطح آن، خاک مزبور خشک شده و انقباض خاک باعث ترک خوردن در آن می‌شود.

ب) ترکهای ناشی از نشست‌نا متساوی: که عمدتاً بدلیل تفاوت در ارتفاع خاکریزی در قسمتهای مختلف یک خاکریز بوجود می‌آیند.

ج) ترکهای ناشی از عمل قوسی شدن: این ترکها بر اثر نشست نامتساوی پوسته و هسته در سدهای خاکی بوجود می‌آید و به علت آنکه در هسته مرکزی سدهای خاکی رخ می‌دهند قابل رویت نیستند. علامت مشخصه این ترکها نشت آب درپایین دست سد است.

د) ترکهای هیدرولیکی: این ترکها ناشی از فشار آب منفذی بوده و هنگامیکه این فشار از مقدار مینی موم تنش اصلی بیشتر شود رخ می‌دهند. شرارد ترکهای گروه «د» را علت اصلی شروع تخریب در بسیاری از سدهای ساخته شده با خاک واگرا می‌داند.

چنانچه قبلاً بیان شد، جهت وقوع پدیده رگاب، نقاطی برای نشت متمرکز آب لازم است و ترکها به هر علتی که بوجود آمده باشند، محلی مناسب برای چنین نشت‌ها می‌باشند. بنابراین نباید انتظار داشت که بر اثر تراوش عادی در داخل توده خاکی خوب متراکم شده و بدون ترک‌خوردگی، تخریب صورت پذیرد. شرارد در یک سری از آزمایشات خود، نمونه‌هایی از رس‌های به شدت واگرا را در دستگاه تراوائی سنج، به خوبی متراکم و پائین دست آنها را با شن نخودی پر نمود. وی این نمونه‌ها را بیش از یکسال تحت گرادیان بسیار بالا قرار داد. اما

در هیچ یک از موارد پدیده رگاب و آب شکستگی در آنها مشاهده نشد.(sherard and etal, 1977)

تاثیر PH خاک در واگرایی

نحوه تاثیر PH خاک در واگرایی آن به نوع املاح موجود در آب و خاک وابسته است و قضاوت در این مورد، بدون آگاهی از شیمی خاک میسر نیست. (فاخر و عسگری، ۱۳۸۶). بار الکتریکی گوشه‌های ذرات صفحه‌ای شکل کانی‌های رسی، برخلاف سطح این ذرات مثبت است. این مسئله ناشی از گسسته شدن پیوندهای شیمیایی و ناپیوستگی صفحات در این نقاط می‌باشد. گسستگی پیوندهای الکتریکی در گوشه‌ها ،بین اتم‌های اکسیژن و سیلسیم یا آلومینیوم، منجر به ایجاد مقداری بار منفی در این نقاط می‌شود. اتم‌های اکسیژن جدا شده، پروتونهای موجود در محیط را به سمت خود جذب می‌کنند و بین آنها پیوندهایی بوجود می‌آید. در صورت افزایش PH (کاهش غلظت پروتونها) از تعداد پروتونهایی که جذب کناره‌های ذرات گردیده‌اند، کاسته می‌شود که در این شرایط بر میزان واگرایی خاک افزوده می‌گردد. گاهی در بعضی از رس‌ها در PH کم، آنیونها جذب گوشه‌های مثبت ذرات رس می‌شوند و بر اثر خنثی شدن بار الکتریکی در این نقاط، نیروی جاذبه میان ذرات از بین می‌رود کع باتوجه به تجربیات بدست آمده بروز واگرائی در این حالت محتمل می‌باشد. (بای بوردی،۱۳۷۶)

کانی‌های تشکیل دهندهٔ خاک رس

وجود کانی‌های مونتمو ریلونیت در رس‌ها و قرارگیری یونهای سدیم در میان لایه‌های آنها، یکی از علل اصلی بروز پدیدهٔ واگرایی می‌باشد.(Fell and etal, 1992). همچنین از به هم پیوستن ذرات کائولینیت که دیگر کانی تشکیل دهنده رس می‌باشد صفحاتی بوجود می‌آیند که ضخامت آنها بسیار بیش از مونتموریلونیت به همین دلیل در کائولینیت نسبت ضخامت صفحات به سطح، از کانی مونتموریلونیت بیشتر است. همچنین به هم پیوستگی صفحات سیلیس-آلومین در کائولینیت بدلیل وجود پیوند هیدروژنی نسبتاً محکم، بسیار بیشتر می‌باشد، لذا جهت جدا شدن ذرات کائولینیت و واگرا شدن آن میزان بسیار بیشتری یون سدیم نسبت به مونتموریلونیت لازم می‌باشد. (Holmgren and Flangan, 1977)

حدود اتربرگ

مطابق نتایج آزمایشهای شرارد در زمینه رده‌بندی ۸۰ نمونه از خاکهای واگرا و ۱۱۵ نمونه از خاکهای غیرواگرا، ارتباط مشخصی را بین حدود اتربرگ و میزان واگرائی ارائه نمی‌کند. (sherard and etal, 1972)

روش‌های شناسایی خاکهای واگرا

نظر به اهمیت شناخت خاکهای واگرا دو معیار کلی زیر پیشنهاد می‌شود.

الف: تشخیص عمومی خاکهای واگرا توسط مشاهدات صحرائی

ب: روش‌های آزمایشگاهی تشخیص خاکهای واگرا

تشخیص عمومی خاکهای واگرا توسط مشاهدات صحرائی

در پروژه‌های سدسازی که بایستی در انتخاب منابع قرضه برای سدهای خاکی و بررسی زمین از جهت وجود خاکهای واگرا دقت نظر زیادی داشت، این مرحله مخصوصاً قابل توجه می‌باشد. از علائم صحرائی بارز به موارد زیر اشاره کرد:

- وجود فرسایش عمیق خندقی در خاکهای پراکنده و شکستهای ناشی از رگاب در سدهای کوچک، نشان دهنده وجود خاک واگرا است.
- در مناطقی که سطح زمین دارای یک شیب نسبتاً تندی است، بریدگیهای بسیار عمیق و مشخص در سطح زمین بر اثر بارندگی و فرسایش سریع، دیگر دلیل وجود این نوع خاک در محیط مزبور است.
- فرسایش مقاطع خاکبرداری جاده‌ها، فرسایش تونلی در امتداد خطوط خندق‌ها و فرسایش درزه‌های سنگی پر نشده با رس ممکن است نشانگر پتانسیل واگرایی خاک باشد.
- معمولاً در مناطق در برداشته خاکهای واگرا آثار شکستگی از قبیل کانالهای تنگ و عمیق طبیعی، خلل و فرج و حفره‌های بزرگ در دیواره‌های عمودی، سوراخ‌های آب گذر، جویبارها و تونل‌ها دیده می‌شوند.
- یکی از مشخصه‌های بارز کانالهای ناشی از آب شکستگی در خاکهای واگرا، مسیر پرپیچ و خم آنهاست معمولاً زاویه خمش این کانالها حدود ۹۰ درجه است.

نکته مهم آنست که در مناطق مسطح و کم‌شیب، تشخیص خاکهای واگرا به سادگی میسر نیست. در این مناطق بر اثر بارندگی ذرات رس واگرا شسته شده و لایه‌هایی از ماسه لای‌دار یا ماسه در سطح زمین باقی می‌ماند که لایه‌های عمیق‌تر را محافظت می‌کند. لذا افزایش و بریدگیهای عمیق، مشخصه بارز خاکهای واگرا در سطح زمین دیده نمی‌شود. بنابراین عدم وجود علائم آب شستگی و فرسایش در سطح زمین به معنای عدم وجود خاکهای واگرا در منطقه نمی‌باشد. در این شرایط احتمال بروز و شکل‌گیری خندق وجود دارد و می‌تواند نشانگر خصوصیت خاک باشد. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦)

معرفی و بررسی مواد پوزولانی جهت اصلاح خاک واگرا

سالها قبل، انسان به کشف مهم و ارزنده‌ای نائل آمد و دریافت که وقتی مواد سیلیسی بسیار ریز با آهک مخلوط می‌شود، سیمانهای دارای خواص هیدرولیکی تولید می‌کند. یک نوع از این مواد، خاکستر آتشفشانی تحکیم یافته یا توف بود که در حوالی پوزولی ایتالیا پیدا شد. پس از آن، واژه پوزولان به هرنوع ماده‌ای با خاصیت مشابه به موارد فوق صرف نظر از منشاء زمین‌شناسی آن ، اطلاق گردید.(رمضانپور،۱۳۷٦) مردم ایران زمین، پیش از ساخته شدن سیمان، کف و بدنه‌های آبگیرها را با ساروج اندود و رومالی می‌کردند. ملات ساروج را با دوغاب آهک و گرد خاکستر با کمی ماسه و خاک رس می‌ساختند. دوغاب آهک با سیلیس بلور نشده گرد خاکستر، ترکیب سیلیکات کلسیم می‌داد که جسم چیسبنده ملاتهای آبی است .(حامی،۱۳٦۸) دو خاصیت اصلی در پوزولانها قابل توجه است.

الف : میل ترکیبی آنها با آهک

ب : میل به تشکیل موادی که دارای خاصیت گیرشی هستند.

خاصیت اول بر لزوم بکارگیری مواد ارزان و قابل دسترسی بعنوان فعال کننده‌های پوزولانی تأکید می‌گذارد و خاصیت دوم بکارگیری آنها را به عنوان موادی که دارای خاصیت گیرشی هستند مورد توجه قرار می‌دهد . مواردی نیز یافت می‌شوند که با عملیات مناسب حرارتی، خواص پوزولانی در آنها آشکار می‌گردد. این قبیل مواد را تحت عنوان سیمانهای پوزولانی مصنوعی می‌توان طبقه‌بندی نمود. به عنوان مثال، کانیهای رسی وقتی تحت حرارت ٦۰۰ تا ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد پخته گردند و تا حدریزی سیمان سائیده شوند فعالیت پوزولانی خوبی را از خود بروز می‌دهند. (رمضان پور،۱۳۷٦)

تعریف پوزولان:«ماده سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد. اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را بوجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چند برگی دارند. (Fell and etal, 1992) بنابراین، پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال است.

لازم است که ماده پوزولانی به شکل پودر شده باشد زیرا فقط در این صورت سیلیس می‌تواند در حضور آب با آهک سیلیکاتهای کسلیم پایدار را که دارای خواص چسبندگی‌اند، تشکیل دهد. در بررسی کلی پوزولانها باید متذکر شد که سیلیس آنها باید بی‌شکل (آمورف) باشد، زیرا قابلیت ایجاد واکنش سیلیس متبلور بسیار کم است. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦)

طبقه‌بندی پوزولانها

پوزولانها را از لحاظ منشاء وجودی به پوزولانهای طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌کنند. پوزولانهای طبیعی شامل خاکهای دیاتمه، چرتهای پالینی و شیلها، توفها و خاکسترهای آتشفشانی است. منابع طبیعی پوزولانهای مصنوعی عبارتند از کوره‌های استخراج فلزات تولید کنندهٔ آهن خام، فولاد، مس، نیکل ، سرب، سیلیس و آلیاژهای فروسیلیس و نیروگاههائی که از زغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. پوزولانهای طبیعی را به ۳ گروه تقسیم می‌نمایند:

گروه اول: شامل سنگ‌های پیرو کلاستیک که موادی با منشاء آتشفشانی‌اند. توفهای پوزولانی و تراس از این دسته محسوب می‌شوند.

گروه دوم: مواد تغییر یافته با درصد سیلیس زیاد است که طی یک روند شامل ساختن مواد با منشاءهای متفاوت شکل داده شده‌اند.

گروه سوم: موادی با منشاء کلاستیک شامل رس‌ها و خاکهای دیاتمه است. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦)

طبقه‌بندی پوزولانها

- پوزولان رده N: پوزولانهای طبیعی خام شامل خاکهای دیاتمه، چرتهای پالین و شیلها و رس‌های کلسینه شده .
- پوزولان رده F: خاکستربادی با منشاء زغال سنگ قیری.
- پوزولان رده C: خاکستربادی خاکستر لیگنیت با منشاء زغال سنگ قیری .
- پوزولان رده S : هر نوع مواد دیگر شامل پومیت‌های عمل شده، بعضی دیاتمه‌ها، رس‌ها و شیل‌های کلسینه شده و آسیاب شده .

براساس مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در زمینه مواد افزودنی و مصنوعی این نتیجه حاصل شده است که ترکیبات کانی شناسی و اندازه ذرات مواد، تعیین کننده خاصیت پوزولانی و سیمانی بودن یک پوزولانند. بیشتر استانداردها برای پوزولانهای طبیعی مقدار حداقل ۷۰ درصد و برای مجموع سه اکسید اصلی شامل Fe_2o_3, Al_2o_3 , Sio_2 مقرر داشته‌اند. همچنین مقدار حداکثر برابر با ۱۰ درصد برای افت سرخ شدن و ۳ درصد برای درصد رطوبت، ۲ محدودیت مفید برای خواص شیمیایی هستند که توسط استانداردها بیان شده‌اند.

پوزولانهای طبیعی

مقصود از طبیعی بودن پوزولان این است که نیاز به عملیاتی که خصوصیات شیمیایی و کانی‌های آن را اصلاح نماید، نباشد و مستقیماً بکار می‌رود. پوزولانهای طبیعی در حقیقت پوکه سنگها و خاکسترهای باقی مانده از فعالیت‌های آتشفشانی غیر بلوری‌اند. ذرات غیر چسبنده رسوبات با منشاء آواری با قرار گرفتن تحت پدیده دیاژنز یا سنگ شدگی به سنگ‌های متراکم که به توفها مرسومند، تبدیل می‌گردند. این پدیده که با اصلاحات کانی- شیمیایی همراه است، می‌تواند اثر مساعد یا نامناسب بر روی رفتار پوزولانی بگذارد، تمام رسوبات آذرآواری از خود فعالیت پوزولانی نشان نمی‌دهند. بلکه فقط آنهایی که اسیدی هستند و حالت شیشه‌ای دارند و حاوی کانی‌های زئولیتی‌اند، این خاصیت را دارا خواهند بود. برخی در این باره چنین نظریه‌ای ارائه می‌دهند: پوزولانهای طبیعی با منشأ آتشفشانی در بردارندهٔ مواد شیمیایی غیرچسبنده یا توفهای متراکم بدست آمده از رسوبات خاکستر و خاکهای آتشفشانی‌اند آنها یا مانند پوزولانهای منطقه راین آلمان لایه‌های زیرین رسوبات جدیدند و به حالت شبه سنگ تحکیم یافته وجود دارند و یا بصورت مخلوط سیلیکاتها و حاوی ذرات شیشه‌ای وکریستالی، خاکستر و خاک آتشفشانی هستند که تحت سرد شدن سریع تشکیل شده‌اند. در بعضی حالتها اصلاح شیمیایی قابل ملاحظه‌ای را تحمل کرده که به هر صورت منجر به تشکیل ترکیبات زئولیتی می‌گردند.

این اصلاح را معمولاً به عمل بخار آب با دمای بالا و دی اکسیدکربن در زیرزمین نسبت می‌دهند. اثر چنین اصلاحی را باید بهبود در رفتار شیمیایی پوزولانها دانست که طی آن، عناصر اصلی بطور جزیی تحت تأثیر واکنش بادی اکسیدکربن و آب قرار می‌گیرند. فعالیت پوزولانی کمی نیز در گدازه‌های حجیم و همچنین در بعضی از سنگ‌های آذرین تجزیه شده مثل پسامیت و آرن که اهمیت کاربردی ندارند مشاهده گردیده است. ترکیبات شیمیایی پوزولانهای غیرچسبنده آتشفشانی در طیف وسیعی متغیرند با این حال در تمام آنها سیلیس و آلومین نسبت به دیگر اجزاء میزان بالاتری دارند. (رمضانپور،۱۳۷۶)

پوزولانهای مصنوعی

دوده سیلیس یک محصول مصنوعی حاصل از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید فلز سیلسیم یا آلیاژهای سیلیسیم بخصوص آلیاژهای فروسیلیس است. این ماده با داشتن بیش از ۸۰ درصد سیلیس با حالت غیرکریستالی و به شکل ذرات بی‌نهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون یک ماده پوزولانی قوی است. این ماده بی‌شکل با ذرات بسیار ریز به نامهای مختلفی از قبیل:

Pyrogenic Silica Flour, Microsilica , Aerosol , Silicadust Silica Fume Condensed Silica Fume نامیده می‌شود. سیلسیم، فروسیلیس و سایر آلیاژهای سیلسیم در کوره‌های الکتریکی از نوع قوسی غوطه‌ور که در دماهای بسیار زیاد کوارتز را به کربن تبدیل می‌کنند، تولید می‌شود. بنابراین، کارخانه‌های سازنده عموماً در مناطقی که نیروی هیدروالکتریک ارزان قابل دسترس است، مستقرند.

واکنش‌های شیمیایی که در کوره اتفاق می‌افتد، پیچیده بوده ولی یکی از این واکنش‌ها اکسیداسیون sio و تراکم آن در شکل ذرات کروی بسیار ریز و غیرکریستالی سیلیس است. بنابراین دوده سیلیس یک محصول از فرآیند تولید است که توسط گازهای خروجی از کوره به خارج انتقال می‌یابد. کارخانه‌های دارای کوره قوسی غوطه‌ور به انواع مختلف طراحی می‌شوند.

اما آنچه از دیدگاه تولید دوده سیلیس اهمیت دارد، تشخیص بین دو نوع کوره شامل کوره‌های با سیستم بازیابی حرارتی و بدون سیستم بازیابی حرارتی است. زیرا مقدار کربن و رنگ دوده سیلیس حاصل از این دو نوع کوره تفاوت مهمی دارد. اگر کوره مجهز به سیستم یاد شده باشد، گازهای خروجی حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دارند و در این دما بیشتر کربن سوخته می‌شود و دوده سیلیس حاصل رنگ روشن خواهد داشت. در حالیکه اگر کوره مجهز به این سیستم نباشد، گازهای با حرارت حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد خارج شده و مقداری کربن سوخته نشده باقی می‌ماند و نتیجتاً این افت گرمایی باعث می‌شود که دوده سیلیس با رنگ خاکستری حاصل شود.

خواص فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیس

برحسب نوع آلیاژ تولید شده و طرح کوره، خواص فیزیکی و شیمیایی محصول متغیر است.

الف- خواص شیمیایی

بدیهی است که ترکیب شیمیایی دوده سیلیس بستگی به ترکیب محصول اصلی دارد که در کوره تولید می‌شود و آن هم در ارتباط با ترکیب شیمیایی مواد خاصی است که در کوره ریخته می شود بعلاوه، نوع کوره نیز بر روی ترکیب شیمیایی اثر می‌گذارد. بعنوان مثال، یک کوره مجهز به سیستم بازیابی، حرارتی، دوده سیلیس با درصد کربن کم تولید می‌کند.

برخلاف سایر پوزولانها، مانند خاکستر بادی، یک نوع مشخص دوده سیلیس حاصل از منبع و حد غالباً ترکیب شیمیایی بدون تغییر یا تغییرات خیلی کم را در طول زمان خواهد داشت. این ثبات در ترکیب شیمیایی ناشی از این حقیقت است که مواد خام خالص در تولید فلز سیلیس و آلیاژهای فروسیلیس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب- خواص فیزیکی

چگالی مخصوص دوده سیلیس حاصل از صنعت تولید آلیاژ فروسیلیس یا فلز سیلسیم تقریباً ۲/۲ است و برای دوده سیلیس بدست آمده از آلیاژهای دیگر بین ۲/٤ تا ۳/۱ تغییر می‌کند. وزن ظاهری این ماده بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب است. ازنظر میانگین اندازه ذرات، مقدار مانده روی الک نمره ۳۲۵ (معادل ٤۵ میکرومتر) برای ۳۰ نمونه تجریه شده، ۳/۷ درصد و سطح مخصوص آنها با روش بلین حدود ۳/۳ تا ۳/۷ متر مربع برگرم اندازه‌گیری شده است. از آنجا که مشاهدات با میکروسکوپ الکترونی توسط بسیاری از محققان نشان داده، دوده سیلیس بیشتر از ذرات کروی به قطر میانگین ۰/۱ تا ۰/۲ میکرومتر تشکیل شده است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الک و روش بلین مشخصات ذرات دوده سیلیس روش‌های مناسبی نیستند.

خاکستربادی ماده‌ای است که از سوختن زغال سنگ مخصوص در نیروگاهها و در فیلترها بصورت غبار تهیه می‌شود. ذرات ریز خاکستربادی از گاز حاصل از سوختن، قبل از اینکه وارد هوا شده جدا می‌گردند. (رمضان پور و پیدایش،۱۳۷٦)

خاکستربادی را به دو دسته تقسیم می شود:

- گروه F: خاکستربادی با فعالیت پوزولانی.
- گروه C: خاکستربادی با فعالیت پوزولانی همراه با آهک بیش از ۱۰ درصد.

خواص فیزیکی و شیمیایی خاکستربادی

به منظور اندازه‌گیری و مشخص کردن شکل ذرات خاکستربادی، آزمایشات متعددی توسط پژوهشگران کشورهای مختلف صورت گرفته و این نتیجه بدست آمده است که اندازه ذرات این ماده بین ۰/۱ تا۱۵۰ میکرون و غالباً به شکل کروی هستند. سطح مخصوص این ماده بین ۱۳۰ متر مربع بر کیلوگرم در خاکستربادی با زغال‌های قیری و ۵۸۰ متر مربع بر کیلوگرم برای خاکستربادی با زغالهای لیگنیتی اندازه‌گیری شده است. چگالی مخصوص این ماده نیز براساس ماده اولیه تولید کننده آن بسیار متغیر و بین ۱/۹ تا ۲/۹٦ گزارش شده که بطور متوسط چگالی مخصوص معادل ۲/۵ را می‌توان به آن نسبت داد. از نظر شیمیایی، خاکسترهای بادی بدست آمده از سوختن زغال سنگ مختلف، از لحاظ نوع اکسیدها و ترکیبات تشکیل دهنده آن متفاوتند. آزمایش‌های انجام شده توسط دستگاه‌های اشعه ایکس X نشان داده‌اند که اجزای اصلی تشکیل دهنده انواع خاکستربادی شامل Al_2o_3 , Sio_2 , Fe_2o_3 , Cao و اجزای فرعی آن شامل C , Tio_2 , Mno , So_3 , K_2o , Na_2o , Mgo هستند. در اثر عمل سرد شدن خاکستربادی که خیلی سریع انجام می‌گیرد، ذرات با بافت غیر کریستالی و شیشه‌ای بدست می‌آیند و ذرات کمی بصورت کریستالی ظاهر می‌شوند. به علت بافت غیرکریستالی و شیشه‌ای خاکستربادی این ماده فعالیت پوزولانی بالایی داشته و با آهک و سیمان و

واکنش‌های شیمیایی ایجاد می‌کند. (رمضان پور و همکاران،۱۳۷٦)

فعالیت پووزلانی

خاکستربادی گروه C با کلسیم بالا که شامل حالت شیشه‌ای و بعضی حالت‌های کریستالی (شامل C_1A_3S, Mgo , C_2S , C_3A , $Caso_4$ آهک آزاد) است، اغلب خواص خودگیرشی دارد. طی اختلاط آنها با ایجاد ترکیباتی چون اترینگات، منوسولفوآلومینات و ژل C-S-H باعث سخت شدن آن می‌گردند. خاکستربادی نوع F که خاصیت گیرشی ندارد با اضافه نمودن آهک $Ca(OH)_2$ و قلیائی واکنش نشان داده و سخت می‌شود. ترکیبات حاصل از واکنش‌ها عموماً C-S-H , C_2ASH_8, C_4AH_{13} هستند. در اغلب گزارش‌ها اثر خاکستربادی در هیدراته شدن سیمان بصورت تأثیر کندگیری روی ترکیبات C_3S, C_2S آورده شده است. فعالیت پوزولانی خاکستربادی با روش‌های متداول واکنش با آهک و یا بررسی مقاومت، اندازه‌گیری شده است. فعالیت پوزولانی این مواد بستگی به میزان اکسید سیلیسیم و آلومینیوم آنها دارد. در مقابل، بالا رفتن مقدار زیاد اکسید آهن (Fe_2o_3) سبب کاهش فعالیت پوزولانی این ماده می‌گردد.

ریزی ذرات و بخصوص وجود ذرات غیرکریستالی از عوامل مهم دیگر در افزایش فعالیت پوزولانی این ماده به حساب می‌آیند. آزمایش‌های متعددی جهت ارتباط فعالیت پوزولانی خاکستربادی با استفاده از روش‌های جذب آهک و یا مقاومت با سطح ویژه و ریزی آنها انجام شده که نتیجه، حاکی از وابستگی خوب این خاصیت به سطح ویژه ذرات بوده است. همچنین افزایش دما باعث فعالیت بیشتر ذرات خاکستربادی در ایجاد ترکیبات ($Ca(OH)_2$) و یا ذرات سیمان می‌شود.

سرباره کورهٔ ذوب‌آهن

به هنگام تولید آهن خام در کوره بلند آهنگدازی، ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن و سوخت را به کمک یک ماده‌گداز آور از آهن خام جدا می‌کنند. سرباره محصولی فرعی از فرآیند ذوب آهن است. کانی‌های آهن و ترکیبات، اکسیدی می‌شوند. تحت این شرایط اکسیدهای آهن با کک ترکیب می‌شوند و دی‌اکسیدکربن (Co_2) و منواکسیدکربن (Co) ایجاد می‌نمایند. در این فرآیند بعد از عمل احیاء آهن خام بصورت مذاب در قسمت تحتانی کوره جمع می‌شود. عمدتاً این چنین ناخالصی‌هایی از جنس سیلیس و آلومین هستند. درجهٔ ذوب سیلیس و آلومین بسیار بالاتر از نقطه ذوب آهن است. بدلیل اینکه از نظر فنی جدا کردن این ناخالصی‌ها از آهن در حالت جامد مشکل است، بنابراین ضروری است که به بار کوره متشکل از آهن و کک مقداری سنگ آهک اضافه شود تا مخلوطی از آهک، سیلیس و آلومین که درجه ذوب آنها پایین است، بدست می‌آید. لذا علاوه بر ذوب شدن آهن، یک لایه سطحی از سرباره ذوب شده تشکیل می‌گردد که به دلیل سبکتر بودن بصورت مذاب و کف بر روی آهن خام قرار می‌گیرد. بنابراین، سرباره کوره ذوب آهن یک محصول گداخته است که در پایین کوره بلند و بر روی آهن خام ظاهر می‌شود. دمای آن نزدیک به دمای آهن یعنی بین ۱٤۰۰ تا ۱٦۰۰ درجه سانتیگراد است.

خواص فیزیکی سرباره

از نظر فیزیکی سرباره بایستی دارای بافت شیشه‌ای باشد. در سیستم‌های امروزی با استفاده از آب‌پاشی با فشار بالا شرایطی را بوجود می‌آورند که حالت شیشه‌ای سرباره به حدود ۹۵ تا ۱۰۰ درصد برسد. حالت شیشه‌ای (بی‌شکل بودن) سرباره و ترکیب شیمیایی مناسب با آن عوامل اصلی تعیین کننده قدرت هیدرولیکی (تشکیل فعل و انفعال با آب) سرباره است . وزن مخصوص سرباره کوره ذوب‌آهن اصفهان ۲/۷٥٤ گرم بر سانتیمتر مکعب و سطح مخصوص آن ۲۲۰۰ سانتیمترمربع بر گرم است که البته سطح مخصوص به روش اسیاب کردن بستگی دارد.(رمضان پور،۱۳۷٦)

خواص شیمیایی سرباره

اجزای تشکل دهندهٔ سرباره عمدتاً آهک، سیلیس و آلومین است و شباهت زیادی به اجزای سیمان پرتلند دارد. ترکیب شیمیایی سرباره بستگی به ترکیب سنگ معدن و همچنین ناخالصی‌های موجود در سنگ آهک اضافه شده به کوره دارد. بطور کلی سرباره‌ها دارای تفاوت‌هایی در ترکیب شیمیایی خود هستند.(حامی،۱۳۸٦)

%35-%45

خاکسترپوسته برنج

استفاده از پس مانده‌های محصولات کشاورزی در امر ساختمان، طی سالهای متمادی مورد مطالعه بوده است. پوسته برنج یکی از پس مانده‌های کشاورزی است که در حد وسیعی تولید می‌گردد. پوسته برنج اگر تحت شرایط کنترل شده سوزانده شود، خاکستر حاصل دارای خواص پوزولانی زیاد بوده جهت استفاده در مخلوط آهک- پوزولان و جایگزینی به جای سیمان، مناسب می‌باشد و اگر در شرایط کنترل نشده سوزانده شده، خاکستر حاصل که قسمت اعظم آن اکسید سیلیسیم است به شکل کریستالی در می‌آید که دارای فعالیت پوزولانی کمی است. استفاده از خاکستر پوسته برنج بعنوان یک پوزولان، نسبتاً جدید است. اگرچه اندیشهٔ استفاده از آن به سالهای ۱۹۲٤ بر می‌گردد. (رمضان پور و همکاران،۱۳۷٤)

روش‌های تولید خاکستر پوسته برنج

مسأله عمده در تولید سیمان خاکستر پوسته برنج، تبدیل پوسته برنج به خاکستر و آسیاب کردن خاکستر تا رسیدن به ریزی مناسب است. به منظور داشتن واکنش قابل قبول با آهک، خاکستر نیاز به مدت طولانی، حتی تا ۷ ساعت، آسیاب کردن دارد. برای تولید خاکستر پوسته برنج، پوسته برنج را در شرایط تحت کنترل می‌سوزاند. اگر شرایط سوزاندن تحت کنترل نباشد خاکستر حاصل دیگر کاملاً بی‌شکل و غیر بلوری نخواهد بود. (رمضان پور و همکاران،۱۳۷٤)

هیدراتاسیون پوزولانها

یک ماده پوزولانی وقتی با آب مخلوط می‌شود، هیچگونه ارزش و خاصیت چسبندگی و سخت شدن ندارد. فعل و انفعالات پوزولانی بین اجزاء سیلیسی یا سیلیس آلومیناتی یک پوزولان با هیدروکسید کلسیم در معرض رطوبت اتفاق می‌افتد و خواص چسبندگی و سیمانی شدن را بروز می‌دهد. در مورد فعل و انفعال پوزولانی، از آنجا که اجزاء اصلی یک پوزولان شامل $Cao\ \ Fe_2o\ ,\ Al_2o,\ Sio_2$ است. از این رو محصولات حاصل از فعل و انفعال شیمیایی شبیه محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان پرتلند است. محصولات اصلی هیدروسیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدروآلومینات کلسیم (C-A-H) عموماً بعد از ترکیبات سیلیس و آلومین موجود در پوزولان با هیدروکسیدکلسیم بدست می‌آید. (رمضانپور،۱۳۷٦)

ارزیابی فعالیت پوزولانی

پیشنهادهای متعدد در این زمینه نشان می‌دهد که یافتن یک روش آزمایش عمومی که هم برای هر نوع پوزولان معتبر باشد و هم دقت و سرعت کافی و قابل قبول داشته باشد امری مشکل است. روش‌های زیادی جهت تقریب فعالیت پوزولانی توسط محققان پیشنهاد شده است. بعضی از این روش‌ها عمومی‌اند و می‌توانند هم برای پوزولانهای طبیعی و هم پوزولانهای مصنوعی بکار گرفته شوند و برخی دیگر خاص هستند. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: روش‌های شیمیایی و فیزیکی.

الف- روش‌های شیمیایی

فعالیت پوزولانی را می‌توان با محاسبهٔ مقدار آهک ترکیب شده با پوزولان طی مخلوط شدن با آهک هیدراته یا سیمان پرتلند اندازه‌گیری نمود. این آزمایش را می‌توان با کار کردن روی مواد معلق یا خمیر ایجاد شده انجام داد که نتیجتاً یک ایده از فعالیت کوتاه مدت و دراز مدت ماده بدست می‌دهد.

در بعضی روش‌های پیشنهادی مقدار سیلیس (Sio_2) یا مقدار مجموع ($Fe_2o_3,\ Al_2o_3,\ Sio_2$) حل شده در اسید کلریدریک سرد اندازه‌گیری می‌شود. از جمله روش‌های دیگر می‌توان روش‌های فراتینی، تجزیه حرارتی و روش راسک و باسکار را نام برد.

ب- روش‌های فیزیکی

بعضی از روش‌های تجربی دیگر جهت خاصیت‌های پوزولانی مواد شامل اندازه‌گیری برخی خواص مهندسی در ارتباط با آهک است. به عنوان مثال روش تامپسون که برای ارزیابی خواص خاک مفید و قابل استفاده است، عبارت از اندازه‌گیری مقاومت فشاری احاطه نشده خاکهای مخلوط شده با درصد بهینه آهک (برای مقاومت فشاری) و متراکم شده با دانسیته حداکثر نگهداری شده به مدت ۲۸ روز است. آنگاه اختلاف بین مقدار مقاومت فشاری احاطه نشده مخلوط خاک آهک و مقاومت خاک خالص به عنوان عکس‌العمل آهکی خاک نامیده می‌شود. آزمایش‌های مقاومت فشاری احاطه نشده ، همچنین برای تعیین فعالی پوزولانی PFA و سایر پوزولانها به

روش‌های متنوع توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. (رمضان پور،۱۳۷٦)

روش‌های شناسایی خاکهای واگرا

نظر به اهمیت شناخت خاکهای واگرا دو معیار کلی زیر پیشنهاد می‌شود.

الف: تشخیص عمومی خاکهای واگرا توسط مشاهدات صحرائی

ب: روش‌های آزمایشگاهی تشخیص خاکهای واگرا

تشخیص عمومی خاکهای واگرا توسط مشاهدات صحرائی

در پروژه‌های سدسازی که بایستی در انتخاب منابع قرضه برای سدهای خاکی و بررسی زمین از جهت وجود خاکهای واگرا دقت نظر زیادی داشت، این مرحله مخصوصاً قابل توجه می‌باشد. از علائم صحرائی بارز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

– وجود فرسایش عمیق خندقی در خاکهای پراکنده و شکستهای ناشی از رگاب در سدهای کوچک، نشان دهنده وجود خاک واگرا است.

– در مناطقی که سطح زمین دارای یک شیب نسبتاً تندی است، بریدگیهای بسیار عمیق و مشخص در سطح زمین بر اثر بارندگی و فرسایش سریع، دیگر دلیل وجود این نوع خاک در محیط مزبور است.

– فرسایش مقاطع خاکبرداری جاده‌ها، فرسایش تونلی در امتداد خطوط خندق‌ها و فرسایش درزه‌های سنگی پر نشده با رس ممکن است نشانگر پتانسیل واگرایی خاک باشد.

– معمولاً در مناطق در برداندە خاکهای واگرا آثار شکستگی از قبیل کانالهای تنگ و عمیق طبیعی، خلل و فرج و حفره‌های بزرگ در دیواره‌های عمودی، سوراخ‌های آب گذر، جویبارها و تونل‌ها دیده می‌شوند.

– یکی از مشخصه‌های بارز کانالهای ناشی از آب شکستگی در خاکهای واگرا، مسیر پرپیچ و خم آنهاست معمولاً زاویه خمش این کانالها حدود ۹۰ درجه است.

– وجود آبهای تیره در سدهای مزارع و چاله‌های گل‌آلود بعد از بارش نشانگر خاکهای واگرا است.

نکته مهم آنست که در مناطق مسطح و کم‌شیب، تشخیص خاکهای واگرا به سادگی میسر نیست. در این مناطق بر اثر بارندگی ذرات رس واگرا شسته شده و لایه‌هایی از ماسه لای‌دار یا ماسه در سطح زمین باقی می‌ماند که لایه‌های عمیق‌تر را محافظت می‌کند. لذا افزایش و بریدگیهای عمیق، مشخصه بارز خاکهای واگرا در سطح زمین دیده نمی‌شود. بنابراین عدم وجود علائم آب شستگی و فرسایش در سطح زمین به معنای عدم وجود خاکهای واگرا در منطقه نمی‌باشد. در این شرایط احتمال بروز و شکل‌گیری خندق وجود دارد و می‌تواند نشانگر خصوصیت خاک باشد. (فاخر و عسگری، ۱۳۸٦) در ادامه باید تذکر داد که می‌توان خصوصیات کانی رس‌ها را از چنین مشاهداتی حدس زد، لذا در جداول (۲) و (۳) متکال و اینگلس برخی راهنمایها در این جهت ارائه داده‌اند. (Ingles , 1985)

جدول ۲. شناخت کانی‌های رس از مشاهدات محلی (Ingles, 1985)

مشاهده	ترکیب رس قابل مشاهده
آب خیلی گل آلود به رنگ زرد– قهوه‌ای تا قرمز– قهوه‌ای	مونت موریلونیت– ایلیت به اضافه خاک شور
آبهای روشن	کلسیم، منیزیم یا خاک غنی از آهک، خاک ماسه‌ای با اسید زیاد
آبهای روشن با یک قسمت مایل به آبی	کائو لیتهای غیرنمکی
فرسایش آبراهها و یا تونل‌های ایجاد شده در خاک طبیعی	رس‌های شور، مونت موریلونیت‌های معمولی
قسمت‌های روین ست	کائولینیتها

ریزش‌ها	کائولینیتها، کلریتها
سطوح با برجستگیهای ریز	مونت موریلونیتها
سنگ از نوع گرانیتی	میکاها، کائولینتها
سنگ از نوع بازالتی، از نظر توپوگرانی بطور ضعیف زهشکی شده	مونت موریلونیتها
سنگ از نوع بازالتی، از نظر توپوگرافی بطور خوب زهشکی شده	کائولینیتها
ماسه سنگها	کائولینتها
گل سنگ‌ها و شیل‌ها	مونت موریلونیت‌ها یا ایلیت، اغلب خاک شور
سنگ آهک	مونتموریلونیت‌های قلیائی با ویژگیهای ناپایدار
سنگ از نوع پیوکلاسیتکهای تازه	الوفینها

جدول ۳. شناخت کانی‌های رس از مقاطع خاک(Ingles , 1985)

مشاهده	ترکیب رس قابل مشاهده
رس‌های رنگارنگ، لکه قرمز- نارنجی- سفید	کائولینیتها
رس‌های رنگارنگ، لکه زرد- نارنجی- خاکستری	مونت موریلونیتها
رس‌های سیاه و خاکستری تیره تا متوسط	مونت‌موریلونیتها
رس‌های قرمز قهوه‌ای و قهوه‌ای	ایلیت، مقداری مونت موریلونیتها
رس‌های خاکستری روشن و سفید	کائولنیتها و بوکسیتها
دانه‌های ریز جدا از هم با انعکاس‌های بسیار روشن	خاکهای متورق
میکروکریستالهای جدا از هم، به آسانی خرد شونده	خاکهای با گچ زیاد
برجستگی کوچک نرم در اسید قابل حل	کربونیتها
برجستگی‌های سخت قرمز قهوه‌ای	سنگهای آهنی_ اجری
ترکهای ممتد، پهن، عمیق و گسترش یافته تا ٦ سانتیمتر یا کمتر	ایلیتهای با کلسیم زیاد و مونت موریلونیتها
فاصله‌های بالای ۳۰ سانتیمتر و بیشتر	ایلیتها
خاکهای لومی با بافت خرد شونده با مقدار رس قابل ملاحظه	معمولاً همراه با کربونیت، الوفین یا کائولین اما بدون مونت موریلونیت و بندرت ایلیت

خاکهای لومی با بافت خرد شونده با مقداری رس سیاه	خاکهای ارگانیکی
خاکهای لومی با بافت خرد شونده با مقداری رس کم	کربونیت، سیلیتها و ماسه‌ها
وجود کرم بر روی مقاطع هوازده	مونت موریلونیتها به اضافه خاک شور
خاک نسبتاً سست و خاک سطحی به شدت شسته شده	رویه بخش شسته شده، سیلیت ریز، زیربخش شسته شده خاک واگرا، احتمالاً آب فصلی در سطح شسته شده جاری می‌شود.

اصلاح خاک‌های واریزه ای واگرا با استفاده از مواد افزودنی (یک مطالعه موردی در استرالیا)

بعد از معرفی اجمالی افزودنی‌هایی که بصورت متداول جهت تثبیت خاکهای واگرا بکار گرفته می‌شود، در این قسمت تاثیر ۳ افزودنی آهک، سربارهٔ کوره و خاکستربادی بر روی نمونه خاک واریزه‌ای که در والز جنوبی استرالیا توسط (B.Indraratna 1996, Ghiasi et al,2022,2023, 2024) صورت گرفته، نشان داده شده و مقایسه می‌گردد. (Indratna,1996)

در واقع با استفاده از آزمایشات ژئوتکنیکی میزان تأثیر هر کدام از این افزودنی‌ها و با درصدهای مختلف بر مشخصه‌های تحکیم، پارامترهای مقاومت برشی (C, ϕ) و تراکم‌پذیری مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در هر قسمت به جهت ارزیابی بهتر درصد اصلاح شده، نمونه طبیعی خاک نیز در کنار سایر نمونه‌ها نشان داده شده است. همچنین تاثیر افزودنی‌ها بر حدود اتربرگ و سطح PH مورد بررسی قرار گرفته است.

لازم به توضیح است که به جهت فراوانی خاکستربادی و سرباره‌های فولادی در منطقه موردنظر استفاده این مواد اقتصادی بوده و به روش‌های عرف دیگر همچون تثبیت آهکی ارجحیت دارد، اما چون قیمت این افزودنی‌ها در کشورهای مختلف، متفاوت بوده و به فراوانی این مواد بستگی دارد لذا در این مقاله تمرکز بیشتر بر روی تاثیر این افزودنی‌ها بر پارامترهای ذکر شده بوده و در نهایت استفاده از این مواد در هر پروژه بستگی به نتایج حاصل از این آزمایشات، اهمیت پروژه، شرایط خاک در محل، و قیمت مواد افزودنی در (محل با در نظر گرفتن شرایط محل مواد) و نهایتاً قضاوت مهندسی دارد. در آخر نشان داده می‌شود که سرباره کوره بیشترین تاثیر را در بهبود زاویهٔ اصطکاک خاک دارد، و در مقابل خواهیم دید که بیشترین مقاومت فشاری بهینه توسط آهک تامین می‌شود و خاکستربادی غیر پوزولانی جهت تثبیت خاک واریزه‌ای نامناسب ارزیابی می‌شود.

در سطح زمین موردنظر مصالح و دانه‌بندی ذرات تشکیل دهنده آن در نقاط مختلف متفاوت است. ضمن اینکه بیشتر بخش‌های زمین از آبرفت با مقاومت برشی پائین تشکیل شده است.

خاکهای واریزه‌ای ریزدانهٔ رسوبی اغلب از نرخ فرسایش بالایی برخوردار هستند. ارزیابی شده است که در حدود۱۲درصد زمین‌های در دسترس در اثر فرسایش آبی پتانسیل آسیب پذیری دارند. هدف از این مقاله، ارزیابی تاثیر افزودنی‌ها بر تثبیت خاک واریزه ای واگرا که دارای خواص ژئوتکنیکی ضعیف است می‌باشد. در این مقاله اولویت خاصی به مصالح ما زاد صنعتی از قبیل خاکستربادی و سرباره کوره ذوب آهن داده شده و اثر آنها با مواد افزودنی عرف همچون شیرهٔ آهک مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با اینکه هزینه شیرهٔ آهک نسبت به آهک زنده بیشتر است اما در زمین‌های کشاورزی به جهت بازدهٔ بهتر و سهولت در استفاده به آهک زنده ترجیح داده می‌شود. آهک زنده به هنگام اشباع شدن واکنش گرمازایی ایجاد کرده و باعث سوزاندن سطح پوست در تماس با آن می‌شود، ضمن اینکه باعث تسریع در خوردگی ابزارآلات کشاورزی می‌شود.

در واقع استفاده از مواد مازاد صنعتی در خاکهای معمولی یک دستاورد مهم اقتصادیست که می‌تواند در کاهش حجم فساد و آلودگی در محیط زیست مفید باشد و در برنامه‌های مدیریتی مواد مازاد قرار گیرد. به جهت اینکه اندازه ذرات خاکستربادی و سرباره کوره بزرگتر از اندازه لازم است، این مواد سائیده شده تا به اجزاء کوچکتر تبدیل شود.

لازم به توضیح است که بیشترین بخش از سرباره‌های کوره در اساس راه و شن و ماسه ریل راه‌آهن مصرف می‌شود. از طرفی سرباره کوره سائیده شده به عنوان جایگزین سیمان پرتلند استفاده می‌شود. ضمن اینکه با کاربری مناسب در آجرسازی نیز بکار می‌رود. خاکستربادی و سرباره کوره ذوب‌آهن، حاوی مقدار کمی از مواد سمی یا ترکیبات اسید

فورمیک از قبیل سولفیدآهن و گوگرد است. که چندان قابل توجه نیست. بنابراین ترکیب این مصالح با خاک واریزه‌ای خطری جهت آبهای زیرزمینی بوجود نمی‌آورد .

خواص فیزیکی خاک واریزه‌ای واگرا

نمونه در نظر گرفته شده با مشخصات بافت ریزدانه، ماسه قرمز یا قهوه‌ای، خاک نباتی متخلخل و در محل‌های کوچکی حاوی اجزاء گوشه دار خیلی کوچک۲ تا ۵ میلیمتر است. در ناحیه بالایی خاک و در ۵ سانتیمتری ابتدایی ریشه وجود دارد و خاک تا حدی حالت اسیدی دارد (PH=5) ضمن اینکه این خاک با خط زیاد فرسایش و عدم پایداری ارزیابی می‌شود. نمونه ریزدانه از ۵۰ سانتیمتری بالای شیب Eagle Hill جایی که فرسایش شدید مجرای آب در این مکان صورت گرفته اخذ می‌شود. حد روانی خاک موردنظر ٪۳۷ و حدخمیری آن در حدود ٪۲۰ تعیین می‌شود و بنابراین شاخص خمیری ٪۱۷ حاصل می‌شود. آنالیز خط انقباض بیانگر این نکته است که بیشترین انقباض در حدود ٪۱۲/۵ بدست می‌آید. چگالی خاک مورد نظر ۲/٦۸ ارزیابی می‌شود که این چگالی بیشتر از چگالی مواد افزایشی استفاده شده در این مقاله است (خاکستربادی ۲/۱۵ سرباره کوره۲/۳۲ آهک ۲/۲۱). بنابراین انتظار می‌رود نمونه‌های خاک مخلوط شده چگالی کمتری از خاک طبیعی داشته باشد. خاک طبیعی با میزان PH بین ٤/۹ تا۵/۱ قابلیت اسیدی دارد و افزودنی‌های قلیایی سطح PH مخلوط را افزایش می‌دهد. در واقع این یک نتیجهٔ سودمند است چراکه خاک خنثی یا خاک با قلیایی کم ، خوردگی اعضاء بتنی و فلزات مدفون را به همراه نخواهد داشت.

مخلوط خاک

استفاده از آهک و سیمان در مخلوط آهک در هر دو حالت تثبیت سطحی و عمقی به خوبی شناخته شده است. بکارگیری از ستونهای آهکی در مهندسی پی بطور موفقیت‌آمیزی در کاهش نشست و بهبود ظرفیت باربری نقش داردضمن اینکه در ساختار خاکریزها آهک تأثیر مثبتی دارند. مطالعات صورت گرفته بر روی رس نرم که بوسیله آهک اصلی شده، حاکی از افزایش در راندمان تحکیم به میزان ۱۰ تا ٤۰ برابر و افزایش در مقاومت زهکشی نشده بین ٤ و ۵ برابر می‌باشد. نتیجه این که جهت همهٔ انواع رس‌ها استفاده از سیمان افزوده به آهک در افزایش مقاومت بلندمدت مفید است. تأثیرات شیرهٔ آهک در خاک موردنظر به پارامترهای زیر بستگی دارد:

الف جذب ($Ca(OH)_2$) توسط رس معدنی (عکس‌العمل تغییر کاتیونها) و بهبود تجمع پذیری.

ب- واکنش آبی بین رس مرطوب و ($Ca(OH)_2$) و بهبود خود گیرش مخلوط.

تأثیر استفاده از خاکستربادی و سرباره کوره به درصد آهک آزاد بستگی دارد. نتیجه اصلی این عکس‌العمل کاهش پلاستیسیته مخلوط ترکیب شده با کارآیی بیشتر است. استفاده از مصالح مازاد از قبیل خاکستربادی، سرباره کوره و مواد پسماند معدن در بهبود خاک در مقایسه با تثبیت آهکی متداول نیست. همچنین تاثیر خاکستربادی پوزولانی بر روی رفتار خاک واگرا مورد بررسی قرار گرفته است.

برای ماسه یکنواخت در والز جنوبی نشان داده است که تخمین و مقاومت فشاری غیر محدود با استفاده از درصد بالای ٪۲۰ خاکستربادی می‌تواند بهینه شود. بهره‌برداری از سرباره کوره فراهم شده از کارخانجات فولاد در بهبود خاک جهت شرایط منطقه‌ای استرالیا جواب نداده است. بهبود بند خاکی با اصلاح آهکی را مورد بررسی قرار داده است. او بیان کرد که افزونه آهکی به میزان حدود ٪۳ مقدار حد پلاستیک را به حد روانی نزدیک کرده و منتج به صفر شدن تقریبی نشانه پلاستیک می‌شود. به عبارت دیگر، سختی (خود گیرش) نمونه‌های اصلاح شدهٔ آهکی جهت بهبود کارایی به اشباع شدن بیشتری نیاز دارد. بنابراین حد پلاستیک با درصد آهک ازفایش پیدا می‌کند، و تاثیر کلی آن کاهش اندیس خمیری است. هرچند درصد آهک بیشتر از ٪۳ منجر به کاهش خمیری خاک می‌شود. این نکته را معین است که جهت رس مونت موریلونیت انبساطی تأثیر درازمدت آهک بر حدود اتربرگ به دورهٔ نگهداری وابسته است. دردورهٔ کوتاه، رفتار نمونه‌های مونت موریلونیت اصلاح شدهٔ آهکی شبیه است به خاکهای رس غیرانبساطی.

خواص خاکستربادی و سربارهٔ کوره

خاکستربادی استفاده شده در این تحقیق نشان می‌دهد که با گذر زمان بصورت خود گیرشی عمل نمی‌کند، بنابراین مقاومت فشاری غیر محدود برای نمونه‌های متراکم با میزان ٪۸ اشباع طبیعی مقدار ۷۰-٦۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. این

خاکستربادی چگالی ۲/۱۵ در کلاسه‌بندی (F، غیر پوزولانی و عدم خودگیرش) با درصد آهک آزاد کمتر از ٪۵ قرار دارد. ترکیب شیمیایی خاکستر بادی تابع دقیق نوع کوره، مقدار زغال سنگ و نوسانات درجه حرارت کوره بوده و لذا خاکستربادی سایر کارخانجات با خاکستربادی استفاده شده متفاوت است.

خواص رفتاری خاک وایرزه‌ای اصلاح شده

خواص مهندسی خاک واریزه‌ای اصلاح شده با سرباره کوره، خاکستربادی و شیرهٔ آهک با استفاده از آزمایشات تراکم، تحکیم، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برشی سه محوری در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تاثیر عمل آوردن

ترکیبات شیمیایی بویژه اکسیدها، با هیدراسیون در حضور آب در خاک طبیعی آغاز می‌شود. زمان این عمل به نتایج عکس‌العمل در خاک بستگی دارد که منجر به افزایش مقاومت در هر دو حالت فشاری و برشی می‌شود.

تاثیر روی PH

خاک واریزه‌ای رسوبی بطور طبیعی با (PH=4/9)بصورت اسیدی است، تاثیر افزودنی‌ها روی میزانPH در خاک اصلاحی مورد بررسی قرار گرفته شد همهٔ افزودنی‌ها، مقدار PH را افزایش می‌دهد. شیرهٔ آهک حتی اگر به مقدار کمی اضافه شود باعث می‌شود تا خاک مخلوط کاملاً بصورت قلیایی در بیاید، تا جایی که استفاده از آهک به میزان بیش از ٪۳ منجر می‌شود که PH > ۱۰ شود. خاکستربادی کمترین اثر را بر افزایش سطح PH دارد، از طرفی ٪۲/۵ سربارهٔ کوره خاک را به میزان کمی قلیایی می‌کند. هرچند، افزایش مقدار آهک سطح PH را به بالاتر از ۱۲ می‌تواند افزایش دهد اما این مقدار می‌تواند به ژئوتکستایل و شبکه مهاربندی که در مجاورت اسیدها و قلیایی های شدید آسیب پذیرند، مضر باشد.

تأثیر بر تراکم

در آزمایش تراکم پروکتور استاندارد تأثیر افزودنی‌ها بادرصدهای مختلف اشباع بر چگالی خشک تعیین می‌گردد. قبل از آزمایش نمونه مخلوط شده به مدت ۲٤ ساعت در دمای ۱ ± ۲۲ نگهداری شد. به منظور جلوگیری از تغییر میزان اشباع نمونه‌های آماده شده با دقت توسط نوار نازک محافظتی پوشش داده شدند. شیرهٔ آهک، خاکستربادری و سربارهٔ کوره در درصدهای مختلف اضافه شد. با توجه باینکه چگالی همهٔ این افزودنی‌ها کمتر از خاک است این موضوع منطقی به نظر می‌رسد. بطور کلی، درصد رطوبت بهینه نمونه های مخلوطی با درصد افزودنی‌ها افزایش پیدا می‌کند، البته به جز نمونهٔ خاکستر بادی که تأثیر درصد رطوبت بهینه ناچیز است. افزاینده‌های آهک و سرباره کوره در خلال روند هیدراسیون آب مصرف می‌کنند وبه این علت موجب افزایش درصد رطوبت بهینه می‌شود. درصد رطوبت بهینه با مدت زمانی که از مخلوط ترکیب شده گذشته و آزمایش روی درصد رطوبت های متفاوت تغییر می‌کند.

تأثیر روی تراکم غیر محدود

نمونه‌های رس مخلوط شده ۷، ۱٤، ۲۸ روز پس از تراکم نگهداری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. در همه نمونه ها حداقل ٪ ۹ بیشترین مقاومت در هفته اول نگهداری بدست آمد، افزایش مقاومت در نمونه‌های دیگری که دو هفته از مدت نگهداری انها می‌گذشت بسیار کم بود. افزودن تنها ٪۲ آهک، مقاومت فشاری تک محوری(ucs) را تقریباً ٪۵ افزایش می‌دهد، در حالیکه اگر این مقدار به ٪۵ برسد، این میزان تقریباً ۲ برابر می‌شود. افزایش آهک بیش از این مقدار سبب کاهش و افت شدیدتری در مقاومت می‌شود. ابراز کرد که آهک اضافی سیلیس را در خاک فراهم می‌کند و موجب مصرف این میزان در خلال مرحلهٔ هیدراسیون (سیمنته شدن) می‌شود. سرباره کوره تاثیری مشابه با شیره آهک دارد. افزایش بیش از ٪۲ سرباره موجب کاهش تدریجی در میزان(ucs) می‌شود. هرچند میزان این افت خیلی کمتر از نمونه آهکی است. سربارهٔ کوره بین ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش در مقاومت را با زاء ٪۲ افزودنی نشان می‌دهد که این میزان بیانگر شرایط اقتصادی مناسبی است. در مقابل استفاده از افزودنی خاکستربادی موجب افزایش خیلی کمی در میزان (ucs) می‌شود (در حدود ٪٦) بیشترین میزان (ucs) در مقداری برابر با ٪۵ افزودنی اتفاق می‌افتد و افزایش بیشتر از این مقدار موجب کاهش تدریجی(ucs) خواهد بود. موارد بحث شده و مقادیر آن جهت خاکستربادی غیر پوزولانی که حجم آهک آزاد کمی جهت هیدراسیون دارد، معتبر است. بطوریکه خاکستربادی پوزولانی نتیجه بهتری در افزایش مقاومت نسبت به زمان دارد. نمونه‌های مخلوط شده برای آزمایش در دمای ۲۲ نگهداری شده بودند، که شاید مقداری

موجب افزایش میزان(ucs) شـود، که بطور طبیعی ممکن است در محل اتفاق بیافتد.

تأثیر افزودنی‌ها بر نشانه خلاء و تحکیم

آزمایشـات تحکیم یک بعدی به منظور بررسـی پارامترهای تراکم پذیری نمونه‌های مخلوط شـده بادرصـد رطوبت بهینه صـورت می‌پذیرد. واضـح است که شیرهٔ آهک افزوده به خاک طبیعی موجب افزایش نشـانهٔ خلاء اولیه در مخلوط شده است، که احتمالاً به دلایل زیر صورت گرفته است.

الف: کـاهش تراکم (بـه این جهت که افزودنی همه حفرات را پر نکرده است)

ب: تورم ایجاد شده در اثر هیدراتاسیون

درعوض، اضـافه کردن خاکسـتر بادی به خاک طبیعی، نشـانه خلاء رادرتمام نمونه های مخلوط شده کاهش می‌دهد.

بطور کلی، همهٔ نمونه‌های اصلاح یافته کاهش در قابلیت تراکم بوسیله فشار، را نشان می‌دهند، ضمن اینکه تأثیرات افزودنی بر خاک طبیعی موجب پدیدار شدن منحنی تحکیم بصورت تخت شـده اسـت. در نمونهٔ آهک و سـربارهٔ کوره کاهش در قابلیت تراکم پذیری به واکنش‌های شـیمیایی (نحوهٔ هیدراسـیون و شـرایط خود گیرشـی) نمونهٔ اصـلاح شـده مربوط می شود. از طرف دیگر در افزودنی خـاکسـتر بادی، قابلیت تراکم پذیری بطور کلی تابعی از نشانه خلاء حاصل از مخلوط و تراکم است به نظر می‌رسد که نسبت بالای خاکستر بادی (بیشتر از ٪۱۵) با خاک واریزه‌ای، بدون اینکه سـبب افزایش در میزان نشانه خلاء شـده می‌تواند مخلوط شـود. برای تثبیت اهکی نمونه رس این مسـئله را بیان شده که نشست تحکیمی نمونه های اصلاح شده میتواند ۵تا ۱۰ مرتبه کمتر از خاک طبیعی باشـد. افزودن آهک (بیشـتر از ٪۲) در حد مهمی نرخ افزایش نشـانه خلاء در حین باربرداری را کنترل می‌کند (یک پاسـخ ارتجاعی تخت). تغییر شـکل‌های ظاهری نمونه اصـلاح شـده غالباً بصورت پلاستیک اسـت که البته مقدار کمی هم بصـورت الاسـتیک اسـت. نمونه‌های اصـلاح شـده با درصدهای بالای سربارهٔ کوره (بیش از ٪۱۰) رفتار مشـابه به حالت نمونه‌های آهکی دارد، به جزء اینکه تخلخلهایشان کمتر خواهد شد.

خواص مقاومت برشی

آزمـایش تحمکیم سـه محوری زهکشـی شـده (بر روی نمونه‌های ۷۵×۳۸ میلیمتر) که با رطوبت بهینه متراکم شده بود، انجـام شـد. بررسـی تـأثیر افزودنی‌هـای مورد نظر بر روی پارامترهای مقاومت برشـی خاک واریزه‌ای در این قسمت مورد بررسـی قرار می‌گیرد. مفهوم آزمایش سه محوری زهکشی شده در انالیز زمین لغزش بحث شـده است. همهٔ نمونه های اصلاح شـده قبل از آزمایش به مدت ۲۸ روز عمل اوری شـده بودند. نمونه‌های سـه محوری جهت تأثیر فشـارهای ۱۰۰و۲۰۰ و۴۰۰ کیلوپاسـکال در نظر گرفته شـدند، به ترتیب، و با نرخ کرنش محوری کمتر از ٪۰/۰۱ در دقیقه تحت شـرایط زهکشی شده با افزایش فشـار حفره‌ای نـاچیز، توسـعه یافته در خلال برش، آزمایش شـدند. نمونه‌های واریزه‌ای که با رطوبت٪۱۵ متراکم شـده با زاویه اصـطکاک زهکشـی شده $(\emptyset d)'$معرفی می‌شود که این مقدار از ۲۵ بیشـتر نیسـت و چسـبندگی زهکشـی شده $(Cd)'$ بین محدوده ۸۵ تا ۱۶۵ کیلو پاسـکال متغییر اسـت. برای این میزان تنش، پوش گسـیختگی موهر – کلب نشـان دهنـده بهبود پارامترهای مقاومت برشـی اسـت، میزان زاویه اصـطکاک ۳۲ و چسـبندگی ۴۱۰ کیلو پاسـکال اسـت که در شرایط زهکشی شده بدست آمده است. تأثیر افزودنی‌ها موجب افزایش چشـمگیری در زاویه اصـطکاک زهکشی شده می‌شود. درهمه نمونه‌های سـه محوری (طبیعی و اصـلاح شـده) شـیب صـفحه گسـیختگی تابع فشـار سـلولی و میزان افزودنی‌ها می‌باشـد. بر خلاف نمونه‌های مخلوط شـده با سرباره و آهک، رفتار نمونه‌های اصـلاح شـده با خاکسـتر بادی باید با افت ناگهانی مقاومت، بعد از نقطه ماکزیمم سـلولی برای فشـارهای ۲۰۰ و۴۰۰ کیلوپاسکال توأم است.

۵-نتیجه‌گیری

تأثیر شـیره آهک، سـربارهٔ کوره و خاکسـتر بادی بر رفتار مهندسـی خاک واریزه ای واگرا بررسـی شد. نمونه‌های اصلاح شده شیرهٔ آهک و سربارهٔ کوره معین کرد که با گذشت زمان به جهت فرآیند هیدراسـیون و سـخت شـدن این رفتار مهندسـی بهبود پیدا می‌کند. شیرهٔ آهک در مقایسه با آهک زنده از اطمینان و بازدهٔ بهتری برخوردار اسـت و لذا بیشـتر مورد اسـتفاده قرار گرفته و متداولتر است. در عوض خاکستر بادی استفاده شده در این تحقیق غیر پورولانی و دارای درصـد آهک آزاد بسـیار کم

می‌باشد در نتیجه بهبودرفتار مهندسی مناسبی با مخلوط خاکستر بادی فراهم نگردید. هر چند انواع پوزولانی خاکستر بادی انتظار می‌رود رفتار بهتری در تثبت خاک داشته باشند و مواد افزایشی بررسی شده دراین تحقیق (شیرهٔ آهک، خاکستر بادی و سربارهٔ کوره) چگالی کمتری نسبت به خاک طبیعی دارند در نتیجه قابلیت تراکم مخلوط نمی تواند بوضوح بر پایهٔ چگالی خشک تعیین می‌شود. نشانه خلاء مخلوط درجه تراکم را بهتر نشان می‌دهد به هر جهت شیرهٔ آهک و سربارهٔ کوره باعث افزایش نشانه خلاء در مخلوط می شود، در عین حال موجب افزایش UCS می‌شود به طوری که با ٪۵ درصد آهک مقاومت فشاری تک محوری خاک واریزه‌ای متراکم از ۲۲۵۰ کیلوپاسکال به ٤۰۰۰کیلوپاسکال افزایش پیدا می‌کند. از طرفی هر چند خاکستر بادی باعث کاهش تخلخل خاک می شود اما نمی‌تواند بطور مناسب باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. نتایج تحکیم نمونه‌های مخلوط شده نشان دهنده این مطلب است که هر سه افزودنی قابلیت تراکم خاک اصلاح شده را کاهش می‌دهد شیرهٔ آهک و سربارهٔ کوره باعث تقلیل قابلیت تراکم خود گریشی (سخت و تجمع شدن) می‌شود از طرف دیگر خاکستر بادی غیرپوزولانی قابلیت تراکم را کاهش و موجب تقلیل نشانه خلاء می‌شود.

درصد کمی از شیره آهک و سربارهٔ کوره (حدود ٪۵) در ایجاد بیشترین زاویه اصطکاک نمونه مخلوط شده (یعنی 47^0 برای سربارهٔ و 43^0 برای آهک) کافی به نظر می رسد. بیشترین زاویه اصطکاک جهت مخلوط خاکستر بادی با درصد نسبتاً بالای ٪۱۲ به میزان 46^0 ایجاد می شود. لازم به ذکر است که اگر درصد خاکستر بادی به ٪۵ برسد، زاویه اصطکاک به میزان 42^0 فراهم میشود که در واقع موجب افزایش زاویه اصطکاک خاک واریزه‌ای طبیعی گه 24^0بوده است می گردد. خاکستر بادی در مقایسه باشیره آهک تأثیر مناسبی در افزایش چسبندگی ندارد بنابراین استفاده از تثبیت خاکستر بادی فقط ممکن است در مکانیسم اصطکاکی خلاصه شود. در نهایت همانطور که نشان داده شده مخلوط آهکی هر دو مقاومت فشاری و برشی را که در جاده سازی بسیار اهمیت دارد بهبود می‌بخشد. ذکر این نکته مهم است که در هر خاک رفتار بهینهٔ کاملاً متفاوتی جهت افزودنی‌های مشابه شاهد هستیم و با برونیابی مستقیم حاصل از نتایج این تحقیق نبایستی بدون انجام پیش بینی‌های لازم آزمایشات مورد نظر استفاده کرد. در جدول ٤ مروری برمطالعات افزایش مقاومت برشی خاک با استفاده از مواد افزودنی ارائه گردیده است.

جدول ٤. مروری برمطالعات افزایش مقاومت برشی خاک با استفاده از مواد افزودنی

ردیف	نام نویسنده و سال	پارامتر مورد مطالعه	روش پژوهش	نتیجه گیری	ملاحظات
۱	(هاشمی طباطبایی و آرایی،۱۳۸٦)	مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده	پژوهشی و کاربردی	افزودن آهک شکفته موجب افزایش درصد رطوبت و کاهش وزن خشک می‌شود. اما تغییرات قابل ملاحظه در نمونه های محتوی آهک زنده مشاهده نشد.	افزودن آهک شکفته و زنده سبب تغییر بافت خاک ریزدانه به خاک مجتمع می‌شود.
۲	(بهروزی و احدیان،۱۳۹۲)	اثر افزایش آهک بر خصوصیات تحکیمی خاکهای رسی-گچی	مطالعاتی و آزمایشگاهی	تمامی عیارهایی که برای بهسازی خاک استفاده گردید نتایج قابل قبولی در کاهش مقدار ضریب تحکیم داشتند در عیار ۵۰ کیلوگرم آهک بر متر مکعب، کمترین مقدار ضریب تحکیم اتفاق افتاد.	می‌توان به این نکته اشاره نمود که عیار ۵۰ کیلوگرم آهک بر هر متر مکعب، برای بهسازی خاک،کمترین پتانسیل نشست تحکیمی را دارا بوده و از نظرمیانگین سرعت تحکیمی عیار ۱۰۰ کیلوگرم آهک بر هر مترمکعب کمترین مقدار را شامل بوده است.
۳	(طاهرخانی و جوانمرد،۱۳۹۳)	مقایسه تأثیرسیمان، آهک PLUS CBR و نانوپلیمر در کاهش تورم خاکهای رسی بستر روسازی ها	آزمایشگاهی	اثر آهک در کاهش دامنه خمیری خاک رس با دامنه خمیری زیاد بیش از سیمان و ماده نانوپلیمر PLUS CBR است.	برای همه مواد افزودنی و خاکهای استفاده شده در این تحقیق، میزان تورم بعد از ۹۸ ساعت افزایش ناچیزی دارد.

٤	(روحبخشان و کلانتری،۱۳۹۳)	تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی	مطالعاتی و آزمایشگاهی	نتایج بدست آمده کاهش معناداری در پلاستیسیته و تغییر در رطوبت بهینه و وزن واحد حجم بیشینه خاک رس را با افزایش مقادیر پودر ضایعات سنگی و آهک نشان می‌دهد.	افزودن آهک و پودر ضایعات سنگی به خاک منجر به افزایش حد خمیری، کاهش حد روانی و کاهش دامنه خمیری می‌شود. ترکیب خاک با آهک و پودر ضایعات سنگی سبب تغییر در مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه نمونه‌ها می‌شود.
٥	(قبادی و همکاران، ۱۳۹۳)	تأثیر آهک بر روی بهسازی خاکهای ریز دانه منطقه فقیره همدان	مطالعاتی و آزمایشگاهی	درصد آهک روی مقاومت نمونه های تثبیت شده با آهک تاثیر گـذاراست. به این معنا که افزودن آهک، باعث افزایش مقاومت تک محوری خاک می‌گردد.	مقـادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه طی زمـان عمـل آوری بـه ترتیب کاهش و افزایش می یابد که ایـن تغییـرات در روزهـای اول بـا سرعت بیشتری اتفاق می افتـد و بـا گذشـت زمـان سـرعت تغییـرات کاهش می یابد.
٦	(جواهری،۱۳۹٤)	تثبیت خاک رس با سیمان، آهک و خرده شیشه	عددی و آزمایشگاهی	در این پژوهش با استفاده از ترکیب خرده شیشه، سیمان و آهک به تثبیت خاک رسی پرداخته شده و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک تثبیت شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.	خرده شیشه همراه با سیمان و آهک برای تثبیت خاک استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزودن آهک و سیمان به خاک درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها افزایش و وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
۷	(اوحدی و همکاران ۱۳۹٤)	ارزیابی ریزساختاری میزان مصرف آهک و پیشرفت واکنشهای پوزولانی خاک واگرای تثبیت شده با آهک	مطالعاتی و آزمایشگاهی	بر اساس آنالیز پراش پرتو ایکس در نمونه مورد مطالعه، مصرف اولیه آهک برای انجام کامل فرایند تبادل کات یونی در حدود ۱٪ بوده است.	برای خاک عمل آورده شده با محتوای آهک بیشتر از مقادیر لازم برای مبادله کاتیون، واکنش پوزولانی باعث شکل‌گیری ترکیب‌های جدید CSH و CAH شده است.
۸	(گودرزی و اکبری، ۱۳۹٦)	تأثیر ترکیب پسماندهای صنعتی و آهک بر رفتار هیدرومکانیکی رسها	مطالعاتی و آزمایشگاهی	علاوه بر شاخص مقاومت، قابلیت فشردگی خاک پس از تثبیت، تأثیر زیادی بر پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی ساخته شده بر روی آن دارد.	نتایج به دست آمده مؤید آن است که در مقایسه با آهک، حضور سرباره به ویژه((GGBS)) تأثیر اندکی بر مشخصات ژئومکانیکی خاک دارد.
۹	(محبوبی مطلق و محبوبی اردکانی،۱۳۹٦)	بررسی تأثیر افزودن آهک بر پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک خاک رس- ژئوسنتتیک	آزمایشگاهی	تمامی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با چشمه‌هایی به ابعاد٤X٤ میلیمتر قفل و بست بهتری ایجاد میکنند و اندرکنش قویتری نسبت به ژئوگرید با چشمه های۱۰X۱۰ میلی متر دارند به وضوح نمایان است.	تثبیت خاک رسی با آهک نیز منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود و با افزایش زمان عمل آوری به علت انجام واکنشهای بلندمدت خاک- آهک (واکنش پوزولانی) این مقاومت افزایش می‌یابد.

۱۰	(کریمی و همکاران،۱۳۹٦)	استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و آهک برای تثبیت خاکهای رسی	آزمایشگاهی و کاربردی	افزودن خاکستر باگاس به مخلوط آهک _خاک رس باعث کاهش میزان میگردد و PH این امر می‌تواند میزان واکنشهای پوزولانی را تا حدی کاهش دهد.	با مطالعه نمودارهای تغییرات مدول کشسانی نمونه‌های مختلف با تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده آنها می‌توان دریافت که روند تغییرات مدول کشسانی با روند تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده تقریباً مشابه هم می‌باشند.
۱۱	(زورقی وهمکاران،۱۳۹۷)	نقش دوغاب آهک هیدراته در تثبیت حرکت ماسه های بادی	آزمایشگاهی و پژوهشی	نتایج داده های این تحقیق نشان داد، که لایه مالچ ایجاد شده با آهک هیدراته سه درصد مقاومت کافی در مقابل سایش باد را ندارد و با تیمار شاهد قابل مقایسه است.	تجزیه وتحلیل میزان سایش لایه مالچی در تیمارهای دوغاب آهک هیدراته پنج و هفت درصد نشان داد که با افزایش درصد آهک در دوغاب، مقاومت سایشی مالچ ایجاد شده افزایش یافته است.
۱۲	(دریائی و کاشفی،۱۳۹۸)	بررسی تاثیر افزایش ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاکهای رسی	پژوهشی مطالعاتی	افزودن آهک و ماسه بادی به صورت همزمان تغییر محسوسی در وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت اپتیمم نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند.	تاثیر افزودن آهک و ماسه بادی به صورت همزمان در افزایش میزان مقاومت محوری و مدول الاستیسیته خاک به مراتب بیشتر از تاثیر افزودن آهک به تنهایی در افزایش میزان پارامترهای فوق دارد.
۱۳	مسلم ثروتی وهمکاران،۱۳۹۸)	تأثیر ژئومرفولوژی برنمودهای خاکساختی آهک	پژوهشی وآزمایشگاهی	از مقاطع میکروسکوپی مطالعه و نمودهای کربناتی خاکساختی در هر دو لندفرم، تحت تأثیر فرآیندهای خاکساختی با نقش بارز موجودات زنده به دلیل تولید گاز دی اکسید کربن و خشک و تر شدن فابریک خاک گزارش شده است.	سخت دانه های آهکی قهوهای رنگ در خاکرخهای لندفرم پدیمنت بیشتر نشان دهنده حالت ارثی آنها بوده که همراه با نمودهای خاکساختی قابل مشاهده است.
۱٤	(تاجبخش و همکاران،۱۳۹۸)	تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب آبگذری اشباع خاک ماسه سیلتی افقی	پژوهشی و کاربردی	بر اساس نتایج این تحقیق، افزودن آهک به عنوان تثبیت کننده به خاک غیرچسبنده در مواردی که پایین بودن آبگذری دارای اهمیت بالایی است توصیه نمی شود.	افزودن ٤ درصد خاکستر پوسته برنج به آهک، آبگذری را تا حدی کاهش می‌دهد و بر اساس هدف پروژه نفوذناپذیری مناسبی را تأمین نماید.
۱۵	(مطلبی و همکاران،۱۳۹۸)	بررسی تاثیر آهک بر ویژگیهای رطوبتی خاکهای سری گرمسار با استفاده ازتوابع انتقالی	تحلیلی و آزمایشگاهی	آهک بر پارامترهای مربوط به منحنی رطوبتی از طریق تاثیر برساختمان خاک اثر می گذارد.	کربنات کلسیم به عنوان اصلی ترین عامل کنترل کننده ویژگیهای رطوبتی در خاکهای آهکی است.
۱٦	(فرح بخش و دیگران،۱۳۹۸)	تأثیر افزودن آهک و خاکستربادی بر مقاومت	آزمایشگاهی	میتوان نتیجه گرفت ترکیب افزودنیهای تثبیت کننده مورد استفاده در این پژوهش اثرات پرکنندگی بهتر	نمونه های تثبیت شده با آهک خاکستربادی افزایش مقاومت بیشتری را در

		تک محوری خاکهای سیلتی		و افزایش دانسیته مناسبتر بر خاک سیلتی دارند.	مقایسه با نمونه های تثبیت شده با آهک به تنهایی دارند که خود بیانگرتأثیر مثبت خاکستربادی در بهبود مقاومت بلند مدت خاک است.
۱۷	(عساکره وهمکاران، ۱۳۹۹)	تأثیر فرایند تثبیت ترکیب آهک و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و وارفتگی خاک	آزمایشگاهی	براساس نتایج مقاله حاضر افزودن آهک و نانوسیلیس به خاک مارن منجر به کاهش شاخص پلاستیسیته خاک مارن شده است.	افزودن بیش از ۷٪ تا ۸٪ نانوسیلیس به خاک مارن حاوی ۹٪ آهک، مانع فروپاشی و گسیختگی نمونه در آب شده است.

٦-مراجع

-بای بوردی، محمد، (١٣٧٦). فیزیک خاک. *انتشارات دانشگاه تهران*.

-شناسایی و کاربرد خاکهای واگرا در سدهای خاکی کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، *نشریه ۸*، (۱۳۷۵).

-فاخر، علی، و عسگری، فرج الله (١٣٨٦). تورم و واگرایی از دید مهندس ژئو تکنیک. تهران، *انتشارات دانشگاه تهران*.

-رمضانپور، علی اکبر (١٣٧٦). دوام بتن و نقشهای سیمانهای پوزولانی. تهران، *مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن*.

-حامی، احمد (١٣٦٨). مصالح ساختمانی. تهران، *انتشارات دانشگاه تهران*.

-رمضانپور، علی اکبر (١٣٧٦). ارزیابی پوزولانهای ایران. تهران، *مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن* .

-رمضانپور، علی‌اکبر و پیدایش، منصور (١٣٧٦). ضریب بازدهی بتن دارای دوده میلیس. تهران، *انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن*.

-رمضانپور، علی اکبر، و پرهیزگار، طیبه، و طاهری، افشین (١٣٧٦). مواد افزودنی و پوزولانی و کاربرد آن در بتن. تهران، *مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن*.

-رمضانپور، علی اکبر و جعفرپور، فاطمه و ماجدی، محمد حسن (١٣٧٤). مصارف پوستهٔ برنج و خاکستر آن در صنعت ساختمان. تهران، *انتشارت مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن*.

-هاشمی طباطبایی، سعید، و آقایی آرایی، عطا، (١٣٨٦). مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده. *فصل نامه علوم زمین*، سال هفدهم، شماره ٦، ٢٠-٢.

-بهروزی، فاطمه، و احدیان، جواد، (١٣٩٢). اثر افزایش آهک بر خصوصیات تحکیمی خاکهای رسی-گچی. *فصل نامه علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)*، جلد ۳۷، شماره‌ی ۲، ۱۲-۱.

-طاهرخانی، حسن، و جوانمرد، مهران (۱۳۹۳). مقایسه تأثیرسیمان، آهک و نانوپلیمر PLUS CBR در کاهش تورم خاکهای رسی بستر روسازی‌ها. *نشریه زمین شناسی مهندسی*، جلد نهم، شماره ٤، ٣١٥٢-٣١٣١.

-روح بخشان، آرمین، و کلانتری، بهزاد (۱۳۹۳). تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی. *نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر*، دوره٤٨، شماره٤، ٤٣٨-٤٢٩.

-قبادی،محمد حسین، و یزدان محبی حسن آبادی، عبدلی لر، یاسین، و بابازاده، رضا، (۱۳۹۳). تأثیر آهک بر روی بهسازی خاکهای ریز دانه منطقه فقیره همدان. *فصلنامه زمین شناسی کاربردی*، شماره ۳، ۲۷۵-۲٦٥.

-جواهری، فرهاد (١٣٩٤). تثبیت خاک رس با سیمان، آهک و خرده شیشه. پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مجتبی قاسمی، دانشگاه صنعتی سیرجان، *گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک*.

-اوحدی،وحید رضا، و امیری، محمد، و زنگنه، مینا (١٣٩٤). ارزیابی ریزساختاری میزان مصرف آهک و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرای تثبیت شده با آهک. *مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس*، دوره شانزدهم، شماره ۱، ۲۲-۱۱.

-گودرزی، امیر رضا، و اکبری، حمید رضا، (١٣٩٦). تأثیر ترکیب پسماندهای صنعتی و آهک بر رفتار هیدرومکانیکی رسه. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، جلد٤٩، شماره۱،۱۰۸-۹۷.

-محبوبی مطلق،نازنین، ومحبوبی اردکانی، احمد رضا (١٣٩٦). بررسی تأثیر افزودن آهک بر پارامترهای مقاومت برشی فصل

مشترک خاک رس- ژئوسنتتیک. *نشریه مهندسی علوم زمین*، شماره۱۰۸، ۲۹۲-۲۸۱.

-کریمی،عبدالحمید، وعباسی،نادر، و سیاوش نیا، مهدی (۱۳۹۶). استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و آهک برای تثبیت خاکهای رسی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، دوره ۹۴، شماره ۱، ۱۲-۱.

-زورقی،غلام، و گرجی، کاظم، و نورا، محمد رضا، و راشکی، علی رضا، (۱۳۹۷). نقش دوغاب آهک هیدراته در تثبیت حرکت ماسه‌های بادی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). دوره ۹۴، شماره ۲۱، ۱۴۰-۱۲۷.

-دریایی،مهدی، و کاشفی پور، سید محمود، (۱۳۹۸). بررسی تاثیر افزایش ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاک‌های رسی. *نشریه آب و خاک*، جلد ۲۵، شماره ۲، ۲۳۹-۲.

-ثروتی،مسلم، و جعفر زاده،علی اصغر،و حیدری،احمد، و شهبازی، فرزین، (۱۳۹۸). تأثیر ژئومرفولوژی برنمودهای خاک ساختی آهک در برخی خاکهای جنوب شهرستان اهر. *دانش آب و خاک ایران*، دوره ۲۱، شماره ۱، ۵۵-۴۳.

-Fell R. & Mac Gregor J.P. & Stapledon D. (1992). Geotechnical Engineering of Embankment Dams, *Rotterdam.*

-Ghiasi, V., & Dashti famili, S. (2023). A Review of the Factors That Cause Sinkholes and the Effect of Soil Type on Its Formation. *Road*, *31*(114), 15-32. **doi: 10.22034/road.2022.323699.2017**

-Ghiasi, V., & Eskandari, S. (2024). Improvement of Alluvial Soils Using Cement Injection Method. *Road*, *32*(118), 209-232. **doi: 10.22034/road.2022.323689.2016**

-Ghiasi, V., & Kamalabadi Farahani, M. (2024). Feasibility Study of Soil Pollution Removal Using the Electrokinetic Method. *Road*, *32*(119), 507-528. **doi: 10.22034/road.2022.323983.2018**

-Ghiasi, V., & Molaei Tari, P. (2022). Geotechnical design of landfills and solutions for their construction in different soils. *Road*. **doi: 10.22034/road.2022.324326.2020**

-Ghiasi, V., & Mostafaeifar, A. (2023). Assessment of the effects of geosynthetics on geotechnical soils behavior. *Road*, *31*(115), 67-80. **doi: 10.22034/road.2022.323429.2015**

-Ghiasi, V., & Najafi, F. (2022). Investigation of liquefiable soils improvement methods. *Road*, *30*(110), 41-56. **doi: 10.22034/road.2023.112863**

-تاج بخش،محمد و فتحی مقدم، منوچهر، و ابراهیمی، نادر قلی، (۱۳۹۸). تأثیر مخلوط خاکستر پوسته برنج و آهک بر ضریب آبگذری اشباع افقی خاک ماسه سیلتی. *نشریه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، دوره ۱۲، شماره ۶۹، ۶۰-۴۰.

- مطلبی، الهام، همایی، مهدی، و زارعی، قاسم ، و محمودی، شهلا، (۱۳۹۸). بررسی تاثیر آهک بر ویژگی‌های رطوبتی خاکهای سری گرمسار با استفاده ازتوابع انتقالی. *نشریه نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، شماره ۳، جلد۴، ۴۳۹-۴۲۶.

-فرح بخش،سدید، حق بین، مریم، و اقبالی، امیر حسین، (۱۳۹۸). تأثیر افزودن آهک و خاکستربادی بر مقاومت تک محوری خاکهای سیلتی. *مجله نخبگان علوم و مهندسی*، جلد ۴، شماره ۲، ۱۹۷-۱۸۴.

- عساکره، عادل و امیری، محمد و زارعی،حلیمه (۱۳۹۹). تأثیر فرایند تثبیت ترکیب آهک و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری و وارفتگی خاک‌های مارنی در حالت اشباع. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، جلد ۵۱، شماره ۱، ۱۱۵-۱۰۲.

-Ghiasi, V., & Nazhdghorbani, A. (2024). An Overview of the Use of Fly Ash for Soil Stabilization. *Road*, *32*(120), 455-488. **doi: 10.22034/road.2022.333556.2034**

-Ghiasi, V., & Sharifi far, F. (2023). Bearing capacity of strip foundation on granular soil reinforced with geogrid. *Road*.

doi: 10.22034/road.2023.360048.2083

-Ghiasi, V., & Tavagho Hamedani, H. (2022). A review of soil improvement with waste and recycled materials and its impact on soil parameters. *Road*.

doi: 10.22034/road.2022.324228.2019

-Ghiasi, V., & Zakavi, I. (2023). Geosynthetics of Stone Columns- A Review. *Road*, *31*(117), 143-170. **doi: 10.22034/road.2022.333550.2033**

-Holmgren G.G.S.and Flangan C.P. (1977). Factor Affecting Spontanesus Dispersive of soil Materials as Evidenced by the Crumb test, *ASTM STP 623.*

-Indratna. B. (1996). Utilization of Lime, Slag and Fly ash for Improvement of a colluvial Soil in New South Wales, Australia. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.14,169-191.

-Ingles,O.G., (1985). Piping in Earth Dams of Dispersive Clay. ASCE, Speciality Conf. *On The Performance of Earth and Earth Supported Structures,* Vol.3, 111-117.

-Sherard J.L . & Decker R. S. (1997) . Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects. *ASTM STP 623*.

-Sherard J.L. & Decker R.S. & Dunnigan L.P. (1976). Identification and Nature of Dispersive soils. *Journal of Geotechnical Eng.*, ASCE, Vol.102, 287-301.

-Sherard J.L. & Dunnigan L.P. & Decker R.S, (1977). Some Engineering Problem with Dispersive Clays. *ASTM STP 623*, 3-12.

-Sherdad J.L & Decker R.S. & Ryker N.L., (1972). Piping in Earth Dams of Dispersive Clay. Proc. of Specility conf . *On Performance of Earth Supported Structures*, Asce, Vol. 1, 584-626.

Investigation of Increasing Shear Strength of Dispersive Clays Using Additives

Vahed Ghiasi, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Saeid Madah, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

This paper aims to assess the impact of additives on the stabilization of soils with diverging debris and low geotechnical qualities. This essay compares the effects of common additives like lime milk with our industrial products, such as fly ash and steel furnace slag, giving them specific importance. For greater efficiency and convenience of usage, live lime is not recommended in agricultural fields; instead, lime milk is more expensive. Since crops are more abundant and need to be used effectively with the aid of measures, the study of crop divergence appears to be significant. The loan source near the earthen dam, which contains divergent soils, cannot be ignored and used in the clay core. In the past, clay soils were thought to have a high resistance to water erosion, but in recent years, the generalization of this issue has been limited. Because observations have been very confirming that in nature, there are clay soils that are highly vulnerable to erosion due to the existence of such soils in most parts of our country, measures such as stabilization of divergent soils or its improvement can be of great help to use these soils in engineering projects. This article will identify and study divergent soils and the phenomenon of divergence and evaluate the effect of additives on the stabilization of divergent soils.

Keywords: Lime, Cementation, Soil, Shear Strength