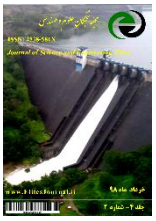
مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

جلد ۴- شماره ۲- سال ۱۳۹۸

www.ElitesJournal.ir



تأثیر افزودن آهک و خاکستربادی بر مقاومت تک‌محوری خاک‌های سیلتی

سدید فرح بخش[1*]، مریم حق بین[2]، امیر حسین اقبالی[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

۲- استادیار گروه عمران- ژئوتکنیک و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

۳- استادیار گروه عمران- ژئوتکنیک و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

*Sadid.fa@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۸ پذیرش: خرداد ماه ۹۸

چکیده

شناسایی خاک‌های ضعیف زیر شالوده‌ی سازه‌ها و یا بستر راه‌ها و سپس تثبیت آن‌ها از مهمترین اصول مهندسی ژئوتکنیک برای دست‌یابی به طرحی ایده‌آل تلقی می‌گردد. خاک‌های سیلتی از نقطه‌نظر چسبندگی و همچنین زاویه اصطکاک داخلی، مصالح مناسبی در مهندسی عمران اعم از سازه و راه محسوب نمی‌گردند. آهک به عنوان یکی از اصلی‌ترین افزودنی‌هایی که توانایی بهبود رفتار خاک‌های ریزدانه را دارد از دیرباز مورد توجه قرار داشته است. در کنار آن استفاده از مواد زائد صنعتی مانند خاکستربادی به دلیل حضور ترکیباتی از سیلیس، آلومینیوم و آهن به عنوان مکمل آهک نیز می‌تواند هم از نظر رفتاری و هم از نظر اقتصادی کمک شایانی به بهبود مشخصات نهایی خاک مورد مطالعه داشته باشد. نظر به گسترش ساخت و ساز در سال‌های اخیر در منطقه شهریار واقع در غرب استان تهران و وسعت قابل‌توجه زمین‌های دارای خاک با طبقه‌بندی ML (سیلت با حد روانی کم)، در این تحقیق از خاک این منطقه به عنوان منابع قرضه در تعیین و تخمین افزایش مشخصات خاک سیلتی تقویت شده با آهک و خاکستربادی تحت آزمایش تک‌محوری استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان از رشد قابل توجه مقاومت تک‌محوری خاک سیلتی منطقه‌ی مورد مطالعه در اثر افزودن آهک و خاکستربادی به میزان مشخص دارد. همچنین روند تغییرات مشخصات مکانیکی خاک‌سیلتی تقویت شده از نظر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که مبین بهبود قابل‌توجه این دو مشخصه در خاک منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی : خاک‌های سیلتی، مقاومت تک‌محوری، تثبیت، آهک، خاکستربادی، منطقه‌ی شهریار

۱- مقدمه

بحث بهسازی خاک هم در شالوده سازه‌ها و هم در بستر راه‌ها با توجه به پیشرفت علمی مهندسی عمران بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بعضاً خاک‌های طبیعی موجود در محل پروژه های عمرانی به لحاظ خصوصیات مهندسی، برای تحمل نیروی وارده مناسب نیستند؛ به عنوان مثال در بسیاری از مواقع لایه‌های فوقانی و یا حتی تحتانی خاک مطلوب نبوده و باید برداشته شده و با خاکی مناسب جایگزین شوند اما این امر در پروژه‌هایی مانند راهسازی و علی‌الخصوص ساختمانی صرفه اقتصادی نداشته و به سبب مشکل دسترسی به منابع قرضه مناسب، منطقی نمی‌باشد. در چنین شرایطی اصلاح خاک به شیوه‌های مختلف به عنوان

راهکاری موثر مطرح می‌شود. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات این نوع خاک‌ها، تثبیت خاک است. تثبیت خاک شامل فعالیت‌هایی است که در نتیجه آنها مشخصات مهندسی خاک بهبود یافته و به ویژگی‌های موردنظر نزدیک می‌شود. این اقدامات باعث افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات سودمند دیگر می‌شود [۱].

در تثبیت با مصالح ، استفاده از آهک بسیار متداول است. آهک به دلیل دامنه وسیع، قیمت مناسب، دردسترس بودن و اثرات دائمی در طیف گسترده‌ای از خاک ها کاربرد زیادی دارد. همچنین خاکستربادی به عنوان ماده زائد حاصل از نیروگاه‌های حرارتی، خاصیتی برای استفاده در صنعت ندارد پس اگر بتوان شرایطی را فراهم کرد که از این مواد، به دلیل وجود خاصیت پوزولانی، در بحث تثبیت خاک استفاده شود، می‌تواند از نظر زیست محیطی و اقتصادی مفید واقع شود [۱].

وجود رس‌ها در واکنش با آهک بر امر تثبیت تأثیر بسزایی دارد ولی در زمینه خاک‌های فاقد چسبندگی یا با چسبندگی کم مانند خاک‌های سیلتی تثبیت خاک با آهک کیفیت واقعی خود را بروز نمی‌دهد. از سوی دیگر کاهش زمان تثبیت خاک می‌تواند باعث کاهش هزینه ها در انجام پروژه‌ها شود. از فاکتورهایی که در این پژوهش مد نظر قرارگرفته است استفاده از ماده‌ای می باشد که به کمک آن بتوان علاوه بر کاهش زمان تثبیت ، مقاومت طرح را نیز بالاتر برد و عملکرد کاملی از طرح تثبیت خاک سیلتی بدست آورد. پژوهش‌هایی که پیش از این بر روی خاک‌های رسی و خاک‌های سیلتی در ترکیب با آهک انجام شده است، حاکی از تسریع و مقاومت بهتر این طرح‌ها در زمان اضافه شدن خاکستربادی می‌باشد و این تأثیر مثبت سبب شد تا برای بهسازی خاک مورد نظر از آهک و خاکستربادی استفاده شود. علاوه بر اینها توجه به قیمت کم و صرفه اقتصادی خاکستربادی در قیاس با دیگر مکمل‌های آهک و سیمان برای تثبیت خاک همگی از عوامل موثر بر انتخاب این مصالح برای بهسازی خاک می‌باشد[۱].

نظر به گسترش ساخت و ساز در سال‌های اخیر در منطقه شهریار واقع در غرب استان تهران و وسعت قابل‌توجه زمین‌های دارای خاک با طبقه‌بندی ML (سیلت با حد روانی کم) در این نواحی، از خاک این منطقه به عنوان منابع قرضه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱-آهک

استفاده از آهک در تثبیت خاک‌ها به عنوان یک روش بهسازی اقتصادی به طور گسترده انجام می‌پذیرد. اضافه کردن آهک به خاک باعث به وجود آمدن واکنش‌هایی می‌شود که این واکنش‌ها باعث ایجاد بهبود در خواص اولیه خاک می‌شوند و از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود[۱]:

الف) کاهش حد روانی
ب) افزایش حد خمیری
ج) کاهش نشانه خمیری
د) افزایش حد انقباض
ه) افزایش کارایی
و) بهبود خواص مقاومتی خاک
ز) کاهش تورم

آهک با بروز فعل و انفعالات شیمیایی اثرات مهمی بر روی مشخصات فنی خاک‌ها می‌گذارد. اضافه کردن آهک به خاک‌های ریزدانه باعث بروز چندین واکنش نظیر واکنش تبادل یون‌های مثبت، واکنش تجمع و واکنش شیمیایی می‌شود. شدت نسبی این

واکنش‌ها بستگی به خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک به ویژه نوع کانی‌های رسی، یون‌های سدیم قابل جایگزین شدن، آهن قابل ترکیب، نسبت سیلیس به آلومین و درجه هوازدگی خاک دارد.

عوامل مختلفی بر انجام واکنش خاک و آهک مؤثر هستند، از جمله این موارد می توان به میزان رس اشاره کرد. اگر میزان رس از حد مشخصی کمتر باشد، واکنش ها انجام نمی‌شود؛ به همین علت وجود رس کافی برای انجام واکنش لازم است. می‌توان گفت باید حداقل ۲۵ درصد خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کند تا تثبیت با آهک ثمربخش باشد[۱]. همچنین میزان PH محیط مهم است، به طوریکه باید حداقل مقدار PH از ۱۰ بیشتر باشد تا باعث انجام واکنش بین آهک و رس شود[۱]. در برخی از مراجع حداقل مقدار PH برای انجام واکنش بین آهک و رس ۱۲/۴ بیان شده است. در ضمن نوع و غلظت کاتیون‌های موجود در محیط و نوع کانی رسی نیز اهمیت دارد[۲].

۲-۱-۱ – واکنش‌های آهک و خاک

در جریان تثبیت خاک با آهک سه نوع فعل و انفعال شیمیایی بین خاک و آهک در مجاورت آب به وقوع می‌پیوندد که عبارتند از[۳]:

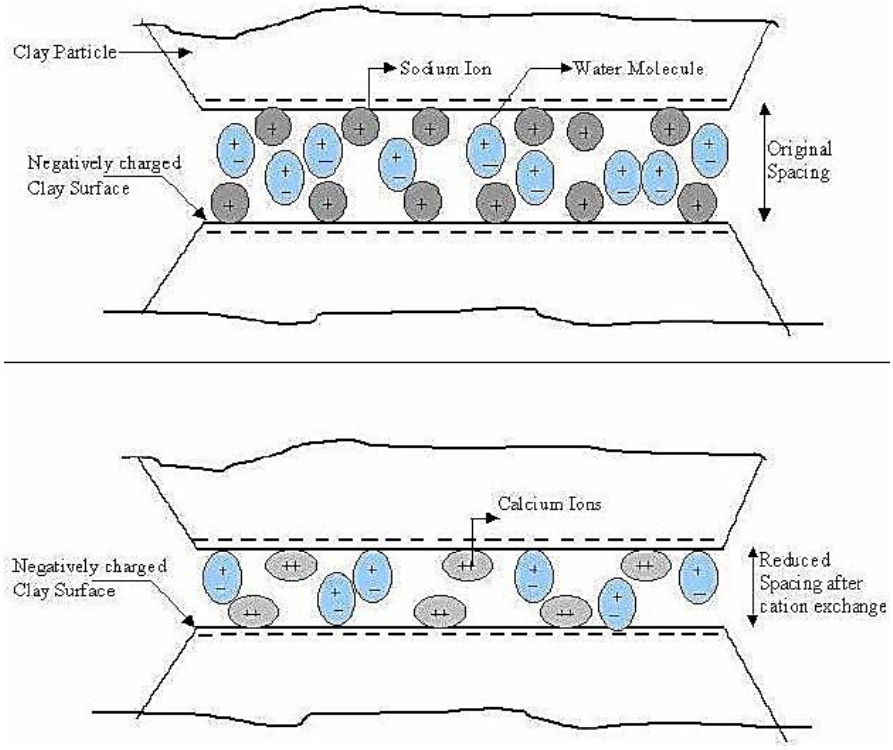
الف) واکنش تبادل یونی، مجتمع شدن و لخته شدن

ب) کربناته شدن

ج) واکنش پوزولانی

الف) واکنش تبادل یونی، مجتمع شدن و لخته شدن :

اصولاً واکنش تبادل یون‌های مثبت بین آهک و خاک آنی بوده و به مجرد تماس آهک با اکثر خاک‌های ریزدانه حاصل می‌شود. واکنش تبادلی معمولاً باعث بروز تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می شود. این واکنش باعث تغییر ساختار خاک از مجتمع به موازی می‌شود. مکانیزم این واکنش در شکل(۱) نشان داده شده است [۱].



شکل ۱- مکانیزم تبادل کاتیونی (Yazici ,2004)

ب) کربناته شدن :

کربناته شدن واکنش کوتاه مدت و مضری است که باعث جلوگیری از انجام واکنش‌های دیگر شده و خاصیت خمیری خاک را افزایش می‌دهد. اگر رس خاصیت پوزولانی نداشته باشد یا میزان آهک زیاد باشد، کربناته شدن اتفاق می‌افتد [۴].کربناته شدن باعث کاهش آهک محیط، در نتیجه کاهش مقاومت و سایر فواید آهک می‌شود.

ج) واکنش پوزولانی:

واکنش پوزولانی یک واکنش بلندمدت است. شرط لازم جهت فعال شدن مواد سیمانی اضافه شده به محیط، حل شدن سیلیکا و آلومینای خاک است. عامل دیگری که به حل شدن این مواد کمک می‌کند، درجه کریستالی کانی‌ها و اندازه ذرات است. واکنش پوزولانی، ذرات ریزدانه خاک را به هم می‌چسباند و ذرات درشت‌دانه حاصل می‌کند[۴].

بطور خلاصه می‌توان گفت تبادل کاتیونی و مجتمع شدن باعث افزایش حد انقباض و حد خمیری و کاهش حد روانی و بهبود کارایی خاک می‌شوند و واکنش پوزولانی باعث تشکیل ژل‌های هیدراته و افزایش قابل ملاحظه مقاومت در درازمدت می‌شود. تبادل کاتیونی و واکنش پوزولانی باعث کاهش تورم خاک می‌شوند [۵]. خاک‌ها را می‌توان از نظر واکنش با آهک به دو گروه تقسیم‌بندی کرد :

الف) خاک‌های واکنش زا

ب) خاک‌های بدون واکنش

خاک‌های واکنش زا خاک‌هایی هستند که پس از تثبیت با آهک و عمل آمدن به مدت ۲۸ روز در گرمای ۲۰ درجه سانتیگراد بیش از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش مقاومت فشاری محدود نشده از خود نشان دهند و خاک‌های بدون واکنش خاک‌هایی هستند که افزایش مقاومتشان در شرایط مشابه کمتر از ۳/۵ کیلوگرم برسانتیمتر مربع باشد.

اگر چه افزودن آهک به خاک‌های بدون واکنش ممکن است که باعث شود تغییرات محسوسی در خواص خمیری خاک‌ها ایجاد شود، اما صرف نظر از نوع و درصد آهک مصرفی همچنین شرایط عمل آوری مخلوط، این تغییرات باعث ایجاد واکنش پوزولانی در خاک‌های بدون واکنش نمی‌شود. آهک معمولاً با اغلب خاک‌هایی که دامنهٔ خمیری آنها بین ۱۰ تا ۵۰ درصد است واکنش می‌دهد. عموماً خاک‌های با دامنه خمیری کمتر از ۱۰ نیاز به پوزولان برای ایجاد واکنش با آهک دارند. پوزولان‌هایی مانند خاکستربادی، سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و شیست‌های رسی منبسط شده می‌توانند برای این منظور بکار روند[۶].

۲-۲- خاکستربادی

خاکستربادی ماده‌ای زائد است که از سوختن ذغال سنگ به ویژه در نیروگاه‌ها حاصل و در فیلترها به صورت غبار تهیه می‌شوند. این ماده یک گرد بسیار ریزدانه است که ترکیبی از سیلیس، آلومینیوم، اکسیدها و قلیاهای مختلف می‌باشد. این ماده دارای طبیعت پوزولانی بوده و می‌تواند با آهک هیدراته واکنش داده و فرآیند سمانتاسیون بوجود آورد. به همین علت مخلوط آهک و خاکستربادی می‌تواند برای پایدارنمودن اساس و زیراساس جاده‌ها و همچنین بهبود خاک زیر سازه‌ها مورد استفاده قرارگیرد. به طور معمول از خاکستربادی در بهبود مقاومت بتن بهره گرفته می‌شود. گاهی با اضافه کردن آن در کنار سیمان و گاهی به عنوان جایگزین آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مقاومت فشاری بتن قبل و بعد از اضافه شدن خاکستربادی مبین بالا رفتن مقاومت فشاری بتن تا مقدار ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد. البته ثبات کیفیت خاکستربادی در بهبود خواص مقاومتی آن اهمیت فراوان دارد که در این خصوص استاندارد ASTM C618 و یا استاندارد BS 3892 ضوابط سختگیرانه‌ای برای حداقل کیفیت مورد تایید خاکسترهای بادی با مشخصات مختلف وضع کرده است. انواع خاکستربادی بر اساس استاندارد ASTM C618 بر اساس زیر می‌باشد :

گروه C : خاکستربادی با خاصیت خودگیرشی

گروه F : خاکستربادی با فعالیت پوزولانی

اندازه ذرات خاکستربادی در دامنه‌ای حدود نیم الی سیصدمیکرون قرار دارند. به عنوان مثال طبق ضوابط استانداردهای مطرح شده باید ۹۰ درصد از اندازه ذرات خاکستربادی گروه F کوچکتر از ۴۵ میکرون باشند. چگالی نسبی این ماده نیز بر اساس ماده اولیه تولیدکننده آن متغیر و بین ۲/۲ تا ۲/۹۴ گزارش شده که بطور متوسط چگالی مخصوص معادل ۲/۵ را می‌توان به آن نسبت داد. مزایای استفاده از خاکستربادی را در تثبیت خاک می‌توان به شرح زیر نام برد :

الف) افزودن درصد کمی از آهک و یا سیمان تا حد زیادی مقاومت آن را بهبود می‌بخشد.

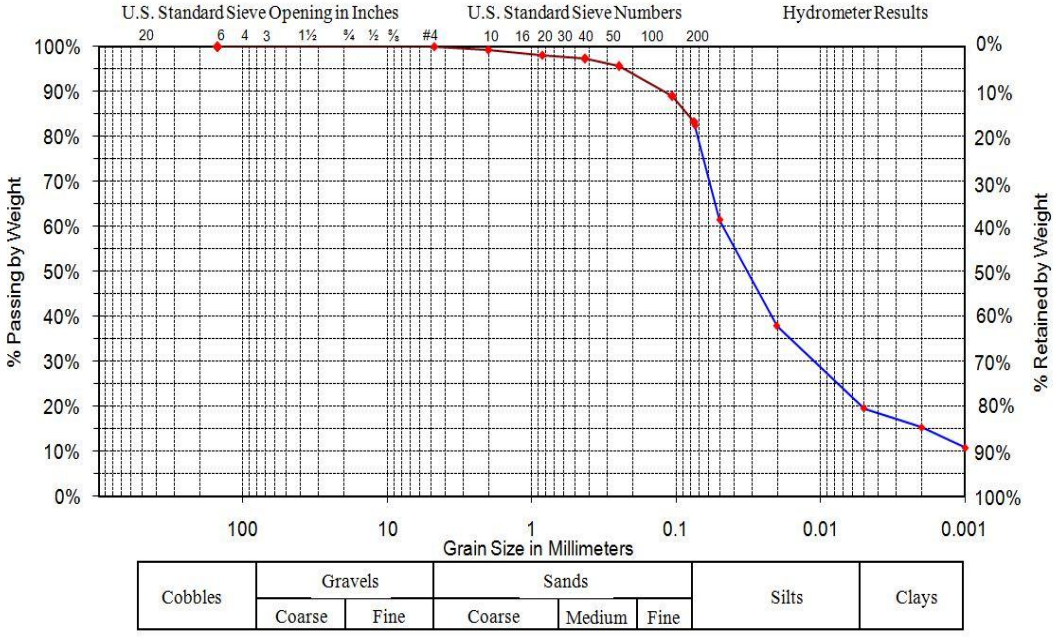
ب) با اضافه کردن خاکستربادی پایداری افزایش می‌یابد.

ج) اختلاط آن با خاک باعث کاهش شکل‌پذیری و خصوصیات پلاستیسیته زیر اساس می‌شود.

۲-۳ – مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک پایه

۲-۳-۱ – دانه‌بندی

آزمایش دانه‌بندی به‌روش الک و هیدرومتری براساس استاندارد شماره ASTM D421 و ASTM D422 انجام پذیرفته است. که نتایج آن در شکل(۲) قابل ملاحضه می‌باشد.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک پایه مورد استفاده در این پژوهش

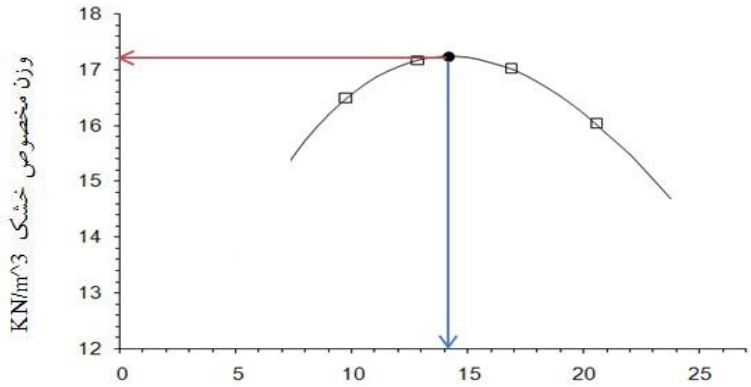
۲-۳-۲- حدود اتربرگ

آزمایش تعیین حدود اتربرگ خاک طبق استاندارد ASTM D4318 انجام پذیرفته و مقدار شاخص پلاستیسیته بدین صورت بدست آمده‌است:

PI = LL – PL =23.77 - 21.79= 1.98

۲-۳-۳- تراکم

آزمایش تراکم استاندارد مطابق استاندارد ASTM D698 انجام پذیرفته است. که نتایج در شکل (۳) قابل ملاحضه می‌باشد.



شکل ۳- منحنی آزمایش تراکم (رابطه بین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت) خاک پایه

۲-۳-۴- مقاومت فشاری تک‌محوری

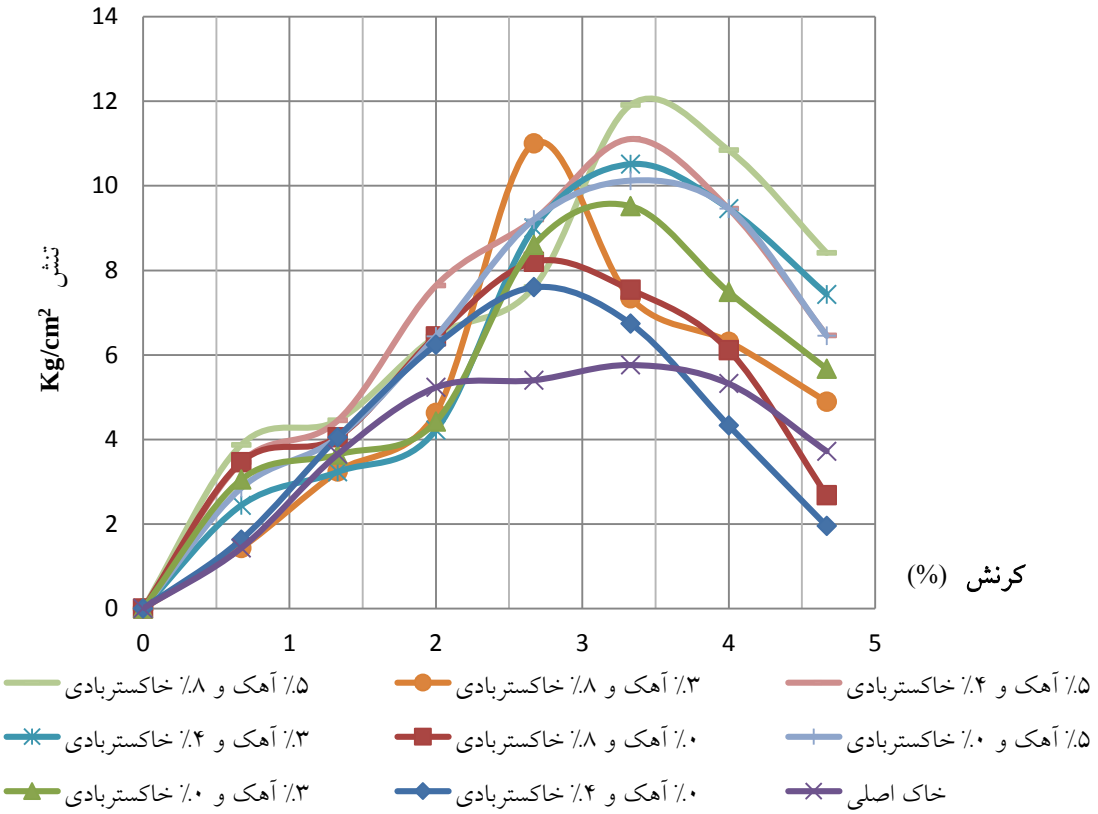
این آزمایش بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM D2166 بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با مقدار ۰٪، ۳٪ و ۵٪ آهک و ۰٪، ۴٪ و ۸٪ خاکستربادی در بازه های یک، هفت و بیست و هشت روزه بر حسب رطوبت بهینه حداکثر هر نمونه انجام پذیرفته است تا بهترین نمونه که باعث مناسب‌ترین مقاومت فشاری تک‌محوری می گردد را به عنوان درصد اختلاط بهینه معرفی نماید. نمونه‌ی تحت آزمایش تک‌محوری در شکل(۴) قابل ملاحضه است.

شکل ۴- تصویر گسیختگی نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۳- نتایج

۳-۱ - مقاومت فشاری تک‌محوری یک روزه

شکل(۵) نتایج حاصل از انجام آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستربادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت‌زمان عمل‌آوری یک روزه نمایش می‌دهد.

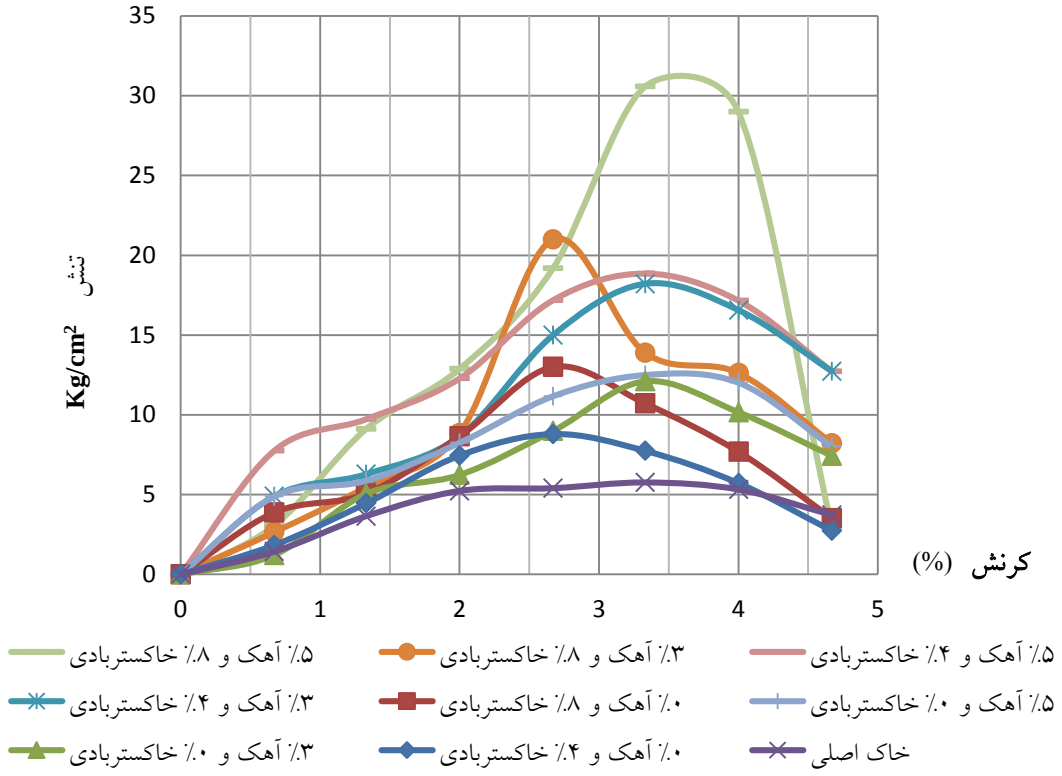


شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه های یک روزه با نسبت های اختلاط مختلف

شکل(۵) که رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستربادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت‌زمان عمل‌آوری یک روزه مدنظر قرارداده‌است، نشان دهنده رشد مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده نسبت به خاک اصلی حتی در مدت زمان عمل‌آوری یک روز می‌باشد. بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری بدست آمده حاصل از افزودن ۵٪ آهک و ۸٪ خاکستربادی است که به رقمی در حدود ۱۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است، این در حالی است که مقاومت خاک اصلی حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد که مبین رشد صد درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده پس از یک روز عمل‌آوری است. موضوع افزایش مقاومت فشاری در مابقی نسبت های اختلاط نیز به چشم می‌خورد. گرچه نسبت فوق به عنوان بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری یک روزه معرفی گردید اما لازم به ذکر است که مابقی نسبت‌های اختلاط نیز نموی نزدیک به هم داشته‌اند و به صورت کلی رفتار مقاومتی خاک، در اثر افزودن افزودنی‌ها با درصدهای مختلف، در مدت زمان عمل‌آوری یک‌روزه از حدود ۱/۵ برابر تا حدود ۲ برابر مقاومت خاک پایه افزایش پیدا کرده است. دلیل نزدیکی نتایج مقاومت‌های فشاری تک‌محوری بدست آمده به یکدیگر، زمان عمل‌آوری ناکافی برای انجام فعل و انفعلات بین خاک و مواد افزودنی می‌باشد که این روند در زمان های عمل‌آوری بیشتر سرعت و شتاب سریع‌تری به خود خواهد گرفت که در بخش های ۴-۲-۲ و ۴-۲-۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲ – مقاومت فشاری تک‌محوری هفت روزه

در شکل(۶) رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستربادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت‌زمان عمل‌آوری هفت روزه ارائه شده است.

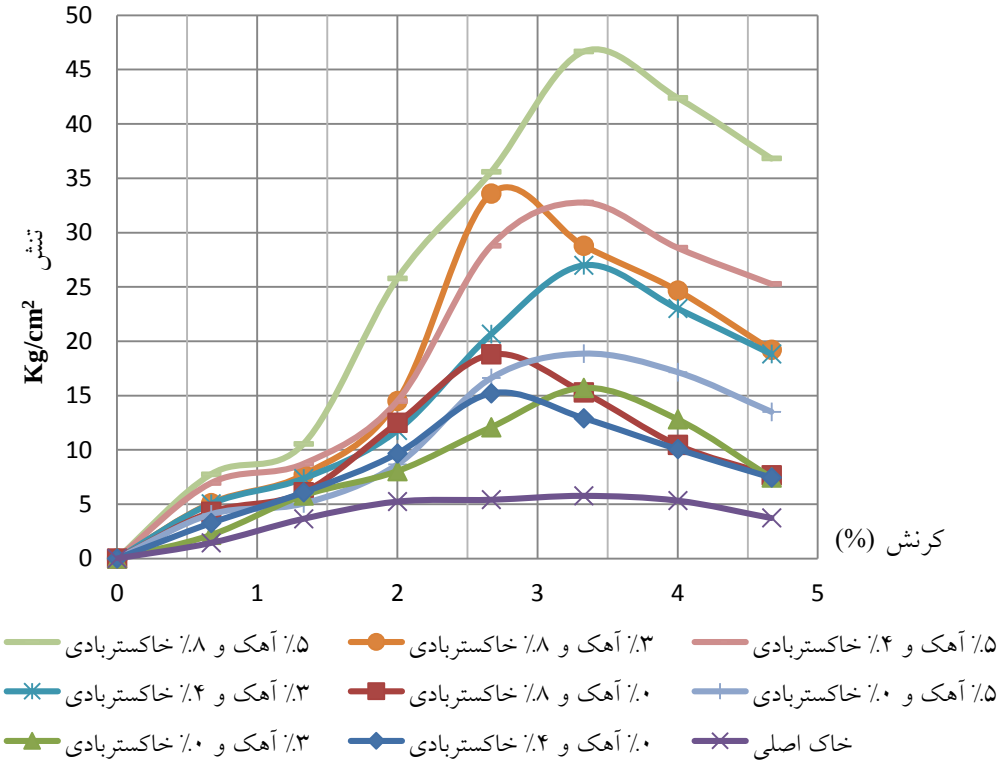


شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های هفت روزه با نسبت‌های اختلاط مختلف

شکل(۶) که رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستربادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت‌زمان عمل‌آوری هفت روزه مدنظر قرارداده‌است، نشان دهنده رشد چند برابری مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده نسبت به خاک اصلی در مدت زمان عمل‌آوری هفت روزه هستند. بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری بدست آمده حاصل از افزودن ۵٪ آهک و ۸٪ خاکستربادی است که به رقمی در حدود ۳۱ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است، این در حالی است که مقاومت خاک اصلی حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد که مبین رشد بیش از پنج برابری مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده پس از هفت روز عمل‌آوری دارد. لازم به ذکر است که مقاومت بدست آمده در قیاس با مدت زمان عمل آوری یک روزه حدود ۲/۵ برابر شده‌است. موضوع افزایش مقاومت فشاری در مابقی نسبت های اختلاط نیز به چشم می‌خورد. به صورت کلی رفتار مقاومتی خاک، در اثر افزودن افزودنی‌ها با درصدهای مختلف، در مدت زمان عمل‌آوری هفت روزه از حدود ۱/۵ برابر تا بیش‌از ۵ برابر مقاومت خاک اولیه بوده؛ اما همچنان حضور زمان عمل‌آوری بیشتر برای انجام فعل و انفعلات دقیق‌تر بین خاک و مواد افزودنی می‌تواند نمو مشخصات مقاومتی خاک را افزایش دهد که این روند در زمان عمل‌آوری بیست‌وهشت روزه و در بخش ۳-۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۳ – مقاومت فشاری تک‌محوری بیست‌وهشت روزه

شکل(۷) رفتار نمونه‌های مورد مطالعه را با حضور آهک و خاکستربادی با نسبت‌های اختلاط مختلف در مدت‌زمان عمل‌آوری بیست‌وهشت روزه نمایش‌داده‌است.



شکل ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های اختلاط مختلف

باتوجه‌به شکل(۷) بیشینه مقاومت بدست آمده پس از بیست و هشت روز عمل‌آوری به حدود ۴۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است که ناشی از ترکیب خاک اصلی همراه با ۵٪ آهک و ۸٪ خاکستربادی می‌باشد این ارتقای مقاومت در قیاس با مقدار مقاومت خاک اصلی که حدود ۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد رقم قابل توجه‌ای است.

نکته قابل استنتاج دیگر آن است که هر چند مقادیر بیشینه مقاومت متناظر با افزودن مقادیر به ترتیب ۳٪ و ۵٪ برای آهک به تنهایی با ۴٪ و ۸٪ برای خاکستر بادی به تنهایی به خاک پایه تقریبا برابرند اما کرنش متناظر با مقاومت بیشینه در موارد استفاده از آهک بیشتر بوده و نمونه‌ها شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان داده‌اند. این روند از بررسی و مقایسه در رفتار سایر نمونه‌ها نیز قابل نتیجه‌گیری است به گونه‌ای که می‌توان چنین عنوان نمود که افزودن آهک بدون تغییر محسوس در شکل‌پذیری خاک و یا اندکی افزایش آن موجب بالا رفتن مقاومت خاک سیلتی می‌شود اما افزودن خاکستربادی ضمن بالا بردن مقاومت بیشینه موجب کاهش شکل پذیری می‌گردد.

از نکات قابل تامل دیگری که از شکل(۷) نتیجه می‌شود آن است که مقاومت نهایی بدست آمده هنگام استفاده از آهک به صورت مجزا، کمتر از زمانی بوده است که از حضور خاکستربادی، به عنوان مکمل آهک، کمک گرفته شده است. یعنی همانطور که اشاره شد در اثر افزودن تنها ۳٪ آهک به خاک سیلتی مورد بحث، مقاومت فشاری به رقمی حدود ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده است و همچنین در اثر افزودن تنها ۵٪ آهک مقاومت فشاری به حدود ۱۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نزدیک شده است، که به ترتیب ۲/۵ و ۳ برابر مقاومت نهایی بدست آمده نسبت به مقاومت خاک پایه می‌باشد. اما هنگامی‌که همراه افزودن آهک از اضافه نمودن خاکستربادی به مخلوط کمک گرفته شده نتایج قابل توجه‌ای بدست آمده است، به عنوان مثال زمانی که از نسبت‌های اختلاط آهک و خاکستربادی به صورت توامان و به ترتیب به میزان ۳٪ و ۴٪ استفاده شده مقدار مقاومت حداکثر نمونه به ۲۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که مبین نمو ۴/۵ برابری مقاومت بدست آمده در قیاس با شرایط خاک پایه است.

۳-۴- تأثیر مدت‌زمان عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری

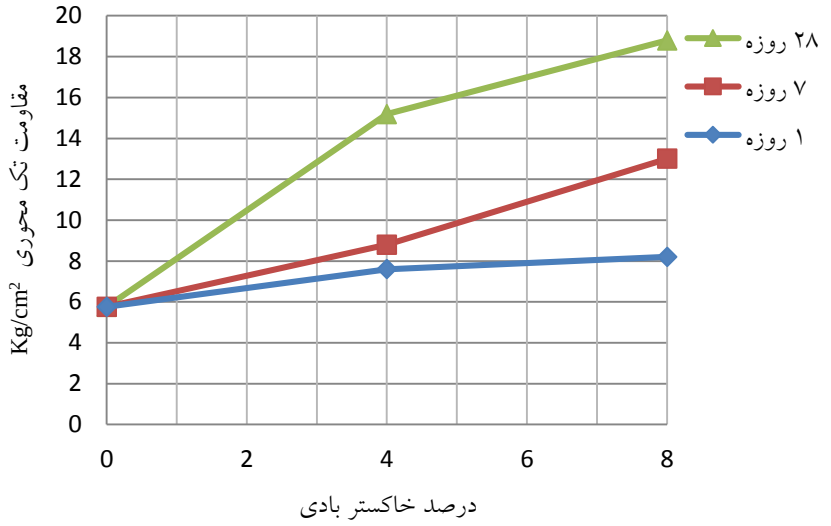
بررسی نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده با آهک و خاکستربادی در مدت زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان دهنده بهبود مقاومت تک‌محوری خاک تثبیت شده با گذشت زمان می‌باشد که به دلیل وجود زمان کافی برای فعالیت پوزولانی بین افزودنی‌ها و خاک مورد مطالعه با یکدیگر بوده است؛ یعنی نمونه‌هایی که در مدت بیست‌وهشت روز عمل‌آوری شده‌اند مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های هفت روزه و به همین ترتیب نمونه‌های هفت روزه نیز مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه‌های یک روزه از خود نشان می‌دهند. همچنین می‌توان بیان داشت که حتی با گذشت تنها یک روز از زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت بیشتری نسبت به قبل از تثبیت خاک با آهک و خاکستربادی پدیدآمده‌است. این مقدار بین ۶۰٪ تا ۸۰٪ مقاومت حداکثری نمونه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در مدت زمان عمل آوری بیست و هشت روزه، برخلاف مدت‌زمان‌های عمل‌آوری یک روزه و هفت روزه، فعالیت های بین خاک و افزودنی‌ها تقریبا شکل نهایی به خود گرفته و درصد بالایی از مقاومت نهایی خاک تثبیت شده در این مدت بدست می آید همچنین تامین مقاومت مورد انتظار از خاک تقویت شده در کمترین زمان، مسئله بسیار مهمی در پیش‌برد اهداف زمان‌بندی اجرای سازه‌های مختلف عمرانی خواهد بود، که باید توسط طراح مد نظر قرار گیرد. نتایج جدول(۱) از نقطه نظر نسبت مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مدت‌زمان عمل‌آوری و به ازای مقادیر مختلف آهک و خاکستربادی است که در شکل‌های (۸) الی (۱۱) نیز به تفکیک ارائه گردیده‌است.

جدول ۱- نتایج بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با آهک و خاکستربادی به‌تفکیک زمان‌عمل‌آوری نسبت به خاک پایه

درصد آهک	درصد خاکستربادی	نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری خاک بهسازی شده به خاک پایه		
		۱ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
۵	۸	۱۱/۹۱	۳۰/۵۸	۴۶/۶۶
۳	۸	۱۱	۲۰/۹۹	۳۳/۵۹
۵	۴	۱۱/۱۱	۱۸/۸۶	۳۲/۷۶
۳	۴	۱۰/۵۱	۱۸/۲۱	۲۶/۹۸
۵	۰	۱۰/۱۲	۱۲/۵	۱۸/۸۵
۰	۸	۸/۲	۱۳	۱۸/۷۹
۰	۴	۷/۶	۸/۸	۱۵/۱۹
۳	۰	۹/۵۲	۱۲/۱۱	۱۵/۰۷
۰	۰	۵/۷۶	۵/۷۶	۵/۷۶

۳-۴-۱ – تاثیر مدت‌زمان بر عمل‌آوری خاکستربادی

شکل(۸) شرایط نمونه را بدون حضور آهک و تنها با حضور خاکستربادی با درصدهای مختلف و تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان داده‌است.



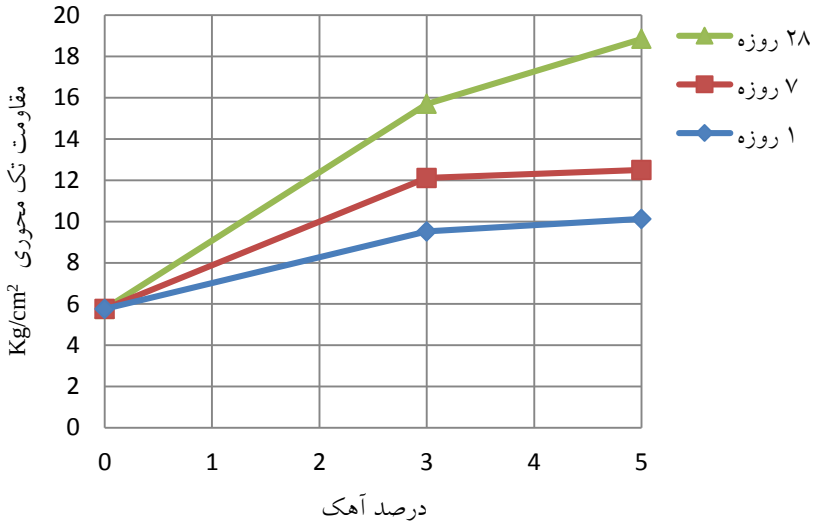
شکل ۸- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با خاکستربادی و بدون حضور آهک

همان‌گونه که از نمودار قابل استنباط است شیب نمودار در حالت یک روز عمل‌آوری به دلیل عدم شکل‌گیری صحیح فعالیت‌های پوزولانی خاکستربادی با خاک ، رشد چندانی در قیاس با مدت‌زمان‌های عمل‌آوری بلندتر به خود نگرفته‌است. پس از هفت روز عمل‌آوری، نمودار شیب تندتری نسبت یک روز عمل‌آوری خاکستربادی دارد که نشان از تقویت فعالیت‌های بین خاکستربادی و خاک مورد مطالعه می‌باشد. پس از بیست‌وهشت روز عمل‌آوری، تأثیر واقعی حضور خاکستربادی بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری به وضوح قابل لمس است. نمودار در بازه‌ی ۰٪ الی ۴٪ خاکستربادی شیب صعودی‌تری نسبت به بازه‌ی ۴٪ الی ۸٪ دارد که نشان از کافی‌بودن تأثیرخاکستربادی به میزان ۴٪ بر شکل‌گیری مقاومت فشاری ایده‌آل خاک مورد مطالعه می‌باشد و در صورت افزودن مقدار بیش از ۴٪ روند افزایشی مقاومت فشاری تک‌محوری به نسبت کمتری ادامه پیدا خواهد نمود.

۳-۴-۲ – تاثیر مدت‌زمان بر عمل‌آوری آهک

شکل(۹) واقع در صفحه بعد شرایط نمونه را بدون حضور خاکستربادی و تنها با حضور آهک با درصدهای مختلف و تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان داده‌شده‌است. با دقت در نمودار قابل مشاهده است طبق انتظارات فعالیت‌های مقاومتی شکل‌گرفته بین آهک و خاک موردمطالعه با گذشت زمان تأثیر بیشتری از خود نمایان می‌سازد. همچنین در مدت‌های عمل‌آوری یک‌روزه و هفت‌روزه شیب نمودار، مخصوصاً در نسبت‌های اختلاط بیش از ۳٪ آهک، تقریبا شرایط یکسانی دارد.

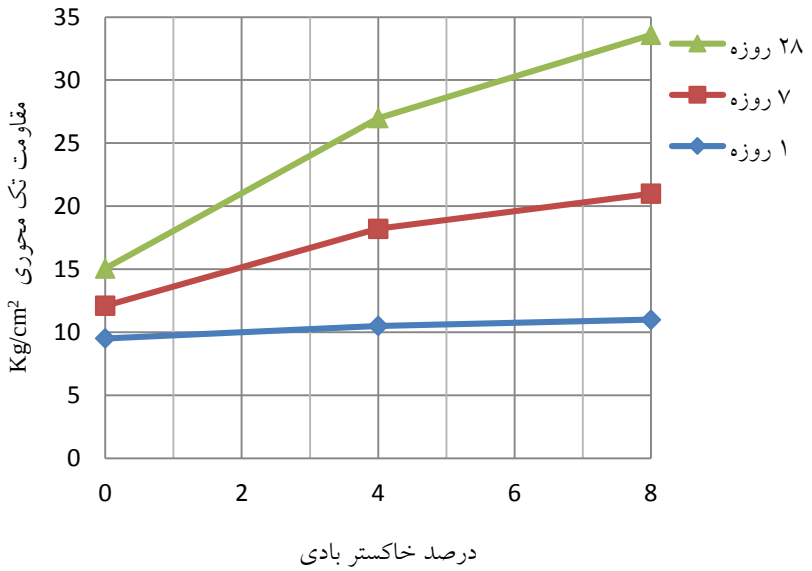
با گذشت مدت‌زمان بیست‌وهشت روز عمل‌آوری، گرچه رشد مقاومت فشاری تک‌محوری در بازه‌ی ۳٪ الی ۵٪ نسبت به زمان‌های عمل‌آوری کوتاه‌تر رشد بهتری داشته‌است اما باید بیان شود که درهر سه مدت زمان عمل‌آوری، نمودار در بازه‌ی ۰٪ الی ۳٪ شیب صعودی‌تری دارد. این مسئله به وضوح نشانگر این موضوع است که حضور آهک به میزان ۳٪ شرایط مقاومتی نمونه‌های مورد بررسی را تا حد بسیار قابل‌قبولی افزایش داده‌است، و این میزان، در قیاس با شیب نمودار در بازه‌ی بیش از ۳٪ آهک ، از کیفیت بیشتری برخورداراست.



شکل ۹- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با آهک و بدون حضور خاکستربادی

۳-۴-۳ – تاثیر مدت‌زمان بر عمل‌آوری خاکستربادی توأم با ۳٪ آهک

شکل(۱۰) شرایط نمونه مورد مطالعه را با حضور ۳٪ آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی و تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان داده‌است.



شکل ۱۰- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با خاکستربادی و ۳٪ آهک

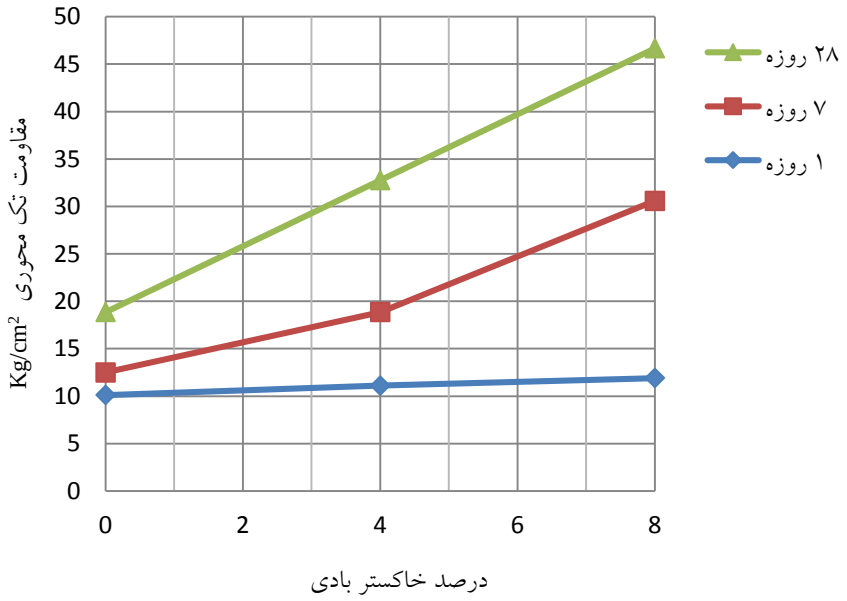
به طور مشخص حضور ۳٪ آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی به دلیل شکل‌گیری فعالیت‌های پوزولانی، نیاز به زمان کافی برای تقویت مقاومت خاک مدنظردارد به همین علت در مدت زمان عمل‌آوری یک روزه تأثیر اضافه نمودن افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌سیلتی موردمطالعه ناچیز بوده است.

نمودار در مدت‌زمان عمل‌آوری هفت روزه شیب صعودی‌تری را در بازه‌ی ۰٪ الی ۴٪ خاکستربادی نسبت به بازه‌ی ۴٪ الی ۸٪ تجربه می‌کند، که نشان از کافی بودن ۴٪ خاکستربادی، در کنار ۳٪ آهک، برای افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری هفت روزه خواهد بود.

در مدت زمان عمل‌آوری بیست‌وهشت روزه نمونه‌ها، شیب نمودار تندتر از زمان های عمل‌آوری پیشین گشته و نمودار تقریبا روند یکسانی را به خود گرفته است که به بیان کافی بودن مدت زمان شکل گیری فعالیت های بین افزودنی‌ها و خاک اصلی و در نتیجه تولید مقاومت نهایی می‌پردازد. همچنین نمودار شیب صعودی‌تری را در بازه‌ی ۰٪ الی ۴٪ خاکستربادی نسبت به بازه‌ی ۴٪ الی ۸٪ تجربه می کند، که نشان می‌دهد حضور خاکستربادی به میزان ۴٪، در کنار ۳٪ آهک، شرایط مقاومتی نمونه‌های مورد بررسی را تا حد بسیار قابل‌قبولی افزایش داده‌است، و این میزان، در قیاس با شیب نمودار در بازه‌ی بیش از ۴٪ خاکستربادی ، از کیفیت بیشتری برخورداراست.

۳-۴-۴ – تاثیر مدت‌زمان بر عمل‌آوری خاکستربادی توام با ۵٪ آهک

شکل(۱۱) شرایط نمونه مورد مطالعه را با حضور ۵٪ آهک در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی و تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت مورد بررسی قرارداده‌است.



شکل ۱۱- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با خاکستر بادی و ۵٪ آهک

به مانند شرایط بند ۳-۴-۳ حضور ۵٪ آهک نیز در کنار درصدهای مختلف از خاکستربادی به دلیل شکل‌گیری فعالیت‌های پوزولانی، نیاز به زمان کافی برای تقویت مقاومت خاک مدنظردارد به همین علت در مدت زمان عمل‌آوری یک روزه تأثیر اضافه نمودن خاکستربادی بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌سیلتی موردمطالعه ناچیز بوده است.

نمودار در مدت‌زمان‌های عمل‌آوری هفت روزه و حتی بیست‌وهشت روزه در حضور نسبت‌های بیشتری از افزودنی‌ها (نسبت به بند ۳-۴-۳، افزایش ۲٪ آهک بیشتر) شیب تقریبا یکسانی به خود گرفته‌است که نشان می‌دهد پس از گذشت مدت‌زمان کافی از عمل‌آوری نمونه‌ها رفتار مقاومتی خاک مورد بحث روند متعادلی پیدا کرده است.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده بیشترین مقاومت مربوط به نسبت اختلاط ۵٪ آهک و ۸٪ خاکستر بادی به میزان ۴۶/۶۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد، که نشان دهنده رشد هشت برابری نسبت به مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌سیلتی منطقه‌ی موردمطالعه می‌باشد، اما باید خاطر نشان شود که با توجه به مسئله‌ی‌صرفه اقتصادی راه‌کار ارائه بهبود مشخصات خاک، نسبت اختلاط ۳٪ آهک و ۴٪خاکستربادی با توجه به نیل به مقاومت ۲۰/۶۵

کیلوگرم بر سانتیمترمربع و رشد بیش از ۳/۵ برابری مقاومت در قیاس خاک پایه، این نسبت اختلاط است که به عنوان بهینه‌ترین نسبت اختلاط خاک سیلتی منطقه‌ی شهریار با آهک و خاکستربادی به‌منظور بهبود مشخصات مقاومتی پیشنهاد می‌گردد. در هر صورت لازم به ذکر است که انتخاب درصد اختلاط مناسب به مقدار نیروی وارده از سوی سازه احداثی بر روی خاک مدنظر بستگی دارد. علاوه بر این مقایسه مقاومت نمونه‌ها در فاصله عمل‌آوری یک تا بیست‌وهشت روز نشان می‌دهد نمونه‌های تثبیت شده با آهک – خاکستربادی افزایش مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک به‌تنهایی دارند که خود بیانگر تأثیر مثبت خاکستربادی در بهبود مقاومت بلند مدت خاک است.

همچنین می‌توان نتیجه‌گرفت ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده در این پژوهش اثرات پرکنندگی بهتر و افزایش دانسیته مناسب‌تر بر خاک‌سیلتی دارند که سهم افزایش دانسیته با مدت‌زمان افزایش می‌یابد، همچنین ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده می‌تواند به طور مؤثری سبب بهبود مقاومت فشاری خاک‌سیلتی شود. از نقطه‌نظر مکانیکی و قابلیت اجرا، ترکیب افزودنی‌های تثبیت کننده مورد استفاده یک طرح اقتصادی و معقول را نتیجه خواهد داد. خاک‌سیلتی تثبیت شده مقاومت اولیه‌ی بالا و سختی سراسری بالایی دارد و به خوبی می‌تواند نیازهای بستر سازه‌ها و راه‌ها را برآورده کند.

۵– منابع

۱. داس، ب .م. (۱۳۸۳). اصول مهندسی ژئوتکنیک(چاپ هشتم). تهران: مؤسسه انتشاراتی پارس آئین، جلد دوم – مهندسی پی، ترجمه طاحونی.

۲. بهنیا، کامبیز، طباطبایی، امیرمحمد. (۱۳۷۸). مکانیک خاک(چاپ یازدهم). مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

۳. هاشمی طباطبایی، آقایی آرایی، علی. (۱۳۸۷). مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده. نشریه علوم زمین، سال هفدهم، شماره ۶۷.

۴. پژوهشکده حمل‌ونقل. (۱۳۸۸). راهنمای تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها(چاپ دوم). وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل و نقل.

4. Hausmann, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. McGraw-Hill. Book. Inc. Yazici, V. (2004). Stabilization of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS). GBFS-Lime Combinations and GBFS Cement.

5. Rajasekaran, G. (2005). Sulphate Attack and Ettringite Formation in the Lime and Cement Stabilized Marine Clays. Ocean Engineering, Vol. 32.

6. Hausmann, M.R. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. McGraw-Hill. Book. Inc. ASTM C618 , D422 , D421 , D4318 , D2166 & BS 3892