

تأثیر آهک بر روی بهسازی خاک‌های ریز دانه منطقه فقیره همدان

محمّد مسین قبّادی^۱، یزدان ممبّی مسن‌آبادی^{۲*}، یاسین عبدی‌لر^۳ و رضا بابازاده^۳

(۱) استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، amirghobadi@yahoo.com

(۲) مربی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور همدان، yazdan5@yahoo.com

(۳) دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا

(* عهده‌دار مکاتبات)

دریافت: ۹۱/۴/۲۵؛ دریافت اصلاح شده: ۹۱/۶/۱۲؛ پذیرش: ۹۱/۶/۲۱؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۱/۱۲/۵

هکیده

در این پژوهش بهسازی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه منطقه فقیره همدان با استفاده از آهک مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای مورد بررسی شامل خصوصیات خمیری خاک، مقاومت تراکمی تک محوری، رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر می باشد که با افزودن آهک با درصدهای وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ به خاک و با زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روز مورد مطالعه قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل شده از آزمایش دانه بندی مشخص شد که با افزایش درصد آهک به خاک رس مورد نظر پس از ۷ روز، درصد ذرات ریزدانه موجود در خاک کاهش یافته و ذرات درشت دانه بیشتر می گردند. همچنین نتایج آزمایش حدود خمیری حاکی از این است که با افزایش درصد آهک و زمان عمل آوری، شاخص خمیری کاهش یافته و خاک غیر خمیری می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش تراکم تک محوری نیز نشان می دهد که افزایش درصد آهک و دوره عمل آوری، خصوصیات مقاومتی خاک بهسازی شده را افزایش می دهد. با توجه به نتایج حاصله، درصد آهک بهینه و زمان عمل آوری بهینه برای بهسازی خاک رس منطقه فقیره همدان به ترتیب ۷ و ۳۰ روز پیشنهاد می شود. علاوه بر این، به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مخلوط شده با درصد آهک و زمان عمل آوری، آنالیز رگرسیون غیرخطی انجام شده و روابط خوبی با ضریب رگرسیون بالا ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: تراکم تک محوره، خاک‌های ریزدانه، شاخص خمیری، ضریب رگرسیون، مقاومت خاک، ویژگی‌های ژئوتکنیکی.

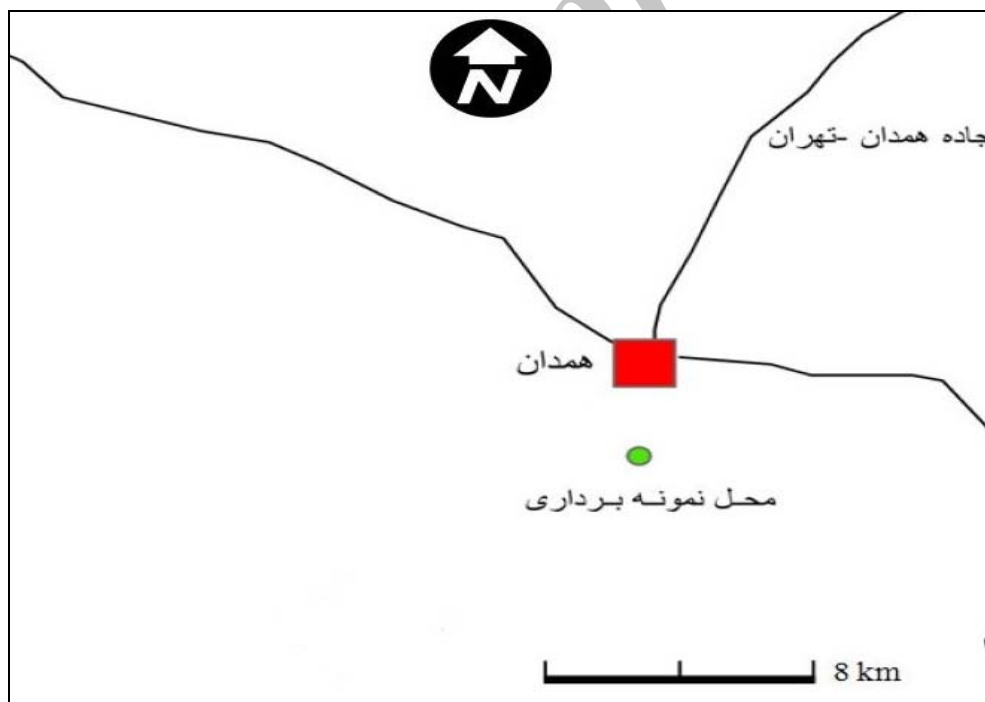
۱- مقدمه

دارند، کائولینت و ایلیت نیز با آهک واکنش نشان می دهند (کاووسی و هاشمیان ۱۳۸۰). در تثبیت مصالح خاکی، مواد تثبیت‌کننده با ذرات خاک آمیخته می‌شوند و گاه ترکیب شیمیایی جدیدی با خواص متفاوت به وجود می‌آورند. به عنوان مثال، آهک؛ چه به صورت زنده (با ترکیب شیمیایی CaO) و چه به صورت شکفته با فرمول شیمیایی $Ca(OH)_2$ با ذرات رس ترکیب می‌شود و خصوصیات فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد. این عمل، یعنی استفاده از آهک به عنوان تثبیت‌کننده ارزان، قابل دسترس و بسیار نتیجه بخش، سالیان دراز است که در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است

تثبیت خاک با آهک به‌عنوان روش نتیجه بخشی در افزایش توان باربری و کاهش تغییرشکل پذیری و خواص خمیری بسیاری از خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تثبیت خاک، عموماً با به‌کارگیری: سیمان، آهک، قیر و مواد شیمیایی مختلف، امکان‌پذیر است (Hicks 2002, Cernica 1995). برای مشخص شدن میزان واکنش آهک با خاک هایی که دامنه خمیری آنها کم است، بایستی آزمایش مقاومت فشاری انجام گردد. بطور کلی اغلب رس های خمیری با آهک واکنش می‌دهند. خاک های حاوی مونت مورنولیت معمولاً واکنش شدیدتری

برای ماسه‌هایی با توزیع مناسب دانه‌بندی و حاوی مقدار کافی از مصالح ریزدانه رسی، بیش‌ترین مقاومت در درصد‌های آهک (حدود ۶ تا ۷ درصد) حاصل می‌شود (عربانی و ویس کرمی ۱۳۸۸). روند تغییرات مقادیر CBR (California Bearing Ratio) خاک اصلاح شده با درصد بهینه آهک افزایشی است و درصد تورم آن با افزایش زمان عمل آوری کاهش می‌یابد (Rao & Thyagaraj 2003). یکی دیگر از اثرات استفاده از آهک در خاک رس کاهش نفوذپذیری خاک است. هر چه میزان درصد آهک کمتر باشد افزایش نفوذپذیری بیشتر خواهد بود. از طرفی با افزایش سن نمونه‌ها میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد (عربانی و ویس کرمی ۱۳۸۸). در این پژوهش، تأثیر مقادیر مختلف درصد آهک بر بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از قبیل خصوصیات خمیری، رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک و مقاومت خاک‌های رسی منطقه فقیره همدان مورد مطالعه قرار گرفته است (تصویر ۱). درصد‌های آهک افزوده شده و زمان‌های عمل آوری بر اساس مطالعات پژوهشگران قبلی انتخاب گردید (داودی و کبیر ۱۳۸۹، Bell 1996).

(Al- Rawas & Goosen 2006). ترکیب خاک رس و آهک به دلیل به‌وجود آمدن پیوند شیمیایی بین ذرات رس و آهک منجر به سیمانی شدن مصنوعی خاک می‌گردد. (Ingles & Metcalf 1972) خصوصیات متفاوت خاک‌های بهسازی شده با آهک، توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (Boardman et al. 2001, Gay & Schad 2000, Bell 1996, Ismail et al. 2002). این افراد در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های بهسازی شده با آهک، میزان رطوبت بهینه افزایش قابل توجهی یافته و وزن واحد حجم خشک حداکثر نیز کاهش یافته است. کاهش میزان دانسیته خاک در این آزمایش را می‌توان به تشکیل سریع موادی با خاصیت سیمانی ارتباط داد که باعث کاهش تراکم پذیری و در نتیجه کاهش دانسیته خاک بهسازی شده می‌شود (Airey 1993). محققین دیگری نیز نشان دادند که رفتارهای گسیختگی نمونه‌های خاک‌های بهسازی شده با آهک، مشابه رفتار مصالح ترد و شکننده می‌باشد و مقاومت این خاک‌ها پس از افزودن آهک، افزایش پیدا کرده است (Boardman & Glendinning & Rogers 2001, Al- Rawas & Goosen 2006).



تصویر ۱- موقعیت جغرافیایی برداشت نمونه‌های مورد آزمایش از منطقه فقیره همدان.

گرفته است؛ زیرا شن و ماسه درشت دانه، اصولاً به بهسازی نیاز نداشته و اغلب خصوصیات ژئوتکنیکی مناسبی دارند. به همین منظور بهسازی خاک به روش سیمانی شدن مصنوعی به طور عمده روی ماسه‌ها و مصالح ریزدانه انجام می‌شود (Mallela et al. 2004).

۲- زمین‌شناسی منطقه

سیمانی شدن در مهندسی ژئوتکنیک به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و ایجاد یک توده چسبنده با مقاومت بیشتر اتلاق می‌شود. سیمانی شدن مصنوعی، عموماً در ارتباط با ماسه‌ها مورد بررسی قرار

می‌گردد.

ه- روش (Official American Association of AASHTO State Highway and Transportation): با این روش براساس نمودارهایی درصد آهک را مشخص می‌کنند. در این روش نیز نشانه‌ای از مقاومت و خصوصیات مکانیکی مصالح پس از تثبیت به چشم نمی‌خورد.

مصالح تثبیت شده با آهک در بسترهای خاکی راه، خاک‌ریزها و ترانشه‌ها و هم‌چنین پی‌سازی در برخی زمین‌های نرم، قابل استفاده هستند. اختلاط خاک با آهک به صورت درجا و کارگاهی انجام می‌شود. عموماً مصالح خاکی با درصد رطوبت بهینه خاک با آهک خشک یا دوغاب آهک آمیخته شده و متراکم می‌شوند. اختلاط درجای خاک و آهک در تثبیت لایه‌های سطحی بیش‌تر، مورد توجه است. در این راستا مصالح خاکی و آهک با استفاده از ماشین‌آلات مخلوط می‌شوند. کنترل تثبیت توسط آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری یا CBR انجام‌پذیر است (Lin et al. 2007). در این پژوهش از روش مقاومت فشاری تک‌محوری برای تعیین درصد بهینه آهک در بهسازی خاک استفاده شده است.

۳- بمت

۳-۱- ویژگی‌های خاک مورد استفاده

نمونه خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه، از روستای فقیره همدان تهیه شده‌اند. بر اساس نتایج آزمایش دانه بندی و طبق رده بندی یونیفاید، رده خاک CL می‌باشد. در تصویر ۲ نمودار دانه بندی خاک‌های مذکور نشان داده شده است.

پس از افزودن آهک، آزمایش دانه بندی بر روی نمونه‌ها پس از ۷ روز انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که با مخلوط کردن آهک با خاک پس از گذشت ۷ روز درصد ذرات ریزدانه خاک کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش دانه بندی خاک با درصد‌های مختلف آهک در تصویر ۳ آمده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد آهک درصد ذرات ریزدانه خاک کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان افزایش ذرات درشت دانه در خاک بهسازی شده را به واکنش‌های فولکوله شدن بین خاک رس و آهک می‌توان نسبت داد.

بر روی این خاک آزمایش پراش اشعه ایکس X-Ray Diffraction (XRD) انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که عمده کانی‌های موجود در خاک، کوارتز، فلدسپات و ایلیت می‌باشد. (تصویر ۴). نتایج حاصل از آزمایشات فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی نمونه خاک مذکور قبل از اضافه کردن آهک در جدول ۱ آمده است.

اصولاً پس از افزودن آهک به خاک، دو دسته واکنش به صورت جایگزینی یون‌های مثبت و تجمع- تراکم درخاک صورت می‌گیرد. در طی این واکنش‌ها، ذرات آهک با خاک رس ترکیب شده، به یکدیگر می‌چسبند و یک مخلوط سیمانی با اجزای درشت‌تر را به وجود می‌آورند که دارای خمیری کم‌تر و مقاومت بیش‌تری است. پس از آن در بلند مدت، واکنش‌های دیگری بین اجزای رسی خاک و آهک صورت می‌گیرد.

واکنش‌های پوزولانی که طی آن، مواد سیمانی‌شده بیش‌تری تولید می‌شود و مقاومت بلندمدت خاک بر آن اساس قرارداد، و واکنش‌های کرناسیون که به تولید مواد غیر محلول در آب می‌انجامد، از جمله این واکنش‌ها هستند (کاووسی و هاشمیان ۱۳۸۰).

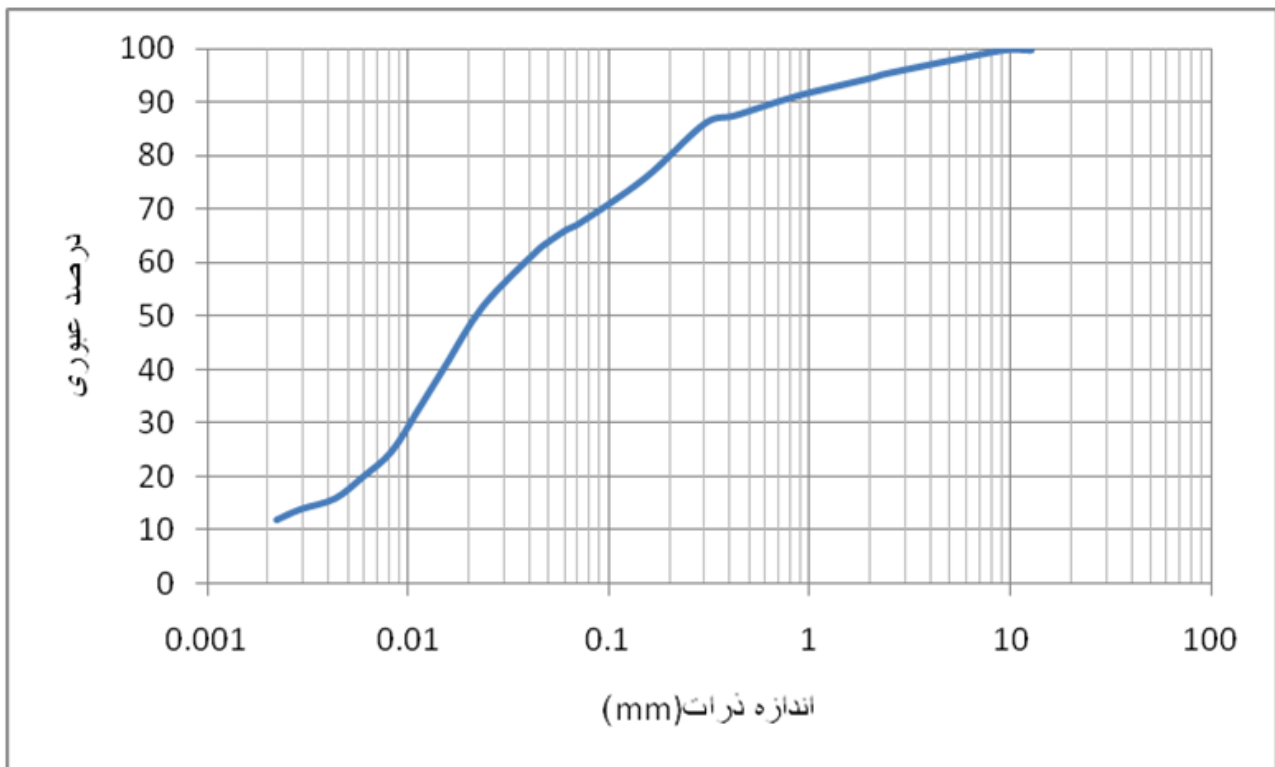
افزایش مواد سیمانی‌کننده در خاک تا یک سطح مشخص، می‌تواند به افزایش چسبندگی اجزای درشت‌تر بیانجامد و مقاومت مخلوط را افزایش دهد. علاوه بر خاک‌های رسی در موارد متعددی از آهک، جهت سیمانی شدن مصنوعی مصالح درشت‌دانه‌تر مانند ماسه‌ها و لس‌ها استفاده می‌شود که از جمله آن می‌توان به کاربرد آهک زنده در تثبیت ماسه‌ها و رس‌ها در آلمان و موارد دیگر در بازسازی ماسه‌های ریزدانه در شمال غربی قاره استرالیا اشاره نمود (Gay & Schad 2000). تعیین درصد آهک مناسب و بهینه در طرح مخلوط‌های خاک- آهک، از اهداف عمده مطالعه مخلوط‌ها است. برای طرح و اجرای لایه‌های خاکی و خاکریزهای تثبیت شده با آهک در آیین‌نامه‌ها روش‌های متعددی پیشنهاد شده است (عربانی و ویس کرمی ۱۳۸۸). این روش‌ها عبارتند از:

الف- روش pH: در این روش، درصد آهک مناسب بر اساس pH مخلوط خاک- آهک تعیین می‌شود. این روش برای تثبیت خاک‌های درشت‌دانه قابل استفاده نمی‌باشد و علاوه بر آن، مشخصات مقاومتی و تغییرشکل پذیری خاک در این روش مشهود نیست.

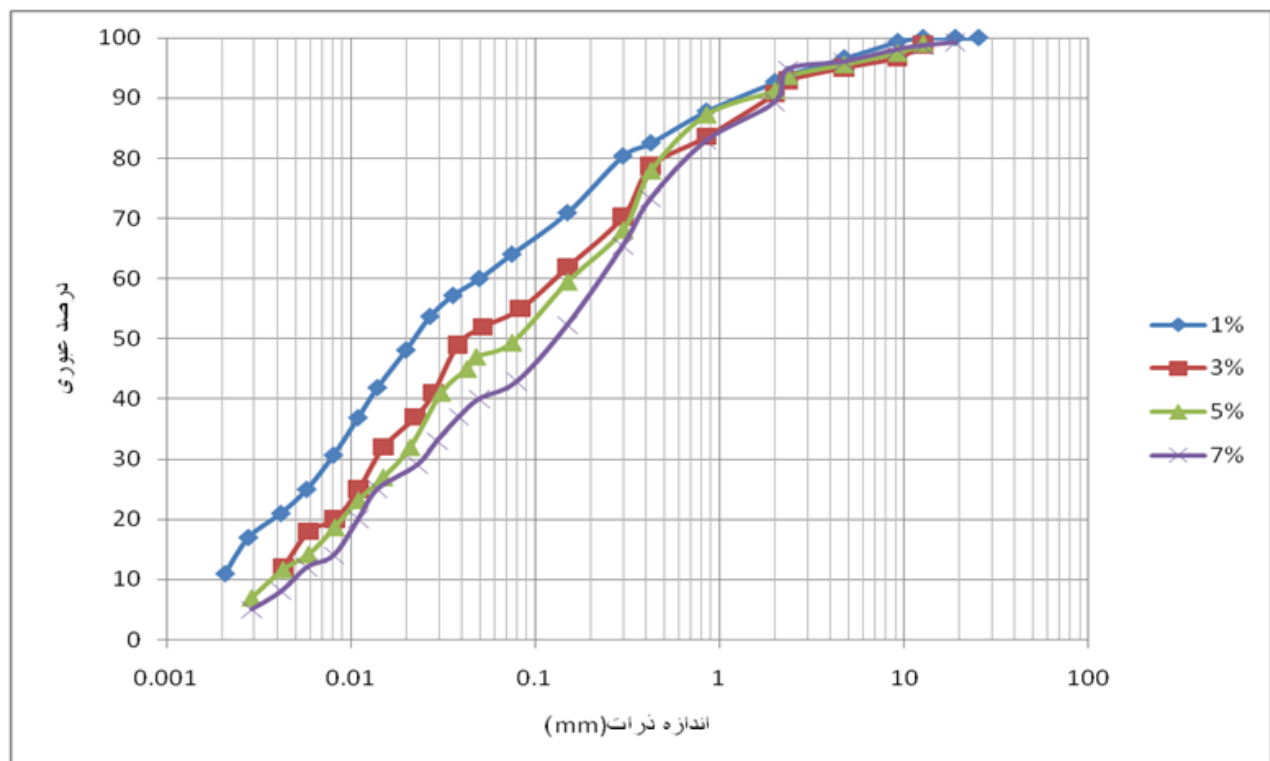
ب- روش نشانه خمیری: در این روش درصد آهک مناسب به اندازه‌ای است که خصوصیات خمیری مخلوط را به مقدار مورد نظر کاهش دهد. در این روش نیز مشخصات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری خاک پس از تثبیت قابل پیش‌بینی نیست.

ج- استفاده از نسبت باربری کالیفرنیا (CBR): در این روش، درصد آهک مناسب براساس نسبت CBR مشخص برای خاک‌ریز موردنظر تعیین می‌شود. در این روش هم تغییرشکل‌پذیری خاک پس از تثبیت قابل پیش‌بینی نیست؛ ولی نشانه‌ای از افزایش مقاومت بر اساس این روش، به دست می‌آید.

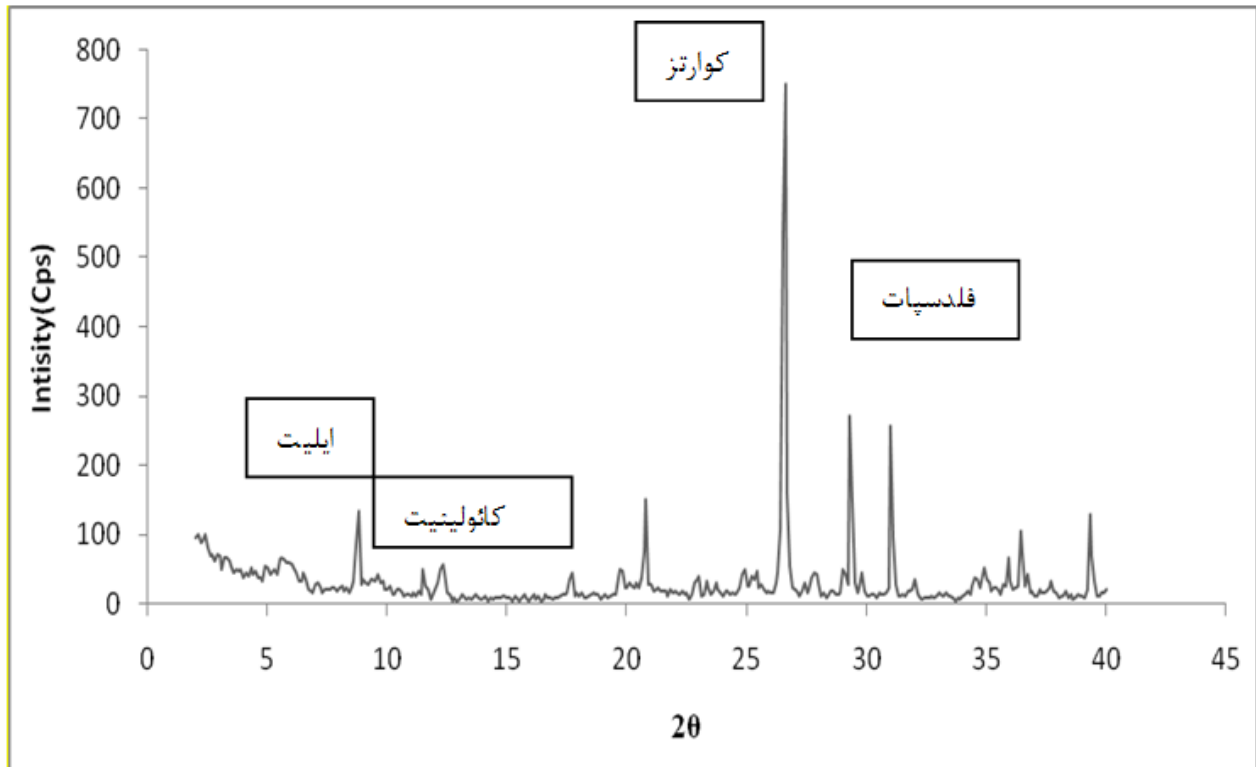
د- روش مقاومت فشاری تک‌محوری: درصد آهک مناسب در روش اخیر بر اساس مقاومت فشاری مخلوط خاک- آهک تعیین



تصویر ۲- منحنی دانه بندی خاک‌های منطقه مورد مطالعه.



تصویر ۳- منحنی دانه بندی خاک‌های منطقه مورد مطالعه با درصد های مختلف آهک با زمان عمل آوری ۷ روزه.



تصویر ۴- نمودار حاصل از انجام آزمایش پراش اشعه ایکس خاک مورد مطالعه به انگلیسی لغات توجه شود.

۴۵ روزه انجام شده است. آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ مطابق استاندارد (ASTM-D4318 (2000) انجام و حدود خمیری خاک تعیین گردید (جدول ۲). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با گذشت ۷ روز از افزودن آهک به خاک، خاصیت خمیری آن کاهش یافته و در مقادیر ۵ و ۷ درصد آهک، خاک غیرخمیری می‌شود. کاهش حدود خمیری خاک‌های رسی نرم در اثر اختلاط با آهک نتیجه تبادل کاتیونی در حضور آب است. این واکنش‌ها باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و فاصله بین کانی‌ها می‌شوند در نتیجه نیروی جاذبه بین کانی‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه ذرات رس تمایل به جفت شدن با یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگ‌تر را پیدا می‌کنند که در نهایت به غیرخمیری شدن خاک منجر می‌شود.

۳-۳- آزمایش تراکم

میزان تراکم و دانسیته خاک، از شاخص‌های مقاومتی خاک است. به منظور مشخص کردن تأثیر درصد آهک و زمان عمل‌آوری بر حداکثر دانسیته خشک و میزان رطوبت بهینه نمونه‌های خاک رس مخلوط شده با آهک، آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM - D698(2000) انجام شده است (تصویر ۵ و ۶). با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک خاک، حداکثر

جدول ۱) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه.

۹/۸	رطوبت طبیعی %
۲/۶۸	وزن مخصوص (Gs)
۳۸	حد روانی %
۲۷	حد خمیری %
۱۱	شاخص روانی (PI) %
۱۲/۱	رطوبت بهینه %
۱/۸۷	حداکثر وزن واحد حجم خشک (gr/cm ³)
۱/۵	مقاومت فشاری تک محوری (kg/cm ²)

آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های آماده شده از خاک با افزودن آهک به میزان ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی و زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه انجام شده است.

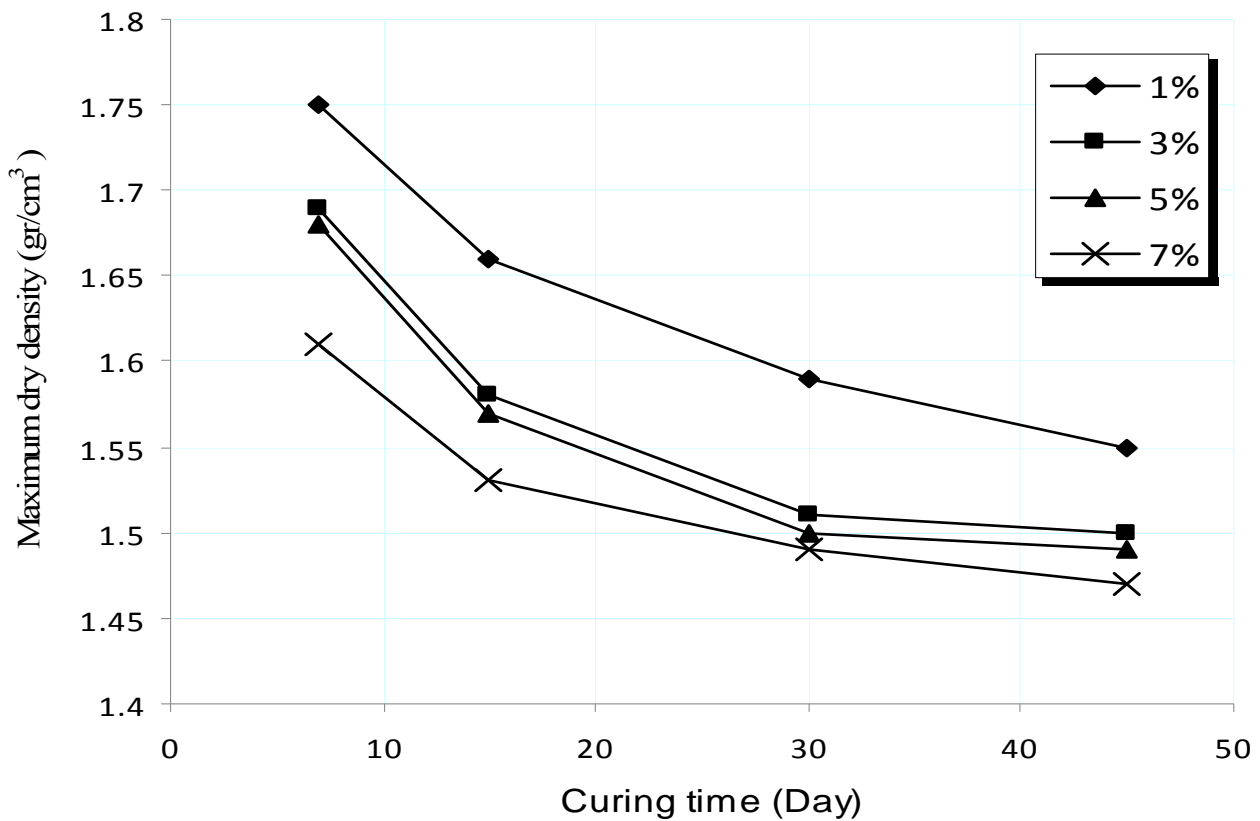
۳-۲- آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ، قبل و بعد از افزودن آهک به خاک با نسبت‌های ۱٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ وزنی و با زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و

جدول ۲- نتایج آزمایش حدود اتبرگ خاک، برای درصد‌های آهک مختلف و زمان گیرش هفت روز.

LL	PL	PI	درصد آهک افزوده شده	نوع مصالح
۳۸	۲۷	۱۱	۰	CL
۳۲	۲۶	۶	۱	
-	-	N.P	۳	
-	-	N.P	۵	
-	-	N.P	۷	

دانسیتة خشک نمونه ها دچار کاهش شده است. علاوه بر این مطابق با تصویر ۵ مشاهده می شود که با افزایش دوره عمل آوری نمونه ها، دانسیتة خشک نمونه ها روندی کاهشی از خود نشان می دهد. مطابق با تصویر ۶، درصد رطوبت بهینه نمونه های خاک رس بهسازی شده با آهک، ارتباط مستقیمی با درصد آهک افزودنی و زمان عمل آوری دارد. بر این اساس، مشاهده می گردد که با افزایش درصد آهک و دوره عمل آوری، درصد رطوبت بهینه دچار افزایش شده است که این مقدار افزایش به میزان آهک افزودنی، طول دوره عمل آوری و همچنین چگونگی عمل آوری بستگی دارد.

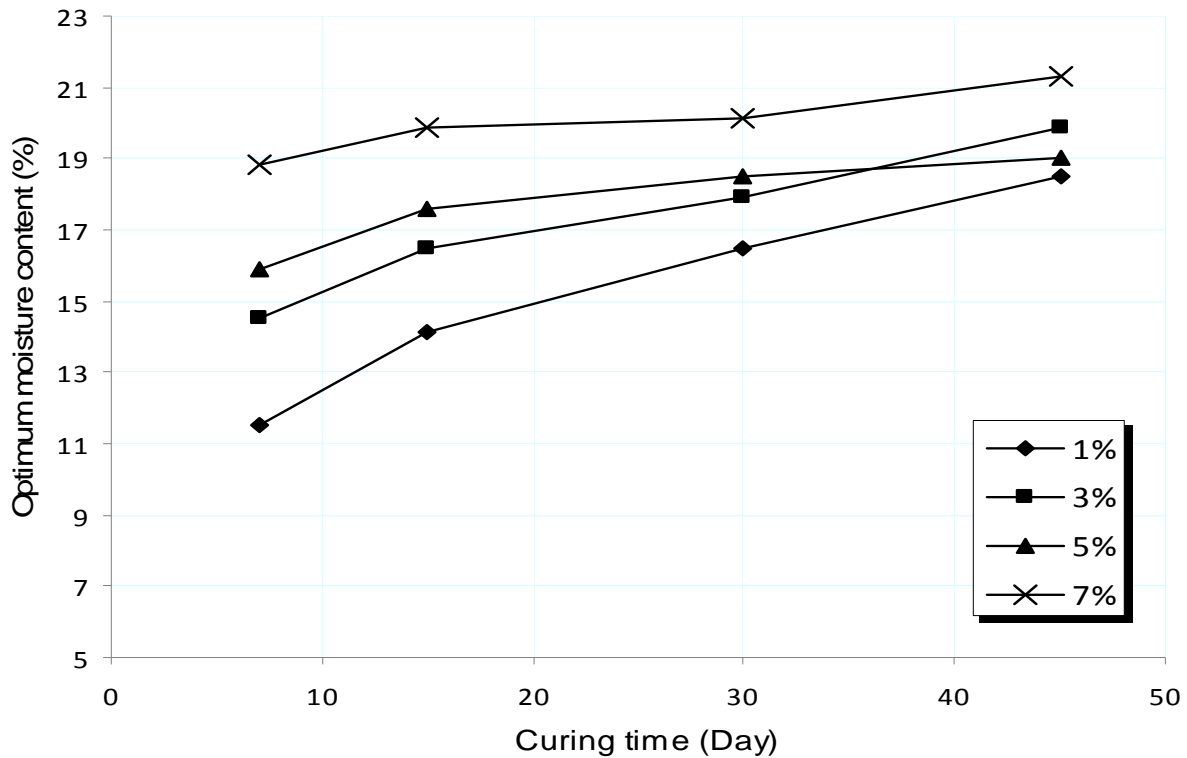


تصویر ۵- تأثیر زمان عمل آوری بر حداکثر دانسیتة خشک نمونه های خاک رس بهسازی شده با آهک.

استاندارد ASTM - D2166(2000) انجام گرفت. نمونه های مورد استفاده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، بر اساس رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک به دست آمده از آزمایش تراکم بازسازی شده اند.

۱۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

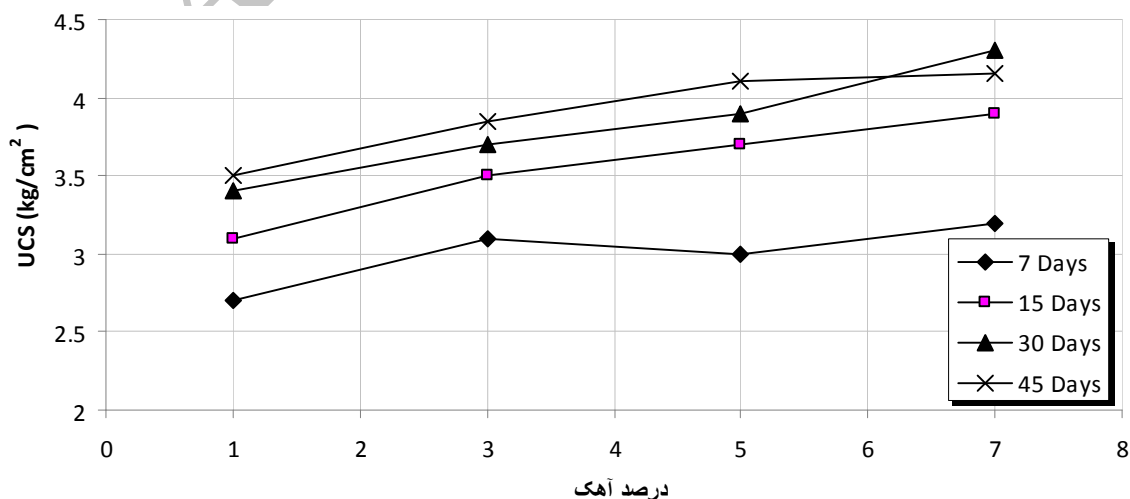
آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه های آماده شده از خاک مورد مطالعه با افزودن آهک به خاک با نسبت های ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی و زمان های عمل آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه مطابق با



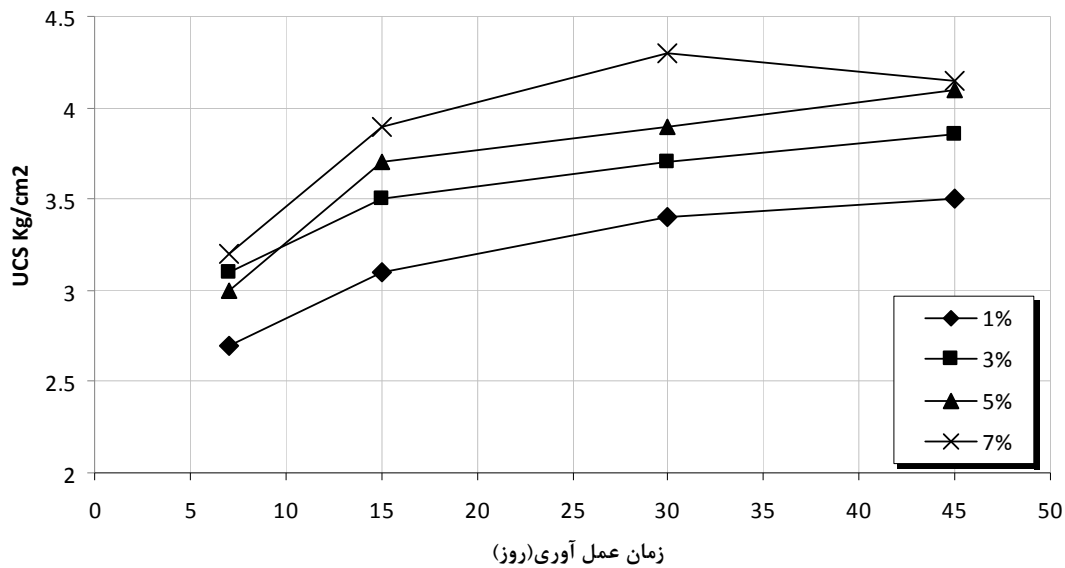
تصویر ۶- تأثیر زمان عمل آوری و درصد آهک بر روی درصد رطوبت بهینه خاک های رس بهسازی شده با آهک.

ذرات خاک است که در نتیجه واکنش های پوزولانی صورت می گیرد. تصویر ۸ نیز تأثیر افزایش زمان عمل آوری نمونه های بهسازی شده خاک را بر مقاومت فشاری نامحصور خاک نشان می دهد که حاکی از افزایش تدریجی مقاومت خاک تا پایان دوره عمل آوری ۳۰ روزه می باشد. همانطور که ملاحظه می گردد، پس از ۳۰ روز، افزایش مقاومت نمونه ها چشم گیر نبوده و حتی در بعضی موارد روند کاهشی نیز داشته است.

بر روی این نمونه ها با زمان های عمل آوری مختلف، سه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین، به عنوان مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته شد (تصویر ۷ و ۸). همانطور که در تصویر ۷ نشان داده شده است، با افزایش درصد آهک به خاک رس مورد نظر، مقاومت فشاری نامحصور نمونه ها افزایش یافته است. هر چند در بعضی موارد این روند افزایش نقض شده است اما بطور کلی، افزایش درصد آهک باعث افزایش خصوصیات مقاومتی این خاک ها شده است. در واقع افزایش در مقاومت نمونه ها با افزودن آهک، ناشی از سیمان شدگی



تصویر ۷- تأثیر درصدهای مختلف آهک بر روی مقاومت فشاری تک محوره در خاک های مورد مطالعه.



تصویر ۸- تأثیر زمان عمل آوری بر روی مقاومت فشاری تک محوره خاک‌رس بهسازی شده با آهک.

۴- تجزیه و تحلیل استاتیکی

گیری شده و مقادیر پیش بینی شده با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ بدست آمده که به ترتیب برای مقاومت فشاری محصور نشده، حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه نمونه های خاک بهسازی شده با آهک، معادل ۰/۸۷، ۰/۷۲ و ۰/۷۵ می باشد. تصاویر ۹، ۱۱ و ۱۳ ضرایب رگرسیون بین مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط را نشان می دهند. همچنین تصاویر ۱۰، ۱۲ و ۱۴ اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط را نشان می دهند. روابط ۱، ۲ و ۳ می‌توانند به عنوان یک روش سریع و مفید در شناسایی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک های ریزدانه رسی بهسازی شده با آهک، مورد استفاده قرار گیرند.

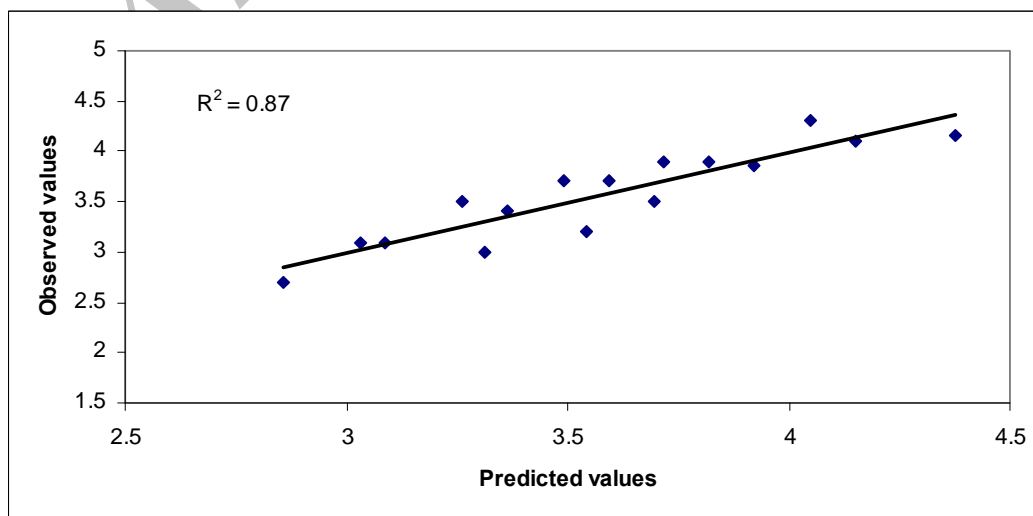
به منظور بدست آوردن روابط مناسب بین ویژگی های ژئوتکنیکی (مقاومت فشاری محصور نشده، حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه) نمونه های خاک بهسازی شده با درصد های متفاوت آهک افزودنی (LC%) و زمان عمل آوری (t) نمونه ها، آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره با استفاده از نرم افزار SPSS Statistics انجام شده است. بر این اساس روابط زیر بدست آمده است:

رابطه (۱) $UCS = 0.114 LC(\%) + 0.022t(\text{Day}) + 2.59$

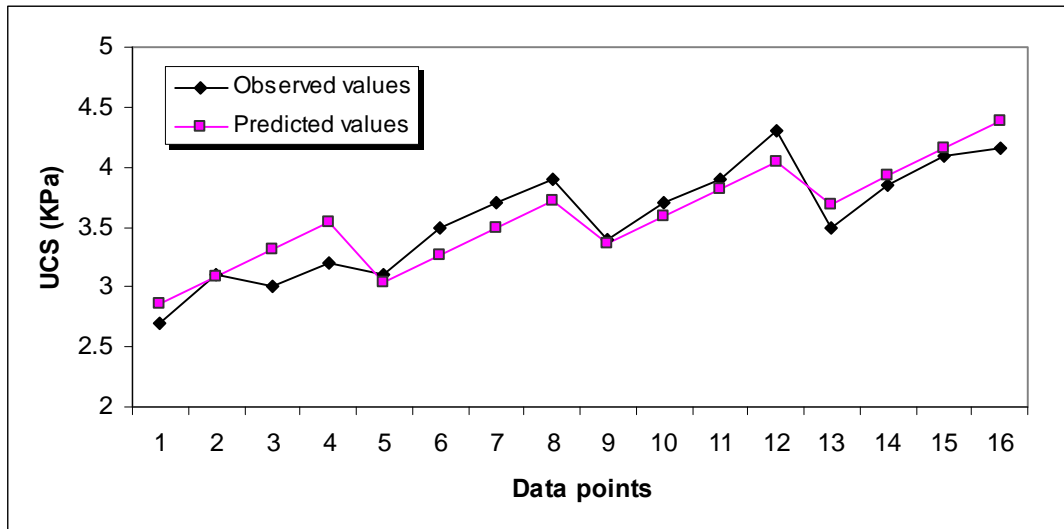
رابطه (۲) $\gamma_d = 1.908 - 0.045 LC(\%) - 0.003 t(\text{Day})$

رابطه (۳) $Wopt = 0.392 LC(\%) + 0.178 t(\text{Day}) + 10.6$

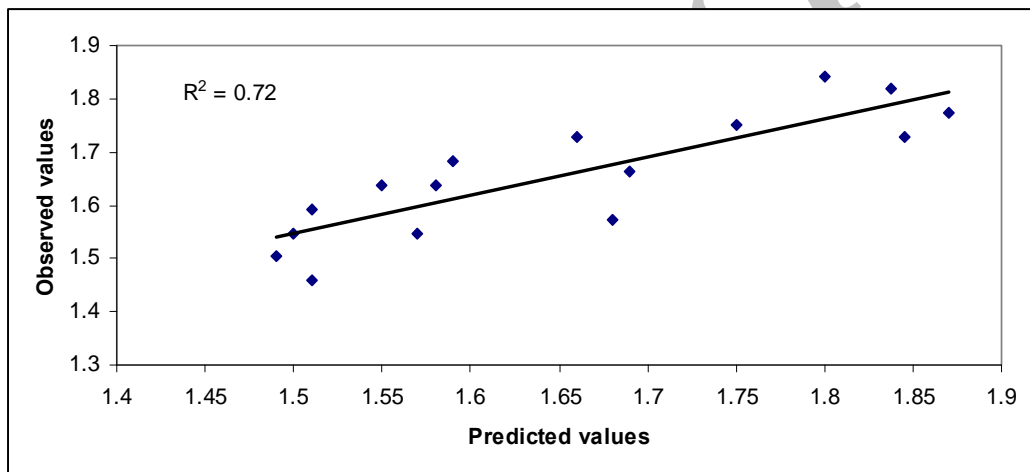
نتایج نشان می دهد که ضرایب رگرسیون (r) بالایی بین مقادیر اندازه



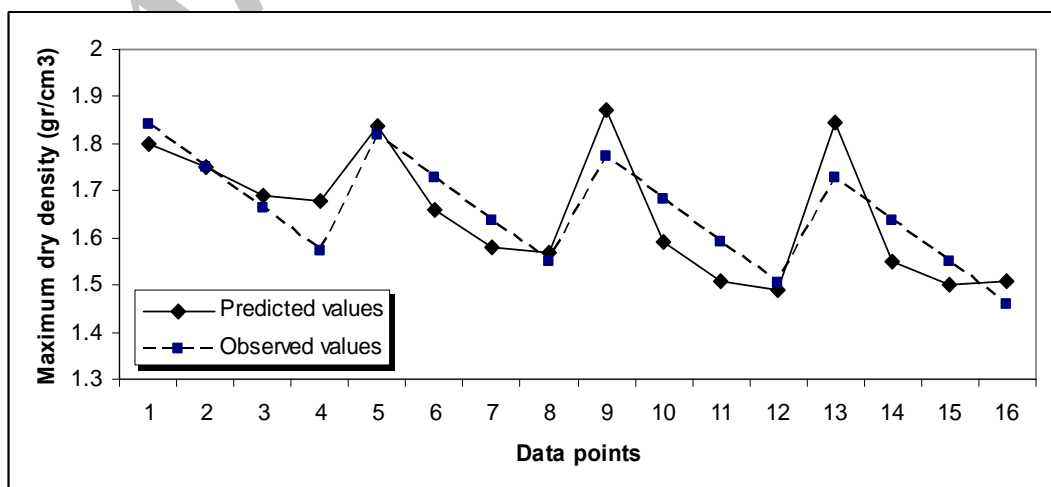
تصویر ۹- ارتباط بین مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.



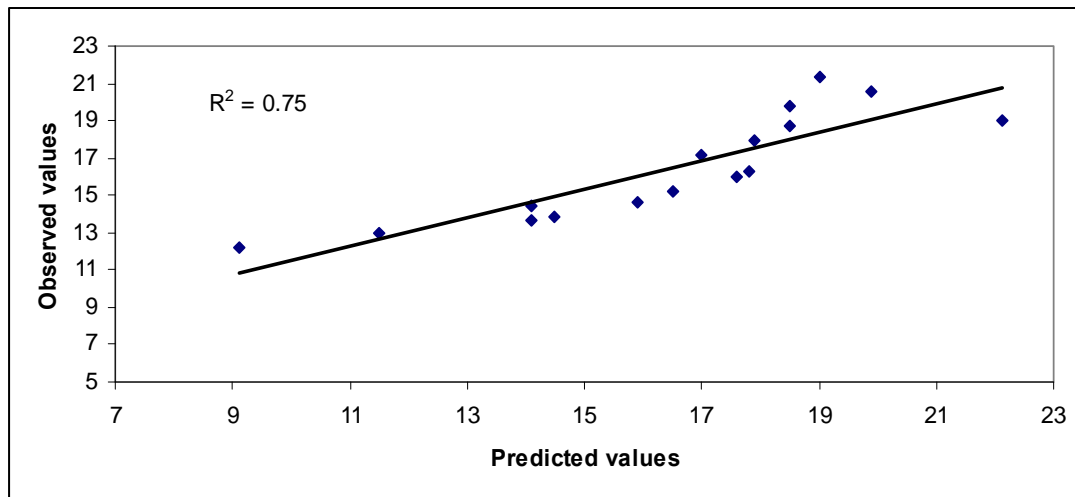
تصویر ۱۰- اختلاف بین مقادیر مقاومت فشاری (UCS) اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.



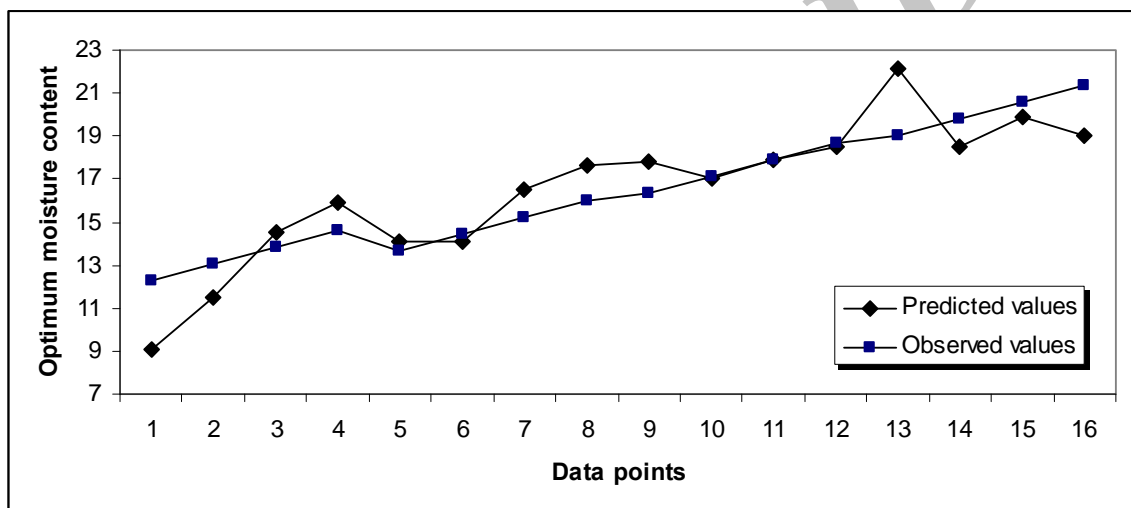
تصویر ۱۱- ارتباط بین مقادیر حداکثر دانسیته خشک اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.



تصویر ۱۲- اختلاف بین مقادیر حداکثر دانسیته خشک اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.



تصویر ۱۳- ارتباط بین درصد رطوبت بهینه اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.



تصویر ۱۴- اختلاف بین مقادیر رطوبت بهینه اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی.

۵- نتیجه‌گیری

افزودن درصد‌های مختلف آهک به خاک باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر می‌شود. مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه طی زمان عمل‌آوری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد که این تغییرات در روزهای اول با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان سرعت تغییرات کاهش می‌یابد.

درصد آهک روی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با آهک تأثیر گذار است. به این معنا که افزودن آهک، باعث افزایش مقاومت تک محوری خاک می‌گردد. مقاومت فشاری تک محوری بدون افزایش آهک ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بوده ولی با افزایش آهک به میزان ۷ درصد وزنی و در زمان عمل‌آوری ۳۰ روزه تا ۴/۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به واکنش‌های ایجاد شده بین

با توجه به خصوصیات فیزیکی و نتایج حاصل از آزمایش پراش اشعه ایکس خاک مورد مطالعه خصوصیات خمیری پایینی دارد و مطابق با طبقه‌بندی یونیفاید در رده CL قرار می‌گیرد. با افزودن آهک به خاک و پس از گذشت ۷ روز، به علت پیشرفت واکنش‌های شیمیایی بین آهک و کانی‌های خاک خاصیت خمیری خود را از دست می‌دهد. خاک مخلوط شده با ۱٪ آهک دارای PI برابر ۶ و خاک‌های مخلوط شده با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به خاکی غیر خمیری (NP) تبدیل می‌شود. آزمایش دانه بندی نشان می‌دهد که با افزایش آهک و زمان عمل‌آوری درصد ذرات ریزدانه خاک کاهش یافته و ذرات ماسه ای آن افزایش می‌یابد که این امر با غیر خمیری شدن خاک همخوانی دارد.

- Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F. & Meritt, A., 2002, "Cementation of porous materials using calcite", *Géotechnique*, Vol. 52 (5): 313–324.
- Lin, D. & Lin, K. & Huang, M. & Luo, H. 2007, "Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil", *Journal of Hazardous Material*, Vol. 145 (1-2): 58-64.
- Mallela, J. & Von Quintus, H. & Smith, K. L., 2004, "Consideration of lime- stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", *The National Lime Association, Arlington, Virginia 22203*, 36 pp.
- Rao, S. M. & Thyagaraj, T., 2003, "Lime study stabilization of an expansive soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 156 (3):139- 146.

خاک و آهک ارتباط داد که باعث تصویرگیری سیمان بین ذرات خاک شده و آنها را به هم می‌چسباند.

بر اساس آنالیز استاتیکی انجام شده روابطی با ضرایب رگرسیون بالا بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده بدست آمد. با توجه به قابلیت پیش‌بینی بالای این روابط و به منظور کاهش هزینه‌های بهسازی خاک، می‌توان از روابط ارائه شده برای تعیین درصد آهک و زمان عمل‌آوری بهینه استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از آقای مهندس منصور که در انجام آزمایشات XRD نویسندگان مقاله را یاری نموده‌اند قدر دانی می‌شود.

مراجع

- داودی، م. ه. و کبیر، ا.، ۱۳۸۹، "اندرکنش آهک و کلرید سدیم در خاک های ریزدانه با شاخص خمیری اندک"، فصلنامه زمین شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال ۶ (۳): ۲۰۳- ۱۹۵.
- عربانی، م. و ویس کرمی، م.، ۱۳۸۸، "تأثیر درصد رس و درصد آهک بر CBR ماسه‌های رس دار تثبیت شده با آهک"، نشریه عمران سال ۲۱، (۱): ۱-۱۱.
- کاووسی، ا. و هاشمیان، ل.، ۱۳۸۰، "بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک در فرودگاه پارس"، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس بهسازی زمین: ۱۸- ۳۰.
- Airey, D. W., 1993, "Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 107 (11): 1379-1398.
- Al-Rawas, A. A. & Goosen, M. F. A., 2006, "Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment", 1 edition, Taylor & Francis, 544 pp.
- Bell, F., 1996, "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, Vol. 42 (4): 223-237.
- Boardman, D. I., Glendinning, S. & Rogers C. D. F., 2001, "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes", *Géotechnique*, Vol. 51 (6): 533–543.
- Cernica, J. N., 1995, "Geotechnical engineering: soil mechanics", *John Wiley and Sons*, 453 pp.
- Gay, G. & Schad, H. 2000, "Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils", *Journal of Otto-Graf*, Vol. 11: 19-31.
- Harichane, K. & Ghrici, M. & Kenai, S. & Grine, K. 2011, "Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 29 (5): 759-769.
- Hicks, R. G., 2002, "Alaska soil stabilization design guide", *Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, Fairbanks, AK*, 64 pp.
- Ingles, O. G. & Metcalf, J. B., 1972, "Soil stabilization, Principles and Practice", *John Wiley & Sons*, 369 pp.