

## بررسی تأثیر چرخه‌های انجماد - آب شدن بر خاک‌های بهسازی شده با آهک زنده در منطقه فقیره، همدان

سید داود محمدی\*<sup>۱</sup>، آرزو آبرفت<sup>۲</sup>

دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۲۲ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۲۹

### چکیده

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر آهک بر روی خاک‌های باقیمانده محدوده جنوبی روستای فقیره در جنوب شهر همدان است. منطقه مورد مطالعه در دامنه کوه‌های الوند و کیوارستان در جنوب شهر همدان قرار دارد. توپوگرافی منطقه به صورت تپه‌ماهوری بوده و از واحدهای سنگی هوازده تشکیل شده است. به منظور بررسی اثر آهک بر خاک‌های مورد مطالعه، مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر، رطوبت بهینه، pH خاک و مقاومت فشاری تک محوری خاک‌های بهسازی شده با درصدهای مختلف آهک تعیین گردیدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش درصد آهک و دوره عمل‌آوری، باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر شده و همچنین خصوصیات مقاومتی خاک بهسازی شده را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل، درصد آهک بهینه ۵٪ و ۷٪ و زمان عمل‌آوری برای بهسازی خاک‌های منطقه فقیره همدان ۲۸ روز به دست آمده است. سپس تأثیر چرخه‌های انجماد - آب شدن به وسیله‌ی آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم، افت وزنی ناشی از یخبندان و تعیین تورم نمونه‌ها بررسی گردید. نتایج به دست آمده نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری تک محوری در چرخه‌های انجماد - آب شدن می‌باشد. در این راستا چسبندگی نمونه‌ها کاهش و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و همچنین افت وزنی و تورم ناشی از یخبندان نمونه‌های بهسازی شده کمتر از نمونه‌های خاک پایه است.

**کلید واژه‌ها:** چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک خاک، تورم، افت وزنی، دوره عمل‌آوری.

۱- عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان d.mohammadi@basu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

## ۱. مقدمه

با توجه به اهمیت خاک در اجرای پروژه‌های عمرانی از قبیل زیرسازی جاده‌ها، پوشش کانال‌های آبیاری و سازه‌های مرتبط با آن و غیره، بهسازی خاک جهت بهبود ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن مدت‌های طولانی مورد علاقه‌ی متخصصین مهندسی ژئوتکنیک بوده است (دریایی و کاشفی‌پور، ۱۳۹۰). امروزه تکنیک‌های مختلفی برای بهسازی خاک به منظور بهبود خواص مهندسی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر کدام دارای ویژگی‌های فنی و اقتصادی خود می‌باشند. در این میان، استفاده از آهک از دیرباز مورد توجه بوده است (گلچین‌فر، ۱۳۹۰ و Bell, 1996). افزودن آهک به خاک موجب بروز فعل و انفعالاتی می‌گردد که از جنبه‌های مهندسی ژئوتکنیک عملاً بهبود کیفیت و مشخصه‌های خاک را در پی خواهد داشت (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱). فرایندهایی که بر اثر ترکیب خاک و آهک در خاک‌ها رخ می‌دهد عبارت از فولکوله شدن، کاهش پلاستیسیته، کاهش در تغییر حجم، تغییر در بیشترین تراکم و رطوبت بهینه و تغییر در مقاومت و پارامترهای تغییرشکلی خاک می‌باشند (Yıldız and Sogancı, 2012). تأثیر مهم آهک بر خاک افزایش کارایی، کاهش تورم و انقباض خاک و همچنین افزایش مقاومت خاک، اعم از مقاومت‌های فشاری و کششی است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰ ب). در اثر افزودن آهک به خاک رده خاک بر اساس مقاومت فشاری تک محوری ارتقا پیدا می‌کند و مقدار مدول الاستیسیته آن نیز افزایش می‌یابد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰ الف). کارایی خاک‌های بهسازی شده با آهک با افزایش عمل هیدراتاسیون در طی زمان، افزایش یافته و این کارایی تا سال‌ها درون خاک باقی می‌ماند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

آب و هوای سرد و چرخه‌های انجماد-آب شدن، در مهندسی از موضوعات مهمی هستند. چرخه‌های انجماد-آب شدن، یعنی جایگیری آب و یخ که در موقعیت‌های ترمودینامیک در دمای زیر صفر درجه می‌توانند ایجاد شوند، ویژگی‌های مهندسی خاک‌ها را تغییر می‌دهند (Ghazavi and

(Roustaei, 2013). تورم ناشی از انجماد باعث افزایش حجم کل خاک و آب شدن یخ باعث افزایش تخلخل، افزایش درصد رطوبت و در نهایت کاهش مقاومت خاک می‌شود (مکارچیان و صیفوری، ۱۳۹۲).

زمانی که خاک و آهک با هم ترکیب می‌شوند و در معرض چرخه‌های انجماد-آب شدن قرار می‌گیرند، این چرخه‌ها باعث کاهش مقاومت فشاری شده و با افزایش زمان عمل‌آوری درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها کم شده و ذرات تمایل به جذب آب ندارند و مقاومت بیشتری در برابر انجماد و آب شدن از خود نشان می‌دهند. ذرات رس با آهک واکنش شیمیایی نشان می‌دهند و ترکیباتی با ساختمان بلورین ایجاد می‌کنند که فضا را اشغال نمی‌کنند، بلکه بین ذرات پیوند ایجاد می‌کنند که دیگر آب قادر به نفوذ نیست تا در بین ذرات خاک منجمد شود (گلچین فر، ۱۳۹۰). با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد - آب شدن مقاومت کاهش می‌یابد (گلچین فر و عباسی، ۱۳۹۲).

بیلدیز و سوگانسی (Yıldız and Sogancı, 2012)، تأثیر چرخه‌های انجماد - آب شدن را در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های فشرده خاک و آهک بررسی کرده‌اند. این مطالعه کم شدن مقاومت فشاری تک محوری را به وسیله‌ی چرخه‌های انجماد - آب شدن تأیید کرده است (Bell, 1996).

هوتینو و همکاران (Hotineanu et al, 2015)، اثر چرخه‌های انجماد - آب شدن را بر روی رس‌های متورم شونده بهسازی شده بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری با افزودن آهک و افزایش زمان عمل‌آوری به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و با قرارگیری در چرخه‌های انجماد - آب شدن مقاومت کاهش می‌یابد. همچنین چرخه‌های انجماد - آب شدن باعث کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها می‌شود.

اسمعیلی‌فلک و همکاران (۱۳۹۶)، به بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های تنش و کرنش در خاک‌های ماسه‌ای منجمد متروی تبریز پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که کاهش دما

سیلیکات کلسیم و آلومینات ایجاد می‌کنند (Yıldız and Sogancı, 2012). در این واکنش‌ها مواد سیمانی شده بیشتری تولید می‌شود و مقاومت بلندمدت خاک بر این اساس قرار دارد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۱).

### ۳-۲. واکنش‌های کربنات‌سیون

در این واکنش آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث می‌شود که آهک به حالت غیر فعال سنگ آهک باز گردد. با توجه به زمان انجام واکنش‌ها در دراز مدت خواص مکانیکی مخلوط‌های رسی آهک‌دار بهبود می‌یابد (اسماعیل زاده شهری و سپاهی، ۱۳۸۲).

### ۳. چرخه‌های انجماد-آب شدن و مکانیسم آن

زمانی که خاک‌های ریزدانه تحت تأثیر دمای کمتر از صفر درجه باشد آب در خلل و فرج آن منجمد می‌شود. در طی انجماد حجم آب در حدود ۹٪ افزایش می‌یابد و این رویداد باعث ترک خوردن خاک می‌گردد (Yıldız and Sogancı, 2012). با انجماد آب عدسی‌های یخ تشکیل می‌شوند، این عدسی‌های یخ باعث بالا آمدن سطح زمین و تورم شده و این تورم باعث کاهش مقاومت یا ظرفیت باربری خاک می‌شود. تورم ناشی از یخبندان و افزایش رطوبت ناشی از ذوب یخ در مناطق سردسیر با سطح بالای آب زیرزمینی ارتباط دارد (گلچین فر، ۱۳۹۰).

زمانی که خاک و آهک با هم ترکیب می‌شوند و این ترکیب در معرض چرخه‌های انجماد قرار می‌گیرند، این چرخه‌ها باعث کاهش مقاومت فشاری شده و با افزایش زمان عمل‌آوری درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها کم شده و ذرات تمایل به جذب آب ندارند و مقاومت بیشتری در برابر انجماد و آب شدن از خود نشان می‌دهند. ذرات رس با آهک واکنش شیمیایی نشان می‌دهند و ترکیباتی با ساختمان بلورین ایجاد می‌کنند که این ترکیبات فضا را اشغال نمی‌کنند، بلکه بین ذرات پیوند ایجاد می‌کنند که دیگر آب قادر به نفوذ نیست تا در بین ذرات خاک منجمد شود (گلچین فر، ۱۳۹۰). با افزایش تعداد چرخه‌های انجماد - آب شدن مقاومت کاهش

مقاومت برشی و مدول الاستیسیته ماسه بد دانه‌بندی شده منجمد را افزایش می‌دهد و تنش‌های تسلیم در کرنش‌های بیشتری اتفاق می‌افتد.

شهر همدان دارای آب و هوای سرد کوهستانی است. به استناد گزارش‌های ایستگاه‌های سینوپتیک همدان-نورژه، حداکثر مطلق درجه حرارت هوا در همدان ۳۶/۸، و حداقل مطلق آن ۲۹/۶- و متوسط حرارت آن ۹/۶ درجه ی سانتی-گراد است. گرم‌ترین ماه‌های سال با حداکثر دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، تیر و مرداد است و سردترین ماه‌های سال، با میانگین دمای ۲۵/۴- درجه سانتی‌گراد، دی و بهمن است (ابری، ۱۳۹۲).

با توجه به قرارگیری شهر همدان در اقلیم سرد کوهستانی، به منظور بررسی تاثیر این اقلیم بر رفتار خاک‌های بهسازی شده منطقه فقیره، به طور کلی، ضمن تعیین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های مورد مطالعه به بررسی رفتار این خاک‌ها تحت تأثیر چرخه‌های انجماد-آب شدن پرداخته شده است. سپس این خاک‌ها با استفاده از آهک بهسازی شده و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و رفتار آنها بررسی شده است. در نهایت، خاک‌های بهسازی شده با آهک نیز تحت تاثیر چرخه‌های انجماد - آب شدن قرار گرفته و ویژگی‌های آنها در برابر چرخه‌های انجماد - آب شدن قبل و بعد از بهسازی مقایسه شده است.

### ۲. بهسازی خاک با آهک و مکانیسم آن

#### ۲-۱. واکنش‌های تبادل یونی

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 نشانه خمیری کمتر و مقاومت بیشتری است (قبادی و همکاران، ۱۳۹۱).

#### ۲-۲. واکنش‌های پوزولانی

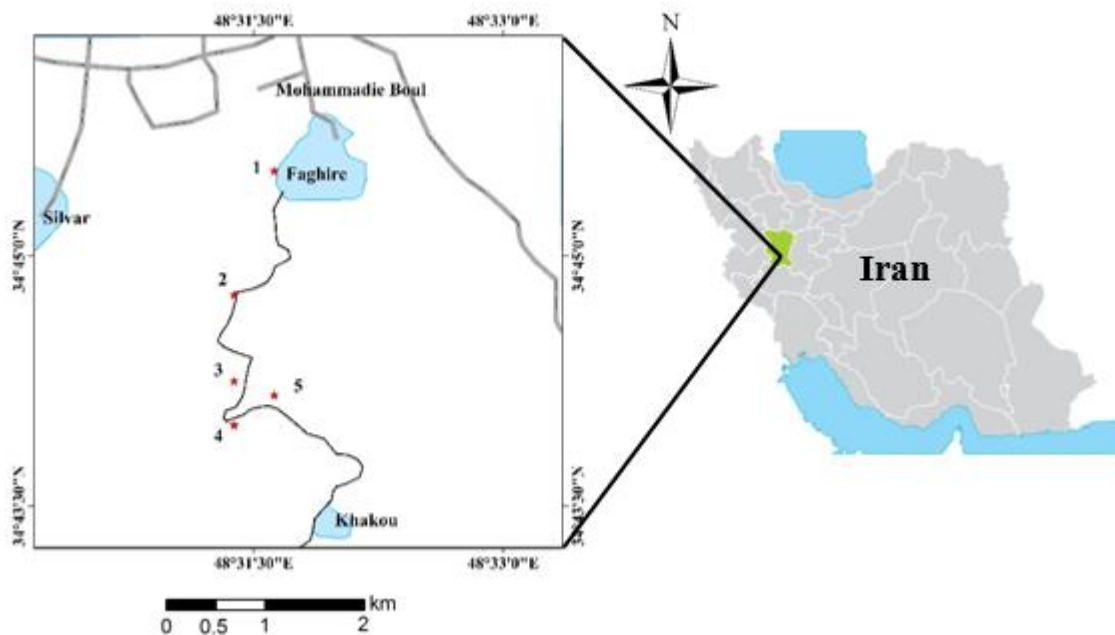
از واکنش‌های مهم دیگر در بهسازی خاک با آهک واکنش‌های پوزولانی است. با اضافه کردن آهک آلومنیوم و مواد سیلیسی موجود در رس با آهک واکنش می‌دهند و

تعیین درصد رطوبت، تعیین وزن مخصوص قسمت جامد، تراکم استاندارد، تعیین حدود آتبرگ، تعیین مقدار آهک نمونه (کلسیمتری)، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و برش مستقیم در شرایط CU در آزمایشگاه بر روی خاک پایه انجام شد و نمودار دانه بندی خاک های منطقه در شکل ۲ آمده است. همچنین ویژگی های خاک پایه مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ آمده است.

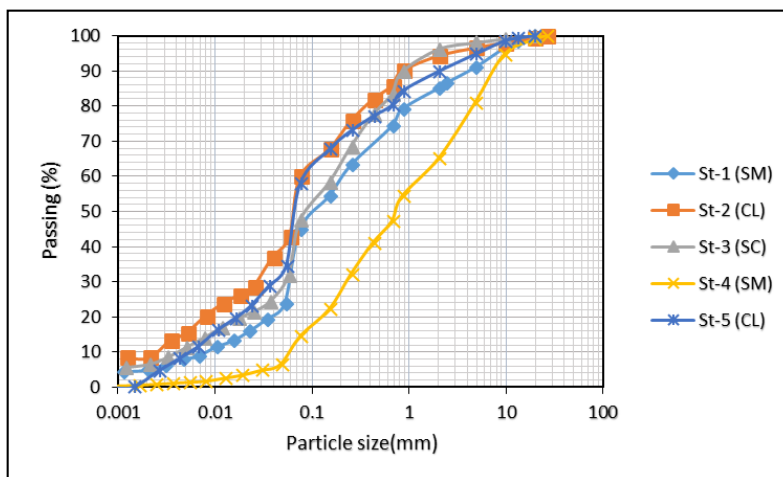
یافته و وقوع گسیختگی با شکستی تردتر صورت می گیرد (گلچین فر و عباسی، ۱۳۹۲).

#### ۴. مواد و روش ها

برای انجام این تحقیق ضمن مطالعه نقشه زمین شناسی منطقه، بازدید صحرائی انجام شده و نمونه گیری از خاک منطقه صورت گرفته است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری را نشان می دهد. آزمایش های مختلف از جمله



شکل ۱. منطقه و نقاط نمونه برداری



شکل ۲: نمودار دانه بندی خاک های مورد مطالعه

جدول ۱. خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مورد مطالعه

Properties	St 1	St 2	St 3	St 4	St 5	References
Water content (%)	2.22	2.44	2.09	1.64	1.83	ASTM D2216-90, 2000
Specific gravity	2.76	2.69	2.75	2.80	2.69	ASTM D85490, 2000
Plastic Limit (%)	-	17.19	13.08	-	16.65	ASTM D4318, 2000
Liquid Limit (%)	-	31.2	28.4	-	30	ASTM D4318, 2000
Liquid Index (%)	-	14	15.31	-	13.43	ASTM D4318, 2000
Soil Classification	SM	CL	SC	SM	CL	ASTM D422-63, 2000
Maximum dry unit weight (gr/cm <sup>3</sup> )	1.97	1.8	1.9	1.85	1.86	ASTM D698-78, 2000
Optimum water content (%)	11.6	16	14	12	16	ASTM D698-78, 2000
In situ density (gr/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.49	1.51	1.26	1.57	ASTM D1556-82, 2000
Lime content (%)	31.5	44.66	55.33	30.66	62.66	Haghighi Gafari., 1382
Uniaxial compressive strength (kPa)	108.85	165.32	118.33	25.77	117.94	ASTM D2166-06, 2000
Internal friction angle ( $\phi_u$ )	32.15	37.86	40.83	30.33	29.12	ASTM D3080-98, 2000
Cohesion, $C_u$ (kPa)	40	115	57.5	30	130	ASTM D3080-98, 2000

در کیسه نایلونی تا رسیدن به دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه نگهداری گردیدند. در ادامه هر نمونه با ۶ ساعت قرارگیری در یک فریزر با دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد و سپس ۶ ساعت قرارگیری در محیط با دمای ۲۰+ درجه سانتی‌گراد، چرخه‌های انجماد - آب شدن را طی کرده‌اند و سپس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

#### ۵. نتایج و بحث

##### ۵-۱. نتایج بهسازی خاک

##### ۵-۱-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

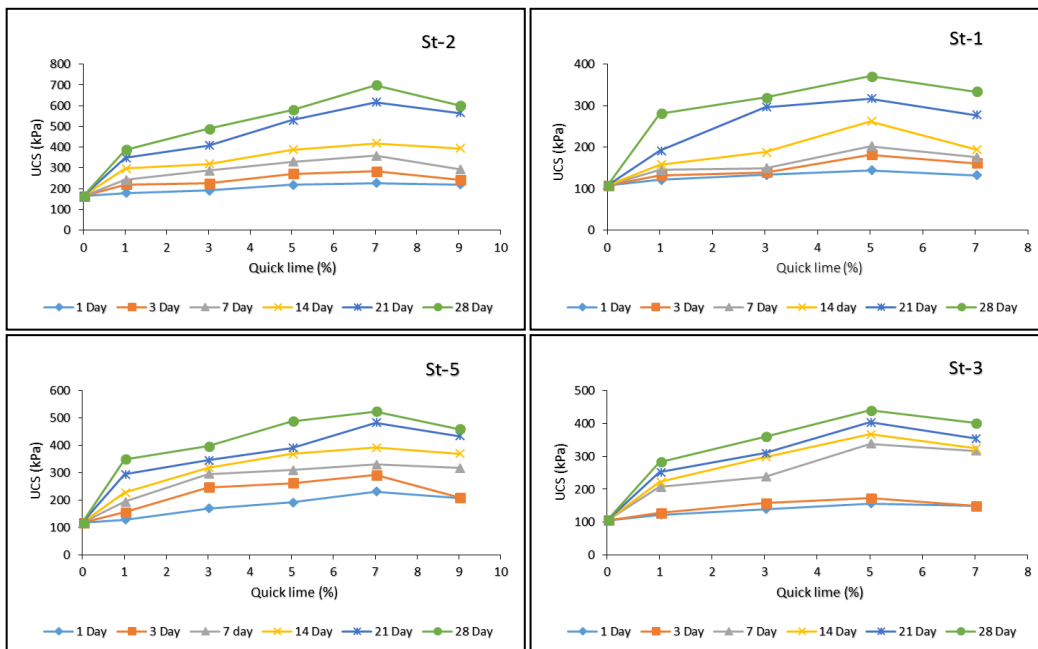
برای بررسی تغییرات مقاومت فشاری، آزمایش تک محوری روی نمونه‌های بهسازی شده و متراکم شده در وزن واحد

روش‌های کلی تعیین درصد آهک مناسب شامل روش pH، روش نشانه خمیری، روش آشتو، روش مقاومت فشاری تک محوری و روش استفاده از نسبت باربری کالیفرنایی است، که در این پژوهش از دو روش مقاومت فشاری و pH برای تعیین درصد آهک بهینه استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقامت فشاری و pH انجام شده برای ایستگاه‌های ۱ و ۳ میزان درصد آهک بهینه ۵٪ وزنی و برای ایستگاه‌های ۲ و ۵ میزان آهک بهینه ۷٪ اندازه‌گیری شده است و ایستگاه ۴ به دلیل عدم اختلاط با آهک از آزمایش‌ها حذف گردید.

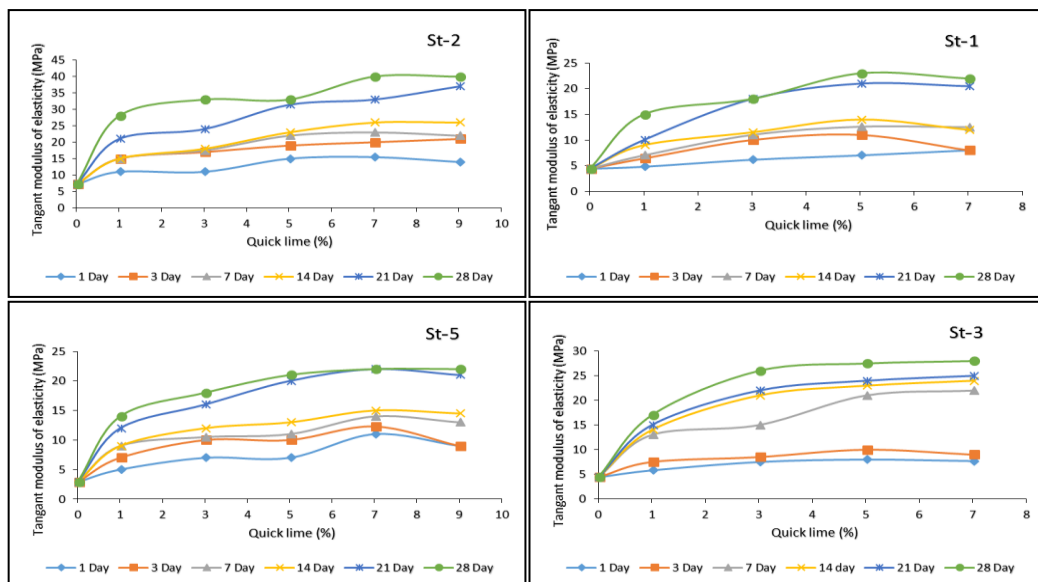
آزمایش‌های انجماد نیز بر روی ۴ ایستگاه ۱ و ۲ و ۳ و ۵ انجام شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده از خاک هر یک از ایستگاه‌ها

درصد های آهک متفاوت و در دوره های عمل آوری مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس این نمودارها مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک بهسازی شده با افزایش آهک به مقدار آهک بهینه و زمان عمل آوری بیشتر می شود که می توان آن را به پیشرفت واکنش های پوزولانی نسبت داد.

حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم انجام گرفته است. نمونه های بازسازی شده به صورت استوانه ای بوده و طول و قطر آنها به ترتیب ۸۷ میلیمتر و ۳۵ میلیمتر بوده است. روند تغییرات مقاومت نمونه های بهسازی شده در برابر درصد آهک برای ایستگاه های مورد مطالعه در شکل ۳ و تغییرات مدول الاستیسیته مماسی نمونه ها با



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بهسازی شده در برابر درصد آهک ایستگاه های مورد مطالعه



شکل ۴. تغییرات مدول الاستیسیته مماسی نمونه های بهسازی شده در برابر درصد آهک ایستگاه های مورد مطالعه

$$UCS = 121.8 + 16.41 L + 12.748 D \quad (4)$$

$$\omega (\%) = 17.833 + 0.4942 L + 0.17563 D \quad (5)$$

$$\gamma_d = 1.69587 - 0.014042 L - 0.002349 D \quad (6)$$

ایستگاه ۳

$$UCS = 99.6 + 15.14 L + 8.26 D \quad (7)$$

$$\omega (\%) = 16.412 + 0.4500 L + 0.16655 D \quad (8)$$

$$\gamma_d = 1.82684 - 0.01367 L - 0.002271 D \quad (9)$$

ایستگاه ۵

$$UCS = 129.0 + 14.80 L + 8.909 D \quad (10)$$

$$\omega (\%) = 18.338 + 0.3475 L + 0.16441 D \quad (11)$$

$$\gamma_d = 1.83143 - 0.011225 L - 0.002619 D \quad (12)$$

نتایج نشان می‌دهد که ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بالایی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت فشاری تک محوری، وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه برقرار است. شکل ۵، ۷ و ۹ ضرایب تعیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶، ۸ و ۱۰ اختلاف بین مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط را نشان می‌دهد.

به منظور بدست آوردن روابط مناسب برای مقاومت فشاری محصور نشده نمونه های خاک بهسازی شده با درصد های متفاوت آهک ( $L\%$ ) و زمان عمل آوری ( $D$ ) رگرسیون خطی چند متغیره با استفاده از نرم افزار Minitab17.0 انجام شده است. بر این اساس روابط زیر بدست آمده است. در این روابط ( $UCS$ ) مقاومت فشاری تک محوری بر حسب ( $kPa$ )،  $\omega$  مقدار رطوبت بهینه و  $\gamma_d$  مقدار وزن واحد خشک حداکثر بر حسب  $gr/cm^3$  می‌باشد. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده برای کلیه ایستگاه های مورد مطالعه برای دوره عمل آوری حداکثر تا ۲۸ روز معتبر بوده و در خصوص درصد آهک، باید مقادیر آهک بهینه را برای هر ایستگاه در نظر داشت. در این راستا، روابط ارائه شده برای ایستگاه های ۱ و ۳ برای محدوده مقادیر آهک بهینه، حداکثر تا ۵ درصد و برای ایستگاه های ۲ و ۵ برای محدوده مقادیر آهک بهینه حداکثر تا ۷ درصد معتبر می باشد.

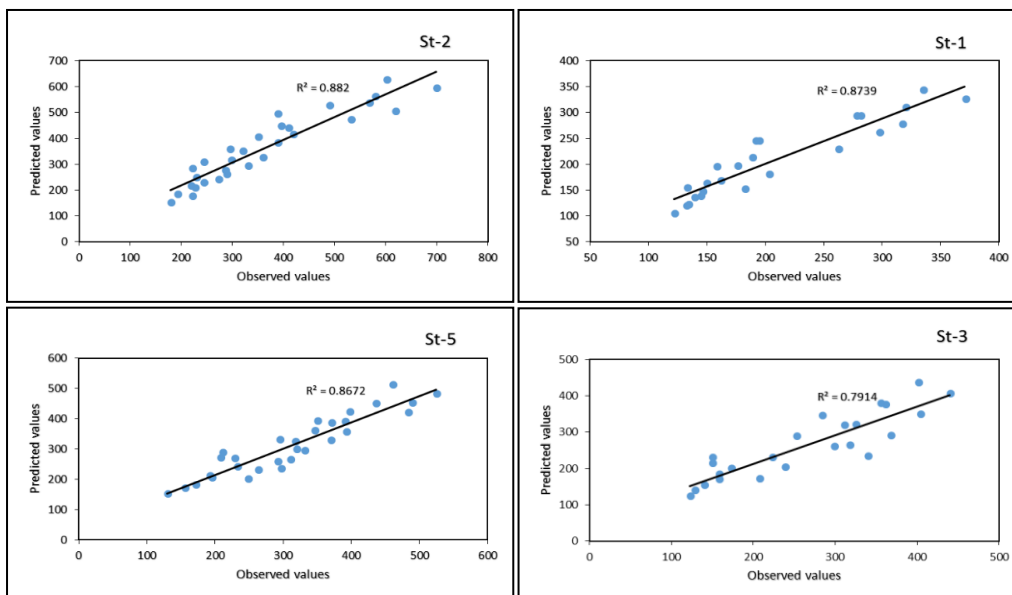
ایستگاه ۱

$$UCS = 89.79 + 8.25 L + 6.973 D \quad (1)$$

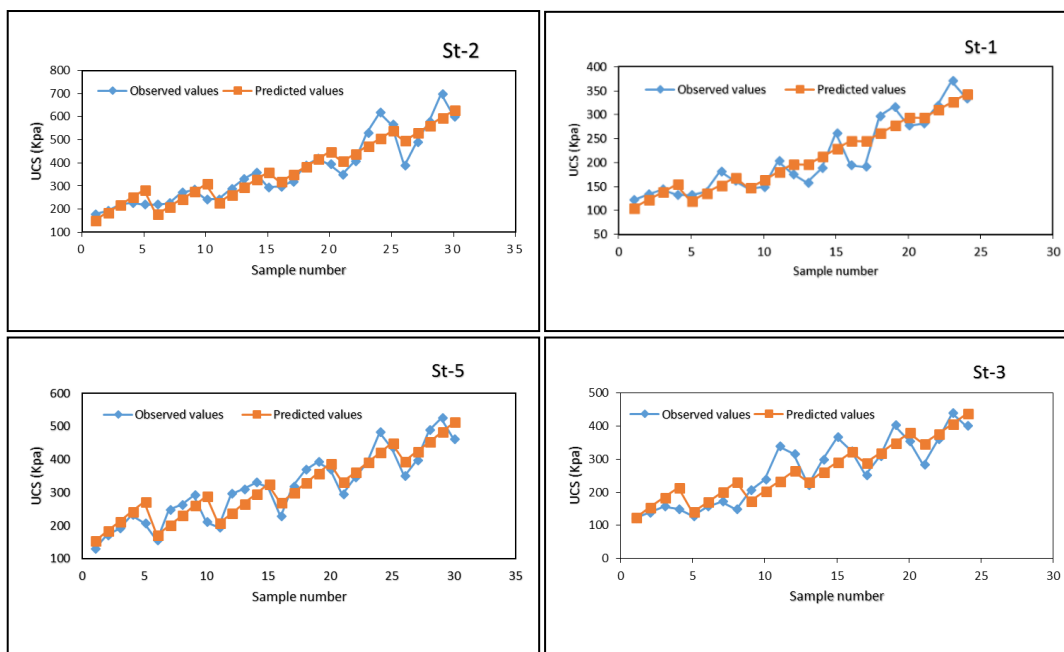
$$\omega (\%) = 13.675 + 0.4442 L + 0.14683 D \quad (2)$$

$$\gamma_d = 1.89870 - 0.01442 L - 0.003922 D \quad (3)$$

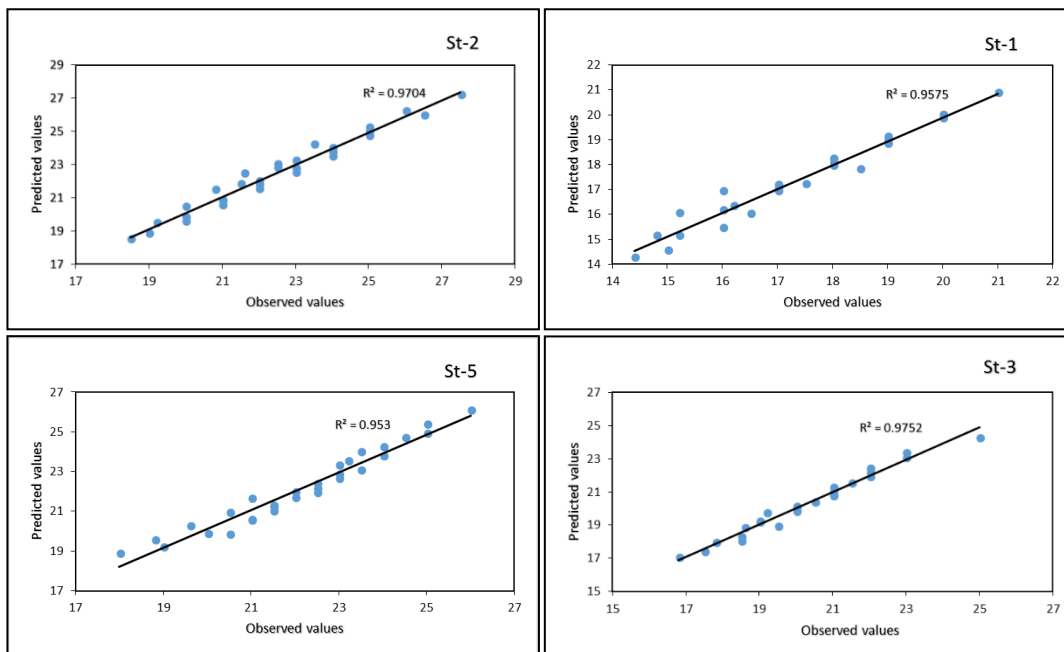
ایستگاه ۲



شکل ۵. ارتباط بین مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده ( $UCS$ ) اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

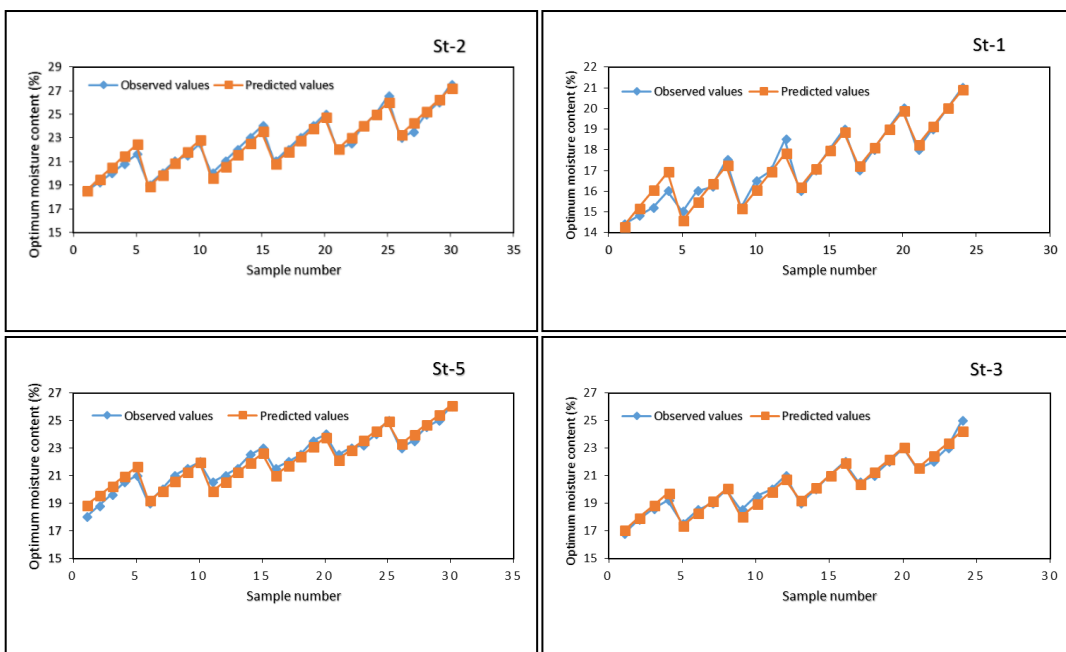


شکل ۶. اختلاف مقادیر مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده (UCS) اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

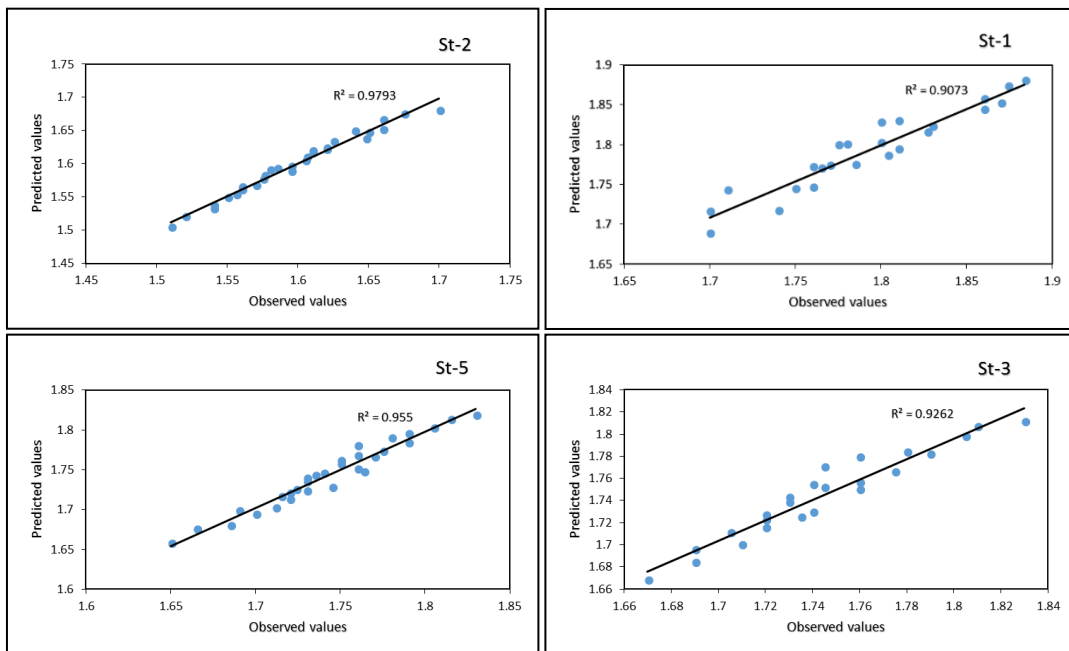


شکل ۷. ارتباط بین مقادیر رطوبت بهینه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

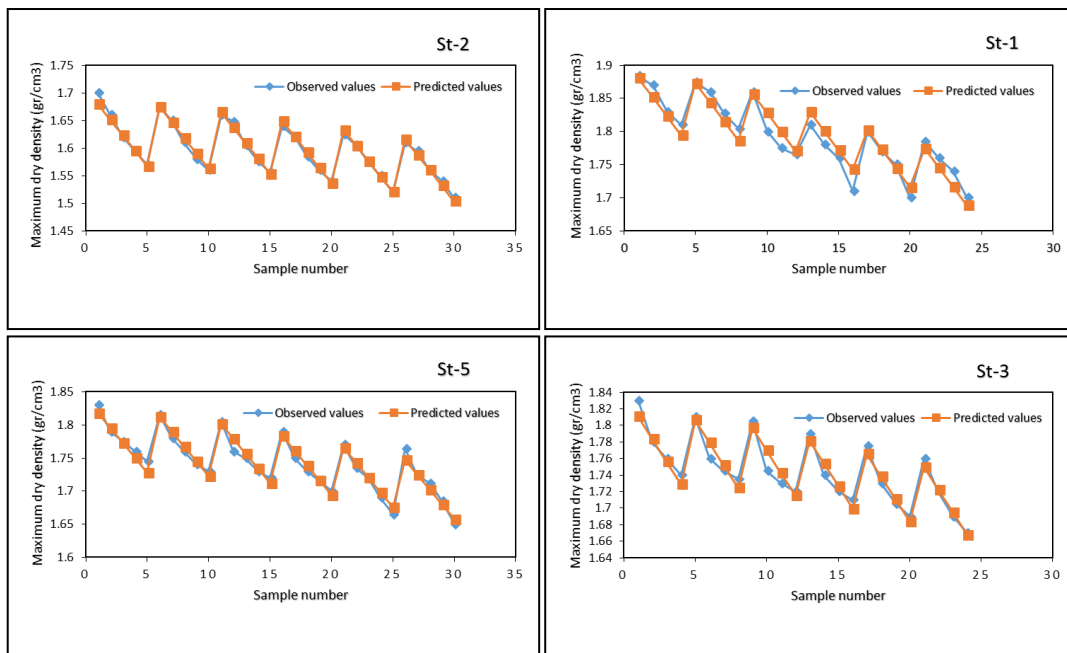




شکل ۸. اختلاف بین مقادیر رطوبت بهینه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی



شکل ۹. ارتباط بین مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

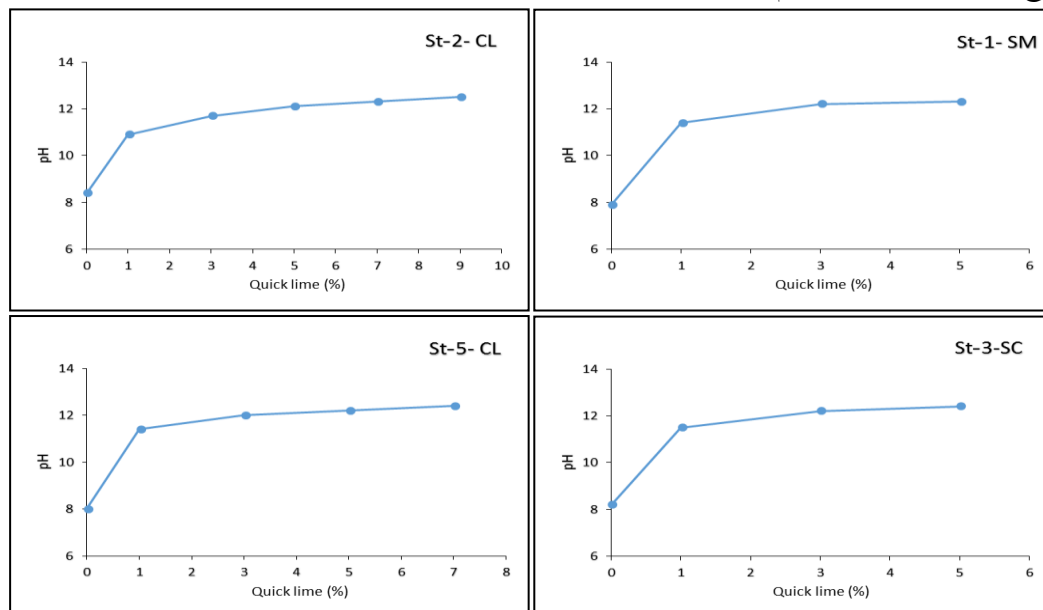


شکل ۱۰. اختلاف بین مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

به نمونه داده می‌شود. با استفاده از دستگاه pH متر مقدار pH عصاره‌های به دست آمده اندازه‌گیری می‌شود. مقدار آهک بهینه در این روش مقدار آهکی است که در آن pH عصاره ۱۲/۴ باشد. نتایج تعیین pH نمونه‌ها در شکل ۱۱ ارائه شده است.

#### ۲-۱-۵. آزمایش pH

پس از ترکیب آهک با خاک آزمایش تعیین pH بر روی عصاره حاصل از نمونه‌ها انجام گرفته‌است. در این روش برای تهیه عصاره، از مخلوط خاک و آهک نمونه ای با رطوبت اشباع تهیه می‌شود و زمان لازم برای جذب کامل آب



شکل ۱۱. نتایج تعیین pH نمونه‌های مورد مطالعه

## ۵-۲. نتایج آزمایش‌های انجماد - آب شدن

## ۵-۲-۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

در ارزیابی تغییرات مقاومت فشاری خاک بهسازی شده با آهک طی آزمایش‌های انجماد-آب شدن، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه انجام شده است. نمونه‌های مورد آزمایش دارای قطر ۳۵ میلیمتر و ارتفاع ۸۷ میلیمتر می‌باشند که نمونه‌های خاک پایه پس از آماده سازی و نمونه‌های بهسازی شده پس از طی دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه در چرخه‌های انجماد - آب شدن قرار گرفته‌اند. شکل ۱۲ روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده را در برابر چرخه‌های انجماد - آب شدن نشان می‌دهد.

بر اساس این آزمایش با قرارگیری نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش مقاومت در چرخه اول کاملاً مشهود است و سپس مقاومت افزایش یافته که می‌توان علت آن را بازبازی مقداری از مقاومت نمونه بعد از ذوب در چند چرخه ابتدایی در نظر گرفت، اما به طور کلی مقدار آن از مقاومت خاکی که چرخه‌های انجماد - آب شدن را تحمل نکرده، کمتر است و در نهایت مقاومت مجدداً افت می‌کند که این افت مقاومت می‌تواند ناشی از ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها باشد.

در مطالعات سایر محققین بیلدیز و سوگانسی (۲۰۱۲) (Yildiz and Sogancı, 2012)؛ گلچین فر و عباسی، (۱۳۹۲)؛ هوتیننو و همکاران (۲۰۱۵) (Hotineanu et al, 2015) و لی و همکاران (۲۰۱۳) (Li et al, 2013) این پارامتر از همان چرخه اول انجماد - آب شدن روند کاهشی را نشان می‌دهد که با نتایج این تحقیق متفاوت بوده است.

از دلایل دیگر کاهش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده می‌توان به عوامل زیر اشاره کرد که توسط محققان دیگر نیز تایید شده است:

کاهش مقاومت بعد از چرخه‌های انجماد - آب شدن می‌تواند ناشی از چسبندگی ضعیف بین ذرات باشد زیرا با قرارگیری

نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن چسبندگی ذرات کاهش می‌یابد. این موضوع با نتایج به دست آمده توسط گلچین فر و عباسی، (۱۳۹۲) همخوانی دارد. همچنین کاهش مقاومت خاک به زمان انجماد برمی‌گردد که ذرات نسبتاً متصل هستند و با شکل‌گیری یخ، بین ذرات نمونه جدایی ایجاد می‌شود. این موضوع با نتایج به دست آمده توسط هوتیننو و همکاران (۲۰۱۵) (Hotineanu et al, 2015) همخوانی دارد.

بر اساس زمان عمل‌آوری تأثیر چرخه‌های انجماد - آب شدن متفاوت است. این رفتار در خاک بهسازی شده می‌تواند به ادامه واکنش‌های بین خاک و آهک نسبت داده شود، که واکنش‌های اولیه کامل شوند (Hotineanu et al, 2015).

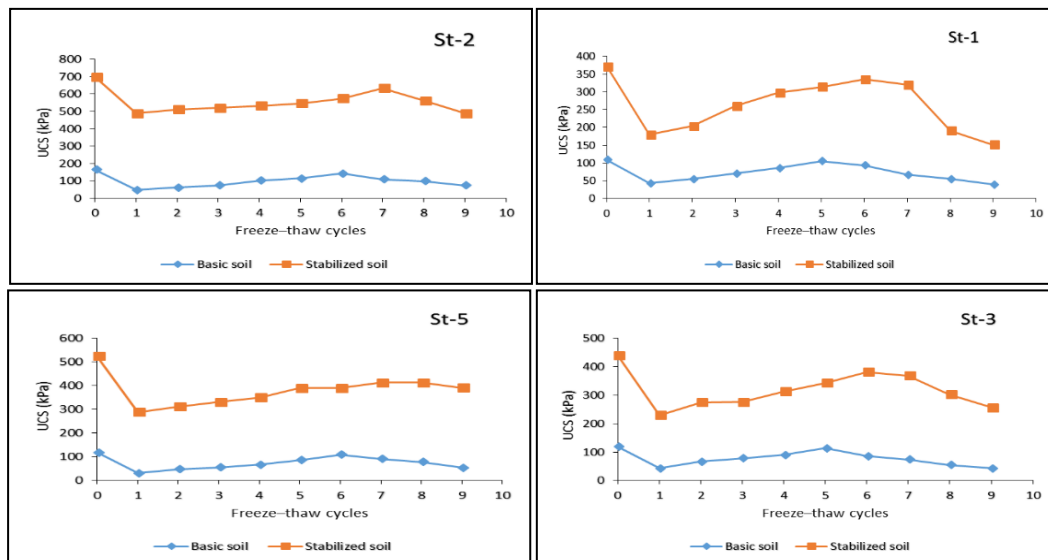
کاهش مقاومت نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن به دلیل شکل‌گیری یخ در حجم خاک است که حجم آن ۹٪ در اثر انجماد افزایش می‌یابد. سپس درصد رطوبت نمونه در نتیجه ذوب نمونه زیاد می‌شود (Gullu, 2015).

از ویژگی‌های یخ این است که فاز جامد آن ضریب شکست کمتری نسبت به فاز مایع دارد، همچنان که این ویژگی در مورد دانسیته هم صادق است. زمانی که یخ در بین ذرات نمونه وجود دارد نیروهای واندروالسی بین جامدها به صورت رانشی خواهد بود. که مقدار این رانش، آنقدر زیاد است که فشار مورد نیاز جهت هل دادن یخ برای تماس با دیواره‌ی منفذ از مقاومت نمونه تجاوز خواهد نمود و باعث ایجاد ترک در نمونه می‌شود. این فرایند در نمونه‌های مورد مطالعه به خوبی مشاهده شده و با نتایج به دست آمده توسط بحری (۱۳۸۹) همخوانی دارد.

همچنین از دلایل افزایش مقاومت پس از چرخه‌های ابتدایی انجماد - آب شدن می‌توان بیان نمود که با انجماد خاک، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک، افزایش می‌یابد، اما با شروع مرحله ذوب، مقاومت فشاری نمونه‌ها به تدریج کم می‌شود تا زمانی که لنزهای یخ موجود در خاک به طور کامل ذوب شوند. پس از این مرحله مقاومت نمونه‌ها رو به افزایش می‌گذارد، هرچند که میزان افزایش مقاومت آنها، کمتر از نمونه‌های بدون انجماد (معمولی) خواهد بود. این

نتایج، با نتایج به دست آمده توسط کاظمی و همکاران

(۱۳۹۱)، همخوانی خوبی نشان می دهد.



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده در برابر چرخه‌های انجماد - آب شدن

## ۲-۵. نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم در شرایط تحکیم یافته - زهکشی نشده (CU) بر روی نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، بعد از یک چرخه انجماد - آب شدن و همین‌طور بعد از ۹ چرخه انجماد - آب شدن انجام گرفته است. به طوری که نمونه‌های خاک پایه پس از آماده‌سازی و نمونه‌های بهسازی شده پس از طی دوره عمل‌آوری در چرخه انجماد - آب شدن قرار گرفتند. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودار مقایسه مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های مطالعه شده را در چرخه‌های انجماد - آب شدن نشان می‌دهند.

با توجه به نمونه‌های آزمایش شده، مقدار پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن با کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی تغییر می‌کند، که این نتایج با پژوهش‌های هوتینو و همکاران (۲۰۱۵) و (Hotineanu et al, 2015) و لی و همکاران (۲۰۱۳) (Li et al, 2013) مطابقت دارد.

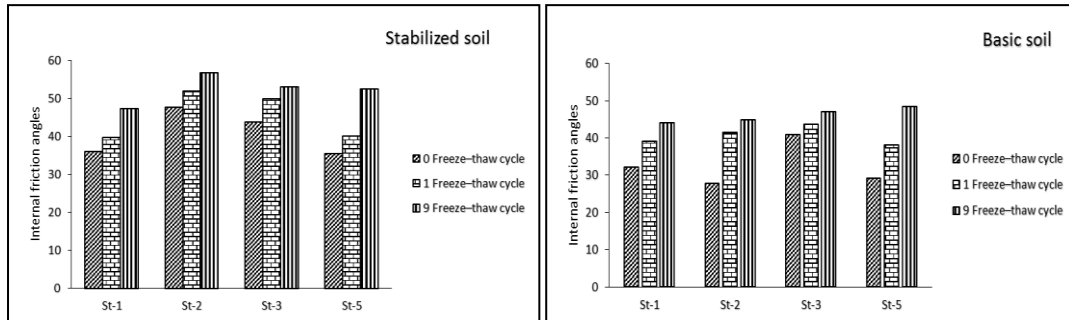
علت تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در آزمایش‌های برش مستقیم را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

یکی از فرایندهایی که بر اثر ترکیب خاک و آهک در خاک‌ها رخ می‌دهد، فولکوله شدن ساختار خاک می‌باشد. پدیده فولکوله شدن باعث افزایش پیوند بین ذرات خاک می‌گردد. در دمای انجماد، درون منافذ نمونه‌های خاک یخ تشکیل شده و تنش دمایی ناشی از تبدیل آب به یخ، باعث ایجاد نیروی زیادی به ذرات خاک می‌شود. اگر این تنش دمایی و نیروی ناشی از یخ از نیروی بین ذرات خاک تجاوز نماید، ساختار خاک ضعیف می‌شود. در زمان ذوب، آب به منافذ خاک نفوذ می‌کند و با ادامه چرخه‌های انجماد - آب شدن، نمونه آسیب می‌بیند و بنابراین چسبندگی خاک کاهش می‌یابد. این موضوع با نتایج به دست آمده توسط لی و همکاران (۲۰۱۳) (Li et al, 2013) همخوانی خوبی نشان می‌دهد.

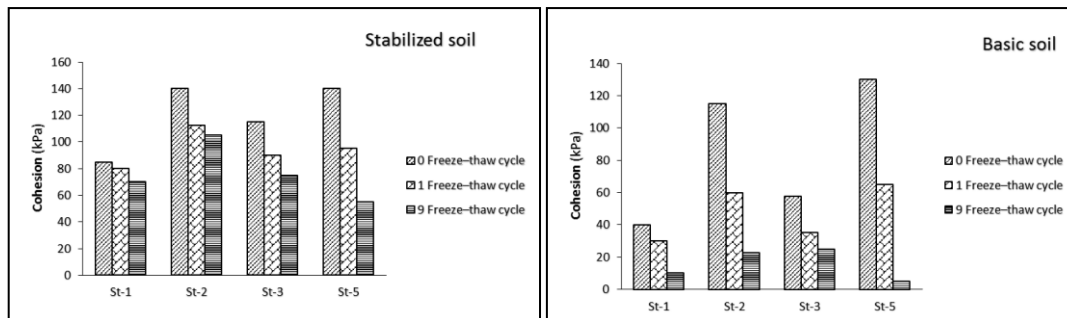
همچنین در چرخه‌های انجماد - آب شدن بر اثر تنش دمایی و نیروی تورمی حاصل از انجماد، ساختار خاک آسیب می‌بیند که باعث شکسته شدن ساختار خاک شده و تعداد ذرات درگیر و اصطکاکی در خاک افزایش می‌یابد. بنابراین باعث

همخوانی خوبی نشان می‌دهد.

افزایش اصطکاک داخلی خاک می‌گردد. این موضوع با نتایج به دست آمده توسط لی و همکاران (۲۰۱۳) (Li et al, 2013)



شکل ۱۳. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده در چرخه‌های انجماد - آب شدن



شکل ۱۴. مقادیر چسبندگی نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده در چرخه‌های انجماد - آب شدن

کاهش تورم و انقباض خاک است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰ الف؛ مکارچیان و صیفوری، ۱۳۹۲؛ خطیبی و همکاران، ۱۳۹۴).

علت اصلی کاهش تورم خاک بهسازی شده را اینگونه می‌توان بیان نمود:

در مرحله فولکوله شدن یکسری واکنش شیمیایی بین آهک و رس به وجود می‌آید که طی آن ذرات ریز خاک به یکدیگر چسبیده و ذرات درشت‌تری را به وجود می‌آورند که به موجب آن سطح ویژه ذرات کاهش و در نتیجه قدرت جذب آب به وسیله ذرات و قدرت تورمی خاک کاهش می‌یابد (خطیبی و همکاران، ۱۳۹۴).

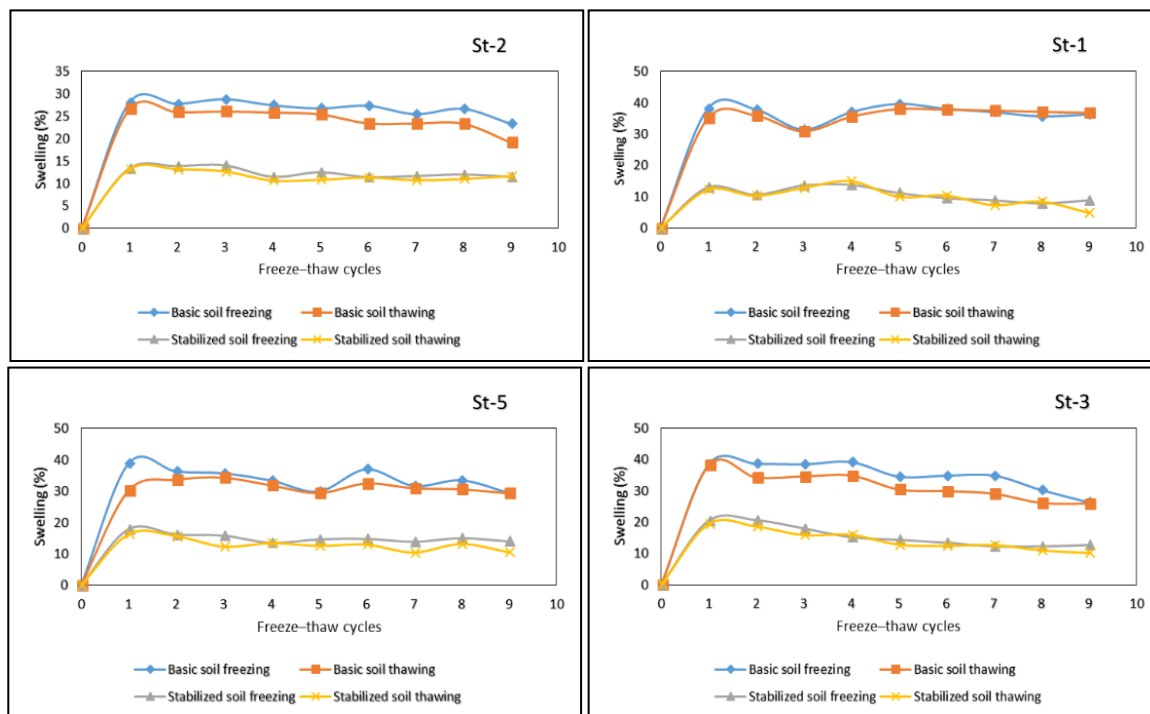
با قرارگیری نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن حجم نمونه‌ها افزایش می‌یابد. زمانی که نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن قرار می‌گیرند، تمایل به رشد منافذ و تغییر

۳-۲-۵. نتایج آزمایش تعیین تورم آزاد ناشی از چرخه‌های انجماد - آب شدن

به منظور بررسی میزان تورم آزاد ناشی از یخبندان، نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه، با توجه به وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم در قالب کوبیده و آماده شدند. نمونه‌های خاک پایه پس از آماده‌سازی و نمونه‌های بهسازی شده بعد از طی ۲۸ روز دوره عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۱۵ نمودارهای تغییرات میزان تورم آزاد در نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه در چرخه‌های مختلف انجماد - آب شدن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تورم آزاد خاک بهسازی شده در چرخه‌های انجماد - آب شدن، کمتر از خاک پایه است. تاثیر مهم آهک بر خاک افزایش کارایی،

باعث کاهش تورم نمونه‌های بهسازی شده می‌شود (هاشمی طباطبایی و سلامت، ۱۳۸۷).

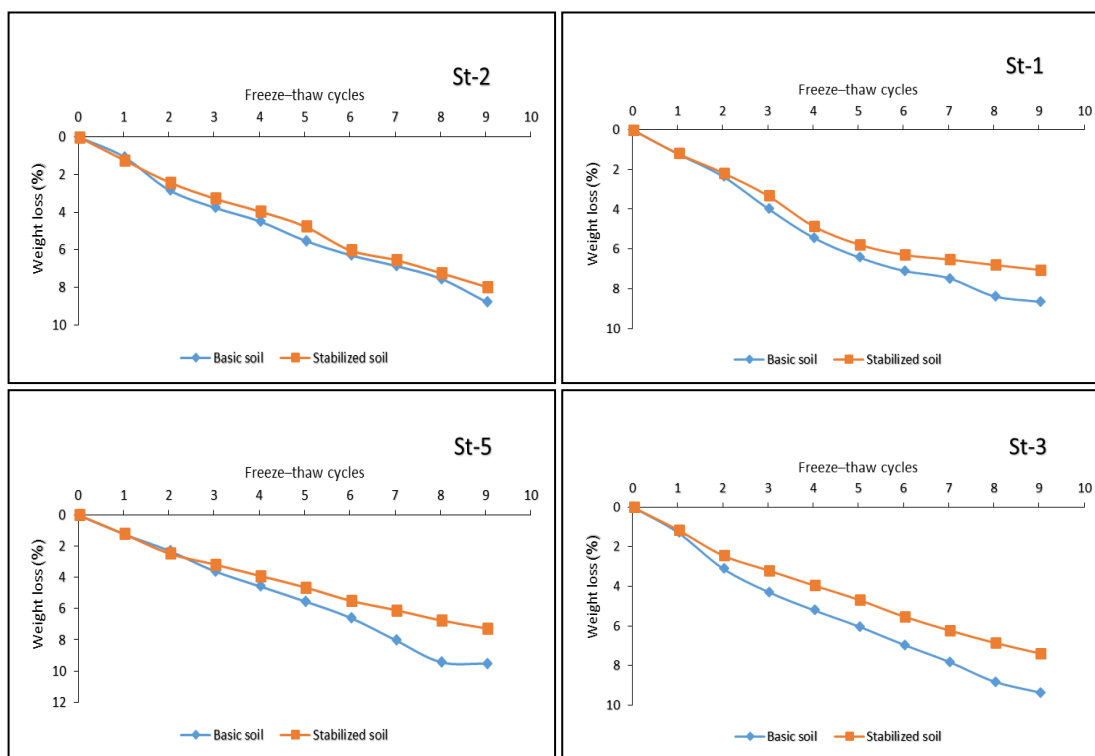
اندازه آنها، نقش مهمی در تغییر حجم ایفا می‌کنند. این در حالی است که نمونه‌های بهسازی شده در دوره عمل‌آوری طولانی تغییر حجم کمتری دارند (Hotineanu et al, 2015). با افزودن درصد آهک بهینه به خاک‌ها میزان رطوبت نمونه‌ها به علت واکنش‌های میان خاک و آهک کم می‌شود و این



شکل ۱۵. نمودارهای تغییرات میزان تورم آزاد در نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه در چرخه‌های مختلف انجماد - آب شدن

هر چرخه آب شدن اندازه‌گیری شده و افت وزنی نمونه‌ها محاسبه شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که نمودارها نشان می‌دهند، مقدار افت وزنی نمونه‌های مغزه بهسازی شده از نمونه‌های خاک پایه کمتر است که نشان دهنده تأثیر مطلوب بهسازی بر روی مقاومت خاک می‌باشد.

۴-۲-۵. نتایج آزمایش افت وزنی ناشی از انجماد - آب شدن اندازه‌گیری افت وزنی ناشی از انجماد - آب شدن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳۵ میلیمتر و ارتفاع ۸۷ میلیمتر و ساخته شده از خاک پایه و خاک بهسازی شده با درصد آهک بهینه بعد از طی زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه انجام شده است. در این راستا وزن نمونه‌ها بعد از هر چرخه انجماد و بعد از



شکل ۱۶. نتایج افت وزنی نمونه‌های خاک پایه و خاک بهسازی شده در چرخه‌های انجماد - آب شدن

## ۶. نتیجه گیری

بازیابی مقداری از مقاومت نمونه بعد از ذوب در چند چرخه ابتدایی در نظر گرفت. در نهایت مقاومت مجدداً افت می‌کند که این افت مقاومت ناشی از ایجاد ریزترک‌ها در نمونه‌ها می‌باشد. نتایج آزمایش های چرخه های انجماد-آب شدن بر روی نمونه های خاک پایه و بهسازی شده بیانگر کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ها می باشد. میزان تورم آزاد خاک بهسازی شده در چرخه‌های انجماد - آب شدن، کمتر از میزان تورم آزاد در خاک پایه است. این موضوع تأثیر مهم آهک بر افزایش کارایی، کاهش تورم و انقباض خاک را نشان می دهد. مقدار افت وزنی نمونه‌های مغزه بهسازی شده از نمونه‌های خاک پایه کمتر بوده که نشان دهنده تأثیر مطلوب بهسازی بر روی مقاومت خاک می‌باشد.

با افزودن درصد آهک زنده افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری تک محوری مشاهده گردید، به طوری که نمونه‌های ایستگاه‌های ۱ و ۳ با ۵ درصد وزنی آهک زنده به حداکثر مقاومت رسیده‌اند و با افزودن بیشتر آهک مقاومت آنها کاهش یافته است. در ایستگاه‌های ۲ و ۵ نیز نمونه‌ها با ۷ درصد وزنی آهک زنده به حداکثر مقاومت رسیده‌اند. همچنین با افزایش دوره عمل‌آوری مقاومت تک محوری نمونه‌ها بیشتر شده است. با افزودن آهک زنده به خاک pH نمونه‌ها زیاد شده و محیط قلیایی می‌شود و محیط قلیایی برای انحلال سیلیکا و آلومینای خاک مناسب است. با قرارگیری نمونه‌ها در چرخه‌های انجماد - آب شدن مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش مقاومت در چرخه اول کاملاً مشهود است و سپس مقاومت افزایش یافته که می‌توان علت آن را

## منابع

- ابری، ر.، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر برخی پارامترهای زمین شناسی مهندسی بر فرسایش بارانی خاک در بخش بالادست سد اکباتان با استفاده از دستگاه شبیه ساز باران، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- اسماعیل زاده شهری، ع.، سپاهی، ز.، ۱۳۸۲. تأثیر درصد آهک در مقاومت فشاری خاک رس، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.
- اسمعیلی فلک، م.، کاتبی، ه.، جواد، الف.، رحیمی، س.، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی مشخصه‌های تنش و کرنش در خاک‌های ماسه‌ای منجمد: مطالعه موردی متروی تبریز، مجله علمی - پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره هفدهم، شماره ۵، صفحه ۱۳-۲۳.
- بحری، م. م.، ۱۳۸۹. سازه کارهای تخریب ناشی از یخبندان، مرکز تحقیقات سیمان، ۲۰ صفحه.
- جعفری حقیقی، م.، ۱۳۸۲. روش‌های تجزیه خاک، انتشارات ندای ضحی.
- خطیبی، م.، سلطانی، الف.، رئیسی استبرق، ع.، ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی و آماری بهسازی یک خاک متورم شونده با استفاده از الیاف مصنوعی و افزودنی‌های شیمیایی، مجله علمی - پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره پانزدهم، شماره ۲، صفحه ۱۴۷-۱۳۷.
- دریایی، م.، کاشفی پور، س. م.، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر افزایش ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاک‌های رسی، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۲، خرداد - تیر، صفحه ۲۳۹-۲۳۰.
- قبادی، م. ح.، محبی حسن آبادی، ی.، عبدی لر، ی.، بابازاده، ر.، ۱۳۹۱. تأثیر آهک بر روی بهسازی خاک‌های ریزدانه منطقه فقیره همدان، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۸، شماره ۳، صفحه ۲۶۵-۲۷۵.
- کاظمی، پ.، نیکودل، م. ر.، محمدی، ع. ع.، ۱۳۹۱. بررسی اثر انجماد بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های ریزدانه (CL) و خاک‌های ماسه‌ای (SP)، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شیراز، صفحه ۷-۱.
- گلچین فر، ن.، ۱۳۹۰. اثر سیکل‌های انجماد و ذوب شدن بر روی مقاومت فشاری خاک‌های رسی بهسازی شده با آهک و مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی.
- گلچین فر، ن.، عباسی، ن.، ۱۳۹۲. اثر ذوب و یخبندان‌های مکرر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن، نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)، دوره چهل و پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۲-۱.
- محمدی، س. د.، نیکودل، م. ر.، گلستانی، الف.، ۱۳۹۰. الف. تأثیر آهک زنده بر ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های آلی جنگل شهید زارع ساری، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، صفحه ۸-۱.
- محمدی، س. د.، نیکودل، م. ر.، گلستانی، الف.، ۱۳۹۰. الف. تأثیر آهک زنده بر ویژگی‌های تراکمی خاک‌های آلی جنگل شهید زارع ساری، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، صفحه ۷-۱.
- محمدی، س. د.، نیکودل، م. ر.، گلستانی، الف.، ۱۳۹۱. الف. بررسی کارایی آهک زنده و شکفته جهت بهسازی خاک‌های جنگلی حاوی مواد آلی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد پنجم، شماره ۳ و ۴، پاییز و زمستان، صفحه ۶۷-۸۰.
- مکارچیان، م.، صیفوری، ن.، ۱۳۹۲. تأثیر سرباره فولادسازی کارخانه ذوب آهن اصفهان (BOS) بر دوام خاک رس تثبیت شده با آهک، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، صفحه ۹-۱.
- هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرای، ع.، ۱۳۸۷. مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، علوم زمین، بهار ۸۷، سال هفدهم، شماره ۶۷، صفحه ۱۴-۲۱.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. Annual Books of ASTM Standards, D2216-90.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for specific gravity of soils. Annual Books of ASTM Standards, D854.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil. Annual Books of ASTM Standards, D4318.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for particle size of soils. Annual Books of ASTM Standards, D422-63.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for laboratory compaction characteristic. Annual Books of ASTM Standards, D698-78.



- ASTM., 2000. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method, D1556-82.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, D2166-06.
- ASTM., 2000. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, D3080-98
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42:223-237.
- Yıldız, M., Sogancı, A.S., 2012. Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays, *Scientia Iranica*, Pp. 1013-1017.
- Ghazavi, M., Roustaei, M., 2013. Freeze-thaw performance of clayey soil rein-forced with geotextile layer, *Cold Regions Science and Technology*, Pp. 22-29.
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M., 2015. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays, *Cold Regions Science and Technology*, 119:151-157.
- Li, Z., Liu, S.H., Wang, L.J., Fu, Z.Z., 2013. Experimental study on the mechanical properties of clayey soil under different freezing apparatus temperatures and freeze-thaw cycles, *Scientia Iranica Feb*, 20(4):1145 - 1152.
- Gullu, H., 2015. Unconfined compressive strength and freeze-thaw resistance of fine-grained soil stabilised with bottom ash, lime and superplasticizer, *Road Materials and Pavement Design*, Pp. 1-26.
- Czurda, K.A., Hohmann, M., 1997. Freezing effect on shear strength of clayey soils, *Applied Clay Science*, 12:165-187.