

ارزیابی ریزساختاری میزان مصرف آهک و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک‌واگرای تثبیت‌شده با آهک

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، محمد امیری^۲، مینا زنگنه^۳

۱- استاد گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار گروه عمران، دانشگاه هرمزگان

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

vahidouhadi@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۳۰]

چکیده- وجود خاک‌های واگرا در محل اجرای سازه‌های مهندسی به‌عنوان یکی از مشکلات ژئوتکنیکی شناخته شده‌است. هدف اصلی این پژوهش، تعیین نرخ رشد و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرا و آهک در کوتاه‌مدت و بلندمدت از منظر ریزساختاری و درشت‌ساختاری و همچنین تعیین میزان آهک مصرفی در گذشت زمان و تأثیر آن بر پارامترهای مکانیکی بوده‌است. در این راستا آزمایش‌ها با درصد‌های مختلف آهک هیدراته (۰ تا ۱۰ درصد) انجام شد. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به ارائه یک معیار ساده برای شروع واکنش‌های پوزولانی و تعیین میزان آهک مصرف‌شده در مدت واکنش‌های پوزولانی بر اساس pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC) اشاره نمود. بر اساس نتایج آزمایش‌های pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC)، پراش پرتو ایکس (XRD) و مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در مقادیر $EC \geq 4 \text{ mS/cm}$ واکنش‌های پوزولانی صورت می‌پذیرد و تشکیل ترکیبات جدیدی مانند ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) موجب افزایش ویژگی‌های مقاومتی خاک می‌شود. در طی زمان با کاهش $EC \leq 4 \text{ mS/cm}$ و $pH \leq 12.4$ نرخ واکنش‌های پوزولانی و افزایش مقاومت خاک محدود می‌شود. در خاک واگرای مورد مطالعه حدود ۳ تا ۴٪ آهک برای واکنش کوتاه‌مدت که شامل تبادل کاتیونی است، کافی است. بر اساس نتایج، افزایش ۶٪ آهک در طی ۱۴ روز اول ($EC \geq 4 \text{ mS/cm}$ و $pH \leq 12$) مقاومت فشاری نمونه تثبیت‌شده را حدود ۱۰ برابر افزایش می‌دهد این در حالی است که پس از ۱۴ روز ($EC \leq 4 \text{ mS/cm}$ و $pH \leq 12$) افزایش مقاومت تنها حدود ۵٪ است.

کلمات کلیدی: ضریب هدایت الکتریکی (EC)، پراش پرتو ایکس (XRD)، pH، آهک، خاک واگرا.

۱. مقدمه

رسی موجود در خاک و چگونگی ترکیب کردن با خاک بستگی دارد [۱-۳]. برخی خاک‌های ریزدانه از لحاظ ساختاری ناپایدار است، به گونه‌ای که به آسانی پراکنده‌شده و بسیار فرسایش پذیر است [۱]. به‌طور کلی خاک‌هایی که پولک‌های رسی آن‌ها به‌خودی‌خود از یکدیگر جدا شده و به داخل سوسپانسیون در آب ساکن وارد می‌شوند به عنوان خاک‌های واگرا معرفی می‌شوند [۴-۶]. واگرایی یک روند فیزیکی-رفتاری است که اصولاً تحت تأثیر متغیرهایی چون کانی‌شناسی، مشخصات آب حفره‌ای خاک و نمک‌های حل شده در خاک است [۷]. به‌طور کلی پدیده واگرایی در خاک‌ها به حضور کانی‌های رسی

توسعه‌ی زیرساخت‌های کشور مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن و سازه‌های بزرگ نیاز به مطالعات ژئوتکنیکی دارد. به شکل کلی برای ساخت زیربناها و شالوده‌ها در بیشتر مواقع بهسازی خاک‌ها مورد نیاز است. روش‌های بهسازی به آهک سال‌ها توجه شده است و در سرتاسر دنیا توسعه یافته‌است. بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک را می‌توان بلافاصله بعد از اضافه کردن مقدار اندکی آهک یا سیمان به خاک رس، مشاهده نمود. باین‌حال، موثر بودن این شیوه به مقدار آهک، نوع کانی‌های

کلسیم باعث ایجاد ترکیب‌های سیمانی جدید هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH)، هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) و هیدرات آلومینو-سیلیکات کلسیم (CSAH) می‌شود [۲-۳] [۱۳-۱۵].

اصلاح خاک با آهک به دلیل موثر و اقتصادی بودن آن روشی متداول برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک به شمار می‌رود. مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهند که افزودن آهک موجب بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک می‌شود؛ اما در پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون در مبحث تثبیت خاک رس نرم و اگر با آهک به بررسی ریزساختاری فرایند اصلاح و بررسی چگونگی تشکیل و زمان تشکیل ترکیبات جدید و میزان مصرف آهک در زمان توجه محدودی صورت گرفته است. همچنین به بررسی نوع کانی رسی و تأثیر آن بر میزان مصرف آهک توجه نشده است. بر این اساس هدف این پژوهش تعیین میزان آهک مورد نیاز برای انجام فرایند تبادل کاتیونی (واکنش کوتاه‌مدت) و تعیین نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی (واکنش بلندمدت) خاک-آهک در کوتاه‌مدت و بلندمدت از منظر ریزساختاری به وسیله آزمایش‌های ساده مستقل pH و هدایت الکتریکی (EC) و اعتباربخشی آن به وسیله آزمایش‌های ریزساختاری پراش پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی و آزمایش درشت ساختاری مقاومت فشاری محدود نشده برای درصد‌های مختلف آهک در ترکیبات خاک در طی زمان است.

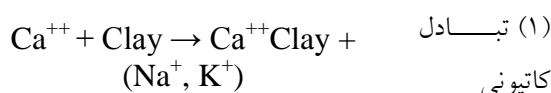
۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، در بخش آزمایش‌های رفتاری از خاک و اگرای طبیعی استفاده شده است. هدف از این انتخاب بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ظرفیت باربری خاک منطقه برای احداث سازه‌های بزرگ بوده است. آهک هیدراته شده‌ای که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته از شرکت ایرانی سیمان هگمتان تهیه شده است. آهک مورد استفاده بسیار نرم بوده و از الک ۸۰ میکرومتری گذرانده شده است. آنالیز شیمیایی آهک مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

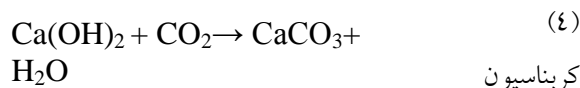
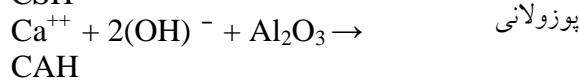
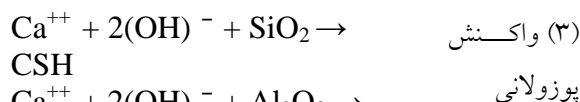
بخش اعظم آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM و دستورالعمل انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشگاه مک گیل کانادا صورت

فعال مانند مونت‌موریلونیت و حضور کاتیون‌های سدیم وابسته است [۸-۹]. در توصیف کلی رفتار خاک‌های واگرای می‌توان گفت هنگامی که این خاک‌ها در معرض آب قرار می‌گیرند، ذرات رسی پراکنده شده و به صورت ذرات معلق باقی می‌مانند. بر این اساس وقوع واگرایی ممکن است منجر به شکل‌گیری پدیده‌هایی چون فرسایش خاک‌های متراکم، تخریب و از بین رفتن جاده‌ها و رگاب در سدهای خاکی شود [۱۰-۱۱].

هنگامی که آهک و خاک رسی باهم مخلوط شوند و در معرض رطوبت قرار بگیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ می‌دهد که شامل تبادل کاتیون، کلوخه شدن، واکنش پوزولانی و کربناسیون^۲ است [۶][۲] [۱۱-۱۲].



(۲) لخته شدن (فولوکوله شدن)



تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزء واکنش‌های اولیه است که بلافاصله بعد از اختلاط رخ می‌دهند. در جریان این واکنش‌ها، کاتیون‌های یک ظرفیتی موجود در لایه دوگانه رسی با کاتیون دو ظرفیتی کلسیم جایگزین می‌شوند. این واکنش‌ها موجب تغییرات سریع در نشانه خمیری، کارپذیری و کسب مقاومت می‌شوند [۲-۳] [۱۳].

بیشینه آهک مورد نیاز برای متعادل‌سازی اصلاح خاک، نقطه‌ی تثبیت آهک یا مصرف ابتدایی آهک نامیده می‌شود [۱۳]. نقطه‌ی تثبیت آهک، مقدار آهکی را نشان می‌دهد که pH محیط واکنش را برای ترکیب خاک-آهک به ۱۲/۴ می‌رساند [۱۲-۱۳]. در مدت فرایند واکنش پوزولانی محیط بسیار قلیایی (pH=12.4) که با اضافه کردن آهک ایجاد شده است، باعث تجزیه سیلیکا و آلومینای کانی‌های رسی می‌شود و ترکیب با

1 . Flocculation-agglomeration

2 . Carbonation

دستگاه میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل (TESCAN-510-SEM-01) قرار گرفته است.

برای تعیین میزان زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و میزان چسبندگی (c) نیز آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D 3080-90 انجام شده است. همچنین به منظور بررسی واگرایی خاک منطقه، آزمایش هیدرومتری دوگانه و تعیین میزان یون سدیم موجود در خاک انجام شده است. در جدول (۲) برخی مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است. ارزیابی پراش پرتو ایکس به عنوان یک معیار در تعیین ریزساختار خاک‌ها شناخته شده است. منحنی پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است. بر اساس منحنی پراش پرتو ایکس حدود ۶۸ درصد این خاک از کانی‌های رسی است، قله $(d_{001}=14.1 \text{ \AA})^\circ$ مربوط به کانی اسمکتیت (۴۳ درصد)، قله $(d_{001}=7.1 \text{ \AA})^\circ$ مربوط به کانی کائولینیت (۱۰ درصد)، قله $(d_{001}=10.0 \text{ \AA})^\circ$ مربوط به کانی ایلیت (۱۵ درصد) و حدود ۳۲ درصد آن از کانی‌های غیر رسی (مانند کوارتز و کربنات) تشکیل شده است. در جدول (۳) برخی مشخصات ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است. برای تعیین مقدار آهک بهینه برای بهبود خصوصیات مهندسی، آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی انجام شد. ابتدا pH و EC خاک و آهک به طور جداگانه تعیین شد. سپس درصدهای مختلف ۲ تا ۱۰ درصد آهک به خاک اضافه شد. بر این اساس ۴ گرم خاک رد شده از الک شماره ۴۰ و خشک شده در هوا را با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن کرده و درون بطری پلاستیکی حاوی درپوش به ظرفیت ۵۰ میلی‌لیتر (بیشتر) ریخته شد. سپس به مقدار ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خاک، آهک توزین شد. خاک و آهک به درون بطری پلاستیکی ریخته و با هم مخلوط شدند. سپس ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر به بطری اضافه و به مدت دو ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. رسانایی الکتریکی و pH محلول‌ها بعد از ۲ ساعت و سپس بعد از ۱، ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۵ و ۹۹ روز نگهداری اندازه‌گیری شدند. مقادیر pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل (HANNA-Hi 9321) اندازه‌گیری شد. همچنین رسانایی

گرفته است [۱۶-۱۷]. برای تعیین درصد کربنات خاک، از روش تیتراسیون استفاده شده است [۱۸]. برای تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)، از محلول باریم کلراید استفاده شد [۱۹]. به این منظور ظرفیت تبادل کاتیونی خاک^۳ (CEC)، با افزودن محلول کلرید باریم ۰/۱ مولار تعیین شده است. سوسپانسیون ۱ به ۱۰ (۴ گرم خاک خشک به ۴۰ میلی‌لیتر محلول کلرید باریم)، به وسیله لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از گذشت مدت زمان لازم نگهداری، به وسیله سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ rpm، فاز مایع و جامد از هم جدا شد. مقادیر کاتیون‌های سدیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم موجود در فاز مایع، به وسیله دستگاه جذب اتمی^۴ مدل (GBC 932 AB Plus)، در آزمایشگاه پژوهشی ژئوتکنیک و مکانیک خاک دانشگاه بوعلی سینا، اندازه‌گیری شده است. مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی از روش ارائه شده در مرجع [۲۰] از جمع مقادیر کاتیون‌های اندازه‌گیری شده در فاز مایع به وسیله نرم‌افزار (GBC-Avental Ver. 1.33) به دست آمد. برای تهیه نمونه‌های اشعه ایکس (XRD) از کلیه نمونه‌ها، یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس بعد از اضافه نمودن ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت سه ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت برای اطمینان از حصول شرایط تعادل، این سوسپانسیون دوباره به مدت سه ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شد تا سیستم کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه به وسیله لرزاننده دوباره هم زده شدند. در پایان بین ۵ تا ۷ قطره از این سوسپانسیون روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Siemens-Diffract meter D8 Advance آزمایش شد [۲۰-۲۱]. همچنین برای مطالعه ساختار و مرفولوژی، نمونه خاک واگرایی طبیعی مورد مطالعه به وسیله

3 . Cation Exchangeable Capacity

4 . Atomic Absorption Spectrometer

۹۹ روز نگهداری شدند. بر این اساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، دانه‌بندی، هیدرومتری، هیدرومتری دوگانه، رسوب، پتانسیل واگرایی و آزمایش پراش پرتو ایکس بر روی ترکیب‌های مختلف خاک-آهک بر اساس استاندارد ASTM انجام شدند. قابل گفتن است نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در قالب‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده با دانسیته خشک ($\gamma_d = 1.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$) ساخته شده و در ظروف پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شدند.

الکتریکی (EC) کلیه نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه (Martini Instrument Mi 170) اندازه‌گیری شدند.

برای انجام دیگر آزمایش‌ها، نمونه‌های تهیه شده از منطقه به وسیله‌ی چکش پلاستیکی خردشده و سپس با درصدهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی خاک، آهک به صورت خشک مخلوط شده‌است. سپس حدود ۳۰ درصد رطوبت (تقریباً ۵٪ بیشتر از رطوبت طبیعی محل) به مخلوط خاک و آهک اضافه شد. نمونه‌ها در ظرف‌های پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شدند. برای انجام واکنش‌ها نمونه‌ها به مدت ۱، ۷، ۱۴، ۲۸ و

جدول (۱). مشخصات شیمیایی آهک هیدراته

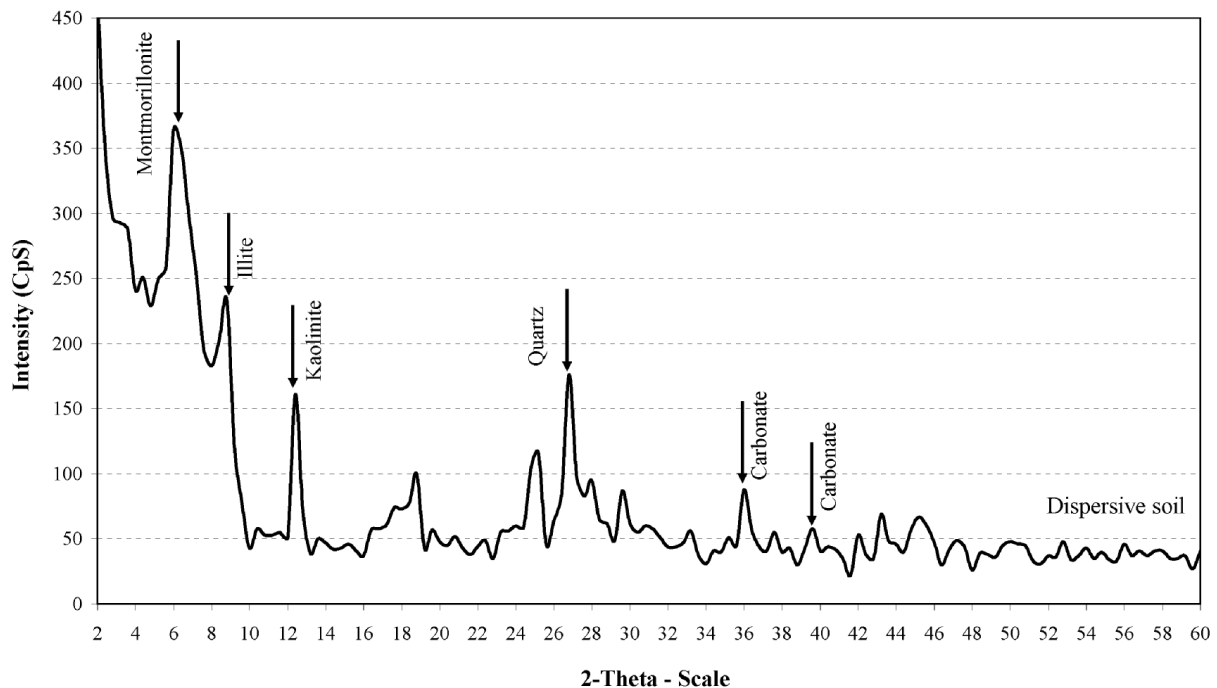
Parameters	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	T.AL K	SO ₃	LOI	SiO	MnO
Product type												
Hydrated Lime	1.19	0.69	0.12	71.4	0.53	0.1	0.1	----	0.1	25.86	0.1	0.1

جدول (۲). برخی از مشخصات ژئوتکنیکی نمونه خاک واگرای مطالعه شده

Physical properties of Dispersive Soil	Quantity measured	References for method of measurement
Clay (%)	48	[16], ASTM, D422-63
Strength Parameters	C (kg/cm ²)	[16], ASTM D3080-90
	ϕ°	[16], ASTM D3080-90
Unconfined Compression Strength (UCS) (kg/cm ²)	0.82	[16], ASTM D2166-06
Liquid limit (%)	41.3	[16], ASTM, D4318
Plastic Limit (%)	19.9	[16], ASTM, D4318
Plasticity Index (%)	21.4	[16], ASTM, D4318
G _s	2.6	[16] ASTM, D85487
Classification	CL	[16], ASTM, D3282

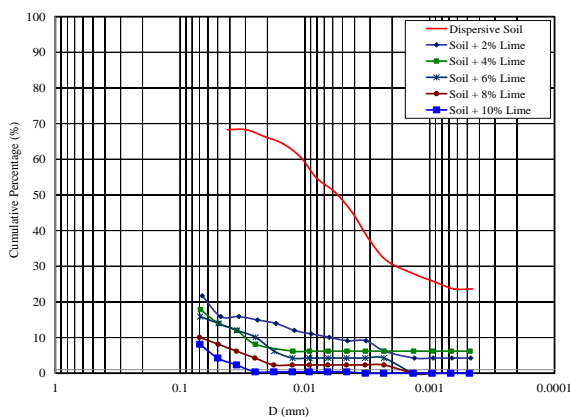
جدول (۳). برخی از مشخصات ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه خاک واگرای مطالعه شده

Geo- environmental properties of Dispersive Soil	Quantity measured	References for method of measurement
pH (1:10; soil: water)	9.80	
Carbonate content (%)	10.5	[18]
Organic content (%)	1.5	[16], ASTM, D2974
CEC (cmol/kg-soil)	Na ⁺	20.83
	Ca ⁺²	6.10
	Mg ⁺²	0.81
	K ⁺	0.58
Total:	28.32	[19]
ESP	73.55	
Dispersion (%)	100	
X Ray Results: d ₀₀₁	14.13 Å	[20-21]
Color	Brown	
Soil composition	Montmorillonite, Kaolinite, Illite,	[16], ASTM, D2216
	Calcite, Quartz	



شکل (۱). منحنی پراش پرتو ایکس خاک واگری مطالعه شده

ذرات لای و رس به یکدیگر به وسیله ترکیبات سیمانی به وجود آمده در نتیجه واکنش‌های پوزولانی خاک-آهک، افزایش قطر ذرات مشاهده می‌شود. به منظور تأیید نتیجه گرفته شده بالا تعدادی آزمایش تعیین نرخ رسوب بر نمونه‌های رسی واگری حاوی درصد‌های مختلف آهک انجام شد.



شکل (۲). منحنی هیدرومتری خاک واگری به همراه منحنی هیدرومتری نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های متفاوت آهک

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳) برای نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک، درحالی‌که در نمونه خالص پس از ۲۴ ساعت کمتر از ۰.۵٪ رسوب مشاهده می‌شود، این مقدار با افزایش ۲٪ آهک به ۰.۷٪ رسیده‌است. با افزایش میزان آهک به

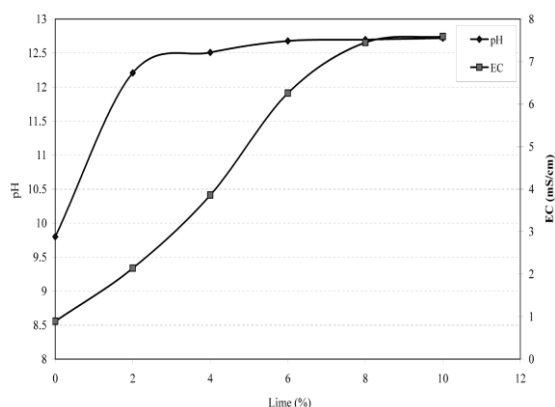
۳- بحث و بررسی

بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه، خاک منطقه مطالعه شده به شدت واگری است. از سوی دیگر بر اساس مطالعه پژوهشگران پتانسیل واگری با وجود یون سدیم به عنوان کاتیون اصلی تبدالی نسبت مستقیم دارد [۴]. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۳) و همچنین معادله ارائه‌شده به وسیله شرارد [۶]، با توجه به حضور زیاد کاتیون Na^+ میزان درصد سدیم تبدالی (پتانسیل واگری) بر اساس معادله (۱) حدود ۷۳/۵٪ حاصل می‌شود.

$$ESP = \frac{Na}{Na + Ca + K + Mg} * 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

شکل (۲) منحنی هیدرومتری نمونه‌های اصلاح‌شده با درصد‌های متفاوت آهک را پس از عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۲) با افزایش آهک به دلیل واکنش‌های شیمیایی و تشکیل پیوند بین ذرات، فرایند فولوکوله شدن صورت می‌گیرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ۲٪ آهک، درصد ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون از ۵۰٪ به حدود ۱۰٪ کاهش یافته است. این در حالی است که این مقدار با افزایش ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آهک به حدود ۰.۲٪ و ۰.۱٪ کاهش نشان داده‌است. به عبارت دیگر به دلیل چسبیدن

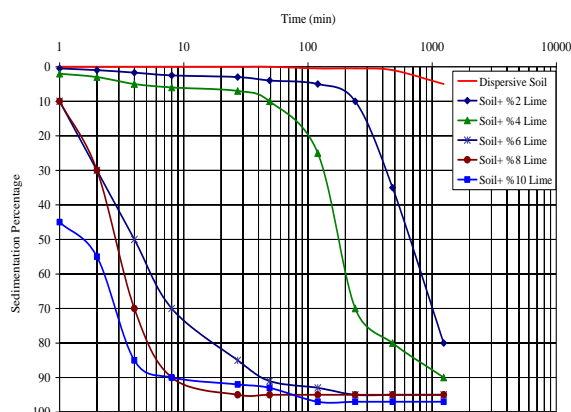
مقدار pH را به حدود ۱۲/۶ و EC محیط را به mS/cm ۶,۲۶ رسانده است (شکل (۴)). با افزایش ۱۰٪ آهک، pH و EC محیط بعد از ۴۸ ساعت به ترتیب به ۱۲/۷۲ و ۷/۶۰ رسیده است. به عبارتی تا هنگامی که کلسیم دو ظرفیتی برای جایگزینی با سدیم تک ظرفیتی در محیط وجود دارد و تا زمانی که محیط از یون کلسیم ناشی از فرایند یونیزاسیون آهک اشباع نشده، pH محیط افزایش یافته است. بیشتر پژوهشگران درصد بهینه آهکی را برای بهسازی پیشنهاد می‌کنند که pH محیط را به بیش از ۱۲/۴ برساند [۲۳]. بر این اساس با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۴) می‌توان $EC \geq 2/5$ mS/cm را به عنوان ضریب هدایت الکتریکی لازم برای پیشرفت فرایند واکنش‌های پوزولانی بیان نمود.



شکل (۴). روند تغییرات pH نمونه‌های واگرای اصلاح شده با آهک طی پس از ۴۸ ساعت

ارزیابی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده با مقادیر (۲ تا ۱۰) درصد آهک در مدت ۷ روز عمل‌آوری در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، شدت قله مونت‌موریلونیت، کائولینیت و ایلیت با افزایش درصد آهک به شدت کاهش یافته است. به عبارتی همان گونه که مشاهده می‌شود قله $d_{001} = 14 \text{ \AA}$ مربوط به کانی مونت‌موریلونیت از ۳۵۰ Cps با افزایش ۲٪ آهک به حدود ۱۲۰ Cps و با افزایش ۸٪ آهک به کمتر از ۶۰ Cps رسیده است. این روند را برای کانی ایلیت هم می‌توان مشاهده کرد. درحالی‌که شدت قله $d_{001} = 10 \text{ \AA}$ مربوط به کانی ایلیت در نمونه خالص حدود ۲۰۰ Cps است، افزایش ۲٪ آهک آن

نمونه‌ها فرایند رسوب در نمونه‌ها به دلیل افزایش جایگزینی کاتیون‌های دو ظرفیتی به جای کاتیون‌های تک ظرفیتی، فرایند تبادل کاتیونی و کلوخه شدن به سرعت صورت می‌پذیرد. به عبارتی در نمونه‌های حاوی ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ آهک در زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه فرایند رسوب به شکل کامل صورت پذیرفته است.



شکل (۳). منحنی رسوب خاک و اگر با همراه نمونه‌های اصلاح شده با آهک

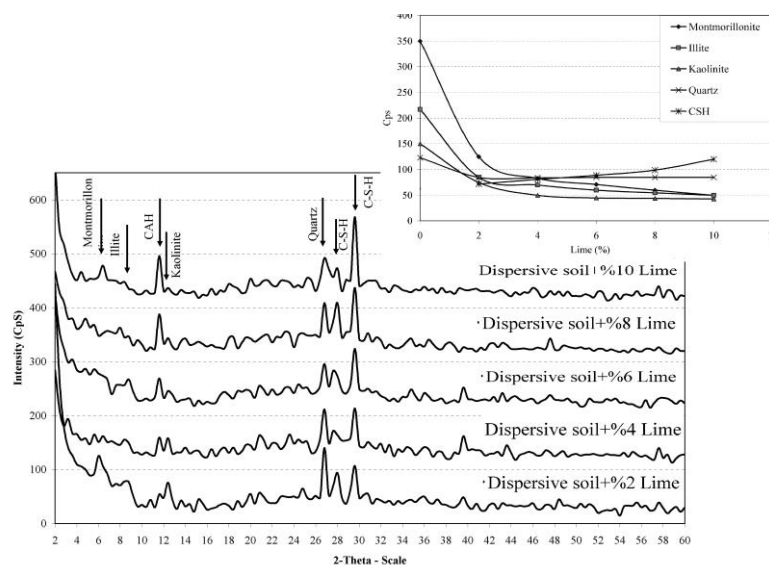
با توجه به حدود سرعت قابل توجه رسوب نمونه‌ها می‌توان بیان کرد که در فرایند رسوب نمونه‌های اصلاح شده با آهک، فاز تبادل کاتیونی نقش اساسی را ایفا کرده است. این امر را بررسی نتایج pH نیز تأیید می‌کند (شکل (۴)).

میزان کمینه آهکی که باید به خاک اضافه شود تا تبادل کاتیونی (تبادل Ca^{++} و Na^{+}) صورت بگیرد و در نتیجه یک تغییر گسترده در خواص خاک در کوتاه مدت رخ دهد را نقطه‌ی تثبیت آهک می‌گویند [۱۳]. در این پژوهش تعیین این کمینه میزان آهک بر طبق اندازه‌گیری‌های pH و هدایت الکتریکی (EC) و اعتباربخشی به وسیله‌ی آزمایش‌های پراش پرتو ایکس و مقاومت فشاری تک محوری صورت گرفته است. با افزایش $Ca(OH)_2$ به نمونه، همراه با جایگزینی کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم به جای کاتیون تک ظرفیتی سدیم در محیط، واکنش‌های یونیزاسیون آهک موجب آزاد شدن یون‌های هیدروکسید (OH^{-}) می‌شود که این امر افزایش pH محیط را نتیجه می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) با افزایش ۲٪ آهک، pH و EC محیط بعد از ۴۸ ساعت به ترتیب به حدود ۱۲,۲ و ۲/۱۴ mS/cm رسیده است. افزایش ۶٪ آهک

بیش از ۱۲ و $2/50 \text{ mS/cm}$ بوده ادامه می‌یابد. همچنین میزان واکنش پوزولانی با گذشت زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. شکل (۶) روند تغییرات pH نمونه‌های اصلاح‌شده را طی دوره عمل‌آوری نشان می‌دهد. بر اساس تغییرات pH محیط واکنش می‌توان شروع واکنش پوزولانی را ارزیابی کرد. در این شکل تغییرات pH در زمان عمل‌آوری ۱۰۰ روزه برای مقادیر مختلف ترکیبات خاک - آهک (۲ تا ۱۰٪) ارائه شده‌است. برای نمونه‌هایی که حاوی ۲ درصد آهک است، pH به آهستگی کاهش یافته‌است درحالی‌که در نمونه‌هایی که آهک بیشتری دارند pH با گذشت زمان افت بیشتری را نشان می‌دهد. به‌علاوه تا زمانی که آهک در دسترس باشد pH محیط ثابت باقی می‌ماند. کاهش pH در طول دوره عمل‌آوری را می‌توان با مصرف آهک برای واکنش پوزولانی توضیح داد؛ زیرا تبادل یون مثبت (تبادل کاتیونی) بر غلظت یون هیدروکسید (OH^-) تأثیر می‌گذارد. کاهش آهسته‌ی pH مربوط به نمونه‌های اصلاح‌شده، به علت فعالیت آهسته‌ی واکنش پوزولانی است. به‌علاوه برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۲ تا ۴٪ آهک (در حدود مصرف اولیه‌ی آهک) کاهش کم در مقدار pH، نبود رخداد واکنش پوزولانی یا واکنش بسیار کم پوزولانی را نشان می‌دهد.

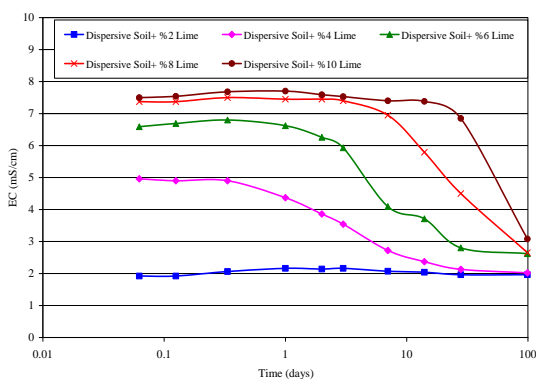
را به 80 Cps و افزایش ۸٪ آهک آن را به حدود 50 Cps رسانده‌است. در حقیقت بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۴) افزایش آهک هیدراته موجب افزایش pH محیط واکنش به بیش از $12/4$ و موجب حل‌شدگی قله‌های کانیه‌های رسی مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت شده‌است [۴]. از سوی دیگر الگوهای پراش پرتو ایکس، بازتاب‌های قوی را برای کریستال‌های هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) در نمونه‌های اصلاح‌شده با ۸٪ و ۱۰٪ آهک نشان می‌دهد. این بازتاب‌ها با افزایش آهک و زمان عمل‌آوری افزایش داشته‌است. ترکیبات تشکیل‌شده شامل هیدرات کلسیم سیلیکات (CSH) و هیدرات کلسیم آلومینات (CAH) است [۲۲]. این مواد معمولاً حفره‌های خاک را پر کرده و یا اینکه ذرات آن را می‌پوشانند. در نتیجه تخلخل و نفوذپذیری بسته به درصد آهک کاهش می‌یابد.

بررسی منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های عمل‌آوری شده، افزایش شدت قله‌های هیدرات کلسیم آلومینات (CAH) را در فاصله‌ی ($d_{001}=7.62 \text{ \AA}$) در نمونه‌های اصلاح‌شده با بیش از ۲٪ آهک نشان داده‌است [۲۳]. شدت این قله‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش داشته‌است. بر اساس این نتایج می‌توان بیان کرد که واکنش‌های پوزولانی در کوتاه‌مدت آغاز می‌شود و تا هنگامی که pH و EC محیط واکنش به ترتیب



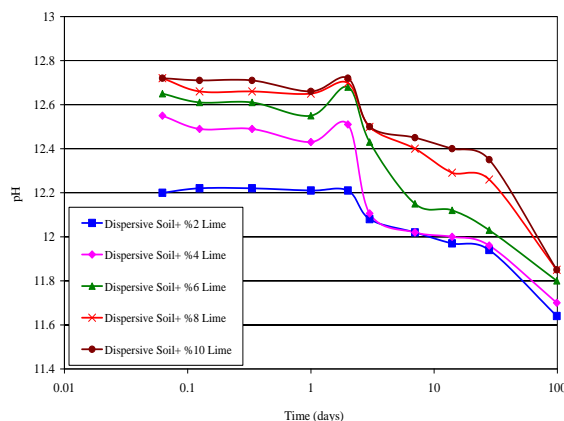
شکل (۵). منحنی پراش اشعه ایکس نمونه‌های بهسازی شده با آهک پس از هفت روز عمل‌آوری

اصلاح‌شده توجیه کرد. مقادیر رسانایی ترکیبات اصلاح‌شده با کمتر از ۶٪ آهک دچار کاهش بسیار زیادی در مدت ۷ روز اول است که علت آن تبادل کامل کاتیونی است. از سوی دیگر هیچ تأثیری از مدت‌زمان عمل‌آوری روی رسانایی الکتریکی قبل از ۲۸ روز برای ترکیبات مختلف خاک - آهک دارای بیش از ۶ درصد آهک مشاهده نشد. برای نمونه‌های حاوی بیش از ۶٪ آهک، مقدار رسانایی الکتریکی (EC) برای نمونه‌هایی که آهک بیشتری دارند با تأخیر کاهش یافته‌است. کاهش EC را می‌توان به کاهش مقدار Ca^{++} و (OH^-) در ترکیبات مختلف خاک - آهک که به علت پیشرفت واکنش پوزولانی است نسبت داد. مدت زمان واکنش با افزایش مقدار آهک در دسترس، افزایش می‌یابد. بعد از ۹۰ روز نگهداری، مقادیر EC همه‌ی ترکیبات مختلف خاک - آهک (Ca-smectite) به سمت (mS/cm) ۲/۵ تا ۳ میل کرده‌است، که نسبت به نمونه خالص ((Na-smectite) (۰/۹۶ mS/cm) تقریباً دو تا سه برابر است. قابل توجه است که بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۶) در نمونه‌های اصلاح‌شده با بیش از ۶٪ آهک مقادیر pH محیط واکنش در ۱۴ روز اول بیش از ۱۲/۳ بوده و بعد از ۹۰ روز مقادیر pH نمونه‌ها به سمت ۱۱/۶۵ میل نموده‌است. بر اساس نتایج ارائه‌شده، مقدار آهک که در طول روز اول از طریق واکنش تبادل کاتیونی مصرف شده‌است در عمل حدود ۴٪ بوده‌است. در طول مدت عمل‌آوری طولانی‌تر، مقدار آهک مصرفی با افزایش میزان آهک تا ۶٪ درصد افزایش یافته‌است. این رفتار را می‌توان با پیشرفت واکنش پوزولانی بعد از تبادل کامل یون‌های مثبت (قرارگیری Ca به جای Na) توجیه کرد، که تأیید کننده زمان بر بودن واکنش‌های پوزولانی است.



شکل (۷). روند تغییرات رسانایی الکتریکی (EC) نمونه‌های واگرای اصلاح‌شده با آهک طی دوره عمل‌آوری

بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۶) در تمام نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف آهک، pH محیط واکنش تا ۴۸ ساعت اول افزایش یافته‌است اما پس از آن محیط واکنش دچار افت شده‌است. در حقیقت تا هنگامی که فرایند تبادل کاتیونی رخ می‌دهد به دلیل افزایش یون هیدروکسید (OH^-)، pH محیط واکنش افزایش می‌یابد اما پس از ۴۸ ساعت به دلیل رخ داد واکنش‌های پوزولانی pH محیط به آهستگی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در نمونه حاوی ۴٪ آهک بعد از ۷ روز، pH محیط واکنش به کمتر از ۱۲ رسیده است. در حقیقت آهک موجود برای واکنش‌های پوزولانی پایان پذیرفته است و نرخ واکنش‌های پوزولانی کند شده‌است. در نمونه حاوی ۶٪ آهک نیز pH محیط واکنش در سه روز اول بالای ۱۲/۴ است و پس از ۲۸ روز به حدود ۱۲ رسیده‌است. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی ۸٪ و ۱۰٪ آهک در ۱۴ روز اول pH محیط واکنش بیش از ۱۲/۳ است و پس از حدود ۶۰ روز pH محیط واکنش به کمتر از ۱۲ کاهش یافته‌است.



شکل (۶). روند تغییرات pH نمونه‌های واگرای اصلاح‌شده با آهک طی دوره عمل‌آوری

شکل (۷) رسانایی الکتریکی را با گذشت زمان نگهداری برای ترکیبات مختلف خاک - آهک نشان می‌دهد. قابلیت هدایت الکتریکی خاک، متناسب با غلظت یون‌های محلول خاک است. بر اساس نتایج شکل (۷)، افزودن ۲٪ آهک بعد از ۱/۵ ساعت بلافاصله رسانایی الکتریکی را از (mS/cm) ۰/۹۶ به (mS/cm) ۲/۰ افزایش داده‌است. در نمونه‌های حاوی بیش از ۶ درصد آهک این مقدار به بیش از (mS/cm) ۶/۲۶ رسیده است. رسانایی الکتریکی رو به رشد را می‌توان با یون‌های کلسیم و هیدروکسید اضافی به علت تجزیه‌ی آهک در خاک

(OH) که موجب افزایش pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC) شده است پس از ۱۴ روز به مقدار قابل توجهی مصرف شده است.

بررسی مقاومت فشاری محدود نشده نمونه حاوی ۶٪ آهک نیز نشان می‌دهد در حالی که مقاومت فشاری نمونه در ۱۴ روز اول حدود ۸ برابر افزایش یافته است، اما پس از ۱۴ روز نرخ رشد مقاومت فشاری بسیار کند شده است و به حدود ۵٪ رسیده است. برای یک نمونه‌ی اصلاح شده با ۶ درصد آهک، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) بعد از ۱۴ و ۹۹ روز به ترتیب ۸ و ۹ برابر بوده است. ارزیابی pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC) محیط واکنش نیز نشان می‌دهد که در مدت ۱۴ روز اول $pH \geq 12$ و $EC \geq 4 \text{ mS/cm}$ بوده است. در حقیقت کاهش $EC \leq 4 \text{ mS/cm}$ و $pH \leq 12$ موجب عدم تداوم واکنش‌های پوزولانی شده و نرخ افزایش مقاومت فشاری بسیار محدود شده است. برای اعتباربخشی به این نتایج منحنی پراش پرتو ایکس نمونه حاوی ۶٪ آهک در طی زمان در شکل (۹) ارائه شده است.

بر این اساس رفتار مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) را می‌توان به تغییرات ساختار ذرات که در اثر واکنش‌های کوتاه مدت ایجاد شده‌اند نیز نسبت داد. تبادل کاتیونی به وسیله‌ی کلسیم یک ساختار پایدارتر (غیر متورم) و فشرده‌تر ایجاد می‌کند که به اسمکتیت و ایلیت استحکام بیشتری می‌دهد. به علاوه تشکیل ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) و هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) در این رفتار نقش تعیین کننده داشته است. این ترکیبات شبیه به ترکیبات موجود در سیمان پرتلند هیدراته است [۱۰-۱۳].

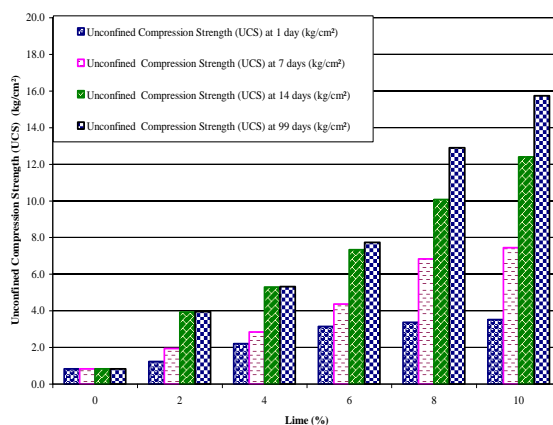
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸) در نمونه‌های حاوی ۸٪ و ۱۰٪ آهک افزایش مقاومت به دلیل ادامه واکنش پوزولانی پس از ۱۴ روز ادامه یافته است. برای مقادیر کم آهک (۲ و ۴ درصد) که به نمونه خالص اضافه شده است مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در طول ۱۴ روز به مقدار بیشینه رسیده و به نظر می‌رسد این مقادیر آهک به شکل کامل برای واکنش کوتاه مدت استفاده شده است. بنابراین میزان واکنش‌های پوزولانی در خاک اصلاح شده نمی‌تواند قابل توجه باشد یا به عبارتی واکنش‌های پوزولانی پیشرفت نمی‌کنند. برای مقادیر

شکل (۸) به ارزیابی مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح شده با آهک طی زمان می‌پردازد. بعد از یک روز، مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) برای همه‌ی نمونه‌های اصلاح شده افزایش یافته است. این رفتار را در نمونه‌های اصلاح شده با آهک می‌توان به ماهیت کلوخه‌ای شدن خاک اصلاح شده که با واکنش سریع آهک با خاک رس (تبادل کاتیونی و کلوخه شدن) ایجاد می‌شود، نسبت داد. اما از سوی دیگر در نمونه‌های اصلاح شده با آهک مقاومت یک روزه نمونه‌های حاوی ۸٪ و ۱۰٪ آهک تقریباً با یکدیگر برابر است. همچنین با مقایسه مقاومت نمونه‌های اصلاح شده با ۲٪ و ۴٪ آهک مشاهده می‌شود که مقاومت ۱۴ و ۹۹ روزه نمونه‌ها تغییری نیافته است.

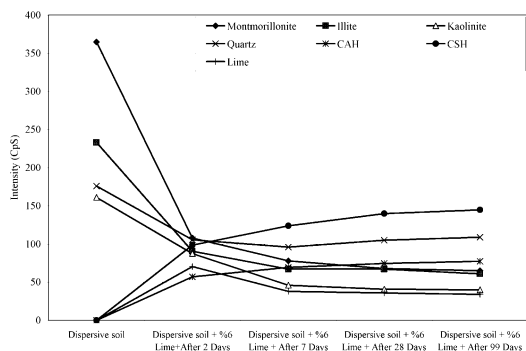
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸) در نمونه حاوی ۲٪ آهک، افزایش مقاومت فشاری به مقدار ناچیزی وابسته به واکنش‌ها پوزولانی است و عامل اصلی افزایش مقاومت ماهیت کلوخه شدن خاک اصلاح شده بوده است. همچنین بر اساس منحنی پراش پرتو ایکس ارائه شده در شکل (۵) در نمونه اصلاح شده با آهک، قله‌های بسیار ضعیف ساختار هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) مشاهده می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۴٪ آهک نیز مقاومت فشاری نهایی نمونه حدود ۶/۵ برابر افزایش یافته است. اما مقاومت نمونه ۹۹ روزه نسبت به نمونه ۱۴ روزه تنها (۰,۵٪) افزایش یافته است. در حقیقت بخش اعظم ۴٪ آهک اضافه شده به نمونه در مدت ۱۴ روزه اول به مصرف واکنش‌های پوزولانی رسیده است. بررسی منحنی‌های تغییرات pH در شکل (۶) ($pH \leq 12$) و تغییرات ضریب هدایت الکتریکی در شکل (۷) ($EC \leq 2,5 \text{ mS/cm}$) این نتیجه را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) pH محیط واکنش در دو روز اول بیش از ۱۲/۴ است و تا روز ۱۴ بیش از ۱۲ است، این در حالی است که از روز ۱۴ به بعد pH محیط واکنش به کمتر از ۱۲ رسیده است. به عبارتی نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی بسیار کند شده و افزایش مقاومتی نیز رخ نداده است. تغییرات ضریب هدایت الکتریکی نیز همین فرایند را تأیید می‌کند. در ۴۸ ساعت اول EC محیط واکنش بیش از 4 mS/cm است و پس از ۱۴ روز به کمتر از $2,5 \text{ mS/cm}$ رسیده است. در حقیقت یون هیدروکسید

همان‌گونه که اشاره شده شکل (۹) منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بهسازی شده با ۶٪ آهک در طول مدت زمان را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده، رشد اصلی ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در مدت ۷ روز اول است و شدت قله C-S-H به ۱۲۶ CpS رسیده است. این نرخ رشد در ساختار C-S-H تا ۲۸ روز ادامه یافته‌است اما از ۲۸ روز تا ۹۹ روز نرخ رشد ساختار C-S-H بسیار کند می‌شود. در حقیقت نرخ رشد ساختار C-S-H در ۷ روز اول (۱۲,۷) $\leq \text{pH} \leq 12/2$ و $4 \leq \text{EC} \leq 7 \text{ mS/cm}$ بوده و از روز ۷ تا ۲۸ (۱۲/۲) $\leq \text{pH} \leq 12/0$ و $3/5 \leq \text{EC} \leq 4 \text{ mS/cm}$ نرخ رشد قله C-S-H به حدود ۱۳٪ محدود شده‌است. از روز ۲۸ به بعد (۱۲/۰) $\leq \text{pH} \leq 11/8$ و $3 \text{ mS/cm} \leq \text{EC} \leq 2/5$ نرخ رشد قله ساختار C-S-H به حدود ۳٪ کاهش یافته‌است. قابل توجه است بررسی نرخ رشد ساختار هیدرات کلسیم آلومینات (CAH) همین روند را تأیید می‌کند. در حقیقت می‌توان بیان کرد که در فاصله $12/7 \leq \text{pH} \leq 12/2$ و $4 \leq \text{EC} \leq 7 \text{ mS/cm}$ نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی سریع، در $12/0 \leq \text{pH} \leq 12/2$ و $3/5 \leq \text{EC} \leq 4 \text{ mS/cm}$ نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی متوسط و در فاصله $12/0 \leq \text{pH} \leq 11/8$ و $3/5 \leq \text{EC} \leq 2/5 \text{ mS/cm}$ نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی کند بوده‌است.

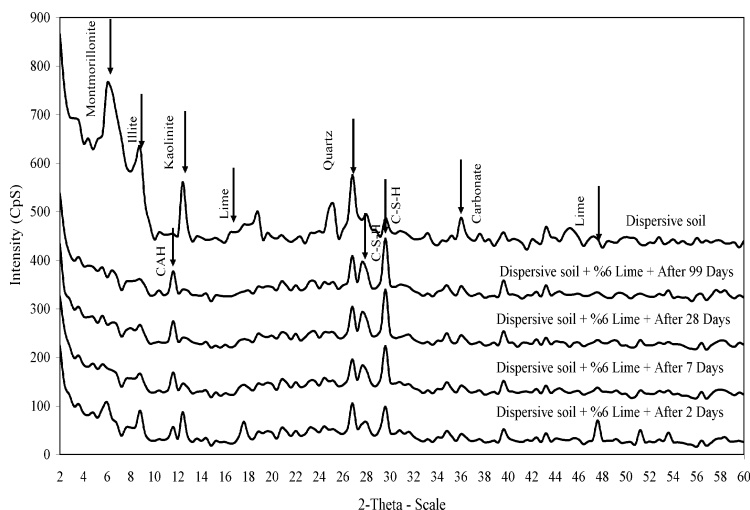
بالتر آهک (بیش از ۶ درصد) مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) با گذشت زمان عمل‌آوری بیشتر، برای مقادیر بالاتر آهک افزایش یافته‌است. با افزودن ۱۰ درصد آهک و بعد از ۱۴ و ۹۹ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) به ترتیب به اندازه ۱۴ و ۱۸ برابر، در مقایسه با مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) مربوط به نمونه‌ی اصلاح‌نشده (۰,۸۶ Mpa) افزایش نشان داده‌است. گفتنی است که بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل‌های (۶) و (۷) در ۴۵ روز اول عمل‌آوری، pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC) محیط واکنش در نمونه‌های حاوی ۸٪ و ۱۰٪ آهک به ترتیب بیش از ۱۲ و ۴ mS/cm بوده‌است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که واکنش‌های پوزولانی در این دوره در نمونه‌ها انجام شده‌است.



شکل (۸). روند تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) نمونه‌های اصلاح‌شده با آهک



شکل (۹). منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بهسازی شده با ۶٪ آهک در گذشت زمان



در بخش پایانی این پژوهش ریخت‌شناسی نمونه رسی واگرای مورد مطالعه و نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بررسی شده است. بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی ارائه شده در شکل (۱۰-الف) می‌توان ساختار پراکنده خاک واگرا را مشاهده کرد. بر اساس ریخت‌شناسی ارائه شده در شکل (۱۰-الف) از نمونه خاک واگرای طبیعی مورد مطالعه، ساختار به صورت کامل پراکنده است. از سوی دیگر افزایش ۶٪ آهک و عمل‌آوری ۷ روزه موجب شده که منافذ ساختار به شدت کاهش یافته است (شکل ۱۰-ب). به عبارتی ترکیبات تشکیل شده شامل هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) و هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-H) حفره‌های خاک را پر کرده و یا اینکه ذرات آن را پوشانده‌اند، در نتیجه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج گرفته شده در این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱) تفاوت‌ها در رسانایی الکتریکی و pH مربوط به ترکیبات خاک - آهک را می‌توان برای مشاهده‌ی پیشرفت واکنش‌های پوزولانی با گذشت زمان استفاده کرد.

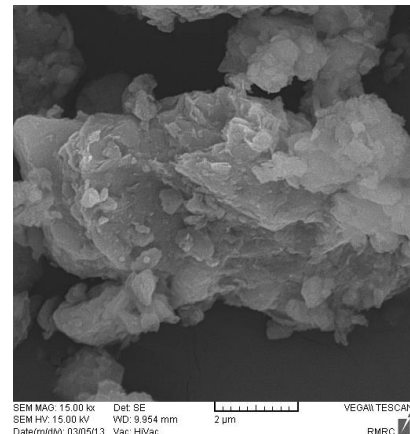
۲) بر اساس نتایج پراش پرتو ایکس، با افزودن ۶٪ آهک، واکنش‌های پوزولانی موجب تشکیل ترکیبات هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) و هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-H) شده است.

۳) بر اساس آنالیز پراش پرتو ایکس در نمونه مورد مطالعه، مصرف اولیه‌ی آهک برای انجام کامل فرایند تبادل کاتیونی در حدود ۴٪ بوده است.

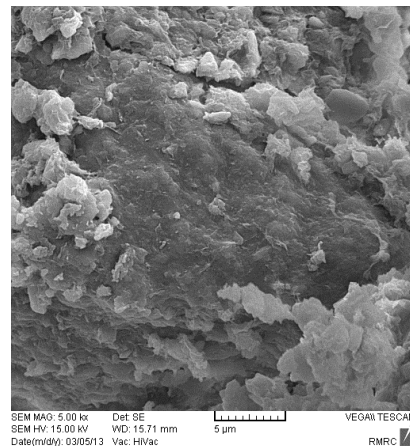
۴) برای خاک عمل‌آورده شده با محتوای آهک بیشتر از مقدار لازم برای مبادله کاتیون، واکنش پوزولانی باعث شکل‌گیری ترکیب‌های جدیدی CAH و CSH شده است.

۵) در نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۴٪ آهک علت اصلی افزایش مقاومت تغییر ساختار و کلوخه شدن خاک است این در حالی است که در نمونه‌های حاوی بیش از ۴٪ آهک عامل اصلی افزایش مقاومت واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ترکیبات جدید CAH و CSH است.

گفتنی است بازتاب‌های آهک (مصرف نشده) تنها در الگوهای ارزیابی پراش پرتو ایکس نمونه‌های اصلاح‌شده تا ۴۵ روز مشاهده می‌شود و شدت قله‌های مربوط به آهک با گذشت زمان کاهش می‌یابد. آهک اضافه‌شده به تدریج با گذشت زمان مصرف شده است. مصرف آهک اضافه‌شده پیشرفت واکنش پوزولانی بین آهک و خاک رس برای تولید یک ماده‌ی معدنی جدید (هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدرات کلسیم آلومینات (CAH)) را نشان می‌دهد. با بررسی منحنی‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد آهک مشاهده می‌شود درحالی که شدت قله کانی‌های اسمکتیت، ایلیت و کائولینیت به شدت کاهش یافته است، اما بازتاب‌هایی از تشکیل کلسیم آلومینات هیدراته مشاهده نمی‌شود. این امر را می‌توان با بیان این واقعیت که هم‌هی کلسیم ناشی از آهک اضافه‌شده ممکن است به وسیله‌ی پولک‌های اسمکتیت برای تبادل کاتیونی جذب شده باشند توجیه کرد.



شکل (۱۰-الف). تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از خاک واگرا



شکل (۱۰-ب). تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از نمونه بهسازی شده با آهک پس از هفت روز عمل‌آوری

[10] Basma, A.A., Tuncer, E.R., "Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays", Transportation Research Record, 1991, 1295, 52-61.

[11] Mallela, J., Quintus, H. V., and Smith, K. "Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design", The National Lime Association, 2004.

[12] Alper, S., Gozde, I., Recep, Y.H., Kambiz, R., "Utilisation of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", Building and Environment, 2006, 42 (2), 150-155.

[13] Eades, J.L., Grim, R.E., "A quick test to determine lime requirements for soil stabilization", Highway Research Record, 1966, 139, 61-72.

[14] Basma A.A., Tuncer E.R. "Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays", Transportation research record, 1992, 1295, 52-61.

[15] Afès, M., Didier, G., "Stabilization of expansive soils: the case of clay in the area of Mila (Algeria)", Bulletin of Engineering Geological Environment, 2000, 59 (1), 75-83.

[16] American Society for Testing and Materials., ASTM, American Society for Testing, 1984.

[17] EPA,. "Process design manual, land application of municipal sludge, Municipal Environmental Research Laboratory", EPA-625/1-83-016, U.S. Government Printing Offices, New York, 1983.

Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards, P.A., 1992. Philadelphia V.4, 08.

[18] Eltantawy and Arnold, I.N. Eltantawy and Arnold, P.W., "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimation of clays", Soil Sci, 1973, 24, pp. 232-238.

[19] Handershot, W. H., and Duquette, M., "A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations", Soil Sci. Soc. Am. J. 1986, 50, pp. 605-608.

[20] Ouhadi. V.R., Yong. R.N., "Experimental and theoretical evaluation of impact of clay microstructure on the quantitative mineral evaluation by XRD analysis", Elsevier Appl. Clay Sci. J. 2003, 23. pp 141-148.

[21] Ouhadi, V.R., "Study of transformation of clay minerals in the interaction process with additives by use of scanning electron microscope and XRD and its relation to mechanical behaviour", Iran. J. Crystallogr. Mineral. 2002, 10 (1), 87-97.

[22] Al-Mukhtar, M, Lasledj, A., Alcover, Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C, Applied Clay Science 50 (2010) 191-198.

[23] Al-Mukhtar, M, Lasledj, A., Alcover, J., Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C, Applied Clay Science 50, 191-198.

(۶) بر اساس نتایج pH، EC و آنالیز پراش پرتو ایکس نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی بر اساس آزمون pH و EC می‌تواند به شرح جدول (۴) باشد.

جدول (۴) نرخ رشد واکنش‌های پوزولانی

محدوده تغییرات		نرخ رشد
EC (mS/cm)	pH	
$4 \leq EC \leq 7$	$12.2 \leq pH \leq 12.7$	سریع $\geq (20\%)$
$3.5 \leq EC \leq 4$	$12.0 \leq pH \leq 12.2$	ملایم $\geq (7\%)$
$2.5 \leq EC \leq 3.5$	$11.8 \leq pH \leq 12.0$	کند $\geq (3\%)$

۵. قدردانی

مؤلفین این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا برای تهیه بخشی از مواد و وسایل این پژوهش تشکر نمایند.

۶. مراجع

- [1] Ouhadi, V. R. & Goodarzi, R. V. "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", Engineering Geology, 2006. Vol. 85: 91-101.
- [2] Al-Rawas, A.A. Hago, A.W., Al-Sarmi, H., "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", Building and Environment, 2005, 40 (5), 681-687.
- [3] Al-Mukhtar, M, Lasledj, A., Alcover, J., "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C", Applied Clay Science 2010. Vol, 50, 191-198.
- [4] Mitchell, I. V., "Pillared Layered Structures: Current Trends and Applications", 2005. Elsevier Applied Science.
- [5] Yong, R. N., Sethi, A. J., Ludwig, H. P. & Jorgensen, M. A., "Physical chemistry of dispersive clay particle interaction", American Society of Civil Engineers, Chicago, 1978, 1-21.
- [6] Sherard, J. I., Dunnigan, L. P. & Decher, R. S., "Some engineering problems with dispersive soils", ASTM, STP, 1977, No. 623: 3-12.
- [7] Sherard, J. I., Dunnigan, L. P. & Decher, R. S., "Identification and nature of dispersive soil", Journal of Geotechnical Engineering Division, 1976, Vol. 102: 287-301.;
- [8] Yong, R. N. & Warkentin, B. P., "Soil properties and behaviour",. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- [9] Thompson, M. R. "Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures.", Highway Research Record, Washington, D.C., 1966, 139, 1-14.

Microstructural Assessment of Lime Consumption Rate and Pozzolanic Reaction Progress of a Lime-Stabilized Dispersive Soil

V.R. Ouhadi^{*1}, M. Amiri², M. Zangene³

1. Prof., Bu-Ali Sina University, Faculty of Engineering, Iran

2. Assistant Professor, Hormozgan University, Faculty of Engineering, Iran

3. Master Student, Bu-Ali Sina University, Faculty of Engineering

vahidouhadi@yahoo.com

Abstract:

The existence of soft clay and dispersive soft clay at the site of engineering structures is regarded as one of the geotechnical problems. This study is performed on silty soft clay that according to the experimental results showed 100% dispersivity potential. Due to the low bearing capacity of this type of soil in the site, the slaked lime was used to stabilize the soil geotechnical properties, to increase its strength, to decrease plasticity behaviour of soil, and to overcome its dispersive properties. The main goal of the present study is to determine the growth rate and progress of lime-soil pozzolanic reactions in short and long terms from micro- and macro- structural point of view, as well as the measurement of the consumed lime rate over the time and its effect on mechanical parameters of the stabilized soil. The results of this study allow determining the minimum percentage of the lime that is necessary to react with clay minerals for making an acceptable change in long-term properties of stabilized soil. Since the hydration of cement produces lime, one would expect that a main element of the soil-cement interaction process can be studied in terms of interactions between lime and clay minerals. The addition of lime or cement to clay minerals and clayey soils – i.e. soils with a significant proportion of clay minerals – in the presence of water produces both short term and long-term reactions. In this regard, a number of tests carried out with different percentages (0 to 10 percent) of hydrated lime. The pH, electric conductivity (EC), unconfined compressive strength, and lime consumption rate determination by X-ray diffraction analysis were the tests used in this study to observe the progress of lime reaction with clay. In order to determine the microstructural and mineralogical changes, and reaction products formed in the modified soil, X-ray diffraction (XRD) evaluation and scanning electron microscopy images have been used. Among the most important results of the present study, this paper propose a simple criterion for the onset of pozzolanic reactions and determination of the consumed lime rate during the pozzolanic reaction process based on pH and electric conductivity measurements. Based on the results from pH, EC, XRD, and unconfined compressive strength (UCS) tests, the pozzolanic reaction occurs at $EC \geq 4$ mS/cm. Following that, the formation of new components such as calcium silicate hydrate (CSH) and calcium aluminate hydrate (CAH) causes an increase in soil strength. Over the time, with the reduction of $EC \leq 4$ mS/cm and $pH \leq 12.4$, the progress rate of pozzolanic reaction and the progress rate in soil strength suspend. The results show that for the dispersive soil around 3-4% lime is sufficient for its short-term reaction, which includes cation exchange. Based on the achieved results, the use of 6% lime for stabilization of sample gives $EC \geq 4.0$ mS/cm and $pH \geq 12$ after the first 14 days period. The unconfined compressive strength of the stabilized sample increased around 10 times in the same period, while only 5% increase in strength observed after 14 days ($EC \leq 4.0$ mS/cm and $pH \leq 12$).

Keyword: Electric Conductivity (EC), XRD, pH, Lime, Dispersive Soil.