

# تأثیر آب دریا بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس تثبیت شده با آهک و مواد پوزولانی

المیرا احمدی<sup>۱</sup>، مهدی اثنی‌عشری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه بوعلی سینا

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

\*esna\_ashari@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۰۴/۰۴]

## چکیده

خاک‌های رسی معمولاً دارای ظرفیت باربری کم، تراکم پذیری زیاد و مشکلات انقباض و تورم هستند. تثبیت شیمیایی با افزودن موادی مانند آهک یکی از روش‌های رایج بهبود کیفیت و اصلاح این نوع خاکهاست. رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی تا حدودی به ویژگی‌های شیمیایی آب منفذی بستگی دارد. معمولاً در آزمایشگاه از آب شرب برای تأمین رطوبت موردنیاز خاک استفاده می‌شود و این امر سبب تفسیر نادرست از خواص مهندسی خاک در شرایط استفاده از آب‌های خاص می‌شود. در این مطالعه برای تثبیت خاک رس کائولینیت از مقادیر مختلف آهک، پوزولان، آب مقطر و همچنین آب‌های دارای املاح که از دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه ارومیه تهیه، و استفاده شده است. مقادیر به کار رفته از آهک و پوزولان در ساخت نمونه‌ها ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نسبت به وزن خشک خاک است. مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای که در زمان‌های ۳، ۷ و ۱۴ روزه عمل‌آوری شده‌اند با استفاده از آزمایش تک‌محوری آزمایش و بررسی شدند. نتایج حاصل مبین آن است که مقاومت تک‌محوری نمونه‌های فاقد مواد افزودنی که با آب دریا ساخته شده‌اند نسبت به نمونه‌های حاوی آب مقطر بهبود یافته و همچنین در حالتی که از مواد افزودنی استفاده شده است، مقاومت نمونه‌های حاوی آب دریای خزر و خلیج فارس نسبت به نمونه‌های آب مقطر بیشتر و مقاومت نمونه‌های حاوی آب دریاچه ارومیه نسبت به نمونه‌های آب مقطر کمتر است. در نهایت نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده روی آب‌ها مبین آن است که املاح موجود به ترتیب در آب دریاچه ارومیه، خلیج فارس و دریای خزر بیشتر است.

**واژگان کلیدی:** تثبیت، آب دریا، مقاومت تک‌محوری، خاک رسی

## ۱- مقدمه

روش‌های بهسازی با آهک و سیمان سالها مورد توجه بوده‌اند و در سراسر دنیا توسعه یافته‌اند. برای انتخاب یک ماده تثبیت‌کننده، جنس خاک منطقه، شرایط محیطی و خصوصیات تثبیت‌کننده عوامل تعیین‌کننده هستند. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تثبیت خاک‌های ریز دانه با آهک صورت گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نشانگر افزایش مقاومت و مدول

روش‌های بهسازی زمین، راهکارهایی هستند که مهندس ژئوتکنیک برای حل مشکل زمین سست یا ضعیف از آن‌ها بهره می‌گیرد [1]. امروزه به دلیل محدودیت زمین، لزوم اجرای سازه‌های سنگین، طرح‌های رقابتی و ساخت‌وساز سریع، فرآیند بهسازی زمین گسترش یافته است [2].

از آزمایش تک‌محوری آزمایش و بررسی شدند.

## ۲- واکنش‌ها در تثبیت خاک رس

هنگامی که آهک و خاک رس با هم مخلوط شوند و در معرض رطوبت قرار بگیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ می‌دهد که شامل تبادل کاتیون، کلوخه شدن<sup>۱</sup>، واکنش پوزولانی و کربناتاسیون<sup>۲</sup> است [13].

تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزو واکنش‌های اولیه هستند که بلافاصله بعد از اختلاط رخ می‌دهند. این واکنش‌ها موجب تغییرات سریع در نشانه خمیری، کارپذیری و کسب مقاومت می‌شوند و فولوکوله شدن و کلوخه شدن ذرات با نزدیک شدن ذرات به یکدیگر همراه است. اصلاح خاک توسط آهک موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه، کاهش پتانسیل تورم، افزایش مقاومت و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود [4, 14].

پوزولان‌های طبیعی یا مصنوعی موادی هستند که به سهولت و با هزینه کم و بدون هرگونه کار اضافی برای آماده‌سازی آن‌ها، می‌توانند به کار برده شوند، ضمن آن‌که اغلب موادی که به نام پوزولان‌های مصنوعی شناخته می‌شوند، مواد زائد حاصل از فرآیند تولید در کارخانه‌های صنعتی است و موادی هستند که معمولاً دور ریخته می‌شوند [8]. پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال است. از انواع پوزولان‌های مصنوعی می‌توان خاکستر زغال سنگ، میکروسیلیکا، سرباره و خاکستر پوسته برنج را نام برد. در این پژوهش از پوزولان‌های طبیعی استفاده شده است. از پوزولان‌ها می‌توان به منظور کاهش فضای خالی درون توده خاک به عنوان یک ماده افزودنی پرکننده (فیلر) و یا یک ماده تثبیت‌کننده شیمیایی استفاده کرد [15]، لیکن به منظور افزایش مقاومت آنی و درازمدت و همچنین دوام این مخلوط‌ها، معمولاً از ترکیب پوزولان-آهک برای تثبیت خاک‌ها استفاده می‌شود [6].

الاستیسیته و همچنین کاهش شاخص خمیری خاک بوده است [3, 4, 5]. استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی نیز در تثبیت خاک‌های ریزدانه مورد توجه پژوهشگران بوده است. این مواد به تنهایی تأثیری در تثبیت خاک ندارند لکن سیلیس فعال موجود در آنها ضمن واکنش با هیدروکسید کلسیم با ایجاد ترکیبات سیمانی ذرات خاک را به هم می‌چسبانند. در مورد تأثیرانواع مواد پوزولانی توام با آهک بر بهبود رفتار خاک‌های رسی نیز مطالعات متعددی به وسیله پژوهشگران بعمل آمده و نتایج حاصل بیانگر بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌ها مانند سختی و مقاومت و کاهش نفوذپذیری و تورم خاک بوده است [6, 7, 8]. در صورتی که خاک دارای سولفات باشد و یا در معرض آب سولفات قرار بگیرد، واکنش‌های آهک و خاک رس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طبیعت این واکنش‌ها به تمرکز یون‌های فلزی موجود در سولفات‌ها و همچنین میزان آلومینا و سیلیکای موجود در خاک بستگی دارد و می‌تواند بر رفتار مهندسی خاک‌های رسی تثبیت‌شده با آهک تأثیر بگذارد [9]. به همین دلیل تأثیراملاح آب بر مشخصه‌های مهندسی خاک‌های ریز دانه نیز از مواردی است که مطالعه شده است. از جمله عوامل بررسی شده می‌توان به مقاومت برشی، حدود اتبرگ و آثار تحکیم اسمزی بر میزان تغییر حجم و پتانسیل تورم و همچنین تغییرات نفوذپذیری خاک اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعات نشانگر آن است که خواص مهندسی رس‌ها به ویژه مقاومت و تراکم پذیری آنها تحت تأثیر ترکیبات سیال حفره‌ای است [10, 11, 12].

شایان ذکر است با وجود مطالعاتی که در خصوص تأثیر املاح آب منفذی بر مشخصه‌های خاک‌های ریزدانه صورت گرفته لکن در مورد خاک‌هایی که با آب‌های محلی حاوی املاح مانند آب دریا و دریاچه و افزودن آهک توام با پوزولان تثبیت می‌شوند مطالعات چندانی صورت نگرفته است. در این راستا در این مطالعه آزمایشگاهی برای تثبیت خاک رس کائولینیت از مقادیر مختلف آهک، پوزولان، آب مقطر و همچنین آب‌های دارای املاح که از دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه ارومیه تهیه شده استفاده، و مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای که در زمان‌های مختلف عمل‌آوری شده‌اند با استفاده

1 Flocculation-agglomeration

2 Carbonation

افزودن نمک‌های NaCl و CaCl<sub>2</sub> در تثبیت خاک با آهک مانند کاتالیزور و شتاب‌دهنده عمل می‌کند. این واکنش‌ها باعث تسریع در گیرش و سخت‌شدگی خاک می‌شوند. حضور یون‌های سدیم، رویه‌ی تجزیه و انحلال سیلیکا را در برهم کنش خاک-آهک تسریع می‌کند. تأثیر کلرید کلسیم مشابه کلرید سدیم است. اما برخی آثار متفاوت مانند افزایش نفوذپذیری از آن در تثبیت خاک دیده می‌شود. کلرید سدیم در تشکیل کانی‌های جدید حاصل از تثبیت خاک رس با آهک، ویژگی‌های کانی‌شناسی خاک تثبیت‌شده را در مقایسه با کلرید سدیم بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد [18].

با وجود نمک‌ها، کاتیون‌های موجود در ساختار خاک لخته‌ای شده و به رس اجازه انجام بهتر واکنش‌های پوزولانی با آهک را می‌دهند. از طرف دیگر نمک‌ها باعث مجتمع‌شدن ساختار خاک می‌شوند. به دنبال این دو رفتار، مخلوط آهک-نمک مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که نمک در کاهش فضای حفره‌ای بین ذرات رسی تنش مؤثری دارد [19].

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پروژه از خاک رس کائولینیت، آهک، پوزولان، آب مقطر و آب‌های حاوی املاح (دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه ارومیه) استفاده شده است.

#### ۳-۱- خاک رس

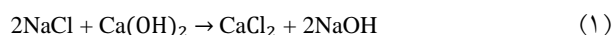
در این پروژه برای انجام آزمایش‌ها از خاک رس کائولینیت استفاده شده است. این خاک رس که نام تجاری آن ارش زنوز است از کارخانجات چینی‌سازی شهر لاله‌جین همدان تهیه شده است و معدن تولیدی آن در استان آذربایجان شرقی و در حومه روستای زنوز واقع است. از آنجا که ۱۰۰ درصد خاک تهیه شده از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند، برای تعیین دانه‌بندی آن از آزمایش هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM-D422-02 استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی خاک در شکل (۱) آورده شده است. همچنین بر اساس آزمایش

پوزولان‌ها حاوی اکسیدهای سیلیسیم، آلومینوم، آهن و کلسیم هستند و باعث گسترده‌گی کاربرد آهک شده و آثار مخرب سولفات‌ها را جبران می‌کند [6].

تغییر در کیفیت شیمیایی آب منفذی، یا به عبارت دیگر، تغییر در میزان و نوع نمک‌های موجود در خاک (کاهش یا افزایش)، پدیده‌ای است که وقوع آن، در اثر فعالیت‌های مختلف انسان یا به طور طبیعی، اجتناب‌ناپذیر است. به عنوان مثال آنیون‌های سولفات موجود در خاک‌های سولفاته با کلسیم و آلومینای تجزیه شده از آهک و خاک رس ترکیب شده و در نتیجه کانی‌های کریستالی متورم شونده‌ای به نام اترینگایت (Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 26H<sub>2</sub>O) را به وجود می‌آورند [16].

بنابراین شناخت رفتار و عکس‌العمل خاک تحت تأثیر محلول‌ها و مواد مختلف می‌تواند در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری صحیح، مؤثر واقع شود.

در مورد خاک‌های رسی تثبیت‌شده با آهک نیز نمک‌های NaCl و CaCl<sub>2</sub> معمولاً دارای آثار مثبتی هستند. وجود نمک کلرید سدیم سبب افزایش نسبی مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک می‌شود. افزایش مقاومت مشاهده شده در خاک تثبیت‌شده با آهک در حضور کلرید سدیم، ناشی از افزایش pH و حضور نمک سدیمی NaCl است و می‌توان آن را به کمک واکنش زیر توصیف کرد [17].



این واکنش قابلیت انحلال نمک موجود برای واکنش با کلسیم را نشان می‌دهد. محصول به دست آمده، با ترکیب سیلیکات موجود در خاک، موجب ایجاد فرآیند پوزولانی و تولید اجزای سیمانی می‌شود. با افزایش مقاومت خاک بهسازی شده در حضور کلرید سدیم، این دلیل توجیه می‌شود که مخلوط شدن ژل سیلیکات سدیم سریعتر از ژل سیلیکات کلسیم است و کیفیت اجزای سیمانی سریعتر بهبود می‌یابد [12].

که از نوع شکفته و در کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی تهیه شده است. در جدول (۲) درصد ترکیبات مختلف آهک آورده شده است.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی آهک

Compound	Percentage
Na <sub>2</sub> O	0.1
MgO	0.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69
SiO <sub>2</sub>	1.19
SO <sub>3</sub>	0.1
K <sub>2</sub> O	0.1
CaO	71.14
TiO <sub>2</sub>	<0.1
MnO <sub>2</sub>	<0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12
SrO	0.12
L.O.I	25.86

Table 2. Chemical components of lime

### ۳-۳- پوزولان

پوزولان مورد استفاده در این پروژه از کارخانه سیمان ایلام تهیه شده است. جدول (۳) ترکیب شیمیایی پوزولان استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی پوزولان

Compound	Percentage
SiO <sub>2</sub>	61.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.59
CaO	7.01
MgO	1.86
K <sub>2</sub> O	0.98
Na <sub>2</sub> O	1.34
other compounds	8.07

Table 2. Chemical components of pozzolan

### ۴-۱- آب

آب مورد استفاده در این پروژه آب مقطر و آب‌های حاوی املاح است که از دریای خزر (ساحل بابلسر)، خلیج فارس (ساحل بندر دیلم) و دریاچه ارومیه تهیه شده‌اند. برخی از مشخصات آب‌های حاوی املاح در جدول (۴) نشان داده شده است.

تعیین حدود خمیری برای این خاک بر اساس استاندارد ASTM 2216-98، حد روانی ۳۸/۷٪ و حد خمیری ۲۸/۲٪ به دست آمد. با توجه به دانه‌بندی و حدود خمیری، خاک مصرفی طبق طبقه‌بندی یکنواخت از نوع CL (رس با خاصیت خمیری کم) است. همچنین مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نیز به ترتیب ۱۵/۸ و ۱۹/۶٪ به دست آمدند.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول (۱) آورده شده است.

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک

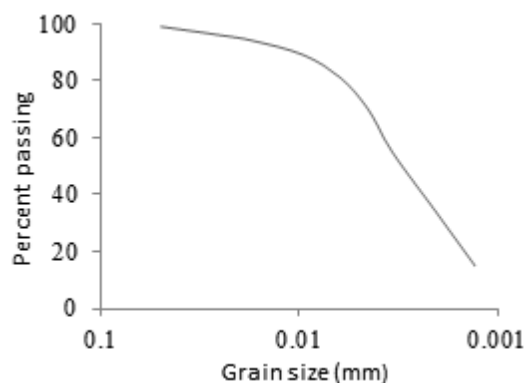


Fig. 1. Particle size distribution curve

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی خاک

Soil Classification	CL
Liquid Limit (%)	38.7
Plastic Limit (%)	28.2
Plasticity Index (%)	10.5
Specific Gravity (G <sub>s</sub> )	2.65
Maximum dry density	15.8

Table 1. Physical properties of soil

### ۳-۲- آهک

اگرچه آهک زنده به علت دارا بودن CaO بیشتر، تأثیر بیشتری در تثبیت خاک نسبت به آهک هیدراته دارد ولی واکنش‌های آهک زنده با آب همراه با تولید گاز CO<sub>2</sub> و دما است که برای سلامتی انسان زیان‌آور است. پس کارکردن با آهک هیدراته ایمن‌تر است، بنابراین کاربرد آن در صنعت مرسوم‌تر است. آهک مصرفی در این پروژه، آهک صنعتی است

آزمایش‌های انجام شده برای تعیین مشخصات آب‌ها بر اساس استاندارد ASTM و دستورالعمل انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشگاه مگ‌گیل کانادا صورت گرفته است. آزمایش  $pH$  با استفاده از دستگاه  $pH$  سنج مدل (HANNA-Hi 9321) اندازه‌گیری شد. همچنین تعیین مقادیر املاح موجود در فاز مایع، به وسیله دستگاه جذب اتمی مدل (GBC 932 AB Plus)، در آزمایشگاه تحقیقاتی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، اندازه‌گیری شد.

## ۵- تفسیر نتایج

در این قسمت در خصوص نتایج آزمایش‌های انجام شده بحث و بررسی می‌شود. شایان ذکر است برای اختصار، نامگذاری نمونه‌ها در جداول و منحنی‌ها از علائم اختصاری استفاده شده است.

S= South (خلیج فارس) N= North (خزر)

D = Distilled (مقطر) U = Urmieh (ارومیه)

Poz = Pozzolan (پوزولان) I = Lime (آهک)

### ۵-۱- نتایج آزمایش‌های تراکم

آزمایش‌های تراکم به روش استاندارد (پراکتور) انجام شده است. در شکل‌های (۲ و ۳) تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه در برابر درصد پوزولان و در صد آهک‌های مختلف ترسیم شده است.

شکل ۲. تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر در برابر مقادیر مختلف

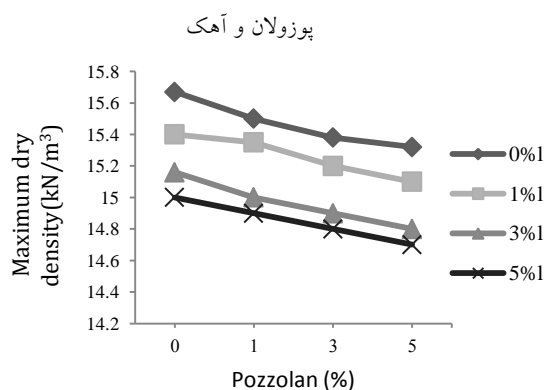


Fig. 2. Maximum dry density vs. different amounts of pozzolan and lime

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های مشخصات املاح نمونه‌های آب

Water Properties	Caspean sea	Persian Golf	Urmia Lake
pH	8.39	7.87	6.88
$SO_4^{2-}$ (ppm in 1:10 S:W)	2280	2480	22300
EC (mS/cm)	18.7	64.6	177.9
Na (ppm)	9168.3	2953.6	16212.1
K (ppm)	266.5	36.8	1179.9
Mg (ppm)	1553.9	612.2	1909.2
Ca (ppm)	254	232	106

Table 4. The test results of salts properties of water sampels

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. دستگاه آزمایش تک‌محوری مورد استفاده در سرعت‌های بارگذاری مختلف قابلیت اعمال بار تا ۵۰ کیلونیوتن را دارا است و چگونگی انجام آزمایش به صورت کرنش-کنترل است که روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۷ و ارتفاع ۸۰ میلی‌متر انجام شده (ASTM D5102) و برای ساختن نمونه‌ها از لوله P.V.C به عنوان قالب استفاده شده است. به منظور آماده نمودن نمونه‌ها برای هر ترکیب ابتدا وزن خاک رس و مواد افزودنی (آهک و پوزولان) با توجه به بیشینه وزن مخصوص خشک خاک که از آزمایش تراکم بدست آمده تعیین شده پس از آن خاک و مواد افزودنی به خوبی با یکدیگر مخلوط شده و آب بهینه کم کم به مخلوط اضافه شده است. بعد از اختلاط کامل، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت داخل کیسه نایلونی زیپ‌دار قرار داده شده و سپس هر یک از نمونه‌های آماده شده تا رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر در قالب استوانه‌ای در چهار لایه متراکم شده است. قبل از تراکم هر لایه با ایجاد خراش در لایه قبلی سعی شد تا درگیری مناسبی بین لایه‌ها ایجاد شود. شایان ذکر است برای کمینه کردن صدمات وارد شده به نمونه حین بیرون آوردن از قالب، جدار داخلی لوله با وازلین روغن‌کاری شده است. در مرحله بعد نمونه‌ها برای عمل آوری درآون با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد قرار داده شده و پس از زمان‌های ۳، ۷ و ۱۴ روز با استفاده از دستگاه به آهستگی از قالب خارج و بر اساس ضوابط ASTM D 2166 آزمایش شدند.

روزه که در آن‌ها از مواد تثبیت کننده (آهک و پوزولان)، استفاده نشده و با رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک ساخته شده بود، مشاهده می‌شود. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در حالتی که از تثبیت کننده استفاده نمی‌شود مقاومت نمونه‌هایی که در آن‌ها از آب‌های حاوی املاح استفاده می‌شود بیشتر از زمانی است که از آب مقطر استفاده شده است. در این حالت مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها به ترتیب برای نمونه حاوی آب ارومیه ۶۵۷ کیلو پاسکال، خلیج فارس حدود ۵۸۰ کیلو پاسکال، آب خزر ۴۱۹ کیلو پاسکال و برای آب مقطر ۴۰۳ کیلو پاسکال است. با توجه به این مقادیر نمونه‌های حاوی آب دریاچه ارومیه نسبت به دیگر نمونه‌ها مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند.

شکل ۴. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بدون آهک و پوزولان با ۷ روز عمل آوری

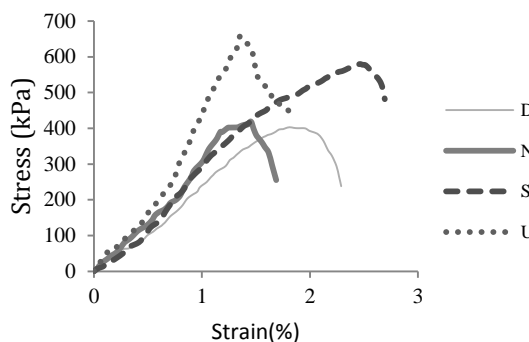


Fig. 4. Stress – Strain curves of specimens without lime and pozzolan for 7 days curing time

با توجه به اینکه EC آب ارومیه بیشتر از دو نمونه دیگر و همچنین نمونه آب جنوب بیشتر از نمونه آب شمال است، این امر موجب کاهش ضخامت لایه دوگانه شده که باعث افزایش مقاومت می‌شود.

اصولاً هنگام تماس خاک با آب‌های دارای غلظت زیاد از نمک با کاتیون‌های چند ظرفیتی، بسته به میزان تخلخل رس و غلظت آب و نوع کاتیون‌های آن، رفتار رس حالت غشای تراوا و نیمه تراوا داشته و دو پدیده می‌توانند همزمان اتفاق بیفتند. یکی انتشار یون‌ها به داخل رس و دیگری خروج آب ذرات خاک به دلیل گرادیان اسمزی، که منجر به تحکیم اسمزی می‌شود. در

شکل ۳. تغییرات رطوبت بهینه در برابر مقادیر مختلف پوزولان و آهک

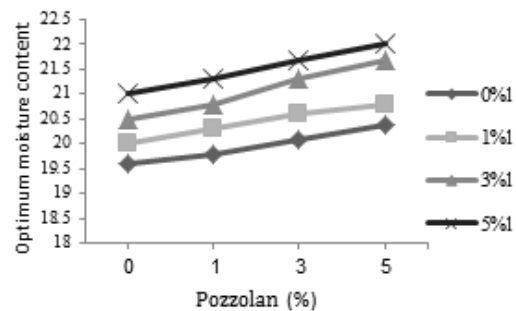


Fig. 3. Optimum moisture contents vs. different amounts of pozzolan and lime

چنانچه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، افزودن آهک و مواد پوزولانی به خاک رس باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش میزان رطوبت بهینه در یک انرژی ثابت می‌شود. اضافه شدن آهک به خاک رس موجب لخته شدن ذرات رس می‌شود. در اثر به وجود آمدن این ذرات لخته، عمل تراکم سخت‌تر شده و ذرات برای لغزش و حرکت آسان‌تر روی یکدیگر به آب بیشتری احتیاج دارند و همین باعث افزایش رطوبت بهینه می‌شود. با افزودن همزمان پوزولان و آهک به خاک رس به دلیل افزایش واکنش‌های آنی (تبادل کاتیونی) میان آهک و پوزولان، لخته شدن ذرات نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فضای خالی میان ذرات ناشی از لخته شدن، آب بیشتری برای پر کردن آنها مورد نیاز است. علاوه بر آن با افزایش درصد پوزولان، جذب آب سطحی توسط ذرات پوزولان به علت نرمی زیاد آن افزایش می‌یابد که این دو عامل موجب افزایش درصد رطوبت بهینه می‌شود. علاوه بر این در واکنش پوزولانی، CaO هیدراته شده و باعث جذب مقدار مشخصی از آب می‌شود. با افزایش رطوبت بهینه آب کم کم جای ذرات خاک را گرفته که به دلیل وزن حجمی کمتر آب نسبت به مصالح مصرفی، حداکثر دانسیته خشک کاهش می‌یابد. همچنین چگالی ذرات آهک و پوزولان نیز کمتر از چگالی خاک است و همین باعث کم شدن وزن مخصوص مخلوط می‌شود.

۵-۲- تأثیر املاح آب دریا بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های فاقد آهک و پوزولان

در شکل (۴) منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های ۷

شکل ۶. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی آب دریای خزر با ۳ درصد پوزولان و درصد‌های مختلف آهک و عمل‌آوری ۱۴ روز

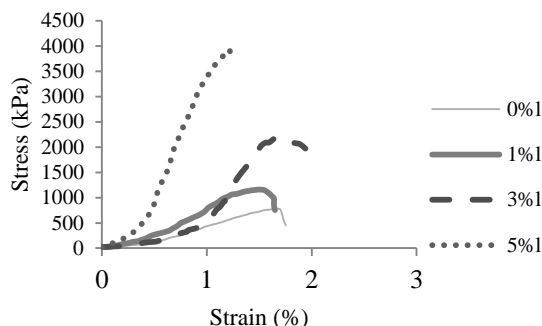


Fig. 6. Stress – Strain curves of specimens with Caspian sea water and 3% pozzolan and different amounts of lime for 14 days curing time

شکل ۷. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی آب خلیج فارس با ۳ درصد پوزولان و درصد‌های مختلف آهک و عمل‌آوری ۱۴ روز

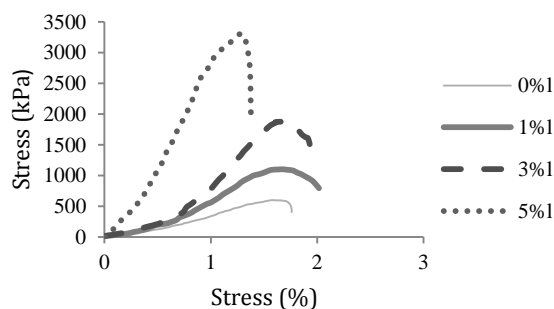


Fig. 7. Stress – Strain curves of specimens with Persian gulf water and 3% pozzolan and different amounts of lime for 14 days curing time

شکل ۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی آب دریاچه ارومیه با ۳ درصد پوزولان و درصد‌های مختلف آهک و عمل‌آوری ۱۴ روز

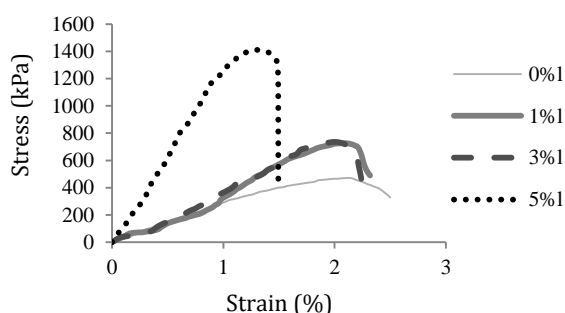


Fig. 8. Stress – Strain curves of specimens with Urmia lake water and 3% pozzolan and different amounts of lime for 14 days curing time

در واقع غلظت یون سولفات در ترکیب آب ارومیه بسیار زیاد است. این امر سبب می‌شود که هنگام افزودن آهک و پوزولان

نتیجه، کاهش ضخامت لایه دوگانه و میزان آب جذب شده به کانی‌ها سبب ایجاد پیوندهای یونی قوی بین ذرات رسی شده و چسبندگی شدیدی به وجود می‌آید. هنگامی که آب منفذی رقیق باشد، پیوندهای شیمیایی ضعیف‌تر بوده و احتمالاً تبادل پذیرند و توسعه لایه دوگانه سبب تورم و واگرایی ذرات شده و در نتیجه سبب کاهش چسبندگی و اصطکاک بین ذرات می‌شود. همچنین پژوهشگران نشان داده‌اند که جریان آب خروجی از خاک فقط در رس‌های با تخلخل کم و در محلول‌های رقیق می‌تواند قابل توجه باشد ولی در نسبت تخلخل بیشتر خاک و غلظت‌های بالاتر محلول عامل تعیین کننده حرکت یون‌ها به درون خاک است [11].

۳-۵- تأثیر املاح آب دریا بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های حاوی آهک و پوزولان

در شکل (۵) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی ۳ درصد آهک و فاقد پوزولان برای انواع نمونه آب نشان داده شده است و در شکل‌های (۶ تا ۸) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های حاوی ۳ درصد پوزولان و درصد‌های مختلف آهک برای انواع آب جداگانه بررسی شده است. نمونه‌های مورد نظر با رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ساخته شده است.

شکل ۵. نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها با ۳ درصد آهک و ۷ روز عمل‌آوری

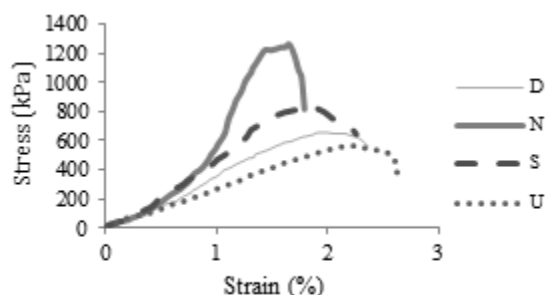


Fig. 5. Stress – Strain curves of specimens with 3% lime and 7 days curing time

همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود مقاومت نمونه‌های آب دریاچه ارومیه نسبت به بقیه نمونه‌ها کمتر و نمونه آب دریای خزر بیشترین مقدار است.

درصد پوزولان در دوره‌های عمل‌آوری ۳ روزه نشان داده شده است.

شکل ۹. تأثیر آهک بر مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بدون پوزولان و

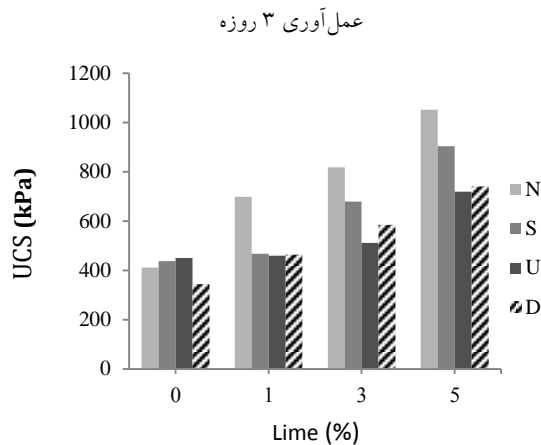


Fig. 9. UCS values of specimens stabilized with different amounts of lime (without pozzolan) for 3 days curing time

شکل ۱۰. تأثیر آهک بر مقاومت تک‌محوری نمونه‌های حاوی ۳ درصد پوزولان و

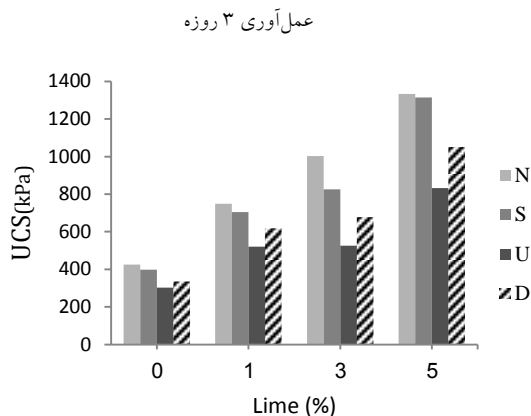


Fig. 10. UCS values of specimens stabilized with different amounts of lime and 3% pozzolan for 3 days curing time

در این نمودارها با افزایش درصد آهک، مقاومت افزایش می‌یابد. با افزایش درصد آهک، pH محیط بالا می‌رود، محیط قلیایی ایجاد شده توسط یون‌های کلسیم، باعث حل شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها شده، این ترکیب‌ها با یون‌های  $\text{OH}^-$  ترکیب شده و  $\text{Al}(\text{OH})_3$  و  $\text{Si}(\text{OH})_3$  را تولید می‌کنند. سپس این هیدروکسیدها با یون‌های کلسیم ترکیب شده و سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته را تشکیل می‌دهند که باعث سخت‌شدن و افزایش مقاومت مخلوط می‌شود [22].

به نمونه‌های رس، در صورت استفاده از آب دریاچه ارومیه به دلیل زیاد بودن یون سولفات در ترکیب‌های آن، شرایط تشکیل کانی اترینگایت فراهم شود و موجب کاهش مقاومت شود. تشکیل کانی اترینگایت زمانبر نبوده و معمولاً بین ۳ تا ۷ روز است [20] و با توجه به دوره نگهداری نمونه‌ها در این پژوهش (۳، ۷ و ۱۴ روز)، احتمال تشکیل کانی اترینگایت وجود دارد. از طرفی غلظت یون سدیم در نمونه آب ارومیه بسیار زیاد است و شاید بتوان این موضوع را دلیل دیگری بر کاهش مقاومت بیان کرد، زیرا بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش‌های قبلی، سدیم در غلظت‌های کم موجب ساختار پراکنده<sup>۱</sup> و در غلظت زیاد موجب ساختار مجتمع (درهم)<sup>۲</sup> می‌شود. از طرفی از یک مقدار به بعد غلظت بیشتر سدیم موجب ایجاد ساختار پراکنده گروهی<sup>۳</sup> می‌شود که کاهش مقاومت را به دنبال دارد [21]. از طرفی pH آب ارومیه ۶/۸۸ است که نسبت به نمونه‌های آب خزر و خلیج فارس و حتی آب مقطر کمتر است و از آنجا که واکنش‌های درازمدت پوزولانی با افزایش pH و حل شدن بخشی از کانی‌های رسی و سیلیکا و آلومینای خاک صورت می‌گیرد، بنابراین شرط انجام این واکنش‌ها افزایش pH است و به دلیل کمتر بودن pH آب ارومیه واکنش‌های پوزولانی در درصدهای یکسان و شرایط مشابه، در نمونه‌های حاوی آب دریاچه ارومیه نسبت به نمونه‌های حاوی آب دریای خزر و خلیج فارس، دیرتر انجام می‌گیرد. شایان ذکر است که در مطالعات گذشته کمینه مقدار pH لازم برای شروع واکنش‌های بلندمدت در فرآیند تثبیت ۱۲/۴ گزارش شده است [2]. غلظت کاتیون دو ظرفیتی کلسیم در آب دریاچه ارومیه نسبت به آب دریای خزر و خلیج فارس کمتر است که خود عاملی برای کاهش مقاومت است.

۴-۵- تأثیر آهک بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

در شکل‌های زیر، نمودارهای مقاومت فشاری تک‌محوری در برابر درصد آهک مربوط به نمونه‌های حاوی صفر و ۳

- 1 Dispersed & Deflocculated
- 2 Dispersed & Flocculated
- 3 Agglomerated & Deflocculated



درصد پوزولان افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار پوزولان، به دلیل جذب کلسیم محلول در واکنش‌های مقاومتی میان آهک با سیلیس موجود در پوزولان میزان افزایش مقاومت بیشتر شده، به گونه‌ای که بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه‌های حاوی ۵ درصد آهک و ۵ درصد پوزولان دیده می‌شود.

#### ۵-۶- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های آب دریای خزر و آب مقطر با درصدهای ۳ و ۵ درصد آهک و درصدهای مختلف پوزولان بررسی می‌شود.

شکل ۱۳. تغییرات مقاومت فشاری یک محوری در برابر زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های حاوی آب دریای خزر و ۳ درصد آهک

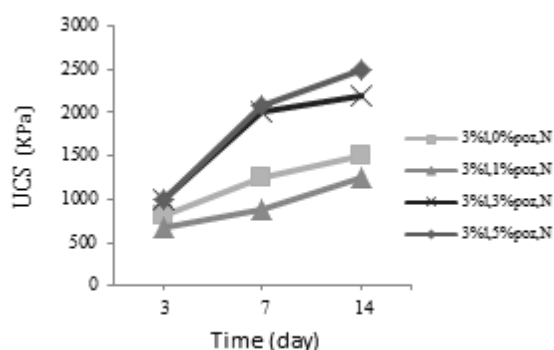


Fig. 13. Unconfined compressive strength vs. curing times for specimens with Caspian sea water and 3% lime

شکل ۱۴. تغییرات مقاومت فشاری یک محوری در برابر زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های حاوی آب مقطر و ۵ درصد آهک

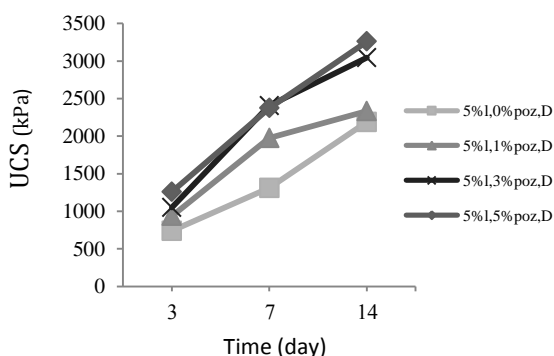


Fig. 14. Unconfined compressive strength vs. curing times for specimens with distilled water and 5% lime

۵-۵- تأثیر پوزولان بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نمودارهای مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های حاوی ۰ و ۵ درصد آهک در برابر مقادیر پوزولان، در دوره عمل‌آوری ۳ روزه نشان داده شده است.

شکل ۱۱. تأثیر پوزولان بر مقاومت یک محوری نمونه‌های بدون آهک و

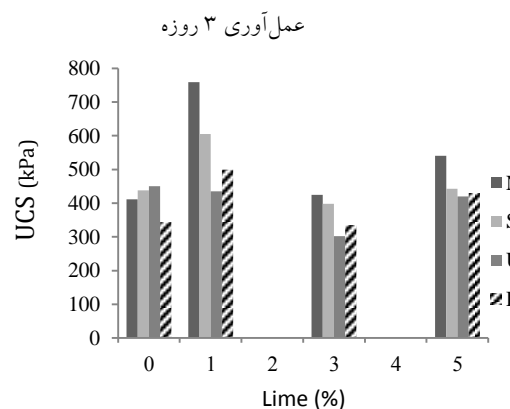


Fig. 11. UCS values of specimens with different amounts of pozzolan (without lime) for 3 days curing time

شکل ۱۲. تأثیر پوزولان بر مقاومت یک محوری نمونه‌های حاوی ۵ درصد آهک و عمل‌آوری ۳ روزه.

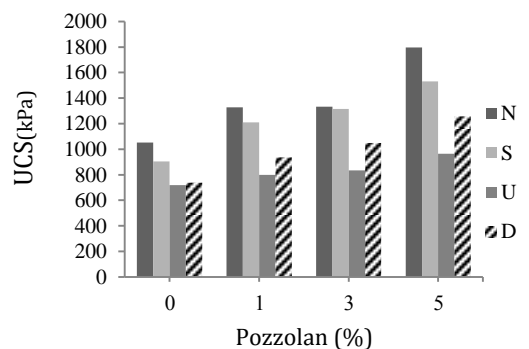


Fig. 12. UCS values of specimens with different amounts of pozzolan and 5% lime for 3 days curing time

با افزودن پوزولان به خاک در نمونه‌های بدون آهک، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های حاوی ۱ درصد پوزولان مقداری افزایش و با اضافه کردن بیشتر پوزولان مقاومت نمونه‌ها در مقایسه با خاک اولیه کاهش می‌یابد. با اضافه شدن پوزولان به خاک، به علت نبود آهک، پوزولان به‌عنوان مواد اضافی در خاک باقی‌مانده و چسبندگی محیط خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۵ درصد آهک، مقاومت نمونه‌ها با افزایش

است که در زمان‌های عمل‌آوری مختلف به‌وجود می‌آید.

## References

## ۷-مراجع

- [1] Ahmed, A., , "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled basanite". *Applied Clay Science*, No. 104, 2015.pp: 27-35.
- [2] Ouhadi,V.R., Amiri, M., , "interaction of nano-clays and Cu contaminant in geo-environmental projects", *International Journal of Environmental Science and Technology*,No. 16, 2014a. pp: 78-87.
- [3] Akinlabi ola, S,"The potentials of lime stabilization of lateric soils " *Journal of Engineering Geology* 11(4), 1977,pp :305-317
- [4] 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 Environmental*. 40(5), 2005, pp: 681-687.
- [5] Alper, S, Gozde, I, Reecep, Y.H, Kambize ,R, " Utilisation of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay" *Building Environmental*, 42(2), 2006,pp:150-155
- [6] Sezer ,A., Gozde, I., Yilmaz, R.H., Ramyar, K., "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", *Journal of Building and Environment*, Vol. 41,2006, pp: 150-155.
- [7] Beegly, G.H.," Recent experiences with lime – fly ash stabilization of pavement subgrade soils,base and recycled asphalt " *Proceeding of International Ash Utilization Symposium* ,Lexington ,Ky, 0-967 4971 -5-9, 2003,pp:435-452
- [8] Ramezanin poor,A.,"Effect of pozzolanic cement on concrete durability " *Bilding and Housing Research Center*, No.274,1976 (In Persian)
- [9] Grim, R.E., , *Clay Mineralogy*, 2<sup>nd</sup> edn., New York, McGraw Hill, 1968.pp:596.
- [10] Yukselen – Aksoy, Y, Kaya, A, and Oran, A.H, " Sea water effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays" *Engineering Geology* ,102, 2008,pp:54-61
- [11] Alamdar,S.,"Long term effect of salty water on clayey soil" M.S.C thesis ,Tarbiat Modares Univ.1398(In Persian)
- [12] Kabir,A.,"Effect of calcium chloride on unconfined compressive strength of fine grained soil with calcium choioride" M.S.c thesis, Islamic Azad Univ. 2008(In Persian)
- [13] Kang, G., Tsuchida, T., Athapaththu, A.M., "Strength mobilization of cement treated dredged clay during the early stages of curing. *Soils and Foundations*".No. 55, 2, 2015,pp: 372-392.
- [14] Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.F., "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C *Applied Clay Science*".No. 50, 2010,pp: 191-198.
- [15] Bajaj.K., Pandey.B., singh.A.P., "Soil Stabilization Using Pozzolanic Material And Jute Fibre". *Proceeding of Indian Geotechnical Conference*, 2013.

چنانچه در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار آهک شیب نمودارها به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در نمونه‌های با ۵ درصد پوزولان، با افزایش میزان آهک، مقاومت نمونه‌های ۱۴ روزه نسبت به نمونه‌های ۳ و ۷ روزه افزایش چشمگیری دارد، این امر به‌دلیل افزایش واکنش‌های پوزولانی با افزایش مقدار آهک است و از آنجا که این واکنش‌ها زمانبر هستند، شیب منحنی‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

## ۶-نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف آهک و پوزولان و استفاده از آب مقطر، آب دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه ارومیه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- با افزودن مقادیر مختلف آهک و پوزولان به خاک وزن مخصوص خشک بیشینه کلیه نمونه‌ها در مقایسه با خاک اولیه، کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.
- ۲- در نمونه‌هایی که در آنها از افزودنی آهک و پوزولان استفاده نشده، نمونه‌های حاوی آب دریاچه ارومیه، دریای خزر، خلیج فارس و آب مقطر به ترتیب بیشترین مقاومت تک‌محوری را به‌خود اختصاص داده‌اند. بدین معنی که نمونه‌های آب دریاچه ارومیه بیشترین مقاومت و نمونه حاوی آب مقطر کمترین مقاومت را ایجاد می‌کنند.
- ۳- در نمونه‌هایی که از آهک و پوزولان استفاده شده است نمونه‌های دارای آب دریای خزر، خلیج فارس، آب مقطر و دریاچه ارومیه به‌ترتیب بیشترین مقاومت را به‌خود اختصاص داده‌اند.
- ۴- در نمونه‌های دارای آهک با افزایش مقدار پوزولان، شیب نمودار تنش-کرنش افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌ها در اثر افزایش پوزولان است.
- ۵- افزایش زمان عمل‌آوری، باعث افزایش قابل توجه مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به ویژه در نمونه‌های با مقدار بیشتر آهک می‌شود، این موضوع به‌علت فعل و انفعالات انجام گرفته بین خاک، آهک و پوزولان و تشکیل ژل‌های سیمانی

- [20] Amiri, M., "Micro - structurel and Geotechnical study of soft clayey soil stabilization and heavy metal retention in stabilization /solidification at the presence of micro and nano - clay particles " Ph.D thesis , Bu - Ali Sina Univ. 2014 (In Persian)
- [21] Ouhadi, V. R., and A. R. Goodarzi. "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum." *Engineering geology* 85, No. 1 2006: 91-101.
- [22] Ouhadi, V.R., Amiri, M., Zangene, M., "Microstructural assessment of lime consumption rate and pozzolanic reaction progress of a lime-stabilized dispersive soil", *Modares journal of technical & civil engineering* , in press. 2014b.
- [16] Lee, D.J., Fenton, A., Gillam, T.M., Wiles, C.C., "Stabilization and Solidification of hazardous and radioactive wastes", ASTM STP 1123, ASTM, Philadelphia, 1992, pp. 348.
- [17] Davidson, D.T., Mateos, M., Barnes, H.F., "Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives", *HRB Bull*, Vol. 262, 1960, pp: 33-50.
- [18] Ingles, O.G., Metcalf, J.B., "Soil Stabilization Principles and Practice", Vol. 11, No. Textbook. 1972.
- [19] Kostanant, S., Onitsuka, K., Negami, T., "Influence of salt additive in lime stabilization on organic clay", *Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society*, 2006, pp: 95-101.

# Effect of Sea Water on Unconfined Compressive Strength of Clayey Soil Stabilized with Lime and Pozzolan

E. Ahmadi<sup>1</sup>, M. Esna ashari<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Eng., Buali sina University

2- Assistant Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., Buali sina University

\*esna\_ashari@basu.ac.ir

## Abstract:

Clayey soils usually have low bearing capacity, high compressibility, shrinkage and swell characteristics. Several methods have been adopted to improve the geotechnical properties of such soils. Soil stabilizing by chemical materials is one of the most common methods for treating fine grained soils. Lime has been used to improve some mechanical and plastic properties of fine grained soils since many years ago. In recent years, some studies have also been carried out to investigate the influence of adding pozzolany materials on the geotechnical properties of lime-treated clayey soils. Geotechnical behavior of clayey soils depends on chemistry of pore fluid. When drinking water is used to provide the needed moisture of soil in the laboratory, it will lead to incorrect interpretation of engineering properties of soil, where specific water such as sea water is utilized. Therefore, if the brackish water has been used to provide soil moisture, it is necessary to examine the behavioral characteristics of the materials by the same water. For example, the presence of some sulphates in the soil stabilized with lime, leads to problems such as the reduction of strength and increase of swelling in clay. In this laboratory study, the effect of sea water on the strength of stabilized kaolinite has been investigated by conducting several unconfined compression tests. The specimens were prepared at four percentages of lime and pozzolan (i.e.0%,1%,3%,5%) by weight of dry soil and distilled water, and three saline water samples taken from the Caspian Sea, Persian Gulf and Urmia Lake. for every combination, the weight of each material was determined precisely, based on the optimum moisture content and maximum dry density obtained from the standard proctor compaction test. Clay and lime and pozzolan were mixed properly in dry condition, and water was added gradually. Afterwards, the mixtures were kept in plastic bags for 24 hours. Weight of each specimen was determined in accordance with given specific volume and obtained maximum dry density from compaction test. This weight was divided into four portions, and each portion was compacted in 20 mm layer in a PVC mold. The specimens were cured in an oven at a temperature about 35 °C for 3, 7 and 14 days. After each curing time an extruder was used to remove the specimens from the molds vertically with constant rate to avoid bending and formation of tensile cracks. Thereafter, the specimens were immediately tested under strain, controlled at constant loading rate of 1.0 mm per minute, according to the requirements of ASTM D 2166. For each combination, three specimens were examined to assure repeatability of results. The results of conducted experiments indicate that unconfined strength of samples without additives (lime and pozzolan) prepared by sea water are higher than specimens containing distilled water. For the samples containing Urmia lake water, the unconfined strength was higher than that in the other samples. Also, for the specimens in which additive has been used, the strength of the samples containing Caspian Sea and Persian Gulf water were more than that with distilled water, and the strength of samples containing Urmia lake water was less because of differences in salts concentrations in water samples. Finally, the results show that water minerals are higher in Urmia lake, Persian Gulf and Caspian Sea, respectively.

**Keywords:** Stabilization, Sea water, Unconfined strength, Clay soil