

## تغییرات حدود پلاستیک خاک رس تثبیت شده با آهک

وحید تائبی<sup>۱\*</sup>، احمدرضا محبوبی اردکانی<sup>۲</sup>، محمد حاجی ستوده<sup>۳</sup> و مهدی نیکزاد<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

vtaebi@stud.pwut.ac.ir

چکیده: تغییرات دامنه خمیری خاک رس در اثر افزودن آهک به عوامل مختلفی همچون نوع و درصد آهک، درصد رطوبت عمل‌آوری اختلاط، زمان عمل‌آوری، نوع و درصد کانی‌های خاک رس و pH محیط بستگی دارد. یکی از مهمترین این عوامل نوع کانی‌های خاک رس می‌باشد. خاک رس متشکل از کانی‌های مختلفی از جمله کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت و ... است که روند تغییرات دامنه خمیری در صورت تغییرات درصد کانی‌های موجود در خاک مورد تثبیت متفاوت خواهد شد. مقایسه نتایج آزمایش‌ها با تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که روند تغییرات حد خمیری در اثر افزودن آهک به خاک رس در اکثر کانی‌های رسی افزایشی است. اما روند تغییرات حد روانی متفاوت می‌باشد به طوریکه در بعضی کانی‌ها افزایشی و در بعضی دیگر کاهش‌ی خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نشانه خمیری با افزایش درصد رطوبت عمل‌آوری اختلاط افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: درصد آهک، درصد رطوبت عمل‌آوری اختلاط، زمان عمل‌آوری، دامنه خمیری، خاک رس

### *Plastic Limit Variations of Lime-Stabilized Clay Soil*

V. Taebi, A. Mahboubi, M. Hajisotoudeh and M. Nikzad

**Abstract:** Plastic limit variations of stabilized clay soil depend upon different factors including lime type and percentage, curing moisture content, curing time, type and percentage of clay soil minerals and soil-lime mixture pH. Among these, clay soil mineral type (i.e. soil mineralogy) is one of the most important factor. Clay soil consists of various minerals including kaolinite, montmorillonite, illite etc. Plastic limit variations routine would change duo to changes in mineral combination of clay soil under stabilization. The obtained results of present study indicate that plastic limit variations routine is ascending due to lime addition to clay soil for most of the minerals. Liquid limit variations, however, are different and it can be either ascending some minerals or descending for the others. Furthermore, the obtained results show that the higher the mixture curing moisture content, the higher the plasticity index.

**Keywords:** Lime Percentage, Mixture Curing Moisture Content, Curing time, Plasticity Limit, Clay Soil.

۱ - مقدمه

توانایی آهک در ایجاد تغییرات حدود پلاستیک خاک‌ها توسط بسیاری از محققین گزارش شده است. افزودن آهک به خاک رس بر ضخامت لایه آبدار اطراف ذرات خاک رس اثر می‌گذارد و همین امر منجر به تغییرات حدود پلاستیک می‌شود. معمولاً حد روانی با افزایش درصد آهک اختلاط کاهش می‌یابد [۱، ۲ و ۳] و حد خمیری افزایش می‌یابد [۳، ۴ و ۵]. بسیاری از نتایج خاک رس افزایش حد خمیری را نشان داده است [۶]. بنابراین مقدار نشانه خمیری با افزایش آهک کاهش می‌یابد [۲، ۳ و ۵]. با این وجود، در بعضی موارد، آهک اضافه شده به خاک نتیجه‌ای برعکس بر عملکرد خاک گذاشته است. افزایش در حد روانی و نشانه خمیری نشان می‌دهد که خاک تثبیت شده با آهک می‌تواند، باعث افزایش خمیری خاک گردد [۷، ۸ و ۹]. در بیشتر موارد اثر آهک بر پلاستیسیت خاک رس کم و بیش به صورت آنی است، تبادل کاتیونی سبب کاهش در

پلاستیسیت، شکنندگی خاک و آسان شدن کار با آن می‌گردد. ذرات رس در طی کلوخه شدن درشت دانه‌تر می‌شوند و شبیه دانه‌های سیلتی رفتار می‌کنند. تغییرات پلاستیسیت تا حدود زیادی به نوع کانی غالب خاک رس بستگی دارد. ویژگی‌های مختلفی که کانی‌ها در خاک‌های رسی ایجاد می‌کنند، شاید به خاطر تفاوت در فعالیت سطح ذرات رس است. کانی‌های متورم شونده به مانند مونتموریلونیت ظرفیت تبادل یونی بالایی از خود نشان می‌دهند، در حالی که کانی‌های غیر متورم شونده به مانند کائولینیت قابلیت تبادل یونی نسبتاً کمی دارند [۸].

Bell در سال ۱۹۹۶ جهت تعیین قابلیت تبادل یونی کائولینیت و مونتموریلونیت به همراه درصد‌های مختلف آهک با استفاده از روش Buchanan و Gallaway در سال ۱۹۶۴ آزمایش‌هایی را انجام داد. ترکیبات شیمیایی کائولینیت و مونتموریلونیت که در این آزمایش‌ها استفاده شده‌اند در جدول ۱ آمده است.

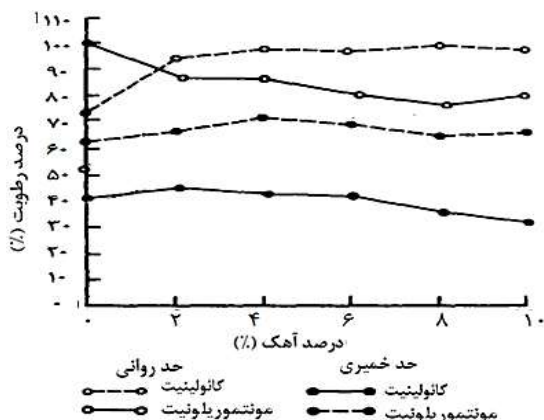
جدول ۱: ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی کائولینیت و مونتموریلونیت [۸]

مونتموریلونیت	کائولینیت	ترکیبات شیمیایی
۶۰٪/۴	۴۷٪	SiO <sub>2</sub>
۱۹٪/۲	۳۸٪/۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱٪/۱	۰٪/۸	K <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> O
۱٪/۷	۰٪/۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
-	-	TiO <sub>2</sub>
۱٪/۹	-	CaO
۵٪/۶	-	MgO
۸/۰ ± ۶/۵	۰ ± ۵/۵	PH در ۱۰ درصد جامد
۱۲۰-۸۰	۱۶-۲	ظرفیت تبادل یونی (mec/100 g)
مونتموریلونیت	کائولینیت	خصوصیات فیزیکی
۲۴٪	۶٪	اندازه ذرات ۰/۰۶ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر
۷۶٪	۹۴٪	اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر
۲/۶۳	۲/۵۷	چگالی ویژه
۱۱۴	۷۵	حد روانی (%)
۶۷	۴۲	حد خمیری (%)
۴۷	۳۳	نشانه خمیری (%)
۰/۴۷	۰/۳۵	فعالیت رس
۱۲۷	۳۵۰	مقاومت فشاری محصور نشده (kPa)
۲۶	۳۵	مدول الاستیک (MPa)
۲۰	۲۹/۵	درصد رطوبت بهینه (%)
۱/۲۹	۱/۴	وزن مخصوص خشک حداکثر (Mg/m <sup>3</sup> )
۹	۱	CBR

سیمان، ساروج و عملکرد گرمایی را روی پتانسیل ترمی خاک‌های منبسط شونده Al-Khod ارزیابی کردند. در بخشی از کار آنها تغییرات حدود اتربرگ بر اثر افزودن موارد اشاره شده را مورد بررسی قرار دادند. آنها خاک را با ۳، ۶ و ۹ درصد آهک، سیمان و ساروج مخلوط کردند. همچنین درصد ثابت آهک (۳٪ و ۵٪)، به علاوه درصدهای مختلف سیمان با خاک مخلوط کردند. حد روانی همه نمونه‌های بهسازی شده به جز نمونه‌های بهسازی شده با ۵٪ آهک + سیمان یک افزایش اولیه با افزایش ۳٪ تثبیت گر و به دنبال آن یک کاهش تدریجی را نشان می‌دهد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: قابلیت تبادل یونی در کائولینیت و مونتموریلونیت [۸]

ظرفیت تبادل یونی (meq/100g)		درصد آهک (%)
مونتموریلونیت	کائولینیت	
۸۸	۴	۰
۸۰	۱۲	۲
۵۶	۹	۴
۶۶	۹	۶
۶۲	۱۰	۸
۷۳	۱۰	۱۰



شکل ۱: تغییرات حد خمیری و روانی برای کائولینیت و مونتموریلونیت در درصدهای مختلف آهک [۸]

نمونه‌های بهسازی شده با ۳٪ سیمان، ۳٪ آهک و ۳٪ ساروج یک افزایش اولیه را در نشانه خمیری نشان می‌دهد. هر چند، با افزایش بیشتر، نشانه خمیری به تدریج کاهش یافت. به عبارت دیگر، نمونه‌های عمل آمده با ترکیبات سیمان و آهک یک کاهش اولیه را در ۳٪ آهک + ۳٪

نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشخص است قابلیت تبادل یونی در مونتموریلونیت با افزایش درصد وزنی آهک تا ۸ درصد کاهش یافته ولی از آن به بعد دوباره افزایش می‌یابد. در حالی که قابلیت تبادل یونی کائولینیت با اضافه کردن ۲ درصد آهک افزایش می‌یابد و با ۴ درصد آهک کاهش یافته است و از آن به بعد تقریباً ثابت می‌شود. Bell در سال ۱۹۹۶ همچنین برای بررسی ارتباط قابلیت تبادل یونی با تغییرات پلاستیسیته خاک ترکیب شده با آهک آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ را بر کانی‌های مونتموریلونیت و کائولینیت رس انجام داد و نتیجه گرفت که کاهش اولیه تبادل یونی با اضافه کردن آهک به مونتموریلونیت با کاهش پلاستیسیته آن همراه است. پلاستیسیته زمانی که آهک به کائولینیت اضافه می‌شود لزوماً کاهش نمی‌یابد و تغییرات آن به مانند مونتموریلونیت نیست. این تفاوت رفتاری در پلاستیسیته کائولینیت احتمالاً به خاطر تفاوت در قابلیت تبادل یونی آن است.

حد خمیری با افزایش آهک تا ۴ درصد برای مونتموریلونیت افزایش می‌یابد و از آن به بعد به آرامی کاهش می‌یابد (شکل ۱). حد خمیری با افزایش آهک بیش از ۲ درصد به کائولینیت کاهش می‌یابد.

وقتی ۲ درصد آهک با کائولینیت ترکیب می‌شود، مقدار حد روانی افزایش می‌یابد. این چنین افزایشی شاید به علت واکنشی است که یون‌های هیدروکسید برای اصلاح پیوستگی سطوح ذرات رس با آب انجام می‌دهد [۱۱]. به علاوه آهک اضافی باعث افزایش در مقدار حد روانی می‌گردد.

با تغییرات حد روانی و حد خمیری برای کائولینیت یک افزایش در نشانه خمیری مشاهده می‌شود. در مقابل با افزایش مقدار آهک در مونتموریلونیت مقدار حد روانی کاهش می‌یابد. بنابراین فعالیت یون‌های هیدروکسید در خاک‌های متورم شونده محسوس نمی‌باشد. کاهش در حد روانی و افزایش در حد خمیری باعث کاهش قابل توجهی در نشانه خمیری مونتموریلونیت می‌گردد.

Amer Ali و همکارانش در سال ۲۰۰۴، تحقیقی تحت عنوان اثر آهک، سیمان و ساروج (پوزولان ساختگی) روی پتانسیل تورم یک خاک متورم‌شونده از عمان انجام دادند. در این تحقیق آن‌ها تأثیر آهک، سیمان، ترکیبات آهک و

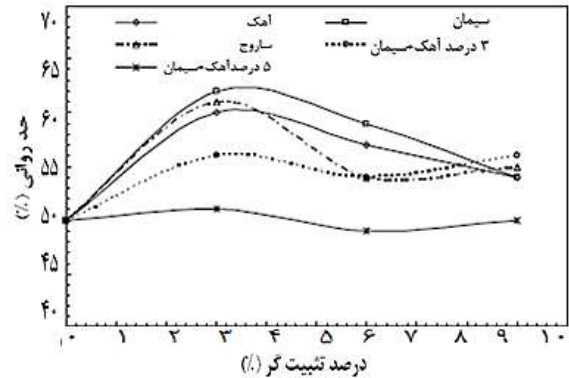
بیشتر از بقیه نمونه‌هاست. نمونه RS ۱۰۰٪ بعد از کاهش با افزایش حد روانی مواجه شده است.

جدول ۳: حدود اتربرگ خاک‌های استفاده شده در آزمایش‌های Sujit و Monowar در سال ۲۰۱۲

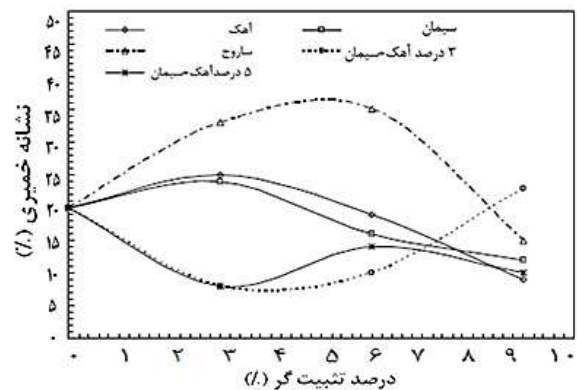
خاک	حد روانی (%)	حد پلاستیک (%)	نشانه خمیری (%)
100%ES	۴۵۹/۹	۵۳/۷	۴۰۶/۲
80%ES+20%RS	۳۵۱/۹	۴۹/۴	۳۰۲/۵
60%ES+40%RS	۲۴۸/۲	۳۸/۱	۲۱۰/۱
40%ES+60%RS	۱۷۸/۸	۳۰/۷	۱۴۸/۱
20%ES+80%RS	۹۹/۲	۲۸/۷	۷۰/۵
100%RS	۴۵/۳	۲۵/۹	۱۹/۴

Sujit و Monowar علت افزایش حد روانی در تحقیقاتشان را چند فاکتور اعلام کردند. در حقیقت مقدار pH خاک با اضافه کردن حدود ۳ درصد آهک به ۱۲/۳ افزایش می‌یابد. در این محیط قلیایی با pH بیشتر از ۱۲، ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده (CSH) شکل می‌گیرد، که محصولات هیدراتاسیون و آب جذب سطحی به صورت فیزیکی را شامل می‌شود. این آب به عنوان آب ژل نامیده می‌شود و در بین ذرات هیدراته شده خاک واقع می‌گردد. میزان آب ژل به مقدار بیش از ۲۸ درصد کل ژل تخمین زده شده است [۱۴]. به علاوه مقدار زیادی از آب موجود در لایه دوگانه اطراف ذرات خاک رس به علت اینکه وارد واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی با ذرات هیدراته شده‌اند، کاسته می‌شود و بنابراین مقدار حد روانی را افزایش می‌دهد. افزایش حد روانی در خاک RS که مقدار بیشتری سیلیکات در آن موجود است، نسبت به خاک SE بیشتر است، زیرا مقدار بیشتری از ژل CSH در آن شکل می‌گیرد. آنها همچنین به این موضوع اشاره داشته‌اند، که با افزایش مدت عمل‌آوری اختلاط خاک با آهک واکنش‌های پوزولانیک شکل می‌گیرد، که مقدار آب ژل را افزایش می‌دهد و باعث افزایش حد روانی می‌گردد. ضمناً افزایش مقدار pH مقدار بار منفی را افزایش می‌دهد و باعث لخته شدن ذرات خاک رس می‌گردد [۱۵]. در این صورت ساختار نسبتاً متخلخل بوجود آمده ناشی از لخته‌سازی

سیمان و ۵٪ آهک + ۳٪ سیمان نشان دادند که با یک افزایش کلی با افزودنی‌های بیشتر دنبال شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: تأثیر افزایش تثبیت گر بر حد روانی [۱۲]

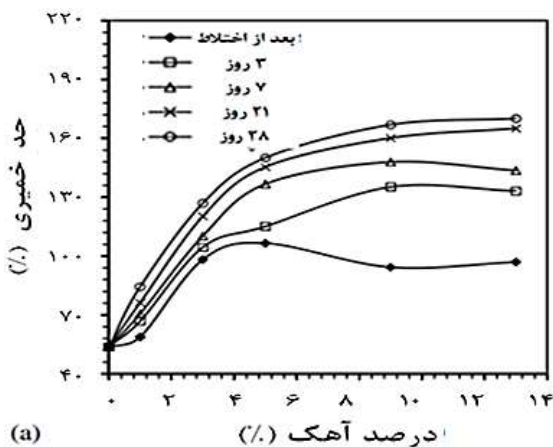


شکل ۳: تأثیر افزایش تثبیت گر بر نشانه خمیری (Amer Ali et al., 2004)

Sujit و Monowar نیز در سال ۲۰۱۲ در یک مطالعه به بررسی تغییرات حدود اتربرگ بر ۶ نوع خاک با حدود اتربرگ متفاوت که در جدول ۳ آمده است پرداختند. آنها این تغییرات را برای ۵ درصد مختلف آهک و برای روزهای ۱، ۳، ۷، ۲۱ و ۲۷ بررسی کردند. ۶ نمونه مورد بررسی در آزمایش‌های آنها از ترکیبات مختلف دو نوع خاک ES و RS ساخته شده‌اند. کانی‌های غالب ES مونتموریلونیت، کوارتز و آلومینیوم اکسید و کانی‌های غالب RS کائولینیت، کوارتز و آهن است. کوارتز (SiO<sub>2</sub>) موجود در خاک RS تقریباً دو برابر خاک ES است. روند تغییرات حد روانی برای سه نمونه ES ۱۰۰٪، RS ۱۰۰٪ و ES ۴۰٪ + RS ۶۰٪ در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در همه نمونه‌ها یک کاهش اولیه در حد روانی وجود دارد. این کاهش در نمونه ES ۱۰۰٪ (خاک ۱۰۰٪)

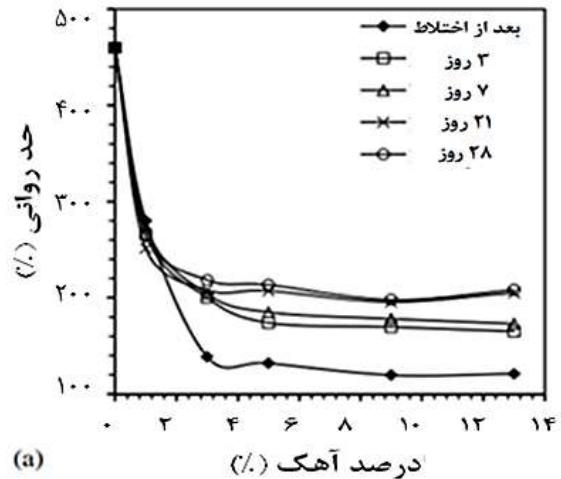
<sup>1</sup>-Gel Water

مطالعات Sujit و Monowar بر حد خمیری نشان داد که با افزایش درصد آهک اختلاط مقدار حد خمیری افزایش می‌یابد. روند تغییرات حد خمیری برای نمونه‌های ES ۱۰۰٪ و RS ۱۰۰٪ در شکل ۵ و ۶ قابل مشاهده است. روند تغییرات چهار نمونه دیگر هم روندی بین همین دو نمونه را داشتند. آنها علت این پدیده را با توجه به تعریف حد خمیری توجیه کردند. با توجه به اینکه حد خمیری معیاری از چسبندگی بین ذرات در مقابل ترک خوردگی است. در این صورت چسبندگی و بنابراین مقاومت برشی بین ذرات خاک باید به قدری کم باشد که ذرات بتوانند به آرامی بر هم بلغزند و از طرف دیگر مقاومت برشی بین ذرات باید تا حدی زیاد باشد، که توده خاک در موقعیت شکل‌گیری دوباره بعد از ترک خوردگی قرار گیرد. بنابراین حد خمیری معیاری از درصد آب موجود در خاک است که در این درصد مقاومت برشی به مقدار معینی میل می‌کند. حال با توجه به اینکه با اضافه شدن آهک ضخامت لایه دوگانه کاهش می‌یابد و به دنبال آن تمرکز شارژ بوجود آمده در اطراف ذرات، ویسکوزیته آب حفره‌ای را افزایش می‌دهد. در نتیجه مقدار مقاومت برشی افزایش می‌یابد و باعث افزایش سریع در حد خمیری می‌گردد. ضمن اینکه لخته‌سازی ذرات بوجود آمده نیز مقدار مقاومت برشی بین ذرات را افزایش می‌دهد که این نیز باعث افزایش حد خمیری می‌گردد. این افزایش در خاک‌های با سیلیکات بیشتر و همچنین با افزایش دوره عمل‌آوری به علت شکل‌گیری ژل CSH نمایان‌تر است.

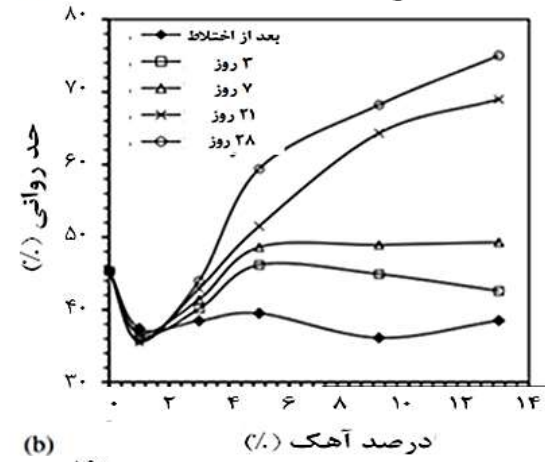


شکل ۵: روند تغییرات حد خمیری ES ۱۰۰٪/۱۳

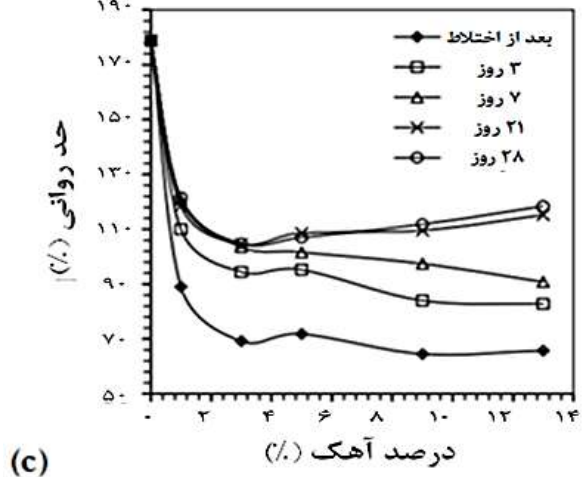
ذرات، آب بیشتری را در خود نگهداری می‌کند و این نیز باعث افزایش حد روانی می‌گردد. Sivapullaiah و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۰ رفتاری مشابه را گزارش کرده‌اند.



(a) درصد آهک (%)



(b) درصد آهک (%)



(c)

شکل ۶: روند تغییرات حد روانی (a) ES ۱۰۰٪، (b) RS ۱۰۰٪ و (c) ES ۴۰٪ + RS ۶۰٪ (Monowar & Sujit, 2012)

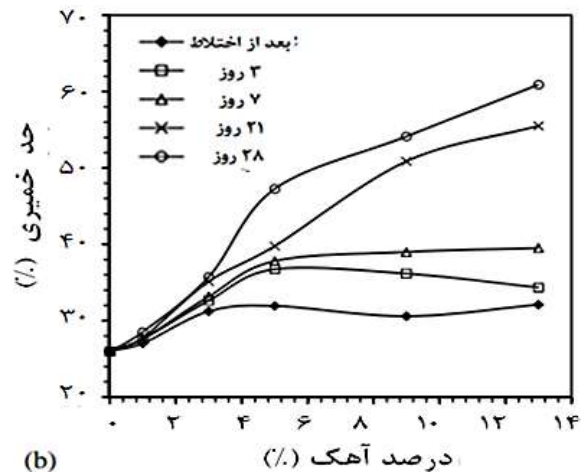
مختلف رطوبت عمل‌آوری شده‌اند، در طول زمان بررسی نماید.

جدول ۴. مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه

۱. ترکیبات شیمیایی (نتایج آزمایش XRF و pH)	
۵۶/۸۱	O
۰/۸۴	Na
۲/۱۷	Mg
۶/۸۵	Al
۱۹/۸۸	Si
۲/۰۷	K
۶/۷۸	Ca
۰/۲۷	Ti
۴/۳۲	Fe
۶/۵	pH
۲. مشخصات فیزیکی اندازه ذرات	
۱۰٪	۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر
۶۵٪	۰/۰۰۲ تا ۰/۱ میلی‌متر
۲۵٪	کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر
۲/۶۱	چگالی ویژه
۳۱/۶	حد روانی (%)
۱۴	حد خمیری (%)
۱۷/۶	نشانه خمیری (%)
۱۲/۵	درصد رطوبت بهینه (%)
۱۹/۹	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m <sup>3</sup> )
CL	نوع خاک

جدول ۵: مشخصات آهک مورد استفاده

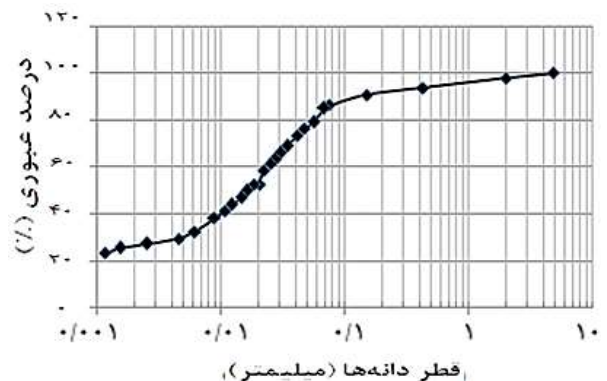
عناصر	درصد وزنی
CaO	۸۰/۱۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۵
Si <sub>2</sub> O	۰/۷۴
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۳
K <sub>2</sub> O	۰/۰۱
MgO	۰/۳۷
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۰۲
MnO	۰/۰۰۱
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۱/۳۲۵
S	۰/۰۰۱



شکل ۶: روند تغییرات حد خمیری RS ۱۰۰٪ [۱۳]

## ۲- خاک مورد مطالعه

در شکل ۷ نمودار دانه‌بندی خاک مورد نظر قابل مشاهده است. حد پلاستیک و حد روانی این خاک به ترتیب ۱۴ و ۳۲ درصد می‌باشد. همچنین خاک جهت تعیین عناصر تشکیل دهنده مورد آنالیز XRF قرار گرفت. نتایج این آنالیز و سایر آزمایش‌های مربوط به تعیین مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۴ آمده است.



شکل ۷: منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

## ۳- آهک مورد استفاده

مشخصات اجزای تشکیل دهنده آهک مورد استفاده در جدول ۵ آمده است. قبل از استفاده از آهک، آن را در اجاق حرارت داده و پس از خشک شدن از الک نمبر ۴۰ عبور داده شد.

## ۴- آزمایش تعیین حدود انقباض

محقق در این مطالعه به دنبال این است که تأثیر تغییرات درصد آهک اختلاط را برای نمونه‌هایی که با درصدهای

۸۰ نمونه است که پس از بسته‌بندی در محل مناسب با شرایط دمایی ثابت و معادل دمای اتاق نگهداری شد. در صورت مشاهده هرگونه اختلاف فاحش و یا پراکندگی در نتایج، آزمایش‌ها تکرار شده‌اند.

بنابراین نمونه‌هایی با درصدهای اختلاط ذکر شده در جدول ۶ تهیه شدند و در روز آزمایش تحت آزمایش حدود تعیین حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D 4318-87 قرار گرفتند. تعداد کل نمونه‌های آماده شده در این تحقیق

جدول ۶: فهرست مخلوط‌های به کار گرفته شده در آزمایش تعیین حدود اتربرگ

شماره نمونه	درصد آهک	درصد رطوبت	مدت زمان عمل‌آوری	دمای عمل‌آوردن (درجه سانتیگراد)
۱	۰/۵	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	دمای اتاق
۲	۱	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	دمای اتاق
۳	۳	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	دمای اتاق
۴	۵	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	دمای اتاق
۵	۷	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	دمای اتاق

## ۵-نتایج

و ۹۰ روز انجام آزمایش تعیین حد خمیری غیر ممکن بود. برای انجام آزمایش تعیین حد خمیری در این نمونه‌ها لازم بود آب زیادی به نمونه مورد نظر اضافه گردد تا بتوان آنرا فتیله نمود اما با این وجود دچار ترک خوردگی می‌شد.

قبل از بررسی نحوه تغییرات حدود اتربرگ ذکر این نکته لازم است که اکثر تحقیقاتی که تاکنون بر خواص خمیری خاک رس تثبیت شده با آهک انجام شده است برای خاک‌های با دامنه خمیری بالا (حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ درصد) است. در این نوع خاک‌ها با توجه به اینکه تغییرات حدود اتربرگ با تغییرات درصد آهک زیاد است، می‌توان از اثر خطاهای موجود در آزمایش صرف نظر کرد و با توجه به روند کلی تغییرات حد روانی و حد خمیری در مورد آنها اظهار نظر نمود. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات Bell در سال ۱۹۹۶ و Sujit و Monowar نیز در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد که به نتایج قابل استنادی در این زمینه رسیده‌اند. اما برای خاک‌های با دامنه خمیری کم به مانند خاک مورد مطالعه (حدود ۱۸ درصد) رسیدن به یک قاعده کلی و نتیجه‌گیری کلی به سختی ممکن است، زیرا درصد خطای آزمایش تعیین حدود اتربرگ به قدری است که اظهار نظر در مورد علت پدیده‌های بوجود آمده را به سختی ممکن می‌سازد و تنها می‌توان به روند کلی تغییرات اکتفا نمود. اما اشاره به این نکته لازم است، که روند تغییرات نتایج به دست آمده از آزمایش‌های این تحقیق به صورتی بوده است که برای نمونه‌های با پارامترهای ثابت مشابه می‌باشد و این موضوع شک مربوط به خطای آزمایش را می‌کاهد.

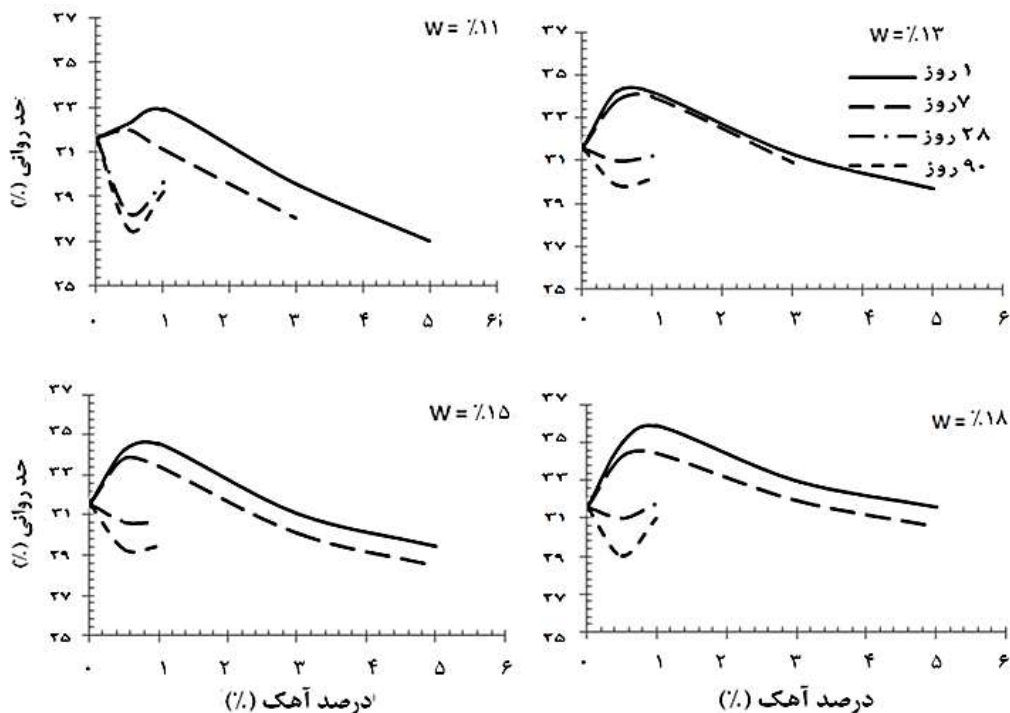
### ۱-۵-تأثیر تغییر درصد آهک در طی زمان بر حدود اتربرگ

نمودارهای شکل ۸ روند تغییرات حد روانی بر حسب درصد آهک را برای نمونه‌های با سن ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز و برای رطوبت‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای نمونه‌های ۱ و ۷ روزه با افزودن ۱ درصد آهک مقدار حد روانی حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد و با افزودن بیشتر آهک از مقدار حد روانی کاسته می‌شود. این روند تغییرات در نتایج آزمایش‌های Amer Ali که در سال ۲۰۰۵ منتشر شده است دیده می‌شود. اما برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه با افزودن ۰/۵ درصد آهک حد روانی کاهش و با افزودن ۱ درصد آهک افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه با ۳ و ۵ درصد آهک و ۷ روزه با ۵ درصد آهک قابل انجام آزمایش تعیین حدود اتربرگ نبودند و مقادیر آنها در نمودار وارد نشده است. روند تغییرات حد روانی برای نمونه‌های با رطوبت ۱۱ و ۱۵ درصد نیز به صورت مشابه است.

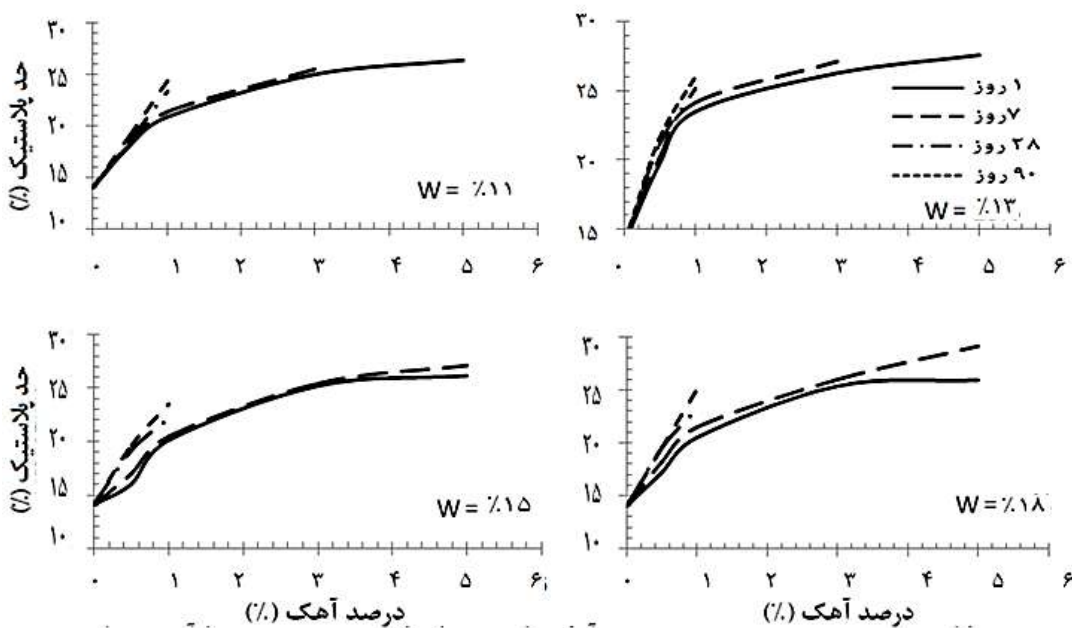
برای نمونه‌های با ۸ درصد آهک و برای تمام روزها و نمونه‌های با ۳ و ۵ درصد آهک با مدت زمان عمل‌آوری ۲۸

خمیری که تابعی از حد خمیری و حد روانی است، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری روند کاهش شاخص خمیری سرعت بیشتری در اثر افزودن آهک می‌یابد.

عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است حد خمیری با افزودن آهک به خاک مورد مطالعه افزایش می‌یابد. شیب تغییرات حد خمیری با افزودن آهک تا ۱ درصد زیاد است و از آن به بعد نرخ افزایش حد خمیری کاهش می‌یابد. نحوه تغییرات نشانه

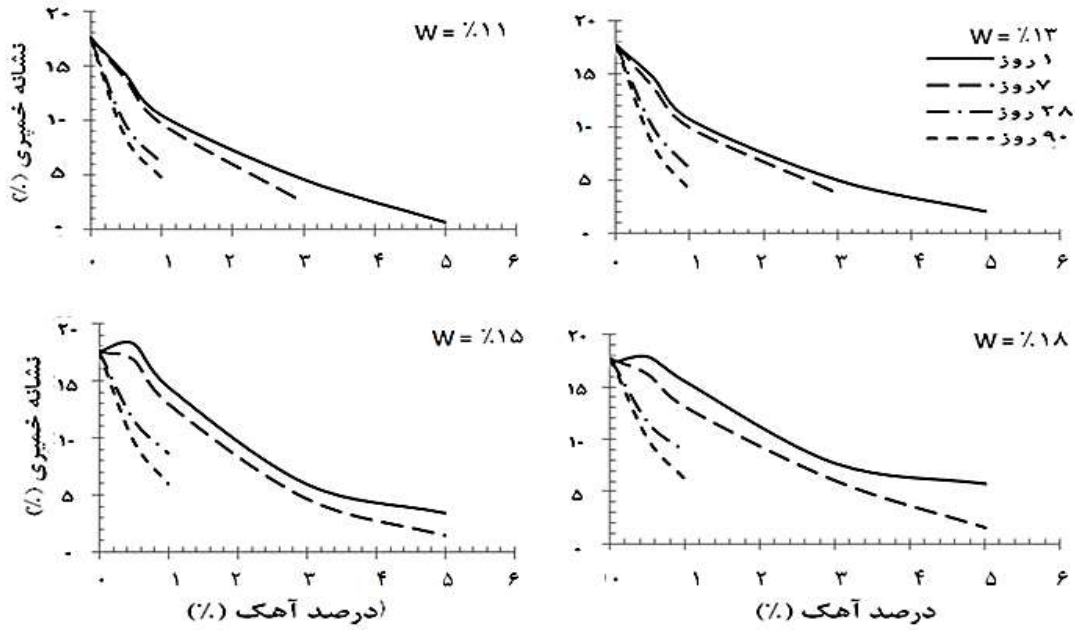


شکل ۸: تغییرات حد روانی نمونه‌های با رطوبت عمل‌آوری مختلف و برای زمان‌های مختلف



شکل ۹: تغییرات حد خمیری بر حسب درصد آهک برای نمونه‌های با رطوبت و زمان‌های عمل‌آوری مختلف

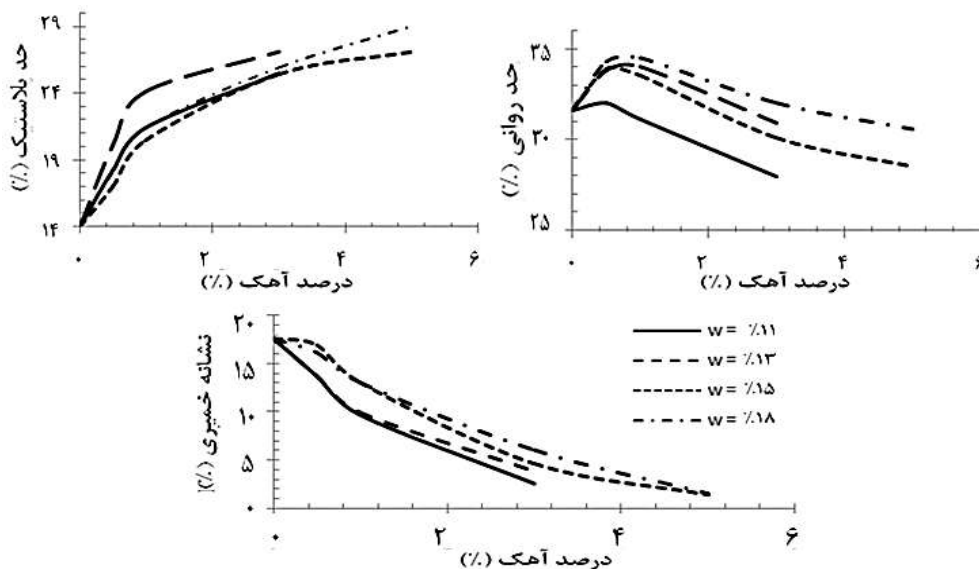




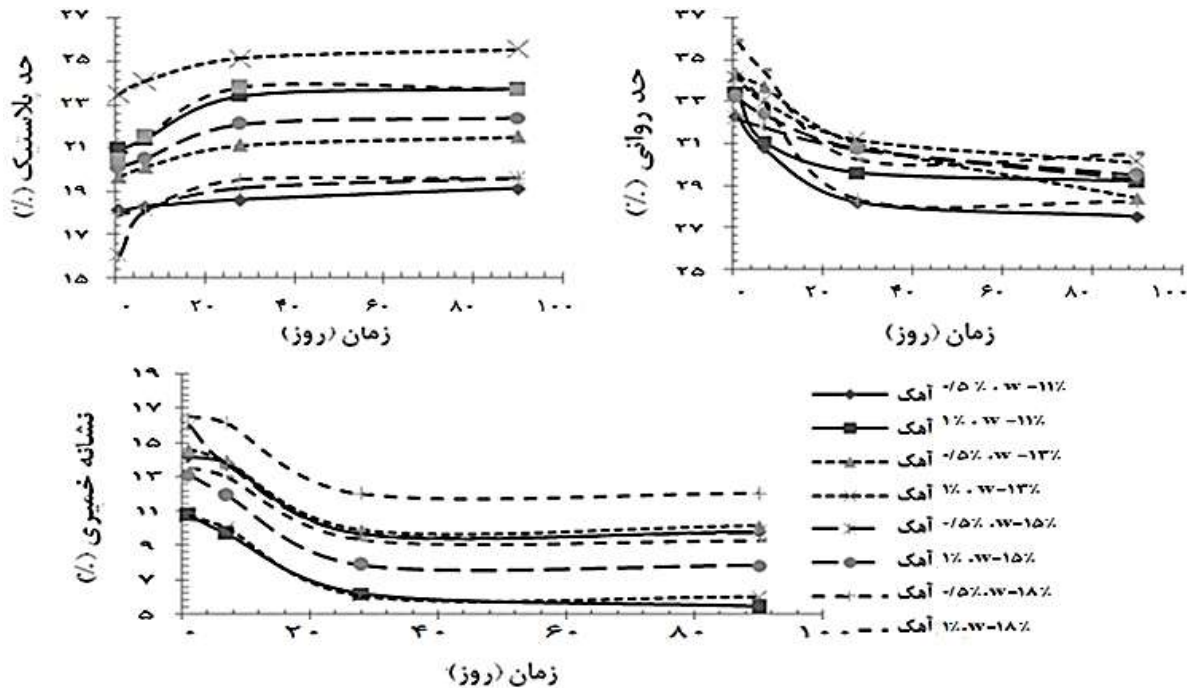
شکل ۱۰: تغییرات شاخص خمیری نمونه‌های با رطوبت و زمان‌های عمل‌آوری مختلف

شده با آهک در شکل‌های ۱۱ برای روز هفتم عمل‌آوری ارائه شده است. در روزهای ۱، ۲۸ و ۹۰ نیز همین روند مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که در بین ۰/۵ تا ۱ درصد آهک حد روانی افزایش یافته و از آن به بعد با کاهش روبرو بوده است. همچنین حد خمیری نمونه‌ها با افزایش آهک افزایش یافته است. نشان خمیری خاک مورد نظر با افزایش درصد آهک، افزایش یافته است.

همچنین از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز باعث عمده تغییرات در خواص خمیری خاک رس مورد مطالعه شده است و از آن به بعد تغییرات با نرخ کمتری صورت گرفته است. با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر واکنش‌های تبادل کاتیونی که به صورت آنی اتفاق می‌افتند و عامل اصلی کاهش پلاستیسیته خاک تثبیت شده با آهک است، واکنش‌های پوزولانی نیز عاملی در وقوع این پدیده هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌های حدود اتربرگ بر نمونه‌های خاک رس مخلوط

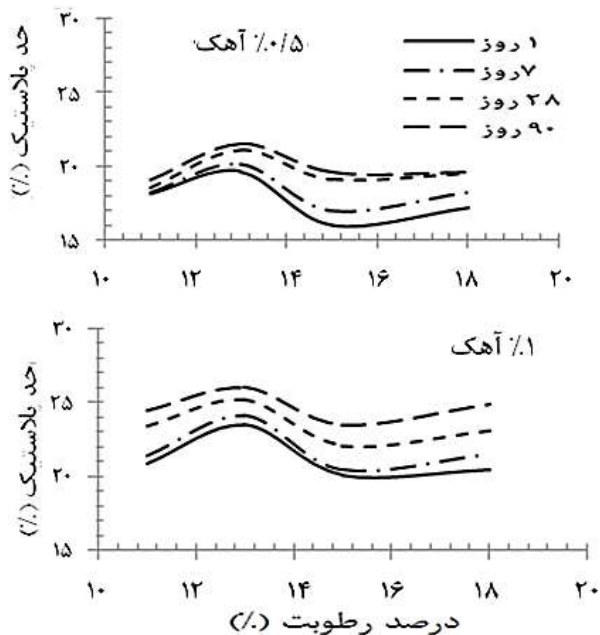


شکل ۱۱: تغییرات حدود اتربرگ بر حسب درصد آهک برای نمونه با درصد رطوبت‌های عمل‌آوری مختلف در روز هفتم



شکل ۱۲: نحوه تغییرات حدود اتبرگ در طول زمان برای نمونه‌های با ۰/۵ و ۱ درصد آهک و با رطوبت‌های مختلف

درصد رطوبت عمل‌آوری بر حد خمیری تأثیر می‌گذارد. با بررسی در روند تغییرات حد خمیری مشاهده می‌شود که در رطوبت ۱۳ درصد بیشترین مقدار حد خمیری به دست آمده است. این روند برای نمونه‌های با ۳ و ۵ درصد آهک برای زمان‌های ۱ و ۷ روزه نیز مشابه است (شکل ۱۴).



شکل ۱۳: تغییرات حد خمیری بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف و با ۰/۵ و ۱ درصد آهک

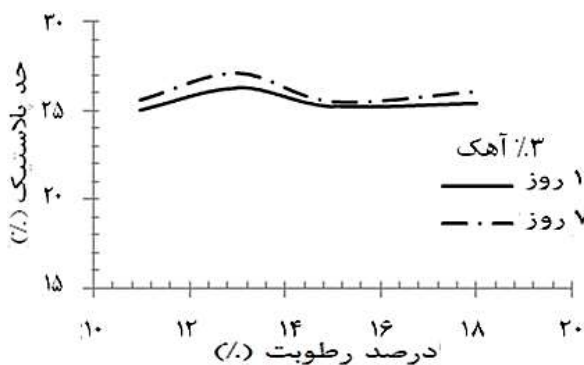
با توجه به نتایج می‌توان مشاهده نمود، که زمان عمل‌آوری در مخلوط‌های با درصد پایین آهک تأثیر کمی دارد، زیرا در درصد‌های کم آهک (۰/۵ و ۱ درصد) تغییرات خواص خمیری تابع واکنش‌های تبادل یونی است و دارای سرعت زیاد بوده و تقریباً در همان روز اول (نهایتاً تا ۲۸ روز) قسمت عمده تغییرات حاصل می‌گردد. اما در درصد‌های بالاتر با توجه به اینکه واکنش‌های پوزولانی خاک و آهک باعث تغییرات اساسی در بافت می‌گردد، زمان عمل‌آوری نیز بر خواص خمیری مؤثر است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، که تأثیر زمان عمل‌آوری بر حد روانی بدین صورت است که با گذشت زمان حد روانی روند کاهشی و حد خمیری روند افزایشی دارد اما از روز ۲۸ به بعد این تغییرات با نرخ کمتر رخ می‌دهد و تقریباً ثابت شده است.

### ۵-۲- تأثیر تغییر درصد رطوبت و زمان عمل‌آوری بر حدود اتبرگ

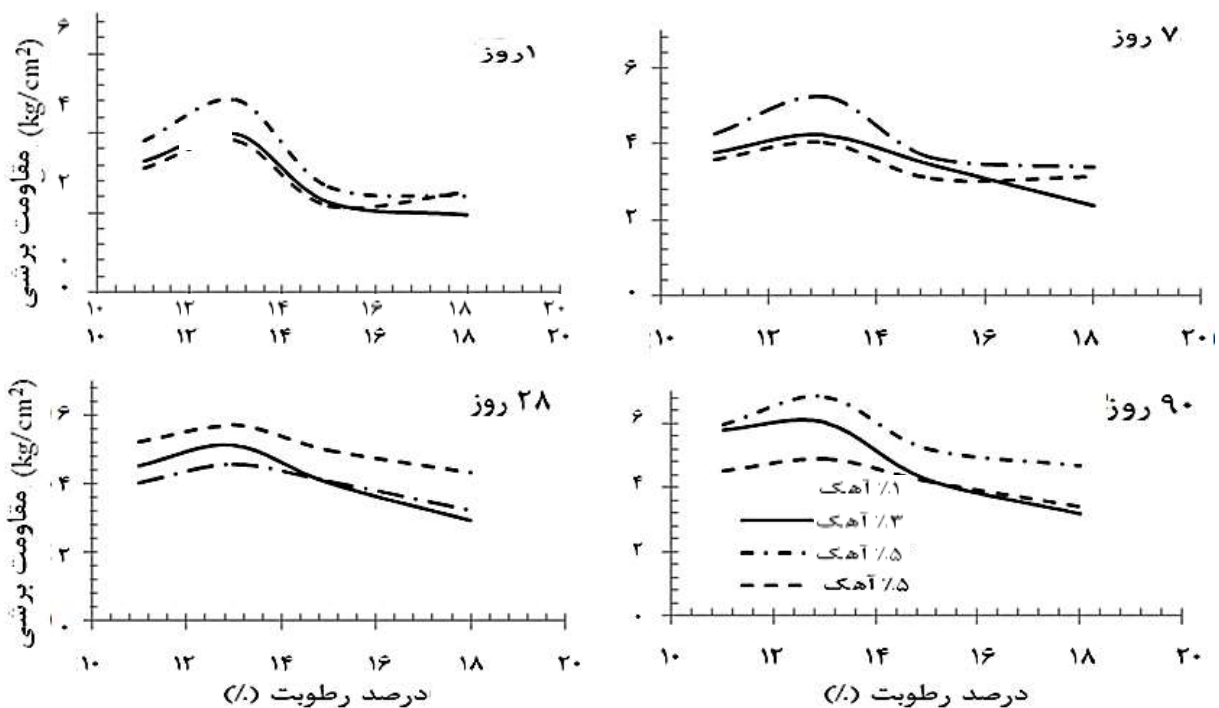
شکل ۱۳ تغییرات حد خمیری بر حسب تغییرات درصد رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف و به ترتیب با ۰/۵ و ۱ درصد آهک اضافه شده را نشان می‌دهد. حدود اتبرگ برای رطوبت‌های ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۸ درصد اندازه‌گیری شده‌اند و همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد Sujit و Monowar در سال ۲۰۱۲ علت افزایش حد خمیری را افزایش مقاومت بر اثر افزودن آهک به خاک ذکر نموده‌اند. البته آنها در آزمایش‌هایشان مقاومت برشی را اندازه‌گیری نکردند و تنها به بررسی تغییرات خواص خمیری خاک مورد نظر پرداختند. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد آنها دلیل این امر را با توجه به تعریف حد خمیری توجیه کردند و ذکر کردند که حد خمیری معیاری از درصد آب موجود در خاک است که در این درصد، مقاومت برشی به مقدار معینی میل می‌کند. مقدار حد خمیری در محدوده درصد آهک‌هایی که آنها مورد بررسی قرار دادند طوری بود، که با افزایش درصد آهک اختلاط روند افزایشی داشت و در نتایج خود ذکر نمودند که با افزایش درصد آهک مقدار مقاومت برشی افزایش یافته است بنابراین رطوبت حد خمیری نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق جهت بررسی نحوه تغییرات مقاومت برشی نمونه‌هایی با رطوبت‌های ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۸ درصد تهیه شدند و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که نمونه با ۱۳ درصد رطوبت بیشترین مقاومت را داراست (شکل ۱۶). نتایج آزمایش تعیین حد خمیری نیز نشان می‌دهد که مقدار حد

خمیری در رطوبت ۱۳ درصد بیشینه شده است، اما نمی‌توان علت آن را با مقاومت برشی توجیه کرد زیرا مقاومت برشی و حد خمیری دو مقوله جدا از هم هستند. می‌توان این پدیده را این‌طور توجیه نمود که در رطوبت ۱۳ درصد بیشترین تغییرات در ساختار ذرات خاک رس (کلوخه‌ای شدن) اتفاق می‌افتد و درصد بیشتری از خاک ساختار شبیه سیلت پیدا می‌کند و این عاملی در افزایش حد خمیری است.

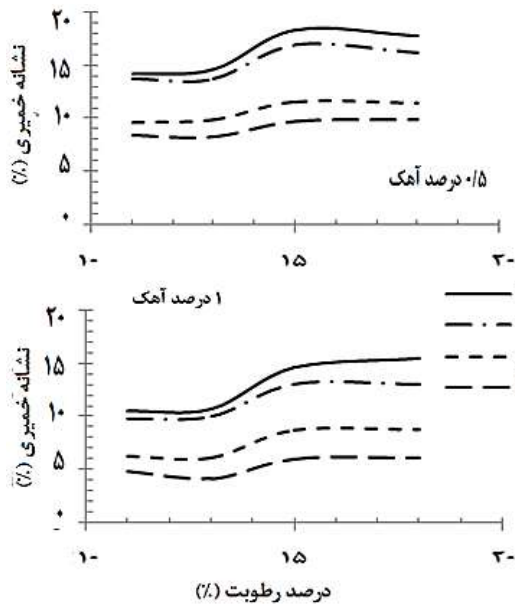


شکل ۱۴: تغییرات حد خمیری بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز و با ۳ درصد آهک

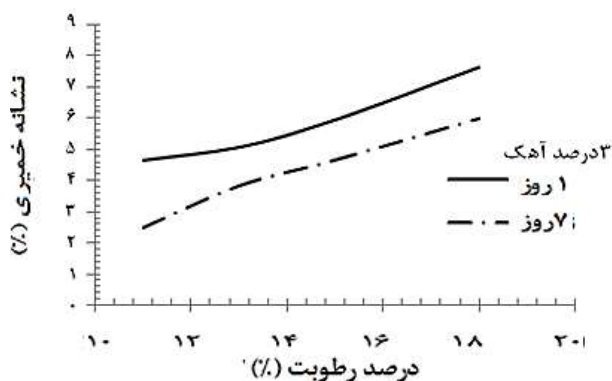


شکل ۱۵: مقاومت برشی بر حسب رطوبت برای درصد‌های مختلف آهک (محور قائم نشان دهنده مقاومت برشی حداکثر نمونه‌هاست)

نمونه‌های ۳ و ۵ درصد برای ۲۸ روز به حالت غیر خمیری در آمده به طوری که انجام آزمایش مقدور نبوده است. شکل ۱۹ نحوه تغییرات شاخص خمیری بر حسب درصد رطوبت عمل‌آوری را برای زمان‌های ۱ و ۷ روز و برای نمونه‌های با ۳ درصد آهک نشان می‌دهد.



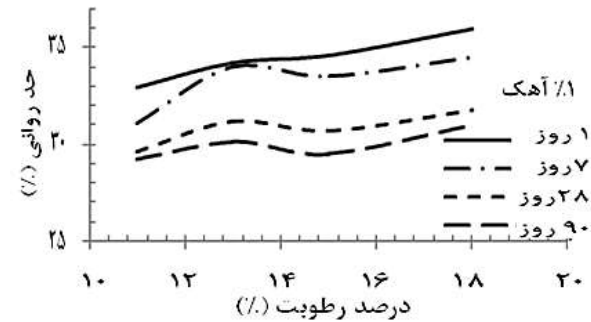
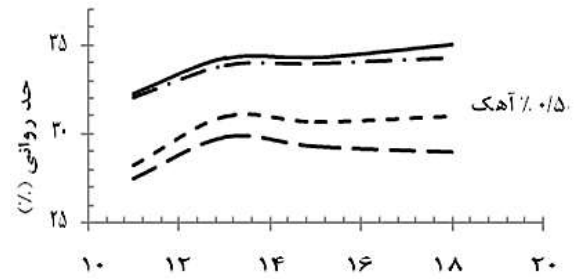
شکل ۱۸: تغییرات شاخص خمیری بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف و با ۰/۵ و ۱ درصد آهک



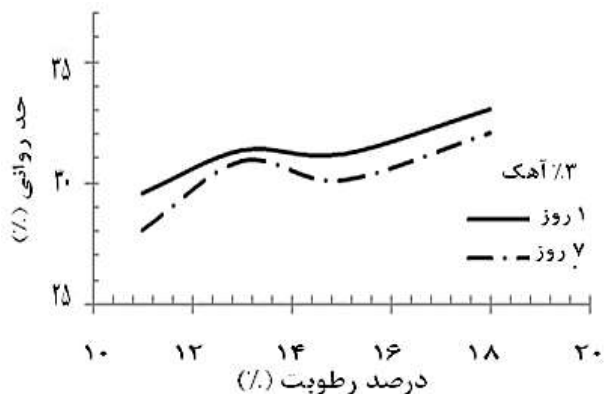
شکل ۱۹: تغییرات شاخص خمیری بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز و با ۳ درصد آهک ۳ درصد آهک

### ۶- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش درصد آهک افزودنی به خاک رس، شاخص خمیری دچار کاهش می‌شود. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری مخلوط خاک-آهک نیز، شاخص خمیری دچار کاهش شده و در نهایت به صفر می‌رسد. بر این اساس برای زمانی که آهک افزودنی معادل ۰/۵ و ۱ درصد است، برای یک دوره



شکل ۱۶: تغییرات حد روانی بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف و با ۰/۵ و ۱ درصد آهک



شکل ۱۷: تغییرات حد روانی بر حسب رطوبت عمل‌آوری برای زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز و با ۳ درصد آهک

شکل ۱۸ نمودار تغییرات شاخص خمیری بر حسب تغییرات درصد رطوبت عمل‌آوری را برای زمان‌های ۱، ۷ و ۲۸ روز و درصد آهک‌های ۰/۵ و ۱ درصد اضافه شده نشان می‌دهد. حدود اتربرگ برای رطوبت‌های ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۸ درصد اندازه‌گیری شده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات درصد رطوبت عمل‌آوری بر نشانه خمیری تأثیر می‌گذارد و هرچه درصد رطوبت عمل‌آوری افزایش می‌یابد میزان نشانه خمیری نیز با افزایش همراه است. همچنین در این نمودارها اثر زمان عمل‌آوری نیز بر نشانه خمیری قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمل‌آوری مقدار نشانه خمیری افت می‌کند. این افت به قدری است که نمونه با ۵ درصد آهک برای ۷ روز و

نتایج نشان داد که حدود اتربرگ با افزایش درصد رطوبت عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش درصد رطوبت حد روانی افزایش می‌یابد اما حد خمیری در رطوبت ۱۳ درصد بیشینه می‌گردد. نتایج آزمایش برش مستقیم حاکی از آن است که در همین درصد رطوبت نیز مقاومت برشی ماکزیمم است. در واقع در خاک‌های ریزدانه به دلیل تغییر ساختاری ذرات در اثر واکنش با آهک مقاومت برشی افزایش می‌یابد. تغییرات ساختاری ذرات خاک رس ترکیب شده با آهک در یک درصد معین از آهک، رطوبت و درصد کانی‌های رس بیشینه می‌گردد. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که برای خاک مورد مطالعه درصد بهینه رطوبت و آهک به ترتیب ۱۳ و ۳ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر در این درصد بیشترین تغییرات ساختاری در ذرات خاک رس ایجاد شده است که یک‌سری از محققین از تعبیر شبه سیلتی شدن خاک رس استفاده کرده‌اند. بنابراین در این درصد بیشترین حد خمیری به دست آمده است.

عمل‌آوری ۹۰ روزه، شاخص خمیری به تدریج دچار کاهش می‌شود. اما برای ۳، ۵ درصد آهک افزودنی، پس از ۲۸ روز زمان عمل‌آوری شاخص خمیری خاک صفر می‌شود. برای نمونه‌های با ۷ درصد آهک، آزمایش تعیین حد خمیری غیر قابل انجام است. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد آهک افزوده شده به خاک، تأثیر زمان عمل‌آوری نسبت به درصد آهک کمتر می‌شود یا به عبارت دیگر چون واکنش‌های تبادل کاتیونی سریع رخ می‌دهند، درصد آهک افزوده شده اثر بیشتری در کاهش حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه دارد. نکته حائز اهمیت اینکه کاهش حدود اتربرگ خاک‌های رسی نرم در اثر اختلاط با آهک را می‌توان نتیجه واکنش تبادل یونی در خاک ریزدانه با خاصیت تبادل کاتیونی و در حضور آب دانست. این واکنش‌ها باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و فاصله بین کانی‌ها می‌شوند، در نتیجه نیروی جاذبه بین کانی‌ها شدت گرفته و ذرات رس تمایل به جفت شدن با یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگتر را دارند که در نهایت باعث کاهش پلاستیسیته خاک می‌شود.

## مراجع

- [1] Wang, J. W. H. Mateos, M. and Davidson, D. T.; "Comparative Effects of Hydraulic, Calcitic and Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization", Highway Research Record Bulletin No.59, National Research Council, Washington, DC, 42-54, 1963
- [2] Bell, F. G.; "Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime, Part I—Basic Principles." Ground Eng., 21(1), 10-15, 1988.
- [3] Taebi, V., "Influence of Variation of Water and Lime Content on Shear Strength of Clayey Soil", MS thesis, PWUT, Tehran, Iran (in Persian), 2013.
- [4] Barker, J. E. Rogers, C. D. F. and Boardman, D. I.; "pHysico-Chemical Changes in Clay Caused by Ion Migration from Lime Piles." J. Mater. Civ. Eng., 18(2), 182-189, 2006.
- [5] Herrin, M. and Mitchell, H.; "Lime-Soil Mixtures." Bulletin No. 304, Highway Research Board, Washington, DC, 99-138, 1961.
- [6] Hilt, G. H., and Davidson, D. T.; "Lime fixation on clayey soils." Bulletin No. 262, Highway Research Board, Washington, DC, 20-32, 1960.
- [7] Prakash, K., Sridharan, A., and Rao, S. M.; "Lime Addition and Curing Effects on the Index and Compaction Characteristics of a Mont-Morillonitic Soil." Geotechnical Eng., AIT, 20(1), 39-47, 1989.
- [8] Bell, F.G.; "Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils". Department of Geology and Applied Geology, Engineering Geology 42. 223-237, 1996.
- [9] Clare, K. E. and Cruchley, A. E.; "Laboratory experiments in the Stabilization of Clays with Hydrated Lime." Geotechnique, 7(2), 97-111, 1957.
- [10] Gallaway, B.M. and Buchanan, S.J.; "Lime Stabilization of Clay Soils". Proc. Conf. Aust. Road Res. Board, 2 : 1169-1203, 1964.
- [11] Croft, J.B.; "The Processes Involved in the Lime Stabilization of Clay Soils". Proc. Aust. Road Res. Board, 2, Part 2 : 1169-1203, 1964.
- [12] Amer Ali, A.W. Hago, H.; " Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman", Elsevier Science Publishers, Building and Environment 40 681-687, 2005.

- [13] Sujit, K. D. and Monowar, H.; " *Lime Stabilization of Soils*". American Society of Civil Engineers, 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0000431, **2012**.
- [14] Neville, A. M. and Brooks, J. J.; " *Concrete Technology*". 4th Indian reprint, Pearson Education, Delhi, **2004**.
- [15] Taylor, A. W.; " *Physico-Chemical Properties of Soils—Ion Exchange phenomenon*." J. Soil Mech. Found. Div., 85(2), 19–30, **1995**.
- [16] Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., and Bhaskar Raju, K. V.; " *Role of Amount and Type of Clay in the Lime Stabilization of Soils*." Proc. Inst. Civ. Eng. Ground Improv., 4(1), 37–45, **2000**.
- [17] ASTM.; " *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*." D4318, West Conshohocken, PA, **2005**.