



## بررسی آزمایشگاهی تاثیر روش اختلاط خاک در عمق بر خصوصیات مهندسی خاک رس نرم تثبیت شده با سرباره و آهک

پرهام ربانی، سید حمید لاجوردی\*

گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۱۵  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۴-۱۸  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۴-۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۲۶

**کلمات کلیدی:**  
رس نرم  
تثبیت عمیق خاک  
سرباره، آهک  
مطالعه آزمایشگاهی

**خلاصه:** خاک‌های رسی نرم عموماً دارای تراکم‌پذیری زیاد و مقاومت کم بوده و حضور آن‌ها در محل پروژه‌های عمرانی همواره مشکل‌آفرین است. یکی از راهکارهای مفید برای اصلاح این نوع خاک‌ها، تثبیت آن‌ها به شیوه‌های گوناگون است. در پژوهش پیش‌رو اثر افزایش عمق بر خصوصیات مهندسی خاک رسی نرم تثبیت شده به روش نوین تراش و اختلاط خاک، به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابزار و دستگاه‌های لازم جهت ساخت نمونه‌ها و اعمال فشارهای قائم معادل با اعماق مختلف قرارگیری آن‌ها، طراحی و ساخته شدند و در فرآیند آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌چنین استفاده از دوغابی حاوی مقادیر مشخص سرباره کوره آهن گدازی و آهک هیدراته جهت استفاده در این شیوه جدید، برای اولین بار پیشنهاد شده است. نمونه‌های شبیه‌سازی شده به مدت ۲۸ و ۵۶ روز تحت فشارهای قائم مختلف و شرایط اشباع، عمل‌آوری شدند تا تاثیر این شرایط بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها تعیین شود. نتایج حاصل نشان دادند که افزایش عمق باعث کاهش رطوبت نمونه‌ها و افزایش وزن مخصوص اشباع، خشک و هم‌چنین بهبود پارامترهای مقاومتی آن‌ها می‌شود. هم‌چنین با گذر از عمقی مشخص که عمق بحرانی نامیده شده است، تغییرات ایجاد شده به ویژه در خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها ناچیز بوده است.

### ۱- مقدمه

سیلیکات<sup>۵</sup> مانند کوارتز<sup>۶</sup>، میکاها<sup>۷</sup> و فلدسپارها<sup>۸</sup> شکل می‌گیرند [۲] و [۳]. ظرفیت باربری کم، خلل و فرج فراوان، نشست‌پذیری زیاد، تورم‌پذیری، واگرایی و دیگر موارد از جمله مشکلات شایع و رایج این خاک‌ها هستند. این مشکلات عموماً ناشی از نوع ترکیبات، نسبت منافذ، کانی‌های تشکیل‌دهنده و سرانجام بافت این نوع خاک‌ها است [۴]. بنابراین در بیشتر مواقع باید نسبت به برداشت و یا جایگزینی آن‌ها با خاکی مناسب اقدام شود. گرچه این امر در بسیاری از پروژه‌ها نه صرفه اقتصادی داشته و نه منطقی به نظر می‌رسد. در چنین شرایطی با توجه به نوع و نیاز پروژه، اصلاح خاک به شیوه‌های مختلف

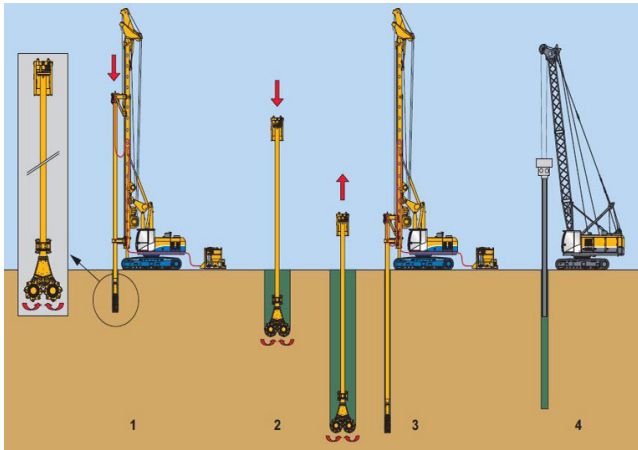
برخی از خاک‌های طبیعی موجود در محل پروژه‌های عمرانی به لحاظ خصوصیات مهندسی، برای تحمل نیروی وارده ناشی از اجرای چنین پروژه‌هایی، مناسب نیستند. یکی از این نوع خاک‌ها، خاک‌های رسی نرم بوده که دارای طیف گسترده، ابعاد و انواع مختلفی از کانی‌های رسی می‌باشند. مهم‌ترین این کانی‌ها شامل کائولینیت<sup>۱</sup>، ایلیت<sup>۲</sup> و مونت‌موریلونیت<sup>۳</sup> است [۱]. این کانی‌ها عموماً بر اثر هوازدگی فیزیکی، شیمیایی و یا تغییرات هیدروترمال<sup>۴</sup> مربوط به مواد معدنی آلومینا -

- 1 Kaolinite
- 2 Illite
- 3 Montmorillonite
- 4 Hydrothermal

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Sh-lajvardi@iau-arak.ac.ir

- 5 Alumina - Silicate
- 6 Quartz
- 7 Micas
- 8 Feldspars





شکل ۱. مراحل کلی اجرای دیوارهای ساخته شده به روش برش و اختلاط خاک در عمق [۸]

Fig. 1. The general steps for constructing CSM walls

دوغاب سیمانی سفت و سخت‌شونده (ماده تثبیت‌کننده افزودنی) با خاک طبیعی که در نهایت منجر به ساخت دیواره‌هایی<sup>۳</sup> با مقطع مستطیلی درون زمین می‌گردد که طول آن‌ها می‌تواند تا ۶۰ متر و ضخامت آن‌ها بین ۰/۵ تا ۱/۲ متر باشد. در این روش از تکنیک‌های اصلاح شده برش و تراش خاک، حفر گودال و پر کردن هم‌زمان آن با مخلوطی از خاک و مواد افزودنی تثبیت‌کننده استفاده می‌شود [۷ و ۸] که ترکیبی از روش‌های اصلاح مکانیکی (برش، تراش و اختلاط خاک) و اصلاح شیمیایی (افزودن دوغاب سیمان) است. فن‌آوری شیوه مذکور جدید بوده و اولین بار در سال ۲۰۰۳ ابداع شده‌است. همچنین این روش را می‌توان جزو روش‌های اختلاط مرطوب خاک به شیوه چرخشی در عمق<sup>۴</sup>، نیز محسوب نمود که با دیگر شیوه‌های مشابه متفاوت است، زیرا تیغه‌های دوار دارای چرخشی عمودی حول محوری افقی هستند. علاوه بر این امکان مجهز کردن آن‌ها به تیغه‌های مخصوص برش در خاک‌های سخت و لایه‌های سنگی نیز وجود دارد [۷ و ۹-۱۱]. این شیوه اصلاح خاک تاکنون در کشورهای اروپایی، ژاپن، نیوزیلند، استرالیا و آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱۲]. مطابق با دستورالعمل شرکت سازنده دستگاه و ابداع‌کننده روش و آن‌چه در شکل ۱ نشان داده شده‌است مراحل ساخت و اجرای این دیوارها به شرح زیر است:

۱- آماده‌سازی ابتدایی شامل حفر گودال برای جمع‌آوری دوغاب

به عنوان راهکاری مفید، موثر و کم‌هزینه در مقایسه با سایر روش‌ها مطرح می‌شود. روش تراش و اختلاط خاک<sup>۱</sup> در عمق، شیوه‌ای جدید و کارآمد به منظور تثبیت عمیق خاک‌های سست و ریزدانه غیرچسبنده و چسبنده رسی به کمک تزریق دوغاب سیمان است.

از آنجایی که این روش، شیوه‌ای جدید در خصوص اصلاح خاک‌ها در عمق، تحت شرایط اشباع یا نزدیک به اشباع محسوب می‌شود، تحقیقات گسترده‌ای پیرامون آن صورت گرفته و از پتانسل بسیار بالایی جهت بررسی کارایی، بهبود و ارتقاء، برخوردار است. از طرف دیگر بخش عمده‌ای از مطالعات انجام شده در خصوص تثبیت شیمیایی خاک‌ها، مربوط به لایه‌های سطحی و کم‌عمق خاک است که عمدتاً پروژه‌های مرتبط با امور جاده‌سازی، راهسازی و خطوط ریلی را شامل می‌شود، که در آن‌ها خاک مورد مطالعه با رطوبت بهینه و تا رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خشک، متراکم و آماده‌سازی شده و تحت تثبیت شیمیایی قرار می‌گیرد [۵ و ۶] بنابراین شیوه آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها به کلی با شیوه مورد بحث در این مطالعه متفاوت است.

این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اثر افزایش عمق بر خصوصیات مهندسی خاک رسی نرم تثبیت‌شده به روش نوین تراش و اختلاط خاک می‌پردازد. به این منظور برای شبیه‌سازی دقیق شرایط خاک تثبیت‌شده در اعماق مختلف و تحت شرایط اشباع، ابزار و دستگاه‌های مورد نیاز طراحی و ساخته شدند. علاوه بر این دوغابی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی و آهک هیدراته به عنوان جایگزین دوغاب سیمان معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌است. در نهایت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تثبیت‌شده به روش CSM مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- مروری بر پیشینه تحقیق

پیشینه این تحقیق را می‌توان به دو بخش مجزا شامل معرفی روش جدید تراش و اختلاط خاک در عمق و مروری بر تثبیت شیمیایی خاک‌ها تقسیم نمود.

### ۲-۱- روش تراش و اختلاط خاک (CSM)

شیوه تراش و اختلاط خاک در عمق، زیر مجموعه‌ای از روش‌های اصلاح خاک در عمق<sup>۴</sup> می‌باشد و عبارت است از اختلاط هم‌زمان

3 CSM Walls

4 Wet Rotary End (WRE)

1 Cutter Soil Mixing (CSM) method

2 Deep Mixing Method (DMM)



شکل ۲. دیواره‌های ساخته شده به روش برش و اختلاط خاک در عمق [۸]

Fig. 2. Constructed CSM wall

نمودن بستری مطلوب برای مصرف این مواد و کاهش مشکلات و هزینه‌های گزاف مربوط به انباشت و نگهداری آن‌ها، با تغییر ساختار اولیه این مواد در پروسه تثبیت شیمیایی، خطرات زیست‌محیطی آن‌ها را کاهش داده و یا به کلی مرتفع می‌سازد.

یکی از محصولات فرعی و جانبی کارخانه‌های تولید آهن و فولاد که سرانجام بصورت ضایعات، دفع شده و انباشته می‌شوند، سرباره حاصل از گداخت کوره‌های فولاد سازی<sup>۲</sup> می باشد که ترکیباتی پوزولانی و غیرفلزی بوده و عمدتاً از سیلیکات‌ها، آلومینا - سیلیکات‌ها و کلسیم - آلومینا - سیلیکات‌ها<sup>۳</sup> تشکیل شده‌اند [۱۶]. سرباره‌ها را می‌توان بر اساس نحوه سرد شدن به انواع مختلفی تقسیم نمود که سرباره خرد شده درشت دانه<sup>۴</sup> و سرباره سرد شده در هوا<sup>۵</sup> از جمله رایج‌ترین آن‌ها می‌باشند [۱۷]. ترکیبات و کانی‌های سرباره‌ی آسیاب شده دارای خواص شبه‌سیمانی بوده و از آن در سیمان پرتلند هم استفاده می‌شود. از آنجایی که سرعت واکنش‌های سرباره به خودی خود بسیار کند می‌باشد، استفاده از ماده مناسب فعال‌کننده واکنش‌های شیمیایی ضروری به نظر می‌رسد [۱۸ و ۱۹]. آهک هیدراته ( $\text{CaOH}_2$ ) می‌تواند محیط قلیایی مورد نیاز را برای فعال کردن واکنش‌های شیمیایی تامین کند و صرفاً به‌عنوان فعال‌ساز واکنش‌ها و در مقادیر اندک، در کنار سرباره که ماده اصلی تثبیت‌کننده است،

اضافی و جاگذاری صحیح نوک دستگاه حفار در راستای محور طولی محل اجرای دیوار.

۲- هدایت ابزار و دستگاه‌های ساخت مخلوط (ترکیب‌کننده خاک و دوغاب)، با سرعت ثابت به درون زمین و شکسته شدن بافت و شبکه خاک به وسیله چرخ‌دنده‌های دستگاه حفار تا رسیدن به عمق مورد نظر (عمق نهایی طراحی).

۳- حرکت روبه بالا و خروج دستگاه حفار از درون زمین. پمپ هم‌زمان دوغاب سیمان به صورت پیوسته به نازل‌هایی که در میان چرخ‌دنده‌ها قرار گرفته‌اند و سپس به محیط جهت تثبیت. چرخش هم‌زمان چرخ‌دنده‌ها به منظور شکل‌گیری مخلوطی سیال و همگن شامل دوغاب سیمان و خاک دست‌خورده و سست شده و ادامه این روند تا خروج کامل تجهیزات از درون زمین.

۴- جاگذاری المان‌های مسلح‌کننده (عناصر فولادی) به درون دیواره (پس از ساخته شدن آن) در صورت نیاز و با توجه به اهداف سازه‌ای.

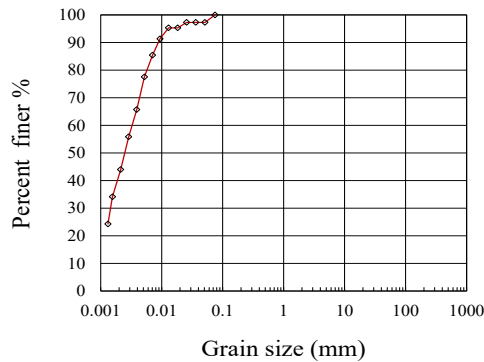
لازم به ذکر است که در اعماق کم، عناصر مسلح‌کننده در اثر وزن خود به درون مخلوط ساخته شده نفوذ می‌کنند و در صورت لزوم می‌توان به کمک لرزاننده‌های سبک نسبت به نصب و قرارگیری صحیح آن‌ها اقدام کرد. فاصله بین شبکه آرماتور و سطح مقطع آن‌ها بر اساس بارهای وارده و خصوصیات مقاومتی خاک مورد نظر طراحی می‌شود. کنترل کیفیت و تضمین کیفیت دیواره‌های ساخته شده به این روش، شامل بازدیدهای چشمی صفحات<sup>۱</sup> در حین حفاری و آزمایش‌های مربوط به تعیین پارامترهای مقاومتی مخلوط‌های خاک و سیمان است. نمونه‌ای از دیواره‌های ساخته شده به این روش در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

## ۲-۲- تثبیت شیمیایی خاک‌ها

از نظر شیمیایی تثبیت خاک را می‌توان با افزودن موادی هم‌چون سیمان [۱۳] خاکستر بادی [۱۴] مواد پوزولانی [۵، ۶ و ۱۵] و یا مواد شیمیایی دیگر به آن انجام داد. انتخاب نوع مواد به عوامل زیادی چون جنس خاک، شرایط جوی منطقه، هدف از انجام به‌سازی خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. امروزه استفاده از ضایعات و محصولات فرعی کارخانه‌های مختلف، به عنوان تثبیت‌کننده از راه‌های مفید و موثر جهت به‌سازی خاک‌ها محسوب می‌شود که علاوه بر فراهم

2 Blast Furnace Slag  
3 Calcium - Alumina - Silicates (C-A-S)  
4 Grand Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)  
5 Air Cooled Blast Furnace Slag (ACBFS)

1 CSM Panels - CSM Walls



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک رسی بکر مورد مطالعه  
Fig. 3. Grain size distribution of the native soil

جدول ۱. خصوصیات خاک رسی بکر مورد مطالعه  
Table 1. Native soil properties

واحد	مقدار	خصوصیات خاک بکر
-	۲/۷۱	چگالی ویژه (Gs)
%	۱۰۰	ذرات کوچکتر از الک #۲۰۰
%	۲۴/۱	حد خمیری (PL)
%	۴۱	حد روانی (LL)
%	۱۶/۹	شاخص روانی (PI)
-	CL	طبقه بندی خاک (USCS)
gr/cm <sup>3</sup>	۱/۷۶	وزن مخصوص اشباع
gr/cm <sup>3</sup>	۱/۲۷	وزن مخصوص خشک
%	۲۴/۳	رطوبت بهینه
gr/cm <sup>3</sup>	۱/۴۸	حداکثر وزن مخصوص خشک
kg/cm <sup>2</sup>	۱/۱۷	مقاومت تک‌محوری خاک بکر با درصد رطوبت بهینه
-	۰/۳	نشانه فشردگی خاک بکر (Cc)

بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>۷</sup>، خاک از نوع رس با خاصیت خمیری کم<sup>۸</sup> طبقه‌بندی شد. منحنی مربوط به دانه‌بندی خاک بکر مورد مطالعه در شکل ۳ و سایر خصوصیات مهندسی آن در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. هنگامی که سرباره و آهک هیدراته به خاک رسی نرم اضافه می‌شوند دو واکنش شیمیایی و پوزولانی اصلی روی می‌دهد. هیدراتاسیون سرباره فعال شده به کمک آهک هیدراته منجر به تشکیل ذرات مرکب آبدار<sup>۱</sup> (C-A-S-H) شده و وجود فاز هیدروتالسایت<sup>۲</sup> و واکنش بین رس و آهک باعث تشکیل زل‌های چسبنده (C-S-H)<sup>۳</sup>، (C-A-H)<sup>۴</sup> و (C-A-S-H) می‌شود [۲۱]. این فرآیند منجر به تغییر ساختار اولیه خاک رسی و بهبود خصوصیات آن به خصوص پارامترهای مقاومتی می‌گردد [۵ و ۶].

علاوه بر فواید مطرح شده با توجه به حضور کارخانه‌های متعدد تولید آهن و فولاد در داخل کشور و پیرو آن تولید حجم بالای سرباره و هم‌چنین وجود معادن فراوان آهک، دسترسی به مصالح بومی مذکور جهت تثبیت خاک‌های مشکل‌آفرین به راحتی امکان‌پذیر بوده و دلیل استفاده از آن‌ها را چه به لحاظ اقتصادی و چه به لحاظ عملیاتی در پروژه‌های عمرانی مرتبط به خوبی توجیه می‌نماید.

### ۳- معرفی مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل خاک رسی نرم، سرباره کوره فولاد سرد شده در هوا و آهک هیدراته صنعتی<sup>۵</sup> می‌باشد. در ساخت دوغاب از ترکیب نسبت‌های مشخصی از سرباره، آهک و آب، با توجه به دستورالعمل شرکت ابداع‌کننده روش استفاده گردید و سپس دوغاب حاصل به خاک رسی نرم اضافه شده‌است.

### ۳-۱- خاک

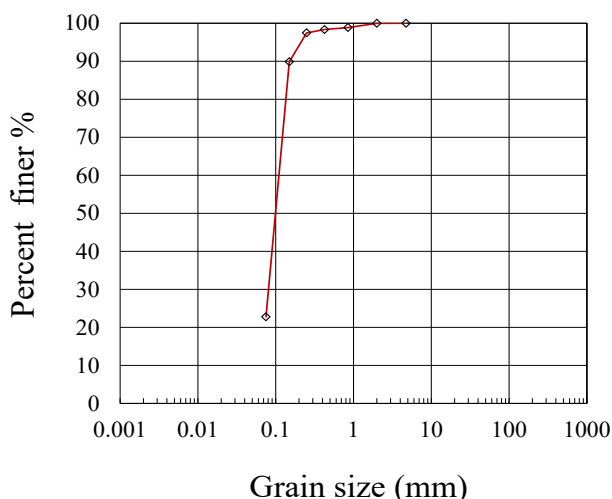
خاک مورد استفاده از نوع خاک رسی نرم می‌باشد که از معادن خاک رس کائولن واقع در نزدیکی شهر زنوز در استان آذربایجان شرقی تهیه شده‌است. این نوع از خاک‌ها در بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران به وفور یافت می‌شوند. به منظور شناسایی این خاک، آزمایش‌های متعددی بر مبنای جدیدترین نسخه استانداردهای ASTM<sup>۶</sup> انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی، تمامی ذرات خاک کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر بودند و

- 1 Hydrates
- 2 Hydrotalcite
- 3 Calcium - Silicates - Hydrates (C-S-H)
- 4 Calcium - Alumina - Hydrates (C-A-H)
- 5 Industrial Hydrated Lime (IHL)
- 6 American Standard Test Method

7 Unified Soil Classification System (USCS)  
8 Low Plasticity Clay

جدول ۲. عناصر شیمیایی تشکیل دهنده خاک رسی بکر  
Table 2. Chemical components of the native soil

مقدار (%)	ترکیب شیمیایی	مقدار (%)	ترکیب شیمیایی
۰/۲۵ ± ۰/۰۵	K <sub>2</sub> O	۶۵ ± ۱	SiO <sub>2</sub>
۰/۳۵ ± ۰/۰۵	MgO	۲۲ ± ۱	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۴ ± ۰/۰۱	TiO <sub>2</sub>	۰/۷۵ ± ۰/۱	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۸/۵ ± ۱	L.O.I	۱/۵ ± ۰/۲	CaO
		۰/۳۵ ± ۰/۰۵	Na <sub>2</sub> O



شکل ۴. منحنی دانه بندی سرباره (ACBFS)

Fig. 4. Grain size distribution of the ACBFS

جدول ۳. عناصر شیمیایی تشکیل دهنده سرباره (ACBFS)  
Table 3. Chemical components of the ACBFS

مقدار (%)	ترکیب شیمیایی	مقدار (%)	ترکیب شیمیایی
۰/۱۱	MgO	۵۰/۸۵	SiO <sub>2</sub>
۰/۶۱۲	TiO <sub>2</sub>	۱۰/۶۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۱۵/۶۳	MnO	۱۸/۷۸	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۱۲	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۱/۰۳	CaO
۰/۰۱۳	S	۱/۵۵	Na <sub>2</sub> O
۰/۰۱	L.O.I	۱/۳۳	K <sub>2</sub> O

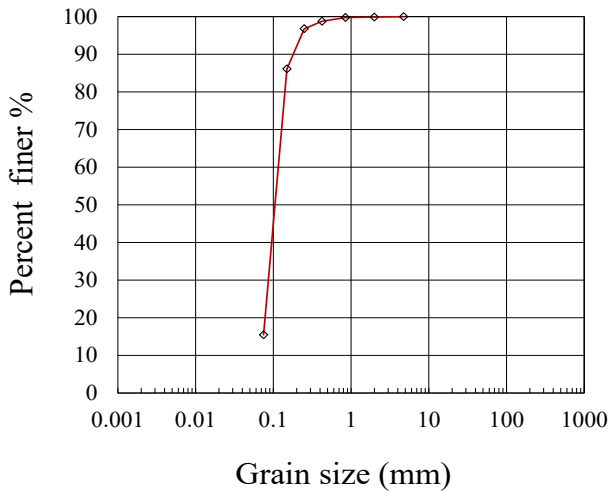
لازم به ذکر است که طبق تعریف و در حالت کلی به خاک ریزدانه رسی با درصد رطوبت بالا که دارای خصوصیتی مانند تراکم پذیری زیاد، تحکیم پذیری و پارامترهای مقاومتی ضعیف باشد خاک رس نرم گفته می شود. این خاکها عموماً در نزدیکی سطح سفره آب زیرزمینی و یا پایین تر از آن و در شرایط اشباع واقع شده اند، صرفاً توانایی تحمل وزن خود را دارند و در اثر هرگونه بارگذاری اضافی دچار تغییر شکل های زیاد می شوند [۲۲ و ۲۳]. خاک رس کائولن نیز از جمله این خاکها دسته بندی می شود. جهت تایید صحت این موضوع شاخص تراکم پذیری یا به عبارتی نشانه فشردگی (Cc) خاک بکر مورد مطالعه به کمک آزمایش تحکیم استاندارد تعیین شد و مقدار آن معادل ۰/۳ به دست آمد که این خاک را در در دسته خاک های با تراکم پذیری بالا و سست قرار می دهد. از طرفی نمونه خاک بکر در شرایط اشباع و حضور رطوبت ۳۹ درصدی دچار تغییر شکل های بسیار زیاد شده و مقاومت فشاری تک محوری قابل توجهی از خود نشان نداده است. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده این خاک تحت عنوان خاک رسی نرم نام گذاری و معرفی شده است. لازم به توجه است که مقاومت فشاری تک محوری خاک بکر در درصد رطوبت بهینه نیز مقداری اندک بوده است (مشاهده جدول ۱).

آزمایش تعیین عناصر شیمیایی<sup>۱</sup> نیز بر روی خاک مورد مطالعه انجام شد که نتیجه آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

### ۳-۲- سرباره سرد شده در هوا (ACBFS)

سرباره مورد استفاده در این تحقیق از نوع ACBFS می باشد که به صورت پسماند در فرآیند ساخت فولاد، تولید و از کارخانه های فولاد سازی واقع در نزدیکی شهر جاجرود در استان تهران تهیه شده است. در واقع اگر سرباره تولید شده و مذاب بر روی زمین گسترده شود و با آرامی تحت شرایط محیطی سرد شود ساختاری بلوری شکل پیدا می کند و در این حالت سفت و سخت می شود که به آن سرباره سرد شده در هوا گفته می شود. در مرحله بعد سرباره مورد استفاده توسط آسیاب صنعتی خرد و نرم شده و آزمایش های دانه بندی به روش الک و آنالیز تعیین عناصر

1 X-Ray Fluorescence (XRF)



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی آهک هیدراته صنعتی (IHL)  
Fig. 5. Grain size distribution of the IHL

جدول ۴. عناصر شیمیایی تشکیل‌دهنده آهک هیدراته صنعتی (IHL)  
Table 4. Chemical components of the IHL

مقدار (%)	ترکیب شیمیایی	مقدار (%)	ترکیب شیمیایی
> 0.1	K <sub>2</sub> O	< 92	CaOH <sub>2</sub>
> 0.1	MgO	> 1	SiO <sub>2</sub>
> 0.02	MnO <sub>2</sub>	> 0.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
> 0.05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	> 0.2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
> 1/3	SiO <sub>2</sub> + insoluble materials	> 1/5	CaO (free)
Trace	SO <sub>3</sub>	> 0.1	Na <sub>2</sub> O

ترکیبات و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی طبق برنامه و مطابق با روش مذکور می‌باشد.

#### ۴-۱- ساخت دستگاه‌ها و ابزار آزمایشگاهی

تعیین پارامترهای مقاومتی خاک اصلاح شده به روش CSM به کمک انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری از جمله اهداف این تحقیق بوده‌است. بر این اساس از ابتدا لازم بود تا نمونه‌ها در ابعاد استاندارد نمونه‌های تک‌محوری ساخته شوند. از طرفی با توجه به ارتفاع متغیر دیواره‌های CSM و پیرو آن فشارهای سربار قائم متفاوت وارد بر توده خاک در اعماق مختلف، نیاز به شبیه‌سازی شرایط مشابه در آزمایشگاه بود. دستگاه تحکیم یک‌بعدی (ادئومتر)

شیمیایی، بر روی آن انجام شدند. نتایج حاصل به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده‌است.

#### ۳-۳- آهک هیدراته صنعتی (IHL)

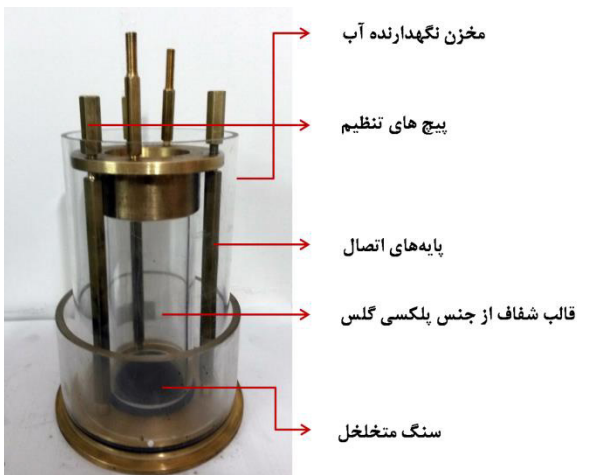
آهک مورد استفاده از نوع آهک هیدراته صنعتی و با درجه خلوص ۹۲ درصد می‌باشد که از منابع آهک واقع در نزدیکی شهر مراغه در استان آذربایجان شرقی تهیه شده‌است. چگونگی تولید آهک هیدراته به طور مستقیم بر مقدار خلوص آن تاثیرگذار است. در روش سنتی تولید، با انجام عمل آب پاشی بر روی آهک زنده CaO، آهک هیدراته تولید می‌شود که درجه خلوص آن در بهترین حالت بین ۶۰ تا ۷۰ درصد است. درحالی‌که در روش صنعتی به کمک دستگاه‌های هیدراتاسیون، بخار آب با دامایی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به آهک زنده دمیده می‌شود که منجر به شکفته شدن آن و تولید آهک هیدراته CaOH<sub>2</sub> با درجه خلوص بالای ۹۰ درصد می‌گردد. این محصول به عنوان آهک هیدراته صنعتی درجه یک شناخته می‌شود. آزمایش دانه‌بندی به روش الک و آنالیز شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده بر روی آهک مورد استفاده انجام شد که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۴ آمده‌است.

#### ۳-۴- دوغاب

در روش CSM، عموماً از دوغاب سیمان در ساخت دیوارها و تثبیت خاک در عمق استفاده می‌شود. در این تحقیق استفاده از دوغاب سرباره و آهک به عنوان جایگزین دوغاب سیمان برای اولین بار مطرح و به بررسی تاثیر آن بر تثبیت عمیق و خصوصیات مهندسی خاک تثبیت‌شده پرداخته شده‌است. با توجه به پیشنهاد شرکت ابداع‌کننده روش و سازنده دستگاه، برای جلوگیری از گرفتگی ابزار و دستگاه‌های تزریق شامل نازل‌ها و شلنگ‌ها، بهتر است که نسبت اختلاط آب به افزودنی‌ها برابر با یک در نظر گرفته شود که این مورد با اضافه کردن یک واحد آب به یک واحد افزودنی سرباره - آهک رعایت شده‌است.

#### ۴- فرآیند آزمایش‌های آزمایشگاهی

فرآیند آزمایش‌های آزمایشگاهی در این مطالعه شامل ساخت دستگاه‌های مورد نیاز جهت شبیه‌سازی شرایط خاک در طی فرآیند تثبیت به روش CSM، آماده‌سازی و اختلاط افزودنی‌ها جهت ساخت



شکل ۶. قالب پلکسی گلس و سلول تحکیم اصلاح شده  
Fig. 6. Plexiglass mold and modified cell



شکل ۷. دستگاه شبیه ساز تنش وارد بر خاک در عمق  
Fig. 7. Soil overburden pressure simulator

شامل: تغییر ارتفاع مخزن نگهدارنده آب، تغییر ارتفاع پایه ها و آب بند نمودن سلول ها بود. پس از انجام اصلاحات مذکور، جهت انتقال نیروی وارده به کلاهک بارگذاری و سپس به نمونه ها، ابعاد بازوهای بدنه اصلی دستگاه های تحکیم نیز اصلاح شد و تغییر یافت.

وسایله ای مناسب جهت اعمال فشارهای قائم متفاوت بر نمونه ها و شبیه سازی اعماق مختلف قرارگیری آن ها در شرایط اشباع است. اگرچه ابعاد سلول و دستگاه تحکیم استاندارد امکان استفاده از آن ها را جهت بارگذاری و اشباع نمودن نمونه های با ارتفاع زیاد فراهم نمی کند. بنابراین نیاز بود تا دستگاه مذکور و سلول آن مطابق با ابعاد نمونه استاندارد تک محوری اصلاح و بازسازی شوند. این امر با اعمال تغییرات در دستگاه استاندارد تحکیم و ساخت سلول های تحکیم با ابعاد و اندازه های جدید تحقق یافت که توضیحات بیشتر در خصوص جزئیات آن در ادامه مطرح شده است. با این شبیه سازی عملاً امکان بررسی تاثیر شرایط موجود در محل<sup>۱</sup> بر خصوصیات خاک تثبیت شده، میسر شده است. در مجموع ده دستگاه تحکیم استاندارد طراحی مجدد، اصلاح و بازسازی شدند [۲۴] که از این پس تحت عنوان دستگاه شبیه ساز تنش وارد بر خاک در عمق نامگذاری شده و مورد خطاب قرار می گیرند. شکل های ۶ و ۷ به ترتیب کلیه تغییرات اعمال شده بر روی سلول و بدنه اصلی دستگاه را نشان می دهند.

نسبت طول به ضخامت دیواره های ساخته شده به روش CSM، با توجه به عمق طراحی عدد بزرگی است. بنابراین رینگ های تحکیم (قالب های جدید) مطابق با استاندارد نمونه های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (نسبت قطر به طول ۲ تا ۳) ساخته شده اند. همچنین جهت شبیه سازی درست و به حداقل رساندن میزان خطا در انجام آزمایش ها لازم بود تا نمونه ها به صورت همگن و تا جای ممکن بدون خلل و فرج مشهود، درون قالب ها ساخته شوند، بنابراین امکان ساخت و استفاده از قالب هایی با جنس معمول مانند برنج و فولاد وجود نداشت و نیاز به قالب هایی شفاف بود تا هم در حین ساخت نمونه، داخل آن مشخص باشد و هم به مقدار کافی مقاوم باشند تا در برابر فشارهای وارده در اثر بارگذاری دستگاه شبیه ساز تنش وارد بر خاک در عمق مقاومت کرده و نشکنند. به این منظور از لوله های شفاف از جنس پلکسی گلس<sup>۲</sup> و به قطر ۵۰ میلی متر جهت ساخت قالب استفاده شده است که در قطعاتی به طول ۱۳۰ میلی متر برش خورده و تراشکاری شده اند تا به عنوان جایگزینی مناسب بجای قالب های مرسوم استفاده شوند.

از آنجایی که امکان قرار دادن قالب های ساخته شده در داخل سلول های استاندارد تحکیم وجود نداشت، نیاز به اصلاحات دیگری

1 In-Situ  
2 Plexiglass

#### ۴-۲- آماده‌سازی‌ها



شکل ۸. مراحل مخلوط نمودن ترکیبات شامل خاک، سرباره و آهک هیدراته

Fig. 8. Stages of mixing native saturated soil and additives



شکل ۹. نمونه‌های ساخته شده درون قالب‌های پلکسی‌گلس و سلول‌های تحکیم

Fig. 9. Prepared sample installed in the oedometer cells

جدول ۵. ویژگی‌های ترکیب ساخته شده

Table 5. Properties of the soil mixture

واحد	مقدار	مشخصات مخلوط
%	۳۹	رطوبت اشباع خاک بکر
%	۱۲	سرباره ACBFC
%	۳	آهک هیدراته IHL
%	۱۵	رطوبت دوغاب
-	۱:۱	نسبت اختلاط افزودنی‌ها به آب
%	۵۴	رطوبت نهایی ترکیب
%	۳۰	مقدار کل دوغاب اضافه شده

معمولا با افزایش عمق، خاک موجود در محل تحت شرایط نیمه‌اشباع و اشباع قرار می‌گیرد. روش CSM، برای تثبیت خاک‌های سست اشباع و نیمه‌اشباع مناسب است. برای شبیه‌سازی شرایط اشباع، رطوبتی معادل با ۳۹ درصد وزن خشک خاک بکر به آن اضافه شد که این مقدار با قرار دادن خاک به مدت ۵۶ روز تحت شرایط اشباع و اندازه‌گیری درصد رطوبت آن پس از مدت زمان مذکور به دست آمده‌است. به منظور توزیع کامل و یکنواخت رطوبت در بین ذرات خاک و جلوگیری از تبخیر آن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون دو لایه کیسه نایلونی خالی شده از هوا قرار گرفتند.

سپس مقادیر متفاوتی از افزودنی‌های سرباره و آهک بر مبنای درصد مشخصی از وزن خشک خاک بکر انتخاب و به آن اضافه شدند. در این مطالعه ۱۵ درصد وزن خشک خاک با افزودنی‌های فوق جایگزین شده‌است. بر این اساس ۱۲ درصد سرباره، ۳ درصد آهک هیدراته صنعتی و ۱۵ درصد آب با یکدیگر ترکیب و دوغاب حاصل به مدت حداقل ۵ دقیقه توسط همزن برقی با سرعت ده هزار دور در دقیقه مخلوط شد. همان‌طور که مشخص است نسبت سرباره به آهک، ۴ در مقابل ۱ و نسبت این دو افزودنی به آب برابر با یک در نظر گرفته شده‌است. تحقیقات انجام شده پیشین نشان داده‌است که اختلاط سرباره و آهک به نسبت ۵ به ۱ برای فعال کردن سرباره به منظور انجام واکنش‌های شیمیایی کافی می‌باشد، اگرچه با بالا رفتن مقدار سرباره نسبت مذکور ممکن است رضایت بخش نباشد [۲۵]. با توجه به این موضوع برای کاهش میزان مصرف سرباره و اطمینان از حضور مقدار کافی از آهک به عنوان فعال‌ساز، نسبت ۴ به ۱ لحاظ شده‌است. در مرحله بعد دوغاب ساخته شده به خاک بکر اشباع اضافه گردید و برای رسیدن به مخلوطی همگن، این مواد تا رسیدن به رنگی یکنواخت با یکدیگر ترکیب شدند. شکل ۸ وضعیت خاک در مراحل مختلف بیان شده را نشان می‌دهد.

ترکیب نهایی ساخته شده، در چندین لایه درون قالب پلکسی‌گلس ریخته و هر لایه به آرامی و با فشار تا حد ممکن متراکم شد. جهت اطمینان از همگن و مشابه بودن نمونه‌های ساخته شده سعی شد که وزن مخصوص کلیه نمونه‌ها پس از ساخت دارای مقادیری نزدیک به هم باشند (مشاهده جدول ۷). سپس نمونه‌های ساخته شده درون سلول‌های اصلاح شده مطابق آنچه در شکل ۹ نشان داده شده‌است



جدول ۶. برنامه انجام آزمایش‌ها  
Table 6. Laboratory test plan

واحد	مقدار	مشخصات نمونه‌ها
-	۸	تعداد نمونه‌های تحت فشار
-	۲	تعداد نمونه‌های بدون اعمال فشار
Kg/cm <sup>2</sup>	۴، ۳، ۲، ۱	فشارهای اعمالی
روز	۵۶ و ۲۸	زمان بارگذاری، عمل‌آوری و تثبیت

جدول ۷. مشخصات نمونه‌ها بلافاصله پس از ساخت  
Table 7. Mixture properties before consolidation test

واحد	مقدار	مشخصات نمونه‌ها
gt/cm <sup>3</sup>	۱/۷۳	وزن مخصوص اشباع
gt/cm <sup>3</sup>	۱/۲۰	وزن مخصوص خشک
%	۵۴	درصد رطوبت

قبل و پس از بارگذاری، عمل‌آوری و تثبیت ارائه‌شده و تاثیر عوامل مذکور بر خصوصیات مهندسی نمونه‌های ساخته شده به روش CSM، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است.

#### ۵-۱- خصوصیات نمونه‌های ساخته شده پیش از بارگذاری و عمل‌آوری

بلافاصله پس از ساخت نمونه‌ها درون قالب‌های پلکسی‌گلس و پیش از قرارگیری آن‌ها در داخل سلول‌های تحکیم، وزن مخصوص اشباع آن‌ها اندازه‌گیری شد. از آنجایی که مقادیر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها به یکدیگر بسیار نزدیک بودند، میانگین وزن مخصوص اشباع ۱۰ نمونه ساخته شده شامل ۱۲ درصد سرباره و ۳ درصد آهک هیدراته به عنوان وزن مخصوص اشباع نهایی در نظر گرفته شده‌است. روند مذکور در محاسبه وزن مخصوص خشک نمونه‌ها نیز تکرار شده‌است. نتایج حاصل در جدول ۷ آمده‌است.

نوع خاک، مقدار سرباره، آهک و رطوبت محیط از پارامترهای تاثیر گذار بر وزن مخصوص نمونه‌های ساخته شده می‌باشند. بیشتر مطالعات انجام شده تاکید بر اثر آهک بر وزن مخصوص خشک حداکثر

جاگذاری شدند. ویژگی‌های ترکیب ساخته شده در جدول ۵ ارائه شده‌است. لازم به ذکر است که درصد‌های بیان شده نسبت به وزن خشک خاک بکر می‌باشند.

#### ۴-۳- چگونگی انجام آزمایش‌ها

فشار وارد بر توده خاک در دیوارهای ساخته شده به روش CSM، با افزایش عمق بیشتر می‌شود بنابراین دستگاه شبیه‌ساز تنش وارد بر خاک در عمق وسیله‌ای مناسب برای اعمال چنین فشارهایی به نمونه‌های ساخته شده‌است. با توجه به ابعاد نمونه‌ها از دستگاه‌های تحکیم اصلاح شده به این منظور استفاده شده‌است. بازوی دستگاه کمک می‌کند تا نیروی وارد بر یک سمت آن (توسط وزنه‌های بارگذاری) در سمت دیگر بازو ۱۰ برابر شده و سپس به کمک صفحه و کلاهک بارگذاری به صورت یک بارگذاری یکنواخت دایروی به نمونه اعمال شود. بر این اساس ۱۰ نمونه موجود به ۵ گروه دوتایی تقسیم شدند که هر جفت از آن‌ها تحت یک فشار ثابت و مشخص به مدت ۲۸ و ۵۶ روز در شرایط اشباع (غرقاب) قرار گرفتند. با انجام این کار نمونه‌های ساخته شده دقیقاً مشابه با آنچه در عمل و در اعماق مختلف روی می‌دهد بارگذاری، عمل‌آوری و تثبیت شدند. فشارهای قائم وارد بر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده‌اند. دو نمونه نیز صرفاً تحت اثر وزن خود (فشار قائم صفر) عمل‌آوری و تثبیت شدند. این دو نمونه عملاً نماینده سطحی ترین لایه خاک تثبیت شده می‌باشند. سرانجام با انتهای مدت زمان عمل‌آوری خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها تعیین شده‌است. عمق معادل با تنش‌های وارده از تقسیم فشار قائم اعمالی بر وزن مخصوص اشباع نمونه‌های ساخته شده قابل محاسبه است که در بخش نتایج به آن اشاره است. دمای آزمایشگاه در طی کلیه مراحل آزمایش ثابت و در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده‌است. لازم به ذکر است جهت اطمینان از صحت نتایج، برنامه آزمایش مطرح شده حداقل دو مرتبه به طور کامل تکرار شده و میانگین نتایج به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شده‌است. جزییات مربوط به برنامه آزمایش‌های انجام شده در جدول ۶ ارائه شده‌است.

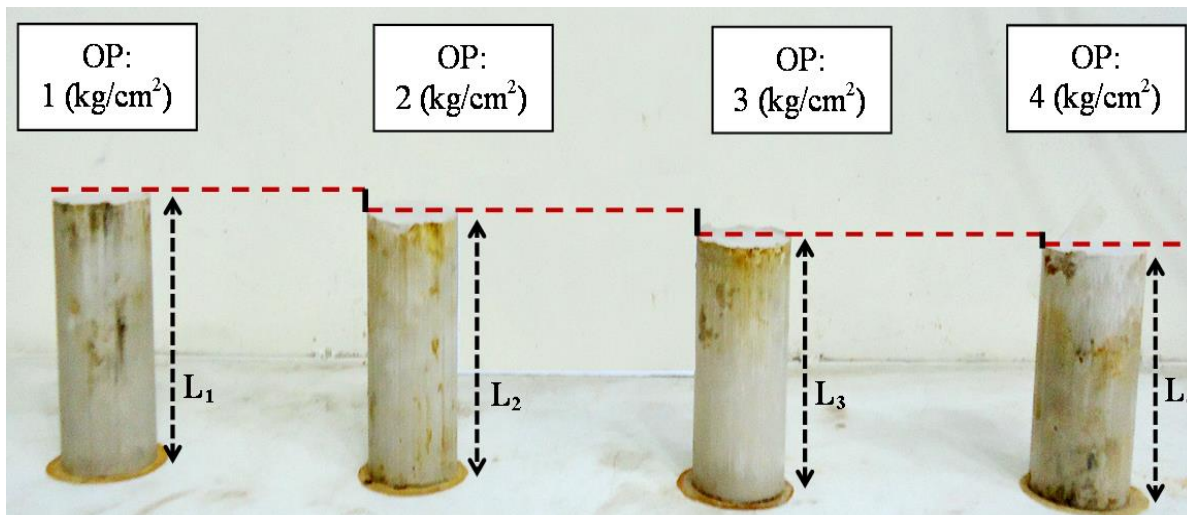
#### ۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به خصوصیات نمونه‌های ساخته شده

جدول ۸. عمق معادل قرارگیری نمونه‌ها

Table 8. Applied pressures and equivalent depths

عمق معادل (m)	فشار قائم ( $\text{kg/cm}^2$ )
۰	صفر
۵/۸	۱
۱۱/۶	۲
۱۷/۳	۳
۲۳/۱	۴



شکل ۱۰. تغییر شکل نمونه‌ها تحت فشارهای سربرار قائم مختلف پس از عمل‌آوری  
Fig. 10. Samples settlements after applying overburden pressures

حاصل نشان می‌دهند که تاثیر حضور آهک و رطوبت ۵۴ درصدی در کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها اندکی بیشتر از تاثیر سربراره جهت افزایش وزن مخصوص آن‌ها بوده‌است. (مشاهده جدول‌های ۱ و ۷).

#### ۵-۲- خصوصیات نمونه‌های ساخته شده پس از بارگذاری و عمل‌آوری

نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۸ و ۵۶ روز به کمک دستگاه‌های تحکیم اصلاح‌شده، تحت فشارهای قائم وارده، عمل‌آوری و تثبیت شدند. عمق معادل با هر فشار از تقسیم این فشارها، بر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها (جدول ۷)، محاسبه و در جدول ۸ نشان داده شده‌است. در پایان مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها به کمک جک هیدرولیکی

نمونه‌هایی داشته‌اند که با رطوبت بهینه ساخته شده‌اند. تحقیق حاضر به بحث درخصوص تاثیر ترکیب دو ماده مذکور، آن هم تحت شرایط اشباع و در محل، بر وزن مخصوص اشباع و خشک نمونه‌ها و دیواره‌های ساخته شده به روش CSM می‌پردازد. مقایسه بین وزن مخصوص اشباع و خشک خاک بکر و ترکیبات ساخته شده پیش از اعمال بارگذاری و عمل‌آوری نشان می‌دهد که استفاده از دوغاب سربراره-آهک در کل منجر با کاهش جزیی در وزن مخصوص نمونه‌ها شده‌است. در واقع آهک و آب دارای وزن مخصوص پایین و سربراره دارای وزن مخصوص بالا می‌باشد. بنابراین این مواد تاثیری متضاد بر وزن مخصوص نهایی نمونه‌های ساخته شده دارند. نتایج

رطوبت نمونه‌ها نیز کمتر شده‌است. این امر نشان می‌دهد که تغییرات عمق با رطوبت نسبت عکس دارند و افزایش یکی باعث کاهش دیگری می‌شود. دلیل اصلی این پدیده همان فرآیند تحکیم یک‌بعدی خاک است. بنابراین برای نمونه واقع در عمقی مشخص فشار سربار معادلی وجود دارد که این فشار سربار در طی ۲۸ و ۵۶ روز بارگذاری به تسریع زه‌کشی و خروج بیشتر آب اضافی بین دآن‌های کمک می‌کند که یکی از دلایل کاهش رطوبت نمونه‌ها محسوب می‌شود. البته این تاثیر تا عمقی معین ادامه داشته‌است که در بخش مربوطه توضیحات لازم در مورد آن ارائه شده‌است.

ارتباط بین اعماق مختلف قرارگیری نمونه‌ها، زمان عمل‌آوری و درصد رطوبت آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. در این شکل خطوط A و B، بر مقادیر درصد رطوبت نمونه های ۲۸ و ۵۶ روزه مماس شده‌اند که شیب آن‌ها نشان‌دهنده نرخ کاهش این مقادیر است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شیب خط A از ۱۰۲ درصد به ۴۲ و سپس ۲۰ درصد کاهش یافته‌است و شیب خط B از ۵۰ به ۱۸ درصد رسیده‌است. بنابراین این دو خط عموماً تا عمق ۱۱/۶ متری دارای شیب تند بوده و با افزایش بیشتر عمق از شیب آن‌ها به وضوح کاسته شده‌است. در واقع در نواحی سطحی فشار سربار وارد بر توده خاک کم و بنابراین توده خاک اشباع دارای حفرات زیادی است که عمدتاً با آب پر شده‌اند، در نتیجه درصد رطوبت خاک تثبیت‌شده بالا است. با افزایش تدریجی عمق و به تبع آن افزایش فشار قائم، هوای اندک موجود در بین ذرات خاک اشباع خارج می‌شود. از آنجایی که خاک رسی دارای نفوذپذیری کمی است با گذشت زمان و به تدریج، بخشی از رطوبت زه‌کشی شده و فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش یافته و یا کاملاً زائل می‌شود. در این شرایط عملاً تنش‌های موثر موجود در توده خاک نیز افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که درصد رطوبت نمونه‌ها و دیواره‌های ساخته شده به روش CSM، به شدت به عمق وابسته است و بیشترین تغییرات و پیرو آن بحرانی‌ترین شرایط در نواحی کم عمق روی می‌دهد. در این تحقیق عمق ۱۱/۶ متری به عنوان عمق بحرانی شناخته و تعیین شده‌است که با گذر از آن کلیه نمونه‌های تثبیت شده به رطوبت تقریباً یکسان ۳۷ درصد با اختلاف ناچیز رسیده‌اند. جالب توجه است که این مقدار رطوبت کاملاً مستقل از محیط کاملاً اشباع (شرایط غرقاب) پیرامون نمونه‌ها در مدت زمان بارگذاری-عمل‌آوری و همچنین رطوبت ۵۴ درصدی نمونه‌ها در

از درون قالب‌های پلکسی‌گلس خارج و به منظور تعیین وزن مخصوص اشباع وزن شدند. جهت تعیین درصد رطوبت اشباع نمونه‌های عمل‌آوری شده در اعماق مختلف، بخشی از قسمت میانی نمونه جدا شده و قبل و پس از خشک شدن در گرمخانه وزن شده‌است. این روند عیناً برای نمونه‌هایی که تحت بارگذاری نبودند نیز انجام شده‌است. لازم به ذکر است که طی بازدید عینی از نمونه‌های عمل‌آوری شده مشاهده شد که آن‌ها دارای سطحی صاف، صیقلی و فاقد هرگونه منافذ مشهود بودند (شکل ۱۰).

تغییرات مربوط به ارتفاع نمونه‌های ساخته شده پس از طی شدن ۲۸ و ۵۶ روز فرآیند عمل‌آوری تحت فشارهای سربار مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که در عمق بیشتر و پیرو آن تحت فشار سربار<sup>۱</sup> بزرگ‌تری قرار داشتند کاهش ارتفاع بیشتری را نسبت به نمونه‌های مشابه از خود نشان داده‌اند بر این اساس  $L1 > L2 > L3 > L4$  بوده‌است. علاوه بر این درصد تغییر شکل نمونه‌ها (تغییر طول به طول اولیه نمونه) برای نمونه‌های ۲۸ روزه از ۶/۹ درصد در نقاط سطحی‌تر تا ۱۴/۶ درصد در عمیق‌ترین نقطه متغیر بوده‌است. در حالی که این مقدار برای نمونه‌های ۵۶ روزه اندکی بیشتر و از ۷/۷ تا ۱۵/۴ درصد بوده‌است. همچنین مشاهده شد که با اعمال فشار بیشتر از ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (گذر از عمق ۱۱/۶ متری) درصد کاهش ارتفاع نمونه‌ها ( $L3 / L4$ ) نسبت به یکدیگر کاهش یافته و حدود ۲/۷ درصد بوده‌است این امر نشان می‌دهد با گذر از این عمق تراکم‌پذیری نمونه‌ها کاهش یافته و آن‌ها به بافتی متراکم رسیده‌اند.

#### ۵-۲-۱- اثر عمق و زمان عمل‌آوری بر درصد رطوبت نمونه‌ها

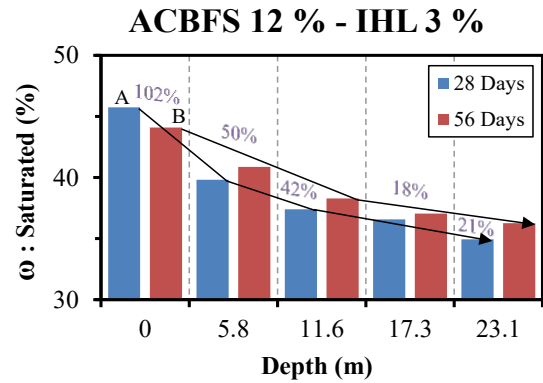
نتایج حاصل نشان دادند که رطوبت نمونه‌های سطحی (عمق صفر) که تحت هیچ‌گونه فشار سرباری نبوده و فقط تحت تاثیر وزن خود در مدت ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری و تحکیم یافته‌اند، از مقدار اولیه ۵۴ درصد به حدود ۴۵ درصد رسیده‌است. از طرفی زه‌کشی و خروج آب اضافی از نمونه‌ها نیز در مدت زمان عمل‌آوری در افت رطوبت آن‌ها موثر است. اگرچه به نظر می‌رسد که در نواحی سطحی کاهش رطوبت نمونه‌ها عمدتاً ناشی از واکنش‌های شیمیایی بین خاک و افزودنی‌ها است. با افزایش عمق و پیرو آن افزایش فشارهای قائم وارده

ناچیز است.

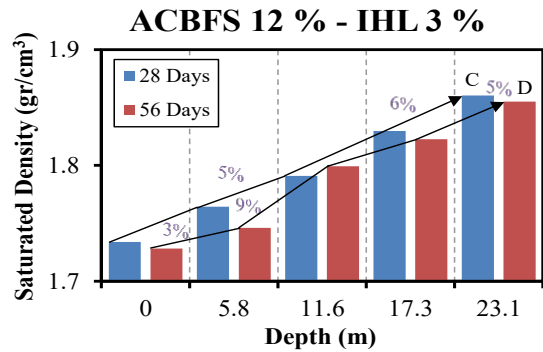
در نهایت دو فاکتور فیزیکی (افزایش عمق و فشار) و شیمیایی (واکنش‌های خاک و افزودنی‌ها با گذر زمان) عوامل اصلی تاثیرگذار بر میزان رطوبت نمونه‌های ساخته شده به این روش، می‌باشند. اگرچه تاثیر مورد اول از مورد دوم بیشتر است.

۲-۲-۵- اثر عمق و زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها با افزایش عمق، وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها با شیبی ملایم افزایش یافته‌است. تاثیر عمق و مدت زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها و دیواره‌های ساخته شده به روش CSM در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. خط C بر مقادیر وزن مخصوص اشباع نمونه‌های ۲۸ روزه و خط D بر مقادیر وزن مخصوص اشباع نمونه‌های ۵۶ روزه مماس شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خط C تا عمق ۱۱/۶ متری دارای شیب ۵ درصد و از این عمق تا عمق ۲۳/۱ متری دارای شیب ۶ درصد و به طور میانگین دارای شیب ۵/۵ درصد است. خط D نیز تا عمق ۱۱/۶ متری دارای شیب ۳ و ۹ درصد بوده و از این عمق تا عمق ۲۳/۱ متری دارای شیب حدود ۵ درصد است که میانگین شیب کلی این خط نیز در مجموع حدود ۵/۵ درصد است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که وزن مخصوص اشباع نمونه‌های تثبیت شده ۲۸ و ۵۶ روزه تا عمق حدود ۲۳ متری با شیب ثابت ۵/۵ درصد افزایش یافته‌است.

وزن مخصوص اشباع نمونه‌های نواحی سطحی تا عمق ۵/۸ متری در مقایسه با خاک بکر اولیه (مشاهده جدول ۱) کمی کمتر می‌باشد. رطوبت ۵۴ درصدی مربوط به نمونه‌های ساخته شده و حضور آهک عواملی هستند که در کاهش وزن مخصوص اشباع نقش دارند. به عبارت دیگر رطوبت و وزن مخصوص خاک بکر اشباع در ابتدا به ترتیب ۳۹٪ و ۱/۷۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده‌است. بلافاصله پس از اضافه کردن افزودنی‌ها و آب به خاک بکر با نسبت ۱:۱ (۱۵) درصد افزودنی و ۱۵ درصد آب به شکل دوغاب و منطبق بر روش CSM) و ساخت نمونه‌ها درون قالب‌ها، مقدار رطوبت نمونه‌ها از ۳۹٪ به ۵۴٪ افزایش و مقدار وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها از ۱/۷۶ به ۱/۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش یافته‌است. پایین بودن وزن مخصوص آب و آهک در کاهش وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها در این مرحله نقش داشته‌اند و عملاً ذرات آهک با در بر گرفتن



شکل ۱۱. تاثیر عمق و زمان عمل‌آوری بر درصد رطوبت نمونه‌ها  
Fig. 11. Moisture content of treated samples



شکل ۱۲. تاثیر عمق و زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها  
Fig. 12. Saturated densities of treated samples

زمان ساخت بوده‌است. عامل تاثیرگذار بعدی بر کاهش رطوبت نمونه‌ها زمان عمل‌آوری می‌باشد. واکنش‌های شیمیایی و پوزولانی انجام شده بین سرباره، آهک هیدراته صنعتی و خاک رسی نرم با ایجاد اتصال بین ذرات خاک، منجر به تجمع و یک‌پارچه‌سازی آن‌ها شده و در نهایت با پرکردن حفرات موجود در خاک سست و یا گیر انداختن آن‌ها موجب کاهش رطوبت نمونه‌ها از یک سو و تقلیل میزان نفوذپذیری نمونه‌ها از سوی دیگر می‌شوند. با توجه به شکل ۱۱ مقدار اختلاف بین درصد رطوبت اشباع نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه تحت فشارهای سربار یکسان، بسیار ناچیز است. عمدتاً درصد رطوبت نمونه‌های ۵۶ روزه اندکی بیشتر از درصد رطوبت نمونه‌های ۲۸ روزه بوده‌است که علت این امر مدت زمان طولانی‌تر قرار گرفتن نمونه‌ها تحت شرایط اشباع (غرقاب) است. حداکثر مقدار این اختلاف حدود ۲ درصد بوده‌است که بسیار

قرارگیری آن‌ها تحت شرایط اشباع (غرقاب) بوده‌است. اگرچه این اختلاف بسیار ناچیز بوده و عملاً افزایش زمان عمل‌آوری تاثیر قابل توجهی بر تغییر وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها تحت فشارهای قائم مختلف نداشته‌است.

#### ۵-۲-۳- اثر عمق و زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها

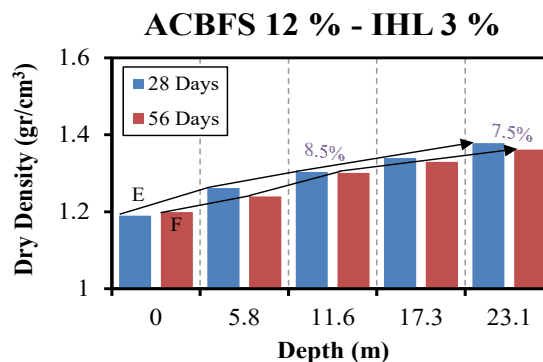
تاثیر عمق و مدت زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص خشک نمونه‌های ساخته شده به روش CSM در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. خط E بر مقادیر وزن مخصوص خشک نمونه‌های ۲۸ روزه و خط F بر مقادیر وزن مخصوص خشک نمونه‌های ۵۶ روزه مماس شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود وزن مخصوص خشک نمونه‌ها با شیبی ملایم افزایش یافته‌است. خطوط E و F به طور میانگین دارای شیب ۸/۵ و ۷/۵ درصد می‌باشند. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که وزن مخصوص خشک نمونه‌های تثبیت‌شده ۲۸ و ۵۶ روزه تا عمق حدود ۲۳ متری با شیب ثابت ۸ درصد افزایش یافته‌است.

وزن مخصوص خشک نمونه‌های سطحی در مقایسه با خاک بکر (جدول ۱)، کاهش یافته‌است که این کاهش می‌تواند به دلیل تشکیل بافت سیمانی<sup>۱</sup> و متخلخلی باشد که در اثر واکنش‌های شیمیایی خاک و آهک تشکیل شده‌است [۲۷]. لازم به ذکر است که حضور فشارهای قائم عاملی تاثیرگذار بر افزایش وزن مخصوص خشک نمونه‌های تثبیت‌شده‌است. با افزایش فشار و گذر از عمق بحرانی ۱۱/۶ متری، وزن مخصوص خشک نمونه‌ها از خاک بکر بیشتر شده‌است.

شکل ۱۳ هم‌چنین اختلاف بین وزن مخصوص خشک نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه تحت فشارهای قائم مختلف را نشان می‌دهد. مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر موارد وزن مخصوص خشک نمونه‌های ۵۶ روزه اندکی از نمونه‌های ۲۸ روزه کمتر بوده‌است. اگرچه این اختلاف به قدری ناچیز است که می‌توان گفت افزایش زمان عمل‌آوری تاثیر قابل توجهی بر تغییر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها تحت فشارهای قائم مختلف نداشته‌است.

#### ۵-۲-۴- اثر عمق و زمان عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومتی نمونه‌ها

پس از تعیین تغییرات ایجاد شده در خصوصیات فیزیکی نمونه‌های اصلاح شده به روش CSM، جهت تعیین تغییرات ایجاد



شکل ۱۳. تاثیر عمق و زمان عمل‌آوری بر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها  
Fig. 13. Dry densities of treated samples

دانه‌های خاک می‌توانند باعث ایجاد ذرات بزرگ‌تر با حفرات بیشتر شوند که خود منجر به کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها می‌شود [۲۶]. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری شده‌اند. نمونه‌های واقع در سطح (عمق صفر) تحت هیچ‌گونه سربار قائمی نبوده و فقط تحت تاثیر وزن خود نمونه تحکیم شده‌اند و نمونه‌های واقع در اعماق کمتر (تا عمق ۵/۸ متر) نیز حداکثر تحت فشار قائم ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده‌اند. در واقع اگرچه افزایش عمق از سطح تا ۵/۸ متر باعث افزایش فشار تحکیمی، زه‌کشی بیشتر آب اضافی، افت رطوبت، نشست و کاهش حجم نمونه‌ها در مدت زمان عمل‌آوری شده‌است اما تا این عمق رطوبت نمونه‌های حاوی افزودنی‌ها هم‌چنان از رطوبت خاک بکر اشباع بیشتر (حدود ۴۰٪) و وزن مخصوص اشباع این نمونه‌ها هنوز از وزن مخصوص اشباع خاک بکر کمتر است (حدود ۱/۷۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع). با افزایش بیشتر عمق و پیرو آن فشار تحکیمی و رسیدن به عمق ۱۱/۶ متر، رطوبت نمونه‌ها از رطوبت خاک بکر اشباع کمتر و وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها از خاک بکر بیشتر شده‌است. عملاً افزایش فشارهای قائم اعمالی باعث خروج آب حفره‌ای اضافی، کاهش حفرات، تراکم بیشتر خاک و در نتیجه افزایش وزن مخصوص اشباع نمونه‌ها شده‌است. می‌توان مشاهده کرد که اثر عمق و حضور سرباره در بالابردن وزن مخصوص نمونه‌ها قویتر از اثر آب و آهک در کاهش آن‌ها بوده‌است.

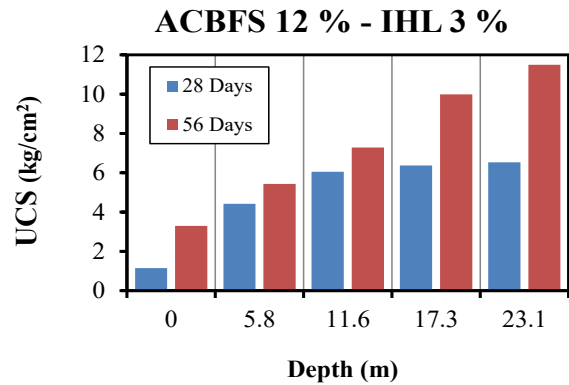
با توجه به نتایج حاصل در اکثر موارد وزن مخصوص اشباع نمونه‌های ۵۶ روزه اندکی از نمونه‌های ۲۸ روزه کمتر است که علت آن جذب رطوبت بیشتر توسط نمونه‌ها به علت مدت زمانی طولانی‌تر

انجام واکنش‌های بیشتر و شدیدتر منجر به تشکیل ژل‌های چسبنده بیشتر و مصالح سیمانته با مقاومت بالاتر شده‌است. علاوه بر موارد ذکر شده افزایش عمق و فشارهای قائم سربار وارده که به تراکم بیشتر نمونه‌ها کمک کرده‌اند از سایر عوامل تاثیر گذار بر افزایش مقاومت آن‌ها بوده‌اند.

حداکثر مقدار افزایش مقاومت نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری شده از سطحی ترین نقطه (عمق صفر) تا عمیق‌ترین نقطه (عمق ۲۳/۱ متری) به ترتیب حدود ۴۶۸ و ۲۴۸ درصد بوده‌است. این امر نشان می‌دهد که اگرچه نرخ رشد مقاومت در ۲۸ روز اول شیب تندتری دارد اما افزایش مقاومت نمونه‌ها تا ۵۶ روز هم‌چنان با نرخ رشدی قابل توجه ادامه داشته‌است.

از مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه خاک بکر ساخته شده با درصد رطوبت بهینه با حداکثر مقاومت فشاری تک‌محوری حاصل از نمونه‌های تثبیت‌شده به روش CSM مشاهده می‌شود که با استفاده از این شیوه و در شرایط اشباع، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک بکر در حدود ۸۸۳ درصد و به عبارتی تا ۸/۸ برابر افزایش یافته‌است.

در نهایت ذکر این نکته لازم است که شرکت ابداع‌کننده روش CSM بدون اشاره مستقیم به مواردی از جمله جنس خاک، شرایط رطوبتی محل، عمق قرارگیری نمونه‌ها و درصد افزودنی سیمان، حصول مقاومت فشاری تک‌محوری در بازه ۵ تا ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را با استفاده از افزودنی سیمان مقداری مطلوب ارزیابی می‌کند. بر این اساس مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های حاوی سرباره و آهک در حداکثر مقدار خود به حدود ۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است که در بازه مطلوب قرار داشته و نشان از امکان جایگزینی افزودنی سرباره و آهک به جای سیمان دارد. هم‌چنین محققین با بررسی نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی با نمونه‌های مغزه‌گیری شده مشابه و نمونه‌های دارای ابعاد و اندازه واقعی و میانگیری از نتایج حاصل نشان داده‌اند که بسته به دقت شبیه‌سازی آزمایشگاهی شرایط در محل و با در نظر گرفتن شیوه اصلاح خاک مورد استفاده، مقاومت نمونه‌های آزمایشگاهی می‌تواند از ۱ تا ۵ برابر بیشتر از مقاومت نمونه‌های در محل باشد که توجه به این مورد نیز حائز اهمیت است [۷، ۸ و ۲۸].



شکل ۱۴. تاثیر عمق و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

Fig. 14. UCS of treated samples

شده در خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها و به عبارتی تعیین پارامترهای مقاومتی آن‌ها از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شده‌است. این آزمایش بر روی نمونه‌های عمل‌آوری و تثبیت‌شده واقع در اعماق مختلف انجام شده‌است تا از این طریق امکان مقایسه تغییرات حاصل در عمق فراهم شود. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه خاک بکر ساخته شده با درصد رطوبت بهینه حدود ۱/۱۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده‌است (مشاهده جدول ۱). ارتباط بین اعماق مختلف قرارگیری نمونه‌ها و زمان عمل‌آوری بر افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با افزودنی‌های سرباره-آهک به روش CSM در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است.

نتایج حاصل نشان می‌دهند که به استثنای یک مورد (نمونه ۲۸ روز عمل‌آوری شده تحت فشار سربار صفر) با اضافه نمودن افزودنی سرباره-آهک مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک اصلاح شده بهبود یافته و از خاک بکر بیشتر شده‌است. مقدار این افزایش برای نمونه‌های ۵۶ روز عمل‌آوری شده بیشتر از نمونه‌های ۲۸ روزه بوده‌است. نکته قابل‌توجه آن است که افزایش مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه با گذر از عمق بحرانی (۱۱/۶ متر) اندک بوده‌است. در حالی که نمونه‌های ۵۶ روزه با گذر از عمق بحرانی هم‌چنان رشد مقاومتی قابل توجهی داشته‌اند. می‌توان گفت فرصت بیشتر برای انجام واکنش‌های زمان‌بر پوزولانی در مدت زمان ۵۶ روز و حضور رطوبت در محیط پیرامون (شرایط اشباع) جهت تامین آب مورد نیاز برای

## ۶- نتیجه گیری

عمق با شیبی ثابت بیشتر می‌شود. بنابراین اگرچه دیواره‌های ساخته شده دارای جنس یکسانی می‌باشند ولی وزن مخصوص آن‌ها در عمق ثابت نیست که این امر باید مورد توجه قرار گیرد.

حضور سرباره و فشار قائم عواملی برای افزایش و حضور آهک و آب عواملی برای کاهش وزن مخصوص خشک نمونه‌ها هستند، اگرچه نهایتاً تاثیر عوامل افزایشده بیشتر از کاهشده است.

استفاده از روش اختلاط خاک در عمق منجر به افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها می‌شود. این افزایش مقاومت با افزایش عمق ارتباط مستقیم دارد. به طوریکه حداکثر مقدار این افزایش نسبت به مقاومت معادل خاک بکر حدود ۸/۸ برابر و مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد افزودنی و واقع در عمق ۲۳/۱ متری بوده که به مدت ۵۶ روز تحت شرایط اشباع عمل‌آوری شده‌است.

## ۷- تشکر و قدردانی

این تیم تحقیقاتی بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت کیهان خاک به سبب کمک‌های فراوان در ساخت ابزار و دستگاه‌های تحقیقاتی مورد استفاده و همچنین دسترسی کامل به امکانات و فضای آزمایشگاهی، اعلام می‌نماید.

## مراجع

- [1] A. Rooh Bakhsh, B. Kalantari, Clay Stabilization by Using Lime and Waste Stone Powder, Amirkabir Journal of Science and Research Civil and Environmental Engineering (AJSR-CEE), 48(4) (2016) pp. 429-438 (in Persian).
- [2] A. Zegeye, S. Yahaya, C.I. Fialips, M.L. White, N.D. Gray, D.A.C. Manning, Refinement of Industrial Kaolin by Microbial Removal of Iron-Bearing Impurities, Applied Clay Science, 86 (2013) pp. 47-53.
- [3] M. Budhu, Soil Mechanics and Foundations, Wiley India Pvt. Limited, New York, United States, 2008.
- [4] F.G. Bell, M.G. Culshaw, Problems soils: a Review from a British Perspective, in: Problematic Soils Symposium, Nottingham, UK, 2001, pp. 1-35.
- [5] M.R. Abdi, F. Charkhyari, Effects of steel slag on strength of fine-grained soils (in Persian), in: 08th

تحقیق پیشرو شامل مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر عمق بر خصوصیات مهندسی خاک رسی نرم تثبیت‌شده با استفاده از روش نوین تراش و اختلاط خاک (CSM) بوده‌است. به این منظور ابزار و دستگاه‌های لازم جهت شبیه‌سازی این روش، طراحی و ساخته شدند و برای اولین بار ترکیباتی حاوی سرباره سرد شده در هوا (ACBFS) و آهک هیدراته صنعتی (IHL) جهت استفاده در روش مذکور و تثبیت عمیق خاک پیشنهاد شده و مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

درصد رطوبت دیواره‌های رسی تثبیت‌شده به روش تراش و اختلاط خاک (CSM) که در محیط‌های اشباع واقع شده‌اند، در عمق ثابت نبوده و با افزایش آن کاهش می‌یابد.

از آنجایی که تغییرات رطوبت می‌تواند بر پارامترهای مقاومتی خاک تثبیت‌شده موثر باشد، عمقی بحرانی معرفی شد که بیشترین مقدار تغییرات رطوبت تا آن عمق روی می‌دهد. با گذر از این عمق نرخ تغییرات رطوبت کاهش یافته و مقدار آن عملاً مستقل از شرایط اشباع پیرامون نمونه‌ها است. این عمق برای خاک رسی نرم تثبیت‌شده به روش تراش و اختلاط خاک در عمق شامل ۱۲ درصد سرباره و ۳ درصد آهک، معادل با ۱۱/۶ متر می‌باشد.

واکنش‌های شیمیایی و پوزولانی ناشی از دوغاب سرباره و آهک هیدراته با خاک رسی نرم، منجر به جذب آب و کاهش رطوبت نمونه‌ها طی مدت زمان عمل‌آوری می‌شوند. علاوه بر این واکنش‌های مذکور با بستن حفرات سطحی باعث کاهش نفوذپذیری و افت رطوبت شده و سطحی صاف و صیقلی را ایجاد می‌نمایند، که در نهایت کاهش رطوبت کلی نمونه‌ها را در پی دارد.

تاثیر فیزیکی افزایش عمق و فشار قائم بر کاهش رطوبت نمونه‌ها بیشتر از تاثیر شیمیایی ناشی از حضور افزودنی‌ها است.

افزافه نمودن دوغابی شامل ۱۲ درصد سرباره و ۳ درصد آهک هیدراته به خاک رسی نرم و مطابق با روش CSM، تغییری در وزن مخصوص اشباع و خشک نمونه‌ها بلافاصله پس از ساخت ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این در نواحی سطحی و کم‌عمق عمل‌آوری ۲۸ و ۵۶ روزه تغییر قابل توجهی در وزن مخصوص نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. وزن مخصوص اشباع و خشک نمونه‌های ساخته شده با افزایش

- with Plastic Waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(No. 6) (2002) 462-472.
- [15] P. Rabbani, Y. Daghigh, M.R. Atrechian, M. Karimi, A. Tolooiyan, The Potential of Lime and Grand Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Mixture for Stabilisation of Desert Silty Sands, *Scientific & Academic Publishing (SAP)*, 2(6) (2012) pp. 108-119.
- [16] FHWA, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA-HRT-13-046, Federal Highway Administration, U.S Department of Transportation, USA, 2016.
- [17] S. Bhuyan, S.P. Singh, Stabilisation of balast furnace slag and fly ash using lime and Rbi grade 81, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2010.
- [18] H.Y. Poh, G.S. Ghataora, N. Ghazireh, Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines, *American Society of Civil Engineers*, 2006 ASCE, 18(2) (2006) 99 229-240.
- [19] K. Axelsson, S.E. Johansson, R. Andersson, Stabilisation of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions, 3, Swedish Deep Stabilisation Research Centre, c/o Swedish Geotechnical Institute, 2002.
- [20] D.D. Higgins, J.M. Kinuthia, S. Wild, Soil Stabilisation Using Lime-Activated GGBS, in: *Proceedings of the 6 th ACI/CANMET International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, American Concrete Institute, Bangkok, Thailand, 1998, pp. 1057-1074.
- [21] M.E.S. Abdel Rahman Ouf, Stabilisation of Clay Subgrade Soil Using Ground Granulated Ballast Furnace Slag, University of Leeds, United Kingdom, 2001.
- [22] M. Kamon, D.T. Bergado, Ground Improvement Techniques, in: *Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, 1991, pp. pp. 526-546.
- [23] H.G. Kempfert, B. Gebreselassie, *Excavations and Foundations in Soft Soils*, Springer, Berlin, International Congress on Civil Engineering Shiraz, Iran, 2009.
- [6] M.R. Abdi, Effects of basic Oxygen steel slag (BOS) on strength and durability of kaolinite, *International Journal of Civil Engineering*, 9(2) (2011) pp. 81-89.
- [7] M.E.C. Bruce, R.R. Berg, J.G. Collin, G.M. Filz, M. Terashi, D.S. Yang, Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, FHWA-HRT-13-046, U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration Design Manual, USA, 2013.
- [8] BAUER Maschinen GmbH, Process Description Manual; Cutter Soil Mixing Process and Equipment, in: 905.656.2, BAUER Foundation Corp, Germany, 2016.
- [9] D. Bellato, P. Simonini, I.P. Marzano, E. Leder, M. Grisolia, T. Vohs, F.W. Gerressen, Mechanical and Physical Properties of a CSM Cut-off/Retaining Wall, in: *ICGI 2012 - International Conference on Ground Improvement and Ground Control*, Wollongong, Australia, 2012.
- [11] F. Gerressen, T. Vohs, CSM-Cutter Soil Mixing—Worldwide Experiences of a Young Soil Mixing Method, in: *Grouting and Deep Mixing 2012, Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, Geotechnical Special Publication 228, American Society of Civil Engineers, Reston, VA., New Orleans, Louisiana, United States, 2012, pp. 281-290.
- [12] D.A. Bruce, Seepage Cut-Offs for Levees and Dams: The Technology Review, in: *Dam Safety Annual Conference Curran Associates, Inc.*, Hollywood, Florida, USA 2009, pp. 1205-1233.
- [13] Y.E.A. Mohamedzein, A.A. Al-Rawas, M.Y. Al-Aghbari, Assessment of Sand– Clay Mixtures For Use in Landfill Liners, *Proceedings of the International Conference on Geo-environmental Engineering*, (2003) 211-218.
- [14] N.C. Consoli, J.P. Montardo, P.D.M. Prietto, G.S. Pasa, *Engineering Behavior of a Sand Reinforced*



- [26] N.K. Sharma, S. Swain, U.C. Sahoo, Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: a Micro Level Investigation, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5) (2012) pp. 1197-1205.
- [27] F.G. Bell, Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, *Engineering Geology*, 42(4) (1996) pp. 223-237.
- [28] O. Matsuo, Determination of Design Parameters for Deep Mixing, in: *Proceedings of Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing*, Coastal Development Institute of Technology, Tokyo, Japan., 2002, pp. 75-79.
- [24] A. Tolooiyan, K. Gavin, Modelling the Cone Penetration Test in Sand using Cavity Expansion and Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Methods, *Computers and Geotechnics*, 38 (2011) pp. 482-490.
- [25] S. Wild, W.A. Tasong, Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Sulphate Resistance of Lime-Stabilised Kaolinite, *Magazine of Concrete Research*, 51(4) (1999) pp. 247-254.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*P. Rabbani, S.H. Lajevardi, Laboratory Investigation of the Effect of Deep Soil Mixing Method on Engineering Properties of Soft Clay Stabilized by Slag and Lime, Amirkabir J. Civil Eng., 51(5) (2019) 925-942.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2018.14279.5609](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14279.5609)



