



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر تثبیت شیمیایی و زیستی بر خصوصیات خاک رس بستر راه

سیامک شفقتیان، غلام مرادی\*، هوشنگ کاتبی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

### کلمات کلیدی:

تثبیت شیمیایی

تثبیت زیستی

بستر رس

پلی الکترولیت کاتیونی

بهسازی میکروبی

**خلاصه:** تثبیت شیمیایی خاک ضعیف بستر راه، یک روش مناسب و ضروری برای پرهیز از مشکلات جایگزینی خاک ضعیف با منابع منتخب قرصه به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی است. در تثبیت شیمیایی، استفاده از مصالح نوین از جمله پلیمرها به جای مصالح سنتی مانند آهک موجب تسریع عملیات و همچنین کاهش فشار بر منابع می شود ولی آثار زیست محیطی و مقاومت درازمدت این روش ها دغدغه متخصصین است. اخیراً طبق توصیه پیمان زیست محیطی کیوتو در بخش تثبیت خاک با اهداف ژئوتکنیکی، تحقیق بر روی روش های نوین زیستی تثبیت خاک از جمله روش "تثبیت میکروبی خاک" گسترش یافته است. در این پژوهش تأثیر تثبیت خاک رس بستر راه به دو روش شیمیایی و زیستی از طریق آزمایش های مختلف، بررسی و مقایسه شده است. در تثبیت شیمیایی از یک پلیمر مایع به نام پلی الکترولیت کاتیونی و در تثبیت زیستی، از روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم، به عنوان یک روش بهسازی میکروبی استفاده شده است. در هر دو روش وزن مخصوص خشک خاک، کاهش و رطوبت بهینه آن افزایش می یابد. تثبیت شیمیایی، دامنه خمیری را افزایش و تثبیت میکروبی آن را کاهش می دهد. هر دو ماده در غلظت های پایین، pH محیط را تا دوره زمانی سه روزه افزایش می دهند. هر دو ماده مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته خاک را تقریباً به یک میزان افزایش می دهند که به لحاظ اقتصاد پروژه (هزینه و زمان)، تثبیت شیمیایی با پلی الکترولیت کاتیونی و به لحاظ مسائل زیست محیطی، تثبیت زیستی به روش MICP برای خاک مورد مطالعه مناسب است.

### ۱- مقدمه

منفرد به نام مونومر تشکیل شده است [۳]. تحقیق بر روی کاربرد پلیمر در بهسازی خاک عمدتاً از دهه پنجاه قرن نوزده میلادی آغاز شده است. در این زمان وین و همکاران، توده شدن و تجمع خاک رس توسط پلیمرها را گزارش نمودند [۴]. لمب نیز تأثیر مثبت پلی اکریل آمید بر خصوصیات مقاومتی و فیزیکی رس سیلت دار را قابل توجه و مناسب تحقیقات بیشتر دانست [۳]. البته در ابتدا عمده کاربرد پلی آمیدها در تثبیت خاک رس در شاخه کشاورزی و با اهداف کاهش نفوذ پذیری و افزایش پایداری بود [۵ و ۶]، ولی به تدریج در شاخه مهندسی عمران نیز گسترش یافته است. در سال ۲۰۰۷ ویلیام اورتز و همکاران تثبیت خاک رس با پلی اکریل آمید، جهت کاهش فرسایش بستر راه های در معرض سیل و پراکنش رس سایت های موقت و اضطراری فرود هلیکوپتر را بررسی کردند [۷]. در سال

در پروژه های بزرگ عمرانی از جمله راه سازی در مناطق با بستر خاک ضعیف، عملیات جایگزینی و جابه جایی خاک بستر به لحاظ زمانی و مالی بسیار پر هزینه است. تثبیت خاک ضعیف موجود یکی از راه های بهینه سازی اجرای این پروژه هاست که به روش های گوناگون از جمله تثبیت شیمیایی انجام می شود. تثبیت شیمیایی با مصالح سنتی مانند آهک، سیمان و ... موجب فشار بر منابع طبیعی می شود. بنابراین استفاده از مصالح نوین مطرح شده و گسترش یافته است [۱]. این مصالح به دسته های کلی پلیمرها، یون ها و آنزیم ها، سولفات ها، رزین ها و نفت و چند شاخه فرعی دیگر تقسیم می شوند [۲]. پلیمر یک ماکرومولکول<sup>۱</sup> آلی است که از ترکیب مولکول های

1 Macro molecule

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: gmoradi@tabrizu.ac.ir



۲۰۱۲ یانگ فنگ و همکاران تأثیر مناسب پلی‌اکریل‌آمید در پایداری مخازن دفن زباله به لحاظ افزایش کرنش تسلیم و نفوذ ناپذیری را گزارش کردند [۸] و در سال ۲۰۱۹ کولای و همکاران تأثیر پلیمر مایع بر مقاومت تک‌محوری و *CBR* سیلت و رس را بررسی و تأثیر مثبت شیمیایی را مفید ارزیابی کردند [۹]. یکی از انواع پلیمرها، پلی‌اکریل‌آمیدها هستند. پلی‌اکریل‌آمید (PAM) یک پلیمر محلول در آب است که توانایی جذب و ته نشین کردن خاک رس را دارد و در صنعت تصفیه آب استفاده می‌شود. هر شاخه پلیمری می‌تواند به سطح چند ذره خاک بچسبد. با توجه به این خصوصیت، استفاده از این ماده به عنوان افزودنی در تثبیت خاک رس مورد توجه قرار گرفته است [۶].

اخیراً تثبیت شیمیایی خاک با مصالح نوین نیز با مشکلاتی از جمله مقاومت دراز مدت و مخاطرات زیست‌محیطی همراه شده است. برای رفع اینگونه مسائل، روش‌های نوین تثبیت از جمله تثبیت زیستی مطرح گردیده که بهسازی میکروبی خاک<sup>۱</sup> (MICP) یکی از زیر مجموعه‌های آن است [۱۰]. در این روش از گونه خاصی از باکتری‌های اسپوردار<sup>۲</sup> که خاصیت رسوب‌زایی دارند، استفاده می‌شود. با افزودن سوسپانسیون باکتری و همچنین مواد واکنشگر شامل اوره و کلرید کلسیم به خاک و با انجام واکنش‌های شیمیایی، رسوب کربنات کلسیم در بین ذرات خاک تولید شده و دانه‌های خاک را به هم متصل می‌کند [۱۱]. بهسازی میکروبی یک رشته بسیار جوان است و هرچند در حال حاضر به لحاظ اجرایی سخت و پرهزینه است [۱۲]، ولی کاربرد آن رو به گسترش بوده و ایده‌های جدید و متنوعی به این روش، اجرایی شده است [۱۳]. در سال ۲۰۱۹ گوتامان و همکاران تأثیر تثبیت میکروبی بر پایداری شیب‌های مناطق سردسیر ژاپن را بررسی کردند [۱۴] و در همین زمان سنایان و همکاران در آمریکا مقاومت بلند مدت دیواره‌های ریزشی معادن را پس از بهسازی میکروبی در یک واحد پایلوت بررسی و آن را مثبت ارزیابی کردند [۱۵]. با توجه به حجم قابل توجه ساخت و ترمیم راه و اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی، مرکز مشترک تحقیقات بزرگراه آمریکا<sup>۳</sup> پروژه‌ای را با عنوان بهسازی میکروبی بستر ضعیف و مسأله‌دار، اجرا نموده که اخیراً (اکتبر ۲۰۱۹) به روز گردیده است

[۱۶].

این فرآیند، پهنه وسیعی از مهندسی عمران از بهسازی مصالح سازه‌ای مثل آجر، بتن و خاک تا جلوگیری از نشت آب در سدها، نشست سازه، ساخت تونل و تثبیت ماسه‌های روان را شامل می‌شود [۱۷] و [۱۸]. در سال ۲۰۰۸ وندر استار<sup>۴</sup> و همکاران در عملیات عبور لوله‌گاز از زیر رودخانه وال در سوئیس، قسمت شنی لایه‌های موجود را با این روش تثبیت کردند [۱۹]. یکی از مشکلات زیست‌محیطی ناشی از خشک شدن دریاچه ارومیه، پیشروی ماسه روان به سمت مناطق روستایی بر اثر فرسایش بادی است که از سال ۲۰۱۶ تثبیت میکروبی ماسه‌های روان در این منطقه توسط فهمی و همکاران در دست مطالعه، بررسی و اجرا می‌باشد [۱۳]. تثبیت میکروبی در مقایسه با تثبیت شیمیایی، نفوذ پذیری خاک را در محدوده مناسب حفظ می‌کند. عدم تغییر بستر آب‌های زیرزمینی، امکان رشد پوشش گیاهی و عدم استفاده از مصالح آلوده‌کننده محیط زیست از دیگر مزایای این روش است [۲۰]. اغلب مطالعه‌های انجام شده در این زمینه مربوط به خاک ماسه است و تثبیت میکروبی خاک‌های رسی به تازگی مورد توجه قرار گرفته و مزایای آن در حال بررسی است [۲۱ و ۲۲]. در این تحقیق خاک مورد مطالعه، خاک رسی بستر راه بوده، برای تثبیت شیمیایی آن از یک نوع پلیمر مایع از شاخه پلی‌اکریل‌آمید به نام پلی‌الکترولیت کاتیونی و برای تثبیت میکروبی از یک نوع باکتری به نام باسیلوس و مواد مغذی کلرید کلسیم و اوره استفاده شده است.

## ۲- مصالح مورد استفاده

### ۲-۱- خاک

در این تحقیق از خاک رس بستر آزاد راه آمل به ساری در حوزه قائمشهر استفاده شده است. طبق نتایج آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ، این خاک بر اساس سیستم متحد، رس با حد روانی بالا (CH)، طبقه بندی می‌شود. در جدول ۱ نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه آمده است.

### ۲-۲- پلیمر مایع

جهت تثبیت شیمیایی از نوعی پلیمر به نام پلی‌الکترولیت کاتیونی

1 Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)

2 Spare-farming Bacteria

3 NCHRP (AASHTO & FHWA)

4 Van der Star

جدول ۱. نتایج آزمایش های شناسایی خاک رس

Table 1. Engineering properties of collected clay soil

TYPE (ASTM)	CH		
LL (%)	53		
PL (%)	22		
PI (%)	31		
G <sub>s</sub>	2.61		
d <sub>max</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ) $\gamma$	1.61		
$\omega_{opt}$ (%)	19.6		
pH	1 h	3 d	7 d
	7.43	8.1	7.61

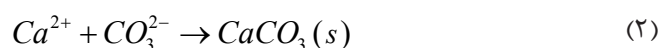
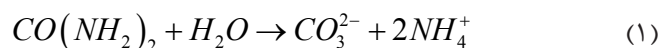


شکل ۱. پلی الکترولیت کاتیونی

Fig. 1. The Cationic polyelectrolyte

### ۳-۲- تثبیت میکروبی (MICP)

در این روش ابتدا باکتری هوازی طبق واکنش شیمیایی رابطه (۱)، موجب هیدرولیز اوره می شود. سپس کاتیون های آزاد کلسیم حاصل از ماده مغذی که به باکتری چسبیده اند با کربنات حاصل از هیدرولیز اوره طبق رابطه (۲) واکنش داده و رسوب کربنات کلسیم تشکیل می شود [۲۱]:



واکنش کلی تثبیت میکروبی را می توان به صورت رابطه (۳) نوشت [۱۱]:

استفاده شده است. این پلیمرهای منعقد کننده، ترکیباتی پلیمری با وزن مخصوص بالا بر پایه پلی اکریل آمیدها (PAM) به صورت محلول در آب هستند که به طور وسیعی به عنوان منعقدکننده و افزایش دهنده سرعت ته نشینی مواد جامد در فرآیند تصفیه و تولید مایعات استفاده می شوند. این پلیمرها عمدتاً در صنایع تصفیه آب، تولید شکر و فرآیندهای تصفیه پتروشیمی مورد استفاده هستند که اخیراً با توجه به خصوصیات آنها به صورت گسترده در فرآیند تثبیت خاک های ریزدانه مورد توجه محققین قرار گرفته اند. در این تحقیق از پلی الکترولیت کاتیونی استفاده شده است که به صورت مستقیم با ذرات دارای بار الکتریکی منفی رس، زنجیره و لخته ایجاد می کند و همچنین با ایجاد پیوند هیدروژنی با مولکول های آب در افزایش جذب آب خاک مؤثر است [۲۳ و ۲۴]. پودر پلی الکترولیت مورد استفاده در این تحقیق، تولید شرکت BASF آلمان می باشد (شکل ۱).



شکل ۲. اندازه گیری چگالی نوری محلول میکروبی  
**Fig. 2. Measurement of optical density of microbial solution**

باکتری پس از تولید باید در دمای ۴/۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردد و در این شرایط فعالیت اوهره - آژ مناسب را تا یک هفته حفظ می‌کند [۱۳]. بهتر است فاصله زمانی تولید تا استفاده از محلول کم باشد.

هر دو دستگاه متعلق به دانشکده علوم پزشکی تبریز هستند. از اوهره و کلرید کلسیم دو آبه صنعتی که در اکی مولارهای ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ مولار تهیه شده، به عنوان ماده مغذی یا سیمنتاسیون<sup>۶</sup> استفاده شده است.

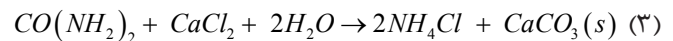
### ۳- روش آماده سازی نمونه ها

#### ۳-۱- تثبیت شیمیایی

برای تهیه محلول مثبت با غلظت های ۳، ۷ و ۱۰ گرم بر لیتر [۸ و ۱۲]، پودر پلی‌الکترولیت کاتیونی پس از توزین، در مقدار مشخصی آب ریخته و همزمان مخلوط شد. پس از اطمینان از حصول محلول همگن و یکنواخت، به تدریج در چند مرحله به خاک خشک، اضافه شده و عملیات اختلاط انجام شد (شکل ۴).

#### ۳-۲- تثبیت میکروبی

ابتدا خاک، شیارکشی شده و باکتری با نسبت یک سوم وزنی ماده مغذی، به روی آن پاشیده و مخلوط شد. پس از ۲۰ دقیقه، نمونه تسطیح و مجدداً شیارکشی شد. سپس محلول مغذی با غلظت های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ مولار [۸ و ۱۳ و ۲۶] به تدریج و در چند مرحله به خاک خشک، اضافه شده و اختلاط انجام گردید (شکل ۵).

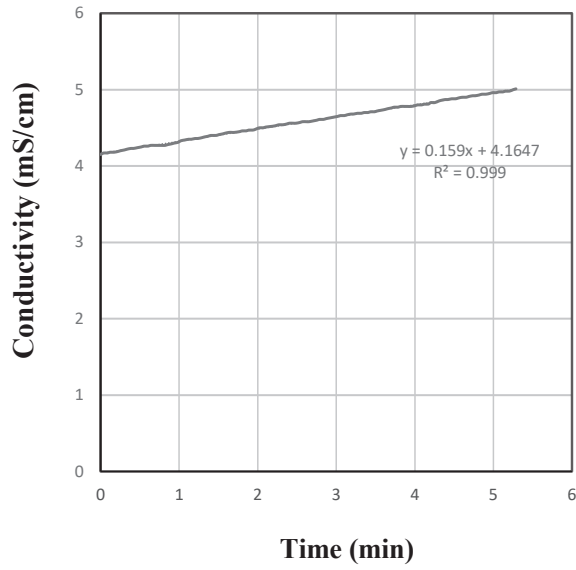


در این تحقیق جهت دستیابی به فعالیت بالای اوهره آژ محلول میکروبی کشت شده، از باکتری باسیلوس پاستوری با نام علمی باسیلوس اسفریسوس<sup>۱</sup> استفاده شده است. باکتری از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری صنعتی ایران به صورت لیوفلیزه<sup>۲</sup> تهیه شده و طبق دستورالعمل ارسالی برای فعال سازی اولیه باکتری از محیط کشت (براث<sup>۳</sup>) بدون آگار<sup>۴</sup> استفاده شده است. برای اندازه‌گیری میزان و رشد باکتری (بیومس) موجود در محلول میکروبی از دستگاه اسپکتوفتومتر استفاده شده است. این دستگاه، جذب نور محلول رقیق شده را نسبت به یک نمونه شاهد در طول موج ۶۰۰ نانومتر، نشان می‌دهد که چگالی نوری<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. این مقدار برای محلول مورد استفاده، پس از فاز لگاریتمی، یک به دست آمد (OPG=۱) (شکل ۲).

فعالیت اوهره آژ باکتری، نمایانگر توانایی محلول در هیدرولیز اوهره و در واقع همان شیب خط هدایت الکتریکی نسبت به زمان است. این شاخص با دستگاه هدایت الکتریکی پیشرفته، در مدت ۵ دقیقه و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۰/۱۶ mS/cm.min اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). نقش محلول باکتری، فراهم کردن زمینه انجام واکنش های منجر به رسوب کربنات کلسیم در خاک است و بعد از انجام واکنش ها، فعالیت آن اهمیتی ندارد. محلول

- 1 Bacillus Sphaericus
- 2 Lyophilized
- 3 Broth
- 4 Agar
- 5 Optical Density

6 Cementation



ب

الف

شکل ۳. الف) دستگاه اندازه گیری فعالیت اوره آز با دقت ثبت یک قرائت در هر دو ثانیه ب) فعالیت اوره آز باکتری موضوع تحقیق  
 Fig. 3. a) The urease activity measuring device (Ability. one record every two seconds), b) The urease activity for the investigated bacteria



شکل ۴. تهیه و اختلاط محلول پلی الکترولیت کاتیونی

Fig. 4. Preparation and mixing of cationic polyelectrolyte solution



شکل ۵. پاشش باکتری به خاک

Fig. 5. Bacteria spraying into the soil



شکل ۶. اندازه گیری pH نمونه های خاک  
Fig. 6. pH measurement of soil

#### ۴- آزمایش های انجام شده

##### ۴-۱- آزمایش تراکم (ASTM D۶۹۸)

با توجه به مایع بودن هر دو مثبت، جهت بررسی اثر تثبیت خاک بر مشخصات تراکمی، محلول های مثبت شیمیایی و میکروبی، به مقدار ۵ درصد وزنی خاک خشک و به روشی که در بخش ۳ بیان شد، به خاک اضافه شده و طبق استاندارد در سه لایه در قالب ۴ اینچ ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش، متراکم گردید. پس از محاسبه رطوبت و وزن مخصوص، آزمایش با گام های افزایشی ۵ درصدی افزودن محلول مثبت، تا کاهش وزن مخصوص خاک ادامه یافت و برای هر حالت منحنی تراکم رسم گردید. در روش میکروبی جهت حفظ رطوبت نمونه در زمان نفوذ، سینی با نایلون پوشانده شد. زمان نفوذ در آزمایش های بهسازی میکروبی ۷۵ دقیقه منظور گردید که شامل زمان توقف پس از پاشش و اختلاط میکروب (۲۰ دقیقه) و پس از پاشش و اختلاط مغذی (۲۰ دقیقه) و زمان اختلاط و دیگر عملیات آزمایشگاهی مربوط نیز می باشد. آزمایش تراکم برای هر روش و غلظت، دو بار تکرار و در صورت قابل قبول بودن میزان تفاوت نتایج، میانگین آن ها به عنوان نتیجه نهایی ثبت شد.

##### ۴-۲- آزمایش حدود اتربرگ (ASTM D۴۳۱۸)

ابتدا به مقدار لازم، نمونه تثبیت شده شیمیایی و میکروبی با غلظت های مورد مطالعه و با رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم

تهیه شد. پس از دو ساعت، طبق استاندارد و جهت آبخوری به مقدار لازم به آن آب اضافه شده و پس از ۲۴ ساعت حفاظت از نمونه، آزمایش ها بر روی آن انجام گردید. آزمایش حد روانی برای هر روش و غلظت دو بار تکرار شد.

##### ۴-۳- آزمایش pH (ASTM D۴۹۷۲)

مشابه آزمایش حدود اتربرگ، ابتدا حدود ۱۰ گرم از هر نمونه با غلظت های مورد مطالعه و با رطوبت بهینه حاصل از نتایج آزمایش تراکم ساخته و پس از ۲ ساعت در صورت نیاز، وزن نمونه با آب مقطر دقیقاً به ۱۰ گرم رسانده شد. سپس با دستگاه pH سنج، مقدار pH نمونه ها در فواصل یک ساعت، سه روز و هفت روز قرائت و تأثیر تثبیت بر pH محیط بررسی گردید (شکل ۶). در هر آزمایش، قرائت نهایی پس از یک دقیقه ثابت مقدار pH در نمایشگر دستگاه، انجام شده است.

##### ۴-۴- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (ASTM D۲۱۶۶)

برای بررسی تأثیر بهسازی بر مقاومت خاک، نمونه های استوانه ای آزمایش تک محوری، از خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با مشخصات بهینه حاصل از آزمایش تراکم تهیه شد. قطر قالب ۳۵ میلی متر و نسبت ارتفاع به قطر، ۲ تا ۲/۵ در نظر گرفته شد. جهت سهولت خروج نمونه از قالب دو تکه استفاده

## ۵- تحلیل نتایج

### ۵-۱- آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم در جدول زیر آمده است.

#### ۵-۱-۱- پلی الکترولیت

در حالت کلی، تثبیت خاک رس مورد تحقیق با پلی الکترولیت، موجب کاهش وزن مخصوص حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. وزن مخصوص حداکثر تا غلظت ۷ gr/lit، حدود ۷ درصد کاهش یافته و سپس تا غلظت ۱ gr/lit افزایش می‌یابد. رطوبت بهینه نیز تا غلظت ۷ gr/lit افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. این روند (البته با غلظت های متفاوت) با نتایج تحقیق انجام شده در این زمینه تطابق

شد. برای تأمین شرایط حفاظت و عمل‌آوری، نمونه‌ها در داخل محفظه عمل‌آوری آزمایشگاه قرار داده شد و در هر غلظت، نمونه‌ها پس از دوره‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه عمل‌آوری، مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش به روش کنترل کرنش و با سرعت بارگذاری ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای بررسی تأثیر تثبیت بر خصوصیات شکل‌پذیری خاک، علاوه بر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته معادل ۵۰٪ مقاومت ( $E_{sec} = 50\%$ )، که به طور اختصار در این تحقیق با  $E$  نشان داده می‌شود نیز اندازه‌گیری و محاسبه گردید. آزمایش‌ها برای هر غلظت و دوره عمل‌آوری، دو بار تکرار و در صورت قابل قبول بودن میزان تفاوت نتایج، میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی ثبت شد.



ب



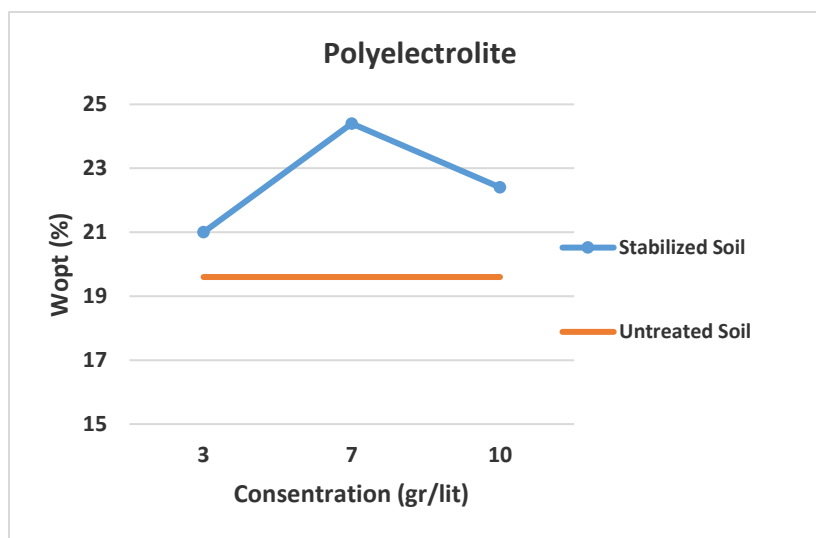
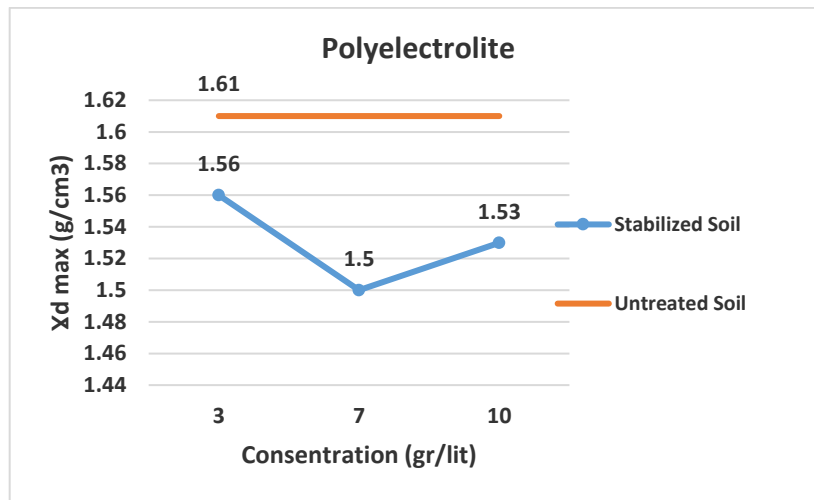
الف

شکل ۷. الف) نگهداری و عمل‌آوری نمونه‌های تک‌محوری، ب) شکست صحیح نمونه‌های تک‌محوری  
Fig. 7. a) Curing of UCS test samples, b) Proper fracture of UCS test samples

جدول ۲. نتایج آزمایش تراکم

Table 2. The results of compaction test

MICP			پلی الکترولیت			خاک تثبیت نشده	
1 M	0.75 M	0.5 M	10 gr/lit	7 gr/lit	3 gr/lit		
1.61	1.57	1.54	1.53	1.5	1.56	1.61	$\gamma_{d \max} (\text{g/cm}^3)$
22	21.5	22.5	22.4	24.4	21	19.6	$W_{\text{opt}} (\%)$



شکل ۸. مقایسه نتایج آزمایش تراکم در تثبیت شیمیایی خاک  
**Fig. 8. Results of compaction test in chemical stabilization**

افزایش قابل توجه ویسکوزیته و چگالی محلول پلیمر که ژل مانند است، پلیمر جذب شده مجدداً موجب افزایش وزن مخصوص حداکثر می‌شود و از طرفی تشکیل ژل غلیظ پلیمر در اطراف دانه‌ها، جذب آب را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده با پلی‌الکترولیت در شکل ۸ آمده است.

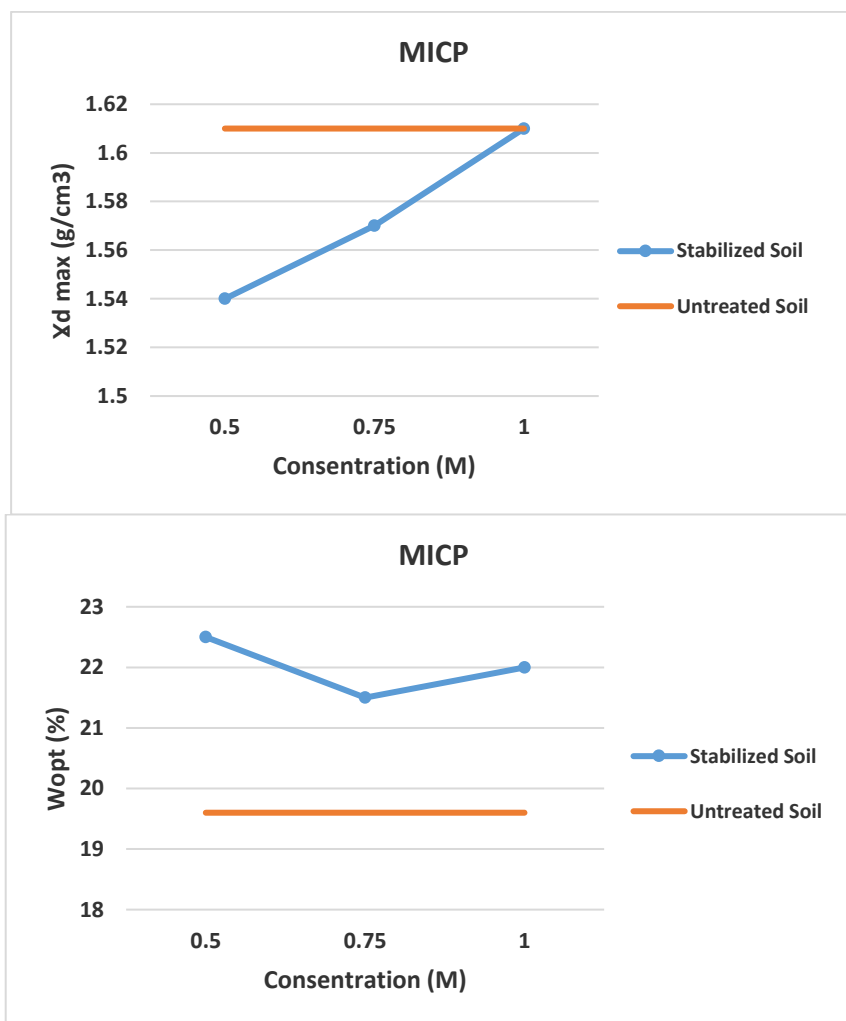
#### ۵-۱-۲- تثبیت میکروبی (MICP)

تثبیت خاک به روش MICP موجب ایجاد پل های اتصال بین ذرات خاک می‌شود، ولی این پل تمام فضای خالی خاک را پر نمی‌کند و این می‌تواند باعث کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه نسبت به خاک معمولی شود [۲۱]. افزایش غلظت مغذی، تراکم را

دارد [۳ و ۶ و ۲۵ و ۲۷]. در تثبیت شیمیایی، پلی‌الکترولیت، جانشین بخشی از خاک رس در قالب تراکم می‌شود. از آنجا که در غلظت های پایین، چگالی محلول کم است، وزن مخصوص حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین افزایش سریع مقاومت برشی ناشی از جاذبه بین دانه‌ای، قسمتی از انرژی تراکم را تلف کرده، تا حدودی تراکم پذیری خاک را کم می‌کند [۳ و ۶]. به طور کلی پلی‌اکریل‌امید (PAM) یک ماده آبدوست<sup>۱</sup> است و جذب آب خاک را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن با افزایش خلل و فرج موجب افزایش نفوذپذیری و جذب آب در خاک می‌شود که از این لحاظ در بهبود مقاومت خاک در برابر فرسایش ناشی از رواناب مؤثر است [۲۷-۲۹]. در غلظت های بالا با توجه به

1 Hydrophil





شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایش تراکم در تثبیت میکروبی خاک  
 Fig. 9. Results of compaction test in microbial stabilization

جدول ۳. نتایج آزمایش حدود اتربرگ  
 Table 3. The results of Atterberg limits test

MICP			پلی‌الکترولیت			خاک تثبیت نشده	
1 M	0.75 M	0.5 M	10 gr/lit	7 gr/lit	3 gr/lit		
24	24	23	26	26	24	22	PL (%)
48	50	52	59	59	54	53	LL (%)
24	26	29	33	33	30	31	PI (%)

### ۵-۲-۱- پلی‌الکترولیت

به طور کلی تأثیر پلی‌الکترولیت بر حدود اتربرگ ناچیز است و این در تطابق با تحقیقات منابع [۳۰ و ۳۱] است ولی روند جزئی افزایش در  $PL$  و  $LL$  را می‌توان در اثر افزایش جذب آب خاک رس به سبب پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب و پلی‌الکترولیت [۲۴] و افزایش نسبی تخلخل خاک در شروع فرآیند تثبیت دانست [۲۸]. زنجیره

بالا می‌برد. ضمناً با افزایش ماده مغذی، رطوبت بهینه تغییر چندانی نمی‌کند. نتایج آزمایش تراکم خاک تثبیت شده به روش MICP در شکل ۹ آمده است.

### ۵-۲- حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ در جدول ۳ آمده است.

و افزایش محدود pH محیط بعد از تثبیت را می‌توان ناشی از وجود واکنش کاتیون‌های یک و دو ظرفیتی در محیط دانست [۲۳]. بیشترین تأثیر که نشان‌دهنده واکنش‌های بیشتر کاتیون و ذرات رس است در غلظت ۷ gr/lit دیده می‌شود. در غلظت ۱۰ gr/lit، میزان pH محیط نسبت به خاک اولیه افزایش نشان نمی‌دهد. pH محیط در سه روز به بالاترین مقدار خود رسیده و پس از آن با کم شدن واکنش‌ها مجدداً کاهش می‌یابد.

#### ۵-۳-۲- تثبیت میکروبی (MICP)

در بهسازی میکروبی، هیدرولیزه شدن اوره موجب جدا شدن یون آمونیوم ( $\text{NH}_4^+$ ) شده، pH محیط را افزایش می‌دهد و محیط مناسبی را جهت رسوب کربنات کلسیم و تثبیت خاک فراهم می‌کند [۲۶]. بیشترین pH محیط در غلظت ۰/۵ M محلول مغذی، حاصل می‌شود که مطابق نتایج مطالعات منبع [۲۶] می‌باشد. افزایش غلظت محلول مغذی، اثر کاهنده در pH محیط دارد.

#### ۵-۴- مقاومت فشاری تک‌محوری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به همراه مدول الاستیسیته برای خاک معمولی و تثبیت شده، به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ آمده است.

پلی‌الکترولیت علاوه بر اتصال دانه‌های رس، توانمندی برقراری پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب را داشته و بر این اساس قابلیت جذب و نگهداری آب در خاک رس را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن ژل پلیمر در فرآیند تثبیت خاک و پس از جذب آب به مقدار جزئی دچار تورم می‌شود که تا حدودی تخلخل خاک را افزایش می‌دهد. با افزایش غلظت پلیمر، میزان حد روانی بیش از حد انقباض افزایش می‌یابد که موجب افزایش دامنه خمیری می‌شود.

#### ۵-۲-۲- تثبیت میکروبی (MICP)

خاک تثبیت شده به روش MICP هرچند ناچیز، به افزایش PL، کاهش LL و در نتیجه کاهش PI تمایل دارد. این امر می‌تواند به علت تبادل کاتیونی بین ذرات رس و یون‌های کلرید کلسیم باشد. این تبادل، قابلیت جذب و نگهداری آب دانه‌ها را کاهش می‌دهد [۳۲ و ۳۳].

#### ۵-۳- pH

نتایج آزمایش pH در جدول ۴ آمده است.

#### ۵-۳-۱- پلی‌الکترولیت

به طور کلی پلی‌الکترولیت‌ها تأثیر چندانی بر pH محیط ندارند

#### جدول ۴. نتایج آزمایش تعیین pH

Table 4. The results of pH determination test

MICP			پلی‌الکترولیت			خاک تثبیت نشده	
1 M	0.75 M	0.5 M	10 gr/lit	7 gr/lit	3 gr/lit		
7.54	7.54	7.77	7.54	7.56	7.68	7.43	1 h
7.74	7.92	8.05	7.97	8.27	8.14	8.1	3 day
7.08	7.23	7.44	7.58	7.75	7.73	7.61	7 day

#### جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ( $q_u$ ) برای خاک تثبیت نشده (بر حسب $\text{kg/cm}^2$ )

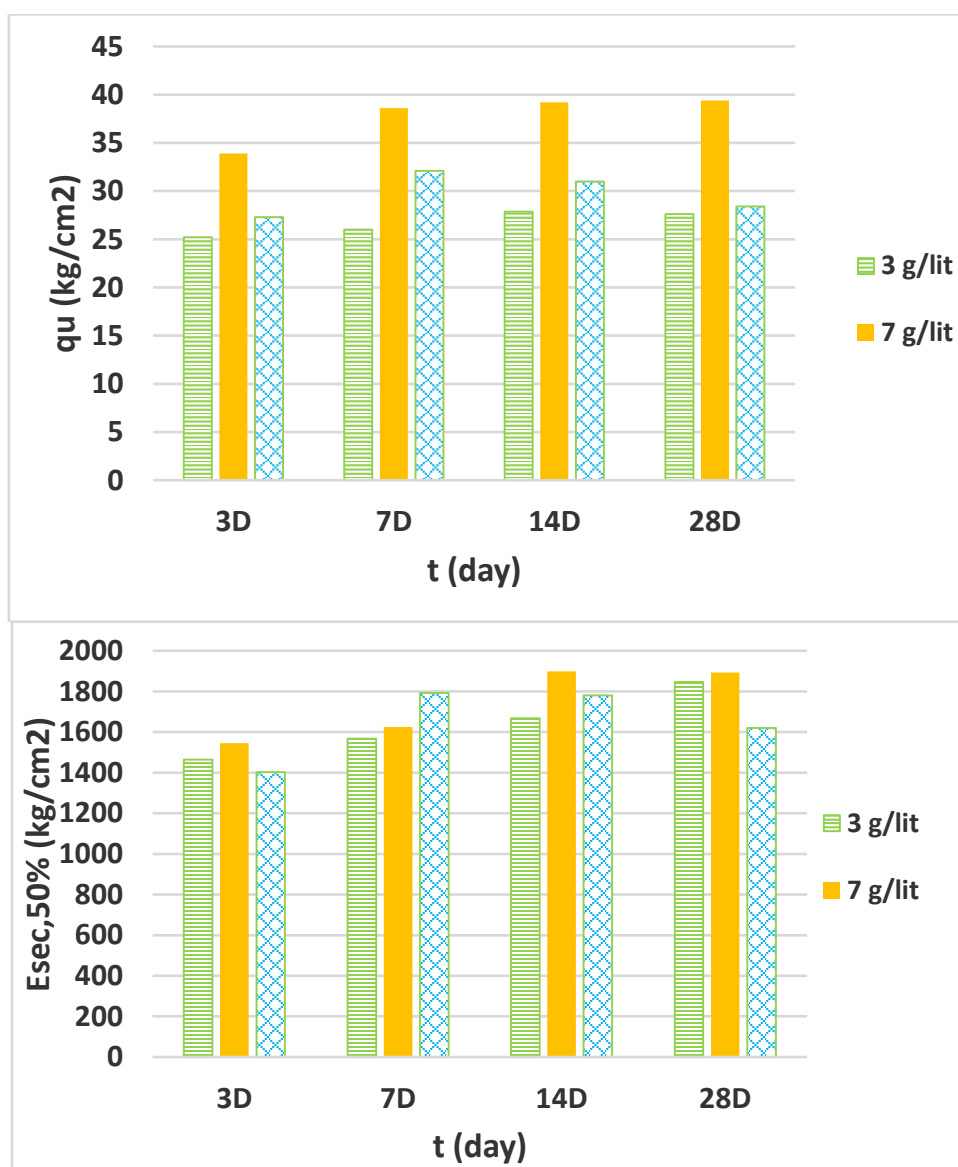
Table 5. The results of UCS test for untreated soil ( $\text{kg/cm}^2$ )

3D		7D		14D		28D	
$q_u$	$E_{sec}$ (50%)	$q_u$	$E_{sec}$ (50%)	$q_u$	$E_{sec}$ (50%)	$q_u$	$E_{sec}$ (50%)
5.7	362.8	5.7	360	5.9	371	5.9	371

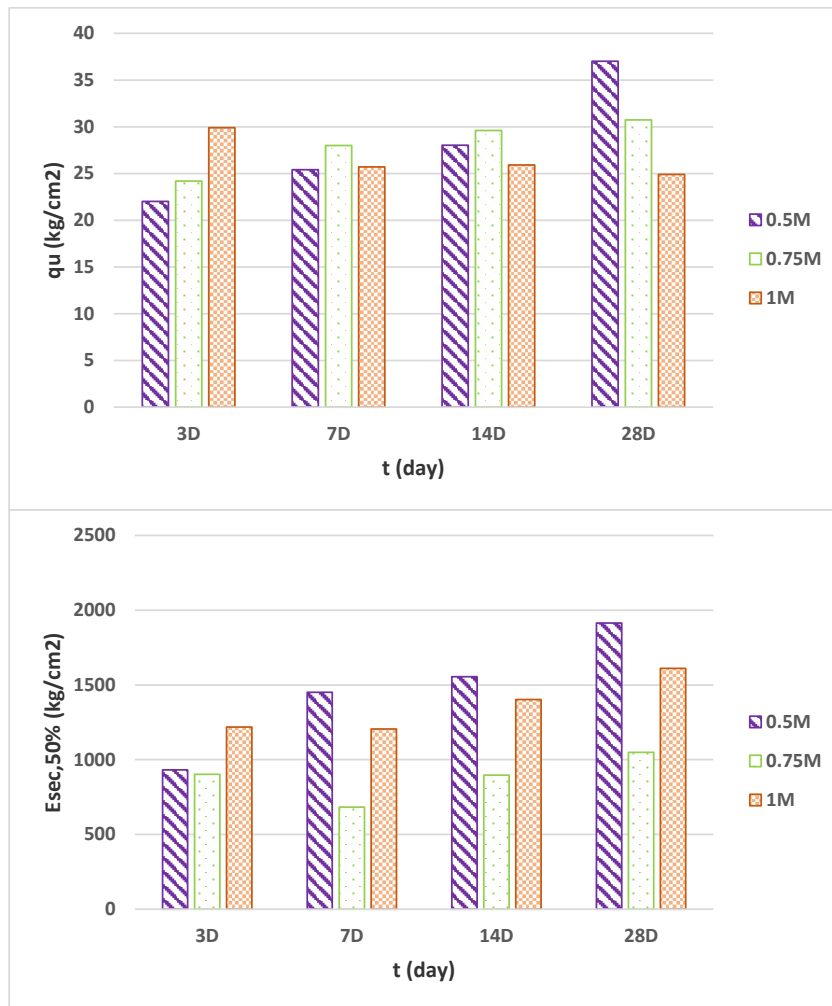
جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ( $q_u$ ) برای خاک تثبیت شده (بر حسب  $\text{kg/cm}^2$ )

Table 6. The results of UCS test for treated soil ( $\text{kg/cm}^2$ )

		3D		7D		14D		28D	
		$q_u$	$E_{sec}$	$q_u$	$E_{sec}$	$q_u$	$E_{sec}$	$q_u$	$E_{sec}$
بلی‌الکترولیت	3 g/lit	25.2	1463.7	26	1568.1	27.85	1668.5	27.6	1845.6
	7 g/lit	33.9	1544.9	38.6	1623.8	39.2	1899.4	39.4	1892.2
	10 g/lit	27.3	1402.1	32.1	1792.3	31	1780.2	28.4	1619.4
MICP	0.5M	22	932.3	25.4	1451.3	28.03	1555.3	37	1913.7
	0.75M	24.2	902.5	28	683.5	29.6	915.3	30.74	1048.5
	1M	29.9	1219	25.7	1205.1	25.9	1402.4	24.9	1611.5



شکل ۱۰. مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی در غلظت‌های مختلف پلیمر مایع  
Fig. 10. UCS ( $q_u$ ) and secant modulus of chemically stabilized soil at different polymer dosages

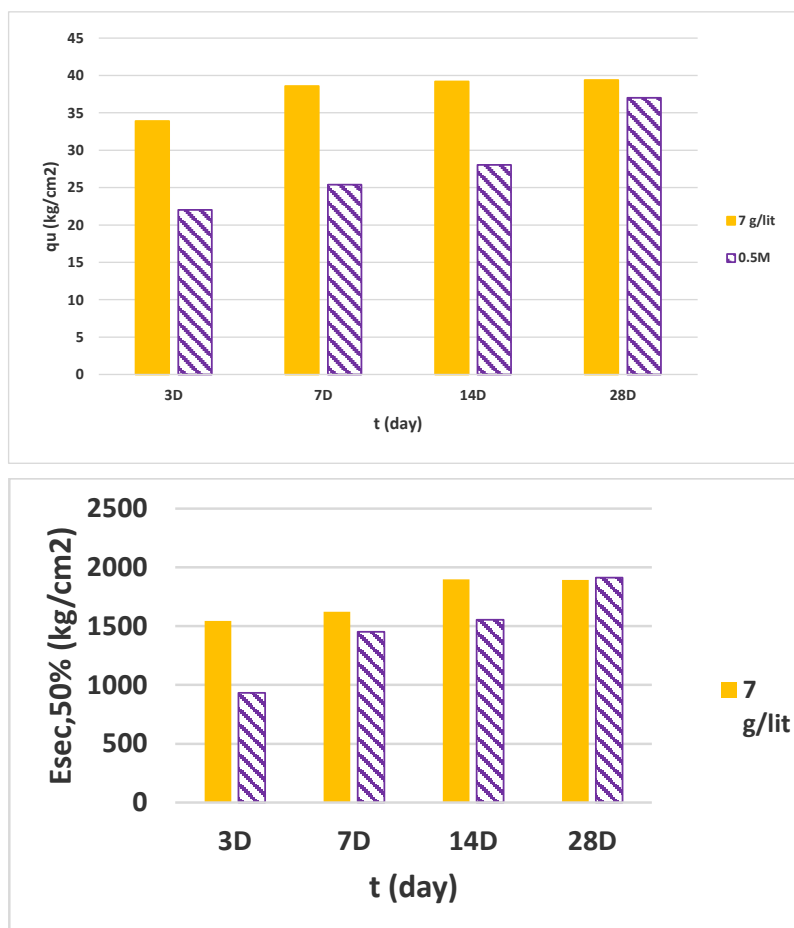


شکل ۱۱. مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت میکروبی در غلظت‌های مختلف ماده مغذی  
 Fig. 11. UCS ( $q_u$ ) and secant modulus of microbially stabilized soil at different nutrient densities

#### ۵-۴-۱- پلی‌الکترولیت

آن، ساختار خاک را سست می‌کند. بنابراین غلظت بالای پلیمر مایع موجب کاهش عملکرد بلند مدت روسازی خواهد شد. بالاترین مقاومت در خاک تثبیت شده با پلی‌الکترولیت در غلظت  $7 \text{ gr/lit}$  و دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به میزان  $39/4 \text{ kg/cm}^2$  حاصل شده است. در این حالت  $1892/2 \text{ kg/cm}^2$  است. از آنجا که در این غلظت مقادیر  $q_u$  و  $E$  چهارده روزه و ۲۸ روزه از نظر ملاحظات طراحی تفاوت قابل توجهی ندارند، با در نظر گرفتن اهمیت کوتاه بودن دوره عمل‌آوری در الزامات اجرایی، غلظت  $7 \text{ gr/lit}$  و دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به عنوان مقادیر بهینه انتخاب می‌شوند. در نمودارهای شکل ۱۰ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت شیمیایی بر حسب دوره عمل‌آوری و در غلظت‌های مختلف پلیمر مایع مقایسه شده اند.

پلیمر مایع با غلظت‌های ۳، ۷ و  $10 \text{ gr/lit}$  به میزان رطوبت بهینه به خاک اضافه شده و پس از اختلاط، نمونه‌های تک‌محوری، قالب‌گیری شده و پس از عمل‌آوری در دوره‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. مقاومت فشاری تک‌محوری تا غلظت  $7 \text{ gr/lit}$  افزایش یافته و پس از آن تا  $10 \text{ gr/lit}$  کاهش می‌یابد. این روند در  $E$  نیز مشاهده می‌شود که کاهش آن بین ۷ تا  $10 \text{ gr/lit}$  قابل توجه است و این نشان می‌دهد که افزایش غلظت پلیمر از ۷ تا  $10 \text{ gr/lit}$  گرم بر لیتر موجب افزایش شکل‌پذیری و نرمی خاک می‌گردد. در غلظت  $10 \text{ gr/lit}$  با افزایش دوره عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روزه، به تدریج کاهش مقاومت و سستی خاک دیده می‌شود و نشان‌دهنده این است که حضور ژل غلیظ در محیط، با گذشت زمان و خشک شدن



شکل ۱۲. مقایسه حداکثر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک در غلظت های بهینه تثبیت شیمیایی و میکروبی  
**Fig. 12. Comparison of maximum values of UCS and elasticity modulus of soil at optimum dosage/ density for chemical and microbial stabilization**

روی باکتری و افزایش خصوصیت نمک‌دوستی<sup>۲</sup> باکتری دانست که موجب نقص در فرآیند رسوب کربنات کلسیم در غلظت های بالای مغذی می شود [۲۶]. لذا غلظت نیم مولار با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه با مقادیر  $q_u = 37 \text{ kg/cm}^2$  و  $E = 1913/7 \text{ kg/cm}^2$  به عنوان مقادیر بهینه انتخاب می گردند. در نمودارهای شکل ۱۱ مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک پس از تثبیت میکروبی بر حسب دوره های مختلف عمل‌آوری و در غلظت های مختلف ماده مغذی مقایسه شده اند.

در نمودار شکل ۱۲ حداکثر مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک در غلظت های بهینه به دست آمده برای تثبیت شیمیایی (۷ g/lit) و میکروبی (۰/۵ مولار)، بر حسب دوره عمل‌آوری، مقایسه شده اند.

#### ۵-۴-۲- تثبیت میکروبی (MICP)

نمونه ها با غلظت های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ مولار ماده مغذی و دوره عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به روشی که در بخش ۲ بیان شد، با رطوبت بهینه تهیه شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. در غلظت ۰/۵ مولار مقاومت فشاری از ۲۲ تا  $37 \text{ kg/cm}^2$  و  $E$  از  $932/3$  تا  $1913/7 \text{ kg/cm}^2$  افزایش می یابد. روند افزایش مقاومت و  $E$  در غلظت ۰/۷۵ بسیار کندتر بوده و بعد از ۱۴ روز تقریباً ثابت می ماند. ضمن اینکه روند افزایش، نسبت به غلظت ۰/۵ مولار از ۱۴ روز به بعد متوقف شده و مقداری کاهش می یابد. در غلظت ۱ مولار با افزایش دوره عمل‌آوری، مقاومت، تغییر چندانی پیدا نکرده و مقداری کاهش می یابد و تنها در دوره ۳ روزه از مشخصات مشابه در غلظت های قبلی بالاتر است که می تواند ناشی از اثر بازدارنده<sup>۱</sup> مغذی غلیظ بر

2 Halophilic

1 Inhibitory effect

## ۵-۵- ارزیابی اقتصادی

روش های نوین مثل بهسازی میکروبی در آغاز به سبب کمبود امکانات در تهیه مواد و روش های اجرایی گران می باشند و معمولاً با گذشت زمان و گسترش استفاده از آن ها، از هزینه ها کاسته می شود. کمک هایی که بانک جهانی برای روش های زیست محیطی در نظر گرفته می تواند کمک زیادی به توسعه کاربرد آن ها در مقیاس صنعتی نماید (مانند استفاده از روش های گران قیمت زیستی در تصفیه پساب های پتروشیمی). اخیراً با توجه به اهمیت روش های تثبیت زیستی از جمله بهسازی میکروبی در مسائل زیست محیطی، طبق توصیه پیمان کیوتو، امکان حمایت مالی از این روش ها مهیاست [۳۴]. هزینه بهسازی میکروبی بستر راه در حال حاضر حدود ده برابر بهسازی با پلیمر است. تثبیت شیمیایی بستر با پلیمر مورد مطالعه تقریباً چهار برابر مصالح سنتی مثل آهک و سیمان هزینه دارد [۳۵] و [۳۶]. علاوه بر مسائل زیست محیطی مزیت قابل توجه روش های تثبیت مورد بررسی در این تحقیق نسبت به مصالح سنتی، فضا و تجهیزات کوچک تر تولید و نگهداری و سهولت حمل و نقل است که باید در ارزیابی های اقتصادی منظور شود.

## ۶- نتیجه گیری

تثبیت شیمیایی و میکروبی خاک رس ضعیف بستر، جهت اجتناب از جابه جایی و جایگزینی با استفاده از پلی الکترولیت کاتیونی و باکتری باسیلوس به همراه مغذی های کلرید کلسیم و اوره قابل انجام است. از تحقیقات انجام شده، نتایج زیر به دست می آید:

۱- تثبیت شیمیایی و میکروبی خاک رس، هر دو باعث کاهش وزن مخصوص حداکثر و افزایش رطوبت بهینه خاک می شوند. این امر در تثبیت شیمیایی، بیشتر ناشی از تلف شدن انرژی تراکم ناشی از افزایش سریع مقاومت برشی بین دانه ها بر اثر چسبندگی ژل و در تثبیت میکروبی به علت افزایش تخلخل ناشی از ایجاد پل های اتصال بین دانه ها می باشد. در تثبیت شیمیایی با افزایش غلظت به ۱۰ گرم بر لیتر، چگالی آن افزایش پیدا کرده و وزن مخصوص حداکثر مجدداً زیاد می شود. ژل غلیظ، جذب آب دانه ها را کم کرده و در نتیجه رطوبت بهینه در این حالت کاهش می یابد.

۲- پلیمر مایع، مولکول های آب را با پیوند هیدروژنی جذب کرده و تورم جزئی آن پس از جذب آب، تخلخل خاک را تا حدودی افزایش

می دهد که این عامل منجر به افزایش قابلیت جذب آب و دامنه خمیری خاک رس می شود. در تثبیت میکروبی، تبادل کاتیونی رس و یون های کلرید کلسیم موجب کاهش دامنه خمیری می شود.

۳- تثبیت شیمیایی و میکروبی با افزایش pH محیط، شرایط تثبیت را مناسب می کنند. افزایش pH در تثبیت شیمیایی در روز سوم به حداکثر رسیده پس از آن با افت شدت واکنش ها، کاسته می شود. در تثبیت میکروبی، شدت واکنش ها در زمان اولیه تثبیت است و پس از آن pH محیط کاهش می یابد.

۴- پلیمر مایع، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک رس بستر مورد تحقیق را تا غلظت ۷ درصد به میزان قابل توجهی افزایش می دهد؛ ولی در غلظت های بالا (۱۰٪) شاخص های مقاومتی و سختی خاک عموماً کاهش می یابند. همچنین در غلظت های بالا با افزایش زمان نیز این خصوصیات خاک کاهش می یابند و بنابراین عملکرد بلند مدت روسازی را مختل می کنند.

۵- در تثبیت میکروبی خاک نیز بهترین نتایج در غلظت ۰/۵ مولار ماده مغذی به دست آمد. در غلظت های بالاتر، عموماً با گذشت زمان، شاخص های مقاومتی و سختی خاک افزایش چندانی نداشته و حتی در غلظت یک مولار مقاومت فشاری کاهش می یابد که ناشی از خصوصیات بازدارنده در غلظت های بالای مغذی و نمک دوستی باکتری است.

۶- با توجه به نتایج به دست آمده، تثبیت خاک رس بستر راه در دو روش، نتایج تقریباً یکسانی دارد؛ لذا در صورت اولویت مزیت های اجرایی (زمان و هزینه)، تثبیت شیمیایی با پلی الکترولیت کاتیونی و در صورت اولویت مزیت های زیست محیطی، تثبیت میکروبی (MICP) مناسب می باشد.

## تشکر و قدردانی

از همکاری اساتید محترم مرکز تحقیقات دارویی دانشکده علوم پزشکی تبریز در انجام مطالعات تثبیت میکروبی این تحقیق، به ویژه آقایان دکتر حسین صمدی کفیل و دکتر احمد فهیمی نهایت قدردانی به عمل می آید.

## فهرست علائم

$q_u$  مقاومت فشاری تک محوری،  $\text{kg/cm}^2$

1800-1807.

- [9] P. Kolay, B. Dhakal, Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils, Geotechnical and Geological Engineering, (2019) 1-13.
- [10] K. Chiet, K. Kassim, K. Chen, U. Martula, C. Yah, A. Arefnia, Effect of Reagents Concentration on Biocementation of Tropical Residual Soil, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2016, pp. 012030.
- [11] A. Fahmi, H. Katebi, M. Hajjalilue Bonab, H. Samadi Kafil, Microbial Sand Stabilization Using Corn Steep Liquor Culture Media and Industrial Calcium Reagents in Cementation Solutions, Industrial Biotechnology, 14(5) (2018) 270-275.
- [12] M.G. Arab, Soil Stabilization Using Calcium Carbonate Precipitation via Urea Hydrolysis, in: Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19), 2019.
- [13] A. Fahmi, sand stabilization using microbial induced calcium carbonate precipitation method and chemical methods(in persian),Thesis, Tabriz University,Iran, 2019.
- [14] S. Gowthaman, T. Iki, K. Nakashima, K. Ebina, S. Kawasaki, Feasibility study for slope soil stabilization by microbial induced carbonate precipitation (MICP) using indigenous bacteria isolated from cold subarctic region, SN Applied Sciences, 1(11) (2019) 1480.
- [15] S. Saneiyani, D. Ntarlagiannis, J. Ohan, J. Lee, F. Colwell, S. Burns, Induced polarization as a monitoring tool for in-situ microbial induced carbonate precipitation (MICP) processes, Ecological engineering, 127 (2019) 36-47.
- [16] B. Chittoori, M. Burbank, Application of Microbial Facilitated Stabilization for Sustainable Improvement of Expansive Pavement Subgrades, 2019.
- [17] C.-H. Kang, Y.-J. Kwon, J.-S. So, Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures, Ecological engineering, 89 (2016) 64-69.
- [18] A.J. Phillips, R. Gerlach, E. Lauchnor, A.C. Mitchell, A.B.

مدول الاستیسیته، $\text{kg/cm}^2$	$E$
حدود اتبرگ، %	$PL, LL$ و $PI$
چگالی جامد دانه های خاک	$G_s$
رطوبت بهینه، %	$W_{opt}$
وزن مخصوص حداکثر، $\text{g/cm}^3$	$\gamma_{d max}$

## مراجع

- [1] S.A. Naeini, B. Naderinia, E. Izadi, Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer, KSCE Journal of Civil Engineering, 16(6) (2012) 943-949.
- [2] P. Kolay, A. Pant, V. Puri, S. Kumar, Effect of Liquid Polymer Stabilizer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil, in: Indian Geotechnical Conference IGC2016, 2016, pp. 15-17.
- [3] T.W.Lambe, The Effect of Polymers on Soil Properties, in: international society for soil mechanics and geotechnical engineering publications, international society for soil mechanics and geotechnical engineering (ISSMGE), publications, 1955.
- [4] R. Ruehrwein, D. Ward, Mechanism of clay aggregation by polyelectrolytes, Soil science, 73(6) (1952) 485-492.
- [5] W. Miller, R. Willis, G. Levy, Aggregate stabilization in kaolinitic soils by low rates of anionic polyacrylamide, Soil use and management, 14(2) (1998) 101-105.
- [6] T. Zhang, Y. Deng, H. Lan, F. Zhang, H. Zhang, C. Wang, Y. Tan, R. Yu, Experimental Investigation of the Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province, China, Polymers, 11(1) (2019) 90.
- [7] W.J. Orts, A. Roa-Espinosa, R.E. Sojka, G.M. Glenn, S.H. Imam, K. Erlacher, J.S. Pedersen, Use of synthetic polymers and biopolymers for soil stabilization in agricultural, construction, and military applications, Journal of materials in civil engineering, 19(1) (2007) 58-66.
- [8] D. Yongfeng, L. Songyu, H. Jian'an, L. Kan, D. Yanjun, J. Fei, Strength and permeability of cemented soil with PAM, in: Grouting and deep mixing 2012, 2012, pp.

- Establishment, Science and Technology, 24(4) (2011) 291-300.
- [28] Asamatdinov, New water-keeping soil additives, Modern Chemistry and Applications 6(1) (2018) 7.
- [29] M. Bakass, A. Mokhlisse, M. Lallemand, Absorption and desorption of liquid water by a superabsorbent polyelectrolyte: Role of polymer on the capacity for absorption of a ground, Journal of applied polymer science, 82(6) (2001) 1541-1548.
- [30] P.K. Kolay, B. Dhakal, S. Kumar, V.K. Puri, Effect of liquid acrylic polymer on geotechnical properties of fine-grained soils, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2(4) (2016) 29.
- [31] S. Onyejekwe, G.S. Ghataora, Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: Sulphonated oil and a polymer, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(2) (2015) 651-665.
- [32] M. Ghorbani, The effect of biological stabilization on strength of fine grade soils(in persian), Thesis, Azarbaijan Shahid Madani University (ASMU), Iran, 2016.
- [33] S. Neupane, Evaluating the Suitability of Microbial Induced Calcite Precipitation Technique for Stabilizing Expansive Soils, Thesis, Boise State University, USA., 2016.
- [34] Chang, J. Im, G.-C. Cho, Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering, Sustainability, 8(3) (2016) 251.
- [35] Catalog, in, Drug Applied Research Center of Tabriz 2019.
- [36] Basic Unit Price Reference for Activities in the Field, Railway and Runway Activities, Iran(In persian), Planning and Budget Organization of Iran, 2019.
- Cunningham, L. Spangler, Engineered applications of ureolytic biomineralization: a review, Biofouling, 29(6) (2013) 715-733.
- [19] W. Van der Star, W. Van Wijngaarden, L. Van Paassen, L. Van Baalen, G. Zwieten, Stabilization of gravel deposits using microorganisms, in: Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece, 5-9 October 2011, IOS Press, 2011.
- [20] A. Karimian, M. Hassanlourad, G. Karimi, Bio-stabilization of Sand by Surface Percolation, AUT Journal of Civil Engineering, (2018).
- [21] D. Mujah, M.A. Shahin, L. Cheng, State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization, Geomicrobiology Journal, 34(6) (2017) 524-537.
- [22] A. Sharma, R. Ramkrishnan, Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strength of fine grained soils, Perspectives in Science, 8 (2016) 198-202.
- [23] p. Zadab.com, in.
- [24] S. Zhang, J.J. Sheng, Z. Qiu, Water adsorption on kaolinite and illite after polyamine adsorption, Journal of Petroleum Science and Engineering, 142 (2016) 13-20.
- [25] S. Abbasi, Effect of Water-Soluble Polymers and Nanoparticles on Physical, Mechanical, and inflationary Properties of Clay(in persian), Thesis, Tabriz University, Iran, 2019.
- [26] L.M. Lee, W.S. Ng, C.K. Tan, S.L. Hii, Bio-mediated soil improvement under various concentrations of cementation reagent, in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2012, pp. 326-329.
- [27] A. Rabiee, M. Gilani, H. Jamshidi, Preparation of Acrylamide-based Anionic Polyelectrolytes for Soil

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Shafaghatian, Gh. Moradi, H. Katebi, *Experimental Study of the Effect of Chemical and Biological Stabilization on Clay Subgrade Soil*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2821-2836.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17493.6588](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17493.6588)

