مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره شانزدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۵

ارزیابی عوامل موثر بر مقاومت برشی خاک بهسازی شده به روش بیولوژیکی با استفاده از روش تاگوچی

احسان مختاری[۱]، مسعود میرمحمدصادقی[۲*]، علیرضا ستوده‌فر[۳]، البرز حاجیان نیا[٤]

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، اصفهان
۲- استادیار، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان (نویسنده مسئول)
۳- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، اصفهان
٤- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، اصفهان

hmontaseri@gmail.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۱/۲۳]　　تاریخ پذیرش: [۱۳۹٤/۳/۲۷]

چکیده–توجه به نیاز رو به رشد جوامع بشری به امر توسعه از یک‌سو و شرایط بحرانی اطراف ما از دیدگاه زیست‌محیطی از سوی دیگر، اهمیت و ارزش دست‌یابی به روش‌هایی که در عین مرتفع ساختن این نیاز، آسیب جدی به محیط‌زیست وارد نکند را روشن می‌سازد. بهسازی زیستی خاک، یک سیستم میان‌رشته‌ای و جدید است با رویکرد سازگاری با محیط‌زیست که از پیوند میان رشته‌های مهندسی عمران و بیوتکنولوژی در جهت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک به وجود آمده و متکی بر فعالیت باکتری‌هایی است که منجر به تشکیل رسوب کربنات کلسیم در توده‌ی خاک می‌شود. در این پژوهش از باکتری *Sporosarcina pasteurii* بر روی یک خاک ماسه‌ای استفاده شد و با کمک آزمایش برش مستقیم، مقاومت برشی خاک، تحت سه سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال مورد ارزیابی قرار گرفت. روش تاگوچی به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و تحلیل آماری نتایج نیز مورداستفاده قرار گرفت. به این منظور چهار فاکتور غلظت باکتری، نسبت مولاریته مواد غذایی، مدت‌زمان تیمار کردن خاک (گیرش) و نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی با ۳ سطح تغییرات انتخاب گردید. بررسی میزان تأثیر فاکتورهای در نظر گرفته‌شده به‌وسیله‌ی تحلیل واریانسی (ANOVA) نشان داد که درصد تأثیر این فاکتورها روی مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۲۲٪، ۲۰٪، ٤۵٪ و ۱۲٪ می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج نتایج مشاهده گردید، مقاومت برشی نمونه‌های شاهد که برای سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال به ترتیب برابر ٦، ۱۸ و ۳۱ کیلو پاسکال بود پس از گذشت ۲۸ روز به مقدار ٤۷۰، ٤۹۱ و ۵۱۲ کیلو پاسکال برای سربارهای یادشده در حالت بهینه افزایش یافت.

واژگان کلیدی: بهسازی زیستی خاک، رسوب میکروبی کربنات کلسیم، روش تاگوچی، آزمایش برش مستقیم

۱- مقدمه

در ایران، افزایش جمعیت شهری، مهاجرت از روستاها و شهرهای کوچک به سمت شهرهای بزرگ و تمرکز امکانات و خدمات در کلان شهرها، باعث شده است تا بسیاری از شهرهای کشور با مشکلاتی مانند کمبود زیرساخت‌ها مواجه شوند و به دنبال آن محیط زیست شهری نیز تحت تأثیر قرار گیرد. بهبود کیفیت و اصلاح خصوصیات مقاومتی خاک یا اصطلاحاً بهسازی خاک از اساسی ترین مقوله‌ها در توسعه‌ی زیرساخت‌های شهری است و تا امروز روش‌های گوناگونی برای انواع خاک‌ها به کار گرفته‌شده است و با توجه به نیازهای روزافزون برای بهبود مقاومت خاک در زیرساخت-های جدید و پشتیبانی از زیرساخت‌های قدیمی، خاک‌های بیشتری نیز باید تثبیت شوند. هر نوع سازه‌ای که بر روی زمین بنا می‌شود، بارهایی را بر خاک تکیه‌گاه اعمال می‌نماید. تغییر شکل‌های ایجادشده در خاک به‌واسطه تشکیل حباب تنش در توده‌ی خاک، منجر به تحکیم یا گسیختگی خاک می‌شود. لذا آشنایی با شرایط فیزیکی خاک، درک صحیح از میزان مقاومت آن و یافتن راهکارهایی برای غلبه بر ضعف

مقاومتی خاک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. یک رویکرد معمول برای رفع این نیاز، تزریق مواد ساخت دست بشر، مانند میکرو ذرات چسباننده، اپوکسی‌ها[1]، آکریلامیدها[2]، فنوپلاست‌ها[3]، سیلیکات‌ها[4] و پلی اورتان‌ها[5] به فضای منافذ بین ذرات خاک برای اتصال آن‌ها است [۱]. اکثر این روش‌ها نیاز به انرژی قابل‌توجهی برای تولید مواد، نصب و راه‌اندازی و درنهایت اجرای پروژه دارند [۲]. این روش‌ها باعث ایجاد نگرانی‌های زیست‌محیطی شده است و به‌طور فزاینده‌ای موردتوجه افکار عمومی قرارگرفته است. تمام مواد شیمیایی تزریقی به‌جز سیلیکات سدیم سمی و خطرناک هستند. در سال ۱۹۷٤، دوغاب آکریلامید با پنج مورد مسمومیت آب در ژاپن همراه بود و باعث محدودیت بیشتر جهت استفاده از مواد شیمیایی تزریقی در این کشور شد. در ایالات‌متحده آمریکا نیز بر اساس قوانین نظارتی همه‌ی مواد تزریقی به‌جز سیلیکات سدیم، سمی و خطرناک محسوب می‌شوند. عواملی ازاین‌دست باعث گردیده در برخی از کشورها پیشنهاد منع استفاده از کلیه‌ی مواد مصنوعی ساخت بشر برای تزریق و تثبیت مطرح گردد [۳].

رسوب کربنات کلسیم به شیوه میکروبی، بیانگر روشی نوظهور جهت افزایش مقاومت خاک بر پایه‌ی فعالیت باکتری‌ها می‌باشد. این روش جدید و بین‌رشته‌ای از پیوند بیوتکنولوژی و مهندسی عمران جهت بهسازی خاک پدید آمده است که به‌اصطلاح بهسازی زیستی خاک نام‌گرفته است. یک سیستم بهسازی زیستی خاک به‌طورکلی به شبکه‌ای از واکنش‌های شیمیایی اشاره دارد که توسط فعالیت‌های بیولوژیکی مدیریت و کنترل می‌شود و محصولات جانبی[6] تولیدشده در این سیستم، پارامترهای مهندسی خاک را تغییر می‌دهد. یکی از روش‌های بهسازی زیستی خاک پایه‌ی رسوب میکروبی کربنات کلسیم[7] است. نوعی از باکتری که قادر به تبدیل اوره به یون کربنات و یون آمونیوم است به خاک اضافه می‌شود، سپس یک محلول حاوی اوره و کلرید کلسیم افزوده می‌شود که موجب تولید کربنات می‌شود. کربنات تولیدشده در ترکیب با کلسیم رسوب می‌کند. ویژگی درخور توجه این نوع باکتری، اوره آز بودن و خاصیت رسوب زایی آن می‌باشد به نحوی‌که رسوبات کربنات کلسیم حین پیشرفت فرآیند به‌واسطه تجزیه‌ی اوره به‌وسیله‌ی این باکتری تشکیل می‌شود. واکنش تجزیه‌ی اوره و تشکیل رسوب کربنات کلسیم طی فرمول زیر در خاک انجام می‌شود [٤]:

$$CO(NH_2)_2 + CaCl_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4Cl + CaCO_3\ (s)$$

دو روش برای استفاده از باکتری‌ها جهت بهسازی خاک وجود دارد: روش اول بر پایه‌ی تحریک بیولوژیکی باکتری‌ها[8] است که با اضافه کردن مواد مغذی موردنیاز، باکتری‌های رسوب زا فعال می‌شوند. در این روش، کشت و رشد باکتری در داخل خاک صورت می‌گیرد. درصورتی‌که باکتری‌های موردنظر در محل موجود باشند، تحریک بیولوژیکی باکتری ها می تواند روشی مناسب برای شروع فعالیت و ادامه یافتن آن باشد. روش دوم بر پایه‌ی افزایش باکتری‌ها[9] است که در این روش، باکتری‌های رسوب زا به‌طور مستقیم به خاک اضافه می‌شوند. کلیه‌ی مراحل کشت و رشد میکروب در این روش در آزمایشگاه و با استفاده از رآکتورهای مخصوص صورت می‌گیرد. درصورتی‌که باکتری‌ها موردنظر در لایه‌های زیرین موجود نباشند و با توجه به خصوصیات لایه‌ی موردنظر از قبیل نفوذپذیری و قابلیت دسترسی به کل لایه‌بندی خاک، ممکن است افزایش باکتری‌ها راهکار مناسبی باشد. تعداد باکتری‌ها در طول عمق خاک متفاوت است به‌نحوی‌که هر گرم خاک در عمق یک متری دارای بیش از 10^9 سلول باکتری بوده که با افزایش عمق این تعداد کاهش‌یافته و در پایین‌ترین محدوده برای اکثر فعالیت‌های مهندسی، یعنی ۳۰

1 Epoxy
2 Acrylamide
3 Phenoplasts
4 Silicates
5 Polyurethane
6 Byproducts
7 Microbial induced carbonate precipitation-MICP
8 Bio-stimulation
9 Bio-augmentation

متر زیر سطح، این تعداد به 10^6 سلول در هر گرم خاک می‌رسد [۵]. از خصوصیات بارز روش مذکور می‌توان به جدید و کم‌هزینه بودن آن با رویکرد حفاظت و کاهش آثار مخرب این‌گونه فعالیت‌ها بر طبیعت و محیط‌زیست اشاره نمود [٦].

از مزایای بیوگروت (بهسازی زیستی خاک به روش تزریق) نسبت به تزریق مواد شیمیایی این است که این روش سمی نیست درحالی‌که بسیاری از مواد شیمیایی، به‌خصوص آن‌هایی که بر اساس آکریلامیدها و پلی اورتان‌ها تهیه می‌شوند، سمی هستند و برای محیط‌زیست مضر می‌باشند. از مزایای دیگر آن نسبت به تزریق مواد شیمیایی این است که هزینه مواد مصرفی پایین‌تر است. هزینه‌ی ارزیابی‌شده برای مواد اولیه در تزریق مواد شیمیایی در آمریکا در محدوده ۲ دلار تا ۷۲ دلار در هر مترمکعب خاک است. تزریق مواد شیمیایی، به‌خصوص آن‌هایی که بر اساس آکریلامیدها و پلی اورتان‌ها هستند، بسیار گران است درحالی‌که هزینه‌ی مواد مصرفی برای روش بیوگروت می‌تواند در محدوده‌ی ۵/. دلار تا ۹/. دلار در هر مترمکعب خاک باشد [۷].

به‌کارگیری روش بیوگروتینگ جهت بهسازی خاک در سال ۲۰۰٤ توسط ویفین با بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی یک ستون ١٦ سانتی‌متری خاک صورت پذیرفت [۸]. در سال ۲۰۰۷ ویفین و همکارانش رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم را بر روی ستون ۵ متری خاک به مرحله اجرا درآوردند [۹]. در سال ۲۰۱۰ هارکس و همکارانش به بررسی روشی برای توزیع و تثبیت باکتری‌ها (فعالیت آنزیمی باکتری‌ها) به‌صورت نسبتاً همگن در بستر ماسه‌ای پرداختند [۱۰]. نمونه‌ای از آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس در سال ۲۰۱۰ توسط ون پسن و همکارانش برای مدل‌سازی حالت سه‌بعدی و ارزیابی عملکرد روش فوق بر روی نمونه‌های یک و صد مترمکعبی انجام شد [۱۱]. در سال ۲۰۱۱ دی یانگ و همکارانش به بررسی اثر شرایط محیطی بر روند رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم پرداختند [۱۲]. مدرس نیا در سال ۱۳۹۰ برای نخستین بار در ایران، مطالعه‌ای موردی را باهدف ارزیابی رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم بر تثبیت ماسه‌های روان انجام داد [۱۳].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ خاک مورداستفاده

خاک مورداستفاده، یک نمونه خاک ماسه‌ای بوده که در صنعت با نام ماسه‌ی ریخته‌گری شناخته می‌شود و دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد. ماسه مذکور از معدن ماسه چیروک واقع در شهرستان طبس تهیه گردیده و شکل ظاهری دانه‌ها، کروی می‌باشند و شکستگی و لبه‌های تیز ندارند. درصد بالای سیلیس، سیلتی بودن و عدم چسبندگی ذرات از ویژگی‌های بارز این ماسه است. شکل (۱) نتایج آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D422 [١٤] را نشان می‌دهد.

شکل ۱: نمودار دانه‌بندی خاک مورداستفاده

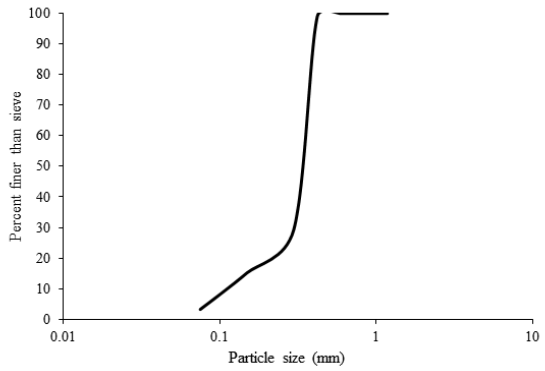

Fig. 1. Cumulative particle-size distribution curve of the utilized soil

جدول (۱): محاسبه‌ی ضرایب خمیدگی و یکنواختی

C_C	C_U	D_{60}	D_{30}	D_{10}
1.98	2.69	0.35	0.3	0.13

Table 1 C_U (uniformity coefficient) and C_C (coefficient of gradation)

طبق استاندارد ASTM D2487 [۱۵] و اطلاعات موجود در جدول (۱)، خاک موردنظر در طبقه‌بندی یونیفاید، ماسه بد دانه‌بندی شده یا SP هست.

۲-۲ میکروارگانیسم مورداستفاده

باکتری مورداستفاده در این پژوهش از خانواده باسیلاسه۱ با نام علمی Sporosarcina pasteurii که یک باکتری خاکزی

1 Bacillaceae family

قلیادوست[1] با فعالیت اوره‌آزی بسیار بالاست [۵] و از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران به شماره‌ی PTCC 1645 (DSM33) و به‌صورت لیوفیلیزه تهیه گردید و با توجه به اینکه به‌صورت پودر است، می‌بایست جهت مراحل بعدی آزمایش فعال گردد. مطابق دستورالعمل ارائه‌شده توسط این مرکز، پودر در محیط نوترینت براث[2] کشت داده شد. سپس باکتری فعال‌شده به محیط کشت TSA[3] منتقل‌شده و در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد در یخچال آزمایشگاه نگهداری شد.

۲-۳ محیط کشت مورداستفاده

یک نوع محیط کشت برای رشد باکتری مورداستفاده قرار گرفت که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه‌شده است.

جدول (۲): مشخصات محیط کشت

Culture Medium	Concentration
Peptone	20 gr/l
NH_4Cl	10 gr/l

Table 2 The characteristic of the utilized culture medium

۲-٤ روش تحقیق

آماده‌سازی باکتری‌ها پس از خروج از حالت لیوفیلیزه در دو محیط کشت جامد و مایع انجام می‌شود. برای محیط کشت جامد از محیط TSA استفاده شد. در مرحله‌ی بعد می‌بایست باکتری از محیط جامد به محیط مایع انتقال یابد. به این منظور باکتری در شرایط کشت بسته[4] و در محیط پپتون و کلرید آمونیوم رشد داده شد. سپس سلول‌های باکتری موجود در محیط مایع با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ متراکم[5] شدند. بیومس حاصل با محلول ۹ گرم بر لیتر کلرید سدیم رقیق شد و با استفاده از دستگاه نورسنجی[6] غلظت باکتری در طول‌موج ٦۰۰ نانومتر روی مقدار مشخصی که در طرح آزمایش ارائه‌شده بود تنظیم گردید. باکتری‌ها پس از این مرحله، به مدت ۲٤ ساعت در دمای ٤ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شدند.

آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D698 [١٦] به‌صورت پروکتور استاندارد باهدف یافتن درصد رطوبت بهینه‌ی خاک انجام شد. هدف از محاسبه درصد رطوبت بهینه، تعیین میزانی از ترکیب مواد غذایی و سوسپانسیون باکتری است که هنگام افزوده شدن به خاک، آن را با بیش‌ترین وزن مخصوص در قالب قرارداد. بنا بر نتایج این آزمایش، میزان رطوبت بهینه برابر ۱۳٪ محاسبه گردید. شکل ۲ نتایج آزمایش پروکتور استاندارد را نشان می‌دهد.

شکل ۲: منحنی تراکم حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد

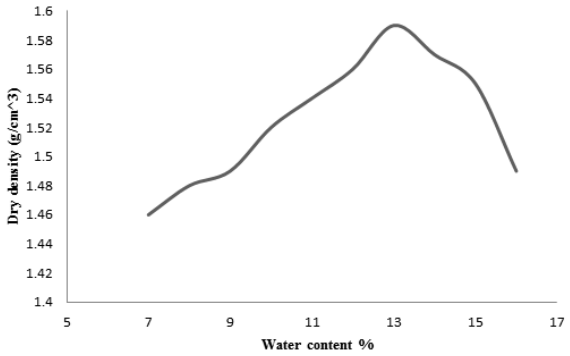

Fig. 2. Laboratory compaction plot for the utilized soil

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های خاک جهت اجرای آزمایش، تعدادی قالب از جنس MDF ساخته شد. لازم به ذکر است که فرآیند ساخت نمونه‌ها مطابق با ابعاد و مشخصات سلول برشی دستگاه انجام شد. خاک موردنظر، طبق طرح آزمایش، با میزانی مشخص از مواد غذایی و سوسپانسیون باکتری مخلوط گردید و با توجه به وزن مخصوص خاک، هر کدام از قالب‌های آماده‌شده را می‌بایست با ۱۱۰ گرم خاک پر نمود. قالب‌ها به نحوی پر شدند که در هر یک از آن‌ها سه لایه خاک ریخته شده، هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شود تا شرایط مناسب تراکم فراهم گردد. در نهایت سطح نمونه‌های خاک داخل قالب تا حد امکان صاف گردید. این نمونه‌ها تا زمان مشخص که باید تحت آزمایش قرار گیرد (طبق طرح آزمایش) در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. در نهایت، نمونه‌ها از قالب خارج گردیده و مطابق استاندارد ASTM D3080 [۱۷] تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. لازم

---

۱ آلکالوفیل یا قلیادوست به باکتری هایی گفته می شود که رشد بهینه آنها در شرایط قلیایی یا بازی انجام می شود.

2 Nutrient broth
3 Trypticase Soy Agar-TSA
4 Batch
5 Condense
6 Spectrophotometer

به ذکر است که اجرای آزمایش برش مستقیم با سه سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال ادامه یافت.

۲-۵ طراحی آزمایش

در این پژوهش، جهت طراحی آزمایش روش تاگوچی[1] به همراه دو نرم‌افزار تخصصی در این زمینه به نام‌های کوالیتک[2] و مینی‌تب[3] به کار گرفته شد. این روش توسط دکتر تاگوچی در اواسط جنگ جهانی دوم به‌منظور توسعه‌ی روش‌های جدید در بهینه‌سازی فرآیندهای مهندسی در کشور ژاپن ابداع شد [۱۸]. به این منظور ٤ فاکتور برای بررسی در نظر گرفته شد. این فاکتورها شامل غلظت باکتری[4]، نسبت مولاریته مواد غذایی[5]، مدت‌زمان تیمار کردن خاک (گیرش)[6] و نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی[7] با ۳ سطح تغییرات بودند. با نگاه به جدول تاگوچی مشاهده می‌شود که ماتریس ارتوگونال مناسب بر اساس تعداد عوامل و سطوح موردنظر L9 است. تعداد کل نمونه‌های موردنیاز برای هر سربار برابر ۹ عدد بود که با تکرار ۳ مرتبه جهت افزایش دقت نتایج، تعداد ۲۷ آزمایش برای هر سربار اجرا شد. درنتیجه تعداد کل نمونه‌ها برابر ۸۱ عدد گردید. در جدول (۳) فاکتورها و سطوح در نظر گرفته‌شده در روش تاگوچی نشان داده‌شده است.

جدول (۳): فاکتورها و سطوح در نظر گرفته‌شده در روش تاگوچی

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
OD600	1.5	2.5	4
Urea-CaCl2 (M)	1.5-0.75	1.5-1.5	3-1.5
Curing Time (day)	14	28	40
Inoculum Ratio (%)	3-10	6-7	9-4

Table 3 Parameters and levels considered in the Taguchi method for the present study

1 Taguchi Method
2 QualiTek®
3 MiniTab®
4 OD600
5 Urea/CaCl2
6 Curing Time
7 Inoculum Ratio

در جدول (٤) حالات طراحی آزمایش تاگوچی با ٤ فاکتور و ۳ سطح ارائه‌شده است.

جدول (٤): حالات آزمایش‌های طراحی‌شده در روش تاگوچی

Trial No.	OD600	Urea-$CaCl_2$ (M)	Curing Time (Day)	Inoculum Ratio (%)
T1	1.5	1.5-0.75	14	3-10
T2	1.5	1.5-1.5	28	6-7
T3	1.5	3-1.5	40	9-4
T4	2.5	1.5-0.75	28	9-4
T5	2.5	1.5-1.5	40	3-10
T6	2.5	3-1.5	14	6-7
T7	4	1.5-0.75	40	6-7
T8	4	1.5-1.5	14	9-4
T9	4	3-1.5	28	3-10

Table 4 The trial conditions proposed by Taguchi method for the present study

۳- نتایج

به‌منظور افزایش دقت پژوهش، آزمایش‌ها طبق جدول (٤) با ۳ تکرار برای هر سربار اجرا شدند که نتایج مقاومت برشی نمونه‌ها با سربارهای ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال به ترتیب در جداول (۵) تا (۷) ارائه‌شده است. لازم به ذکر است که مقاومت نمونه‌ی شاهد که حاصل افزودن مواد غذایی (بدون سوسپانسیون باکتری) بود، از تمام نتایج کاسته شده است. این اعداد برای سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال به ترتیب برابر ٦، ۱۸ و ۳۱ کیلو پاسکال بود.

جدول (۵): نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش برش مستقیم برای سربار ۱۲/۵ کیلو پاسکال (کیلو پاسکال)

Trial No.	Repetition 1	Repetition 2	Repetition 3
T1	84	94	115
T2	216	229	259
T3	260	263	285
T4	314	324	328
T5	244	260	293
T6	168	172	211
T7	170	188	231
T8	245	262	281
T9	400	433	460

Table 5 The result of the direct shear test (kPa) related to 12.5 kPa normal stresse

جدول (٦): نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش برش مستقیم برای سربار ٤٠ کیلو پاسکال (کیلو پاسکال)

Trial No.	Repetition 1	Repetition 2	Repetition 3
T1	85	97	109
T2	218	234	261
T3	260	268	287
T4	317	330	340
T5	249	268	296
T6	171	178	211
T7	176	197	228
T8	251	268	284
T9	409	441	478

Table 6 The result of the direct shear test (kPa) related to 40 kPa normal stresse

جدول (٧): نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش برش مستقیم برای سربار ٦٨ کیلو پاسکال (کیلو پاسکال)

Trial No.	Repetition 1	Repetition 2	Repetition 3
T1	86	97	119
T2	221	236	267
T3	264	269	294
T4	320	333	340
T5	255	272	308
T6	175	181	222
T7	182	201	251
T8	254	273	294
T9	414	448	478

Table 7 The result of the direct shear test (kPa) related to 68 kPa normal stresse

میانگین حاصل از نتایج آزمایش‌ها به همراه خطای استاندارد میانگین[1] در شکل (٤) نشان داده‌شده است. کوچک بودن خطای استاندارد میانگین نشان‌دهنده‌ی دقت نتایج به‌دست‌آمده است.

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA)، میزان تأثیر هر یک از فاکتورهای دخیل در این آزمایش را بر روی مقاومت برشی مشخص می‌کند. نتایج آنالیز واریانس برای هر سربار به ترتیب در جدول (٦) تا (٨) نشان داده‌شده است. صرف‌نظر از طبیعت نتایج و اندازه‌ی آزمایش، ادغام[2] نتایج حاصل از تحلیل واریانس قویاً پیشنهادشده است مگر اینکه آزمایش، شامل تعداد کمی از پارامترها با اثرات تقریباً برابر باشد به این دلیل که شانس به‌حساب آوردن پارامترهای کم‌اهمیت کاهش می‌یابد [١٨].

شکل ٣: میانگین حاصل از نتایج آزمایش‌ها به همراه خطای استاندارد میانگین

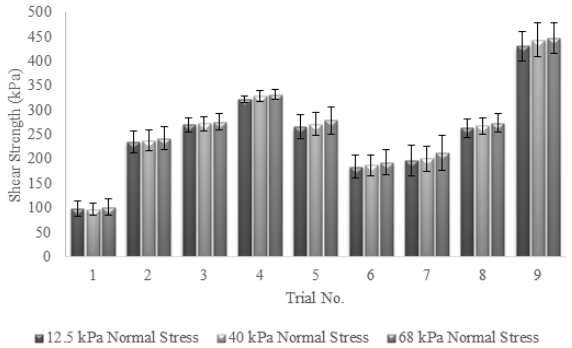

Fig. 3. Mean resulting from test results as well as standard error of the mean

جدول (٨) : نتایج آنالیز واریانس برای سربار ١٢/٥ کیلو پاسکال

Factors	Degree of freedom	Sum of squares	Variance	Pure sum	Percentage of the each factor effect
OD600	2	22.259	11.129	22.259	20.68
Urea-CaCl2	2	22.44	11.22	22.440	20.84
Curing Time	2	48.752	24.376	48.752	45.28
Inoculum Ratio	2	14.210	7.105	14.210	13.2
Total	8	107.663			100

Table 8 The results of analysis of variance for the 12.5 kPa normal stress

در شکل (٤) درصد تأثیر هر فاکتور در سربارهای مختلف در یک نمودار نشان داده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان تأثیر هر فاکتور در سربارهای مختلف تقریباً یکسان است؛ به‌عبارت‌دیگر، میزان سربار اثری در نتایج حاصل از تحلیل واریانسی ندارد. درنتیجه میزان اثر هر فاکتور بر روی مقاومت برشی با میانگین‌گیری بین اعداد حاصل از سه سربار مختلف می‌آید. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که درصد تأثیر فاکتورهای غلظت باکتری، نسبت مولاریته مواد غذایی، مدت‌زمان تیمار کردن خاک و نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی به ترتیب برابر ٢٢٪، ٢٠٪، ٤٥٪ و ١٢٪ است.

1 Standard error of the mean-SEM
2 Pooling

شکل ٤: مقایسه نتایج تحلیل واریانس برای سربارهای مختلف

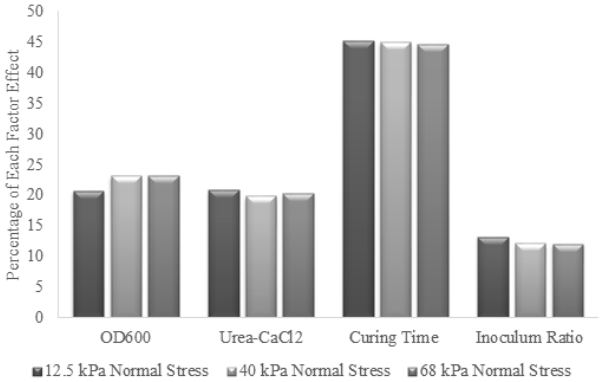

Fig. 4. Comparison of the results associated with analysis of variance for various normal stresses

در روش تاگوچی، از متغیری به نام SN[1] جهت مقایسه اثر یک فاکتور در سطوح مختلف استفاده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد. در این رابطه، n برابر تعداد تکرار آزمایش و y برابر نتیجه‌ی حاصل از هر تکرار آزمایش است. SN پراکندگی حول یک نقطه‌ی معین را بیان می‌کند و هر چه این مقدار بیشتر باشد پراکندگی کمتر خواهد بود [۱۸].

$$SN = -10\ \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right)$$

مقادیر SN نتایج مربوط به هر سربار در جدول (۹) ارائه‌شده است.

جدول (۹) : نتایج آنالیز واریانس برای سربار ٤٠ کیلو پاسکال

Factors	Degree of freedom	Sum of squares	Variance	Pure sum	Percentage of the each factor effect
OD600	2	21.510	10.765	21.510	23.12
Urea-CaCl2	2	18.512	9.256	18.512	19.87
Curing Time	2	41.863	20.931	41.863	44.95
Inoculum Ratio	2	11.227	5.613	11.227	12.06
Total	8	93.134			100

Table 9 The results of analysis of variance for the 40 kPa normal stress

1Signal-to-noise ratio

علاوه بر مقدار SN به‌دست‌آمده برای هر آزمایش می‌توان مقدار SN برای هر فاکتور در هر سطح را نیز تعیین نمود. در شکل‌های (۵) تا (۷) تأثیر فاکتورها بر مبنای سطوح تعریفی و SN در نمودارهای اثر اصلی[2] برای هر سربار نشان داده‌شده است. نمودار اثر اصلی نشانه‌ای است تا عملکرد هر یک از فاکتورها در فرایند را ارائه دهد؛ به‌عبارت‌دیگر نمودارهای اثر اصلی، اثر هر پارامتر در روند کلی فرایند را توصیف می‌کند [۱۸].

شکل (۵): نمودار اثر اصلی مربوط به سربار ۱۲/۵ کیلو پاسکال

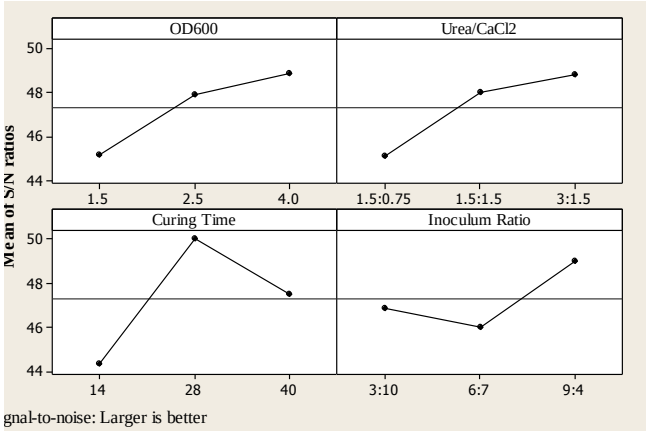

Fig. 5 Main effect diagram relating to the 12.5 kPa normal stress

شکل (٦): نمودار اثر اصلی مربوط به سربار ٤٠ کیلو پاسکال

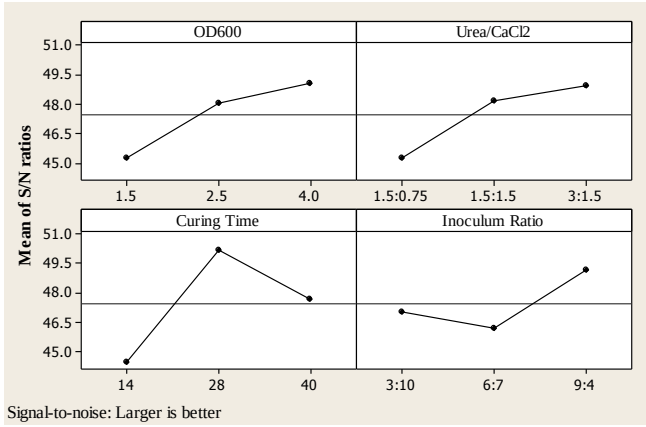

Fig. 6 Main effect diagram relating to the 40 kPa normal stress

2 Main effect plot

شکل ۷: نمودار اثر اصلی مربوط به سربار ٦٨ کیلو پاسکال

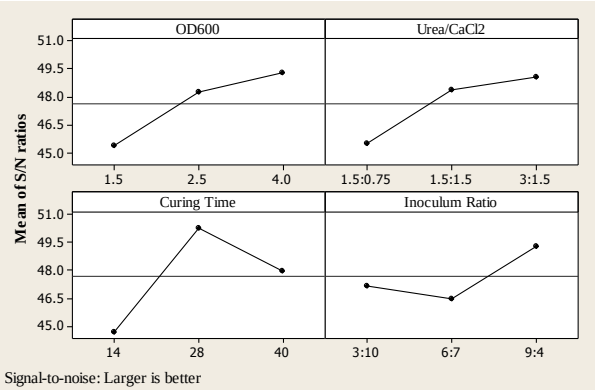

Fig. 7. Main effect diagram relating to the 68 kPa normal stress

با نگاهی به مقادیر SN برای فاکتورهای مختلف در سطوح تعریف‌شده برای سربارهای گوناگون، به این نکته پی برده می‌شود که میزان سربار اثر چندانی روی سطوح تأثیرگذار ندارد. همان‌طور که در نمودار فاکتور غلظت باکتری مشاهده می‌شود، سطح ۳ یعنی غلظت باکتری برابر ٤، بیش‌ترین تأثیر و سطح ۱ یعنی غلظت باکتری برابر ۱/۵، کمترین تأثیر را بر مقدار مقاومت برشی خاک دارد. در فاکتور نسبت مواد غذایی، سطح ۳ یعنی نسبت مواد غذایی ۳ مولار برای اوره و ۱/۵ مولار برای کلریدکلسیم، بیش‌ترین تأثیر و سطح ۱ یعنی نسبت مواد غذایی ۱/۵ مولار برای اوره و ۷۵/. مولار برای کلریدکلسیم، کمترین تأثیر را بر مقدار مقاومت برشی خاک دارد. در فاکتور زمان تیمار خاک، سطح ۲ یعنی مدت‌زمان تیمار ۲۸ روز، بیش‌ترین تأثیر و سطح ۱ یعنی مدت‌زمان تیمار ١٤ روز، کمترین تأثیر را بر مقاومت برشی خاک دارد. در فاکتور نسبت باکتری به مواد غذایی، سطح سوم یعنی نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی ۹ به ٤ بیش‌ترین تأثیر و نسبت باکتری به مواد غذایی ٦ به ۷ در سطح دوم، کمترین تأثیر را بر مقاومت برشی خاک دارد. بر این اساس حالت بهینه‌ی فاکتورها در آزمایش که منجر به بیش‌ترین مقاومت برشی خاک می‌شود، محاسبه گردید. ازآنجاکه ترکیب نمونه بهینه در ترکیبات طرح آزمایش ارائه‌شده وجود ندارد نمونه‌ای با ترکیب پیشنهادی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. مقاومت برشی به‌دست‌آمده برای سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦٨ کیلو پاسکال به ترتیب برابر ٤۷۰، ٤۹۱ و ۵۱۲ کیلو پاسکال (بدون کسر مقاومت نمونه‌ی شاهد) به دست آمد.

٤-بحث

رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم روشی جدید به‌جای روش‌های قبلی تثبیت خاک است. در این روش باکتری‌های دارای اوره آز یکی از فاکتورهای اصلی به شمار می‌آیند. به‌طورکلی چهار روش برای سنتز اوره آز در سیستم‌های میکروبی وجود دارد: ساختمانی۱، قابل القا۲، قابل‌مهار۳، تکاملی٤ [۱۹, ۲۰]. اگر این باکتری‌ها فعال بوده و آنزیم‌های اوره آز را به‌طور دائم در سلول بسازند و یا آنزیم به‌صورت فعال به سلول القا شود، نتیجه‌ی عمل مطلوب خواهد بود. قابل‌ذکر است که میکروارگانیسم‌های موردنظر برای این روش تثبیت خاک باید قادر به تحمل محیط با غلظت بالای اوره و کلسیم باشند. باید مدنظر داشت میکروب‌هایی برای محیط‌های غنی از اوره مناسب می‌باشند که فعالیت اوره آزی آن‌ها با یون آمونیوم محدود نمی‌شود و با توجه به مسائل زیست‌محیطی، سویه‌های باکتری موردنظر نباید پاتوژن باشند [۸, ۲۱]. باکتری Sporosarcina pasteurii که در این پژوهش مورداستفاده قرارگرفته است قابلیت‌های موردنظر را دارا است. این‌گونه‌ی باکتری برای مصارف صنعتی (برای اجرای عملیات رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم در مقیاس بالاتر و کارگاهی) مناسب بوده و در تمامی محیط‌های دارای شرایط ویژه حتی محیط غیر استریل قابل رشد و تکثیر است [۸].

خاک‌ها ازنظر اندازه‌ی ذرات، گستره‌ی چشم‌گیری را به خود اختصاص می‌دهند که بنا بر طبقه‌بندی یونیفاید در اندازه‌ی ۷۵ میکرون به دودسته‌ی درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شوند. نکته‌ی قابل‌تأمل و اصلی در انتخاب خاک برای اجرای عملیات رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم به‌اندازه‌ی میکروب‌های موردنظر در پژوهش بستگی دارد. قطر سلول باکتری مورداستفاده در این پژوهش در حدود یک میکرون است. سلول‌های باکتری باید از منافذ خاک عبور کنند؛

1 Constitutive
2 Inducible
3 Repressible
4 Developmental

بنابراین اندازه‌ی ذرات خاک نه باید آن قدر کوچک باشد که عبور سلول‌ها را با مشکل مواجه سازد و نه آن قدر بزرگ که مانع تشکیل همگن کلسیت در خاک شود [۲۲]. با توجه به موارد ذکر شده خاک مناسب برای این پژوهش خاک SP است.

تاکنون در زمینه‌ی رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم پژوهش‌های زیادی انجام شده است که اکثراً بر موضوعاتی مانند سویه‌های مختلف باکتری، الگوهای متفاوت تزریق، روش‌های تثبیت باکتری در خاک در حین تزریق و افزایش مقیاس فعالیت داشته‌اند. در این پژوهش، پارامترهای مختلف متأثر بر روی روش رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم موردبررسی قرارگرفته و مقدار هر پارامتر با روش تاگوچی تعیین‌شده است. روش تاگوچی در صنایع و در علوم مهندسی به‌منظور بهینه کردن اجرا و عملکرد و نتایج مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این روش به‌طور اکید توصیه می‌شود که در صورت تکرار نتایج با توجه به اینکه می‌توان از آنالیز میانگین استفاده کرد از آنالیز SN استفاده شود. تبدیل نتایج به نسبت SN سبب می‌شود گستره‌ی بیشتری از اعداد پوشش داده شوند (از ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰۰ روی نمودار لگاریتمی). در ضمن نسبت SN معیار مناسبی برای مقایسه‌ی هر عملکردی در هر تعداد می‌باشد. بدون در نظر گرفتن روش‌های کنترل کیفیت برای آنالیز نتایج، هر چه نسبت SN بیشتر باشد نتیجه مطلوب‌تر خواهر بود. قابل‌ذکر است که تنها نکته‌ی قابل‌تأمل در استفاده از نسبت SN مربوط به تبدیل نتایج حاصل از آنالیز به واحدهای اولیه در بعضی شرایط خاص است [۲۳].

دو پارامتر کنترل‌کننده و تأثیرگذار در رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم که وجه اساسی و مکمل در تولید کلسیت را تشکیل می‌دهند، غلظت باکتری و نسبت مولاریته مواد مغذی هستند. با توجه به نمودارهای اثر اصلی باید تأثیر مثبت پارامتر افزایش غلظت باکتری و نسبت مولاریته مواد مغذی بر نتایج مقاومت برشی موردبررسی قرار گیرد. زمانی که تعداد سلول‌های باکتری در محیط خاک کم شود درصد وقوع واکنش بین مواد شرکت‌کننده به دنبال آن کم می‌شود [۵]. نزدیکی درصد توزیع این دو پارامتر در تحلیل واریانسی نکته‌ی قابل‌توجه در این واکنش است که این نکته بیانگر تناسب تعداد سلول‌های باکتری با مقدار ماده‌ی ورودی برای واکنش است. فیشر و همکارانش در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که تعداد سلول‌های باکتری و آنزیم خارج سلولی با نرخ تولید آمونیوم و درنتیجه رسوب کلسیت تناسب دارد [۲٤]؛ به‌عبارت‌دیگر، افزایش نسبت مولاریته‌ی مواد مغذی منجر به افزایش pH حول سلول‌های باکتری می‌شود، زیرا با افزایش تعداد مولکول‌های اوره، یک لایه‌ی ضخیم کلسیت حول ذره‌ی خاک تشکیل می‌شود. از سوی دیگر، کاهش مقدار اوره و کلسیم سبب کاهش رسوب کلسیت و در نهایت کاهش مقدار مقاومت برشی خاک می‌گردد. سومانی و همکارانش در سال ۲۰۰٦ با تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که افزایش یون کربنات شرط لازم برای افزایش اندازه‌ی متوسط کریستال‌ها می‌باشد که این نتیجه بیانگر این نکته است که وجود مقدار مناسب اوره، تمایل رسوب بیشتر روی کریستال-های موجود در خاک را افزایش می‌دهد [۲۵].

تعداد کثیری از آزمایش‌ها نشان داده‌اند که افزایش مدت زمان تیمار باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود. زمان کافی به مواد شرکت کننده در واکنش با افزایش مدت زمان تیمار داده می‌شود که این کار باعث توزیع یکنواخت کلسیت در توده‌ی خاک می‌شود، یعنی توزیع یکنواخت کلسیت زمانی قابل‌دسترس است که سلول‌های باکتری در طول توده حاضر و زمان متوسط واکنش مواد به‌اندازه‌ی کافی باشد [۱۰]. در این پژوهش قابل‌مشاهده است که نسبت SN به‌دست‌آمده بعد از ۲۸ روز افزایش نیافته است و این موضوع نشان می‌دهد که بعد از یک دوره‌ی زمانی مشخص، مقاومت خاک تثبیت‌شده افزایش نمی‌یابد که این مورد به‌نوعی شبیه به عملکرد سیمان پرتلند معمولی است. این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت باکتریایی بعد از زمان مشخص شود. پژوهش‌های ربتا در سال ۲۰۰۷ نشان داد که با کاهش فعالیت باکتریایی بعد از یک دوره‌ی زمانی بین ۱٦ تا ۳۲ روزه رسوب کلسیت کاهش می‌یابد [۲٦]. ون پسن در سال ۲۰۰۹ اظهار داشت که ممکن است دلیل کاهش فعالیت باکتریایی پس از ۲۰ روز به ۵ میلی

مول اوره در ساعت کاهش‌یافته که به علت به دام افتادن سلول‌های باکتری داخل رسوبات کلسیت می‌باشد [۲۷].

در نهایت نکته‌ی قابل‌ذکر برای سنجش میزان رضایت از آزمایش، استفاده از روش صحت‌سنجی آزمایش در حالت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از نتایج است. وجود میانگین در محدوده‌ی پیش‌بینی‌شده به معنای رضایت‌بخش بودن آزمایش و نتیجه‌ی آن است. از سوی دیگر، خارج بودن میانگین از محدوده‌ی موردنظر دلیلی برای مناسب نبودن مدل مورداستفاده برای پیش‌بینی نتایج آزمایش است. به‌طورکلی زمانی که از آزمایش صحت‌سنجی جوابی به غیر از نتایج متناسب به دست می‌آید می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که مدل موردنظر برای پیش‌بینی رفتار واقعی کاربردی نمی‌باشد [۱۸]. در این پژوهش، فرآیند رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم با چهار پارامتر به روش تاگوچی بهینه شد و با توجه به مقاومت به‌دست‌آمده در حالت واقعی نسبت به حالت پیش‌بینی‌شده، نتایج با دقت ۹۵ درصد در حالت بهینه به دست آمد که این نتیجه تأییدی بر طرح آزمایش مورداستفاده می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها استفاده شد که نسبت به روش فاکتوریل کامل، صرفه‌جویی قابل‌توجهی در وقت و هزینه را به دنبال داشت به‌نحوی‌که با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح در نظر گرفته‌شده، تعداد آزمایش‌ها را از ۲۴۳ آزمایش به ۲۷ آزمایش تقلیل داد. همچنین برای افزایش دقت پژوهش، آزمایش‌ها با ۳ تکرار اجرا شدند. فرآیند میکروبی نقشی اساسی در این روش دارد زیرا مقاومت نمونه‌های شاهد که فقط حاصل افزودن مواد مغذی بودند، مقاومت چشمگیری را از خود نشان نداد. تحلیل واریانسی (ANOVA) به منظور بررسی میزان تاثیر فاکتورهای در نظر گرفته‌شده نشان داد که درصد تأثیر چهار فاکتور غلظت باکتری، نسبت مولاریته مواد غذایی، مدت‌زمان تیمار کردن خاک و نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی روی مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۲۲٪، ۲۰٪، ۴۵٪ و ۱۲٪ می‌باشد. مقاومت برشی نمونه‌های بهینه با شرایط غلظت باکتری برابر ٤، نسبت مولاریته مواد غذایی برابر ۳-۱/۵ مول، مدت زمان تیمار کردن خاک برابر ۲۸ روز و نسبت حجمی سوسپانسیون باکتری به مواد غذایی برابر ۹٪ به ٤٪، برای سربار ۱۲/۵، ٤۰ و ٦۸ کیلو پاسکال به ترتیب مقدار ٤۷۰، ٤۹۱ و ۵۱۲ کیلو پاسکال در حالت بهینه به دست آمد که افزایشی قابل‌توجه نسبت به نمونه‌های شاهد داشت. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بعد از یک بازه‌ی زمانی مشخص افزایش قابل‌توجهی در مقاومت برشی خاک رخ نمی‌دهد. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند باعث بهبود طراحی آزمایش‌ها در آینده و حتی اجرای این روش در محل پروژه شود.

٦- منابع References

1. Xanthakos, P.P., L.W. Abramson, and D.A. Bruce, *Ground control and improvement*. 1994, New York: J. Wiley. xxv, 910 p.
2. Cho, G.-C., J. Dodds, and J.C. Santamarina, *Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006. **132**(5): p. 591-602.
3. Karol, R.H., *Chemical grouting and soil stabilization*. 3rd ed. Civil and environmental engineering. 2003, New York: M. Dekker. xvii, 558 p.
4. Lee, M.L., W.S. Ng, and Y. Tanaka, *Stress-deformation and compressibility responses of bio-mediated residual soils*. Ecol. Eng., 2013. **60**: p. 142-149.
5. DeJong, J.T., et al., *Bio-mediated soil improvement*. Ecol. Eng., 2010. **36**(2): p. 197-210.
6. Bachmeier, K.L., et al., *Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation*. J Biotechnol, 2002. **93**(2): p. 171-81.
7. Ivanov, V. and J. Chu, *Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008. **7**(2): p. 139-153.
8. Whiffin, V.S., *Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement*, in *School of Biological Sciences and Biotechnology*. 2004, Murdoch University: Perth, Australia.
9. Whiffin, V.S., L.A. van Paassen, and M.P. Harkes, *Microbial carbonate precipitation*

19. Mobley, H. and R. Hausinger, *Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization.* Microbiol. Rev., 1989. **53**(1): p. 85-108.
20. Mobley, H., M.D. Island, and R.P. Hausinger, *Molecular biology of microbial ureases.* Microbiol. Rev., 1995. **59**(3): p. 451-480.
21. Follmer, C., et al., *Jackbean, soybean and Bacillus pasteurii ureases.* Eur. J. Biochem., 2004. **271**(7): p. 1357-1363.
22. Mitchell, J.K. and J.C. Santamarina, *Biological considerations in geotechnical engineering.* J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2005. **131**(10): p. 1222-1233.
23. Roy, R.K., *Design of experiments using the Taguchi approach : 16 steps to product and process improvement*. 2001, New York: Wiley. xv, 538 p.
24. Stocks-Fischer, S., J.K. Galinat, and S.S. Bang, *Microbiological precipitation of $CaCO_3$.* Soil Biol. Biochem., 1999. **31**(11): p. 1563-1571.
25. Somani, R.S., et al., *Examination of the polymorphs and particle size of calcium carbonate precipitated using still effluent (i.e., $CaCl_2$ + NaCl solution) of soda ash manufacturing process.* Ind. Eng. Chem. Res., 2006. **45**(15): p. 5223-5230.
26. Rebata-Landa, V., *Microbial activity in sediments: effects on soil behavior*. 2007, Georgia Institute of Technology: Atlanta, GA.
27. van Paassen, L.A., *Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation*. 2009, Delft University of Technology: Delft, The Netherlands.
as a soil improvement technique. Geomicrobiol. J., 2007. **24**(5): p. 417-423.
10. Harkes, M.P., et al., *Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement.* Ecol. Eng., 2010. **36**(2): p. 112-117.
11. van Paassen, L.A., et al., *Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment.* J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2010. **136**(12): p. 1721-1728.
12. Mortensen, B.M., et al., *Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation.* J Appl Microbiol, 2011. **111**(2): p. 338-49.
13. Modares Nia, A.R., *Performance evaluation of biological improvement for sandy soils*. 2012, Islamic Azad University, Najafabad Branch: Iran.
14. Standard, A., *D422 1963 (2007) Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.*
15. Standard, A., *D2487 (2007) Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM International, West Conshohocken, PA.*
16. Standard, A., *D698 (2007) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)). ASTM International, West Conshohocken, PA.*
17. Standard, A., *ASTM D3080 (1998) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA.*
18. Roy, R.K., *A primer on the Taguchi method*. 2nd ed. 2010, Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers. xii, 304 p.

Numerical Investigation of the Effect of Intake Location and Diversion Angle on Flow Pattern in a Channel Curve by SSIIM2 Software

H. Montaseri[1],H. Asiaei[2]

1. Assistant Professor of Civil Engineering, Yasouj University
2. MSc Student of Civil Engineering, Yasooj University

hmontaseri@gmail.com

Abstract:
The use of lateral intake is a method for providing water from river. The most important issue is to get maximum water and minimum sediment into the diversion channel. Rivers rarely run on straight paths in nature, and most rivers have meandering forms. In a river curve the presence of centrifugal force leads to the formation of secondary flow. As a result, water particles near the surface are driven outward. The secondary flow advects the main flow, leading to high velocity at the outer bank of the curve. On the other hand the flow at the bed of a channel is directed toward the inner bank. The interaction of the main flow with the secondary flow forms the so-called helical flow in the bend. This flow system has important consequences in the longitudinal, transverse, vertical velocity distributions, transport of momentum and streamlines at different levels of water. Therefore, laying out the intake's outer bank of a curve is one of the ways to reduce sediment input to the lateral intake. The combination of the helical flow and the complex flow pattern in front of the lateral intake increases the complexity of this three- dimensional flow pattern. The flow approaches the intake; it is accelerated laterally by the suction pressure at the end of the diversion channel. This causes the division of the flow, so that a portion enters the diversion channel and the remainder continues its way to the downstream in the main channel. The portion withdrawn by the branch is delineated by a curved shear-layer surface, denoted as the dividing stream surface. Because of the streamwise curvature of the dividing stream surface, the diverted flow experiences an imbalance between the transverse pressure gradient and shear and centrifugal forces that initiates a clockwise secondary motion cell. This secondary motion interacts with the separation zone along the inner wall of the branch channel. In design of lateral intakes, the determination of appropriate intake location and diversion angle is very important. In this paper, lateral intake was simulated at different locations and angels by using the SSIIM numerical model to investigate dividing stream surface and separation zone at main and branch channels. For this purpose, the flow is simulated using standard k-ε model and RNG model. For model calibration, the result of the Montaseri et.al (2008) investigation was used. The results show that in the curved channel the dividing stream surface has a completely different structure than the lateral diversion in a straight one. In other words, the width of the dividing stream surface close to the bed is smaller than the surface. Furthermore, at every location, the dividing stream surface width adjacent to the bed and separation zone has the largest dimension at the diversion angle of 90 degrees and has the smallest dimension at that of 30 degrees. Also, at the location of 135 degrees, dividing stream surface width close to the bed has the smallest dimension, while the width close to the surface has the largest dimension at any diversion angle.

Key words: lateral intake, dividing stream surface, separation zone, channel curve