



## بررسی افزایش قابلیت زهکشی خاک‌های ریزدانه با استفاده از روش الکتروکنتیک

کاظم شاهوردی<sup>۱\*</sup>، فریدون خسروی<sup>۱</sup>، محسن زمانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی اراک، اراک، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲ آذر ۱۳۹۳  
بازنگری: ۲۳ آبان ۱۳۹۴  
پذیرش: ۶ بهمن ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

الکتروکنتیک  
تحلیل آزمایشگاهی  
خاک‌های ریزدانه  
زهکشی سریع

**چکیده:** بسیاری از سازه‌ها بر روی خاک‌های ریزدانه احداث می‌شوند. زهکشی این نوع خاک‌ها جهت کاهش سطح ایستایی برای ساخت سازه جدید و یا حفاظت از سازه‌های موجود، امری ضروری است. یکی از روش‌ها برای افزایش زهکشی در خاک‌های ریزدانه که سرعت زهکشی در آن‌ها کم است، استفاده از روش الکتروکنتیک می‌باشد. در این روش دو الکتروود داخل خاک اشباع قرار گرفته و سپس با استفاده از منبع انرژی، جریان الکتریکی در الکتروودها برقرار می‌شود. در نتیجه، انتقال ذرات باردار به سمت الکتروودهای با بار مخالف با سرعت بیشتری انجام شده و باعث افزایش سرعت زهکشی می‌شود. در این تحقیق حرکت ذرات باردار در خاک ریزدانه با توجه به روابط حاکم ریاضی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از روش الکتروکنتیک، زهکشی یک نمونه خاک رسی در یک مخزن با ابعاد  $180 \times 60 \times 60$  سانتی متر مکعب مورد آزمایش قرار می‌گیرد. بررسی نتایج آزمایش زهکشی با اعمال ولتاژهای مختلف در خاک در حالت عادی و اسیدی نشان می‌دهد که ظرفیت باربری، میزان زهکشی و نشست سریع خاک‌های ریزدانه اشباع در صورت استفاده از روش الکتروکنتیک افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

افزایش زهکشی و افزایش ظرفیت باربری خاک در اجرای سازه‌ها، احداث خاکریز راه‌ها، سد‌های خاکی، اسکله، موج‌شکن و سایر سازه‌های ساحلی اهمیت ویژه‌ای دارد. جهت اجرای این پروژه‌ها، در صورت بالا بودن سطح آب زیرزمینی لازم است ابتدا عملیات زهکشی و بهسازی خاک صورت گیرد. همچنین فشار ناشی از تورم خاک ریزدانه رسی با قابلیت تورم بالا می‌تواند موجب خرابی کامل ابنیه‌ها، نظیر پوشش کانال‌های آبیاری، کف سازه‌ها و جاده‌ها گردد. بنابراین با توجه به اینکه هر ساله تعداد بسیار زیادی از سازه‌ها بر روی خاک ریزدانه اشباع و نیمه اشباع ساخته می‌شود، زهکشی این خاک امری ضروری می‌باشد.

زهکشی خاک درشت‌دانه به سهولت انجام می‌پذیرد لیکن در خاک ریزدانه، با توجه به اینکه سرعت زهکشی بسیار پایین است، استفاده از روش‌های مناسب برای افزایش زهکشی آن‌ها امری ضروری می‌باشد. یکی از روش‌ها، روش الکتروکنتیک<sup>۱</sup> می‌باشد.

الکتروکنتیک یک واژه عمومی فیزیکی است که به حرکت ذرات در میدان الکتریکی دلالت دارد. در مهندسی ژئوتکنیک، کاربرد این واژه به مفهوم اعمال یک جریان مستقیم، با شدت و اختلاف پتانسیل کم به دو الکتروود مستقر در خاک می‌باشد. در این حالت با برقراری جریان، حرکت ذرات در الکتروولیت شکل می‌گیرد.

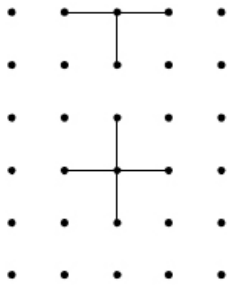
از مهمترین کاربردهای روش الکتروکنتیک می‌توان به تحکیم خاک‌های سست، زهکشی در خاک‌های ریزدانه رسی، آبدایی لجن‌ها، جداسازی آلودگی‌ها از خاک و زهکشی زمین‌های شیب‌دار که امکان زهکشی در آنها با روش‌های عادی امکان‌پذیر نیست اشاره نمود. با هدف آشنایی محققین با فرایندهایی که در پدیده الکتروکنتیک اتفاق می‌افتد، یک تحقیق مروری توسط مساوات و همکاران (۲۰۱۲)، مرجع [۱]، انجام و فرایندهای مذکور تشریح گردید.

این روش جهت تحکیم خاک‌های سست، تثبیت خاکریزها و ترانشه‌ها [۲-۴]، درمعدن به‌منظور آبدایی [۵، ۶] و همچنین در مهندسی آب [۷] مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت تحکیم یک خاک رس [۸]، یک سلول مکعبی از جنس پلی اتیلن در یک نمونه جعبه آزمایشگاهی با ابعاد محدود در نظر گرفته شد. فلز آند از جنس روی در داخل خاک در سلول اول قرار می‌گیرد و در سلول دوم محلول الکتروولیت کلراید ریخته می‌شود. کاتد (از جنس کربن) در داخل سلول دوم قرار گرفته و برای انجام آزمایش ولتاژ ۲۰ ولت اعمال می‌گردد. محلول الکتروولیت کلراید شامل یون‌های کلسیم با بار الکتریکی مثبت بوده و در اثر برقراری جریان الکتریکی به سمت الکتروود با بار منفی حرکت می‌کند. برای جداسازی سلول اول و دوم یک صفحه پلی‌اتیلن با پوشش فیلتر نایلون-پلی‌پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت. به منظور مشاهده اولیه میزان سختی نمونه، آزمایش سوزن و جهت شناسایی کانی‌های موجود در خاک، آزمایش‌های مورد استفاده قرار گرفت. با برقراری جریان

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: k.shahverdi@modares.ac.ir

۱ قرار می‌گیرند. که در آن طول هر شبکه برابر با فاصله بین مولکول‌ها (Lmol) می‌باشد.



شکل ۱: مقطع عرضی مولکول‌های یک مایع در تماس با خلا  
Fig. 1. Cross section of a liquid in contact with vacuum

هر مولکول در داخل این مایع شش پیوند با مولکول‌های اطراف خود دارد. در صورتی که مولکول‌های سطح تنها پنج پیوند دارد (۲ مولکول در صفحه عمود بر صفحه کاغذ قرار دارند که در شکل دیده نمی‌شوند). در صورتی که کل انرژی پیوندی هر مولکول در یک حجم برابر با  $\mathcal{E}$  باشد، انرژی یک مولکول سطحی برابر با  $\frac{5}{6}\mathcal{E}$  خواهد بود. مقدار انرژی پیوندی با استفاده از رابطه ۱ تخمین زده می‌شود:

$$\mathcal{E} \approx hm \quad (1)$$

که در آن  $h$  گرمای ویژه‌ی تبخیر (آنتالپی تبخیر در واحد جرم) و  $m$  جرم یک مولکول واحد می‌باشد:

$$m = \frac{M_{mol}}{N_A} = \rho L_{mol}^3 \quad (2)$$

با تقسیم انرژی مولکولی سطحی بر مقیاس سطح مولکولی معادله ۳ حاصل می‌شود که برای تخمین کشش سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\gamma_L \approx \frac{1}{6}\mathcal{E} \approx \frac{1}{6}\frac{hm}{L_{mol}^2} \approx \frac{1}{6}h\rho L_{mol} \quad (3)$$

که در آن  $\gamma_L$  کشش سطحی مایع می‌باشد.

یانگ رابطه ۴ را برای تعیین کشش سطحی بین آب و یک سطح جامد ارائه داده است:

$$\gamma_L \cos \theta = \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (4)$$

که در آن  $\gamma_S$  کشش سطحی جسم جامد،  $\gamma_{SL}$  کشش سطحی بین جسم جامد و مایع و  $\theta$  زاویه تماس بین مایع (L) و جامد (S) می‌باشد. در این رابطه، زاویه تماس و نیروی کشش سطحی مایع به راحتی قابل اندازه‌گیری

الکتریکی، یون‌های کلسیم موجود در محلول الکترولیت موجود در سلول دوم به سمت سلول اول مهاجرت و دانه‌های خاک را احاطه می‌کند که در نتیجه آن، یک ترکیب مستحکمی با رده سیمانی ۲۰۰۰ psi تشکیل می‌گردد. مکارچیان و فردحاجیان (۱۳۹۱) برای کنترل رفتار شمع‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها از روش الکتروکنتیک استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت استفاده از روش الکتروکنتیک، به طور میانگین ظرفیت باربری شمع‌ها ۳۴ برابر نسبت به حالتی که از این روش استفاده نمی‌شود، افزایش می‌یابد. بنابراین در این حالت نیازی به افزایش قطر شمع نخواهد بود [۹]. دوستی و همکاران (۱۳۸۸) برای حذف سرب از لجن‌های شیمیایی از روش الکتروکنتیک استفاده نمودند. در این پژوهش کارایی فرایند الکتروکنتیک در حذف فلز سرب از لجن‌های شیمیایی آلوده مورد مطالعه قرار گرفته و به‌وسیله فرایند انعقاد و لخته‌سازی با آهک، نمونه لجن شیمیایی با غلظت

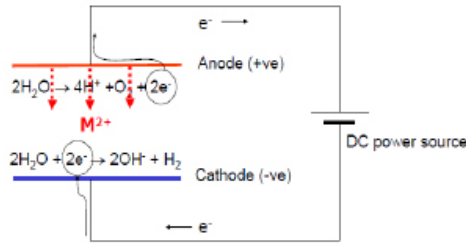
۱۰۰۰ mgr/kg در آزمایشگاه تهیه گردید و درون یک راکتور از جنس پلکسی گلاس به ابعاد محدود قرار داده شد. سپس جریان برق مستقیم با گرادیان ولتاژ ۱ v/cm در طول نمونه برقرار گردید. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که عامل اصلی افزایش میزان حذف سرب در مجاورت کاتد، معکوس شدن جهت جریان الکترواسمز (آب میان حفره‌ای) بوده است [۱۰].

نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که با استفاده از روش الکتروکنتیک می‌توان تا حداکثر ۹۰٪ املاح سنگین را از خاک رس و ۶۵٪ املاح را از خاک پیت خارج کرد. در آزمایشگاه تا ۹۴ درصد حذف املاح نیز در خاک‌های ریزدانه مشاهده شده است [۱۱]. برای جداسازی نیترات کادمیم از داخل رس، تحقیقی در مدل آزمایشگاهی و در یک سلول الکتریکی به ابعاد ۱۰ cm × ۱۲ cm انجام گرفت. در این تحقیق، غلظت‌های مختلف نیترات کادمیم در داخل خاک در نظر گرفته شد و ولتاژهای مختلف با شروع از ولتاژ ۱ v در مدت زمان‌های ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ساعت اعمال گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه کادمیم، افزایش مقدار ولتاژ و افزایش مدت زمان اعمال جریان، راندمان روش الکتروکنتیک افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار بیشتری نیترات کادمیم از خاک جدا می‌شود [۱۲].

هدف از این تحقیق، بومی‌سازی فرایند الکتروکنتیک برای افزایش سرعت زهکشی در خاک‌های ریزدانه است. بدین منظور دستگاه آزمایش بزرگ مقیاس الکتروکنتیک همراه با کلیه تجهیزات، برای بررسی مقدار افزایش زهکشی یک نمونه خاک رس طبیعی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و سپس آزمایش‌های مربوطه انجام شد.

## ۲- روش الکتروکنتیک

نیروی عمودی در واحد طول، نیروی کشش سطحی نامیده می‌شود. در یک سیستم گاز-مایع-جامد مانند هوا و آب که در داخل خاک وجود دارد نیروی کششی فاز هوا در عمل صرف نظر می‌گردد، بنابراین به‌منظور برقراری تعادل در چنین سیستمی تنها نیروی فشاری هوا، نیروی فشاری آب و نیروی کشش سطحی آب مورد توجه قرار می‌گیرد. در یک مایع، مولکول‌هایی که به‌وسیله خلا احاطه شده است، در شبکه‌ای بصورت شکل



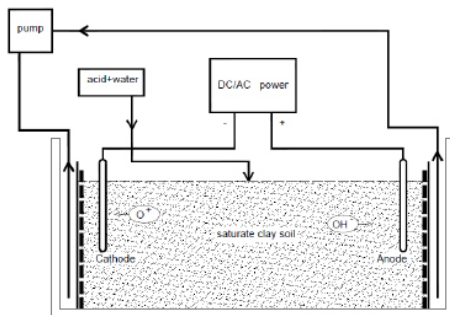
شکل ۳: انتقال الکترون‌ها و یون‌ها در پدیده الکتروکنتیک [۱۴].  
Fig. 3. the electrons and ions transfer in the electro kinetic phenomenon

خاکی که در پدیده الکتروکنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید هدایت هیدرولیکی پائینی داشته و دارای املاح کافی قابل حل در آب باشد. کاهش غلظت املاح موجود در خاک، راندمان پدیده الکتروکنتیک را کاهش می‌دهد [۱۵]. مناسب‌ترین خاک برای مشاهده تاثیر این پدیده، رس و سیلت می‌باشد [۱۶].

ضمناً در مرجع [۱۷] روش‌های قرارگیری الکترودها در خاک شامل: ۱- قرارگیری الکترودها بصورت قائم در موازات یکدیگر ۲- قرارگیری الکترودها بصورت صفحات افقی درون خاک ۳- قرارگیری عمودی کاتدها به محوریت یک آند پیشنهاد شده است.

### ۳- دستگاه مورد آزمایش

دستگاهی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، متشکل از دو عدد الکتروده مسی به صورت میله‌ای با قطر حدود ۲ سانتیمتر و طول ۵۰ سانتیمتر، دستگاه منبع تغذیه با ولتاژ متغیر، سیم‌های رابط و یک مخزن با ابعاد  $180 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$  از جنس ورق پلکسی شفاف پمپ قرار می‌باشد. دو عدد ظرف کوچک به فاصله ۲۰ cm در دو طرف مخزن قرار داده شده‌اند تا آب زهکش شده در این ظروف ذخیره گردد. در قسمت انتهایی مخزن و درست در بالای محل قرارگیری ظروف منافذی وجود دارد که در صورت باز کردن آن‌ها عمل زهکشی انجام می‌شود. پس از اتمام آزمایش مقدار آب جمع شده در داخل ظروف برای تعیین میزان آب زهکشی شده اندازه‌گیری می‌شود. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۴ ارائه شده است.

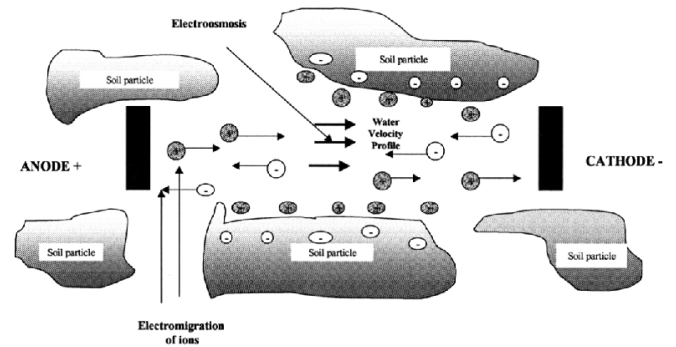


شکل ۴: شکل شماتیک دستگاه آزمایش  
Fig. 4. the schematic of the testing apparatus

می‌باشد و مقادیر مختلف آن‌ها در تحقیقات مختلف ارائه شده است در صورت مشخص شدن  $\gamma_s$  به راحتی می‌توان با استفاده از معادله یانگ،  $\gamma_{SL}$  را محاسبه کرد. این نیرو ( $\gamma_{SL}$ )، یکی از مهمترین نیروهای درون خاک‌های ریزدانه می‌باشد که اثر مهمی بر روی زهکشی آن‌ها دارد. برای غلبه بر این نیرو و جداسازی آب از خاک می‌توان از روش الکتروکنتیک استفاده کرد.

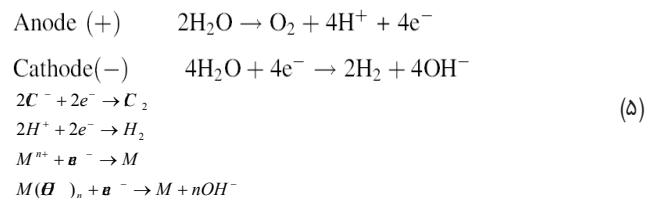
پدیده‌های الکتروکنتیک در مایعات ناهمزاد (برون‌زاد) یا در اجسام متخلخل پر از مایع اتفاق می‌افتند. ناهمزاد به معنای مایع حاوی ذرات است. ذرات می‌توانند جامد، مایع یا حباب‌های گاز با ابعادی در مقیاس میکرومتر یا نانومتر باشند. تأثیر یک نیروی خارجی الکتریکی در چنین محیطی باعث ایجاد حرکتی در مایع می‌شود که با سطح باردار مجاور مماس است.

مهمترین واکنشی که در طی پدیده الکتروکنتیک در نزدیکی الکترودها رخ می‌دهد، الکترولیز آب است که در نتیجه آن، مکانیزم‌های انتقال ذرات باردار به سمت الکترودهای با بار مخالف، طی فرایندهای الکترواسمزی<sup>۱</sup> و الکترومیگریشن<sup>۲</sup> اتفاق افتاده و تعداد زیادی برهم کنش بین خاک و املاح موجود در آن صورت می‌گیرد (شکل ۲). الکترواسمزی حرکت رطوبت خاک یا آب زیرزمینی از آند به کاتد در یک سلول الکترولیت و الکترومیگریشن انتقال ذرات باردار شده به سمت الکترودها با بار مخالف می‌باشد.



شکل ۲: حرکت ذرات باردار در اثر الکتروکنتیک  
Fig. 2. Charged particles Movement affected by electro kinetic

فرایندهایی که در طی پدیده الکتروکنتیک در یک محلول الکترولیت اتفاق می‌افتد بصورت رابطه ۵ می‌باشد [۱۳].



این فرایند برای مولکول آب در شکل ۳ نشان داده شده است.

- 1 Electro osmosis
- 2 Electro migration

#### ۴- مکانیزم انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش، ابتدا درون مخزن دستگاه، ۵۰ cm خاک ریخته می‌شود. سپس آب به آن اضافه می‌گردد. با توجه به ضریب نفوذپذیری و مشخصات مکانیکی خاک و دانستن عمق خاک داخل مخزن (۶۰ cm)، مدت زمان نفوذ آب و حجم آب لازم برای شدن اشباع خاک قابل پیش‌بینی است. با مشاهده خروج آب از خاک ریزدانه از طریق بیرون‌زدگی آب از شیارهای انتهای سلول آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که خاک بطور کامل اشباع شده است. اشباع شدن خاک، در این مخزن به طور طبیعی حدود ۳ روز زمان می‌برد. به منظور اندازه‌گیری مقدار زهکشی خاک، ابتدا در حالت طبیعی منافذ زهکش را باز نموده و به مدت ۲۴ ساعت زهکشی انجام می‌گردد.

پس از اطمینان از ایجاد جریان برق در محیط خاک، با دو الکتروود آغاز آزمایش می‌گردد. باید توجه داشت برای انجام هر آزمایش جدید ابتدا خاک درون مخزن خالی و پس از پر نمودن مخزن و اشباع کامل خاک و قرار دهی الکتروودها بصورت قائم در داخل خاک آزمایش تکرار می‌شود.

#### ۵- معرفی آزمایش‌ها

بطور کلی دو دسته آزمایش شامل حالت‌های اشباع و نیمه‌اشباع انجام یافت (که درصد رطوبت آن از طریق نمونه برداری و آزمایش حدود اتبرگ اندازه‌گیری می‌گردد). این آزمایش‌ها نیز در دو حالت استقرار الکتروودها در خاک به طور مستقیم (الکتروود کاملاً در درون خاک قرار می‌گرفت) و استقرار الکتروودها به طور غیرمستقیم (الکتروود در درون لوله پلیکای مشبک در خاک) انجام گردید. ضمناً آزمایش‌های در استقرار مستقیم در دو محیط آب و خاک و همچنین محیط آب، خاک و اسید صورت گرفت. این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

برای افزایش اسید چند روش وجود دارد که در ادامه به دو روش که در این تحقیق استفاده شده است، اشاره می‌شود. در صورتی که خاک مرطوب باشد، اسید به صورت شبکه منظم در اعماق مناسب خاک تزریق می‌شود و سپس با ریختن آب بر روی خاک، اجازه داده می‌شود تا خاک اشباع شود. در روش دیگر، اسید به آب اضافه شده سپس این ترکیب بر روی خاک ریخته شده و اجازه داده می‌شود تا در خاک نفوذ کرده و آن را اشباع کند. در این روش‌ها احتمال توزیع اسید به صورت یکنواخت بسیار زیاد خواهد بود.

#### جدول ۱: آزمایش‌های انجام شده در تحقیق

Table 1. the experiments of the research

نوع آزمایش	استقرار الکتروودها	محیط آزمایش	شماره
آزمایش‌های اشباع	استقرار غیرمستقیم	خاک و آب	۱
	استقرار مستقیم	خاک و آب	۲
	استقرار غیرمستقیم	خاک و آب و اسید	۳
آزمایش‌های نیمه اشباع	استقرار غیرمستقیم	خاک و آب	۴
	استقرار مستقیم	خاک و آب	۵
	استقرار مستقیم	خاک و آب و اسید	۶

هر یک از موارد ۱ تا ۶ با ولتاژهای ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت مورد آزمایش قرار گرفته است. در آزمایش‌های اولیه استقرار غیرمستقیم که در آن الکتروودها در داخل لوله پلیکا قرار گرفته انجام یافت و سپس در مراحل بعد الکتروودها در داخل خاک به صورت مستقیم قرار داده شده است، هدف از این آزمایش بررسی تاثیر روش الکتروکنیتیک بر زهکشی خاک طبیعی و اندازه‌گیری نشست خاک می‌باشد.

همچنین آزمایش‌های در محیط آب و خاک و اسید برای بررسی تاثیر اسید بر سرعت زهکشی در روش الکتروکنیتیک انجام یافت. ضمناً یادآور می‌شویم در آزمایش‌هایی که در کارهای تحقیقاتی در زمینه الکتروکنیتیک انجام شده است، از محیط‌های اسیدی و قلیائی استفاده شده است. نتایج نشان داده است که محیط اسیدی باعث انحلال بیشتر عناصر شده و باعث جابجائی ذرات بیشتری در خاک نسبت به محیط قلیایی می‌شود. لذا در محیط اسیدی مهاجرت عناصر و حرکت دانه‌های آب، املاح، ذرات و ریزدانه‌ها در درون درشت‌دانه با توجه به مقدار جریان و ولتاژ مناسب بسیار سریع‌تر انجام می‌گردد. اسید مورد استفاده در این تحقیق، اسید سولفوریک با وزن مولکولی ۹۸ gr/mol و دانسیته ۱/۲۸ gr/cm<sup>3</sup> بوده و نقطه ذوب و جوش آن به ترتیب برابر با ۱۰ و ۳۳۷ درجه سانتیگراد می‌باشد.

در این تحقیق، لایه خاک کاملاً افقی بوده و مدت زمان آنالیزها در هر مرحله حداقل ۲۴ ساعت و حداکثر یک هفته بود. به منظور مقایسه دقیق نتایج، برای حالت‌های زهکشی طبیعی و الکتروولیت، آزمایش‌ها در شرایط کاملاً یکسان انجام شد.

#### ۶- تحلیل و بررسی آزمایشات

قبل از شروع عملیات آزمایش، نتایج زهکشی خاک در حالت طبیعی و به صورت ثقلی در مدت زمان ۲۴ ساعت برابر با صفر و در مدت زمان ۷۲ ساعت حدود ۰/۵ لیتر آب اندازه‌گیری گردید. سپس با شروع آزمایش نتایج مربوط به مقدار آب زهکشی شده در روش الکتروکنیتیک برای آزمایش‌های ۱ تا ۳ در جدول ۲ گزارش گردید که نمودار مربوط به آن در شکل ۵ ارائه شده است.

#### جدول ۲: نتایج آزمایش الکتروکنیتیک برای آزمایش‌های ۱ تا ۳

Table 2. the results for experiment no. 1-3

ولتاژ (V)	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳
۴	۰	۰/۵۲	۱/۵۳
۶	۰	۰/۶	۱/۹
۸	۰	۰/۶۵	۲/۰۵
۱۰	۰	۰/۷۵	۲/۳
۱۵	۰	۰/۸۵	۲/۶۵
۲۰	۰/۱	۰/۹	۳
۳۰	۰/۲	۱/۱	۳/۴۵
۴۰	۰/۵	۱/۴۹	۴

مقایسه نمودار آزمایش‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ مقدار آب زهکشی شده در این دو آزمایش بصورت همگرا به هم نزدیک می‌شوند که نشان می‌دهد در ولتاژهای بالا لوله پلیکا تاثیری بر مقدار آب زهکشی شده ندارد.

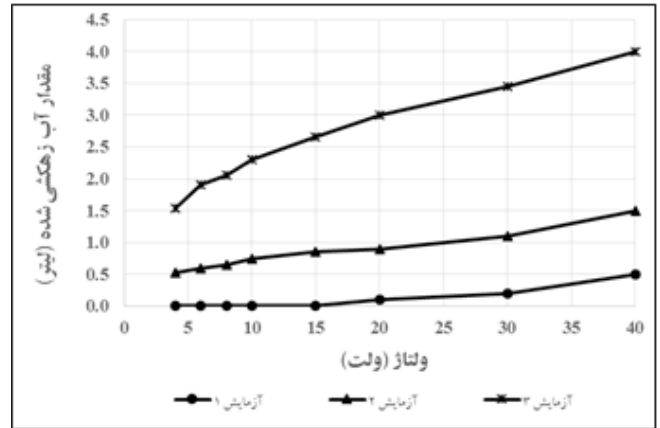
در سری آزمایش‌های سوم، که اسید نیز افزوده شده است در اثر اعمال ولتاژ ۴۷ میزان آب زهکشی شده  $1/53$  لیتر و در ولتاژ ۴۰۷ مقدار آب زهکشی شده برابر با ۴ لیتر می‌باشد که باعث نشست حدود ۱۵cm خاک در مخزن شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که وجود اسید، افزایش مقدار آب زهکشی شده و افزایش نشست خاک را به دنبال دارد. با توجه به شکل ۶ هر اندازه مقدار ولتاژ زیاد شود، نمودار مربوط به آزمایش‌های ۲ (الکتروستاتیک با خاک اشباع ارتباط دارد) و ۳ (الکتروستاتیک با خاک اشباع اسیددار ارتباط دارد) نسبت به هم واگراتر می‌شوند.

نتایج آزمایش‌ها برای خاک‌های نیمه اشباع (آزمایش‌های ۴ تا ۶) نشان می‌دهد که روش الکتروکنیتیک تاثیر چندانی بر روی زهکشی آب در خاک ندارد و مقدار آب زهکشی شده تقریباً صفر می‌باشد. ضمناً شایان ذکر است که در هر مرحله جدیدی از آزمایش‌ها می‌بایست نمونه آزمایشگاهی جدیدی ساخته شده و عملیات بارگذاری تا زمانی که زهکشی در خاک به صفر برسد ادامه یابد. انجام آزمایش جدید و تغییر ولتاژ در بعضی از آزمایش‌ها تا هفت روز به طول می‌کشید.

## ۷- نتیجه‌گیری

افزایش سرعت زهکشی و حرکت سریع ذرات آب در درون خاک‌های ریزدانه و سرعت نشست تحکیمی به روش الکتروکنیتیک به عنوان یکی از بهترین روش‌های زهکشی با توجه به هم‌خوانی با روابط ریاضی و نتایج آزمایشگاهی در این مقاله تایید می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد بهترین حالت آزمایشگاهی قرارگیری الکترودها به صورت مستقیم در درون خاک بوده که در این حالت زهکشی خاک در ولتاژ ۴۰۷ حدوداً ۳ برابر زهکشی خاک در ولتاژ ۴۷ می‌باشد. در این حالت با توجه به ارتباط مستقیم بین خاک و الکترودها و اشباع بودن خاک، تقریباً تمامی جریان اعمال شده به الکترودها، در داخل خاک نیز برقرار می‌گردد و افت ولتاژ در داخل خاک اشباع وجود نخواهد داشت. در حالی که خاک به همراه آب و جریان الکتریکی با ولتاژ ۴۰۷ برقرار باشد پس از گذشت ۲۴ ساعت مقدار آب زهکشی شده برابر با  $1/49$  لیتر می‌باشد. در صورتی که همین آزمایش همراه با اضافه نمودن اسید در ولتاژ ۴۷،  $1/53$  لیتر آب زهکشی می‌شود. لذا در آزمایشگاه در صورتی که از اسید استفاده شود مقدار ولتاژ مورد نیاز تا ۱۰ برابر کاهش می‌یابد. ضمناً با توجه به مقادیر نشست در آزمایش‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت مقدار نشست تحکیمی خاک‌های رسی با اعمال روش الکتروکنیتیک بسیار سریع و افزایشنده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که میزان زهکشی بستگی به نوع خاک،



شکل ۵: نمودار تغییرات ولتاژ در برابر مقدار آب زهکشی

Fig. 5. diagram of voltage variation vs drained water

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که در آزمایش ۱ تا ولتاژ ۱۵۷ مقدار آب زهکشی شده برابر با صفر می‌باشد. با افزایش ولتاژ به ۲۰۷، حجم آب زهکشی شده برابر  $0/1$  لیتر و در ولتاژ ۴۰۷ به  $0/5$  لیتر افزایش می‌یابد. علت اصلی زهکشی پائین، افت ولتاژ به دلیل وجود لوله پلیکا و عدم تماس مستقیم الکترودها با خاک است.

در آزمایش ۲ با توجه به این که الکترودها مستقیماً در درون خاک قرار دارند در پایان آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که سرعت زهکشی در ولتاژ ۴۷ برابر با  $0/52$  لیتر و در ولتاژ ۴۰۷ مقدار آب زهکشی شده  $1/49$  لیتر می‌باشد. ضمناً خاک درون مخزن حدود ۱۰ cm در طول مخزن نشست داشته است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶: نشست خاک در اثر زهکشی در آزمایش ۲ و ولتاژ ۴۰۷

Fig. 6. Soil settlement because of drainage in the experiment no. 2 and voltage of 40 v

- [8] S.W. Morefield, M.K. McInerney, V.F. Hock, O.S. Marshall Jr, P.G. Malone, C.A. Weiss Jr, J. Sanchez, O.E.V.M. CORPS, Rapid Soil Stabilization and Strengthening Using Electrokinetic Techniques, World Scientific, 2004.
- [9] M. Makarchian, s. Fardhajian, Application of the Electro-Osmosis method for increasing the bearing capacity and reducing the negative skin friction on piles, Road Journal, 69: (2011) 263-271.
- [10] M.R. Doosti, N. Mansouri, A.H. Hassani, M. A., Zn Removal of Chemical Sludge using Electrokinetic, Environmental Science and Technology Journal, 12(4) (2009) 636-427.
- [11] V.C. george, W. WALTER, F.K. LEONID, A. SIMON, Electrobioremediation of soils contaminated with hydrocarbons and metals: progress report, Energy sources, 19(2) (1997) 129-146.
- [12] N. Utchimuthu, K. Saravanakumar, D. Joshuamarnath, Removal or reducing heavy metal (lead) from soil by electrokinetic process, Engineering Research and Applications (IJERA), 2(3) (2012) 2367-2373.
- [13] L. Rutigliano, D. Fino, G. Saracco, V. Specchia, P. Spinelli, Electrokinetic remediation of soils contaminated with heavy metals, Journal of Applied Electrochemistry, 38(7) (2008) 1035-1041.
- [14] C. Jones, J. Lamont-Black, S. Glendinning, D. Bergado, T. Eng, A. Fourie, Recent research and applications in the use of electro-kinetic geosynthetics', in: Proceedings of 4th Euro-Geo Conference, Edinburgh, Scotland, Paper, 2008.
- [15] K.R. Reddy, M. Donahue, R.E. Saichek, R. Sasaoka, Preliminary assessment of electrokinetic remediation of soil and sludge contaminated with mixed waste, Journal of the Air & Waste Management Association, 49(7) (1999) 823-830.
- [16] R.C. Sims, Soil remediation techniques at uncontrolled hazardous waste sites, Journal of the Air & Waste Management Association, 40(5) (1990) 704-732.
- [17] U. EPA, Revised guidance document for the remediation of contaminated soils, S Environmental Protection Agency Annual Review, 1998.

میزان رطوبت و میزان افزایش اسید، فاصله الکترودها و میزان ولتاژ اعمال شده دارد. و از آنجائی که مقدار نشست تحکیمی خاک‌های رسی با اعمال روش الکتروکنیتیک زیاد است بنابراین برای سازه‌هایی که بر روی خاک‌های ریزدانه اجرا شده‌اند استفاده از این روش توصیه نمی‌شود. با توجه به اینکه در این تحقیق، ابعاد فنی روش الکتروکنیتیک بررسی و کارائی آن تایید شده است، پیشنهاد می‌شود هزینه اجرای این روش با توجه به نتایج تحقیق حاضر برآورد شده و با روش‌های دیگر از جنبه اقتصادی مقایسه شود.

## مراجع

- [1] N. Mosavat, E. Oh, G. Chai, A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils, International Journal of GEOMATE, 2(2) (2012) 266-272.
- [2] R.C. Pugh, The application of electrokinetic geosynthetic materials to uses in the construction industry, (2002).
- [3] S. Glendinning, C. Jones, R. Pugh, Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics, International Journal of Geomechanics, 5(2) (2005) 138-146.
- [4] S. Chew, G. Karunaratne, V. Kuma, L. Lim, M. Toh, A. Hee, A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains, Geotextiles and Geomembranes, 22(1) (2004) 17-35.
- [5] J. Lamont-Black, C. Jones, S. Glendinning, D. Huntley, A. Fourie, Laboratory evaluation of the potential for Electrokinetic belt filter press dewatering of Kimberlite Slimes, in: Paste, 2007, pp. 147-152.
- [6] A. Fourie, D. Johns, C.F. Jones, Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics, Canadian geotechnical journal, 44(2) (2007) 160-172.
- [7] J. Lamont-Black, S. Glendinning, C. Jones, D. Huntley, R. Smith, The development of in-situ dewatering of lagooned sewage sludge using electrokinetic geosynthetics (EKG), in: Proceedings of Tenth European Bio-solids and Bio-wastes Conference, 2005.

Please cite this article using:

K. Shahverdi, F. Khosravi, "Increasing of Fine-Grained Soils Drainage using Electrokinetic Method in Laboratory Scale", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 487-492.

DOI: 10.22060/ceej.2016.706

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

