# اثر تغییرات pH سیال ورودی در اصلاح خاکهای واگرا به روش الکترواسمزی

جمشید صدرکریمي دانشیار گروه خاك و پي، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
آرش شادمند کارشناس ارشد خاک وپي، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

**چکیده**

خاكهاي رسي واگرا خاكهايي هستند كه با قرار گرفتن در معرض آب به صورت كلوئيدي در آمده و شسته ميشوند. مهمترين مشخصه اين خاكها وجود مقدار نسبتاً زياد يون سديم در آب منفذي آنها است. يكي از اصول الكتروسينتيك، الكترواسمزي ميباشد كه در آن سيال منفذي به واسطه وارد شدن يك جريان كم D.C توسط دو الكترود كه در خاك قرار داده ميشود، به حركت در ميآيد. در اين تحقيق به وسيله الكترواسمزي يون سديم به همراه آب منفذي از سمت قطب آند (مثبت) حركت داده شده و به سمت قطب كاتد (منفي) رانده می‌شود. به واسطه اين عمل خاك در سمت آند غير واگرا شده و از رطوبت آن كاسته ميشود و TDS در اين ناحيه كاهش مييابد. ولي در خاك سمت كاتد نه تنها اصلاحي رخ نميدهد بلكه واگرايي شديدتر ميشود. به واسطه اين اصلاح در خاك تغييرات فيزيكي و شيميايي زيادي رخ ميدهد كه در اين تحقيق به بررسي آنها پرداخته شده است. ولتاژ بكار گرفته شده در تمام آزمايشات ثابت بوده و برابر۶ ولت گرفته شده است. در اين تحقيق pH محلولهاي مجاور آند و كاتد تغيير داده شده است تا بدين نحوه اثر آن بر اصلاح خاك سمت آند بررسي شده و بهينهترين حالت pH در محلولها مشخص شود. اين تحقيق نشان داد در حالتيكه سيال سمت آند اسيدي و سيال مجاور كاتد بازي باشد بهترين نتايج اصلاح الكترواسمزي برقرار ميشود. با پيشرفت زمان اصلاح، دانسيته جريان كاهش مييابد و اين امر نشان ميدهد كه بر مقاومت الكتريكي خاك افزوده می‌شود. پس از اصلاح كامل الكترواسمزی از pH خاك در سمت آند كاسته ميشود و همچنين بر pH خاك در سمت كاتد افزوده ميگردد. پس از اصلاح كامل الكترواسمزی حد خميری و حد روانی هم در آند و هم در كاتد افزوده ميشود ولي افزايش اين دو در آند بيشتر از كاتد ميباشد.

**كلمات كليدی: خاكهاي واگرا، الكتروسينتيك، الكترواسمزي، جريان DC ،PS, SAR, TDS.**

# Effects of pH Value of Inflow Fluid on The Elector-Osmotic Treatment of Dispersive Soils

J. Sadrekarimi and A. Shadmand
Geotechnical Eng. Department, Civil Eng. Faculty, University of Tabriz, Tabriz

**Abstract**

Dispersive soils dilute as colloids when they are exposed to water. The most important characteristic of these soils is presence of a large amount of Na ion in their pore water. Electro-osmosis is one on of the electro-kinetic phenomena in which the liquid moves relative to the solid phase under the influence of an externally applied electrical potential. This causes the positive ions move from anode towards cathode; following which the moisture content and TDS value of the soil near by the anode are decreased and it is highly treated to become non-dispersive. At cathode, however, the dispersivity become even worse. These phenomena initiates several physical and chemical changes in soil which are appreciated in the current paper. This paper presents results of a laboratory research program in which the pH value of the inflow fluid, and in some cases also outflow fluid, at anode and cathode, are changed and their effects on the efficiency of the electro-osmotic treatment of test specimens are evaluated. It was observed that the soil is best treated when the inflow and outflow fluids are acidic and base respectively. As the treatment proceeds the current density decreases due to the increase of soil electrical resistance When the ultimate treatment has been achieved the pH value of the soil at anode and at cathode decreases and increases, respectively. In the same time the plastic and liquid limits increase both at anode and at cathode. However, this effect is more eminent at anode.

**Key words: Dispersive Soil, Electro-osmosis, Electro-kinetics, DC current, TDS, SAR, PS.**

## ۱- مقدمه

الکترواسمزي يکي از اصول الکتروسينتيك ميباشد کـه سـيال منفذي از طريق بکارگيري جريان DC پـائين و ثابـت بـه وسـيله وارد کردن الکترودهايي در توده خاك خارج مـيشود [۱]. پديـده الکترواسمزي اولين بار در سـال ۱۸۰۷ توسـط رئـوس شناختـه شـده و اولـين کاربرد عملي ايـن پديـده در سـال ۱۹۴۷ توسـط کاساگرانده در جهت بهبود خواص مکانيکي خاك به کـار گرفتـه شد [۲]. از زمانيکه کاساگرانده الکترواسمزي را در بهبود مقاومـت و بهبود ويژگيهاي تغيير شکل خاکهاي ريزدانه بکار برد تا به حال تعداد زيادي کاربردهاي موفقيتآميز الکترواسمزي به ثبت رسـيده اسـت [۱] و در ايـن رابطـه تـأثير الکترواسـمزي بـر روي مقـدار کاتيونهاي خاك و امکان اصـلاح خـاك رس واگـرا بـا اسـتفاده از تأثير الکترواسمزي از سال ۱۹۹۸ به بعد به طور مـستدل بررسـي شـده و تحقيقاتی در اين مورد انجام پذيرفته است [۳]. بـا توجـه بـه ادبيات فنی در دسترس شايد تحقيقات مذکور اولين مطالعات آزمايـشگاهی چگـونگی اصـلاح خـاك واگـرا توسـط جريـان الکترواسمزی بوده است. همچنين تحکيم الکترواسمزي به عنوان تکنيك بهبود خـاك در پـروژههـايي نظيـر تثبيـت سـد خـاکي، خاکريز راه آهن و شيبها و مقـاومسازي شـمعها بکـار بـرده شـده است و نتايج حاصل توسـط سـودرمن و مـیليقـان [۴]، جـرام و همکـاران، ۱۹۶۷[۵] و همچنـين اقـستاد و فـوين ۱۹۸۳ [۶] و تـعدادی محـققان ديـگر مورد بـررسـي واقـع شـده اسـت. بـه علت تـوانـايي و بـازده زيـاد الکتـرواسـمزي در اصـلاح خاکهـاي ريزدانه با نفوذپـذيري کـم، امـروزه مهندسـان ژئوتکنيـك توجـه بيشتري به آن ميکنند [۷]. در هر حال در کليه کاربردهای الکترو اسمز پس از برقـراری جريـان الکترواسـمزی مقاومـت الکتريکـي نمونه خاک در اثر کاهش آب منفذی آن افزايش پيدا مـيکنـد و در واقع بر مقاومت مکانيکي خاک نيز افزوده ميشـود [۸و۹].

خاکهاي واگرا خاکهاي ريزدانهاي هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض جريان آب، به سهولت شسته ميشوند و فرسايش مييابند. بالا بودن درصد يون سديم در آب منفذي از خصوصيات عمده اين خاکها به شمار ميآيد. نخستين بار در سال ۱۹۳۰ ميدلتون پديده واگرايي را يکي از عوامل مؤثر در فرسايش خاکهاي ريزدانه معرفي کرد [۱۰]. در خلال سالهاي ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰، تحقيقاتي که اغلب در استراليا بر روي علل تخريب سدهاي خاکي کوتاه انجام گرفت به شناخت بهتر رسهايي که به سهولت شسته ميشدند منجر گرديد [۱۱].

متداولترين آزمايشهاي شناسايي خاکهاي واگرا عبارتند از :

۱- آزمايش پين هول

۲- آزمايش تعيين درصد املاح محلول در آب منفذي (آزمايشهاي شيميايي)

۳- آزمايش هيدرومتري دوگانه

در اين تحقيق از دو آزمايش شيميايي و هيدرومتري دوگانه براي تعيين واگرايي استفاده شده است. دو معيار مهم واگرايي که از آزمايش شيميايي حاصل ميشوند عبارتند از SAR , PS.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

$$PS = Na / TDS \quad , \quad TDS = Na + K + Mg + Ca$$

که در آن منظور از K , Na , Mg , Ca غلظت نمکهاي آنها در عصاره اشباع برحسب ميلي اکي والان در ليتر است [۱۲].

معمولاً در خاکهاي واگرا SAR > 2 ميباشد [۱۳]. شرارد و همـکارانـش در سـال ۱۹۷۶ نـموداري به منظور ارزيابي واگرايـي بـا استـفاده از نتـايج آزمايشـهاي شيميايي ابداع کردند که طبق آن به طور خلاصه خاکهاي دارای TDS > 1 و با PS < 40 , 40 < PS < 60 , PS > 60 به ترتيب خاك واگرا ، مشکوك به واگرائی و غير واگرا شناخته ميشوند [۱۴].

در آزمايش هيدرومتري دو گانه نيز معيار واگرايي به اين صورت به دست ميآيد که ابتدا دانهبندي خاك به روش استاندارد هيدرومتري صورت ميگيـرد و سپس روي نمونه ديگري از همان خاك آزمايش هيدرومتـري بـدون استفاده از ماده شيميايـي و همزن انجام ميشود. درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ ميليمتر در هر دو آزمايش تعيين ميشود و پس از تقسيم درصد حاصل از آزمايش دوم (A) به درصد حاصل از آزمايش اول (B) پتانسيل واگرايي محاسبه ميشود [۱۲].

در اين تحقيق خاکهاي واگرا به روش الکترواسمزي اصلاح شده و pH محلولهاي مجاور قطب آند و کاتد تغيير داده شدهاند و بدين ترتيب مناسبترين pH براي حالتي که الکترواسمزي بيشترين راندمان را داشته باشد تعيين گرديده است و نتايج مورد بحث و بررسی واقع شده است.

## ۲- خصوصيات خاك مورد آزمايش

محل قرضه خاك مورد آزمايش در نزديكي روستاي خواجه در ۲۰ كيلومتري شمال شرقي تبريز ميباشد. مشخصات خاك طبيعي در جداول (۱ و ۲) آمده است. نتايج آزمايش خاك طبيعي بيانگر واگرا بودن آن است.

**جدول ۱- نتايج آزمايشات كوتاه مدت (۴ روزه)**

| Test No | Current mA/cm$^2$ | | P | Fluid pH | | pH | Ion content, meq/lit. | | | | TDS meq/lit. | PS% | SAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Initial | Final | | Init. | Fin. | | Ca | Mg | Na | K | | | |
| Initial Soil | - | - | - | - | - | 7.0 | 0.9 | 1.9 | 50.8 | 0.5 | 54.1 | 93.9 | 36.3 |
| 1 | 0.7 | 0.4 | + | 7.0 | 3.7 | 7.2 | 1.9 | 3.4 | 30.4 | 0.6 | 36.3 | 83.8 | 18.8 |
| | | | - | 7.0 | 12.5 | 8.1 | 0.6 | 0.5 | 45.2 | 0.3 | 46.6 | 97 | 61.0 |
| 2 | 0.7 | 0.3 | + | 2.9 | 3.6 | 7.3 | 2.5 | 6.1 | 19.1 | 0.6 | 28.4 | 67.3 | 9.2 |
| | | | - | 7.0 | 12.4 | 8.2 | 0.8 | 0.8 | 29.1 | 0.3 | 31.1 | 93.9 | 32.5 |
| 3 | 0.8 | 0.4 | + | 11.3 | 4.4 | 7.3 | 2.5 | 6.1 | 28.5 | 0.9 | 38.3 | 74.5 | 13.5 |
| | | | - | 7.0 | 12.5 | 8.3 | 0.3 | 0.5 | 34.8 | 0.3 | 35.9 | 96.9 | 55.0 |

**جدول ۲- نتايج آزمايشات دراز مدت (پس از تثبيت دانسيته جريان)**

| Test No | Current mA/cm$^2$ | | P | Fluid pH | | pH | Ion content, meq/lit. | | | | TDS meq/lit. | PS % | SAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Init. | Fin. | | Init. | Fin. | | Ca | Mg | Na | K | | | |
| Init. Soil | - | - | - | - | - | 7.0 | 0.9 | 1.9 | 50.8 | 0.5 | 54.1 | 93.9 | 36.3 |
| 4 | 0.7 | 0.1 | + | 7.0 | 4.0 | 6.2 | 6.8 | 10.8 | 1.2 | 1.0 | 19.8 | 6.1 | 0.41 |
| | | | _ | 7.0 | 12.9 | 9.4 | 0.2 | 0.2 | 38.5 | 0.7 | 39.5 | 97.4 | 99.4 |
| 5 | 0.8 | 0.1 | + | 2.9 | 4.2 | 6.1 | 7.5 | 11.2 | 1.1 | 0.8 | 20.5 | 5.5 | 0.37 |
| | | | _ | 7.0 | 12.9 | 9.2 | 0.1 | 0.1 | 52.5 | 0.9 | 53.6 | 98.0 | 166.1 |
| 6 | 0.8 | 0.2 | + | 11.3 | 4.0 | 6.0 | 9.7 | 5.6 | 1.2 | 0.8 | 17.3 | 7.0 | 0.44 |
| | | | _ | 7.0 | 13.0 | 7.5 | 0.3 | 1.0 | 16.3 | 0.5 | 18.1 | 90.0 | 20.2 |
| 7 | 0.8 | 0.1 | + | 2.9 | 4.5 | 6.5 | 6.7 | 8.3 | 0.7 | 0.8 | 16.5 | 4.2 | 0.26 |
| | | | _ | 11.3 | 12.8 | 8.8 | Nill | 1.0 | 25.0 | 0.7 | 26.7 | 93.8 | 32.4 |
| 8 | 0.9 | 0.1 | + | 2.9 | 4.5 | 6.6 | 4.1 | 3.9 | 15.2 | 0.8 | 24.0 | 63.2 | 7.58 |
| | | | _ | 2.9 | 12.6 | 8.1 | 0.1 | 0.5 | 51.8 | 0.3 | 52.7 | 98.2 | 94.6 |
| 9 | 0.8 | 0.2 | + | 10.0 | 4.2 | 6.7 | 6.3 | 10.4 | 6.3 | 0.9 | 23.7 | 26.4 | 2.2 |
| | | | _ | 7.0 | 12.8 | 9.4 | 0.1 | 0.1 | 30.7 | 0.9 | 31.7 | 96.8 | 108.4 |

**جدول ۳-تاثير اصلاح الكترو اسمزي روي حدود اتربرگ و هيدرومتري خاك**

| Test No. | Current mA/cm$^2$ | | P | Atterberg Limits % | | | A/B | Test No. | Current mA/cm$^2$ | | P | Atterberg Limits % | | | A/B |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Init. | Fin. | | LL | PL | PI | | | Init. | Fin. | | LL | PL | PI | |
| Base soil | - | - | - | 33 | 14 | 19 | 21.8 | 5 | 0.8 | 0.1 | + | 38 | 16 | 22 | 1.52 |
| | | | | | | | | | | | _ | 34 | 15 | 19 | 94.9 |
| 1 | 0.7 | 0.4 | + | 36 | 22 | 14 | 11.2 | 6 | 0.8 | 0.2 | + | 38 | 18 | 20 | 2.2 |
| | | | - | 39 | 18 | 21 | 92.2 | | | | _ | 33 | 15 | 18 | 70.3 |
| 2 | 0.7 | 0.3 | + | 36 | 21 | 15 | 6.2 | 7 | 0.8 | 0.1 | + | 37 | 14 | 23 | 1.5 |
| | | | - | 37 | 19 | 18 | 91.2 | | | | _ | 34 | 15 | 19 | 98.8 |
| 3 | 0.8 | 0.4 | + | 36 | 18 | 18 | 7.03 | 8 | 0.9 | 0.1 | + | 39 | 18 | 21 | 5.9 |
| | | | - | 37 | 16 | 21 | 93.9 | | | | _ | 37 | 16 | 21 | 93.7 |
| 4 | 0.7 | 0.1 | + | 37 | 18 | 19 | 1.55 | 9 | 0.8 | 0.2 | + | 41 | 15 | 26 | 3.5 |
| | | | - | 34 | 16 | 18 | 90.4 | | | | _ | 37 | 18 | 19 | 95.1 |

## ۳- روش آزمایش

جریان موردنیاز براي اصلاح الکترواسمزي يك منبع تغذیه میباشد که اختلاف پتانسیلهاي تا ۳۰ ولت را تأمین میکند. ضمناً شدت جریان با دقت ۰/۱ میلي آمپر در طول زمان اصلاح قرائت میشد. خاك مورد آزمایش با رطوبت ۲۵ % آماده و در داخل لوله PVC با دانسیته مرطوب ۱/۷۶ $gr/cm^3$ متراکم شد. این رطوبت و دانسیته در واقع همان مقادیری بودند که خاک مورد آزمایش در طبیعت داشته است. طول لوله PVC، ۵۰۰ mm و قطر آن ۶۳ mm بـود که بـه منظور قرارگیـري بهتر الکترودها به اندازه ۲۵mm از خاك در انتهاي لوله را برداشته و بعد الکترودها نصب شد. الکترودها از جنس آلومینیوم بوده و به منظور انتقال آب مشبك ساخته شدند. بعد از اتصال سیمهاي جریان، زانوئیها را نصب کرده و محلولها در داخل زانوئیها ریخته شد. لوله PVC در این سري از آزمایشها به صورت کاملاً افقي قرار گرفت و جریان مستقیم برقرار گردید. ولتاژ بکار گرفته شده در تمام آزمایشها ۶ ولت بود. علت به کار بردن ولتاژ ۶ ولت بالا بودن راندمان الکترواسمزي در این ولتاژ بود که در آزمایشات قبـلي به اثبات رسیده بود [۹]. آزمایشات از لحاظ زمان اصلاح بـه دو گروه کوتاه مدت و طولاني مدت تقسیم شدند آزمایش کوتاه مدت، ۴ روز به طول میانجامید. سه آزمایش اول از این نوع بودند. هدف از انجام این سري از آزمایشها این بود که اثر تغییرات pH بر اصلاح الکترواسمزي در کوتاه مدت بررسي شود. در این سه آزمایش فقط pH محلول مجاور آند تغییر داده شد و کلیه پارامترهای دیگر ثابت ماند. در آزمایش اول pH محلولهاي مجاور آند و کاتد ۷/۰ بود. در آزمایش دوم، از سیال ورودی (مجاور آند) اسیدی با pH = 2.9 استفاده شد. در آزمایش سوم سیال مجاور آند بازي با pH = 11.27 انتخاب شد. در تمام آزمایشها به منظور اسیدي کردن محلولها از $CH_3COOH$ و به منظور بازي کردن محلولها از $Ba(OH)_2$ استفاده شد.

آزمایشهاي طولاني مدت آزمایشهایي بودند که تا تثبیت دانسیته جریان، عمل اصلاح الکترو اسمزی ادامه داده شد. این آزمایشها به این علت انجام گردید که در آزمایشهاي کوتاه مدت اصلاح کامل صورت نگرفت و زمان براي اصلاح کامل کافي نبود. آزمایشهاي چهارم تا نهم به این گروه مربوط میشوند. آزمایشهاي ۴ ، ۵ و ۶ به ترتیب همانند آزمایشهاي ۱ ،۲ و ۳ بوده و تنها تفاوت آنها در مدت زمان آزمایش میباشد. در آزمایشهاي ۷ و ۸، pH سیال مجاور آند مؤثـرتـرین pH در آزمـایشات قبل, یعنی pH = 2.9, انتخاب شد. معهذا در آزمایش هفتم pH محلول مجاور کاتد ۱۱/۲۷ و در آزمایش هشتم pH محلول مجاور کاتد نیز ۲/۹ انتخاب شد. هدف از انجام این دو آزمایش تعیین بهینه ترین و مؤثرترین حالت ممکن از pH سیالهاي مجاور آند و کاتد براي اصلاح الکترواسمزي بود.

در این آزمایشات علت اینکه از مقادیر pH نزدیك به ۷/۰ استفاده نشد این بود که براي تهیه این محلولها مقدار بسیار ناچیـزي از $CH_3COOH$ یا $Ba(OH)_2$ نیـاز میشد که بـا توجـه به دقت آزمایشها احتمال اینکه بتوان از نتایج استفاده نمود وجود نداشت. علت اینکه از مقادیر pH خیلي زیاد و یا خیلي کم هم استفاده نشد عبارتند از:

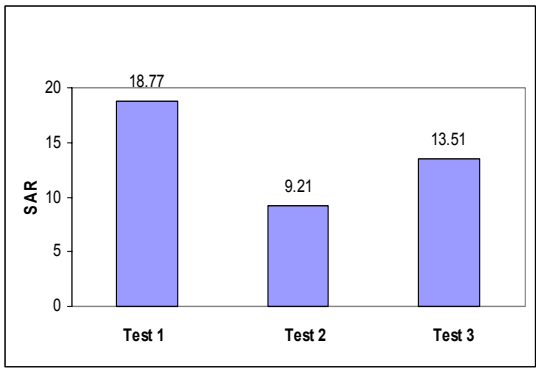
۱- نتیجه حاصل از این امر در عمل به کار نمیآمد چون آب با pH خیلي کم یا خیلي زیاد در طبیعت یافت نمیشود.

۲- امکان دارد این نوع محلولها بر بافت خاک و الکترودها اثر بگذارند.

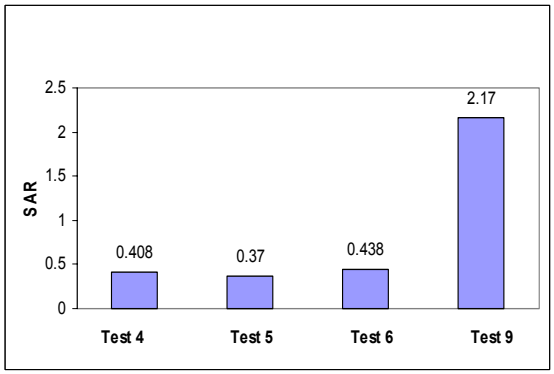
در نهایت پس از خاتمه زمان آزمایش نمونـه را از لولـه خـارج کرده و حدود ۱ cm از هر دو طرف نمونهها بـه دور انداختـه شـد سپس ۷/۵ cm از ابتدا و انتهاي نمونهها را برداشته و آزمایـشهاي حـدود اتربـرگ، درصـد رطوبـت، هیـدرومتري دوگانـه و آنـالیز شیمیایي بر روي آنها صورت گرفت.

نتایج حاصل از آزمایشها به طور خلاصـه در جـداول (۱-۳) و نیز در اشکال (۱-۵) ارائه شده اسـت. در ایـن جـداول منظـور از A/B درصـد واگرایـي بـه دسـت آمـده از آزمـایش هیـدرومتري مضاعف میباشد. همچنـین در تحقیقـات قبلـي [۳و ۹] ملاحظـه گردید که در درمان الکترو اسمزي خاك نتایج حاصل از آزمـایش پین هول و شیمیائي کاملاً بایکدیگر همسو میباشند و بنابراین در این مرحله از تحقیقات از انجام آزمایش پین هـول خـودداري بـه عمل آمد.

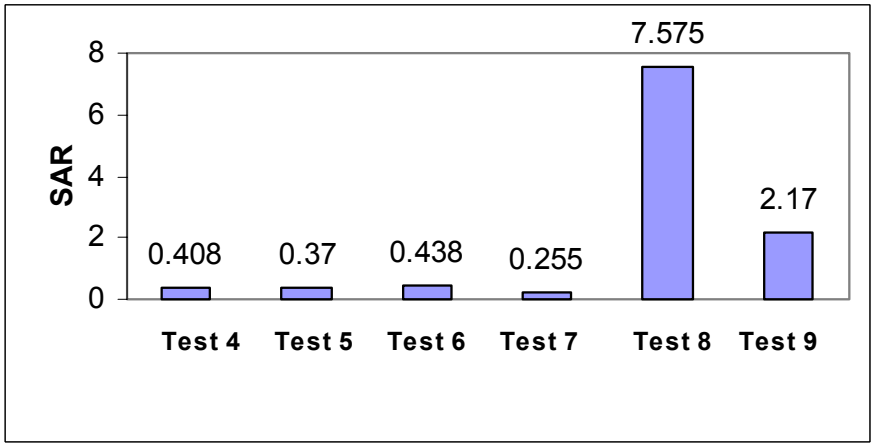
لازم به ذکـر اسـت بـرای حـصول دقـت بیـشتر هـر کـدام از آزمایشات دو بار انجام گردیده و نتایج متوسط گیری شده اسـت. با توجه به دقت بالاي ابزاز و وسائل اندازهگیري جریان الکتریکـي و سنجش کاتیونهاي خـاك نتـایج آزمایـشات بـار دوم و بـار اول انطباق خوبي با یکدیگر نشان دادند و بنابراین تکرار آزمایش براي دفعات بعد لزوم پیدا نکرد.



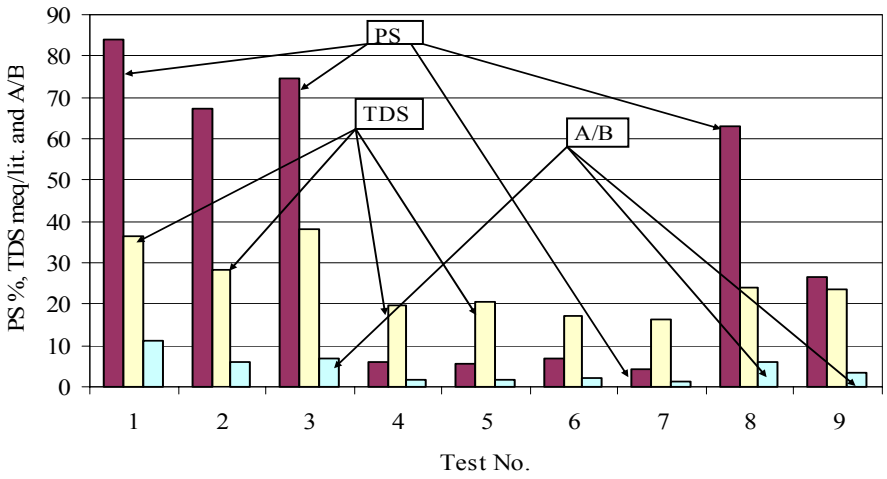

شکل ۱ - مقایسه SAR آزمایشهاي کوتاه مدت در قطب آند



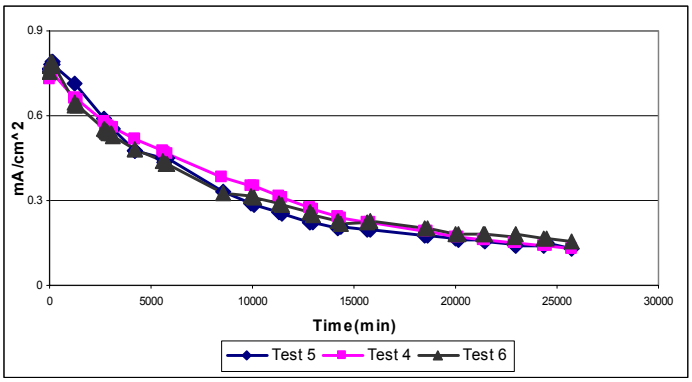

شکل ۲- مقایسه SAR آزمایشهاي بلند مدت در قطب آند




شکل ۳- مقایسه مقدار SAR در قطب آند پس از انجام آزمایشهاي طولاني مدت




شکل ۴- مقادیر نهائي PS، TDS و A/B در آند




**شكل ۵-تغييرات دانسيته جريان نسبت به زمان در سه آزمايش طولاني مدت**

## ۴- بحث وبررسي نتايج

### ۴-۱- تغييرات pH محلولهاي مجاور خاك

در حـالت كلـي به علت اكسيداسيون آب در قطب آند ($2H_2O - 2e \rightleftarrows 4H^+ + O_2$) انتظار ميرود كه pH محلول مجاور آند كاسته شود ولي زمانيكه pH محلول كمتر از 4 ميشود pH روند رو به كاهش خود را از دست ميدهد و با سرعت كمتري افزوده ميشود. علت اين امر را ميتوان در زدوده شدن اكسيد آلومينيم از روي الكترود آند در pHهاي پائين دانست. در اين حالت طبق واكنشهاي ($AL \rightleftarrows AL^{3+} + 3e$ , $2H^+ + 2e \rightleftarrows H_2$) بر مقدار pH محيط افزوده ميشود. يعني به علت دوباره اكسيد شدن آلومينيم pH به مقدار ناچيزي افزوده ميشود.

همچنين در حالت كلي به علت احياء آب در قطب كاتد($2H_2O + 2e^- \rightleftarrows 2OH^- + H_2$) انتظار ميرود كه pH محلول مجاور كاتد افزوده شود كه نتايج نيز مؤيد اين موضوع هستند. كه البته در لحظات شروع اصلاح، pH با سرعت زيادي افزوده ميشود كه با گذشت زمان آزمايش از سرعت افزايش pH كاسته ميشود كه علت آن را ميتوان در برگشتپذير بودن واكنش احياء دانست. يعني با افزوده شدن غلظت $OH^-$ طبق اصل لوشاتليه واكنش در جهت برگشت سرعت بيشتري ميگيرد و از سرعت واكنش احياء آب كاسته ميشود.

### ۴-۲- تغييرات pH خاك و مناسبترين pH محلول آند و كاتد در اصلاح الكترو اسمزي خاك

در رابطه با تغييرات pH خاك نيز در حالت كلي انتظار ميرود كه از pH خاك در قطب مثبت (آند) كاسته شود. البته دامنه تغييرات pH خاك نسبت به محلولها خيلي كمتر ميباشد و خاك در مقابل تغييرات pH از خود مقاومت نشان ميدهد. با بررسي نتايج آزمايشات كوتاه مدت مشاهده ميشود كه در ابتدا pH خاك در آند به مقدار ناچيزي افزوده ميشود و بعد به مرور زمان كاسته ميشود. علت افزايش اوليه pH را ميتوان در وجود يونهاي منفي كه ميل به از دست دادن الكترون دارند و مانند باز عمل ميكنند دانست. سپس با نفوذ $H^+$ از pH محيط كاسته ميشود. pH خاك در كاتد نيز همانطوركه انتظار ميرفت دائماً در حال افزوده شدن بوده است.

هدف از انجام اصلاح الكترواسمزي، اصلاح خاك در ناحيه آند مي باشد. بنابراين ميتوان گفت اصلاحي بيشترين بازده را دارا ميباشد كه كمترين SAR و PS را در ناحيه خاك آند ايجاد كرده باشد.

با مقايسه مقادير SAR در ناحيه آند در آزمايشهاي كوتاه مدت مشاهده ميشود كه آزمايش دوم كه مربوط به سيال ورودي اسيدي ميباشد بيشترين بازده را دارد، شكل (۱).

در آزمايشهاي بلنـد مـدت نيز آزمايـش پنـجم كـه مربـوط به سيال ورودي اسيدي ميباشد بيشترين بازده را دارد. بنابراين ميتوان نتيجه گرفت كه اگر سيال ورودي اسيدي باشد اصلاح بازده بيشتري خواهد داشت، شكل (۲).

به منظور تعيين بهينهترين شرايط pH محلولهاي مجاور آند و كاتد براي اصلاح الكترواسمزي آزمايش هفتم و هشتم انجام گرفت كه سيال مجاور آند اسيدي (pH = 2.9) بوده و فقط pH محلول مجاور كاتد تغيير داده شد ومشاهده گرديد كه بهينهترين شرايط در تمام حالات مربوط به آزمايش هفتم ميباشد كـه سيال مجاور آند اسيدي و سيال مجاور كاتد بازي بود، شكل (۳).

براي اينكه نتايج آزمايشات از شفافيت بيشتري برخوردار شود مقادير PS، TDS و A/B به طور يكجا در شكل (۴) ارائه شده است. اين شكل در واقع تأثير نسبي تغييرات pH سيال طرفين خاك را در نحوة اصلاح الكترو اسمزي آن نشان ميدهد. ملاحظه ميگردد كه در آزمايشات كوتاه مدت در آزمايش ۲ و در دراز مدت در آزمايش ۷ حداقل PS، TDS و نسبت A/B به دست آمده است. همچنين ملاحظه ميگردد كه در آزمايش ۷ نتايج به دست آمده حتي بهتر از آزمايش ۸، كه در آن سيال هر دو طرف نمونه اسيدي بوده است، ميباشد. بنابراين به نظر ميرسد كه بهترين نتايج موقعي به دست ميآيد كه سيال طرف آند حدالامكان اسيدي و سيال طرف كاتد حدالامكان بازي باشد.

### ۴-۳- بررسي كاتيونهاي دفع شده از آند به كاتد

در رابطه با دفع كاتيونها از آند به كاتد ظاهراً انتظار ميرود كه تمام كاتيونها از سمت آند به كاتد حركت كنند و از مقدار كاتيونها در آند كاسته شده و در كاتد افزوده شود. ولي با توجه به نتايج مشاهده ميشود كه چنين نيست. در آند بر مقدار كاتيونهاى $K^+$، $Mg^{2+}$ و $Ca^{2+}$ افزوده شده و با پيشرفت زمان آزمايش بر مقدارشان بيشتر افزوده ميشود و كاتيون $Na^+$ برخلاف ساير كاتيونها از مقدارش در آند كاسته شده و همچنين با پيشرفت زمان آزمايش مقدار بيشتري از آن كاسته ميشود. علت اين امر را ميتوان در سري ليوتروپي براي جذب سطحي دانست [۱۵].

$$Li = Na < K = NH4 < Mg < Ca < Ba < AL$$

بنابراين Na ضعيف‌ترين جذب سطحي را دارد و تا زمانيكه Na وجود دارد كاتيونهاي ديگر كمتر از رس جدا ميشوند. در نتيجه كاهش Na منطقي ميباشد و چون Na به مقدار زيادي از خاك آند جدا ميشود خاك از لحاظ الكترواستاتيكي حالت نامتعادل پيدا ميكند و براي برقراري تعادل، $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $K^+$ را كه جذب سطحي بيشترى نسبت به Na دارند جذب كرده و بر مقدار آنها در آند افزوده ميشود.

در كاتد (آزمايشهاي كوتاه مدت) از تمام كاتيونهاي $K^+$, $Na^+$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ كاسته ميشود ولي اين كاهش در حدي است كه از لحاظ الكترواستاتيكي خاك نامتعادل نميشود. ولي در طولاني مدت با افزايش pH خاك در كاتد قابليت حل شدن $Ca(OH)_2$و $Mg(OH)_2$ كم ميشود و در نتيجه $Ca^{2+}$ و $Mg^{2+}$ در محيط خيلي كمتر شده و بنابراين $K^+$ كه جذب سطحي بيشتري نسبت به $Na^+$ دارد جاي آنها را ميگيرد. لذا در طولاني مدت از مقدار $Ca^{2+}$، $Mg^{2+}$ و $Na^+$ در قطب كاتد كاسته ميشود و بر مقدار $K^+$ اندكى افزوده ميگردد.

### ۴-۴- بررسي تغييرات شدت جريان

با بررسي تغييرات شدت جريان در نمودار شكل (۵) ملاحظه ميشود كه دانسيته جريان با پيشرفت زمان اصلاح روند نزولي داشته است. با توجه به اينكه ولتاژ ثابت بوده بنابراين مقاومت الكتريكي نمونه خاك به مرور زمان افزايش يافته است كه علت آن كاهش آب منفذي است كه الكترونها از طريق آن در داخل نمونه پيش ميروند. با توجه به گراف شكل (۵) ميتوان مشاهده كرد كه روند نزولي نمودار با گذشت زمان كمتر مىشود و در نهايت تقريباً ثابت شده است. اين مطلب بيانگر اين است كه به مرور زمان از بازده و راندمان اصلاح الكترواسمزي كاسته ميشود. با توجه به دامنه تغييرات دانسيته جريان نيز ميتوان به راندمان اصلاح پي برد يعني آزمايشي كه دامنه تغييرات دانسيته جريان آن بيشتر است معمولاً راندمان بيشتري دارد. به طور مثال طبق جدول (۲)، آزمايش ۵ نسبت به آزمايشهاي ۴ و ۶ دامنه تغييرات دانسيته جريان بيشتري دارد و بنابراين راندمان آن نيز بيشتر است.

### ۴-۵- بررسي تغييرات حدود اتربرگ خاك

در رابطه با تغييرات حدود اتربرگ با اصلاح الكترواسمزي نميتوان يك عبارت كاملاً دقيق را بيان كرد. ولي با دقت نسبتاً خوبي ميتوان نتيجه گرفت كه در اصلاح الكترواسمزي كامل يعني تا زمانىكه دانسيته جريان به مقدار نسبتاً ثابتي ميل كند معمولاً در قطب آند حد رواني و حد خميري از خود افزايش نشان ميدهند و دامنه خميري (PI) نيز به اندازه ناچيزي افزوده ميشود. در قطب كاتد نيز مانند آند در حد رواني و حد خميري و دامنه خميري افزايش ديده ميشود ولي در مقايسه با آند ميزان افزايش هر سه مقدار كمتري است. در آزمايشهاي كوتاه مدت نتايج تا حدودي متفاوت است. به اين ترتيب كه حدرواني و حد خميري تقريباً چه در آند و چه در كاتد از خود افزايش نشان مي دهند ولي در مورد دامنه خميري (PI) هم افزايش و هم كاهش ديده شد.

مطلب قابل توجه ديگر اين است كه حد رواني و حد خميري برخلاف حالت طولاني مدت، در آند از كاتد كمتر بوده است.

در حالت كلي ميتوان گفت كه اصلاح الكترواسمزي در خاكها سبب افزايش حد رواني و حد خميري ميشود ولي دامنه خميري با توجه به زمان اصلاح و موقعيت نمونه افزايش يا كاهش مييابد ولي تغييرات آن زياد نميباشد. البته اثر اصلاح الكترواسمزي بر حدوداتربرگ نياز به تحقيقات گستردهتري هم در زمينه تجربي و هم زمينة تئوريك دارد.

## نتيجه گيري

۱- الكترواسمزي يك روش مناسب و با كارايي بالا براي اصلاح خاكهاي واگرا و همچنين مناسب براي كاهش پتانسيل واگرايي ميباشد. اين روش حتي در كوتاه مدت سبب كاهش پتانسيل واگرايي ميشود ولي براي رسيدن به اصلاح كامل لازم است كه تا ثابت شدن دانسيته جريان، اصلاح ادامه يابد.

۲- پس از برقراري جريان الكتريكي، دانسيته جريان شروع به كاهش تدريجی ميكند و پس از گذشت زمان، روند سير نزولي آن كمتر ميشود. علت كاهش دانسيته جريان افزايش مقاومت الكتريكي نمونه بر اثر خارج شدن آب از نمونه ميباشد. كاهش سير نزولي نشان ميدهد كه از راندمان الكترواسمزي با گذشت زمان كاسته ميشود.

۳- تقريباً در كل طول نمونه $TDS = Na + K + Mg + Ca$ كاسته ميشود. البته در آند اين كاهش بسيار محسوستر از كاتد ميباشد.

۴- هرچه pH سيال ورودي كمتر باشد، يعني هر چه اسيديتر باشد، بازده اصلاح الكترواسمزي بيشتر بوده و از پتانسيل واگرايي به مقدار بيشتري كاسته ميشود.

۵- بهينهترين شرايط براي اصلاح الكترواسمزي حالتي است كه سيال مجاور قطب آند اسيدي و سيال مجاور قطب كاتد بازي باشد.

۶- حد رواني و حد خميري بر اثر اصلاح الكترواسمزي در آند هم در آزمايشهاي كوتاه مدت و هم در آزمايشهاي طولاني مدت افزوده ميشوند ولي مقدار افزايش آنها در آند و كاتد، با توجه به زمان آزمايش، متفاوت است.

۷- در صورتيكه از فلزاتي كه زود اكسيده ميشوند مانند آلومينيوم به عنوان الكترود استفاده شود به منظور جلوگيري از كاهش راندمان اصلاح الكترواسمزي بيش از يك بار نبايد از يك الكترود استفاده نمود.

## سپاسگزاريها

اين مقاله بخشی از تحقيقاتی است كه در رابطه با امكان اصلاح خاكهای واگرا برای بهرهگيری در امور آب و سدسازی انجام میپذيرد و بدينوسيله از مساعدتهای سازمان آب منطقهای آذربايجانشرقی و اردبيل قدردانی می نمايد.

## مراجع

[1] Yaclin B. Acar, "Electrokinetic soil processing". Geotechnical special publication, No 30,ASCE, pp.1420-1432,1992.

[2] Lo K. Y and Ho K. S. "The effects of electro-osmotic field treatment on the soil properties of a soft sensitive clay", Canadian Geotechnical Journal, 28, 763-770, 1991.

[3] Sadrekarimi. J, "Lime and Distilled treatment of dispersive Soils by Electro – osmosis Effect", IE (I) Journal, 1998.

[4] Soderman, L.G. and Milligan, L. "capacity of friction piles in varved clay increased by electro-osmosis", Proc.5th ICSMFE. Dunod, Paris,2,pp.143-147,1961.

[5] Bjerumm, L., Moum, J. and eide, o., "Application of electro-osmosis on a foundation problem in Norwegian quick clay".Geotechnique,17(3),PP.214-235,1967.

[6] Eggestad, A. and Foyn, T., "Electro-osmotic improvement of a soft sensitive clay". In :Proc.8th ECSMFE,Helsinki.Balkema,Rotterdam.2,pp.597-603,1983.

[7] Albert T. Yeung, "Electro-Kinetic flow processes in porous media and their implications", Advances in porous media, vol 2, pp 309-395,1994.

[8] Julie Q. Shang, "Electrokinetic dewatering for clay slurries as engineered Soil Covers", Can. Geotech. J.34, pp. 78-86,1997.

[9] Sadrekarimi.J., Sadrekarimi, A. " Voltage and duration effects on electro-osmotic treatment of dispersive soils" , Proceedings of Int. Conf. on Problematic Soils, Nottingham Trent University, UK, Vol. 2, pp 453-457, 2003.

[10] Decker R.S. and Dunnigan L.P., "Development and use of the soil conservation service dispersion test", ASTM STP 623,pp.94-109,1977.

[11] Sherard. J.L., Ryker N.L. and Decker R.S., "Piping in earth dams of dispersive clay",

Proc. of Special Conf. on performance of earth and earth supported structures, ASCE, VOL.1, part 1, pp. 584-626,1972.

[12] Head, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing, ELE International Limited, Pentech Press, London, 1994.

[۱۳] فرجاله عسگري و علي فاخر، تورم و واگرايي خاكها از ديد مهندسي ژئوتكنيك - انتشارات جهاد دانشگاهي، چاپ اول، ۱۳۷۷.

[14] Sherard. J.L, Dunnigan L. P. and Decker R.S., "Identification and nature of dispersive soils", J.Geotech, Eng. Dive.,ASCE Vol. 102,No, GT4,pp.287-301,1976.

[۱۵] بوهن، مكنيل، اوكانر، شيمي خاك - ترجمه حسام مجللي – انتشارات مركز نشر دانشگاهي، تهران، چاپ دوم، ۱۳۷۳.