

## The Effect of Plotting on Leaching Uniformity of Soil Profile in Laboratory Model

REZA SAEIDI<sup>1\*</sup>, ABBAS SOTOODEHNIA<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(Received: Aug. 11, 2020- Revised: Sep. 19, 2020- Accepted: Sep. 21, 2020)

### ABSTRACT

In an experiment, the effect of soil surface plotting on leaching uniformity of soil profile was investigated. The experiment was performed in a physical model with dimensions (height×width×length) of 1×0.5×2 meters. The leaching of the soil profile was simulated in presence of subsurface drainage pipe. The plots were made by separating the soil surface into four equal parts (with dimensions of 0.5×0.5 m), in order to prevent water mixing on the soil surface. An equal water depth was applied for soil leaching, before and after soil surface plotting. After leaching, the E<sub>c</sub> of soil samples taken from different depths (20, 40 and 60 cm) and different distances from the drain pipe (25, 75, 125 and 175 cm) were measured. The amount of standard deviation of soil salinity data were 2(dS/m) and 0.63(dS/m) before and after soil surface plotting, respectively. The uniformity coefficient of salinity distribution in the soil profile before and after soil surface plotting was estimated to be 45% and 76%, respectively. The results showed that the presence of drain pipe was effective on infiltration rate at different parts of the soil surface. So that the infiltration rate was estimated to be 1.9, 1.7, 1.56 and 1.47 (mm/h) at 25, 75, 125 and 175 cm far from the drain pipe, respectively. Through soil plotting, the unbalanced water infiltration to the soil surface was prevented, in order to have a uniform soil washing at different places. The results showed that the soil leaching uniformity can be achieved by adopting a management strategy. Therefore, more drainage water production, depletion of soil nutrients and environmental pollution are prevented.

**Keywords:** Drainage, Leaching Curve, Soil Permeability, Soil Salinity.

## اثر کرت‌بندی بر یکنواختی آبخوبی نیمرخ خاک در مدل آزمایشگاهی

رضا سعیدی<sup>۱\*</sup> و عباس ستوده‌نیا<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۳۱)

### چکیده

در آزمایشی، تأثیر کرت‌بندی سطح خاک بر یکنواختی آبخوبی نمک‌ها از نیمرخ خاک بررسی شد. آزمایش در مدل فیزیکی با ابعاد (ارتفاع×عرض×طول)  $2 \times 0.5 \times 1$  متر انجام شد و عملیات آبخوبی در نیمرخ خاک با حضور لوله زهکش زیرزمینی شبیه‌سازی شد. کرت‌بندی شامل جداسازی سطح خاک در چهار قسمت مساوی (با ابعاد  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  متر)، برای جلوگیری از اختلاط آب در سطح خاک بود. در حالت‌های قبل و بعد از کرت‌بندی، یک عمق یکسان آب برای آبخوبی در نظر گرفته شد. پس از آبخوبی، هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک و فواصل ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از محل نصب زهکش اندازه‌گیری شد. مقدار انحراف معیار داده‌های شوری خاک در قبل و بعد از کرت‌بندی به ترتیب  $2 \left(\frac{ds}{m}\right)$  و  $0.63 \left(\frac{ds}{m}\right)$  بود. ضریب یکنواختی توزیع شوری در نیمرخ خاک، در شرایط قبل و بعد از کرت‌بندی به ترتیب ۴۵ و ۷۶ درصد بود. نتایج نشان داد وجود زهکش، بر تفاوت سرعت نفوذ آب در قسمت‌های مختلف سطح خاک مؤثر بود. به طوری که سرعت نفوذ آب به داخل خاک در فواصل ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از زهکش، به ترتیب برابر با  $1/9$ ،  $1/7$ ،  $1/56$  و  $1/47$  میلی‌متر بر ساعت برآورد شد. بنابراین از طریق کرت‌بندی، از نفوذ نامتوازن آب در سطح خاک جلوگیری شد تا نواحی مختلف نیمرخ خاک شستشوی یکنواختی داشته باشد. نتایج فوق نشان داد که به جای مصرف آب بیشتر، می‌توان با اتخاذ راه‌کار مدیریتی به یکنواختی آبخوبی خاک دست یافت. در این صورت از تولید زهاب بیشتر، تخلیه‌ی عناصر غذایی از خاک و آلودگی محیط زیست جلوگیری می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** زهکشی، شوری خاک، منحنی آبخوبی، نفوذپذیری خاک.

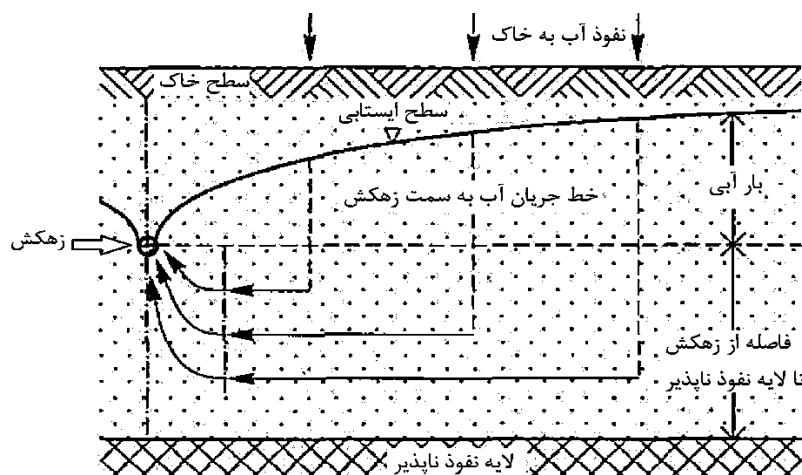
### مقدمه

ممکن سعی می‌شود غلظت نمک‌های موجود در خاک، در حد آستانه‌ی تحمل گیاه مورد کشت نگه داشته شود. شرایط آب و هوایی، شوری خاک و آب آبیاری، بافت خاک، پستی و بلندی (توپوگرافی) زمین، مقدار شوری آب زیرزمینی و مقدار آب آبیاری، از عوامل مؤثر در شور شدن اراضی کشاورزی است (Barzegar, 2008). بنابراین قبل از آغاز کشت محصولات، باید مقدار املاح محلول در خاک بررسی و در صورت لزوم اصلاح شود. یکی از روش‌های اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، شستشوی خاک و یا به اصطلاح آبخوبی آن است. آبخوبی به معنی قراردادن آب روی خاک و فرصت دادن به آب برای نفوذ در خاک و انتقال زهاب شور به درون زهکش و یا لایه‌های تحتانی زمین است. به منظور برآورد مقدار آب مورد نیاز برای شستشوی املاح محلول در خاک و متعادل نمودن مقدار نمک در منطقه‌ی رشد گیاهان زراعی، مطالعات آبخوبی صورت گرفته است. در پژوهشی گزارش شد که عمل آبخوبی، کنترل شوری خاک را میسر می‌سازد. با تخلیه نمک‌های مازاد خاک از طریق شبکه‌های زهکشی زیرزمینی،

کیفیت مناسب خاک در بخش کشاورزی، از نکات ضروری در جوانه‌زنی بذر، رشد و توسعه‌ی گیاهی و رسیدن به عملکرد مطلوب محصولات است. وجود نمک‌ها و به‌ویژه برخی عناصر مضر مانند سدیم و کلر در خاک، علاوه بر ایجاد مسمومیت برای ریشه‌ی گیاه، با کاهش پتانسیل آب خاک باعث اختلال در جذب بهینه‌ی آب توسط گیاهان می‌شوند. در پژوهش‌های گذشته گزارش شد که انباشتگی بیش از حد نمک‌ها در خاک موجب کاهش باروری خاک و کاهش عملکرد محصولات گیاهی می‌شود. در چنین شرایطی جریان آب و هوا در خاک، پتانسیل آب قابل دسترس برای گیاه، جوانه‌زنی بذر، نفوذ ریشه در خاک و حتی عملیات کشت و کار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین نمک‌های مضر در خاک باعث عدم تعادل دسترسی عناصر غذایی برای گیاهان شده و رشد گیاهان را به دلیل عدم جذب مواد مغذی، محدود می‌کنند (Qadir and Schubert, 2002; Qadir and Oster, 2004). از این‌رو در زمین‌های مستعد کشاورزی، تا جای

بهسازی خاک، کدام روش به مقدار آب کمتری برای شوری زدایی خاک نیاز داشته و راندمان آبخوبی بالاتری دارد، حائز اهمیت خواهد بود (Behbahanizade et al., 2017). از این رو اتخاذ روش‌های مناسب در آبخوبی می‌تواند موجب کاهش مقدار آب با کیفیت مصرفی و همچنین کاهش تولید زهاب شور شود. دفع زهاب شور از خاک بدون توجه به کیفیت شستشوی نقاط مختلف نیمرخ خاک، ممکن است نتیجه‌ی مطلوب را به همراه نداشته باشد. از این رو اطلاع از نحوه‌ی توزیع آب و املاح در خاک می‌تواند به منظور ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین گزینه‌ی مدیریتی، مفید واقع شود (Liu et al., 2012; Thorburn et al., 2003). در یک سیستم زهکشی زیرزمینی، نحوه‌ی توزیع و خطوط جریان آب در نیمرخ خاک بین دو زهکش لوله‌ای، در شکل (۱) نشان داده شده است. با عنایت به شکل (۱)، در صورت تنظیم ارتفاع ثابت آب بر روی سطح خاک، خطوط جریان آب در نیمرخ خاک دارای طول یکسانی نخواهد بود. یعنی یک قطره آب در سطح خاک بالای زهکش نسبت به سطح خاک وسط دو زهکش، مسیر کوتاه‌تری را طی می‌کند. بنابراین اثر متفاوتی بر شوری نهایی در نقاط مختلف نیمرخ خاک خواهد گذاشت. از سوی دیگر، منحنی سطح ایستابی در شکل (۱) نشان داد که افت جریان آب از محل زهکش‌ها تا فاصله وسط دو زهکش، یکسان نبوده است. با توجه به افت متفاوت آب در زیر زمین، به نظر می‌رسد که مقدار نفوذ آب در سطح خاک نیز تحت تأثیر زهکش بوده و متفاوت باشد. بنابراین وجود زهکش‌ها ممکن است باعث افزایش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی ستون خاک بالای زهکش نسبت به اواسط بین دو زهکش شود. با توجه به رویداد مذکور، احتمال داده می‌شود که شوری نهایی نیمرخ خاک در فاصله وسط بین دو زهکش، نسبت به ستون خاک بالای زهکش‌ها متفاوت باشد.

اراضی کشاورزی از شور شدن نجات می‌یابند (Jebelli, 2001). کاهش شوری خاک تا حد بهینه با استفاده از آبخوبی املاح و جلوگیری از ماندابی شدن خاک‌ها از طریق زهکشی، یکی از اقدامات مهم و اساسی برای به‌سازی خاک‌های شور و سدیمی به‌شمار می‌رود (Asadi Kapoorchal and Agdarnejad, 2018). نتایج یک آزمایش نشان داد که یک واحد عمق آب، برای آبخوبی همان واحد عمق خاک کفایت می‌کند و باعث کاهش ۸۰ درصد شوری از همان عمق در نیمرخ خاک می‌شود (Toze, 2006). بر اساس مطالعات گذشته، آبخوبی نمک‌ها از خاک به شدت تحت تأثیر بافت خاک، کیفیت آب، سرعت جریان آب و رطوبت اولیه خاک قرار داشت (Delbari et al., 2012). در پژوهشی اعلام شد که مقدار آب مورد نیاز برای آبخوبی نمک‌ها از خاک، به مقدار شوری اولیه خاک، بافت، عمق خاک و روش آبخوبی بستگی داشت (Corwin et al., 2007). از این رو در ستون‌هایی از جنس پلی اتیلن به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع یک متر، خاکی با بافت سنگین رسی ریخته شد. سپس با دو روش غرقاب متناوب و پاششی تحت آبخوبی قرار گرفت. عمق‌های آب آبخوبی شامل ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر و لایه‌های خاک مورد بررسی شامل ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵ و ۷۵-۱۰۰ سانتی‌متر بود. نتایج نشان داد روش آبخوبی متناوب، به حجم آب کمتری برای اصلاح خاک مورد مطالعه نیاز داشت و از ضریب راندمان آبخوبی بهتری برخوردار بود (Behbahanizade Rezaeyan et al., 2017). اما عملیات زهکشی نقش گسترده‌تری یافته است، به طوری که علی‌رغم نمک‌زدایی از اراضی شور، اهدافی مانند مدیریت مصرف آب، کیفیت زهاب تولیدی و حفاظت محیط زیست نیز مد نظر قرار گرفته است (Alizadeh, 2005). آبخوبی نمک‌های محلول در خاک با روش‌های مختلفی قابل اجراست. اما تشخیص آن که برای



شکل ۱- الگوی جریان آب به سمت زهکش لوله‌ای (Ritzema, 1994)

خاک، یکنواختی آبشویی نیمرخ خاک دور از ذهن نبود.

## مواد و روش‌ها

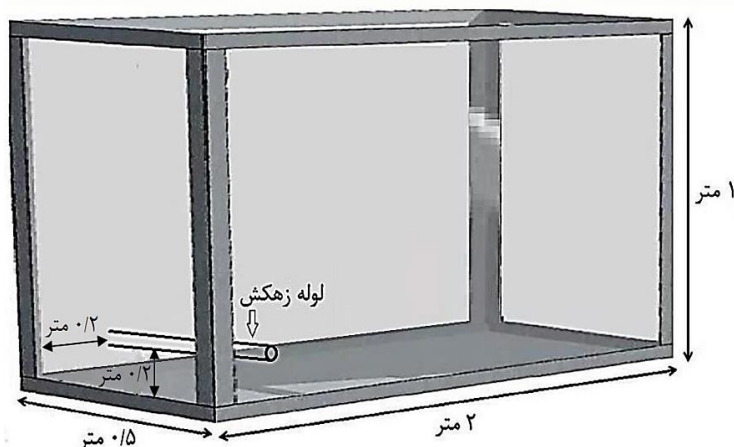
### معرفی مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش برای شبیه‌سازی عملیات آبشویی در نیمرخ خاک شور، از یک مخزن مستطیلی به طول دو متر، عرض نیم متر و ارتفاع یک متر استفاده شد (شکل ۲). دیواره‌های پشت، کناری و زیرین مخزن از جنس ورق گالوانیزه و دیواره‌ی جلو از جنس شیشه‌ی پلاستیکی شفاف (Plexiglass) بود. لوله‌ی زهکش، متشکل از یک لوله‌ی گالوانیزه با قطر اسمی ۲ سانتی‌متر و طول ۴۵ سانتی‌متر بود. با توجه به استاندارد DIN1187 آلمان برای ساخت لوله‌های زهکشی، یک درصد از مساحت جانبی لوله‌ی گالوانیزه به سوراخ‌های زهکش اختصاص داده شد. سوراخ‌ها با قطر دو میلی‌متر و با فاصله‌ی یکسان از هم، در سطح خارجی لوله پراکنده شد و شرایط زهکشی خاک را فراهم ساخت. برای جلوگیری از مسدود شدن لوله و افزایش هدایت هیدرولیکی در اطراف آن، از پوشش ماسه‌ای با ضخامت یک سانتی‌متر و دانه‌بندی با قطر بزرگ‌تر از سوراخ زهکش استفاده شد. به‌وسیله‌ی یک توری پلاستیکی، پوشش ماسه‌ای دور لوله‌ی زهکش نگه داشته شد. خاک مورد آزمایش، خاک شور با شوری اولیه در استان قزوین تهیه شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مطابق جدول (۱) است.

از این‌رو اتخاذ راه‌کار مدیریتی برای توزیع مناسب آب در نیمرخ خاک، ضمن رعایت مقدار مناسب مصرف آب، ضروری به‌نظر می‌رسد. تاکنون مدل‌های تجربی و منحنی‌های آبشویی در محدوده نوع خاک، مقدار شوری و درصد سدیم تبادلی خاک، برای عمق معینی از خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش‌ها، محاسبه‌ی عمق مورد نیاز برای آبشویی خاک‌های شور و بررسی روش‌های مختلف آبشویی مورد مطالعه بوده است (Nazari, 2017). اما در طراحی سیستم‌های زهکشی کمتر به بررسی یکنواختی آبشویی نیمرخ خاک، در فاصله‌ی بین دو زهکش پرداخته شده است. عدم شستشوی یکنواخت نیمرخ خاک، موجب توزیع نامتوازن املاح در خاک شده که نتیجه‌ی آن عدم بهره‌مندی کامل از مزایای آبشویی خواهد بود. همچنین در شرایط واقعی و عملیاتی، در صورتی که عملیات آبیاری در طول کشت وجود نداشته باشد (کشت دیم)، ادامه آبشویی (با تداوم آبیاری) و اصلاح لایه‌های زیرین خاک نیز وجود نخواهد داشت. در این شرایط، یکنواختی آبشویی اولیه در عمق توسعه‌ی ریشه‌ی گیاه اهمیت می‌یابد. ایجاد شرایط مناسب برای آبشویی یکنواخت خاک، از اصول مدیریتی بوده که از طریق آن ضمن رعایت مصرف بهینه‌ی آب در عملیات آبشویی، غلظت املاح موجود در خاک و حجم زهاب تولیدی به حداقل ممکن خواهد رسید. بنابراین هدف از این پژوهش، ارائه راه‌کار عملی برای شستشوی یکنواخت‌تر نیمرخ خاک بود. راه‌کار مدیریتی مذکور، کربندی سطح خاک بود. به‌طوری که با کربندی و توزیع یکنواخت آب در سطح

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک	ECe ( $\frac{ds}{m}$ )	چگالی ظاهری خاک ( $\frac{gr}{cm^3}$ )	رس (%)	شن (%)	سیلت (%)	اسیدیته (pH)	پتاسیم ( $\frac{meq}{L}$ )	منیزیم ( $\frac{meq}{L}$ )	کلسیم ( $\frac{meq}{L}$ )	سدیم ( $\frac{meq}{L}$ )	کلر ( $\frac{meq}{L}$ )
شن لومی	۹/۸	۱/۵	۱۸	۵۵	۲۷	۷/۹	۹/۸	۲۷/۲	۳۰/۵	۲۰	۲۰/۲



شکل ۲- نمایی از مخزن مکعب مستطیلی (مدل فیزیکی)

شد. به این صورت که با در نظر داشتن زمان صفر برای ابتدای آزمایش، در یک زمان مشخص و در حین آزمایش، ارتفاع آب روی سطح خاک (در هریک از کرت‌ها) اندازه‌گیری شد. سپس ارتفاع مذکور از ارتفاع اولیه آب (۲۰ سانتی‌متر) کسر شد تا عمق آب نفوذ یافته مشخص شود. در یک نمودار، شیب خط بین اعماق نفوذ یافته آب و زمان‌های اندازه‌گیری، معرف سرعت متوسط نفوذ آب بوده است. برای نشان دادن این‌که کرت‌بندی چه تأثیری بر کاهش پراکندگی داده‌های شوری نهایی خاک می‌گذارد، از انحراف معیار استفاده شد (رابطه ۱). به طوری که انحراف معیار داده‌ها در شرایط با و بدون کرت‌بندی مورد مقایسه قرار گرفت. طبق تعریف، هر چه انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها عدد کمتری باشد، نشانه آن است که داده‌ها به میانگین خود نزدیک بوده و پراکندگی اندکی دارند. در صورتی که انحراف معیار عدد بزرگی باشد، نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها زیاد بوده است.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه (۱)،  $s$ : انحراف معیار،  $N$ : تعداد داده‌ها،  $x_i$ : مقدار شوری نهایی در نقاط مختلف نیمرخ خاک  $\left(\frac{ds}{m}\right)$  و  $\bar{x}$ : میانگین مقادیر شوری نهایی در نیمرخ خاک  $\left(\frac{ds}{m}\right)$  بود.

#### ضریب یکنواختی توزیع شوری<sup>۱</sup> (UC)

برای توصیف یکنواختی آبشویی و توزیع یکنواخت شوری نهایی در نقاط مختلف شبکه‌ی نیمرخ خاک، از ضریب یکنواختی استفاده شد. در این روش، کل مساحت نیمرخ خاک به ۱۰ قسمت برابر تقسیم شد و مقادیر شوری آن‌ها برای محاسبه‌ی ضریب یکنواختی به کار گرفته شد. برای محاسبه‌ی ضریب مذکور، از رابطه ۲ استفاده شد (Wilcox and Swails, 1947).

$$UC = \left(1 - \frac{s}{\bar{x}}\right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

#### معادله منحنی آبشویی (شوری زدایی)

منحنی‌های آبشویی، نشان‌دهنده‌ی اثر آبشویی بر کاهش شوری خاک نسبت به مقدار عمق آب مصرفی است. با استفاده از توابع این منحنی‌ها می‌توان برای یک عمق مشخص از خاک شور، مقدار عمق آب لازم برای رسیدن به شوری مورد نظر را تعیین کرد. با توجه به این‌که پس از آبشویی طولانی مدت، نهایتاً املاح محلول خاک و آب آبشویی به تعادل می‌رسند، شکل این منحنی موازی محور افقی در می‌آید. معادله‌ی منحنی آبشویی بر اساس رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید (Hoffman, 1980).

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}\right) = f\left(\frac{D_w}{D_s}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه (۳):  $EC_f$ : هدایت الکتریکی نهایی عصاره اشباع خاک

#### روش اجرای آزمایش

در این پژوهش، نیمرخ خاک برای حالت نصف فاصله‌ی بین دو زهکش لوله‌ای شبیه‌سازی شد. به این صورت که در پایین‌ترین نقطه‌ی مدل، یعنی فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از کف و دیواره‌ی سمت چپ مخزن، یک لوله‌ی زهکش نصب شد (شکل ۲). سپس خاک شور تا ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری محفظه‌ی مذکور به صورت لایه‌ای ریخته شد و با تراکم ساختن آن، به چگالی  $1/5 \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$  رسانده شد. برای این‌که تفاوتی با شرایط واقعی وجود نداشته باشد، تا فاصله ۱۰ سانتی‌متری از دور پوشش ماسه‌ای، خاک با تراکم کمتری دور زهکش ریخته شد. باتوجه به این‌که بحث اصلی پژوهش مربوط به تأثیر زهکش بر روی نفوذپذیری سطح خاک بود، پس از فاصله ۱۰ سانتی‌متری، تراکم خاک بالای زهکش مشابه بقیه نقاط نیمرخ خاک بود. آزمایش شامل اجرای دو مرحله آبشویی در قبل و بعد از کرت‌بندی سطح خاک بود. در مرحله اول، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر آب با هدایت الکتریکی  $0/51 \left(\frac{ds}{m}\right)$  به طور یکنواخت روی سطح خاک مدل توزیع شد و با باز کردن خروجی زهکش، فرصت آبشویی داده شد. به طور کلی برای انتخاب عمق آب کاربردی در آبشویی، عمقی برابر و یا کمتر از عمق خاک (۸۰ سانتی‌متر) مناسب بود. اما برای بررسی بهتر تأثیر کرت‌بندی بر یکنواختی آبشویی، عمق کم (یعنی ربع عمق خاک) انتخاب شد. پس از آبشویی، عصاره‌ی اشباع نهایی خاک در یک شبکه‌ای از نقاط در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک و فواصل ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از زهکش اندازه‌گیری شد. برای شبیه‌سازی مقادیر اندازه‌گیری شده بین دو زهکش، داده‌ها به طور قرینه تعمیم داده شد. در مرحله‌ی دوم آزمایش، خاک آبشویی شده تخلیه شد و خاک جدید با شرایط قبلی در مدل جایگزین شد. در این مرحله، سطح خاک با استفاده از ورق‌های شیشه‌ی پلاستیکی به چهار قسمت برابر (با ابعاد  $0/5 \times 0/5$  متر) تقسیم و به اصطلاح کرت‌بندی شد. برای جلوگیری از نفوذ آب از یک کرت به کرت دیگر، ورق‌های شیشه‌ی پلاستیکی تا عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک پایین برده شد و با چسب آکواریوم به دیواره‌ی مدل چسبانده شد (شکل ۳). در این مرحله نیز، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر آب با هدایت الکتریکی  $0/51 \left(\frac{ds}{m}\right)$  به طور یکنواخت و مساوی روی سطح خاک کرت‌ها پخش شد و با باز کردن خروجی زهکش، فرصت آبشویی داده شد. سری جدید ثبت داده‌های شوری نهایی خاک، مشابه مرحله‌ی قبل و در یک شبکه‌ی ۱۲ نقطه‌ای از نیمرخ خاک انجام شد. در هر یک از کرت‌ها، عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان اندازه‌گیری

پنج سانتی‌متری عمق خاک و بعد از اتمام عملیات آبخوبی اندازه‌گیری می‌شود (Mashaal et al., 2013).  $EC_i$ : هدایت الکتریکی اولیه‌ی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر) قبل از اجرای عملیات آبخوبی است.  $f$ : ضریب بازده آبخوبی خاک (بی‌بعد)،  $D_w$ : عمق خالص آب کاربردی برای آبخوبی خاک (سانتی‌متر) و  $D_s$ : عمق خاک تحت آبخوبی (سانتی‌متر) است.

(دسی‌زیمنس بر متر) بعد از عملیات آبخوبی،  $EC_{eq}$ : هدایت الکتریکی تعادلی خاک و آب (دسی‌زیمنس بر متر) بعد از آبخوبی طولانی مدت است که املاح محلول در خاک با املاح آب آبیاری به تعادل می‌رسند. در این شرایط، مقدار  $EC_{eq}$  از شوری آب آبیاری بیشتر و از شوری اولیه خاک کمتر خواهد بود.  $EC_{eq}$  که کمترین مقدار شوری تبادل‌ی خاک است، در لایه سطحی صفر تا



شکل ۳- نمایشی از تصویر واقعی مدل فیزیکی، پس از کرت‌بندی سطح خاک

مقدار از میانگین خود منحرف شده‌اند. از این‌رو با ترسیم خطوط هم‌ $EC$  در شکل (۴)، پراکندگی مقادیر شوری و عدم شستشوی یکنواخت نیمرخ خاک مشاهده شد. در شکل (۴) نتایج حاصل از مدل فیزیکی، به شکل قرینه تعمیم داده شد و تغییرات شوری در نیمرخ خاک بین دو زهکش نشان داده شد. مقادیر شوری در سطح خاک و در نقطه‌ی بالای زهکش‌ها دارای کمترین مقدار و در فاصله‌ی میانی بین دو زهکش که منتهی به بستر خاک بود، دارای بیشترین مقدار بود. مقادیر هدایت الکتریکی خاک، در دو بعد طول و عرض نیمرخ خاک نیز بررسی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که از جهات مختلف، فاصله گرفتن از محل نصب زهکش، بر کاهش آبخوبی خاک مؤثر بود. با توجه به الگوی حرکت جریان آب در شکل (۱)، ارتفاع ثابت آبی که بر روی خاک قرار داشت، برای این‌که به سمت خروجی زهکش‌ها هدایت شود، مسافت متفاوتی را طی کرده بود. یعنی خط جریان در بالای زهکش‌ها، مسیر کوتاه‌تری را نسبت به وسط دو زهکش پیموده بود. به همین علت خاک بالای زهکش‌ها نسبت به خاک وسط دو زهکش، بهتر شسته شده بود. بنابراین با وجود ارتفاع ثابت آب بر روی سطح خاک، نمی‌توان انتظار داشت که نیمرخ خاک بین دو زهکش به شکل یکنواخت آبخوبی شود. در پژوهش‌های گذشته نیز از طریق بررسی عملکرد مدل‌های نظری، به‌طور تلویحی به

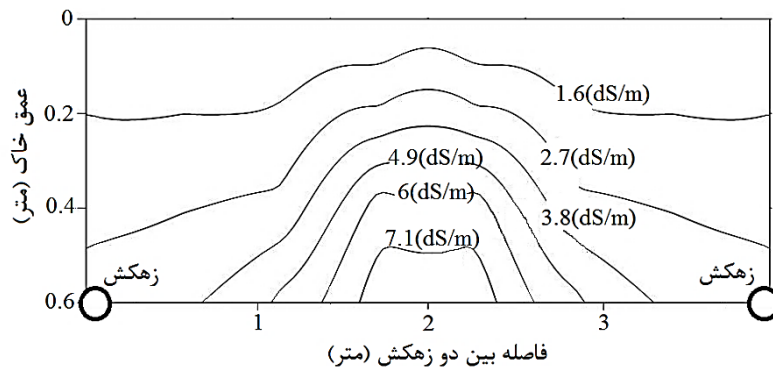
## نتایج و بحث

### آبخوبی خاک قبل از کرت‌بندی

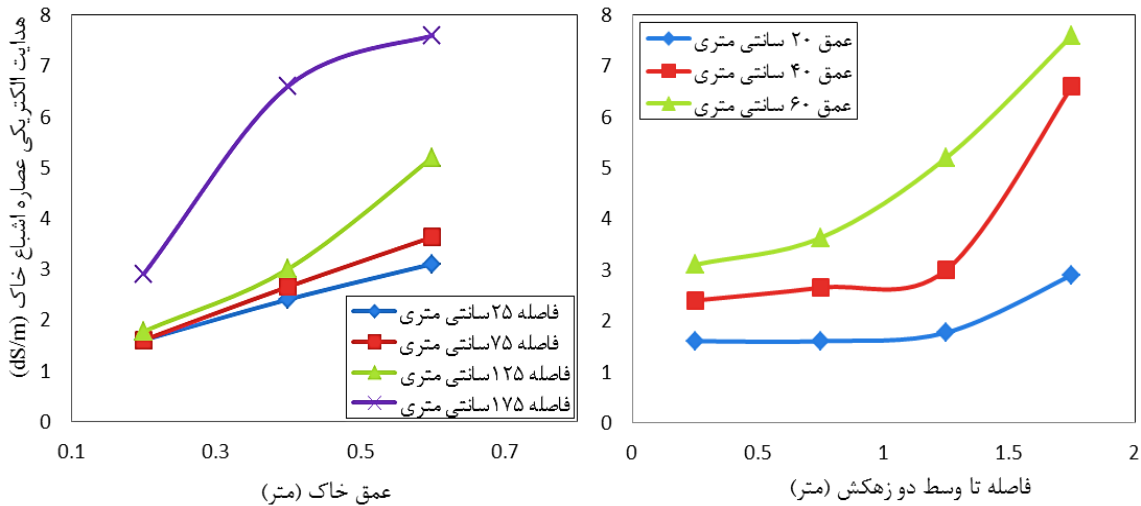
در این پژوهش، خاکی با ابعاد نیمرخ  $0.18 \times 2$  متر و عرض  $0.05$  متر مورد مطالعه‌ی آبخوبی قرار گرفت. زهکش در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از بستر مخزن قرار داشت، بنابراین عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک آبخوبی شد. در این آزمایش، صرفاً برای این‌که یک تصویری از مقدار متوسط شوری نهایی خاک ایجاد شود، اقدام به محاسبه آن از طریق رابطه (۳) شد. لازم به‌ذکر است که شرایط آزمایش تحت کنترل بود و خاک همگن، بدون وجود جریان‌های ترجیحی و با عمق ثابت آب، تحت آبخوبی قرار داشت. از این‌رو راندمان آبخوبی در کل نیمرخ خاک، ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. با توجه به شوری اولیه خاک  $\left(\frac{ds}{m}\right) 9/8$ ، شوری معادل  $\left(\frac{ds}{m}\right) 1/2$  و عمق آب ۲۰ سانتی‌متر، شوری نهایی خاک عدد  $\left(\frac{ds}{m}\right) 4$  محاسبه شد. از این‌رو انتظار می‌رفت که شوری نیمرخ خاک، برابر با عدد مذکور باشد. اعداد اندازه‌گیری شده از عمق ۲۰ سانتی‌متری تا بستر شبکه‌ی نیمرخ خاک در بازه‌ی  $1/6$  تا  $7/6$  دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت (جدول ۲) و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای شوری خاک، عدد  $\left(\frac{ds}{m}\right) 3/7$  بود. عدد  $\left(\frac{ds}{m}\right) 2$  به‌عنوان انحراف معیار، نشان داد که مجموعه‌ی داده‌ها چه

که قابلیت تخمین مقادیر غیر یکنواخت شوری در نیمرخ خاک را نداشت. در شرایط واقعی به‌طور معمول برای یکنواختی آبشویی در نیمرخ خاک، عمق آب کاربردی معادل عمق خاک در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، ممکن است بتوان با اعمال راه‌کارهای مدیریتی و مصرف آب کمتر، یکنواختی آبشویی نیمرخ خاک را رقم زد. در این صورت آب صرفه‌جویی شده به مصرف گیاه رسیده و از تولید زهاب بی‌کیفیت و آلودگی محیط زیست جلوگیری می‌شود.

عدم یکنواختی آبشویی خاک اشاره شده بود. در یک آزمایش صحرایی بر روی ۱۵ کرت به مساحت یک متر مربع، گزارش شد که تخمین شوری نهایی خاک در لایه‌های سطحی خاک قابل انجام و در لایه‌های زیرین خاک، غیر قابل توصیه و کاربرد بود. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که شوری لایه‌های سطحی خاک به‌علت نزدیکی به سطح آزاد آب، قابلیت تخمین از طریق مدل‌های نظری داشت. اما شستشوی لایه‌های زیرین خاک با نتایج مدل‌های تجربی سازگار نبود (Mashaal et al., 2013). نتایج پژوهش مذکور به‌دلیل روابط ریاضی حاکم بر مدل‌های نظری بود



شکل ۴- خطوط هم‌EC پس از آبشویی نیمرخ خاک (بدون کرت‌بندی سطح خاک)



شکل ۵- مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در فواصل مختلف نسبت به زهکش (بدون کرت‌بندی سطح خاک)

جدول ۲- مقادیر شوری نهایی نقاط مختلف نیمرخ خاک، پس از آبشویی

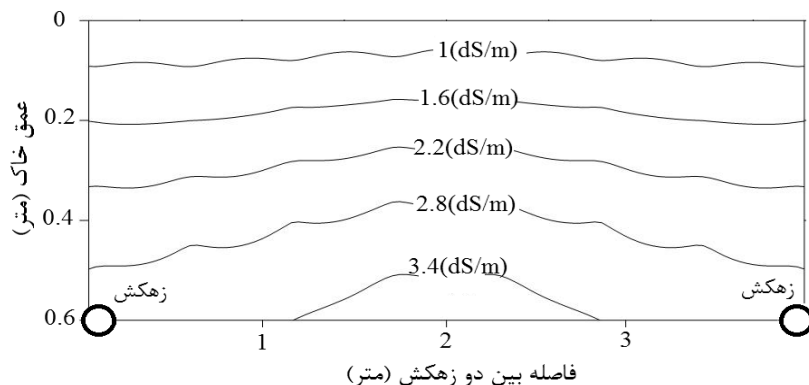
فاصله از زهکش (سانتی‌متر)	شوری نهایی خاک قبل از کرت‌بندی ( $\frac{dS}{m}$ )		شوری نهایی خاک بعد از کرت‌بندی ( $\frac{dS}{m}$ )	
	عمق ۲۰ سانتی‌متر	عمق ۴۰ سانتی‌متر	عمق ۲۰ سانتی‌متر	عمق ۴۰ سانتی‌متر
۲۵	۱/۶	۲/۴	۱/۶	۳/۱
۷۵	۱/۶	۲/۶۵	۱/۶	۳/۶۳
۱۲۵	۱/۷۷	۳	۱/۷	۵/۲
۱۷۵	۲/۹	۶/۶	۱/۹	۷/۶

## آبشویی خاک بعد از کرت‌بندی

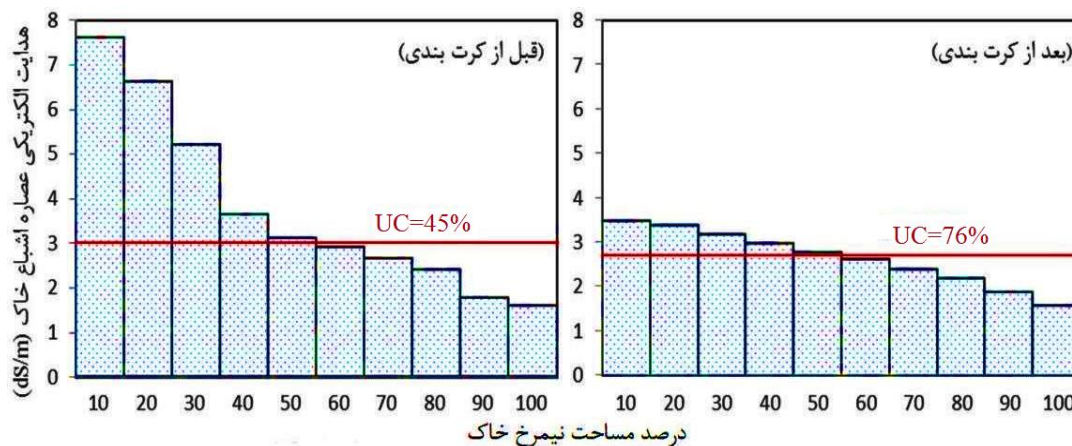
در این مرحله از پژوهش، طول دو متری مدل فیزیکی توسط سه دیواره در سطح خاک، به چهار قسمت مساوی تقسیم شد. با این کار ضمن کرت‌بندی سطح خاک، از جابه‌جایی آب بین قسمت‌های مختلف سطح خاک جلوگیری شد. ارتفاع ثابت آب به اندازه‌ی مرحله‌ی قبل، در همه‌ی کرت‌ها وجود داشت و اقدام به آبشویی خاک شد. پس از انجام آبشویی، از وسط هر کرت یعنی فاصله‌ی ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از زهکش و اعماق ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ متری سطح خاک، نمونه‌برداری شد و شوری عصاره‌ی اشباع خاک اندازه‌گیری شد. اعداد اندازه‌گیری شده از عمق ۲۰ سانتی‌متری تا بستر شبکه‌ی نیمرخ خاک، در بازه‌ی ۱/۶ تا ۳/۷ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت (جدول ۲). بنابراین حداکثر شوری اندازه‌گیری شده در نیمرخ خاک، حاکی از دستیابی به هدف آزمایش بود. از سوی دیگر، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای شوری خاک، عدد  $2/6 \left(\frac{dS}{m}\right)$  و مقدار انحراف معیار عدد  $0/63 \left(\frac{dS}{m}\right)$  بود که نشان‌دهنده‌ی کاهش مقدار آن پس از کرت‌بندی سطح خاک بود. خطوط هم‌EC در شکل (۶) نیز بیانگر افزایش یکنواختی در آبشویی و شستشوی بهتر نیمرخ خاک بود. همچنین یکنواختی توزیع شوری در نیمرخ خاک پس از آبشویی، در شکل (۷) نشان داده شد. در شرایط قبل و بعد از کرت‌بندی سطح خاک و بر مبنای سطح کفایت ۵۰ درصد، ضریب یکنواختی (UC) به ترتیب ۴۵ و ۷۶ درصد محاسبه شد. از این‌رو با اجرای کرت‌بندی در این پژوهش، ضریب یکنواختی توزیع شوری ۳۱ درصد افزایش یافت. برای بررسی علت تأثیر کرت‌بندی بر افزایش یکنواختی آبشویی نیمرخ خاک، سرعت نفوذ آب در هر یک از کرت‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که شیب خط تغییرات ارتفاع نفوذ آب نسبت به زمان (سرعت متوسط نفوذ آب)، در کرت‌های مختلف متفاوت بود (شکل ۸). سرعت متوسط نفوذ آب به داخل خاک در فواصل ۲۵، ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی‌متری از زهکش به ترتیب برابر با ۱/۹، ۱/۷، ۱/۵۶ و ۱/۴۷ میلی‌متر بر ساعت برآورد شد. یعنی نزدیک بودن به زهکش، بر افزایش سرعت نفوذ آب مؤثر بود و با فاصله گرفتن از زهکش، سرعت نفوذ آب کاهش یافت. تأثیر این پدیده بر عدم آبشویی یکنواخت خاک در شرایط بدون کرت‌بندی، قابل تفسیر بود. به این صورت که با قرارگیری یک ارتفاع ثابت آب بر روی سطح خاک، آب روی

زهکش‌ها نسبت به اواسط زهکش‌ها با سرعت بیشتری به داخل خاک نفوذ کرد. از سوی دیگر به دلیل تراز شدن (افقی شدن) سریع سطح آب، کمبود آب روی زهکش‌ها از اواسط زهکش‌ها جبران شد. این کار تا زمانی که کل آب روی خاک نفوذ یافت، ادامه داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط بدون کرت‌بندی، علی‌رغم وجود یک ارتفاع ثابت آب، تصور نفوذ یک مقدار برابر آب به همه‌ی نقاط خاک واقعیت نداشته است. اما از طریق کرت‌بندی، علاوه بر توزیع مناسب و مساوی آب در سطح خاک، فرصت بیشتری به آب میان دو زهکش داده شد تا نیمرخ خاک آن ناحیه شستشوی بهتری داشته باشد. تاکنون پژوهش مشابهی در این‌باره انجام نشده بود اما در پژوهش‌های گذشته اشاره شد که به دلیل توان انتقال پذیری نمک‌های محلول در خاک، مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک از شکل حرکت آب در ستون خاک تأثیر پذیرفت (Hao and Chang, 2003). بنابراین در پژوهش حاضر نفوذ برابر آب در قسمت‌های مختلف سطح خاک، از علل آبشویی بهتر آن نواحی بوده است. در پژوهش دیگر گزارش شد که کاربرد آب اضافی (مصرف آب زیاد) در فرآیند آبشویی، منجر به خروج عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان نظیر یون‌های محلول در خاک، از منطقه رشد ریشه می‌شود (Anapali et al., 2001). از این‌رو دستاورد کاربردی پژوهش حاضر این بود که برای دستیابی به شوری موردنظر در خاک، از مصرف بیش از حد آب با کیفیت و تخلیه عناصر مفید غذایی از خاک و تولید زهاب بیشتر جلوگیری شد. با توجه به نتایج به دست آمده، نفوذپذیری سطح خاک نیز مانند افت سطح ایستابی زیرزمینی، تحت تأثیر زهکش‌ها دارای یک شعاع تأثیر بوده است. به طوری که در شرایط واقعی زهکشی، بیشترین نفوذپذیری سطح خاک از محل نصب زهکش‌ها آغاز شده و تا یک نقطه‌ای در فاصله‌ی بین دو زهکش (نه لزوماً وسط دو زهکش) به حالت ثابت خواهد رسید. بنابراین پیشنهاد می‌شود در یک آزمایش میدانی و برای فاصله واقعی بین دو زهکش (مثلاً ۸۰ متر)، شعاع تأثیر زهکش بر نفوذپذیری سطح خاک تعیین شود. با این کار می‌توان محل دقیق کرت‌بندی، تعداد کرت مورد نیاز، ابعاد کرت‌ها و فواصل دیواره‌ی کرت‌ها از هم را شناسایی نمود و نسخه‌ای برای شرایط واقعی پیچید.

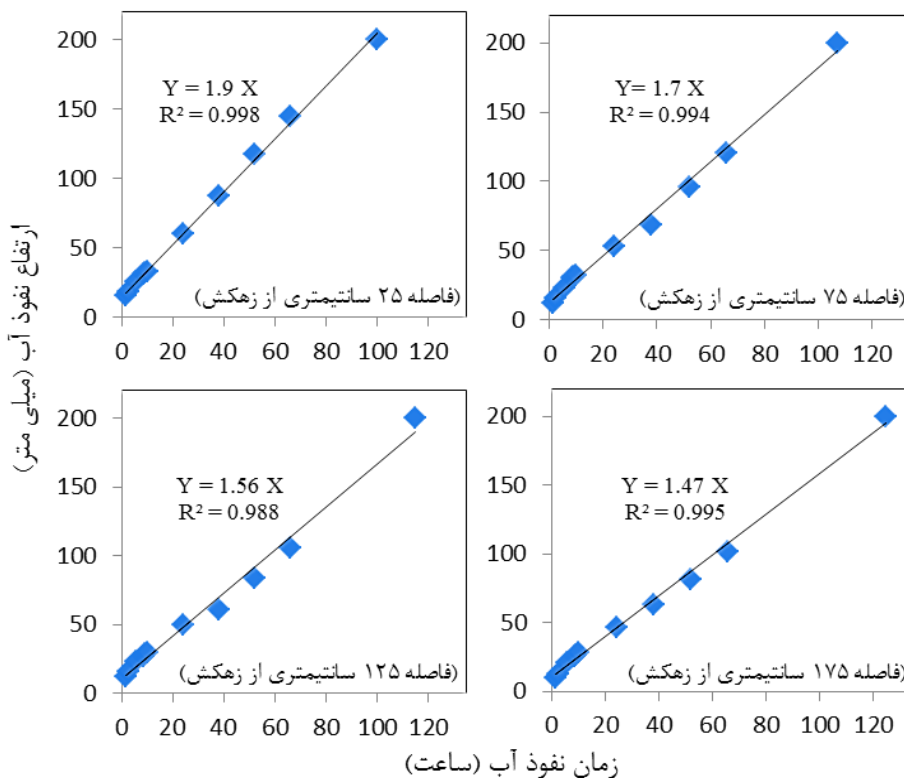




شکل ۶- خطوط هم‌EC پس از آبشویی نیمرخ خاک (بعد از کرت بندی سطح خاک)



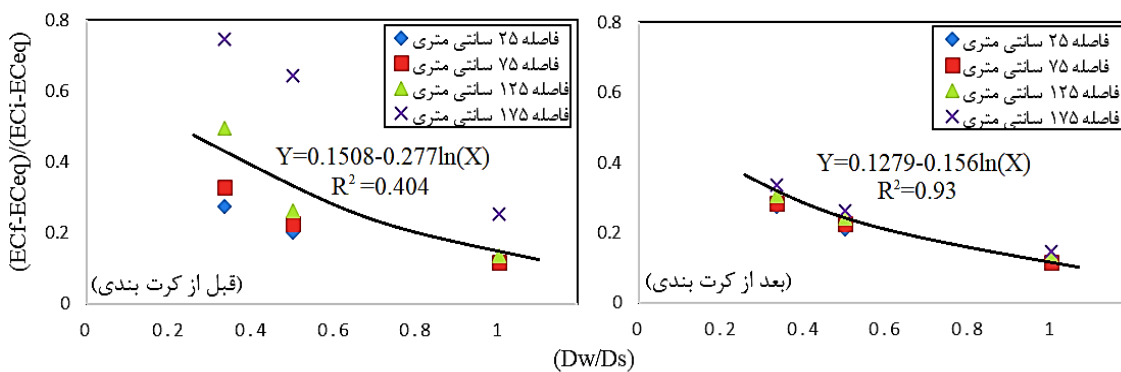
شکل ۷- یکنواختی توزیع شوری در نیمرخ خاک پس از آبشویی



شکل ۸- ارتفاع نفوذ آب در خاک نسبت به زمان، در فواصل مختلف از زهکش منحنی آبشویی (شوری زدایی)

بازده آبشویی نقاط مختلف خاک اقدام نمود. با این کار ارتفاع بهینه‌ی آب برای فواصل مختلف از زهکش، در سطح خاک توزیع شده و باعث افزایش راندمان آبشویی و مصرف بهینه آب می‌شود. در پژوهش‌های گذشته گزارش شد که ضریب راندمان آبشویی (f) از عوامل مهم و مؤثر در شناخت عکس‌العمل خاک، نسبت به فرآیند آبشویی و خروج نمک‌های محلول از نیمرخ خاک بود. علاوه بر بافت خاک و ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی و تخلخل خاک، روش آبشویی نیز در مقدار ضریب راندمان آبشویی مؤثر بوده است (Behbahanzade et al., 2016). در پژوهش دیگر، منحنی آبشویی خاک در دشت ساوه برای اعماق مختلف خاک، به صورت رابطه  $Y=0.1552-0.0948\ln(X)$  برآورد شد. ضریب همبستگی بین ارقام بازده آبشویی، مقدار ۰/۸ بود. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد آب آبشویی بیش از ۶۰ سانتی‌متر، تأثیر معناداری بر ضریب بازده آبشویی نداشت (Mashaal et al., 2013). یعنی مصرف بیش از حد آب در آبشویی، بی‌تأثیر بوده و فقط باعث هدررفت آب، تولید زهاب بیشتر و آلودگی محیط زیست شد.

منحنی آبشویی برای فواصل مختلف از محل نصب زهکش در نیمرخ خاک، بر اساس رابطه (۳) ترسیم و در شکل (۹) نشان داده شد. در شرایط قبل و بعد از کرت‌بندی سطح خاک به ترتیب روابط لگاریتمی  $Y=0.1508-0.277\ln(X)$  و  $Y=0.1279-0.156\ln(X)$  بین ضرایب بازده آبشویی (f) برازش داده شد. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بین ضرایب بازده آبشویی، در قبل و بعد از کرت‌بندی به ترتیب ۰/۴۰۴ و ۰/۹۳ به دست آمد. نتایج نشان داد که در شرایط قبل از کرت‌بندی به دلیل نفوذ نابرابر آب در سطح خاک و شکل حرکت آب به سمت زهکش، برخی نقاط نیمرخ خاک بیش از حد شسته شده و نقاط دیگر کمتر درگیر آبشویی بود. از این رو تفاوت مقادیر بازده آبشویی در نقاط نیمرخ خاک زیاد بوده و همبستگی کمتری داشت. اما با اعمال کرت‌بندی، ضرایب بازده آبشویی در نقاط مختلف نیمرخ خاک به هم نزدیک شد و بیانگر آبشویی یکنواخت نیمرخ خاک بود. دستاورد کاربردی این بخش از پژوهش این بود که با استفاده از رابطه به دست آمده برای منحنی آبشویی، می‌توان با در نظر گرفتن ارتفاع متفاوت آب در سطح خاک بین دو زهکش، در راستای افزایش همبستگی



شکل ۹- منحنی آبشویی نیمرخ خاک قبل و بعد از کرت‌بندی سطح خاک

کرد. بنابراین از طریق کرت‌بندی با حذف اثر نامتوازن زهکش بر مکش آب روی خاک، فرصت بیشتری به آب میان دو زهکش داده شد تا نیمرخ خاک آن ناحیه شستشوی بهتری داشته باشد. از این رو با راه‌کار مدیریتی مذکور ضمن دستیابی به شوری مورد نظر در خاک، از مصرف بیش از حد آب با کیفیت، تخلیه عناصر مفید غذایی از خاک، تولید زهاب بیشتر و تخریب محیط زیست جلوگیری شد. همچنین نتایج بررسی منحنی آبشویی در نقاط مختلف نیمرخ خاک نشان داد که با در نظر گرفتن ارتفاع متفاوت آب در سطح خاک بین دو زهکش، قابلیت افزایش یکنواختی آبشویی خاک وجود داشت. با این کار ضمن توزیع و مصرف بهینه آب در فاصله‌ی میان دو زهکش، افزایش راندمان آبشویی در نیمرخ خاک نیز ممکن بود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## نتیجه‌گیری

راه‌های راه‌کارهای مدیریتی برای توزیع یکنواخت شوری در نیمرخ خاک، مانع از مصرف بیش از حد آب در عملیات آبشویی می‌شود. در این پژوهش با کرت‌بندی سطح خاک در فاصله‌ی بین دو زهکش، تأثیر قابل توجهی در یکنواختی آبشویی نیمرخ خاک مشاهده شد. ضریب یکنواختی شوری نهایی خاک در شرایط قبل و بعد از کرت‌بندی، به ترتیب ۴۵ و ۷۶ درصد محاسبه شد. یعنی با اجرای کرت‌بندی در این پژوهش، ضریب یکنواختی توزیع شوری ۳۱ درصد افزایش یافت. نتایج نشان داد که نزدیک بودن سطح خاک به زهکش، بر افزایش سرعت نفوذ آب به داخل خاک مؤثر بود. به طوری که با قرارگیری یک ارتفاع ثابت آب بر روی سطح خاک، آب روی زهکش‌ها نسبت به اواسط زهکش‌ها با سرعت بیشتری به داخل خاک نفوذ

## REFERENCES

- Alizadeh, A. (2005). *New drainage (planning, design and management of drainage systems)* (1st ed.). Mashhad, Imam Reza University publications.
- Anapali, O., Shahin, V. Oztas, T. and Hanay, A. (2001). Defining effective salt leaching regions between drains. *Journal of Turk. agric.* 25, 51-56.
- Asadi Kapoorchal, S. and Agdarnejad, A. (2018). Leaching of saline and sodic soils with the use of pure water and gypsum modifier in a part of Maxer plain lands. *Third national conference on field water management*, 26 February. Soil and Water Research Institute, Karaj.
- Barzegar, A. (2008). *Saline and sodic soils*. (1st ed.). Ahvaz. Shahid Chamran University, 13-15.
- Behbahanzade Rezaeyan, Z., Pazira, E., Panahpour, E. and Zohrabi, N. (2016). Determination of leaching efficiency coefficient for desalinization of saline and sodic soil in Veis area, Khuzistan province. *Journal of protection of water and soil resources*. 5(4), 97-112.
- Behbahanzade Rezaeyan, Z., Pazira, E., Panahpour, E. and Zohrabi, N. (2017). Comparison of different methods of soluble salts leaching from saline and sodic soils profile. *Journal of Water Science and Engineering*. 7(15), 79-93.
- Corwin, D. L., Rhoades, J. D. and Simunek, J. (2007). Leaching requirement for soil salinity control: Steady – state versus transient models. *Journal of Agricul, Water Manage.* 90(3), 165-180.
- Delbari, M., Talebzadeh, M., Naghavii, H. and Gholamalizadeh, A. (2012). Salt Leaching Process in saline soils through disturbed soil columns. *Journal of irrigation and water engineering*. 2(8), 54-65.
- Hao, X. and Chang, C. (2003). Does a long-term heavy cattle manure application increase salinity of a clay loam soil in semi-arid southern Alberta. *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment*. 94, 89-103.
- Hoffman, G. J. (1980). Guideline for reclamation of salt affected soils Proceeding of International American Salinity and Water Management, Technical Conference. Juan. Mexico. PP: 49-64.
- Jebelli, S. J. (2001). Environmental effects of land drainage. *Second Technical Workshop on Drainage and Environment*, 17 May. National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran.
- Liu, M. X., Yang, J. S., Li, X. M., Yu, M. and Wang, J. (2012). Effects of irrigation water quality and drip tape arrangement on soil salinity, soil moisture distribution and cotton yield (*Gossypium hirsutum* L.) under mulched drip irrigation in Xinjiang, china. *Journal of Integ. Agric.* 11(3), 502-511.
- Mashaal, M., Daneshvar, M., Emami, S. and Varavipour, M. (2013). Evaluation of theoretical models of soil solute leaching. *Journal of Water and irrigation management*. 3(1), 121-134.
- Nazari, N. (2017). Appropriate empirical model for salt leaching of saline soils at Islamic Azad University, Miyaneh Branch cultivated lands. *Journal of Agroecology*. 13(2), 35-51.
- Qadir, M. and Schubert, S. (2002). Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Journal of Land Deg. Dev.* 13, 275-294.
- Qadir, M. and Oster, J. (2004). Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Journal of Science of the Total Environment*. 323(1), 1-19.
- 17-Ritzema, H. P. (1994). *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). ILRI Publication 16, Wageningen, the Netherlands, pp: 263-304.
- 18-Thorburn, P. J., Cook, F. J. and Bristow, K. L. (2003). Soil-dependent wetting from trickle emitters: implication for system design and management. *Journal of Irrigation Science*. 22, 121-127.
- 19-Toze, S. (2006). Reuse of effluent water-benefits and risks. *Journal of Agric.Water Manage.* 80, 147-159.
- 20-Wilcox, J. C. and Swails, G. E. (1947). Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinkler. *Journal of Scientific Agriculture*. 27: 565-586.