



Gonbad Kavous University  
Journal of New Approaches in  
Water Engineering and Environment  
Volume 2, Issue 1

## **Simulation of the effect of irrigation with Saline-sodic water on Soil infiltration Rate changes with Kostiakov and Philip's infiltration model**

**Mehdi Zakerinia<sup>1\*</sup>, Sina Abdollahi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Associate Professor, Water Engineering Department, Water and soil Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>2</sup>Graduated MSc Student, Water Engineering Department, Water and soil Engineering Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 21.01.2023; Accepted:21.04.2023

### **Abstract**

In order to evaluating effects of irrigation with saline-sodic water, we conducted three infiltration experiments in clay-loam soil in end-close furrow. We were using 5cm water depth every week, which had EC=12 ds/m and SAR=32. Experiments were done with volume-index method in end-close furrow in third, sixth and tenth irrigation. Therefore, infiltration speed and cumulative infiltrations curves were fitted in different times with Kostiakov and Philip models. Results showed that great decrease in infiltration rate was happened since irrigation with saline-sodic water in experiment. Therefore, infiltration rate decreased 40.6 and 68 percent from third irrigation to sixth and sixth to tenth irrigation, respectively. So, using saline-sodic water can have decreased infiltration rate up to 81 percent in 50 days. Evaluation of the simulation results of test data again Kostiakov & loese and Philip model data with RMSE and MBE parameters showed that these models could simulate soil infiltration rate changes good under the effect of irrigation with saline-sodic water. Also, simulation accuracy was increased at the end of experience time than initial and mead time infiltration tests.

**Keyword:** Infiltration rate, electrical conductivity, furrow, saline sodic water

---

\*. Corresponding author, Email:mzakerinia@gmail.com



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست"  
دوره دوم، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

## شبیه‌سازی تأثیر آبیاری با آب شور - سدیمی بر تغییرات نفوذپذیری خاک با مدل‌های نفوذ فیلیپ و کاستیاکوف

مهدی ذاکری نیا<sup>۱</sup>، سینا عبدالهی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۲</sup> دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

### چکیده

به منظور بررسی تأثیر آبیاری با آب شور-سدیمی بر نفوذپذیری خاک، آزمایش‌های نفوذ در ۶ جویچه‌ی انتهابسته، به طول ۲/۶ متر با عرض ۰/۴ و عرض پشته‌ی ۱/۲ متر با خاکی از جنس لوم رسی انجام شد. آب آبیاری دارای رسانایی الکتریکی ۱۲ dS/m و SAR برابر ۳۲ و عمق آب آبیاری در هر هفته به اندازه‌ی ۵ cm اعمال می‌شد. آزمایش نفوذپذیری در زمان آبیاری سوم، ششم و دهم به روش حجم-شاخص در جویچه‌ی انتها بسته انجام شد. سپس نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در زمان‌های مختلف محاسبه و نتایج با مدل‌های کاستیاکوف و فیلیپ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که آبیاری با آب شور-سدیمی باعث کاهش شدید در نفوذپذیری می‌شود؛ به طوری که سرعت نفوذ نهایی آبیاری ششم نسبت به آبیاری سوم ۴۰/۶ درصد و در آبیاری دهم نسبت به آبیاری ششم ۶۸ درصد کاهش یافت. در مجموع در فاصله زمانی ۵۰ روز تا ۸۱ درصد سرعت نفوذ نهایی کاهش یافت. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی داده‌های نفوذ با آماره مجذور میانگین مربعات خطا، بزرگی خطا و معیار میانگین انحراف خطاکی از آن است که مدل کاستیاکوف و فیلیپ به خوبی توانسته‌اند، تغییرات نفوذپذیری خاک ناشی از آبیاری شور سدیمی را برآورد نمایند. اما مدل کاستیاکوف نتایج به نسبت بهتری از خود نشان داده است. همچنین دقت شبیه‌سازی در انتهای دوره‌ی آزمایش نسبت دوره‌های قبل از آن بهتر شده بود. کلمات کلیدی: آب شور سدیمی، جویچه، سرعت نفوذ نهایی، هدایت الکتریکی.

\* نویسنده مسئول، Email: mzakerinia@gmail.com

## مقدمه

سدیمی بودن نیز علاوه بر سمیت برای گیاهان، بر روی خواص فیزیکی خاک هم تأثیر منفی می‌گذارد. مشخصه‌ی بارز خاک‌های سدیمی، حرکت هوموس پراکنده شده به همراه آب و تشکیل پوشش سیاه‌رنگ در سطح زمین، بعد از تبخیر آب است (Krista, 2003). نفوذپذیری کم خاک مشکلات زیادی برای اجرای سامانه‌های آبیاری ایجاد می‌کند. از جمله این مشکلات می‌توان به پایین آمدن راندمان آبیاری به‌خصوص در سیستم آبیاری جویچه‌ای و یا نواری اشاره نمود. به طور کلی خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های دیگر به علت دارا بودن منافذ کوچکتر و در نتیجه مقاومت بیشتر مسیر جریان، نفوذپذیری کمتری دارند. به طور کلی خاک‌های شور-سدیمی غالباً در نواحی پست و دارای آب و هوای نیمه‌خشک که دارای زهکشی ضعیف هستند، به وجود می‌آید (Rhoades, 1992). در مورد چگونگی تأثیر آبیاری با آب شور بر تخریب یا بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحقیقات فراوانی انجام گرفته و نتایجی متفاوت و گاه متضاد ارائه شده است. آبیاری گیاهان به‌ویژه محصولات زراعی با آب شور بدون مدیریت آبخوبی در بیشتر موارد سبب تخریب ساختمان و کاهش نفوذپذیری خاک گردیده است (Pakparvar and Sadati, 2003). (Akhavan Ghalibaf, 1994) سنگینی بافت، پستی اراضی، نحوه‌ی به کارگیری و توزیع آب را به‌عنوان عامل‌های اصلی تشدید شوری در منطقه‌ی رودشت اصفهان دانسته است. (Pakparvar and Sadati, 2003) با کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در روندیابی زمانی و مکانی شوری در دشت کاشان نشان دادند که در طول ۲۲ سال، ۷/۵ درصد بر مساحت زمین‌های شور افزوده شده است. با توجه به نتایج این مطالعه بر هم خوردن تعادل سفره آب شور و شیرین و کاربرد آب‌های جدیداً شور در کشاورزی علت این امر بوده است. Emdal et al (2003) برای تعیین تأثیر کیفیت‌های مختلف آب آبیاری بر نفوذپذیری نهایی خاک در آبیاری جویچه‌ای پژوهشی را در مزرعه دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام دادند. در این راستا تغییرات نفوذپذیری نهایی خاک در آبیاری جویچه‌ای با روش جویچه‌ی مسدود در دو حالت وجود و نبود گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد

از جمله ویژگی‌های خاک‌های زراعی مناسب آن است که علاوه بر ذخیره‌ی مقادیر قابل توجهی آب، اجازه‌ی انتقال یا نفوذ آب را نیز به‌راحتی فراهم سازد. حرکت آب در خاک معمولاً شامل فرایند نفوذ<sup>۱</sup> و توزیع مجدد<sup>۲</sup> آن است (Alizadeh, 2001) نفوذپذیری ضعیف خاک با ایجاد سله، تجمع آب در سطح خاک و عدم تهویه، تأمین آب گیاه را دشوار می‌نماید. در ابتدای ورود آب به خاک، سرعت نفوذ زیاد است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد و بالاخره به سرعت نفوذ نهایی کم می‌شود. نفوذپذیری نهایی خاک از مشخصات مهم هر خاک است و روش‌های مختلفی برای تعیین مقدار آن ارائه شده‌است. یکی از این روش‌ها، استفاده از جویچه‌ی مسدود است. در این روش از اطلاعات نفوذسنج جویچه‌ی مسدود در زمان چند ساعت استفاده شده است. روش دیگر تعیین سرعت نفوذپذیری نهایی استفاده از اطلاعات و داده‌های پیشروی است. در این روش با استفاده از معادلات توازن حجمی و زمان پیشروی نفوذپذیری نهایی خاک تعیین می‌شود. روش دیگر تعیین نفوذپذیری نهایی خاک، برآورد این مقدار با استفاده از جداول ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت خاک امریکا<sup>۳</sup> است. روش دیگر استفاده از اطلاعات ورودی-خروجی<sup>۴</sup> است که باید دبی ورودی و خروجی در ابتدا و انتهای جویچه اندازه‌گیری شود. یکی از عوامل موثر در نفوذپذیری، شوری و سدیمی بودن آب آبیاری است. حدود ۳۳ درصد از تمامی اراضی تحت آبیاری جهان را خاک‌های شور تشکیل می‌دهند. هر ساله حدود ۶ میلیون هکتار از این اراضی به دلیل مسائل زهدار بودن و شوری از بهره‌برداری ساقط می‌شوند. به‌علاوه در حدود ۴۰۵ میلیون هکتار از اراضی از نظر آب‌های شور زیرزمینی مشکل دارند. در ایران بر اساس برآوردهای مختلف ۲۴-۱۶ میلیون هکتار از اراضی به درجات مختلف با شوری روبه‌رو است (Pakparvar and Sadati, 2003). مشکلاتی نظیر افزایش پتانسیل اسمزی خاک و جلوگیری از بهره‌برداری کامل آب توسط گیاه از شور بودن خاک ناشی می‌شود.

<sup>1</sup> Infiltration

<sup>2</sup> Redistribution

<sup>3</sup> -Soil Conservation Service

<sup>4</sup> Inflow-Outflow

ریز درون آب و ترسیب آن‌ها در ذرات درشت و بسته شدن برخی از منافذ عبور جریان، عامل دیگری برای کاهش نفوذ در خاک است. نسبت نفوذ حساسیت زیادی به سدیم تبدالی، غلظت املاح و مقادیر PH خاک دارد. به طوری که تحت تأثیر این عوامل هدایت هیدرولیکی لایه‌های سطحی دو تا سه برابر کاهش می‌یابد (Hillel, 1981). به منظور بررسی کیفی آب آبیاری مصرفی و در نظر گرفتن خطر کاهش نفوذ آب به خاک جداول و نمودارهایی نظیر ویل کاکس که در همه آن‌ها از معیار EC و SAR استفاده می‌گردد (Alizadeh, 2001). به طور کلی اثرات سدیم علاوه بر کاهش مقادیر نفوذ، با ایجاد مقاومت در برابر توسعه ریشه باعث کم شدن مقادیر آب قابل دسترس گیاه می‌گردد و همچنین به سبب ایجاد رواناب بیشتر سبب فرسایش خاک می‌شود. از آنجا که شوری (شامل کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم) باعث بهبود وضع نفوذ و سدیمی بودن باعث کاهش آن می‌شود، لذا ترکیب این دو فاکتور در تعیین خطر احتمالی آب آبیاری برای نفوذپذیری حائز اهمیت است (Haghnia, 1996). به منظور شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک، از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. این روش‌ها یا با استفاده قانون بقای جرم و بقای انرژی و تلفیق آن‌ها به یکسری معادلات ریاضی مانند معادله فیلیپ و گرین-آمپت منجر می‌گردد و یا آنکه با استفاده از روابط تجربی نظیر کاستیاکف، هورتن و غیره می‌توان معادله حاکم بر پدیده نفوذ را به دست آورد (Vghefi and Movahed, 2011). رهنما و رضایی مقدم (Rezaei moghadam, 2007) برای تعیین ضرایب چهار مدل نفوذ آب در خاک به روش استوانه‌های مضاعف طی پژوهشی در اطراف گل گهر سیرجان، ضرایب چهار مدل نفوذ را محاسبه و پس از ارزیابی مدل‌ها بیان کردند که مدل فیلیپ بهترین مدل برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در منطقه است.

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که سدیم یکی از عوامل کاهش نفوذپذیری در خاک است، اما در تحقیقات مورد بررسی، اثر آبیاری مکرر با آب شور سدیمی در مقیاس مزرعه‌ای بر نفوذپذیری خاک کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. از این رو هدف این پژوهش،

که با افزایش نسبت جذبی سدیم، سرعت نفوذپذیری نهایی خاک در پایان دوره به صورت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. خاک‌های دارای EC بیشتر از  $4 \text{ ds/m}$  و ESP بیشتر از ۱۵ درصد جزء خاک‌های شور-سدیمی دسته‌بندی می‌شوند. علاوه بر تشخیص شوری که بر پایه‌ی اندازه‌گیری‌های EC انجام می‌شود، SAR آب آبیاری یا SAR محلول خاک، یا ESP خاک در بررسی مقدار سدیمی بودن خاک به کار می‌روند. اما به منظور کاهش زمان و هزینه‌ی تشخیص، انجمن خاک‌شناسی آمریکا پیشنهاد کرده است که نسبت جذبی سدیم (SAR) در عصاره‌ی اشباع برای توصیف صفات اختصاصی خاک‌های سدیمی به کار رود. برای سهولت کار، چنین مقرر شد که عدد ۱۵ به عنوان خط جداسازی وضعیت سدیمی و غیرسدیمی در نظر گرفته شود. همان‌طور که در حد شوری (یا رسانایی الکتریکی) بیشتر به عنوان زنگ خطر کلی در نظر گرفته می‌شود تا به عنوان عددی صرفاً خاص، مقادیر SAR نیز در گستره‌ی کلی ۱۰ تا ۲۰ را باید بالقوه خطرناک تلقی نمود و موضع را باید با توجه با وضعیت مدیریت پیش‌بینی شده دقیق‌تر بررسی کرد (Alizadeh, 2001). به طور کلی حرکت آب در خاک تحت تأثیر اختلاف پتانسیل هیدرولیکی بین دو نقطه صورت می‌گیرد. در حرکت قائم نیروی جاذبه نیز در حرکت آب موثر است. میزان نفوذپذیری خاک به عواملی مثل ارتفاع آب اعمال شده، ساختمان خاک و بافت آن بستگی دارد. بافت خاک نقش مهمی در حرکت آب دارد. همچنین نقش آن در زمینه‌ی تأثیر سدیم و شوری بر خصایص نفوذ، غیر قابل انکار است. خاک‌های شنی منافذ بزرگتری دارند و آب بیشتری را از خود عبور می‌دهند. پراکندگی نیز در خاک‌های رسی به دلیل داشتن سطح ویژه بیشتر و در نتیجه واکنش بیشتر با یون‌ها تک‌ظرفیتی نظیر سدیم، محتمل‌تر است. بین انواع کانی خاک‌ها نیز کانی مونت موریلونیت، یون‌های سدیم را بیشتر از ایلیت و کائولینیت احاطه نموده و تورم بیشتری نیز دارد (Haghnia, 1996). تراکم خاک عامل معمول کاهش نفوذ آب در خاک است که به خصوص در ابتدای فصل زراعی و تحت تأثیر آبیاری‌های اولیه روی می‌دهد. همچنین معلق شدن ذرات

<sup>1</sup> bound

آبیاری جویچه‌ای و شبیه‌سازی رفتار خاک با معادله فیلپ است.

بررسی اثر واقعی آبیاری با آب شور-سدیمی بر مقادیر نفوذپذیری خاک‌ها و شبیه‌سازی رفتار خاک در آبیاری مکرر با آب با کیفیت مذکور در مقیاس مزرعه‌ای در

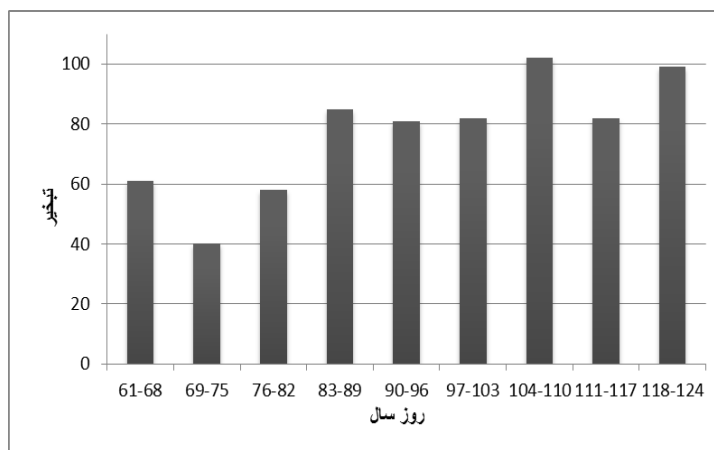
جدول ۱- خطر کاهش نفوذپذیری خاک در اثر آبیاری با آب شور و سدیمی (Alizadeh, 2001)

تأثیر شدید EC(dS/m)	کم اثر EC(dS/m)	بی‌اثر EC(dS/m)	SAR
<۰/۲	۰/۲-۰/۷	>۰/۷	۰-۳
<۰/۳	۰/۳-۱/۲	>۱/۲	۳-۶
<۰/۵	۰/۵-۱/۹	>۱/۹	۶-۱۲
<۱/۹	۱/۹-۲/۹	>۲/۹	۱۲-۲۰
<۲/۹	۲/۹-۵	>۵	۲۰-۴۰

### مواد و روش‌ها

از کف هر جویچه برداشته شد. آبیاری به عمق ۵ سانتیمتر هر هفته یکبار در هر ۶ جویچه اعمال شد. با در نظر گرفتن این که عوامل متعددی نظیر: الف) تراکم خاک متأثر از ارتفاع آب آبیاری ب) تعلیق ذرات ریز و حرکت آن‌ها به درون منافذ درشت و مسدود نمودن آن‌ها ج) ریشه‌ی گیاه د) وجود لانه‌ی جانوران در خاک ر) تأثیر یون‌های وارد شونده از راه آب آبیاری، بر تغییرات زمانی نفوذ آب به داخل خاک موثرند. لذا به منظور بررسی تأثیر یون‌های محلول در آب آبیاری بر نفوذپذیری خاک و حذف دیگر عوامل موثر بر نفوذ خاک تمهیدات زیر در نظر گرفته شد. از آنجا که ریشه گیاه باعث تغییر در نفوذ می‌شد، در آزمایش از گیاه استفاده نشد. همچنین به-منظور حذف عامل تراکم و ترسیب ذرات که به طور طبیعی در آبیاری با کیفیت مناسب نیز رخ می‌دهد، اولین آزمایش نفوذ مطابق با سومین آبیاری هفتگی انجام شد. به این ترتیب با اطمینان زیادی می‌توان تغییرات زمانی آبیاری ششم و آزمایش سوم اندازه‌گیری نفوذ در آبیاری دهم و مطابق با روز ۱۲۴ سال انجام شد. همچنین مقادیر تبخیر تجمعی از روی داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی محاسبه و در شکل ۱ برای طول دوره آزمایش نشان داده است.

در این پژوهش تأثیر آب آبیاری شور-سدیمی بر روی خصوصیات نفوذ خاک از آبی با شوری ۱۲ dS/m و SAR برابر ۳۲ مورد ارزیابی قرار گرفته است. آب آبیاری با محلول ساختن نمک رودخانه با خلوص کلرید سدیم برابر ۹۵ درصد، در آب معمولی تهیه شده و خاک مورد استفاده نیز از جنس لوم رسی با شوری اولیه ۱/۷۵ dS/m بود. بعد از انجام سه آبیاری سنگین، چگالی ظاهری لایه‌های مختلف به طور متوسط ۱/۳۵ gr/cm<sup>3</sup> اندازه‌گیری شد. سپس در سطح خاک، ۶ جویچه‌ی انتهاسته، به طول ۲/۶ متر به ترتیب با عرض جویچه ۰/۴ و عرض پشته ۱/۲ متر احداث شد. جویچه‌ی کناری به دلیل شبیه‌سازی وضعیت مزرعه و تأثیر نفوذ از طرفین احداث شده بودند و آزمایش نفوذ در جویچه‌های وسط انجام شد. برای جلوگیری از فرسایش جویچه در آغاز هر آبیاری، پوششی پلاستیکی در کف آن قرار داده شد و سپس به آرامی پوشش پلاستیکی مقادیر نفوذ و سرعت نهایی نفوذ آب به داخل خاک را به تأثیر کیفیت آب آبیاری نسبت داد. شروع آبیاری منطبق بر روز ۶۱ سال و انتهای دوره‌ی مطابق با روز ۱۲۴ سال بود و در این فاصله ده آبیاری با فاصله یک هفته اعمال شد. اولین آزمایش اندازه‌گیری نفوذ منطبق بر آبیاری سوم در روز ۷۵ سال، آزمایش دوم در روز ۹۶ سال و منطبق بر



شکل ۱- مقادیر تبخیر تجمعی در طول دوره آزمایش

برای ارزیابی نتایج نفوذپذیری اندازه‌گیری شده با مدل‌های کاستیاکوف و فیلیپ از معیارهای ارزیابی خطا شامل دو معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) استفاده شد. که در این روابط (Pi) مقادیر شبیه سازی شده و (Oi) مقادیر اندازه‌گیری یا مشاهداتی است.

$$RMSE = \left( \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (4)$$

### نتیجه‌گیری و بحث

حجم و ارتفاع آب در جویچه‌های میانی در همه‌ی نوبت‌های آبیاری اندازه‌گیری شده و منحنی ارتفاع-حجم آب با داده‌های میانگین برای دو جویچه‌ی میانی در شکل ۲ نمایش داده شده است. با مشاهده‌ی این منحنی می‌توان گفت سه زمان آبیاری، سطح مقطع جویچه‌ها در طول دوره تغییر نداشتند. بنابراین می‌توان گفت که در حین سه آزمایش نفوذ، ارتفاع آب آبیاری بر تغییرات زمانی نفوذ بی‌اثر بوده است.

مراحل اندازه‌گیری نفوذ برای روش جویچه‌ی انتهابسته عبارت بودند از الف) اندازه‌گیری سطح مقطع جویچه در فواصل متفاوت از ابتدای آن؛ ب) تهیه‌ی منحنی ارتفاع آب در جویچه در برابر حجم آب موجود در آن؛ ج) اندازه‌گیری ارتفاع آب در لحظات مختلف آبیاری در جویچه نسبت به زمان؛ د) تبدیل ارتفاع آب به مقادیر نفوذ تجمعی؛ ه) ترسیم منحنی نفوذ تجمعی و زمان؛ و) ترسیم منحنی سرعت نفوذ در برابر زمان.

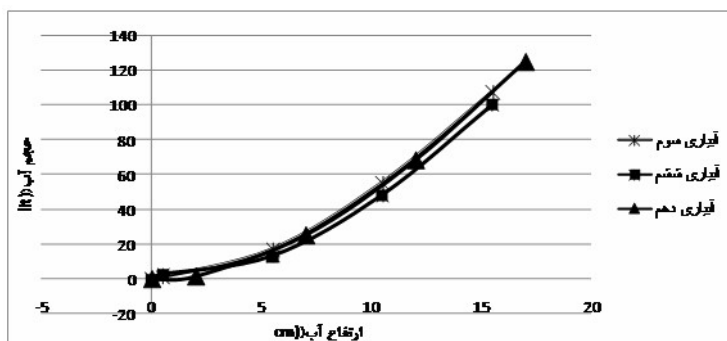
برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، معادلات نفوذ کاستیاکوف-لوییز و فیلیپ به داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی نفوذ تجمعی برازش داده شد. معادله‌ی کاستیاکوف با رابطه شماره ۲ نمایش داده شده است.

$$Z = at^b + ct \quad (1)$$

که در این رابطه Z مقدار نفوذ تجمعی بر حسب (cm)، t زمان بر حسب (min) و a، b و c ضرایب تجربی هستند. همچنین معادله‌ی فیلیپ با رابطه‌ی شماره ۳ نشان داده شده است که در آن S پارامتر نفوذ در ابتدای زمان آبیاری

بر حسب  $(\frac{cm}{min})^{0.5}$ ، A ضریب ثابت جذب در انتهای آبیاری بر حسب (cm/min)، Z مقدار نفوذ تجمعی بر حسب (cm) و t زمان بر حسب (min) است.

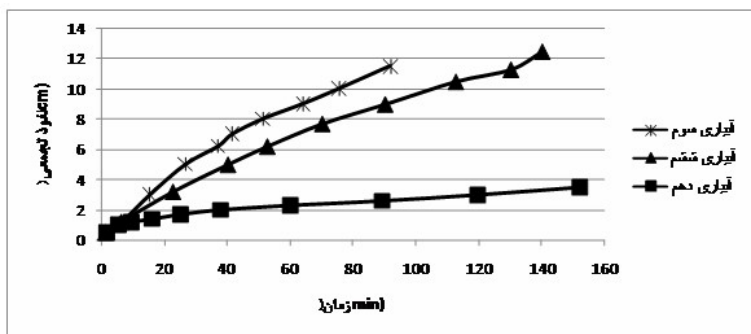
$$Z = St^{0.5} + At \quad (2)$$



شکل ۲- منحنی ارتفاع-حجم آب موجود در جویچه‌های وسط در سه آزمایش

کاهش نفوذپذیری از طریق افزایش زمان نفوذ حجم ثابتی از آب آبیاری است. با در نظر گرفتن زمان ۹۰ دقیقه از آغاز هر آزمایش، مقادیر نفوذ جمع‌ی به ترتیب ۱۲/۵۸، ۸/۸ و ۲/۷۶ سانتیمتر اندازه‌گیری شد. اختلاف مقادیر نشان‌دهنده تأثیر شدید یون‌های حل‌شده در آب آبیاری است. این مساله در نمودار سرعت نفوذ آب در خاک در شکل ۴ به وضوح مشخص است.

اندازه‌گیری مقادیر نفوذ جمع‌ی در سه آزمایش مذکور حاکی از تفاوت قابل ملاحظه بین منحنی‌های نفوذ جمع‌ی در برابر زمان است (شکل ۳). با توجه به شکل مذکور می‌توان گفت که کل حجم آب واردشده به جویچه‌ها در آبیاری سوم در زمان ۹۲ دقیقه، در آبیاری ششم در حدود ۱۴۰ دقیقه و در آبیاری دهم در حدود ۱۵۵ دقیقه در خاک نفوذ نموده است. تفاوت در زمان‌های فوق منعکس‌کننده اثر یون‌های نمک کلرید سدیم در



شکل ۳- منحنی نفوذ تجمعی و زمان در سه آزمایش نفوذ

ارزیابی آن در سه آزمایش نفوذ در آبیاری سوم، ششم و دهم در جدول ۲ نشان داده شده است.

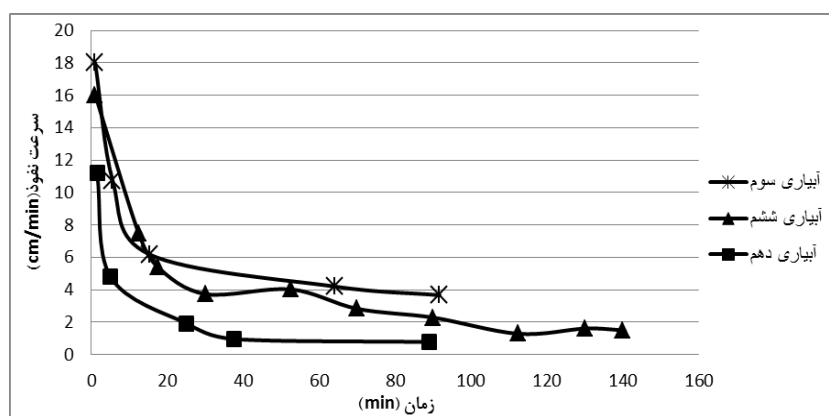
ضرایب معادله‌ی کاستیاکوف-لوییز برآزش داده شده بر داده‌های نفوذتجمعی و نیز مقادیر پارامترهای آماری

جدول ۲- ارزیابی مشاهدات و مدل کاستیاکوف لوییز

نوبت آبیاری	$R^2$	MBE	RMSE	c	b	a
آبیاری سوم	۰/۹۸	-۰/۰۴	۰/۲۱۱	-۱/۲۷۰	۰/۹۶۷	۱/۶۲۱
آبیاری ششم	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۱۱۵	-۰/۲۲۶	۰/۹	۰/۵۱۲
آبیاری دهم	۰/۹۷	-۰/۰۰۲	۰/۰۷۳	۰/۰۰۳۴	۰/۳۳۴	۰/۵۳۶

مدل مذکور مقادیر نفوذ تجمعی را در آبیاری سوم و دهم بیشتر از مقادیر واقعی (MBE کمتر از صفر) ولی در آبیاری ششم مقادیر نفوذ را کمتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است (MBE بزرگتر از صفر).

مقدار آماره RMSE بزرگی خطا و معیار MBE میزان انحراف از خط نیمساز است. نتایج حاکی از آن است که مدل کاسیتاکوف لوییز با دقت مناسبی هر سه آبیاری را شبیه‌سازی می‌نماید. اما دقت آن در آبیاری دهم نسبت به دو آبیاری اولیه بیشتر بوده است (RMSE برابر ۰/۰۷۳).



شکل ۴- منحنی سرعت نفوذ در برابر زمان برای سه آزمایش

آزمایش می‌توان گفت روش فیلیپ به خوبی بر داده‌های واقعی نفوذ برازش یافته و توانایی پیش‌بینی نفوذ در شرایط این آزمایش را در دوره‌های مختلف دارا است. مقدار مثبت پارامتر MBE در آبیاری سوم و ششم نشان داد که در این دو آزمایش مقادیر برآوردشده با معادله فیلیپ به‌طور کلی از مقادیر اندازه‌گیری بیشتر و در آزمایش آبیاری دهم کمتر بوده است. همچنین ارزیابی نتایج شبیه‌سازی داده‌های نفوذ با آماره RMSE بزرگی خطا و معیار MBE حاکی از آن است که مدل فیلیپ به خوبی توانسته است، تغییرات نفوذ پذیری خاک ناشی از آبیاری شور سدیمی را برآورد نماید. همچنین دقت شبیه‌سازی در انتهای دوره‌ی آزمایش نسبت دوره‌های قبل از آن بهتر شده بود. البته مقادیر منفی حاصل برای آماره MBE در آبیاری سوم و ششم نشان دهنده آن بود که مقادیر برآورد شده توسط مدل بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. اما این مقادیر برای آبیاری دهم مثبت و برابر ۰/۰۲ محاسبه شده است که نشانگر کمتر برآورد نمودن نفوذ توسط مدل فیلیپ در انتهای دوره است.

مقادیر سرعت نفوذ نهایی در سه آزمایش نفوذ به ترتیب ۳/۶۴، ۲/۱۶ و ۰/۶۹ سانتیمتر بر ساعت است. محاسبه‌ی درصد اختلاف سرعت نفوذ بین هر دو آزمایش نفوذ بیانگر ۴۰/۶ درصد کاهش نفوذ بین آبیاری سوم تا ششم و ۶۸ درصد بین آبیاری ششم تا دهم است. درصد کاهش نفوذ از ابتدا تا انتهای دوره در فاصله بین آبیاری سوم تا دهم نیز ۸۱ درصد است.

برای تجزیه و تحلیل بیشتر داده‌ها، معادله‌ی نفوذ فیلیپ نیز به داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذ تجمعی برازش داده شد. برای برازش معادله فیلیپ به داده‌های نفوذ از نرم افزار solver در اکسل استفاده شد و با روش حل معکوس از داده‌های مزرعه‌ای برای به دست آوردن بهترین مقادیر پارامترهای معادله‌ی فیلیپ (پارامترهای A و S) استفاده شد. در ادامه مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده با مدل فیلیپ در جدول ۳ به کمک پارامترهای آماری مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مقدار RMSE اندازه‌گیری‌شده در سه آزمایش مقادیر قابل قبولی را نشان می‌دهد و در انتهای دوره مقادیر کوچکتری از آن به دست آمد. با توجه به معیار MBE در سه



جدول ۳- ارزیابی مشاهدات و مدل نفوذپذیری فیلیپ

S(cm/min <sup>0.5</sup> )	A(cm/min)	RMSE	MBE	R <sup>2</sup>	نوبت آبیاری
۰/۵۹۶	۰/۰۶۶	۰/۳۶۱	-۰/۰۴۸۴	۰/۹۸۸	آبیاری سوم
۰/۵۱۲	۰/۰۴۴۴	۰/۲۱۱	-۰/۰۳۱۱	۰/۹۹۷	آبیاری ششم
۰/۳۸۱	-۰/۰۰۹۱	۰/۱۱۷	۰/۰۲	۰/۹۸۵	آبیاری دهم

تحقیق را در محدوده‌ی بی‌خطر قرار می‌دهد (جدول ۱). علت این کاهش شدید نفوذ آن بود که الف) شوری اولیه‌ی خاک مورد آزمایش در مقایسه با شوری آب آبیاری از مقدار کمی برخوردار بود و با آبیاری‌ها مکرر، مقادیر زیادی یون کلر و سدیم (۹۵ درصد NaCl) وارد آن شده‌است. به علت کم بودن عناصر دیگر نظیر کلسیم و منیزیم نسبت به سدیم، ساختمان خاک شدیداً تحت تأثیر یون‌های تک ظرفیتی سدیم قرار گرفته و ذرات خاک دچار پراکندگی شدید شده‌است که این مساله در نتایج تحقیق رودس (Rhodes, 1992) نیز ذکر شده است. ب) دلیل اینکه در خلال آبیاری ششم تا دهم فاکتور سرعت نفوذ نهایی کاهش شدیدتری نسبت به آبیاری سوم تا ششم داشته آن است که اولاً مقادیر املاح موجود در خاک در انتهای دوره نسبت به اواسط آن بیشتر بوده و در نتیجه تأثیرات مخرب آن‌ها نیز افزایش یافته است. ثانیاً به دلیل حادث شدن فصل گرم سال در اواخر دوره (شکل ۳)، به دلیل تبخیر بیشتر از سطح خاک و عدم آبشویی مناسب املاح از سطح اطلاعات ویژه‌ای در زمینه‌ی تأثیر کاتیون‌های تبادلی و غلظت کلی املاح و دیگر فاکتورهای شیمیایی خاک در اختیار داشت و همچنین در زمینه‌ی کاربری اطلاعات مذکور در اصلاح خاک و بهبود نفوذپذیری خاک به نحو احسن از تجربیات موجود استفاده نمود.

بنابراین در مجموع ارزیابی مشاهدات با پارامترهای آماری برای هر سه آزمایش نفوذ، نشان از تفاوت اندک مدل فیلیپ با داده‌های مشاهداتی دارد. هر چند که مدل کاستیاکوف برازش نسبتاً بهتری نسبت به مدل فیلیپ داشته است. با این حال هر دو مدل در محدوده مناسبی از دقت، بر داده‌های نفوذ برازش یافته‌اند. این نتایج با گزارش رهنما و رضایی مقدم (Rahnema and Rezaei, 2007) که مدل فیلیپ را برای برازش داده‌های نفوذ مدل مناسبی معرفی نمودند، همخوانی دارد. به‌طور خاص با توجه به تحقیق انجام‌شده مشخص شد که آبیاری با آب شور-سدیمی با EC ۱۲ dS/m و SAR برابر ۳۲، تأثیر شدیدی بر نفوذپذیری یک خاک از جنس لوم رسی داشته است. به‌طوری‌که در فاصله‌ی هفت هفته تا ۸۱ درصد در سرعت نفوذ نهایی آن کاهش ایجاد شده است. این درحالی است که مشاهده‌ی جداول و نمودارهای ارائه شده در زمینه‌ی در نظرگرفتن خطر کیفی آب آبیاری برای نفوذپذیری خاک، آب آبیاری استفاده شده در این خاک، تجمع یون سدیم در سطح جویچه در اواخر دوره بیشتر و اثر تخریبی آن تشدید شده است. با وجود رسانایی الکتریکی مناسب آب به‌کاررفته از آنجا که عمده-ی املاح موجود در آن از نوع کلرید سدیم بوده است، سهم کاتیون‌های دو ظرفیتی در افزایش رسانایی الکتریکی آب موجود بسیار اندک است. به‌طوری‌که این یون‌ها نتوانسته‌اند از تخریب ساختمان خاک توسط یون سدیم بکاهند. برای استفاده از مواد اصلاحی نیز لازم است که

منابع

- Akhavan Ghalibaf M. 1994. Study of the causes of salinization and alkalinity of Zarandieh series soils and its effect on evolution (pedogenesis) of this series in Rudasht region of Isfahan. Master of Science Thesis of Isfahan University of Technology. 97 pages (in Persian).
- Emdad M.R., Siadat H. 2003. The effect of different irrigation water qualities (salinity and sodium) on the final soil permeability in furrow irrigation. Eleventh Conference of the National Irrigation and Drainage Committee of Iran. No. 37. pp. 551-541(in Persian).
- Pakparvar M. and Saadat Y.A. 2003. Effect of saline water on the distribution of solutes in the profile of a clay cultivar under salinity-resistant species (Case study: Karbal Fars). Iranian Journal of Range and Desert Research. Volume 10. Number 3. Pages379-357(in Persian).
- Haghnia Gh. 1996. Soil recognition. Ferdusi University of Mashhad Publications (in Persian).
- Rahnama M.B., Rezaei Moghaddam H. 2007. Determining the coefficients of infiltration models and water infiltration equations in soil in the plains around Gol Gohar Sirjan iron mine (Baneh train plain). Ninth Irrigation and Evaporation Reduction Seminar. Irrigation Journal 326-09(in Persian).
- Alizaeh A. 2001. The relationship between water, soil and plants. Imam Reza University Press, Mashhad (in Persian).
- Vaghefi M., Movahedzadeh M. 2011. Investigation of Philip permeability model using the results of double cylinder testing in Mand catchment (Dashti city-Bushehr province). Marine Science and Technology. No. 58. Pages 37-29(in Persian).
- Hillel D.1981. Applications of Soil Physics. <https://doi.org/10.1016/B978-0-123-48580-9.X5001-9>.
- Krista E. P. 2003. The Basics of Salinity and Sodicity Effects on Soil Physical Properties. paper of Nikos, J, Warrence.
- Rhoades J.D.1992. The use of saline waters for crop production. FAO. Irrigation and Drainage Paper 48.
- Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892–898.