



انتخاب مدل بهینه نفوذ آب در خاک (مطالعه موردی: اراضی جهاد نصر استان خوزستان)

- حمید زارع ابیانه^۱، احمد خسرابی^۲، نیازعلی ابراهیمی پاک^۳، آرش تافته^۴، مهدی جوزی^۵
 ۱. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
 ۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
 ۳. دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
 ۴. استادیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
 ۵. استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
 تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

چکیده

فرآیند نفوذ آب به خاک از اجزای مهم چرخه هیدرولوژی و مدیریت آب در مزرعه بوده که اندازه‌گیری آن زمان‌بر و پرهزینه است. از این‌رو مدل‌های نفوذ به‌کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف - لوئیس، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، اورتون و هورتون براساس آزمایش استوانه‌های دوگانه در دو مزرعه گندم و لوبیا با هدف تعیین بهترین مدل نفوذ در اراضی جهاد نصر خوزستان بررسی شدند. نتایج نشان داد متوسط سرعت نفوذ در مزرعه گندم بین ۳۵/۴۷ سانتی‌متر در ساعت در رطوبت ۱۵/۸۳ درصد در قبل از آبیاری اول تا ۶/۳۵ سانتی‌متر در ساعت در رطوبت ۲۹/۲۰ درصد بعد از آبیاری دوم بود. متوسط سرعت نفوذ در مزرعه لوبیا با رطوبت اولیه ۱۶/۴۳ درصد قبل از آبیاری اول بین ۶۱/۶۳ تا ۱۳/۷۰ سانتی‌متر در ساعت در رطوبت ۲۳/۱۰ درصد بعد از آبیاری دوم بود. کم‌ترین و بیش‌ترین میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) مربوط به ضرایب مدل‌های نفوذ تجمعی در مزرعه گندم به ترتیب ۱/۲۱ و ۳/۱۴ سانتی‌متر با ضریب تبیین (R²) ۰/۹۳ و ۰/۹۵ و در مزرعه لوبیا ۱/۵۷ و ۳/۴۲ سانتی‌متر با R² ۰/۹۰ و ۰/۹۲ از معادلات فیلیپ و هورتون حاصل شد. کم‌ترین و بیش‌ترین RMSE مؤلفه سرعت نفوذ در مزرعه گندم ۰/۴۶ و ۰/۶۳ و در مزرعه لوبیا ۰/۹۰ و ۱/۴۰ سانتی‌متر بر دقیقه از معادلات فیلیپ و هورتون به‌دست آمد. رتبه‌بندی دقت مدل‌ها در مزرعه گندم و لوبیا نشان داد مدل‌های کوستیاکوف - لوئیس و هورتون در برآورد سرعت نفوذ و کوستیاکوف - لوئیس و فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی بیش‌ترین دقت را دارند.

کلیدواژه‌ها: روش استوانه‌های دوگانه، سرعت نفوذ، مدل‌های نفوذ، نفوذ تجمعی.

Selecting the Optimal Model of Water Infiltration into the Soil (Case study: Jahad Nasr lands of Khuzestan province)

Hamid Zare Abyaneh¹, Ahmad Khasraei², Niaz Ali Ebrahimi Pak³, Arash Tafteh⁴, Mehdi Jovzi⁵

1. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Graduated Master Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
5. Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran.

Received: November 23, 2019

Accepted: January 23, 2020

Abstract

The process of infiltration is one of the most important components of the hydrological cycle and field water management. The direct measurement of infiltration process is difficult, time spending and expensive. Therefore, infiltration models are used. Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Philip, Soil Conservation Service of America, Horton and Overton models infiltration based on double ring results carried out in two wheat and bean fields to the determination of best infiltration model in the Jahad Nasr Khuzestan province. The results showed that the mean infiltration rate in wheat field was 35.47 cm hr⁻¹ in 15.83 percent moisture before first irrigation up to 6.35 cm hr⁻¹ in soil moisture content of 29.20 percent after second irrigation. The average infiltration rate in the bean field with initial moisture was 16.43 percent before the first irrigation from 61.63 to 13.70 cm hr⁻¹ in the soil moisture content of 23.10 percent after the second irrigation. The lowest and highest RMSE for coefficients of cumulative infiltration models in wheat field were obtained from Philip and Horton equations with 1.21 and 3.14 cm with R² of 0.93 and 0.95 and the bean field was 1.57 and 3.42 cm with R² of 0.90 and 0.92, respectively. The lowest and highest RMSE of the infiltration rate in the wheat field were obtained Philip and Horton equations with 0.46 and 0.63 cm min⁻¹ and in the bean field were 0.90 and 1.40 cm min⁻¹, respectively. The accuracy rating of the studied models in two fields showed that Kostiakov-Lewis and Horton models have the highest accuracy in the infiltration rate and Kostiakov-Lewis and Phillip models in cumulative infiltration.

Keywords: Cumulative infiltration, Double ring method, Infiltration models, Infiltration rate.

مقدمه

نفوذ آب به خاک یکی از فرآیندهای مهم در فیزیک خاک و چرخه هیدرولوژی است که شکل‌های مختلفی از ورود آب به خاک را بیان می‌کند و در کنترل عملکرد گیاهان زراعی، انتقال آب و املاح، طراحی سیستم‌های آبیاری، افزایش راندمان و کاهش تلفات آب نقش دارد (۲۰ و ۲۷). شدت نفوذ تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند خاک‌ورزی، پوشش گیاهی، زبری سطح، تخلخل خاک، تراکم خاک و مقدار آب خاک است (۲۷). نفوذ آب به خاک در شرایط مزرعه‌ای و یا آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شود که برای تعیین مزرعه‌ای آن، روش‌های متفاوتی بر مبنای اندازه‌گیری سرعت جریان عمودی آب به خاک ذکر شده است. لیکن به علت تغییرات مکانی خواص فیزیکی خاک، مدل‌های (روش‌های) متفاوت تجربی و فیزیکی نیز برای آن پیشنهاد شده است (۳۳). جوادی و همکاران (۷) عملکرد بهتری از معادلات تجربی کوستیاکوف-لوئیس و هورتون را نسبت به معادله فیزیکی فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی تحت شرایط اولیه و مرزی مختلف گزارش نمودند. ارزیابی‌های یونگ‌یونگ و همکاران (۳۵) نشان داد معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس رابطه بین نفوذ تجمعی و زمان را بهتر از معادلات نفوذ فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون در جویچه‌های آبیاری توصیف می‌نماید. رحمتی و همکاران (۱۰) با اندازه‌گیری مقدار نفوذ به‌روشن نفوذسنج دیسکی در حوضه آبخیز ليقوان (آذربایجان شرقی) مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح‌شده، هورتون، گرین-آمپت، کوتیلیک-کرجا و فیلیپ را به ترتیب دارای دقت مناسب دانستند. احمدی و همکاران (۱) با آزمایش نفوذ تک‌استوانه‌ای خصوصیات هیدرولیکی خاک را برآورد نمودند. سلیمانی و همکاران (۱۵) با ارزیابی مدل‌های مختلف نفوذپذیری در سه کاربری مرتع، جنگل و زراعت در حوضه آبخیز

کاکاشرفلرستان نشان دادند که عملکرد مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا^۱ (SCS) در کاربری مرتعی و مدل فیلیپ در کاربری‌های جنگلی و زراعت در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری به‌روشن استوانه‌های دوگانه، بهتر است. طالبی کلان و همکاران (۱۶) در دو استان زنجان و اردبیل، دقت بهتر مدل کوستیاکوف-لوئیس در برآورد مقدار نفوذ آب به خاک در اراضی زراعی و باغی و مدل هورتون در اراضی بایر را گزارش نمودند. در گزارش آنان هم‌چنین متوسط نفوذ تجمعی حاصل از استوانه‌های دوگانه در کاربری زراعی و باغی به دلیل انجام عملیات زراعی بیش از کاربری بایر بود. نتایج کرمی و همکاران (۲۹) در دشت خوزستان بیان‌گر دقت بالای سه مدل کوستیاکوف-لوئیس، کوستیاکوف و گرین-آمپت نسبت به مدل‌های هورتون، SCS و مدل فیلیپ در مقایسه با داده‌های مشاهداتی استوانه‌های دوگانه بود. ذوالفقاری و همکاران (۳۶) برتری مدل کوستیاکوف-لوئیس را در مقایسه با مدل‌های هورتون، فیلیپ، SCS، کوستیاکوف-لوئیس اصلاح‌شده، کوستیاکوف، گرین-آمپت و اسوارترندرودر نسبت به داده‌های اندازه‌گیری از استوانه‌های دوگانه گزارش نمودند. ارزیابی کلی آنان نشان داد دقت مدل‌های کوستیاکوف-لوئیس و هورتون در رتبه‌های اول و دوم، گرین-آمپت و SCS در رتبه سوم، مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ در رتبه‌های چهارم و پنجم قرار دارند. آنان تعدد پارامترهای مدل کوستیاکوف-لوئیس را نسبت به دیگر مدل‌ها علت انعطاف‌پذیری و برتری این مدل دانستند. دامودارا و همکاران (۲۶) اندازه‌گیری مستقیم نفوذ آب به خاک را به دلیل اهمیت آن در چرخه طبیعی آب، مدیریت صحیح آبیاری مزارع، ذخیره رطوبتی خاک و عملکرد مطلوب زراعی در مناطق

1. Soil conservation service

و ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه و ۱۵/۴۰ ثانیه طول شرقی صورت گرفت. انتخاب مزارع در این تحقیق براساس تفاوت در کشت، تفاوت در روش آبیاری و تفاوت در توزیع اندازه ذرات بود. روش آبیاری مزرعه اول جویچه‌ای و مزرعه دوم نواری بود. از تفاوت‌های دیگر این دو قطعه، آیش یک‌ساله زمین تحت کشت گندم و عدم شخم آن در زمان آیش بود. دامنه میانگین ۱۰ ساله دمای هوا در منطقه پژوهش، طی سال‌های ۹۶-۱۳۸۷ برابر ۲۷-۲۳ درجه سانتی‌گراد، دامنه سالانه بارش ۴۷۰-۱۰۰ میلی‌متر، میانگین حداقل رطوبت نسبی ۴۰-۱۰ درصد و میانگین حداکثر رطوبت نسبی ۹۰-۷۰ درصد می‌باشد (۲).

نحوه انجام آزمایش

قبل از انجام آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های نفوذ آب به خاک، نمونه خاک از مزارع مورد پژوهش برداشت گردید و پس از انتقال به آزمایشگاه، بافت خاک به روش هیدرومتری و مثلث بافت خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و درصد سدیم تبادلی (ESP)، به روش شعله‌سنجی با دستگاه فلیم‌فتمتر^۱ مدل JENWAY PFP7، هدایت الکتریکی و pH عصاره اشباع خاک به ترتیب با EC متر مدل Cyber Scan 502 و pH متر مدل AZ 86502 تعیین شد. وزن مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه فلزی، وزن مخصوص حقیقی خاک به روش پیکنومتر، رطوبت نمونه‌ها با خشک‌نمودن در آون اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی اشباع نیز به روش بار ثابت اندازه‌گیری و منحنی رطوبتی خاک با دستگاه غشای سلولزی مدل DIK 3500 در فشارهای مختلف به دست آمد.

آزمایش‌های هر دو مزرعه در سه تکرار و پنج تیمار رطوبتی در یک روز قبل از آبیاری اول در ۲۷ تیرماه برای

خشک لازم می‌دانند. لیکن وقت‌گیری و هزینه زیاد اندازه‌گیری آن و تأثیرپذیری نفوذ از تغییرات ساختمان فیزیکی خاک در کاربری‌ها و عملیات مدیریتی مختلف، موجب استفاده از مدل‌های فیزیکی و یا تجربی برآورد نفوذ به‌عنوان یک روش سریع، ساده و کم‌هزینه شده است.

بررسی منابع نشان داد رفتار مدل‌های نفوذ در کاربری‌های مختلف، شرایط مزرعه‌ای متفاوت و اقلیم‌های گوناگون فرق داشته و هر مدل تحت شرایط خاص مورد ارزیابی، نسبت به دیگر مدل‌ها برتری دارد. عدم اطلاع از نفوذ سبب ایجاد خسارت زیاد به کشاورزان در مناطق دارای مشکل زهکشی، بروز محدودیت‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های کمی و کیفی آب و خاک می‌گردد. بنابراین در پژوهش حاضر سعی گردید تا در دو کشت زراعی (گندم و لوبیا) که در روش آبیاری (نواری و جویچه‌ای) و توزیع اندازه ذرات خاک با هم متفاوت بوده، مقدار نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج استوانه‌ای دوگانه، اندازه‌گیری و پس از مدل‌سازی با مدل‌های مختلف نفوذ آب به خاک، بهترین مدل نفوذ از لحاظ برازش با داده‌های مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش دو سری آزمایش نفوذ در دو ناحیه از زمین‌های کشاورزی سازمان جهاد نصر استان خوزستان در کیلومتر ۱۰ جاده شوشتر- اهواز انجام شد. آزمایش اول در زمین تحت کشت لوبیا، در مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۳ دقیقه ۵۳/۵۰ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه و ۵۴/۹۸ ثانیه طول شرقی انجام شد. آزمایش دوم نیز در زمین تحت کشت گندم با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه ۱/۸۵ ثانیه عرض شمالی

1.Flame Photometer

گردید. آزمایش تا ثابت شدن عمق آب نفوذی ادامه یافت. برای هر تکرار ۴ ستون داده شامل زمان‌های قرائت به صورت تجمعی از یک تا ۲۰۰ دقیقه، مقدار آب نفوذ یافته در هر قرائت، مقدار نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر و نسبت مقدار نفوذ بر بازه زمانی به عنوان سرعت نفوذ بر حسب سانتی متر بر دقیقه، تنظیم شد. به منظور تعیین بهترین مدل نفوذ در شرایط این پژوهش، مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، اورتون و هورتون مورد بررسی قرار گرفت. این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در تمامی این مدل‌ها Z نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر و t زمان بر حسب دقیقه است.

داده‌های زمان در محور افقی و داده‌های نفوذ و سرعت نفوذ در محور عمودی جای گرفتند. ترسیم شکل‌ها در محیط اکسل و تجزیه و تحلیل نتایج به روش رگرسیون غیرخطی در نرم افزار SPSS صورت گرفت. برای برآورد ضرایب مجهول در مدل‌های مختلف نفوذ، زمان به عنوان پارامتر مستقل، نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ به عنوان پارامتر وابسته برای هر یک از مدل‌ها تعریف گردید. با جایگزینی ضرایب محاسباتی در مدل‌ها، مقادیر نفوذ تجمعی محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری مقایسه گردید. بهترین ضرایب با استفاده از روش کم‌ترین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R²)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده (NRMSE)، انتخاب شدند.

مزرعه اول و ۳۰ آبان برای مزرعه دوم شروع و تا یک روز پس از آبیاری دوم به مدت ۱۶ روز ادامه یافت. تیمارهای رطوبتی شامل مقدار رطوبت خاک در یک روز قبل از آبیاری اول و دو، چهار، هشت و پانزده روز بعد از آبیاری اول بودند. برای اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب به خاک از سه جفت استوانه فلزی (استوانه‌های دوگانه) استفاده شد. الگوی جانمایی استوانه‌ها در سطح مزرعه برای هر سه تکرار به صورت مثلثی بود. در تمام مراحل فروری استوانه‌ها داخل خاک، نسبت به عمود بودن آن اطمینان حاصل گردید. با فشردگی دستی خاک در هر دو سوی محل تماس بیرون و درون استوانه‌ها از نشت احتمالی جریان آب و جریان ترجیحی ممانعت گردید. سطح داخلی استوانه کوچک نیز برای جلوگیری از تخریب ساختمان خاک به واسطه اضافه نمودن آب، با نایلون پلاستیکی پوشش داده شد. پوشش نایلونی در شروع اندازه‌گیری‌ها حذف و مقدار آب نفوذی با سطح سنج شناور در بازه‌های مختلف زمانی اندازه‌گیری و ثبت گردید. فواصل زمانی هر قرائت ۱، ۱، ۱، ۱، ۲، ۲، ۲، ۵، ۵، ۱۰، ۱۰، ۲۰، ۲۰، ۳۰، ۳۰، ۶۰ دقیقه و زمان کل آزمایش در هر تکرار ۲۰۰ دقیقه بود. زمان‌های قرائت در ابتدای آزمایش به دلیل خشکی خاک و نفوذ بیش تر آب کوتاه‌تر و با گذشت زمان به دلیل کاهش سرعت نفوذ آب به خاک طولانی‌تر لحاظ گردید. با نزول سطح آب درون استوانه‌ها از ۲۰۰ به ۵۰ میلی متر اقدام به اضافه نمودن آب

جدول ۱. مدل‌های نفوذ آب به خاک و ضرایب آن‌ها

مدل	شکل ریاضی مدل	پارامتر
کوستیاکوف	$Z=at^p$	a و b ضرایب تجربی (-)، Z نفوذ تجمعی (cm) و t زمان (min)
کوستیاکوف-لوئیس	$Z=at^p+F_0t$	F ₀ سرعت نهایی نفوذ (cm min ⁻¹)، a و b ضرایب تجربی (-)
فیلیپ سه جزئی	$Z=St^{0.5}+C_1t+C_2t^{1.5}$	C ₁ (cm min ⁻¹)، S ضریب جذبی (cm min ^{-0.5}) و C ₂ ضریب تجربی (-)
حفاظت خاک آمریکا	$Z=at^p+0.6985$	a و b تابعی از شماره منحنی نفوذ وابسته به نوع خاک (-)
اورتون	$Z=(2at)^{0.5}+Rt$	R سرعت نهایی نفوذ (cm min ⁻¹) و a ضریب تجربی (-)
هورتون	$Z=F_c t + [(F_1 - F_c)/E](1 - e^{-Et})$	F ₁ سرعت اولیه نفوذ، F _c سرعت نهایی (cm min ⁻¹)، E ثابت تناسب (-)

۲۴۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۳)، تحقیقات گریگوری و همکاران (۲۸) و واقفی و موحدزاده (۲۳) بود.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مزارع مورد مطالعه برای سه لایه ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ سانتی‌متر در جدول (۲) آمده است. بافت خاک هر دو مزرعه مطابق نتایج جدول (۲) در کلاس رسی سیلتی بود. نظری (۲۲) در مطالعه ۴۴۴۰ هکتار از اراضی منطقه میان‌آب در جنوب شوشتر نشان داد که بافت خاک این منطقه عمدتاً رسی سیلتی بوده و شوری خاک، ضعف زهکشی، سنگین‌بودن بافت و سطح آب زیرزمینی بالا از جمله محدودیت‌های منطقه است. میانگین سرعت نفوذ اولیه، نهایی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مزرعه گندم به ترتیب ۰.۸۶۴، ۶/۳۱ میلی‌متر بر ساعت و در مزرعه لوبیا ۰.۲۰۱۰، ۱۸ و ۴/۵ میلی‌متر بر ساعت از مزرعه لوبیا که دلیل بیش‌تر بودن مقادیر پارامترهای ذکرشده در مزرعه لوبیا می‌تواند ناشی از بیش‌تر بودن درصد اندازه ذرات شن، کم‌تر بودن درصد اندازه رس و بزرگ‌تر بودن میزان تخلخل در خاک مزرعه لوبیا باشد (جدول ۲). میانگین تخلخل خاک لایه صفر تا ۹۰ سانتی‌متر مزرعه لوبیا ۴۱/۴۷ درصد و مقدار متناظر آن در مزرعه گندم ۳۶/۲۹ درصد اندازه‌گیری شد. هم‌چنین برخی ویژگی‌های شیمیایی مربوط به خاک هر دو مزرعه، شامل هدایت الکتریکی، پی‌اچ، مجموع املاح محلول، ظرفیت تبادل کاتیونی و سدیم تبدالی در قبل از آبیاری اول و بعد از آبیاری اول در جدول (۳) آمده است.

مطابق نتایج جدول (۳) خاک مزرعه گندم با توجه به درصد سدیم تبدالی ۵/۶۲، هدایت الکتریکی ۴/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر، پی‌اچ کم‌تر از ۸/۵ در گروه خاک‌های شور و خاک مزرعه لوبیا با درصد سدیم تبدالی ۳/۸۶، هدایت الکتریکی ۲/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر، پی‌اچ کم‌تر از

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n ((I_p)_j - (I_m)_j)^2}{n}} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{j=1}^n ((I_p)_j - \bar{I_p})(I_m)_j - \bar{I_m})^2}{\sum_{j=1}^n ((I_p)_j - \bar{I_p})^2 \sum_{j=1}^n ((I_m)_j - \bar{I_m})^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n ((I_p)_j - (I_m)_j)^2}{n}}}{\bar{I_m}} \quad (3)$$

که در آن $\bar{I_m}$ و $(I_m)_j$ به ترتیب میانگین و مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده در گام زمانی λ_m بر حسب سانتی‌متر (و در سرعت نفوذ بر حسب سانتی‌متر در ساعت)، $\bar{I_p}$ و $(I_p)_j$ به ترتیب میانگین و مقدار نفوذ تجمعی برآوردشده در گام زمانی λ_p بر حسب سانتی‌متر (و در سرعت نفوذ بر حسب سانتی‌متر در ساعت) و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است. RMSE نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ به ترتیب بر حسب سانتی‌متر و سانتی‌متر در ساعت می‌باشد. مقدار آماره خطای برآوردشده مربوط به کل فرآیند نفوذ است. بهترین عملکرد آماره RMSE در مقادیر نزدیک به صفر می‌باشد (۱۷). جهت برگزیدن بهترین مدل نفوذ از روش رتبه‌بندی شاخص ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. در این روش به عملکرد هر مدل به تفکیک رطوبت‌های مختلف مزارع برای دو مؤلفه سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی، رتبه‌ای براساس معیار RMSE اختصاص یافت. رتبه کل هر مدل از جمع جبری رتبه‌ها و مرتب‌سازی ترتیب صعودی آن‌ها به دست آمد. رتبه مدل با کم‌ترین خطا عدد ۱ و رتبه دیگر مدل‌ها بر حسب افزایش میزان خطا عدد ۲ و بالاتر بود (۱۷).

برای ترسیم نمودار سرعت نفوذ و نمودار نفوذ تجمعی آب به خاک از میانگین هر سه تکرار استفاده شد. تمامی مراحل آزمایش نفوذ و ترسیم نمودارهای مرتبط با آن مطابق استاندارد انجمن آزمایش مواد آمریکا^۱ (۲۴)، نشریه شماره

1. American Society for Testing and Materials (ASTM)

۸/۵ در گروه خاک‌های غیر شور قرار دارد. دلیل شوری خاک مزرعه گندم، رهاسازی مزرعه به‌حالت آیش در سال قبل، عدم شخم زمین، وجود جریان کاپیلار پشته شور و عدم آبشویی اولیه آن است. نتایج حاصل از ویژگی‌های شیمیایی خاک در راستای نتایج سرخه‌نژاد و کشکولی (۱۳) است.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی خاک دو مزرعه مورد آزمایش

لایه خاک مزرعه لوبیا (سانتی‌متر)			لایه خاک مزرعه گندم (سانتی‌متر)			واحد	خصوصیت
۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰	۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰		
۴۷/۴۱	۴۴/۷۲	۴۴/۳۲	۴۸/۱۱	۴۸/۹۶	۴۵/۴۴	درصد	رس
۵۲/۰۳	۵۰/۴۹	۴۵/۶۴	۵۱/۶۹	۵۰/۰۸	۴۹/۸۴	درصد	سیلت
۰/۵۶	۴/۷۹	۱۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۹۶	۴/۷۲	درصد	شن
SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	-	بافت
۴۶/۸۳	۴۶/۲۵	۴۶/۸۱	۴۶/۱۱	۴۶/۵۳	۴۶/۱۸	درصد	درصد اشباع
۱/۲۳	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۴۲	۱/۴۹	۱/۴۲	گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن مخصوص ظاهری
۲/۲۳	۲/۲۴	۲/۲۴	۲/۳۲	۲/۲۲	۲/۲۱	گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن مخصوص حقیقی
۳۸/۶۵	۴۵/۹۷	۳۹/۷۸	۳۹/۴۸	۳۳/۱۷	۳۶/۲۲	درصد	تخلخل
۱۸/۰۰	۱۶/۱۰	۴/۵۰	۱۵/۷۹	۱۳/۶۶	۳/۷۸	درصد	رطوبت اولیه وزنی
۲۰۱۰	۲۰۱۰	۲۰۱۰	۸۶۴	۸۶۴	۸۶۴	میلی‌متر بر ساعت	سرعت نفوذ اولیه
۱۸	۱۸	۱۸	۶	۶	۶	میلی‌متر بر ساعت	سرعت نفوذ نهایی
۴/۵	۴/۵	۴/۵	۳/۱	۳/۱	۳/۱	میلی‌متر بر ساعت	هدایت هیدرولیکی اشباع
۳۶/۰۶	۳۶/۰۷	۳۶/۰۶	۳۶/۳۷	۳۶/۳۷	۳۶/۳۷	درصد	رطوبت ظرفیت زراعی
۱/۷۳	۱/۷۴	۱/۶۳	۳/۹۷	۳/۹۷	۳/۹۶	درصد	رطوبت نقطه پژمردگی

جدول ۳. برخی خصوصیات شیمیایی خاک‌های مزرعه اول (گندم) و مزرعه دوم (لوبیا)

مزرعه	خصوصیت	واحد	از آبیاری اول (روز)				
			۱ روز قبل	۲ روز بعد	۴ روز بعد	۸ روز بعد	۱۵ روز بعد
گندم	هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	۴/۳۹	۳/۷۵	۳/۹۴	۴/۲۱	۳/۷۷*
	بی‌اچ	-	۷/۴۰	۷/۳۶	۷/۴۶	۷/۴۹	۷/۴۴*
	مجموع املاح محلول	میلی‌گرم بر لیتر	۷۶۴	۶۵۴	۶۸۴	۷۳۹	۶۶۲*
	سدیم	میلی‌گرم بر لیتر	۶۵۵/۸۷	۴۴۷/۹	۵۳۷/۱۳	۶۰۶/۵۳	۴۷۷/۶۴*
	ظرفیت تبادل کاتیونی	میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک	۱۰/۰۹	۶/۰۶	۷/۵۴	۹/۰۷	۶/۵۱*
لوبیا	سدیم تبدالی	درصد	۵/۶۲	۴/۹۴	۵/۱۳	۵/۴۶	۴/۸۹*
	هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	۲/۷۹	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۳۵*	۰/۴۲
	بی‌اچ	-	۷/۱۴	۶/۷۹	۷/۴۴	۷/۳۳*	۷/۴۴
	مجموع املاح محلول	میلی‌گرم بر لیتر	۴۷۵	۷۴/۰	۷۵/۱	۶۱/۱۰*	۸۸/۴
	سدیم	میلی‌گرم بر لیتر	۵۸۶/۷۰	۴۳۷/۹۹	۴۸۷/۵۶	۴۰۸/۲۴*	۵۱۷/۳۰
لوبیا	ظرفیت تبادل کاتیونی	میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک	۶/۲۰	۱/۶۶	۱/۹۷	۱/۴۶*	۱/۹۸
	سدیم تبدالی	درصد	۳/۸۶	۱/۳۹	۱/۴۸	۱/۳۱*	۱/۴۰

* یک روز بعد از آبیاری دوم

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد حداکثر مقدار مؤلفه‌های نفوذ آب به خاک، به قبل از آبیاری اول که زمین دارای کم‌ترین مقدار رطوبت است تعلق دارد و با انجام اولین آبیاری و افزایش میزان رطوبت خاک مقادیر فوق کاهش می‌یابند. به طوری که مقادیر نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی با رطوبت اولیه ۱۵/۸۳ درصد برای مزرعه گندم به ترتیب ۱۵/۴ سانتی‌متر، ۱۳۲، ۳۵/۴۷، ۱/۳۳ سانتی‌متر بر ساعت است.

افزایش رطوبت خاک در مزرعه گندم از ۱۵/۸۳ درصد به ۳۱/۴۰ درصد با انجام اولین آبیاری سبب کاهش مقادیر نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی به ۶/۱ سانتی‌متر، ۵۴، ۶/۶۸ و ۰/۸۵ سانتی‌متر بر ساعت شد. در مزرعه لوبیا نیز نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی با رطوبت اولیه ۱۶/۴۳ درصد به ترتیب ۲۵/۷۵ سانتی‌متر، ۳۰۰، ۶۱/۶۳، ۳/۷۵ سانتی‌متر بر ساعت قبل از اولین آبیاری اندازه‌گیری گردید.

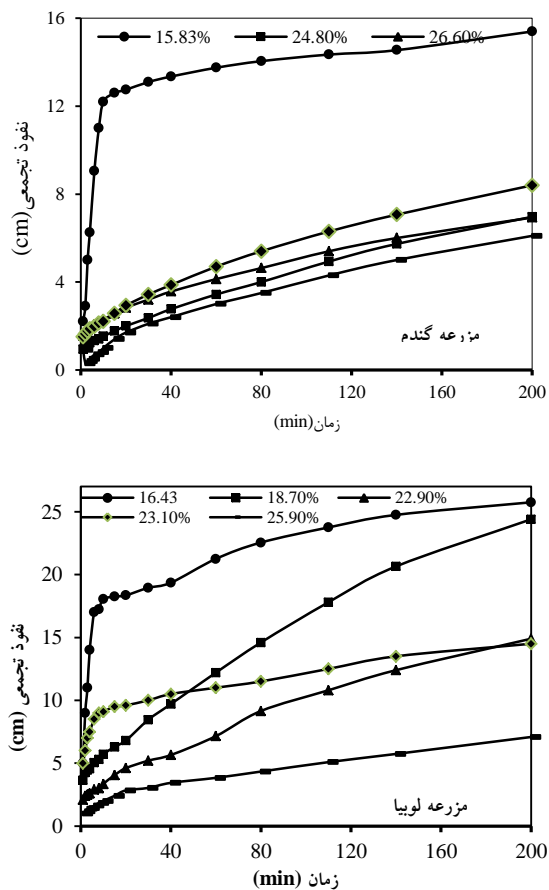
با انجام آبیاری اول، میزان هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدالی در مزرعه گندم از ۴/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۵/۶۲ درصد به ۳/۷۵ و ۴/۹۴ و در مزرعه لوبیا از ۲/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۳/۸۶ درصد به ۰/۴۳ و ۱/۳۹ کاهش یافت. ضمن آن‌که میانگین سدیم اندازه‌گیری شده طی ۵ مرحله، در مزرعه گندم ۵۴۵/۰۱ میلی‌گرم در لیتر و در مزرعه لوبیا ۴۸۷/۵۶ میلی‌گرم در لیتر بود (جدول ۳). سدیم یکی از مهم‌ترین نمک‌های محلول در آب و خاک است که با تغییر در خواص فیزیکی خاک سبب کندی رشد گیاه و کاهش عملکرد محصول می‌شود. از طرفی شوری به دلیل چسبندگی و تراکم خاک بر سرعت نفوذپذیری آب در خاک اثر کاهشی دارد (۱۱). شوری با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پراکنده‌شدن ذرات خاک و تخریب خاکدانه‌ها مؤثر است و سبب تشکیل سله‌های سطحی و تغییر در ضرایب توابع نفوذ می‌گردد (۷). مؤلفه‌های مختلف نفوذ در ۵ زمان قبل و بعد از اولین آبیاری برای هر دو مزرعه تحت کشت گندم و لوبیا در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. مقادیر مؤلفه‌های مختلف نفوذ و رطوبت قبل و بعد از آبیاری اول مزرعه

مزرعه	متغیر	واحد	۱ روز قبل	۲ روز بعد	۴ روز بعد	۸ روز بعد	۱۵ روز بعد
			از آبیاری اول	از آبیاری اول	از آبیاری اول	از آبیاری اول	از آبیاری اول
گندم	نفوذ تجمعی	سانتی‌متر	۱۵/۴	۶/۱	۸/۴	۸/۹۳	۶/۹۶*
	رطوبت حجمی	درصد	۱۵/۸۳	۳۱/۴۰	۲۶/۶۰	۲۴/۸۰	۲۹/۲۰*
	حداکثر سرعت نفوذ	سانتی‌متر بر ساعت	۱۳۲/۰	۵۴/۰	۹۰/۰	۹۴/۰	۵۶/۰*
	متوسط سرعت نفوذ	سانتی‌متر بر ساعت	۳۵/۴۷	۶/۶۸	۹/۱۰	۹/۰۴	۶/۳۵*
	سرعت نفوذ نهایی	سانتی‌متر بر ساعت	۱/۳۳	۰/۸۵	۱/۱	۱/۲۳	۰/۹۳*
لوبیا	نفوذ تجمعی	سانتی‌متر	۲۵/۷۵	۷/۰۸	۱۴/۵	۱۴/۹*	۱۸/۷۰
	رطوبت حجمی	درصد	۱۶/۴۳	۲۵/۹۰	۲۲/۹۰	۲۳/۱۰*	۱۸/۷۰
	حداکثر سرعت نفوذ	سانتی‌متر بر ساعت	۳۰۰	۶۰	۳۰۰	۱۲۶*	۲۱۹
	متوسط سرعت نفوذ	سانتی‌متر بر ساعت	۶۱/۶۳	۷/۷۱	۳۲/۳۳	۱۳/۷۰*	۲۳/۰۴
	سرعت نفوذ نهایی	سانتی‌متر بر ساعت	۳/۷۵	۱	۱/۳۵	۱*	۲/۵

* یک روز بعد از آبیاری دوم

خاک‌های سدیمی و خاک‌های دارای مقادیر بالای رس و سیلت، کم‌تر است که نتایج جدول (۳) نیز بیش‌تر بودن مقادیر رس، سیلت و سدیم خاک مزرعه گندم نسبت به مزرعه لوبیا را نشان می‌دهد. لادو و همکاران (۳۰) بیان داشتند نفوذپذیری خاک با افزایش میزان رس، کاهش و با افزایش ذرات شن زیاد می‌شود. همچنین کاهش شدت نفوذ آب در خاک به‌واسطه افزایش تورم در اثر عواملی نظیر آماس ناشی از حضور سدیم نیز می‌تواند رخ دهد. اثر رطوبت اولیه خاک بر سرعت نفوذ تجمعی خاک در قالب نمودارهای نفوذ متناظر با زمان، برای پنج مقدار رطوبت اولیه برای هر دو مزرعه در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. تغییرات نفوذ تجمعی در رطوبت‌های اولیه مختلف خاک در مزرعه گندم و لوبیا

مقادیر متناظر با آن پس از افزایش رطوبت به‌واسطه اولین آبیاری به ۷/۰۸ سانتی‌متر، ۶۰، ۷/۷۱ و ۱ سانتی‌متر بر ساعت کاهش یافت (جدول ۴). این تغییرات به‌خوبی تأثیر آبیاری در افزایش رطوبت خاک و دیگر مؤلفه‌های نفوذ در اولین اندازه‌گیری پس از آبیاری اول و دومین اندازه‌گیری پس از آبیاری دوم را نشان می‌دهد. به‌گونه‌ای که در رطوبت‌های کم مقدار مؤلفه‌های نفوذ زیاد و در رطوبت‌های بالا مقدار مؤلفه‌های نفوذ کم است. دربندی و همکاران (۹) با اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک نشان دادند که رطوبت اولیه سطح خاک تأثیر به‌سزایی بر روی نفوذ آب به خاک دارد و با افزایش رطوبت اولیه خاک از میزان سرعت نفوذ آب به خاک کاسته شده و در نتیجه نفوذ تجمعی کاهش می‌یابد. سپهوند و همکاران (۱۲) علت این امر را کاهش نیروی ماتریک خاک همگام با افزایش رطوبت خاک، غالب شدن نیروی ثقل و کم تأثیر بودن آن بر مقادیر مؤلفه‌های نفوذ نسبت به نیروی ماتریک در رطوبت‌های بالا گزارش نمودند. از طرفی مطابق نتایج جدول (۴) مقدار نفوذ تجمعی و دیگر مؤلفه‌های نفوذ در همه زمان‌های قبل و بعد از آبیاری در مزرعه لوبیا بیش از مقدار متناظر آن در مزرعه گندم است که می‌تواند به‌دلیل عدم انجام عملیات خاک‌ورزی در مزرعه گندم، عدم شخم زمین، عدم آب‌شویی و وجود جریان کاپیلاریته شور باشد. خاک‌ورزی با افزایش خلل و فرج خاک باعث افزایش نفوذ آب در خاک می‌شود (۸ و ۲۷). به‌همین ترتیب بیش‌تر بودن مقادیر نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی در همه زمان‌های اندازه‌گیری قبل و بعد از آبیاری علاوه بر نقش خاک‌ورزی می‌تواند ناشی از تفاوت پوشش گیاهی لوبیا و گندم (۲۵)، تفاوت سیستم ریشه‌ای افشان در گندم و راست در لوبیا (۵) و بهبود ساختمان خاک به‌دلیل بیش‌تر بودن تعداد آبیاری‌های لوبیا باشد. معمولاً نفوذ آب در

فرج ریز و درشت و بالا بودن پتانسیل مکش خاک است. در حالی که در رطوبت‌های بالا نقش خلل و فرج درشت نسبت به خلل و فرج ریز و نیروی ثقل نسبت به نیروی ماتریک در حرکت عمودی آب در خاک بیش‌تر است.

بهترین ضرایب مدل‌های نفوذ براساس کم‌ترین میانگین ریشه مربعات خطا برای دو مؤلفه نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ خاک‌های هر دو مزرعه در جدول (۵) آمده است. ضرایب، حاصل برازش معادلات نفوذ بر داده‌های آزمایش‌های استوانه‌های دوگانه می‌باشند. مطابق نتایج جدول (۵) مقادیر حداقل و حداکثر RMSE ضرایب در بین معادلات نفوذ تجمعی در مزرعه کشت گندم به ترتیب $1/21$ و $3/14$ سانتی‌متر با $R2$ $0/93$ و $0/95$ و $NRMSE$ $0/11$ و $0/29$ است و به معادلات فیلیپ و هورتون تعلق دارد. همین‌طور مقادیر حداقل و حداکثر RMSE برای سرعت نفوذ در خاک مزرعه گندم به ترتیب $0/46$ و $0/68$ سانتی‌متر بر دقیقه با $R2$ $0/71$ و $0/73$ و $NRMSE$ $0/77$ و $1/15$ مربوط به معادلات فیلیپ و اورتون می‌باشند. مقایسه میانگین مربعات خطا در جدول (۵) نشان می‌دهد معادله فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ کم‌ترین خطا و معادلات اورتون و هورتون بیش‌ترین خطا را در برآورد این مؤلفه‌ها در خاک مزرعه گندم دارند. مدل هورتون به دلیل تغییرات نمایی زمان، در دقایق اولیه آزمایش، مقادیر نفوذ را کم‌تر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند (۱۵).

از دیگر نتایج جدول (۵) آن است که هر شش مدل نفوذ در برآورد سرعت نفوذ نسبت به نفوذ تجمعی از خطای کم‌تر و انطباق بیش‌تری برخوردارند. در هر حال اختلاف خطای برآورد مقادیر نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ توسط مدل‌های مورد بررسی، در زمان گذر از مرحله غیراشباع به اشباع به دلیل حبس هوا در خلل و فرج خاک، طبیعت تغییرپذیر فرآیند نفوذ آب به خاک و تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی خاک هر دو مزرعه است.

در تأیید نتایج جدول (۲)، شکل (۱) نشان‌دهنده کاهش میزان نفوذ تجمعی خاک در هر دو مزرعه به‌ازای افزایش رطوبت اولیه خاک می‌باشد. در جدول (۴) نیز نفوذ تجمعی پس از آبیاری اول از $15/4$ سانتی‌متر به $6/1$ سانتی‌متر در خاک مزرعه گندم و از $25/75$ به $7/08$ سانتی‌متر در خاک مزرعه لوبیا کاهش یافته است. در شکل (۱) بیش‌ترین مقدار نفوذ تجمعی در خاک مزرعه گندم در همه زمان‌ها از دامنه $2/2$ سانتی‌متر تا $15/4$ سانتی‌متر به رطوبت اولیه $15/83$ درصد و در مزرعه لوبیا در دامنه $4/45$ سانتی‌متر تا $25/75$ سانتی‌متر به رطوبت اولیه $16/43$ درصد تعلق دارد.

در مقابل کم‌ترین مقدار نفوذ تجمعی برای مزرعه گندم از دامنه $0/9$ سانتی‌متر تا $6/1$ سانتی‌متر به رطوبت اولیه $31/4$ درصد و در مزرعه لوبیا از دامنه 1 تا $7/08$ درصد به رطوبت اولیه $25/9$ درصد مربوط است. به‌عبارتی در خاک مزرعه گندم به‌ازای $98/36$ درصد افزایش رطوبت اولیه خاک از $15/83$ به $31/4$ درصد، مقدار نفوذ تجمعی $144/4$ درصد، در دقیقه ابتدای آزمایش و $152/5$ درصد، در پایان 200 دقیقه آزمایش کاهش یافت. در خاک مزرعه لوبیا نیز با افزایش $57/64$ درصد رطوبت اولیه از $16/43$ به $25/9$ درصد، مقدار نفوذ تجمعی 200 درصد، در دقیقه ابتدای آزمایش و $263/5$ درصد، در پایان 200 دقیقه آزمایش کاهش یافت. نتایج فوق در راستای مطالعات سپهوند و همکاران (۱۲) مبنی بر کاهش میزان نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، سرعت نفوذ نهایی و متوسط سرعت نفوذ آب به خاک به‌واسطه کاهش نیروی ماتریک خاک به‌ازای افزایش رطوبت خاک است. شیب منحنی نفوذ تجمعی در بازه زمانی مشخص، نشان‌دهنده تغییرات سرعت نفوذ در آن بازه زمانی است که مطابق شکل (۱) شیب برای زمان‌های ابتدایی بیش‌تر و با گذشت زمان از شدت شیب کاسته شده است. زیاد بودن شیب در زمان‌های ابتدایی، به‌دلیل خشکی خاک، مشارکت خلل و

جدول ۵. ضرایب مدل‌های نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ

کشت	معادلات	نفوذ تجمعی	RMSE (cm)	R ²	NRMSE	سرعت نفوذ	RMSE (cm min ⁻¹)	R ²	NRMSE
کوستیاکوف		$Z=5.732t^{0.207}$	۲/۰۱	۰/۷۷	۰/۱۸	$F=1.187t^{-0.793}$	۰/۶۵	۰/۷۲	۱/۱
کوستیاکوف- لوئیس		$Z=5.972t^{0.176}+0.014t$	۲/۱۵	۰/۷۲	۰/۱۹	$F=1.051t^{-0.824}+0.014$	۰/۴۹	۰/۷۰	۰/۸۲
فیلیپ سه جزئی		$Z=4.544t^{0.5}-0.474t+0.016t^{1.5}$	۱/۲۱	۰/۹۳	۰/۱۱	$F=2.272t^{-0.5}-0.474+0.024t^{0.5}$	۰/۴۶	۰/۷۱	۰/۷۷
گندم حفاظت خاک آمریکا		$Z=5.155t^{0.219}+0.6985$	۲/۰۴	۰/۷۶	۰/۱۸	$F=1.129t^{-0.781}$	۰/۶۴	۰/۶۶	۱/۰۸
اورتون		$Z=(11.446t)^{0.5}-0.176t$	۱/۶۷	۰/۸۴	۰/۱۵	$F=5.723(11.446t)^{-0.5}-0.176$	۰/۶۸	۰/۷۳	۱/۱۵
هورتون		$Z=0.014t+(2.2-0.014)/0.124(1-e^{-0.124t})$	۳/۱۴	۰/۹۵	۰/۲۹	$F=0.014+2.186e^{-0.124t}$	۰/۶۳	۰/۸۰	۱/۰۵
کوستیاکوف		$Z=10.143t^{0.184}$	۱/۹۴	۰/۸۶	۰/۱۰	$F=1.866t^{-0.816}$	۱/۳۰	۰/۹۰	۱/۲۶
کوستیاکوف لوئیس		$Z=10.506t^{0.16}+0.016t$	۲/۰۷	۰/۸۴	۰/۱۱	$F=1.681t^{-0.84}+0.016$	۱/۰۶	۰/۸۹	۱/۰۳
فیلیپ سه جزئی		$Z=7.717t^{0.5}-0.889t+0.034t^{1.5}$	۱/۵۷	۰/۹۰	۰/۰۸	$F=3.859t^{-0.5}-0.889+0.051t^{0.5}$	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۸۷
لوبیا حفاظت خاک آمریکا		$Z=9.525t^{0.191}+0.6985$	۱/۹۶	۰/۸۶	۰/۱۱	$F=1.819t^{-0.809}$	۱/۳۱	۰/۹۰	۱/۲۷
اورتون		$Z=(28t)^{0.5}-0.267t$	۳/۰۵	۰/۸۴	۰/۱۷	$F=14(28t)^{-0.5}-0.267$	۱/۳۵	۰/۹۰	۱/۳۱
هورتون		$Z=0.016t+24.43(1-e^{-0.204t})$	۳/۴۲	۰/۹۲	۰/۱۹	$F=0.016+4.984e^{-0.204t}$	۱/۴۰	۰/۹۳	۱/۳۵

هر دو مؤلفه سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی در هر دو مزرعه در رطوبت‌های بالا می‌باشد. فولادمند و مظلوم (۱۸) متفاوت بودن مقدار نفوذ و ضرایب مدل‌های نفوذ را در شرایط اولیه رطوبت غیر مشابه خاک‌ها و کاهش آن‌ها با افزایش رطوبت اولیه خاک را به دلیل کاهش نفوذ جانبی در آزمایش استوانه‌های دوگانه گزارش نمودند. لویسیگا و هوانگ (۳۱) نیز رطوبت خاک را از عوامل تأثیرگذار بر مؤلفه نفوذ آب به خاک دانستند. عملکرد متفاوت مدل‌های نفوذ می‌تواند ناشی از تفاوت در ضرایب مدل‌ها با توجه به فرضیات مدل‌ها، نوع کشت و خصوصیات هیدرولیکی و فیزیکی هر دو مزرعه باشد. به عبارت دیگر در این تحقیق تفاوت در دقت مدل‌های نفوذ در جدول (۶) را می‌توان ناشی از تفاوت در ضرایب مدل‌های نفوذ مطابق نتایج جدول (۵) و تفاوت در برخی ویژگی‌های خاک مطابق نتایج جدول (۲) دانست. به دلیل این‌که فرضیات و ضرایب در مدل‌ها با یکدیگر متفاوت است پیش‌بینی می‌شود که در شرایط یکسان، مدلی خاص دارای عملکرد بهتری نسبت با سایر مدل‌ها باشد (۱۹، ۳۲، ۳۴). از طرفی دقت در

نتایج محمدی و رفاهی (۲۱) نشان داد پارامترهای معادلات نفوذ به خصوصیات فیزیکی از جمله بافت خاک بستگی دارد و این ویژگی‌ها تا حدودی اختلاف در ضرایب و نتایج را توجیه می‌نمایند. لیکن بخشی از تفاوت در نتایج، نیز به روش اندازه‌گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان آب در خاک وابسته است (۴ و ۶). میانگین ریشه مربعات خطا و رتبه مدل‌های مختلف نفوذ نسبت به تغییرات رطوبت برای دو مؤلفه سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی در مزرعه کشت گندم و لوبیا در جدول (۶) آمده است. نتایج کارایی مدل‌های نفوذ در جدول (۶) در قالب رتبه کل ارائه شده است که بیانگر رتبه هر مدل به لحاظ پایداری رتبه عملکرد آن در رطوبت‌های مختلف می‌باشد. نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد در تمامی مدل‌ها مقدار میانگین ریشه مربعات خطا به‌ازای افزایش مقدار رطوبت، کاهش یافته است. به عبارت دیگر هر چه رطوبت خاک بیش‌تر باشد مقادیر خطای سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی خاک کم‌تر است. به‌گونه‌ای که رتبه‌های کم نشان‌دهنده RMSE کم‌تر برای

نفوذ تجمعی با مدل هورتون مناسب نیست. نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ توسط سعدی‌خانی و سهرابی (۱۴) نشان داد که مدل‌های نفوذ در کاربری‌های مختلف عملکرد متفاوتی دارند.

در مجموع مدل کوستیاکوف-لوئیس و مدل هورتون به طور مشترک با کسب رتبه ۲۸ به عنوان انتخاب اول برای برآورد مؤلفه سرعت نفوذ و مدل کوستیاکوف-لوئیس و مدل فیلیپ با کسب رتبه ۴۸ به عنوان انتخاب اول در برآورد مؤلفه نفوذ تجمعی مناسب تشخیص داده شدند. مهم‌ترین حسن معادله کوستیاکوف-لوئیس دقت بالای آن به دلیل انعکاس و لحاظ تقریباً تمام شرایط و عوامل مؤثر در فرآیند نفوذ می‌باشد. در مقابل تأثیرپذیری همه معادلات از شرایط زمانی و مکانی و نارسایی پارامترهای معادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده این گونه معادلات می‌باشد (۲۱).

برآورد سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی توسط مدل‌های نفوذ مورد بررسی، در خاک مزرعه گندم با توجه به کم‌تر بودن اعداد رتبه‌ها، نسبت به مزرعه لوبیا بیش‌تر است. به گونه‌ای که جدول (۶) نشان می‌دهد رتبه پنج حداکثر رتبه‌ای است که برای مؤلفه سرعت نفوذ در مزرعه گندم با 1 cm hr^{-1} $RMSE=0.7$ در دو مدل کوستیاکوف و SCS به دست آمد و رتبه هشت نیز حداکثر رتبه مزرعه لوبیا می‌باشد که از مدل اورتون با $1 \text{ cm hr}^{-1} RMSE=1/4$ به دست آمد. برای مؤلفه نفوذ تجمعی نیز حداکثر رتبه در مزرعه گندم ۱۲ با $1 \text{ cm} RMSE=3/1$ و در مزرعه لوبیا ۱۴ با $1 \text{ cm} RMSE=3/4$ از مدل هورتون حاصل گردید. محمدی و رفاهی (۲۱) نیز عدم همبستگی معنی‌دار مدل هورتون با خصوصیات خاک در برآورد مقدار نفوذ تجمعی را گزارش نمودند. مطالعات آنان نشان داد که به دلیل عدم همبستگی معنی‌دار پارامتر E در مدل هورتون نسبت به خصوصیات خاک، برآورد مقادیر

جدول ۶. میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و رتبه‌بندی مدل‌های نفوذ در رطوبت‌های متفاوت خاک

انتخاب رتبه کل	رطوبت مزرعه لوبیا								رطوبت مزرعه گندم					مدل	مؤلفه								
	۳۱/۴٪		۲۹/۲٪		۲۶/۶٪		۲۳/۸٪		۱۵/۸٪		۲۵/۹٪		۲۳/۱٪			۲۲/۹٪		۱۸/۷٪		۱۷٪			
	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه			RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	رتبه	RMSE	
۴	۳۲	۱	۰/۲	۳	۰/۴	۴	۰/۷	۶	۱	۷	۱/۳	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۵	۰/۷	کوستیاکوف	سرعت نفوذ (cmhr ⁻¹)
۱	۲۸	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۴	۰/۷	۶	۱	۶	۱/۰	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۳	۰/۵	کوستیاکوف لوئیس	
۳	۳۱	۱	۰/۲	۳	۰/۴	۴	۰/۷	۶	۱	۷	۱/۳	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۴	۰/۶	فیلیپ سه جزئی	
۴	۳۲	۱	۰/۲	۳	۰/۴	۴	۰/۷	۶	۱	۷	۱/۳	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۵	۰/۷	SCS	
۲	۳۰	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۴	۰/۷	۶	۱	۸	۱/۴	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۳	۰/۵	اورتون	
۱	۲۸	۱	۰/۲	۳	۰/۴	۴	۰/۷	۶	۱	۵	۰/۹	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۳	۰/۵	هورتون	
۳	۵۰	۱	۰/۱	۵	۰/۵	۷	۱	۹	۱/۶	۱۰	۱/۹	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۴	۰/۵	۱۰	۲	کوستیاکوف	نفوذ تجمعی (cm)
۱	۴۸	۱	۰/۱	۳	۰/۳	۵	۰/۵	۵	۰/۵	۱۱	۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۴	۰/۵	۵	۰/۶	۱۱	۲/۲	کوستیاکوف لوئیس	
۱	۴۸	۱	۰/۱	۴	۰/۴	۶	۰/۸	۸	۱/۳	۹	۱/۶	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۴	۰/۵	۴	۰/۵	۸	۱/۲	فیلیپ سه جزئی	
۲	۴۹	۲	۰/۲	۴	۰/۴	۵	۰/۵	۶	۰/۸	۱۲	۲/۲	۲	۰/۳	۲	۰/۳	۳	۰/۴	۳	۰/۴	۱۰	۲	SCS	
۴	۵۲	۲	۰/۲	۴	۰/۴	۷	۱	۱۰	۱/۹	۱۳	۳/۱	۱	۰/۲	۱	۰/۲	۲	۰/۳	۳	۰/۴	۹	۱/۷	اورتون	
۵	۸۰	۴	۰/۴	۸	۱/۳	۸	۱/۳	۱۲	۲/۲	۱۴	۳/۴	۴	۰/۵	۵	۰/۶	۶	۰/۷	۷	۰/۸	۱۲	۳/۱	هورتون	

نتیجه گیری

نتایج کلی نشان داد میانگین سرعت نفوذ اولیه، نهایی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مزرعه لوبیا بیش تر از مزرعه گندم به دست آمد. افزایش رطوبت خاک در هر دو مزرعه سبب کاهش مقادیر نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی شد. مقدار نفوذ تجمعی و دیگر مؤلفه های نفوذ در همه زمان های قبل و بعد از آبیاری در مزرعه لوبیا بیش از مقدار متناظر آن در مزرعه گندم بود. در بین مدل های نفوذ مورد بررسی که شامل کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوئیس، فیلیپ، SCS، اورتون و هورتون بود مدل فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ، کمترین خطا و مدل اورتون بیشترین خطا را داشت. همچنین هر شش مدل نفوذ در برآورد سرعت نفوذ نسبت به نفوذ تجمعی از خطای کم تر و انطباق بیشتری برخوردار بودند. بررسی خطای برآورد همه مدل های نفوذ فوق در رطوبت های مختلف خاک نشان داد که هرچه رطوبت خاک بیش تر باشد مقادیر خطای برآورد سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی آب در خاک کم تر می شود. همچنین دقت در برآورد سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی توسط مدل های نفوذ مورد بررسی، در خاک مزرعه گندم، نسبت به مزرعه لوبیا بیش تر بود. در مجموع برای برآورد مؤلفه سرعت نفوذ، مدل های کوستیاکوف- لوئیس و هورتون و در برآورد مؤلفه نفوذ تجمعی مدل های کوستیاکوف- لوئیس و فیلیپ به عنوان انتخاب اول مناسب تشخیص داده شد.

منابع

- احمدی ت.، افراسیاب پ. و دلبری م. (۱۳۹۵). معرفی یک روش ساده در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از آزمایش نفوذ بیرکن. مدیریت آب و آبیاری. ۶ (۱): ۱۴۷-۱۳۳.
- بی نام. (۱۳۹۷). گزارش آمار هواشناسی شوشتر. اداره کل هواشناسی استان خوزستان. ۱۰ صفحه.

- بی نام. (۱۳۸۰). استاندارد دستورالعمل اندازه گیری سرعت نفوذ آب در خاک با روش استوانه. نشریه شماره ۲۴۳ وزارت نیرو و سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۳۲ صفحه.
- پرجمی عراقی ف.، میرلطیفی س.م.، قربانی دشتکی ش. و مهدیان م. (۱۳۸۹). ارزیابی برخی مدل های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس های بافتی و کاربری های اراضی. آبیاری و زهکشی ایران. ۲ (۴): ۱۹۳-۲۰۵.
- تافته آ.، امداد م.ر. و غالبی س. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر راندمان کاربرد آب آبیاری نواری در شرایط عمق توسعه ریشه موجود و قابل توسعه گندم در اراضی حمیدیه (خوزستان). حفاظت منابع آب و خاک. ۶ (۴): ۷۵-۹۰.
- جنوبی ر.، رضاوردی نژاد و. و عباسی و. (۱۳۹۵). ارائه مدل بهینه سازی برآورد پارامترهای نفوذ و ضریب زبری آبیاری نواری با استفاده از داده های پیشروی و رواناب. مدیریت آب و آبیاری. ۶ (۱): ۲۹-۴۵.
- جوادی ع.، مصطفی زاده فرد ب.، شایان نژاد م. و مصدقی م.ر. (۱۳۹۶). ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱ (۳): ۴۸۲-۴۶۹.
- چگنی م.، انصاری دوست ش. و اسکندری ح. (۱۳۹۲). تأثیر نوع شخم و مدیریت بقایای گیاهی بر برخی خواص فیزیکی خاک در راستای نیل به کشاورزی پایدار. دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۴ (۲): ۳۱-۴۰.
- دربندی ص.، دربندی ص. و تقوی ص. (۱۳۸۹). تعیین بهترین معادله نفوذ برای خاک های ایستگاه نعمت آباد (دانشگاه آزاد واحد تبریز) و آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ به رطوبت اولیه خاک. آبیاری و زهکشی ایران. ۴ (۳): ۳۳۷-۳۳۰.

۱۰. رحمتی م.، نیشابوری م.ر.، محمدی اسکویی م.، فاخری فرد ا.، احمدی ع. و موسوی س.ب. (۱۳۹۴). ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای معادلات مختلف نفوذ برای حوضه آبخیز ليقوان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲ (۶): ۲۰-۱.
۱۱. سارانی ف.، غلامعلی‌زاده ا. و شبانی ا. (۱۳۹۵). مقایسه مدل‌های رگرسیونی و هوش محاسباتی در تخمین درصد سدیم تبادلی از نسبت جذب سدیم (مطالعه موردی: خاک‌های منطقه میانکنگی سیستان). دانش آب و خاک. ۲۶ (۲): ۱۳۷-۱۲۵.
۱۲. سپهوند ع.ر.، طایی سمیرمی م.، میرنیا س.خ. و مرادی ح.ر. (۱۳۹۰). ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۲): ۳۴۶-۳۳۸.
۱۳. سرخه‌نژاد م. و کشکولی ح.ع. (۱۳۸۹). تعیین منحنی مشخصه رطوبتی و توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از مدل ریاضی. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
۱۴. سعدی‌خانی م.ر. و سهرابی ا. (۱۳۹۶). تأثیر کاربری اراضی بر کارایی برخی از مدل‌های نفوذ آب به خاک. مدیریت خاک و تولید پایدار. ۷ (۱): ۱۳۸-۱۲۷.
۱۵. سلیمانی ل.، حقی‌زاده ع. و زینی‌وند ح. (۱۳۹۵). تعیین بهترین مدل‌های برآورد نفوذ در کاربری‌های مختلف به‌منظور مدیریت بهینه حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کاکاشرف، استان لرستان). مدیریت حوزه آبخیز. ۷ (۱۳): ۴۱-۳۳.
۱۶. طالبی‌کلان ی.، محمدی م.ح. و کریمی س. (۱۳۹۵). تأثیر کاربری اراضی بر خصوصیات نفوذ آب در برخی خاک‌های استان اردبیل و زنجان. مدیریت خاک و تولید پایدار. ۶ (۱): ۱۲۶-۱۰۹.
۱۷. فعالیان ا.، انصاری ح. و صدرالدینی س.ع.ا. (۱۳۹۰). استفاده از منطق فازی برای شبیه‌سازی الگوی توزیع آبشام منفرد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۶): ۱۴۳۳-۱۴۲۱.
۱۸. فولادمند ح.ر. و مظلوم ه. (۱۳۹۵). مقایسه نفوذ آب در خاک با استفاده از روش‌های تک استوانه و استوانه‌های مضاعف. سامانه‌های سطوح آبیگر باران. ۴ (۴): ۲۳-۳۲.
۱۹. قربانی دشتکی ش.، همایی م. و مهدیان م.ح. (۱۳۸۸). برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳ (۱): ۱۹۸-۱۸۵.
۲۰. کمالی پ.، ابراهیمیان ح. و وردی‌نژاد و.ح. (۱۳۹۴). ارزیابی و مقایسه روش بهینه‌سازی چند سطحی و مدل IPARM در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای. مدیریت آب و آبیاری. ۵ (۱): ۵۴-۴۳.
۲۱. محمدی م.ح. و رفاهی ح. (۱۳۸۴). تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. علوم کشاورزی ایران. ۳۶ (۶): ۱۳۹۸-۱۳۹۱.
۲۲. نظری پ. (۱۳۸۸). ارزیابی تناسب اراضی منطقه میان‌آب شوشتر برای زیتون با استفاده از مدل Micro LEIS. همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران.
۲۳. واقفی م. و موحدزاده م. (۱۳۹۳). بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف نفوذپذیری در حوضه آبریزمند دشتی با استفاده از نتایج آزمایشات استوانه مضاعف. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۴ (۳): ۱۲-۱.
24. ASTM. (2003). Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer, D3385-03. ASTM International, West Conshohocken, PA.

25. Cubera, E. & Moreno, G. (2007). Effect of land-use on soil water dynamic in Dehesas of Central-Western Spain. *CATENA*, 71(2), 298-308.
26. Damodhara Rao, M., Raghuwanshi, N.S. & Singh, R. (2006). Development of a physically based 1D-infiltration model for irrigated soils. *Agricultural Water Management*, 85(1-2), 165-174.
27. De Almeida, W.S., Panachuki, E., de Oliveira, P.T.S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T.A. & de Carvalho, D.F. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130-138.
28. Gregory, J.H., Dukes, M.D., Miller, G.L. & Jones, P.H. (2005). Analysis of double-ring infiltration techniques and development of a simple automatic water delivery system. *Applied turfgrass science*, 2, 1-7.
29. Karami, B., Golabi, M. & Dhumal, K.N. (2012). Determination Coefficients of Infiltration Equations: Case Study of Shavoor Plain in Khuzestan Province. *International Journal Applied Engineering Research*, 7 (1), 55-69.
30. Lado, M., Paz, A. & Ben-Hur, M. (2004). Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society America Journal*, 68(3), 935-942.
31. Loaiciga, H.A. & Huang, A. (2007). Ponding analysis with Green-Ampt infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 109-112.
32. Mishra, S.K., Tyagi, J.V. & Singh, V.P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*, 17, 2629-2652.
33. Morbidelli, R., Saltalippi, C., Flammini, A. & Govindaraju, R.S. (2018). Role of slope on infiltration: a review. *Journal of Hydrology*, 557, 878-886.
34. Rashidi, M. & Seyfi, K. (2007). Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *Journal of Agricultural and Environmental Science*, 2, 628-632.
35. Yongyong, Z., Pute, W., Xining, Z. & Ping, L. (2012). Evaluation and modeling of furrow infiltration for uncropped ridge-furrow tillage in Loess Plateau soils. *Soil Research*, 50, 360-370.
36. Zolfaghari, A.A., Mirzaee, S. & Gorgi, M. (2012). Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *International Journal Soil Science*, 7 (3), 108-115.