

بررسی و مقایسه داده های اندازه گیری و برآوردی سرعت نفوذ آب، در سه نوع بافت خاک

بهزاد آزادگان

¹ نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

نفوذ آب در خاک با بافت های مختلف، رفتار متفاوتی دارد، پارامترهای آن، تابعی از زمان و مکان بوده و تعداد زیادی اندازه گیری های مزرعه ای، نیاز است تا نشان دهنده متوسط شرایط مزرعه، باشد. اندازه گیری سرعت نفوذ آب در مزرعه به دلیل هزینه بر و زمان بر بودن، با مدل های سرعت نفوذ، برآورد، می شود. برای طراحی سیستم های آبیاری و زهکشی، استفاده بهینه از آب و افزایش راندمان آبیاری، باید پارامترهای نفوذ، با دقت بالا اندازه گیری و واسنجی، شوند. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه داده های اندازه گیری شده در مزرعه با استفاده از روش استوانه های مضاعف و مقادیر برآوردی از معادله های سرعت نفوذ (کوستیاکوف، هورتون، فیلیپ و گرین و امپت)، برای سه نوع بافت خاک، در سه تکرار، می باشد. برای ارزیابی دقت مقادیر برآوردی از معادلات سرعت نفوذ، از شاخص های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و معیار ناش- ساتکلیف (ENS)، استفاده گردید. معادله ای که کمترین RMSE و MBE و بالاترین معیار ناش- ساتکلیف را داشته باشد، بهترین معادله برآورد سرعت نفوذ آب برای هر بافت خاک، انتخاب می شود. نتایج این پژوهش نشان داد که معادله گرین و امپت با بالاترین معیار کفایت ناش- ساتکلیف و کمترین خطاهای RMSE و MBE، سرعت نفوذ را با دقت بالا و نسبتاً قابل قبول با داده های اندازه گیری شده برای خاک های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، برآورد کرده است. مقادیر برآوردی سرعت نفوذ به ترتیب با معادله کوستیاکوف برای خاک سیلتی لوم، معادله هورتون برای خاک شن لومی و معادله فیلیپ برای خاک رسی، از دقت لازم، برخوردار نبوده است.

کلید واژه ها: استوانه مضاعف، بافت خاک، سرعت نفوذ، مزرعه.

سرعت نفوذ از پارامترهای بسیار مهم برای طراحی پروژه های آبیاری و زهکشی، مطالعات هیدرولوژی، مدیریت منابع آب، کنترل فرسایش و حفاظت خاک است (Mazighi et al. 2023). سرعت نفوذ آب بر عواملی مانند: عمق آب روی سطح خاک، رطوبت اولیه خاک، بافت و ساختمان خاک، کیفیت آب و خاک، تأثیر دارد (Neshat and Parehkar, 2007; Faridah et al., 2023). نفوذ آب در خاک های با بافت های مختلف، رفتار متفاوتی دارد، مدل های نفوذ، باید با توجه به شرایط محلی و ویژگی های خاک، انتخاب شوند لذا ارزیابی و انتخاب مدل های مناسب، برای پیش بینی نرخ نفوذ آب، اهمیت زیادی دارد (Bajirao and Vishnu, 2023; Parchami Araghi et al., 2010). سرعت نفوذ آب در خاک، تعیین کننده زمان تداوم آبیاری برای ذخیره مقدار مشخصی آب، در داخل خاک بوده و در استفاده بهینه از آب و افزایش راندمان آبیاری، اهمیت زیادی دارد (Almeida et al., 2014). هر مدل نفوذ، برخی از ویژگی های فیزیکی خاک و شرایط محیطی را در نظر گرفته و نتایج متفاوتی را برای پیش بینی سرعت نفوذ، ارائه می دهد (Thomas et al., 2020). مدل کوستیاکوف، یکی از ساده ترین مدل های ارزیابی سرعت نفوذ آب، است. این مدل رابطه تجربی بین زمان و میزان نفوذ را، ارائه می دهد که در شرایط مختلف قابل استفاده، است (Kostiakov, 1932; Gebul, 2022). مدل هورتون به تأثیرات تغییرات موقتی در ظرفیت نفوذ آب، توجه دارد و برای خاک های اشباع و غیر اشباع مناسب است (Horton, 1940). مدل فیلپ، با در نظر گرفتن ویژگی های فیزیکی خاک، برآورد بهتری از سرعت نفوذ را، در شرایط مختلف، فراهم می کند (Philip, 1957). مدل گرین و امپت، برای خاک های با بافت های مختلف، دقیق تر، عمل می کند و یکی از مدل های کاربردی، برای برآورد نفوذ آب، است (Green and Ampt, 1911). اگر پارامترهای معادله نفوذ، با دقت مناسب و نزدیک به شرایط مزرعه ای، تعیین نگردند، ممکن است آبیاری زیاد و در نتیجه فرونشست عمقی و رواناب، اتفاق افتد، همچنین اگر آبیاری، کمتر از مقدار مورد نیاز، انجام گیرد، در هر دو حالت، راندمان آبیاری، کم خواهد شد (Batoukhteh, et al., 2021). نتایج مطالعات قبلی، وابستگی مقدار سرعت نفوذ را، به نوع بافت خاک سطحی و مقدار رطوبت اولیه، اثبات کرده است (Kojouri and Javadi, 2023; Patle et al., 2019). تعیین سرعت نفوذ، مهمترین و مشکل ترین عامل، برای ارزیابی در سامانه های آبیاری سطحی است. نفوذ از مهمترین متغیرهای فیزیکی خاکها و داده ها در مدل های بارش و رواناب به منظور تعیین تلفات آب در سطح حوزه های آبخیز، می باشد (Vghefi et al., 2013). پارامتر های نفوذ، تابعی از زمان و مکان بوده و برای طراحی یک سامانه آبیاری، تعداد نسبتاً زیادی اندازه گیری های مزرعه ای با روش استوانه مضاعف، نیاز است تا نشان دهنده متوسط شرایط مزرعه، باشد (Vishwakarma et al 2024). مدل هایی به منظور برآورد نفوذ، توسعه یافته اند، برخی از این مدل ها روابطی تجربی بوده، بر شکل منحنی سرعت نفوذ و زمان، تطبیق داده شده و برخی با توجه به مبانی فیزیکی بر نفوذپذیری، سعی در ساده سازی شرایط اولیه و مرزی جریان غیر اشباع دارند (Haghnazari et al., 2015; Nie, et al., 2017). این مدل ها در خاک های مختلف با بافت های متفاوت مانند خاک های شنی، لومی و رسی بررسی می شوند تا بتوان مدل مناسبی، برای طراحی سیستم های آبیاری و مدیریت منابع آب ارائه نمود (Vand et al., 2018; Ogbe et al., 2011). اندازه گیری نفوذپذیری در مزرعه، هزینه بر و مستلزم صرف زمان زیاد، است، لذا بررسی ویژگی های فیزیکی خاک، ضروری است (Utin and Oguike. 2018). در پژوهشی، تأثیر کاربری اراضی، بافت خاک و پوشش گیاهی در مناطقی از هند را، با استفاده از معادلات نفوذ کوستیاکوف، هورتون و فیلپ، بررسی کردند که به ترتیب نتایج معادله کوستیاکوف، هورتون و فیلپ، با داده های مشاهداتی، مطابقت داشت (Mishra and Singh, 2003). در تحقیقی، مدل های مختلف نفوذ در خاک های چمن ارزیابی شد، نتایج نشان داد، برخی مدل ها، بسته به شرایط خاص خاک، نتایج بهتری را ارائه می دهند (Duan et al., 2010). در مطالعه دیگری، تأثیر بافت و ویژگی های فیزیکی خاک بر روی سرعت نفوذ آب، گزارش گردیده که خاک های رسی و شنی، رفتار متفاوتی در فرآیند نفوذ داشته اند (Ghosh et al., 2020; Faridah et al., 2023). هدف این تحقیق، بررسی و مقایسه داده های اندازه گیری شده در شرایط مزرعه و مقادیر برآوردی از معادلات سرعت نفوذ (کوستیاکوف، هورتون، فیلپ، گرین و امپت) در خاک های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، در مزرعه تحقیقاتی دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، می باشد.

۱. مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، مزرعه پژوهشی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، می باشد. موقعیت آن در شهرستان پاکدشت، استان تهران، واقع شده که در شکل (۱)، نشان داده شده، است. اقلیم منطقه، خشک و نیمه خشک و میانگین بارندگی سالانه، ۱۸۰ میلی متر، می باشد. ارتفاع متوسط از سطح دریا، ۱۰۲۱ متر، طول و عرض جغرافیایی، به ترتیب ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی است.

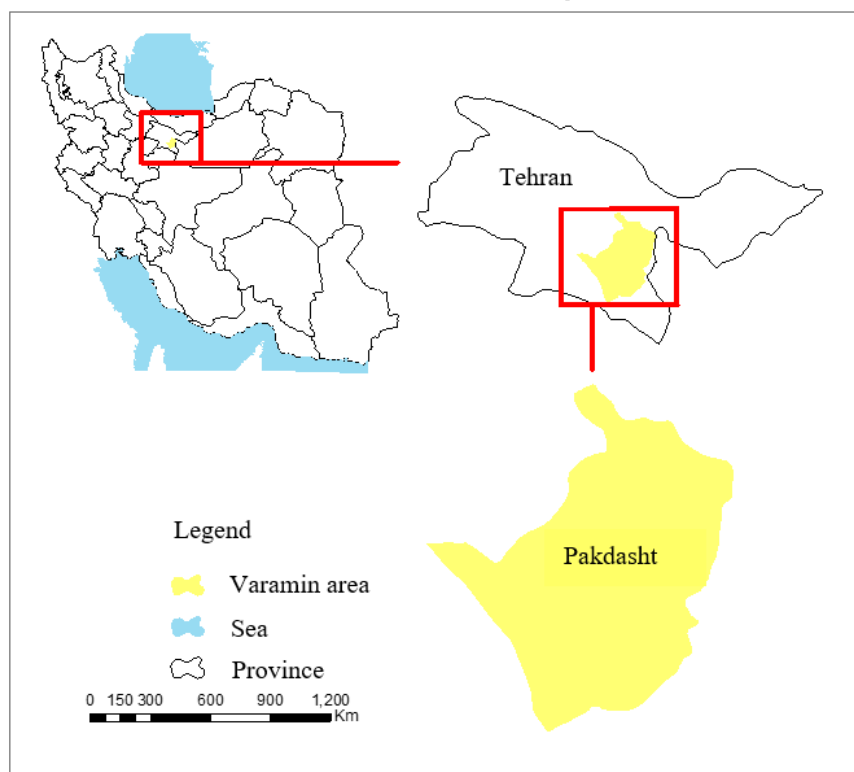


Figure 1. Location of the study area (Pakdasht in Tehran province)

در مکان های انتخابی مزرعه برای آزمایش، از بافت های مختلف خاک، نمونه هایی از عمق ۰-۳۰ سانتی متر، به منظور، تعیین برخی خصوصیات فیزیکی خاک های مورد مطالعه، تهیه و به آزمایشگاه خاکشناسی، ارسال شد. نمونه های هوا خشک شده، پس از کوبیدن و غربال با الک دو میلیمتری، برای انجام آزمایشات، آماده شدند. بر اساس روش های معمول آزمایشگاهی، پارامترهای: جرم مخصوص ظاهری (ρ_b)، رطوبت اولیه (θ_i)، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_i)، رطوبت اشباع (SP)، تخلخل (Porosity) اندازه گیری، گردید. سپس درصد ذرات خاک، شامل: (شن) (Sand)، سیلت (silt)، رس (clay)، نمونه ها، با روش هیدرومتری مشخص شده و با استفاده از مثلث بافت خاک، نوع بافت (Texture)، نمونه ها، تعیین، گردید. برخی خصوصیات فیزیکی خاک های مورد مطالعه، در جدول (۱)، ارائه شده، است.

Table 1. Some physical properties of the studied soils (Depth 0-30 cm)

Soil number	%Sand	%silt	%clay	Texture	% θ_i	% $\theta_{F.C}$	%SP	ρ_b (gr/cm ³)	%Porosity
1	88	4	8	Sandy loam	8.3	16	25	1.58	40
2	40	32	28	Silty loam	13	31	43	1.44	45
3	42	21	37	Clay	22	28	57	1.32	50

در این پژوهش، آزمایش استوانه های مضاعف (Double rings)، در مزرعه، برای سه نوع بافت خاک: شنی لومی، سیلت لومی و رسی، انجام شده است. منحنی نفوذ تجمعی، با استفاده از داده های اندازه گیری و زمان های نفوذ، ترسیم می شود. در تحقیقی، برای پیش بینی تغییرات مکانی نفوذ، به جای استفاده از پارامترهای معادله نفوذ، از مقدار آب نفوذ کرده به خاک، در یک زمان مشخص برای به دست آوردن ضریب معادله سرعت نفوذ، استفاده شده است (Chari et al 2020). وسایل اندازه گیری آزمایش نفوذ، در شکل (۲)، نشان داده شده است. آزمایش نفوذ، در سه نقطه مختلف با سه تکرار، برای هر نوع بافت خاک، انجام شده و مقدار نفوذ آب، تا زمان رسیدن به سرعت نفوذ ثابت، ادامه یافت. ارتفاع آب روی سطح خاک درون استوانه ها، تا پایان آزمایش، ۱۰ سانتی متر ثابت، بود. مقدار نفوذ با خط کش مدرج، در فواصل زمانی متفاوت، قرائت و داده های زمان (دقیقه) و مقدار نفوذ (سانتی متر)، در جداول آزمایشات، جداگانه، ثبت شد، سپس مقدار نفوذ تجمعی، در بازه های زمانی مختلف، تعیین گردید که در جدول (۲)، ارائه شده، است.

Table 2. Average measured Cumulative infiltration rate of soil textures in the field, (cm)

Time (min)	sandy loam	silty loam	clay
5	3.50	3.30	0.70
10	5.40	5.10	1.50
15	9.10	8.90	2.30
30	10.90	9.30	3.80
45	15.30	10.80	5.40
60	17.70	12.70	6.10
90	22.40	14.20	6.80
120	24.90	16.80	9.50
180	28.10	19.40	10.00
240	28.10	19.40	10.00

براساس میانگین داده های سه تکرار هر نوع بافت خاک، مقادیر اندازه گیری شده نفوذ تجمعی در زمان های آزمایش، منحنی های مربوطه، با نرم افزار اکسل (Excel)، ترسیم شد. معادله سرعت نفوذ، برای هر سه بافت خاک شنی لومی، سیلت لومی و رسی، جداگانه با مشتق گیری از معادلات نفوذ تجمعی مربوطه، تعیین شده و سپس مقادیر سرعت نفوذ هر نوع بافت خاک، برآورد، گردیده است.



Figure 2. Experimental double rings infiltrometer

در این پژوهش، برای تعیین بهترین معادله برآورد سرعت نفوذ، مدل های (گرین و امپت، کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون) انتخاب گردیدند. خلاصه ای از تئوری معادلات، به شرح ذیل، ارائه می شود (Salifu et al., 2021; Dahak et al., 2022; Mesele et al., 2024):

۱- معادله گرین و امپت، بر مبنای اصول فیزیکی خاک، ارائه شده است که ویژگی هایی چون مکش جبهه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع را، در نظر می گیرد، لذا می توان شکل منحنی نفوذ و تغییرات آن را، پیش بینی، کرد. رابطه (۱)، برای برآورد شدت نفوذ (I)، به صورت زیر می باشد:

$$I = K_s (H_0 + S_w + L) / L \quad (1)$$

در رابطه (۱)، S_w : پتانسیل مکش خاک در جبهه رطوبتی، H_0 : ارتفاع آب روی سطح خاک، K_s : ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع، L : فاصله سطح خاک تا جبهه رطوبتی است. برای محاسبه پارامترها، از معادله ساده شده گرین و امپت بر اساس قانون داری، از رابطه (۲)، استفاده شده است:

$$I = \frac{A}{i} + B \quad (2)$$

در رابطه (۲)، A و B مقادیر پارامترهای مدل گرین و امپت هستند. اگر مقادیر سرعت نفوذ (i)، روی محور عمودی، در مقابل $1/I$ روی محور افقی، مشخص، گردد، بر روی نمودار مربوطه، در خط برازش داده ها، A : معادل شیب خط و B : معادل عرض از مبدأ، می باشد.

i : نفوذ تجمعی، A و B ، ضرایبی هستند که از روی آزمایش نفوذ، به دست می آیند. این معادله، مبنای فیزیکی و نظری دارد و با آن می توان منحنی نفوذ و تغییرات آن را، پیش بینی، کرد.

۲- معادله فیلیپ: مبنای فیزیکی داشته، مبتنی بر معادلات ریاضی که نفوذ را به صورت ترکیبی از زمان و خصوصیات فیزیکی خاک (تخلخل، رطوبت اولیه، ساختار خاک خاک) مدل می کند که به صورت رابطه (۳)، ارائه شده است:

$$I = St^{-0.5} + A \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A : ضریب آگذری اشباع خاک و S : ضریب جذبی خاک، می باشد. سرعت نفوذ با مشتق گیری از معادله (۳)، به شرح ذیل و از رابطه (۴)، دست می آید:

$$dI/dt = (i_t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (4)$$

پارامترهای A و S در معادله (۴)، با رسم نمودار داده های سرعت نفوذ، روی محور عمودی (i_t) در مقابل مقادیر زمان ($t^{-0.5}$) روی محور افقی، خط مستقیمی، بدست می آید که در آن مقدار A ، برابر عرض از مبدأ و مقدار S معادل شیب خط، می باشد.

۳- معادله کوستیاکوف: کوستیاکوف، معادله تجربی رابطه (۵) را، برای تخمین سرعت نفوذ، پیشنهاد نمود:

$$I = Kt^a \quad (5)$$

در رابطه (۵)، I : سرعت نفوذ در زمان t ، a و k ، پارامترهای تجربی معادله کوستیاکوف، هستند. در این معادله، وقتی مقادیر نفوذ تجمعی و زمان به صورت نمودار لگاریتمی ($\log I$ در مقابل $\log t$)، ترسیم شود، شیب خط، مقدار a (توان t) می باشد و k محل تلاقی خط با محور عمودی (عرض از مبدأ) است که مقدار آن بین صفر و یک بوده و بستگی به ویژگی های خاک، ندارد.

۴- معادله هورتون: هورتون معادله تجربی به صورت رابطه (۶)، را ارائه کرده است:

$$F_t = F_e t + F_0 e^{-kt} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، F_t : سرعت نفوذ در زمان t (میلی متر بر ساعت)، F_c : شدت نفوذ نهایی (میلی متر بر ساعت)، F_0 : شدت نفوذ اولیه (میلی متر بر ساعت) و k : ثابت هورتون، است. K توان نمایی معادله، ضریب بدون بعد و ثابتی است، مقدار آن بستگی به جنس خاک، کاربری اراضی و شرایط ابتدایی ورود آب به خاک، دارد.

اگر مقادیر سرعت نفوذ لحظه ای (i_t)، روی محور عمودی در مقابل لگاریتم داده های زمان ($\log t$)، روی محور افقی، به صورت نموداری، ترسیم شود، شیب خط، برابر مقدار k ، می باشد که چون شیب خط رو به پایین است، منها جلوی k گذاشته می شود ($-k$).

با ترسیم نمودارها و برازش داده های اندازه گیری شده، مقادیر پارامترهای معادلات، برای سه نوع بافت خاک: شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، محاسبه، گردید که به ترتیب معادلات مربوطه در جداول (۳)، (۴) و (۵)، با واسنجی و صحت سنجی، ارائه شده، است. پس از ترسیم نمودار برای هر کدام از مدل های فوق، با توجه به منحنی های سرعت نفوذ هر مدل، بررسی مقایسه داده های اندازه گیری شده و برآوردی، تجزیه و تحلیل نتایج، انجام شد.

Table 3. Calibrated equations for infiltration rate in sandy loam soil

Infiltration equation	Model name
$I = 0.288t^{-0.4}$	Kostiakov
$I = 0.039t + 0.351(e^{-0.11t})$	Horton
$I = 0.195t^{-0.5} + 0.03$	Philip
$I = 0.013 + \frac{1.68}{L}$	Green & Ampt

Table 4. Calibrated equations for infiltration rate silty loam soil

Infiltration equation	Model name
$I = 0.26t^{-0.48}$	Kostiakov
$I = 0.013t + 0.387(e^{-0.1t})$	Horton
$I = 0.2t^{-0.5} + 0.01$	Philip
$I = 0.003 + \frac{0.726}{L}$	Green & Ampt

Table 5. Calibrated equations for infiltration rate in clay soil

Infiltration equation	Model name
$I = 0.173t^{-0.49}$	Kostiakov
$I = 0.004t + 0.146(e^{-0.04t})$	Horton
$I = 0.165t^{-0.5} + 0.001$	Philip
$I = 0.0005 + \frac{0.3}{L}$	Green & Ampt

مقدار سرعت نفوذ در زمان های مختلف، برای هر معادله، برای تمامی نقاط مورد آزمایش، برای هر بافت خاک، محاسبه شد. به منظور ارزیابی دقت معادلات فوق، از رابطه (۷)، برای محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و از رابطه (۸)، برای میانگین انحراف خطا (MBE)، استفاده گردید. مقادیر پایین تر این دو شاخص، نشان دهنده، دقت معادله مورد استفاده، است. بهترین حالت برای RMSE وقتی است که مقدار بدست آمده آن، نزدیک، به صفر، باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^n (I_{oi} - I_{ei})^2} \quad (۷)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{oi} - I_{ei}) \quad (۸)$$

برای بررسی دقت نسبی معادلات مورد استفاده در این پژوهش، از مقایسه داده های اندازه گیری شده و داده های برآورد شده از این معادلات، از رابطه (۹)، معیار ناش-ساتکلیف (ENS)، استفاده گردید که در واقع معیاری برای برآورد دقت و مقایسه، بین داده های اندازه گیری شده و برآورد شده، است. معیار ناش-ساتکلیف، نشان می دهد، خط رگرسیون بین مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده تا چه مقدار، به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است و مقدار آن از منفی بینهایت تا یک متغیر، می باشد.

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_{oi} - I_{ei})^2}{\sum_{i=1}^N (I_{oi} - \bar{I}_o)^2} \quad (۹)$$

تعریف نمادها در رابطه های فوق: N تعداد داده های ثبت شده در دوره مورد نظر، i شماره هر رویداد از یک تا n، نماد I نشان دهنده مقدار نفوذ، و زیروندهای o و e به ترتیب مقدار نفوذ مشاهده ای و محاسباتی است. تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب، برای ضریب ناش-ساتکلیف، ارائه نشده است. ولی ضریب ناش-ساتکلیف، در معادلات نفوذ آب در خاک، باید از ۰/۵، بزرگتر باشد تا بتوان نتایج معادله را، قابل قبول، دانست (Kavousi et al., 2018).

۳. نتایج و بحث

با انجام آزمایش استوانه مضاعف، برای سه نوع بافت خاک شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، مقدار سرعت نفوذ آب، تعیین شد. سپس ضرایب و پارامترهای معادله های سرعت نفوذ (کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون و گرین و امپت) برای بافت های مختلف خاک ها، محاسبه و واسنجی شد که نتایج مربوطه در جداول (۳)، (۴) و (۵)، ارائه شده است. پس از محاسبه مقدار سرعت نفوذ، مقادیر برآوردی و اندازه گیری شده با استفاده از شاخص های آماری، ارائه شده در جداول (۶)، (۷) و (۸)، برای هر نوع بافت خاک، جداگانه، بررسی و ارزیابی، شدند. ارزیابی آماری مدل های سرعت نفوذ، نشان داد، در خاک های شن لومی، سیلتی لوم و رسی، مقادیر برآوردی معادله گرین و امپت، با کمترین RMSE و MBE (خطای برآوردی) و بیشترین ضریب ناش-ساتکلیف (ENS)، بهترین همخوانی و مطابقت را با داده های اندازه گیری شده مزرعه، داشته است. در خاک شنی لومی به ترتیب معادله های گرین و امپت، کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون، در خاک سیلتی لوم به ترتیب معادله های گرین و امپت، هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ و برای خاک رسی، دقت معادلات، به ترتیب معادله های گرین و امپت، هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ، رتبه بندی گردیده است.

Table 6. Statistical indicators for evaluating the accuracy of infiltration rate equations in sandy loam soil

Coefficient Nash & Sutcliffe	MBE	RMSE	equations
0.437	0.051	0.078	Philip
0.662	0.048	0.060	Kostiakov
0.838	0.031	0.042	Green & Ampt
0.386	0.077	0.247	Horton

Table 7. Statistical indicators for evaluating the accuracy of infiltration rate equations in silty loam soil

Coefficient Nash & Sutcliffe	MBE	RMSE	equations
0.388	0.050	0.088	Philip
0.535	0.048	0.077	Kostiakov
0.990	0.004	0.011	Green & Ampt
0.904	0.025	0.035	Horton

Table 8. Statistical indicators for evaluating the accuracy of infiltration rate equations in clay soil

Coefficient Nash & Sutcliffe	MBE	RMSE	equations
0.572	0.016	0.028	Philip
0.608	0.016	0.027	Kostiakov
0.904	0.006	0.013	Green & Ampt
0.873	0.011	0.015	Horton

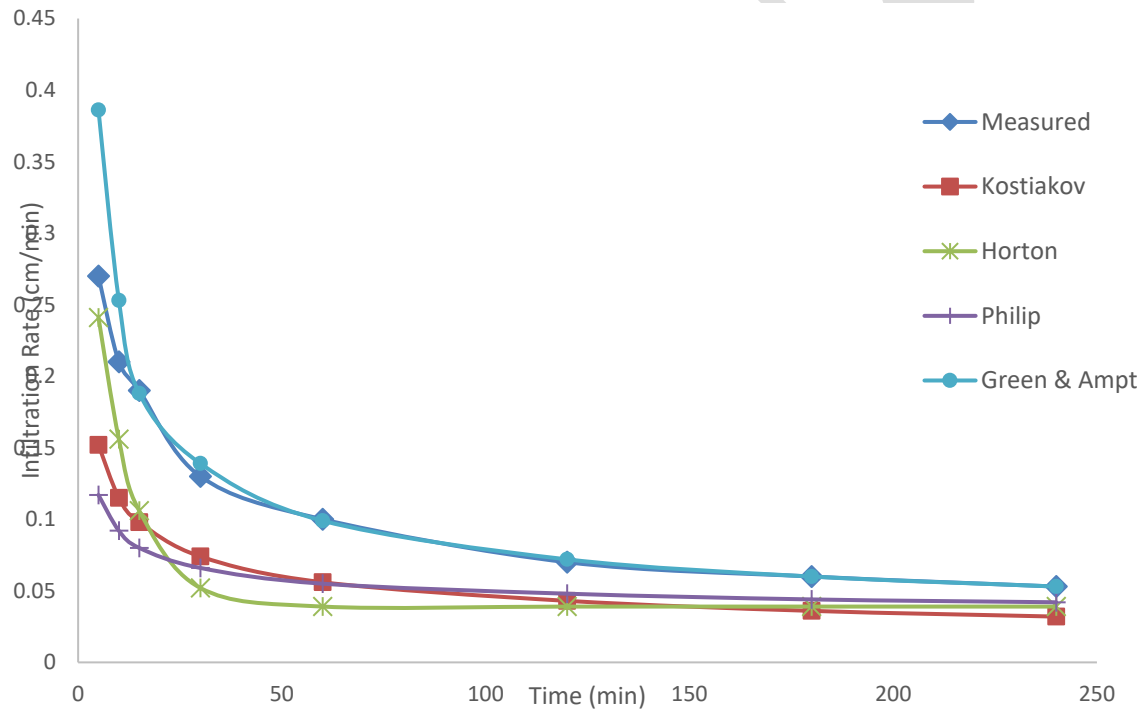


Figure 3: Comparison of observational and estimated infiltration rates in sandy loam soil

نمودار (۳)، مقایسه داده های اندازه گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآورد شده معادلات سرعت نفوذ را، در خاک شنی لومی، نشان می دهد، سرعت نفوذ در ابتدا بالا بوده و به تدریج کاهش می یابد تا به مقدار نفوذ نهایی برابر هدایت آبی اشباع، رسیده است. سرعت نفوذ بالا در خاک با بافت شنی لومی، به دلیل تخلخل مناسب و هدایت هیدرولیکی زیاد آن، می باشد. معادله کاستیاکوف، در برآورد سرعت نفوذ، در خاک شنی لومی، دقت کمتری، دارد لذا برای برآورد سرعت نفوذ در زمان های کوتاه، مناسب است ولی برای مدت های طولانی، خطای زیادی، دارد. معادله هورتون سرعت نفوذ را بیشتر از داده های اندازه گیری، برآورد نمود. مدل هورتون برای ارزیابی هیدرولوژیکی و تأثیر کاهش رواناب باران یک مدل نفوذ بهینه و انعطاف پذیر است (Song et al 2021). معادله فیلیپ، سرعت نفوذ را کمتر از مقدار داده های اندازه گیری شده، برآورد نموده، معادله گرین و امپت، بیش ترین تطابق واقعی را، با داده های آزمایش نفوذ در شرایط مزرعه، داشته است. مقایسه ها بین سرعت های نفوذ پیش بینی شده و مشاهده ای با استفاده از پارامترهای داده های میدانی و آزمایشگاهی، نشان داد، معادلات تجربی ممکن است پیش بینی های بهتری ارائه دهند، چون پارامترهای آن ها بر اساس داده های نفوذ میدانی واقعی، تعیین می شوند (Salifu1 et al 2021) در تحقیقی، پژوهشگران، تأثیر کاربری اراضی، بافت خاک و پوشش گیاهی را در مناطقی از هند، با استفاده از معادلات نفوذ کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ، بررسی کردند که به ترتیب نتایج معادله کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ، با داده های مشاهداتی، مطابقت داشته است (Mishra and Singh, 2003) که، با نتایج این تحقیق، همخوانی دارد زیرا در خاک شنی لومی، بیشترین تطابق و دقت، با داده های آزمایش به ترتیب شامل معادله های گرین و امپت، کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ، بدست آمده، است.

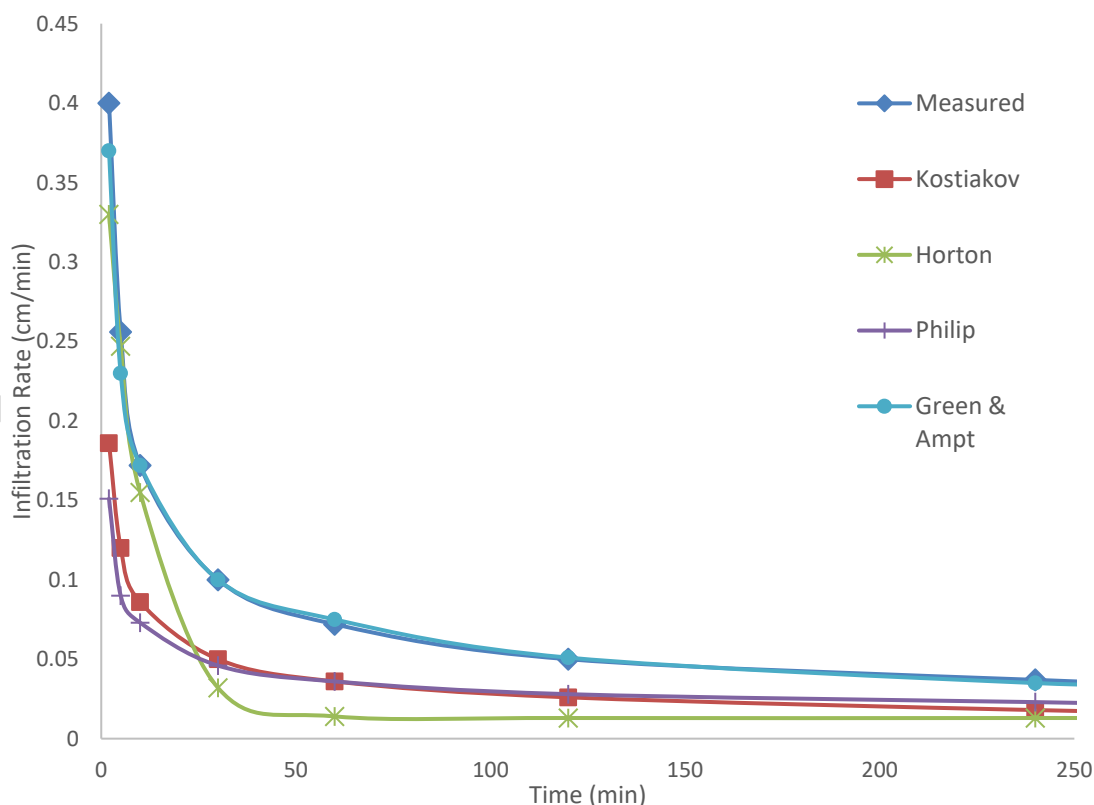


Figure 4: Comparison of observational and estimated infiltration rates in silty loam soil

نمودار (۴)، مقایسه داده های اندازه گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآورد شده از معادلات سرعت نفوذ را، در خاک سیلتی لوم، نشان می دهد. سرعت نفوذ متوسط در خاک سیلتی لوم، به دلیل وزن مخصوص ظاهری و تخلخل مناسب آن، می باشد. در خاک های سیلتی لوم، کاهش سرعت نفوذ، نسبت به خاک شنی لومی، به دلیل ساختمان نسبتاً متراکم و درصد رس بیشتر آن، می باشد.

معادله هورتون و کاستیاکوف، در برآورد سرعت نفوذ خاک با بافت سیلتی لوم، ناتوان بوده و از دقت پایین تری برخوردار هستند. معادله فیلیپ، سرعت نفوذ را کمتر از مقدار داده های اندازه گیری شده، برآورد کرده و مدل مناسبی برای خاک سیلتی لوم، نمی باشد. نتایج ارزیابی عملکرد کیفی سه مدل (فیلیپ، کاستیاکوف و هورتون) در الجزیره، نشان داد که رطوبت خاک و مقادیر اولیه و نهایی نفوذ، نقش مهمی در برتری مدل هورتون بر مدل فیلیپ، برای تخمین سرعت نفوذ دارند (Dahak et al 2022). معادله گرین و امپت، تطابق خوب و نسبتاً مناسب تری را، با داده های اندازه گیری مزرعه، داشته است. بافت خاک، رطوبت اولیه و رطوبت ظرفیت مزرعه، هدایت آبی، مکش رطوبتی و جبهه رطوبی، نقش مهمی در تعیین شدت نفوذ دارند، معادله گرین و امپت این پارامترها را با دقت، در نظر می گیرد و برآورد قابل قبولی نسبت به معادلات کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ داشته است. معادلات کوستیاکوف، هورتون، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و گرین و امپت، با استفاده از داده های مشاهده ای، برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ، به روش استوانه مضاعف، ارزیابی شدند، نتایج آنها، نشان داد، معادله کوستیاکوف، بهترین نتیجه را دارد ولی در دراز مدت، معادله فیلیپ و SCS، عملکرد بهتری، داشته اند (Mesele et al., 2024). داده های این گزارش، با نتایج این تحقیق، همخوانی ندارد زیرا در خاک سیلتی لومی، منحنی های معادله های کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ کمترین تطابق را، با منحنی داده های آزمایش، داشته است.

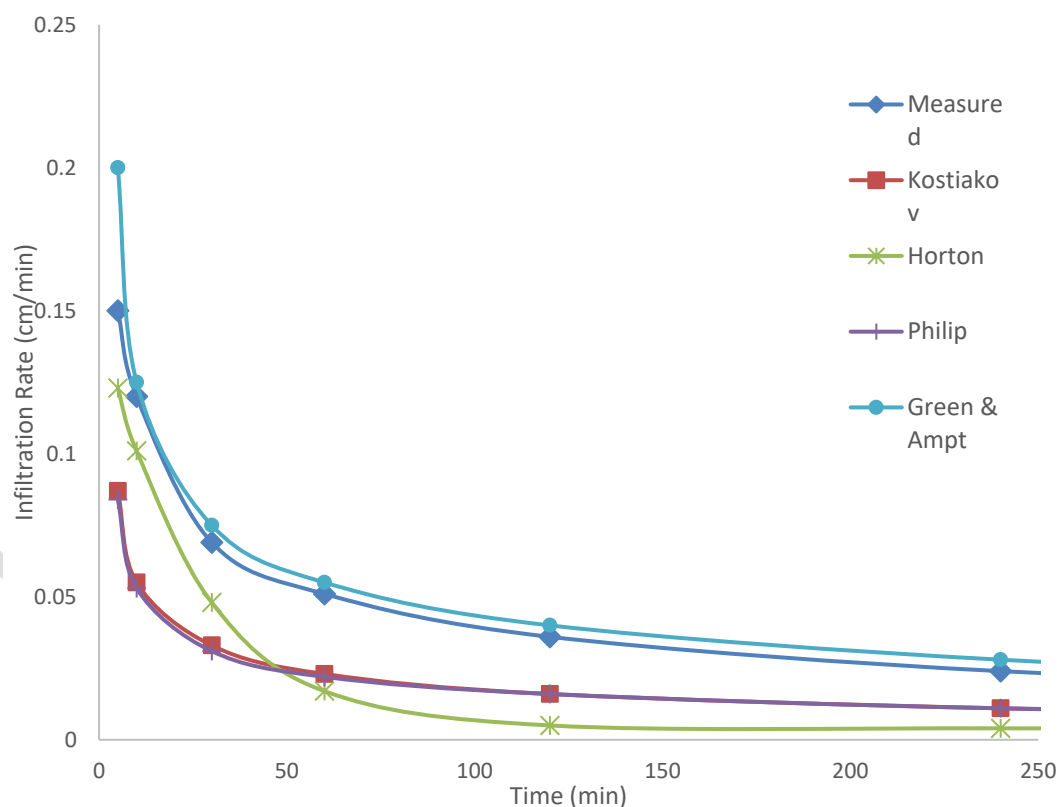


Figure 5: Comparison of observational and estimated infiltration rates in clay soil

نمودار (۵)، مقایسه داده های اندازه گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآورد شده از معادلات سرعت نفوذ، در خاک رسی را، نشان می دهد. در خاک رسی، سرعت نفوذ کند آب، به دلیل، ساختار متراکم خاک، تخلخل بیشتر، جرم مخصوص ظاهری کمتر، درصد رس زیاد، هدایت آبی کم، رطوبت اولیه و ظرفیت نگهداری بیشتر رطوبت، می باشد. معادلات کاستیاکوف، هورتون و فیلیپ، در برآورد مقادیر سرعت نفوذ برای بافت رسی، از دقت خیلی پایینی برخوردار بوده و مقادیر سرعت نفوذ را کمتر از داده های آزمایشی، برآورد، نموده اند، لذا منحنی های مربوطه، کمترین تطابق را، با منحنی داده های آزمایش، داشته است.

معادله گرین و امپت، برای پیش‌بینی سرعت نفوذ در دوره‌های طولانی، دقت بیشتری دارد. نتایج ارزیابی معادلات سرعت نفوذ، در سه بافت شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، نشان داد که معادله گرین و امپت، سرعت نفوذ را در هر سه نوع خاک، با دقت بیشتری، برآورد نموده است. دلیل دقت بالا و مناسب معادله گرین و امپت، با داده‌های آزمایش، در نظر گرفتن پارامترهای مهم فیزیکی خاک، رطوبت اولیه و رطوبت ظرفیت مزرعه، هدایت آبی، مکش رطوبتی و جبهه رطوبتی، در این مدل، است. پژوهشگران، نتایج تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ گرین و امپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده و هورتون را، با مقادیر حاصل از این معادلات را با داده‌های تجربی، مقایسه کردند، آنها، نشان دادند که از بین مدل‌های مختلف سرعت نفوذ آب (کوستیاکوف، هورتون، فیلیپ و گرین و امپت)، مدل گرین و امپت با مقدار RMSE کمتر، بهترین مدل، است (Omidvar et al., 2018). نتایج این گزارش، با نتایج این تحقیق، همخوانی دارد زیرا در خاک رسی، منحنی سرعت نفوذ گرین و امپت، بیشترین تطابق را، با داده‌های آزمایش و منحنی سرعت نفوذ مربوطه، داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش، در نمودارهای (۳)، (۴) و (۵) مشاهده می‌شود، مدل‌های کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ، سرعت نفوذ آب را، کمتر از مقادیر داده‌ها آزمایش در شرایط مزرعه، برآورد نموده‌اند، لذا همخوانی و تطابق با منحنی داده‌های اندازه‌گیری شده، ندارند. تغییر پذیری عوامل بافت و ساختمان خاک، رطوبت و... در سرعت نفوذ آب، موجب عملکرد متفاوتی در برآوردهای معادله نفوذ، در دو خاک با ویژگی‌های فیزیکی بسیار مشابه، می‌گردد (Bayabil et al 2019). ارزیابی تحقیقی، نشان داد از میان مدل‌های گرین-امپت، هورتون و گرین-امپت اصلاح شده؛ مدل گرین-امپت اصلاح شده، نتایج واقع‌گرایانه‌تری دارد چون متغیرها/پارامترهای بیشتری را نسبت به دو مدل دیگر، در نظر می‌گیرد (Mosammat and Borhan 2023). دقت مدل‌ها، به نوع بافت و ساختمان خاک، شرایط اولیه رطوبت لایه سطحی و هدایت آبی، وابسته است. معادله فیلیپ در خاک سیلتی لوم و رسی، سرعت نفوذ را با دقت پایین‌تری برآورد، کرده اما در بافت شنی، دقت آن از معادله هورتون، کمتر بوده است (Bajirao and Vishnu 2023). نتایج این تحقیق، با نتایج مطالعه در خاک‌های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، همخوانی دارد (Neshat and Parehkar, 2007). در پژوهش دیگری، محققین، نتایج مشابهی از مدل‌ها، برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب، گزارش کرده‌اند (Duan et al 2010). نتایج تحقیقی، نشان داد که مدل فیلیپ، دقت و کارایی بهتری نسبت به مدل کوستیاکوف در تخمین سرعت نفوذ دارد (Amami et al 2021). در پژوهشی، محققین نتیجه گرفتند که مدل لویس - کوستیاکوف در کاربری‌های مختلف در رتبه نخست است و مدل‌های سازمان حفاظت خاک آمریکا، فیلیپ، گرین و امپت و هورتون در رده‌های بعدی، قرار گرفتند (Kindo et al 2013). در این تحقیق، معادله گرین و امپت در برآورد سرعت نفوذ آب در بافت‌های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، دقت، نسبتاً خوب و قابل قبولی داشته است. لذا برای طیف وسیعی از خاک‌ها، عملکرد بهتری دارد. پیشنهاد می‌شود از ترکیب داده‌های اندازه‌گیری مزرعه، خصوصیات فیزیکی خاک با مدل‌های ریاضی، برای مطالعه طرح‌های مدیریت منابع آب، آبیاری و زهکشی، حفاظت آب و خاک، استفاده شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Green & Ampt
2. Horton
3. Kostiakov
4. Philip
5. Nash-Sutcliffe

- Almeida, W.S., Panachuki, E., de Oliveira, P.T.S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T.A., and de Carvalho, D.F. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175: 130–138.
- Amami R, Ibrahim K, Sher F, Milham P, Ghazouani H, Chehaibi S, Hussain Z, Iqbal HMN (2021) Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13 (6):1–15.
- Bayabil HK, Dile YT, Tebebu TY, Engda TA, Steenhuis T.S. (2019) Evaluating infiltration models and pedotransfer functions: implications for hydrologic modeling. *Geoderma*, 338(49):159-169.
- Bajirao, T.S., Vishnu, P. (2023). Comparative performance of different infiltration models for prediction of infiltration rate under different land-use conditions. *Environ Earth Sci*, 82(4):1–18.
- Batoukhteh, F., Khoshravesh, M., and Dehghanisani, H. (2021). Evaluating Some Infiltration Models under Different Soil Texture Classes and Land Uses in Urmia Lake Basin. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sci.)*, 35(1):73-87.
- Chari, M. M., Poozan, M. T., and Afrasiab, P. (2020) .Modelling soil water infiltration variability using scaling. *Biosystems Engineering*, 196:56-66.
- Dahak, A., Boutaghane, H., & Merabtene, T. (2022). Parameter Estimation and Assessment of Infiltration Models for Madjez Ressoul catchment, Algeria. *Water*, 14(8), 1185.
- Duan, R., Fedler, C.B., and Borrelli, J. (2010). Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrig. Sci.*, 29: 379-389.
- Faridah, S.N., Achmad, M., Jamaluddin, T.A., Jasmira, J. (2023). Infiltration model of Mediterranean soil with clay texture. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 12(1):162-168.
- Gebul, M.A. (2022). Simplified approach for determination of parameters for Kostiakov's infiltration equation. *Water Pract Technol*, 17(11):2435–2446.
- Ghosh, T., Maity, P.P., Das, T.K., et al. (2020). Evaluation of different infiltration models under long term conservation agricultural practices. *Indian J Agric Sci*, 90:2379–2384.
- Green, W., and Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. *J. Agr Sci.* 4, P.1-2.
- Haghnazari, F., Shahgholi, H., Feizi, M. (2015). Factors affecting the infiltration of agricultural soils. *Int J Agron Agric Res*, 6:21–35.
- Horton, R.E. (1940). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 5, P. 399-417.
- Kavousi, S.S., Vafakhah, M., and Mahdian, M.H. (2013). Evaluation of Some Infiltration Models for Different Land Uses in Kojour Watershed. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 4(1):1-13.
- Kojouri, R., and Javadi, M.R. (2023). Comparison of the Efficiency of Some Soil Infiltration Models Based on the Data Obtained from Double Rings in Different Land Uses (Case Study: Mikhsaz Watershed). (In Persian).
- Kindo, S., Agrawal, N., Shori, A. (2024). Evaluation of infiltration models in clay loam and laterite soils under field conditions. *Journal of Environment Conservation*, 25(1):22–32.

- Kostiakov, A.V. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation soils and the necessity for studying it from a dynamics point of view for purposes of amelioration. Transaction of the Sixth Commission of International Society of Soil Science. Part A., pp. 17-21.
- Mazighi A, Meddi H, Meddi M, Abdi I, Ravazzani G, Feki M (2023) Estimation and inter-comparison of infiltration models in the agricultural area of the Mitidja plain, Algeria. *J Arid Land* 15(12):1474–1489
- Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., Teklay, B.G. (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, 26, p 13(1).
- Mishra, S., J. Tyagi, and V. Singh. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*. 17:2629–2652.
- Mosammat, M. K., and Borhan, M. S. (2023). Evaluating model effectiveness for soil infiltration attribute: Comparison of Green-Ampt, Horton, and modified Green-Ampt infiltration models. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 11(2), 50–59.
- Neshat, A., and Porehkar, M. (2007). Comparison of the methods of determination of vertical soil water infiltration rate in the soil. *Journal of Natural Resources and Agriculture*. 14(3): 1-10.
- Nie, W., Ma, X., Fei, L. (2017). Evaluation of infiltration models and variability of soil infiltration properties at multiple scales. *Irrig Drain*, 66:589–599.
- Ogbe, V.B., Jayeoba, O.J., Ode, S.O. (2011). Comparison of four soil infiltration models on a sandy soil in Lafia, Southern Guinea Savanna Zone of Nigeria. *Production Agriculture and Technology*, 7(2): 116–126.
- Omidvar, E., Kavain, A., and Solamani, K. (2014). Identification of the Best Infiltration Model in Order to Investigation of Spatial Variability of Infiltration Parameters (Case Study: Darabkola River Basin). *E.E.R.*; 4(1):1-16.
- Parchami Araghi, F., Mirlatifi, S.M., Ghorbani Dashtaki, S., and Mahdian, M.H. (2010). Evaluating Some Infiltration Models Under Different Soil Texture Classes and Land Uses. *J. Irrigation and Drainage*. 2(4): 193-205.
- Patle, G.T., Sikar, T.T., Rawat, K.S., Singh, S.K. (2019). Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(1), 1–13.
- Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration: 1.The infiltration equation and its solution. *Soil Sci*. 83, P.345–357.
- Salifu1. A, Abagale. F.K and Berisavljevic. G.K. (2021). Estimation of Infiltration Models' Parameters Using Regression Analysis in Irrigation Fields of Northern Ghana, *Journal of Soil Science*, 11(3): 164-176.
- Song, J., Wang, J., Wang, W., Peng, L., Li, H., Zhang, C., and Fang, X. (2021). Comparison between different infiltration models to describe the infiltration of permeable brick pavement system via a laboratory-scale experiment. *Journal of Water Sci Technol*, 84 (9): 2214–2227.
- Thomas, A-D., Oforu, A.E., Emmanuel, A., De-Graft, A.J., Ayine, A.G., Asare, A., Alexander, A. (2020). Comparison and estimation of four infiltration models. *Open J Soil Sci*, 10(02):45–57.
- Utin UE, Oguike PC (2018) Evaluation of Philip's and Kostiakov's infiltration models on soils derived from three parent materials. *Sci Eng Res* 5(6):79–87
- Vghefi, M., and Movahedzadeh, M. (2014). Evaluation and comparison of infiltration methods in the catchment area of Mond River – Dashti Township by use double ring tests. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 4(3):1-12.
- Vand, A.S., Sihag, P., Singh, B., Zand, M. (2018). Comparative Evaluation of Infiltration Models. *KSCE J Civ Eng*, 22(10):4173–4184.

Vishwakarma, D. K., Yadav, D., Kumar, R., Bhat, S. A., Mirzania, E., & Kuriqi, A. (2024). Assessing the performance of various infiltration models to improve water management practices. Paddy and Water Environment, <https://doi.org/10.1007/s10333-024-01000-9>

Zolfaghari, A.A., Mirzaee, S., and Gorji, M. (2012). Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. Journal of Soil Science 7: 108-115.

آماده انتشار

Evaluation and comparison of Measured and Estimated Infiltration Rate in Three Soil Textures

Behzad Azadegan

¹ Corresponding Author, Behzad Azadegan, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran.

Abstract

Infiltration in soils with different textures exhibits varying behavior. Infiltration rate parameters depend on time and location, requiring numerous field measurements used to represent average field conditions, but measuring in the field is costly and time-consuming; they are estimated by infiltration equations. For optimal water use and increased irrigation efficiency, infiltration equation parameters, which are an essential role in the design of irrigation and drainage systems, should be calibrated with high accuracy. The purpose of this research is to evaluate and compare field-measured data with estimates from equations (Kostiakov, Horton, Philip, Green and Ampt), based on the using the double-ring method for three soil textures in three replicates. In this research, the cumulative infiltration rate measured by the double rings method for sandy loam, silty loam, and clay soil textures. Evaluation to the accuracy of the estimated values, the study utilized RMSE, MBE, and ENS. The equation with the lowest RMSE and MBE and the highest ENS was identified as the best for estimating infiltration rates for each soil texture. The results of this research, based on the evaluation indicators, determined: the Kostiakov, Green and Ampt equation, with the highest Nash-Sutcliffe indices and the lowest RMSE and MBE errors, infiltration rate with high accuracy, like the measurement data, for sandy loam, silty loam, and clay soils have estimated with the most accuracy and the least error. However, the Kostiakov for silty loam, the Horton for sandy loam, and the Philip equations for clay soils did not achieve the desired accuracy.

Key words: Double ring, Field, Infiltration rate, soil texture.