



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

Behzad Azadegan 

Corresponding Author, Behzad Azadegan, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: bazad@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 9 January 2025

Received in revised form

11 February 2024

Accepted 15 March 2025

Published online 11 October 2025

Keywords:

Double ring

Field

Infiltration rate

soil texture

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.

Cite this article: Azadegan, B. (2025). Evaluation and comparison of Measured and Estimated Infiltration Rate in Three Soil Textures. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 221-233.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388498.1202>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388498.1202>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی و مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و برآوردی سرعت نفوذ آب، در سه نوع بافت خاک

بهزاد آزادگان ✉

نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: bazad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ کلیدواژه‌ها: استوانه مضاعف بافت خاک سرعت نفوذ مزرعه	نفوذ آب در خاک با بافت‌های مختلف رفتار متفاوتی دارد، پارامترهای آن تابعی از زمان و مکان بوده و تعداد زیادی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نیاز است تا نشان‌دهنده متوسط شرایط مزرعه باشد. اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب در مزرعه به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، با مدل‌های سرعت نفوذ برآورد می‌شود. برای طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، استفاده بهینه از آب و افزایش راندمان آبیاری، باید پارامترهای نفوذ با دقت بالا اندازه‌گیری و واسنجی شوند. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مزرعه با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف و مقادیر برآوردی از معادله‌های سرعت نفوذ (کوستیاکوف، هورتون، فیلیپ و گرین و امپت)، برای سه نوع بافت خاک، در سه تکرار می‌باشد. برای ارزیابی دقت مقادیر برآوردی از معادلات سرعت نفوذ، از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و معیار ناش-ساتکلیف (ENS) استفاده گردید. معادله‌ای که کم‌ترین RMSE و MBE و بالاترین معیار ناش-ساتکلیف را داشته باشد، بهترین معادله برآورد سرعت نفوذ آب برای هر بافت خاک، انتخاب می‌شود. 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 داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای خاک‌های 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.

استناد: آزادگان، بهزاد (۱۴۰۴). بررسی و مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و برآوردی سرعت نفوذ آب، در سه نوع بافت خاک. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵

(۲)، ۲۲۱-۲۳۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388498.1202>



© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

سرعت نفوذ از پارامترهای بسیار مهم برای طراحی پروژه‌های 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 Porehkar, 2007; Faridah et al., 2023). نفوذ آب در خاک‌های با بافت‌های مختلف رفتار متفاوتی دارد، مدل‌های نفوذ باید با توجه به شرایط محلی و ویژگی‌های خاک انتخاب شوند، لذا ارزیابی و انتخاب مدل‌های مناسب، برای پیش‌بینی نرخ نفوذ آب اهمیت زیادی دارد (Bajirao and Vishnu, 2023; Parchami Araghi et al., 2010). سرعت نفوذ آب در خاک، تعیین‌کننده 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 ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط محیطی را در نظر گرفته و نتایج متفاوتی را برای پیش‌بینی سرعت نفوذ، ارائه می‌دهد (Thomas et al., 2020). مدل کوستیاکوف، یکی از ساده‌ترین مدل‌های ارزیابی سرعت نفوذ آب، است. این مدل رابطه تجربی بین زمان و میزان نفوذ را، ارائه می‌دهد که در شرایط مختلف قابل استفاده است (Kostiakov, 1932; Gebul, 2022). مدل هورتون به تأثیر تغییرات موقتی در ظرفیت نفوذ آب، توجه دارد و برای خاک‌های اشباع و غیراشباع مناسب است (Horton, 1940). مدل فیلیپ، با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی خاک، برآورد بهتری از سرعت نفوذ را در شرایط مختلف فراهم می‌کند (Philip, 1957). مدل گرین و امپت، برای خاک‌های با بافت‌های مختلف دقیق‌تر عمل می‌کند و یکی از مدل‌های کاربردی برای برآورد نفوذ آب است (Green and Ampt, 1911). اگر پارامترهای معادله نفوذ با دقت مناسب و نزدیک به شرایط مزرعه‌ای 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 مشکل‌ترین عامل، برای ارزیابی در سامانه‌های آبیاری سطحی است. نفوذ از مهم‌ترین متغیرهای فیزیکی خاک‌ها و داده‌ها در مدل‌های بارش و رواناب به‌منظور تعیین تلفات آب در سطح حوزه‌های آبخیز، می‌باشد (Vghefi et al., 2013). پارامترهای نفوذ، تابعی از زمان و مکان بوده و برای طراحی یک سامانه آبیاری، تعداد نسبتاً زیادی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با روش استوانه مضاعف نیاز است تا نشان‌دهنده متوسط شرایط مزرعه باشد (Vishwakarma et al., 2024). مدل‌هایی به‌منظور برآورد نفوذ توسعه یافته‌اند، برخی از این مدل‌ها روابطی تجربی بوده و بر شکل منحنی سرعت نفوذ و زمان تطبیق داده شده و برخی با توجه به مبانی فیزیکی بر نفوذپذیری سعی در ساده‌سازی شرایط اولیه و مرزی جریان غیر اشباع دارند (Haghazari et al., 2015; Nie et al., 2017). این مدل‌ها در خاک‌های مختلف با بافت‌های متفاوت مانند خاک‌های شنی، لومی و رسی بررسی می‌شوند تا بتوان مدل مناسبی، برای طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب ارائه نمود (Vand et al., 2011; Ogbie et al., 2018). اندازه‌گیری نفوذپذیری در مزرعه، هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان زیاد است، لذا بررسی ویژگی‌های 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 فیلیپ بررسی کردند که به‌ترتیب نتایج معادله کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ با داده‌های مشاهداتی مطابقت داشت (Mishra and Singh, 2003). در پژوهشی، مدل‌های مختلف نفوذ در خاک‌های چمن ارزیابی شد. نتایج نشان داد که برخی مدل‌ها بسته به شرایط خاص خاک، نتایج بهتری را ارائه می‌دهند (Duan et al., 2010). در مطالعه دیگری، تأثیر بافت و ویژگی‌های فیزیکی خاک بر

روی سرعت نفوذ آب، گزارش گردیده که خاک‌های رسی و شنی، رفتار متفاوتی در فرآیند نفوذ داشته‌اند (Ghosh *et al.*, 2020; Faridah *et al.*, 2023). هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه داده‌های اندازه‌گیری‌شده در شرایط مزرعه و مقادیر برآوردی از معادلات سرعت نفوذ (کوستیاکوف، هورتون، فیلیپ، گرین و امپت) در خاک‌های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، در مزرعه تحقیقاتی دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، مزرعه پژوهشی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، می‌باشد. موقعیت آن در شهرستان پاکدشت، استان تهران، واقع شده که در شکل (۱) نشان داده شده است. اقلیم منطقه، خشک و نیمه‌خشک و میانگین بارندگی سالانه، ۱۸۰ میلی‌متر، می‌باشد. 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.

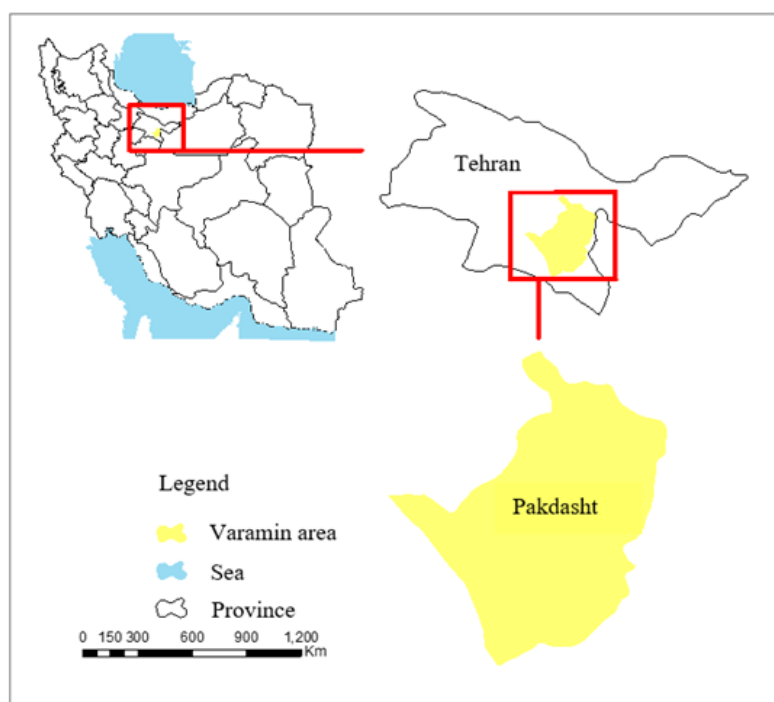


Figure 1. Location of the study area (Pakdasht in Tehran province)

در مکان‌های انتخابی مزرعه برای آزمایش، از بافت‌های مختلف خاک نمونه‌هایی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر به‌منظور تعیین برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه تهیه و به آزمایشگاه خاک‌شناسی ارسال شد. نمونه‌های هوا خشک شده، پس از کوبیدن و غربال با الک دو میلی‌متری، برای انجام آزمایش‌ها آماده شدند. براساس روش‌های معمول آزمایشگاهی، پارامترهای جرم مخصوص ظاهری (ρ_b)، رطوبت اولیه (θ_i)، رطوبت ظرفیت زراعی (θ_1)، رطوبت اشباع (SP) و تخلخل (Porosity) اندازه‌گیری گردید. سپس درصد ذرات خاک، شامل شن (Sand)، سیلت (silt)، رس (clay). نمونه‌ها با روش هیدرومتری مشخص شده و با استفاده از مثلث بافت خاک، نوع بافت (Texture) نمونه‌ها تعیین گردید. برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌های 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 استوانه‌های 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 داده‌های اندازه‌گیری و زمان‌های نفوذ ترسیم می‌شود. در پژوهشی، برای پیش‌بینی تغییرات مکانی نفوذ، به‌جای استفاده از پارامترهای معادله نفوذ، از مقدار آب نفوذ کرده به خاک در یک زمان مشخص برای به‌دست‌آوردن ضریب معادله سرعت نفوذ استفاده شده است (Chari *et al.*, 2020). وسایل اندازه‌گیری آزمایش نفوذ در شکل (۲) نشان داده شده است. آزمایش نفوذ، در سه نقطه مختلف با سه تکرار، برای هر نوع بافت خاک انجام‌شده و مقدار نفوذ آب تا زمان رسیدن به سرعت نفوذ ثابت ادامه یافت. ارتفاع آب روی سطح خاک درون استوانه‌ها، تا پایان آزمایش ۱۰ سانتی‌متر ثابت بود. مقدار نفوذ با خط‌کش مدرج، در فواصل زمانی متفاوت قرائت و داده‌های زمان (دقیقه) و مقدار نفوذ (سانتی‌متر)، در جداول آزمایش‌ها جداگانه ثبت شد، سپس مقدار نفوذ تجمعی در بازه‌های 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 داده‌های سه تکرار هر نوع بافت خاک، مقادیر اندازه‌گیری‌شده نفوذ تجمعی در زمان‌های آزمایش، منحنی‌های مربوطه با نرم‌افزار اکسل (Excel) ترسیم شد. معادله سرعت نفوذ، برای هر سه بافت خاک شنی لومی، سیلت لومی و رسی، جداگانه با مشتق‌گیری 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، مدل‌های گرین و امپت، کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون انتخاب گردیدند. خلاصه‌ای از تئوری معادلات به شرح ذیل ارائه می‌شود (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 ویژگی‌هایی چون مکش جبهه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع را در نظر می‌گیرد، لذا می‌توان شکل منحنی نفوذ و تغییرات آن را پیش‌بینی کرد. رابطه (۱) برای برآورد شدت نفوذ (I) به صورت زیر می‌باشد:

$$I = K_s (H_0 + S_w + L) / L \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، 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 ساده‌شده گرین و امپت براساس قانون دارسی از رابطه (۲) استفاده شده است:

$$I = \frac{A}{i} + B \quad \text{رابطه (۲)}$$

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 داده‌ها، A : معادل شیب خط و B : معادل عرض از مبدأ می‌باشد.

i : نفوذ تجمعی A و B : ضرایبی هستند که از روی آزمایش نفوذ به دست می‌آیند. این معادله، مبنای فیزیکی و نظری دارد و با آن می‌توان منحنی نفوذ و تغییرات آن را پیش‌بینی کرد.

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

$$I = St^{-0.5} + A \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، A : ضریب آگذری اشباع خاک و S : ضریب جذبی خاک می‌باشد. سرعت نفوذ با مشتق‌گیری از معادله (۳) به شرح ذیل و از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$dI/dt = (i_t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad \text{رابطه (۴)}$$

پارامترهای A و S در معادله (۴)، با رسم نمودار داده‌های سرعت نفوذ روی محور عمودی (i_t) در مقابل مقادیر زمان ($t^{-0.5}$) روی محور افقی خط مستقیمی به دست می‌آید که در آن مقدار A برابر عرض از مبدأ و مقدار S معادل شیب خط می‌باشد.

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

$$I = Kt^a \quad \text{رابطه (۵)}$$

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) می‌باشد و k محل تلاقی خط با محور عمودی (عرض از مبدأ) است که مقدار آن بین صفر و یک بوده و بستگی به ویژگی‌های خاک ندارد.

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

$$F_t = F_c t + F_0 e^{-kt} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، F_t : سرعت نفوذ در زمان t (میلی‌متر بر ساعت)، F_c : شدت نفوذ نهایی (میلی‌متر بر ساعت)، F_0 : شدت نفوذ اولیه (میلی‌متر 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 لحظه‌ای (i_t)، روی محور عمودی در مقابل لگاریتم داده‌های زمان ($\log t$) روی محور افقی به صورت نموداری ترسیم شود، شیب خط برابر مقدار k می‌باشد که چون شیب خط رو به پایین است منهای جلوی k گذاشته می‌شود ($-k$).

با ترسیم نمودارها و برازش داده‌های اندازه‌گیری شده، مقادیر پارامترهای معادلات، برای سه نوع بافت خاک شنی لومی، سیلتی لوم و رسی محاسبه گردید که به ترتیب معادلات مربوطه در جدول‌های (۳)، (۴) و (۵)، با واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است. پس از ترسیم نمودار برای هر کدام از مدل‌های فوق، با توجه به منحنی‌های سرعت نفوذ هر مدل بررسی مقایسه داده‌های اندازه‌گیری 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 زمان‌های 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 پایین‌تر این دو شاخص نشان‌دهنده دقت معادله مورد استفاده، است. بهترین حالت برای RMSE وقتی است که مقدار به دست آمده آن نزدیک به صفر باشد.

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

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

برای بررسی دقت نسبی معادلات مورد استفاده در این پژوهش، از مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های برآورد شده از این معادلات، از رابطه (۹)، معیار ناش-ساتکلیف (ENS) استفاده گردید که در واقع معیاری برای برآورد دقت و مقایسه بین

داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده است. معیار ناش-ساتکلیف نشان می‌دهد، خط رگرسیون بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار، به خط رگرسیون با شیب یک نزدیک است و مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر می‌باشد.

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_{oi} - I_{ei})^2}{\sum_{i=1}^N (I_{oi} - I_o)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

در این روابط، N: تعداد داده‌های ثبت شده در دوره موردنظر، i: شماره هر رویداد از یک تا n، I: نشان‌دهنده مقدار نفوذ و زیروندهای o و e به ترتیب مقدار نفوذ مشاهده‌ای و محاسباتی است. تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب، برای ضریب ناش-ساتکلیف ارائه نشده است. اما 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 معادله‌های سرعت نفوذ (کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون و گرین و امپت) برای بافت‌های مختلف خاک‌ها، محاسبه و واستجی شد که نتایج مربوطه در جدول‌های (۳)، (۴) و (۵) ارائه شده است. پس از محاسبه مقدار سرعت نفوذ، مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده با استفاده از شاخص‌های آماری، ارائه شده در جدول‌های (۶)، (۷) و (۸) برای هر نوع بافت خاک جداگانه بررسی و ارزیابی شدند. ارزیابی آماری مدل‌های سرعت نفوذ نشان داد، در خاک‌های 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 داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه، داشته است. در خاک شنی لومی به ترتیب معادله‌های گرین و امپت، کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون در خاک سیلتی لوم به ترتیب معادله‌های گرین و امپت، هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ و برای خاک رسی دقت معادلات به ترتیب معادله‌های گرین و امپت، هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ، رتبه‌بندی گردیده است.

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

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

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

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

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

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

نمودار (۳)، مقایسه داده‌های اندازه‌گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآورد شده معادلات سرعت نفوذ را در خاک شنی لومی نشان می‌دهد؛ سرعت نفوذ در ابتدا بالا بوده و به تدریج کاهش می‌یابد 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 می‌باشد. معادله کاستیاکوف در برآورد سرعت نفوذ در خاک شنی لومی دقت کم‌تری دارد، لذا برای برآورد سرعت نفوذ در

زمان‌های کوتاه مناسب است اما برای مدت‌های طولانی خطای زیادی دارد. معادله هورتون سرعت نفوذ را بیش‌تر از داده‌های اندازه‌گیری برآورد نمود. مدل هورتون برای ارزیابی هیدرولوژیکی و تأثیر کاهش رواناب باران یک مدل نفوذ بهینه و انعطاف‌پذیر است (Song *et al.*, 2021). معادله فیلیپ، سرعت نفوذ را کم‌تر از مقدار داده‌های اندازه‌گیری‌شده، برآورد نموده، معادله گرین و امپت، بیش‌ترین تطابق واقعی را با داده‌های آزمایش نفوذ در شرایط مزرعه داشته است. مقایسه‌ها بین سرعت‌های نفوذ پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای با استفاده از پارامترهای داده‌های میدانی و آزمایشگاهی نشان داد، معادلات تجربی ممکن است پیش‌بینی‌های بهتری ارائه دهند، چون پارامترهای آن‌ها براساس داده‌های نفوذ میدانی واقعی تعیین می‌شوند (Salifu *et al.*, 2021). در پژوهشی، 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 به‌ترتیب نتایج معادله کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ با داده‌های مشاهداتی مطابقت داشته است (Mishra and Singh, 2003) که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد، زیرا در خاک شنی لومی بیش‌ترین تطابق و دقت با داده‌های آزمایش به‌ترتیب شامل معادله‌های گرین و امپت، کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ به‌دست آمده است.

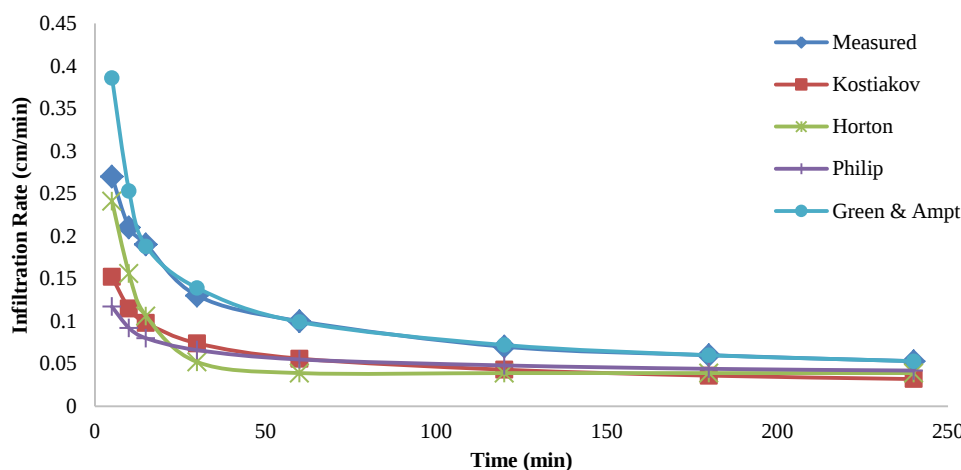


Figure 3. Comparison of observational and estimated infiltration rates in sandy loam soil

نمودار (۴)، مقایسه داده‌های اندازه‌گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآوردشده از معادلات سرعت نفوذ را در خاک سیلتی لوم نشان می‌دهد. سرعت نفوذ متوسط در خاک سیلتی لوم به‌دلیل وزن مخصوص ظاهری و تخلخل مناسب آن، می‌باشد. در خاک‌های سیلتی لوم کاهش سرعت نفوذ نسبت به خاک شنی لومی به‌دلیل ساختمان نسبتاً متراکم و درصد رس بیش‌تر آن می‌باشد. معادله هورتون و کاستیاکوف، در برآورد سرعت نفوذ خاک با بافت سیلتی لوم، ناتوان بوده و از دقت پایین‌تری برخوردار هستند. معادله فیلیپ، سرعت نفوذ را کم‌تر از مقدار داده‌های اندازه‌گیری‌شده برآورد کرده و مدل مناسبی برای خاک سیلتی لوم نمی‌باشد. 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 مناسب‌تری را، با داده‌های اندازه‌گیری مزرعه داشته است. بافت خاک، رطوبت اولیه و رطوبت ظرفیت مزرعه، هدایت آبی، مکش رطوبتی و جبهه رطوبتی نقش مهمی در تعیین شدت نفوذ دارند؛ معادله گرین و امپت این پارامترها را با دقت در نظر می‌گیرد 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 داده‌های مشاهده‌ای، برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ، به‌روش استوانه مضاعف ارزیابی شدند. نتایج آن‌ها نشان داد معادله کوستیاکوف بهترین نتیجه را دارد، اما در درازمدت، معادله فیلیپ و SCS عملکرد بهتری داشته‌اند (Mesele et al., 2024). داده‌های این گزارش، با نتایج این پژوهش همخوانی ندارد، زیرا در خاک سیلتی لومی منحنی‌های معادله‌های کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ کم‌ترین تطابق را با منحنی داده‌های آزمایش داشته است.

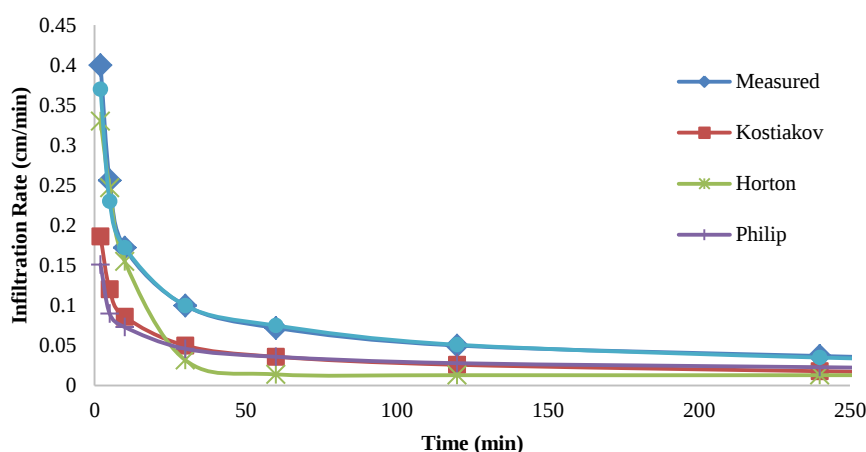


Figure 4. Comparison of observational and estimated infiltration rates in silty loam soil

نمودار (۵)، مقایسه داده‌های اندازه‌گیری آزمایش نفوذ در مزرعه و مقادیر برآوردشده از معادلات سرعت نفوذ در خاک رسی را نشان می‌دهد. در خاک رسی سرعت نفوذ کُند آب به‌دلیل ساختار متراکم خاک، تخلخل بیش‌تر، جرم مخصوص ظاهری کم‌تر، درصد رس زیاد، هدایت آبی کم، رطوبت اولیه و ظرفیت نگهداری بیش‌تر رطوبت می‌باشد. 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 داده‌های آزمایشی برآورد نموده‌اند، لذا منحنی‌های مربوطه کم‌ترین تطابق را با منحنی داده‌های آزمایش داشته است.

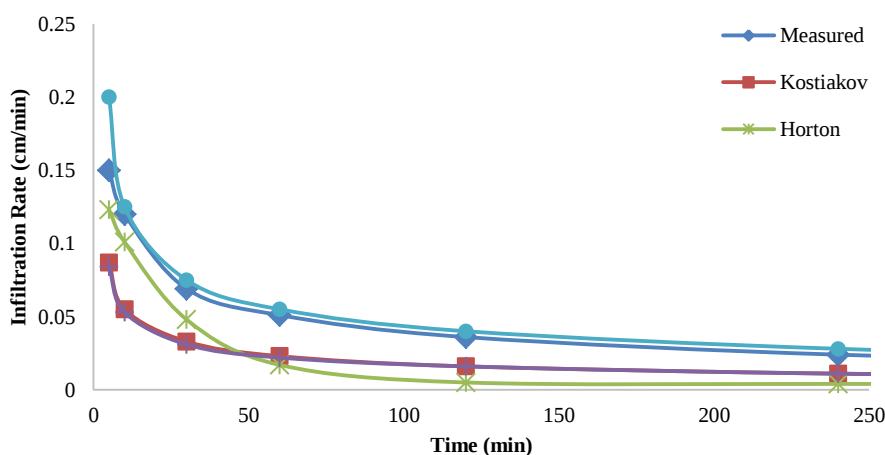


Figure 5. Comparison of observational and estimated infiltration rates in clay soil

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 اصلاح‌شده 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 پژوهش 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 اندازه‌گیری‌شده ندارند. تغییرپذیری 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 پژوهشی نشان داد از میان مدل‌های گرین-امپت، هورتون و گرین-امپت اصلاح‌شده؛ مدل گرین-امپت اصلاح‌شده، 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 پژوهش، با نتایج مطالعه در خاک‌های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، همخوانی دارد (Neshat and Porehkar, 2007). در پژوهش دیگری، پژوهش‌گران نتایج مشابهی از مدل‌ها برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب گزارش کرده‌اند (Duan et al., 2010). نتایج پژوهشی، نشان داد که مدل فیلیپ دقت و کارایی بهتری نسبت به مدل کوستیاکوف در تخمین سرعت نفوذ دارد (Amami et al., 2021). در پژوهشی، پژوهش‌گران 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 پژوهش، معادله گرین و امپت در برآورد سرعت نفوذ آب در بافت‌های شنی لومی، سیلتی لوم و رسی، دقت نسبتاً خوب و قابل‌قبولی 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. Kostiaikov
4. Philip
5. Nash-Sutcliffe

۶. منابع

- 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.
- Amami, R., Ibrahimi, K., Sher, F., Milham, P., Ghazouani, H., Chehaibi, S., Hussain, Z., & Iqbal, H. M. (2021). Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(6), 3155.
- Bayabil, H. K., Dile, Y. T., Tebebu, T. Y., Engda, T. A., & Steenhuis, T. S. (2019). Evaluating infiltration models and pedotransfer functions: implications for hydrologic modeling. *Geoderma*, 338, 159-169.
- Bajirao, T.S., & Vishnu, P. (2023). Comparative performance of different infiltration models for prediction of infiltration rate under different land-use conditions. *Environmental Earth Sciences*, 82(4), 1-18.
- Batoukhteh, F., Khoshravesh, M., & 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., & 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., & Borrelli, J. (2011). Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science*, 29(5), 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., Krishnan, P., Bhatia, A., Roy, M., & Sharma, D. K. (2020). Evaluation of different infiltration models under long term conservation agricultural practices. *Indian Journal of Agricultural Science*, 90, 2379-2384.
- Green, W., & Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 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 Science Society of America*, 5, 399-417.
- Kavousi, S.S., Vafakhah, M., & 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., & 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. *Journal of 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, 13(1).
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., & Singh, V. P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological processes*, 17(13), 2629-2652.

- Mosammat, M. K., & 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 Parehkar, 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., & 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., & Mahdian, M.H. (2010). Evaluating Some Infiltration Models Under Different Soil Texture Classes and Land Uses. *Journal of 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 Scienc*, 83, 345-357.
- Salifu, A., Abagale, F.K., & 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., & 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., Ofosu, A.E., Emmanuel, A., De-Graft, A.J., Ayine, A.G., Asare, A., & Alexander, A. (2020). Comparison and estimation of four infiltration models. *Open Journal of Soil Science*, 10(02), 45-57.
- Utin, U.E., & Oguike, P.C. (2018). Evaluation of Philip's and Kostiaikov's infiltration models on soils derived from three parent materials. *Sci Eng Res.*, 5(6), 79-87.
- Vghefi, M., & 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 Journal of Civil Engineering*, 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., & Gorji, M. (2012). Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *Journal of Soil Science*, 7, 108-115.