

Research Article

Spatial Variability of Holtan Soil Infiltration Control Depth Parameter Along Two Toposequences

Saeed Sharifi Zilan³, Mohammad Hossein Mohammadi¹, Hossein Asadi²

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: saeed.sharif.z@ut.ac.ir

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: mhmohmad@ut.ac.ir

3-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: ho.asadi@ut.ac.ir

Received: May 26, 2026

Revised: June 11, 2026

Accepted: June 15, 2026

Published: June 17, 2026

Extended Abstract

Background and objectives

Infiltration is controlled by i) the water supply rate on the soil surface, ii) soil surface properties and iii) soil profile properties. Where the surface control and flux control are not restrictive, soil profile properties will control the rate of water infiltration. To express infiltration at “profile control” condition, Holtan (1961) developed an empirical model whose parameters have a physical meaning. Many researchers showed that the Holtan model can express reasonably soil infiltration and predicts water storage capacity and the maximum infiltration rate and runoff. In addition, the physical base of Holtan model allows to predict soil infiltration and hence, it provides input data to estimate following processes although, the physical meaning of control depth, or the depth of soil that should be input in model has not been provided reasonably yet. The importance of the top soil thickness in the soil infiltrability and the mechanism of water infiltration in the soil is known, but the value of infiltration control depth is still unclear. Although many attempts have been suggested to define the control depth such as: the depth of the impermeable layer, the thickness of the Ap horizon, depth of water table, very limited studies have been conducted to describe it in real conditions. Since the Holtan model allows the prediction of soil infiltration and this model is highly influenced by control depth parameter therefore, the objectives of this study were: i) to understand how soil infiltration and the control depth factor vary across hillslope transects ii) to link these soil functions to soil basic properties and topographical attributes.

Materials and Methods

The study was carried out along two opposite 580 meter hillslopes. At each transect position soil samples were collected and the infiltration experiment was conducted using a double-ring infiltrometer in three replications. The Holtan infiltration model (1961) was fitted to the experimental data to obtain the control depth of infiltration and other model parameters as well.

Results

The results of soil analysis demonstrated a wide range of the physical and chemical properties of the studied soils. The Holtan model was fitted appropriately to the experimental infiltration data across all studied soils and consequently the subject empirical parameters were obtained. The correlation between the Holtan model parameters was statistically insignificant, showing independent variations along the

two toposequences, indicating the high flexibility of the model. The range of variations for the infiltration control depth (D) was limited and did not correlated significantly with the thickness of the A horizon, the depth of impermeable layer, nor with soil properties such as sand, silt, and clay content, organic matter, or initial and saturated soil water content. However, in both slopes, the D value decreased from the upper slope, reached its minimum at the backslope, and then increased again in the toeslope. These changes are consistent with the pattern of soil evolution along a toposequence. Although the role of soil surface characteristics on water infiltration in soil has been demonstrated well, in our study the infiltration pattern cannot be attributed to changes in soil surface characteristics and vegetation because, the type of soil surface cover was almost the same at all measurement points. Soil initial conditions (especially initial water content), influences highly on the water infiltration in the soil, but in the study area, the variation of initial water content were limited and less than 8% moreover, it did not correlate significantly with the control depth, so these two parameters cannot explain soil infiltration along studied toposequences.

Conclusion

While it is not possible to attribute the infiltration control depth to a single and easily available soil property, it can be confirmed that an underlying physical interpretation is embedded. Although this value is obtained from model fitting in experimental infiltration studies, it possesses a meaningful physical interpretation beyond that of a purely empirical coefficient. The limited range of variations of D, along with its simultaneous variations with pedological conditions along the two toposequences, indicates that comprehensive, large-scale studies-as well as the development of pedotransfer functions- are required to better understand the physical concept and estimation of this parameter. This finding can help understand eco-hydrological processes in the context of water resources management in dryland ecosystems.

Key words: Catena, Pedological factors, Soil infiltration, Soil physics.

Author Contributions

M.H. Mohammadi and H. Asadi conceived and planned the experiments S Sharifi Zilan carried out the experiments. M.H. Mohammadi wrote the first manuscript. All authors contributed to the interpretation of the results. M.H. Mohammadi and H. Asadi authors provided critical feedback and helped shape the research, analysis and manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors thank the University of Tehran for supporting this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Cite this article: Sharifi Zilan, S., Mohammadi, M.H., & Asadi, H. (2026). Spatial variability of Holtan soil infiltration control depth parameter along two toposequences. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(2), 1-18.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72625.1041>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





مقاله پژوهشی

تغییرات پارامتر عمق کنترل نفوذ آب در خاک مدل هولتان در طول دو توپوسکانس

سعید شریفی ذیلان^۱ , محمدحسین محمدی^۲ , حسین اسدی^۳ 

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: saeed.sharif.z@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mhmohmad@ut.ac.ir

۳- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ho.asadi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵	تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

چکیده

مدل تجربی هولتان برای تبیین نفوذ آب به خاک در مقیاس‌های بزرگ توسعه داده شده و دارای پارامترهایی مانند عمق کنترل نفوذ (D) است که فرض می‌شود که دارای مفهوم فیزیکی هستند. پارامتر D مهمترین عامل در مدل هولتان است که تغییرات شدت نفوذ در طی زمان را تبیین می‌کند. مفاهیم مختلفی برای بیان معنی فیزیکی آن پیشنهاد شده‌است که هر یک دارای محدودیت‌هایی هستند. پژوهش حاضر در جهت تشریح و درک مفهوم فیزیکی پارامتر عمق کنترل نفوذ انجام گردید. برای این کار، منحنی نفوذ آب در خاک در ۱۲ نقطه مختلف در روی دو دامنه شیب روبروی هم با طیف نسبتاً وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری گردید و مدل هولتان بر آن برازش داده شد تا الگوی تغییرات D و همبستگی آن با ویژگی‌هایی از خاک که به‌طور شناخته شده در طول دامنه تغییر می‌کنند، مشخص گردد. نتایج نشان داد که مدل هولتان برازش مناسبی بر داده‌های تجربی نفوذ آب در نقاط مختلف دو دامنه دارد و عامل D با دقت مناسبی قابل برآورد در نقاط مختلف هر دو دامنه است. مقدار عمق کنترل نفوذ بین ۱۵/۷ تا ۶۶/۳ سانتی‌متر متغیر بوده و در هر دو توپوسانس مقدار آن از بالای دامنه به طرف پایین کاهش یافته و در میانه آن به حداقل خود می‌رسد و سپس در بخش‌های پایین دامنه مجدداً افزایش می‌یابد. در طول هر دو توپوسکانس، عمق کنترل نفوذ به دلیل پیچیدگی‌های مستتر در خود، با ویژگی‌هایی مانند عمق سخت کفه و ضخامت افق A و درصد شن، سیلت و رس و رطوبت اولیه و اشباع خاک همبستگی معناداری ندارد. در مطالعه حاضر، یافتن یک مفهوم ملموس و فیزیکی دقیق برای عامل D میسر نگردید اما تشابه الگوی تغییرات D با الگوی تغییرات عوامل ژنتیکی خاک و موقعیت نقطه اندازه‌گیری شده در روی دو توپوسکانس نشان داد که یک معنی و پایه فیزیکی در آن مستتر است و مفهومی فراتر از «صرفاً یک ضریب تجربی» دارد. وجود درز و ترک‌ها و منافذ درشت و کرم راه‌ها در خاک‌های مختلف می‌تواند از دلایل دشواری یافتن یک مفهوم فیزیکی برای عمق کنترل نفوذ باشد. دامنه محدود تغییرات D و شباهت الگوی تغییرات آن با الگوی تغییرات شرایط پدولوژیکی خاک نشان داد که مطالعات جامع و وسیع مقیاس و توسعه توابع تبدیلی خاکی می‌توانند در درک مفهوم فیزیکی و برآورد این پارامتر راهگشا باشند.

واژه‌های کلیدی: عامل‌های خاکساز، فیزیک خاک، کاتنا، نفوذپذیری خاک.

استناد به این مقاله: شریفی ذیلان، س.، محمدی، م.ح.، و اسدی، ح. (۱۴۰۵). تغییرات پارامتر عمق کنترل نفوذ آب در خاک مدل هولتان در طول دو توپوسکانس. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۲)، ۱-۱۸.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72625.1041>

مقدمه

نفوذ، فرایند ورود آب به داخل پروفیل خاک است و در چرخه هیدرولوژی نقش اصلی در تعیین کیفیت و کمیت آب های سطحی و زیرزمینی دارد (Vereecken *et al.*, 2022). نفوذ آب به خاک عموماً به وسیله سه عامل سرعت تامین آب (Shukla *et al.*, 2023)، شرایط سطح خاک (van Schaik, *et al.*, 2014; de Almeida *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2025) و نفوذپذیری پروفیل خاک (Smetten *et al.*, 2021) تعیین می‌گردد. تعیین عامل محدود کننده نفوذ آب به خاک در مدل‌سازی و برآورد نفوذ آب در شرایط و مناطق مختلف و نیز توسعه روش‌های مدیریت آب در مزرعه نقش اساسی دارد. برای شرایطی که عوامل سطح و یا پروفیل خاک عامل محدود کننده نفوذ آب در خاک هستند، مدل‌های نظری و تجربی متعددی برای تبیین نفوذ آب در خاک توسعه یافته اند. مدل‌های تجربی مانند مدل کوستیاکوف (Kostiakov, 1932) روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (Mishra & Singh, 1999) و مدل هورتون (Horton, 1938) دارای ضرایب تجربی هستند که از برازش یا روش‌های توابع تبدیلی خاکی به دست می‌آیند و به شدت تحت تأثیر شرایط زمانی و مکانی قرار می‌گیرند (Mirzaee *et al.*, 2014) به همین دلیل قابلیت تعمیم آن‌ها به سایر خاک‌ها و شرایط محدود است (Basset *et al.*, 2025).

همچنین، پارامترهای مدل‌های تجربی نفوذ فاقد هر گونه مفهوم فیزیکی هستند و به همین دلیل تفسیر نتایج، امکان برآورد نفوذ برای شرایط و زمان‌هایی غیر از شرایط آزمایش و نیز بررسی رابطه بین ویژگی‌های خاک و نفوذ آب در خاک به دشواری فراهم شده و نتایج و تفسیرها نیز از قطعیت و جهان شمولی بالایی برخوردار نیستند (Basset & Abou Najm, 2025). مدل‌های نیمه تجربی مانند Guo *et al.* (2026) هم دارای محدودیت‌های مشابهی هستند اما مدل‌های نظری مانند مدل فیلیپ (Phillip, 1957) مدل گرین امپت (Green & Ampt, 1911) که بر پایه قوانین فیزیکی استنتاج و توسعه داده شده‌اند، دارای عواملی هستند که دارای مفهوم فیزیکی می‌باشند. با این حال، این مدل‌ها به دلیل آنکه محیط پیچیده و ناهمگن خاک و شرایط بغرنج جریان غیراشباع - غیرماندگار آب را تا حدود زیادی ساده فرض می‌کنند، دقت مناسبی ندارند (Mohammadi & Rafahi, 2006, Mirzaee *et al.*, 2014). در این میان، مدل هولتان (Holtan, 1961) در عین حال که یک معادله تجربی است، اما دارای پارامترهایی است که دارای مفهوم فیزیکی می‌باشند (Rawls *et al.*, 1992). به همین دلیل، انتظار می‌رود بتوان تفسیر قابل قبولی برای پارامترهای آن در شرایط واقعی نفوذ آب در خاک طبیعی یافت و ارتباط بین مقادیر پارامترها و شرایط اولیه و مرزی حاکم بر پدیده نفوذ آب در خاک را درک نموده و تبیین و یا برآورد نفوذ آب به خاک را در مقیاس‌های بزرگ فراهم نمود. علاوه بر آن، این مدل دارای کارایی مناسبی در مقیاس‌های بزرگ است (Holtan & Lopez, 1971). (Mishra *et al.* (2003) با مقایسه ۱۴ مدل مختلف نفوذ شامل فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده، گرین آمپت، هورتون، هولتان، سینگ-یو، اسمیت، اورتون، کولیس-جرج، هاگینس-مونک، میشر-سینگ، اسمیت-پارالانژ در دو فرم خطی و غیر خطی دریافتند که کارایی مدل هولتان در شبیه سازی نفوذ در مزرعه رتبه دوم را در بین این مدل‌ها دارد. در مقابل برخی محققین مانند Parnas *et al.* (2021) نشان دادند که توانایی مدل نفوذ هولتان برای محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی آب قابل دسترس و حداکثر سرعت نفوذ، و در نتیجه پیش بینی رواناب بیشتر از سایر مدل‌ها است، هر چند در این مدل داده‌های ورودی بیش‌تری در مقایسه با روش نفوذ گرین - امپت و هورتون مورد نیاز است. (Mallari *et al.* (2015) نیز نشان دادند که برای مقیاس‌های بزرگ، مدل هولتان در تبیین نفوذ آب به خاک بهتر از مدل هورتون عمل می‌کند. (Frere *et al.* (1975) نیز کارایی مدل هولتان در برآورد رواناب حاصل از باران را گزارش نمودند. مدل هولتان علاوه بر مزیت لحاظ نمودن شرایط مدیریتی اراضی

و کارکرد در مقیاس بزرگ، دارای پارامترهایی است که واجد مفهوم فیزیکی هستند. یکی از این پارامترها، عمق کنترل نفوذ آب در خاک و دیگری توان این پارامتر است که در بسیاری از شرایط ثابت و برابر با $1/4$ در نظر گرفته می‌شود (Bybordi, 2014).

Shao & Baumgartl (2014) با انجام تحلیل حساسیت مدل هولتان دریافته‌اند که در درجه اول عامل توان عمق کنترل نفوذ و در درجه بعدی عمق کنترل نفوذ آب، بیشترین نقش در تعیین مقدار نفوذ آب در خاک را دارند. Singh (2010) با استفاده از نظریه آنتروپی، روشی برای برآورد عمق کنترل نفوذ مدل هولتان از برآزش بر داده‌های نفوذ آب در خاک توسعه داد هرچند در مورد اینکه مفهوم عمق کنترل چيست، و یا چه عمقی از خاک باید در نظر گرفته شود، یافته‌ای ارائه نمود. اهمیت ضخامتی از پروفیل خاک که شدت نفوذ را کنترل می‌کند و نقش آن در تعیین سازو کار نفوذ آب در خاک به وسیله Ju *et al.* (2024) گزارش شده است اما مشخص نیست چه بخشی از ضخامت پروفیل خاک نفوذ آب را کنترل می‌کند. هرچند پیشنهادات مختلفی برای تعریف عمق کنترل نفوذ مانند: عمق سخت کفه و یا ضخامت افق Ap ارائه شده است (Huggins & Monke, 1966; Overton, 1964) اما مطالعات بسیار محدودی برای تبیین آن در شرایط واقعی انجام شده است. تحقیق حاضر در جهت درک مفهوم فیزیکی عمق کنترل نفوذ مدل هولتان انجام گردید. برای دست یابی به داده‌های متنوع از تغییرات مکانی نفوذ در یک منطقه، نفوذ آب به خاک در طول دو دامنه شیب روبروی هم اندازه‌گیری شد تا عمق کنترل ابتدا محاسبه و سپس تغییرات آن از بالا تا پایین یک دامنه بررسی و تا حد ممکن مشخص شود که تابع چه عواملی است.

مواد و روش‌ها

موقعیت و ویژگی‌های عمومی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، در ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران واقع در کوهین در مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 22'$ شمالی و $49^{\circ} 35'$ شرقی در تناوب زراعی کشت دیم-آیش قرار دارد. رژیم رطوبتی منطقه زریک و رژیم حرارتی آن مزیک و خاک‌های آن در دو رده اینسپیتی‌سول‌ها و انتی‌سول‌ها طبقه‌بندی شده و فاقد سخت‌کفه تا عمق دو متری می‌باشند. منطقه دارای یک دره و دو توپوسکانس جنوبی و شمالی با شیب کمتر از ۲۰ درصد است. با فرض وجود تغییرات الگودار در ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی در طول دو توپوسکانس (Xue *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2021)، ابتدا در امتداد یک خط فرضی، در دامنه جنوبی ۵ پروفیل و در دامنه شمالی ۶ پروفیل حفر شد. یک پروفیل نیز درست در وسط دره حفر گردید. پروفیل‌ها با استفاده از سیستم جامع آمریکایی (Soil Survey Staff, 2022) تشریح شدند. طول و عرض جغرافیایی و شیب محل حفر پروفیل در جدول ۱ آمده است. شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه و نیز محل حفر پروفیل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت مکانی پروفیل‌های حفر شده در طول دو دامنه در داخل ایستگاه و نیمرخ ارتفاعی دامنه‌ها.

جدول ۱- طول و عرض جغرافیایی و درصد شیب هر یک از پروفیل‌ها در طول دو دامنه.

شماره پروفیل	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	درصد (%)
1	36°22'30.85"N	49°34'58.57"E	10
2	36°22'31.57"N	49°34'59.32"E	11
3	36°22'32.76"N	49°35'0.18"E	15
4	36°22'34.26"N	49°35'1.27"E	10
5	36°22'35.22"N	49°35'2.25"E	12
6	36°22'36.87"N	49°35'4.20"E	7
7	36°22'37.58"N	49°35'4.79"E	1
8	36°22'39.72"N	49°35'6.20"E	5
9	36°22'40.90"N	49°35'7.26"E	15
10	36°22'42.00"N	49°35'8.46"E	7
11	36°22'43.23"N	49°35'9.45"E	8
12	36°22'42.46"N	49°35'8.95"E	7

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در همه پروفیل‌های حفر شده از هر افق مشخصه، تعداد سه نمونه دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهایی با قطر ۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر برای تعیین رطوبت حجمی اولیه و اشباع برداشت شدند. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تعداد ۳۶ نمونه خاک به صورت دست‌خورده به جرم ۱۰-۱۵ کیلوگرم نیز تهیه و به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات اولیه، جرم مخصوص ظاهری، قابلیت هدایت الکتریکی و pH عصاره اشباع، کربن آلی، کربنات کلاسیم معادل و رطوبت اولیه و اشباع و منحنی رطوبتی مطابق روش‌های رایج اندازه‌گیری گردیدند (Shahbazi et al., 2024).

اندازه‌گیری و مدل‌سازی نفوذ آب در خاک

در دو دامنه شیب، نقاط برای نمونه‌برداری به نحوی انتخاب شدند که نماینده بخش‌های مختلف شیب باشد. در مجاورت هر پروفیل حفر شده، نفوذ آب در خاک با استفاده از نفوذسنج استوانه ای دوگانه قائم با قطر استوانه داخلی برابر با ۳۳ سانتی‌متر و قطر استوانه خارجی ۶۶ سانتی‌متر در سه تکرار اندازه‌گیری شد. سپس معادله هولتان (رابطه شماره ۱) برای تشریح نفوذ آب در خاک استفاده گردید (Holtan, 1961).

$$f = 0.69.a.S^{1.4} + f_c \quad (۱)$$

f سرعت نفوذ (LT^{-1})

$0.69a$ ضریبی است مربوط به نوع کشت که از جدول خوانده می‌شود ($L^{-0.4}T^{-1}$)، (Holtan & Lopez, 1971)

f_c سرعت نفوذ نهایی آب در خاک (LT^{-1})

S تخلخلی از خاک که خالی از آب بوده و می‌تواند آب نافذ در سطح خاک را در خود جای دهد.

به دلیل آنکه برازش مدل هولتان (رابطه ۱)، بر داده‌های تجربی با یک سری عدم قطعیت مانند ثابت فرض کردن توان پارامتر S و وجود خطا در بیان شرایط اولیه خاک و نیز عدم وجود ظاهری عامل زمان در درون مدل همراه است. برای افزایش دقت در برازش، از رابطه استنتاجی (Singh (2010) بر پایه نظریه انتروپی برای تبیین معادله هولتان استفاده شد (رابطه ۲).

$$f = f_c + a_3[S^{1-m} - a_3 \times (1 - m) \times t]^{1-m} \quad (۲)$$

f سرعت نفوذ (LT^{-1})

f_0 سرعت نفوذ اولیه آب در خاک (LT^{-1})

f_c سرعت نفوذ نهایی آب در خاک (LT^{-1})

a_3 ضریبی است که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$a_3 = \frac{(f_0 - f_c)}{S^m} \quad (۳)$$

$m =$ یک ضریب بدون بعد است و از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$m = \ln(f_0 - f_c) - \overline{\ln(f - f_c)} \quad (۴)$$

$\overline{\ln(f - f_c)}$ میانگین لگاریتم طبیعی اختلاف شدت نفوذ لحظه‌ای و و شدت نفوذ نهایی است.

عمق کنترل نفوذ D (L) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (Holtan & Lopez, 1971).

$$D = \frac{S}{\theta_s - \theta_i} \quad (۵)$$

θ_s و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و اولیه خاک (L^3L^{-3}) در عمق کنترل نفوذ و t زمان (T) می‌باشند.

برازش معادله هولتان (رابطه شماره ۲) بر داده‌های شدت نفوذ و زمان انجام گردید. برای این کار، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2025 و روش spline (Erdogan, 2013) داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به داده‌های سرعت نفوذ تبدیل گردید.

محاسبه عمق کنترل

برای برآورد عمق کنترل نفوذ لازم است مقدار رطوبت اولیه و رطوبت اشباع مشخص شوند. عمق کنترل در واقع از تقسیم S معادله هولتان بر تفاضل درصد رطوبت اشباع و رطوبت اولیه به دست می‌آید (Holtan & Lopez, 1961, 1971). برای این کار، خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به ۵ لایه ۱۰ سانتی‌متری تقسیم شد و هم‌زمان با اندازه‌گیری نفوذپذیری، در هر یک از پروفیل‌های خاک، نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۵۰ سانتی‌متری جهت تعیین رطوبت اولیه برداشت شد. به بیان دیگر، از هر یک از پروفیل‌ها ۵ نمونه خاک برای تعیین رطوبت اولیه برداشت شد. میانگین رطوبت سه عمق ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت تا مشخص شود کدام یک برای اصلاح و محاسبات عمق کنترل مناسب‌تر می‌باشد. ابتدا عمق ۲۰ سانتی‌متری به عنوان عمق کنترل اولیه انتخاب گردید، در رابطه (۵) مقدار اولیه S به دست آمده از معادله هولتان تقسیم بر میانگین درصد رطوبت اشباع دو لایه اول (صفر تا ۱۰ سانتی‌متر و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) منهای میانگین رطوبت اولیه این دو لایه گردید. عدد به دست آمده به عنوان عمق کنترل فرضی اولیه (D) در نظر گرفته و سپس با استفاده از رابطه (۵) تفاضل رطوبت اشباع و رطوبت اولیه این عمق اولیه محاسبه شده عمق کنترل جدید محاسبه گردید. این چرخه تا زمانی که عمق به دست آمده برابر با عمقی از خاک که رطوبت آن در محاسبات رابطه شماره (۲) وارد می‌شود، تقریباً برابر شوند، ادامه یافت. در صورت وقوع این انطباق بین عمق وارد شده به مدل و داده خروجی از آن نتیجه گرفته می‌شود که عمق کنترل به دست آمده معتبر می‌باشد. این محاسبات برای تمام داده‌های نفوذ انجام گردید. برای برآورد رابطه ۲ و برآورد a_3 ، I_c ، m و مقادیر اولیه S از افزونه Solver در محیط Excel 2016 استفاده شد. برای ارزیابی ضرایب معادله هولتان از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (r^2) استفاده گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات ماده آلی خاک از ۰/۱۶ تا ۱/۹۱ درصد، مقدار رس از ۷/۱ تا ۵۲/۴ درصد، سیلت از ۷/۲ تا ۳۹/۷ درصد، شن از ۱۷ تا ۸۵/۹ درصد، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع از ۰/۳۲۰ تا ۰/۶۰ دسی‌زیمنس بر متر و pH خاک از ۷/۳۷ تا ۸/۴ می‌باشد. بافت همه خاک‌ها متوسط تا سنگین و pH آن‌ها در دامنه قلیایی بوده و از نظر شوری در دسته خاک‌های غیرشور قرار دارند. جدول ۲ مؤید تنوع مناسب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پروفیل خاک های مورد بررسی.

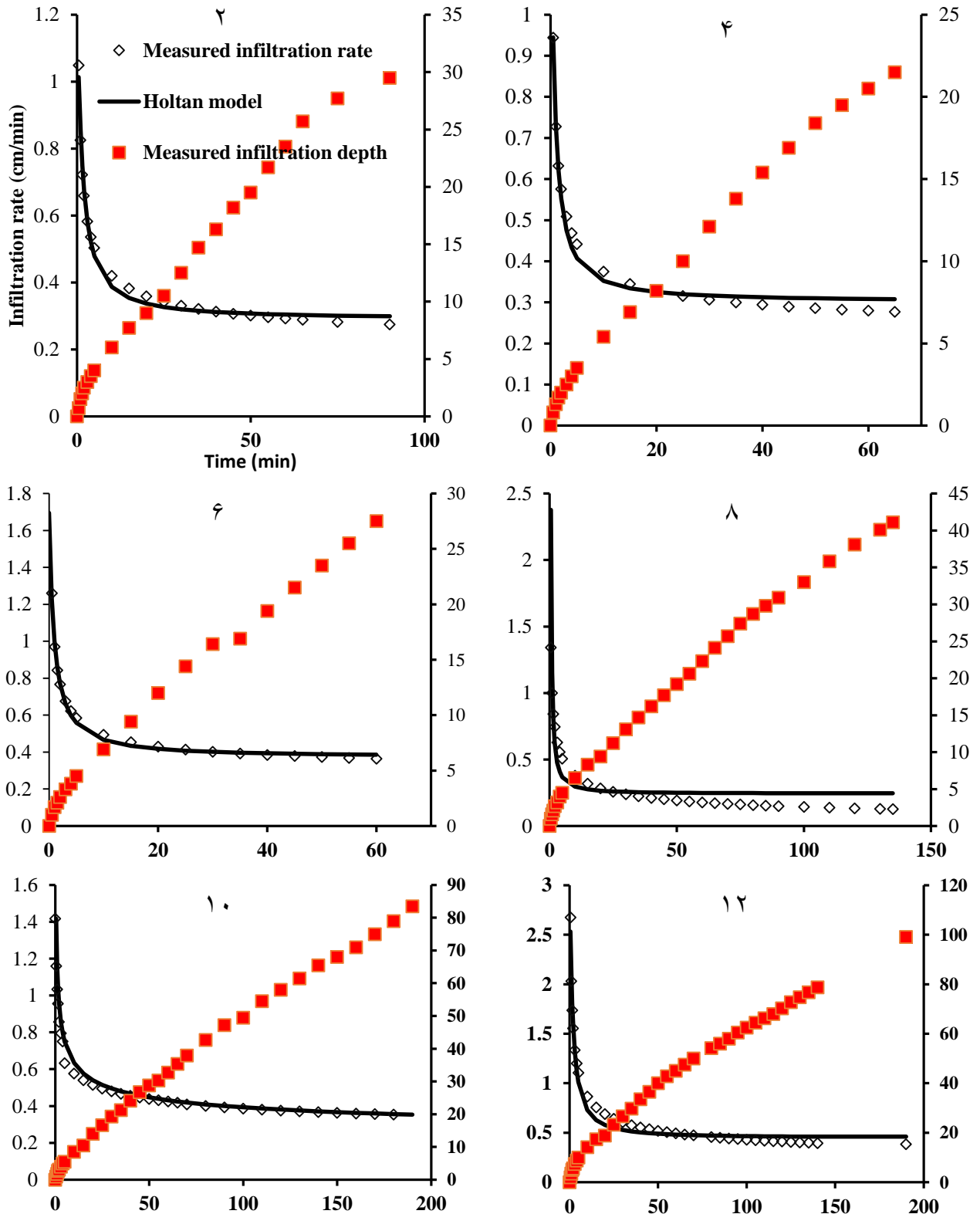
شماره پروفیل	عمق (cm)	ماده آلی (%)	رس (%)	سیلت (%)	شن (>20μ) (%)	بافت	pH	EC (dS/m)
پروفیل ۱	۰-۲۰	۱/۹۱	۳۸/۷	۲۲/۳	۳۹	Clay loam	۸/۱۷	۰/۴۳
	۲۰-۴۳	۰/۸۱	۴۴/۶	۲۰/۹	۲۴/۵	Clay	۷/۷۹	۰/۴۸
	۴۳-۱۵۰	۰/۲۴	۵۲/۴	۳۰/۶	۱۷	Silty clay	۷/۹۲	۰/۳۴
پروفیل ۲	۰-۲۰	۱/۰۵	۴۳/۷	۲۴/۵	۳۱/۸	Clay	۸/۲۷	۰/۵۴
	۲۰-۴۰	۰/۸۱	۴۰/۱	۲۷	۳۲/۹	Clay	۸/۲۷	۰/۳۸
	۴۰-۱۵۰	۰/۶۴	۵۱/۳	۲۹/۳	۱۹/۳۴	Clay	۸/۱۸	۰/۵۳
پروفیل ۳	۰-۲۰	۱/۲۱	۳۶/۳	۲۹/۵	۳۴/۲	Clay loam	۸/۲۴	۰/۳۵
	۲۰-۴۹	۰/۵۶	۴۷/۶	۳۱	۲۱/۴	Clay	۸/۳۹	۰/۳۳
	۴۹-۱۵۰	۰/۶۴	۳۵/۲	۳۰/۱	۳۴/۷	Clay loam	۸/۳۲	۰/۳۷
پروفیل ۴	۰-۱۹	۱/۲۱	۳۷/۳	۲۸/۴	۳۴/۳	Clay loam	۷/۸۸	۰/۵۶
	۱۹-۵۰	۰/۸۱	۴۵/۴	۲۹/۲	۲۵/۴	Clay loam	۸/۱۶	۰/۴۱
	۵۰-۷۳	۰/۵۶	۴۲/۵	۳۹/۷	۱۷/۸	Clay	۸/۰۴	۰/۳۷
	۷۳-۱۵۰	۰/۳۲	۲۳/۸	۳۰/۶	۴۵/۶	Loam	۸/۰۴	۰/۴۱
پروفیل ۵	۰-۲۴	۱/۱۳	۳۷/۹	۲۸/۱	۳۴	Clay loam	۷/۹۸	۰/۴۵
	۲۴-۴۴	۰/۸۹	۴۳/۴	۲۰/۷	۳۸/۹	Clay	۷/۷۵	۰/۳۸
	۴۴-۱۵۰	۰/۶۴	۴۴/۸	۲۳/۲	۳۲	Loam	۸/۱۵	۰/۳۶
پروفیل ۶	۰-۱۸	۱/۴۵	۳۷/۹	۱۶/۲	۴۵/۹	Sandy	۸/۰۵	۰/۴۷
	۱۸-۴۸	۰/۸۹	۴۲/۷	۲۹/۷	۲۷/۶	Clay	۷/۸۰	۰/۳۵
	۴۸-۱۵۰	۰/۷۲	۴۱/۵	۳۳/۱	۲۵/۴	Clay	۸/۳۱	۰/۳۸
پروفیل ۷	۰-۱۵	۱/۸۵	۳۳/۰	۲۳/۳	۴۳/۷	Clay loam	۸/۳۶	۰/۵۹
	۱۵-۳۴	۰/۹۷	۳۵/۶	۲۸/۰	۳۶/۴	Clay loam	۸/۱۷	۰/۳۶
	۳۴-۶۵	۰/۳۲	۳۵/۳	۱۸/۶	۴۶/۰۸	sandy	۸/۲۳	۰/۵۳
	۶۵-۱۵۰	۰/۱۶	۲۱/۶	۲۲/۶	۵۵/۸	sandy	۷/۸۳	۰/۵۳
پروفیل ۸	۰-۱۱	۱/۳۷	۳۵/۲	۳۱/۱	۳۳/۷	Clay loam	۷/۹۹	۰/۴۰
	۱۱-۴۵	۰/۶۴	۳۹/۱	۲۸/۳	۳۲/۶	Clay loam	۷/۳۷	۰/۴۱
	۴۵-۱۵۰	۰/۴	۴۰/۱	۳۱/۱	۲۸/۸	Clay	۸/۰۸	۰/۴۴
پروفیل ۹	۰-۱۷	۱/۲۱	۲۴/۴	۲۵/۸	۴۹/۸	Sandy	۸/۳	۰/۵۷
	۱۷-۳۰	۱/۱۳	۲۲/۶	۱۹/۵	۵۷/۹	Sandy	۸/۲	۰/۳۳
	۳۰-۷۶	۰/۶۴	۹/۷	۴/۴	۸۵/۹۴	Loam	۸/۱۶	۰/۴۶
	۷۶-۱۵۰	۰/۴۸	۷/۲	۷/۲	۸۵/۶	Loam	۷/۸۲	۰/۳۴
پروفیل ۱۰	۰-۱۹	۰/۸۹	۳۵/۱	۳۴/۸	۳۰/۱	Clay loam	۷/۷۹	۰/۴۵
	۱۹-۴۰	۰/۷۲	۴۷/۵	۲۹/۹	۲۲/۶	Clay	۸/۱۸	۰/۴۲
	۴۰-۱۵۰	۰/۳۲	۵۳/۶	۲۸/۳	۱۸/۱	Clay	۸/۱۲	۰/۴۸
پروفیل ۱۱	۰-۱۲	۱/۲۹	۳۱/۲	۳۳/۶	۳۵/۱	Clay loam	۸/۴	۰/۴۴
	۱۲-۷۰	۰/۲۴	۳۶/۵	۲۶/۸	۳۶/۷	Clay loam	۸/۲۷	۰/۶۰
	۷۰-۱۵۰	۰/۱۶	۳۷/۵	۳۳/۱	۲۹/۴	Clay loam	۸/۱۲	۰/۴۱
پروفیل ۱۲	۰-۱۵	۱/۵۳	۳۷/۸	۲۹/۴	۳۲/۸	Clay loam	۸/۲۹	۰/۴۱
	۱۵-۷۶	۰/۶۴	۴۷/۲	۲۵/۹	۲۶/۹	Clay	۸/۱۲	۰/۳۲
	۷۶-۱۵۰	۰/۳۲	۴۲/۲	۳۲/۵	۲۵/۳	Clay	۸/۲۱	۰/۴۷

برازش مدل هولتان

منحنی‌های سرعت نفوذ و برازش مدل هولتان برای شش خاک از ۱۲ خاک مورد آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. هر چند در برخی نقاط مانند پروفیل شماره ۸، برازش توأم با مقداری خطا است، اما به‌طور کلی این مدل در همه بخش‌های منحنی نفوذ تقریباً به یکسان قادر به برازش بوده و فاقد خطاهای سیستماتیک می‌باشد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب و معیارهای سنجش خطای معادله نفوذ هولتان در نقاط مختلف را مناسبی برخوردار هستند. جدول ۳ ضرایب و معیارهای سنجش خطای معادله نفوذ هولتان در نقاط مختلف را نشان می‌دهد. ضریب تبیین (میانگین ۰/۹۲۱) و پایین بودن ریشه میانگین مربعات خطا (میانگین ۰/۰۳۵ سانتی‌متر بر دقیقه) مؤید برازش مناسب این مدل بر داده‌های تجربی است.

جدول ۳- ضرایب و برخی آماره‌های برازش معادله نفوذ هولتان (رابطه ۲) بر داده‌های تجربی نفوذ آب در خاک در طول دو دامنه. موقعیت هر نقطه در شکل شماره ۱ آمده است.

r^2	RMSE (cm min ⁻¹)	S (cm) اولیه	m	f_c (cm min ⁻¹)	شماره پروفیل
۰/۸۳۱	۰/۰۸	۱۲/۳۴	۵/۱۲	۰/۲۴	۱
۰/۹۵۰	۰/۰۲	۸/۲۸	۶/۰۳	۰/۲۹	۲
۰/۹۳۵	۰/۰۱	۵/۷۱	۷/۰۲	۰/۳۹	۳
۰/۹۱۱	۰/۰۲	۵/۳۷	۷/۴۶	۰/۳۰	۴
۰/۹۸۶	۰/۰۲	۹/۹۸	۴/۱۲	۰/۴۴	۵
۰/۹۵۱	۰/۰۱	۹/۹۴	۷/۸۵	۰/۳۷	۶
۰/۹۸۲	۰/۰۱	۱۴/۹۶	۴/۱۵	۰/۴۳	۷
۰/۹۳۵	۰/۰۶	۹/۲۵	۶/۱۴	۰/۲۰	۸
۰/۷۰۴	۰/۰۳	۹/۶۷	۱۰/۲۸	۰/۳۵	۹
۰/۹۹۳	۰/۰۳	۱۳/۵۱	۴/۸۱	۰/۳۹	۱۰
۰/۹۳۰	۰/۰۷	۱۶/۴۰	۴/۵۵	۰/۴۹	۱۱
۰/۹۴۱	۰/۰۶	۱۹/۵۱	۴/۴۰	۰/۴۴	۱۲
۰/۹۲۱	۰/۰۳۵				میانگین



شکل ۲- منحنی نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده (نقاط مربع توپر) و شدت نفوذ محاسبه شده (نقاط لوزی توخالی) و برازش مدل هولتان بر داده‌های شدت نفوذ (خط پیوسته سیاه) در ۶ خاک از ۱۲ خاک مورد آزمایش. عدد بالای هر شکل بیانگر شماره نقطه مورد مطالعه در طول توپو سکانس است. محور عمودی سمت راست و چپ به ترتیب مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ را نشان می‌دهند. منحنی نفوذ ۶ خاک از ۱۲ خاک مورد آزمایش نشان داده نشده است.

عمق کنترل نفوذ

مقادیر محاسبه شده عمق کنترل نفوذ (D) به همراه ضخامت افق سطحی و نیز رطوبت اولیه و اشباع خاک برای نقاط مختلف دامنه در جدول ۴ آمده است. عمق کنترل نفوذ محاسبه شده در طول دو دامنه بین ۱۵/۷ و ۶۶/۳ سانتی متر تغییر می‌کند. هرچند در مطالعه حاضر یافتن رابطه تجربی بین پارامترهای مدل نفوذ هولتان و ویژگی‌های خاک یا توسعه توابع تبدیلی خاکی با استفاده از رگرسیون چند گانه خارج از اهداف مطالعه حاضر بود اما برای درک تأثیر عوامل مختلف بر عمق کنترل نفوذ، همبستگی بین D و ویژگی‌های مختلف خاک بررسی گردید.

جدول ۴- عمق کنترل نفوذ اولیه و نهایی تعیین شده از مقدار رطوبت اولیه و اشباع برای نقاط مختلف دو توپوسکانس.

شماره پروفیل	رطوبت اولیه (%)	رطوبت اشباع (%)	ضخامت افق A (cm)	عمق کنترل نفوذ محاسبه شده (cm)
۱	۷/۱	۴۴	۲۰	۳۳/۲
۲	۵/۸	۳۶	۲۰	۲۶/۸
۳	۵/۸	۳۶	۲۰	۱۸/۵
۴	۴/۴	۳۷	۱۹	۱۵/۷
۵	۴/۴	۳۶	۲۴	۳۰/۳
۶	۸/۳	۳۲	۱۸	۴۰/۶
۷	۷/۲	۲۹	۱۵	۶۶/۳
۸	۴/۹	۳۱	۱۱	۳۴/۹
۹	۳/۳	۳۵	۱۷	۲۹/۸
۱۰	۷/۲	۳۸	۱۹	۴۲/۸
۱۱	۴/۹	۴۰	۱۲	۴۶/۹
۱۲	۱۳/۳	۴۸	۱۵	۵۶/۳

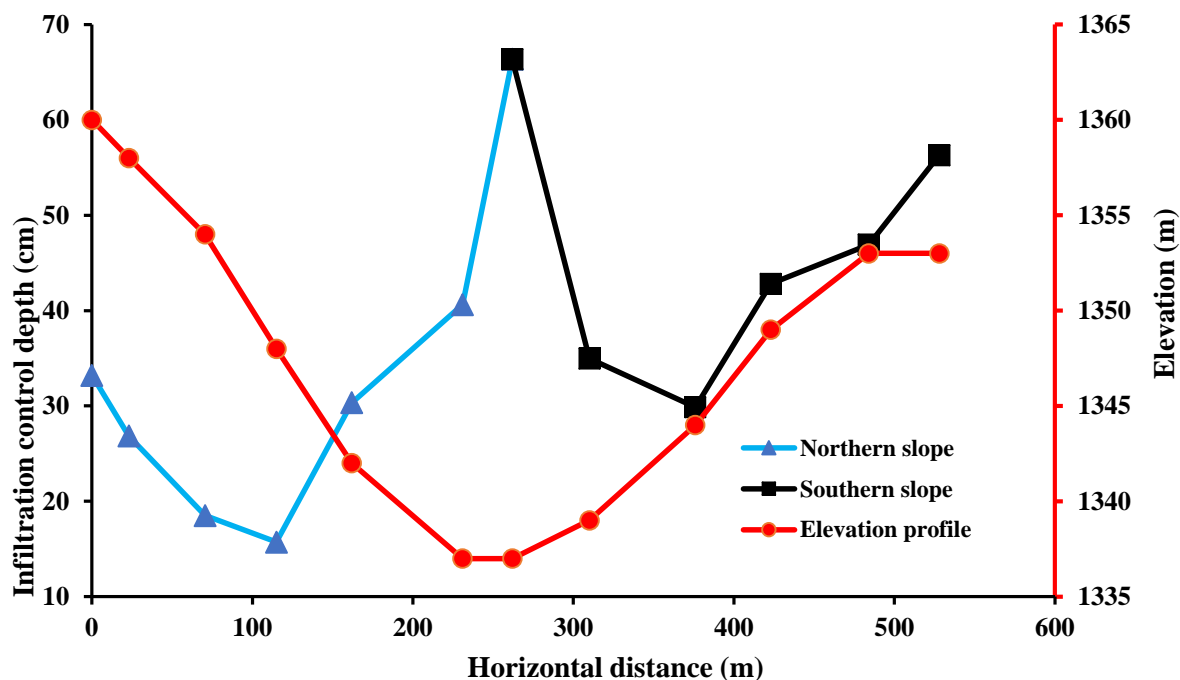
ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مختلف فیزیکی و هیدرولیکی خاک در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد ضریب تعیین بین D و ضخامت افق A برابر با ۰/۲۶ ($p=0/152$) بین D و رطوبت اشباع ۰/۰۲ ($p=0/82$) و بین D و سایر ویژگی‌های خاک مانند درصد رس و شن و سیلت و ماده آلی عموماً کمتر از ۰/۱۰ ($p > 0/05$) می‌باشد (جدول ۵). بنابراین، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به تنهایی برای تبیین یا تفسیر و برآورد D کفایت نمی‌کنند. این امر مؤید وجود پیچیدگی مستتر در عامل D است. هرچند (Shao & Baumgartl, 2014) با توسعه روابط رگرسیونی چندگانه به همراه تجزیه به مولفه‌های اصلی، مقادیر S و توان آن (رابطه ۲) را با استفاده از درصد سیلت و رس و تخلخل کل و جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برآورد نمودند اما ضریب تعیین برای دسته‌های مختلف از عوامل ورودی مدل را عموماً کم و بین ۰/۵۸ تا ۰/۲۹ به دست آوردند. این نتیجه نشان می‌دهد روابط رگرسیونی چندگانه حداقل ۴۲ درصد از تغییرات عمق کنترل نفوذ را برآورد نکرده‌اند. آنان عدم کارایی مدل در برآورد نفوذ را ناشی از تغییرات ویژگی‌های پوشش گیاهی سطح خاک و نیز ویژگی‌های باران دانستند در حالی که (Kubát et al., 2024) خطای توابع تبدیلی در برآورد پارامترهای نفوذ آب در خاک را عموماً ناشی از عدم قطعیت در اندازه‌گیری یا برآورد شرایط اولیه خاک گزارش نمودند.

جدول ۵- ماتریس همبستگی‌های بین ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی اندازه‌گیری شده برای ۱۲ خاک مختلف در روی دو توپوسکانس.

	f_c	m	S	A	θ_s	D	θ_{in}	Sa	Si	Cl
m	-۰/۳۴۸									
S	۰/۵۲۱	-۰/۵۹۹								
A	۰/۰۱۰	۰/۰۴۰	-۰/۴۴۷							
θ_s	۰/۱۵۴	-۰/۲۹۴	۰/۴۷۴	۰/۰۹۷						
D	۰/۴۸۱	-۰/۵۴۳	۰/۸۷۸*	-۰/۵۰۸	۰/۰۳۶					
θ_{in}	۰/۲۴۷	-۰/۴۰۰	۰/۶۴۹*	-۰/۱۳۸	۰/۵۱۸	۰/۵۸۵				
Sa	۰/۰۲۲	-۰/۵۷۰	-۰/۰۲۶	-۰/۱۰۰	-۰/۳۷۹	-۰/۱۴۸	-۰/۱۴۸			
Si	۰/۲۱۷	-۰/۳۱۶	۰/۱۸۴	-۰/۲۶۲	۰/۲۷۱	-۰/۱۴۰	-۰/۱۴۰	-۰/۶۷۹*		
Cl	-۰/۲۶۷	-۰/۴۰۲	-۰/۱۶۸	۰/۴۱۹	۰/۲۰۱	۰/۳۴۹	۰/۳۴۹	-۰/۵۷۸	-۰/۲۱۹	
OM	-۰/۲۶۷	-۰/۲۲۷	۰/۳۸۱	-۰/۲۷۵	۰/۰۸۸	۰/۳۷۹	۰/۳۷۹	۰/۴۳۵	-۰/۵۱۱	-۰/۰۱۰

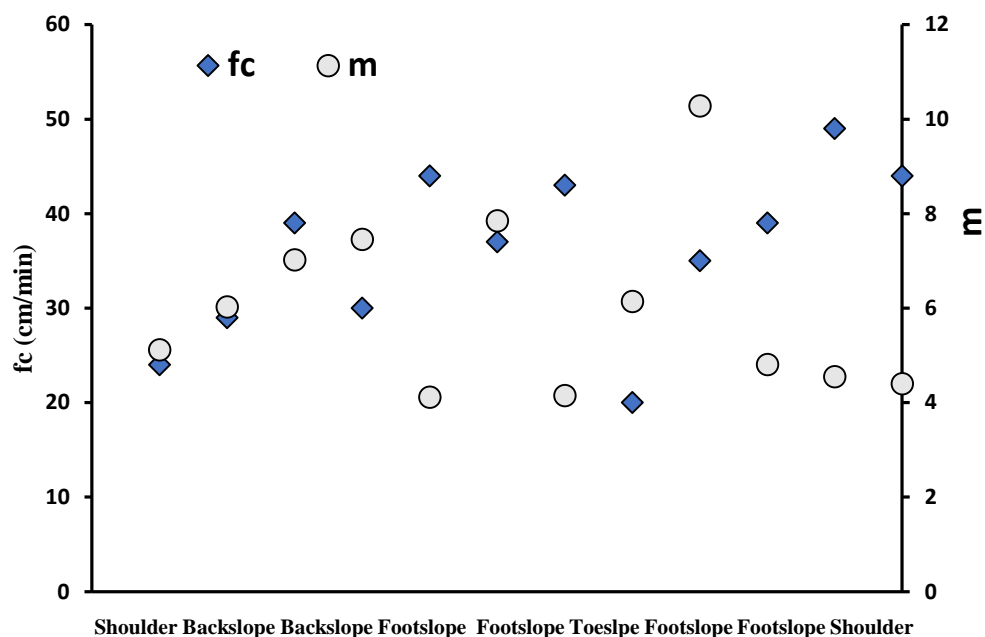
*: معنادار در سطح ۵ درصد f_c : شدت نفوذ نهایی در مدل هولتان m: توان در مدل هولتان S: تخلخل خالی در مدل هولتان A: ضخامت لایه سطح الارض θ_s : رطوبت اشباع D: عمق کنترل نفوذ در مدل هولتان θ_{in} : رطوبت اولیه Sa: مقدار شن در عمق کنترل نفوذ Si: مقدار سیلت در عمق کنترل نفوذ Cl: مقدار رس در عمق کنترل نفوذ OM: مقدار ماده آلی در عمق کنترل نفوذ.

تغییرات بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و هیدرولیکی خاک در طول توپوسکانس دارای الگوی مشخص و شناخته شده‌ای هستند (Chen et al., 2021; Bamutaze et al., 2010)، لذا، تغییرات مقادیر D در طول دو دامنه نیز مورد بررسی قرار گرفت تا روند احتمالی تغییرات آن مشخص گردد. شکل ۳ تغییرات مقادیر عمق کنترل نفوذ در طول دو دامنه روبروی هم را به همراه پروفیل ارتفاعی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در هر دو دامنه رو به جنوب و رو به شمال، مقدار عمق کنترل نفوذ از بالای دامنه ابتدا کاهش یافته و در میانه آن به حداقل خود می‌رسد و سپس در بخش‌های پایین دامنه مجدداً مقدار آن افزایش می‌یابد و الگوی تغییرات D در موقعیت‌های مختلف شیب هر دو دامنه مشابه است. این تغییرات با الگوی تغییرات تکامل خاک در بخش‌های مختلف توپوسکانس (Minasny et al., 2008; Sweeney et al., 2015) شباهت دارد. با اینکه برخی محققین نقش ویژگی‌های سطح خاک در تغییرات نفوذ آب در خاک را بسیار مهم و تعیین کننده می‌دانند (Andrieux & Zante, 2025) اما در مطالعه حاضر، به دلیل آن که نوع پوشش سطحی خاک در همه نقاط اندازه‌گیری تقریباً مشابه بود، نمی‌توان تغییرات نفوذ را به تغییرات ویژگی‌های سطح خاک و پوشش گیاهی آن نسبت داد. شرایط اولیه خاک (Chen et al., 2021; Wei et al., 2022) به ویژه رطوبت اولیه خاک (Zhu et al., 2014) بر شدت نفوذ آب در خاک تأثیر دارد اما در منطقه مورد مطالعه، تغییرات رطوبت اولیه خاک نیز محدود و کمتر از ۸٪ بوده (جدول ۳) و همبستگی معناداری با عمق کنترل نفوذ ندارد (جدول ۵). بنابراین، نمی‌تواند منشأ تغییرات الگوی نفوذپذیری خاک در طول دو توپوسکانس مورد مطالعه باشد.



شکل ۳ - تغییرات مقادیر عمق کنترل نفوذ در دو دامنه رو به جنوب و رو به شمال و پروفیل ارتفاع مکانی نقاط مورد مطالعه. خط سیاه رنگ عمق کنترل پروفیل‌های دامنه رو به جنوب و خط آبی رنگ عمق کنترل پروفیل‌های دامنه رو به جنوب را نشان می‌دهند. مقادیر ارتفاع مربوط به نمودار نیمرخ ارتفاعی در محور عرضی سمت چپ نشان داده شده است.

برای درک بهتر عوامل موثر بر پارامترهای مدل هولتان، رابطه احتمالی بین آن‌ها بررسی گردید. جدول ۵ نشان می‌دهد همبستگی بین دو پارامتر m, f_c غیر معنادار ($r^2=0.12$) و نیز همبستگی بین پارامترهای D و f_c و m نیز کم و فاقد ارزش کاربردی است. ضرایب همبستگی کم بین پارامترهای مدل هولتان مؤید استقلال پارامترهای آن از هم و در نتیجه انعطاف پذیری بالای این مدل می‌باشد (Šimůnek et al., 2024). برای درک بهتر عوامل موثر بر پارامترهای مدل هولتان تغییرات شدت نفوذ نهایی (f_c) و پارامتر m در طول دو توپوسکانس نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ نشان می‌دهد تغییرات آن‌ها در طول دو دامنه فاقد الگوی مشخص بوده و این دو عامل تا حدود زیادی مستقل از هم هستند. بنابراین تحقیقات بیشتری برای درک عوامل موثر بر این دو عامل مورد نیاز می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات مقادیر شدت نفوذ نهایی (f_c) و پارامتر m مدل نفوذ آب در خاک هولتان در طول دو توپوسکانس مورد مطالعه.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر تغییرات پارامتر عمق کنترل نفوذ آب در خاک (D) که در مدل نفوذ هولتان معرفی شده است در طول دو دامنه روبروی هم مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بر خلاف بسیاری از منابع که عمق کنترل نفوذ در مدل هولتان را برابر یا معادل عمق شخم و یا عمق سخت کفه فرض می‌کنند، رابطه مشخصی بین عمق کنترل و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک و ضخامت افق A وجود ندارد، هرچند که تغییرات این عامل در هر دو دامنه دارای یک روند منظم و مشابه بوده و نظیر الگوی تغییرات تکامل خاک در طول توپوسکانس است. تغییرات سیستماتیک و مشابه D در هر دو دامنه مورد بررسی و تغییرات منظم و منطبق آن با تغییرات عوامل ژنتیکی خاک نشان می‌دهد علیرغم آنکه نمی‌توان عمق کنترل نفوذ را به یک عامل و یا ویژگی ساده خاک نسبت داد اما می‌توان تایید کرد یک مفهوم و پایه فیزیکی در آن مستتر است و با اینکه در مطالعات تجربی مدل سازی نفوذ، مقدار آن از برآزش حاصل می‌شود اما مفهومی فراتر از یک ضریب تجربی دارد. در معادله هولتان، خلل و فرج خاک و پیوستگی و تداوم آن تا سطح خاک، نقش عمده ای در تعیین سرعت نفوذ دارد. به همین دلیل وجود درز و ترک‌ها و کرم راه‌ها نیز ممکن است در محاسبه عمق کنترل نفوذ خلل ایجاد کند. مدل هولتان برای تبیین نفوذ آب در اراضی وسیع توسعه داده شده است، لذا برآورد پارامترهای آن از اندازه‌گیری های نقطه ای نفوذ آب در خاک مانند روش استوانه‌های مضاعف می‌تواند همراه با عدم قطعیت باشد. این عدم قطعیت ممکن است از موانع یافتن یک مفهوم فیزیکی برای عمق کنترل نفوذ باشد. دامنه محدود تغییرات پارامتر عمق کنترل نفوذ و تشابه آن با تغییرات شرایط پدولوژیکی خاک در طول دو توپو سکانس نشان می‌دهد که مطالعات جامع و وسیع مقیاس و نیز توسعه توابع تبدیلی خاکی در درک مفهوم فیزیکی و برآورد این پارامتر می‌تواند راهگشا باشد.

شفاف‌سازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن و ویرایش یا ترجمه از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

منابع مورد استفاده

References

- Andrieux, P., Voltz, M., Bailly, J. S., Attia, R., & Zante, P. (2025). Predicting the steady-state infiltration rates of agricultural soils of the Mediterranean region from their soil surface conditions. *Geoderma*, 461, 117468. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117468>
- Bamutaze, Y., Makooma, T., Gilbert, M., Vanacker, V., Bagoora, F., Magunda, M., Obando, J. and Wasigeh, J. (2010). Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt.Elgon, Eastern Uganda Yazidhi. *Catena*, 80(2), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.09.006>
- Basset, C., Abou Najm, M., Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Ghanbarian, B., Prima, S. D & Stewart, R. (2025). Review of conceptual and empirical approaches to characterize infiltration. *Vadose Zone Journal*, 24(1), e20393. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20393>
- Basset, C., & Abou Najm, M. (2025). The problem of too many infiltration models: Balancing infiltration model selection and physical meaning of soil hydraulic parameters. *Soil and Tillage Research*, 252, 106622. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106622>
- Bybordi, M. (2014) Soil Physics. (10th Ed) University of Tehran Press. PP 674. In Persian.
- Chen, C., Zou, X., Singh, A. K., Zhu, X., Zhang, W., Yang, B., Jiang, X & Liu, W. (2021). Effects of hillslope position on soil water infiltration and preferential flow in tropical forest in southwest China. *Journal of Environmental Management*, 299, 113672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113672>
- de 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- Erdogan, K. A. Y. A. (2013). Spline interpolation techniques. *Journal of Technical Science and Technologies*, 2(1), 47-52. <https://doi.org/10.31578/jtst.v2i1.56>
- Frere, M.H., C.A. Onstad, and H.N. Holtan. 1975. ACTMO, an agricultural chemical transport model. ARS-H-3. USDA–ARS, Washington, DC.
- Green WH, Ampt CA (1911) Studies on soil physics. I. Flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science* 4, 1–24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Guo, X., Guo, X., Li, Y., Zhang, S., & Cheng, J. (2026). A unified fractional-order model for soil infiltration. *Journal of Hydrology*, 135443. Volume 674, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135443>
- Holtan, H. N. (1961). A concept for infiltration estimates in watershed engineering (Vol. 41). *Agricultural Research Service*, US Department of Agriculture.
- Holtan, H. N., & Lopez, N. C. (1971). *USDAHL-70 model of watershed hydrology* (No. 1435). US Department of Agriculture.
- Horton RL (1938) The interpretation and application of runoff plot experiments with reference to soil erosion problems. *Soil Science Society of America Proceedings* 3:340–349. <https://doi.org/10.2136/sssaj1939.036159950003000C0066x>
- Huggins, L. F., & Monke, E. J. (1966). The mathematical simulation of the hydrology of small watersheds (IWRRC Technical Reports, Paper 1). *Indiana Water Resources Research Center*.

- Ju, X., Gao, L., She, D., Jia, Y., Pang, Z., & Wang, Y. (2024). Impacts of the soil pore structure on infiltration characteristics at the profile scale in the red soil region. *Soil and Tillage Research*, 236, 105922. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105922>
- Kostiakov AN (1932) On the dynamics of the co-efficient of water percolation in soils. In: *Sixth Commission, International Society of Soil Science*, Part A, pp. 15–21.
- Kubát, J. F., Strouhal, L., & Kavka, P. (2024). Estimation of infiltration parameters: The role of pedotransfer functions and initial moisture conditions. *Journal of Hydrology*, 633, 130954. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130954>
- Lu, S., Liu, M., Yi, J., Yang, Q., & Ding, F. (2025). Preferential flow influences the profile partition patterns of rainwater infiltration in a steep forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 661, 133541. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133541>
- Mallari, K. J. B., Kim, H., Pak, G., Aksoy, H., and Yoon, J. (2015). A comparison of two infiltration models applied to simulation of overland flow over a two-dimensional flume. *Water Science and Technology*, 71(9), 1325-1331. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.060>
- Minasny, B., McBratney, A. B., & Salvador-Blanes, S. (2008). Quantitative models for pedogenesis—A review. *Geoderma*, 144(1-2), 140-157. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.12.013>
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyck, M. and Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), pp: 681-693. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.823477>
- Mishra SK, Singh VP (1999) Another look at the SCS-CN method. *Journal of Hydrology Engineering*, ASCE 4(3):257–264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:3\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:3(257))
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., & Singh, V. P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological processes*, 17(13), 2629-2652. <https://doi.org/10.1002/hyp.1257>
- Mohammadi, M.H. and Refahi, H.G., (2006). Estimation of infiltration through soil physical characteristics. *Journal of Iranian Agriculture Science*, 36(6), 1391-1398. (In Persian)
- Overton, D. (1964). Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. Department of Agricultural Services. Master's Thesis, NTNU.
- Parnas, F. E., Abdalla, E. M., & Muthanna, T. M. (2021). Evaluating three commonly used infiltration methods for permeable surfaces in urban areas using the SWMM and STORM. *Hydrology Research*, 52(1), 160-175. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.048>
- Phillip, J.R. (1957). Theory of infiltration. *Soil Sciences*, 83(5), 345–357.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L., & Shirmohammadi, A. (1992). Infiltration and soil water movement. In: Maidment D.R. (Ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Education, USA.
- Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi-Gerdelidani, A., Hasheminasab Zavareh, K. S., & Cheraghi, M. (2024). *Methods of Soil Analysis: Sampling, Chemical and Physical Methods*. Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In Persian)
- Shao, Q., & Baumgartl, T. (2014). Estimating input parameters for four infiltration models from basic soil, vegetation, and rainfall properties. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5), 1507-1521. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.04.0122>
- Shukla, M. K. (2023). *Soil physics: An introduction*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780429264849>

- Šimůnek, J., Brunetti, G., Jacques, D., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2024). Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016. *Vadose Zone Journal*, 23(4), e20310. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20310>
- Singh, V. P. (2010). Entropy theory for derivation of infiltration equations. *Water Resources Research*, 46, W03527. <https://doi.org/10.1029/2009WR008193>
- Smettem, K. R. J., Rye, C., Henry, D. J., Sochacki, S. J., & Harper, R. J. (2021). Soil water repellency and the five spheres of influence: A review of mechanisms, measurement and ecological implications. *Science of the Total Environment*, 787, 147429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147429>
- Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th Ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00008.x>
- Sweeney, K. E., Roering, J. J., & Ellis, C. (2015). Experimental evidence for hillslope control of landscape scale. *Science*, 349(6243), 51-53. <https://doi.org/10.1126/science.aab001>
- 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(2), 45-57. <https://doi.org/10.4236/ojss.2020.102003>
- van Schaik, L., Palm, J., Klaus, J., Zehe, E., & Schröder, B. (2014). Linking spatial earthworm distribution to macropore numbers and hydrological effectiveness. *Ecohydrology*, 7(2), 401-408. <https://doi.org/10.1002/eco.1358>
- Vereecken, H., Amelung, W., Bauke, S. L., Bogaen, H., Brüggemann, N., Montzka, C., ... & Zhang, Y. (2022). Soil hydrology in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(9), 573-587. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00324-6>
- Wei, L., Yang, M., Li, Z., Shao, J., Li, L., Chen, P., ... & Zhao, R. (2022). Experimental investigation of relationship between infiltration rate and soil moisture under rainfall conditions. *Water*, 14(9), 1347. <https://doi.org/10.3390/w14091347>
- Xue, D., Tian, J., Zhang, B., Kang, W., & He, C. (2025). Evaluating the effect of vegetation type and topography on infiltration process in an arid mountainous area: Insights from continuous soil moisture monitoring network. *Agricultural Water Management*, 315, 109537. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109537>
- Zhang, J., Sun, Q. W., Wen, N., Horton, R., & Liu, G. (2022). Quantifying preferential flows on two farmlands in the North China plain using dual infiltration and dye tracer methods. *Geoderma*, 428, 116205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116205>
- Zhu, Q., Nie, X., Zhou, X., Liao, K., & Li, H. (2014). Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope. *Catena*, 119, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.010>