

Spatial variability modeling and geostatistical estimation of coefficients of some water infiltration equations in calcareous soil of Bajgah, Shiraz

Mohammad Omidifard¹, Seyed Ali Akbar Moosavi^{2*}, Abdolmajid Sameni³

¹ Former M.Sc. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

³ Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract

Introduction

Water infiltration into soil is one of the most important soil physical processes for hydrological and agricultural applications. It plays a key role in hydrological studies, water resource management, soil conservation, irrigation systems, drainage systems, and soil erosion control in watersheds. There are various equations for determining how water infiltrates into the soil. Some of these (e.g., Philip and Green-Ampt equations) are based on the physical properties of the soil and the results of solving the relationships governing water flow in the soil. The others (e.g., Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, and US Soil Conservation Service equations) are empirical relationships obtained from analyzing the curve between infiltration rate and time without any physical background. Using these relationships avoids the waste of time and high cost required to measure infiltration in the field, especially on a large scale. The coefficients of these equations, like other soil characteristics, depend on the soil type and conditions and are subject to spatial and temporal variations. Therefore, this research aimed to study the spatial variability and model of the spatial dependence of the coefficients of different theoretical and empirical infiltration equations in the calcareous soils of Bajgah, Shiraz.

Materials and Methods

Infiltration tests were carried out at 50 points of the studied soil using the single-ring method. Different infiltration equations, including Horton, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, US soil conservation service (SCS), Green-Ampt, and Philip equations were fitted to the measured data, and the coefficients of the equations were determined. Preliminary statistical checks included determining the summary statistic (measure of location, measure of spread, and shape parameters of data distribution), checking the normality of the distribution of the infiltration coefficients data, and performing necessary transformations if required. To check the spatial dependency of the data, the experimental semivariogram of the data was calculated. Various theoretical models, including spherical, exponential, and Gaussian models, were fitted and the best semivariogram model and its characteristics were determined using statistical criteria. Coefficients at unmeasured points were also estimated using the normal kriging method and the inverse distance weighting (IDW) method with different weight powers. The evaluation of the estimation methods was also carried out using the jack-knife method and the appropriate estimation method was identified. Estimation of the coefficients at points without data and zoning was done using the appropriate estimation method. The statistical and geostatistical analyses mentioned above were carried out using the software packages Excel and GS⁺.

Results and Discussion

The coefficient of variation (CV) of the studied infiltration equation coefficients varied between 12.5 and 478%, with the highest and lowest CV for the coefficients "A" of the Kostiakov-Lewis equation and "b" of the SCS equation. The isotropic spherical model was the best-fitted model to the semivariogram of the coefficients of the Kostiakov (K and b), Horton (c, m, and a), Philip ("A"), and Kostiakov-Lewis (b) equations. Whereas, the isotropic exponential model was the best-fitted model to the coefficients of the SCS (a and b), Philip ("S"), and Kostiakov-Lewis (K and A) equations. The range of variation (the radius of influence) of the coefficients of the infiltration equations varied from 1.96 to 211 m, respectively, for the "K" coefficient of the Kostiakov equation

and the coefficients of the Kostiakov-Lewis, “a” of Horton, “S” of Philip, and “b” of SCS equations. Among the coefficients studied, the highest and lowest nugget effect (C_0) to threshold ($C+C_0$) ratio was obtained as 0.648 and 0.5, respectively. The spatial correlation class of the infiltration equation coefficients was moderate, and the maximum and minimum radius of influence were 211 and 6.4 m, respectively, which corresponded to the “S” coefficient of Philip, the coefficients of Kostiakov-Lewis, the “a” coefficient of Horton, and the “b” coefficient of the SCS equations. The most precise and the least precise estimates were related to the “A” coefficient of Philip, “b” of Kostiakov, and “b” of Kostiakov-Lewis equations, respectively.

Conclusion

In this study, spatial variations of the coefficient of various infiltration relations were investigated and modeled, and estimation and zoning were performed using the best model. Results showed that the spatial dependence class of the coefficient of infiltration relations in the study area is medium, and also, the maximum and minimum radius of influence of 211 and 6.4 m are related to the coefficient S of the Philip and the coefficients of the Kostiakov-Lewis and the coefficient a of Horton and the coefficient b of the US Soil Conservation Service equations, respectively. In other words, this study suggests geostatistical methods and limited measurements to estimate the coefficients of the infiltration equations with reasonable precision and to save time and cost when zoning or estimating these coefficients at large scales. However, due to the weak and unsuitable spatial structure, the IDW method outperformed the kriging method in some cases in the studied area and its use can lead to more precise estimates. Therefore, in cases where the spatial structure of the desired feature is weak and inappropriate, methods such as Kriging that rely on strong spatial correlation are unsuitable, and in these cases, other alternative estimation methods, such as IDW which does not depend on the presence of strong and appropriate spatial structure in the data should be used.

Keywords: Inverse distance weighting, Kriging, Isotropy, Sorptivity coefficient, Spatial variability, Variogram, Zoning

Article Type: Research Article

Acknowledgment

The authors thank Shiraz University for providing all the required facilities.

Conflicts of interest

There is no conflict of interest.

Data availability statement

All generated data are included in the article. Further datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Omidifard: Experiments, data analysis and interpretation, article writing and editing; **Seyed Ali Akbar Moosavi:** Idea and experimental design, project supervision, data analysis and interpretation, materials/analysis tools, and article writing and editing; **Abdolmajid Sameni:** Idea and experimental design, materials, article editing.

*Corresponding Author, E-mail: aamousavi@gmail.com

Citation: Omidifard, M., Moosavi, S.A.A., & Sameni, A. (2024). Spatial variability modeling and geostatistical estimation of coefficients of some water infiltration equations in calcareous soil of Bajgah, Shiraz. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 131-150.

DOI:10.22098/mmws.2023.13324.1325

Received: 17 July 2023, Received in revised form: 30 August 2023, Accepted: 31 August 2023, Published online: 31 August 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 131-150

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مدل سازی تغییرات مکانی و تخمین زمین آماری ضریب های برخی رابطه های نفوذ آب در خاک آهکی منطقه باجگاه، شیراز

محمد امیدی فرد^۱، سید علی اکبر موسوی^{۲*}، عبدالمجید ثامنی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۲ استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۳ دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

نفوذ از فرآیندهای فیزیکی مهم خاک است که معمولاً با رابطه های نفوذ بررسی می شود. ضریب های این رابطه ها تحت تأثیر ویژگی های مختلفی از خاک هستند. ویژگی های خاک و ضریب رابطه های نفوذ دارای تغییرات مکانی هستند. بنابراین، با هدف مدل سازی وابستگی مکانی ضریب رابطه های نفوذ در خاک های آهکی منطقه باجگاه استان فارس، آزمایش های نفوذ در ۵۰ نقطه با روش تک حلقه انجام و رابطه های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، هورتون، هولتان، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، فیلیپ و گرین-امپت به داده ها برازش و ضریب های آن ها تعیین شد. نیم تغییرنمای تجربی محاسبه و مدل سازی و بهترین مدل تعیین شد. تخمین در نقاط اندازه گیری نشده با روش های کریجینگ معمولی و وزن دهی عکس فاصله (IDW) انجام و با ارزیابی جک نایف روش مناسب شناسایی و تخمین و پهنه بندی انجام شد. بیشترین (۴۷۸ درصد) و کمترین (۱۲/۵ درصد) مقدار ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به ضریب های A' رابطه کوستیاکوف-لوییز و b' رابطه SCS بود. بهترین مدل نیم تغییرنمای ضریب رابطه های کوستیاکوف (K و b)، هورتون (a ، m ، c)، ضریب های A فیلیپ، b کوستیاکوف-لوییز از نوع کروی همسانگرد بود، در حالی که بهترین مدل ضریب های رابطه SCS (a'' و b'')، ضریب های S رابطه فیلیپ و K' و A' رابطه کوستیاکوف-لوییز، نمایی همسانگرد بود. دامنه تغییرات شعاع تأثیر بین ۹۶/۱ تا ۲۱۱ متر متغیر بود. بیشترین نسبت اثر قطعه ای به سقف به مقدار ۰/۶۴۸ مربوط به ضریب a'' رابطه SCS و کمترین نسبت اثر قطعه ای به سقف برابر ۰/۵ بود. کلاس وابستگی مکانی ضریب رابطه های نفوذ متوسط و بیشترین و کمترین شعاع تأثیر به ترتیب ۲۱۱ و ۶/۴ متر بود. دقیق ترین و کم دقت ترین تخمین ها به ترتیب مربوط به ضریب A رابطه فیلیپ و b رابطه کوستیاکوف و b' رابطه کوستیاکوف-لوییز بود. در مواردی که به پهنه بندی ضریب رابطه های نفوذ و یا مقادیر این ضریب ها در نقاط زیاد نیاز باشد با استفاده از روش های زمین آماری و اندازه گیری های محدود، ضریب های با دقت قابل قبول برآورد و در وقت و هزینه ها صرفه جویی می شود. در مواردی که دلیل ساختار مکانی ضعیف، روش IDW در مقایسه با روش کریجینگ مناسب تر بوده و به تخمین های دقیق تری منجر می شود. بنابراین، پیشنهاد می شود در شرایط ساختار مکانی ضعیف، از روش های متکی به همبستگی مکانی قوی (کریجینگ) استفاده نشود و از روش هایی مانند IDW استفاده شود.

واژه های کلیدی: پهنه بندی، تغییرنما، ضریب جذب آب خاک، کریجینگ، وزن دهی عکس فاصله، همسانگردی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: aamousavi@gmail.com

استناد: امیدی فرد، محمد، موسوی، سید علی اکبر، و ثامنی، عبدالمجید (۱۴۰۳). مدل سازی تغییرات مکانی و تخمین زمین آماری ضریب های برخی رابطه های نفوذ آب در خاک آهکی منطقه باجگاه، شیراز. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۱۳۱-۱۵۰.

DOI:10.22098/mmws.2023.13324.1325

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۱۳۱ تا ۱۵۰

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

انتقال املاح، مواد شیمیایی و کودها در خاک مؤثر هستند. به دلیل تغییرات مکانی و زمانی این ضریب‌های نفوذ مانند سایر ویژگی‌های خاک (Moosavi and Sepaskhah, 2012; Moosavi et al., 2016; Moradi et al., 2016; Zahedifar et al., 2017; Rezaee et al., 2020a,b; Fakher and Nazari, 2022; Kamangar and Minaei, 2023) روش‌های آماری قطعی کلاسیک برای توصیف آن‌ها به‌تنهایی کارا نیست. بنابراین برای توصیف دقیق این ضریب‌ها بایستی از مدل‌های تصادفی (مدل‌های زمین‌آمار) به همراه آمار کلاسیک استفاده شود (Moosavi and Sepaskhah, 2011).

جدول ۱- شرح مدل‌های نفوذ مورد بررسی

Table 1- Description of the studied infiltration models

مدل	ضریب	رابطه
گرین و آمپت	G و Kfs	$I = Kfs t + G \ln [1+I/G]$
فیلیپ	A و S	$I = S \sqrt{\frac{t}{S}} + \frac{A}{2}$
کوستیاکوف	b و K	$I = Kt b$
کوستیاکوف-لوییز	A', b', K'	$I = K'tb' + A't$
هورتون	a و m, C	$I = Ct + m(1-e-at)$
SCS	b" و a"	$I = a"tb" + 0.6985$

به ترتیب زمان بر حسب دقیقه و نفوذ تجمعی بر حسب سانتی‌متر است.
SCS: مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا است.
ضریب A رابطه فیلیپ معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است.

یکی از روش‌های متداول در برآورد ویژگی‌های فیزیکی خاک، روش‌های زمین‌آمار است که با استفاده از الگوی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، این ضریب‌ها را در نقاط نمونه‌برداری نشده تخمین می‌زند. تغییرات مکانی نفوذپذیری خاک متأثر از ویژگی‌های ذاتی خاک از قبیل نوع خاک و توزیع اندازه منافذ و ویژگی‌های غیرذاتی مانند عبور و مرور و وسایل نقلیه، کشت و کار است. چگونگی تأثیر این عوامل بر ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است (Ghorbani Dashtaki et al., 2010). مشابه با سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کیفیت خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی و زیستی خاک، تغییر کاربری اراضی نیز یکی از عوامل مؤثر بر نفوذ آب به خاک است (Bakhshandeh, 2019; Mozaffari et al., 2021; Sharma et al., 2022; Zahedifar, 2023a,b). در این راستا، (1989) تغییرپذیری مکانی ضریب‌های مدل فیلیپ را در شبکه‌های منظم ۱×۱ و ۱۰×۱۵۰ متر بررسی کردند و نشان دادند ضریب‌های مدل فیلیپ از همبستگی مکانی بسیار ضعیفی برخوردار بوده‌اند. در پژوهشی، Sepaskhah et al. (2005) ساختار مکانی ضریب جذب آب خاک را در فاصله‌های ۵/۵×۰/۵ متر و پنج در پنج متر بررسی کردند و نشان دادند که تنها در صورت نمونه‌برداری در فاصله‌های ۰/۵ متر، ضریب جذب آب خاک در مدل فیلیپ دارای

نفوذ آب یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فیزیکی خاک در ارتباط با مسائل کشاورزی و هیدرولوژی است. ورود آب به داخل خاک را نفوذ و مقدار آبی که در یک دوره زمانی مشخص در خاک نفوذ می‌کند نفوذ تجمعی و میانگین سرعت وارد شدن آب به داخل خاک را طی یک دوره زمانی، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ آب به داخل خاک را در یک لحظه معین از زمان، سرعت نفوذ لحظه‌ای می‌گویند (Alizadeh, 2015). سرعت وارد شدن آب به خاک یا به عبارت دیگر سرعت نفوذ از عوامل مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری، مطالعات هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و حفاظت خاک و طراحی و اجرای طرح‌های زهکشی و کنترل فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز است. انتخاب نوع سیستم آبیاری برای هر منطقه به ویژگی‌های نفوذ آب به داخل خاک بستگی دارد. به عبارتی، نفوذ آب به خاک فرآیندی مهم در علوم خاک، آبیاری، هیدرولوژی، کشاورزی و محیط زیست بوده (Valiantzas, 2010) و نقش حیاتی در چرخه آبی طبیعت ایفا می‌کند. شناخت کمی نفوذپذیری برای جلوگیری از فرسایش اراضی و منابع خاک و آب ضروری است (Ghorbani Dashtaki et al., 2010; Jafarzadeh and Vayskarami, 2022).

رابطه‌های مختلفی برای تعیین چگونگی نفوذ آب به خاک وجود دارد که برخی از آن‌ها بر مبنای ویژگی‌های فیزیکی خاک و حاصل حل رابطه‌های حاکم بر جریان آب در خاک هستند و برخی دیگر رابطه‌هایی هستند که بر اساس ترسیم منحنی بین سرعت نفوذ و زمان تحلیل شده‌اند و ویژگی‌های فیزیکی به‌خصوصی از خاک را در بر نمی‌گیرند (Alizadeh, 2015). با به‌کارگیری این رابطه‌ها از اتلاف وقت و صرف هزینه زیاد که برای اندازه‌گیری نفوذ در مزرعه به‌ویژه در سطح وسیع لازم است، جلوگیری می‌شود. به‌طور کلی رابطه‌های نفوذ به دو دسته تقسیم می‌شوند دسته اول رابطه‌های تجربی که شامل رابطه‌های هورتون (Horton, 1940)، هولتان (Holtan, 1961)، کوستیاکوف (Kostiakov, 1932)، کوستیاکوف-لوییز (Mezencev, 1948) و سازمان حفاظت خاک آمریکا، SCS (USDA-NRCS, 1974) هستند. دسته دوم رابطه‌های تئوری و شامل رابطه‌های Green (1911) and Ampt (1957) است (جدول ۱).

نفوذ آب به خاک همانند دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بسته به نوع و شرایط خاک، دارای تغییرات مکانی و زمانی هستند و انتظار می‌رود تغییرپذیری و الگوی نفوذ آب به خاک در خاک‌های مختلف، متفاوت باشد (Bouma, 1983; Sameni et al., 2014, 2016). ضریب رابطه‌های نفوذ بر بسیاری از فرآیندهای خاک از جمله نفوذ آب به خاک، جریان آب در خاک،

ساختار مکانی خواهد بود. در پژوهش دیگری Jensen et al. (1987) بیان کردند که شدت نفوذ به دلیل تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی خاک مؤثر بر آن، می‌تواند از مقادیر خیلی کم تا خیلی زیاد تغییر کند. با توجه به این که تخمین شدت نفوذ و ضریب مدل‌های نفوذ در مقیاس ناحیه‌ای با صحت قابل قبول و با حداقل اندازه‌گیری صحرایی بسیار مهم است. تغییرات مکانی شدت نفوذ را می‌توان با روش‌های زمین آماری کمی نمود. افزون بر آن، در صورت وجود همبستگی زیاد بین ویژگی‌های زودپافت خاک و ضریب‌های نفوذ، می‌توان از این ویژگی‌ها به‌عنوان متغیر کمکی به‌منظور تخمین بهتر در مکان‌های نمونه‌برداری نشده بهره برد (Karami et al., 2012).

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در خاک سری دانشکده با نام علمی Fine, Carbonatic, Mesic, Typic Calcixerepts در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه در ارتفاع ۱۸۷۲ متری از سطح دریای آزاد و در محدوده ۵۲ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی انجام شد. این خاک با مساحت ۷۴۵ هکتار جزء خاک‌های عمیق با رنگ قهوه‌ای متمایل به زرد تا قهوه‌ای متمایل به زرد روشن (قهوه‌ای آهکی) و بافت لومی تا رسی است که حدود یک پنجم از کل اراضی منطقه را تشکیل می‌دهد (Abtahi et al., 1992). در خاک مورد مطالعه ۵۰ نقطه با فاصله‌های ۱۶، هشت و چهار متر واقع بر الگوی نمونه‌برداری نسبتاً منظم انتخاب و ضریب رابطه‌های نفوذ (فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا) در آن‌ها با روش تک حلقه اندازه‌گیری شد (Reynolds and Elrick, 1990). بدین ترتیب که در شروع آزمایش در هر نقطه پس از کنار زدن بقایای گیاهی، روی سطح زمین یک استوانه (به قطر ۶۰ سانتی‌متر) قرار داده شد و با استفاده از درپوش و وارد کردن ضربات غیرمستقیم چکش، استوانه تا عمق حدود ۱۰ سانتی‌متر در زمین فروبرده شد. در این پژوهش از ارتفاع آبی پنج سانتی‌متری در استوانه برای انجام آزمایش‌های نفوذ و تعیین ضریب‌های نفوذ استفاده شد (Reynolds and Elrick, 1990; Thomas et al., 2020). لازم به یادآوری است که در طول آزمایش، با افزودن آب به داخل استوانه، ارتفاع سطح آب در داخل استوانه ثابت نگه داشته شد. مقدار آبی که در فاصله‌های زمانی مختلف به استوانه افزوده می‌شود، برابر با حجم آب نفوذ یافته به خاک است. سپس از تقسیم حجم آب نفوذ یافته به خاک بر مساحت استوانه ارتفاع آب نفوذ یافته به خاک یا I به‌دست می‌آید تا رسیدن به شرایط پایدار، زمان و حجم آب افزوده شده (نفوذ یافته) به خاک ثبت شد (Reynolds and Elrick, 1990). سپس ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک شامل رابطه‌های فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، هورتون و سازمان

ساختار مکانی خواهد بود. در پژوهش دیگری Jensen et al. (1987) بیان کردند که شدت نفوذ به دلیل تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی خاک مؤثر بر آن، می‌تواند از مقادیر خیلی کم تا خیلی زیاد تغییر کند. با توجه به این که تخمین شدت نفوذ و ضریب مدل‌های نفوذ در مقیاس ناحیه‌ای با صحت قابل قبول و با حداقل اندازه‌گیری صحرایی بسیار مهم است. تغییرات مکانی شدت نفوذ را می‌توان با روش‌های زمین آماری کمی نمود. افزون بر آن، در صورت وجود همبستگی زیاد بین ویژگی‌های زودپافت خاک و ضریب‌های نفوذ، می‌توان از این ویژگی‌ها به‌عنوان متغیر کمکی به‌منظور تخمین بهتر در مکان‌های نمونه‌برداری نشده بهره برد (Karami et al., 2012).

با توجه به پژوهش Gupta et al. (1994) نتایج نشان داد که متغیرهای بافت، ساختمان خاک و برخی از خواص شیمیایی مانند کربن آلی می‌توانند بر فرآیند شدت نفوذ و پارامترهای مرتبط با آن اثر چشم‌گیری داشته باشند. در ادامه، Vieira et al. (1981) با ارزیابی تغییرات مکانی شدت نفوذ، چگونگی استفاده از توابع همبستگی در تعیین حداقل تعداد نمونه لازم برای مطالعات شدت نفوذ را نشان دادند. با تلفیق روش‌های زمین‌آماري کریجینگ و کوکریجینگ برای ارزیابی خواص آب Alemi et al. (1988) خاک نشان دادند که استفاده از کوکریجینگ، برای تخمین هدایت هیدرولیکی، واریانس تخمین کم‌تری نسبت به روش کریجینگ داشت. در مطالعه‌ای، Vauclin et al. (1983) گزارش کردند که تلفیق اندازه‌گیری‌های صحرایی نفوذسنج فشاری گلف با روش‌های زمین‌آماري، روشی کارآمد برای تعیین تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک لومی است. با استفاده از تغییر نمای دو جانبه، Mallants et al. (1997) ارتباط تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع با منافذ بزرگ را نشان دادند. همچنین، Ersahin (2003) در مقایسه کریجینگ ساده و کوکریجینگ برای تخمین شدت نفوذ در مناطقی برای داده‌های محدود نشان دادند که روش کوکریجینگ بر کریجینگ ساده برتری داشته و در این بین جرم ویژه ظاهری خاک زیرین، مهم‌ترین متغیر کمکی برای پیش‌بینی شدت نفوذ بوده است. در نهایت، Rumman et al. (2005) با تلفیق مدل‌های هیدرولوژی و GIS محدوده‌هایی با شدت نفوذ یکسان را در یک حوزه آبخیز تعیین نمودند.

پژوهش‌هایی در ارتباط با مدلسازی تغییرات مکانی نفوذ Govindaraju et al., 1996; Machiwal et al., 2006; Nie et al., 2017; Babaei et al., 2018; Ghosh and Pekkati, 2020; Mahapatra et al., 2019) و یا تعیین ضریب معادلات نفوذ و مقایسه کارایی آن‌ها (Oku and Aiyelari, 2011; Suryoputro et al., 2018; Vand et al., 2018; Lei et al., 2020; Thomas et al., 2020; Rasool et al., 2021;

در رابطه (۲)، $\gamma(h)$ مقدار نیم‌تغییرنا در فاصله h ، $N(h)$ تعداد جفت نمونه به کار رفته در محاسبه $\gamma(h)$ به ازای فاصله h ، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ به ترتیب مقادیر متغیر در موقعیت‌های نمونه‌برداری x_i و x_i+h است. رابطه‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب رابطه مدل کروی، نمایی و گوسی را نشان می‌دهد.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right) \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right) \quad (5)$$

در رابطه‌های فوق C_0 اثر قطعه‌ای، a دامنه تأثیر و $C+C_0$ حد آستانه نیم‌تغییرنا است. با استفاده از ضریب‌های بهترین مدل نیم‌تغییرنا و روش‌های کریجینگ معمولی (رابطه ۶) و وزن‌دهی عکس فاصله (رابطه ۷) مقدار هر یک از ویژگی‌های مورد مطالعه در نقاط نمونه‌برداری نشده تخمین زده شد.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_j, x_c) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$Z^*(x_c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

در رابطه‌های $Z^*(x_0)$ مقدار تخمین متغیر Z در موقعیت نمونه‌برداری نشده x_0 ، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر Z در موقعیت x_i ، λ_i وزن اختصاص یافته به مقدار Z در موقعیت x_i و n تعداد کل نمونه‌ها است.

$$Z^*(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^p Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^p} \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

در این رابطه، d_i فاصله نقطه اندازه‌گیری شده x_i تا نقطه مورد تخمین و p توان وزن‌دهی است. در این پژوهش توان‌های مختلف وزن‌دهی استفاده و نتایج تخمین حاصل ارزیابی شد.

با توجه به توانایی روش ارزیابی جک‌نایف (Stone, 1974) برای تعیین میزان خطا و معرفی تخمین‌گر مناسب، در این پژوهش به منظور انتخاب روش مناسب تخمین از روش ارزیابی جک‌نایف استفاده شد. به این ترتیب که در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف و با استفاده از سایر نقاط مشاهده‌ای، کمیت مورد مطالعه در آن نقطه برآورد شد. سپس این نقطه به مجموعه نقاط برگردانده و عملیات گفته شده برای تمام نقاط مشاهده‌ای تکرار شد به گونه‌ای که در انتها به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود داشت. در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده میزان

حفاظت خاک آمریکا تعیین شدند. به منظور تعیین ضریب‌های مدل‌های مورد نظر، تابع هدف به صورت رابطه (۱) تعریف شد (Ghorbani Dashtaki et al., 2009):

$$SSR = \sum_{i=1}^n (I(m)_i - I(p)_i)^2 \quad (1)$$

در رابطه بالا، SSE مجموع مربعات خطا (سانتی‌متر مربع)، $I(m)_i$ مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در زمان i ام (سانتی‌متر)، $I(p)_i$ مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برای زمان i ام (سانتی‌متر) و n تعداد مقایسه‌ها است. ضریب مدل‌های مورد بررسی با حداقل قرار دادن مقدار تابع هدف (SSE) و به منظور در نظر گرفتن بهترین برازش بین مقادیر برآورد شده و مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از برنامه Solver در نرم‌افزار اکسل تعیین شد.

پس از پیش‌پردازش آماری داده‌ها و محاسبه آماره‌های مرکزی (حداقل، حداکثر و میانگین)، آماره‌های پراکنش (ضریب تغییرات) و آماره‌های شکل توزیع (ضریب‌های چولگی و افراستگی) داده‌های مربوط به ضریب رابطه‌های نفوذ، نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و با استفاده از نرم‌افزار SPSS بررسی و توزیع داده‌های غیرنرمال با تبدیل‌های مناسب به توزیع نرمال تبدیل شد. پس از بررسی وجود یا عدم وجود روند در داده‌های اندازه‌گیری شده، به منظور تحلیل همبستگی مکانی بین ضریب‌های نفوذ مورد مطالعه در نقاط اندازه‌گیری شده، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار GS+5.1 نیم‌تغییرنمای مسطحاتی^۱ برای هر یک از ضریب‌های رابطه‌های نفوذ تعیین و ناهمسانگردی موجود در پیوستگی مکانی داده‌های مربوطه بررسی شد (Iqbal et al., 2005; Moosavi and Sepaskhah, 2012). سپس نیم‌تغییرنمای آزمایشی (تجربی) هر ویژگی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد و مدل‌های مختلف نظری شامل مدل‌های کروی، نمایی و گوسی (رابطه‌های ۳، ۴ و ۵) به آن‌ها برازش داده شد. با در نظر گرفتن معیارهای بیش‌ترین ضریب تعیین (R^2) و کم‌ترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) بهترین مدل انتخاب و ضریب‌های آن (دامنه تأثیر، اثر قطعه‌ای و سقف) تعیین شد. دامنه تأثیر فاصله‌ای است که در آن نیم‌تغییرنا ثابت می‌شود و به سقف می‌رسد. اثر قطعه‌ای کم‌ترین مقدار نیم‌تغییرنا و نشان‌دهنده ناپیوستگی نیم‌تغییرنا در نزدیکی مبدأ مختصات بوده و سقف (آستانه) حداکثر مقدار نیم‌تغییرنا است (Iqbal et al., 2005).

$$\gamma(h)^* = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \right\} \quad (2)$$

¹ Surface variogram

دو نقطه مجاور و با فاصله کم از یکدیگر، تفاوت قابل توجهی وجود داشته باشد. همچنین، در پژوهش Moosavi and Sepaskhah (2012) کلاس تغییرپذیری ویژگی‌های هیدرولیکی مورد مطالعه (هدایت هیدرولیکی و ضریب جذب آب خاک اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف) را متوسط تا زیاد گزارش کردند. در پژوهش دیگری، Moosavi and Omidifard (2016) نیز کلاس تغییرپذیری هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط مزرعه را متوسط ولی برای سایر ویژگی‌ها کم گزارش کردند.

چولگی ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه در محدوده $6/83$ تا $3/45$ - قرار داشت به طوری که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار چولگی به ترتیب مربوط به ضریب‌های b رابطه کوستیاکوف و b'' رابطه کوستیاکوف-لوییز بود. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش متحنی توزیع داده‌ها در بین ضریب‌های رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه به ترتیب مربوط به ضریب b رابطه کوستیاکوف و ضریب جذب آب به خاک (S رابطه فیلیپ) بود که نشان‌دهنده نزدیک بودن متحنی توزیع داده‌های ضریب جذب آب به خاک به متحنی توزیع نرمال است. درحالی‌که متحنی توزیع داده‌های مربوط به ضریب b رابطه کوستیاکوف نسبت به سایر ضریب‌های نفوذ مورد مطالعه انحراف بیش‌تری از متحنی توزیع نرمال داشت. بنابراین، توزیع داده‌های این ضریب و سایر ضریب‌هایی که به طور معنادار (در سطح پنج درصد) از توزیع نرمال انحراف داشتند با استفاده از تبدیل‌های مختلف از جمله تبدیل کاکس باکس تا حد امکان به توزیع نرمال نزدیک شدند. جدول ۳ ویژگی‌های آماری داده‌های مربوط به ضریب رابطه‌های نفوذ اندازه‌گیری شده را پس از تبدیل توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نشان می‌دهد. نتایج نشان داد تبدیل‌های مذکور علاوه بر کاهش چولگی و افزایش ضریب رابطه‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، سازمان حفاظت خاک آمریکا و ضریب‌های C و m رابطه هورتون و بهبود وضعیت نرمال بودن داده‌ها، تغییرپذیری ضریب‌های K ، a و m را از زیاد به متوسط، تغییرپذیری ضریب A' را از زیاد به کم و تغییرپذیری ضریب K را از متوسط به کم کاهش داده است. در پژوهش‌های دیگری از جمله پژوهش Karami et al. (2012) میانگین ضریب K رابطه کوستیاکوف، ضریب b رابطه کوستیاکوف، ضریب S رابطه فیلیپ و ضریب A رابطه فیلیپ را به ترتیب $0/896$ ، $0/62$ ، $0/92$ و $0/074$ گزارش کردند که تا حدود زیادی با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. همچنین، در ارتباط با ضریب‌های مورد مطالعه به ترتیب ضریب چولگی را $0/02$ ، $0/154$ و $0/93$ ، ضریب افزایش $1/12$ ، $0/81$ ، $2/29$ و $9/19$ ، ضریب تغییرات را $55/2$ ، $12/1$ ، $55/55$ و $91/9$ درصد و تغییرپذیری ضریب‌های مذکور را به ترتیب زیاد، کم، زیاد و زیاد گزارش کردند. این نتایج تا حدود زیادی با نتایج پژوهش حاضر

خطا و انحراف روش تخمین استفاده شده با محاسبه شاخص‌های آماری کنترل اعتبار نظیر ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای باقی‌مانده (MRE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) تعیین و نقشه‌های هم مقدار با استفاده از نتایج روش مناسب تخمین ترسیم شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های آماری

جدول ۲ ویژگی‌های آماری داده‌های مربوط به ضریب رابطه‌های نفوذ اندازه‌گیری شده را قبل از تبدیل توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که میانگین ضریب A رابطه فیلیپ به مقدار $0/087$ سانتی‌متر بر دقیقه بوده است. بنابراین، خاک مورد مطالعه بر اساس درجه‌بندی Klute (1965) در کلاس زهکشی متوسط تا نسبتاً سریع قرار دارد. از آن‌جا که ضریب A رابطه فیلیپ معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است در این پژوهش نیز میانگین این ضریب حدود ۲۵ درصد میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است. در این راستا، Gupta et al. (2006) و Youngs (1968) گزارش کردند که ضریب A رابطه فیلیپ ۶۶ درصد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بوده که تا حدود زیادی با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. همچنین، در پژوهشی Rawls et al. (1992) نشان دادند که مقدار ضریب A رابطه فیلیپ در زمان‌های طولانی مدت از فرآیند نفوذ می‌تواند معادل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک باشد.

ضریب تغییرات ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه در محدوده $12/5$ تا 478 درصد متغیر بوده است، به طوری که بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب تغییرات به ترتیب مربوط به ضریب‌های A' رابطه کوستیاکوف-لوییز و b'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا بود که نشان می‌دهد ضریب b'' کم‌ترین تغییرپذیری را داشته درحالی‌که ضریب A' بیش‌ترین تغییرپذیری را نشان داد. تغییرات و در نتیجه ضریب تغییرات ضریب A' رابطه کوستیاکوف-لوییز به دلیل زیاد بودن مقدار انحراف معیار (انحراف داده‌ها از میانگین) و درعین حال کم بودن مقدار میانگین، در مقایسه با سایر ضریب‌های به طور قابل توجهی بیش‌تر بود که ممکن است به دلیل وابستگی این ویژگی به ویژگی‌هایی با تغییرپذیری زیاد مانند جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک (Karami et al., 2012) باشد. به طور کلی، در بین ویژگی‌های مختلف خاک، ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی و نفوذ و به ویژه ویژگی‌های هیدرولیکی و نفوذ در شرایط طبیعی و ناهمگن خاک دارای تغییرات بسیار بیش‌تری نسبت به سایر ویژگی‌هایی شیمیایی یا زیستی هستند و حتی ممکن است بین مقادیر این ویژگی‌ها در

همخوانی ندارد که احتمالاً می‌تواند به دلیل تفاوت در فاصله‌های نمونه‌برداری و نوع خاک‌های مورد مطالعه باشد.

۳-۲- تغییرات مکانی و مدل سازی وابستگی مکانی

نتایج مربوط به ضریب‌های (دامنه تأثیر، اثر قطعه‌ای و سقف) بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای مربوط به ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه که دارای توزیع نرمال بودند یا توزیع آن‌ها با تبدیل مناسب به توزیع نرمال نزدیک شده بود (جدول‌های ۲ و ۳)، در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق نتایج، بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب رابطه کوستیاکوف (K و b)، ضریب‌های رابطه هورتون (c)، m و a)، ضریب‌های A رابطه فیلیپ، b' رابطه کوستیاکوف-لوییز از نوع کروی همسان‌گرد بوده است. درحالی که بهترین مدل برازش داده شده به ضریب‌های رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا (a'' و b'')، ضریب‌های S رابطه فیلیپ و K' و A' رابطه کوستیاکوف-لوییز از نوع نمایی همسان‌گرد بود. در پژوهشی که Karami et al. (2012) انجام دادند بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب K و b رابطه کوستیاکوف را به ترتیب کروی و نمایی گزارش کردند. همچنین، آنان بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب‌های S و A رابطه فیلیپ را به ترتیب کروی و نمایی گزارش کردند که تنها از نظر بهترین مدل برازش داده شده به ضریب K رابطه کوستیاکوف با یافته‌های این پژوهش همخوانی داشت و در سایر موارد با نتایج این پژوهش همخوانی نداشت. همچنین، Ghorbani Dashtaki et al. (2010) بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب جذب آب به خاک (ضریب S) را در یک خاک مرتعی در منطقه نثار تنگ بن از توابع شهرکرد کروی گزارش کردند که احتمالاً به دلیل تفاوت در شرایط خاک‌های مورد مطالعه با یافته‌های این پژوهش همخوانی نداشت. با توجه به پژوهشی که Moosavi and Sepaskhah (2012) انجام دادند بهترین مدل برازش یافته به نیم‌تغییرنمای ضریب جذب آب خاک اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف در خاک‌های آهکی منطقه باجگاه شیراز را از نوع نمایی و کروی گزارش کردند که تا حدودی با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد.

نتایج نشان داد کم‌ترین سقف در بین ضریب‌های نفوذ مورد مطالعه مربوط به ضریب C رابطه هورتون و بیش‌ترین سقف مربوط به ضریب a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا بوده است که نشان‌دهنده تصادفی بودن یا بدون ساختار بودن ضریب a'' یا واریانس کل تمام نمونه‌های است که در محاسبه نیم‌تغییرنمای آن به کار گرفته شده‌اند. دامنه تغییرات سقف در بین ضریب‌های نفوذ مورد مطالعه به ترتیب از $0/00010$ تا $6/80900$

برای ضریب‌های C رابطه هورتون و a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا متغیر بود. در مطالعه Karami et al. (2012) نیز سقف برای ضریب‌های S و A رابطه فیلیپ و ضریب‌های K و b رابطه کوستیاکوف به ترتیب $0/28$ ، $0/23$ ، $0/279$ و $0/01$ است. در ادامه، نتایج نشان داد کم‌ترین اثر قطعه‌ای در بین ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه به مقدار $0/00005$ مربوط به ضریب C رابطه هورتون است که نشان می‌دهد واریانس نسبی و حجم نمونه‌برداری برای آشکار کردن ساختارهای مکانی آن مناسب بوده است. درحالی که بیش‌ترین اثر قطعه‌ای به مقدار $2/4$ مربوط به ضریب a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا بود که بیان‌گر واریانس تصادفی قوی در یک فاصله کوتاه است که می‌تواند ناشی از خطاهای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و وجود تغییرات کوتاه دامنه ویژگی مورد مطالعه در فاصله‌های کوچک‌تر از کوتاه‌ترین فاصله نمونه‌برداری باشد. نتایج مطالعه Karami et al. (2012) نیز بیان‌گر اثر قطعه‌ای برای ضریب‌های S و A رابطه فیلیپ و ضریب‌های K و b رابطه کوستیاکوف به ترتیب $0/09$ ، $0/11$ ، $0/94$ و $0/05$ است. همچنین، Moosavi and Omidifard (2016) نیز اثر قطعه‌ای و درصد اثر قطعه‌ای را برای مدل کروی همسان‌گرد برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب جذب آب در خاک مورد مطالعه به ترتیب $0/0001$ و $50/2$ درصد گزارش کردند. از طرفی نتایج نشان داد کم‌ترین شعاع تأثیر در بین ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه به مقدار 96 متر مربوط به ضریب K رابطه کوستیاکوف بود که نشان می‌دهد ضریب K رابطه کوستیاکوف در یک نقطه می‌تواند تا 96 متر بر نقاط اندازه‌گیری مجاور تأثیر داشته باشد. به عبارتی کم‌ترین وابستگی مکانی مربوط به ضریب K رابطه کوستیاکوف است. بنابراین برای این ویژگی می‌توان فاصله نمونه‌برداری را حدود 100 متر در نظر گرفت چون با افزایش دامنه تأثیر فاصله‌های نمونه‌برداری افزایش یافته و تعداد نمونه‌های لازم و در نتیجه هزینه‌های لازم کم‌تر می‌شود. دامنه تغییرات شعاع تأثیر ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه بین $96/1$ تا 211 متر به ترتیب برای ضریب K رابطه کوستیاکوف و ضریب‌های رابطه کوستیاکوف-لوییز، a رابطه هورتون، S رابطه فیلیپ و b'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا متغیر بود. همچنین، Karami et al. (2012) گزارش کردند که شعاع تأثیر برای ضریب‌های S و A رابطه فیلیپ و ضریب‌های K و b رابطه کوستیاکوف به ترتیب 3165 ، 7110 ، 3232 و 14410 متر است. در پژوهشی که Moosavi and Omidifard (2016) انجام دادند اثر شعاع تأثیر را برای مدل کروی همسان‌گرد برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای ضریب جذب آب در خاک مورد مطالعه 101 متر گزارش کردند. همچنین، با توجه به پژوهش Moosavi and Sepaskhah

(1994) Cambardella et al. کلاس وابستگی مکانی همه ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه متوسط تعیین شد و کلاس وابستگی مکانی قوی در هیچ یک از ضریب رابطه‌های نفوذ مشاهده نشد. درحالی‌که (2012) Karami et al. گزارش کردند کلاس ساختار مکانی ضریب‌های K رابطه کوستیاکوف و S و A رابطه فیلیپ را قوی گزارش نمودند البته آن‌ها مشابه نتایج این پژوهش کلاس وابستگی مکانی ضریب b رابطه کوستیاکوف را متوسط گزارش نمودند. در پژوهشی Cambardella et al. (1994) بیان کردند که ساختار مکانی قوی ناشی از اثر عامل‌های ذاتی خاک است و علی‌رغم این‌که نقاط آزمایش مورد مطالعه در یک خاک واقع شده بودند که از نظر عوامل ذاتی و پیدایش خاک تا حدود بسیار زیادی یکسان بودند، ولی احتمالاً به دلیل اثرات ناشی از عوامل بیرونی مانند پوشش گیاهی و غیره ساختار مکانی قوی برای ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه مشاهده نشد (جدول ۴) و کلاس وابستگی مکانی از قوی به متوسط تنزل یافته است. به عبارتی تأثیر عوامل بیرونی بر ساختار مکانی این ویژگی‌ها بیش‌تر از تأثیر عوامل ذاتی مؤثر بر ساختار مکانی بوده است.

(2012) شعاع تأثیر مدل‌های برازش یافته به نیم‌تغییرنمای ضریب جذب آب خاک اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف در خاک‌های آهکی منطقه باجگاه شیراز را حدود ۱۳ تا ۱۰۲ متر گزارش کردند که تا حدود زیادی با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد.

نتایج ضریب‌های نفوذ نشان داد که بیش‌ترین نسبت اثر قطعه‌ای به سقف به مقدار $0/648$ مربوط به ضریب "a" رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا بود که نشان می‌دهد از کل تغییرات مربوط به این ضریب $35/2$ درصد دارای ساختار مکانی بوده درحالی‌که $64/8$ درصد از تغییرات این ویژگی تصادفی و بدون ساختار مکانی مشخص بوده است. کم‌ترین نسبت اثر قطعه‌ای به سقف به مقدار $0/5$ مربوط به ضریب "b" رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا، ضریب‌های C و a رابطه هورتون، ضریب S رابطه فیلیپ و ضریب b رابطه کوستیاکوف بود که نشان می‌دهد 50 درصد از کل تغییرات مربوط به این ویژگی‌ها تصادفی و بدون ساختار مکانی بوده و 50 درصد غیرتصادفی و دارای ساختار مکانی است. با توجه به مقدار نسبت اثر قطعه‌ای به سقف نیم‌تغییرنما و بر اساس الگوی پیشنهاد شده توسط

جدول ۲- خلاصه آمار توصیفی داده‌های مربوط به ضریب‌های رابطه‌های نفوذ اندازه‌گیری شده قبل از تبدیل توزیع داده‌ها به توزیع نرمال

Table 2- Summary of the descriptive statistics of the data related to the coefficients of the measured infiltration equations before converting the data distribution to a normal distribution

ضریب‌های رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا		ضریب‌های رابطه هورتون			ضریب‌های رابطه کوستیاکوف-لوئیز			ضریب‌های رابطه کوستیاکوف		ضریب‌های رابطه فیلیپ		ویژگی‌های آماری
b''	a''	a	m	c	A'	b'	K'	b	K	A	S	
0.950	0.193	0.216	1.99	0.110	-0.050	0.642	0.573	0.719	0.494	0.087	0.486	میانگین
0.959	0.175	0.225	1.22	0.119	0.050	0.650	0.471	0.685	0.501	0.090	0.476	میانه
0.300	0.095	0.037	0.743	-0.180	-1.17	0.298	0.361	0.608	0.004	0.050	0.349	مد
0.119	0.071	0.092	2.24	0.057	0.240	0.149	0.246	0.243	0.097	0.021	0.082	انحراف معیار
0.014	0.005	0.008	5.03	0.003	0.057	0.022	0.061	0.059	0.009	0.000	0.007	واریانس
-3.45	1.95	0.070	4.36	-3.16	-2.82	-0.022	2.51	6.83	-2.42	0.171	0.631	چولگی
18.0	6.20	-0.491	22.8	13.4	9.61	-0.576	7.48	47.6	12.5	-0.737	0.245	برافراشتگی
0.792	0.405	0.381	14.1	0.346	1.33	0.644	1.30	1.78	0.674	0.083	0.361	دامنه تغییرات
0.300	0.095	0.037	0.743	-0.180	-1.17	0.298	0.361	0.608	0.004	0.050	0.349	حداقل
1.09	0.500	0.419	14.9	0.167	0.153	0.942	1.66	2.38	0.678	0.133	0.710	حداکثر
0.911	0.142	0.135	0.978	0.098	-0.056	0.528	0.436	0.662	0.446	0.068	0.419	چارک اول
1.02	0.218	0.278	2.01	0.141	0.079	0.747	0.597	0.713	0.546	0.099	0.541	چارک سوم
0.108	0.076	0.143	1.03	0.043	0.135	0.219	0.160	0.051	0.100	0.030	0.122	دامنه میان چارکی
12.5	36.5	42.6	113	51.8	478	23.2	43.0	33.8	19.7	24.1	16.9	ضریب تغییرات (درصد)
کم	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	کلاس تغییرپذیری*

S, A, K, b, K', A', a, a'', b'' به ترتیب عبارتند از ضریب جذب آب خاک (سانتی‌متر بر مجذور دقیقه)، معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (۷۱۹/سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی‌بعد)، ضریب تجربی (۰/۶۴۲ سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی‌بعد)، ضریب تجربی (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (یک بر دقیقه)، ضریب تجربی (۰/۹۵۰ سانتی‌متر بر دقیقه) و ضریب تجربی (بی‌بعد).
* اگر ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد، بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و بیش‌تر از ۳۵ درصد باشد کلاس تغییرپذیری به ترتیب کم، متوسط و زیاد است (Wilding, 1985).

جدول ۳- خلاصه آمار توصیفی داده‌های مربوط به ضریب رابطه‌های نفوذ اندازه‌گیری شده پس از تبدیل توزیع داده‌ها به توزیع نرمال

Table 3- Summary of the descriptive statistics of the data related to the coefficients of the measured infiltration equations after converting the data distribution to a normal distribution

ضریب‌های رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا		ضریب‌های رابطه هورتون			ضریب‌های رابطه کوستیاکوف-لوییز			ضریب‌های رابطه کوستیاکوف		ضریب‌های رابطه فیلیپ		ویژگی‌های آماری
b''	a''	a	m	c	A'	b'	k'	b	K	A	S	
کاکس باکس	کاکس باکس	-	کاکس باکس	کاکس باکس و قدرمطلق	کاکس باکس	کاکس باکس	کاکس باکس	کاکس باکس	کاکس باکس	-	-	نوع تبدیل
0.871	5.73	0.216	0.786	0.015	4.10	0.296	0.719	4.58	2.08	0.087	0.486	میانگین
0.847	5.71	0.225	0.817	0.015	4.18	0.301	0.753	4.55	2.05	0.090	0.476	میانه
0.008	2.00	0.037	0.504	0.000	4.46	0.214	0.558	0.031	2.03	0.050	0.349	مد
0.283	1.72	0.092	0.234	0.007	0.444	0.060	0.154	1.19	0.170	0.021	0.082	انحراف معیار
0.080	2.95	0.008	0.055	0.000	0.197	0.004	0.024	1.40	0.029	0.000	0.007	واریانس
-0.343	0.340	0.070	0.200	-0.094	-0.282	0.382	0.120	0.774	0.086	0.171	0.631	چولگی
0.592	0.164	0.491	0.924	-0.344	-0.856	0.923	-1.08	3.46	0.398	0.737	0.245	برافراشتگی
1.42	8.48	0.381	0.915	0.032	1.74	0.196	0.612	7.26	0.709	0.083	0.361	دامنه تغییرات
0.008	2.00	0.037	0.431	0.000	3.24	0.181	-1.02	0.031	1.75	0.050	0.349	حداقل
1.42	10.5	0.419	1.35	0.032	4.98	0.377	0.407	7.30	2.46	0.133	0.710	حداکثر
0.688	4.58	0.135	0.520	0.010	3.75	0.255	0.829	3.88	1.99	0.068	0.419	چارک اول
1.08	7.04	0.278	0.982	0.021	4.46	0.347	0.558	5.22	2.17	0.099	0.541	چارک سوم
0.389	2.46	0.143	0.462	0.010	0.715	0.093	0.272	1.35	0.183	0.030	0.122	دامنه میان چارکی
32.5	30.0	42.6	29.8	48.3	10.8	20.1	21.4	25.9	8.16	24.1	16.9	ضریب تغییرات (%)
متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	کم	متوسط	متوسط	متوسط	کم	متوسط	متوسط	کلاس تغییرپذیری*

* S, A, K, b, k', b', C, a, m, a'' و b'' به ترتیب عبارتند از ضریب جذب آب خاک (سانتی‌متر بر مجذور دقیقه)، معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (۰/۷۱۹ سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی‌بعد)، ضریب تجربی (۰/۶۴۲ سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی‌بعد)، ضریب تجربی (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (سانتی‌متر)، ضریب تجربی (یک بر دقیقه)، ضریب تجربی (۰/۹۵۰ سانتی‌متر بر دقیقه) و ضریب تجربی (بی‌بعد) اگر ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد، بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و بیش‌تر از ۲۵ درصد باشد کلاس تغییرپذیری به ترتیب کم، متوسط و زیاد است (Wilding, 1985).

جدول ۴- ضریب‌های بهترین مدل برازش داده شده به نیم تغییرنمای ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه

Table 4- The coefficients of the best-fitted model to the semi-variogram of coefficients of the studied infiltration equations

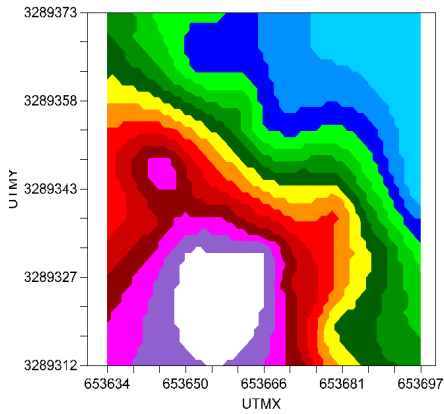
RSS	R ²	کلاس وابستگی مکانی**	نسبت C ₀ /C+C ₀	شماره تأثیر (متر)	سقف (C+C ₀)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	مدل	ویژگی‌های مورد مطالعه*
2.92	0.93	متوسط	0.500	211	0.012	0.006	S	ضریب‌های رابطه فیلیپ
2.26	0.43	متوسط	0.501	101	0.001	0.000	A	رابطه فیلیپ
3.56	0.99	متوسط	0.569	96.1	0.046	0.020	K	ضریب‌های رابطه
5.44	0.85	متوسط	0.500	101	2.283	1.141	b	کوستیاکوف
416	0.94	متوسط	0.501	211	0.042	0.021	K'	ضریب‌های رابطه
3.85	0.64	متوسط	0.569	211	0.401	0.173	A'	کوستیاکوف- لوییز
4.97	0.56	متوسط	0.501	211	0.005	0.003	b'	کوستیاکوف- لوییز
2.32	0.98	متوسط	0.500	200	0.000	0.000	C	ضریب‌های رابطه هورتون
3.33	1.00	متوسط	0.501	176	0.091	0.045	m	ضریب‌های رابطه هورتون
6.41	0.65	متوسط	0.500	211	0.014	0.007	a	ضریب‌های رابطه سازمان
2.46	0.92	متوسط	0.648	185	6.809	2.400	a''	رابطه سازمان
8.97	0.83	متوسط	0.500	211	0.136	0.068	b''	حفاظت خاک آمریکا

* S, A, b, K, b', K', C, a, m, a'', b'' به ترتیب عبارتند از ضریب جذب آب خاک (سانتی‌متر بر مجذور دقیقه)، معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (0.719 سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی بعد)، ضریب تجربی (۰/۶۴۲ سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (بی بعد)، ضریب تجربی (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (سانتی‌متر بر دقیقه)، ضریب تجربی (یک بر دقیقه)، ضریب تجربی (۰.950 سانتی‌متر بر دقیقه) و ضریب تجربی (بی بعد). R² ضریب تعیین و مجموع مربعات باقی‌مانده است. ** اگر نسبت اثر قطعه‌ای به سقف یک ویژگی کم‌تر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ و بیش‌تر از ۷۵ درصد باشد آن ویژگی به ترتیب در محدود کلاس وابستگی مکانی قوی، متوسط و ضعیف را شامل می‌شود (Cambardella et al., 1994).

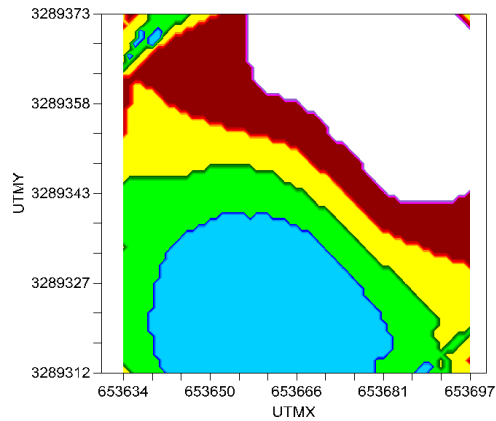
۳-۳- تخمین و پهنه‌بندی

جدول ۵ روش مناسب برای تخمین ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک و معیارهای محاسبه شده برای ارزیابی و دقت تخمین را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در تمام ضریب رابطه‌های نفوذ مورد مطالعه (به استثناء ضریب‌های S رابطه فیلیپ، b رابطه کوستیاکوف و b'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا) روش وزن‌دهی نرمال عکس فاصله با توان یک نسبت به روش کریجینگ معمولی کارایی بهتری در تخمین داشته است. بیش‌ترین ضریب تعیین مربوط به تخمین ضریب A رابطه فیلیپ به دست آمد در حالی که کم‌ترین ضریب تعیین مربوط به تخمین ضریب C رابطه هورتون بود. بنابراین، با در نظر گرفتن این آماره تخمین‌گر استفاده شده برای تخمین ضریب C رابطه هورتون دقت کم‌تری دارد. بیش‌ترین مقدار میانگین خطای باقی‌مانده مربوط به ضریب K' رابطه کوستیاکوف-لوییز بود در حالی که کم‌ترین مقدار میانگین خطای باقی‌مانده مربوط به تخمین ضریب C رابطه هورتون بود که نشان‌دهنده این است تخمین ضریب K' رابطه کوستیاکوف-لوییز دارای بیش‌ترین مقدار بیش برآوردی و ضریب C رابطه هورتون دارای بیش‌ترین مقدار کم برآوردی است. همچنین، نتایج نشان داد بیش‌ترین مقدار میانگین مربعات خطا مربوط به تخمین ضریب a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا است، در حالی که کم‌ترین مقدار میانگین مربعات خطای تخمین مربوط به ضریب C رابطه هورتون بود. به عبارتی با در نظر گرفتن این آماره دقیق‌ترین برآورد مربوط به ضریب C رابطه هورتون و کم دقت‌ترین

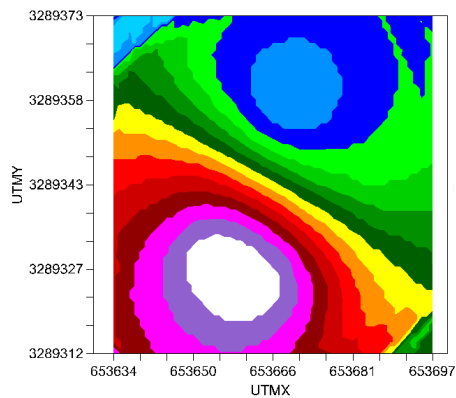
تخمین مربوط به ضریب a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب مربوط به تخمین ضریب‌های C رابطه هورتون و K' رابطه کوستیاکوف-لوییز بود که نشان‌دهنده این است که بیش‌ترین مقدار بیش برآوردی مربوط به ضریب C رابطه هورتون و بیش‌ترین مقدار کم برآوردی مربوط به ضریب K' رابطه کوستیاکوف-لوییز بود. بر اساس میانگین هندسی نسبت خطا تخمین‌گر مورد استفاده برای تخمین ضریب A رابطه فیلیپ دقیق‌ترین تخمین‌گر و برای تخمین ضریب b' رابطه کوستیاکوف-لوییز دارای بیش‌ترین بیش برآوردی و برای تخمین ضریب b رابطه کوستیاکوف دارای بیش‌ترین کم برآوردی است. بر اساس کل معیارهای آماری ذکر شده ضریب A رابطه فیلیپ در مقایسه با سایر ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک با استفاده از روش وزن‌دهی عکس فاصله دقیق‌تر برآورد شده است. همچنین، نتایج نشان داد به‌طور کلی ضریب b رابطه کوستیاکوف کم و ضریب b' رابطه کوستیاکوف-لوییز زیاد برآورد شده‌اند. در پژوهشی که Sepaskhah et al. (2005) انجام دادند نتایج نشان داد که با تحلیل زمین‌آماری به شرط وجود ساختار مکانی، کریجینگ از توانایی کافی برای پیش‌بینی ضریب جذب رابطه فیلیپ برخوردار است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. در مقایسه کریجینگ ساده و کوکریجینگ برای تخمین شدت نفوذ در مناطقی با داده‌های محدود نشان داده شد که روش کوکریجینگ بر کریجینگ ساده برتری دارد (Ersahin, 2003). همچنین، Moosavi and



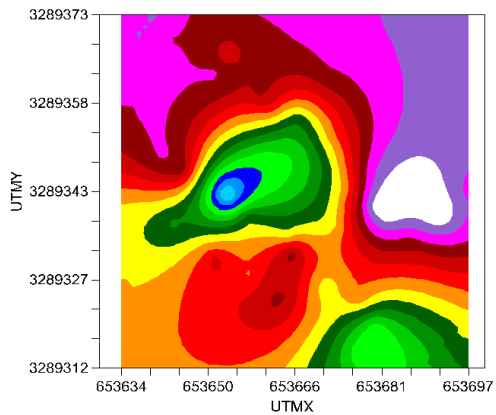
ب: ضریب جذب آب خاک (S) در رابطه فیلیپ (سانتی متر بر مجذور دقیقه)



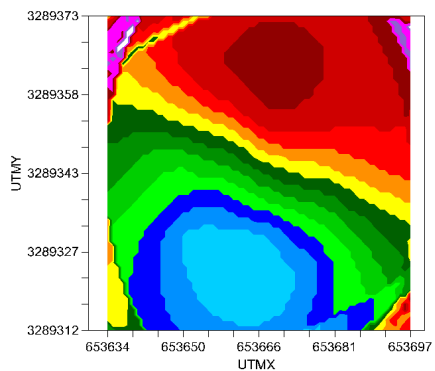
الف: معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع (ضریب A) در رابطه فیلیپ (سانتی متر بر دقیقه)



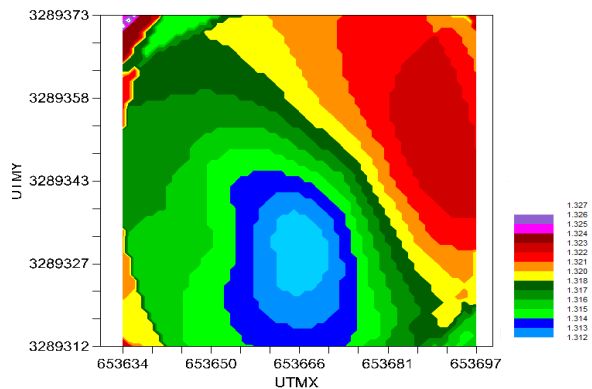
ت: ضریب تجربی K در رابطه کوستیاکوف (۷۱۹/۰ سانتی متر بر دقیقه)



پ: ضریب تجربی h در رابطه کوستیاکوف (بی بعد)



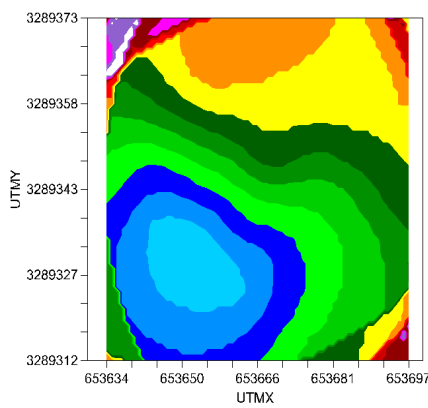
ج: ضریب تجربی K' در رابطه کوستیاکوف-لوییز (۶۴۲/۰ سانتی متر بر دقیقه)



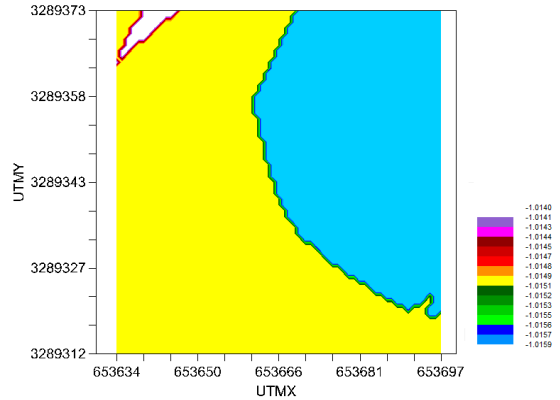
ث: ضریب تجربی h' در رابطه کوستیاکوف-لوییز (بی بعد)

شکل ۱- نقشه مقادیر تخمین زده شده ضریب رابطه های نفوذ آب به خاک با استفاده از روش مناسب زمین آماری پیشنهاد شده

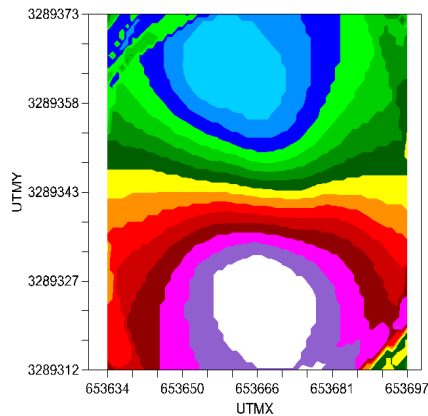
Figure 1- The map of the estimated values of the coefficients of water infiltration equations to the soil using the suggested appropriate geostatistical method



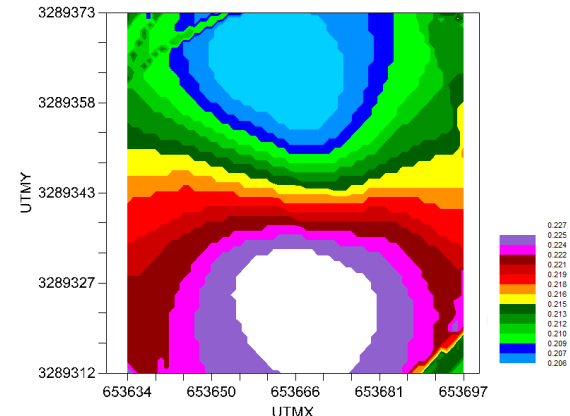
ح: ضریب تجربی A' در رابطه کوستیاکوف-لوییز (سانتی متر بر دقیقه)



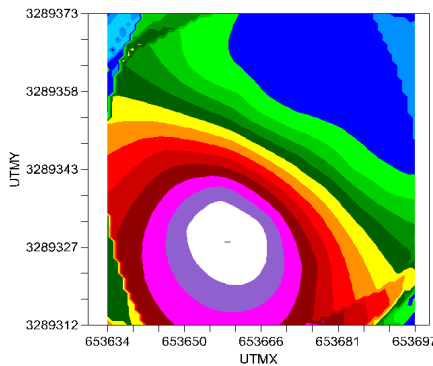
چ: ضریب تجربی C در رابطه هورتون (سانتی متر بر دقیقه)



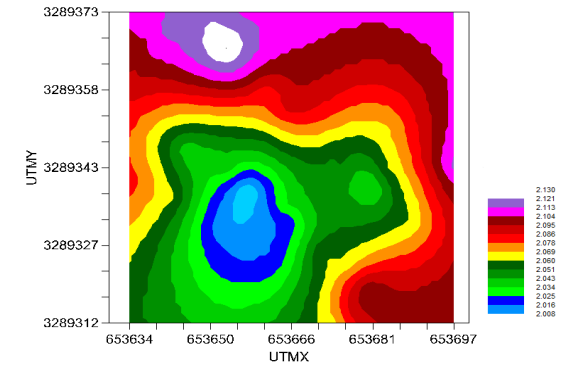
د: ضریب تجربی m در رابطه هورتون (سانتی متر)



خ: ضریب تجربی a در رابطه هورتون (یک بر دقیقه)



ز: ضریب تجربی a'' در رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا (۰/۹۵۰ سانتی متر بر دقیقه)



ذ: ضریب تجربی b'' در رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا (بی بعد)

ادامه شکل ۱- نقشه مقادیر تخمین زده شده ضریب رابطه های نفوذ آب به خاک با استفاده از روش مناسب زمین آماری پیشنهاد شده
Continued Figure 1- The map of the estimated values of the coefficients of water infiltration equations to the soil using the suggested appropriate geostatistical method suggested

تغییرپذیری در مرکز منطقه و در راستای شمال به جنوب و بیشترین مقدار تخمین در جنوب و کمترین مقدار تخمین در شمال منطقه بود. ضریب a'' رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا دارای بیشترین تغییرپذیری در مرکز منطقه در راستای

ضریب m رابطه نفوذ هورتون دارای بیشترین تغییرپذیری در مرکز و در راستای شرقی-غربی بود و بیشترین مقدار تخمین آن در جنوب و کمترین مقدار تخمین آن در شمال مشاهده شد. ضریب a رابطه نفوذ هورتون تخمین زده شده دارای بیشترین

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه شیراز به سبب حمایت‌های مالی در تامین ملزومات مورد نیاز، سپاسگزاری می‌نمایند.

تضاد منافع

تضاد منافی وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های بیشتر می‌تواند از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار داده شود.

مشارکت نویسندگان

محمد امیدی فرد: انجام آزمایش‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نگارش و ویرایش مقاله؛ **سید علی اکبر موسوی:** ایده و طراحی آزمایش‌ها، نظارت بر پروژه، تحلیل و تفسیر داده‌ها، تهیه مواد و تجهیزات آزمایش/ابزارهای تحلیل، نگارش و ویرایش مقاله؛ **عبدالمجید ثامنی:** ایده و طراحی آزمایش‌ها، تهیه مواد و تجهیزات آزمایش، ویرایش مقاله.

منابع

ابطحی، سید علی، کریمیان، نجفعلی، و صلحی، محمد (۱۳۷۰). گزارش مطالعات خاکشناسی نیمه تفضیلی اراضی باجگاه، استان فارس. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. ۷۳ صفحه.

ثامنی، عبدالمجید، پاکجو، مرتضی، موسوی، سید علی اکبر و کامگارحقیقی، علی اکبر. (۱۳۹۵). تعیین ضرایب برخی مدل‌های نفوذ آب در دو خاک آهکی منطقه باجگاه در استان فارس. *دانش آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۱۷۱-۱۸۳. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5847.html?lang=en
ثامنی، عبدالمجید، پاکجو، مرتضی، موسوی، سید علی اکبر و کامگارحقیقی، علی اکبر. (۱۳۹۳). ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب‌های شور و سدیمی. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۸(۲)، ۳۹۵-۴۰۸. doi:10.22092/jwra.2014.100040

جعفرزاده، مریم‌السادات و ویس کریمی، ایرج. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل‌های فردی و ترکیبی در شناسایی پهنه‌های مستعد نفوذپذیری. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۶۹-۸۶. doi:10.22098/MMWS.2022.9809.1066
علیزاده، امین (۱۳۹۴). فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۴۳۸ صفحه.

فخار، محدثه‌سادات و نظری، بیژن. (۱۴۰۱). ارزیابی و صحت‌سنجی شاخص‌های پایش شوری در دشت قزوین. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۸)، ۴۰-۵۱. doi:10.22098/mmws.2022.10142.1077

شمال شرق به جنوب غرب و بیش‌ترین مقدار تخمین در جنوب غربی و کم‌ترین مقدار تخمین در شمال شرق بود. ضریب "b" رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا دارای تغییرپذیری زیاد در کل منطقه و بیش‌ترین مقدار تخمین در شمال غربی و کم‌ترین مقدار تخمین در مرکز منطقه بود. به طور کلی می‌توان گفت اکثر ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک دارای بیش‌ترین تغییرپذیری در مرکز منطقه مورد مطالعه بودند که احتمالاً به دلیل تغییرپذیری بیش‌تر عوامل و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی موثر بر ضریب‌های مختلف نفوذ مورد مطالعه است.

۴- نتیجه گیری

بررسی نفوذ آب به خاک با استفاده از منحنی‌های نفوذ و عمدتاً رابطه‌های نفوذ انجام می‌شود. نفوذ آب به خاک و ضریب رابطه‌های نفوذ نیز همانند سایر ویژگی‌های خاک به نوع و شرایط خاک وابسته است و دارای تغییرات مکانی و زمانی است. در این پژوهش تغییرات مکانی ضریب رابطه‌های مختلف نفوذ بررسی و مدل سازی شد و با استفاده از نتایج حاصل از بهترین مدل، تخمین و پهنه‌بندی انجام شد. نتایج نشان داد کلاس وابستگی مکانی ضریب رابطه‌های نفوذ در منطقه مورد مطالعه متوسط است و همچنین، بیش‌ترین و کم‌ترین شعاع تأثیر به مقدار ۲۱۱ و ۶/۴ متر به ترتیب مربوط به ضریب s رابطه فیلیپ و ضریب‌های رابطه کوستیاکوف-لوویز و ضریب a هورتون و ضریب "b" رابطه سازمان حفاظت خاک آمریکا است. به طور کلی پیشنهاد می‌شود در مواردی که به نقشه ضریب رابطه‌های نفوذ آب به خاک و یا مقدار این ضریب‌های در نقاط زیاد نیاز باشد با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و اندازه‌گیری‌های محدود، ضریب‌های با دقت قابل قبول برآورد و در وقت و هزینه‌ها صرفه‌جویی شود. البته همان‌گونه که نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه به دلیل ساختار مکانی ضعیف و نامناسب، در برخی موارد روش وزن‌دهی عکس فاصله در مقایسه با روش کریجینگ مناسب‌تر بوده و استفاده از آن می‌تواند به تخمین‌های دقیق‌تری منجر شود به علاوه این که دقیق‌ترین و کم دقت‌ترین تخمین‌ها به ترتیب مربوط به ضریب A رابطه فیلیپ و b رابطه کوستیاکوف و 'b' رابطه کوستیاکوف-لوویز هستند. بنابراین، در مواردی که ساختار مکانی ویژگی مورد نظر ضعیف و نامناسب است بهتر است از روش کریجینگ یا سایر روش‌های مشابه که متکی به همبستگی و ساختار مکانی قوی هستند استفاده نشود و پیشنهاد می‌شود در این زمینه از سایر روش‌های تخمین جایگزین که وابسته به وجود ساختار مکانی قوی و مناسب در داده‌ها نیستند (مانند روش‌های وزن‌دهی عکس فاصله) استفاده شود.

- بهاره. *مدلسازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۳۶-۴۹.
doi:10.22098/mmws.2022.11226.1108
- موسوی، سید علی‌اکبر و امیدفرد، محمد (۱۳۹۵). تغییرات مکانی و تخمین زمین‌آماری برخی ضرایب هیدرولیکی در یک خاک آهکی. *آب و خاک*، ۳(۳)، ۷۳۰-۷۴۲.
doi:10.22067/jsw.v30i3.43438
- موسوی، سید علی‌اکبر و سپاسخواه، علیرضا (۱۳۹۰). بررسی زمین‌آماری تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع خاک در مکش‌های مختلف. مجموعه مقالات دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تبریز.
- قربانی دشتکی، شجاع، همایی، مهدی و مهدیان، محمدحسین (۱۳۸۹). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تغییرات مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۴(۲)، ۲۰۶-۲۲۱.
https://www.magiran.com/paper/808923
- کرمی، علی، همایی، مهدی، بای‌وردی، محمد، محمودیان شوشتری، محمد و دوات‌گر ناصر (۱۳۹۱). پراکنش مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک در مقیاس ناحیه‌ای. *دانش آب و خاک*، ۱۷-۳۱.
https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1062.html
- کمانگر، محمد، و مینائی، مسعود (۱۴۰۲). تحلیل مکانی ناهنجاری تغییرات شوری خاک استان فارس در اثر بارش‌های سنگین. *Science Society of America Journal*, 67, 1848-1855. doi:10.2136/sssaj2003.1848
- Fakher, M.S., & Nazari, B. (2022). Evaluation and validation of salinity monitoring indices in the Qazvin plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(3), 40-51. doi:10.22098/mmws.2022.10142.1077 [In Persian]
- Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., & Mahdian, M. (2010). Effect of land use change on spatial variability of coefficient of infiltration into soil. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(2), 206-221. [In Persian]
- Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., Mahdian, M. H., & Kouchakzadeh, M. (2009). Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resource Management*, 23, 1573-1650.
- Ghosh, B., & Pekkatt, S. (2019). A critical evaluation of measurement-induced variability in infiltration characteristics for a river sub-catchment. *Measurement*, 132, 47-59. doi:10.1016/j.measurement.2018.09.018
- Govindaraju, R.S., Koelliker, J.K., Banks, M.K., & Schwab, A.P. (1996). Comparison of spatial variability of infiltration properties at two sites in Konza prairie of East-Central Kansas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(3), 131-138. doi:10.1061/(ASCE)1084%2D0699(1996)1%3A3(131).
- Green, W.H., & Ampt, G. (1911). Studies of soil physics, Part 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1-24. doi:10.1017/S0021859600001441
- Gupta, N., Rudra, R.P., & Parkin, G. (2006). Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering*, 48, 55-62.
- Gupta, R.K., Rudra, R.P., Dickinson, W.T., & Elrick, D.E. (1994). Modelling spatial pattern of three infiltration parameter. *Canadian Journal of Agricultural Engineering*, 36, 9-13.

References

- Holtan, H.N. (1961). A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
- Horton, R E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5, 399-417. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x
- Iqbal, J., Thomasson, J.A., Jenkins, J.N., Owens, P.R., & Whisler, F.D. (2005). Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1338-1350. doi:10.2136/sssaj2004.0154
- Jafarzadeh, M.S., & Vayskarami, I. (2022). Assessing the performance of individual and ensembled models in identifying areas with infiltration potential. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 69-86. doi:10.22098/MMWS.2022.9809.1066 [In Persian]
- Jensen, M.E., Swarner, L.R., & Phelan J.T. (1987). Improving irrigation efficiencies. Pp. 1120-1142 In: Hagan, R.M., H.R. Haise, T. W. Edminster (Eds.). *Irrigation of Agricultural Lands*. Agron Monogr II, ASA and SSSA. Madison, WI.
- Kamangar, M., & Minaei, M. (2023). Spatial analysis of soil salinity anomaly in Fars Province due to the heavy spring rains. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 36-49. doi:10.22098/mmws.2022.11226.1108 [In Persian]
- Karami, A., Homae, M., Bybourdi, M., Mahmoodian Shushtari, M., & Davatgar, N. (2012). Spatial distribution of infiltration parameters at regional scale. *Water and Soil Science*, 22(1), 17-32. [In Persian]
- Klute, A. (1965). Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil. Chapter 16. In: *Agronomy Monographs*, doi:10.2134/agronmonogr9.1.c16
- Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. 6th Transactions Congress International Society for Soil Science, , Moscow, Part A, Pp.17-21.
- Lei, G., Fan, G., Zeng, W., & Huang, J. (2020). Estimating parameters for the Kostiakov-Lewis infiltration model from soil physical properties. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 166-180. doi:10.1007/s11368-019-02332-4
- Machiwal, D., Jha, M.K., & Mal, B.C. (2006). Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95(4), 569-582. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007
- Mahapatra, S., Jha, M.K., Biswal, S., & Senapati, D. (2020). Assessing variability of infiltration characteristics and reliability of infiltration models in a tropical sub-humid region of India. *Scientific Reports*, 10, 1515 doi:10.1038/s41598-020-58333-8
- Mallants, D., Mohanty, B.P., Vervoort, A., & Feyan, J. (1997). Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technology*, 10, 115-131. doi:10.1016/S0933-3630(96)00093-1
- Mezencev, V.J. (1948). Theory of formation of the surface runoff. *Meteorologiae Hidrologia*, 3, 33-40.
- Moosavi, A.A. & Omidifard, M., (2016). Spatial variability and geostatistical prediction of some soil hydraulic coefficients of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*, 30(3), 730-742. doi:10.22067/JSW.V30I3.43438. [In Persian]
- Moosavi, A.A., & Sepaskhah, A.R. (2011). Geostatistical investigation of spatial variability of near saturated hydraulic conductivity measured at different applied tentions. 12th Iranian Soil Science Congress, Tabriz University, Tabriz, Iran, Pp. 1-5. [In Persian]
- Moosavi, A.A., & Sepaskhah, A.R. (2012). Spatial variability of physico-chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 631-656. doi:10.1080/03650340.2010.533659
- Moosavi, A.A., Dehghani, S., & Sameni, A. (2016). Spatial variability of plant-available micronutrients in the surface and subsurface layers of a calcareous soil. *Thai Journal of Agricultural Science*, 48, 165-178
- Moradi, F., Moosavi, A.A., & Khalili Moghaddam, B. (2016). Spatial variability of water retention parameters and saturated hydraulic conductivity in a calcareous Inceptisols (Khuzestan province of Iran) under sugarcane cropping. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 1686-1699. doi:10.1080/03650340.2016.1164308
- Mozaffari, H., Moosavi, A.A., & Sepaskhah, A.R. (2021). Land use-dependent variation of near-saturated and saturated hydraulic properties in calcareous soils. *Environmental Earth*

- Sciences*, 80(23), 769. doi:10.1007/s12665-021-10078-x
- Mozaffari, H., Moosavi, A.A., Sepaskhah, A.R., & Cornelis, W. (2022). Long-term effects of land use type and management on sorptivity, macroscopic capillary length and water-conducting porosity of calcareous soils. *Arid Land Research and Management*, 36, 371-397. doi:10.1080/15324982.2022.2066582
- Nie, W., Ma, X., & Fei, L. (2017). Evaluation of infiltration models and variability of soil infiltration properties at multiple scales. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 589-599. doi:10.1002/ird.2126
- Oku, E., & Aiyelari, A. (2011). Predictability of Philip and Kostiakov infiltration models under inceptisols in the humid forest zone, Nigeria. *Agriculture and Natural Resources*, 45(4), 594-602.
- Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solutions. *Soil Science*, 83, 345-358.
- Rasool, T., Dar, A.Q., & Wani, M.A. (2021). Comparative evaluation of infiltration models under different land covers. *Water Resources*, 48, 624-634. doi:10.1134/S0097807821040175
- Rawls, W.J., Nemes, A., & Pachepsky, Y. (1992). Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. In: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, (Eds). Ya Pachepsky and WJ Rawls),
- Reynolds, W.D., & Elrick, D.E. (1990). Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1233-1241. doi:10.2136/sssaj1990.03615995005400050006x
- Rezaee, L., Moosavi, A.A., Davatgar, N., & Sepaskhah, A.R. (2020a). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators*, 117, 106566. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106566
- Rezaee, L., Moosavi, A.A., Davatgar, N., & Sepaskhah, A.R. (2020b). Shrinkage-swelling characteristics and plasticity indices of paddy soils: spatial variability and their influential parameters. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66, 2005-2025. doi:10.1080/03650340.2019.1706169
- Rumman, N., Lin, G., & Li, J. (2005). Investigation of GIS-based surface hydrological modeling for identifying infiltration zones in an urban watershed. *Environmental Information Archives*, 3, 315-322.
- Sameni, A., Pakjoo, M., Moosavi, A.A., & Kamkar Haghighi, A.A. (2016). Determining coefficients of some water infiltration models in two calcareous soils of Bajgah region in Fars Province. *Water and Soil Science*, 26(3), 171-183. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5847.html?lang=en [In Persian]
- Sameni, A., Pakjoo, M., Moosavi, A.A., & Kamkar Haghighi, A.A. (2014). Evaluation of some infiltration equations under application of saline and sodic waters. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(2), 395-408. doi:10.22092/jwra.2014.100040 [In Persian]
- Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., & NikbakhtShahbazi, A.R. (2005). Geostatistical analysis of sorptivity for a soil under tilled and notilled conditions. *Soil and Tillage Research*, 83, doi:237-245. 10.1016/j.still.2004.07.019
- Sharma, M.L., Barron, R.J.W., & De Boer, E.S. (1989). Spatial structure and variability of infiltration parameters. *Advances in Infiltration*, 113-121.
- Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 36(2), 111-147. doi:10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x
- Suryoputro, N., Soetopo, W., Suhartanto, E.S., & Limantara, L.M. (2018). Evaluation of infiltration models for mineral soils with different land uses in the tropics. *Journal of Water and Land Development*, 37(IV-VI), 153-160. doi:10.2478/jwld-2018-0034
- 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 Journal of Soil Science*, 10(2), 45-57. doi:10.4236/ojss.2020.102003
- USDA-NRCS, US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service (1974). National Engineering Handbook. Section 15. Border Irrigation. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.
- Valiantzas, J.D. (2010). New Linearized two parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 1-13. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.049
- Vand, A.S., Sihag, P., Singh, B., & Zand, M. (2018). Comparative evaluation of infiltration

- models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 4173-4184. doi:10.1007/s12205-018-1347-1
- Vauclin, M., Vieira, S.R., Vachaud, G., & Nielsen, D.R. (1983). The use of cokriging with limited field observations. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 175-184. doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700020001x
- Vieira, S.R., Nielsen, D.R., & Biggar, J.W. (1981). Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 175-184. doi:10.2136/sssaj1981.03615995004500060007x
- Wilding, L.P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: Nielsen, D.R., Bouma, J. (Eds.). *Soil Spatial Variability*. Wageningen (The Netherlands): Pudoc. pp. 166-194.
- Youngs, E.G. (1968). An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture conditions. *Soil Science*, 106, 157-163. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1968/09000/an_estimation_of_sorptivity_for_infiltration.1.aspx
- Zahedifar, M. (2023a). Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. *Catena*, 222, 106807-0. doi:10.1016/j.catena.2022.106807
- Zahedifar, M. (2023b). Feasibility of fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and fuzzy TOPSIS methods to assess the most sensitive soil attributes against land use change. *Environmental Earth Sciences*, 82, 1-17. doi:10.1007/s12665-023-10934-y
- Zahedifar, M., Dehghani, S., Moosavi, A.A., & Gavil, E. (2017). Temporal variation of total and DTPA-extractable heavy metal contents as influenced by sewage sludge and perlite in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63, 136-149. doi:10.1080/03650340.2016.1193164