

ارزیابی روش‌های زمین آماری و سطح پاسخ در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک

یاسر حسینی*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که اهمیتی ویژه در بررسی و مدل سازی حرکت آب و املاح در محیط‌های متخلخل دارد. به دلیل آنکه این روش‌ها پرهزینه و زمانبر هستند. از این رو، برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش‌های سریع، کم هزینه و با دقتی قابل قبول ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش از روش‌های زمین آماری و سطح پاسخ برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده شد، داده‌ها از ۱۳۵ پروفیل خاک مربوط به مطالعات خاکشناسی و اصلاح اراضی سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل در محدوده دشت فتحعلی تهیه شد. فاکتور اصلی شامل هدایت هیدرولیکی اشباع بود و بافت خاک، چگالی ظاهری خاک، تخلخل، درجه اشباع و ظرفیت زراعی خاک به عنوان فاکتورهای فرعی در نظر گرفته شدند. از میان روش‌های مدل سازی زمین آماری، روش کوکریجینگ معمولی دارای بهترین برازش بود و بهترین واریوگرام برازش داده شده در این روش، مدل نمایی با اثر قطعه‌ای صفر و سقف ۱۵۶ تعیین گردید که نشان دهنده استحکام ساختار فضایی منطقه و تأثیر کامل متغیر مستقل بر مدل واریوگرام منطقه بود. در روش کوکریجینگ معمولی دقت برآورد با ضریب تعیین ۰/۹۳ و ریشه مجذور مربعات خطا ۳/۲۱ (میلی متر بر ساعت) برآورد گردید. در مدل سطح پاسخ، بهترین مدل هدایت هیدرولیکی اشباع بر اساس متغیرهای موثر، مدل درجه دو با ضریب تعیین ۰/۹۴ و میزان کفایت دقت برابر ۴۹/۲ به دست آمد، همچنین برای تعیین بیشترین هدایت هیدرولیکی با فرض تغییر سایر پارامترهای موثر در محدوده مقادیر به دست آمده، یک هدف با درجه مقبولیت ۰/۶۷ به دست آمد. این هدف هدایت هیدرولیکی خاک را در میزان رس ۸/۹ (درصد) و میزان شن ۸۶ (درصد)، برابر ۵۷/۱۵ (میلی متر بر ساعت) محاسبه نمود. بنابراین نتایج نشان داد، هر دو روش در تعیین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از دقت بالایی برخوردار بودند، لیکن روش سطح پاسخ دارای دقت بالاتری بود.

واژه‌های کلیدی: مدل سطح پاسخ، هدایت هیدرولیک اشباع، شبکه آبیاری و زهکشی، بهینه‌سازی، کوکریجینگ

حسینی ی. ۱۴۰۲. ارزیابی روش‌های زمین آماری و سطح پاسخ در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۴. صفحه: ۶۳-۷۶.

۱-استاد گروه مهندسی فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی
*پست الکترونیک: y_hoseini@uma.ac.ir

مقدمه

اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به دلیل نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد و تغییرپذیری مکانی و زمانی فراوان آن، اغلب با دشواری‌هایی همراه است، بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتوانند این ویژگی‌ها را با استفاده از پارامترهای زودیافت خاک مانند بافت، کربن آلی و چگالی ظاهری با دقت مناسب تخمین بزنند، لازم به نظر می‌رسد. یکی از این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر زمین آمار می‌باشد، از خصوصیات زمین آمار آن است که مقدار خطای تخمین را محاسبه نموده و همچنین قادر است مقدار خطای نمونه‌برداری و آماده‌سازی داده‌ها را محاسبه کرده و به این ترتیب شاخصی جهت برآورد استحکام ساختار فضایی و ارتباط مکانی داده‌ها در اختیار دهد. همچنین استفاده از روش سطح پاسخ نیز از روش‌های جدید تعیین متغیرهای وابسته‌ای مثل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. امروزه با توسعه سریع فناوری‌های پردازش رایانه‌ای و ایجاد نرم‌افزارهای مربوطه، از مزایای فناوری برای مسائل مربوط به مدل‌سازی و استخراج توابع انتقالی استفاده می‌گردد. دلبری و همکاران (Delbari et al. 2004) به ارزیابی روش‌های زمین آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق جنوب دشت سیستان پرداخته‌اند. روش‌های میان‌یابی استفاده شده در این تحقیق شامل کریجینگ، میانگین متحرک وزنی و TPSS¹ بود. نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی در منطقه سیستان از همبستگی مکانی بالایی برخوردار نبوده و در نتیجه روش کریجینگ دقت قابل قبولی در برآورد هدایت هیدرولیکی در منطقه مذکور ارائه نداد.

بیگی هرچگانی و حشمتی (Begay Herchgani & Heshmati, 2012) با استفاده از زمین آمار کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد را برای استفاده در سامانه‌های آبیاری بررسی کردند. در این تحقیق شاخص‌های هدایت الکتریکی (EC)، کل املاح محلول (TDS)، کل جامدات معلق (TSS) و pH آب در ۹۷ حلقه چاه اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده همبستگی مکانی متغیرهای مستقل بود که حاکی از دقت خوب مدل‌های واریوگرام و تخمینگر کریجینگ معمولی در میان‌یابی و پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد بود. نظامی و علیپور

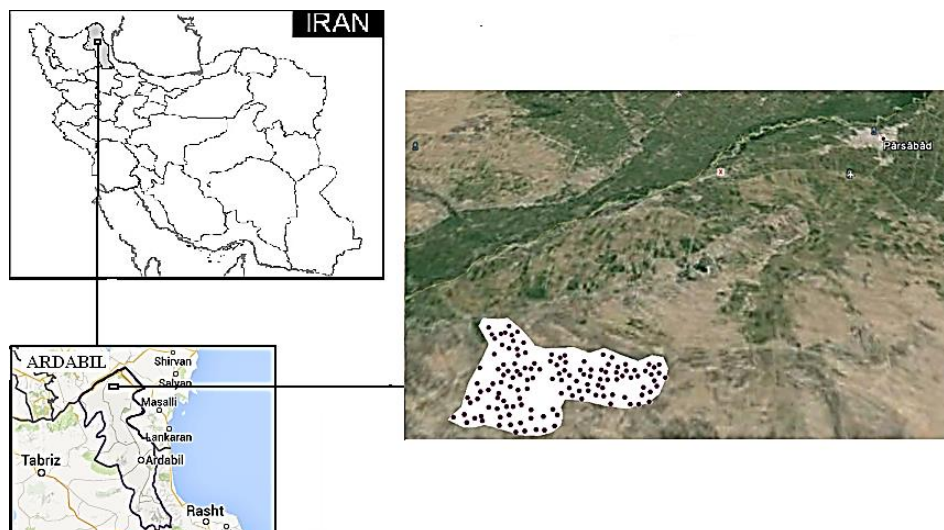
(Nezami & Alipour, 2012) نقشه شوری خاک را با استفاده از روش‌های زمین آماری در دشت قزوین تهیه کردند. به علت اینکه در ارزیابی زمین، شوری خاک عامل محدود کننده برای رشد گیاهان بود، محققان اقدام به نمونه برداری از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک در دشت قزوین کردند، و به این نتیجه رسیدند که استفاده از متغیر کمکی مانند ارتفاع و بافت خاک که دارای همبستگی بالایی با متغیر اصلی می‌باشند، باعث افزایش دقت روش میان‌یابی می‌شود. پرویز و همکاران (Parviz et al. 2022)، روش الگوریتم ژنتیک را با روش‌های زمین آماری در برآورد توزیع مکانی pH خاک مورد مقایسه قرار دادند، نتایج نشان داد که مدل نیم‌تغییرنمای خطی در درون‌یابی کریجینگ دارای کمترین مقدار خطا بوده و برنامه‌ریزی بیان ژن و رگرسیون خطی به ترتیب در برآورد توزیع مکانی pH خاک، کمترین و بیشترین مقدار خطا را داشتند. حسینی و همکاران (Hoseini et al. 2017) به بهینه‌سازی تخمین هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش کریجینگ و منطقه‌بندی اراضی کشاورزی از نظر هدایت هیدرولیکی تحقیقی را انجام دادند. نتایج نشان داد که مساحت مناطق با هدایت هیدرولیکی کم و متوسط در روش کریجینگ نسبت به روش تیسن گسترش داشت و نیز در هدایت هیدرولیکی زیاد مساحت مناطق به روش تیسن بیشتر از روش کریجینگ بود. در تحقیقی که توسط کاستیک و همکاران (Kostić et al. 2016) انجام شد، جریان رودخانه به عنوان تابعی از درجه حرارت و میزان بارندگی با استفاده از داده‌های موجود و روش سطح پاسخ بر روی رودخانه مارووا در صربستان مدل گردید. نتایج رابطه خطی و رابطه درجه دو معنی‌داری را بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته نشان داد و تأثیر متقابل دو پارامتر مستقل بر پارامتر وابسته از درجه تأثیر کمتری برخوردار بود. کشتکار و همکاران (Keshtegar et al. 2016)، پیش‌بینی جریان رودخانه را با استفاده از مدل سطح پاسخ بررسی نمودند. در این تحقیق، روش سطح پاسخ^۲ (RSM) بر اساس توابع چند جمله‌ای مرتبه بالا برای پیش‌بینی جریان رودخانه استفاده شد. تجزیه و تحلیل دقیق از شاخص‌های کلی آماری نشان داد که عملکرد چند جمله‌ای مرتبه پنجم نسبت به سایر چند جمله‌ای‌ها بهتر بود. محمود آبادی و مظاهری (Mahmoodabad & Mazaheri, 2012) به بررسی

پاسخ سطح و بر مبنای طرح مرکب مرکزی پرداختن، نتایج این مطالعه نشان داد، افزایش درصد سنگریزه سطحی در محدوده‌ی صفر تا ۴۵ درصد سبب کاهش غلظت رسوب می‌شود، و اثر سنگریزه‌های ریزتر در کاهش غلظت رسوب در مقایسه با سنگریزه‌های درشت‌تر بیش‌تر است. لذا با توجه به تعداد محدود پژوهش‌های انجام شده در داخل و خارج کشور در راستای تعیین هدایت هیدرولیکی بر اساس روش‌های زمین‌آمار و سطح پاسخ، و با توجه به دشواری، وقت-گیری و هزینه بر بودن روش مستقیم اندازه‌گیری، هدایت هیدرولیکی اشباع، هدف از انجام این پژوهش، تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از برخی پارامترهای زود یافت خاک مانند بافت خاک و چگالی ظاهری خاک، تخلخل، درجه اشباع و ظرفیت‌زراعی خاک با بهره‌گیری از مدل سطح پاسخ و روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار و مقایسه دقت هر یک از این روش‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

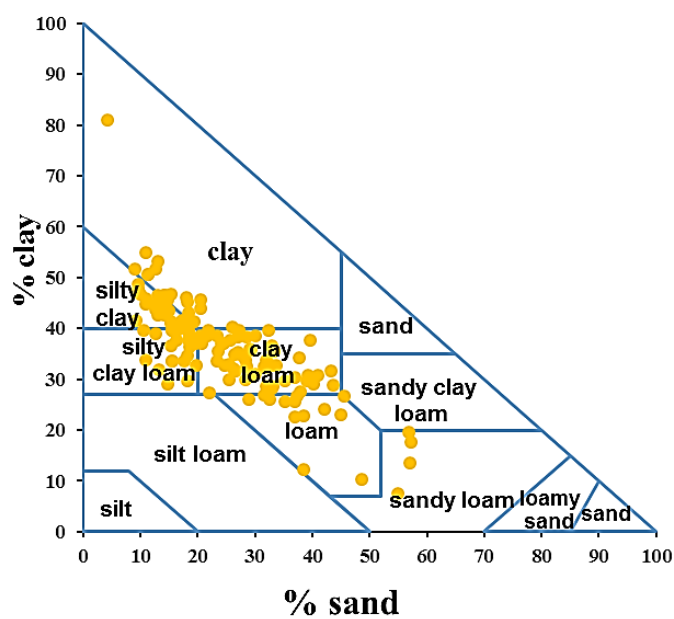
این تحقیق در شهرستان پارس‌آباد استان اردبیل انجام شده است. طول جغرافیائی محل قرارگیری شهر پارس‌آباد ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیائی آن ۳۹ درجه و ۳۸ دقیقه شمالی و ارتفاع آن از سطح دریا ۳۲ متر می‌باشد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و نقاط موجود در شکل نشان‌دهنده نقاط حفر پروفیل می‌باشد. هدایت هیدرولیکی خاک در منطقه مورد مطالعه جمعاً در ۱۵۰ ایستگاه به روش پرماتر گلف، اندازه‌گیری شده است، که در این تحقیق از داده‌های ۱۳۵ نقطه استفاده شده است. با بررسی آماری داده‌های فیزیکی خاک، مشخص شد که دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی ۱۰۸/۷ تا ۱۶۶/۶ میلی‌متر بر روز بامیلنگین ۱۳۱/۲ میلی‌متر بر روز می‌باشد. در شکل (۲)، بافت خاک نقاط نمونه برداری در مثلث بافت خاک USDA نشان داده شده است. همچنین محدوده مقادیر اندازه‌گیری شده، هر یک از متغیرهای مستقل در جدول (۱) نشان داده شده است.

نفوذپذیری خاک در شرایط مزرعه‌ای و نقش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در نفوذپذیری خاک تحقیقی انجام دادند. نتایج آزمایشات نشان داد که بافت خاک تأثیر معنی‌داری بر نفوذپذیری دارد به طوری که با افزایش ۶ برابری ذرات رس، نفوذپذیری نهایی ۱/۵ برابر کاهش یافت و با افزایش ۴/۱۴ برابری ذرات سیلت نیز نفوذپذیری نهایی ۷/۳۸ برابر کاهش یافت. شیرازی و همکاران (Shirazi et al. 2016)، عوامل موثر بر فرسایش را با استفاده از روش سطح پاسخ در حوضه باغملک واقع در استان خوزستان مدل‌سازی نمودند. در این مطالعه کاربرد روش‌های غیر سازه‌ای از جمله قرق و اصلاح پوشش گیاهی بر میزان فرسایش مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ به ترتیب با میانگین مربعات خطا، مجموع مربعات خطا و ضریب تعیین برابر ۴/۱۶، ۲/۰۳، ۰/۹۹۸، مناسب‌ترین روش برای تعیین میزان فرسایش خاک بعد از اعمال شیوه‌های مدیریتی قلمداد گردید. یوسفی و همکاران (Yousefi et al. 2016)، کاربرد روش سطح پاسخ در طراحی بهینه سیستم‌های کنترل سیلاب را مورد بررسی قرار دادند تابع هدف مطلوب در این مطالعه حداقل نمودن هزینه در نظر گرفته شد. آزمایش‌های روش سطح پاسخ بر اساس طرح مرکب مرکزی انجام شد. با مقایسه مقادیر مشاهده شده با نتایج مدل پیش‌بینی شده، از میان مدل‌های مختلف برآورد، مدل خطی با داشتن کمترین مجموع مربعات خطا توسط نرم افزار پیشنهاد شد. سانچز و همکاران (Sánchez et al. 2016)، زبری سطحی را با استفاده از روش سطح پاسخ و یک نوع تابع پایه شعاعی چند درجه‌ای مورد بررسی قرار دادند. و تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان زبری سطح را از جمله تأثیر ماشین کاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل سطح پاسخ با کمترین مقدار خطای برابر ۰/۳۲ میکرومتر و تابع درجه دو، از دقت بالاتری برخوردار بود. اسدزاده و همکاران (Asadzadeh et al, 2017)، به بررسی و مدل‌سازی تأثیر همزمان دبی جریان سطحی، پوشش و همچنین ابعاد سنگریزه‌های سطحی بر غلظت رسوب با استفاده از روش



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Geographical location of the study area



شکل ۲- محل قرارگیری نقاط در مثلث بافت خاک USDA

Figure 2. The location of the points in the USDA soil texture triangle

جدول ۱- مقادیر بیشینه و کمینه هر یک از متغیرهای مستقل

Table 1. maximum and minimum actual values of each of the independent variables

Variables	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Clay	%	7.6	81	36	9.4
Silt	%	14.7	56.3	39	6.8
Sand	%	4.3	57.3	25	11.5
Soil saturation degree	%	26.1	77.2	48.5	9.8
Field capacity	%	12.9	33.2	21.4	3.9
Bulk density	g/cm ³	1.29	1.78	1.59	0.08
Effective porosity	%	5.8	51.4	17.7	6.08

در رابطه فوق، $Z(x)$: مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای با مختصات (x) ، $M(x)$: مؤلفه جزمی متغیر ناحیه‌ای و (x) Y : مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای می‌باشد. نیم تغییر نما برای تشریح ارتباط مکانی مقدار یک متغیر در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه به کار می‌رود و یک ابزار اساسی در زمین آمار است. نیم تغییر نما همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده را با توجه به فاصله و جهت آن‌ها نشان می‌دهد. مقدار نیم تغییر نما به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (5)$$

در رابطه فوق، $\gamma(h)$: نیم تغییر نمای متغیر ناحیه‌ای، $n(h)$: تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبات به ازای هر فاصله h است، بنابراین تعداد جفت‌ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت‌ها کم می‌شود و $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات (x) و $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند.

کریجینگ یک روش تخمین زمین آماری است که با استفاده از مقادیر معلوم و یک تغییر نما، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. این روش بر منطق میلنگین متحرک وزن دار استوار می‌باشد و می‌توان گفت که بهترین تخمینگر خطی نااریب است. فرمول کلی تخمین کریجینگ بصورت زیر است:

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x) \quad (6)$$

در رابطه فوق، $Z(x_1)$: مقدار مشاهده شده Z در نقطه (x) ، λ_1 : وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه و $Z^*(x)$: مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x می‌باشد.

تئوری روش سطح پاسخ

برای انجام روش سطح پاسخ از روش داده‌های موجود^۱ استفاده شد. در این روش، داده‌های آزمایش انجام شده با در نظر گرفتن حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های $(+1)$ و (-1) مشخص می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، معادله مدل درجه دوم کامل یا فرم

روش پرماتر گلف

در روش پرماتر گلف، اندازه‌گیری افت سطح آب، تا زمانی ادامه دارد که افت سطح آب در چهار فاصله زمانی متوالی دو دقیقه‌ای مساوی گردد (Reynolds & Elrick, 1985). پس از انجام آزمایش‌ها هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به دو روش آنالیز تک‌عمقی و دو عمقی گلف با استفاده از روابط زیر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، پتانسیل جریان ماتریک و طول درشت موئینگی خاک را می‌توان محاسبه نمود (Reynolds et al. 1985). اگر دو عمق استغراق H_1 و H_2 در یک چاهک موجود باشد در نتیجه دو شدت جریان Q_1 و Q_2 بدست می‌آید.

$$K_s = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (1)$$

که در روابط بالا مقادیر G_1 و G_2 از روابط زیر محاسبه می‌گردند در معادلات C_1 و C_2 مقادیر متناسب با H_1 و H_2 هستند.

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (2)$$

$$G_1 = G_2 \left(\frac{H_2 C_1}{H_1 C_2} \right)$$

در آنالیز تک عمقی ریچاردز مقدار K_s با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$K_s = CQ / (2\pi H^2 + C\pi a^2 + 2\pi H / \alpha_E^*) \quad (3)$$

$\alpha_E^* (m^{-1})$: تخمین مقدار α^* از جداول ارائه شده توسط الریک و همکاران (Elrick et al. 1989) بدست می‌آید.

تئوری زمین آمار

در روش‌های تخمین کلاسیک از جمله روش تیسسن در برآورد مقادیر متغیر تصادفی و بسط و گسترش آن موقعیت مکانی داده‌ها و جهت آن، در برآورد مقادیر متغیر تصادفی در سطح منطقه مد نظر نبوده و ضریب داده‌ها برای تخمین به جهت و مکان آن داده‌ها وابسته نمی‌باشد ولی در زمین آمار این دو فاکتور مورد توجه قرار می‌گیرند. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه جزمی و تصادفی تجزیه کرد بنابراین می‌توان نوشت:

$$Z(x) = M(x) + Y(x) \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad (8)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_{residual} / DF_{residual}}{SS_{total} / (DF_{model} + DF_{residual})} \quad (9)$$

در روابط بالا $SS_{residual}$ بیان گر مجموع مربعات باقیمانده، DF معرف درجه آزادی و SS_{total} معرف مجموع مربعات کل ($SS_{residual} + SS_{model}$) است.

نتایج و بحث

الف- برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از

زمین آمار

در ابتدا از آنجا که روش میانمایی کریجینگ برای داده‌هایی با توزیع نرمال نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد، جهت استفاده از روش کریجینگ هدایت هیدرولیکی نقاط، توسط روش‌های تبدیل توزیع غیر نرمال به نرمال، به داده‌هایی با توزیع نرمال تبدیل گردید. یکی از این تبدیلات تبدیل لگاریتمی است. شکل (۳) نشان دهنده مقادیر هدایت هیدرولیکی تبدیل شده می‌باشد.

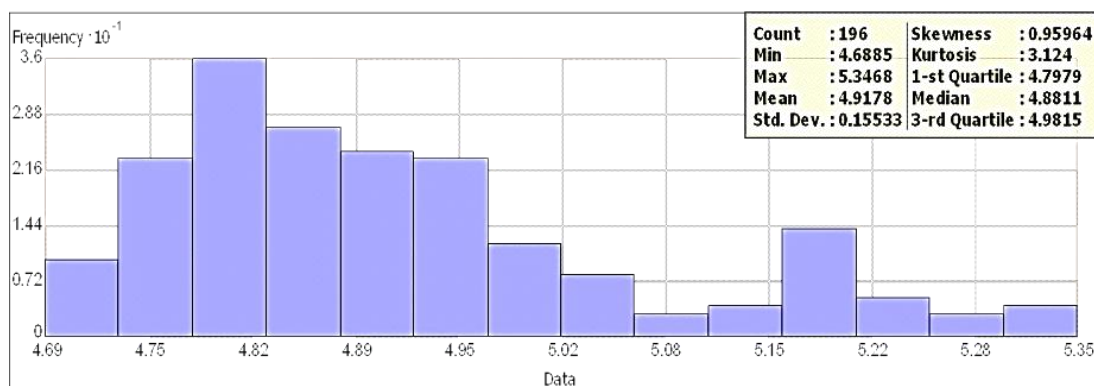
سپس با دادن مختصات UTM نقاط به نرم افزار GIS وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها بررسی شد، پس از بررسی داده‌ها، همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، داده‌ها در جهات X و Y دارای روند بوده و لذا در تخمین به روش کریجینگ روند از داده‌ها حذف گردید.

کاهیده آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به صورت زیر بیان شود.

$$Y = C_{k0} + \sum_{i=1}^k C_{ki} X_i + \sum_{i=1}^k C_{kii} X_i^2 + \sum_{i < j = 2}^k C_{kij} X_i X_j \quad (7)$$

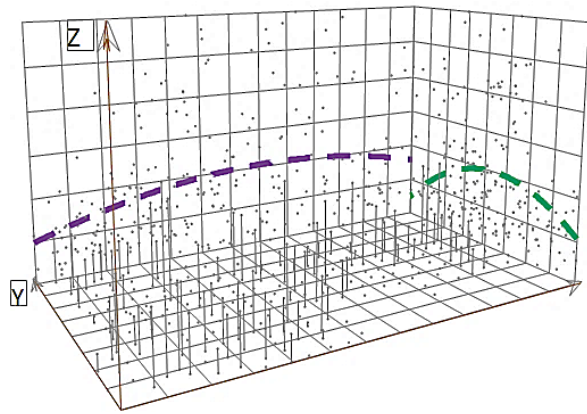
در اینجا C_{k0} ، C_{ki} و C_{kij} به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. X_i و X_j متغیرهای مستقل کد شده هستند.

پس از آنکه ضرایب معادله محاسبه شدند، با حل معادله بالا، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقیمانده، ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل توسط ضریب تعیین (R^2) بیان می‌گردد و اهمیت آماری آن بوسیله آزمون آماری فیشر $(F\text{-Value})$ مشخص می‌شود. اهمیت هر یک از ضرایب رگرسیون (مدل) نیز بر اساس آزمون T به دست می‌آید. البته باید توجه داشت که ضریب تعیین به تنهایی نمی‌تواند دقت مدل را توضیح دهد، زیرا این شاخص بیان کننده تغییرات حول میانگین پاسخ است. بنابراین از ضریب دیگری به نام ضریب تعیین اصلاح شده (R^2_{adj}) استفاده می‌شود (Montgomery & Myers, 1995). در محاسبه این ضریب، برخلاف R^2 ، به جای مجموع مربعات از میانگین مجموع مربعات استفاده می‌شود. نحوه محاسبه این دو ضریب در معادله‌های (۵) و (۶) ارائه شده است:



شکل ۳- نمودار فراوانی هدایت هیدرولیکی تبدیل شده

Figure 3. Frequency diagram of converted hydraulic conductivity



شکل ۴- وجود روند متغیر هدایت هیدرولیکی در راستای محورهای مختصات

Figure 4. Existence of trends of hydraulic conductivity along the coordinate axes

بدست آمده پس از اعمال متغیر کمکی درصد رس خاک را نشان می‌دهد. شکل (۶) پراکنش تخمین هدایت هیدرولیکی خاک، با استفاده از متغیر کمکی درصد رس خاک را به روش کوکریجینگ معمولی نشان می‌دهد. برای ارزیابی میزان اریب بودن یا نبودن تخمین‌های بدست آمده از روش اعتبارسنجی متقابل^۴ استفاده شد. همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود مقدار تخمین زده شده به روش کوکریجینگ معمولی^۵ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک بوده و این امر سبب شده است که خط برازش داده شده بین مقادیر واقعی و تخمینی به زاویه ۴۵° نزدیک گردد. همانطور که در ارزیابی روش مذکور نشان داده شده است با استفاده از پارامترهای زود یافت خاک نظیر درصد شن و رس و سیلت، میزان برآورد انجام شده در سطح منطقه با دقت بسیار بالایی انجام می‌گردد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد وابستگی روش زمین آماری جهت برآورد دقیق پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به خصوصیات بافت مشهود می‌باشد، لذا بکارگیری روش کریجینگ بدون استفاده از متغیر کمکی در برآورد هدایت هیدرولیکی نتایج دقیقی را در بر نداشته است (باساران و همکاران (Basaran et al. 2011)، کالپانا و آگوال (Kalpana & Aggrawal, 2011) اما با در نظر گرفتن خواص فیزیکی خاک به عنوان پارامتر موثر در هدایت هیدرولیکی، برآوردها به مقدار واقعی بسیار نزدیک می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که بدون در نظر گرفتن متغیر کمکی، ارتباط فضایی بین مقادیر هدایت هیدرولیکی کم بوده و واریوگرام بدست آمده از استحکام بسیار کمتری نسبت به

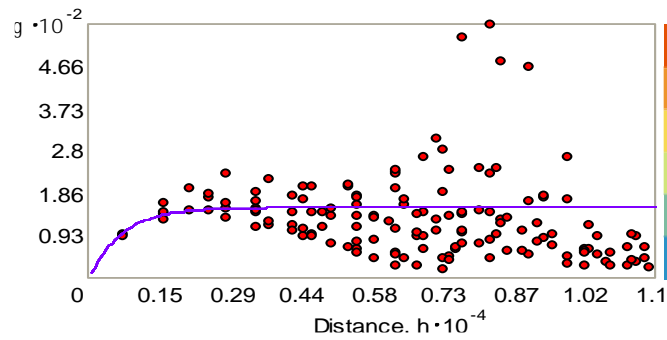
با رسم واریوگرام جهتی برای متغیر هدایت هیدرولیکی خاک، با فرض غیر همسان بودن منطقه در جهتهای ۰° و ۴۵° و ۹۰° و همچنین ۱۳۵° مشاهده شد که این واریوگرام‌ها در جهات مختلف همگن بوده و از ساختار فضایی مدل نمایی پیروی می‌کنند و میزان دامنه تأثیر و سقف آن‌ها یکسان می‌باشد. در این واریوگرام‌های مدل نمایی میزان اثر قطعه‌ای^۱ (۰/۰۰۲) و سقف واریوگرام^۲ (۰/۰۰۶) محاسبه گردید. و لذا، از آنجا که نسبت اثر قطعه ای به سقف واریوگرام کوچکتر از ۰/۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که نقش مؤلفه ساختاردار واریوگرام بیش از نقش مؤلفه بی ساختار آن است و این نشان‌دهنده استحکام ساختار فضایی منطقه می‌باشد. در مرحله بعد از پارامتر درصد رس خاک، جهت کمک به تخمین مورد نظر استفاده شد، برای این کار از روش کوکریجینگ با در نظر گرفتن درصد رس در نقاط اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی، استفاده گردید. بهترین واریوگرام برازش داده شده در این روش واریوگرام مدل نمایی^۳ با اثر قطعه ای صفر و سقف ۱۵۶ بود. همچنین واریوگرام نمایی بدست آمده ارتباط مکانی داده‌ها را تا دامنه ۱۹۹۸ متر نشان داد که از این مقدار میتوان در کاهش شبکه نمونه برداری جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در سطح منطقه استفاده نمود در نتیجه با استفاده از اندازه‌گیری تعداد محدودی هدایت هیدرولیکی و بافت خاک در سطح منطقه و استفاده از ابزار کوکریجینگ، می‌توان هدایت هیدرولیکی را در کل منطقه با دقت خوبی برآورد نمود (مردون و همکاران (Merdun et al. 2006)). شکل (۵) واریوگرام

4-Cross validation
5-Ordinary CoKriging

1- Nugget
2-Sill
3-Exponential

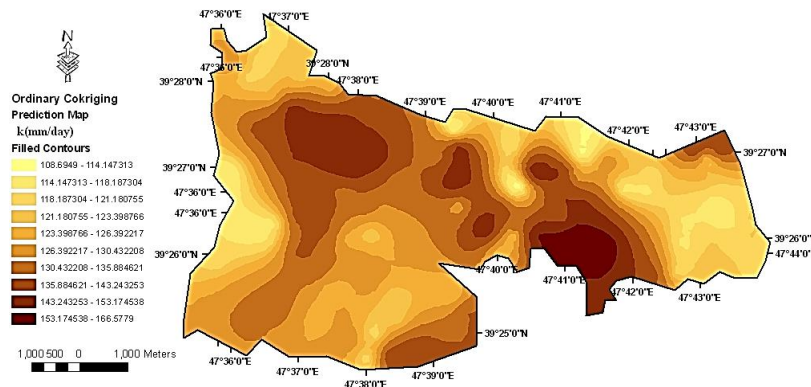
Picciafuoco *et al.* 2019, Usowicz & Lipiec, 2021).
زمینه مطابقت دارد (

حالتی که از متغیر کمکی استفاده می شود، دارد به طوری که در حالت دوم میزان اثر قطعه‌ای متغیر ناحیه‌ای به صفر کاهش می‌یابد که با تحقیقات انجام شده در این



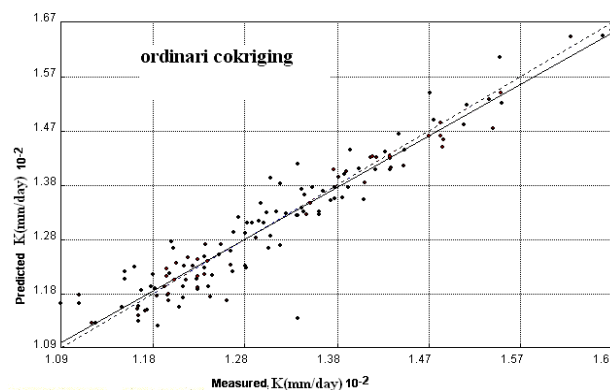
شکل ۵- واریوگرام هدایت هیدرولیکی در سطح منطقه

Figure 5. Variogram of hydraulic conductivity at the level of the region



شکل ۶- پراکنش تخمین کوکریجینگ در سطح منطقه مورد مطالعه به روش کوکریجینگ معمولی

Figure 6. Distribution of the cokriging estimate at the studied area by ordinary cokriging method



شکل ۷- روش اعتبار سنجی متقابل جهت ارزیابی روش کوکریجینگ معمولی برای هدایت هیدرولیکی خاک

Figure 7. Cross validation method to evaluate the ordinary cokriging method for hydraulic conductivity

این روش، با مقایسه مقادیر مشاهده شده هدایت هیدرولیکی با مقادیر پیش‌بینی شده، از میان مدل‌های مختلف، مدل درجه دوم انتخاب گردید. سپس با استفاده از روش گام به گام و اعمال آن بر مدل انتخابی، مدل

ب- برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش سطح پاسخ نتایج تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی نشان داد که شوری، CROSS و برهمکنش آن‌ها بر مقدار رس قابل در

خاک بر هدایت هیدرولیکی خاک، به صورت خطی می‌باشد که با تحقیقات عبدالرحمان و همکاران (Abdel Rahman *et al.*, 2022) همخوانی دارد. شکل (۹) خطوط تراز مقدار هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس فاکتورهای موثر فیزیکی خاک را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل نشان داده شده است، تأثیر افزایشی مقادیر درجه اشباع بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک به صورت تابع خطی دیده می‌شود. این نشان می‌دهد که با افزایش درجه اشباع خاک در شرایط ثابت بودن پارامترهای دیگر، میزان هدایت هیدرولیکی خاک افزایش می‌یابد و در سطوح یکسان و در درصدهای مختلف شن خاک، با افزایش درصد اشباع خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی خاک پیش‌بینی می‌شود، این موضوع در رابطه با میزان ظرفیت زراعی خاک نیز دیده می‌شود. همچنین همانطور که در شکل (۸) مشخص است تأثیر افزایشی مقدار شن خاک بر هدایت هیدرولیکی از نوع درجه دوم بوده، ولی تأثیر کاهش می‌یابد بر هدایت هیدرولیکی خاک به صورت خطی می‌باشد. البته شدت کاهش هدایت هیدرولیکی با افزایش مقادیر رس خاک بیش‌تر از کاهش هدایت هیدرولیکی با افزایش ظرفیت زراعی خاک می‌باشد که با تحقیقات چن و همکاران (Chen *et al.*, 2021) همخوانی دارد. شکل (۱۰) نمودار یک به یک نتایج حاصل از روش سطح پاسخ را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل دیده می‌شود، مدل به خوبی مقدار مقدار هدایت هیدرولیکی خاک را بر اساس فاکتورهای موثر پیش‌بینی نموده است.

ساده‌تر و دارای تعداد جملات کم‌تر (درجه آزادی) با ضریب تعیین ۰/۹۴ به دست آمد (جدول ۲). با بهره‌گیری از نتایج طرح داده‌های موجود، و تجزیه رگرسیون این داده‌ها، آنالیز واریانس مدل استخراج شده‌ی مقادیر هدایت هیدرولیکی خاک با توجه به متغیرهای موثر، بر حسب مقادیر کد شده در جدول (۳) بیان شده است. همانطور که جدول نشان داده شده است، تأثیر مقدار رس و شن خاک، بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک، بیش از سایر پارامترهای موثر می‌باشد که با نتایج تحقیقات اوسویچ و لیپیک (Usowicz & Lipiec, 2021) همخوانی دارد. همچنین در جدول (۴)، شاخص‌های آماری مدل هدایت هیدرولیکی خاک، نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، میزان کفایت دقت مدل برابر ۴۹/۲ برآورد گردیده است، که با توجه به اینکه این عدد بیش از ۴ می‌باشد، نشان دهنده دقت مناسب مدل است. همچنین با توجه به آنکه مقدار اختلاف ضریب تعیین پیش‌بینی شده با ضریب تعیین اصلاح شده کمتر از ۰/۲ می‌باشد و مقادیر آن‌ها به یک نزدیک می‌باشند، این شاخص نیز عملکرد مناسب مدل را تایید می‌نماید. در جدول (۵)، ضرایب مدل پیشنهادی مقدار هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس فاکتورهای فیزیکی خاک، بیان شده است. همچنین، در شکل (۸) تأثیر هر یک از فاکتورهای موثر را به صورت مجزا بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک نشان می‌دهد، همانطور که در شکل مشخص است تأثیر میزان درصد اشباع خاک و میزان رس

جدول ۲- شاخص‌های آماری مدل منتخب

Table 2. Statistical indicators of the selected model

Regression model	Predicted R ²	Adjusted R ²	Sequential p-value	Selected model
Cubic model	0.94	0.92	< 0.0001	✓

جدول ۳- آنالیز واریانس مدل هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس فاکتورهای فیزیکی خاک

Table 3. Variance analysis of soil hydraulic conductivity model based on soil physical factors

Variables	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F-value	p-value
Model**	2	6708	958	95.2	< 0.0001
A-Clay	1	120.01	120.01	11.9	0.0009
C-Sand	1	36.9	36.9	3.6	0.059
D-SP	1	4.88	4.88	0.2	0.65
E-FC	1	2.03	2.03	0.2	0.65
AC	1	71	71	7	0.0097
DE	1	50.3	50.3	5.01	0.02
C ²	1	255.5	255.5	25.3	< 0.0001

AC: تأثیر متقابل میزان رس و شن خاک می‌باشد. DE: تأثیر متقابل ظرفیت زراعی و شن خاک است.

جدول ۴- شاخص های آماری مدل هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس فاکتورهای بافتی خاک

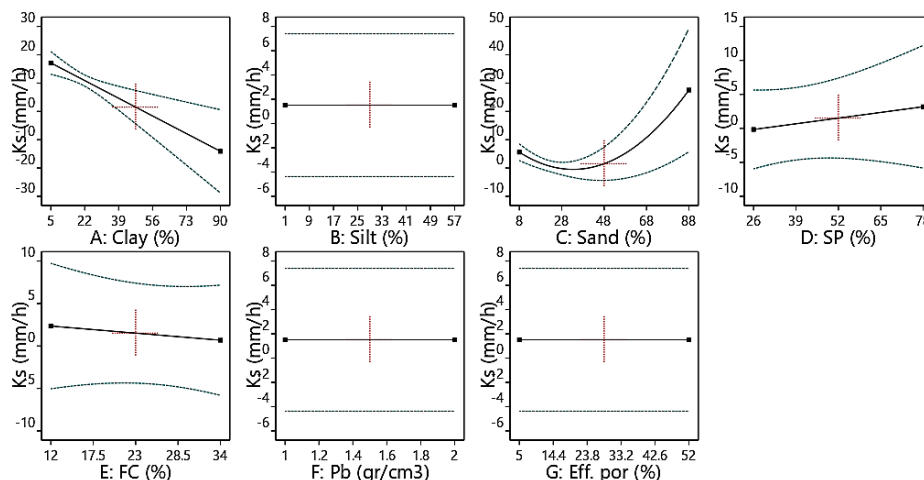
Table 4- Statistical indicators of soil hydraulic conductivity model based on soil textural factors

Variables	Std. Dev	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	Mean	Adeq Precision	C.V.
Hydraulic conductivity (mm.hr ⁻¹)	3.17	0.94	0.89	0.85	7	49.2	44.9

جدول ۵- ضرایب مدل پیشنهادی هدایت هیدرولیکی بر اساس فاکتورهای بافت خاک

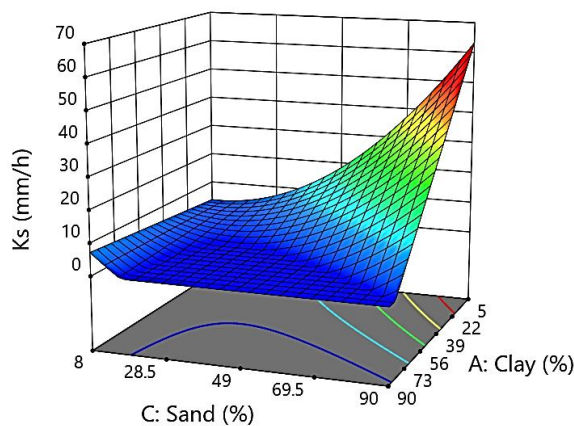
Table 5. Coefficients of the proposed model of hydraulic conductivity based on soil textural factors

Variables	Coefficient	
Constant number	-29.4	
A	Clay	0.122
C	Sand	-0.143
D	SP	0.68
E	FC	1.31
AC	Clay * Sand	-0.01
DE	SP * FC	-0.026
C ²	Sand ²	0.0094



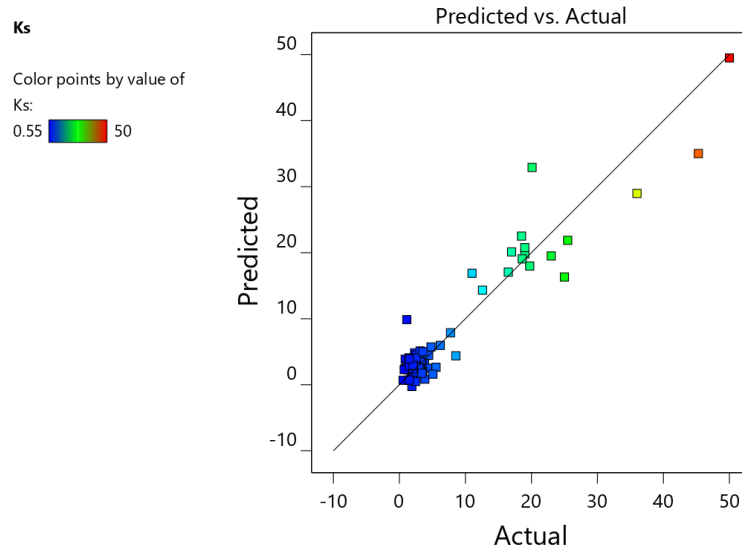
شکل ۸- تأثیر هر یک از فاکتورهای بافت خاک بر هدایت هیدرولیکی خاک

Figure 8. The effect of each textural factor on soil hydraulic conductivity



شکل ۹- سطح سه بعدی خطوط تراز هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس فاکتورهای میزان رس و شن خاک

Figure 9. The three-dimensional surface of the soil hydraulic conductivity level lines based on the factors of soil clay and sand content



شکل ۱۰- نمودار یک به یک نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده

Figure 10. Cross validation graph of predicted results by the model and measured values

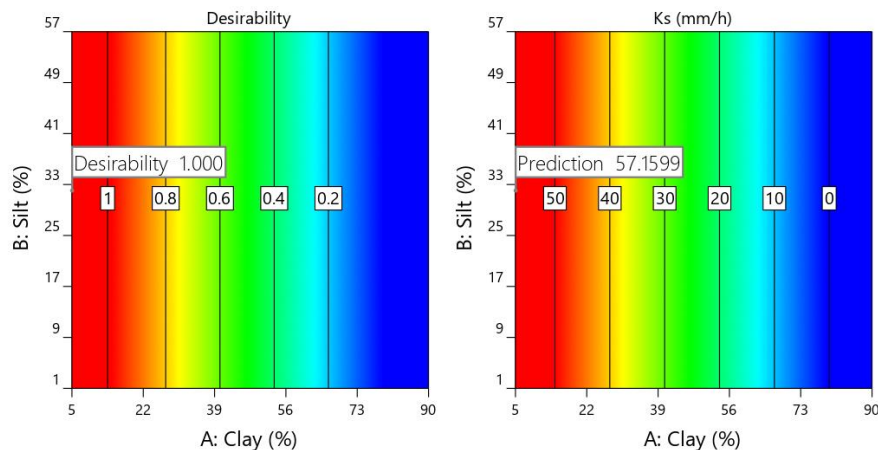
به‌دست آمد و این هدف، در مقدار رس ۸/۹ (درصد) و میزان شن ۸۶ (درصد) به‌دست می‌آید. سایر مشخصات نقطه هدف مطابق جدول (۶) بوده و نقطه مذکور همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، هدایت هیدرولیکی خاک را برابر ۵۷/۱۵ (میلی‌متر بر ساعت) نشان می‌دهد.

برای یافتن نقطه بهینه مقدار هدایت هیدرولیکی خاک در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار، مقدار حداکثر هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان تابع هدف و مطلوب به نرم‌افزار معرفی گردید، در شرایطی که سایر پارامترها در محدوده مقادیر اندازه‌گیری شده تغییر یابند، لذا با در نظر گرفتن فرضیات فوق یک نقطه هدف با درجه مقبولیت ۰/۶۷

جدول ۶- نقطه بهینه عملکرد مدل سطح پاسخ

Table 6. The optimal performance point of the response surface model

Effective porosity (%)	Bulk density (gr.cm-3)	Field capacity (%)	Soil saturation degree (%)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)
26.4	1.37	28	71	86	5.1	8.9



شکل ۱۱- مختصات نقطه بهینه بر سطح دو بعدی پاسخ مدل

Figure 11. Coordinates of the optimal point on the two-dimensional surface of the response model.

بالاتری در پیش‌بینی میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارد و نتایج بسیار نزدیک‌تری به داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه کرده است. همچنین، ارائه تابع رگرسیونی هدایت هیدرولیکی خاک بر اساس شاخص‌های موثر فیزیکی خاک را می‌توان از دیگر برتری‌های روش سطح پاسخ نسبت به روش زمین آماری به شمار آورد.

در جدول (۷)، شاخص‌های کمی ارزیابی مدل سطح پاسخ (RSM) و کوکریجینگ براساس پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) آورده شده است. مقایسه عملکرد مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل RSM در مقایسه با مدل کوکریجینگ توانایی و دقت

جدول ۷- شاخص‌های عملکردی (RMSE, MAE, ε و R^2) برای مدل‌ها

Table 7. performance indicators (RMSE, MAE, ε and R^2) for the models

Model	RMSE	MAE	ε (%)	R^2
Cokriging	3.21	9.43	0.23	0.93
Response surface	1.34	1.3	1.01	0.94

را از روی ویژگی‌های فیزیکی خاک، با دقت بالا و خطای کمتر برآورد کند. همچنین باید در نظر داشت، ارائه نتایج دقیق توسط مدل سطح پاسخ، محتاج دقت در انتخاب عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی طی قرارداد طرح شماره ۲۹۲۲۲، تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

هدایت هیدرولیکی یکی از خصوصیات هیدرودینامیک خاکهاست که نقش تعیین‌کننده‌ای در حرکت و انتقال آب و املاح در خاک دارد. در پروژه‌های زهکشی، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ضروری است. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در منطقه اردبیل با استفاده از روش‌های سطح پاسخ (RSM) و زمین آماری کوکریجینگ پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که هر دو روش در تعیین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از دقت بالایی برخوردارند، لیکن مدل سطح پاسخ، از دقت بالاتری نسبت به روش کوکریجینگ معمولی برخوردار بود و مدل سطح پاسخ، بخوبی می‌تواند هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

References

- AbdelRahman M.A.E., Farg E., Saleh A.M., Ahmed M., Saleh M.S., Abutaleb K and Sayed M.A. 2022. Mapping of soils and land-related environmental attributes in modern agriculture systems using geomatics. *Sustain. Water Resource. Management*, 8: 116-126.
- Asadzadeh, F., Mohiaddin Fegh, H-A. add Khodaverdiloo. H. 2017. Modeling of the effect of rock fragment cover and sizes on the sediment concentration using response surface method. *Applied soil research*, 3(1): 25-38. (In Persian).
- Basaran M., Erpul G., Ozcan A. U., Saygin D.S., Kibar M., Bayramin I., and Yilman F.E. 2011. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale. *Environ Earth Science*, 63:827-838.
- Begay Herchgani H., Heshmati S.S. 2012. Indicators of groundwater quality zoning of Shahrekord's for using on irrigation system design. *Agriculture Water Reourcess*, 51:24-61. (In Persian).
- Chen S., Parsons D., Du T., Kumar U., Wang S. 2021. Simulation of yield and water balance using WHCNS and APSIM combined with geostatistics across a heterogeneous field. *Agricultural Water Management*, 258:165-178.
- Delbari M., Tailormood M., Mahdian M.H. 2004. Evaluation of methods for estimating the hydraulic conductivity of the soil in areas of steep terrain and the bottom surface water of the Sistan plain water. *Journal of Agricultural Science*, 5: 1-12. (In Persian).
- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. and Tan, K.A. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 9:184-193.

- Hoseini Y., Sedghi R., Bairami S. 2017. An evaluation of genetic algorithm method compared to geostatistical and neural network methods to estimate saturated soil hydraulic conductivity using soil texture. *Iran Agricultural Research*, 36(1): 91-104.
- Picciafuoco T., Morbidelli R., Flam-mini A., Saltalippi C., Corradini C., Strauss P. and Blöschl G. 2019. A pedotransfer function for field-scale saturated hydraulic conductivity of a small watershed. *Vadose Zone Journal*, 18:1-15.
- Kostić S., Stojković M., Prohaska S. and Vasović N. 2016. Modeling of river flow rate as a function of rainfall and temperature using response surface methodology based on historical time series. *Journal of Hydroinformatics*, 18 (4): 651–665.
- Keshtegar B., Allawi M.F., and Afan H.A. 2016. Optimized River Stream-Flow Forecasting Model Utilizing High-Order Response Surface Method. *Water Resour Management*, 30: 3899–3914.
- Kalpana H.K., Aggrawal P. 2011. Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones. *International Journal of Geosciences*, 2: 585-596.
- Mahmoodabadi M., Mazaheri M.R. 2012. Effect of some soil physical and chemical properties on permeability in field conditions. *Iranian Journal of Water and Irrigation Engineering*, 2(8):14-25.
- Montgomery D.C and Myers R.H. 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, Raymond H. Meyers and Douglas C. Montgomery, A Wiley-Inter Science Publications. 856 p.
- Merdun H., Ozer C., Meral R., and Apan M. 2006. Comparison of Artificial Neural Network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Tillage Research*, 90: 108-116.
- Nezami M.T., and Alipour Z. T. 2012. Preparing of the soil salinity map using geostatistics method in Qazvin plaine. *Journal of soil science and environmental management*, 3 (2): 36-41.
- Parviz, L., Ahadi, R. and Seyyed Milani, F. 2022. Genetic Algorithm Application for Soil Spatial Distribution Estimation with Geostatistics and Gene Expression Programming Combination. *Applied soil research*, 3(3): 117-129. (In Persian).
- Reynolds, W.D. Elrick, D.E. and Clothier, B.E. 1985. The constant head well permeameter Effect on unsaturated flow. *Soil Science*, 139(2): 172-18.
- Reynolds, W.D. and Elrick D.E. 1985. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity sorpitivity a parameter using Guelph permeameter. *Soil Science*, 140(4): 292-302.
- Sánchez-López O., Hernández-Castillo I., and Castañeda-Roldán, CH. 2020. Surface roughness modeling using response surface methodology and a variant of multiquadric radial basis function. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110: 3311–3322.
- Shirazi M, Khademorasoul A, Safieddine-Ardabili, SM. 2019. Evaluation and optimization of the effects of soil salinity (EC) on soil erosive properties using response surface methodology. 16th Iranian Soil Science Congress, Zanjan. (In Persian)
- Usowicz, B., Lipiec, J. 2021. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Science Reports*, 11: 82-93.
- Yousefi Mobarhan E., Farahmand K., Fahim N., Fahim E. 2016. Efficiency of Flow-Duration Curves Method for Verifcation of a Hydrological Model (Case Study: Zola-Chay Watershed). *Water and soil Science*, 26 (2-1): 101-113. (In Persian)

Evaluation of Geostatistical and Response Surface Methods for Estimating Soil Saturated Hydraulic Conductivity Using Soil Physical Properties

Yaser Hoseini^{1*}

(Received: July, 2022 Accepted: February, 2023)

Abstract

Soil Saturated Hydraulic conductivity is one of the most important soils physical properties, which has particular importance in studying and modeling the movement of water and salts in porous media. Because these methods are expensive and time consuming. Therefore, it seems necessary to estimate saturated hydraulic conductivity using of fast, low-cost methods with acceptable accuracy. In this research, geostatistical and response surface methods were used to estimate the hydraulic conductivity of soil saturation, the data was prepared from 135 soil profiles related to soil science and land reform studies of Ardabil Agricultural Jihad Organization in Fatah Ali Plain area. The main factor included saturated hydraulic conductivity, soil texture, bulk density, porosity, degree of saturation, and field capacity were considered as secondary factors. Among the geostatistical methods, ordinary cokriging had the best fit and the best fitted variogram in this method was the exponential model with zero nugget effect and 156 of sill range. That showed the strength of the spatial structure of the region and the full impact of the spatial structure on region variogram. In the ordinary cokriging method, the estimation accuracy was estimated with the regression coefficient ($R^2=0.93$) and (RMSE=3.21). In the response surface model, the best saturated hydraulic conductivity model based on the effective variables, was quadratic model with regression coefficient of 0.94 and the adequacy of accuracy of 49.2 was estimated, to determine the maximum hydraulic conductivity assuming the change of other effective parameters in the range of measured values, a target with desirability of 0.67 was obtained. This goal calculated the hydraulic conductivity of the soil at 8.9 (%) clay and 86 (%) sand, equal to 57.15 (mm/hour). Therefore, both methods are highly accurate in determining the hydraulic conductivity of soil saturation, but the response surface method (RSM) was more accurate.

Key words: Response surface model, Saturated hydraulic conductivity, Irrigation and drainage network, Optimization, Cokriging.

Hoseini Y. 2024. Evaluation of geostatistical and response surface methods for estimating soil saturated hydraulic conductivity using soil physical properties. *Applied Soil Research*, 11 (4): 63-76.

1-Professor, Department of Agricultural engineering and technology, Moghan College of Agriculture & Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili.

* Corresponding Author Email: y_hoseini@uma.ac.ir