

پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی خاک با بافت لوم

و لوم شنی دشت سیستان

تارخ احمدی، معصومه دلبری¹ و پیمان افراسیاب

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه آب دانشگاه زابل؛ ta.ahmady.ah@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل؛ masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل؛ p_afraasiab@yahoo.com

دریافت: 95/10/29 و پذیرش: 96/7/12

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) یکی از پارامترهای اساسی در مطالعات حرکت آب و املاح در خاک و طراحی پروژه‌های آبیاری و زهکشی است. بنابراین، شناخت الگوی توزیع مکانی آن از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی Ks در مزرعه تحقیقاتی سد سیستان با استفاده از روش‌های میان‌یابی بوده است. برای این منظور تعداد 113 آزمایش نفوذ تک حلقه‌ای بیرکن در خاک‌های مزرعه با فواصل حدود 80 متر انجام گردید. ضریب Ks با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی بیرکن شامل BESTslope و BESTintercept و BESTsteady به دست آمد. متوسط خطای نسبی برازش (\overline{Er}) برای الگوریتم‌های BESTslope و BESTintercept به ترتیب 5/19% و 9/35 درصد بوده که رضایت بخش است. برای مقایسه دقت تخمین از پارامترهای ضریب تعیین وزنی (ωr^2) و خطای استاندارد (SE) استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده، هدایت هیدرولیکی اشباع از همبستگی مکانی متوسط با ساختار غالب نمایی برخوردار بود. همچنین نتایج نشان داد که در بافت لوم و لوم شنی که بافت غالب منطقه مورد مطالعه است و برای هر سه الگوریتم محاسباتی بیرکن، روش لوگ کریجینگ با اختلاف نه چندان زیاد نسبت به سایر روش‌های میان‌یابی، بیشترین مقدار ωr^2 و کمترین مقدار SE و در واقع بیشترین دقت تخمین را داشت. از طرفی دقت تخمین در الگوریتم BESTsteady که ساده‌ترین فرآیند محاسباتی را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر دارد، بیشتر بود. بنابراین طبق نتایج به دست آمده، روش لوگ کریجینگ نمایی به عنوان بهترین روش میان‌یابی برای تعیین الگوی پراکنش مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک براساس مقادیر Ks به دست آمده از الگوریتم ساده و کاربردی BESTsteady در خاک‌های لوم و لوم شنی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش نفوذ بیرکن، الگوریتم‌های محاسباتی، نیم‌تغییرنما، میان‌یابی مکانی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: دانشگاه زابل، دانشکده آب و خاک، گروه مهندسی آب

مقدمه

خاک در تقاطعی مشخص و با پراکنش مناسب مورد نیاز است. لذا معرفی یک روش ساده و کم هزینه برای انجام آزمایشات نفوذ در نقاط دلخواه بسیار سودمند است. امروزه روش آزمایش نفوذ بیرکن⁵ به دلیل سادگی در اجرا و هزینه کمتر در مقایسه با سایر روش‌ها مانند استوانه‌های مضاعف و پرماتر گلف مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. سادگی این روش به دلیل استفاده از یک حلقه‌ای ست که در حدود یک سانتی‌متر در زمین فرو می‌رود و حجم کم و ثابت آبی که به‌طور تکراری بر روی سطح خاک درون حلقه ریخته می‌شود. لاسابتری و همکاران (2006) الگوریتم محاسباتی BEST⁶ را که در تحقیقات بعدی توسط ایلماز و همکاران (2010) به نام BESTslope نام‌گذاری گردید به‌عنوان اولین الگوریتم محاسباتی آزمایش نفوذ بیرکن برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی خاک معرفی کردند.

با توجه به اینکه استفاده از الگوریتم BESTslope در برخی از آزمایشات ممکن است به مقادیر منفی (مقادیر خطا) در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع منتهی شود، الگوریتم BESTintercept به عنوان یک الگوریتم محاسباتی دیگر که می‌تواند جواب‌های قابل اطمینان‌تری ارائه کند توسط ایلماز و همکاران (2010) معرفی گردید. باگارلو و همکاران (2014) تحقیقاتی را در زمینه بررسی نتایج دو الگوریتم مذکور و همچنین معرفی الگوریتم جدیدی به نام BESTsteady انجام دادند که مطابق نتایج آنها، الگوریتم اخیر در عین ساده‌تر بودن نسبت به دو الگوریتم دیگر، نتایج قابل قبولی را ارائه داد. هدف اصلی در پژوهش حاضر بررسی و مقایسه مدل‌های کریجینگ معمولی، لوگ کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن‌دهی عکس فاصله برای میان‌یابی و پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی (Ks) در بافت لوم و لوم شنی مزرعه تحقیقاتی سد سیستان می‌باشد. برای این منظور آزمایش نفوذ بیرکن در بیش از 100 نقطه از مزرعه انجام و مقادیر Ks با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی BESTslope، BESTintercept و BESTsteady به دست آمد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زابل (مزرعه سد سیستان) به مساحت حدود 100 هکتار

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از پارامترهای اساسی در تعیین فاصله مناسب زهکش‌ها و نیز مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و انتقال آلاینده‌ها در خاک است. لذا تعیین الگوی پراکنش مکانی آن ضروری است. از روش‌های مرسوم برای بهینه‌بندی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک براساس تعداد محدودی داده اندازه‌گیری شده، روش‌های میان‌یابی زمین آماری (انواع کریجینگ) است. گالیساند و همکاران (1992) از روش کریجینگ معمولی¹ برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در زهکشی زیر زمینی در 3500 هکتار از اراضی نیل استفاده کردند. بررسی آنها نشان دهنده ساختار خوب هدایت هیدرولیکی در خاک‌های آبرفتی است. دیوو و همکاران (1998) به بررسی تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف خاک پرداختند. نتایج آنها نشان داد که تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع در سطح خاک خیلی بیشتر از تغییرات در زیر سطح خاک می‌باشد. مصطفی و همکاران (1998) به تحلیل تغییرات مکانی خصوصیات خاک از جمله شوری و هدایت هیدرولیکی با استفاده از زمین آمار پرداختند.

نتایج آنها نشان داد روش کریجینگ نقشه‌های بسیار مناسبی را برای مطالعه پروژه‌های زهکشی فراهم می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود در صورت وجود خودهمبستگی مکانی قوی، استفاده از روش کریجینگ نتایج بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک مانند روش وزن‌دهی عکس فاصله² ارائه دهد. روش لوگ کریجینگ³ نیز که در آن از لگاریتم داده‌ها به جای داده‌های اصلی (برای تبدیل توزیع فراوانی داده‌ها به توزیع نرمال) استفاده می‌شود به‌طور متداول برای میان‌یابی بسیاری از ویژگی‌های زمینی و محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ساتو و همکاران 2000). از طرفی در صورت وجود متغیرهای کمکی که دارای همبستگی قوی با متغیر اصلی هستند، استفاده از روش‌های چندمتغیره زمین آماری مانند روش کوکریجینگ⁴ می‌تواند دقت تخمین را افزایش دهد (گوارتس، 1997).

در مطالعات زمین آماری برای تعیین الگوی توزیع مکانی و تهیه نقشه بهینه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks)، انجام آزمایشات میدانی نفوذ آب در

1. Ordinary Kriging (OK)

2. Inverse Distance Weighting (IDW)

3. Lognormal Ordinary Kriging (LOK)

4. Cokriging (COK)

5. Beerkan Infiltration Experiment

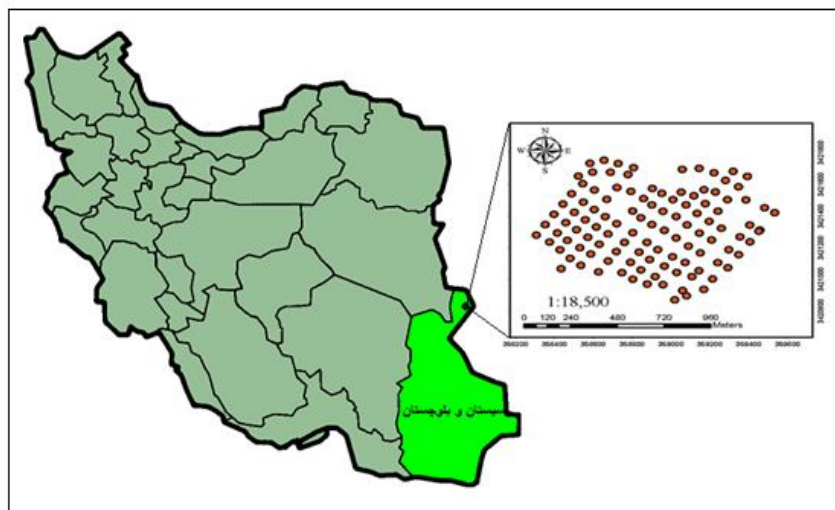
6. Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters

گونه‌ای روی سطح خاک ریخته شد که ساختمان سطح خاک درون حلقه به هم نخورد و سپس مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه‌گیری شد. پس از نفوذ کامل آب مجدداً 150 میلی‌لیتر آب مشابه نوبت اول روی سطح خاک درون حلقه ریخته شد و مدت زمان نفوذ کامل اندازه‌گیری شد. این عمل تا وقتی که مدت زمان نفوذ آب در خاک برای سه تکرار متوالی یکسان شود یا اختلاف مدت زمان نفوذ در سه تکرار متوالی ناچیز گردد ادامه یافت. در این تحقیق به منظور اطمینان از ایجاد شرایط پایدار در نفوذ آب در خاک، عمل ریختن آب به درون حلقه به تعداد 20 بار (20 تکرار) در هر نقطه آزمایشی انجام شد. لذا با توجه به اینکه در هر مرتبه از عمل ریختن حجم ثابت آب، مقدار 8/5 میلی‌متر آب به درون زمین نفوذ می‌کند لذا حداکثر عمق آب نفوذ یافته برای هر نقطه آزمایشی 17 سانتی‌متر (170 میلی‌متر) می‌باشد.

واقع در عرض جغرافیایی $30^{\circ}54'53''$ شمالی و طول جغرافیایی $61^{\circ}31'18''$ شرقی انجام شد. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا 485 متر، متوسط بارندگی سالانه 55 میلی‌متر، و متوسط حداقل و حداکثر دمای روزانه نیز به ترتیب 15 و 30 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. براسا نتایج این پژوهش، بافت غالب خاک منطقه، لومی و لوم شنی است.

آزمایش نفوذ بیرکن

برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی، آزمایش نفوذ بیرکن در 113 نقطه مشخص به فاصله تقریبی 80 متر در گستره مزرعه سد سیستان (شکل 1) انجام شد. برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از یک حلقه فلزی به قطر 15 سانتی‌متر و ارتفاع 10 سانتی‌متر که به اندازه یک سانتی‌متر درون زمین فرو برده می‌شود استفاده شد. سطح خاک قبل از انجام آزمایش از بقایای ریشه و برگ گیاهان پاک گردید. 150 میلی‌لیتر آب به آرامی و به-



شکل 1- موقعیت نقاط انجام آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعه سد سیستان دانشگاه زابل

دانه‌بندی) و جرم مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر اندازه‌گیری شد (جی و اور، 2002).

الگوریتم -های BEST

معادلات نفوذ تجمعی در مراحل انتقالی¹ $I(t)$ و پایدار² $I_m(t)$ به ترتیب در قالب معادلات 1a و 1b ارائه شده است. مقدار شیب (سرعت نهایی نفوذ) (i_s) و عرض از مبدا (b_s) در رابطه خطی نفوذ در مرحله پایدار نیز به-

قبل از شروع آزمایش، دو نمونه خاک برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه (θ_0) و جرم مخصوص ظاهری خاک (ρ_b) و یک نمونه برای تعیین بافت خاک از هر نقطه مشخص تهیه شد. در این پژوهش رطوبت اشباع خاک (θ_s) برابر با تخلخل خاک (ϵ) (مبارک و همکاران، 2009 و 2010، ژو و همکاران، 2009) و جرم مخصوص حقیقی خاک (ρ_s) برای کلیه آزمایشات برابر با 2/65 گرم بر سانتی‌متر مکعب (باگارلو و همکاران، 2014) در نظر گرفته شده است. رطوبت اولیه خاک با روش وزنی، بافت خاک با روش آزمایش الک و هیدرومتری (تهیه منحنی

¹ Transient Phase

² Steady Phase

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp}]^2}} \quad (5)$$

در این رابطه، مقدار خطای نسبی برازش قابل قبول $Er < 5.5\%$ است که البته برای انتخاب آزمایشات در BESTslope مقدار متوسط مقدار خطای نسبی (\overline{Er}) نیز مورد قبول است (باگارلو و همکاران 2014). در صورتی که خطای نسبی از 10 درصد بیشتر نباشد به‌عنوان تخمین دقیق و اگر خطا از 5 درصد بیشتر نباشد به‌عنوان تخمین خیلی دقیق در نظر گرفته می‌شود (دی پیرما و همکاران 2016). مقدار حداقل و حداکثر k (تعداد نقاط منتخب) برای برازش بر معادله 4a و 4b به ترتیب برابر با 5 و N_{tot} می‌باشد. بر اساس نظر جدید نیز بهتر است مقدار حداقل k برابر با 3 در نظر گرفته شود (قویدل فر و همکاران، 2015). پس از محاسبه مقدار S در هر الگوریتم BEST و محاسبه مقدار خطای نسبی، مقدار Ks نیز بر اساس انتخاب هر یک از الگوریتم‌های BEST از طریق هر یک از روابط 1c یا 1d محاسبه می‌گردد. مقدار t_{max} (مدت زمان نفوذ در مرحله انتقالی) نیز با استفاده از معادله 6 در هر مرحله از انتخاب k به‌دست می‌آید.

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-B)} \left(\frac{S}{Ks}\right)^2 \quad (6)$$

در نهایت برای هر مقدار k مقادیر متناظر t_k (زمان سپری شده از شروع آزمایش نفوذ)، S ، Ks و t_{max} در قالب یک جدول به‌دست می‌آید. در نهایت مقادیر S و Ks متناظر با حداکثر مقدار t_{max} که $t_k \leq t_{max}$ و مقدار Er مطلوب باشد، به عنوان نتایج این الگوریتم معرفی می‌شود. الگوریتم BESTsteady که توسط باگارلو و همکاران (2014) ارائه شد، در مقایسه با دو الگوریتم دیگر روش بسیار ساده‌تری برای محاسبه مقدار Ks و S است. دلیل سادگی این الگوریتم این است که بر خلاف دو الگوریتم قبلی تنها از داده‌های نفوذ مربوط به مرحله پایدار (داده‌های انتهایی نفوذ) برای محاسبه Ks و S استفاده می‌گردد. با ترکیب معادلات 1c و 1d با یکدیگر، معادله 7a و سپس معادله 7b به‌دست می‌آید. لذا مقدار S به‌طور مستقیم از طریق معادله 7b و بدون نیاز به فرآیند وقت گیر حداقل کردن مربعات خطا و محاسبه t_{max} و Er به‌دست می‌آید. مقدار Ks نیز از طریق معادله معادلات 1c و 1d محاسبه می‌گردد.

$$i_s = AS^2 + C \frac{S^2}{b_s^{exp}} \quad (7a)$$

$$S = \sqrt{\frac{i_s^{exp} - C}{A + \frac{C}{b_s^{exp}}}} \quad (7b)$$

ترتیب مطابق معادلات 1c و 1d به‌دست می‌آید (لاسابتری و همکاران، 2006):

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^2 + BKs)t \quad (1a)$$

$$I_{\infty}(t) = (AS^2 + Ks)t + C \frac{S^2}{Ks} \quad (1b)$$

$$i_s = (AS^2 + Ks) \quad (1c)$$

$$b_s = C \frac{S^2}{Ks} \quad (1d)$$

در این روابط، t مدت زمان سپری شده از آزمایش نفوذ (T)، S توانایی جذب آب در خاک ($L.T^{0.5}$) و Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($L.T^1$) است. مقدار تجربی یا مشاهداتی شیب (i_s^{exp}) و عرض از مبدا (b_s^{exp}) نیز به ترتیب بر اساس روابط 2a و 2b به‌دست می‌آید که برای انجام محاسبات در الگوریتم‌های محاسباتی برابر با مقادیر تئوری (معادلات 1c و 1d) در نظر گرفته می‌شود.

$$i_s \approx i_s^{exp} = slope_{i=(N_{tot}-N_{end}) \rightarrow N_{tot}}(t_i, I_i) \quad (2)$$

$$b_s \approx b_s^{exp} = intercept_{i=(N_{tot}-N_{end}) \rightarrow N_{tot}}(t_i, I_i) \quad (2b)$$

N_{tot} تعداد کل نقاط آزمایش نفوذ و N_{end} تعداد نقاط انتهایی منتخب (معمولاً 3 عدد) برای برازش خط رگرسیون بر داده‌های مرحله پایدار نفوذ می‌باشد. پارامتر A در معادلات فوق به‌صورت معادله 3 تعریف می‌شود (لاسابتری و همکاران، 2006):

$$A = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_0)} \quad (3)$$

در این رابطه، r شعاع حلقه (L) است. با فرض اینکه برای کلیه آزمایشات نفوذ بیرکن مقدار رطوبت نسبی اولیه کمتر از 0/25 می‌باشد ($Se = \theta_0 / \theta_s \leq 0/25$) مقدار $\gamma = 0/75$ و پارامترهای B و C به ترتیب برابر با 0/467 و 0/639 می‌باشد (دی پری ما و همکاران، 2016). در صورتی که مقدار Ks محاسبه شده از روابط 1c و 1d در رابطه 1a قرار گیرد معادلات 4a و 4b به‌دست می‌آید که از طریق برازش داده‌های نفوذ در مرحله انتقالی (t_i, I_i^{exp}) و روش حداقل شدن مجموع مربعات خطا (حداقل شدن تابع هدف) مقدار S به ترتیب در الگوریتم‌های محاسباتی BESTslope و BESTintercept محاسبه می‌گردد.

$$I(t) = S\sqrt{t} + [A(1-B)S^2 + B i_s^{exp}]t \quad (4a)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left(AS^2 + BC \frac{S^2}{b_s^{exp}}\right)t \quad (4b)$$

مقدار خطای نسبی برازش (Er) نیز مطابق معادله (5) برای هر مقدار k محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} KS^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot KS(x_i) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (9)$$

مقدار $KS^*(x_0)$ مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی در نقطه x_0 ، مقدار مشاهده شده هدایت هیدرولیکی در نقطه x_i ، λ_i وزن آماری نسبت داده شده به مقدار KS در نقطه مشاهده‌ای x_i و n تعداد نقاط مشاهداتی در همسایگی نقطه مورد تخمین می‌باشد. مقدار اوزان (λ_i) با حل دستگاه معادله خطی زیر به دست می‌آید (ایساک و اسراستاوا، 1989):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma(x_i, y_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (10)$$

میانگین $\gamma(x_i, y_j)$ میانگین مقادیر نیم‌تغییرنما بین تمام جفت نقاط معلوم و $\gamma(x_i, x_0)$ میانگین مقدار نیم‌تغییرنما بین موقعیت مورد تخمین (x_0) و i امین نقطه نمونه برداری شده است. پارامتر μ پارامتر لاگراتز برای به حداقل رساندن واریانس کریجینگ است. واریانس کریجینگ (σ^2) که معیاری از عدم قطعیت تخمین در نقطه مورد نظر است نیز از رابطه زیر به دست می‌آید (گوراتس، 1997):

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma(x_i, x_0) + \mu \quad (11)$$

توزیع فراوانی داده‌های KS معمولاً نرمال نیست و اغلب چولگی به راست دارد. بنابراین برای دست‌یابی به نتایج بهتر OK، لازم است توزیع مقادیر خام KS ابتدا توسط تبدیلی (معمولاً تبدیل لگاریتمی) به توزیع نرمال تبدیل گردد. کریجینگ انجام شده روی لگاریتم داده‌ها را لوگ کریجینگ (LOK) می‌گویند (گوراتس، 1997).

وزن‌دهی عکس فاصله

در روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) نیز مانند روش OK، مقدار یک متغیر در نقطه فاقد آمار از روی نقاط مجاورش تخمین زده می‌شود (رابطه 9). با این تفاوت که در این روش مقدار وزن ها (λ_i) فقط با توجه به فاصله نقاط معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه مورد تخمین تعیین می‌شوند. بدین ترتیب به نقاط نزدیک تر وزن بیشتر و به نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می‌شود. مقدار وزن (λ_i) در روش IDW از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

با توجه به اینکه تعیین مرحله پایدار در فرآیند نفوذ آب در خاک در عمل راحت‌تر از تعیین مرحله انتقالی است، استفاده از الگوریتم محاسباتی BESTsteady که مبتنی بر داده‌های نفوذ در مرحله پایدار است و ساده ترین فرآیند محاسباتی را دارد، نیز راحت تر از دو الگوریتم محاسباتی دیگر است که مبتنی بر تلفیق مراحل انتقالی و پایدار است، می‌باشد.

تحلیل همبستگی مکانی

به منظور بررسی همبستگی مکانی KS ، نیم-تغییرنمای تجربی ($\gamma^*(h)$) داده‌های KS به دست آمده توسط هر یک از الگوریتم‌های بیرکن، مطابق رابطه 8 محاسبه گردید:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [KS(x_i) - KS(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

در این رابطه $N(h)$ تعداد کل زوج نقاط مشاهده‌ای با فاصله متوسط h ، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی محاسبه شده در موقعیت x_i و $KS(x_i+h)$ مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی محاسبه شده در موقعیت x_i+h می‌باشد. با افزایش فاصله بین جفت نقاط (h)، مقدار نیم‌تغییرنما افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده عدم تشابه مقادیر KS جفت نقاط با افزایش فاصله بین آن‌ها است. از نظر تئوری مقدار نیم‌تغییرنما به ازای $h=0$ بایستی به سمت صفر میل کند ولی در عمل عوامل مختلفی از جمله خطاهای نمونه برداری و آماده-سازی داده‌ها و همچنین تغییرات کوچک مقیاس باعث بروز پرش در مبدا نیم‌تغییرنما می‌شود که به آن اثر قطعه-ای (C_0) می‌گویند. با افزایش h مقدار نیم‌تغییرنما تا فاصله معینی که دامنه یا شعاع تأثیر (a) می‌نامند افزایش می‌یابد و پس از آن به مقدار ثابتی می‌رسد که به آن آستانه 1 (C_0+C) گفته می‌شود. پس از رسم نیم‌تغییرنمای تجربی لازم است که یک مدل تئوری مناسب بر آن برازش شود که در این مطالعه توابع کروی²، نمایی³ و گوسی⁴ مورد مقایسه قرار گرفت (ایساک و اسراستاوا، 1989).

کریجینگ معمولی

در روش کریجینگ معمولی (OK) مقدار متغیر (KS) در نقطه فاقد آمار از طریق میانگین‌گیری متحرک وزنی خطی مقادیر KS مشاهده شده در همسایگی آن نقطه برآورد می‌شود (ایساک و اسراستاوا، 1989):

1. Sill
2. Spherical
3. Exponential
4. Gaussian

جدول 1- آماره‌های توصیفی خصوصیات فیزیکی خاک

Se	ϵ (cm ³ cm ⁻³)	θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	ρ_b (gcm ⁻³)	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	آماره توصیفی	بافت خاک (USDA class)
0/141	0/351	0/080	1/140	10/40	5/60	20/00	حداقل	
0/260	0/570	0/120	1/720	37/20	50/20	71/88	حداکثر	
0/223	0/465	0/103	1/418	20/538	30/881	45/58	متوسط	لوم و
0/226	0/464	0/100	1/420	5/542	9/338	12/126	میانه	لوم شنی
9/522	8/190	7/899	7/120	26/98	30/23	26/60	ضریب تغییرات (%)	

*در این تحقیق درصد رطوبت اشباع (θ_s) با تخلخل خاک (ϵ) مساوی فرض شده است.

مقدار RSS کمتر و ωr^2 بیشتر باشد دقت برازش مدل نیم‌تغییرنما بیشتر است. دقت تخمین هر یک از روش‌های میان‌یابی (تخمین زننده) نیز بر اساس خطای استاندارد (SE) و ωr^2 ارزیابی گردید. خطای استاندارد بیانگر متوسط انحراف استاندارد داده‌ها حول خط تخمین زده شده است. در صورتی که پارامتر b مقدار شیب⁴ و پارامتر r^2 مقدار ضریب تعیین در رابطه خطی تخمین زده شده باشد، مقدار ωr^2 با استفاده از رابطه 14 تعریف می‌گردد (کروس و همکاران، 2005):

$$\omega r^2 \begin{cases} |b| \cdot r^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot r^2 & \text{for } b > 1 \end{cases} \quad (14)$$

در این پژوهش فرآیندهای محاسباتی مورد نیاز مربوط به الگوریتم‌های بیرکن در محیط نرم افزاری PTC Mathcad Prime 3.1⁵ انجام شد. نمودارها و جداول مورد نیاز نیز در محیط نرم افزار Excel 2013 تهیه گردید. تحلیل‌های زمین آماری توسط نرم افزار GS+ و تهیه نقشه-های پهنه‌بندی توسط نرم افزار ArcGIS انجام گردید.

نتایج و بحث

تحلیل آماری خصوصیات فیزیکی خاک

خلاصه آماری خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده است. در بررسی اولیه مشخص گردید که از مجموع کل 113 آزمایش بیرکن 65 آزمایش در بافت لومی و 48 آزمایش در بافت لوم شنی می‌باشد، لذا بافت غالب خاک مزرعه آزمایشی، لومی و لوم شنی است. همچنین پایین بودن مقدار درصد ضریب تغییرات جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه و تخلخل خاک (جدول 1) نشان می‌دهد که در مجموع خاک محدوده مطالعاتی از نظر خصوصیات فیزیکی تقریباً

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-P}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-P}} \quad (12)$$

D_i فاصله i امین نقطه مشاهده‌ای تا نقطه مورد تخمین، P توان وزن‌دهی فاصله¹ و n تعداد نقاط همسایگی است (گوارتس، 2000 و لوید، 2005).

کوکرچینگ

روش کوکرچینگ معمولی (COK) برخلاف میان-یاب‌های قبلی، یک روش میان‌یابی چندمتغیره است که در آن فرض می‌شود بین متغیر اصلی (K_s) و متغیر کمکی مانند درصد رس (Clay) همبستگی وجود دارد. تخمین‌گر کوکرچینگ معمولی به شرح رابطه زیر محاسبه می‌گردد (ایساک و اسراستاوا، 1989):

$$Ks^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot Ks(x_i) + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot Clay(x_j) \quad (13)$$

α_i و β_j به ترتیب ضرایب وزنی مرتبط با متغیرهای اصلی (K_s) و کمکی (Clay) و n و m به ترتیب تعداد داده‌های مشاهداتی متغیرهای اصلی و کمکی هستند. COK برای یافتن اوزان مناسب، نیاز به اطلاعات نیم‌تغییرنمای متغیر کمکی و نیم‌تغییرنمای عرضی بین متغیر اصلی و کمکی علاوه بر نیم‌تغییرنمای متغیر اصلی دارد (گوارتس، 1997).

روش و معیارهای ارزیابی روش‌های میان‌یابی

در این تحقیق از روش اعتبارسنجی متقابل² (ایساک و اسراستاوا، 1989)، برای ارزیابی نیم‌تغییرنمای هدایت هیدرولیکی و روش‌های میان‌یابی استفاده شد. دقت برازش مدل‌های تئوری نیم‌تغییرنما با توجه به مقدار ضریب همبستگی (r^2) و مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) برازش منحنی و ضریب تعیین وزنی³ (ωr^2) حاصل از اعتبارسنجی متقابل تعیین گردید. در واقع هرچه

1. Weighting power

2. Cross validation

3. Weighting r^2

4. Slope (Regression.Coefficient)

5. Engineering and Education, 2015

مقایسه عملکرد روش کوکریجینگ با کریجینگ، از این متغیرها به‌عنوان متغیر کمکی استفاده گردید.

تحلیل همبستگی مکانی Ks

برای بررسی همبستگی مکانی Ks محاسبه شده توسط هر سه الگوریتم بیرکن، نیم‌تغییرنمای تجربی داده‌های خام و لگاریتمی Ks با استفاده از نرم افزار GS+ محاسبه گردید. در ابتدا چگونگی تغییرات ساختار مکانی Ks در جهات مختلف (ناهمسانگردی)، با محاسبه نیم‌تغییرنمای تجربی Ks در چهار جهت اصلی صفر، 45، 90 و 135 درجه برای هر یک از الگوریتم‌های محاسباتی مورد نظر، بررسی گردید. همانطوری‌که در شکل 3 و 4 مشاهده می‌شود، رفتار نیم‌تغییرنما در چهار جهت مشابه بوده و لذا می‌توان نتیجه گرفت که ناهمسان گردی قابل ملاحظه‌ای در منطقه مورد مطالعه دیده نمی‌شود. بنابراین نیم‌تغییرنمای همسانگرد داده‌های خام و لگاریتمی Ks برای مراحل دیگر تحقیق، مورد استفاده قرار گرفت.

مشخصات مدل‌های کروی، نمایی و گوسی برازش شده به نیم‌تغییرنمای همه‌جهته $\ln(Ks)$ و Ks برای هر سه الگوریتم در جدول 3 ارائه شده است. بررسی نتایج به‌دست آمده در جدول 3 نشان می‌دهد که در هر سه الگوریتم BEST، مدل‌های گوسی، کروی و نمایی به ترتیب و با اختلاف کمی نسبت به یکدیگر با همبستگی (r^2) بالاتر و خطای (RSS) کمتر، برازش بهتری بر نیم‌تغییرنمای تجربی هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) دارند. در هر سه مدل نیم‌تغییرنما، کمترین و بیشترین مقادیر اثر قطعه‌ای (C_0) و آستانه (Sill) نیم‌تغییرنما به ترتیب در الگوریتم‌های BESTslope و BESTintercept به‌دست آمد. با این حال، با تبدیل لگاریتمی داده‌ها، اختلاف بین الگوریتم‌ها از نظر C_0 و Sill کمتر شد. همچنین اغلب کمترین فاصله همبستگی مربوط به الگوریتم BESTslope و بیشترین فاصله تأثیر (با اختلاف کم نسبت به مدل BESTsteady) مربوط به الگوریتم BESTslope است (جدول 3). در مجموع نسبت $C_0/Sill$ در هر سه الگوریتم برای مدل نمایی کمتر است (در حالت لگاریتمی کمتر از 25%) و برای دو مدل کروی و گوسی بین 0/25 تا 0/75 می‌باشد که طبق نظر کامباردلا و همکاران (1994)، همبستگی مکانی متوسط تا قوی را برای Ks در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

یکنواخت می‌باشد. مقدار درجه اشباع اولیه (Se) نیز در 113 نقطه آزمایش بیرکن کمتر از 0/26 است که برای تعیین پارامترهای تجربی γ و β مناسب به نظر می‌رسد.

تحلیل نتایج آزمایش نفوذ بیرکن

همانگونه که پیش‌تر اشاره گردید، مقدار متوسط خطای نسبی برازش (\bar{Er}) در آزمایشات بایستی کمتر از 10 درصد باشد تا در مجموع نتایج به‌دست آمده، به‌عنوان نتایج دقیق برای تجزیه و تحلیل آماری مورد استفاده قرار بگیرد. در این تحقیق متوسط خطای نسبی برازش (\bar{Er}) برای الگوریتم‌های محاسباتی BESTslope و BESTintercept به ترتیب 5/19 و 9/35 درصد به‌دست آمد که مناسب به نظر می‌رسد، هرچند میزان خطای نسبی در BESTslope کمتر است.

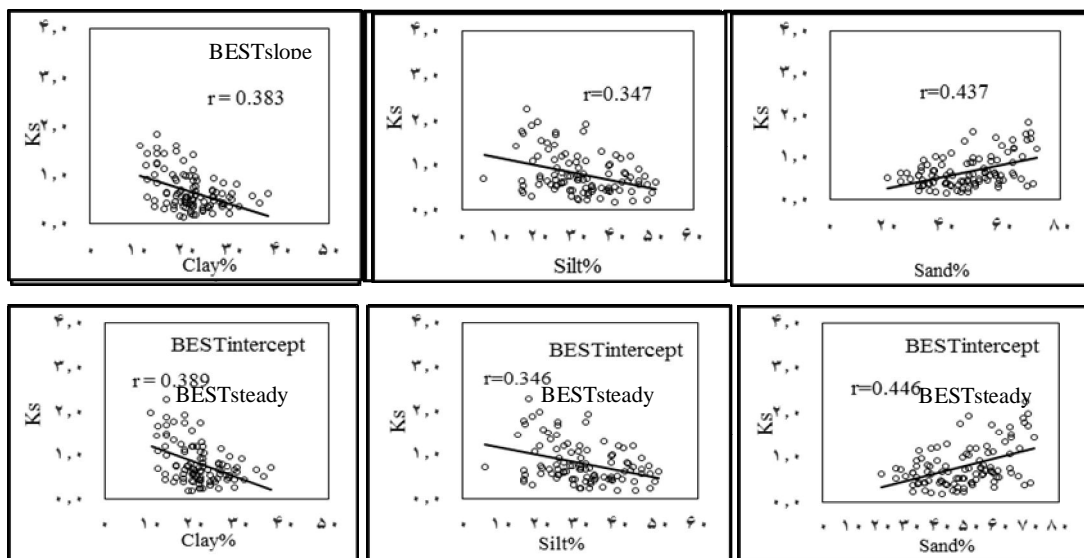
تحلیل آماری Ks

بررسی آماره‌های توصیفی Ks در جدول 2 نشان می‌دهد که متوسط و درصد ضریب تغییرات در تخمین Ks و $\ln(Ks)$ در دو الگوریتم BESTintercept و BESTsteady به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشد. نزدیکی مقدار مطلق چولگی به عدد صفر و مقدار کشیدگی به عدد 3 در داده‌های لگاریتمی، نشان می‌دهد که در هر سه الگوریتم محاسباتی توزیع لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع در مقایسه با توزیع هدایت هیدرولیکی اشباع به شرایط نرمال نزدیک‌تر است. نتایج آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف نیز نشان داد که توزیع لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع در هر سه الگوریتم محاسباتی در سطح معنی‌داری 5 درصد نرمال است. تحقیقات سایر محققین نیز نشان می‌دهد که توزیع هدایت هیدرولیکی اشباع به صورت لوگ نرمال است (ویلاردسون و هارست، 1965؛ نیلسن و همکاران، 1973؛ الریک و همکاران، 1987؛ جری، 1989؛ جانگ و لیو، 2004؛ گوپتا و همکاران، 2006).

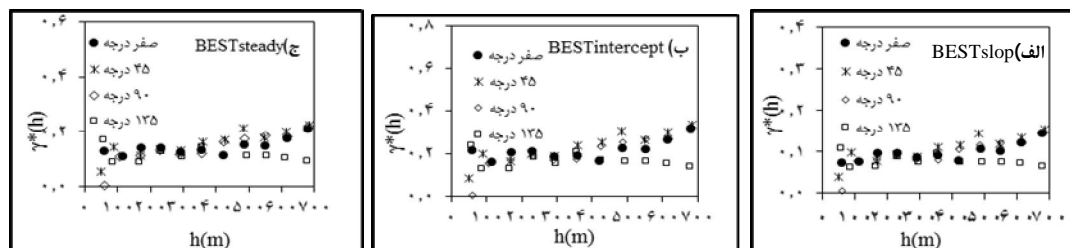
بررسی همبستگی پیرسون بین درصد اجزای بافت خاک و Ks در شکل 2 نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه، در هر سه الگوریتم محاسباتی آزمایش بیرکن، درصد شن با هدایت هیدرولیکی اشباع همبستگی مثبت و درصد رس و سیلت همبستگی منفی دارند. هرچند با توجه به مقدار ضریب همبستگی (r) که حدود 0/4 می‌باشد، همبستگی چندان قوی نیست، لیکن برای

جدول 2- آماره‌های توصیفی هدایت هیدرولیکی اشباع (md^{-1}) و لوگ هدایت هیدرولیکی اشباع ($\text{Ln}(\text{md}^{-1})$) برای سه الگوریتم محاسباتی آزمایش بیرون

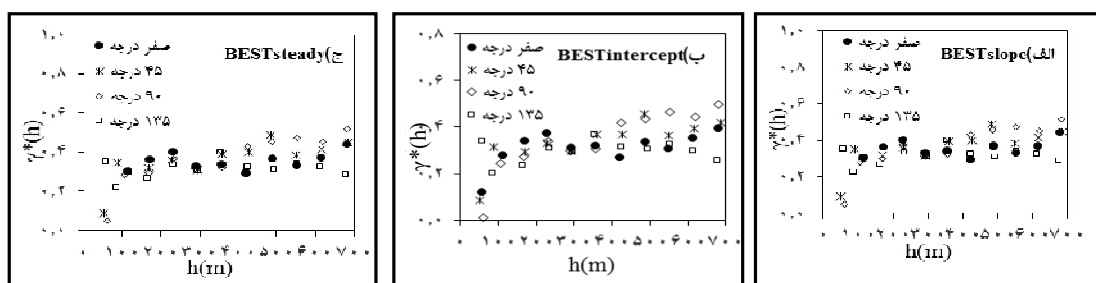
BESTslope		BESTintercept		BESTsteady		آماره‌های توصیفی
Ks	Ln(Ks)	Ks	Ln(Ks)	Ks	Ln(Ks)	
0/095	-2/350	0/156	-1/861	0/130	-2/043	حداقل
1/512	0/413	2/246	0/809	1/840	0/610	حداکثر
0/526	-0/825	0/797	-0/399	0/659	-0/588	متوسط
0/323	0/618	0/478	0/600	0/394	0/600	انحراف معیار
0/104	0/381	0/228	0/361	0/156	0/361	واریانس
61/40	-74/90	59/97	-150/37	59/78	-102/04	درصد ضریب تغییرات
1/063	-0/111	1/035	-0/087	1/023	-0/099	چولگی
3/350	2/591	3/267	2/521	3/232	2/531	کشیدگی



شکل 2- همبستگی خطی هدایت هیدرولیکی اشباع (md^{-1}) با درصد ذرات خاک در الگوریتم‌های محاسباتی BEST



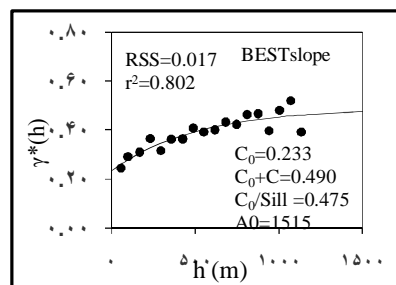
شکل 3- نیم تغییر نمای تجربی هدایت هیدرولیکی اشباع (md^{-1}) در چهار جهت اصلی در الگوریتم‌های محاسباتی BEST



شکل 4- نیم تغییر نمای تجربی لوگ هدایت هیدرولیکی اشباع ($\text{Ln}(\text{md}^{-1})$) در چهار جهت اصلی در الگوریتم‌های محاسباتی BEST

جدول 3- مشخصات مدل‌های برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی K_s در هر یک از الگوریتم‌های محاسباتی آزمایشی بیرکن در بافت لوم و لوم شنی

نام مدل	پارامترهای ثابت مدل	BESTslope		BESTintercept		BESTsteady	
		K_s	$\ln(K_s)$	K_s	$\ln(K_s)$	K_s	$\ln(K_s)$
کروی	C_0	0/065	0/277	0/147	0/225	0/100	0/226
	Sill (C_0+C)	0/137	0/556	0/420	0/456	0/288	0/454
	C_0 / Sill	0/474	0/498	0/350	0/493	0/347	0/497
	Effective Range(m)	2045	1085	2330	1100	2330	1100
	r^2	0/824	0/725	0/854	0/853	0/861	0/839
	RSS	0/0017	0/0210	0/0089	0/0150	0/0040	0/0164
نمایی	C_0	0/070	0/233	0/145	0/227	0/100	0/222
	Sill (C_0+C)	0/258	0/490	0/647	0/600	0/443	0/534
	C_0 / Sill	0/271	0/475	0/224	0/378	0/225	0/415
	Effective Range(m)	7175	1515	7520	3125	7580	2300
	r^2	0/782	0/802	0/853	0/843	0/858	0/831
	RSS	0/0020	0/0170	0/0089	0/0170	0/0040	0/0164
گوسی	C_0	0/073	0/318	0/159	0/272	0/110	0/283
	Sill (C_0+C)	0/147	0/637	0/326	0/544	0/228	0/566
	C_0 / Sill	0/496	0/499	0/487	0/500	0/482	0/500
	Effective Range(m)	1150	2160	1155	1500	1185	1700
	r^2	0/829	0/649	0/892	0/794	0/894	0/751
	RSS	0/0018	0/0290	0/0066	0/0230	0/0030	0/0248



شکل 5 - نمونه مدل نمایی برازش شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی لوگ هدایت هیدرولیکی اشباع $BESTslope$ در الگوریتم $(\ln(md^{-1}))$

تغییرنمای لگاریتم داده‌های K_s تعیین گردید. براساس جدول 3، در هر سه الگوریتم محاسباتی، مدل‌های کروی و نمایی به‌طور مشابه و با اختلاف کمی نسبت به مدل گوسی، برازش بهتری را بر نیم‌تغییرنمای تجربی لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع دارند. در این حالت نیز مانند حالت قبل نتایج الگوریتم‌های $BESTintercept$ و $BESTsteady$ به یکدیگر نزدیکتر و با اختلاف کمی نسبت به الگوریتم $BESTslope$ ، دقت برازش بالاتری بر نیم‌تغییرنمای تجربی دارند. در مجموع با توجه به مقادیر r^2 و RSS و نتایج ارزیابی متقابل، مدل نمایی به‌عنوان

براساس نتایج ارائه شده در جدول 3 مدل‌های نیم-تغییرنمای لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع به‌طور عمده دارای نسبت $C_0/Sill$ بیشتر و فاصله تأثیر کمتر نسبت به داده‌های خام می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که تبدیل لگاریتمی داده‌های K_s نتوانسته است موجب بهتر شدن ساختار مکانی آن شود. یکی از دلایل می‌تواند زیاد نبودن چولگی داده‌های خام (K_s ضریب چولگی نزدیک به یک است) باشد. با این وجود برای بررسی بهتر تأثیر استفاده از لگاریتم داده‌های K_s در دقت میان‌یابی K_s در سطح منطقه، مشخصات بهترین مدل برازش شده به نیم-

اشباع کمتر، همگرایی و نزدیکی بیشتری به خط تخمین زنده (خط ممتد) در مقایسه با بافت لوم شنی دارد که البته در مجموع اختلاف همگرایی قابل توجه نیست.

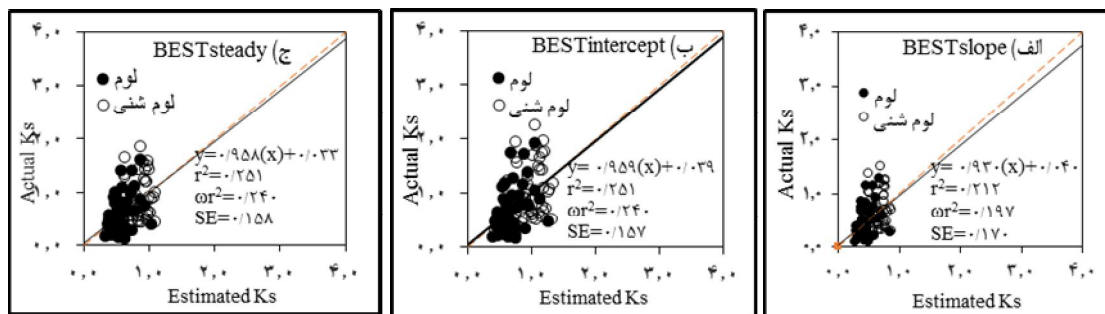
در روش کوکریجینگ از درصد رس، درصد سیلت و درصد شن به‌عنوان متغیر کمکی برای تخمین Ks استفاده شد. براساس نتایج ارائه شده در شکل‌های 8 و 9 ملاحظه می‌شود که با وجود استفاده از متغیرهای کمکی (درصد ذرات خاک) در فرآیند تخمین، مقدار ضریب تعیین وزنی (ωr^2) و دقت تخمین Ks در مقایسه با دو روش قبلی کاهش یافته است. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده برای همه درصد‌های ذرات خاک (درصد رس، شن و سیلت) یکسان بوده و تغییر متغیر کمکی در نتایج به‌دست آمده تأثیری نداشت. علت عدم بهبود دقت تخمین Ks در روش کوکریجینگ را می‌توان ناشی از همبستگی نه‌چندان قوی متغیر اصلی و متغیرهای کمکی (شکل 2) و همبستگی مکانی عرضی متوسط متغیر اصلی و کمی دانست (گوارتس، 1997).

نتایج به‌دست آمده از ارزیابی متقابل تخمین Ks توسط روش IDW در شکل 10 نشان می‌دهد که در این روش با افزایش مقدار توان وزندهی، مقدار شیب رابطه خطی بین مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده (نزدیکی به خط $Y=X$) و همچنین مقدار ωr^2 کاهش یافته است. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که مانند روش‌های قبلی، دقت تخمین Ks در الگوریتم‌های BESTsteady و BESTintercept به یکدیگر نزدیک بوده و از دقت تخمین BESTslope بیشتر است. از طرفی دقت تخمین با اختلاف ناچیزی مشابه روش‌های کوکریجینگ معمولی و لوگ کوکریجینگ است بنابراین در صورتی که هدف تحقیق تنها برآورد الگوی توزیع مکانی Ks در سطح منطقه باشد، می‌توان از روش ساده تر IDW به جای روش‌های پیچیده تر و وقت‌گیرتر نظیر کوکریجینگ استفاده کرد.

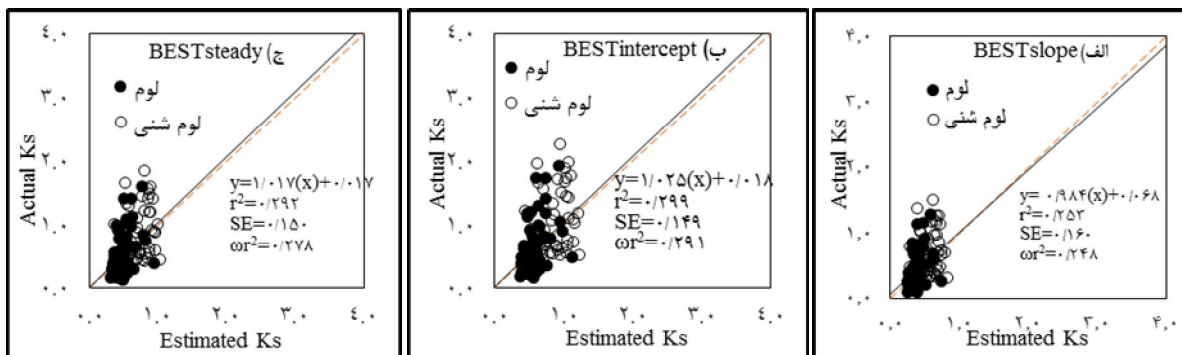
بهترین مدل ساختار مکانی Ks و LnKs انتخاب گردید. در شکل 5 نمونه نیم‌تغییرنمای تجربی و مدل نمایی برازش شده برای لوگ هدایت هیدرولیکی اشباع به‌دست آمده از الگوریتم BESTslope ارائه شده است.

میان‌یابی هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی

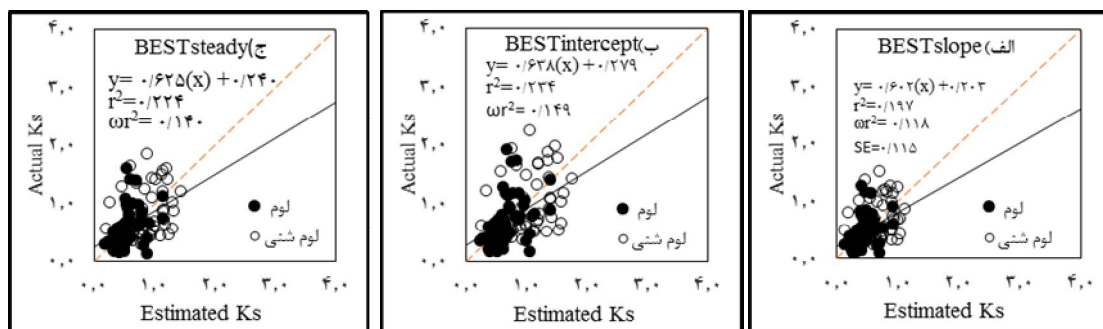
شکل 6 رابطه خطی بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر تخمین زده شده در مدل کوکریجینگ نمایی را برای هر سه الگوریتم BEST همراه با نتایج حاصل از ارزیابی متقابل تخمین Ks نشان می‌دهد. بر اساس مقدار ضریب تعیین وزنی (ωr^2) و مقدار خطا (SE) در بافت خاک منطقه (لومی و لوم شنی)، دقت تخمین Ks در الگوریتم BESTsteady که ساده‌ترین فرآیند محاسباتی را نیز دارد، بیشتر از الگوریتم BESTslope و به الگوریتم BESTintercept بسیار نزدیک است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بافت لومی با هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر، همگرایی و نزدیکی بیشتری به خط تخمین زنده (خط ممتد) در مقایسه با بافت لوم شنی دارد که البته در مجموع اختلاف همگرایی قابل توجه نیست. از طرفی نتایج نشان داد که در هر سه الگوریتم محاسباتی، مدل لوگ کوکریجینگ نمایی دارای مقدار ضریب تعیین وزنی (ωr^2) بیشتر و مقدار خطای (SE) کمتر نسبت به روش کوکریجینگ معمولی است و در نتیجه از عملکرد به‌نسبت بهتری برخوردار است. همچنین در این روش نیز مانند روش کوکریجینگ معمولی، در بافت لومی و لوم شنی، دقت تخمین Ks در الگوریتم BESTsteady که ساده‌ترین فرآیند محاسباتی را نیز دارد، از الگوریتم BESTslope بیشتر و به الگوریتم BESTintercept بسیار نزدیک است. شکل 7 رابطه بین مقادیر مشاهده شده و تخمین زده شده Ks با استفاده از روش لوگ کوکریجینگ نمایی و برخی معیارهای مقایسه را نشان می‌دهد. همچنین مانند مدل کوکریجینگ معمولی، بافت لومی با هدایت هیدرولیکی



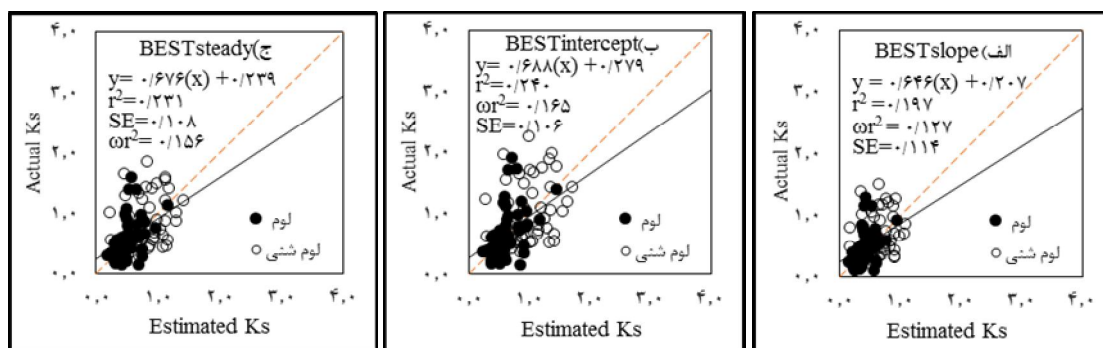
شکل 6- رابطه خطی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری و تخمین زده شده (md^{-1}) در مدل کوکریجینگ معمولی نمایی برای الگوریتم‌های BEST



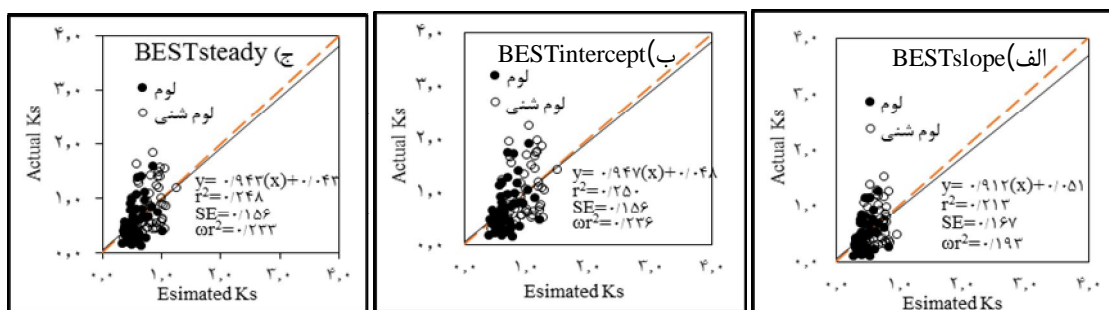
شکل 7- رابطه خطی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری و تخمین زده شده (md^{-1}) در مدل لوگ کریجینگ نمایشی برای الگوریتم‌های BEST



شکل 8- رابطه خطی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری و تخمین زده شده (md^{-1}) در مدل کوکریجینگ برای الگوریتم‌های BEST



شکل 9- رابطه خطی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری و تخمین زده شده (md^{-1}) در مدل کوکریجینگ (با لحاظ لگاریتم داده‌ها) برای الگوریتم‌های BEST

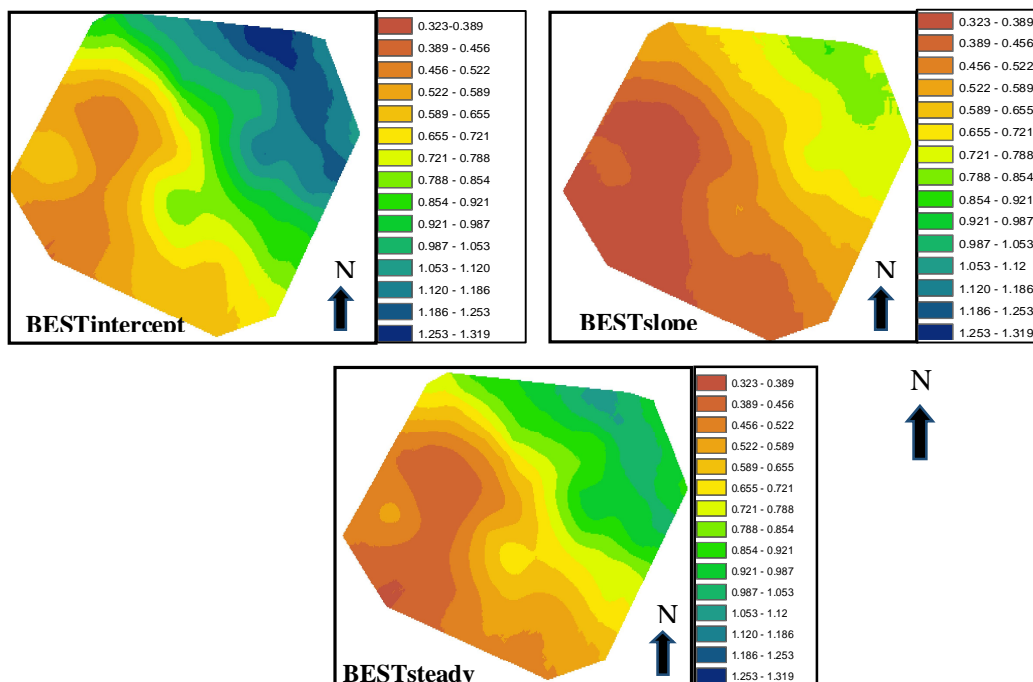


شکل 10- نمودار پراکنش هدایت هیدرولیکی اشباع واقعی و تخمین زده شده در مدل وزن‌دهی عکس فاصله برای الگوریتم‌های BEST (کل داده‌ها)

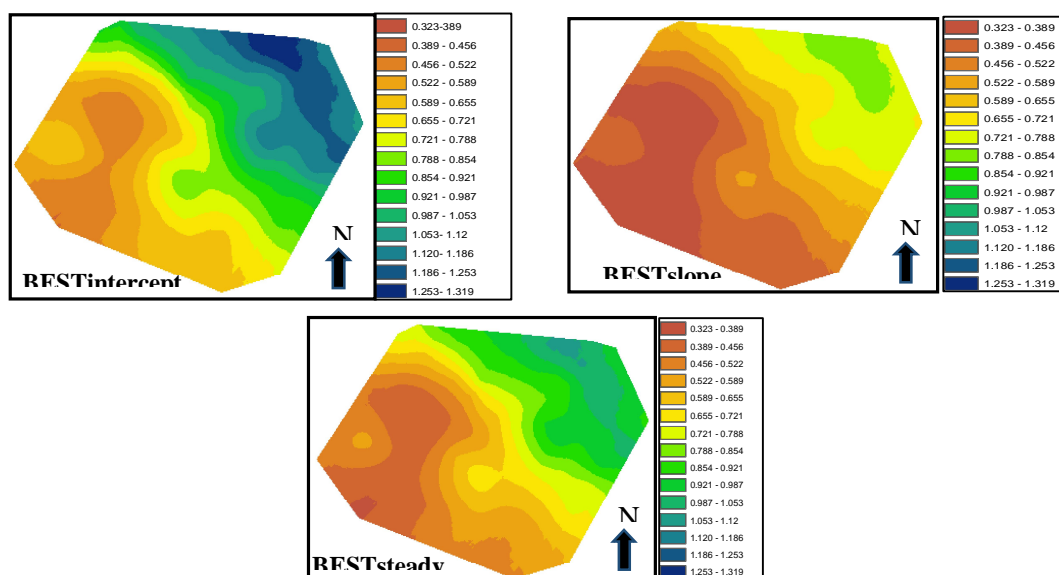
منطقه مطالعاتی با تغییر بافت از لوم شنی به لومی، میزان هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش یافته است. از طرفی نقشه‌های حاصل از هر دو روش، الگوی پراکنش مکانی مشابهی از Ks را در سطح منطقه نشان می‌دهند هرچند که همانگونه که قابل پیش‌بینی بود، نقشه‌های به‌دست آمده از الگوریتم‌های BESTintercept و BESTsteady به یکدیگر نزدیک‌ترند و تغییرات مکانی بیشتری از مقادیر Ks را نسبت به الگوریتم BESTslope نشان می‌دهند.

پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع سطحی

براساس نتایج اعتبارسنجی متقابل روش‌های میان‌یابی استفاده شده، در نهایت دو روش کریجینگ معمولی نمایی و لوگ کریجینگ نمایی با عملکرد مشابه برای پهنه‌بندی Ks در سطح منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است. نحوه تغییر پهنه‌های رنگی نشان می‌دهد که از سمت شمال شرقی به سمت جنوب غربی



شکل 11- پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع (در md^{-1}) الگوریتم‌های BEST با استفاده از روش کریجینگ معمولی



شکل 12- پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع (در md^{-1}) الگوریتم‌های BEST با استفاده از روش لوگ کریجینگ معمولی

نتیجه‌گیری

و بیشتر از الگوریتم BESTslope است، لذا استفاده از آزمایش نفوذ بیرکن در کنار یک الگوریتم محاسباتی ساده مانند BESTsteady و بهره‌گیری از روش‌های میان‌یابی مناسب برای پیش‌بینی الگوی پراکنش مکانی Ks می‌تواند استفاده از این روش آزمایش نفوذ ساده را جذاب‌تر نماید. همچنین شایان ذکر است که روش وزن‌دهی عکس فاصله با وجود عملکرد کمی ضعیف‌تر نسبت به روش‌های زمین‌آمار، به دلیل سادگی و سریع بودن عملیات محاسباتی می‌تواند در کنار آزمایش نفوذ بیرکن برای تعیین توزیع مکانی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی Ks در بافت‌های لومی و لوم شنی مورد استفاده قرار بگیرد. با این حال باید توجه داشت که این روش توانایی مدل کردن عدم قطعیت تخمین Ks را در صورت نیاز ندارد. در مجموع از میان هر سه الگوریتم محاسباتی بیرکن، BESTsteady با دارا بودن ساده‌ترین فرآیند محاسباتی و دقت قابل قبول به‌عنوان یک الگوریتم کاربردی برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع در بافت‌های لوم و لوم شنی و مدل لوگ کریجینگ نمایی با بالاترین دقت، به‌عنوان یک مدل مناسب برای تخمین الگوی پراکنش مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع انتخاب می‌گردد. در مطالعات آینده بررسی و مقایسه نتایج الگوریتم‌های بیرکن به‌همراه مدل‌های زمین‌آمار در بافت‌های دیگر خاک پیشنهاد می‌شود.

در این پژوهش به مقایسه روش‌های میان‌یابی مکانی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) براساس نتایج آزمایش نفوذ بیرکن در بافت‌های لوم و لوم شنی مزرعه سد سیستان پرداخته شد. تحلیل‌ها برای مقادیر Ks به‌دست آمده از سه الگوریتم محاسباتی بیرکن با شرط اینکه متوسط خطای نسبی برازش (Er) در الگوریتم‌ها کمتر از 10 درصد باشد، صورت گرفت. براساس یافته‌های این پژوهش، توزیع فراوانی داده‌های هدایت هیدرولیکی اشباع، لوگ‌نرمال است. براساس نتایج ارزیابی متقابل، روش میان‌یابی لوگ کریجینگ نمایی در هر سه الگوریتم بیرکن، عملکرد بهتری نسبت به کریجینگ معمولی برای تخمین Ks داشت، هرچند این برتری چندان قابل توجه نبود. روش کوکریجینگ با وجود استفاده از متغیرهای کمکی درصد رس، سیلت و شن کم-ترین دقت تخمین Ks را در میان روش‌های مورد استفاده ارائه نمود که علت آن می‌تواند به دلیل عدم وجود همبستگی بالا بین Ks و درصد اجزای بافت خاک و ساختار مکانی نه چندان قوی نیم‌تغییرنمای عرضی Ks و متغیرهای کمکی دانست. از طرفی براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، دقت تخمین روش‌های میان‌یابی در الگوریتم BESTsteady مشابه الگوریتم BESTintercept

فهرست منابع:

1. Bagarello, V. Di Prima, S. and Iovino, M. 2014. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. Soil Science Society of America, 78:724–736.
2. Cambardella, C. Moorman, A. Moorman T.B. Novak, J. M. Parkin, T. B. Karlen, D. L. Turco, R. F. Konopka, A. E. 1994. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soil Science. Society American. 58:1501-1511.
3. Diwu, J.Y. Rudra, R.P. Dickinson, W.T. and Wall, G.J. 1998. Effect of tillage on the spatial variability of soil water properties. Canadian Agricultural Engineering 40(1): 1-7.
4. Di Prima, S. Lassabatere, L. Bagarello, V. Iovino, M. and Angulo-Jaramillo, R. 2016. Testing a new automated single ring infiltrometers for Beerkan infiltration experiments. Geoderma, 262: 20–34.
5. Elrick, D.E. Reynolds, W.D. Baumgartner, Tan, N. K.A. and Bradshaw, K.L. 1987. In-situ measurement of hydraulic properties of soils using the Guelph Permeameter and Guelph Infiltrometer. In Proceedings Third International Symposium on Land Drainage, 13-23. Columbus, Ohio: Ohio State University
6. Gallichand, J. and Marcotte, D. 1992. Mapping Clay Content for Subsurface drainage in the Nile Delta. Geoderma, 58:165-179.
7. Ghavidelfar, S. Shamsedin, A. and Melville, B. 2015. Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty through the Beerkan infiltration experiment. Hydrological Process. 29: 3699–3713.

8. Gee, G.W. and Or, D. 2002. 2.4 Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 4, Physical methods.* : SSSA Book Series. 5. Soil Science Society of America. Inc. Madison. WI. pp. 255–293.
9. Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* Oxford University Press, New York, 496 p., ISBN: 9780195115383
10. Goovaerts, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228(2):113–129
11. Govindaraju, R.S. Koelliker, J.K. Schwab A.P. and Banks.M.K. 1995. Spatial variability of surface infiltration properties over two fields in the Konza Prairie. Poster presented at the Hazardous Waste Research Conference, Manhattan,
12. Isaaks, H. and Srivastava, R. M. 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561 p., ISBN 0-19-505012-6, ISBN 0-19-505013-4
13. Journel, A.G. Huijbregts, C.J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York.
14. Jang, C.S and Liu, C.W. 2004. Geostatistical analysis and conditional simulation for estimating the spatial variability of hydraulic conductivity in the Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Hydrological Process* 18:1333–1350.
15. Jury, W.A. 1989. Chemical movement through soil. In *Vadose Zone Modelling of Organic Pollutants*, eds. Hern, S.C. and Melacon, M.S. 135-139. Chelsea, MI: Lewis Publishing Inc
16. Krause, P. Boyle, DP. and Base, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. *Advances in Geosciences*. 5:89-97.
17. Lassabatere, L. Angulo-Jaramillo, R. Soria Ugalde, J.M. Cuenca, R. Braud, I. and Haverkamp, R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. *Soils Soil Science Society American Journal* 70: 521–532
18. Lloyd, C.D. 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology*,308: 128–150
19. Mubarak, I. Mailhol, J. Angulo-Jaramillo, R. Ruelle, P. Boivin, P. and Khaledian, M. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma*150:158–165.
20. Mubarak, I. Angulo-Jaramillo, R. Mailhol, JC. Ruelle, P. Khaledian, M. and Vauclin, M. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management*. 97: 1517–1526
21. Moustafa, M.M. Yomota, A. 1998. Spatial modeling of soil properties for subsurface drainage projects. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4): 218-228.
22. Nielson, D.R. Biggar, J.W. and Erh.K.T. 1973. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia* 42(7):215-259
23. Saito, H., and P. Goovaerts. 2000. Geostatistical interpolation of positively skewed and censored data in a dioxin contaminated site. *Environ. Sci. Technol.*34: 4228–4235.
24. Willardson, L.S. and R.L. Hurst. 1965. Sample size estimated in permeability studies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 91:1-9.
25. Xu X, Kiely, G. and Lewis, G. 2009. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. *Soil Use and Management*. 25:354–361.
26. Xu, X. Lewis, C. Liu, W. Albertson, J. and Kiely, G. 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agriculture Water Management*. 107:34–41.
27. Yilmaz, D. Lassabatere, L. Angulo-Jaramillo, R. Deneele, D. and Legret, M. 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone*. 9:107–116.

Mapping Saturated Hydraulic Conductivity of Surface Layer in Loam and Sandy Loam Soils of Sistan Plain

T. Ahmady, M. Delbari¹, and P. Afrasiab

PhD. student in Irrigation and Drainage, University of Zabol; E-mail: ta.ahmady.ah@gmail.com

Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Zabol;

E-mail: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Zabol;

E-mail: peyman.afraziab@uoz.ac.ir

Received: January, 2017 and Accepted: October, 2017

Abstract

Soil saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the main parameters in water and solute transport studies in soil and irrigation and drainage projects designs. So, knowledge about the K_s spatial distribution pattern has great importance. The aim of present study was to predict spatial distribution pattern of K_s in the experimental field of Sistan Dam, Zabol University, using different interpolation methods. For this purpose, a set of 113 single ring Beerkan infiltration experiments were carried out over the study area in a grid of average distance about 80 m. The K_s was obtained through Beerkan calculating algorithms, BESTslope, BESTintercept and BESTsteady. The relative fitting errors were 5.19% and 9.39% for BESTslope and BESTintercept algorithms, respectively, that are satisfactory. The interpolation methods were compared using evaluation criteria such as the weighted determination coefficient (ω^2) and standard error (SE). Based on the results, the spatial correlation of K_s was moderate and it had the exponential structure. The results showed that Log Kriging (LOK) achieved the highest ω^2 and lowest SE values for estimating K_s over the study area with a dominant soil textures of loam and sandy loam. However, the difference between LOK and the other interpolation approaches was not significant. Moreover, among the interpolation methods, BESTsteady algorithm, which had the simplest calculating procedure, had the highest precision in estimation. So, according to the results, LOK with an exponential semivariogram model is suggested as the best interpolation method for predicting the spatial distribution of K_s , based on values obtained from the simple and applicable algorithm, i.e. BESTsteady, in loam and sandy loam soils.

Keywords: Beerkan Infiltration Experiment, Calculating algorithms, Semivariogram, Spatial interpolation

¹ Corresponding author: Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran