

مقایسه روش‌های اصلاح شده خطی‌سازی تجمعی (CL) و خطی‌سازی مشتقی (DL) با الگوریتم اصلی آزمایش نفوذ بیرکن (BESTslope) برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع

تارخ احمدی^۱، پیمان افراسیاب^۲، معصومه دلبری^۳

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

چکیده

آزمایش نفوذ تک‌استوانه‌ای بیرکن، روشی ساده و ارزان برای تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. هدف از پژوهش حاضر مقایسه فرم اصلاح شده روش‌های خطی‌سازی تجمعی (CL) و خطی‌سازی مشتقی (DL) با الگوریتم اصلی تحلیل آزمایش نفوذ بیرکن (BESTslope) در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و برآورد مقدار پارامتر ثابت α (نسبت نیروی ثقل به کاپیلاری) در مدل‌های اصلاح شده CL و DL است. برای این منظور تعداد ۱۱۳ آزمایش نفوذ بیرکن در مزرعه تحقیقاتی سد سیستان انجام شد. مقادیر منفی Ks تخمین زده شده توسط الگوریتم BESTslope از مجموع کل نتایج حذف شد و در نهایت تعداد ۱۰۱ آزمایش برای مقایسه روش‌های مورد نظر انتخاب گردید. براساس نتایج به دست آمده، مقدار Ks در مدل‌های خطی CL و DL در اکثر آزمایشات بیرکن منفی به دست آمد، لیکن در فرم اصلاح شده دو مدل خطی، تمامی مقادیر Ks مثبت به دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر برآورد شده Ks توسط فرم اصلاح شده DL با $\omega r^2 = 0/8135$ (مقدار ضریب تعیین وزنی) در مقایسه با فرم اصلاح شده CL با $\omega r^2 = 0/7506$ به نتایج روش BESTslope نزدیک‌تر بود. از طرفی اختلاف مقادیر Ks محاسبه شده توسط الگوریتم BESTslope با مدل‌های CL و DL با افزایش درصد رس به طور کلی روند کاهشی داشت. همچنین مقدار α محاسبه شده برای بافت لوم و لوم ماسه‌ای در فرم اصلاح شده مدل DL ($\alpha = 0/019$) در مقایسه با مدل CL ($\alpha = 0/023$) به نتایج تحقیقات گذشته در بافت مشابه، نزدیک‌تر بود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش نفوذ بیرکن، توانایی جذب، نیروی ثقل، نیروی کاپیلاری، هدایت هیدرولیکی اشباع.

^۱ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران. ta.ahmady.ah@gmail.com

^۲ دانشیار گروه آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران. .peyman.afrafiab@uoz.ac.ir . P_afrafiab@yahoo.com (مسئول

مکاتبه)

^۳ دانشیار گروه آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران. masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

مقدمه

در مدل خطی‌سازی تجمعی (CL)^{۴۴} معرفی شده است. پارامتر α به‌عنوان نسبت نیروی ثقل به نیروی کاپیلاری خاک است (Vanderaer et al., 2000). در شکل اصلی (اصلاح نشده) مدل CL و DL^{۴۵} مقدار Ks معمولاً برای خاک‌هایی که مقدار توانایی جذب خاک (S) بالایی دارند منفی به‌دست می‌آید (ژو و همکاران، ۲۰۰۹). در تحقیق دیگری که توسط Di prima et al., 2016 انجام شده است تخمین منحنی نفوذ در شرایط مختلف رطوبت اولیه نسبی (Se) مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش، مقایسه عملکرد الگوریتم BESTslope با فرم‌های اصلی و اصلاح شده مدل‌های CL و DL (که فرآیند محاسباتی ساده‌تری نسبت به الگوریتم BESTslope دارد) برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) در خاک‌های با بافت لومی و لوم‌ماسه‌ای می‌باشد. همچنین در این پژوهش مقدار پارامتر ثابت α در سه حالت و با سه مقدار متوسط خطای نسبی برازش بر داده‌های نفوذ (Er)، برای بافت‌های لومی و لوم ماسه‌ای محاسبه می‌شود.

مواد و روش‌ها

آزمایشات نفوذ

آزمایشات نفوذ بیرکن در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زابل به مساحت حدود ۱۰۰ هکتار واقع در عرض جغرافیایی ۳۰°۵۴'۵۳" شمالی و طول جغرافیایی ۶۱°۳۱'۱۸" شرقی در ۱۱۳ نقطه مشخص انجام شد. از مجموع کل آزمایشات، ۶۵ آزمایش در بافت لومی و ۴۸ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای می‌باشد. برای انجام آزمایش نفوذ بیرکن از یک حلقه فلزی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر که به اندازه یک سانتی‌متر درون زمین فرو برده شده بود استفاده شد. سطح خاک قبل از انجام آزمایش از بقایای ریشه و برگ گیاهان پاک گردید. ۱۵۰ میلی‌لیتر آب به آرامی و به‌گونه‌ای روی سطح خاک ریخته شد که ساختمان سطح خاک درون حلقه

خصوصیات هیدرولیکی خاک برای مدل کردن فرآیندهای هیدرولوژیکی و انتقال املاح در خاک مهم می‌باشند. برخی خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌تواند در آزمایشگاه توسط نمونه‌های دست‌نخورده و برخی در مزرعه توسط روش‌های اندازه‌گیری صحرائی به‌دست آیند. در بین این روش‌ها، روش آزمایش نفوذ بیرکن^{۴۰} که توسط Haverkamp et al., 1996 و Braud et al., 2005 پیشنهاد شد و نیز مدل ارتقا یافته آن، روش BEST^{۴۱} (تخمین پارامترهای انتقال خاک از طریق آزمایشات نفوذ) که توسط Lassabatere et al., 2006 ارائه گردید، به‌دلیل سادگی در اجرا و هزینه کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. سادگی این روش به‌دلیل استفاده از یک حلقه است که در حدود یک سانتی‌متر در زمین فرو می‌رود و حجم کم و ثابتی از آب به دفعات بر روی سطح خاک درون حلقه تا ثابت شدن مدت زمان نفوذ آب ریخته می‌شود. با این روش نه‌تنها هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و قابلیت جذب خاک (S)، بلکه منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک نیز برآورد می‌گردند.

روش اصلی در محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع و توانایی جذب خاک، الگوریتم BESTslope می‌باشد (Bagarello et al., 2014b). این الگوریتم که پارامترهای هیدرولیکی را بر اساس تلفیق معادلات نفوذ در مراحل انتقالی^{۴۲} و ماندگار^{۴۳} جریان آب در خاک محاسبه می‌نماید توسط Lassabatere et al., 2006 تحت نام BEST ارایه گردید که در تحقیقات بعدی توسط ایلماز و همکاران (۲۰۱۰) به نام BESTslope نام‌گذاری گردید. در تحقیقی که توسط (Bagarello et al., 2014a) انجام شده است مقدار Ks تحت عنوان یک روش ساده تابع مقدار پارامتر متغیر α و شیب معادله خطی شده نفوذ

^۱ Beerkan infiltration experiment^۲ Beerkan estimation of soil transfer parameters^۳ Transient phase^۴ Steady state phase^۵ Cumulative linearization^۶ Derivative linearization

به هم نخورد و سپس مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه گیری شد. پس از نفوذ کامل آب مجدداً ۱۵۰ میلی لیتر آب مانند دفعه اول روی سطح خاک درون حلقه ریخته شد و مدت زمان نفوذ کامل اندازه گیری 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. قبل از شروع آزمایش، دو نمونه دست نخورده برای اندازه گیری رطوبت اولیه (θ_0) و وزن 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)

به هم نخورد و سپس مدت زمان نفوذ کامل آب اندازه گیری شد. پس از نفوذ کامل آب مجدداً ۱۵۰ میلی لیتر آب مانند دفعه اول روی سطح خاک درون حلقه ریخته شد و مدت زمان نفوذ کامل اندازه گیری 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. قبل از شروع آزمایش، دو نمونه دست نخورده برای اندازه گیری رطوبت اولیه (θ_0) و وزن 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)

جدول (۱): آماره های توصیفی درصد رس، سیلت و ماسه - ($N_{selected}=101$)

بافت خاک (USDA class)	آماره توصیفی	درصد ماسه (Sand %)	درصد سیلت (Silt %)	درصد رس (Clay %)
حداقل		۲۰/۰۰	۱۵/۶۰	۱۱/۶۰
لوم و لوم ماسه ای	حداکثر	۷۰/۸۰	۵۰/۲۰	۳۵/۶۰
	متوسط حسابی	۴۷/۸۵	۳۱/۵۳	۲۰/۶۲
	میانه	۴۸/۰۰	۳۱/۶۰	۲۰/۰۰
	درصد ضریب تغییرات	۲۴/۴۵	۲۸/۱۱	۲۵/۵۳

جدول (۲): آماره های توصیفی وزن مخصوص ظاهری (ρ_b)، رطوبت اولیه (θ_0)، تخلخل (ε) و رطوبت نسبی اولیه (Se) - ($N_{selected}=101$)

بافت خاک (USDA class)	آماره توصیفی	ρ_b (gr/cm ³)	θ_0 (cm ³ /cm ³)	ε (cm ³ /cm ³)	Se (cm ³ /cm ³)
حداقل		۱/۱۴۰	۰/۰۸۰	۰/۳۵۱	۰/۱۴۱
لوم و لوم ماسه ای	حداکثر	۱/۷۲۰	۰/۱۲۰	۰/۵۷۰	۰/۲۶۰
	متوسط حسابی	۱/۴۱۸	۰/۱۰۳	۰/۴۶۵	۰/۲۲۳
	میانه	۱/۴۲۰	۰/۱۰۰	۰/۴۶۴	۰/۲۲۶
	درصد ضریب تغییرات	۷/۱۲۰	۷/۸۹۹	۸/۱۹۰	۹/۵۲۲

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

روش BEST و روش های DL و CL

$$I = C_1 \cdot \sqrt{t} + C_2 \cdot t \quad (1)$$

a)

$$C_1 = S \quad (1)$$

b)

در صورتی که معادله دو ترمی (دو بخشی) مربوط به جریان سه بعدی آب در خاک در مرحله انتقالی، مطابق معادله ۱a در نظر گرفته شود، مقدار ضرایب C_1 و C_2 مطابق معادلات ۱b و ۱c تعریف می گردد. ضرایب A و B نیز مطابق معادله ۱d و ۱e تعریف شده است (Vanderaer et al., 2000):

خطی انتخاب می‌شود. مقدار N_{end} در این تحقیق برابر با ۳ (سه نقطه انتهایی) در نظر گرفته شده است

الگوریتم BESTslope

BESTslope به‌عنوان الگوریتم اصلی در آزمایش بیرکن شناخته شده است (Bagarello et al., 2014b) در این الگوریتم با تلفیق معادلات ۱a و ۳ معادله ۴ به‌دست می‌آید که شکل دیگری از معادله ۱a است:

$$Ks = i_s^{exp} - A.S^2 \quad (3)$$

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

معادله ۳ نیز شکل دیگری از معادله ۲b می‌باشد. برای برازش معادله ۴ بر داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن (t_i, I_i^{exp}) و محاسبه S از روش حداقل کردن تابع هدف کلاسیک (حداقل شدن مربعات خطا) استفاده می‌شود که در آن $k = 5, \dots, N_{tot}$ می‌باشد (Lassabatere et al., 2006):

$$f(S, k) = \min \sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^2 \quad (5)$$

$I_{est}(t_i)$ نفوذ تجمعی تخمین زده شده در t_i است. k تعداد داده‌های منتخب از مجموع کل داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن در هر اجرای آزمایش می‌باشد. به‌طور مثال برای $k=8$ هشت داده اول آزمایش نفوذ بیرکن برای برازش بر معادله ۴ انتخاب شده است. مقدار خطای نسبی برازش (Er) نیز مطابق معادله (۶) برای هر مقدار k محاسبه می‌شود (Lassabatere et al., 2006).

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp} - I_{est}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k [I_i^{exp}]^2}} \quad (6)$$

مقدار خطای نسبی برازش قابل قبول $Er < 5.5\%$ است (Lassabatere et al. 2006).

برای انتخاب آزمایشات در BESTslope مقدار متوسط خطای نسبی (\overline{Er}) نیز مورد قبول است (باگارلو و همکاران، ۲۰۱۴b). در صورتی که خطای

$$C_2 = A.S^2 + B.Ks \quad (1)$$

c)

$$A = \frac{\gamma}{r.(\theta_s - \theta_0)} \quad (1)$$

d)

$$B = \frac{2-\beta}{3} \quad (1)$$

e)

t مدت زمان سپری شده از آزمایش نفوذ (T). توانایی جذب خاک $(L.T^{-0.5})$ ، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک $(L.T^{-1})$ و r شعاع حلقه (L) است. با فرض اینکه برای کلیه آزمایشات نفوذ بیرکن مقدار رطوبت نسبی اولیه کمتر از 0.25 می‌باشد ($Se = \theta_0/\theta_s \leq 0.25$)، پارامترهای $\gamma = 0.75$ و $\beta = 0.60$ در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین مقدار پارامتر B برابر با 0.467 محاسبه می‌شود. البته مطابق تحقیق ژو و همکاران (۲۰۱۲) شرایط مرطوب‌تر خاک نیز می‌تواند در عمل می‌تواند اتفاق بیافتد.

در صورتی که معادله خطی نفوذ در مرحله پایدار (i_{∞}) با رابطه ۲a برقرار باشد، مقدار تئوری شیب خط (i_s) و مقدار تجربی شیب خط (i_s^{exp}) به‌ترتیب از روابط ۲b و ۲c به‌دست می‌آید. i_s^{exp} شیب خط برازش شده بر نقاط انتهایی (داده‌های انتهایی) نفوذ در مرحله ماندگار (مرحله پایدار) است (Lassabatere et al., 2006):

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

a)

$$i_s = A.S^2 + Ks \quad (2)$$

b)

$$i_s \approx i_s^{exp} = slope \left(\frac{t_i I_i}{i=(N_{tot}-N_{end}) \rightarrow N_{tot}} \right) \quad (2)$$

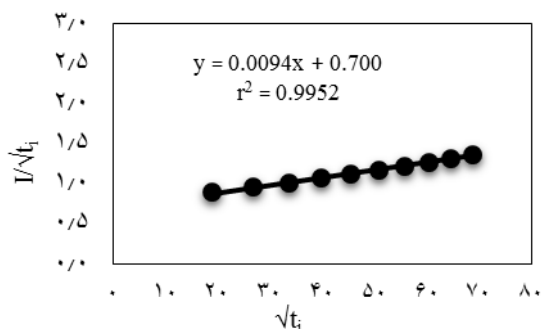
c)

N_{tot} تعداد کل نقاط آزمایش نفوذ و N_{end} تعداد نقاط انتهایی در فاز پایدار است که برای رگرسیون

$$K_s = \frac{C_2 - A \cdot C_1^2}{B} \quad (۸)$$

c)

معادله ۸C شکل دیگری از معادله ۱C می‌باشد.



شکل (۱): نمونه‌ای از شکل خطی شده

منحنی نفوذ در مدل CL

خطی سازی معادله نفوذ در مدل DL

شکل خطی معادله نفوذ در مدل DL از طریق

مشتق‌گیری از معادله ۱a نسبت به ریشه دوم زمان

(\sqrt{t}) به‌دست می‌آید (Vanderaer et al., 2000)؛

(Lassabatere et al., 2006).

$$\frac{dl}{d\sqrt{t}} = C_1 + 2 \cdot C_2 \cdot \sqrt{t} \quad (۹)$$

a)

$$\frac{dl}{d\sqrt{t}} (t_i^*) = \frac{l_{i+1} - l_i}{\sqrt{t_{i+1}} - \sqrt{t_i}} \quad (۹)$$

b)

$$\sqrt{t_i^*} = [\sqrt{t_i t_{i+1}}]^{0.5} \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (۹)$$

c)

در صورتی که داده‌های $dl/d\sqrt{t}$ در مقابل \sqrt{t} ترسیم

شود شکل دیگری از مدل خطی شده منحنی غیر

خطی نفوذ در مرحله انتقالی به‌دست می‌آید که C_1

عرض از مبدأ و C_2 نصف شیب آن خط می‌باشد. با

برازش یک معادله خط بر این داده‌ها C_1 و C_2 در مدل

DL به‌دست می‌آید (وندروایره و همکاران، ۲۰۰۰). در

شکل ۲ مقدار C_1 برابر با $۰/۵۴۷۶$ میلی‌متر بر مجذور

ثانیه و مقدار C_2 برابر با نصف مقدار $۰/۲۲۶$ (mm.S^{-۱})

نسبی از ۱۰٪ بیشتر نباشد به‌عنوان تخمین دقیق و اگر خطا از ۵٪ بیشتر نباشد به‌عنوان تخمین خیلی دقیق در نظر گرفته می‌شود (دی پری ما و همکاران، ۲۰۱۶). پس از محاسبه S ، مقدار K_s از رابطه ۳ تخمین زده می‌شود. مقدار t_{max} (مدت زمان نفوذ در مرحله انتقالی) نیز با استفاده از معادله ذیل به‌دست می‌آید (Lassabatere et al., 2006):

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-B)} \left(\frac{S}{K_s}\right)^2 \quad (۷)$$

برای هر مقدار k مقادیر t_k متناظر (زمان سپری

شده از آزمایش نفوذ)، S ، K_s ، t_{max} و E_r متناظر در

یک جدول به‌دست می‌آید. در نهایت از میان همه

نتایج، مقادیر S و K_s متناظر با حداکثر مقدار t_{max}

که $t_k \leq t_{max}$ باشد، به‌عنوان نتایج این الگوریتم

معرفی می‌شوند.

خطی سازی معادله نفوذ در مدل CL

با تقسیم طرفین معادله ۱a بر \sqrt{t} شکل خطی شده

معادله نفوذ به‌دست می‌آید (Vanderaer et al., 2000).

مطابق شکل ۱ در صورتی که داده‌های I/\sqrt{t}

در مقابل \sqrt{t} ترسیم شود، شکل خطی شده منحنی

نفوذ در مرحله انتقالی به‌دست می‌آید (معادله ۸a). C_1

عرض از مبدأ و C_2 شیب خط می‌باشد که با برازش

یک خط بر این داده C_1 و C_2 در مدل CL به‌دست

می‌آید (Vanderaer et al., 2000). در شکل ۱

مقدار C_1 برابر با $۰/۷$ میلی‌متر بر مجذور ثانیه و مقدار

C_2 برابر با $۰/۰۰۹۴$ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. مقدار S

با C_1 برابر (معادله ۸b) و مقدار K_s نیز از طریق معادله

۸C محاسبه می‌شود (Lassabatere et al. 2006).

$$\frac{l}{\sqrt{t}} = C_1 + C_2 \sqrt{t} \quad (۸)$$

a)

$$S = C_1 \quad (۸)$$

b)

جبهه خیس شدگی برابر با ۱/۸۱۸ در نظر گرفته می‌شود و Φ_m پتانسیل شار ماتریک (L^2T^{-1}) توسط معادله ۱۲ تعریف می‌شود (Reynolds, 1990; Gardner, 1985):

$$\Phi_m = \int_{h_i}^0 K(h) dh \quad (12)$$

h_i پتانسیل فشاری خاک می‌باشد که در بازه $-\infty < h_i < 0$ تعریف می‌گردد. مقدار پارامتر α برای بافت‌های ماسه‌ای، لومی و رسی به ترتیب ۰/۰۳۶، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۴ بر میلی‌متر بدست آمده است (Reynolds, 2002). با تلفیق معادله ۱۰ و ۱۱ شکل دیگر در قالب معادله ۱۳ بدست می‌آید.

$$S^2 = \left[\gamma_w (\theta_s - \theta_0) \frac{K_s}{\alpha} \right] \quad (13)$$

با تلفیق معادله ۸b و ۱۳ شکل جدید محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع در قالب معادله ۱۴ بدست می‌آید.

(۱۴)

$$K_s = \frac{C_2}{\left(\frac{\gamma_w \theta_s}{r \cdot \alpha} \right) + B}$$

معادله ۱۴ برای محاسبه K_s در مدل‌های خطی CL و DL به‌دست آمده که هدایت هیدرولیکی اشباع را برای تمام آزمایشات به‌صورت مثبت برآورد می‌نماید.

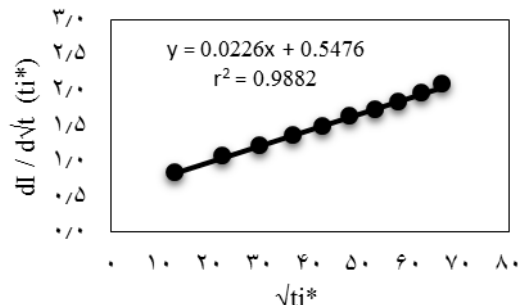
در صورتی که رابطه K_s در مدل‌های اصلاح شده CL و DL با الگوریتم BESTslope به‌صورت خطی فرض شود، پارامترهای a و c به‌عنوان عرض از مبدأ و پارامترهای b و d به‌عنوان شیب می‌باشد:

$$K_{sCL} = a + b * K_{sBESTslope} \quad (15)$$

$$K_{sDL} = c + d * K_{sBESTslope} \quad (16)$$

در این تحقیق پارامترهای a، b، c و d به‌عنوان پارامترهای رگرسیون معرفی شده‌اند. به‌دلیل اینکه

$C_2 = 0/0113^1$ می‌باشد. مطابق معادله ۸b مقدار S برابر با C_1 و سپس مقدار K_s از طریق معادله ۸b محاسبه می‌شود.



شکل (۲): نمونه‌ای از شکل خطی شده منحنی نفوذ در

مدل DL

در روش خطی‌سازی ممکن است به‌دلایل مختلف از جمله تغییرات عمودی رطوبت خاک، لایه‌بندی خاک و یا ورود هوا حین انجام آزمایش، یک یا دو نقطه اول بر روی شکل خطی شده داده‌های نفوذ قرار نگیرد و به سمت پایین انحنا داشته باشد در این شرایط یک یا دو نقطه اول برای برازش معادله خطی حذف می‌گردد (Bagarello et al., 2014b, 2014a).

فرم اصلاح شده هدایت هیدرولیکی

اشباع در مدل‌های خطی CL و DL

با توجه به اینکه ممکن است در برخی از خاک‌های دارای مقدار S یا C_1 بالا، مقدار K_s در مدل‌های خطی‌سازی CL و DL منفی به‌دست آید، اصلاح شکل معادله ۸c می‌تواند از منفی شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع در این خاک‌ها جلوگیری نماید.

رابطه ۱۰ و ۱۱ توسط Reynolds et al., 2002 ارائه شده است.

$$\alpha = \frac{K_s}{\Phi_m} \quad (10)$$

$$S^2 = [\gamma_w (\theta_s - \theta_0) \Phi_m] \quad (11)$$

پارامتر α (L^{-1}) نشان‌دهنده نسبت نیروی ثقل (K_s) به نیروی کاپیلاری یا پتانسیل شار ماتریک (Φ_m) است (Vanderaer et al., 2000). γ_w به‌عنوان پارامتر

آزمایش در بافت لومی و ۱۳ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای، در حالت دوم ۳۱ آزمایش در بافت لومی و ۲۸ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای و در حالت سوم ۵۷ آزمایش در بافت لوم ماسه‌ای می‌باشد. در این تحقیق جهت مقایسه نتایج Ks و محاسبه مقدار پارامتر α از روش اصلاح شده در مدل‌های CL و DL استفاده شد.

در این پژوهش فرآیندهای محاسباتی مورد نیاز مربوط به الگوریتم BESTslope در محیط نرم افزاری PTC (Math soft Engineering and Mathcad Prime 3.1 Education, 2015) انجام شد و برای بررسی صحت فرآیند محاسباتی نتایج به دست آمده با برنامه VBA Marco (دی پریمما، ۲۰۱۳) و برنامه Scilab (لاسابتری و همکاران، ۲۰۱۳) نیز مقایسه گردید که نتایج کاملاً مشابه بودند. نمودارها و جداول مورد نیاز نیز در محیط نرم افزار Excel 2013 تهیه گردید.

نتایج و بحث

برازش خط در مدل‌های CL و DL

بررسی‌ها در این تحقیق نشان داد که هر چه ضریب تعیین (r^2) مربوط به برازش یک خط بر داده‌های خطی شده نفوذ در مدل‌های CL و DL به عدد یک نزدیکتر باشد، خطای نسبی برازش (Er) در الگوریتم BESTslope کمتر است. همانطوری که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود با افزایش متوسط خطای نسبی (\overline{Er})، تمام آماره‌های توصیفی مربوط به مقدار ضریب تعیین r^2 کاهش می‌یابد. همچنین مقدار متوسط و درصد ضریب تغییرات مقدار r^2 در مدل DL نشان می‌دهد که همبستگی داده‌های خطی شده نفوذ در این مدل بهتر و به عدد یک نزدیکتر می‌باشد و لذا استفاده از مدل خطی DL برای محاسبه مقدار Ks بهتر است.

جداول ۵ و ۶ آماره‌های توصیفی مقادیر C_1 و C_2 را در مدل‌های خطی CL و DL و در سه حالت منتخب برای بافت لومی و لوم ماسه‌ای نشان می‌دهد. در هر دو مدل مقدار متوسط C_1 با افزایش مقدار متوسط خطای نسبی (\overline{Er}) افزایش یافته و مقدار متوسط C_2 نیز کاهش یافته است. بازه تغییرات پارامترهای C_1 و

طبق رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ مقدار K_{SCL} و K_{SDL} تابع α می‌باشد، با تغییر مقدار α ، مقدار پارامترهای رگرسیون نیز تغییر می‌کند. در این تحقیق شاخص ضریب تعیین وزنی $(\omega r^2)^{46}$ به عنوان شاخصی برای میزان انطباق روابط خطی ۱۵ و ۱۶ با خط رگرسیون ($y=x$) و نزدیکی تخمین مقدار Ks در روش BESTslope با هر یک از روش‌های CL و DL مورد استفاده قرار می‌گیرد (کروس و همکاران، ۲۰۰۵):

$$\omega r^2 = \begin{cases} |SL| \cdot r^2 & \text{for } SL \leq 1 \\ |SL|^{-1} \cdot r^2 & \text{for } SL > 1 \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه، r^2 ضریب تعیین و SL شیب رابطه خطی رگرسیون می‌باشد. برای مقایسه مقدار Ks در الگوریتم BESTslope و روش‌های CL و DL از فاکتور f_D نیز به عنوان فاکتور اختلاف برای هر آزمایش بیرکن استفاده شده است. این فاکتور برای هر آزمایش بیرکن از تقسیم مقدار حداکثر Ks (مقدار بزرگتر) بر مقدار حداقل Ks (مقدار کوچکتر) در مقایسه بین BESTslope با هر یک از روش‌های CL و DL به دست می‌آید (باگارلو و همکاران، ۲۰۱۴a). اگر مقدار این فاکتور کمتر از ۳ باشد به این مفهوم است که اختلاف (خطای) تخمین Ks بین دو روش ناچیز است (الریک و ریئالدز، ۱۹۹۲).

از مجموع ۱۱۳ آزمایش انجام شده در ۱۲ آزمایش مقدار Ks در الگوریتم BESTslope منفی به دست آمد، لذا در نهایت تعداد ۱۰۱ آزمایش برای ارزیابی روش‌های مورد استفاده در این پژوهش انتخاب گردید. ارزیابی نتایج در سه حالت انجام گرفت. حالت اول شامل انتخاب ۳۱ آزمایش ($N_{\text{selected}}=31$) می‌باشد که در تمام آنها مقدار Er کمتر از ۵/۵ درصد می‌باشد. حالت دوم شامل انتخاب ۵۹ آزمایش ($N_{\text{selected}}=59$) است که متوسط Er در آنها کمتر از ۵/۵ درصد است ($\overline{Er} < 5.5\%$) و حالت سوم شامل ۱۰۱ آزمایش ($N_{\text{selected}}=101$) است که متوسط Er در آنها کمتر از ۱۰ درصد است ($\overline{Er} < 10.0\%$). در حالت اول ۱۸

⁴⁶Weighted regression

۱/۵ و مقدار C_2 کمتر از ۰/۰۱۵ است. مقدار K_s نیز همانگونه که قبلا تشریح گردید و نتایج موسوی و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان می دهد بر اساس معادله b ۸ برای اکثر قریب به اتفاق آزمایشات منفی به دست آمده است که مطلوب نمی باشد

در حالت های اول و دوم در مقایسه با حالت سوم، اختلاف قابل توجهی ندارد. لیکن مطابق شکل ۳ بازه تغییرات C_1 و C_2 در مدل DL کمی بیشتر از CL می باشد که البته با توجه به دقت بیشتر مدل DL این مسأله قابل توجه است. در هر دو مدل در بیش از ۹۰ درصد آزمایشات منتخب مقدار C_1 کمتر و مساوی

جدول (۳): آماره های توصیفی مقدار r^2 در برازش مدل خطی CL در بافت لومی و لوم ماسه ای

Nselected=101 $\bar{Er} < 10\%$	Nselected=59 $\bar{Er} < 5.5\%$	Nselected=31 $Er < 5.5\%$	آماره های توصیفی
۰/۲۵۶۳	۰/۴۶۲	۰/۵۱۳	حداقل
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	حداکثر
۰/۸۶۹	۰/۸۷۹	۰/۹۳۲	متوسط
۰/۹۳۵	۰/۹۳۶	۰/۹۶۳	میانه
۱۷/۷۲۵	۱۵/۵۴۰	۱۰/۶۶۷	درصد ضریب تغییرات

جدول (۴): آماره های توصیفی مقدار r^2 در برازش مدل DL در بافت لومی و لوم ماسه ای

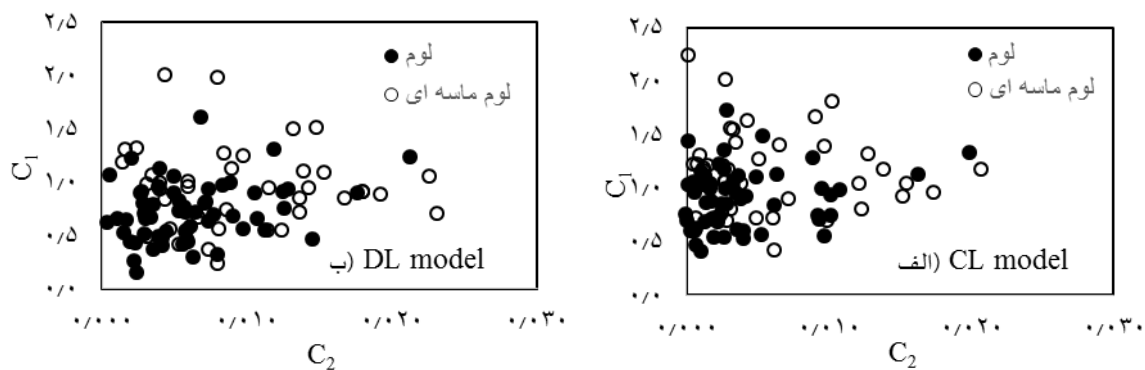
Nselected=101 $\bar{Er} < 10\%$	Nselected=59 $\bar{Er} < 5.5\%$	Nselected=31 $Er < 5.5\%$	آماره های توصیفی
۰/۳۰۷	۰/۶۴۸	۰/۷۳۶	حداقل
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۸۸	حداکثر
۰/۸۶۰	۰/۹۲۷	۰/۹۴۶	متوسط
۰/۹۲۷	۰/۹۴۸	۰/۹۵۵	میانه
۱۴/۳۹	۷/۳۹	۵/۷۲	درصد ضریب تغییرات

جدول (۵): آماره های توصیفی C_1 ، C_2 و K_s در مدل CL در بافت لومی و لوم ماسه ای در سه حالت

Nselected=101 $\bar{Er} < 10\%$			Nselected=59 $\bar{Er} < 5.5\%$			Nselected=31 $Er < 5.5\%$			آماره های توصیفی
K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	
-۰/۳۱۵	۰/۰۰۱	۰/۴۰۹	-۰/۱۴۳	۰/۰۰۱	۰/۴۰۹	-۰/۰۷۶۴	۰/۰۰۱	۰/۴۰۹	حداقل
۰/۰۰۵	۰/۰۲۱	۲/۲۴۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۲۱	۱/۶۶۰	۰/۰۰۵	۰/۰۲۱	۱/۳۲۴	حداکثر
-۰/۰۵۹	۰/۰۰۵	۱/۰۱۱	-۰/۰۳۷۵	۰/۰۰۷	۰/۸۹۸	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۹	۰/۸۱۳	متوسط
-۰/۰۴۵	۰/۰۰۳	۰/۹۹۰	-۰/۰۳۱۲	۰/۰۰۵	۰/۹۰۲	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۹	۰/۷۴۴	میانه
-۸۹/۵۰۸	۹۶/۹۹۴	۳۴/۱۸۸	-۸۰/۱۳۹	۷۵/۴۹۹	۳۰/۳۹۴	-۸۵/۷۲۳	۵۸/۷۹۰	۳۰/۹۳۶	درصد ضریب تغییرات

جدول (۶): آماره های توصیفی C_1 ، C_2 و K_s در مدل DL در بافت لومی و لوم ماسه ای در سه حالت

Nselected=101 $\bar{Er} < 10\%$			Nselected=59 $\bar{Er} < 5.5\%$			Nselected=31 $Er < 5.5\%$			آماره های توصیفی
K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	K_s (mm.s ⁻¹)	C_2 (mm.s ⁻¹)	C_1 (mm.s ^{-0.5})	
-۰/۲۶۰	۰/۰۰۲	۰/۱۴۶	-۰/۱۰۳	۰/۰۰۲	۰/۲۳۵	-۰/۰۶۰	۰/۰۰۲	۰/۲۳۵	حداقل
۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۲/۰۰۱	۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۱/۴۹۳	۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۱/۳۰۸	حداکثر
-۰/۰۳۰	۰/۰۰۸	۰/۸۰۶	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۹	۰/۷۰۴	-۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۶۵۱	متوسط
-۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۰/۷۷۷	-۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۶۹۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۵۶۲	میانه
-۱۴۵/۳۲	۶۷/۹۴	۴۲/۴۶	-۱۶۵/۵۳۷	۵۶/۹۱۶	۳۸/۲۱۷	-۴۸۱/۰۰	۴۹/۲۸۰	۴۳/۱۰۳	درصد ضریب تغییرات



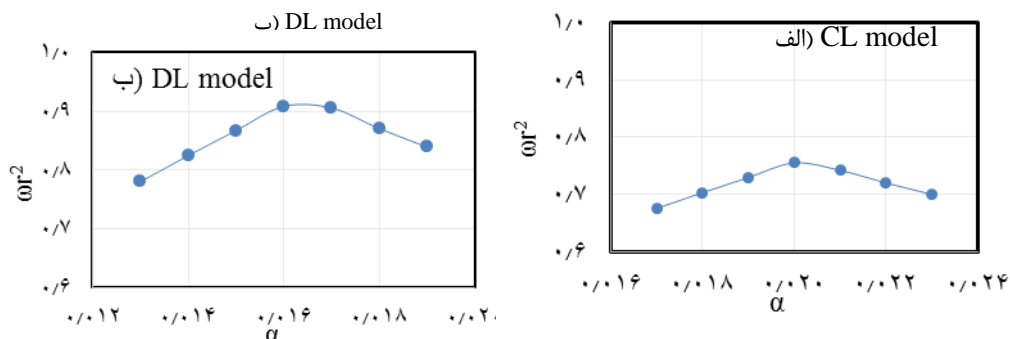
شکل (۳): تغییرات C_1 و C_2 در ۱۰۱ آزمایش منتخب در الف) مدل CL و ب) مدل DL

بیشتر و مقدار α را نزدیکتر به مقدار α تخمین زده شده توسط رینالدز و الریک (۲۰۰۲) که برای خاک‌های لومی برابر ۰/۰۱۲ است محاسبه نموده است. شکل ۵ نیز رابطه خطی K_s را برای حداکثر مقدار ωr^2 در مدل‌های CL و DL با الگوریتم BESTslope نشان می‌دهد. جداول ۸ و ۹ نیز مقدار آماره‌های توصیفی K_s در ۳۱ آزمایش منتخب را برای مدل‌های CL و DL نشان می‌دهد. مقادیر متوسط K_s در هر دو روش با یکدیگر برابرند و درصد ضریب تغییرات نیز اختلاف کمی با یکدیگر دارند. همچنین نتایج به دست آمده از هر دو روش اصلاح شده خطی و به خصوص روش DL با الگوریتم BESTslope بسیار نزدیک و تقریباً مساوی هستند. از طرفی مقدار حداکثر و متوسط f_D نیز در هر دو مدل خطی کمتر از ۳ می باشد که نشان دهنده اختلاف قابل قبول است (جداول ۸ و ۹).

محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای ۳۱ آزمایش

منتخب ($N_{\text{selected}}=31$)

از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن در ۳۱ آزمایش مقدار متوسط و حداکثر E_r به ترتیب ۳/۸ و ۵/۵ درصد می‌باشد. شکل ۴ و جدول ۷ نشان می‌دهد حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده CL در $\alpha = 0.020$ حاصل شده و برابر با ۰/۷۵۵۵ است. مقدار a نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با ۰/۰۰۰۵- و مقدار b نیز نزدیک به عدد ۱ و برابر با ۰/۹۹۲۷ است. حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده DL نیز مربوط به $\alpha = 0.016$ و برابر با ۰/۹۰۸۱ است. مقدار c نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با ۰/۰۰۰۱- و مقدار d نیز نزدیک به عدد ۱ و برابر با ۰/۹۸۰۴ است. نتایج نشان می‌دهد که مدل DL در مقایسه با مدل CL مقدار K_s را با ωr^2 بیشتر یعنی همبستگی خطی



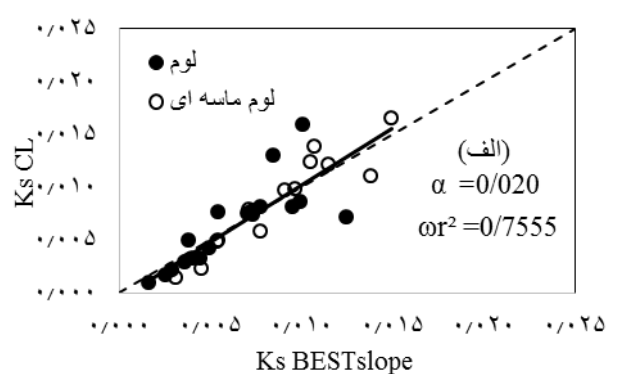
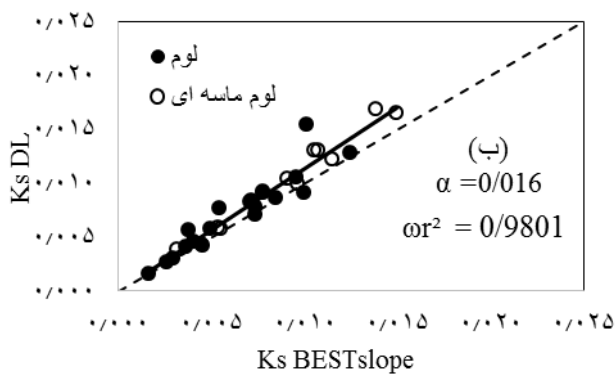
شکل (۶): تغییر پارامتر ωr^2 با تغییر مقدار α در حالت اول الف) مدل CL و ب) مدل DL

جدول (۷): پارامترهای رگرسیون برای مقادیر مختلف α در حالت اول برای مدل های DL و CL

ωr^2	r^2	d	c	α	ωr^2	r^2	b	a	α
۰/۷۸۰۴	۰/۹۲۶۳	۰/۸۴۲۵	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۶۷۶۶	۰/۷۶۱۱	۰/۸۸۹۰	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۷
۰/۸۲۴۶	۰/۹۲۶۳	۰/۸۹۰۲	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۴	۰/۷۰۳۹	۰/۷۶۱۱	۰/۹۲۴۸	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۸
۰/۸۶۷۱	۰/۹۲۶۳	۰/۹۳۶۱	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۷۳۰۱	۰/۷۶۱۱	۰/۹۵۹۳	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۹
۰/۹۰۸۱	۰/۹۲۶۳	۰/۹۸۰۴	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۶	۰/۷۵۵۵	۰/۷۶۱۱	۰/۹۹۲۷	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۰
۰/۹۰۵۵	۰/۹۲۶۳	۱/۰۲۳۰	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۷۴۲۶	۰/۷۶۱۱	۱/۰۲۴۹	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۱
۰/۸۷۰۴	۰/۹۲۶۳	۱/۰۶۴۲	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۸	۰/۷۲۰۷	۰/۷۶۱۱	۱/۰۵۶۱	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۲
۰/۸۳۹۱	۰/۹۲۶۳	۱/۱۰۳۹	-۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۹	۰/۷۰۰۶	۰/۷۶۱۱	۱/۰۸۶۳	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۳

DL: α انتخاب شده برای مدل DL

CL: α انتخاب شده برای مدل CL



شکل (۵): رابطه Ks به دست آمده توسط الگوریتم BESTslope و مدل های الف) CL و ب) DL حالت اول

جدول (۸): آماره های توصیفی Ks در BESTslope و CL برای سه حالت

حالت سوم			حالت دوم			حالت اول			آماره های توصیفی
f_D	BESTslope	CL ($\alpha=0/023$)	f_D	BESTslope	CL ($\alpha=0/021$)	f_D	BESTslope	CL ($\alpha=0/020$)	
۱/۰۰۸۷	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۱/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۴	۱/۰۰۸۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۸	حداقل
۵/۱۴۲۴	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۰	۴/۶۴۹۵	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۰	۲/۴۱۱۴	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۰	حداکثر
۱/۸۴۰۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۳۵	۱/۵۴۵۵	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۸	۱/۳۶۲۱	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۶۷	متوسط
۱/۴۶۶۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲۲	۱/۴۰۴۴	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۳	۱/۳۷۲۴	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۶۸	میانه
۴۹/۷۱۵۶	۷۸/۸۸۴	۹۶/۹۹۴	۴۰/۴۸۱۱	۵۷/۸۸۲	۷۵/۴۹۸	۲۶/۷۲۲۳	۴۶/۹۴۲	۵۸/۷۹۰	درصد ضریب تغییرات

جدول (۹): آماره های توصیفی Ks در BESTslope و DL برای سه حالت

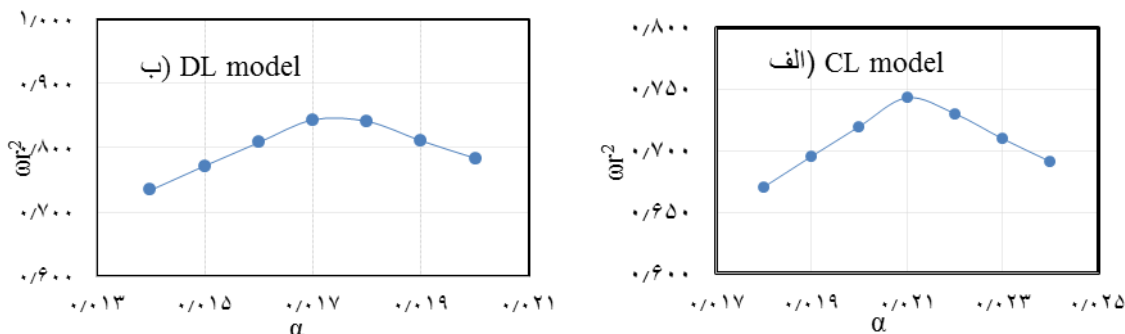
حالت سوم			حالت دوم			حالت اول			آماره های توصیفی
f_D	BESTslope	DL ($\alpha=0/019$)	f_D	BESTslope	DL ($\alpha=0/017$)	f_D	BESTslope	DL ($\alpha=0/016$)	
۱/۰۰۴۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۱/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۳	۱/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۵	حداقل
۵/۹۷۰۶	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۱	۲/۰۰۵۴	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۱	۱/۳۱۱۸	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۵۱	حداکثر
۱/۵۴۷۲	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴۹	۱/۱۹۷۲	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۶۱	۱/۱۱۰۰	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۷۴	متوسط
۱/۲۱۵۱	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۹	۱/۱۲۰۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۹	۱/۰۹۸۶	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۷۴	میانه
۵۸/۷۳۶۳	۷۸/۸۸۴	۶۷/۹۴۵	۱۷/۴۸۳۳	۵۷/۸۸۲	۵۶/۹۱۶	۸/۳۲۷۱	۴۶/۹۴۲	۴۹/۲۸۰	درصد ضریب تغییرات

محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای ۵۹

آزمایش منتخب (Nselected=59)

از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن در ۵۹ آزمایش مقدار متوسط E_r کمتر از ۵/۵ درصد ($\overline{E_r} < 5.5\%$) و حداکثر E_r برابر با ۸/۴ درصد می‌باشد. شکل ۶ و جدول ۱۰ نشان می‌دهد حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده CL در $\alpha = 0.021$ حاصل شده و برابر با ۰/۷۴۷۵ است. مقدار a نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با -0.0005 و مقدار b نیز نزدیک به ۱ و برابر با ۰/۹۹۳۷ است. حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده DL نیز در $\alpha = 0.017$ به دست آمده و برابر با ۰/۸۴۳۶ است. مقدار c نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با 0.0003 و مقدار d نیز نزدیک به ۱ و برابر با ۰/۹۸۱۹ است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد آزمایشات منتخب و افزایش متوسط خطای نسبی (E_r) تغییر محسوسی در نتایج

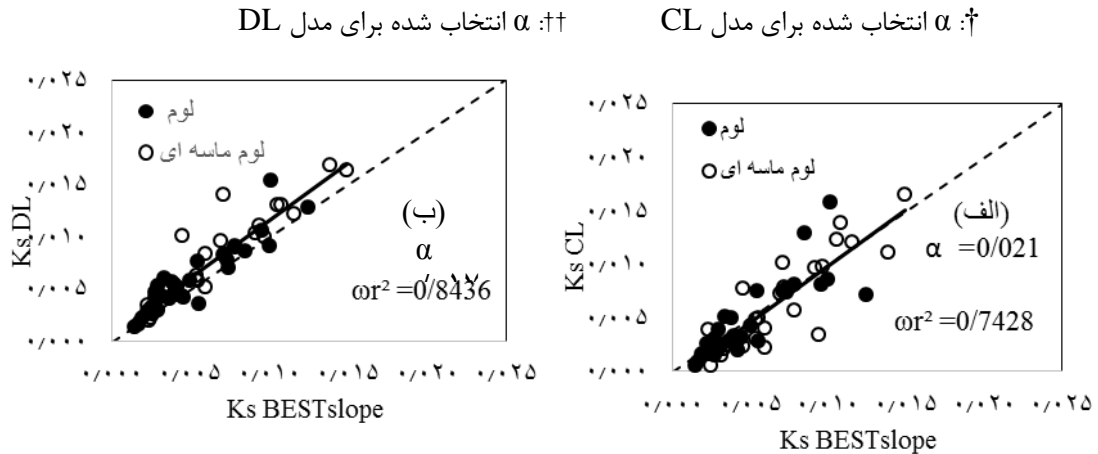
به دست نیامده است و مانند حالت قبل ($N_{selected}=31$) مدل DL با مقدار ωr^2 بیشتر یا همبستگی بالاتر و با مقدار α کمتر از مدل CL، مقدار K_s را بهتر تخمین زده است. البته همانگونه که انتظار می‌رفت نسبت به حالت قبل مقدار ωr^2 در هر دو مدل کمتر می‌باشد که البته این اختلاف قابل توجه نیست. شکل ۷ نیز رابطه خطی K_s را برای حداکثر مقدار ωr^2 در مدل‌های CL و DL با الگوریتم BESTslope نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارایه شده در جداول ۸ و ۹ در این حالت مقدار متوسط و ضریب تغییرات K_s در مدل DL در مقایسه با CL به الگوریتم BESTslope نزدیکتر است. بررسی کلیه مقادیر f_D نشان می‌دهد که در مدل DL در تمام آزمایشات و CL در اکثر قریب به اتفاق آزمایشات، مقدار f_D کمتر از ۳ می‌باشد.



شکل (۶): تغییر پارامتر ωr^2 با تغییر مقدار α در حالت دوم الف) مدل CL و ب) مدل DL

جدول (۱۰): پارامترهای رگرسیون برای مقادیر مختلف α در حالت دوم برای مدل‌های CL و DL

ωr^2	r^2	d	c	α	ωr^2	r^2	b	a	α
۰/۷۳۴۱	۰/۸۵۹۲	۰/۸۵۴۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۴	۰/۶۷۰۲	۰/۷۴۷۵	۰/۸۹۶۶	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۸
۰/۷۷۲۲	۰/۸۵۹۲	۰/۸۹۸۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۵	۰/۶۹۵۲	۰/۷۴۷۵	۰/۹۳۰۰	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۹
۰/۸۰۸۴	۰/۸۵۹۲	۰/۹۴۰۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۷۱۹۴	۰/۷۴۷۵	۰/۹۶۲۴	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۰
۰/۸۴۳۶	۰/۸۵۹۲	۰/۹۸۱۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۷	۰/۷۴۲۸	۰/۷۴۷۵	۰/۹۹۳۷	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۱
۰/۸۴۱۲	۰/۸۵۹۲	۱/۰۲۱۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۸	۰/۷۳۰۱	۰/۷۴۷۵	۱/۰۲۳۹	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۲
۰/۸۱۰۹	۰/۸۵۹۲	۱/۰۵۹۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۹	۰/۷۰۹۷	۰/۷۴۷۵	۱/۰۵۳۲	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۳
۰/۷۸۳۷	۰/۸۵۹۲	۱/۰۹۶۴	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۰	۰/۶۹۱۲	۰/۷۴۷۵	۱/۰۸۱۵	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۲۴



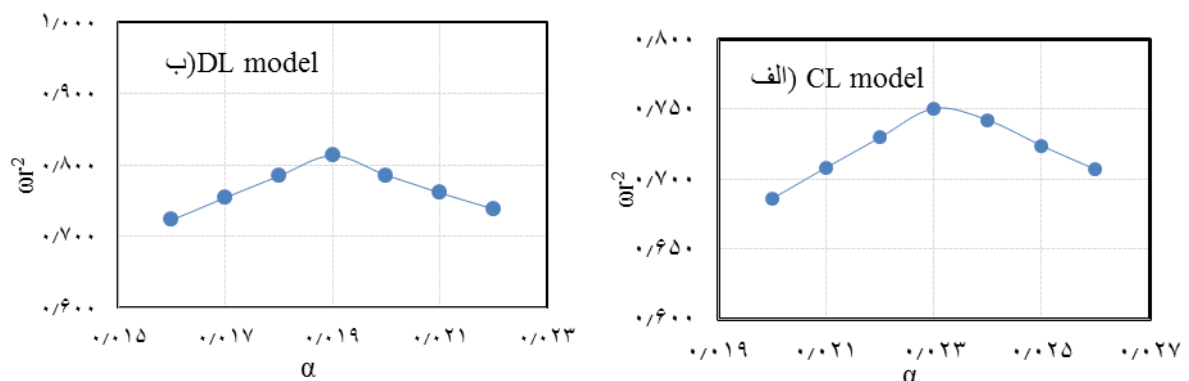
شکل (۷): رابطه Ks به دست آمده توسط الگوریتم BESTslope و مدل های الف) CL و ب) DL در حالت دوم

این مقدار نسبت به دو حالت قبل کمتر است. مقدار c نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با ۰/۰۰۱۲ و مقدار d برابر با ۱ است. بنابراین در این حالت، مدل اصلاح شده DL با همبستگی بیشتر در مقایسه با CL مقدار Ks را بهتر تخمین می‌زند. شکل ۹ رابطه خطی Ks را برای حداکثر مقدار ωr^2 در مدل های CL و DL با الگوریتم BESTslope نشان می‌دهد. مانند حالت قبل و مطابق نتایج ارائه شده در جداول ۸ و ۹ در این حالت نیز مقدار متوسط و ضریب تغییرات Ks در مدل DL در مقایسه با CL به الگوریتم BESTslope نزدیکتر است. بررسی کلیه مقادیر f_D نشان می‌دهد که مدل DL در ۹۵ درصد آزمایشات و در مدل CL ۸۷ درصد آزمایشات دارای f_D کمتر از ۳ می‌باشد.

محاسبه پارامترهای هیدرولیکی برای ۱۰۱

آزمایش منتخب ($N_{selected}=101$)

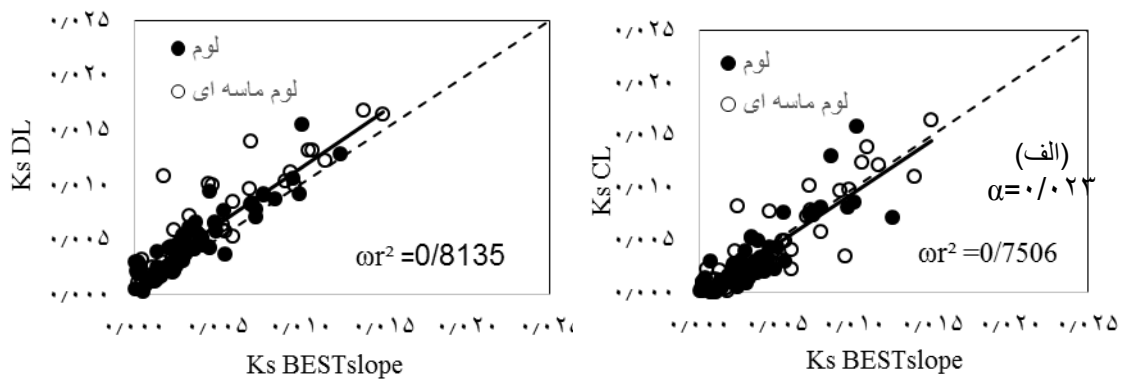
از مجموع ۱۱۳ آزمایش بیرکن در ۱۰۱ آزمایش مقدار متوسط E_r کمتر از ۱۰ درصد ($\bar{E}_r = 7.5\%$) و حداکثر E_r برابر ۱۳/۹۹ درصد می‌باشد در ۱۲ آزمایش هم همانگونه که قبلا اشاره گردید مقدار Ks منفی محاسبه شده است. شکل ۸ و جدول ۱۱ نشان می‌دهد حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده CL در $\alpha = 0.023$ حاصل شده و برابر با ۰/۷۵۰۶ است که نسبت به حالت قبل قدری بیشتر شده است. مقدار a نیز بسیار نزدیک به صفر و برابر با -۰/۰۰۰۳ و مقدار b نیز نزدیک به ۱ و برابر با ۰/۹۹۲۳ است. حداکثر مقدار پارامتر ωr^2 در مدل اصلاح شده DL در $\alpha = 0.019$ به دست آمده و برابر با ۰/۸۱۳۵ است که



شکل (۸): تغییرات پارامتر ωr^2 نسبت به تغییرات مقدار α در حالت سوم الف) مدل CL و ب) مدل DL

جدول (۱۱): پارامترهای رگرسیون برای مقادیر مختلف α در حالت سوم برای مدل های DL و CL

ωr^2	r^2	d	c	α	ωr^2	r^2	b	a	α
۰/۷۳۲۹	۰/۸۱۳۵	۰/۸۸۸۶	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۶۸۸۱	۰/۷۵۸۸	۰/۹۰۶۸	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۰
۰/۷۵۴۳	۰/۸۱۳۵	۰/۹۲۷۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۷	۰/۷۱۰۵	۰/۷۵۸۸	۰/۹۳۶۳	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۱
۰/۷۸۴۶	۰/۸۱۳۵	۰/۹۶۴۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۷۳۲۱	۰/۷۵۸۸	۰/۹۶۴۸	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۲
۰/۸۱۳۵	۰/۸۱۳۵	۱/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۹††	۰/۷۵۰۶	۰/۷۵۸۸	۰/۹۹۲۳	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۳†
۰/۷۸۵۸	۰/۸۱۳۵	۱/۰۳۵۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۰	۰/۷۴۴۷	۰/۷۵۸۸	۱/۰۱۹۰	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۴
۰/۷۶۱۰	۰/۸۱۳۵	۱/۰۶۹۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۱	۰/۷۲۶۲	۰/۷۵۸۸	۱/۰۴۴۹	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۵
۰/۷۳۸۵	۰/۸۱۳۵	۱/۱۰۱۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۲	۰/۷۰۹۲	۰/۷۵۸۸	۱/۰۷۰۰	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۶

††: α انتخاب شده برای مدل DL†: α انتخاب شده برای مدل CL

شکل (۹): رابطه Ks به دست آمده توسط الگوریتم BESTslope و مدل های الف) CL و ب) DL در حالت سوم

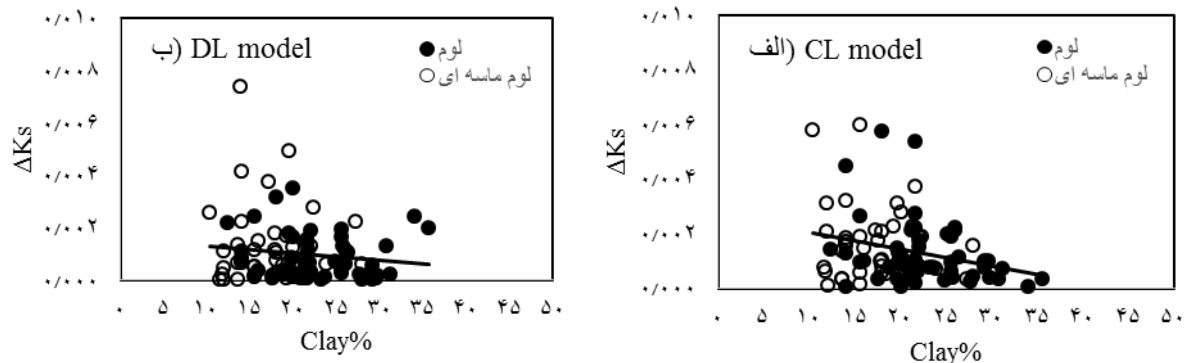
ناچیز می باشد. با توجه به اینکه مقدار ΔKs در مدل های DL و CL با الگوریتم BESTslope می تواند تابع مقدار درصد رس خاک باشد، لذا در این تحقیق اختلاف در تخمین Ks نسبت به تغییر درصد رس مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ نشان می دهد که اختلاف در تخمین Ks توسط هر دو مدل با افزایش درصد رس خاک به طور متوسط کاهش می یابد.

اختلاف در محاسبه Ks

در جدول ۱۲ آماره های توصیفی مقادیر اختلاف در برآورد Ks (ΔKs) توسط مدل های اصلاح شده CL و DL برای مقادیر بهینه α با الگوریتم BESTslope نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می گردد اختلاف در برآورد Ks توسط مدل DL نسبت به مدل BESTslope در هر سه حالت کمتر از مدل CL می باشد. هرچند اختلاف بین DL و CL در حالت سوم

جدول (۱۲): مقادیر اختلاف در محاسبه Ks (ΔKs) توسط مدل BESTslope با مدل های DL و CL با مقادیر بهینه α

حالت سوم		حالت دوم		حالت اول		آماره های توصیفی
DL ($\alpha=۰/۰۱۹$)	CL ($\alpha=۰/۰۲۳$)	DL ($\alpha=۰/۰۱۷$)	CL ($\alpha=۰/۰۲۱$)	DL ($\alpha=۰/۰۱۶$)	CL ($\alpha=۰/۰۲۰$)	
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	حداقل
۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۶۰	حداکثر
۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۵	متوسط
۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۴	میانه
۱۰۷/۰۴۲۱	۸۹/۰۷۱۸	۱۱۴/۸۴۵۵	۸۸/۴۲۸۸	۹۸/۹۳۳۷	۹۱/۰۵۷۰	درصد ضریب تغییرات



شکل (۱۰): تغییرات ΔK_s با افزایش درصد رس در مدل های الف (CL و ب) DL برای ۱۰۱ آزمایش منتخب

حالت اول ($Er < 5.5\%$)، دوم ($Er < 5.5\%$) و سوم ($Er < 10.0\%$) با مقدار α ارایه شده توسط الریک و رینالدز (۱۹۹۲) برای بافت لومی و لوم ماسه ای که برابر با ۰/۰۱۲ است اختلاف داشت، لیکن نتایج مقدار α در مدل DL در مقایسه با مدل CL به نتایج الریک و رینالدز (۱۹۹۲) نزدیکتر بود. همچنین نتایج نشان داد که اختلاف در برآورد K_s توسط مدل DL نسبت به مدل BESTslope در هر سه حالت کمتر از مدل CL می باشد از طرفی اختلاف مدل های خطی CL و DL با الگوریتم BESTslope در برآورد K_s با افزایش درصد رس به طور کلی کاهش نشان داد. البته برای بررسی بهتر اثر بافت خاک در میزان اختلاف مدل های خطی CL و DL توصیه می شود تحقیقات بیشتری در بافت های مختلف و بویژه در بافت های با درصد رس بیشتر از این پژوهش صورت گیرد.

نتیجه گیری

در این تحقیق ضمن مقایسه نتایج الگوریتم اصلی تحلیل نتایج آزمایش نفوذ بیرکن (BESTslope) با نتایج روش های اصلی و اصلاح شده DL و CL، مقدار پارامتر ثابت α برای بافت های لومی و لوم ماسه ای تعیین گردید. بررسی مقادیر C_1 و C_2 در مدل های خطی CL و DL نشان داد که بازه تغییرات این دو متغیر در هر دو مدل خطی به یکدیگر نزدیک می باشد لیکن همبستگی مدل خطی DL در برازش بر داده های نفوذ خطی شده در مقایسه با مدل CL بیشتر می باشد. همچنین نتایج نشان داد که مدل های خطی CL و DL در فرم اولیه مقدار K_s را در اکثر قریب به اتفاق آزمایشات منفی محاسبه می نمایند لیکن در فرم اصلاح شده در تمامی آزمایشات مقادیر K_s مثبت به دست می آید. بر اساس فرم اصلاح شده مقدار α محاسبه شده در مدل های خطی CL و DL در سه

منابع:

ع.، موسوی، م.، خالدیان، ح.، اسدی، م.، ع. گلی و م. نوروزی. ۱۳۹۴. برآورد و تحلیل ویژگی های هیدرولیکی خاک از طریق آزمایش نفوذ بیرکن. مجله تحقیقات آب و خاک ۴۶: ۹۵-۱۰۷.

Bagarello, V., S. Di Prima, M. Iovino and G. Provenzano, 2014a. Estimating field-saturated soil hydraulic conductivity by a simplified Beerkan infiltration experiment. *Hydrology Process*. 28: 1095–1103

Bagarello, V., S. Di Prima and M. Iovino . 2014b. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. *Soil Science Society of America*. 78: 724–736.

Braud, I., D., De Condappa, J. M., Sora, R., Haverkamp, R., Angulo- Jaramillo, S. Galle, and M. Vauclin, (2005) Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of

unsaturated soil hydraulics properties (the Beerkan method). *European Journal of Soil Science*, 56, 361–374.

S, Di Prima. 2013. Automatic analysis of multiple Beerkan infiltration experiments for soil hydraulic characterization. CIGR Inter-regional Conference on Land and Water Challenges. Bari (Italy). 10–14 September.

Di Prima, S., L. Lassabatere, V. Bagarello, M. Iovino and R. Angulo-Jaramillo (2016) testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. *Geoderma* 262: 20–34.

Elrick D. E. and W. D. Reynolds . 1992. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. *Soil Science Society of America*. 56: 320–323

Gardner W. R . 1958. some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*. 85: 228–232.

Gee G. W and D. Or . 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.

Haverkamp. R., P. J., Ross K. R. J Smetten and J. Y Parlange . 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer : 2. Physically based infiltration equation. *Water Resource*. 30: 2931–2935.

Haverkamp R, J. L. Arru'e, J. P. Vandervaere, I. Braud, G. Boulet, J. P. Laurent, A. Taha, P. J. Ross and R. Angulo-Jaramillo . 1996. Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): Experimental study, analysis and modeling Project UE n8 EV5C-CT 92 00 90

Krause, P., D. P. Boyle and F. Base . 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. *Advances in Geosciences*. 5:89-97.

Lassabatere. L., R., Angulo-Jaramillo, J. M, Soria Ugalde, R., I. Cuenca Braud and R. Haverkamp . 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. *Soil Sci. Soc. Am*. 70: 521–532.

Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, D. Yilmaz and T. Winiarski . 2013. BEST method: characterization of soil unsaturated hydraulic properties. In: Caicedo, et al. (Eds.), *Advances in Unsaturated Soils*. CRC Press.

Mubarak I, J.C, Mailhol R, Angulo-Jaramillo P, Ruelle P Boivin and M Khaledian (2009) temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma* 150:158–165.

Mubarak, I., R., Angulo-Jaramillo, J. C, Mailhol, P, Ruelle M. Khaledian, and M. Vauclin (2010) Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? *Agricultural Water Manage*. 97: 1517–1526.

Reynolds. W. D., and D. E. Elrick . 1990. Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America*. 54:1233–1241.

Reynolds, W. D. and D. E. Elrick . 2002. 3.4.1.1 Principles and parameter definitions. In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Book Series, No. 5. Soil Sci. Soc. Am. Madison Wisconsin, USA: 797–801.

Vandervaere J. P., M. Vauclin and D. E. Elrick. 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. *Soil Science Society of America*. 64: 1263–1272.

Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, and B. Sanden . 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. Soil Science Society of America. 63:788–792.

Wooding R. A . 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water resource 4:1259-1273

Xu, X., G. Kiely and G. Lewis . 2009. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. Soil Use Manage. 25:354–361.

Xu X, C. Lewis, W. Liu, J. D. Albertson, and G. Kiely. 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. Agriculture Water Manage. 107:34–41.

Yilmaz, D., L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, D. Deneele and M. Legret. 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. Vadose Zone. 9:107–116.

Comparison of modified CL and DL methods with the main Beerkan infiltration experiment algorithm (BESTslope) for determining saturated hydraulic conductivity

Tarokh Ahmady¹, Peyman Afrasiab², Masoomeh Delbari³

Abstract:

The Beerkan single ring infiltration experiment is a simple and inexpensive method for estimating soil hydraulic properties and is gaining scientist's attention in recent years. The purpose of present study was to compare the performance of modified forms of CL (cumulative linearization) and DL (derivative linearization) methods with the main Beerkan algorithm (i.e. BESTslope) in estimating saturated hydraulic conductivity (K_s) and the value of α (i.e. the ratio of gravity force to the capillary force) in the modified forms of CL and DL. For this purpose a number of 113 Beerkan infiltration experiments were carried out in Sistan Dam' research field. The negative values of K_s estimated by the BESTslope algorithm were eliminated and the 101 remaining experiments were selected for final analysis. According to the results, K_s values estimated by DL and CL were negative in most Beerkan experiments while the modified DL and CL methods resulted in positive values in all cases. The results were compared using a weighted coefficient of determination (ω^2). According to the results, the K_s values estimated by the modified DL were more similar to those obtained by BESTslope algorithm ($\omega^2=0.8135$) when compared to those obtained by the CL method ($\omega^2=0.7506$). Besides, the difference between K_s values estimated by BESTslope algorithm and the modified DL or CL methods decreased as the percentage of clay increased. The calculated value of α in modified DL ($\alpha=0.019$) was more similar to that reported previous studies (in similar soil texture, i.e. loam and sandy loam) than that obtained in CL model ($\alpha=0.023$).

Keywords: Beerkan infiltration experiment, Sorptivity, Gravity force, Capillary force, Saturated hydraulic conductivity

¹:First Author, PhD student , University of Zabol ,ta.ahmady.ah@gmail.com

²:Second Author (Corresponding Author), Associate Professor, University of Zabol, peyman.afraziab@uoz.ac.ir ; p_afraziab@yahoo.com

³:Third Author, Associate Professor, University of Zabol, masoomeh.delbari@uoz.ac.ir