

## بررسی تأثیر پارامتر پیوستگی منافذ و ارائه مدلی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک

بهزاد قنبریان علویجه و فریبرز عباسی<sup>۱\*</sup>

دانشجوی دکتری محیط زیست، دانشکده علوم زمین و محیط زیست، دانشگاه ایالتی رایت، ایالات متحده آمریکا؛

Ghanbarian@gmail.com

عضو هیأت علمی (دانشیار) موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (کرج)؛ abbasi\_Fariborz@yahoo.com

### چکیده

هدایت هیدرولیکی غیراشباع از جمله ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بوده که از یک سو در بسیاری از مطالعات انتقال آب و املاح به کار برده می‌شود و از سوی دیگر اندازه‌گیری مستقیم آن بسیار وقت گیر و پرهزینه است. در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر پارامتر پیوستگی منافذ در مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع بوردین- بروکز- کوری از تعداد ۵۹ نمونه خاک جمع‌آوری شده از بانک اطلاعاتی GRIZZLY استفاده گردید. این بانک اطلاعاتی شامل نمونه‌های خاک‌هایی از ایالات متحده آمریکا، اسپانیا، هلند و فرانسه و ... بوده که توسط هاورکمپ و همکاران (۱۹۹۷) جمع‌آوری شده است. ابتدا با انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای حساس مدل بوردین- بروکز- کوری تعیین شدند. سپس، به منظور بررسی تأثیر پارامتر پیوستگی منافذ مقادیر مختلف این پارامتر شامل ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۰/۵، ۰، ۱- و ۲- در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تحلیل حساسیت مدل بوردین- بروکز- کوری نشان داد که مدل حساسیت بیشتری نسبت به دو پارامتر رطوبت اشباع و شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک دارد. این در حالیست که این مدل نسبت به دو پارامتر پیوستگی منافذ و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حساسیت کمتری دارد. همچنین پارامترهای آماری محاسبه شده در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک همچون مجموع قدرمطلق خطاها (SAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب آکائیک (AIC) و ضریب همبستگی هم‌شیبی ( $r_c$ ) نشان دادند که خطای مدل بوردین- بروکز- کوری به ازای مقدار ۲ برای پارامتر پیوستگی منافذ از سایر مقادیر آن کمتر می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که پارامتر پیوستگی منافذ با توان مدل بوردین- بروکز- کوری با  $R^2=0.96$  به صورت خطی همبستگی دارد. بر این اساس، پارامتر پیوستگی منافذ از مدل بوردین- بروکز- کوری حذف و مدل تجربی جدیدی به منظور پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک توسعه و با استفاده از ۳۳ نمونه خاک بانک اطلاعاتی UNSODA مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده بهتر از مدل بوردین- بروکز- کوری (با یک پارامتر بیشتر) هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را پیش‌بینی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: اعوجاج، آنالیز حساسیت، مدل بوردین- بروکز- کوری، هدایت هیدرولیکی غیراشباع

### مقدمه

امروزه حفاظت از محیط‌زیست یکی از مهمترین پروژه‌های تحقیقاتی در دنیا به شمار می‌آید. این در حالی

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، ص.ب. ۳۱۵۸۵-۸۴۵ موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

\* دریافت: دی ۱۳۸۸ و پذیرش: اسفند ۱۳۸۹

معادله (۲) پیشنهاد نمودند. هر چند محدوده تغییرات ۰/۵۶ تا ۰/۸۰ ( $0.56 < T < 0.80$ ) در منابع مختلف گزارش شده است (بیر، ۱۹۸۸).

در برخی موارد، پارامتر اعوجاج عکس آنچه که در معادله (۲) ارائه شد، تعریف می‌شود. به طوری که مقدار آن همیشه بزرگتر از یک ( $T > 1$ ) و در مواردی حتی بیشتر از ۲ گزارش شده است (هیلل، ۲۰۰۴).  
برای تخمین پارامتر اعوجاج در محیط‌های اشباع ( $T_s$ ) می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود (گیلیال و تریپاته<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵):

$$\left(\frac{1}{T_s}\right)^2 = \left(\frac{L}{L_a}\right)^2 = \frac{\phi E_s}{E} \quad (3)$$

که در آن،  $T_s$  پارامتر اعوجاج در حالت رطوبت اشباع،  $\phi$  تخلخل خاک،  $E_s$  مقاومت الکتریکی محیط متخلخلی است که خلل و فرج آن توسط مایعی با مقاومت الکتریکی  $E$  اشباع شده‌اند.

در بیشتر مطالعات، پارامتر اعوجاج به صورت تابعی از رطوبت خاک در نظر گرفته شده و به شکل زیر تعریف می‌شود (بوردین، ۱۹۵۳؛ معلم، ۱۹۷۶):

$$\frac{T(\theta)}{T_s} = S_e^l = \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^l \quad (4)$$

که در آن،  $T(\theta)$  پارامتر اعوجاج در حالت رطوبت غیراشباع،  $T_s$  پارامتر اعوجاج در حالت رطوبت اشباع،  $S_e^l$  درجه موثر اشباع،  $l$  پارامتر تجربی پیوستگی منافذ،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده،  $\theta_s$  رطوبت اشباع و  $\theta$  رطوبت خاک می‌باشد. برای پارامتر پیوستگی منافذ ( $l$ ) در مطالعات مختلف، مقادیر مختلفی برابر ۱ (کراوچنکو و ژنگ<sup>۲</sup>، ۱۹۹۷)، ۲ (بوردین، ۱۹۵۳؛ زو، ۲۰۰۴)، ۰/۵ (معلم، ۱۹۷۶) و ۱- (شاپ و لیج<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰) پیشنهاد شده است.

شاپ و لیج (۲۰۰۰) مقدار پارامتر پیوستگی منافذ برابر ۱- را برای مدل معلم-وان گنوختن (وان گنوختن، ۱۹۸۰) پیشنهاد نمودند. هر چند مقادیر منفی پارامتر پیوستگی منافذ توجیه فیزیکی نداشته و اساس فیزیکی معادله ون گنوختن- معلم را زیر سوال می‌برد (شاپ و لیج، ۲۰۰۰). در مطالعه‌ای دیگر، شینومیا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۰۱) مقدار ۰/۷۷- را برای پارامتر پیوستگی منافذ در مدل ون- گنوختن- معلم پیشنهاد نمودند.

است که مواد آلاینده تولید شده توسط کارخانجات صنعتی و انتقال این آلاینده‌ها به خاک، رودخانه‌ها و آبهای- زیرزمینی مشکلات عظیم زیست محیطی را فراهم نموده است. در این راستا، استفاده از مدل‌هایی به منظور بررسی حرکت و انتقال املاح در خاک، محاسبه مدت زمان رسیدن مواد آلاینده به منابع آب زیرزمینی و میزان آلاینده‌گی و ... ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مهمترین معادلات حاکم بر جریان در حالت غیر همگام، معادله ریچاردز (۱۹۳۱) بوده که به منظور حل این معادله (معادله ۱) تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی غیراشباع، میزان رطوبت خاک و ... ضروری می‌باشد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K(h)\nabla H) \quad (1)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت خاک،  $t$  زمان،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع و  $\nabla H$  گرادیان هیدرولیکی می‌باشند. هرچند، این معادله تغییرات دمائی محیط و پدیده پس ماند را در نظر نمی‌گیرد، لیکن اساس بیشترین روش‌های تحلیلی و عددی ارائه شده می‌باشد.

از یک سو اندازه گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک وقت گیر و پرهزینه بوده و از سوی دیگر تغییرات زمانی و مکانی این پارامتر نیاز به مدلی جامع و دقیق برای پیش‌بینی این پارامتر در محدوده وسیعی از تغییرات بافت، ساختمان و دیگر ویژگی‌های خاک را می‌طلبد. از جمله مدل‌های تجربی به منظور پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک می‌توان به مدل گاردنر (۱۹۵۸) اشاره نمود. علاوه بر مدل‌های تجربی، مدل‌هایی نیز بر مبنای توزیع اندازه خلل و فرج خاک مانند مدل پورسل (۱۹۴۹)، چایلدز و کولیس-جورج (۱۹۵۰)، بوردین (۱۹۵۳)، معلم (۱۹۷۶) و هافمن و همکاران (۱۹۹۹) و یا بر اساس منحنی دانه‌بندی ذرات خاک همچون مدل آریا و همکاران (۱۹۹۹) ارائه شده‌اند.

پارامتر اعوجاج ( $T$ ) از جمله پارامترهای مجهول مدل‌های پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک همچون بوردین (۱۹۵۳)، معلم (۱۹۷۶) و هافمن و همکاران (۱۹۹۹) بوده که به صورت تئوریک به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$T = \frac{L_a}{L} \quad (2)$$

که در آن،  $L$  طول واقعی مسیر جریان و  $L_a$  طول ظاهری یا به عبارت دیگر طول نمونه است. طبق تعریف فوق، پارامتر اعوجاج ( $T$ ) همیشه کوچکتر از یک می‌باشد (کرکهام، ۲۰۰۵).

کارمن (۱۹۳۷) و بیر و همکاران (۱۹۶۸) به ترتیب مقادیر ۰/۷۱ و ۰/۴۰ را برای پارامتر اعوجاج ( $T$ ) در

1. Ghilyal and Tripathe

2. Kravchenko and Zhang

3. Schaap and Leij

4. Shinomya et al.

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = S_e^l \frac{\int_0^\theta d\theta/h^2}{\int_0^{\theta_s} d\theta/h^2} \quad (۸)$$

در رابطه فوق،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $K(\theta)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع،  $h$  مکش ماتریک و  $l$  پارامتر پیوستگی منافذ می‌باشند. برای پارامتر پیوستگی منافذ مقادیر صفر،  $\frac{4}{3}$  و ۱ به ترتیب توسط چایلدز و کولیس - جورج (۱۹۵۰)، میلنگتون و کورک (۱۹۶۱) و کونز و همکاران (۱۹۶۸) پیشنهاد شده است (معلم، ۱۹۷۶). با قرار دادن مکش ماتریک ( $h$ ) از معادله بروکز - کوری (معادله ۷) در مدل بوردین، مدل بوردین - بروکز - کوری به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (۹)$$

که در آن،

$$\eta = \frac{2}{\lambda} + l + 1 \quad (۱۰)$$

اورجانو<sup>۱</sup> (۱۹۵۰) و ایرمی<sup>۲</sup> (۱۹۵۴) به ترتیب مقادیر ۳/۵ و ۳ را برای پارامتر  $\eta$  پیشنهاد نمودند. معلم (۱۹۷۸) برای پارامتر  $\eta$  محدوده ۱ تا ۲۴/۵ را به ترتیب برای خاک‌های درشت بافت و ریز بافت گزارش نمود.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از ۵۹ نمونه خاک مختلف جمع آوری شده از بانک اطلاعاتی GRIZZLY (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۹۷) با ۹ بافت خاک استفاده گردید. این بانک اطلاعاتی در حالت کلی مشتمل بر ۶۶۰ نمونه خاک از ایالات متحده آمریکا، اسپانیا، هلند، فرانسه و ... بوده که توسط هاورکمپ و همکاران (۱۹۹۷) جمع‌آوری شده است. در این بانک اطلاعاتی داده‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع تنها برای ۵۹ نمونه خاک موجود می‌باشد. ویژگی‌های هیدرولیکی نمونه خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل درصد رطوبت اشباع، هدایت هیدرولیکی اشباع و ... در جدول (۱) ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه خاک‌های استفاده شده محدوده وسیعی از درصد رس (۵۷-۰) و درصد شن (۱۰۰-۱/۲) را در بر می‌گیرند. شکل (۱) نیز توزیع نمونه خاک‌ها را در مثلث بافت نشان می‌دهد. برای اطلاعات بیشتر در رابطه با بانک اطلاعاتی GRIZZLY، تنوع نمونه خاک‌ها و پارامترهای اندازه‌گیری شده موجود به هاورکمپ و همکاران (۲۰۰۵) مراجعه شود.

کاه و ون گنوختن (۱۳۷۱) نیز برای پارامتر پیوستگی منافذ در خاک‌های رسی، لومی و ماسه‌ای به ترتیب مقادیر ۲/۵-، ۰/۵ و ۱/۵ تا ۶/۵ را در مدل ون-گنوختن - معلم توصیه نمودند.

قنبریان علویجه و شمسایی (۱۳۸۷) با آنالیز ۲۰ نمونه خاک از بانک اطلاعاتی UNSODA نشان دادند که مقدار ۲ برای پارامتر پیوستگی منافذ در مدل بوردین - بروکز - کوری منجر به نتایج بهتری در پیش بینی منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک نسبت به مقدار  $l=1$  می‌شود.

میلنگتون و کورک (۱۹۶۱) رابطه تجربی دیگری برای اعوجاج در خاک غیراشباع به شکل زیر ارائه نمودند:

$$T(\theta) = \frac{\theta^{7/3}}{\phi^2} \quad (۵)$$

که در آن،  $\theta$  درصد رطوبت حجمی و  $\phi$  تخلخل خاک می‌باشد.

کوری (۱۹۷۷) نیز معادله‌ای را به منظور تخمین اعوجاج در محیط متخلخل غیراشباع به شکل زیر ارائه نمود:

$$\frac{T_s}{T(\theta)} = \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{-2} = S_e^{-2} \quad (۶)$$

هدف اصلی از این مطالعه، بررسی تأثیر پارامتر پیوستگی منافذ ( $l$ ) در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک و پیشنهاد یک معادله جدید برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع در خاک‌های با بافت متوسط و سنگین می‌باشد.

### تئوری

بروکس و کوری (۱۹۶۴) معادله‌ای به منظور مدل نمودن منحنی مشخصه رطوبتی خاک به شکل زیر ارائه نمودند:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h}{h_b} \right)^{-\lambda} \quad (۷)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت خاک در مکش  $h$  (کیلوپاسکال)،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده،  $\theta_s$  رطوبت اشباع،  $h_b$  مکش در نقطه ورود هوا (کیلوپاسکال) و  $\lambda$  پارامتر توزیع اندازه خلل و فرج خاک می‌باشد.

بوردین (۱۹۵۳) با استفاده از مدل توزیع اندازه خلل و فرج خاک، مدل زیر را برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع ارائه نمود:

1. Averjanov  
2. Irmay

به منظور ارزیابی مدل بوردین- بروکز-کوری به ازای مقادیر مختلف پارامتر پیوستگی منافذ از پارامترهای آماری مجموع قدرمطلق خطاها (SAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب آکائیک (AIC) استفاده گردید:

$$SAE = \sum_{i=1}^n |(K_{est})_i - (K_{meas})_i| \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((K_{est})_i - (K_{meas})_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$AIC = n \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n ((K_{est})_i - (K_{meas})_i)^2}{n} \right) + 2p \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $K_{est}$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع تخمین زده شده،  $K_{meas}$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده در بانک اطلاعاتی GRIZZLY،  $n$  تعداد نقاط اندازه‌گیری و  $p$  تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. مقادیر کوچکتر (منفی‌تر) ضریب آکائیک دلالت بر دقت بالاتر مدل دارند.

لین<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) در مطالعه‌ای نشان داد که مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده بر اساس پارامترهای آماری همچون ضریب همبستگی پیرسون (R)، آزمون‌های آماری (t-test)، شیب خط و مقدار عرض از مبدا مختصات می‌تواند منجر به قضاوت نادرستی شود. بنابراین پارامتر ضریب همبستگی هم‌شیبی<sup>۲</sup> ( $r_c$ ) به شکل زیر ارائه شد (لین، ۱۹۸۹):

$$r_c = \frac{2S_{xy}}{S_x^2 + S_y^2 + ((K_{est})_{ave} - (K_{meas})_{ave})^2} \quad (14)$$

در رابطه فوق  $S_{xy}$ ،  $S_x$  و  $S_y$  عبارتند از:

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n ((K_{est})_i - (K_{est})_{ave})(K_{meas})_i - (K_{meas})_{ave}}{n}$$

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((K_{est})_i - (K_{est})_{ave})^2}{n} \quad (16)$$

به منظور تعیین حساسیت پارامترهای مدل بوردین-بروکز-کوری، تحلیل حساسیت بر روی ۴ پارامتر ورودی مدل شامل رطوبت اشباع ( $\theta_s$ )، شاخص توزیع اندازه خلل و فرج ( $\lambda$ )، پارامتر پیوستگی منافذ ( $l$ ) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) انجام گرفت. بدین منظور در ابتدا برای پارامترهای رطوبت اشباع، شاخص توزیع اندازه خلل و فرج، پارامتر پیوستگی منافذ و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به ترتیب مقادیر اولیه ۰/۵، ۰/۵، ۱ و ۲۵۰ (سانتی‌متر در روز) در نظر گرفته شدند. این مقادیر دلخواه، مقادیر متوسط اولیه بوده و هر مقدار دیگری برای این پارامترها می‌توان در نظر گرفت. برای تعیین حساسیت یک پارامتر به عنوان مثال رطوبت اشباع، معادل ۳۰، ۲۰ و ۱۰٪ پارامتر مذکور ( $0.30_s$ ،  $0.20_s$ ،  $0.10_s$ ) با آن پارامتر (رطوبت اشباع) اضافه و کم شده و سپس مقادیر جدید رطوبت اشباع ( $1.30_s$ ،  $1.20_s$ ،  $1.10_s$ ،  $0.90_s$ ،  $0.80_s$ ،  $0.70_s$ ) به همراه مقادیر اولیه و ثابت سه پارامتر دیگر ( $K_s=250$ ،  $l=1$ ،  $\lambda=0.5$ ) به مدل بوردین-بروکز-کوری وارد گردید تا تأثیر این پارامتر (رطوبت اشباع) بر روی مدل مشخص گردد (عباسی، ۱۳۸۶). شایان ذکر است که در تحلیل حساسیت مذکور، تأثیر هر پارامتر به صورت جداگانه بر روی مدل مورد مطالعه قرار گرفته و اثر متقابل پارامترهای مدل بر روی یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شود.

در بانک اطلاعاتی GRIZZLY مقادیر پارامترهای  $\lambda$  و  $h_b$  با برآزش مدل بروکز-کوری (معادله ۷) به داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک، مقدار  $\eta$  با برآزش مدل بوردین-بروکز-کوری (معادله ۹) به داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، مقادیر اندازه‌گیری شده درصد رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گزارش شده‌اند. لازم به ذکر است که در این بانک اطلاعاتی مقدار  $\theta_r$  برابر صفر در نظر گرفته شده است (هاورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵). به منظور تخمین منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مکش‌های مختلف با استفاده از مدل بوردین-بروکز-کوری (معادله ۹) تخمین زده شدند.

از آنجائیکه در منابع (کراوچنکو و ژنگ، ۱۹۹۷؛ بوردین، ۱۹۵۳؛ زو، ۲۰۰۴؛ معلم، ۱۹۷۶؛ شاپ و لیج، ۲۰۰۰)، مقادیر مختلفی از پارامتر پیوستگی منافذ در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک استفاده شده، مقادیر متفاوتی از این پارامتر مشتمل بر ۳، ۲، ۱، ۰/۵، صفر، ۰/۵، -۱ و -۲ در مدل بوردین-بروکز-کوری مورد آزمون قرار گرفتند.

1. Lin

2. Concordance correlation coefficient

در رطوبت‌های نزدیک به اشباع با دقت بالاتری نسبت به رطوبت‌های پایین‌تر پیش‌بینی می‌نماید. نتایج مشابهی توسط ژوانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) مبنی بر بالاتر بودن دقت مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در رطوبت‌های نزدیک به اشباع گزارش شده است. علت این امر وجود پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به عنوان یک نقطه اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌باشد.

شکل (۳) نشان می‌دهد که به طور کلی مدل بوردین-بروکز-کوری به ازای مقادیر مختلف پارامتر پیوستگی منافذ، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌نماید. اگرچه نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامتر پیوستگی منافذ از حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترهای ورودی مدل بوردین-بروکز-کوری همچون رطوبت اشباع، شاخص توزیع اندازه خلل و فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برخوردار است، با کاهش پارامتر پیوستگی منافذ از مقدار ۲+ تا ۲- مقدار پارامترهای آماري SAE، RMSE و AIC به مقدار قابل توجهی افزایش و مقدار پارامتر  $T_c$  به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، تغییر پارامتر پیوستگی منافذ از ۲+ تا ۲- منجر به افزایش مقدار پارامتر SAE از ۱۷۱/۵ به ۷۹۹/۴، RMSE از ۱/۴۹ به ۶/۸۸ (سانتی‌متر بر ساعت) و AIC از ۳۸۰/۲ به ۱۸۱۸/۶ و کاهش پارامتر ضریب همبستگی هم‌شیبی از ۰/۹۰۱ به ۰/۴۹۰ می‌گردد.

شکل (۳) همچنین نشان می‌دهد که افزایش پارامتر پیوستگی منافذ از مقدار ۲ به ۳ منجر به افزایش خطای مدل بوردین-بروکز-کوری می‌شود.

نتایج این مطالعه بر روی ۵۹ نمونه خاک نشان می‌دهد که مقدار ۲+ برای پارامتر پیوستگی منافذ بالاترین دقت را در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک دارد. نتایج بدست آمده با نتایج شاپ و لیچ (۲۰۰۰) مبنی بر اینکه مقادیر منفی پارامتر پیوستگی منافذ منجر به نتایج بهتری در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک می‌شود، مغایرت دارد. هرچند مطالعه شاپ و لیچ (۲۰۰۰) بر روی مدل ون‌گنوختن-معلم انجام شده است.

معلم (۱۹۷۶) در مدل خود برای ۴۵ نمونه خاک با بافت متفاوت برای پارامتر پیوستگی منافذ مقدار ۰/۵ را پیشنهاد نمود. این مدل به شکل زیر است:

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{2}{\lambda} + 2} \quad (18)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((K_{meas})_i - (K_{meas})_{ave})^2}{n} \quad (17)$$

مقدار ضریب همبستگی هم‌شیبی ( $r_c$ ) برابر با ۱ و ۱- به ترتیب بیانگر تطابق کامل و عدم تطابق کامل داده‌های تخمین زده شده با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. در این مطالعه علاوه بر پارامترهای آماري SAE، RMSE و AIC از پارامتر ضریب همبستگی هم‌شیبی نیز استفاده شد.

## نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که حساس‌ترین پارامترهای مدل بوردین-بروکز-کوری رطوبت اشباع و شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک می‌باشند. این در حالیست که این مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر پیوستگی منافذ حساسیت کمتری دارد. عباسی و همکاران (۲۰۰۳) نیز نشان دادند که مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع ون‌گنوختن-معلم کمترین حساسیت را نسبت به پارامتر پیوستگی منافذ دارد.

نتایج همچنین نشان می‌دهند هنگامیکه مقدار  $\lambda$  بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود، مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شوند (شکل ۲-ج). همچنین حساسیت مدل بوردین-بروکز-کوری نسبت به این پارامتر در ابتدا و انتهای منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک کمتر از ناحیه میانی این منحنی می‌باشد. شایان ذکر است که رابطه معکوسی بین رطوبت اشباع خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع وجود دارد. بدین معنا که وقتی رطوبت اشباع خاک کمتر از مقدار اولیه ( $\theta_s=0.5$ ) برآورد گردد، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بیشتر از مقدار اولیه در مدل تحلیل حساسیت تخمین زده می‌شود (شکل ۲-پ). براساس مدل بوردین-بروکز-کوری (معادله ۹) هنگامیکه رطوبت اشباع خاک افزایش می‌یابد، با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای مدل مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل حساسیت همچنین نشان می‌دهد که حساسیت مدل بوردین-بروکز-کوری در ناحیه اشباع خاک به پارامتر رطوبت اشباع بیش از ناحیه خشک منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک می‌باشد (شکل ۲-پ).

نتایج حاصل از پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در مقابل هدایت هیدرولیکی غیراشباع اندازه‌گیری شده به ازای مقادیر مختلف پارامتر پیوستگی منافذ ( $I$ ) در شکل (۳) در مقیاس لگاریتمی نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۳)، در حالت کلی مدل بوردین-بروکز-کوری مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را

<sup>1</sup> Zhuang et al.

می‌باشد. مزیت رابطه تجربی (۲۰) نسبت به رابطه (۹) در این است که مقدار پارامتر پیوستگی منافذ برای تمامی خاک‌ها ثابت در نظر گرفته نمی‌شود. بلکه مقدار آن به صورت تجربی و با استفاده از ۵۹ نمونه خاک به نوعی در معادله (۲۰) لحاظ گردیده است. هر چند که رابطه (۲۰) تنها در مواردی قابل استفاده است که مقدار  $\lambda$  کوچکتر از  $0/424$  باشد یا به عبارت بهتر برای خاک‌های متوسط و سنگین (بر اساس جدول ۱ در این مطالعه و جدول ۲ در مقاله رالز و همکاران، ۱۹۸۲). در غیر این صورت، توان معادله (۲۰) عددی منفی بوده و نمی‌تواند تخمین درستی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک داشته باشد.

برای ارزیابی معادله (۲۰)، از ۳۳ نمونه خاک بانک اطلاعاتی UNSODA (لیچ و همکاران، ۱۹۹۶) استفاده و نتایج پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. همچنین، با استفاده از معادله (۹) به ازای مقدار ۲ برای پارامتر پیوستگی منافذ، مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک پیش‌بینی شده و با نتایج حاصل از معادله تجربی (۲۰) مقایسه شدند. نتایج این مقایسه‌ها در شکل (۵) در مقیاس لگاریتمی نشان داده شده‌اند. شکل (۵ - الف) نشان می‌دهد که مدل تجربی ارائه شده در رطوبت‌های بالا مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی نموده، در حالی‌که در رطوبت‌های پایین مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع را چندین مرتبه کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. مقادیر پارامترهای آماری SAE، RMSE، AIC و  $r_c$  به ترتیب برابر  $0/570$ ،  $2914/3$ ،  $8/3$ ،  $836/2$  و  $0/570$  محاسبه شدند.

این در حالی است که معادله (۹) (شکل ۵ - ب) در بیشتر موارد خصوصاً در رطوبت‌های بالا مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع را چندین مرتبه (در مواردی  $10^5$  برابر) بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی نموده و در رطوبت‌های پایین مقدار هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌نماید. مقادیر پارامترهای آماری SAE، RMSE، AIC و  $r_c$  به ترتیب برابر  $0/308$ ،  $3660/7$ ،  $14/4$ ،  $1812/5$  محاسبه شدند. در حقیقت رفتار دو مدل در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک مشابه یکدیگر بوده با این تفاوت که مدل تجربی ارائه شده (معادله ۲۰) مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را در رطوبت‌های بالاتر با دقت بیشتری برآورد می‌کند. بنابراین براساس پارامترهای آماری محاسبه شده برای دو مدل مذکور مبنی بر اینکه مدل تجربی ارائه شده در این مطالعه با دقت بالاتری نسبت به مدل بوردین-بروکز-کوری هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را

مقدار پیش‌نهادهی  $0/5$  در معادله (۱۲) معادل حالتی است که مقدار پارامتر پیوستگی منافذ در رابطه (۹) برابر  $1/5$  باشد که با نتایج بدست آمده در این مطالعه ( $l=2$ ) مطابقت دارد.

با استفاده از رابطه (۱۰) و مقادیر گزارش شده  $\eta$  و  $\lambda$  در بانک اطلاعاتی GRIZZLY، مقادیر پارامتر پیوستگی منافذ برای ۵۹ نمونه خاک برآورد شدند. برای ۵ نمونه خاک با بافت شنی، لوم شنی و شن لومی مقدار منفی پارامتر پیوستگی منافذ در محدوده  $-0/74$  تا  $-3/4$  بدست آمد. در شکل (۴) رابطه بین پارامتر پیوستگی منافذ با سایر پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی خاک بررسی شده است. همانطور که در این شکل مشخص می‌باشد، با افزایش درصد رس و سیلت و کاهش درصد شن، پارامتر پیوستگی منافذ افزایش می‌یابد. بدین معنا که با سنگین‌تر شدن بافت خاک و افزایش تخلخل، پارامتر پیوستگی منافذ در خاک افزایش می‌یابد. همین‌طور، با کاهش شاخص توزیع اندازه خلل و فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، پارامتر پیوستگی منافذ افزایش می‌یابد. حتی با حذف مقادیر  $\lambda$  بزرگتر از ۱ (خاک‌های با بافت شنی)، همچنان روند کاهشی پارامتر پیوستگی منافذ ( $l$ ) به ازای افزایش مقادیر  $\lambda$  در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

شکل (۴) نشان می‌دهد هنگامی که  $\lambda$  افزایش می‌یابد، مقدار  $l$  کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش  $\eta$  مقدار  $l$  افزایش می‌یابد. این مطلب بیانگر رابطه معکوس بین  $\lambda$  و  $\eta$  می‌باشد. براتسائر<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) نیز برای ۴۳ نمونه خاک رابطه ای معکوس با ضریب همبستگی  $R=0.75$  میان ضریب  $\eta$  و توان مدل بروکز و کوری ( $\lambda$ ) گزارش نموده است.

نتایج نشان داد که پارامتر پیوستگی منافذ با ضریب  $\eta$  (توان مدل بوردین-بروکز-کوری) با همبستگی بالایی ( $R^2=0.96$ ) به صورت خطی رابطه دارد:

$$l = 0.805\eta - 5.716 \quad (19)$$

با ترکیب معادله‌های (۹)، (۱۰) و (۱۹) پارامتر پیوستگی منافذ در معادله بوردین-بروکز-کوری حذف و معادله تجربی زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\frac{10.27}{\lambda} - 24.22} \quad (20)$$

در معادله فوق، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با استفاده از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی و بدون نیاز به تخمین پارامتر پیوستگی منافذ قابل پیش‌بینی

<sup>1</sup> Brutsaert

پیوستگی منافذ نتایج بهتری در مدل بوردین- بروکز-کوری حاصل می‌گردد. نتایج همچنین نشان داد که پارامتر پیوستگی منافذ با توان رابطه بوردین- بروکز-کوری با ضریب همبستگی بالایی ( $R^2=0/96$ ) رابطه خطی دارد. بر این اساس، با حذف پارامتر پیوستگی منافذ در مدل بوردین- بروکز- کوری رابطه تجربی جدیدی به منظور پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک برای خاک‌های با بافت متوسط و سنگین پیشنهاد و مورد آزمون قرار گرفت. ارزیابی مدل پیشنهادی با استفاده از ۳۳ نمونه خاک بانک اطلاعاتی UNSODA نشان داد که مدل ارائه شده با دقت بالاتری نسبت به مدل بوردین- بروکز- کوری (با یک پارامتر ورودی بیشتر) هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را پیش‌بینی می‌نماید.

پیش‌بینی می‌نماید، استفاده از این مدل تجربی در رطوبت‌های بالا و نزدیک به اشباع پیشنهاد می‌گردد. این در حالی است که مدل پیشنهادی به یک پارامتر ورودی کمتر نیز نیاز دارد.

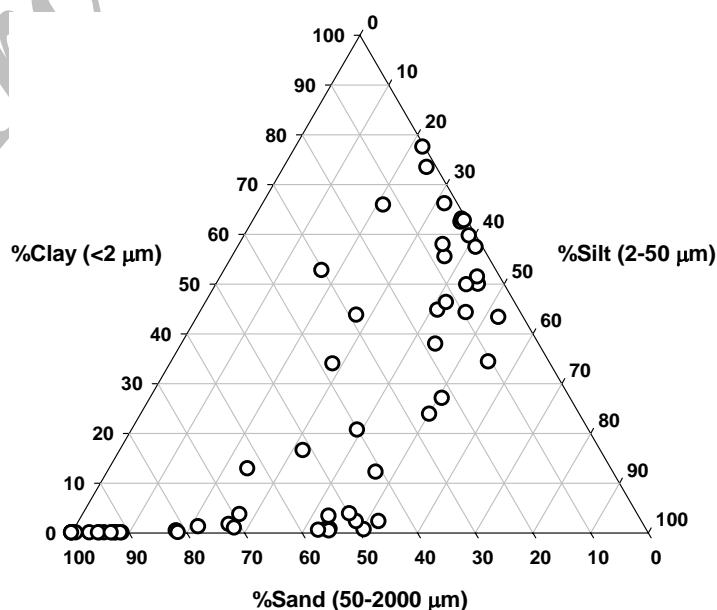
### نتیجه‌گیری

در این مطالعه اهمیت پارامتر پیوستگی منافذ در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در مدل بوردین- بروکز-کوری بررسی گردید. نتایج تحلیل حساسیت مدل بوردین- بروکز- کوری نشان داد که حساسیت این مدل به پارامتر پیوستگی منافذ کمتر از سایر پارامترها همچون رطوبت اشباع، شاخص توزیع اندازه خلل و فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که به ازای مقدار ۲ برای پارامتر

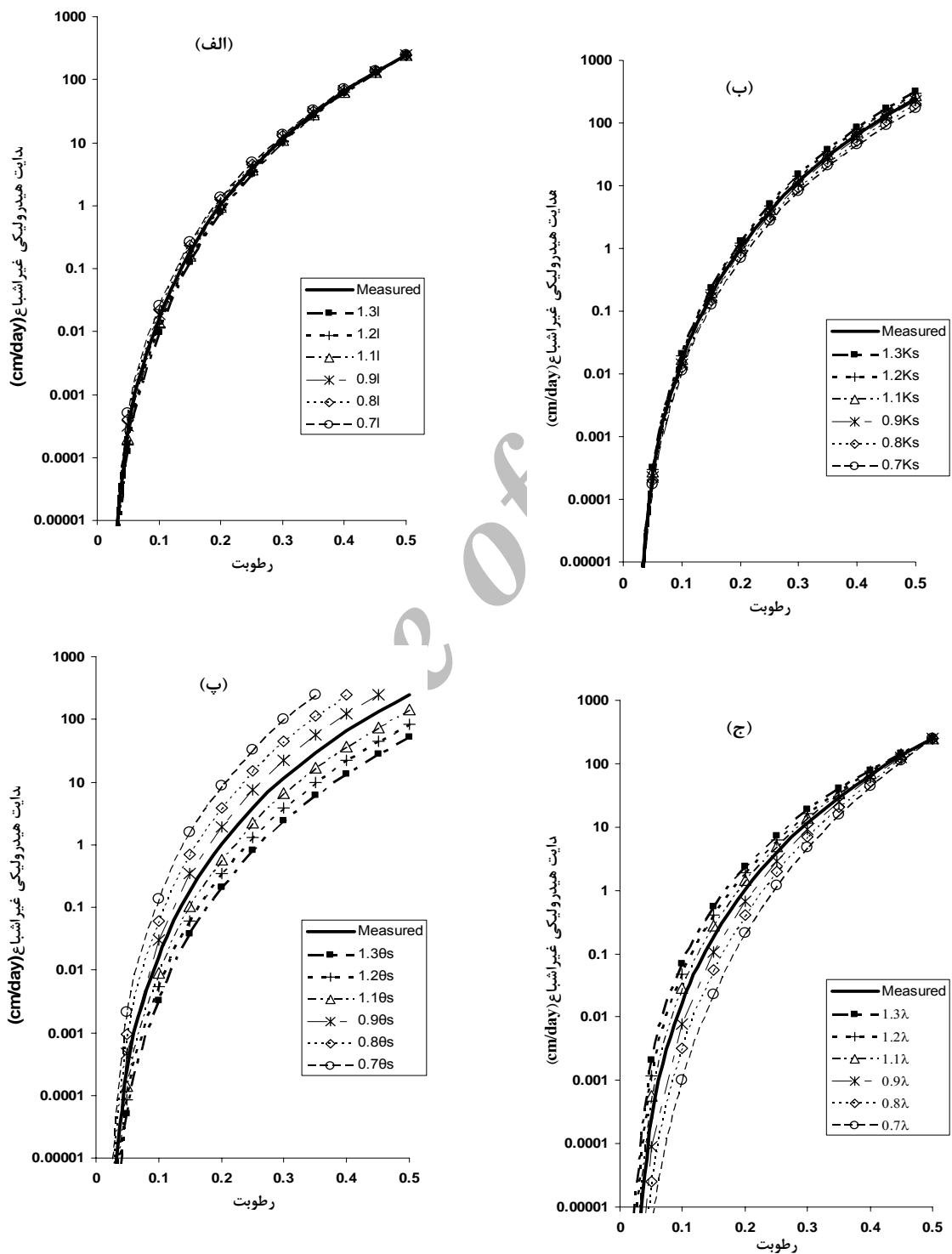
جدول ۱- محدوده پارامترهای مربوط به نمونه خاکهای مورد مطالعه در بانک اطلاعاتی GRIZZLY

$K_s$ (cm/h)	$\lambda$	$h_b$ (kPa)	$\theta_s$ ( $cm^3 cm^{-3}$ )	درصد شن	درصد رس	تعداد	بافت خاک
۰/۰۰۹-۵۳/۲	۰/۲۵۳-۲/۵۹۱	۱/۹-۹/۲	۰/۲۱-۰/۴۱	۹۱-۱۰۰	۰-۰/۰۲	۱۵	شنی
۰/۰۹۵-۲/۸	۰/۱۹۲-۰/۵۲۳	۱/۹-۸/۵	۰/۲۷-۰/۴۲	۷۱-۸۲	۰/۰۲-۲	۵	شن لومی
۰/۰۳-۶۷/۲	۰/۱۸۴-۰/۵۹۲	۱-۲۴/۴	۰/۲۰-۰/۴۰	۴۹-۶۸	۰/۴-۱۳	۹	لوم شن
۰/۰۷۲-۰/۵۱۹	۰/۱۸۱-۰/۲۱۵	۴/۹-۱۱/۵	۰/۲۷-۰/۴۴	۴۰-۵۱	۱۲-۲۱	۳	لوم
۰/۰۶۰-۰/۲۸۴	۰/۲۰۸-۰/۳۰۰	۴/۳-۱۵/۴	۰/۳۴-۰/۴۴	۲۶-۴۹	۰/۶۲-۲۴	۳	لوم سیلتی
۰/۰۰۱-۰/۲۵۱	۰/۰۸۰-۰/۱۵۴	۴/۴-۸/۵	۰/۴۴-۰/۵۶	۱۱-۱۸	۳۴-۳۸	۲	لوم رسی سیلتی
۰/۰۴۴-۰/۶۰۶	۰/۱۵۶-۰/۲۰۷	۱/۹-۲/۵	۰/۴۲-۰/۴۸	۲۲-۳۸	۲۷-۳۴	۲	لوم رسی
۰/۰۰۰۶-۰/۱۵۰	۰/۰۶۲-۰/۱۹۰	۴/۸-۲۸/۶	۰/۴۴-۰/۵۸	۱/۲-۱۴	۴۳-۵۷	۸	رس سیلتی
۰/۰۰۰۶-۱/۱۰	۰/۰۷۵-۰/۱۸۱	۳/۸-۱۵/۲	۰/۵۳-۰/۶۸	۰/۶-۳۰	۴۴-۷۸	۱۲	رسی

مقدار پارامترهای  $\lambda$  و  $h_b$  به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع در بانک اطلاعاتی GRIZZLY گزارش شده‌اند (هاورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵).

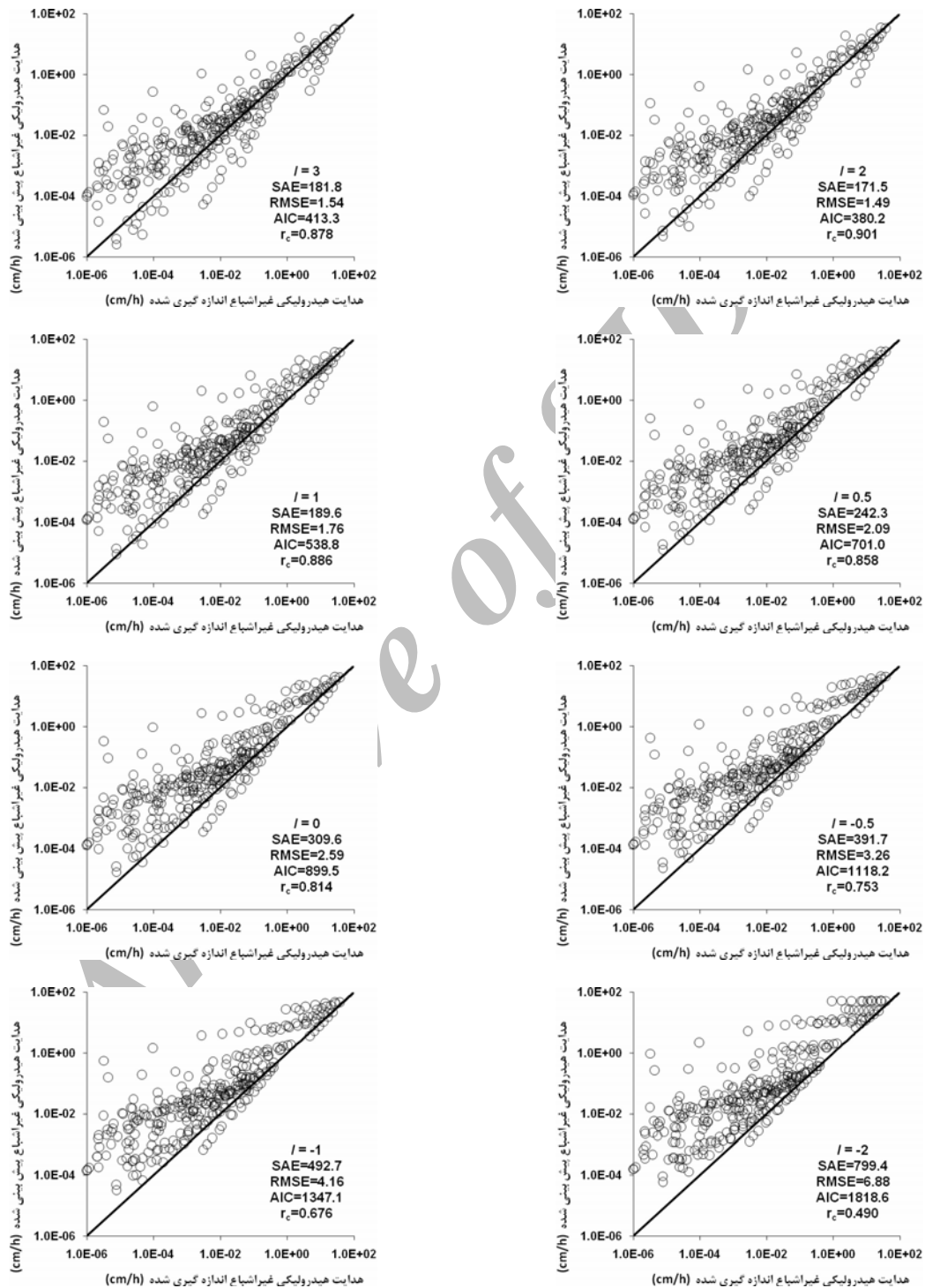


شکل ۱- توزیع ۵۹ نمونه خاک مورد استفاده در این مطالعه در مثلث بافت خاک

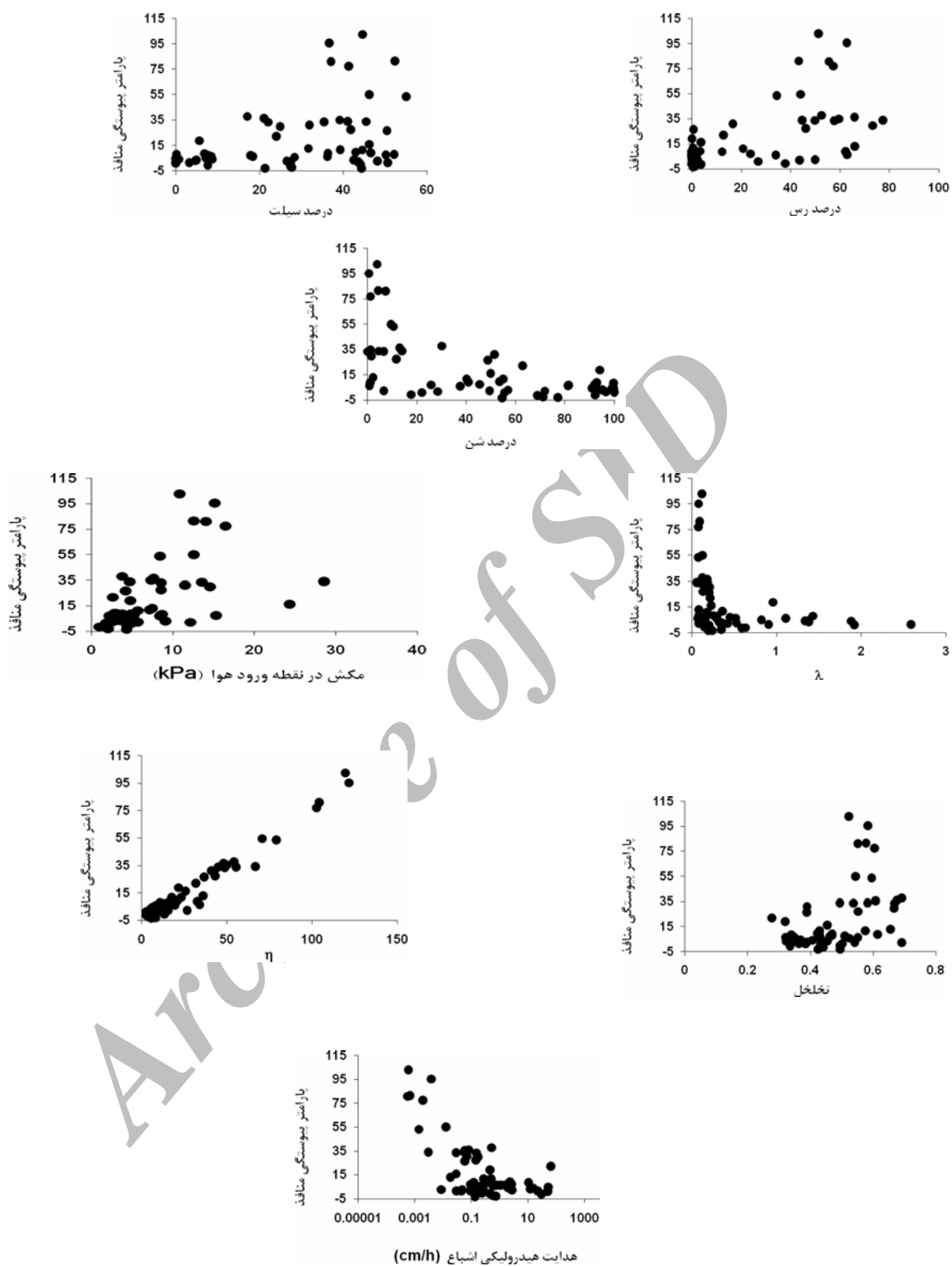


شکل ۲- نتایج تحلیل حساسیت مدل بوردین- بروکز- کوری نسبت به مقادیر مختلف پارامتر پیوستگی منافذ (الف) پارامتر پیوستگی منافذ (l)، (ب) هدایت هیدرولیکی اشباع (K<sub>s</sub>)، (پ) رطوبت اشباع (θ<sub>s</sub>) و (ج) پارامتر توزیع اندازه خلل و فرج (λ)

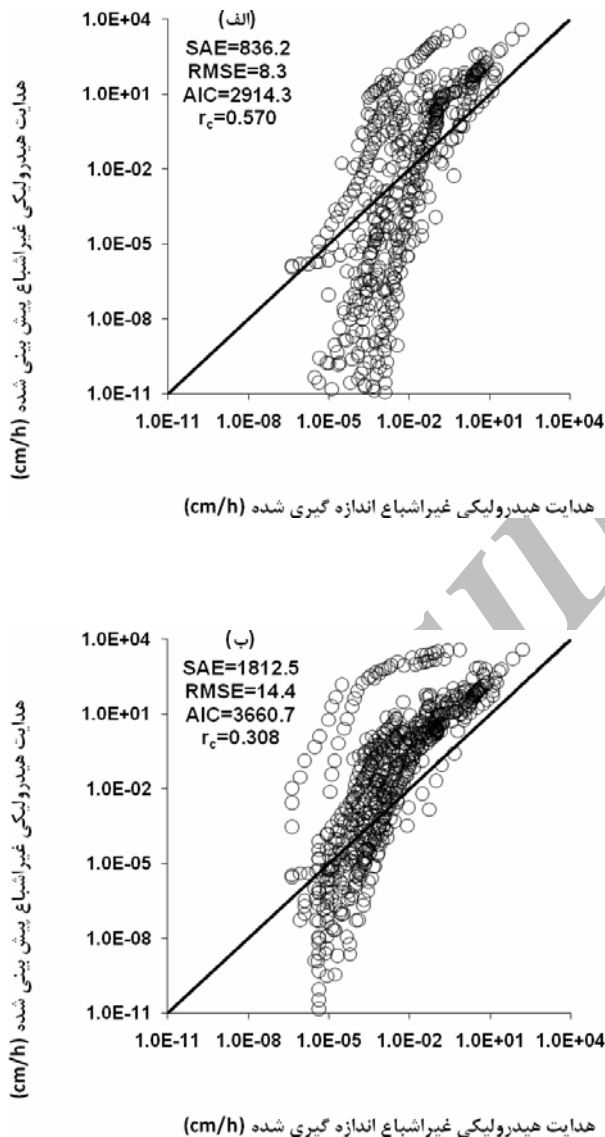




شکل ۳- مقایسه هدایت هیدرولیکی غیراتسباع پیش‌بینی شده به ازای مقادیر مختلف پارامتر پیوستگی منافذ (خط یک به یک)



شکل ۴- تغییرات پارامتر پیوستگی منافذ در مقابل سایر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک



شکل ۵- هدایت هیدرولیکی غیراشباع پیش بینی شده با استفاده از (الف) معادله (۱۴) و (ب) معادله (۹) (خط یک به یک)

### فهرست منابع:

۱. قنبریان علویجه، ب. و شمسایی، ا. ۱۳۸۷. ارائه مدل‌های فرکتالی به منظور پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز. ۲۳-۲۵ مهرماه.
۲. عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۰ صفحه.
۳. کاوه، ف. و ون گنوختن، ام. تی. ۱۳۷۱. بررسی یک معادله جدید تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۲۳(۳) و ۲۴(۴): ۳۲-۲۴.
4. Abbasi, F., D. Jacques, J. Simunek, J. Feyen, and M.Th. van Genuchten. 2003. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: heterogeneous soil. Trans. ASAE. 46:1097-1111.

5. Arya, L. M., F. J. Leij, P. J. Shouse, and M.Th. van Genuchten. 1999. Relationship between the hydraulic conductivity function the particle size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1063-1070.
6. Averjanov, S. F. 1950. About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation, *Engr. Collect.* Vol. 7.
7. Bear, J. 1988. *Dynamics of Fluids in Porous Media.* Elsevier, Amsterdam.
8. Bear, J., D. Zaslavsky, and S. Irmay. 1968. *Physical Principles of Water Percolation and Seepage.* UNESCO, Paris, 465 pp.
9. Brooks, R. H., and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Paper No. 3*, 27 pp., Colo. State Univ., Ft. Collins, Colo.
10. Brutsaert, W. 2000. A concise parameterization of the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Adv. Water Resour.* 23: 811-815.
11. Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 198:71-77.
12. Carman, P. S. 1941. Capillary rise and capillary movement of moisture in fine sands. *Soil Sci.* 52:1-14.
13. Childs, E.C., and N. Collis-George. 1950. The permeability of porous materials. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* 201:392-405.
14. Corey, A. T. 1977. *Mechanics of heterogeneous fluids in porous media.* Water Resources Publications, Fort Collins, CO.
15. Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85:228-232.
16. Ghildyal, B. P. and R. P. Tripathi. 2005. *Soil physics.* New Age Publications. 656 pp.
17. Haverkamp R. Zammit C. Boubkraoui F. Rajkai K. Arrúe J.L. and Heckmann, N., 1997. GRIZZLY, Grenoble soil catalogue: Soil survey of field data and description of particle-size, soil water retention and hydraulic conductivity functions. *Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et en Environnement, Grenoble, France.*
18. Haverkamp, R., F.J. Leij, C. Fuentes, A. Sciortino, and P.J. Ross. 2005. Soil water retention: I. Introduction of a shape index. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1881-1890.
19. Hillel, D. 2004. *Introduction to environmental soil physics.* Elsevier Academic Press. 494 pp.
20. Hoffmann-Riem, H., M. Th. van Genuchten, and H. Fluhler. 1999. A general model of the hydraulic conductivity of unsaturated soils, in *Proceedings of the International Workshop, Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, edited by M. Th. van Genuchten and F. J. Leij, pp. 31- 42, Univ. California, Riverside, CA.
21. Irmay S. 1954. On the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Trans AGU* 35:463-467.
22. Kirkham, M. B. 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations.* Elsevier Academic Press. 500 pp.
23. Kravchenko, A., Zhang, R., 1997. Estimating soil hydraulic conductivity from soil particle-size distribution. *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media.*
24. Kunze, R. J., G. Uehara, and K. Graham. 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:760-765.
25. Leij, F.J. Alves W.J. van Genuchten M.Th. and Williams J.R., 1996. *Unsaturated Soil Hydraulic Database, UNSODA 1.0 user's manual.* Rep. EPA/600/R96/095. USEPA, Ada, OK.
26. Lin, L. I-K. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics* 45: 255-268.

27. Millington, R. J. and J. P. Quirk. 1961. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57:1200-1207.
28. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:513-522.
29. Mualem, Y. 1978. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach. *Water Resour. Res.* 14:325-334.
30. Purcell, W. R. 1949. Capillary pressures-their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. *Trans. AIME* 186:39-46.
31. Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and K. E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316-1320.
32. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1:318-333.
33. Schaap, M. G., and F. J. Leij. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:843-851.
34. Shinomya, Y., K. Takahashi, M. Kobiyama, and J. Kubota. 2001. Evaluation of the tortuosity parameter for forest soils to predict unsaturated hydraulic conductivity. *J. For. Res.* 6:221-225.
35. van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form solution for predicting the conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
36. Xu, Y. 2004. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution. *Computers and Geotechnics.* 31:549-557.
37. Zhuang, J., K. Nakayama, G.R. Yu, and T. Miyazaki. 2001. Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties. *Soil Till. Res.* 59:143-154.

Archive of SID