

اولین همایش ملی زهکشی در کشاورزی پایدار

تهران - ۸ اسفندماه ۱۳۹۲



## برآورد و تحلیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از آزمایش نفوذ بیرکن

سید علی موسوی

مربی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان - [mousavi@guilan.ac.ir](mailto:mousavi@guilan.ac.ir)

محمد رضا خالدیان

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان - [khaledian@guilan.ac.ir](mailto:khaledian@guilan.ac.ir)

حسین اسدی

دانشیار گروه خاکشناسی دانشگاه گیلان - [asadi@guilan.ac.ir](mailto:asadi@guilan.ac.ir)

محمد علی گلی

دانش آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشگاه گیلان - [maligoli@yahoo.com](mailto:maligoli@yahoo.com)

مهدی نوروزی

دانش آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشگاه گیلان - [mehdi\\_uni2000@yahoo.com](mailto:mehdi_uni2000@yahoo.com)

### چکیده

مطالعه انتقال آب و آلاینده‌ها در محیط غیراشباع خاک مستلزم تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است. در این تحقیق برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک از آزمایش نفوذ کم هزینه بیرکن در شش نقطه از منطقه اسالم گیلان با شش کلاس بافت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای شکل از تحلیل توزیع اندازه ذرات خاک و پارامترهای اندازه از مدل‌سازی آزمایش نفوذ با روش‌های  $B/s$ ،  $B/i$ ،  $DL$  و  $CL$  تعیین شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد در حالی که دو روش  $DL$  و  $CL$  در تخمین مقادیر معتبر پارامترهای اندازه در هیچ یک از نقاط آزمایش موفق نبودند اما دو روش  $B/s$  و  $B/i$  به صورت مکمل یکدیگر عمل کرده و توانستند با دقت پارامترها را در همه نقاط برآورد کنند. مقادیر پارامتر قابلیت جذب آب تخمینی به دو روش  $B/s$  و  $B/i$  اختلاف معنی‌داری نداشت اما مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع به روش  $B/i$  بیشتر از روش  $B/s$  تخمین زده شد. که با توجه به خطای نسبی کمتر روش  $B/s$  به نظر می‌رسد برآوردهای روش  $B/i$  تا حدودی دست بالا باشد. بنابراین در شرایط مدل‌سازی موفق و معتبر با هر دو روش، بهتر است مقادیر تخمینی پارامترها به روش  $B/s$  مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: روش بیرکن، پارامترهای شکل و اندازه، هدایت هیدرولیکی اشباع، قابلیت جذب آب.

## مقدمه

شناخت رفتار هیدرولوژیکی منطقه غیراشباع خاک که حلقه اتصال آب سطحی و آب زیرزمینی است، برای توصیف و درک چرخه هیدرولوژی به ویژه برای مطالعه انتقال آلاینده‌ها در این بخش، از اهمیت فراوانی برخوردار است. چنین شناختی متکی بر تعیین ویژگی‌های منحنی‌های هیدرولیکی خاک، شامل منحنی رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی است (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶). برای تعیین منحنی‌های مشخصه هیدرولیکی خاک روش‌های گوناگونی توسعه داده شده است. در بین این روش‌ها روش ساده، کم هزینه و قدرتمند بیرکن<sup>۱</sup> که توسط هاورکمپ و همکاران (۱۹۹۶) ابداع شده است، در حال تبدیل شدن به روشی کاربردی در علوم خاک است (ییلماز و همکاران ۲۰۱۰ و باجارلو و همکاران ۲۰۱۴). لاساباتره و همکاران (۲۰۰۶) بر مبنای آزمایش بیرکن، روش تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک تحت عنوان روش BEST<sup>۲</sup> را توسعه دادند. و ییلماز و همکاران (۲۰۱۰) برای برطرف کردن نواقص روش BEST، آن را به دو نسخه BEST-slope و BEST-intercept (که در این مقاله به ترتیب به اختصار B/s و B/i نامیده شده اند) ارتقاء دادند.

قابلیت‌های روش بیرکن و توسعه یافته آن BEST تا کنون در پژوهش‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به کارهای گاله و همکاران (۲۰۰۱)، براد و همکاران (۲۰۰۳)، لاساباتره و همکاران (۲۰۰۶)، مبارک و همکاران (۲۰۱۰) و باجارلو و همکاران (۲۰۱۴) اشاره نمود. با این وجود هنوز پژوهش‌های کمی برای ارزیابی پتانسیل واقعی این روش انجام شده است. بنابراین در این مقاله ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شش نقطه با شش کلاس بافت مختلف در منطقه جنگلی اسالم در استان گیلان با چهار روش B/s، B/i، DL<sup>۳</sup> و CL<sup>۴</sup> تعیین و نتایج مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### آزمایش نفوذ بیرکن

در آزمایش نفوذ بیرکن از تک استوانه ساده به شعاع ۵ تا ۱۵ سانتیمتر استفاده می‌شود. در این آزمایش ابتدا گیاهان روی سطح خاک محل آزمایش بدون اینکه ریشه‌های آن‌ها خارج شود پاکسازی می‌شود. سپس یک نمونه خاک برای تحلیل توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص حقیقی ( $\rho_s$ ) و رطوبت اولیه ( $\omega_0$ ) و یک نمونه دست نخورده برای تعیین جرم مخصوص ظاهری ( $\rho_d$ ) خاک تهیه می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶).

برای اجرای آزمایش نفوذ، استوانه تا عمق ۱ سانتیمتر در خاک فروبرده می‌شود، تا از جریان جانبی جلوگیری شود. در شروع آزمایش (زمان صفر) حجم ثابت آب به آرامی روی سطح خاک داخل استوانه ریخته شده و مدت زمان نفوذ آب ثبت می‌شود. به محض نفوذ آب روی سطح، حجم ثابت بعدی ریخته شده و این کار تا ثابت شدن مدت زمان نفوذ حجم مشخص آب تکرار می‌شود. در یک آزمایش باید حداقل ۸ تا ۱۵ بار افزودن حجم ثابت آب تکرار شود تا سری زمانی کاملی از نفوذ تجمعی  $I^{\text{exp}}(t)$  به تعداد  $N_{tot}$  نقطه  $(t_i, I_i^{\text{exp}})$  تهیه شود. پس از اتمام آزمایش بلافاصله از خاک اشباع محل آزمایش برای تعیین رطوبت اشباع ( $\omega_s$ )، نمونه‌برداری انجام می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶).

- 1-Beerkan method
- 2-Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters
- 3 - Derivative Linearization
- 4 - Cumulative Linearization

## الگوریتم روش B/i و B/s

روش BEST با فرض روابط تحلیلی منحنی‌های مشخصه هیدرولیکی خاک پارامترهای شکل<sup>۵</sup> که به بافت خاک بستگی دارد را از تحلیل توزیع اندازه ذرات خاک و پارامترهای اندازه<sup>۶</sup> که به ساختمان خاک بستگی دارد را از آزمایش صحرایی نفوذ تحت بار هیدرولیکی صفر، تخمین می‌زند (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶). در این روش برای تعیین منحنی رطوبتی خاک از رابطه ون گنوختن (رابطه (۱a)) با شرایط بوردین (رابطه (۱b)) و برای تعیین منحنی هیدرولیکی خاک از رابطه بروکس و کوری (رابطه (۲)) استفاده می‌شود (بوردین ۱۹۵۳، بروکس و کوری ۱۹۶۴ و ون گنوختن ۱۹۸۰):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (1a)$$

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad (1b)$$

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

که در این روابط  $m, n, \eta$  پارامترهای شکل و  $\theta_s, \theta_r, h_g$  و  $K_s$  پارامترهای اندازه هستند. در بیشتر موارد  $\theta_r$  بسیار ناچیز بوده و بنابراین صفر فرض می‌شود. این روابط برای توصیف رفتار هیدرولیکی بیشتر خاک‌ها مناسب بوده و دقت آن‌ها اثبات شده است (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶).

برازش نتایج حاصل از آزمایش‌های نفوذ بر روابط تجربی یا تحلیلی امکان تخمین پارامترهای اندازه و ترکیبی از آن‌ها مانند قابلیت جذب آب<sup>۷</sup> ( $S$ ) را فراهم می‌آورد. در یک آزمایش نفوذ با بار هیدرولیکی صفر (ناچیز) در سطحی دایروی با شعاع  $r_d$ ، روی خاکی یکنواخت با رطوبت اولیه یکنواخت ( $\theta_0$ )، نفوذ تجمعی سه بعدی ( $I(t)$ ) و سرعت نفوذ ( $q(t)$ )، را می‌توان در حالت انتقالی و غیرماندگار با روابط (۳a) و (۳b) و در حالت پایدار و دائمی با روابط (۳c) و (۳d) بیان نمود (هاورکمپ و همکاران ۱۹۹۴):

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^2 + BK_s)t \quad (3a)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + (AS^2 + BK_s) \quad (3b)$$

$$I_{+\infty}(t) = (AS^2 + K_s)t + C \frac{S^2}{K} \quad (3c)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = AS^2 + K_s \quad (3d)$$

که ضرایب  $A, B, C$  با توجه به رابطه بروکس و کوری (رابطه (۲)) و شرایط اولیه به صورت زیر تعیین می‌شوند (هاورکمپ و همکاران ۱۹۹۴):

$$A = \frac{\gamma}{r_d(\theta_s - \theta_0)} \quad (4a)$$

$$B = \frac{(2 - \beta)}{3} \left[ 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right] + \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \quad (4b)$$

5- Shape parameters

6- Scale parameters

7- Sorptivity

$$C = \frac{1}{2 \left[ 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]} \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \quad (4c)$$

برای بیشتر خاک‌ها با شرایط  $\theta_0 < 0.25\theta_s$  مقادیر  $\beta \approx 0.6$  و  $\gamma \approx 0.75$  در نظر گرفته می‌شود (هاورکمپ و همکاران ۱۹۹۴).  
 برای تخمین پارامترهای شکل ( $n, m, \eta$ ) پس از تعیین توزیع اندازه ذرات خاک در آزمایشگاه، ابتدا نتایج بر رابطه زیر  
 برازش داده می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶):

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad (5a)$$

$$M = 1 - \frac{2}{N} \quad (5b)$$

در این رابطه  $F(D)$ ، فراوانی تجمعی متناظر با قطر ذره  $D, M, N$  دو پارامتر شکل و  $D_g$  یک پارامتر اندازه است. با برازش توزیع  
 اندازه ذرات بر رابطه (۵)، سه پارامتر  $N, M, D_g$  برآورد می‌شود. در ادامه بر مبنای تخلخل خاک ( $\varepsilon$ )، بعد فرکتالی محیط ( $s$ )، و  
 بر مبنای بعد فرکتالی محیط، ضریب  $\kappa$  محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از مقادیر  $\kappa, M, N$ ، شاخص شکل محیط ( $p_m$ )  
 محاسبه و در پایان بر مبنای این شاخص، پارامترهای شکل  $n, m, \eta$  محاسبه می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶):

اگر مقادیر پارامتر شکل و رطوبت اولیه و اشباع خاک معلوم باشند، برازش نتایج آزمایش نفوذ بر رابطه (۳)، امکان برآورد مقادیر  
 هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و قابلیت جذب آب ( $S$ ) را فراهم می‌آورد. با توجه به رابطه (۳c) این برازش یا بر مبنای شیب بخش  
 ماندگار منحنی نفوذ تجمعی (مبنای روش B/s) یا بر مبنای عرض از مبدأ آن (مبنای روش B/i) انجام می‌شود (بیلماز و همکاران  
 ۲۰۱۰):

$$q_{+\infty}^{\text{exp}} = \text{slope} \quad (t_i, I_i^{\text{exp}})_{i=(N_{\text{tot}}-N_{\text{END}}) \rightarrow N_{\text{tot}}} \quad (6a)$$

$$b_{+\infty}^{\text{exp}} = \text{intercept} \quad (t_i, I_i^{\text{exp}})_{i=(N_{\text{tot}}-N_{\text{END}}) \rightarrow N_{\text{tot}}} \quad (6b)$$

که  $N_{\text{END}}$ ، تعداد نقاط مفروض برای رگرسیون خطی است که برای دقت مناسب باید به تعداد کافی در نظر گرفته شود. در جدول (۱)  
 الگوریتم تخمین پارامترهای شکل و اندازه با دو روش B/s و B/i ارائه شده است.

جدول (۱): الگوریتم تخمین پارامترهای شکل و اندازه با دو روش B/s و B/i

الف- تخمین پارامترهای شکل از توزیع اندازه ذرات خاک	ب- تخمین پارامترهای اندازه از داده‌های نفوذ تجمعی آزمایش بیرکن
گام الف-۱: برازش رابطه (۵) بر داده‌های توزیع اندازه ذرات	گام ب-۱: تعیین مقادیر ضرایب محاسبه ضرایب $A, B, C$ از رابطه (۴) و فرض مقادیر $\beta \approx 0.6$ و $\gamma \approx 0.75$
گام الف-۲: تعیین بعد فرکتالی محیط	گام ب-۲: تعیین حداکثر مقدار پارامتر قابلیت جذب آب
$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (7a)$	$I_0(t, S_0) = S_0 \sqrt{t} + AS_0^2 t \quad (10a)$
$(1-\varepsilon)^s + \varepsilon^{2s} = 1 \quad (7b)$	$S_{\text{max}} = \text{MAX}_{k=5 \dots N_{\text{tot}}} \left[ \text{MIN} \left( S_{0k}, \sqrt{q_{+\infty}^{\text{exp}} / A} \right) \right] \quad (10b)$
	گام ب-۳: تخمین مقادیر $S(k)$ و $K_s(k)$ به ازای $k = 5 \dots N_{\text{tot}}$

<p><b>BEST-slope (B/s):</b></p> $I(t) = S\sqrt{t} + [A(1-B)S^2 + Bq_{+\infty}^{\text{exp}}]t \quad (11a)$ $S(k) \min \sum_{i=1}^k [I^{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (11b)$ <p>ST: <math>S(k) \leq S_{\max}</math></p> $K_s(k) = q_{+\infty}^{\text{exp}} - AS^2 \quad (11c)$ $t_{\max}(k) = \frac{1}{4(1-B)^2} \left( \frac{S(k)}{K_s(k)} \right)^2 \quad (13)$ $k_0 = \max \{k \text{ such as } [t(k) \leq t_{\max}(k)]\} \quad (14)$ $S = S(k_0) \quad \text{and} \quad K_s = K_s(k_0) \quad (15)$ $h_g = - \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[ 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right] K_s} \quad (16)$	<p><b>BEST-intercept (B/i):</b></p> $I(t) = S\sqrt{t} + [AS^2 + BCS^2 / b_{+\infty}^{\text{exp}}]t \quad (12a)$ $S(k) \min \sum_{i=1}^k [I^{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (12b)$ <p>ST: <math>S(k) \leq S_{\max}</math></p> $K_s(k) = C \frac{(S(k))^2}{b_{+\infty}^{\text{exp}}} \quad (12c)$ <p>گام ب-۳: تخمین مقادیر نهایی پارامترهای اندازه</p>	<p>گام الف-۳: تخمین پارامترهای شکل:</p> $p_M = \frac{MN}{1+M} \quad (8a)$ $p_m = p_M(1+\kappa)^{-1} \quad (8b)$ $m = \frac{1}{p_m} (\sqrt{1+p_m^2} - 1) \quad (8c)$ $n = \frac{2}{1-m} \quad (8d)$ $\eta = \frac{2}{m \times n} + 3 \quad (8e)$ <p>گام الف-۳: تعیین ضریب <math>c_p</math></p> $c_p = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \left\{ \frac{\Gamma\left(m\eta - \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta)} + \frac{\Gamma\left(m\eta + m - \frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta + m)} \right\} \quad (9)$
---	--	--

پس از ایجاد سری زمانی داده‌های تجربی، مقادیر ضرایب  $A$ ،  $B$  و  $C$  محاسبه شده و برای تخمین پارامتر قابلیت جذب آب ابتدا حداکثر مقدار آن ( $S_{\max}$ ) با فرض اینکه حرکت آب فقط تحت تأثیر موینگی انجام شود ( $B=0$ )، برآورد می‌گردد. این پارامتر با استفاده از برازش رابطه (10a) بر داده‌های تجربی نفوذ و با بهینه‌سازی (حداقل‌سازی) تابع هدف کلاسیک مجموع مربعات خطا انجام می‌شود. در این روابط  $k$ ، تعداد داده‌های مفروض در وضعیت جریان انتقالی و غیرماندگار است. با توجه به این که روابط (3a) و (3b) و به تبع آن‌ها رابطه (10a) در وضعیت جریان گذرا اعتبار دارد، برازش این روابط بر کل سری زمانی درست نیست. بنابراین قابلیت جذب آب به ازای کل مقادیر  $k$  از حداقل پنج نقطه ابتدایی سری زمانی ( $k=5$ ) تا حداکثر کل نقاط سری زمانی ( $k=N_{tot}$ )، برآورد می‌شود. از طرفی با توجه به رابطه (3d) برای این که  $K_s$  منفی نشود، باید  $S_{\max} < \sqrt{q_{+\infty}^{\text{exp}} / A}$  باشد. بنابراین پس از تشکیل سری مقادیر قابلیت جذب آب به ازای مقادیر مختلف  $k$ ، مقدار  $S_{\max}$  از رابطه (10b) تعیین می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶).

در آخرین گام، بر مبنای مقدار واقعی  $B$ ، برازش رابطه (11a) یا (12a) (به ترتیب در روش B/s و B/i) بر داده‌های تجربی نفوذ، با بهینه‌سازی تابع هدف مجموع مربعات خطا و با تغییر مقدار متغیر تصمیم  $S$  بین مقادیر امکانپذیر ( $0 < S < S_{\max}$ ) انجام می‌شود. چون روابط (11a) و (12a) فقط در مرحله جریان انتقالی و غیرماندگار اعتبار دارد، بنابراین برازش بر کل نقاط سری زمانی برآورد صحیح مقدار پارامتر را نتیجه نمی‌دهد و لذا باید به ازای کل مقادیر  $k$  از حداقل ۵ تا حداکثر  $N_{tot}$ ، سری  $S(k)$  تشکیل داده شده و سپس مقدار معتبر از بین مقادیر مختلف آن انتخاب شود. برای این منظور باید حداکثر زمانی که جریان به صورت انتقالی و غیرماندگار است،  $t_{\max}(k)$ ، را از رابطه (13) تعیین گردیده و با مقدار زمان  $t(k)$  مقایسه شود. مقادیر  $S(k)$  و  $K_s(k)$  به شرطی معتبرند که  $t(k)$  کمتر از  $t_{\max}(k)$  باشد (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶). پس از تعیین مقادیر معتبر  $S$  و  $K_s$ ، دیگر پارامتر اندازه یعنی  $h_g$ ، از رابطه (16) محاسبه می‌شود:

### روش CL و DL

برای تعیین پارامترهای اندازه، دو روش برازش داده‌های نفوذ تجمعی در حالت انتقالی و گذرا بر رابطه (3a)، با عنوان خطی سازی تجمعی یا CL (اسمایلز و نایت ۱۹۷۶) و خطی سازی مشتقی یا DL (واندروار و همکاران ۲۰۰۰) ارائه شده است. در روش CL و

DL به ترتیب از برآزش نتایج آزمایش نفوذ بر دو رابطه خطی (۱۷a) و (۱۷b)، ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  تعیین و از رابطه (۱۷c) و (۱۷d) مقادیر  $S$  و  $K_s$  محاسبه می‌شود:

$$\frac{I}{\sqrt{t}} = C_1^{CL} + C_2^{CL} \sqrt{t} \quad (17a)$$

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}}(\hat{t}) = C_1^{DL} + 2C_2^{DL} \hat{t} \quad (17b)$$

$$S = C_1 \quad (17c)$$

$$K_s = \frac{C_2 - AC_1^2}{B} \quad (17d)$$

در روش DL مقادیر  $dI/d\sqrt{t}$  و  $\hat{t}$  از رابطه (۱۸) تعیین می‌شود:

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}}(\hat{t}_i) = \frac{I_{i+1}^{exp} - I_i^{exp}}{\sqrt{t_{i+1}} - \sqrt{t_i}} \quad (i=1, \dots, N_{tot}-1) \quad (18a)$$

$$\hat{t}_i = \sqrt{t_{i+1}t_i} \quad (i=1, \dots, N_{tot}-1) \quad (18b)$$

برای تعیین مقادیر معتبر، کنترل شرط کمتر بودن  $t(k)$  از  $t_{max}(k)$  مشابه روش BEST انجام می‌شود (لاساباتره و همکاران ۲۰۰۶). لازم به ذکر است که در این تحقیق پارامترهای  $M$  و  $N$  از تحلیل رگرسیون غیرخطی توزیع اندازه ذرات (۵ اندازه)، به کمک نرم‌افزار SPSS برآورد شده است. پارامترهای  $A, \eta, n, m, B, C$  در نرم افزار Excel، و پارامتر  $c_p$  در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده است. برای برآورد مقادیر  $S$  و  $K_s$  به روش  $B/s, B/i, CL$  و  $DL$  کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. معیار مقایسه دقت مدل‌سازی‌ها خطای نسبی ( $Er$ ) در نظر گرفته شده است که بر اساس مقادیر اندازه‌گیری ( $x_i^{exp}$ ) و مدل‌سازی ( $x_i^{mod}$ ) از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i^{exp} - x_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^k (x_i^{mod})^2}} \quad (19)$$

## نتایج و بحث

پس از اجرای آزمایشات صحرائی و نمونه‌برداری، مقادیر رطوبت اولیه، جرم مخصوص حقیقی و ظاهری و توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها در آزمایشگاه، اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه ذرات از تحلیل نتایج روش هیدرومتر تعیین و کلاس بافت خاک مشخص گردید. در جدول (۲) اندازه استوانه آزمایش بیرکن، حجم آب آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و کلاس بافت خاک نقاط آزمایش ارائه شده است.

جدول (۲): معرفی شرایط آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و کلاس بافت خاک نقاط آزمایش

نقاط آزمایش	قطر استوانه (cm)	حجم آب جرم مخصوص حقیقی جرم مخصوص ظاهری (ml)	$\rho_d$ (g cm <sup>-3</sup> )	$\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	رطوبت اولیه $\theta_0$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	رطوبت اشباع $\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	کلاس بافت خاک (USDA class)
TP1	۱۰/۸۰	۱۰۰	۱/۰۶۱	۲/۲۰۹	۰/۱۴۵	۰/۵۲۰	رس
TP2	۲۰/۹۰	۲۵۰	۱/۰۴۲	۲/۲۰۸	۰/۱۹۲	۰/۵۲۸	لوم رسی
TP3	۱۰/۸۰	۱۰۰	۱/۵۴۴	۲/۱۳۹	۰/۰۱۵	۰/۲۷۸	لوم شنی
TP4	۲۰/۹۰	۲۵۰	۱/۱۶۵	۲/۱۵۸	۰/۰۹۷	۰/۴۶۰	لوم
TP5	۱۰/۸۰	۱۰۰	۱/۱۵۲	۲/۱۹۷	۰/۰۴۸	۰/۴۷۵	لوم رسی شنی
TP6	۲۰/۹۰	۲۵۰	۱/۰۷۴	۲/۳۸۰	۰/۱۴۹	۰/۵۴۹	لوم رسی سیلتی

## تخمین پارامترهای شکل

داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک با دقت مناسب (خطای نسبی کمتر از ۶ درصد) بر رابطه (۵) برازش داده شد و مقادیر پارامترهای  $M$ ،  $N$  و  $D_g$  برآورد گردید. با استفاده از این مقادیر، پارامترهای شکل  $m$ ،  $n$  و  $\eta$  از روابط (۷) و (۸) محاسبه و در جدول (۳) درج شده است. در بین نقاط مختلف TP1 با بافت رسی کمترین مقدار  $m$  و  $n$  (به ترتیب ۰/۰۳۸ و ۲/۰۶۷) و بیشترین مقدار  $\eta$  (۲۸/۲۹) و TP3 با بافت لوم شنی بیشترین مقدار  $m$  و  $n$  (به ترتیب ۰/۰۷۸ و ۲/۱۷۰) و کمترین مقدار  $\eta$  (۱۴/۷۵) را دارند. همچنین مقدار پارامتر  $c_p$ ، که در محاسبه پارامتر اندازه  $h_g$  کاربرد دارد محاسبه و در جدول (۳) درج شده است.

جدول (۳): مقادیر برآوردی پارامترهای شکل در نقاط آزمایش

نقاط آزمایش	خطای نسبی %	ضریب تبیین $R^2$	$M$	$N$	$D_g$ ( $\mu\text{m}$ )	$m$	$n$	$\eta$	$c_p$
TP1	۵/۲۶	۰/۹۴۰	۰/۰۷۳	۲/۱۵۸	۱۳۹/۶۷	۰/۰۳۸	۲/۰۷۹	۲۸/۲۹	۲/۷۱۰
TP2	۳/۴۹	۰/۹۹۰	۰/۰۹۰	۲/۱۹۸	۷۱۶/۰۸	۰/۰۴۶	۲/۰۹۷	۲۳/۵۴	۲/۶۳۷
TP3	۳/۰۸	۰/۹۹۶	۰/۱۲۸	۲/۲۹۴	۱۰۶۹/۵۳	۰/۰۷۸	۲/۱۷۰	۱۴/۷۵	۲/۴۰۴
TP4	۵/۰۸	۰/۹۸۰	۰/۰۹۲	۲/۲۰۳	۶۶۵/۰۸	۰/۰۵۰	۲/۱۰۵	۲۲/۰۹	۲/۶۰۹
TP5	۲/۲۰	۰/۹۹۸	۰/۱۱۴	۲/۲۵۷	۱۰۳۸/۳۳	۰/۰۶۱	۲/۱۳۰	۱۸/۳۹	۲/۵۲۲
TP6	۵/۶۷	۰/۹۵۴	۰/۱۰۹	۲/۲۴۵	۸۲/۱۵	۰/۰۵۶	۲/۱۱۸	۲۰/۰۱	۲/۵۶۳

## تخمین پارامترهای اندازه

مدل‌سازی داده‌های آزمایش نفوذ بیرکن با چهار روش B/s، B/i، DL و CL برای برآورد پارامترهای اندازه انجام شد، که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. با استفاده از نتایج این مدل‌سازی‌ها منحنی‌های تغییرات زمانی نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در شکل-های (۱) تا (۴) ترسیم و با نتایج اندازه‌گیری‌ها مقایسه شده است. منحنی‌های مدل‌سازی مربوط به وضعیت جریان انتقالی فقط در بازه زمانی  $[0, t_{\max}]$ ، که اعتبار دارند ترسیم شده‌اند. در مواردی که وضعیت ماندگار بعد از پایان آزمایش پیش‌بینی شده است، جریان انتقالی کل بازه زمانی آزمایش را در بر گرفته است.

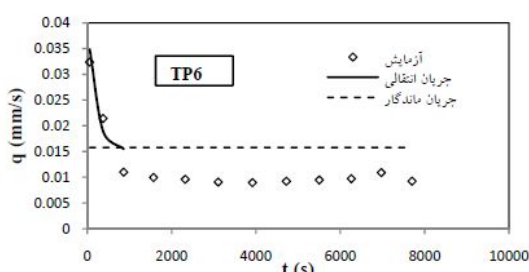
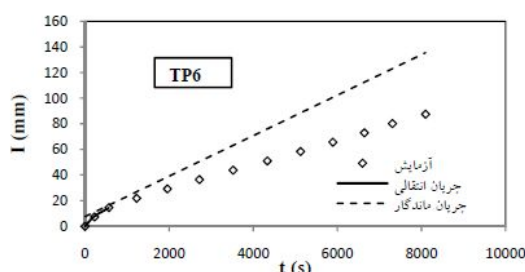
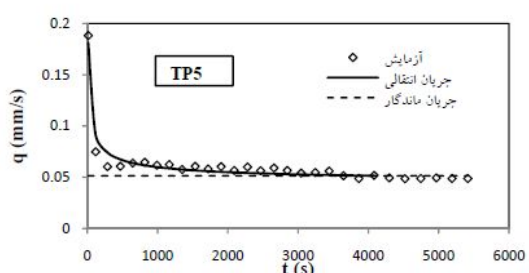
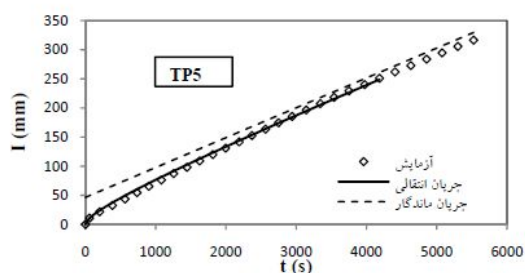
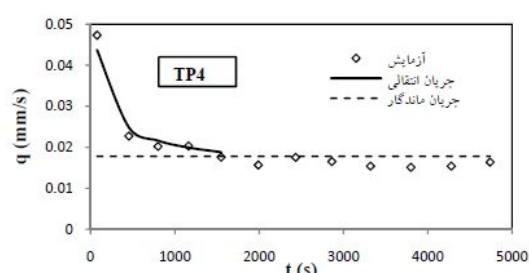
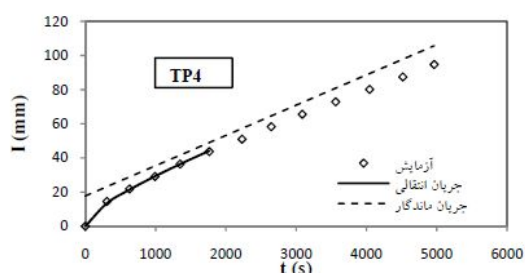
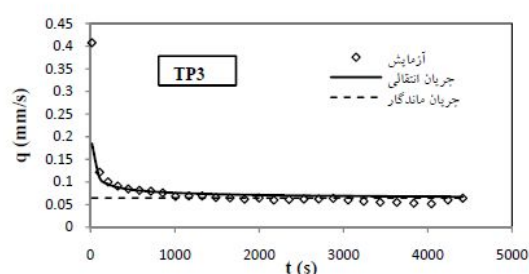
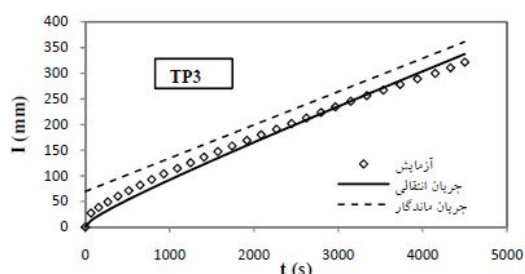
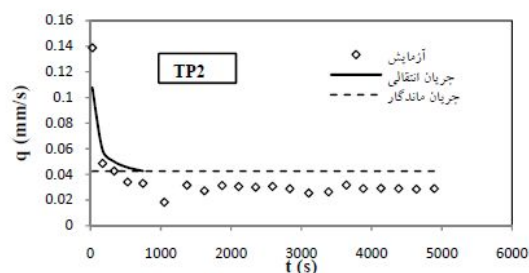
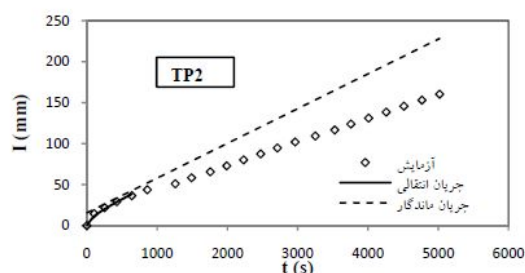
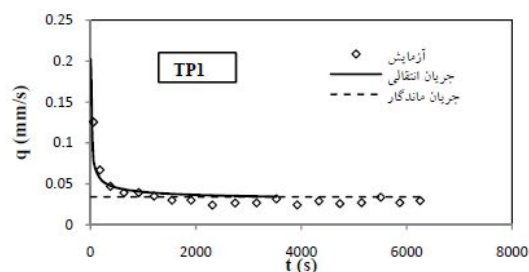
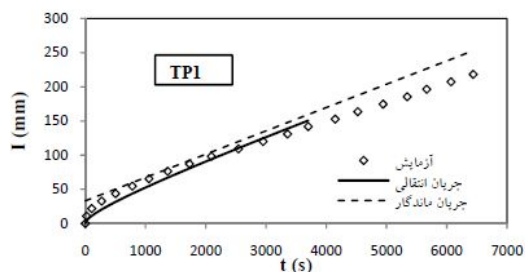
در زمان اجرای روش B/i، در ابتدا تخمین پارامترهای اندازه در نقطه TP6 امکان‌پذیر نشد. زیرا به ازای هیچ  $k \geq 5$ ، شرط  $t(k) \leq t_{\max}(k)$  برقرار نشد. از این رو با ایجاد تغییر در کد اجازه داده شد تا به ازای مقادیر  $k$  کمتر از ۵ نیز مدل‌سازی انجام شود. پس از اجرای دوباره با پیش‌بینی جریان انتقالی در بازه زمانی سه نقطه ابتدایی آزمایش، مدل‌سازی پایان یافت. اجرای مدل‌سازی به روش B/s در نقطه TP3 منجر به برآورد مقدار غیرمعتبر  $K_s = 0$  شد. همچنین مدل‌سازی با روش DL فقط در پنج نقطه و با روش CL فقط در یک نقطه امکان‌پذیر شد.

جدول (۴): نتایج مدل‌سازی آزمایش‌های نفوذ برای تخمین پارامترهای اندازه

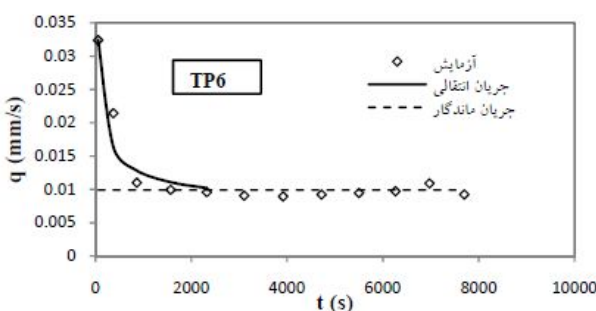
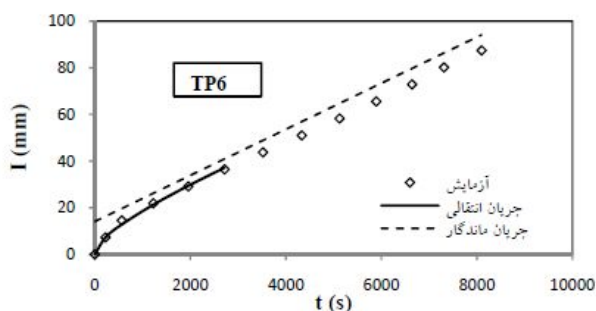
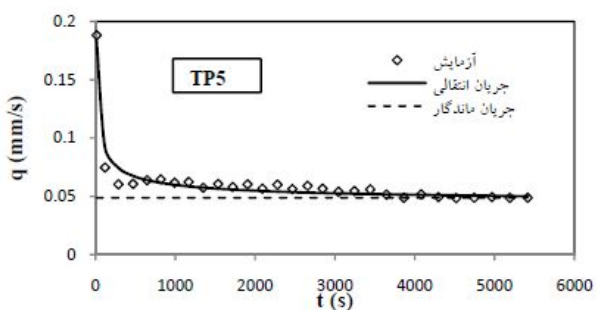
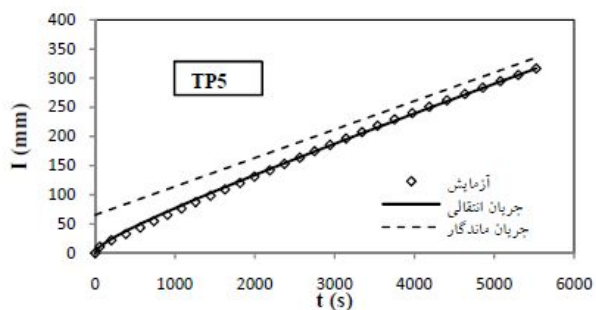
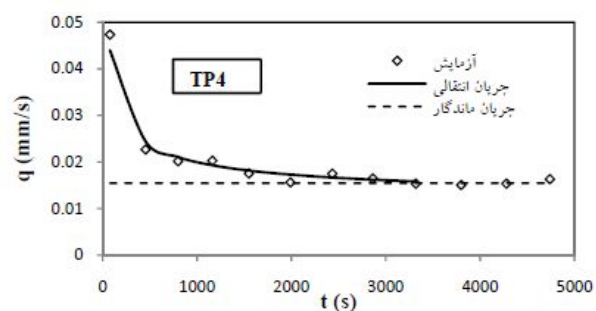
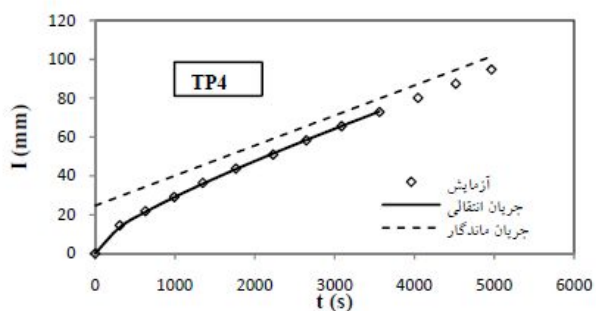
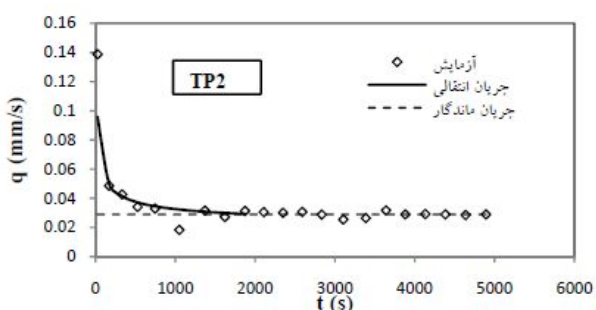
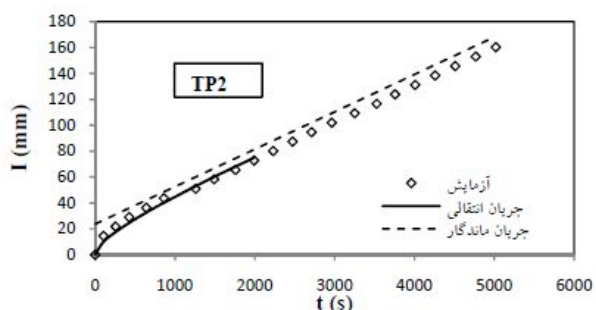
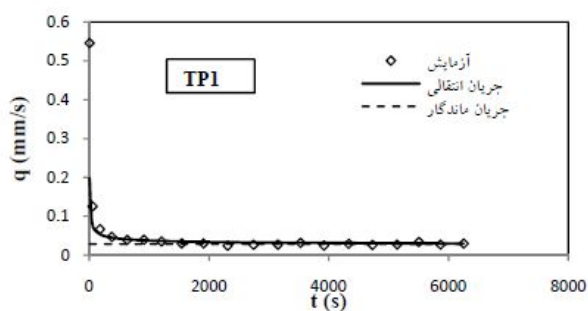
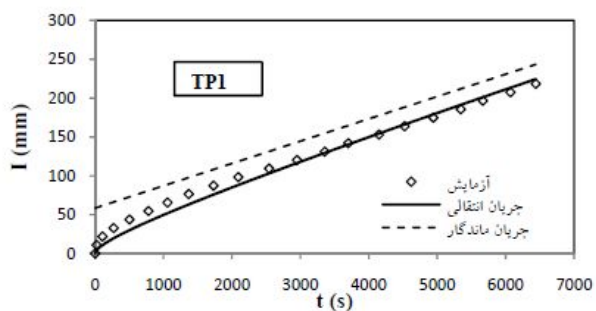
روش	پارامتر	واحد	نقاط آزمایش					
			TP6	TP5	TP4	TP3	TP2	TP1

۰/۰۰۹۹	۰/۰۴۸۹	۰/۰۱۵۵	۰/۰۵۵۹	۰/۰۲۸۹	۰/۰۲۸۷	mm s <sup>-1</sup>	$q_{+\infty}^{\text{exp}}$	آزمایش
۷/۴۷	۴۶/۵۳	۱۷/۷۴	۶۹/۴۷	۱۵/۴۷	۳۳/۱۶	mm	$b_{+\infty}^{\text{exp}}$	
۰/۵۰۸۳	۱/۱۳۵۴	۰/۶۷۹۱	۱/۰۲۸۴	۰/۹۷۸۲	۰/۸۸۰۳	mm s <sup>-0.5</sup>	$S_{\text{max}}$	
۱۳	۳۰	۱۳	۲۹	۲۲	۲۱	-	$N_{\text{tot}}$	
۰/۳۹۱۰	۱/۰۵۳۴	۰/۵۶۴۰	۱/۰۲۲۸	۰/۸۲۳۰	۰/۷۷۸۷	mm s <sup>-0.5</sup>	$S$	B/i
۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۱۴	۰/۰۰۹۶	۰/۰۲۸۰	۰/۰۱۱۷	mm s <sup>-1</sup>	$K_s$	
۷۸۸	۴۲۰۵	۲۱۳۴	۹۹۴۴	۷۶۲	۳۹۰۸	s	$t_{\text{max}}$	
۳	۲۴	۶	۲۹	۵	۱۴	-	$k$	
۵۶۵	۴۱۸۷	۱۷۶۴	۴۵۰۰	۶۴۰	۳۷۰۱	s	$t(k)$	
۰/۰۱۵۸	۰/۰۵۱۳	۰/۰۱۷۷	۰/۰۶۴۹	۰/۰۴۲۴	۰/۰۳۴۱	mm	$q_{+\infty}$	
۵۱/۵۱	۳/۲۸	۱۰/۸۲	۶/۳۱	۴۰/۲۵	۱۴/۲۴	%	$Er$	
۰/۳۹۵۲	۱/۰۷۵۶	۰/۵۸۲۴	۱/۰۲۸۴	۰/۷۷۳۹	۰/۷۷۳۴	mm s <sup>-0.5</sup>	$S$	B/s
۰/۰۰۷۱	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۸۸	۰/۰	۰/۰۱۶۱	۰/۰۰۶۶	mm s <sup>-1</sup>	$K_s$	
۲۷۳۵	۷۹۵۳	۳۸۷۵	-	۲۰۳۶	۱۲۲۵۲	s	$t_{\text{max}}$	
۶	۳۰	۱۰	-	۱۰	۲۱	-	$k$	
۲۷۱۸	۵۵۲۶	۳۵۶۲	-	۱۹۹۱	۶۴۴۰	s	$t(k)$	
۱۴/۰۸	۶۵/۳۳	۲۴/۶۹	-	۲۳/۷۸	۵۸/۳۱	mm s <sup>-1</sup>	$b_{+\infty}$	
۹/۰۸	۱/۶۷	۵/۸۵	-	۶/۶۸	۶/۶۷	%	$Er$	
۰/۴۴۹۵	۱/۱۳۹۱	۰/۶۴۹۱	۲/۰۸۴۵	۰/۸۹۰۹	۱/۳۸۳۲	mm s <sup>-0.5</sup>	$S$	DL
۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۴۱	-۰/۴۰۶۱	۰/۰۰۳۹	-۰/۱۱۴۷	mm s <sup>-1</sup>	$K_s$	
۹۸۷۸	۲۰۳۸۷۰	۲۲۱۱۷	-	۴۷۰۰۳	-	s	$t_{\text{max}}$	
۱۰	۲۷	۱۳	-	۱۶	-	-	$k$	
۵۸۹۳	۴۸۵۷	۴۹۶۵	-	۳۵۲۷	-	s	$t(k)$	
۰/۰۰۷۹	۰/۰۴۴۵	۰/۰۱۲۴	-	۰/۰۲۰۸	-	mm s <sup>-1</sup>	$q_{+\infty}$	
۳۰/۴۳	۳۵۰/۳۲	۶۵/۷۵	-	۱۳۱/۵۵	-	mm	$b_{+\infty}$	
۸/۲۹	۴۸/۲۱	۳/۱۱	-	۴۴/۱۶	-	%	$Er$	
۰/۴۱۴۵	۰/۸۴۳۰	۰/۶۲۸۱	۲/۵۱۱۴	۱/۰۴۲۰	۱/۹۰۳۴	mm s <sup>-0.5</sup>	$S$	CL
-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۰۶۰	-۰/۶۷۹۵	-۰/۰۳۲۹	-۰/۲۷۹۴	mm s <sup>-1</sup>	$K_s$	
-	۲۴۶۲۸۰۳	-	-	-	-	s	$t_{\text{max}}$	
-	۳۰	-	-	-	-	-	$k$	
-	۵۵۲۶	-	-	-	-	s	$t(k)$	
-	۰/۰۲۳۶	-	-	-	-	mm s <sup>-1</sup>	$q_{+\infty}$	
-	۹۰۰/۳۹	-	-	-	-	mm	$b_{+\infty}$	
-	۳۸/۶۷	-	-	-	-	%	$Er$	

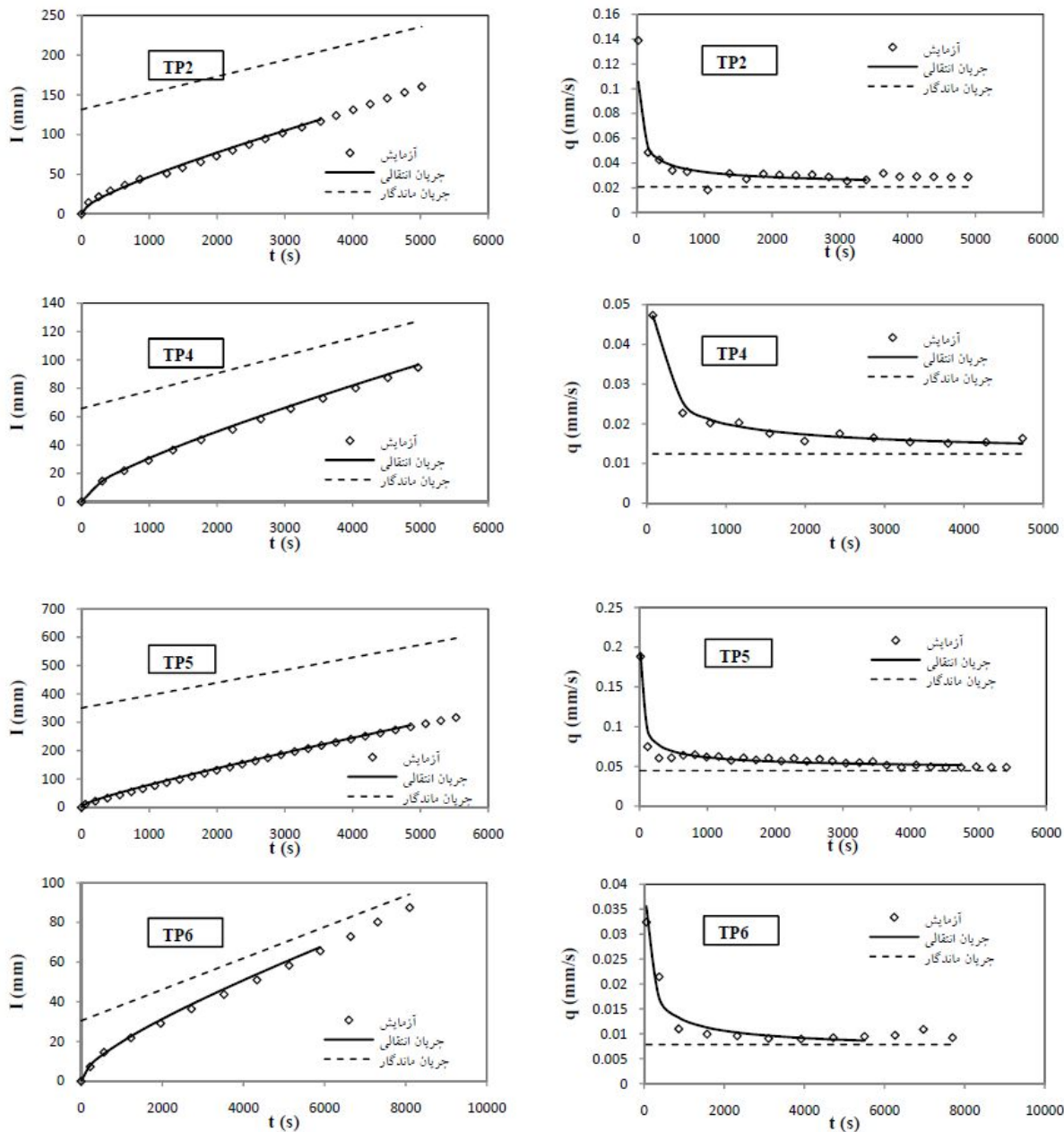




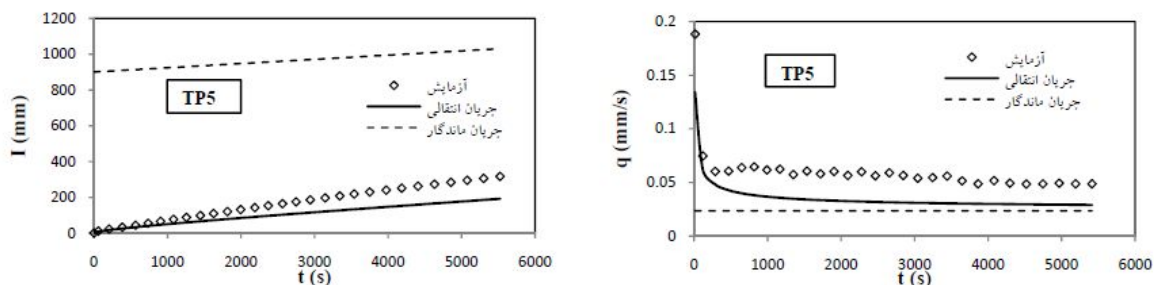
شکل (۱): منحنی تغییرات زمانی نفوذ تجمعی (سمت چپ) و سرعت نفوذ (سمت راست) مدل سازی شده به روش B/i



شکل (۲): منحنی تغییرات زمانی نفوذ تجمعی (سمت چپ) و سرعت نفوذ (سمت راست) مدل سازی شده به روش B/s



شکل (۳): منحنی تغییرات زمانی نفوذ تجمعی (سمت چپ) و سرعت نفوذ (سمت راست) مدل سازی شده به روش DL



شکل (۴): منحنی تغییرات زمانی نفوذ تجمعی (سمت چپ) و سرعت نفوذ (سمت راست) مدل سازی شده به روش CL

پس از برآورد پارامترها انتخاب مقادیر مناسب آن‌ها، علاوه بر این که باید بر مبنای مقایسه دقت مدل سازی‌ها (با استفاده از  $Er$ ) انجام شود، باید بر مبنای میزان هماهنگی آن‌ها با اصول اساسی و فیزیکی فرایند نفوذ آب در خاک که به صورت سه معیار در ادامه تشریح شده است، صورت پذیرد.

اولین معیار مثبت بودن مقادیر برآوردی پارامتر قابلیت جذب آب و هدایت هیدرولیکی اشباع ( $S \geq 0$  و  $K_s \geq 0$ ) است (لاساواتره و همکاران ۲۰۰۶). این معیار در کد نویسی چهار روش مورد استفاده لحاظ شده است. در روش DL در دو نقطه TP1 و TP3 و در روش CL در پنج نقطه TP1، TP2، TP3، TP4 و TP6 به خاطر برآورد مقدار منفی برای  $K_s$ ، مدل سازی متوقف شده است. دومین معیار برای کنترل اعتبار فیزیکی پارامترهای برآوردی  $S$  و  $K_s$  این است که مقادیر مدل سازی شده سرعت نفوذ در بازه زمانی جریان انتقالی از مقدار مدل سازی شده سرعت نفوذ جریان ماندگار بزرگتر باشند ( $q(t) \geq q_{+\infty}$ ) (لاساواتره و همکاران ۲۰۰۶). با توجه به شکل‌های (۱) تا (۴) می‌توان دید که در هر چهار روش مورد استفاده این معیار برای کلیه نقاط آزمایش برقرار بوده است. معیار سوم هماهنگی مقادیر مدل سازی شده نفوذ تجمعی ( $I_{+\infty}(t)$ ) و سرعت نفوذ ( $q_{+\infty}$ ) جریان ماندگار با مقادیر اندازه‌گیری شده است. به ویژه این که باید مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ ضمن همگرایی به مقدار برآوردی سرعت نفوذ جریان ماندگار، بزرگتر یا مساوی آن باشند ( $q^{\text{exp}}(t) \geq q_{+\infty}$ ) (لاساواتره و همکاران ۲۰۰۶). با توجه به شکل (۱) می‌توان دید که این معیار در نقطه TP2 و TP6 رعایت نشده و بنابراین روش  $B/i$  قادر به برآورد مناسب و معتبر پارامترها در این دو نقطه نبوده است. در مورد نقطه TP6 پیش از این بیان شد که مدل سازی به ازای  $k$  کمتر از ۵ امکان پذیر شد. در روش  $B/s$  همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در تمامی نقاط مدل سازی شده معیار سوم به خوبی رعایت شده و برآوردها از نظر فیزیکی اعتبار دارند. این در حالی است که با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) در هیچ یک از نقاط مدل سازی شده با روش‌های DL و CL معیار سوم برقرار نیست و از این رو نمی‌توان پارامترهای برآورد شده آن‌ها را معتبر دانست.

بنابراین در حالی که دو مدل DL و CL موفق به مدل سازی هیچ یک از نقاط مورد آزمایش نشده‌اند، دو روش  $B/i$  و  $B/s$  به ترتیب در چهار و پنج نقطه از شش نقطه آزمایش، پارامترهای شکل را به صورت معتبر برآورد کرده‌اند. پارامترهای اندازه تخمینی در نقطه TP1 با هر دو روش BEST از نظر فیزیکی معتبر هستند، اما خطای نسبی روش  $B/i$  از روش  $B/s$  بیشتر بوده است. مدل سازی نفوذ در نقطه TP2 فقط با روش  $B/s$  و در نقطه TP3 فقط با روش  $B/i$  به نتایج معتبر ختم شده است. با وجود این که نفوذ نقاط TP4 و TP5 با هر دو روش BEST به خوبی مدل سازی شده است اما باز هم خطای نسبی روش  $B/i$  دو برابر روش  $B/s$  بوده است. نفوذ در نقطه TP3 هم فقط با روش  $B/i$  با پارامترهای معتبر مدل سازی شده است.

در نقطه TP3 با توجه به این که مقدار تخمینی به روش  $B/s$  به مقدار بسیار نزدیک برآورد شده است مقدار مساوی صفر محاسبه شده است. برخورد با شرایط مشابه این نقطه ییلماز و همکاران (۲۰۱۰) را بر آن داشت که روش  $B/i$  را ارائه دهند. آن‌ها با مطالعه دوازده آزمایش که در سه دوره زمانی روی دو نوع سربار کوره اکسیژن صنعت فولادسازی که به عنوان مصالح در راهسازی مورد

استفاده قرار می‌گیرد، نتیجه گرفتند که روش B/i ضمن داشتن توانایی‌های روش B/s، قادر است شرایطی که این روش قادر به مدل‌سازی نیست ( $q_{+\infty}^{\text{exp}} \approx AS^2$ ) را نیز با موفقیت مدل‌سازی کند. نگاهی اجمالی به ویژگی‌های فیزیکی مصالح مورد آزمایش آن‌ها (رجوع شود به ییلماز و همکاران (۲۰۱۰)) نشان می‌دهد که  $\rho_d$  مصالح مورد آزمایش مقادیری بین ۱/۶۸ تا ۱/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب داشته است. از طرفی مقایسه  $\rho_d$  نقطه TP3 (۱/۵۴۴) با سایر نقاط نشان می‌دهد که خاک این نقطه بیشترین مقدار  $\rho_d$  را در بین کل نقاط داشته و نسبت به آن‌ها متراکم‌تر بوده است. بنابراین با احتمال فراوان می‌توان گفت در خاک‌های متراکم روش B/i از موفقیت بیشتری نسبت به روش B/s برخوردار است.

مقایسه مقادیر پارامترهای اندازه تخمینی معتبر به دو روش B/s و B/i نشان می‌دهد، در حالی که مقادیر S از دامنه تغییرات ناچیزی برخوردارند، اما مقادیر تخمینی  $K_s$  با دو روش اختلاف فاحشی دارند. مقایسه مقادیر تخمینی با این دو روش برای سه نقطه TP1، TP4 و TP5 نشان می‌دهد، برآوردهای  $K_s$  به روش B/i از برآوردهای روش B/s بیشتر بوده‌اند، که با توجه به دقت بیشتر روش B/s می‌توان نتیجه گرفت که برآوردهای روش B/i تا حدودی دست بالا هستند. حتی اگر این مقایسه برای نقاطی چون TP2 و TP6 که نتایج مدل‌سازی آن‌ها با روش B/i معتبر نبوده انجام شود، باز هم نتیجه‌گیری بالا صحیح است.

با توجه به مطالب فوق با در نظر گرفتن دقت مدل‌سازی و اعتبار فیزیکی پارامترها، مقادیر مناسب پارامترهای اندازه در شش نقطه مورد مطالعه انتخاب و در جدول (۵) درج شده است. مقدار  $h_g$  از رابطه (۱۶) محاسبه شده است. با توجه به جدول (۵)، نقطه TP1 با بافت رسی کمترین مقدار  $K_s$  و TP2 با بافت لوم رسی بیشترین مقدار  $K_s$  را داشته است. حال آن که با توجه به نتایج رالز و همکاران (۱۹۸۲) باید نقطه TP3 با بافت لوم شنی بیشترین مقدار  $K_s$  را داشته باشد. اما متراکم بودن این خاک باعث کاهش هدایت هیدرولیکی آن شده است.

جدول (۵): مقادیر منتخب پارامترهای اندازه در نقاط آزمایش

نقاط آزمایش	روش	$K_s$ (mm s <sup>-1</sup> )	$h_g$ (mm)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
TP1	B/s	۰/۰۰۶۶	-۸۹/۸۹	۰/۵۲۰
TP2	B/s	۰/۰۱۶۱	-۴۲/۰۱	۰/۵۲۸
TP3	B/i	۰/۰۰۹۶	-۱۷۲/۲۲	۰/۲۷۸
TP4	B/s	۰/۰۰۸۸	-۴۰/۷۷	۰/۴۶۰
TP5	B/s	۰/۰۱۱۳	-۹۴/۸۴	۰/۴۷۵
TP6	B/s	۰/۰۰۷۱	-۲۱/۵۲	۰/۵۴۹

### جمع بندی نتایج

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش BEST به پشتوانه مفاهیم و اصول فیزیکی اثبات شده و قدرتمند حرکت آب در محیط غیراشباع، با دقت مناسب موفق به مدل‌سازی فرایند نفوذ شده است. به ویژه توسعه این روش و ارائه دو الگوریتم مکمل B/s و B/i توانسته در کنار هم نقاط ضعف این روش را بسیار بهبود بخشد.

استفاده از دو روش DL و CL در برآورد پارامترهای اندازه باید با دقت و احتیاط انجام شود. زیرا کاربرد رگرسیون خطی بدون توجه به اصول فیزیکی فرآیند نفوذ، ممکن است (در حالی که ضریب تبیین و خطای نسبی مقادیر معتبری داشته باشند) به برآورد غیرمعتبر پارامترهای اندازه ختم شود.

با توجه به نتایج این تحقیق و همچنین نتایج ییلماز و همکاران (۲۰۱۰) به احتمال زیاد بتوان گفت روش B/i در تخمین پارامترهای اندازه خاک‌های متراکم از موفقیت بیشتری نسبت به روش B/s برخوردار است. اظهار نظر قطعی در این مورد به تحقیقات بیشتری نیاز دارد.

در شرایطی که مقادیر پارامتر قابلیت جذب آب تخمینی به دو روش B/s و B/i اختلاف معنی‌داری ندارند اما به نظر می‌رسد تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به روش B/i تا حدودی دست بالا باشد. بنابراین در شرایط مدل‌سازی موفق و معتبر با هر دو روش، شاید بهتر باشد مقادیر تخمینی پارامترها به روش B/s مد نظر قرار گیرد.

## سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی با عنوان " بررسی کارایی روش بیرکن در برآورد نفوذپذیری خاک در سطح حوزه آبریز جهت شبیه‌سازی سیلاب " است که با اعتبار پژوهشی اعضای هیئت علمی دانشگاه گیلان توسط نویسندگان اجرا گردیده است.

## منابع

- Bagarello, V., M. Castellini, S. Di Prima and M. Iovino, 2014. Soil hydraulic properties determined by infiltration experiments and different heights of water pouring. *Geoderma* 213:492–501
- Braud, I., R. Haverkamp, J. L. Arru'e and M. V. Lope'z, 2003. Spatial variability of soil surface properties and consequences for the annual and monthly water balance of a semiarid environment (EFEDA Experiment). *Journal of Hydrometeorology* 4:121–137.
- Brooks, R. H., and C. T. Corey, 1964. Hydraulics properties of porous media. *Hydrology Paper 3*, Colorado State University, Fort Collins.
- Burdine, N. T., 1953. Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Petroleum Transaction, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers* 198: 71–77.
- Galle, S., R. Angulo Jaramillo, I. Braud, S. Boubkraoui, J.M. Bouchez, D. de Condappa, G. Derive, A. Gohoungssou, R. Haverkamp, P. Reggiani, and J. Soria-Ugaldes. 2001. p. 136. In Estimation of soil hydrodynamic properties of the Donga watershed (CATCH Be'nin). *Proceedings of the GEWEX 4th International Conference, Paris. 10–14 Sept. 2001.* Insitut Pierre Simon Laplace.
- 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 behavior 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.
- 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 Resources Research* 30:2931–2935.
- Lassabatère, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp, 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70: 521–532.

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

Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and K. E. Saxton, 1982. Estimation of soil water properties. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 25(5):1316-1328.

Smiles, D. E. and J. H. Knight, 1976. A note on the use of the Philip infiltration equation. *Australian Journal of Soil Research* 14:103–108.

Van Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:892-898.

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 Journal* 64:1263–1272.

Yilmaz, D., L. Lassabatère, R. Angulo-Jaramillo, D. Deneele and M. Legret, 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone Journal* 9:1–10.