

## تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک

محمدحسین محمدی<sup>۱</sup> و حسینقلی رفاهی<sup>۲</sup>

۱، ۲، دانشجوی دوره دکتری و استاد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله ۸۳/۱۲/۲۵

### خلاصه

حرکت آب به داخل خاک تحت تأثیر رطوبت اولیه، درجه اشباع و خصوصیات مختلف فیزیکی خاک از جمله بافت خاک، رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری خاک قرار می‌گیرد. در این مطالعه از داده‌های حاصل از مطالعات ماهشواری (۱۹۹۶) که در خاکهای بدون درز و ترک مناطق مختلف استرالیا به دست آمده است استفاده گردید. میانگین قطر هندسی انحراف معیار هندسی، ضریب پراکندگی برای هر خاک محاسبه گردید و سعی شد پارامترهای سه معادله نفوذ معتبر: کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون توسط این آماره‌ها و ترکیب آنها با خصوصیات فیزیکی توسط رگرسیون چندگانه خطی تخمین زده شود. نتایج نشان داد که این پارامترها می‌توانند توسط ترکیبی از آماره‌های محاسبه شده و خصوصیات فیزیکی، که به آسانی قابل اندازه‌گیری هستند، تخمین زده شوند. توابع انتقالی برای تمام پارامترهای معادلات کوستیاکوف و فیلیپ به دست آمد ولی رابطه معنی‌داری بین ضریب نمایی در معادله هورتون و خصوصیات خاک مشاهده نشد. در نهایت نفوذ تجمعی محاسبه شده و تخمین زده شده بر اساس معادلات کوستیاکوف و فیلیپ مورد بحث و مقایسه قرار گرفت. همچنین نتایج نشان داد که معادله کوستیاکوف تخمین زده شده با داده‌های واقعی رابطه نزدیک‌تری از معادله فیلیپ تخمین زده شده دارد.

**واژه‌های کلیدی:** توابع انتقالی، خصوصیات فیزیکی خاک، نفوذ آب به خاک

### مقدمه

ورود آب از سطح مشترک خاک و اتمسفر به داخل خاک بخش غالب و آغازین تعامل پدوسفر و هیدروسفر است (۴) که نقش بسیار مؤثری در چرخه هیدرولوژی، و نوع پوشش گیاهی، اکولوژی منطقه، میزان رواناب و فرسایش و تخریب خاک، انتقال املاح و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارد (۹). درک فرآیند نفوذ برای برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم آبیاری بسیار ضروری است (۲۱، ۱۵). برای آن دو روش وجود دارد. نخست استفاده از قوانین و روابط اثبات شده مانند قانون بقای جرم (معادله ریچاردز در شکل پخشیدگی) و قانون بقای انرژی (قانون داریسی) و تلفیق آن‌ها و دستیابی به یکسری معادلات ریاضی مانند معادله فیلیپ (۱۴) و گرین امپت (۶) می‌باشد. مهم‌ترین حسن این معادلات این است که بر اساس قوانین فیزیکی وضع

شده‌اند و با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک معادله نفوذ قابل تعیین است. ولی عدم دقت کافی در این معادلات مهم‌ترین نقص آن‌ها می‌باشد که حاصل ساده‌سازی شرایط فیزیکی و ایده‌آل و یکنواخت فرض کردن محیط خاک می‌باشد (۱۹). شیوه دوم استفاده از روابط تجربی از قبیل هورتون (۱۰)، کوستیاکوف (۱۲) است. مهم‌ترین حسن این معادلات دقت بالا به دلیل منعکس و ملحوظ کردن تقریباً تمام شرایط و عوامل مؤثر در فرآیند نفوذ می‌باشد. تأثیر گرفتن از شرایط مکانی و زمانی و نارسایی پارامترهای معادلات در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده اینگونه معادلات می‌باشد (۸، ۹). اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک و ارتباط دادن پارامترهای هیدرولیکی بهم می‌تواند ما را در مقایسه معادلات مختلف نفوذ کمک نماید (۱۳). زیرا مقدار رطوبت خاک و خصوصیات فیزیکی از جمله

بافت خاک مهم‌ترین عوامل تعیین کننده نفوذ می‌باشند (۴، ۱۳، ۱۵). از طرفی طبق مشاهدات برخی محققین این ویژگی‌ها نمی‌توانند به عنوان پارامتر مستقل در روش‌های رگرسیون خطی چندگانه برای تصویر و پیش‌بینی رفتار نفوذپذیری خاک به کار روند (۵). مطالعه حاضر بر اساس یافتن و پیش‌بینی پارامترهای معادلات مختلف نفوذ به وسیله ویژگی‌های فیزیکی که به آسانی قابل تعیین می‌باشند انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر بر اساس اطلاعات و داده‌های منتشر شده توسط ماهشواری (۱۳) انجام شد. در بررسی مذکور ۴۰ خاک فاقد درز و ترک از ۱۰ منطقه New South Wales استرالیا انتخاب شدند.

برای به دست آوردن پارامترهای معادلات نفوذ از دو وسیله نفوذسنج صفحه‌ای با روش سالی وایت (۲۰) و نفوذسنج استوانه‌ای مضاعف با روش کلوت و دیرکسن (۱۱) استفاده شد. سپس مقدار ضرایب جذبی (S) هدایت هیدرولیکی اشباع در مزرعه ( $K_s$ ) و سرعت نفوذ نهایی در دو نوع نفوذسنج (BI, IS) اندازه گیری گردید (۱۱). مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ

لحظه‌ای تا رسیدن به سرعت نفوذ ثابت، مقدار رطوبت اولیه خاک و مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه ای، بافت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری تعیین گردید. نمونه‌های دست نخورده از سه عمق ۱۰ - ۰، ۲۰-۳۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر توسط استوانه‌های نمونه‌برداری تهیه و سپس هدایت هیدرولیکی اشباع در آزمایشگاه ( $K_c$ ) و جرم مخصوص ظاهری و درصد رطوبت اشباع و میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع سه عمق ( $\bar{K}_c$ ) محاسبه گردید و در نهایت سه معادله نفوذ: فیلپ، کوستیاکوف و هورتون با روش حداقل کردن مربعات خطا به صورت غیر خطی بر داده‌های به دست آمده برازش داده شدند. تجزیه‌های آماری توسط نرم‌افزار SPSS 10 با روش Stepwise انجام گردید.

### نتایج

بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری ( $\rho_b$ ) رطوبت اولیه ( $\theta_i$ ) رطوبت ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) درصد رطوبت اشباع (SP) هدایت هیدرولیکی پروفیل ( $K_c$ ) و متوسط خاک ( $\bar{K}_c$ ) اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های نمونه‌برداری در ۱۰ خاک انتخابی مناطق مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی خاکهای مورد آزمایش

شماره خاک	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت	$\rho_b$ (gr/cm <sup>3</sup> )	% $\theta_i$	% $\theta_{FC}$	% SP	$K_c$ (mm/min)			$\bar{K}_c$ mm/min
									۰-۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۰	
۱	۸۸	۴	۸	S.L	۱/۷۰	۷/۲	۲۴	۲۸	۴/۸	۵/۳	۲/۳	۳/۶
۲	۴۲	۲۸	۳۰	C.L	۱/۴۱	۷/۲	۳۱	۳۳	۰/۵۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲
۳	۷۸	۶	۱۶	S.L	۱/۷۶	۹/۳	۱۶	۲۷	۲/۱	۰/۶۴	۰/۳۸	۰/۶۴
۴	۳۸	۴۴	۱۸	L	۱/۳۲	۱۳	۳۱	۵۰	۷/۴	۱۴	۴/۴	۶/۹
۵	۷۳	۶	۱۶	S.L	۱/۴۱	۷/۰	۲۲	۵۴	۲۰	۷۰	۱/۹	۵/۱
۶	۷۶	۸	۱۶	S.L	۱/۴۲	۱۲	۲۷	۵۷	۸/۸	۱/۴	۰/۳۷	۰/۸۵
۷	۷۴	۸	۱۸	S.L	۱/۵۴	۱۶	۱۸	۲۵	۰/۵۰	۰/۲۴	۰/۴۱	۰/۳۵
۸	۸۲	۴	۱۴	S.L	۱/۴۱	۲۳	۲۳	۱۰۰	۲/۳	۰/۹۶	۰/۳۸	۰/۷۳
۹	۴۴	۱۶	۴۰	C.L	۱/۴۰	۱۹	۲۵	۱۳۰	۱۴۰	۰/۴۱	۱۰/۳	۱/۱۸
۱۰	۸۶	۴	۱۰	L.S	۱/۴۱	۲۳	۲۳	۳۶	۱۲/۵	۴/۷	۴/۷	۵/۹

$$\bar{K}_c = \frac{3}{\frac{1}{Kc_1} + \frac{1}{Kc_2} + \frac{1}{Kc_3}}$$

همچنین مشاهده شد که بین پارامترهای معادلات مختلف نفوذ و سرعت نفوذ نهایی در دو روش مذکور و هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در مزرعه ( $K_s$ ) توسط نفوذسنج صفحه‌ای همبستگی خوبی وجود دارد. ولی این همبستگی برای هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های نمونه برداری در آزمایشگاه ( $K_c$ ) ضعیف بود (جدول ۳). وابستگی پارامترهای مختلف معادلات نفوذ آب به خاک به ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد آزمون قرار گرفت که مشاهده شد بین تک تک این خصوصیات و پارامترهای معادلات نفوذ آب همبستگی ضعیفی وجود دارد نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- همبستگی بین پارامترهای معادلات مختلف نفوذ و هدایت

هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مزرعه

پارامتر	A	$\sigma$	$I_s^{-1}$	$K_s$	$K_c$	$Br^{-2}$
A	۱					
$\sigma$	۰/۹۸	۱				
$I_s$	۰/۹۴	۰/۹۷	۱			
$K_s$	۰/۹۲	۰/۹۶	۱	۱		
$K_c$	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۴	۱	
Br	۰/۹۹	۱	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۴۲	۱

۱: شدت نفوذ نهایی در نفوذسنج صفحه‌ای

۲: شدت نفوذ نهایی در نفوذسنج استوانه‌ای مضاعف

یافت اغلب خاکها سبک بوده و به همین دلیل دارای سرعت نفوذ نهایی نسبتاً قابل ملاحظه (بیش از ۰/۲ میلی‌متر در دقیقه) بودند به همین دلیل سعی شد از معادله کوستیاکوف- لویس در برازش بر داده ها استفاده شود ولی نتایج نشان داد که تفاوت معنی داری با معادله کوستیاکوف ندارد (۱۱) نتایج به دست آمده نشان داد که معادله کوستیاکوف برازش بهتر و معادله فیلیپ برازش کمتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده در روش استوانه‌های مضاعف دارد (جدول ۲).

معادله کوستیاکوف  $I = Kt^a$

معادله فیلیپ  $I = St^{1/2} + At$

معادله هورتون  $I = \gamma(1 - e^{-t}) + \sigma t$

I: مقدار نفوذ تجمعی (mm)

S: ضریب جذبی  $(\text{mm}/\text{min})^{1/2}$

A: هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع مزرعه‌ای

$\sigma$ : شدت نفوذ نهایی

A, K, r و  $\gamma$ : ضرایب تجربی

t: زمان (min)

جدول ۲- نتایج برازش سه معادله کوستیاکوف، هورتون و فیلیپ بر داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های نفوذسنج استوانه‌ای در ۱۰ منطقه مختلف

	هورتون	فیلیپ	کوستیاکوف
$R^2$	۰/۹۰ - ۱/۰	۰/۷۷ - ۱/۰	۰/۹۵ - ۱/۰
*SEE	۰/۳۳ - ۱۲	۰/۵۴ - ۱۲	۰/۳۹ - ۸/۸

Standard error of estimate \* اشتباه معیار تخمین

جدول ۴- همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی خاک و پارامترهای معادلات نفوذ

	$\rho_b$	شن %	سیلت %	رس %	$\theta_{F.C}$	$B_r$	K	a
$\rho_b$	۱							
شن %	۰/۵۵ **	۱						
سیلت %	-۰/۵۳ **	-۰/۹۲ **	۱					
رس %	-۰/۳۵ *	-۰/۷۷ **	۰/۴۶ **	۱				
$\theta_{F.C}$	-۰/۵۷ **	-۰/۷ **	۰/۷۳ **	۰/۴۱ **	۱			
$B_r$	-۰/۱۲	-۰/۳۶ *	-۰/۲۵	-۰/۳۸ *	-۰/۰۹	۱		
K	-۰/۳	۰/۴ **	-۰/۳۶	-۰/۳۸ *	-۰/۰۸	۰/۳۳ *	۱	
a	۰/۰۱	-۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۴۳ **	-۰/۵۴ **	۱

و همکاران (۱۸) احتمال وقوع یک ذره با اندازه  $s$  را در توزیع لاگ نرمال  $f(s)$  و معادله تابع تجمعی لاگ نرمال با  $F(s)$  نشان دادند که در آن  $s$  اندازه ذرات اولیه است.

$$F(s) = \int f(s) dx.$$

$$f(x) = \exp[-(\log(s) - a)^2 / 2b^2] / b\sqrt{2\pi}$$

$\delta g$  و  $a = \log(dg)$ ،  $x = \log(s)$  و  $b = \log(\delta g)$  می‌باشد.

و  $dg$  به ترتیب انحراف معیار و میانگین هندسی ذرات در توزیع لاگ نرمال می‌باشد. در مطالعه حاضر همچنین شاخص  $CV$  به عنوان شاخص پراکندگی به صورت زیر تعریف گردید.

$$CV = \frac{\delta g}{dg}$$

در نهایت پس از تجزیه های آماری روابط رگرسیون چندگانه زیر برای پارامترهای مختلف با استفاده از ضرایب معرفی شده به دست آمد (جدول ۶).

همچنین پارامتر "r" معادله هورتون با هیچ یک از خصوصیات خاک و آماره های تعریف شده همبستگی معنی دار و قوی نشان نداد. به همین دلیل برآورد مقدار نفوذ تجمعی با معادله هورتون تخمین زده شده امکان پذیر نگردید (شکل ۱).

رابطه و پراکنش مقادیر برآورد شده پارامترهای معادلات نفوذ توسط روابط رگرسیونی بالا در مقابل مقادیر اندازه گیری شده آنها به روش برازش نشان می‌دهد که هرچند دو معادله کوستیاکوف و فیلیپ با دقت تقریباً یکسان برآورد شده اند (شکل ۱. a, b, c, d, e, f) ولی بدلیل دقت و برازش بهتر رابطه کوستیاکوف با داده‌های تجربی مقادیر برآورد شده آن نیز برازش و صحت بیشتری نشان می‌دهند (شکل ۲. a, b, c, d).

آزمون آماری دانکن (در سطح ۵٪) در مقایسه مقدار نفوذ تجمعی مشاهده شده با مقدار محاسبه شده توسط دو معادله فیلیپ و کوستیاکوف در هر زمان، نشان داد که معادله کوستیاکوف برآورد شده در ۲۴ خاک از ۴۰ خاک مورد آزمون و معادله فیلیپ برآورد شده در ۷ خاک مورد آزمون تخمین نزدیکتری را بدست می‌دهند در ۹ خاک تخمین این دو معادله تفاوت معنی داری با هم نداشتند (شکل ۲ و ۳). بطور کلی به نظر می‌رسد که بتوان مقدار نفوذ اندازه گیری شده به وسیله توابع رگرسیونی بدست آمده را در اغلب خاکها با دقت نسبتاً خوبی برآورد نمود.

با توجه به جدول (۴) روابط مختلف که بیانگر ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و پارامتر معادلات مختلف نفوذ بود مورد آزمون قرار گرفت که ذیلاً به هر یک اشاره می‌شود:

۱ - محاسبه ضریب جذبی (S): بانگ (۲۳) معادله زیر

برای محاسبه S به دست آورده است.

$$S = \sqrt{2(SP - \theta_i)K_s \cdot h_f}$$

که  $h_f$  مکش در جبهه رطوبتی می‌باشد که برای دست

آوردن آن از:

(a) توابع انتقالی راولز و همکاران (۱۶)

(b) مدل تک نقطه‌ای گرگسون (۷) و

(c) مدل بروکز و کوری (۲) استفاده گردید و نتایج به دست آمده با ضرایب جذبی تعیین شده از دو روش استوانه‌های مضاعف و نفوذسنج صفحه‌ای مقایسه گردید (جدول ۵).

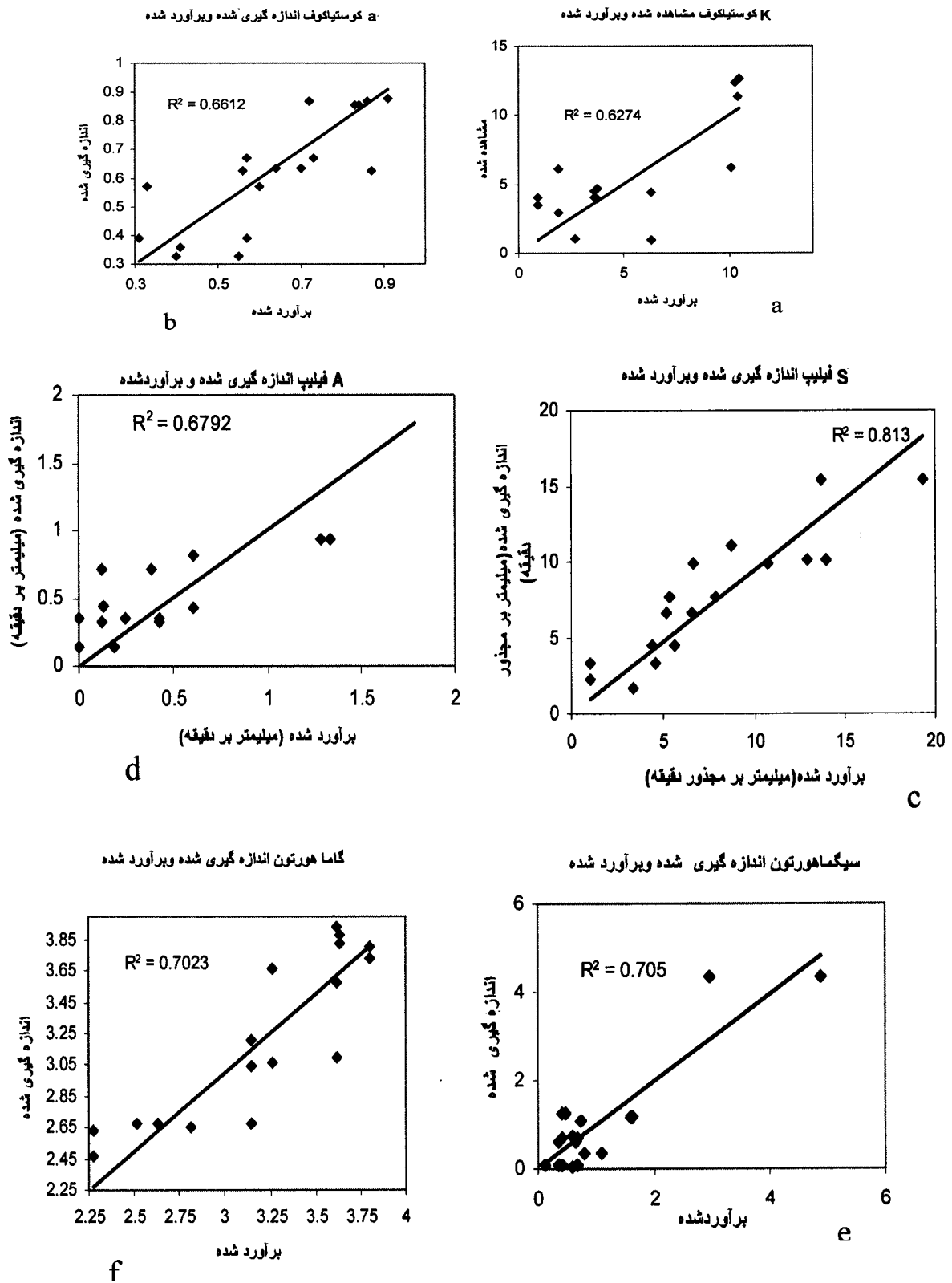
جدول ۵ - همبستگی بین مقدار ضریب جذبی محاسبه شده توسط روابط مختلف و ضرایب جذبی اندازه‌گیری شده توسط دو روش استوانه‌های مضاعف و نفوذسنج صفحه‌ای

روش مدل	استوانه‌های مضاعف نفوذسنج صفحه‌ای	روش مدل
راولز ۱۹۹۲	۰/۲۳	* ۰/۳۶
گرگسون ۱۹۸۶	۰/۴۱**	۰/۱۶
بروکز و کوری ۱۹۶۵	۰/۰۵	۰/۲۲

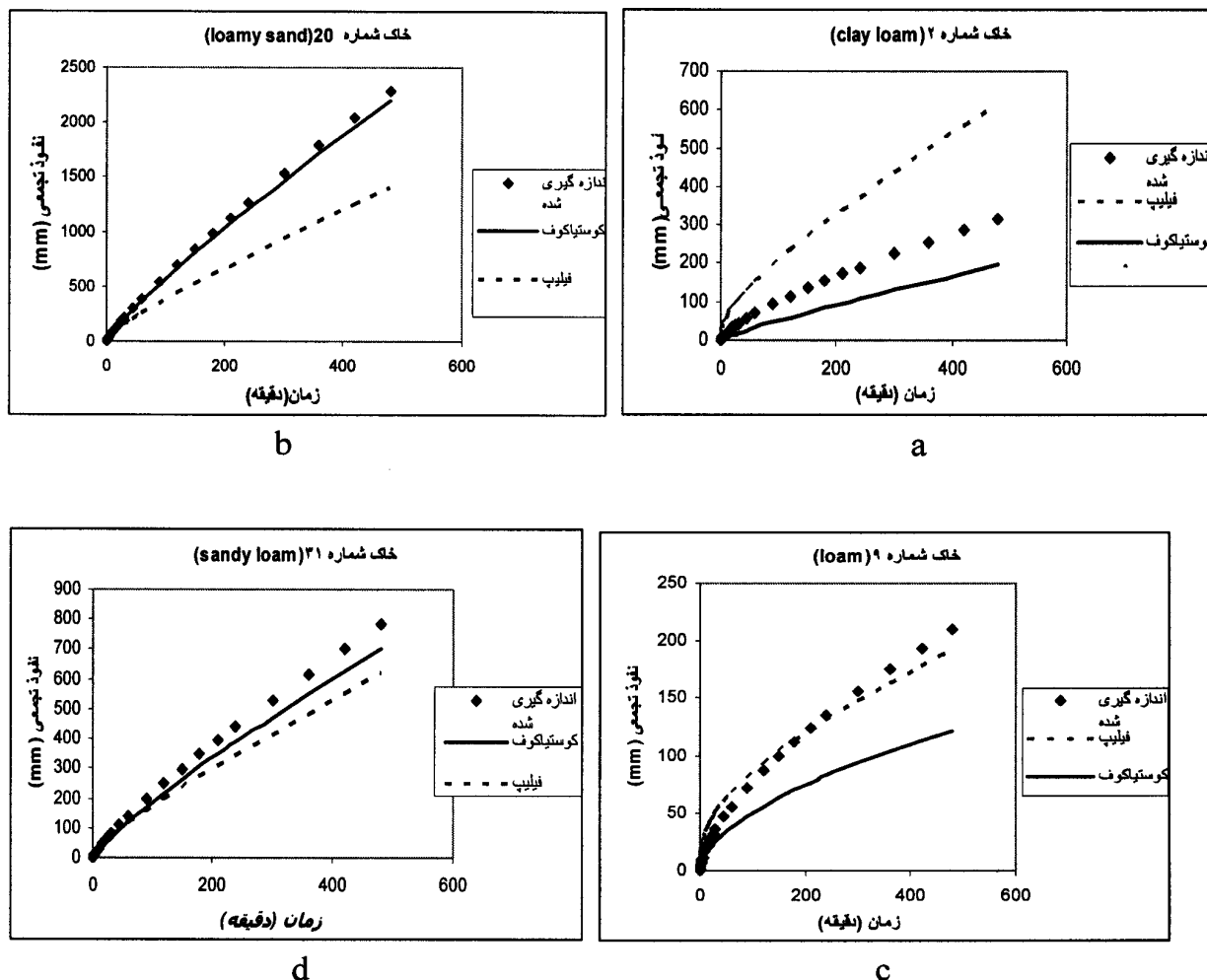
۲ - محاسبه A معادله فیلیپ: برای این منظور مدل ریاضی

کمپل (۳) برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع و رابطه پیشنهادی براکن سیک و راولز (۱) که به صورت توابع انتقالی بود مورد استفاده قرار گرفت که ضریب همبستگی A محاسبه شده توسط این دو روش و A اندازه گیری شده به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۶۷ بود.

نتایج به دست آمده نشان دادند که پارامترهای معادلات نفوذ به خصوصیات فیزیکی از جمله بافت خاک بستگی دارند. ولی به طور کامل توسط این عوامل توجیه نمی‌شوند. به همین دلیل سعی شد به جای اندازه و درصد ذرات از آماره‌های پیشنهادی شیرازی و همکاران (۱۸) که بیانگر توزیع اندازه ذرات است و به جای به کار گیری ویژگی‌های فیزیکی به صورت مستقل، از پارامترهای ترکیبی آن‌ها استفاده گردد (۱۷) شیرازی



شکل ۱- رابطه و پراکنش مقادیر برآورد شده پارامترهای معادلات نفوذ: کوستیاکوف (a و k) فیلیپ (S و A) و هورتون ( $\sigma$  و  $\gamma$ ) و مقادیر اندازه گیری شده آنها که از برازش بر داده‌های تجربی به دست آمده است



شکل ۲ - مقدار نفوذ اندازه گیری شده و برآورد شده توسط معادله کوستیاکوف و فیلیپ در خاکهای مختلف

جدول ۶- روابط رگرسیون چندگانه و درجه همبستگی و اشتباه معیار تخمین بین پارامترهای معادلات نفوذ

و خصوصیات خاک و آماره‌های تعریف شده

پارامتر	رابطه	$R^2$	$R$	SEE
K کوستیاکوف	$54.983 - 0.127 \cdot (CV) \cdot (BD) \cdot (SD) - 29.547 \cdot (BD)$	0.627**	0.792	3.9304
a کوستیاکوف	$0.65 + 0.000179 [(SP - \theta_i) (BD)]^{0.5} \cdot (CV) - 0.00908 [(SP - \theta_i) (BD)]^{0.5} \cdot \ln(CV) + 0.72dg$	0.672**	0.873	0.1248
S فیلیپ	$43.386 + 1715.7(CV/SD) - 22.877(BD) - 0.00189[(SP - \theta_i) (BD)]^{0.5} \cdot (CV) - 16.868(SD)$	0.813**	0.902	2.073
A فیلیپ	$-0.534 + 286.889(CV/SD) + 0.001744(CV)$	0.668**	0.817	0.8363
$\gamma$ هورتون	$e^Z \quad Z = 6.666 - 0.252(BD)^2 \cdot \ln(CV) - 0.000848[(SP - \theta_i)^2 \cdot (dg)] - 0.0194(BD)^2 \cdot (\theta_i)$	0.702**	0.834	0.35
$\sigma$ هورتون	$4.463 - 501.771(CV)/(SD) - 3.213(BD)$	0.705**	0.839	0.9377

SD= $\theta_i$ /SP BD: Bulk Density (0-300mm) SP: Saturation Percentage SEE: Standard Error of Estimate

\*\* معنی دار در سطح ۱٪ \* معنی دار در سطح ۵٪

تشکیل ذرات ثانویه و وابستگی بیشتر فرایند نفوذ به بافت خاک می باشد (۱۶،۱۷).

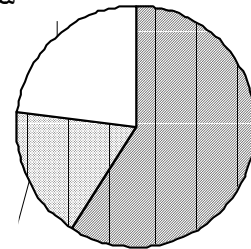
با توجه به این که در مدل‌های ارائه شده از آمارهایی ( $\delta g$  و  $dg$ ) استفاده شد که توسط سه نقطه از منحنی واقعی توزیع اندازه ذرات اولیه محاسبه شده بود، خطای قابل ملاحظه‌ای در درون آنها وجود دارد و درصد ذرات شن و سیلت و رس نمی‌توانند گویای کامل ویژگی‌های آماری توزیع اندازه ذرات خاک باشند (۱۸). انتظار می‌رود که اگر در محاسبات این ضرایب از چندین نقطه که شامل اندازه‌گیری ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر نیز باشند استفاده شود، نتایج بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کنند. مشاهدات نشان داد که نتایج اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در آزمایشگاه تفاوت زیادی با نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای دارد که می‌تواند به دلیل بهم خوردگی خاک به هنگام برداشت و انتقال نمونه و ایجاد جریان ترجیحی در اندازه‌گیری آزمایشگاهی باشد (۱۳).

مطالعه اخیر تأییدی بر این مطلب بود که رابطه تجربی بین منحنی توزیع اندازه ذرات خاک و منحنی نفوذ آب به خاک وجود دارد. دلایل ریاضی، فیزیکی و تجربی قوی و واضح دیگری وجود دارد که رابطه بسیار قوی بین منحنی‌های توزیع تجمعی اندازه ذرات اولیه خاک و منحنی نفوذ آب به خاک وجود دارد (۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۱، ۲۲). انتظار می‌رود با یافتن این روابط با پایه فیزیکی و به صورت کمی و دقیق بتوان بوسیله منحنی توزیع ذرات اولیه و ثانویه خاک، منحنی نفوذ آب به خاک را تعیین نمود.

بدون اختلاف

معنی‌دار: ۹

فیلیپ برآورد شده: ۷



کوستیاکوف برآورد شده: ۲۴

شکل ۳- مقایسه دو مدل کوستیاکوف و فیلیپ برآورد شده در تخمین مقدار نفوذ تجمعی در خاکهای مورد آزمون

### بحث

امکان تخمین پارامترهای هیدرولیکی نفوذ توسط ویژگی‌های فیزیکی خاک - که به آسانی قابل اندازه‌گیری هستند - با دقت نسبتاً خوبی وجود دارد ولی به کارگیری رگرسیون خطی چندگانه که در آن درصد ذرات اولیه و رطوبت‌های اشباع و اولیه و وزن مخصوص ظاهری به عنوان عوامل مستقل به کار رفته‌اند، در تخمین معادلات نفوذ کارآیی لازم را نخواهند داشت و باید به جای آنها از ضرایب آماری پیشنهاد شده و ترکیبی از آنها را استفاده نمود. در اغلب خاکها مقدار نفوذ برآورد شده توسط معادله کوستیاکوف صحت بیشتری نشان می‌دهد ولی بعضی خاکها دقت معادله فیلیپ بالاتر است (شکل ۳). به نظر می‌رسد با سبک تر شدن بافت خاکها دقت برآورد نیز افزایش می‌یابد که شاید به دلیل کاهش

### REFERENCES

1. Brakensiek, D.L., & W.J.Rawls.1998.Effect of agriculture and rangeland management system on infiltration. In: Modeling agricultural, forest, and rangeland hydrology. ASAE, st. goseph, Mich. P. 247.
2. Brooks, R.H., & A.T.Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper3. Colorado State University. Fort Collins
3. Campbell, G.S.1985.Soil physics with BASIC Elsevier, New York, N.Y.
4. Dingman, S. L. 2002. Physical hydrology. 2nd.ed Prentice-Hall Inc. USA pp 220-271
5. Fitzgerald, P. D., G. F. Cossens, & D. S. Richards. 1971. Infiltration and soil physical properties. J. Hydrol. 10: 120-126
6. Green, W. H. & G. A. Ampt.1911.Studies in soil physics :I. The flow of air and water through soils. J. Agric science .4:1-24
7. Gregson, D. J. & M. McGowan. 1987. A one parameter model for the soil water characteristic. Journal of Soil Sci. 38: 483-486
8. Hanks, R. J. 1992. Applied soil physics. 2<sup>nd</sup> Ed., Springer Verlag, New York, NY.

9. Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic press. Sand Diego, CA.
10. Horton, R. E. 1940. An approach toward to physical interpretation of infiltration capacity .Soil.Sci.Soc.Am.J. 5:399-417
11. Klute, A. & C.Dirksen.1986.Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods .In:A.Klute(ed) .Method of soil analysis ,Part 1. Agronomy 9 Soil Science Society of America Madison.W.I. pp687-734
12. Kostiakov, A. N. 1932. On the Dynamic of coefficient of water –percolation in soils and on the necessity for studing it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans sixth comm. .Intern.Soil .Sci.Soc.Russia.Part App 17-21
13. Maheshwari, B. L. 1996. Correlations and interactions among hydraulic parameters of non-cracking soils. ASAE annual international meeting. Paper no 962105.
14. Phillip,J.R.1957a.The theory of infiltration.1.Infiltration equation and its solution .Soil.Sci.83:345-357
15. Radcliffe, D. E. & T. C. Rasmussen. 2000. Soil water movement. In, Hand Book of Soil Science. M. E., Sumner. C.R.C. Press
16. Rawls, W. J. 1992. Infiltration and soil water movement. Chapter 5 In D. R. Maidment. 1992. Hand book of Hydrology. McGraw-Hill. Inc. USA.
17. Rawls, W. J. & D. L. Brakenseik. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Watershed management in the Enghties. ASCE. Pp. 293-299.
18. Shirazi, A., L. Boersma, & W. Hart. 1988. A unifying quantitative analysis of soil tecture: Improvement of precision and extension of scale. Soil Sci. Soc. Am., J. 52:181-190.
19. Smith, E. R. 1976. Approximation for vertical infiltration rate patterns. ASAE. Annual international meeting. Paper No. 75-2010.
20. Sully, M. J. & I. White. 1988. Disk parameter instruction manual. CSIRO. Division of environmental mechanice ,Canberra.Australia
21. Walker, R. W., & Skogerboe. 1983. Surface irrigation. Theory and practice.
22. White, I. & M. J. sally. 1987. Macroscopic and Microscopic capillary length and time scales from field infiltration. Water Resour. Res 23: 1514-1522.
23. Youngs, E. G. 1964. An infiltration method measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials.Soil.Sci.97:307-311