برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک با استفاده از توزیع اندازه ذرات در کاربری‌های مختلف کشاورزی

تکتم فکوری[1*]، حجت امامی، بیژن قهرمان

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد؛
t_fakouri@yahoo.com
استادیار گروه علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد؛
hemami@um.ac.ir
استاد گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد؛
bijangh@um.ac.ir

چکیده

تخمین نفوذ با استفاده از مدل‌های فیزیکی و تجربی و یا برآورد غیرمستقیم آن به کمک ویژگی‌های زودیافت خاک ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، تخمین مقادیر نفوذ تجمعی آب به خاک با استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات و پارامتر شکل منحنی رطوبتی بود. مقادیر نفوذ تجمعی آب به خاک در سه کاربری زراعی، مرتع و باغ در شهرستان نیشابور واقع در خراسان رضوی به روش تک حلقه (بیرکن) در 5 نقطه با سه تکرار اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات در برآورد پارمتر شکل منحنی رطوبتی و سپس برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک در هر سه کاربری، سبب افزایش چشمگیر ضریب تبیین (R^2) در مقایسه با مدل دو جزئی فیلیپ گردید. در کاربری‌های مرتع و باغ جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) حاصل از برازش معادله لاساباتری و همکاران در مقایسه با معادله دو جزئی فیلیپ کاهش بسیار زیادی داشت. بالعکس استفاده از روش میناسنی و مک‌براتنی در هر سه کاربری، سبب کاهش آماره R^2 نسبت به معادله دو جزئی فیلیپ شد. در کاربری زراعی کمترین و بیشترین مقدار RMSE به ترتیب از برازش معادله دو جزئی فیلیپ و روش میناسنی و مک‌براتنی به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، استفاده از توزیع اندازه ذرات برای برآورد پارامتر شکل منحنی رطوبتی و سپس نفوذپذیری خاک توسط معادله لاساباتری و همکاران توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پارامتر شکل منحنی رطوبتی، روش تک حلقه (بیرکن)، معادله فیلیپ، معادله لاساباتری، نفوذپذیری، نوع کاربری اراضی

آدرس نویسنده مسؤول: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی گروه علوم خاک
* دریافت: اسفند، 1390 و پذیرش: شهریور، 1391

مقدمه

طی سالیان گذشته مدل‌های فیزیکی و تجربی فراوانی برای کمی کردن فرآیند نفوذ آب به خاک ارائه شده است. هر کدام از این مدل‌ها در شرایطی معین، مناسب‌ترین برازش را با داده های تجربی دارند. به واسطه هزینه زیاد و زمان‌بر بودن اندازه گیری نفوذ، تخمین نفوذ با استفاده از مدل‌های نفوذ منطقی به نظر می‌رسد.

ارائه یک مدل جهت متوسط سرعت نفوذ یک منطقه از نظر هیدرولوژیکی حائز اهمیت می‌باشد. بین پارامترهای نفوذ، هدایت هیدرولیکی به شدت وابسته به تغییرات مکانی است (11). این تغییرات مکانی به ویژه تغییرپذیری توابع هدایت هیدرولیکی خاک‌ها که عمدتاً شامل منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌باشند، سبب مشکل شدن تحلیل روابط جریان آب در خاک‌های ناهمگن می‌شوند (15). روش‌های مختلفی برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از ویژگی‌های ساده و در دسترس مثل توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یا اندازه‌گیری‌های ساده صحرایی توسعه یافته‌اند (13). اساس بعضی از روش‌ها، آزمایش‌های صحرایی مثل آزمایش نفوذ است (1، 12، 21). این روش‌ها معمولاً با اعمال مکش خاصی متناظر با رطوبت معادل با آن به یک استوانه ساده یا نفوذسنج صفحه‌ای انجام می‌شوند (1).

روش‌های مزرعه‌ای مزایای بیشتری دارند به طوری که 1) هزینه و زمان کمتر دارند، 2) دقت بیشتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی دارند، زیرا نمونه خاک منتقل شده به آزمایشگاه ممکن است نماینده دقیقی از خاک مزرعه نباشد و 3) وسایل آزمایشگاهی برای مشخص نمودن رفتار هیدرولیکی حوضه‌های آبخیز در مقیاس صحرایی به خوبی طراحی نشده‌اند (میاسنی و مک‌براتنی، 2002).

هاورکمپ و همکاران (9) برای اولین بار از روشی به نام "روش بیرکن" استفاده کردند. در این روش، تابع تحلیلی معینی مثل تابع منحنی رطوبتی ون‌گنوختن با شرایط معلم یا تابع هدایت هیدرولیکی بروکس و کوری برای توصیف منحنی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در نظر گرفته می‌شود. سپس پارامترهای شکل ویژگی‌های هیدرولیکی که وابسته به بافت خاک هستند و پارامترهای مقیاس آنها که وابسته به ساختمان خاک هستند،

به ترتیب بر اساس آنالیز اندازه ذرات و آزمایشات صحرایی نفوذ با بار آبی ناچیز تخمین زده می‌شوند (9). سادگی این روش سبب استفاده گسترده از آن شده است. به عنوان مثال گاله و همکاران (6) برای بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شرایط صحرایی این روش را به کار بردند. براد و همکاران (2) نیز برای محاسبه‌ی بیلان آبی ماهانه و سالانه در منطقه‌ای با مساحت 100 کیلومتر مربع در اطراف شهر توملوسوی اسپانیا، از داده‌های نفوذ حاصل از روش بیرکن در مدل-های SWAT و SiSPAT استفاده نمودند. آنها مقادیر نفوذ را به روش صحرایی در 78 نقطه در یک شبکهٔ مربعی شکل اندازه‌گیری کرده و نشان دادند که تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی به روش ساده بیرکن و در تعداد زیادی نقطه می‌تواند تغییرات مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را به خوبی نشان دهد و نتایج مدل‌سازی را بهبود بخشد.

براد و همکاران (3) و لاساباتری و همکاران (15) روشی را با عنوان روش نفوذ بیرکن برای تخمین ویژگی-های هیدرولیکی خاک پیشنهاد نمودند. این روش شامل آزمایش نفوذ در شرایط صحرایی با استفاده از یک استوانه و با مکش $h=0$ در سطح خاک است. این روش نه تنها تخمینی از هدایت هیدرولیکی اشباع را فراهم می‌کند بلکه وضعیت منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی را هم مشخص می‌کند. با این حال لازم است پارامتر شکل منحنی رطوبتی از داده‌های توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک تخمین زده شود.

اندازه‌گیری حداقل پنج جزء از توزیع اندازه ذرات برای توصیف مناسب توزیع اندازه ذرات ضروری است (19). همچنین میناسنی و مک‌براتنی (19) پارامتر شکل منحنی رطوبتی را فقط از جزء رس و شن تعیین و عنوان کردند

که تعیین پارامتر شکل با استفاده از داده‌های رس و شن امکان استفاده از روش بیرکن را در مزرعه با هزینه بسیار کم فراهم می‌کند.

خالدیان و همکاران (14) کارآیی روش تک استوانه بیرکن در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در حوضه آبریز ناورود اسالم با مساحت 307 کیلومتر مربع و در نه نقطه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده با روش بیرکن و مقادیر تخمینی با استفاده از مدل رزتا اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نداشت. آنها سهولت استفاده از این روش در حوضه آبریز به دلیل سبک بودن تک استوانه، سرعت بالای اندازه‌گیری و نیاز به آب کم و دقت آن را از مزیت‌های روش بیرکن دانسته و عنوان کردند که می‌توان از این روش برای برآورد پارامترهای نفوذ حوضه آبریز به عنوان داده ورودی مدل هیدرولوژی استفاده نمود.

درک فرآیند نفوذپذیری برای برنامه ریزی و مدیریت سیستم‌های آبیاری ضروری است. شدت نفوذ آب به خاک در خاک‌های مختلف متفاوت است. همچنین در یک نوع خاک نیز سرعت نفوذ بسته به عوامل مختلف می‌تواند متفاوت باشد (16). اندازه‌گیری صحرایی نفوذ توسط روش استوانه مضاعف بسیار وقت‌گیر و انجام آن در مناطق شیب‌دارو صعب‌العبور به دلیل حجم آب مورد نیاز و وزن تجهیزات با مشکلاتی همراه است، استفاده از پرومامتر گلف نیز باعث به هم خوردن خاک سطحی می‌شود (14).

از سوی دیگر اندازه‌گیری منحنی رطوبتی در آزمایشگاه نیز مستلزم صرف زمان زیاد و وجود تجهیزات آزمایشگاهی خاص مثل صفحه فشاری می‌باشد، بنابراین هدف از این تحقیق تخمین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در سه کاربری مرتع، باغ و زراعی با استفاده از داده-های توزیع اندازه ذرات و استفاده از این پارامترها در تخمین نفوذ آب به خاک‌های سه کاربری بود.

مواد و روشها

این پژوهش بر روی 15 نمونه خاک شامل سه نوع کاربری کشاورزی، باغ و مرتع در شهرستان نیشابور واقع در استان خراسان رضوی انجام شد. در هر کاربری پنج نمونه مورد بررسی قرار گرفت. برای هر نمونه نیز اندازه‌گیری نفوذ در 3 تکرار انجام شد. مطابق روش لاساباتری و همکاران (15) از استوانه تک حلقه به قطر 10 سانتی‌متر برای اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک استفاده شد. در روش مذکور پس از حذف پوشش گیاهی سطح خاک، استوانه در عمقی از خاک (حدود یک سانتی‌متر) قرار داده شد و در زمان صفر حجم ثابتی از آب در داخل آن ریخته شد. زمان سپری شده برای نفوذ آب موجود در استوانه ثبت گردید.

پس از نفوذ کامل حجم آب اولیه، همان حجم آب به سیلندر اضافه و دوباره زمان لازم برای نفوذ اندازه‌گیری شد، این روش 8 تا 15 سری تکرار شد تا زمان نفوذ آب ثابت گردید.

علاوه بر این بعضی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه مثل بافت و جرم مخصوص ظاهری نیز اندازه‌گیری شد که میانگین آنها در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1- میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی خاک	درصد				جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	pH	EC (dS/m)	بافت
	شن	سیلت	رس	ماده آلی				
زراعی	77/36	11/29	11/35	1/87	1/21	7/78	0/73	لوم شنی
مرتع	89/83	1/34	8/83	1/97	1/18	7/96	0/44	شنی
باغ	76/93	9/19	13/87	1/45	1/22	7/93	0/91	لوم شنی

برای برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک از روش‌های زیر استفاده شد:

الف- استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات

به منظور تخمین نفوذ از داده‌های توزیع اندازه ذرات، ابتدا داده‌های توزیع اندازه ذرات که به روش سری الک و هیدرومتری در پنج نقطه برای هر کاربری و در سه تکرار تعیین شده بودند با معادله 1 برازش داده شدند.

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

F(D): درصد تجمعی توزیع اندازه ذرات خاک، D قطر موثر ذرات خاک، D_g پارامتر مقیاس و M بر اساس دو فرض $M=1-\frac{2}{N}$ و $M=1-\frac{1}{N}$ تعیین شد. N هم فاکتور شکل (پارامتر تجربی) است (15).

فرض می‌شود که پارامتر شکل (N) تابع توزیع اندازه ذرات با پارامتر n منحنی رطوبتی خاک از طریق شاخص شکل در ارتباط است (8). شاخص شکل شیب منحنی رطوبتی خاک در مقیاس لگاریتمی است و به صورت زیر تعریف می‌شود (15):

$$p_m=\frac{mn}{1+m} \quad (2)$$

و برای توزیع اندازه ذرات از رابطه زیر تعریف می‌شود (15):

$$p_M=\frac{MN}{1+N} \quad (3)$$

m و n پارامترهای معادله ون گنوختن (24) مربوط به منحنی رطوبتی خاک می‌باشند (m=1 – 1/n) که در معادله 4 ارائه شده است:

$$\theta=(\theta_S-\theta_r)\left[1+\left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m}+\theta_r \quad (4)$$

θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی‌مانده ($cm^3.cm^{-3}$)، h مقدار مکش (cm)، h_g پارامتر مقیاس و m و n پارامترهای شکل هستند.

بین معادلات 2 و 3، رابطه‌ای به شکل معادله 5 برقرار است:

$$p_m=lp_M \quad (5)$$

پارامتر مقیاس برای تبدیل توزیع اندازه ذرات به توزیع اندازه منافذ و وابسته به تخلخل است (3).

$$l=\frac{1-s}{2-s-(1/2s)} \quad (6)$$

s بعد فرکتالی منافذ است که از حل معادله زیر به دست می‌آید (5):

$$0.5\le s<1\ ,\ \varepsilon^{2s}+(1-\varepsilon)^s=1 \quad (7)$$

ε تخلخل خاک (cm^3cm^{-3}) است. میناسنی و مک براتنی (19) معادلات 6 و 7 (رابطه بین l و ε) را به شکل معادله ساده زیر بیان نمودند:

(8)

$$l=0.7467-0.6266\varepsilon+0.5456\varepsilon^2-0.3813\varepsilon^3$$

در این تحقیق ابتدا مقادیر تخلخل خاک بر اساس جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک تعیین و پارامتر l از طریق معادله 8 محاسبه شد، سپس با برازش معادله 1 بر داده های توزیع اندازه ذرات خاک (0/002، 0/05، 0/075، 0/125، 0/5، 1، 1/68 و 2 میلی‌متر) پارامترهای N، M و D_g به دست آمدند. پارامترهای D_g و N از طریق برازش به دست آمدند و سپس پارامرت M از طریق رو فرض M = 1- 1/N و M = 1 – 2/N محاسبه شد

. پس از آن با استفاده از معادلات 3 و 5 پارامتر p_m و سرانجام مقادیر m و n از معادله 2 تعیین شد. مقادیر m و n به دست آمده از توزیع اندازه ذرات خاک با مقادیر به دست آمده از برازش داده‌های منحنی رطوبتی بر معادله ون‌گنوختن (معادله 4) مقایسه شدند. سپس با استفاده از مقادیر m و n و از طریق معادله پیشنهادی لاساباتری و همکاران (15) یعنی معادله 15مقادیر نفوذ تخمین زده شد. البته این معادله همان شکل کلی معادله فیلیپ (20) است ولی برای تعیین پارامتر قابلیت جذب آب (S) از روش لاساباتری و همکاران (15) استفاده شد.

ب- استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی

برای برآورد نفوذ بر اساس پارامترهای منحنی رطوبتی، مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف (0، 0/3، 0/5، 1، 3، 5، 10 و 15 بار) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. داده‌های به دست آمده با معادله ون-گنوختن (24) یعنی معادله 4 برازش داده شد و پارمترهای منحنی رطوبتی تعیین شدند، سپس مقادیر m و n به دست آمده از داده‌های منحنی رطوبتی در معادلات 12b و 12c برای تعیین مقادیر c_p و η جای‌گذاری شدند . پس از تعیین مقادیر c_p و η، مقدار S^2، h_g و K_s به ترتیب با استفاده از معادله 12a، 13 و 14محاسبه شد. در پایان از طریق معادله پیشنهادی لاساباتری و همکاران (15) یعنی معادله 15مقادیر نفوذ تجمعی تخمین زده شد.

ج- استفاده از درصد رس و شن و به کارگیری روش میناسنی و مک‌براتنی (19)

مقادیر m و n از طریق تعیین درصد شن و رس، با استفاده از معادلات 9 و 10 که توسط میناسنی و مک-براتنی (19) پیشنهاد شده بود، تخمین زده شد و در تخمین نفوذ پذیری (معادله 15) مورد استفاده قرار گرفت.

(9)

$$n=2.18+0.11\left[48.087-44.945S(x_1)-1.023S(x_2)-3.896S(x_3)\right]$$

که x_1، x_2 و x_3 از روابط زیر قابل محاسبه است (19).

$$x_1=24.547-0.238Sand-0.082Clay \quad (9a)$$

$$x_2=-3.569+0.081Sand \quad (9b)$$

$$x_3=0.694-0.024Sand+0.048Clay \quad (9c)$$

$$S(x)=\frac{1}{1+\exp(-x)} \quad (10)$$

در معادلات فوق *Sand* و *Clay* به ترتیب درصد شن و رس است.

بعد از تعیین مقادیر m و n مقادیر نفوذ به شرح زیر تخمین زده شد. مقادیر نفوذ تجمعی براساس معادله پیشنهادی لاساباتری و همکاران (15) عبارت است از:

$$I(t)=S\sqrt{t}+(AS^2+BK_s)t \quad (11)$$

S قابلیت جذب آب در خاک است و A و B از طریق معادله‌های 11a و 11b محاسبه شدند.

$$A=\frac{\gamma}{r_d(\theta_0-\theta_s)} \quad (11a)$$

$$B=\frac{2-\beta}{3}\left[1-\left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^{\eta}\right]+\left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^{\eta} \quad (11b)$$

r_d شعاع استوانه برحسب (cm)، θ_0 و θ_s رطوبت اولیه و اشباع خاک برحسب (cm^3cm^{-3}) و γ=0.75 و β=0.6 است (10). S نیز از معادله زیر محاسبه شد.

$$S^2(\theta_0,\theta_S)=c_p\theta_S K_S h_g\left[1-\frac{\theta_0}{\theta_S}\right]\left[1-\frac{\theta_0}{\theta_S}\right]^{\eta} \quad (12a)$$

(12b)

$$c_p=\Gamma\left(1+\frac{1}{n}\right)\left|\frac{\Gamma\left(m\eta-\frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta)}+\frac{\Gamma\left(m\eta-m-\frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta+m)}\right|$$

$$m=1-\frac{2}{n},\ \lambda=mn \qquad \eta=\frac{2}{\lambda}+2+p \quad (12c)$$

Γ تابع گاما است، p: پارامتر اعوجاج است که وابسته به نوع خاک است و در پژوهش با فرض بردین مقدار یک برای آن در نظر گرفته شد (3، 4) . پس از تعیین S^2 و C_p، مقادیر h_g و K_s به ترتیب از طریق معادلات 13 و 14 محاسبه شدند.

$$h_g=\frac{S^2}{c_p K_S(\theta_S-\theta_0)\left[1-\frac{\theta_0}{\theta_S}\right]^{\eta}} \quad (13)$$

$$K_s=\frac{C_2-AC_1^2}{B} \quad (14)$$

C_1 پارامتر تجربی است که معادل قابلیت جذب (S) در نظر گرفته می‌شود (معادله 12a) و C_2 سرعت نفوذ پایه است که از طریق اندازه‌گیری صحرایی و پس از ثابت شدن سرعت نفوذ به دست می‌آید. سرانجام با جای-گذاری پارامترهای C_1 و C_2، معادله 11 به شکل معادله زیر در می‌آید (15):

$$I=C_1\sqrt{t}+C_2 t \quad (۱۵)$$

د- استفاده از معادله دو جزئی فیلیپ

داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ با معادله دو جزئی فیلیپ (20) یعنی معادله 16 به روش حداقل مربعات خطا برازش داده شد.

$$I=St^{\frac{1}{2}}+K_s t \quad (16)$$

در پایان نتایج حاصل از تخمین نفوذ تجمعی آب به خاک با معادله دو جزئی فیلیپ (20) یعنی معادله 16 و مدل پیشنهادی لاساباتری و همکاران (معادله 15) با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدندکه برای مقایسات از پارامترهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از برازش معادله دو جزئی فیلیپ (20) و مدل لاساباتری و همکاران (15) معادله 15، به تفکیک هر کاربری در جدول 2 نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در کاربری مرتع هنگامی که پارامترهای m و n از داده های توزیع اندازه ذرات با فرض M=1-1/N تخمین زده شدند و سپس مقادیر نفوذ بر اساس معادلهٔ پیشنهادی لاساباتری و همکاران (15) برآورد شدند مقدار R^2 در مقایسه با مدل دو جزئی فیلیپ (20) به طور قابل توجهی افزایش یافت.

چنین روندی با فرض دوم (M=1-2/N) و همچنین استفاده از m و n به دست آمده از برازش داده‌های منحنی رطوبتی با معادله ون‌گنوختن (24) نیز مشاهده شد، به طوری که در همه حالات ذکر شده مقدار R^2 بیشتر از 0/99 بود. آماره RMSE نیز در معادله لاساباتری و همکاران (15) در هر سه حالت در مقایسه با معادله دو جزئی فیلیپ (263/67) کاهش بسیار زیادی داشت و کمترین آن (0/64) مربوط به معادله لاساباتری و همکاران (15) با فرض M=1-1/N بود. استفاده از معادله لاساباتری و همکاران (15) در همه حالات سبب کاهش آماره ME گشت ولی بر عکس معادله دو جزئی فیلیپ (20) مقدار آن منفی و قدر مطلق آن کمتر از یک بود که نشان دهنده

کم‌برآوردی بودن معادله لاساباتری و همکاران (15) و بیش برآوردی بودن شکل دو جزئی آن است. برآورد نفوذ با روش میناسنی و مک‌براتنی (19) که در آن تنها از داده‌های درصد رس و شن استفاده شد، سبب کاهش RMSE گردید و مقدار R^2 نیز اندکی کاهش داشت ولی قدر مطلق میانگین خطا افزایش داشت.

به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در روش میناسنی و مک‌براتنی (19) فقط درصد شن و رس تعیین می‌شود، احتمالاً به این دلیل دقت آن در مقایسه با روش لاساباتری و همکاران (15) که فرکشن‌های بیشتری از اندازه ذرات (حداقل پنج فرکشن) تعیین می‌شوند، کمتر بوده است.

در کاربری زراعی اگرچه استفاده از معادله لاساباتری و همکاران (15) در تمامی حالات سبب افزایش ضریب تبیین آنها گردید ولی از آنجا که ضریب تبیین در معادله دو جزئی فیلیپ (20) بالا بود، این افزایش در آماره R^2 تفاوت چندانی نداشت. ولی استفاده از روش میناسنی و مک‌براتنی (19) سبب کاهش قابل توجه در آماره R^2 شد. استفاده از داده‌های درصد رس و شن در روش میناسنی و مک‌براتنی (19) برای تخمین پارامتر n کافی نبوده و نتوانسته است تخمین مناسبی از پارامتر n را فراهم کند، در نتیجه پارامتر قابلیت جذب (S) نیز با دقت قابل قبولی تخمین زده نشده است و دقت این مدل برای تخمین نفوذ تجمعی کاهش یافته است. بنابراین به نظر می‌رسد برای تخمین پارامتر n و در نتیجه قابلیت جذب آب و نفوذپذیری داده‌های شن و رس کافی نیستند و لازم است منحنی توزیع اندازه ذرات با جزئیات بیشتر و به صورت دقیق‌تر تعیین شود. در کاربری زراعی کمترین مقدار RMSE (0/017) از برازش معادله دو جزئی فیلیپ (20) به دست آمد،

همچنین مقادیر RMSE (با دامنه 0/954-0/607) مربوط به معادله لاساباتری و همکاران (15) در سه حالت ذکر شده در جدول 2 بود. بیشترین مقدار RMSE (12/05) نیز از برازش روش میناسنی و مک‌براتنی (19) به دست آمد (جدول 2). مشابه با کاربری مرتع، آماره ME تنها در معادله دو جزئی فیلیپ (20) بیشتر از یک بود که بیانگر بیش‌برآوردی بودن آن است و در معادله لاساباتری و همکاران (15) و روش میناسنی و مک‌براتنی (19) مقدار آن منفی بود که نشان دهنده کم‌برآوردی بودن آنها در پیش‌بینی نفوذ است. مقادیر ME به ترتیب در معادله لاساباتری و همکاران (15) با فرضیات استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی، M=1-1/N و M=1-2/N و روش میناسنی و مک‌براتنی (19) کاهش یافت. البته تفاوت ME حاصل از روش میناسنی و مک‌براتنی (19) بسیار زیاد بود.

جدول 2 – نتایج برازش معادلات دو جزئی فیلیپ و لاساباتری و همکاران با فرضیات مختلف بر مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک

معادلات مورد استفاده	فرضیات	کاربری								
		مرتع			زراعی			باغ		
		R^2	RMSE	ME	R^2	RMSE	ME	R^2	RMSE	ME
دو جزئی فیلیپ (1957)	-	0/755	263/67	14/62	0/985	0/017	0/129	0/658	600/53	21/54
لاساباتری و همکاران (2006)	استفاده از m و n اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی	0/996	0/69	-0/49	0/991	0/607	-0/23	0/989	1/365	-0/67
لاساباتری و همکاران (2006)	استفاده از m و n تخمینی از داده‌های بافت و فرض $M=1-2/N$	0/997	1/01	-2/23	0/995	0/954	-2/61	0/987	1/57	13/69
لاساباتری و همکاران (2006)	استفاده از m و n تخمینی از داده‌های بافت و فرض $M=1-1/N$	0/999	0/64	-0/99	0/991	0/898	-1/93	0/988	1/48	13/15
میناسنی و مک-براتنی (2007)	استفاده از m و n تخمینی از داده‌های رس و شن	0/70	7/79	-35/25	0/607	12/05	-66/67	0/589	23/48	-141/7

در کاربری باغ نیز مشابه با دو کاربری مرتع و زراعی، آماره R^2 حاصل از برازش معادله لاساباتری و همکاران (15) در هر سه وضعیت ذکر شده در جدول 2 در مقایسه با معادله دو جزئی آن افزایش چشمگیری داشت، به طوری‌که در هر سه حالت مقدار R^2 بیش از 98% بود. همچنین در این کاربری نیز استفاده از روش میناسنی و مک‌براتنی (19) سبب کاهش مقدار R^2 گردید، به طوری که کمترین مقدار R^2 (0/589) در بین همه‌ی کاربری‌ها و معادلات مورد استفاده در این پژوهش برای تخمین نفوذ در نتیجه استفاده از این روش به دست آمد. در این کاربری کمترین مقادیر RMSE در نتیجه استفاده از معادله لاساباتری و همکاران (15) برای تخمین نفوذ در تمامی حالات ذکر شده در جدول 2 حاصل شد که تفاوت چندانی نداشتند و قابل چشم‌پوشی بود.

مشابه با کاربری مرتع بیشترین مقدار RMSE (600/53) از برازش معادله دو جزئی فیلیپ (20) به دست آمد. قدر مطلق ME حاصل از معادله لاساباتری و همکاران (15) و هنگام استفاده از m و n حاصل از برازش داده‌های منحنی رطوبتی با معادله ون‌گنوختن (24) کمترین مقدار بود ولی از آنجا که علامت آن منفی بود نشان دهنده کم‌برآوردی بودن آن است. استفاده از فرضیات M=1-1/N و M=1-2/N سبب افزایش مقادیر ME و بیش‌برآوردی (مثبت شدن) آنها گردید، البته مقادیر ME حاصل از این دو فرض تقریبا مشابه بود ولی قدر مطلق آنها با معادله دو جزئی فیلیپ (20) و به ویژه روش میناسنی و مک‌براتنی (19) بسیار زیاد بود (جدول 2). در این کاربری نیز مشابه با دو کاربری مرتع و زراعی مدل دو جزئی فیلیپ (20) بیش‌برآورد و روش میناسنی و مک‌براتنی (19) کم‌برآورد و همچنین کمترین مقدار (141/7-) بود.

نفوذ آب به خاک در چرخه آبی، مدیریت صحیح آبیاری، ذخیره رطوبت مطلوب خاک در مناطق خشک و عملکرد زراعی قابل قبول، نقش مهمی دارد، اما به علت هزینه زیاد، سخت و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری آن، از مدل‌های مختلفی برای تخمین نفوذپذیری استفاده می‌شود. مدل فیلیپ (20) از جمله مدل‌هایی است که در بسیاری از پژوهش‌ها برای تخمین نفوذپذیری آب در خاک از آن استفاده شده است (7، 22، 17، 18، 22). تک استوانه بیرکن نیز که اولین بار توسط هاورکمپ و همکاران (9) برای اندازه‌گیری نفوذ و تخمین پارامترهای شکل ویژگی‌های هیدرولیکی از توزیع اندازه ذرات مورد استفاده قرار گرفت، به علت سادگی روش در تعدادی از پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (2، 3، 14،6، 15).

نتایج این پژوهش نشان داد که در هر سه کاربری مرتع، زراعی و باغ استفاده از توزیع اندازه ذرات برای تخمین پارامترهای شکل منحنی رطوبتی و سپس نفوذ تجمعی آب در خاک توسط معادله لاساباتری و همکاران (15) دارای دقت بسیار بالایی بود. براد و همکاران (2) نیز عنوان کردند تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی به روش ساده بیرکن و در تعداد زیادی نقطه می‌تواند تغییرات مکانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را به خوبی نشان دهد و نتایج مدل‌سازی را بهبود بخشد.

همچنین براد و همکاران (3) و لاساباتری و همکاران (15) از روش نفوذ بیرکن برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده نموده و پارامتر شکل منحنی رطوبتی را از داده‌های توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک تخمین زدند. لاساباتری و همکاران (15) نتایج حاصل از روش بیرکن و داده‌های نفوذ را با روش‌های دیگر برای تخمین قابلیت جذب آب و هدایت هیدرولیکی در سه نوع خاک کشاورزی، شنی و رسوبات یخچالی رودخانه‌ای درشت‌تر از شن مقایسه نمودند و دریافتند که به جز روش بیرکن سایر روش‌ها در بعضی موارد قادر به مدل‌سازی دقیق داده‌های آزمایش نبودند و با مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ همخوانی نداشتند. آنها عنوان کردند که روش بیرکن می‌تواند به عنوان یک روش آسان، دقیق و

ارزان‌قیمت برای مشخص نمودن رفتار هیدرولیکی خاک مورد توجه قرار گیرد.

خالدیان و همکاران (14) نیز با بررسی کارآیی روش تک استوانه بیرکن در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در حوضه آبریز ناورود اسالم دریافتند که بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمده با روش بیرکن و مقادیر تخمینی با استفاده از مدل رزتا اختلاف معنی‌داری در سطح اعتماد 95 درصد وجود نداشت. نتایج این تحقیق نیز با نتایج پژوهش‌های ذکر شده مطابقت داشت و همان طور که گفته شد در هر سه کاربری استفاده از M و N برای تخمین پارامتر شکل منحنی رطوبتی (n) و سپس قابلیت جذب آب و هدایت هیدرولیکی اشباع که در معادله لاساباتری و همکاران (15) برای تخمین نفوذ مورد استفاده قرار گرفتند دقت مدل بسیار بالا بود.

میناسنی و مک‌براتنی (19) فقط از درصد رس و شن داده‌های سه بانک اطلاعاتی (UNSODA، GRIZZLY و بانک اطلاعاتی خاک‌های استرالیا) برای تخمین n استفاده کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که روش پیشنهادی آنها تاثیری بر دقت n پیش‌بینی شده با روش بیرکن نداشت، که با نتایج این پژوهش همخوانی ندارد. دراین پژوهش هنگامی که فقط از درصد رس و شن مطابق با روش میناسنی و مک‌براتنی (19) پارامتر شکل منحنی رطوبتی (پارامتر n) تخمین زده شد، با آنکه دقت مدل نسبتا بالا بود (دامنه R^2 بین 0/59 تا 0/70متغیر بود) ولی در مقایسه با روش لاساباتری و همکاران (15) دارای دقت پایینی بود. به نظر می‌رسد روش میناسنی و مک‌براتنی (19) در خاک‌هایی شبیه به خاک‌های مورد مطالعه که درصد ذرات شن در آنها بیشتر بود از دقت کافی برخوردار نیست و لازم است در خاک‌هایی با دامنه متنوعی از اندازه ذرات مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان با قطعیت بیشتری در مورد دقت آن اظهار نظر نمود. البته به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در روش میناسنی و مک‌براتنی (19) فقط درصد شن و رس تعیین می‌شود، احتمالاً به این دلیل دقت آن در مقایسه با روش لاساباتری و همکاران (15) که فرکشن‌های بیشتری از اندازه ذرات (حداقل پنج فرکشن) تعیین می‌شوند، کمتر بوده است.

نتیجه گیری

فرآیند نفوذ آب به خاک نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت ایفاء می‌کند، بنابراین کمی کردن پدیده نفوذ آب در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت بالایی برخوردار است، ولی اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از جمله نفوذپذیری هزینه‌بر و وقت‌گیر بوده و به دلیل تغییرات مکانی و زمانی فراوان آن، دشوار است. به همین علت تلاش‌های زیادی برای کمی کردن آن با استفاده از مدل‌های فیزیکی و تجربی مختلف و همچنین تخمین برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی مثل نفوذپذیری به صورت غیرمستقیم انجام شده است.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری صحرایی نفوذ توسط روش استوانه مضاعف بسیار وقت‌گیر و انجام آن در مناطق شیب‌دار و صعب‌العبور به دلیل حجم آب مورد نیاز و وزن تجهیزات با مشکلاتی همراه است، دراین پژوهش تلاش شد که مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک با استفاده از پارامتر شکل منحنی رطوبتی تخمین زده شود. علاوه - بر این از آنجا که اندازه‌گیری منحنی رطوبتی در آزمایشگاه نیز مستلزم صرف زمان زیاد و وجود تجهیزات آزمایشگاهی خاص مثل صفحه فشاری می‌باشد،

بنابراین امکان استفاده از پارامترهای زودیافت خاک مثل توزیع اندازه ذرات و تخمین پارامتر شکل منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات و استفاده از این پارامترها در تخمین نفوذ آب در خاک‌های سه کاربری مرتع، باغ و زراعی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از برازش معادله فیلیپ (20) و روش میناسنی و مک‌براتنی (19) مقایسه شد.

نتایج نشان داد که استفاده از توزیع اندازه ذرات در برآورد پارامتر شکل منحنی رطوبتی و در نتیجه نفوذ

تجمعی آب در خاک در هر سه کاربری، سبب افزایش چشمگیر آماره R^2 در مقایسه با مدل دو جزئی فیلیپ (20) گردید. در کاربری‌های مرتع و باغ آماره RMSE حاصل از برازش معادله لاساباتری و همکاران (15) در مقایسه با معادله دو جزئی فیلیپ (20) کاهش بسیار زیادی داشت. بالعکس استفاده از روش میناسنی و مک-براتنی (19) در هر سه کاربری، سبب کاهش آماره R^2 نسبت به معادله فیلیپ (20) شد. در کاربری زراعی کمترین و بیشترین مقدار RMSE به ترتیب از برازش معادله دو جزئی فیلیپ (20) و روش میناسنی و مک-براتنی (19) به دست آمد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، کاربرد توزیع اندازه ذرات برای برآورد پارامتر شکل منحنی رطوبتی و نفوذپذیری خاک با استفاده از معادله لاساباتری و همکاران (15) توصیه می‌گردد. علاوه براین روش بیرکن به دلیل سبک بودن تک استوانه، سرعت بالای اندازه‌گیری و نیاز به آب کم و دقت آن برای برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک قابل استفاده است.

منابع مورد استفاده:

1) Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L., Gaudet, J.P. and Vauclin, M. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. Soil and tillage research, 55:1–29.
2) Braud, I., Haverkamp, R., Arrue, J.L. and Lopez, M.V. 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.
3) Braud, I., De Condappa, D., Soria, J.M., Haverkamp, R., AnguloJaramillo, R., Galle, S. and Vauclin, M. 2005. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulics properties (the Beerkanmethod). European journal of soil science, 56: 361–374.
4) Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculation from pore size distribution data. Petroleum Transactions of the American institute of mining, and metallurgical engineers, 198: 71–77.
5) Fuentes, C., Haverkamp, R. and Parlange, J.Y. 1992. Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. Journal of hydrology, 134:117–142.
6) Galle, S., Angulo Jaramillo, R., Braud, I., Boubkraoui, S., Bouchez, J.M., De Condappa, D., Derive, G., Gohoungssou, A., Haverkamp, R., Reggiani, P. and Soria-Ugaldes, J. 2001. In: Estimation of soil hydrodynamic properties of the Donga watershed (CATCH Benin). 4th International Conference of the GEWEX. Sept. 10–14. Paris, France.
7) Ghorbani Dashtaki, Sh., Homaee, M. and Mahdian, M.H. 2007. Efficiency of some infiltration models in different pedogenic area of Iran. Journal of agriculture sciences, 13(1): 79-96. (In Farsi).
8) Haverkamp, R., Leij, F.J., Fuentes, C., Sciortino, A. and Ross, P.J. 2005. Soil water retention. I. Introduction of a shape index. Soil science society of America journal, 69:1881-1890.

9) Haverkamp, R., Arrue, J.L., Vandervaere, J.P., Braud, I., Boulet, G., Laurent, J.P., Taha, A., Ross, P.J. and Angulo-Jaramillo, R. 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.

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

11) Horton, R.E. 1940. Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil science society of America journal, 5: 339-417.

12) Jacques, D., Mohanty, B.P. and Feyen, J. 2002. Comparison of alternative methods for deriving hydraulic properties and scaling factors from single-disc tension infiltrometer measurements. Water resource research, 38(7):2501–2514.

13) Jarvis, N.J., Zavattaro, L., Rajkai, K., Reynolds, W.D., Olsen, P.A., McGechan, M., Mecke, M., Mohanty, B., Leeds-Harrison, P.B., and Jacques, D. 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. Geoderma, 108: 1–17.

14) Khaledian, M., Moosavai, S.A., Asadi, H. and Noroozi, M. 2011. Determination saturated hydraulic conductivity by using of Beerkan single ring in watershed scale for application in hydrology model. 12th Iranian soil congress. Sep. 3-5. Tabriz, Iran. (In Farsi).

15) Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I. and Haverkamp, R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-Best. Soil science society of America journal, 70: 521-532.

16) Maheshwari, B. L. 1996. Correlations and interactions among hydraulic parameters of noncracking soils. ASAE. Annual international meeting, 96- 105.

17) Minasny, B. and McBratney, A.B. 2000a. Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements. Geoderma, 95:305–324.

18) Minasny, B. and McBratney, A.B. 2002b. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. Geoderma, 107:55–70.

19) Minasny, B. and McBratney, A.B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. Soil Science Society of America Journal, 71:1105-1110.

20) Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil science, 84: 257–264.

21) Simunek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, M.G., Vandervaere, J.P. and Van Genuchten, M.Th. 1998. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. Geoderma, 86:61–81.

22) Vaghefi, M. 2004. Determination conceptual infiltration model and converting crude rain to net rain in southern Iran catchment. First Iranian congress of civil engineering. May 11-13. Tehran, Iran (In Farsi).

23) Vaghefi, M. and Movahed Zadeh, M. 2011. Study Philip infiltration model using the results of double ring in Mand catchment (Dashti town, Booshehr province). Journal of marine science and technology, 58: 29-37. (In Farsi).
24) Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal, 44:892–898.