

یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی ظرفیت نفوذ خاک در وضعیت آبیاری بارانی

بهزاد قربانی

استادیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۸۱/۱۲/۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۴/۲/۲۱

چکیده

نفوذپذیری خاک در بسیاری از طرح‌های آب و خاک، نظیر سیستم‌های آبیاری و زهکشی، عامل بسیار مهمی است. در طراحی روش‌های مختلف آبیاری بارانی، غالباً منحنی شدت نفوذ و یا مقدار شدت نفوذ نهایی خاک در تعیین حداکثر شدت پاشش آبیاری و مدت آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند شدت نفوذ نهایی خاک در نقاط مختلف یک مزرعه ممکن است یکسان نباشد، ولی اگر در تعیین ظرفیت نفوذ خاک از روش‌های مناسب آبیاری بارانی استفاده شود، از رواناب سطحی کاسته می‌شود و بازده آبیاری افزایش می‌یابد. در این تحقیق از یک مدل فیزیکی - ریاضی برای پیش‌بینی ظرفیت نفوذ آب و سرعت نفوذ نهایی خاک در شرایط آبیاری بارانی استفاده شده است. نتیجه حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد بین مقادیر ظرفیت نفوذ مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل همبستگی زیادی ($r^2=96-98\%$) وجود دارد و مدل قادر است ظرفیت نفوذ را در هر لحظه در شرایط آبیاری بارانی روی کرت و جوی پشته پیش‌بینی کند. علاوه بر آن با استفاده از شدت‌های مختلف پاشش یک پاشنده در دو زمان ماندابی می‌توان حرکت مویبگی و ظرفیت نفوذ نهایی آب در خاک را با استفاده از این مدل پیش‌بینی کرد.

۲۱

واژه‌های کلیدی: مدل، ظرفیت نفوذ، حرکت مویبگی، هدایت هیدرولیکی، زمان ماندابی، شدت پاشش

مقدمه

در طراحی روش‌های مختلف آبیاری بارانی، غالباً منحنی شدت نفوذ در مقابل زمان یا مقدار شدت نفوذ نهایی خاک در تعیین حداکثر شدت پاشش آبیاری و مدت زمان لازم برای نفوذ مقدار معین آب آبیاری به عمق ریشه گیاهان استفاده می‌شود. هر چند عوامل متعددی روی نفوذ آب در خاک اثر دارند ولی در معادلات آرایه شده توسط محققین از جمله گرین و امیت (۱۹۱۱)، کوستیاکف (۱۹۳۲)، هورتون (۱۹۴۰)، هولتسان (۱۹۶۱)، ریچاردز (۱۹۵۲)، فیلیپ (۱۹۶۹) و چایلدرز (۱۹۶۹) تأثیر شدت پاشش روی نفوذ آب در خاک دیده نشده است.

علاوه بر آن، روش‌های موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک گاهی مشکل، وقت‌گیر و یا مناسب شرایط آبیاری بارانی و حوضه‌های آبخیز نیست و داده‌های حاصل نمی‌توانند شرایط مورد نیاز را شبیه‌سازی کنند. به این لحاظ، معرفی یک روش که با سهولت بیشتر و صرف وقت و هزینه کمتری بتواند نفوذپذیری خاک را اندازه‌گیری کند، ضروری به نظر می‌رسد. در همین راستا اسمیت و پارالانج (۱۹۷۸) و وولهازر و همکاران (۱۹۹۰) معادلاتی آرایه داده‌اند که در آنها تأثیر شدت پاشش در نفوذ آب به خاک منظور شده است.



$$i_c = \frac{K_s \exp\left(\frac{d \cdot i_c}{B}\right)}{\exp\left(\frac{d \cdot i_c}{B}\right) - 1} \quad [2]$$

در این رابطه K_s هدایت هیدرولیکی اشباع و B عاملی است که از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$B = G(\theta_s - \theta_i) \quad [3]$$

در این رابطه θ_i و θ_s به ترتیب رطوبت اولیه و رطوبت اشباع خاک و G یکی از عوامل فیزیکی خاک است که به آن حرکت موینگی^۲ می‌گویند. بعد G و B طول و بعد i_c و K_s طول در واحد زمان است. اگر ظرف راست معادله [۳] در تختل خاک (ϕ) ضرب و بر آن تقسیم شود، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$B = G \phi (S_{max} - S_i) \quad [4]$$

S_i و S_{max} به ترتیب حداکثر درجه اشباع و اولیه خاک است. درجه اشباع خاک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{\theta}{\phi} \quad [5]$$

دامنه تغییرات S بین صفر و ۱ است و کاربری آن آسان‌تر از درصد رطوبت است. عوامل S و ϕ در رابطه [۴] با نمونه برداری از مزرعه قابل اندازه‌گیری هستند. ولی اندازه‌گیری G به سهولت دو عامل فوق نیست.

بانگر (۱۹۶۸) برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)، بر مبنای تحلیل گرین و امپت، معادله زیر را برای شدت پاشش ثابت R و زمان ماندابی مطرح نمود:

$$t_p = \frac{S_s^2}{2R(R - K_s)} \quad [6]$$

که در آن t_p زمان ماندابی و S_s ضریب جذب آب^۳ توسط خاک است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_s^2 = 2 \int_{\theta_i}^{\theta_s} k(\psi) d\psi \times (\theta_s - \theta_i) \quad [7]$$

که در آن $k(\psi)$ هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک به صورت تابعی از پتانسیل ماتریک می‌باشد. اسمیت (۱۹۸۳) رابطه زیر را نیز بین G و K_s بیان نمود:

هرچند شدت نفوذ نهایی خاک در نقاط مختلف یک مزرعه ممکن است یکسان نباشد. ولی اگر در تعیین آن از روش‌های مناسب آبیاری بارانی استفاده شود، از رواناب سطحی کاسته می‌شود و بازده آبیاری افزایش می‌یابد (قربانی، ۲۰۰۱). در ابتدای بارش، شدت نفوذ (i_c) به وسیله شدت باران (R) با شدت آبیاری کنترل می‌شود و مقدار آن مساوی شدت بارش (یا شدت پاشش) بوده و رواناب صفر است. در این مدت خاک می‌تواند آب را با شدتی بیشتر از شدت پاشش جذب نماید. لحظه‌ای که در آن ظرفیت نفوذ^۴ لحظه‌ای (i_c) خاک عامل کنترل شدت نفوذ می‌شود زمان آغاز رواناب یا زمان ماندابی^۵ شدن است. به هر حال شدت نفوذ همیشه کسری از شدت بارش و یا ظرفیت نفوذ خاک است.

هدف از این تحقیق پیش‌بینی ظرفیت نفوذ آب در هر لحظه و ظرفیت نفوذ نهایی خاک در وضعیت آبیاری بارانی با استفاده از یک مدل فیزیکی-ریاضی است. برای این منظور، شدت نفوذ با استفاده از مدل پیش‌بینی و با داده‌های اندازه‌گیری شده اعتبارسازی شده است. علاوه بر آن، روش تخمین عامل حرکت موینگی خاک (G) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) با استفاده از زمان ماندابی در شدت‌های مختلف پاشش یک پاشنده بررسی شده است.

شرح مدل: طبق گزارش وولهایزر و همکاران (۱۹۹۰) ظرفیت نفوذ (i_c) را می‌توان تابعی از رطوبت اولیه خاک (θ_i) و مقدار بارانی که قبلاً جذب خاک شده است (d_i) توصیف کرد:

$$i_c = f(d_i, \theta_i) \quad [1]$$

اسمیت و پارالنج (۱۹۷۸) معادله زیر را بین ظرفیت نفوذ خاک (i_c)، هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار بارانی که قبلاً وارد خاک شده است، بیان کرده‌اند:

۱- به حداکثر شدتی که در هر لحظه آب وارد خاک می‌شود ظرفیت نفوذ (Infiltration capacity) می‌گویند.

2-Time of ponding

3-Capillary drive
4- Sorptivity



(cm^2/s) است که مقدار آن از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_m = \frac{S_s^2 b}{(\theta_s - \theta_i)} \quad [15]$$

در این معادله S_s ضریب جذب آب توسط خاک است که واحد آن $\text{cm/s}^{1/2}$ و b ضریبی بدون بعد است که مقدار آن بین $0/5$ و $0/25\pi$ تغییر می‌کند (فیلیپ، ۱۹۶۹). برای خاک‌هایی که منحنی نفوذ آنها به صورت پلکانی است، مقدار b برابر $0/55$ فرض می‌شود. ضریب جذب آب توسط خاک (S_s) را می‌توان از معادله فیلیپ (۱۹۶۹) به شرح زیر تخمین زد:

$$I = S_s t^{1/2} \quad [16]$$

و یا:

$$S_s = \frac{I}{t^{1/2}} \quad [17]$$

در این معادله I نفوذ تجمعی و t زمان از ابتدای نفوذ حسب دقیقه است. اگر نفوذ تجمعی آب در خاک که در شرایط آبیاری بارانی محاسبه شده است، در مقابل جذر زمان $t^{1/2}$ رسم شود، در ابتدای نفوذ (حدود بیست دقیقه اول آزمایش) شکل منحنی خطی خواهد بود که شیب آن معادل ضریب جذب آب توسط خاک است (یانگر، ۱۹۹۶).

۲۳



مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در مزرعه دانشگاه کرانفیلد انگلستان، با بافت لوم شنی، از دو روش تراز آبی و زمان ماندابی که سووی و پیر (۱۹۶۳) پیشنهاد کرده‌اند، استفاده شد. روش تراز آبی مناسب شرایط آبیاری بارانی است، به همین سبب برای تعیین منحنی‌های نفوذ مورد استفاده قرار گرفت. در این روش از یک پاشنده آبپاش با فشار ۳ بار و شدت پاشش ۵۴ میلی‌متر در ساعت استفاده گردید و رواناب حاصل از پاشش آب به سطح یک کرت به ابعاد ۱۲×۳ متر نسبت به زمان اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از معادله تراز آبی ظرفیت نفوذ خاک مشخص گردید. همین آزمایش با فشار ۳ بار و شدت پاشش $۵۹/۷$ میلی‌متر در ساعت برای

$$G = \frac{1}{K_s} \int_{\theta_i}^{\theta_s} k(\psi) d\psi (\theta_s - \theta_i) \quad [8]$$

اگر دو معادله اخیر را در معادله [۶] قرار دهیم خواهیم داشت:

$$t_p = \frac{GK_s}{R(R - K_s)} \quad [9]$$

$$R = \frac{GK_s}{t_p R} + K_s \quad [10]$$

اگر زمان ماندابی در شدت‌های مختلف پاشش معلوم باشند، با رسم R در مقابل $1/(t_p R)$ ضرایب معادله یعنی G و K_s به دست می‌آیند. در غیر این صورت، اگر معادله فوق را برای دو زمان ماندابی در دو شدت مختلف پاشش بنویسیم خواهیم داشت:

$$R_1 = \frac{GK_s}{t_{p1} R_1} + K_s \quad [11]$$

$$R_2 = \frac{GK_s}{t_{p2} R_2} + K_s \quad [12]$$

از تفاضل دو معادله فوق، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$GK_s = \frac{R_1 R_2}{\left(\frac{1}{t_{p1} R_1} - \frac{1}{t_{p2} R_2} \right)} \quad [13]$$

مقادیر R_1, R_2, t_{p1} و t_{p2} با استفاده از یک پاشنده با شدت‌های مختلف پاشش مشخص می‌شوند و آن گاه مقدار GK_s از معادله [۱۳] و K_s از معادله [۱۱] یا [۱۲] محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار G به دست می‌آید. پس از تعیین G و قراردادن آن در معادله [۴] مقدار B حاصل می‌شود. حال که تمام عوامل مشخص شده‌اند، به آسانی می‌توان ظرفیت نفوذپذیری خاک را محاسبه و شدت نفوذ نهایی را تخمین زد.

اسمیت (۱۹۸۳) معادله دیگری نیز به شرح زیر برای محاسبه G مطرح نمود:

$$G = \frac{\phi_m}{K_s} \quad [14]$$

در این معادله K_s هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع و ϕ_m جریان پتانسیل ماتریک خاک در واحد عرض

شعاع پاشش به داخل حرکت کند، در این فاصله به نقطه (یا نقاطی) می‌رسد که ظهور آب در سطح زمین بیانگر آغاز ماندابی شدن در آن نقطه است. در نتیجه می‌توان فرض کرد که شدت پاشش در این نقطه تقریباً مساوی ظرفیت نفوذ آب در خاک است. همین روش برای سایر قوطی‌ها دنبال می‌شود و از روی مقدار آب موجود در هر قوطی و زمان ماندابی، شدت جریان پاشش در آن نقطه محاسبه و با استفاده از داده‌ها منحنی نفوذ رسم می‌شود. ولی در عمل نیازی به یافتن تمام نقاط نیست و با تعیین زمان ماندابی برای دو شدت پاشش مختلف و با استفاده از مدل فوق، ظرفیت نفوذ نهایی و حرکت مویبگی خاک محاسبه می‌شود.

بحث و نتایج

برای استفاده از مدل، تعیین برخی از پارامترهای مورد نیاز از جمله ضریب جذب آب توسط خاک و مقدار حرکت مویبگی ضروری است. برای تعیین ضریب جذب آب توسط خاک، نفوذ تجمعی آب به روش تراز آبی محاسبه و در برابر جذز زمان رسم شد (شکل ۱). با توجه به شکل فوق، داده‌های آزمایش در مدت کوتاه مثلاً ۲۰ دقیقه اول آزمایش، یک خط راست است که می‌توان آن را با فرمول فیلیپ بیان کرد (یانگر، ۱۹۹۶). شیب این خط ضریب جذب آب توسط خاک است (فیلیپ، ۱۹۶۹) که در این آزمایش مقدار $0/0002$ سانتی‌متر در جذز زمان به دست آمد.

یک جوی پشته به ابعاد $12 \times 0/9$ متر تکرار شد و آن گاه مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه شده توسط مدل مقایسه شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی پلات‌های آزمایشی در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

در روش زمان ماندابی از یک پاشنده با آبپاش ضربه‌ای^۱ با فشار ۳ بار که متصل به یک مخزن آب بود استفاده گردید. پاشنده در داخل یک استوانه که در یک طرف آن شکافی ایجاد شده بود، قرار داشت. در جهت شکاف و در امتداد شعاع پاشش تعدادی قوطی در سه ردیف در فواصل ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متری برای اندازه‌گیری شدت پاشش قرار داده شد. لازم به یادآوری است که به جای استوانه شکاف دار می‌توان پاشنده ضامن‌دار را طوری تنظیم کرد که چرخش جزئی^۲ داشته باشد و قوطی‌های اندازه‌گیری را در محدوده قطاع خیس شده و در امتداد شعاع پاشش قرار داد. برخی از مشخصات هیدرولیکی آبپاش مورد استفاده در جدول ۲ قابل ملاحظه است.

با توجه به این که نیمرخ کامل پخش آب توسط یک پاشنده در حالت ایده‌آل، به صورت منحنی نرمال است، یعنی شدت پاشش از خارج شعاع پاشش به داخل افزایش می‌یابد، بنابراین پس از آنکه سیستم برای مدتی کار کرد به تدریج شدت نفوذ در نقاط مختلف سطح زمین، متناسب با شدت پاشش در فواصل مختلف زمانی، به ظرفیت نفوذ لحظه‌ای می‌رسد. حال اگر در هنگام آزمایش از خارج

جدول ۱ - برخی از مشخصات فیزیکی پلات‌های آزمایشی.

نوع پلات	بافت خاک	رطوبت حجمی (%)	شدت پاشش (میلی‌متر در ساعت)	متوسط شیب (%)
کرت	لوم شنی	۳۰/۸	۵۴	۱۷/۲
جوی پشته	لوم شنی	۲۹/۱	۵۹/۷	۱۴/۹

جدول ۲ - مشخصات هیدرولیکی آبپاش.

عامل	مقدار	واحد
قطر آبپاش	۶	میلی‌متر
زاویه پرتاب	۱۸	درجه
دبی	۰/۳۰۸	لیتر در ثانیه
فشار	۳	بار

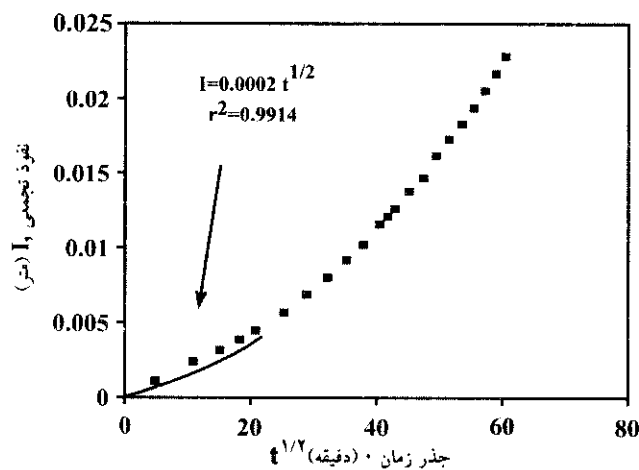
- 1- Single impact sprinkler
- 2- Partial rotation



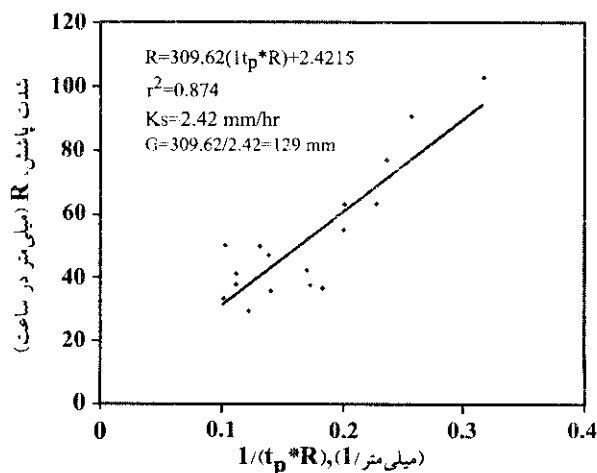
روش ترازابی اندازه‌گیری شده بودند در برابر ارقام پیش‌بینی شده توسط مدل در زمان یکسان در شکل ۳ رسم شده‌اند، همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای کورت با شیب (۰/۹۶۸) و جوی پشته با شیب (۰/۹۴۵)، همبستگی زیادی به ترتیب با ضرایب رگرسیون ۰/۹۸۷ و ۰/۹۶۲ وجود دارد.

نتیجه حاصل از این تحقیق نشان داد که همبستگی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد و مدل قادر است ظرفیت نفوذ خاک را با موفقیت شبیه‌سازی کند. علاوه بر آن با استفاده از دو زمان ماندابی در شدت‌های مختلف پاشش می‌توان ظرفیت نفوذ نهایی آب در خاک و مقدار حرکت مویبستگی خاک را از روی مدل فیزیک ریاضی ارایه شده تخمین زد.

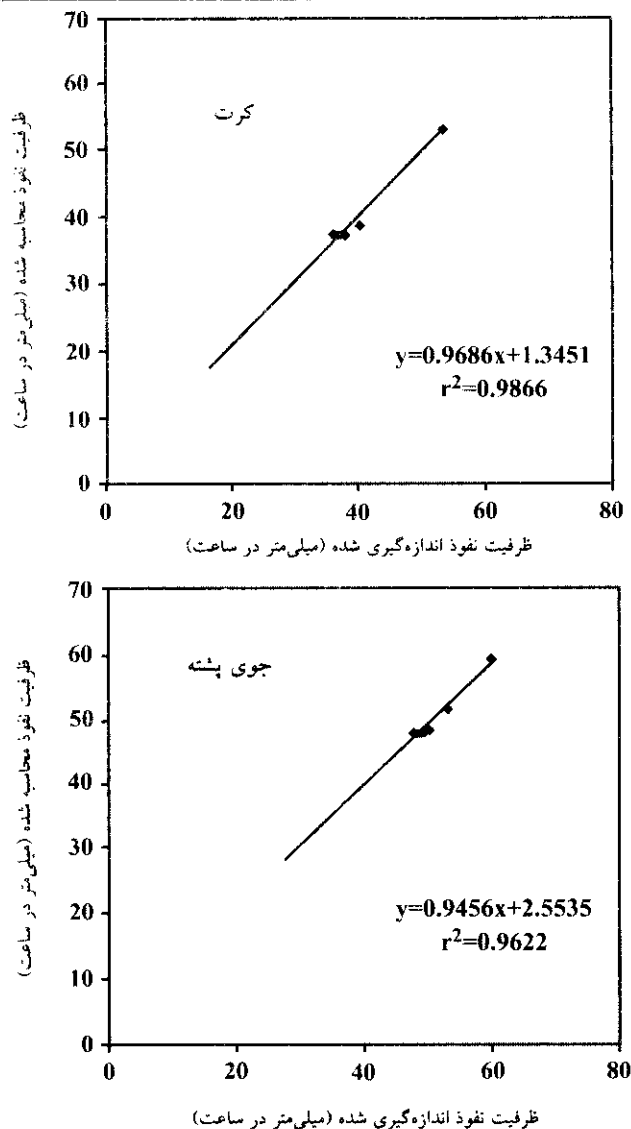
برای تعیین مقدار حرکت مویبگی، شدت‌های پاشش آبیاش در فواصل مختلف از پاشنده در مقابل عکس حاصل ضرب شدت پاشش و زمان ماندابی (معادله ۱۰) مطابق شکل ۲ رسم شده‌اند، به طوری که در شکل فوق ملاحظه می‌شود شیب خط برازش حاصل ضرب هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار حرکت مویبگی است و عرض از مبدأ خط برازش معادل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است. هدایت هیدرولیکی و مقدار حرکت مویبگی خاک لوم شنی در این آزمایش به ترتیب برابر با ۲/۴ میلی‌متر در ساعت و ۱۲۹ میلی‌متر می‌باشد. علت کوچک بودن هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شنی لومی در مقایسه با آنچه در مراجع آمده است، مسدود شدن منافذ خاک با ذرات ریزی است که بر اثر ضربه قطرات آب به ساختمان خاک و متلاشی شدن آن می‌باشد (مورگان، ۱۹۸۶). برای اعتبارسازی مدل، مقادیر ظرفیت نفوذ که با



شکل ۱ - تعیین ضریب جذب خاک با استفاده از معادله فیلیپ.



شکل ۲ - شدت پاشش (R) در مقابل عکس حاصل ضرب زمان ماندابی و شدت پاشش $[1/(t_p R)]$



شکل ۳ - همبستگی ظرفیت نفوذ اندازه گیری شده و محاسبه شده در یک کرت و یک جوی پشته.

۲۶

منابع

۱. قربانی، ب. ۲۰۰۱. روش های کاربردی تعیین نفوذپذیری خاک تحت شرایط آبیاری بارانی. نشریه شماره ۱، انتشارات دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
2. Childs, E.C. 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. John Wiley, New York.
3. Green, W.H., and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils. J. of Agric. Sci. 4:1-24.
4. Holtan, H.N. 1961. A concept for infiltration estimation in watershed engineering. U.S. Department Agriculture, Agricultural Research Service, pp. 41-51.
5. Horton, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 5:399-417.
6. Morgan, R.P.C. 1986. Soil erosion and conservation. Longman Group limited, UK.
7. Kostikov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration. Trans. Inter. Soc. Soil Sci. 6: 17-21.
8. Philip, J.R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosc.* 5: 215-290.



9. Richards, L.A. 1952. Report of subcommittee on permeability and infiltration. Committee on Terminology, Soil Sci.Soc. of Am. Proc. 16: 85-88.
10. Smith, R.E. 1983. Flux infiltration theory for use in watershed hydrology. In: *Proceeding of the National Conference on Advances in Infiltration*, Am. Soc. of Agr. Eng., St. Joseph, MI, pp. 313-323.
11. Smith, R.E., and Parlange, J.Y. 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.* 14: 533-538.
12. Tovey, R., and Pair, C.H. 1963. A method for measuring water intake rate into soil for sprinkler design. Sprinkler Irrigation Association, *Open Technical Conference Proceedings*, pp. 109-118.
13. Woolhiser, D.A. Smith, R.E., and Goodrich, D.C. 1990. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. United State Department of Agriculture, pp. 6-15.
14. Youngs, E.G. 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture movement consideration. *Soil Sci.*, pp. 106: 157-163.
15. Youngs, E.G. 1996. Estimation of capillary drive using 'time to ponding method'. Silsoe College, Bedford, UK (personal communication).



A mathematical model to predict soil infiltration capacity under sprinkler irrigation conditions

B. Ghorbani

Assistant Professor Dept. of Irrigation Shahre-Kord University, Shahre-Kord, Iran

Abstract

Soil infiltration capacity is one of the main important factors to design soil and water projects such as irrigation and drainage systems. Both maximum sprinkling application rate and irrigation scheduling are frequently based on soil infiltration and final infiltration capacity. Although soil infiltration capacities of different parts of a field are not the same, the final soil infiltration capacity should be estimated carefully using an adapted method to sprinkler irrigation to avoid runoff and erosion in order to achieve high irrigation efficiency. In this paper a physical-mathematical model was used to predict soil infiltration capacity under sprinkler irrigation conditions. The results showed good agreements ($r^2=96-98\%$) between measured and predicted infiltration capacities on both basin and furrow experimental plots. Final soil infiltration capacity and capillary drive could also be predicted using the model for two different times of ponding at different application rates.

Keywords: Model; Infiltration capacity; Capillary drive; Hydraulic conductivity; Time of ponding; Application rate

