مقایسه نفوذ آب در خاک با استفاده از روش‌های تک استوانه و استوانه‌های مضاعف

حمید رضا فولادمند[1] هانیه مظلوم[2]
۱- دانشیار آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
۲- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰

چکیده

رطوبت اولیه خاک نقش مهمی بر نفوذ آب در خاک دارد، از این رو مقدار نفوذ و ضرایب مدل‌های نفوذ در شرایط رطوبت اولیه متفاوت یکسان نخواهند بود. در این تحقیق با انجام ۲۴ آزمایش نفوذ در شرایط رطوبتی اولیه متفاوت از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش بر روی خاکی با بافت لوم رسی سیلتی انجام شد و از مدل کوستیاکف برای برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی استفاده شد. همچنین برای کلیه آزمایش‌ها در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف ضرایب مدل کوستیاکف تعیین شدند و روابطی بین ضرایب این مدل با رطوبت اولیه خاک بر قرار گردید. به علاوه روابطی برای تخمین سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه بر مبنای رطوبت اولیه خاک و روابطی برای تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه استخراج گردید. برای این منظور از ۱۷ آزمایش برای واسنجی روابط و از ۷ آزمایش دیگر برای ارزیابی نتایج استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک و سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه در تمام ۲۴ آزمایش از روش تک استوانه بیشتر از روش استوانه‌های مضاعف است. همچنین نتایج نشان داد که روابط به دست آمده برای تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف برمبنای آزمایش تک استوانه مناسب می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: نفوذ، رطوبت اولیه خاک، تک استوانه، استوانه‌های مضاعف، مدل کوستیاکف

مقدمه

به ورود آب از سطح زمین به داخل خاک نفوذ گفته می‌شود که از مهم‌ترین مشخصه‌های خاک در زمینه آبیاری است. نفوذ تجمعی (مقدار کل آب نفوذ یافته در خاک از ابتدا تا زمان مورد نظر) و سرعت نفوذ لحظه‌ای (سرعت وارد شدن آب به داخل خاک در زمان مورد نظر) از مهم‌ترین ویژگی‌های نفوذ آب در خاک می‌باشند. از جمله روش‌های اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک روش استوانه‌های مضاعف است. در روش استوانه‌های مضاعف برای اطمینان از نفوذ قائم آب به خاک از دو استوانه تو در تو استفاده می‌شود، به گونه‌ای که به سبب وجود آب در حد فاصل دو استوانه فرض بر آن است که نفوذ آب از استوانه میانی کاملاً به صورت قائم است و نشت جانبی فقط از حد فاصل بین دو استوانه صورت می‌گیرد. بنابراین نفوذ آب از استوانه میانی می‌تواند خصوصیات نفوذپذیری عمودی خاک را به خوبی نشان دهد (بی‌نام، ۱۳۸۰). نتایج نشان داده است که تغییرات منطقه‌ای نفوذپذیری عموماً به اندازه‌ای زیاد است که خطای ناشی از نبود استوانه بیرونی در مقابل آن اندک است (بی‌نام، ۱۳۸۰). تحقیقات یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۷) نیز در اراضی تحقیقاتی دانشگاه کردستان نشان داد که بین مقادیر نفوذ آب در خاک با دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. از این رو در بعضی از تحقیقات از روش تک استوانه استفاده شده است (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۸۹ و فکوری و همکاران، ۱۳۹۰). نکته قابل توجه آن است که در روش استوانه‌های مضاعف مدت زمانی باید صرف نفوذ آب در حد فاصل دو استوانه شود و بعد از آن اندازه‌گیری نفوذ در

[1] نویسنده مسئول: حمید رضا فولادمند hrfoolad@miau.ac.ir

استوانه میانی آغاز می‌شود، لذا استفاده از روش تک استوانه ساده‌تر بوده و به زمان کمتری نیاز دارد. اما چنانچه ذکر شد استفاده از روش استوانه‌های مضاعف متداول‌تر است.

مدل‌های مختلفی برای نفوذ آب در خاک ارائه شده‌اند که مدل تجربی کوستیاکف (Kostiakov, 1932) از متداول‌ترین آن‌ها است. تحقیقات نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۶) برای خاک‌هایی با بافت‌های رس، لوم و لوم رسی و تحقیقات گودرزی و همکاران (۱۳۹۱) بر روی خاک‌هایی رسی نشان داد که مدل کوستیاکف از سایر مدل‌های نفوذ مناسب‌تر است. همچنین تحقیقات محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) بر روی خاک‌های بدون درز و ترک مناطق مختلف استرالیا و تحقیقات (Fahad et al., 1982) بر روی قطعه زمینی با کشت سویا نشان دهنده مناسب‌تر بودن مدل کوستیاکف نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. نتایج تحقیقات سپهوند و همکاران (۱۳۹۰) بر روی خاکی با بافت سیلت لوم نشان داد که مدل کوستیاکف در سطوح مختلف رطوبتی خاک مناسب‌تر از سایر مدل‌ها است. همچنین نتایج تحقیقات فکوری و همکاران (۱۳۹۰) نیز نشان داد که مدل کوستیاکف برای کاربری‌های باغ و مرتع مناسب‌تر از سایر مدل‌های نفوذ است. در حالی که نتیجه تحقیق طالبی و همکاران (۱۳۹۳) با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده در حوضه آبخیز منشاد استان یزد نشان‌دهنده نامناسب بودن معادله کوستیاکف در مقایسه با سایر معادله‌ها می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر نفوذ آب در خاک رطوبت اولیه خاک است که در بسیاری از آزمایش‌های نفوذ به آن توجه نمی‌شود. هر چه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد سرعت اولیه نفوذ آب در خاک و مقدار نفوذ تجمعی آب در خاک کاهش می‌یابد. بنابراین هر آزمایش اندازه‌گیری نفوذ در یک وضعیت خاص رطوبتی انجام می‌شود و ضرایب مدل نفوذ برازش داده شده بر داده‌ها مخصوص همان شرایط رطوبتی است و با تغییر رطوبت اولیه، ضرایب مدل نفوذ نیز تغییر خواهند کرد. بنابراین ضروری است که نتایج اندازه‌گیری نفوذ در یک رطوبت اولیه مشخص، برای دیگر مقادیر رطوبت تعدیل شود (دربندی و همکاران، ۱۳۸۹).

با توجه به موارد ذکر شده هدف‌های اصلی از این تحقیق عبارت است از: الف) بررسی تغییرات ضرایب مدل کوستیاکف نسبت به رطوبت اولیه خاک با استفاده از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف. ب) مقایسه نفوذ آب در خاک با استفاده از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در شرایط رطوبتی اولیه متفاوت خاک و ارائه روابطی برای تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف برمبنای آزمایش تک استوانه.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق خاکی زراعی بدون شیب و فاقد کشت به ابعاد ۱۰ در ۱۰۰ متر در محدوده دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت در استان فارس انتخاب شد و آزمایش‌های نفوذ از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف انجام شد و نفوذ تجمعی آب در خاک در کلیه آزمایش‌ها در ۱۱ زمان مختلف (۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه) اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها پس از هر واقعه بارندگی و به فواصل زمانی نامنظم انجام شد و قبل از انجام هر آزمایش با برداشت یک نمونه دست نخورده از عمق سطحی خاک مقدار رطوبت حجمی خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. به طور کلی برای انجام این تحقیق ۲۴ آزمایش اندازه‌گیری نفوذ در مقادیر رطوبت‌های اولیه مختلف از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف انجام شد. بافت خاک نیز با برداشت نمونه سطحی در آزمایشگاه بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی ذرات خاک (رس ذرات بین صفر تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر، سیلت ذرات بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر و شن ذرات بین ۰/۰۵ تا ۲ میلی‌متر) با استفاده از ترکیب روش‌های شستشوی خاک با الک و هیدرومتر تعیین گردید.

در این تحقیق از مدل کوستیاکف برای برازش داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی با دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف استفاده شد که به صورت زیر است:

$$I = at^{b} \qquad (1)$$

که در آن I مقدار نفوذ تجمعی آب در خاک بر حسب میلی‌متر، t زمان از ابتدای آزمایش برحسب دقیقه و a و b ضرایب مدل هستند که با برقراری یک رابطه رگرسیون توانی بین مقادیر I و t تعیین می‌شوند. با مشتق‌گیری از رابطه فوق می‌توان به معادله سرعت نفوذ دست یافت.

برای هر ۲۴ آزمایش انجام شده از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در رطوبت‌های اولیه متفاوت، ضرایب مدل کوستیاکف تعیین شدند و در ادامه روابطی رگرسیونی برای تخمین ضرایب این مدل بر مبنای رطوبت اولیه خاک بر قرار گردید. برای این منظور از ۱۷ آزمایش برای واسنجی روابط و از ۷ آزمایش دیگر برای ارزیابی نتایج استفاده شد. در ادامه و برای آزمایش‌های به کار رفته در مرحله ارزیابی، با توجه به رطوبت اولیه هر آزمایش ضرایب مدل کوستیاکف تخمین زده شد و در زمان‌های مختلف مقدار نفوذ آب در خاک برآورد گردید و نتایج با مقدار واقعی نفوذ در همان زمان‌ها مقایسه شد. برای مقایسه نتایج از میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) به صورت روابط زیر استفاده شد (Tietje and Hennings, 1996) :

$$x_i = \frac{E_i}{M_i} \qquad (۲)$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{N}\sum \ln\left(x_i\right)\right) \qquad (۳)$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{N-1}\sum\left[\ln\left(x_i\right)-\ln\left(GMER\right)\right]^2\right)^{0.5}\right] \qquad (۴)$$

که در آن‌ها x_i نسبت خطا، E_i و M_i به ترتیب نفوذ تجمعی تخمین‌زده شده و اندازه‌گیری شده و N تعداد زمان‌های اندازه‌گیری نفوذ تجمعی در هر آزمایش (برابر ۱۱) می‌باشد. در صورتی که مقدار GMER کمتر از یک شود مقادیر تخمین زده شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند و بر عکس. همچنین چنانچه مقدار GSDER برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین‌زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند و افزایش GSDER نسبت به یک بیانگر افزایش فاصله بین مقادیر تخمین‌زده شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین شرایط آن است که مقادیر GMER و GSDER نزدیک به یک باشند (Wagner et al., 2001).

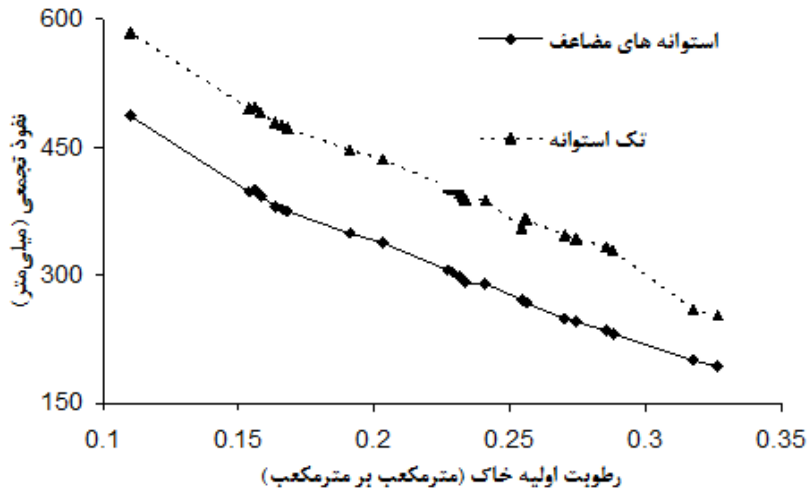
از طرف دیگر روابطی برای تخمین سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه (حداکثر زمان اندازه‌گیری نفوذ تجمعی آب در خاک در کلیه آزمایش‌ها) بر مبنای رطوبت خاک با استفاده از ۱۷ آزمایش به کار رفته در مرحله واسنجی استخراج شد و سپس سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان ۱۸۰ دقیقه در ۷ آزمایش مرحله ارزیابی با سرعت نفوذ تخمین زده شده در این زمان از روی روابط به دست آمده مقایسه گردید. برای مقایسه این نتایج نیز از GMER و GSDER استفاده شد با این تفاوت که N تعداد آزمایش‌های به کار رفته در مرحله ارزیابی (برابر ۷) می‌باشد.

همچنین از آنجا که آزمایش تک استوانه ساده‌تر و آزمایش استوانه‌های مضاعف متداول‌تر است، لذا روابطی برای تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه ارائه شد. برای این منظور روابطی جداگانه برای تخمین نفوذ تجمعی در هر یک از ۱۱ زمان ذکر شده قبلی تهیه شد. برای این منظور نیز از ۱۷ آزمایش برای واسنجی روابط و از ۷ آزمایش دیگر برای ارزیابی نتایج استفاده شد و در هر زمان مقدار نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر اساس مقدار نفوذ تجمعی در همان زمان از آزمایش تک استوانه تخمین زده شد و با نتایج اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف مورد مقایسه قرار گرفت. برای مقایسه نتایج در هر یک از رطوبت‌های اولیه آزمایش‌های مرحله ارزیابی نیز از GMER و GSDER استفاده شد و مقدار N برابر ۱۱ در نظر گرفته شد.

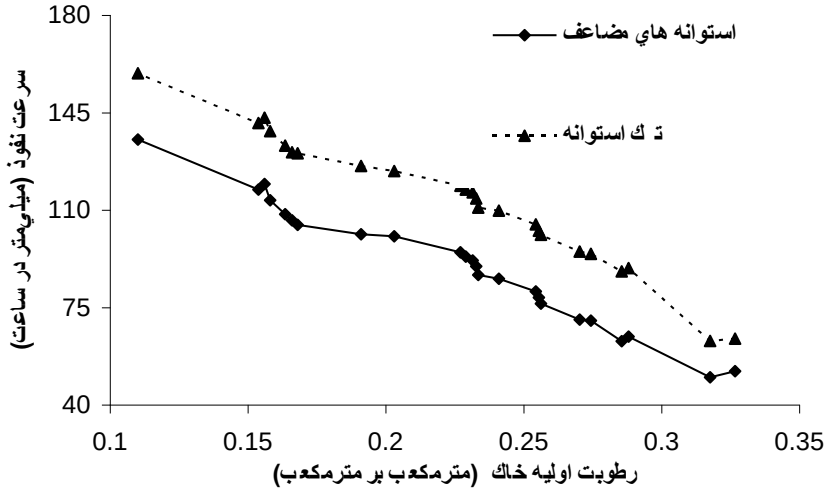
نتایج و بحث

برای انجام این تحقیق آزمایش نفوذ از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در ۲۴ رطوبت اولیه انجام شد و از بین آن‌ها ۱۷ آزمایش در رطوبت‌های حجمی اولیه ۰/۳۲۷، ۰/۲۸۸، ۰/۲۷۴، ۰/۲۷۰، ۰/۲۵۶، ۰/۲۵۶، ۰/۲۵۴، ۰/۲۴۱، ۰/۲۳۴، ۰/۲۳۳، ۰/۲۲۹، ۰/۱۹۱، ۰/۱۶۶، ۰/۱۶۴، ۰/۱۵۸، ۰/۱۵۴ و ۰/۱۱۰ مترمکعب بر مترمکعب برای واسنجی و از ۷ آزمایش در رطوبت‌های اولیه ۰/۳۱۸، ۰/۲۸۶، ۰/۲۳۲، ۰/۲۲۷، ۰/۲۰۳، ۰/۱۶۸ و ۰/۱۵۶ مترمکعب بر مترمکعب برای ارزیابی نتایج استفاده شد. همچنین مقدار درصد رس، سیلت و شن خاک مورد آزمایش به ترتیب ۳۱، ۵۷ و ۱۲ درصد بود و لذا خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی سیلتی است. چنانچه انتظار می‌رود با افزایش رطوبت اولیه خاک مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده است که نشان‌دهنده رابطه بین رطوبت اولیه و نفوذ تجمعی آب در خاک و سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه است.

از طرف دیگر چنانچه در این دو شکل مشاهده می‌شود مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک و سرعت نفوذ آب در خاک تا زمان ۱۸۰ دقیقه در تمام ۲۴ آزمایش از روش تک استوانه بیشتر از روش استوانه‌های مضاعف است. نتایج تحقیق دیگری نیز نشان داده است که مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در آزمایش تک استوانه بیشتر از آزمایش استوانه‌های مضاعف می‌باشند (بی‌نام، ۱۳۸۰). در حالی که تحقیقات یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۷) در اراضی تحقیقاتی دانشگاه کردستان نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین مقادیر نفوذ آب در خاک با دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف می‌باشد. دلیل اصلی تفاوت مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک و سرعت نفوذ آب در خاک در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف آن است که در آزمایش تک استوانه به دلیل عدم افزایش رطوبت لایه‌های جانبی خاک، آب سریع‌تر و به مقدار بیشتری وارد خاک می‌شود که مقدار قابل توجهی از آن به صورت جانبی نفوذ می‌یابد. اما در آزمایش استوانه‌های مضاعف به دلیل افزایش رطوبت لایه‌های جانبی خاک از نفوذ جانبی کاسته شده و مقدار کمتری از آب و با سرعت کمتری وارد خاک می‌شود که بیشتر معرف نفوذ قائم آب در خاک است.



شکل (۱): تغییرات نفوذ تجمعی و رطوبت اولیه از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف



شکل (۲): تغییرات سرعت نفوذ و رطوبت اولیه از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که در دامنه تغییرات رطوبت اولیه خاک (از ۰/۱۱۰ تا ۰/۳۲۷ مترمکعب بر مترمکعب) دامنه تغییرات نفوذ تجمعی آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه در آزمایش تک استوانه بین ۵۸۵ تا ۲۵۳ و در آزمایش استوانه‌های مضاعف بین ۴۸۷ تا ۱۹۳ میلی‌متر متغیر است، به عبارتی با دامنه تغییرات ۰/۲۱۷ رطوبت اولیه، دامنه تغییرات نفوذ تجمعی از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف به ترتیب ۳۳۲ و ۲۹۴ میلی‌متر است که قابل توجه می‌باشد. همچنین اختلاف نفوذ تجمعی از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در کمترین رطوبت اولیه (۰/۱۱۰ مترمکعب بر مترمکعب) و بیشترین رطوبت اولیه (۰/۳۲۷ مترمکعب بر مترمکعب) به ترتیب برابر ۹۸ و ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. لذا نتایج نشان می‌دهد که در رطوبت‌های اولیه کم اختلاف نفوذ تجمعی از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف با یکدیگر بیشتر است و این اختلاف در رطوبت‌های اولیه زیاد، کمتر می‌شود. دلیل این موضوع آن است که در رطوبت‌های اولیه زیاد کل آب نفوذ یافته در خاک کاهش می‌یابد و به مقدار رواناب سطحی افزوده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در دامنه تغییرات رطوبت اولیه خاک (از ۰/۱۱۰ تا ۰/۳۲۷ مترمکعب بر مترمکعب) دامنه تغییرات سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه در آزمایش تک استوانه بین ۱۵۹/۲ تا ۶۳ و در آزمایش استوانه‌های مضاعف بین ۱۳۵/۳ تا ۵۰ میلی‌متر در ساعت متغیر است، به عبارتی با دامنه تغییرات ۰/۲۱۷ رطوبت اولیه، دامنه تغییرات سرعت نفوذ از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف به ترتیب ۹۶/۲ و ۸۵/۴ میلی‌متر در ساعت است که قابل توجه می‌باشد. همچنین اختلاف سرعت نفوذ از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در کمترین رطوبت اولیه (۰/۱۱۰ مترمکعب بر مترمکعب) و بیشترین رطوبت اولیه (۰/۳۲۷ مترمکعب بر مترمکعب) به ترتیب برابر ۲۳/۸ و ۱۱/۶ میلی‌متر در ساعت می‌باشد که به دلیل این موضوع قبلاً اشاره شد.

در جدول (۱) میانگین، حداقل و حداکثر ضرایب مدل کوستیاکف و همچنین مقادیر آماری ذکر شده برای ضریب R^2 در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در کلیه ۲۴ آزمایش ارائه شده است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود به دلیل طبیعت تغییرپذیر نفوذ آب در خاک، ضرایب مدل کوستیاکف در شرایط رطوبتی اولیه، متفاوت است و همچنین دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف یکسان نیست. همچنین در این جدول مشاهده می‌شود که ضریب R^2 دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف بسیار مناسب می‌باشد.

جدول (۱): ویژگی‌های آماری ضرایب مدل کوستیاکف و ضریب R^2 در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در کلیه آزمایش‌ها

روش	ضریب	حداقل	حداکثر	میانگین
تک استوانه	a	۴/۸۹۶	۱۱/۳۰۰	۸/۶۰۶
	b	۰/۷۴۱	۰/۷۷۱	۰/۷۶۰
	R^2	۰/۹۹۲	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵
استوانه‌های مضاعف	a	۲/۲۴۴	۷/۷۶۳	۵/۱۱۹
	b	۰/۷۸۹	۰/۸۴۹	۰/۷۷۶
	R^2	۰/۹۹۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶

از طرف دیگر روابط به دست آمده در این تحقیق برای تخمین ضرایب مدل کوستیاکف و همچنین سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه بر مبنای رطوبت اولیه خاک به صورت زیر می‌باشند:

الف- روش تک استوانه:

$$a = -27.85\theta + 14.84 \quad (۵)$$

$$b = 0.693\theta^2 - 0.326\theta + 0.796 \quad (۶)$$

$$i = -16.73\theta + 8.783 \quad (۷)$$

ب- روش استوانه‌های مضاعف:

$$a = -26.36\theta + 10.97 \quad (۸)$$

$$b = 2.613\theta^2 - 0.925\theta + 0.876 \quad (۹)$$

$$i = -6.169\theta + 2.881 \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها θ رطوبت حجمی خاک برحسب متر مکعب بر متر مکعب و i سرعت نفوذ آب در خاک در زمان ۱۸۰ دقیقه برحسب میلی‌متر در دقیقه می‌باشد. ضریب R^2 معادله‌های ۵ تا ۱۰ نیز به ترتیب برابر ۰/۹۴۹، ۰/۳۷۱، ۰/۹۶۵، ۰/۹۷۴، ۰/۸۸۶ و ۰/۹۸۲ می‌باشد. چنین رابطه معکوسی بین ضرایب مدل کوستیاکف با تغییرات رطوبت اولیه خاک به شکل یک معادله غیر خطی توسط دربندی و همکاران (۱۳۸۹) نیز گزارش شده است. به علاوه هر چه رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد سرعت نفوذ آب در خاک کاهش می‌یابد که این موضوع با شیب منفی بین سرعت نفوذ در زمان ۱۸۰ دقیقه و تغییرات رطوبت در دو رابطه (۷) و (۱۰) مطابقت دارد.

پس از استخراج روابط فوق نتایج بر روی ۷ آزمایش دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور با توجه به رطوبت اولیه هر آزمایش ضرایب مدل کوستیاکف در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف تخمین زده شد و در زمان‌های مختلف مقدار نفوذ آب در خاک برآورد گردید و نتایج با مقدار واقعی نفوذ در زمان‌های متناظر مقایسه شد. چنین روندی برای تخمین سرعت نفوذ در زمان ۱۸۰ دقیقه نیز انجام شد. مقادیر GMER و GSDER مرحله ارزیابی نتایج برای نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در زمان ۱۸۰ دقیقه به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.

جدول (۲): مقادیر GMER و GSDER برای نفوذ تجمعی در ۷ آزمایش مرحله ارزیابی

	تک استوانه		استوانه‌های مضاعف	
رطوبت اولیه	GMER	GSDER	GMER	GSDER
۰/۳۱۸	۱/۱۹	۱/۰۷	۱/۰۷	۱/۲۷
۰/۲۸۶	۱/۰۱	۱/۰۶	۱/۰۵	۱/۷۸
۰/۲۳۲	۰/۹۴	۱/۰۸	۰/۸۸	۱/۴۸
۰/۲۲۷	۰/۹۳	۱/۰۸	۰/۹۲	۱/۲۹
۰/۲۰۳	۱/۰۲	۱/۰۹	۰/۹۶	۱/۱۶
۰/۱۶۸	۱/۰۲	۱/۰۶	۱/۰۰	۱/۰۶
۰/۱۵۶	۰/۹۹	۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۹۶
میانگین	۱/۰۱	۱/۰۷	۰/۹۹	۱/۴۳

جدول (۳): مقادیر GMER و GSDER برای سرعت نفوذ در کل آزمایش‌های مرحله ارزیابی

روش	GMER	GSDER
تک استوانه	۱/۰۰	۱/۰۸
استوانه‌های مضاعف	۱/۰۰	۱/۰۶

نتایج جدول‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهد که دقت تخمین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در زمان ۱۸۰ دقیقه از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف تقریباً یکسان است و برتری قابل توجهی برای هیچ یک از دو روش آزمایش وجود ندارد. همچنین مقدار GMER برای تخمین نفوذ تجمعی در دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف در بعضی از رطوبت‌های اولیه بیشتر از یک و در بعضی دیگر از رطوبت‌ها کمتر از یک شده است و لذا نتایج بیانگر آن است که روابط ارائه شده برای تخمین نفوذ تجمعی همواره منجر به تخمین بیشتر و یا تخمین کمتر نمی‌شود. اما چنانچه مشاهده می‌شود مقدار GMER برای تخمین سرعت نفوذ در هر دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف برابر یک شده است. از طرف دیگر روابط تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه در زمان‌های مختلف به شکل یک رابطه خطی ساده به صورت زیر استخراج گردید:

$$I_D = cI_S + d \qquad (۱۱)$$

که در آن I_D و I_S به ترتیب نفوذ تجمعی در زمان مورد نظر از دو روش استوانه‌های مضاعف و تک استوانه بر حسب میلی‌متر و c و d ضرایب رابطه هستند که برای زمان‌های مختلف مطابق جدول (۴) به دست آمده‌اند. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود ضریب R^2 برای تمام زمان‌ها بسیار بالا می‌باشد.

جدول (۴): ضرایب رابطه بین نفوذ تجمعی از دو روش استوانه‌های مضاعف و تک استوانه در زمان‌های مختلف

زمان (دقیقه)	ضریب c	ضریب d	مقدار R^2 رابطه
۲	۰/۹۴	-۴/۱۵	۰/۹۹۱
۵	۰/۸۸	-۷/۴۶	۰/۹۷۳
۱۰	۰/۹۴	-۱۰/۴۵	۰/۹۹۰
۱۵	۱/۰۵	-۲۶/۶۸	۰/۹۵۰
۳۰	۰/۹۰	-۲۳/۹۱	۰/۹۸۴
۴۵	۰/۹۳	-۳۵/۰۳	۰/۹۸۸
۶۰	۰/۹۳	-۴۴/۲۲	۰/۹۸۹
۹۰	۰/۹۰	-۵۱/۲۶	۰/۹۸۱
۱۲۰	۰/۸۹	-۵۲/۵۱	۰/۹۷۷
۱۵۰	۰/۹۳	-۶۴/۴۶	۰/۹۳۹
۱۸۰	۰/۹۴	-۷۴/۶۰	۰/۹۷۹

همچنین مقادیر GMER و GSDER مرحله ارزیابی تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه نیز در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): مقادیر GMER و GSDER برای تخمین نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه

رطوبت اولیه	RMSE	GMER	GSDER
۰/۳۱۸	۱۴/۸۳	۰/۸۵	۱/۱۱
۰/۲۸۶	۶/۲۴	۱/۰۷	۱/۰۶
۰/۲۳۲	۲/۹۰	۱/۰۲	۱/۰۴
۰/۲۲۷	۲/۶۵	۱/۰۲	۱/۰۴
۰/۲۰۳	۲/۵۱	۱/۰۱	۱/۰۴
۰/۱۶۸	۲/۶۲	۱/۰۱	۱/۰۴
۰/۱۵۶	۳/۲۱	۱/۰۰	۱/۰۳
میانگین	۴/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۵

نتایج جدول (۵) نشان‌دهنده تخمین بسیار مناسب نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه در تمام رطوبت‌های اولیه به جزء بیشترین رطوبت (۰/۳۱۸ متر مکعب بر متر مکعب) می‌باشد، البته در این رطوبت نیز نتایج قابل قبول است. همچنین نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که به جزء رطوبت اولیه ۰/۳۱۸ در سایر رطوبت‌های اولیه با توجه به مقدار GMER مقادیر تخمین‌زده شده نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف بر مبنای آزمایش تک استوانه بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی از آزمایش استوانه‌های مضاعف می‌باشند که البته این تخمین بیشتر، بسیار ناچیز است. لذا با دقت بسیار بالایی می‌توان مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ از روش ساده‌تر تک استوانه را به روش متداول‌تر استوانه‌های مضاعف تبدیل نمود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مقادیر نفوذ تجمعی آب در خاک و سرعت نفوذ آب در خاک تا زمان ۱۸۰ دقیقه در شرایط رطوبت متفاوت با روش تک استوانه بیشتر از روش استوانه‌های مضاعف است. همچنین نتایج نشان داد که در رطوبت‌های اولیه کم اختلاف نفوذ تجمعی با استفاده از دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف بیشتر است و این اختلاف در رطوبت‌های اولیه زیاد، کمتر می‌شود. اما از طرف دیگر نتایج نشان داد که دقت تخمین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در زمان ۱۸۰ دقیقه با دو روش تک استوانه و استوانه‌های مضاعف تقریباً یکسان است و برتری قابل‌توجهی برای هیچ یک از دو روش آزمایش وجود ندارد. به علاوه نتایج نشان داد که امکان تخمین نفوذ تجمعی از روش استونه‌های مضاعف بر مبنای روش ساده‌تر تک استوانه با دقت بالایی وجود دارد. در اکثر طرح‌های آبیاری و مسایل هیدرولوژی برای اندازه‌گیری نفوذ از روش وقت‌گیرتر استوانه‌های مضاعف استفاده می‌شود از این رو پیشنهاد می‌گردد تا مشابه این تحقیق برای مناطق دیگر با خاک‌های متفاوت انجام شود. در این صورت شاید بتوان با اطمینان بیشتری استفاده از روش ساده‌تر تک استوانه را به جای روش استوانه‌های مضاعف پیشنهاد و توصیه نمود.

منابع

۱. بی‌نام. (۱۳۸۰). دستورالعمل اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب به خاک با روش استوانه. نشریه شماره ۲۴۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

۲. دربندی، ص .، ص. دربندی و ص. تقوی. (۱۳۸۹). تعیین بهترین معادله نفوذ برای خاک‌های ایستگاه نعمت‌آباد (دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز) و آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ به رطوبت اولیه خاک. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۴ (۳) : ۳۳۰-۳۳۷.
۳. سپهوند، ع.، م. طایی سمیرمی، س. خ. میرنیا و ح. ر. مرادی. (۱۳۹۰). ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. آب و خاک، ۲۵ (۲) : ۳۳۸-۳۴۶.
۴. طالبی، ع.، س. پورمحمدی و م.ح. رحیمیان. (۱۳۹۳). تعیین مناسب‌ترین معادله نفوذپذیری در حوضه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه خشک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز منشاد، استان یزد). دانش آب و خاک، ۲۴ (۴) : ۱۰۱-۱۱۴.
۵. فکوری، ت.، ح. امامی و ب. قهرمان. (۱۳۹۰). تأثیر کاربری‌های مختلف بر نفوذ آب در خاک. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۵ (۲) : ۲۹۵-۲۰۵.
۶. قربانی دشتکی، ش.، م. همایی و م.ح. مهدیان. (۱۳۸۹). تأثیر کاربری اراضی بر تغییرات مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۴ (۲) : ۲۰۶-۲۲۱.
۷. گودرزی، ل.، ع.م. آخوندعلی و ح. زارعی. (۱۳۹۱). ارزیابی و تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ آب به خاک در دشت اشترینان. حفاظت منابع آب و خاک، ۱ (۳) : ۳۹-۴۴.
۸. محمدی، م.ح. و ح. رفاهی. (۱۳۸۴). تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. علوم کشاورزی ایران، ۳۶ (۴) : ۱۳۹۱-۱۳۹۸.
۹. نشاط، ع. و م. پاره‌کار. (۱۳۸۶). مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴ (۳) : ۱۸۶-۱۹۵.
۱۰. یمین مشرفی، گ .، ع. معروف‌پور، ب. بهرام‌نژاد و ا. فاریابی. ۱۳۸۷. بررسی فرآیند نفوذ با استفاده از استوانه‌های مضاعف و منفرد. سومین همایش منطقه‌ای یافته‌های پژوهشی کشاورزی و منابع طبیعی (غرب کشور). سنندج. ایران.
11. Fahad A.A., Mielke L.N., Flowerday A.D. and Swatzendruber D. *(1982). Soil physical properties as affected by soybeans and other cropping sequences. Soil Sic*. Soc. Am. J. *46: 377-381*.
12. Kostiakov A.N. *(1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration*. Transactions, 6th Congress of the International Society Soil Science of Russia. Part A:*17-21*.
13. Tietje O. and Hennings V. *(1996). Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes*. Geoderma. *69: 71-84 .*
14. Wagner B., Tarnawski V. R., Hennings V., Muller U., Wessoleu G. and Plagge R. *(2001). Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set*. Geoderma. *102: 275-297.*

Comparison of soil water infiltration using single and double ring methods

Fooladmand[*1] H.R., Mazlom[2] M.
1- Department of Water Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
2-, Department of Water Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
[*]Corresponding author email: hrfoolad@miau.ac.ir

Received: 2016/09
Accepted: 2016/12

Abstract

Initial soil moisture content has an important role in soil water infiltration, therefore the values of infiltration and the coefficients of infiltration models are not similar in different initial soil moisture content. Single and double ring methods can be used for infiltration measurement. In this study, 24 infiltration experiments were used based on single and double ring methods in different initial soil moisture content to evaluate the values of cumulative infiltration and infiltration rate. The experiment was done on a soil sample with silty clay loam texture, and the model of Kostiakov was used for fitting the measured infiltration data. Also, the coefficients of the Kostiakov model were determined for all single and double ring experiments, and then the relationships were derived between the coefficients of the Kostiakov model and initial soil moisture content. Furthermore, the relationships were derived between infiltration rate in 180 minute and initial soil moisture content, and between cumulative infiltration with double ring method based on single ring method. For these purposes, 17 experiments were used for calibrating the relationships and the other remained 7 experiments were used for validating the results. The results showed that the values of cumulative infiltration and infiltration rate were higher in all 24 experiments with single ring method than double ring method. Also, the results demonstrated that the obtained relationships for estimating the cumulative infiltration with double ring method based on single ring method are appropriate.

Keywords: Infiltration, Initial soil moisture content, Single ring, Double ring, Model of Kostiakov