

ضرایب مدل‌های نفوذ فیلیپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده بر مبنای جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک

محمد رضا نیشابوری^{۱*}، احمد فاخری فرد^۲، داود فرسادی زاده^۳، نسرین صادقیان^۳ و جعفر خیری^۳

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۰/۱۵

۱- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشجویان کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: neyshabouri@tabrizu.ac.ir

چکیده

ضرایب مدل‌های نفوذ اغلب از طریق برازش داده‌های تجربی بصورت نفوذ تجمعی و زمان نفوذ تعیین می‌گردد و توجهی به دو پارامتر مهم در نفوذ یعنی جرم مخصوص ظاهری (D_b) و مقدار رطوبت اولیه (W_0) نمی‌شود. در یک زمان مشخص مقدار نفوذ تجمعی نه تنها به زمان بلکه به دو ویژگی یاد شده نیز بستگی دارد. هدف از این تحقیق ارزیابی میزان وابستگی ضرایب مدل‌های نفوذ، فیلیپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده به D_b و W_0 و نیز ارزیابی دقت تخمین نفوذ تجمعی سه مدل با وارد کردن دو متغیر مذکور در آنها است. برای این منظور ستونهای خاک به قطر 23 و طول 80 سانتی‌متر با جرم مخصوص ظاهری بین 1/11 تا 1/42 گرم بر سانتی‌متر مکعب و با سه رطوبت وزنی اولیه 10/6، 13/1 و 14/7 درصد در آزمایشگاه تهیه شدند. در مرحله اول داده‌های نفوذ تجمعی و زمان به مدل‌های فیلیپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده برازش و ضرایب هر مدل مشخص گردید. سپس ضرایب حاصله بعنوان متغیر وابسته و D_b و W_0 بعنوان متغیر مستقل منظور و رابطه رگرسیون هر ضریب با دو متغیر یاد شده تعیین شد. در مرحله بعدی با جایگذاری ضرایب برحسب W_0 و D_b ، مدل‌های تخمین نفوذ تجمعی (I_p) بعنوان تابعی از آن دو متغیر و زمان بدست آمدند. جهت ارزیابی اعتبار هر مدل مقادیر I_p محاسبه شده با مقادیر نظیر I (اندازه‌گیری شده) از طریق ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربع انحراف ($RMSD$) مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در هر سه مدل وابستگی ضرایب به تغییرات D_b به مراتب بیشتر از تبعیت آنها از W_0 بود. قرار دادن ضرایب در مدلها برحسب D_b و W_0 علی‌رغم ایجاد پیچیدگی در ظاهر مدلها باعث افزایش دقت تخمینی آنها برای نفوذ تجمعی شد. در این راستا مدل کاستیاکف دارای بالاترین R^2 و کمترین $RMSD$ گردید و دقیقتر از دو مدل فیلیپ و کاستیاکف اصلاح شده توانست در ترکیب مختلفی از D_b و W_0 نفوذ تجمعی را برآورد کند.

واژه‌های کلیدی: جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه، مدل‌های نفوذ، نفوذ تجمعی

Coefficients of Kostiakov, Modified Kostiakov and Philip Infiltration Models on the Basis of Soil Bulk Density and Initial Water Content

MR Neyshabouri^{1*}, A Fakhery-Fard², D Farsadzade², N Sadeghian³ and J Kheiry³

¹Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

²Associate and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

³Former Graduate Students in Soil Science and Irrigation and Drainage, Respectively

*Corresponding author: E-mail: neyshabouri@tabrizu.ac.ir

Abstract

Determining of the coefficients in infiltration models often is accomplished by fitting experimental data (cumulative infiltration and time) to the models; the two important soil parameters, soil bulk density (D_b), and Initial water content (W_0) are overlooked. In the current study it was aimed to find out to what extent the coefficients in Kostiakov, modified Kostiakov and Philip infiltration models would depend on D_b and W_0 and by entering those two variables into the models how much the predicting accuracy may be improved. For this purpose soil columns using PVC tubes with 23 cm in diameter and 80 cm length were prepared with four D_b ranging from 1.11 to 1.42 gcm^{-3} and three W_0 of 0.106, 0.131 and 0.147 gg^{-1} . Infiltration tests were run with each combination of D_b and W_0 with two replicates, and the cumulative infiltration (I) were recorded at various times (t). Constant pressure head of 2.1 cm water was maintained on the soil surface during all tests until approaching steady infiltration rate when tests were terminated. At the first step of data analysis, I and t data were fitted to Kostiakov, modified Kostiakov and Philip models and their coefficients were computed. Then, the coefficients were regressed against D_b and W_0 and the regression equations were constructed. An the second step by applying those equations, the coefficients in the models were substituted in terms of D_b and W_0 and cumulative infiltration, (I_p) were predicted by using three variables of t , D_b and W_0 . Comparing the corresponding set of I and I_p through computing linear correlation coefficient (R) and root mean square deviation ($RMSD$) was the final step of data analysis. Results indicated that the dependence of the coefficients of these models on D_b was quite greater than on W_0 . Entering D_b and W_0 into the models inspite of making them relatively complicated, resulted in better prediction of cumulative infiltration at most combinations of D_b and W_0 . In this respect Kostiakov model with D_b and W_0 entered to it, produced more accurate prediction comparing to Philip and modified Kostiakov models.

Key words: Bulk density, Cumulative infiltration, Initial water content, Infiltration models

مقدمه

نفوذ آب به خاک عموماً تحت تاثیر شرایط سطح خاک و مشخصات منطقه انتقال قرار دارد. از جمله عوامل دخیل می‌توان بافت، ساختمان، ماده آلی، تراکم و هدایت هیدرولیکی خاک و نیز وجود لایه‌های غیرقابل نفوذ در نیمرخ خاک را نام برد (هیلل 1998). کیفیت آب نفوذ کننده به خاک از قبیل غلظت املاح، مواد معلق و گرانیوی نیز می‌توانند بر نفوذ تأثیر داشته باشند (علیزاده 1380 و قیلدلیال و تری پاتی 1987). شیوه تامین آب در سطح خاک و عواملی که چهره ظاهری یا وضعیت سطح خاک از قبیل شیب، پوشش و زبری را تحت تاثیر قرار میدهند، نیز در فرآیند نفوذ نقش دارند (آلن و برنند 1968 و ناصری و همکاران 2004).

در طول فصل زراعی، چگالی ظاهری (D_b) و رطوبت اولیه خاک (W_0) در اثر آبیاری، تردد ادوات کشاورزی و فعالیت بیولوژیکی، تغییر می‌کند و موجب تغییر در نفوذ و ضرایب معادلات نفوذ می‌گردد (فتاح و اوپادهیا 1996 و گامبس و وارکتین 1972). افزایش رطوبت اولیه موجب افزایش پتانسیل ماتریک و به تبع آن کاهش شیب هیدرولیکی در جبهه پیشروی رطوبت شده و در نهایت شدت نفوذ کاهش می‌یابد (لطفی صدیق 1368). حبس هوا در منافذ خاک در طی نفوذ از دیگر عوامل کند کننده نفوذ است. رادکلیف و راس ماسن (2000) گزارش دادند که در نمونه‌های آزمایشگاهی فشار هوای معادل $2/5\text{cm}$ ستون آب در زیر جبهه نفوذ، سرعت نفوذ نهایی آب در خاک را به نصف تقلیل داد. هیلل (1998) و میلروگاردنر (1962) دریافتند که در صورت وجود انواع لایه‌های بافتی در نیمرخ خاک، سرعت نفوذ توسط لایه ای که کمترین نفوذپذیری را دارد، کنترل می‌شود.

افزایش D_b خاک به معنی کاهش اندازه مجاری انتقال دهنده آب یا به عبارت دیگر کاهش هدایت هیدرولیکی خاک است و از شدت نفوذ می‌کاهد. گامبس و وارکتین (1972) با انجام آزمایش های روی ستون‌های

خاک با W_0 و D_b متفاوت نشان دادند که به ازای اندک کاهشی در چگالی ظاهری خاک، شدت نفوذ بطور معنی داری کاهش می‌یابد. آلن و برنند (1968) با انجام آزمایش روی یک خاک لوم سیلتی به این نتیجه رسیدند که با افزایش W_0 شدت نفوذ کاهش می‌یابد طبق آزمایشات انجام یافته در چندین بافت خاک، با افزایش W_0 ضریب جذبی مدل فیلپ بطور مؤثر کاهش پیدا می‌کند (تیلور و اشکرافت 1972).

باتوجه به تغییرات جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه در طول فصل زراعی (چیلدو همکاران 1993 و ساکای و همکاران 1992)، پیش‌بینی تاثیر آنها در فرایند نفوذ حایز اهمیت می‌باشد. اگر بتوان تاثیر آن دو را به عنوان فاکتورهای مستقل علاوه بر زمان در تعیین ضرایب نفوذ دخالت داد در این صورت تغییرات ضرایب بین خاک‌های مختلف کمتر شده و احتمالاً بتوان برای هر گروه بافتی ضرایب معینی را ارایه داد (کلاسنیتزار و همکاران 1998). هدف این تحقیق ارزیابی میزان وابستگی یا تاثیرپذیری ضرایب سه مدل نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده و فیلپ از D_b و W_0 در ستون‌های خاک و نیز ارزیابی چگونی دقت تخمین این مدل‌ها با وارد کردن D_b و W_0 در شبیه سازی مدل‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

- تهیه ستون‌های خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق با $73/5\%$ شن، $16/3\%$ سیلت و $10/3\%$ رس، دارای بافت لوم شنی بود که از منطقه ليقوان تبریز تهیه شد. آزمایش نفوذ در ستون‌های خاک با سه رطوبت اولیه $10/6$ ، $13/1$ و $14/6$ درصد جرمی صورت گرفت. در هر رطوبت آزمایش با چهار چگالی ظاهری متفاوت تکرار شد. جرم (M) خاک لازم با رطوبت وزنی (W) برای تهیه ستون‌های خاک از رابطه 1 بدست آمد.

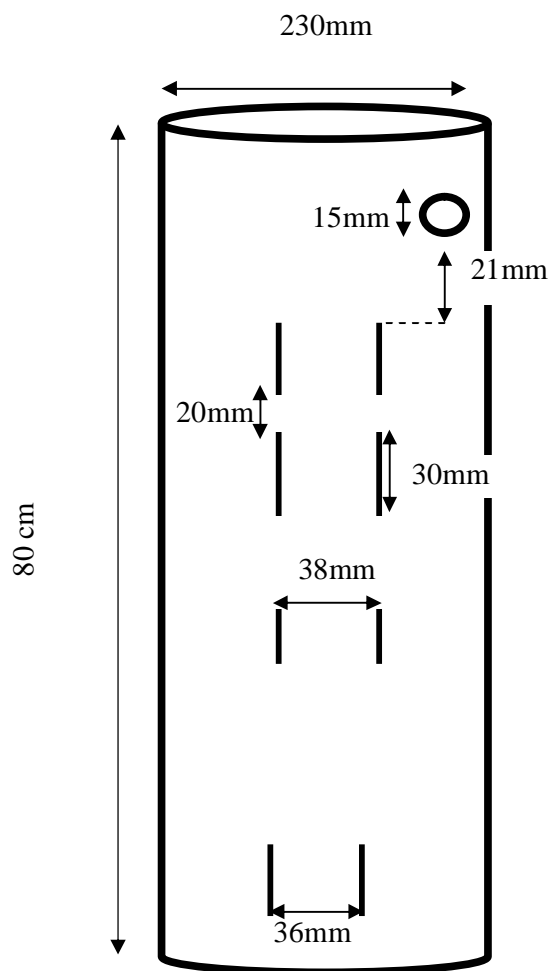
و مقدار آب محاسبه شده از رابطه ۲ در دو قسمت به آن اضافه گردید. قسمت اول با آب پاش دستی بطور یکنواخت روی خاک پاشیده شد و سپس خاک کاملاً مخلوط گردید. این خاک دوباره بر روی ورقه نایلونی پهن و قسمت دوم آب نیز مشابه قبل بر خاک اضافه و پس از به هم زدن کامل، خاک مرطوب شده به مدت ۲۴ ساعت کاملاً با پلاستیک پوشانده شد تا ضمن جلوگیری از تبخیر، توزیع آب در مقیاس میکروسکوپی نیز یکنواخت گردد. بعد از این مدت خاک مرطوب در کیسه‌های پلاستیکی جهت استفاده در مرحله بعدی یعنی تهیه ستونهای خاک ریخته شد.

$$M = \left(1 + \frac{W}{100}\right) \times (Db_1 + Db_2 + Db_3 + Db_4) \times V \quad [1]$$

V حجم و Db_1, Db_2, Db_3, Db_4 چگالی ظاهری خشک پیش‌بینی شده برای هر ستون می‌باشد. برای محاسبه مقدار آب لازم (H) جهت رساندن رطوبت توده خاکی به جرم (M_i) از رطوبت هوا خشک (W_i) به رطوبت وزنی مورد نظر (W) از رابطه ۲ استفاده شد.

$$H = \left(\frac{W - W_i}{100 + W_i}\right) M_i \quad [2]$$

بدین منظور، ابتدا خاک با جرم محاسبه شده (M) را به ضخامت سه سانتی متر بر روی ورقه نایلونی پهن کرده



شکل ۱- استوانه خاک و شکاف‌های نصب الکترود جهت کنترل فشردگی و تعیین محل جبهه رطوبتی

اولین جفت الکتروود در اولین جفت شکاف (10 میلی‌متر از کف استوانه) محکم تثبیت و به وسیله سلکتور در مدار *EC* سنج قرار گرفت. اولین جزو خاک (یک کیسه نایلونی با وزن مشخص) در داخل استوانه ریخته شد و با قلم مو سطح آن در داخل استوانه هم‌تراز گردید. سپس با استفاده از یک صفحه فلزی مدور دسته‌دار و نزدیک به قطر داخلی استوانه که به صورت پیستون به راحتی داخلی استوانه می‌توانست حرکت کند خاک ریخته شده آن قدر متراکم شد تا ضخامت لایه خاک ایجاد شده به 50 میلی‌متر پیش بینی شده برسد. در این حال *EC* اولین لایه (از ته ستون) قرائت و ثبت گردید. در مرحله بعدی جفت الکتروود دوم در جای خود تعبیه و جزو دوم خاک (کیسه نایلونی دوم) در داخل استوانه ریخته شد و به وسیله پیستون به اندازه‌ای متراکم شد تا *EC* حاصل برابر *EC* لایه اول گردید. پر کردن بقیه استوانه به همین ترتیب کامل گردید و بدین صورت میزان تراکم در هر لایه 50 میلی‌متری ستون کاملاً یکنواخت شد. البته هدف اصلی از نصب الکتروودها در فواصل 10 سانتیمتری در طول ستون اساساً اندازه‌گیری پیشروی جبهه رطوبتی با زمان در طول مدت نفوذ بود؛ اما از آنها برای ایجاد D_b های برابر در هر لایه 10 سانتیمتری نیز استفاده شد.

- آزمایش نفوذ

جهت اندازه‌گیری دقیق نفوذ تجمعی از دو دستگاه ترازوی دیجیتالی استفاده شد. ظرف آبی با شیر کنترل جریان خروجی به حجم 15 لیتر به عنوان مخزن تامین کننده آب روی ترازوی با ظرفیت توزین 20 کیلوگرم و حساسیت یک گرم قرار گرفت. مجموع جرم ظرف و آب محتوی آن قبل از شروع هر سری آزمایش نفوذ به 15 کیلوگرم رسانده شد. به منظور جلوگیری از تخریب خاکدانه‌های سطح خاک در هنگام ریزش آب از یک لایه اسفنجی به ضخامت 10 و به قطر 220 میلی‌متر روی سطح خاک در استوانه‌ها قرار داده شد. ترازوی دوم دارای ظرفیت سنجش 1/5 کیلوگرم و حساسیت 0/1 گرم

استوانه ستون‌های خاک با قطر داخلی 230، با ضخامت دیواره 10 و ارتفاع 802 میلی‌متر از جنس *P.V.C* تهیه گردید (شکل 1). مقدار خاک لازم برای هر ستون به طور جز به جز به درون استوانه‌ها ریخته شد و نهایتاً هر ستون به ارتفاع 750 میلی‌متر از خاک پر گردید. برای این که هر جزء خاک ریخته شده در ستون خاک D_b یکسان داشته باشند از سنجش هدایت الکتریکی استفاده شد. به این منظور، مطابق شکل 1 بر روی دیواره استوانه در راستای قائم دو ردیف شکاف به موازات هم و به فاصله 38 میلی‌متر از هم ایجاد شد. شکاف‌ها کاملاً یکسان و دارای ابعاد 1×30 میلی‌متر بودند. از این شکاف‌ها برای قراردادن یک زوج صفحه فلزی به طول 30 و عرض 10 و ضخامت یک میلی‌متر در درون خاک به عنوان سنجنده یا الکتروودهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و رطوبت خاک استفاده شد. اولین جفت شکاف از کف استوانه 10 میلی‌متر فاصله داشت و فاصله مرکز به مرکز دو شکاف متوالی بر روی دیواره 50 میلی‌متر بود (شکل 1). بر روی دیواره استوانه جمعاً 15 جفت شکاف ایجاد گردید و لذا هر زوج شکاف و زوج الکتروود متعلق به لایه‌ای از خاک به ضخامت 50 میلی‌متر را شامل میشد. سطح تحتانی استوانه با یک صفحه *PVC* با روزه‌های به قطر 3 میلی‌متر مسدود شد. این صفحه ضمن نگهداری خاک در ستون خروج هوا و آب از زیر ستون خاک رادر طول آزمایش نفوذ میسر کرد. در نزدیکی دهانه فوقانی استوانه و 21 میلی‌متر بالاتر از اولین جفت شکاف، روزه‌ای به قطر 15 میلی‌متر جهت سرریز احتمالی آب در طول آزمایش نفوذ ایجاد گردید. سرریز شدن آب اضافی از سطح ستون خاک موجب ایجاد بار آبی ثابت به ارتفاع 21 میلی‌متر روی سطح خاک در طول آزمایش نفوذ گردید.

برای تهیه ستون‌های خاک ابتدا وزن خاک لازم برای تشکیل هر لایه 50 میلی‌متری در درون استوانه با D_b و رطوبت مورد نظر محاسبه و به تعداد کافی به طور جداگانه در کیسه‌های نایلونی توزین و آماده شدند.

گردید و دو سری I_p و I از طریق رگرسیون خطی و میانگین مربع انحرافات ($RMSD$) با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج و بحث

- ضرایب معادلات نفوذ

ضرایب سه مدل نفوذ فیلیپ، کاستیتاکف و کاستیتاکف اصلاح شده حاصله از برازش نفوذ تجمعی به زمان در جدول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. هر سه مدل در تمام آزمایش‌ها، دارای ضریب تبیین بالا و معنی دار میباشند. مطابق جدول ۱ در رطوبتهای یکسان با افزایش جرم مخصوص ظاهری ضرایب A و S هر دو کاهش یافته اند ولی کاهش S بیشتر از A می‌باشد. فتاح و اوپادهیا (۱۹۹۶) نیز تأثیر مشابهی را از افزایش جرم مخصوص ظاهری بر ضرایب معادله نفوذ هورتون گزارش کردند. بالا رفتن رطوبت اولیه عموماً باعث کاهش ضریب S و افزایش ضریب A گردیده است. همین نتیجه برای ضریب a در مدل کاستیتاکف که مشابه با S فیلیپ می‌باشد نیز صادق است. تیلور و اشکرافت (۱۹۷۲) اثر رطوبت اولیه بر کاهش سرعت نفوذ نهایی را از طریق کاهش S و A بر روی چندین کلاس بافت خاک نشان دادند. تأثیر افزایش D_b بر ضریب b در مقایسه با a کمتر بوده است. تأثیر تغییرات D_b و W_0 بر روی ضرایب مدل کاستیتاکف اصلاح شده در جدول ۲ ارائه شده است. گرچه ضرایب a ، b ، c و W_0 صرفاً تجربی هستند و هیچ تفسیری توجیه فیزیکی برای آنها منظور نشده است اما چه افزایش D_b و چه افزایش W_0 هر دو باعث کاهش آن ضرایب شده‌اند. تأثیر پذیری ضریب c از D_b و W_0 مشابه a و b است. منفی بودن ضریب c در سری آزمایشات ۱ و ۲ با D_b پایین (۱/۱ و ۱/۱۵) به احتمال قوی ناشی از نشست خاک در این ستونها در طول آزمایش بوده است.

بود و از آن برای اندازه گیری حجم آب سر ریز شده (در صورت وقوع) استفاده گردید. بدین منظور ظرف کوچکی جهت جمع آوری آب سرریز یافته از استوانه نفوذ روی آن قرار گرفت. ارتفاع بار آبی بر روی خاک در تمام طول آزمایش ۲۱ میلی‌متر ثابت نگه داشته شد. مقدار نفوذ تجمعی (I_t) در هر زمان t پس از شروع آزمایش از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$I_t = (W_r - W_{rt}) - (W_{vt} - W_v) \quad [3]$$

W_{rt} , W_r : جرم مخزن تامین کننده آب به ترتیب قبل و بعد از شروع آزمایش در زمان t
 W_{vt} , W_v : جرم ظرف و آب سرریز شده به ترتیب در ابتدا و انتهای هر فاصله زمانی اندازه گیری نفوذ تجمعی در ابتدای آزمایش، چون شدت نفوذ بالا بود لذا فواصل قرائت جرم‌ها در رابطه ۳ یک دقیقه در نظر گرفته شد و با گذشت زمان و کاهش شدت نفوذ فواصل به ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه افزایش یافت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها در سه مرحله صورت گرفت. در مرحله نخست، از تقسیم I_t (رابطه ۳) به سطح مقطع ستون خاک نفوذ تجمعی (I) بر حسب سانتی‌متر بدست آمد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS داده‌های نفوذ تجمعی و زمان (t , I) برای هر سری آزمایش به مدل‌های نفوذ از طریق رگرسیون غیر خطی برازش شدند و ضرایب نفوذ برای هر مدل مشخص گردید. مدل‌های نفوذ بکار رفته، شامل مدل فیلیپ، کاستیتاکف و کاستیتاکف اصلاح شده بود. در مرحله دوم رابطه بین هریک از ضرایب معادلات نفوذ بعنوان متغیر وابسته با D_b و W_0 بعنوان متغیرهای مستقل از طریق رگرسیون و بر مبنای ضریب تبیین مشخص گردید. روابط حاصله در مدل‌های نفوذ بجای ضرایب قرار گرفت و نهایتاً معادله پیش‌بینی نفوذ تجمعی (I_p) در هر مدل بعنوان تابعی از t و D_b و W_0 بدست آمد. در سومین مرحله با قراردادن زمانهای اندازه‌گیری نفوذ تجمعی و D_b و W_0 مربوطه مقادیر I_p نظیر هر I (اندازه گیری شده) با بکارگیری معادلات مذکور محاسبه

جدول ۱ - ضرایب مدل فیلپ ($I = St^{0.5} + At$) و کاستیاکف ($I = at^b$) حاصل از برازش داده‌های نفوذ

شماره	W_0 $g g^{-1}$	D_b $g cm^{-3}$	a	b	R^2	S $cm min^{-0.5}$	A $cm min^{-1}$	R^2
۱	۱۰/۶	۱/۱۱	۱/۹۵۱	۰/۵۶۲	۰/۹۹۷	۲/۱۶	۰/۰۴۲	۰/۹۷۱
۲	۱۰/۶	۱/۱۵	۲/۷۷۴	۰/۵۷۲	۰/۹۹۵	۳/۲۱۳	۰/۰۴۱۳	۰/۹۹۵۲
۳	۱۰/۶	۱/۲۵	۱/۴۱۴	۰/۶۵۲	۰/۹۹۹	۱/۴۲۳	۰/۱۷۴	۰/۹۹۹
۴	۱۰/۶	۱/۳۲	۱/۱۱۹	۰/۵۱۵	۱	۱/۱۰۸	۰/۰۱۱	۰/۹۹۹
۵	۱۳/۰۸	۱/۲۲	۲/۲۵۰	۰/۶۱۱	۰/۹۹۹	۲/۱۳۵	۰/۲۳۳	۰/۹۹۹
۶	۱۳/۰۸	۱/۳	۰/۹۸۵	۰/۶۳۹	۰/۹۹۹	۱/۰۲۳	۰/۱	۰/۹۹۹
۷	۱۳/۰۸	۱/۳۸	۰/۶۳۸	۰/۵۹۹	۰/۹۹۹	۰/۷۲۸	۰/۰۲۸	۰/۹۹۹
۸	۱۳/۰۸	۱/۴۲	۰/۵۸۴	۰/۵۰۴	۰/۹۹۷	۰/۵۳۶	۰/۰۰۶	۰/۹۹۹
۹	۱۴/۶۵	۱/۲۶	۱/۵۹۹	۰/۵۹۷	۰/۹۹۹	۱/۴۷۵	۰/۱۶۴	۱
۱۰	۱۴/۶۵	۱/۲۸	۱/۴۳	۰/۶۰۷	۱	۱/۴۶۳	۰/۱۱۰	۰/۹۹۹
۱۱	۱۴/۶۵	۱/۳۸	۰/۸۰۸	۰/۴۸۱۸	۰/۹۹۶	۰/۷۱۲	۰/۰۰۷	۰/۹۹۸
۱۲	۱۴/۶۵	۱/۴۱	۰/۶۲۳	۰/۵۰۹	۰/۹۹۵	۰/۵۹۳	۰/۰۰۶	۰/۹۹۷

جدول ۲ - ضرایب مدل کاستیاکف اصلاح شده ($I = at^b + ct$) حاصل از برازش داده‌های نفوذ

شماره آزمایش	W_0 $g g^{-1}$	D_b $g cm^{-3}$	a $cm min^{-b}$	b	c $cm min^{-1}$	R^2
۱	۱۰/۶	۱/۱۱	۱/۹۱۵	۰/۶۶۹	-۰/۱۷۶	۰/۹۹۹
۲	۱۰/۶	۱/۱۵	۳/۱۷۲	۰/۷۹۳	-۰/۵۴۹	۰/۹۹۹
۳	۱۰/۶	۱/۲۵	۱/۳۵۶	۰/۵۷۴	۰/۱۱۶	۰/۹۹۹
۴	۱۰/۶	۱/۳۲	۱/۱۳۱	۰/۴۸۷	۰/۰۱۵	۰/۹۹۹
۵	۱۳/۰۸	۱/۲۲	۲/۱۲۵	۰/۵۳۴	۰/۱۸۴	۱
۶	۱۳/۰۸	۱/۳	۰/۹۹۲	۰/۵۳۵	۰/۰۸۲	۰/۹۹۹
۷	۱۳/۰۸	۱/۳۸	۰/۶۶۹	۰/۵۶۷	۰/۰۰۹	۰/۹۹۹
۸	۱۳/۰۸	۱/۴۲	۰/۶۰۸	۰/۴۴۱	۰/۰۱۳	۰/۹۹۹
۹	۱۴/۶۵	۱/۲۶	۱/۴۷۵	۰/۴۹۹	۰/۱۶۴	۱
۱۰	۱۴/۶۵	۱/۲۸	۱/۴۲۲	۰/۶۰۰	۰/۰۱۲	۰/۹۹۹
۱۱	۱۴/۶۵	۱/۳۸	۰/۸۵۲	۰/۳۸۴	۰/۰۳	۰/۹۹۹
۱۲	۱۴/۶۵	۱/۴۱	۰/۷۲۰	۰/۳۹۰	۰/۰۲۲	۰/۹۹۸

(1972) نیز به نتیجه مشابهی رسیدند. مثبت بودن ضرایب برای W_0 به این معنی است که با افزایش درصد رطوبت اولیه، هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد. وابستگی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به رطوبت خاک پایه نظری دارد و توسط خیلی از محققین تجربه شده است (هیلل 1998 و جری و هورتن 2004).

ضرایب S و A فیلیپ و a و b کاستیاکف که از معادلات 4 و 5 محاسبه شده‌اند در جدول 3 ارائه گردیده است. منفی بودن ضریب A در جدول مذکور برای D_b های 1/41 و 1/42 تاثیرگذاری شدید چگالی ظاهری بر ضریب A را نشان می‌دهد. کماینکه در رابطه 5 نیز ضریب D_b منفی است. آلن و همکاران (1968) و فیتز جرالند و همکاران (1971) در بین خصوصیات فیزیکی خاک جرم مخصوص ظاهری را بخصوص در لایه ی سطحی عامل مهم در سرعت نفوذ نهایی و ضریب A دانسته اند.

- وابستگی ضرایب نفوذ به رطوبت اولیه و چگالی ظاهری میزان تأثیرپذیری ضرایب سه مدل نفوذ از W_0 و D_b بوسیله رگرسیون ارزیابی گردید. معادلات زیر رابطه بین S و A مدل فیلیپ ($I = S\sqrt{t} + At$) را با متغیرهای فوق‌الذکر نشان می‌دهند.

$$S = -6.379D_b + 0.0131W_0 + 8.28 \quad [4]$$

$$R^2 = 0.97$$

$$A = -1.51 \ln \quad [5]$$

$$D_b + 0.00757W_0 + 0.404 \quad R^2 = 0.885$$

منفی بودن ضریب رگرسیون برای D_b در معادلات 4 و 5 دلالت بر این است که با افزایش این متغیر S و A هر دو کاهش می‌یابند. ضریب A تقریبی از هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای است (هیلل 1998) و طبیعی است که افزایش چگالی ظاهری باعث کاهش هدایت اشباع و در نتیجه موجب کاهش ضریب A شود. گامبس و وارگنتین

جدول ۳- ضرایب مدل فیلیپ ($I = St^{0.5} + At$) و کاستیاکف ($I = at^b$) محاسبه شده براساس چگالی ظاهری و درصد

رطوبت اولیه

شماره آزمایش	W_0 g g ⁻¹	D_b g cm ⁻³	S cm min ^{-1.5}	A cm min ^{-1.5}	a	b
۱	۱۰/۶	۱/۱۱	۳/۸۱۳	۰/۳۲۶	۴/۱۸۷	۰/۷۱۳
۲	۱۰/۶	۱/۱۵	۲/۹۵۴	۰/۲۷۲	۳/۱۰۷	۰/۶۸۷
۳	۱۰/۶	۱/۲۵	۱/۵۶۱	۰/۱۴۷	۱/۵۳۸	۰/۶۲۳
۴	۱۰/۶	۱/۳۲	۰/۹۹۹	۰/۰۶۴	۰/۹۷۲	۰/۵۷۸
۵	۱۳/۰۸	۱/۲۲	۱/۹۵۳	۰/۲۰۲	۲/۰۲۵	۰/۶۳۷
۶	۱۳/۰۸	۱/۳	۱/۱۷۲	۰/۱۰۶	۱/۱۸۵	۰/۵۸۶
۷	۱۳/۰۸	۱/۳۸	۰/۷۰۳	۰/۰۱۶	۰/۷۱۶	۰/۵۳۴
۸	۱۳/۰۸	۱/۴۲	۰/۵۴۵	-/۰۲۶	۰/۵۶۳	۰/۵۰۸
۹	۱۴/۶۵	۱/۲۶	۱/۵۴۴	۰/۱۶۵	۱/۶۰۲	۰/۶۰۹
۱۰	۱۴/۶۵	۱/۲۸	۱/۳۵۹	۰/۱۴۱	۱/۴۰۳	۰/۵۹۶
۱۱	۱۴/۶۵	۱/۳۸	۰/۷۱۸	۰/۰۲۸۳	۰/۷۴۴	۰/۵۳۱
۱۲	۱۴/۶۵	۱/۴۱	۰/۵۹۳	-/۰۰۰۴	۰/۶۲۰	۰/۵۱۲

$$\ln a = -8.428 \ln D_b + 0.332 \ln W_0 + 1.527$$

$$R^2 = 0.95$$

معادلات 6 و 7 روابط رگرسیونی بین ضرایب مدل کاستیاکف ($I = at^b$) و متغیرهای W_0 و D_b را ارائه

می‌دهد.

تجربی هستند اما وابستگی آنها به D_b و W_0 مشابه با معادلات فیلیپ بوده است (جدول 3).

برای مدل کاستیاکف اصلاح شده ($I = at^b + ct$) روابط زیر حاصل شدند:

ضرایب محاسبه شده از روابط فوق‌الذکر در جدول 4 درج گردیده است.

$$b = -0.645D_b - 0.0019W_0 + 1.45 \quad [7]$$

$$R^2 = 0.562$$

مقادیر محاسبه شده برای دو ضریب a و b از روابط مذکور نیز در جدول 3 آورده شده‌اند. ضریب a بطور معنی‌داری با افزایش D_b کاهش یافته ولی با افزایش W_0 بیشتر شده است. توان b عملاً تحت تأثیر رطوبت اولیه قرار نگرفته ولی بطور معنی‌داری رابطه عکس با D_b نشان می‌دهد. اگرچه ضرایب a و b کاستیاکف، صرفاً

$$\ln a = -7.388 \ln D_b + 0.353 \ln W_0 + 1.195 \quad R^2 = 0.931 \quad [8]$$

$$b = -1.393 D_b - 0.0198 W_0 + 1.403 \quad R^2 = 0.496 \quad [9]$$

$$c = -1.046 \ln D_b + 0.08625 \ln W_0 + 0.1335 \quad R^2 = 0.654 \quad [10]$$

جدول ۴- ضرایب مدل کاستیاکف اصلاح شده ($I = at^{0.5} + ct$) براساس چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه

شماره آزمایش	W_0 $g\ gr^{-1}$	D_b $g\ cm^{-3}$	a	b	c
۱	۱۰/۶	۱/۱۱	۳/۵۲۱	۰/۷۰۲	۰/۲۲۸
۲	۱۰/۶	۱/۱۵	۲/۷۱۱	۰/۶۶۴	۰/۱۹۰
۳	۱۰/۶	۱/۲۵	۱/۴۶۴	۰/۵۷۸	۰/۱۰۳
۴	۱۰/۶	۱/۳۲	۰/۹۷۹	۰/۵۲۴	۰/۰۴۶
۵	۱۳/۰۸	۱/۲۲	۱/۸۸۷	۰/۵۷۳	۰/۱۴۷
۶	۱۳/۰۸	۱/۳	۱/۱۸۰	۰/۵۱۳	۰/۰۸۰
۷	۱۳/۰۸	۱/۳۸	۰/۷۵۹	۰/۴۵۹	۰/۰۱۸
۸	۱۳/۰۸	۱/۴۲	۰/۶۱۴	۰/۴۳۴	-۰/۰۱۱
۹	۱۴/۶۵	۱/۲۶	۱/۵۴۷	۰/۵۲۶	۰/۱۲۳
۱۰	۱۴/۶۵	۱/۲۸	۱/۳۷۷	۰/۵۱۱	۰/۱۰۶
۱۱	۱۴/۶۵	۱/۳۸	۰/۷۹۰	۰/۴۴۵	۰/۰۲۸
۱۲	۱۴/۶۵	۱/۴۱	۰/۶۷۴	۰/۴۲۷	۰/۰۰۵

دو متغیر از روابط 4 تا 10 جایگزین و سه معادله زیر حاصل شدند.

معادله‌های نفوذ تجمعی براساس چگالی ظاهری و رطوبت اولیه برای نشان دادن تأثیرپذیری نفوذ تجمعی از متغیرهای W_0 و D_b ، ضرایب در هر مدل نفوذ بعنوان تابعی از این

معادله فیلیپ:

$$I_p = e^{(-6.379D_b + 0.0131W_0 + 8.28)} t + (-1.51 \ln D_b + 0.007579W_0 + 0.404) t \quad [11]$$

معادله کاستیاکف:

$$I_p = e^{(-8.42 \ln Db + 0.332 \ln W_0 + 1.527) t} (-0.645 Db - 0.0019 W_0 + 1.45) \quad [12]$$

معادله کاستیاکف اصلاح شده:

$$I_p = (-7.388 \ln Db + 0.353 \ln W_0 + 1.195) t^{-1.393 Db - 0.0198 W_0 + 1.403} + (-1.046 \ln Db + 0.08625 \ln W_0 + 0.1335) t \quad [13]$$

قرار گرفت و مدل فیلیپ بالاترین $RMSD$ را داشت که دلالت بر انحراف بیشتر نفوذ تجمعی پیش‌بینی شده نسبت به اندازه‌گیری شده دارد. دقت تخمینی بالاتر مدل کوستیاکوف در مقایسه با مدل فیلیپ در تحقیقات متعدد گزارش شده است (کلاسنیتزر و همکاران، ۱۹۹۸). در هر سه مدل با افزایش مدت زمان نفوذ از ۷ به ۲۵ دقیقه $RMSD$ افزایش یافته است. از این نظر مدل فیلیپ در ۲۵ دقیقه نفوذ بالاترین $RMSD$ را نشان می‌دهد. در بدست آوردن ضرایب مدلها بصورت تابعی از چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه، داده‌های آزمایش ۱ و ۲ به دلیل نشست خاک در طی آزمایش نفوذ کنار گذاشته شد. چون در اثر نشست خاک D_b تغییر یافت.

بکارگیری این مدلها علی‌رغم پیچیده بودن آنها نسبت به مدلهای اصلی این امکان را می‌دهد که به همراه پارامتر زمان W_0 و D_b خاک نیز در معادلات وارد شوند و بنابراین علاوه بر تخمین دقیقتر I بتوان تغییرات W_0 و D_b در طی فصل رشد را در تخمین نفوذ تجمعی دخالت داد. سه معادله مذکور در قالب اصلی فاقد این توانایی هستند.

مقایسه منحنی تغییرات نفوذ تجمعی در مقابل زمان با استفاده از معادلات نهایی ۱۱ تا ۱۳ و داده‌های مشاهداتی نشان داد که در غالب آزمایشها بین مقادیر برآورد شده و مقادیر مشاهداتی اختلافی دیده نمی‌شود. به عنوان مثال شکل ۲ مربوط به آزمایش ۹ مطابقت کامل I_p و I را نشان می‌دهد. تنها در سه آزمایش بخصوص شماره ۸ مقادیر برآورد شده از معادلات فیلیپ (معادله ۱۱) و کاستیاکف تعدیل شده (معادله ۱۳) از یک طرف و مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت قابل توجه نشان دادند (شکل ۳). علت احتمالاً این است که در بعضی از آزمایشات نفوذ، آزمایش قبل از رسیدن به شدت نفوذ نهایی متوقف شده است و ضرایب A فیلیپ و c کاستیاکف اصلاح شده، مبین شدت نفوذ نهایی بطور دقیق نمی‌باشند.

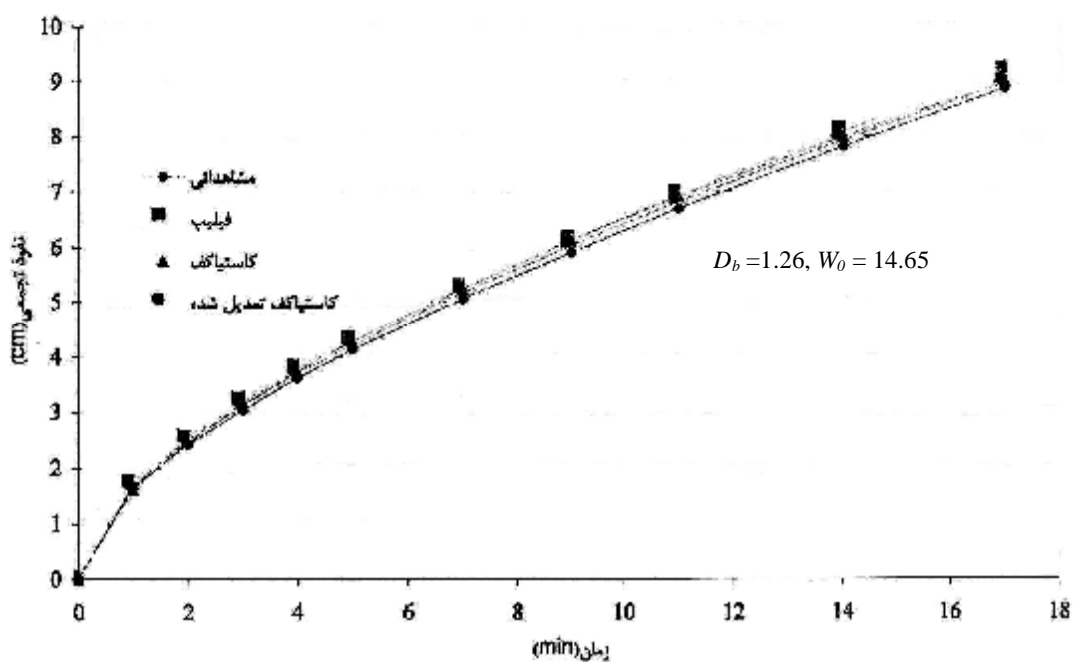
مربع انحرافات بین I_p و I محاسبه و میانگین مربع آن ($RMSD$) برای سه زمان ۷، ۱۴ و ۲۵ دقیقه در جدول ۵ ارائه شده است. میانگین $RMSD$ برای سری آزمایشات ۳ تا ۱۲ برای مدل کاستیاکف حداقل مقدار را در بین سه روش داشت. مدل کاستیاکف اصلاح شده در مرتبه بعدی

جدول ۵- جذر میانگین مجموع مربعات انحرافات ($RMSD$) بین مقادیر مشاهداتی (I) و برآورد شده (I_p) نفوذ تجمعی از سه مدل نفوذ

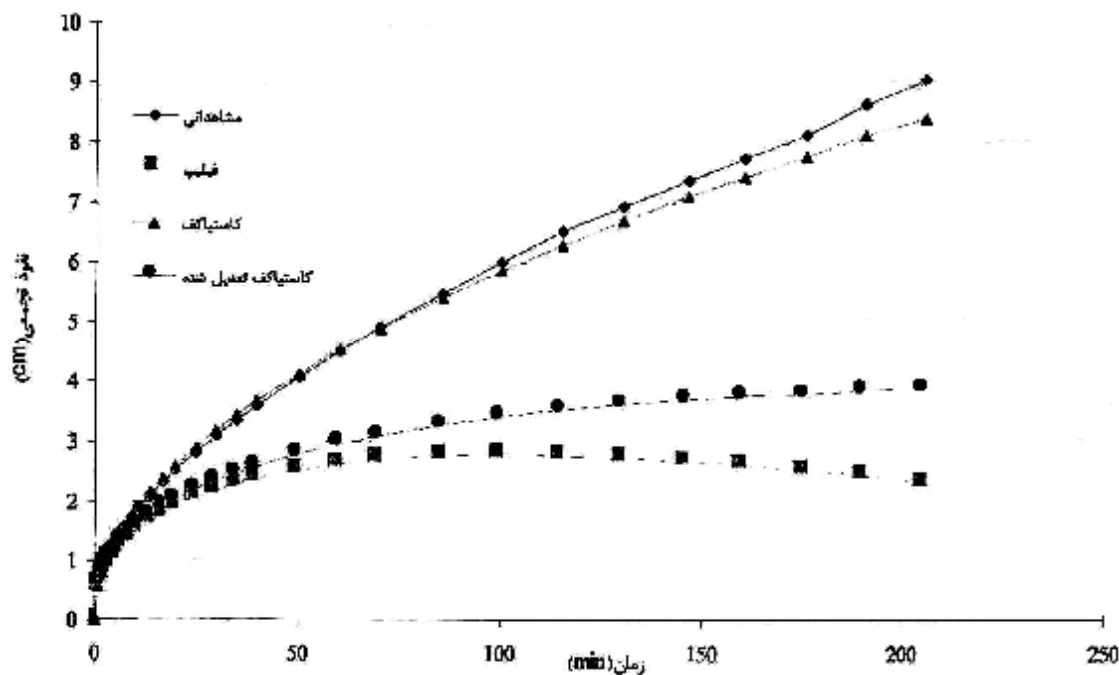
براساس چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه در سه زمان مختلف

شماره آزمایش	کاستیاکف اصلاح شده	کاستیاکف	فیلپ	کاستیاکف اصلاح شده	کاستیاکف	فیلپ	کاستیاکف اصلاح شده	کاستیاکف	فیلپ
	دقیقه بیست و پنجم			دقیقه چهاردهم			دقیقه هفتم		
۳	۰/۱۱۴۸۹	۰/۰۷۶۴	۰/۰۶۸۸	۰/۱۶۵۴۷	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۶۱
۴	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۹۶۶۰	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴
۵	۰/۰۱۴۰۰	۰/۰۳۵۰	۰/۰۳۷۰	۰/۰۱۲۳۴	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۰۰	۰/۰۳۰۰
۶	۰/۰۳۱۸۱	۰/۰۳۲۳	۰/۰۰۴۳	۰/۱۰۳۰۳	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۷
۷	۰/۰۰۶۹۱	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۳۳۸۰	۰/۰۶۶۱	۰/۰۶۶۱	۰/۰۶۶۱	۰/۰۶۶۱	۰/۰۶۶۱
۸	۰/۰۴۷۰۱	۰/۰۱۴۹	۰/۰۶۹۵	۰/۰۵۷۲۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۹	۰/۰۴۳۰۲	۰/۰۰۱۸	۰/۰۹۲۰	۰/۱۲۸۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶
۱۰	۰/۱۰۷۸۳	۰/۰۷۱۱	۰/۱۶۳۷	۰/۱۸۲۷۳	۰/۰۸۳۸	۰/۰۸۳۸	۰/۰۸۳۸	۰/۰۸۳۸	۰/۰۸۳۸
۱۱	۰/۰۱۷۸۷	۰/۰۰۸۱	۰/۰۲۰۰	۰/۱۱۹۹۵	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴	۰/۰۴۷۴
۱۲	۰/۲۴۹۵۸	۰/۰۸۴۰	۰/۰۵۳	۰/۳۹۸۳۹	۱/۲۸۴۴	۱/۲۸۴۴	۱/۲۸۴۴	۱/۲۸۴۴	۱/۲۸۴۴
RMSD	۰/۶۳۳۰۴	۰/۳۳۵۳	۰/۹۷۶۷	۱/۲۹۷۵۹	۰/۵۸۶۵	۲/۳۵۰۶	۲/۶۰۲۶۱	۱/۳۴۰۷	۳/۵۹۱۲

$$RMSD = \left[\sum_{i=1}^n (I_m - I_p)^2 / n \right]^{0.5}$$



شکل ۲- مقایسه منحنی‌های نفوذ تجمعی پیش‌بینی شده از چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه خاک با داده‌های مشاهداتی (آزمایش ۹)



شکل ۳- مقایسه منحنی‌های نفوذ تجمعی پیش‌بینی شده از چگالی ظاهری و درصد رطوبت اولیه خاک با داده‌های مشاهداتی (آزمایش ۸)

منابع مورد استفاده

- علیزاده ا، ۱۳۸۰، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی.
- لطفی صدیق ا، ۱۳۶۸. بررسی نفوذ آب باران در خاک خشک تا مرحله اشباع خاک، دانش کشاورزی جلد ۱، شماره ۱ و ۲ صفحات ۴۱-۶۸.
- Allen, JB and HJ Brand. 1968. How cracks and initial moisture content affect infiltration in Sharkey clay. *Agric Engin* 49:589-594.
- Child, JI, WW Wallender and JW Hopmans. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *J. Irrig. and Drain. Engin. ASCE*. 119:74-90.
- Clausnitzer V, JW Hopmans, and JL Staw. 1998. Parameter uncertainty analysis of common infiltration models. *Soil Sci Soc Am J* 62: 1477-1487.
- Fattah, HA and SK Upadhyaya. 1996. Effect of soil crust and compaction on infiltration in a Yolo loam soil. *Am Soc Agric Engin* 39:79-84.
- Fitzgerald, PD, GF Cossens and DS Richards. 1971. Infiltration and soil properties. *J Hydrol* 10:120-126.
- Ghildyal, BP and RP Tripathi. 1987. *Soil Physics*. Wiley Eastern Limited. New Delhi. pp. 345-380.

- Gumbs, FA and BP Warkentin. 1972. The effect of bulk density and initial water content on infiltration in dry soils. *Soil Sci Soc Am Proc* 36: 720- 724.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Acad. Press. UK.
- Jury, W and R Horton. 2004. *Soil Physics*. John Wiley & Sons Inc., London.
- Miller, DE and WH Gardner. 1962. Water infiltration into stratified soils. *Soil Sci Soc Am Proc*. 26: 115- 119.
- Nasseri, A, MR Neyshabouri, A Fakherifard , M Mogaddam and AH Nazem . 2004. Field-measured furrow infiltration function. *Turk. J Agric* 28:93-99.
- Radcliffe, DE and TC Rasmussen. 2000. Soil water movement. In : M E. Summmer(ed). *Handbook of Soil Science*, CRC Press. Inc.
- Sakai, K, SK Upadhyaya and M Sime. 1992. Variability of a double ring infiltration test. *Trans. ASAE*. 35:1221-1226.
- Taylor, SA and GL Ashcroft. 1972. *Physical edaphology : The physics of irrigated and nonirrigated soils*. Freeman, WH, and Company, San fransisco, USA