

روشی ساده برای تخمین توأمان هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل مؤثر خاک^۱

جمال محمد ولی سامانی، مهدی همائی، مهدی کوچک زاده و پرویز فتحی^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۸۳/۲/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۴/۶/۲۴

چکیده

تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل مؤثر خاک در زهکشی اهمیت ویژه و در کنترل کردن عمق سطح ایستابی بین زهکش‌ها نقش مهم دارند. در حال حاضر، فاصله بین زهکش‌ها بر مبنای مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده این دو عامل طراحی می‌شود که در محدوده مورد طراحی به دست می‌آید. هدف از این پژوهش، ارائه روشی نوین است که بر مبنای آن بتوان مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر را به طور همزمان به دست آورد. در این روش، ارتفاع سطح ایستابی در فواصل مختلف از زهکش و در زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. سپس، با استفاده از مدل جریان غیرماندگار گلور-دام و به کارگیری بهینه سازی غیرخطی، مقادیر هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر بهینه برآورد می‌شود. به منظور واسنجی مدل گلور-دام از راه بهینه سازی غیرخطی، افزون بر داده‌های حاصل از آزمایش برخی داده‌های موجود دیگر نیز به کار گرفته شد. برای اجرای آزمایش‌ها، مدلی فیزیکی به طول ۲/۵، عرض ۰/۳، و ارتفاع ۰/۵ متر تهیه و یک زهکش سوراخ‌دار به قطر ۴/۵ سانتی‌متر در کف یکی از دو انتهای طولی و عمود بر زهکش آن تعبیه شد. برای اندازه‌گیری تغییرات سطح ایستابی در اعماق و زمان‌های مختلف، ۱۶ پیژومتر در امتداد طولی نصب و قرائت‌ها در دوره‌های زمانی مشخص انجام شد. روش پیشنهادی، در دو حالت با تخلخل ثابت و متغیر، ارزیابی و مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر به دست آمد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در پیش‌بینی نیمرخ‌های سطح ایستابی دقت مناسبی دارد. همچنین، اعمال مقادیر بهینه با لحاظ کردن تخلخل متغیر باعث افزایش دقت پیش‌بینی روش پیشنهادی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

بهینه سازی، تخلخل مؤثر، زهکشی، مدل فیزیکی زهکشی، هدایت هیدرولیکی اشباع

۱- برگرفته از تحقیق مستقل

۲- به ترتیب دانشیار گروه‌های مهندسی تاسیسات آبیاری و مهندسی خاکشناسی، استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، خیابان جلال آل احمد- صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵ و استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان



مقدمه

هنگامی میسر می‌شود که مقدار آب ورودی و زه آب خروجی به حجمی معین از خاک به طور دقیق پایش شود [۱۲].

به طور کلی، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را می‌توان از دو راه مستقیم و غیر مستقیم به دست آورد. روش‌های مستقیم، که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های صحرایی یا آزمایشگاهی هستند، عموماً بسیار وقت‌گیر و پرهزینه‌اند [۱۷]. افزون بر این، تغییرات زمانی - مکانی این ویژگی‌ها گاهی چنان گسترده است که تنها برای مساحتی کوچک، باید تعداد اندازه‌گیری‌ها بسیار زیاد باشد [۳۰]. پژوهش‌ها به خوبی این واقعیت را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مقیاس‌های بزرگ باعث ایجاد خطای زیاد و ناهمخوانی با واقعیت می‌شود [۳، ۲۹، و ۳۱].

اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی اشباع، که خود متأثر از ویژگی‌های سیال و محیط متخلخل است، به دو روش صحرایی و آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های صحرایی نیز خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: اندازه‌گیری‌های زیر سطح ایستابی و اندازه‌گیری‌های بالای سطح ایستابی. اندازه‌گیری‌های زیر سطح ایستابی این مزیت را دارند که در برگزیده ویژگی‌های واقعی سیال موجود در خاک هستند و هرگونه دگرگونی مربوط به کیفیت آب به طور طبیعی در آنها لحاظ شده است. در مقابل، اندازه‌گیری‌های بالای سطح ایستابی نیازمند حفاری‌های کمتری جهت نصب تجهیزات است، اما نیازمند مقدار نسبتاً زیاد آب نیز هست که

تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مدل سازی جریان آب، انتقال املاح، و مطالعات زهکشی اهمیتی فراوان دارد. از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و تخلخل مؤثر (f) در زهکشی با اهمیت و به عنوان پیش‌نیاز هرگونه مطالعه، شبیه‌سازی، و طراحی مورد نیاز است. متأسفانه، این دو پارامتر در زمان و مکان متغیرند و اغلب با عملیات فیزیکی که روی خاک انجام می‌شود، تغییر می‌کنند [۱ و ۲۹].

هم هدایت هیدرولیکی اشباع و هم تخلخل مؤثر خاک از هندسه و توزیع تخلخل متأثرند. بافت و ساختمان خاک دو ویژگی فیزیکی مهمی هستند که توزیع تخلخل خاک را رقم می‌زنند [۲۹] برخی فعالیت‌های زراعی همچون شخم عمیق با تغییر ساختمان خاک، توزیع تخلخل را به آسانی تغییر می‌دهد. افزون بر این، کیفیت آب درون منفذی نیز می‌تواند با تغییر ویژگی‌های سطحی ذرات خاک، ساختمان خاک را متأثر و بدین ترتیب آرایش فضایی تخلخل را دگرگون سازد. افزون بر آنچه گفته شد، میدان گرانشی و جرم ویژه آب نیز بر هدایت هیدرولیکی خاک مؤثر است. بدین ترتیب، تغییر پذیری‌های زمانی - مکانی K_s و f به خوبی آشکار می‌شوند [۳].

تخلخل مؤثر یا تخلخل قابل زهکشی، مقدار هیدرولیکی است که طی فرآیند زهکشی از خاک خارج می‌شود تا خاک به حالت تعادل رطوبتی برسد [۱]. چون رطوبت موجود در خاک کمیتهی پویاست، اندازه‌گیری f تنها

تلاش می‌شود تا از نمونه‌های دست نخورده استفاده شود، با این همه در حقیقت هیچ خاک جدا شده در طبیعت را نمی‌توان دست نخورده قلمداد کرد.

برای تعیین تخلخل مؤثر خاک با استفاده از ویژگی‌های خاک و دبی خروجی از زهکشی‌ها روش‌هایی مختلف نیز پیشنهاد شده است [۱۹، ۲۴، ۲۷] که هر یک نقاط قوت و ضعف خود را دارد. اما هر روشی که برای تعیین f برگزیده شود، از این کاستی ذاتی متأثر می‌شود که تخلخل مؤثر کمی «پویا و نه پایا» از خاک است.

به دلیل دشواری‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های مستقیم، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی شده است تا این ویژگی‌ها را از راه‌های غیر مستقیم با تقریبی مناسب برآورد کنند. روش‌های غیر مستقیم عموماً بر این پایه استوارند که ویژگی مورد نظر را می‌توان با استفاده از مدلی ریاضی یا فیزیکی بر مبنای توزیع ذرات جامد یا توزیع تخلخل خاک برآورد کرد [۱۸].

برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع به روش غیر مستقیم، پژوهش‌هایی زیادی شده که نتایج آن عموماً برای خاک‌های فاقد ساختمان یا خاک‌های تک دانه‌ای نسبتاً رضایت بخش بوده است. در این پژوهش‌ها، عمدتاً بین قطری معین از ذرات منفرد خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع نوعی همبستگی

ممکن است حمل آن به منطقه مورد مطالعه چندان آسان نباشد.

روش‌های اندازه‌گیری K_s در زیر سطح ایستابی شامل: روش چاهک^۱ [۶]، روش پیزومتر^۲ [۱۹]، روش دو چاهک^۳ [۱۱]، روش چهار چاهک^۴ [۲۶]، روش چند چاهک^۵ [۲۵]، روش چاه-سطل^۶ [۱۰] و روش ضربه‌ای^۷ [۸] است. مزایا و محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها را آموزگار و ویلسون (Amoozgar & Wilson, 1999) بررسی کرده‌اند.

روش‌های اندازه‌گیری K_s در بالای سطح ایستابی شامل روش نفوذ سنج با بار هیدرولیکی ثابت^۸ [۲]، روش نفوذ سنج با ورود هوا^۹ [۶]، روش نفوذ سنج نهایی^{۱۰} [۸]، روش دو استوانه^{۱۱} [۱]، روش نفوذ سنج سرعت^{۱۲} [۲۲]، و روش نمونه دست نخورده^{۱۳} [۵] است. هرچند اجرای برخی از این روش‌ها ممکن است دشوار یا وقت‌گیر باشد، ولی کاربرد آنها می‌تواند حجم بزرگی از خاک را در برگیرد که هرگز نمی‌توان آن را در آزمایشگاه به حالت اشباع درآورد. این اندازه‌گیری‌ها غالباً برای اصلاح خاک‌های شور یا شور-سدیمی به کار گرفته می‌شوند.

روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری K_s را می‌توان به طریق بار ثابت یا بار افتان [۱۲] اجرا کرد. در این نوع اندازه‌گیری‌ها،

- | | | |
|--|--|--------------------------------------|
| 1- Auger Hole Method | 2- Piezometer Method | 3- Two Well Method |
| 4- Four Well Method | 5- Multi Well Method | 6- Pit-Bailing Method |
| 7- Slug Method | 8- Constant-Head Well Permeameter Method | |
| 9- Air Entry Permeameter Method | | 10- Intake rate Infiltrometer Method |
| 11- Double Tube Method | | 12- Velocity Permeameter Method |
| 13- In Situ Undisturbed Soil Column Method | | |

تحقیقات نشان می‌دهد که تاکنون روشی ارائه نشده است که در برگیرنده اندازه‌گیری همزمان K_s و f باشد. هدف از این پژوهش، ارائه روشی جدید است که بر مبنای آن بتوان مقادیر K_s و f را با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات سطح ایستابی و به کارگیری بهینه‌سازی، به طور همزمان تخمین زد. در روش پیشنهادی، اندازه‌گیری نوسانات سطح ایستابی تنها پارامتر ورودی مورد نیاز است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از میان مدل‌های غیرماندگار نخست مدل غیرماندگار گلور- دام برای پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی انتخاب شد. آنگاه، روشی مناسب برای بهینه‌سازی انتخاب و مدل گلور- دام در آن ادغام گردید. برای اجرای آزمایش‌ها، یک مدل فیزیکی از صفحات ضخم شیشه‌ای ساخته شد. در درون این مدل فیزیکی که به طول ۲/۵، عرض ۰/۳، و ارتفاع ۰/۵ متر بود به فواصل مناسب از محل زهکش ۱۶ پیژومتر به قطرهای یک سانتی متر نصب شد (چهار پیژومتر اول با فاصله ۲ سانتی متر، چهار پیژومتر دوم با فاصله ۴ سانتی متر، پنج پیژومتر سوم با فاصله ۲۰ سانتی متر، و آخرین فاصله ۳۴ سانتی متر بود). قرائت نوسانات سطح ایستابی در فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای اجرا شد تا دقت اندازه‌گیری‌ها افزایش یابد. لوله‌ای از جنس PVC به قطر ۴/۵ سانتی متر و با ۱/۵ درصد مساحت سوراخ شدگی در یکی از دو انتهای طولی و در کف مدل فیزیکی نصب شد. خاک انتخابی با

برقرار و توابعی کاملاً تجربی پیشنهاد شده است [۲۹]. تقریباً هیچ یک از معادله‌های ارائه شده از این راه، برآوردی مناسب از K_s برای خاک‌های ساختمان‌دار ارائه نمی‌نماید [۱۵ و ۱۶].

یکی دیگر از راه‌های غیر مستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده از توابع انتقالی^۱ (PTFs) خاک است [۱۸]. توابع انتقالی توابعی هستند که ویژگی‌های زود یافت خاک را به ویژگی‌های دیر یافت آن، همچون هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع، تبدیل می‌کنند [۱۷، ۲۳، ۲۸، و ۳۰]. در این روش، هدف عمدتاً برآورد هدایت هیدرولیکی غیر اشباع است، اما برای حل معادله جریان، به K_s نیاز هست و بدین ترتیب این ویژگی نیز تخمین زده می‌شود.

یکی از ابزارهایی که در سال‌های اخیر برای تخمین غیر مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به کار گرفته شده، استفاده از روش بهینه‌سازی^۲ است. بهینه‌سازی روشی است که با آن برای هر مسئله، با توجه به هدف تعیین شده^۳ و محدودیت‌های موجود^۴، که همگی با روابط ریاضی مشخص شده‌اند، بهترین جواب ممکن تعیین می‌شود. مسئله بهینه‌سازی دارای یک تابع هدف و احتمالاً چندین تابع محدودکننده است که مجموعاً خصوصیات سیستم مورد نظر را در بر می‌گیرند. منظور از بهینه‌سازی در یک مورد خاص، ممکن است به حداکثر رساندن مقدار تابع هدف^۵ یا به حداقل رساندن آن باشد.

1- Pedo-Transfer Functions
4- Constrain Functions

2- Optimization
5- Maximizing the Objective

3- Objective
6- Minimizing the Objective

برای برآورد تابع تخلخل مؤثر، از روش تیلور [۲۷] و تابع پیشنهادی پندی و همکاران (۱۹۹۲) استفاده شد. بدین ترتیب تغییرات تخلخل قابل زهکشی نسبت به ارتفاع سطح ایستابی با استفاده از تابع تجربی پندی و همکاران (۱۹۹۲) به دست آمد:

$$\frac{f}{f_o} = \left[1 - \frac{\frac{a^* \bar{h}}{h_o}}{\frac{\bar{h}}{h_o} + \frac{1 - \frac{\bar{h}}{h_o}}{b}} \right] \quad (1)$$

که در آن \bar{h} متوسط h در دو زمان متوالی h_t و $h_{t+\Delta t}$ است؛ f_o تخلخل مؤثر خاک به هنگامی است که سطح ایستابی در عمق زهکش قرار گرفته؛ f تخلخل قابل زهکشی خاک در سطح ایستابی (h) است؛ h_o ارتفاع سطح ایستابی در زمان صفر است؛ و a^* و b دو ثابت تجربی هستند. با مشخص شدن مقادیر تخلخل مؤثر نسبت به ارتفاع سطح ایستابی، از میان مقادیر مذکور بهترین منحنی برازش داده شد و مقادیر a^* ، b و f_o به ترتیب برابر با ۰/۸۲۵، ۱/۰ و ۰/۲۸۵ تعیین گردید.

- بهینه سازی

به دلیل اینکه به محاسبه مشتق تابع نیازی نبود، از بین روش‌های مختلف بهینه سازی روش پاول انتخاب شد. این روش هنگامی به کار گرفته می‌شود که به دست آوردن مشتق تابع دشوار یا ناممکن باشد [۱۴].

بافت لوم-ماسه‌ای نخست از الک دو میلی متری رد شد تا ناخالصی‌های آن جدا شود. سپس، خاک را به صورت لایه‌های ۱۰ سانتی متری به درون مدل فیزیکی ریخته شد و با یک تخته صاف تراکم مختصری برای هر لایه ایجاد گردید. پس از خاکریزی تا عمق ۴۵ سانتی متری، خروجی زهکش کاملاً بسته شدند و خاک به طور کامل اشباع شد. مدل، به مدت سه هفته رها شد تا خاک شرایط طبیعی متعادل تری برای اجرای آزمایش‌ها پیدا کند. در پایان این مرحله، خروجی لوله زهکش باز شد تا آب موجود در خاک به طور کامل زهکشی شود. سپس، خاک آبیاری شد تا کاملاً اشباع و سطح ایستابی در عمق ۴۳ سانتی متری تثبیت شود. با ثابت شدن سطح ایستابی، آبیاری قطع، زهکشی شروع، و اندازه‌گیری‌ها آغاز شد. ارتفاع سطح ایستابی در درون پیژومترها در فواصل زمانی ۱۰، ۳۰، ۵۰، و ۶۰ دقیقه قرائت و ثبت شد. مشاهدات نشان داد که از فاصله ۱۱۶ سانتی متری به بعد، ارتفاع سطح ایستابی در هر زمان ثابت می‌ماند و نیمرخ سطح ایستابی به صورت یک خط افقی در می‌آید. این حالت نشان داد که تأثیر لوله زهکشی تا فاصله ۱۱۶ سانتی متری است و از آن پس، سطح ایستابی تحت تأثیر زهکشی قرار نمی‌گیرد. بنابراین، فاصله دو زهکش در این حالت دو برابر فاصله ۱۱۶ سانتی متری یعنی ۲۳۲ سانتی متر است. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از راه اندازه‌گیری زه‌آب خروجی و ارتفاع ثابت سطح ایستابی برابر ۰/۴۵ متر در روز اندازه‌گیری شد.

بر اساس روش پاول، مقادیر اولیه‌ای برای K_s و f (یا a^* ، b ، f_o) در نظر گرفته شد. سپس، با استفاده از این مقادیر اولیه و به کارگیری رابطه (۳) و با مشخص بودن مقادیر x و t مقدار $h_e(x, t)$ محاسبه شد. با این همه مقادیر h_e از طریق اندازه‌گیری برای همان x و t ، لحاظ شده در محاسبات رابطه (۳) تعیین گردید. مقادیر تابع رابطه (۲) با استفاده از رابطه (۳) و h_e برای تمام نقاط و زمان‌های مورد نظر با هم جمع و به عنوان تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفت.

بدین ترتیب، برنامه رایانه‌ای در نخستین مرحله با در نظر گرفتن مقادیر اولیه‌ای برای K_s و f (یا a^* ، b ، f_o) تابع هدف را محاسبه کرد. در مرحله بعد، بر اساس منطق بهینه‌سازی مربوط از مقادیر K_s و f (یا a^* ، b ، f_o) تقریبی جدید در نظر گرفته شد و مجدداً با این مقادیر تابع هدف محاسبه گردید. این عملیات متوالی آنقدر ادامه یافت تا مقدار تابع هدف حداقل شد و مقادیر K_s و f (یا a^* ، b ، f_o) که تابع هدف را حداقل می‌سازند به عنوان نتیجه نهایی بهینه به دست آمد.

در حقیقت هنگامی که دو نیمرخ سطح ایستابی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با دقتی قابل قبول به هم نزدیک شوند، هدف که همان پیش‌بینی دقیق‌تر نیمرخ سطح ایستابی در زمان‌های مختلف است، محقق خواهد شد. بدین ترتیب در یک سیستم زهکشی، با در اختیار داشتن مقادیر K_s و f بهینه (یا a^* ، b ، f_o) می‌توان فاصله دو زهکش را که تضمین کننده میزان افت خاص در زمانی مشخص است، با دقتی مناسب تعیین کرد.

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی جریان آب به سمت زهکش‌ها و تعیین نیمرخ سطح ایستابی مربوط، به دلیل سادگی و تحلیلی بودن، مدل گلور-دام [۲۰] انتخاب شد. از این مدل، برای محاسبه نیمرخ سطح ایستابی در بالای سطح زهکش در هر زمان استفاده گردید. برای تحقق هدف فوق، برنامه‌ای رایانه‌ای تعریف شد که در آن تابع هدف زیر بهینه می‌شود:

$$F = \sum_{i=1}^n (h_e - h_c)^2 \quad (2)$$

که در آن ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در بالای سطح آب در زهکش، h_e ارتفاع سطح ایستابی محاسبه شده در بالای سطح آب در زهکش در هر نقطه و در هر زمان، و n تعداد نقاط اندازه‌گیری است. کمیت h_c با مدل گلور-دام به شرح زیر تعیین شد:

$$h_c(x, t) = \frac{4h_o}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n^2 at} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (3)$$

که در آن a برابر با $\frac{\pi^2 K_s}{fL^2}$ ، h_o ارتفاع سطح ایستابی افقی اولیه (در زمان صفر) در بالای سطح آب در زهکش‌ها (متر)، L فاصله بین زهکش‌ها (متر)، D عمق معادل (متر)، f تخلخل موثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر ثانیه)، x فاصله از زهکش (متر)، t زمان (ثانیه)، و $h_c(x, t)$ ارتفاع سطح ایستابی (متر) در فاصله x و زمان t است.

- واسنجی مدل

برای واسنجی، از دو سری داده استفاده شد: داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پندی و همکاران (۱۹۹۲). برنامه رایانه‌ای تهیه شده برای هر سری از داده‌های فوق در دو حالت زیر اجرا و نتایج با یکدیگر مقایسه شد:

الف- با فرض اینکه مقدار تخلخل خاک ثابت است و به ارتفاع سطح ایستابی بستگی ندارد.

ب- تخلخل مؤثر تابعی از ارتفاع سطح ایستابی است.

در حالت (ب)، با اجرای برنامه، مقدار K_s و f و در نتیجه متغیرهای تابع تخلخل مؤثر خاک (f_o, b, a^*) برآورد گردید. شیوه انجام کار بدین ترتیب بود که ابتدا مقادیر f_o, b, a^* و K_s حدس زده شد.

- برای شروع، \bar{h} برابر با h_t در نظر گرفته شد و بر اساس مقادیر حدسی مرحله قبل، مقدار f از رابطه شماره ۱ محاسبه گردید. سپس، برای Δt مقادیر $h_{t+\Delta t}$ از رابطه شماره ۳ محاسبه شد.

آن‌گاه مقادیر $\bar{h} = \frac{h_t + h_{t+\Delta t}}{2}$ محاسبه و سپس

با استفاده از رابطه شماره ۱، f جدید به دست آمد. مجدداً برای Δt مقادیر $h_{t+\Delta t}$ از رابطه شماره ۳ محاسبه و این مراحل آنقدر تکرار شد تا همگرایی بین داده‌ها به دست آمد. به همین ترتیب، این کار برای Δt های دیگر ادامه یافت تا زمان‌های مربوط به نیمرخ‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری شده حاصل شد که در این مرحله تابع هدف رابطه شماره ۲ محاسبه گردید.

سرانجام، برنامه بهینه ساز مقادیر a^*, b, f_o و K_s را چنان تعیین کرد که تابع هدف، حداقل شد. بخشی از داده‌های مربوط به زمان‌های مشخص برای واسنجی مقادیر K_s و f (یا رابطه شماره ۱) استفاده و بقیه داده‌ها برای مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل گلور- دام (رابطه شماره ۳) به کار گرفته شد.

واسنجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی:

برای ارزیابی روش پیشنهادی، از داده‌های آزمایشگاهی ارتفاع سطح ایستابی در زمان‌های ۳۰ و ۹۰ دقیقه از زمان شروع زهکشی استفاده شد. کلیه محاسبات در دو حالت زیر انجام شد:

الف) با فرض ثابت بودن تخلخل مؤثر: مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر برابر با $0/305$ متر در روز و $0/0055$ و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده به ترتیب $0/45$ متر در روز و $0/16$ تعیین شد. ب) با فرض تخلخل مؤثر متغیر: مقادیر بهینه a^*, b, f_o و K_s به ترتیب $0/9, 1/0, 0/1$ و $0/319$ متر در روز و مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با $0/825, 1/0, 0/285$ و $0/45$ متر در روز به دست آمد.

واسنجی با استفاده از داده‌های پندی و همکاران:

در این واسنجی نخست، مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در زمان‌های ۲، ۴، و ۶ روز از آغاز زهکشی و در فواصل مختلف از زهکش تعیین و به عنوان داده‌های ورودی به برنامه معرفی شد. برنامه مجدداً اجرا و مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر در دو حالت زیر تعیین شد:

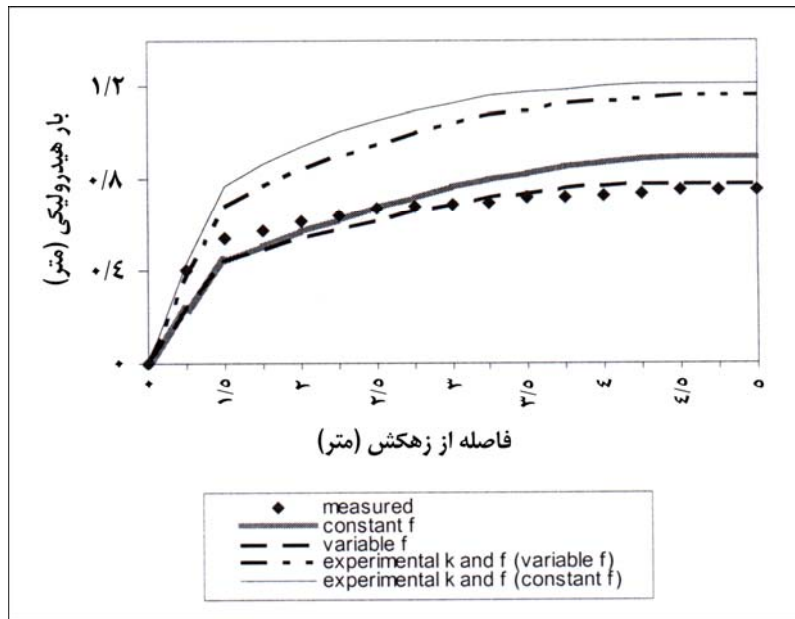
- الف) با فرض ثابت بودن تخلخل مؤثر خاک، مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر به ترتیب ۰/۰۷۲ متر در روز و ۰/۰۱۵ به دست آمد. مقادیر آزمایشگاهی متناظر به ترتیب ۰/۰۳۱ و ۰/۰۳۷۵ اندازه‌گیری شد.
- ب) با فرض وابستگی تخلخل مؤثر خاک و ارتفاع سطح ایستابی در بالای سطح زهکش، مقادیر a^* ، b ، f_0 و K_s به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۴۴۹، ۰/۰۳۲۵ و ۰/۰۴۶۹ متر در روز برآورد شد. مقادیر آزمایشگاهی متناظر متغیرهای فوق به ترتیب ۰/۸، ۰/۶، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۳۷۵ متر در روز به دست آمد.
- ۱- تخلخل مؤثر ثابت است، و مقادیر بهینه شده هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر به کار گرفته شده‌اند.
- ۲- تخلخل مؤثر ثابت نیست، بلکه به ارتفاع سطح ایستابی در بالای سطح زهکش بستگی دارد. در این صورت، مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و متغیرهای تابع تخلخل مؤثر (رابطه شماره ۱) به کار گرفته شده‌اند.
- ۳- تخلخل مؤثر ثابت است، و مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر به کار گرفته شده‌اند.

۴- تخلخل مؤثر متغیر و تابعی از ارتفاع سطح ایستابی در بالای سطح زهکش است. در این حالت از مقادیر هدایت هیدرولیکی و متغیرهای ثابت تخلخل مؤثر (رابطه شماره ۱) به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی استفاده شده است.

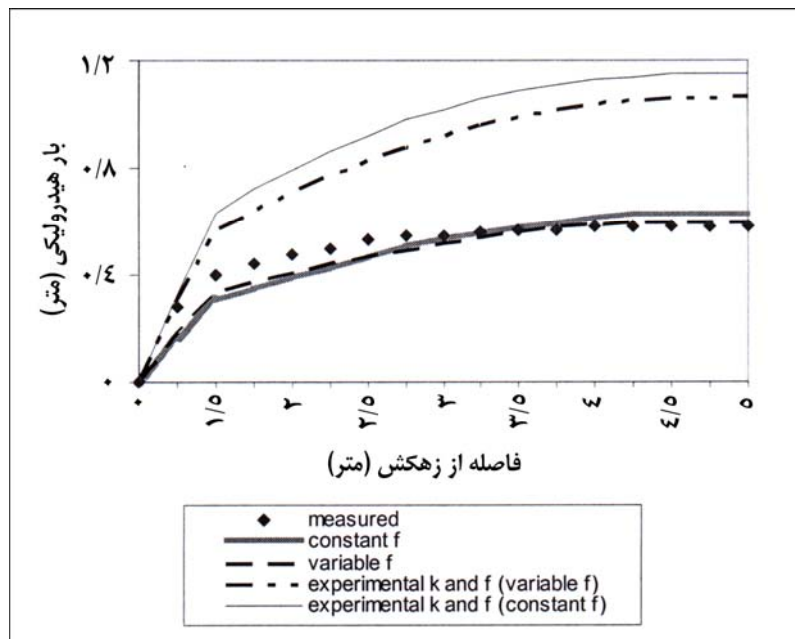
به همان ترتیب بخش قبلی، ارزیابی دقت پیش بینی روش جدید با استفاده از مقادیر به دست آمده از واسنجی با داده‌های آزمایشگاهی، انجام شد. در این ارزیابی، نیمرخ‌های سطح ایستابی پس از ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه از آغاز زهکشی اندازه‌گیری شده در چهار حالت مختلفی که در قسمت قبل ذکر شد، پیش‌بینی گردیدند. نتایج در شکل‌های شماره ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

- پیش‌بینی مدل

برای تشخیص اینکه کدام یک از مقادیر به دست آمده از واسنجی با استفاده از داده‌های پندی و همکاران (اندازه‌گیری شده یا بهینه شده در دو حالت f ثابت و متغیر) دارای دقت بالاتری است، از مقادیر مذکور برای پیش‌بینی نیمرخ سطح ایستابی در زمان‌های مختلف از آغاز زهکشی (از مدل گلو-ردام) استفاده شد. بدیهی است در حالت‌هایی مقادیر دقت بالاتری دارند که تطابق بیشتری با نیمرخ سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه داشته باشند. نیمرخ‌های سطح ایستابی پیش‌بینی شده، در شکل‌های شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نیمرخ‌های سطح ایستابی در



شکل شماره ۱- نیمرخ‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پس از سه روز از شروع زهکشی



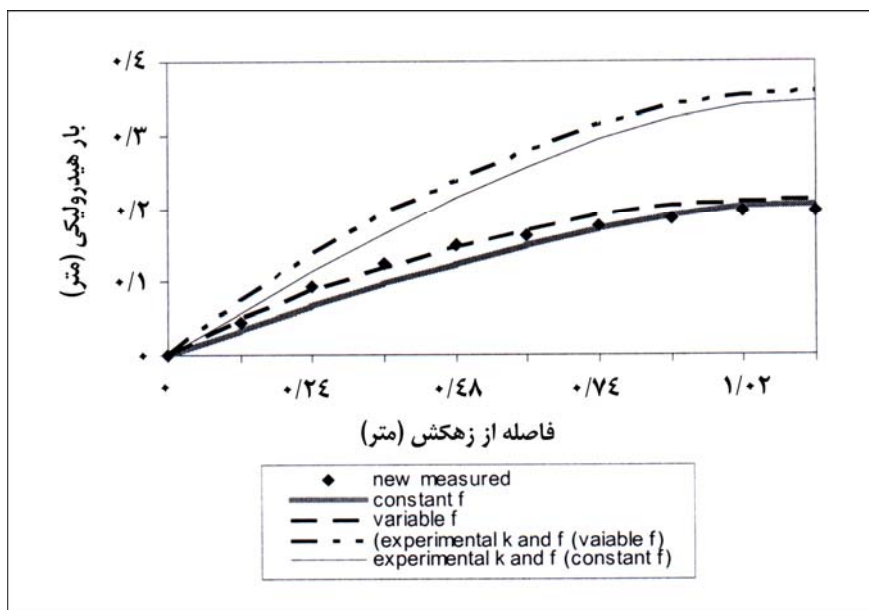
شکل شماره ۲- نیمرخ‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پس از پنج روز از شروع زهکشی

نتایج و بحث

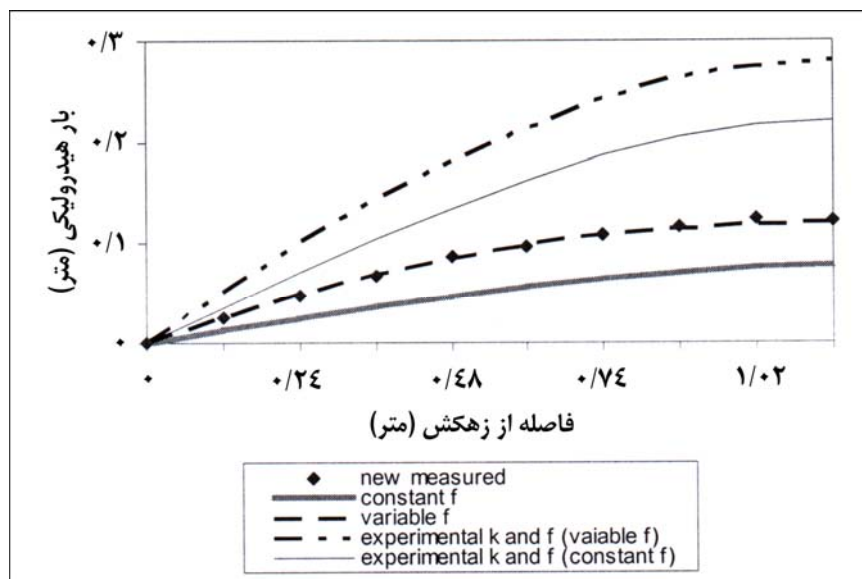
جدید به مراتب دقیق تر از نیمرخ‌هایی است که با

مشاهده شکل‌های شماره ۱، ۲، ۳، و ۴ نشان می‌دهد استفاده از ارقام آزمایشگاهی هدایت هیدرولیکی و

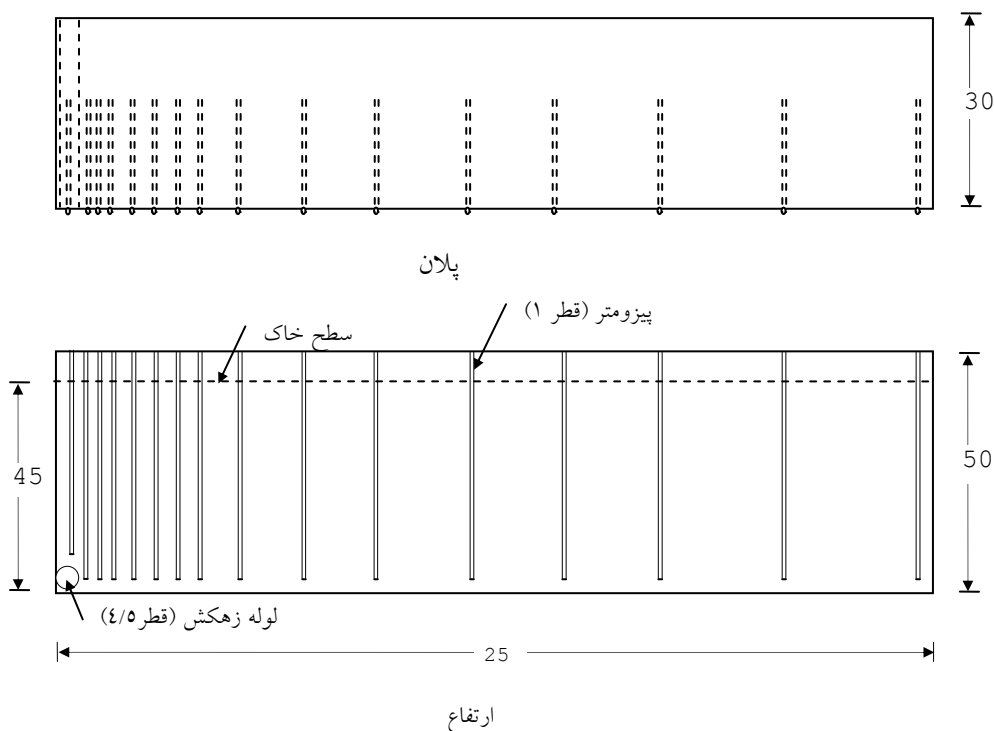
که نیمرخ‌های سطح ایستابی پیش‌بینی شده با روش تخلخل مؤثر محاسبه شده‌اند.



شکل شماره ۳- نیمرخ‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پس از ۶۰ دقیقه از آغاز زهکشی



شکل شماره ۴- نیمرخ‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پس از ۱۲۰ دقیقه از آغاز زهکشی



شکل شماره ۵- شماتیک مدل تانک ماسه (همه ابعاد به سانتی متر می باشد)

روش جدید بیشتر مورد توجه است، و تأثیر چشمگیر وابستگی تخلخل مؤثر به تغییرات سطح ایستابی، از عوامل اصلی اختلاف مذکور هستند. این شکل ها همچنین نشان می دهند که لحاظ کردن رابطه شماره ۱ با تعیین پارامترهای آن از طریق اندازه گیری های آزمایشگاهی کمکی به پیش بینی بهتر نیمرخ های سطح ایستابی نمی کند. علت این امر می تواند، علاوه بر پیچیده و مشکل بودن اندازه گیری های مربوط به تعیین تخلخل مؤثر، همان خطاهای ذکر شده باشد.

تحلیل حساسیت ارتفاع سطح ایستابی در حد فاصل دو زهکش نسبت به پارامترهای مختلف در

همچنین، این شکل ها نشان می دهند که برای تمام زمان ها، متغیر بودن تخلخل مؤثر باعث پیش بینی دقیق تر ارتفاع سطح ایستابی می شود و در نتیجه نیمرخ های سطح ایستابی پیش بینی شده به نیمرخ های واقعی بسیار نزدیکتر است. این موضوع را می توان به عدم تطابق شرایط واقعی جریان به طرف زهکش با شرایط آزمایشگاهی تعیین هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر، تعیین هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر و خطای اندازه گیری هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر، مربوط دانست که به مراتب بیش از خطای اندازه گیری ارتفاع سطح ایستابی است. ناهمگنی خاک محیط زهکشی، که در

حالت f متغیر و ثابت نشان می‌دهد که تغییرات پارامترهای a^* ، b ، f_o و K_s در محدوده ± 5 درصد باعث تغییراتی به میزان ± 4 درصد برای دو پارامتر اول و $\pm 5/3$ درصد برای دو پارامتر دوم می‌شود. اما برای f ثابت، تغییرات ± 5 درصد در مقادیر f و K_s باعث $\pm 5/4$ درصد تغییر در ارتفاع سطح ایستابی می‌گردد. بنابراین، حساسیت پیش‌بینی سطح ایستابی به هنگام بهینه‌سازی با استفاده از مدل گلور-دام نسبت به f_o و K_s بیش از a^* و b است و در نتیجه رابطه پندی از حساسیت زیادی برخوردار نیست.

به دلیل شرایط مرزی خاص مدل گلور-دام، که سطح ایستابی را در زمان بلافاصله پس از آغاز زهکشی هم‌سطح آب در زهکش لحاظ می‌کند، پیش‌بینی نیمرخ سطح ایستابی نزدیک محل زهکش همراه با خطا خواهد بود. از این نظر، توصیه می‌شود که محل پیزومترهای اندازه‌گیری نیمرخ سطح

ایستابی از محل زهکش فاصله داشته باشد. این امر باعث افزایش دقت می‌شود و در نتیجه فقط داده‌هایی در واسنجی مدل گلور-دام دخالت خواهند داشت که دقت مطلوب‌تری داشته باشند.

با توجه به مزایای روش پیشنهادی که شامل استفاده از شرایط واقعی جریان، لحاظ کردن تغییرات مکانی در امتداد عمق خاک و فاصله بین دو زهکش، سادگی، و همزمان بودن تعیین هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر است پیشنهاد می‌شود که این روش در مزرعه با داشتن یک زهکش و نصب تعدادی پیزومتر در امتداد عمود بر زهکش و در فواصل مختلف از آن آزمایش شود. سپس، با ثبت نیمرخ سطح ایستابی در زمان‌های مختلف، افت سطح ایستابی تعیین و در نهایت با استفاده از مدل پیشنهادی مقادیر بهینه هدایت هیدرولیکی و تخلخل مؤثر خاک تخمین زده شود.

مراجع

- 1- Amoozgar, A. and Wilson. G. V. 1999. Methods for measuring hydraulic conductivity and drainable porosity. In: *Agricultural Drainage, Agronomy Monograph No. 38, Chapt. 37*. Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p. 1149-1205.
- 2- Amoozgar, A. and Warrick, A. W. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods. In *klute, A. (Ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI. p. 735-770.*
- 3- Beven, K. J. 2002. *Rainfall-runoff modeling*. J. Wiley and Sons Ltd., 360 pp.

- 4- Boast, C. W. and Kirkham, D. 1971. Auger hole seepage theory, Soil science Society of America Journal. 35, 365-374.
- 5- Bouma, J., Dekker, L. W. and Verlinden, H. L. 1976. Drainage and vertical hydraulic conductivity of some Dutch "kink" clay soils. Agric. Water Manage. 1, 67-78.
- 6- Bouwer, H. 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. Water Resour. Res. 2,729-738.
- 7- Bouwer, H. 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. *In*: Klute, (Ed.) A. Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI. p. 825-844.
- 8- Bouwer, H. 1989. The bouwer and rice sluge test-an update. Groundwater 27,304-309.
- 9- Bouwer, H., and Jackson, R. D. 1974. Determining soil properties. *In*: van J. Schilfgaarde (Ed.) Drainage for Agriculture. Agron. Monogr. 17. ASA. Madison. WI. p. 611-672.
- 10- Bouwer, H., and Rice, R. C. 1983. A The pit bailing method for hydraulic conductivity measurement of isotropic or anisotropic soil. Transactions of the ASAE 26, 1435-1439.
- 11- Childs, E. C. 1952. The measurement of the hydraulic conductivity of saturated soil in situ. I. Principles of a proposed method. Proc. R. Soc. London (A) 215, 525-535.
- 12- Dirksen, C. 2000. Unsaturated hydraulic conductivity. *In*: Smith, K. A. and Mullins, C. E. (Eds.). Soil Analysis, Physical Methods. Second Ed. Revised and expanded. Marcel Dekker Inc. New York. USA., p. 183 – 237.
- 13- Dumm, L. D. 1954. Drain spacing formula. Agricultural Engineering. 35, 726-730.
- 14- Greig, M. D. 1980. Optimization: New York: Longmon publishing Company.
- 15- Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. New York, 771 pp.

- 16- Homae, M., and Khodaverdiloo H. 2004. Derivation of pedo transfer function of some calcareous soils. In: shaozhong et al. (Ed.), water saving agriculture and sustainable use of water and land resources. 506-513. (In: Farsi)
- 17- Hore, F. R. 1959. Pizometer method in Ontario. *Agricultural Engineering*. 40 (15), 272-278.
- 18- Jarvis, N. J., Zavattaro, L. Rajkai, K. Reynolds, W.D. Olesen, P.A. Mcgechan, M. Mecke, M. Mohanty, B. Leeds-Harison, P.B. and Jacques, D. 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*. 108, 1-17.
- 19- Luthin, J. N. 1966. *Drainage engineering*. New York: John wiley & Sons, Inc. P. 250.
- 20- Pazira, E., Akram, M., and Lotfi, A. 2003. Drainage theories and models. Working group on "Drainage", pp. 188. No. 70. (In: Farsi)
- 21- Pendy, R. S., Bhattachaya, A. K. Singh, O. P. and Gupta, S. K. 1992. Drawdown solution with variable drainage porosity. *Journal of Irrigation and Deainafe Engineering*. 118 (3), 382- 396.
- 22- Rose, K. J., and Merva, G. E. 1990. Investigation septic disposal sites using a velocity permeameter. *J. Environ. Sci. Health*. A25, 533-552.
- 23- Schaap, M. G., Leij, F. J. and van Genuchten, M. Th. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol*. 251, 163-176.
- 24- Skaggs, R. W., Wells, L. G. and Chate, S. R. 1978. Predict and measured drainable porosities for field soils. *Transactions of the ASAE*. 119 (1), 73-84.
- 25- Smiles, D. E. and Youngs, E. G. 1963. Amultiple-well method for determining the hydraulic conductivity of stratified soil in situ. *J. Hydrol*. 1, 279-287.
- 26- Snell, A. W., and van Schilfgaarde. J. 1964. Four-well method of measuring hydraulic conductivity in saturated soils. *Trans. ASAE*. 7, 83-87, 91.
- 27- Taylor, G. S. 1960. Drainable porosity evaluations from outflow measurements and its use in drawdown equation, *Soil Science*. 90 (60), 338-343.
- 28- Van Alphen, B. J., Booltink, H. W. G. and Bouma, J. 2001. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation

-
- of soil hydraulic properties. *Geoderma*. 103, 133-147.
- 29- Warrick, A.W. 2002. *Soil physics companion*. CRC Press, 389 pp.
- 30- Wosten, J. H. M., Pachepsky, Ya. A. and Rawls, W. J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251,123-150.
- 31- Wosten, J. H. M., Lilly, A. Nemes, A. and Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90, 169-185.

A Simple Method for Simultaneous Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity and Drainable Porosity

J. M. V. Samani, M. Homaei, M. Kouchakzadeh and P. Fathi

The saturated hydraulic conductivity K_s and the effective porosity f are needed for modeling and many applications in drainage. The current design procedure is based upon calculation of the lateral spacing, using some average values of K_s and f within the area to be drained. The objective of this study was to take into account the spatial and temporal variability of these parameters and to introduce a new method for simultaneous estimation of K_s and f . The proposed method was based upon measuring water table profiles at different times. The an steady model of Glover-Dumm (1954) for predicting water table profiles was used with a nonlinear optimization technique to find the optimum values for K_s and f . Different data sets from the conducted experiments and literatures were used for calibration, using nonlinear optimization technique. A physical drainage model of 2.2 m length, 0.3 m width and 0.5 m hight was established in the laboratory and carefully packed with a sandy loam soil. A perforated drainage pipe of 4.5 cm diameter was established at the bottom end of the model. Some 16 piezometers were inserted in the soil for spatial and temporal water table monitoring. The proposed approach was evaluated with both constant and variable f . The pridicted values with new coefficiante showed of the new approach showed good agreement with the measured ones. With variable effective porosity the mothed is even much more successful to predict water table profiles.

Keywords: Drainage, Effective Porosity, Optimization, Saturated Hydraulic Conductivity