سال پنجم، شماره ۱، ۱۳۹۷، صفحات ۳۷ تا ٤٤
نشریه آب و توسعه پایدار

2018, Vol.5, No.1, Pages 37 to 44
Journal of Water and Sustainable Development

روش حل معکوس پارامترها: کاربرد در تعیین تخلخل مؤثر و هدایت هیدرولیکی خاک در سیستم زهکشی دشت شادگان

وحید شهابی‌زاد[۱*]، علیرضا حسن اقلی[۲]، عباس ستوده نیا[۳]

۱و۳- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین. ۲- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: vahidsh2706@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۹

چکیده

روش حل معکوس روشی است که در آن پارامترهای موردنیاز با حل عددی معادلات مربوطه به‌صورت غیرمستقیم تعیین می‌شوند. روش‌های متفاوت و متنوعی به‌منظور تخمین تخلخل مؤثر (f) و هدایت هیدرولیکی خاک (K) در دسترس می‌باشد که روش حل معکوس یکی از کارآمدترین روش‌ها جهت تخمین این ضرایب می‌باشد. لذا تعیین این پارامترها برای شرایط واقعی در مزارع آزمایشی زهکشی، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده برخی شاخص‌ها و کاربرد روش حل معکوس بررسی شد. به همین جهت، حجم آب خروجی از زهکش‌های زیرزمینی و نوسانات سطح ایستابی در بازه ۲۴ ساعته در سیستم زهکشی اجراشده در دشت شادگان، برای ۳ دور آبیاری متوالی اندازه‌گیری شد. در زمان پایین افتادن سطح ایستابی، f به روش معکوس تیلور و K نیز با معلوم بودن f، به روش معکوس اسکگز تعیین شد. همچنین تغییرات f و K با عمق سطح ایستابی نسبت به سطح زمین (z) به دست آمد. بر این اساس و با میانگین‌گیری حسابی، مقادیر f و K به ترتیب ۰/۰۱۱۸ $m^3.m^{-3}$ و ۰/۳۰۵۵ $m.d^{-1}$، با میانگین‌گیری وزنی، f و K با وزن z به ترتیب ۰/۰۱۱۶ $m^3.m^{-3}$ و ۰/۲۳۹۲ $m.d^{-1}$ و با استفاده از مفهوم میانگین تابع f و K برحسب متغیر z، کمیت آن‌ها به ترتیب ۰/۰۱۱۷ $m^3.m^{-3}$ و ۰/۳۰۹۳ $m.d^{-1}$ به‌دست آمد. جهت ارزیابی مقادیر f و K به‌دست‌آمده، فاصله زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از آن‌ها و به روش گلور اصلاح‌شده تعیین شد. نتایج نشان داد وقتیکه سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین باشد، مقدار K به عوامل متعددی وابسته بوده و نمی‌توان K را تنها تابعی از z دانست. با افزایش z مقدار f به مقدار اندک و K به‌صورت محسوسی کاهش خواهد یافت. تکنیک حل معکوس ارائه‌شده، در این پژوهش یک روش ابداعی ساده و مناسب جهت تخمین f و K است که مهم‌ترین مزیت آن در برگرفتن مقیاس واقعی خاک و همچنین ناهمگنی و ناهمروندی خاک است.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی خاک، تخلخل مؤثر، سطح ایستابی، حل معکوس.

Inverse Solution Technique: Application in Determining the Effective Porosity and Hydraulic Conductivity of Soil in Drainage System of Shadegan Plain

V. Shahabizad[1*], A. Hassanoghli[2], A. Sotoodehnia[3]

1,3- Phd Student & Associate Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. 2- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

*(Corresponding author Email: vahidsh2706@gmail.com)

Received: 18-04-2017
Accepted: 09-01-2018

Abstract

The inverse solution method is a method in which the required parameters are indirectly determined numerically by solving the equations. Various methods are available to estimate the effective porosity (f) and the soil hydraulic conductivity (k). The inverse technique is one of the most efficient methods for estimating these coefficients.Therefore, determination of these parameters for actual conditions in drainage experimental fields was investigated using the measured values of some indicators and application of the inverse solution method. The volume of outlet water from drainage pipes and the variation in water table height were measured in 24-hour periods for 3 irrigation intervals in the Shadegan plain subsurface drainage system. With the drop in the water table, f was measured with the Taylor method and k was estimated with Skaggs method. The variations of f and k with water table depth (z) were determined. The arithmetic mean of f and k were calculated equal to 0.0118 m3/m3 and 0.3055 m/d, respectively. The weighted average of f and k with weight of z were 0.0116 m3/m3 and 0.2392 m/d, respectively. Also, using the concept of average function, f and k according to z were estimated equal to 0.0117 m3/m3 and 0.3093 m/d, respectively. To evaluate the values of F and k, the distance between specific drainage was calculated using the modified Glover equation. The results showed that when the water table is near the ground surface, the k value is dependent on several factors and k is not only a fuction of z. With increasing z, the values of f partially and k significantly decreased. The proposed inverse solution technique is a simple and convenient method for estimating f and k. The main advantage of this method is using the actual scale of the soil, as well as its heterogeneity and anisotropy.

Keywords: Soil hydraulic conductivity, Effective porosity, Water table, Inverse technique.

DOI: 10.22067/jwsd.v5i1.63700

مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت داشته و به‌عنوان اطلاعات‌پایه‌ای در طراحی سامانه‌های آبیاری و زهکشی، مسائل هیدرولوژی و ارزیابی کیفیت خاک مورداستفاده قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها به کمک روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی قابل اندازه‌گیری یا برآورد هستند. اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها دشوار، هزینه‌بر و زمان‌بر است. افزون بر این، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آن‌ها در شرایط مزرعه نیاز است (Asgarzadeh و همکاران، ۲۰۱۴). طی دهه‌های اخیر روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی‌ها ارائه‌شده که یکی از آن‌ها روش حل معکوس است. درروش حل معکوس، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی معادلات مربوطه جریان، به‌صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند. نتایج پژوهش‌ها، کارایی زیاد این روش را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در آزمایش‌های مختلف جریان‌های ورودی و خروجی از ستون خاک و در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای نشان می‌دهند (Simunek و همکاران، ۱۹۹۸؛ Vanclooster و همکاران، ۲۰۰۷؛ Russo و همکاران، ۱۹۹۱).

مدل‌سازی معکوس، فرآیندی است که در آن به‌طور متوالی پارامترهای هیدرولیکی خاک به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند که مدل با دقت مناسب و قابل قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم موردبررسی در دوره زمانی مشخص باشد. مدل HYDRUS یکی از مدل‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک است (Simunek و همکاران، ۲۰۱۲). این مدل قابلیت تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را به روش معکوس دارد و محققان بسیاری از آن استفاده نموده‌اند (مشایخی و همکاران، ۱۳۹۵). درزمینهٔ تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از معادله ریچاردز و تکنیک حل معکوس نیز تحقیقات زیادی انجام‌شده است(نخعی و همکاران، ۱۳۹۴). استفاده از مطالب گفته‌شده عمدتاً برای تعیین ضرایب هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس در مسائل فیزیک خاک دلالت دارد و در مسائل زهکشی کمتر از آن‌ها استفاده می‌شود. برآورد هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از تکنیک حل معکوس معادله Hooghoudt یکی از رایج‌ترین و متداول‌ترین مسئله حل معکوس در زهکشی می‌باشد (علیزاده، ۱۳۸۹). معادله Hooghoudt که در سال ۱۹۴۰ ارائه شده است به‌صورت زیر می‌باشد:

$$q= (8Kd_eh+4Kh^2)/L^2 \quad (1)$$

که در آن q دبی خروجی لحظه‌ای در واحد سطح (m/d)، K هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (m/d)، d_e عمق معادل (m)، h ارتفاع سطح ایستابی در حد واسط دو زهکش (m) و L فاصله زهکش‌ها از یکدیگر (m) می‌باشد. استفاده از این فرمول برای مناطق مرطوب در سرتاسر جهان متداول است. در مناطق مرطوب، معیار طراحی ضریب زهکشی یا مقدار عمق تخلیه آب در بازه زمانی مشخص می‌باشد ولی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقدار بارندگی کمترین ملاحظات را در طراحی زهکشی زیرزمینی دارد، زیرا منبع اصلی آب اضافه در خاک ناشی از آبیاری می‌باشد که باعث صعود سطح ایستابی میشود. در این مناطق بایستی از معادلات غیرماندگار استفاده شود (Gupta، ۲۰۰۰). معادلات تحلیلی غیرماندگار جهت طراحی زهکشی زیرزمینی از حل معادله بوزینسک منشأ می‌گیرد. در تمامی معادلات تحلیلی غیرماندگار، ضریب تخلخل قابل زهکشی (f) و هدایت هیدرولیکی خاک (K) نقش اساسی ایفا می‌کنند (Upadhyaya و Chauhan، ۲۰۰۰) و در مطالعات پروژه‌های زهکشی اهمیت بسیار بالایی دارند.

روش‌های مستقیم بسیار متنوعی در مزرعه برای به‌دست آوردن K وجود دارد (Amoozegar و Warrick، ۱۹۸۶؛ Snell و VanSchilfgaarde، ۱۹۶۴؛ Luthin، ۱۹۶۶؛ Boast و KriKham، ۱۹۷۱). در مطالعات پروژه‌های زهکشی بایستی با آزمایش‌های مزرعه‌ای در نقاط مختلف و مطابق استاندارد مقدار K را تخمین زد (Gupta، ۲۰۰۲). مقادیر این ضریب هیدرودینامیکی در خاک بسیار تغییرپذیر بوده (King و همکاران، ۲۰۱۵) و ممکن است در اندازه‌گیری K در فواصل چند متری در یک مزرعه اختلاف معنی‌داری مشاهده شود. حتی اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف سال نیز باعث اختلاف معنی‌دار در مقادیر K می‌شود (یاری و همکاران، ۱۳۸۹).

اندازه‌گیری مستقیم تخلخل مؤثر (f) در آزمایشگاه بسیار زمان‌بر و دشوار می‌باشد. نمودارها و روابط تجربی ساده‌ای جهت تخمین f ارائه‌شده است که در برخی منابع، f تنها تابعی از مقدار K (USBR-FAO، ۱۹۸۴؛ ILRI، ۱۹۷۲) و در برخی دیگر تابعی از K و درصد رس خاک معرفی‌شده است (Chossat و Saugnac، ۱۹۸۵). استفاده از توابع انتقالی جهت تخمین K و f در عمل نتایج رضایت بخشی نداشته و توصیه‌شده است در مطالعات زهکشی، ضرایب هیدرودینامیکی خاک (K و f) اندازه‌گیری شود (Stephens و همکاران، ۱۹۹۸)

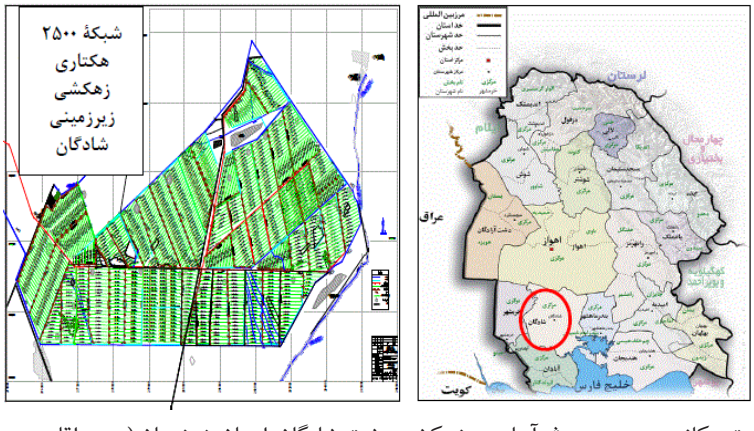
اکبری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مدل DRAINMOD و با تکنیک حل معکوس مقدار K را تخمین زدند. پژوهش آن‌ها در زهکشی زیرزمینی منطقه بهشهر انجام شده و نتایج حاصل از تحقیق رضایت‌بخش بوده است.

سامانی و همکاران (۱۳۸۴) با ساخت مدل آزمایشگاهی راه‌حلی جهت تخمین هم‌زمان f و K ارائه نمودند. آن‌ها تغییرات f نسبت به بار آبی در وسط دو زهکش را به روش تجربی پندی (Pendy

و همکاران، ۱۹۹۲) تعیین نموده و سپس f و K را با تکنیک بهینه‌سازی و در نظر گرفتن حل معکوس از معادله گلور-دام تعیین کردند. عزیزپور و همکاران (۱۳۹۱) نیز با ساخت یک مدل آزمایشگاهی و مشابه تحقیق سامانی و همکاران (۱۳۸۴) با استفاده از معادله گلور-دام به روش حل معکوس و استفاده از تکنیک الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه f و K را به دست آوردند. نکته مهم این است که استفاده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری دربرگیرنده کل مزرعه و شرایط حاکم بر آن نمی‌باشد. هدف از این تحقیق، ارزیابی یک روش حل معکوس جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی خاک، بدون استفاده از معادلات زهکشی غیرماندگار است. همچنین بررسی تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی خاک با نوسانات عمق سطح ایستابی در مقیاس واقعی در مزرعه و تعیین مناسب‌ترین نوع میانگین جهت تخمین مقادیر ثابت f و K به‌منظور استفاده از معادلات زهکشی زیرزمینی، از دیگر اهداف این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دشت شادگان جلگه‌ای است هموار که در حدفاصل ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز و ۷۰ کیلومتری شمال شرقی آبادان در استان خوزستان واقع‌شده است (شکل ۱). شیب اراضی در این محدوده بسیار کم و به‌طور متوسط حدود ۰/۰۰۰۵ (متر بر متر) و در جهت کلی شمال شرقی به جنوب غربی است. کشت غالب منطقه گندم و وسعت دشت در حدود ۲۵۰۰ هکتار می‌باشد. اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. از رودخانه جراحی برای تأمین آب آبیاری اراضی استفاده می‌شود. بافت خاک از عمق صفرتا ۹۰، ۹۰ تا ۱۲۰ و ۱۲۰ تا ۲۱۰ سانتیمتر به ترتیب رس سیلتی، لوم رس سیلتی و رس سیلتی می‌باشد. مشخصات خاک منطقه، آب آبیاری و آب زیرزمینی در جدول (۱) آورده شده است. به‌طور متوسط درصد توزیع بندی ذرات خاک برای ذرات رس، سیلت و شن به ترتیب ۲۹، ۵۰ و ۲۱ می‌باشد (حسن‌اقلی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۱- موقعیت مکانی محدوده پروژه آبیاری و زهکشی دشت شادگان، استان خوزستان (حسن‌اقلی و همکاران، ۱۳۹۴)

جدول ۱- برخی از خصوصیات شیمیایی خاک ،آب آبیاری و آب زیرزمینی در محدوده موردمطالعه (حسن‌اقلی و همکاران، ۱۳۹۴)

نمونه	EC (dS/m)	pH	آنیون‌ها (meq/l)			کاتیون‌ها (meq/l)		SAR
			Cl^-	HCO_3^{2-}	SO_4^{2-}	$Mg^{2+}+Ca^{2+}$	Na^+	
خاک	۳۲/۱۴	۷/۶۱	۲۹۴	۴/۰۶	۲۸/۲۹	۱۲۸	۱۹۷/۳۴	۲۶/۳۹
آب آبیاری	۵/۷۵	۷/۷۳	۳۶	۳/۴۶	۱۲/۹	۲۵	۳۶/۸	۱۰/۰۶
آب زیرزمینی	۶۶/۹	۶/۵	۷۷۵	۲/۵	۵۰	۱۶۵	۶۵۲	۷۲

فاصله بین زهکش‌های زیرزمینی دشت شادگان ۵۰ متر ، عمق کارگذاری زهکش‌ها۱/۷ متر و طول زهکش‌ها ۲۲۰ متر می‌باشد. عمق لایه غیرقابل نفوذ در منطقه و جهت محاسبه فاصله زهکش‌های زیرزمینی برابر با ۳/۵ متر نسبت به سطح زمین در نظر گرفته‌شده است. از پیزومترهای نصب‌شده با آرایش مناسب در حدفاصل میانی دو خط لوله زهکش جهت اندازه‌گیری نوسانات سطح ایستابی زهکش استفاده شد. در اولین زمان بعد از آبیاری (۲۴ ساعت پس از اتمام آبیاری) که امکان رفتن به مزرعه وجود داشت، اندازه‌گیری ارتفاع سطح ایستابی بین دو زهکش و دبی خروجی زهکش مبنا (به روش حجمی) آغاز شد. اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی مشخص ۲۴ ساعته و تا وقتی دبی خروجی از زهکش تقریباً ناچیز شود ادامه داشت. به‌طور متوسط در ابتدای اندازه‌گیری ارتفاع سطح ایستابی ۱/۵۵ متر بود (حسن اقلی و همکاران، ۱۳۹۴). در این تحقیق از داده‌های ۳ دور آبیاری استفاده شد.

همچنین مقدار ضریب تخلخل قابل زهکشی با استفاده از رابطه (۲) تعیین شد (Taylor، ۱۹۶۰).

$$f_n(h)=(V_n-V_{n-1})/a(h_n-h_{n-1}) \quad (۲)$$

که در آن، h متوسط ارتفاع سطح ایستابی میان دو زهکش (m)، $f_n(h)$ تخلخل قابل زهکشی در نقطه‌ای که ارتفاع سطح ایستابی h باشد، V حجم آب خروجی از زهکش (m^3)، a مساحت ناحیه‌ای که حجم آب آن زهکشی می‌شود (m^2)، زیر وند n بیانگر گام زمانی اندازه‌گیری می‌باشد.

برای تخمین K از روش Skaggs (۱۹۷۶) استفاده شد. این روش براساس حل تحلیلی معادله بوزینسک می‌باشد. در این روش نسبت K به f را می‌توان با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده h و زمان (t) به دست آورد. ازآنجاکه مقدار f مشخص است، K نیز تعیین می‌شود. به‌عبارت‌دیگر با اندازه‌گیری سطح ایستابی در میانه دو زهکش و حجم آب خروجی از لوله زهکش و در نظر گرفتن مساحت (۲۲۰متر × ۵۰ متر) به‌عنوان مساحت زهکشی می‌توان f را به دست آورد و سپس با داشتن مقادیر h و t اندازه‌گیری شده در مزرعه و مشخص بودن ضریب f می‌توان K را به روش Skaggs (۱۹۷۶)تعیین نمود. جزییات بیشتر در منابع مذکور آمده است.

در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده در سیستم زهکشی زیرزمینی و همچنین در نظر گرفتن حل عددی معادله بوزینسک مقادیر f و K تعیین شد ازاین‌رو روش استفاده‌شده حل معکوس بود. مزیت روش ارائه‌شده جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیکی خاک در این تحقیق، عدم نیاز به معادلات زهکشی و تنها استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده h و t جهت تخمین ضرایب هیدرودینامیکی خاک است. همچنین در این روش تغییرپذیری f و K نسبت به h و یا عمق سطح ایستابی (z) هم لحاظ شده است. لذا مقادیر f و K به دست آمده نسبت به (z) متغیر می‌باشد (مقادیر ثابت f و K در معادلات زهکشی غیرماندگار به‌کاربرده می‌شوند که با واقعیت متفاوت است). ازاین‌رو سه نوع میانگین، میانگین تابع f و K برحسب متغیر z، میانگین وزنی K و f با وزن z و میانگین حسابی f و K محاسبه شدند. در میانگین حسابی، ارزش عددی داده‌ها یکسان است. در میانگین وزنی ارزش عددی داده‌ها یکسان نبوده و بسته به عامل وزن (عمق سطح ایستابی) است. میانگین تابع برخلاف دو میانگین اشاره‌شده، توزیع پیوسته داده‌ها در نظر گرفته و میانگین تابع f و K برحسب z را در بازه تغییرات عمق سطح ایستابی مشخص کرد. به‌منظور ارزیابی مقادیر به‌دست‌آمده f و K و همچنین میانگین‌های آن‌ها از معادله گلور اصلاح‌شده استفاده شد و با داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده h و t در مزرعه و همچنین مقادیر محاسبه‌شده f و K، فاصله بین دو خط زهکش تعیین شد. هر چه فاصله به‌دست آمده به فاصله موجود (۵۰ متر) نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت روش ارائه‌شده می‌باشد و از انحراف فاصله به‌دست آمده نسبت به فاصله موجود ۵۰ متر می‌توان خطای انحراف روش شرح داده‌شده را تعیین نمود. معادله گلور اصلاح‌شده در بین معادلات زهکشی غیرماندگار از دقت بالایی برخوردار می‌باشد (Kumar و همکاران، ۲۰۱۲). معادله گلور-دام اصلاح‌شده به‌صورت زیر است (Van Schilfgaarde، ۱۹۶۳):

$$L=[(9Kd_et)/fln((h_0(2d_e+h_t))/(h_t(2d_e+h_0))))]^{0.5} \quad (۳)$$

که در آن، L فاصله بین دو خط زهکش (m)، t زمان (day) و d_e عمق معادل (m) می‌باشد و از رابطه Moody (۱۹۶۶) جهت تعیین آن استفاده شد (رابطه ۴). مابقی پارامترها قبلاً تعریف‌شده‌اند.

$$\begin{aligned} d_e&=D/((8D/\pi L)\ln(D/\pi r)+1) \quad \text{for} \quad 0<D/L<1/4 \\ d_e&=\pi L/(8\ln(L/\pi r)) \quad \text{for} \quad D/L>1/4 \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن، r قطر لوله زهکش (m) و D عمق لایه غیرقابل نفوذ (m) می‌باشد.

نتایج و بحث

از تقسیم میزان دبی خروجی زهکش اندازه‌گیری شده بر مساحت منطقه زهکشی شده (۲۲۰ متر ×۵۰ متر) دبی در واحد سطح محاسبه شد. خط رگرسیون مناسب برای تغییرات سطح ایستابی و دبی در واحد سطح، نسبت به زمان برازش یافت. داده‌های مورداستفاده در ترسیم و برازش خط رگرسیون، از اندازه‌گیری h و t در ۳ دور آبیاری پیاپی به‌دست‌آمده بودند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت روابط (۵) و (۶) مقدار متوسط h و q را نسبت به زمان بیان می‌کنند(فرامرزی و همکاران، ۱۳۸۴). در این تحقیق از روابط رگرسیونی برازش یافته h و q نسبت به زمان جهت محاسبه f و K استفاده شد. روند تغییرات مشاهده‌شده h و q نسبت به زمان، با نتایج دیگر محققین همخوانی داشت (Kumar و همکاران، ۲۰۱۲).

$$h_t=1.33t^{-0.48} \quad , \quad R^2=0.87 \quad (۵)$$

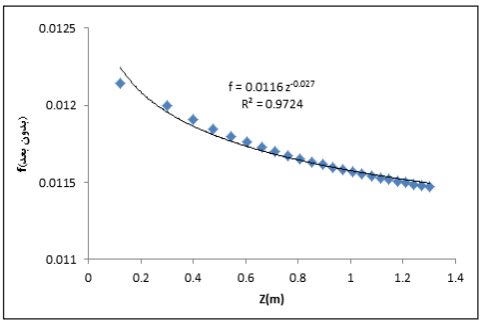
$$q_t=0.004t^{0.51} \quad , \quad R^2=0.87 \quad (۶)$$

در شکل (۲) رابطه بین f و عمق سطح ایستابی نسبت به تراز زمین (z) ارائه‌شده است. در هر گام زمانی ۲۴ ساعته، مقدار دبی خروجی و سطح ایستابی مشخص است. از معادله (۲) مقدار f برای ارتفاع سطح ایستابی h_t به دست می‌آید. از آنجاکه مجموع مقدار h_t و z_t برابر ۱/۷ متر است می‌توان مقدار f را نسبت به z محاسبه کرد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، رابطه بین f و z از توزیع توانی به‌صورت $f=0.0116z^{-0.027}$ پیروی می‌کند. در خاک سنگین دشت شادگان با پایین افتادن عمق سطح ایستابی از ۰/۱۵ متر تا ۱/۳ متر، مقدار f، ۰/۰۰۰۷ کاهش یافت. در تحقیق مشابه

برای خاک سبک بافت نشان دادند که با فروکش نمودن z به‌اندازه ۰/۵ متر، مقدار f ۰/۰۴ افزایش یافت (Pali و همکاران، ۲۰۱۴). محدوده دامنه تغییرات و روند تغییرات f با z در خاک سنگین، در قیاس با خاک سبک بسیار متفاوت است (FAO، ۱۹۸۰). جهت تعیین مقدار متوسط تابع f(z) در بازه عمق سطح ایستابی مورد مطالعه، یعنی از ۰/۱۵ تا ۱/۳ متر، از تابع f(z) انتگرال گرفته شد و مطابق رابطه (۷)، مقدار متوسط تخلخل قابل زهکشی ($\bar{f}$) به‌صورت زیر تعیین شد:

$$\bar{f} = \frac{\int_{0.15}^{1.3} 0.0116z^{-0.027}\,dz}{1.3 - 0.15} = 0.0117 \qquad (۷)$$

میانگین وزنی مقادیر به‌دست‌آمده f با وزن z، ۰/۰۱۱۶ و میانگین حسابی مقادیر f ۰/۱۱۸ می‌باشد. برای خاک سنگین مقدار f بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ پیشنهاد شده است (FAO، ۱۹۸۰). مقادیر متوسط به‌دست‌آمده در همخوانی با مقادیر پیشنهادشده برای f می‌باشد. مزیت استفاده از روش Taylor (۱۹۶۰) برای تخمین f درواقع، لحاظ نمودن حجم بزرگی از خاک در محاسبات است که اثرات ناهمگنی و ناهمروندی خاک را نیز به‌حساب آورده است.

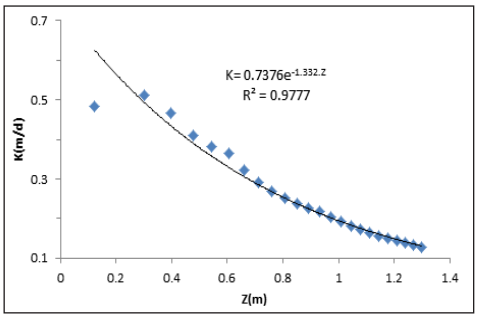


شکل ۲- متوسط تغییرات تخلخل مؤثر نسبت به عمق سطح ایستابی

با داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده h و t در گام زمانی ۲۴ ساعته، نسبت K/f به روش Skaggs (۱۹۷۶) تعیین شد. در مرحله قبل f و تغییرات آن با z تعیین‌شده بود بنابراین می‌توان تغییرات K به z را نیز تعیین کرد. در شکل (۳) رابطه بین K و z نشان داده‌شده است. بهترین خط رگرسیون برازش یافته برای نشان دادن تغییرات K نسبت به z به‌صورت $K=0.7376e^{-1.332z}$ می‌باشد. مقدار متوسط تابع K برحسب متغیر z در محدوده دامنه تغییرات z به‌صورت زیر تعیین شد:

$$\bar{k}=\frac{\int_{0.15}^{1.3} 0.737e^{-1.33x}\,dx}{1.3-0.15}=0.3093\ m/d \qquad (۸)$$

که در آن $\bar{k}$ متوسط هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشد. همچنین مقدار میانگین وزنی k با وزن z و میانگین حسابی K به ترتیب ۰/۲۳۹۲ و ۰/۳۰۵۵ متر بر روز می‌باشد. با افزایش z، مقدار K کاهش یافت. مطابق شکل (۳) با افزایش z از عمق ۰/۱۵ تا ۱/۳ متر، مقدار K از ۰/۵ به ۰/۱۳ متر بر روز تقلیل یافت. کاهش K ناشی از تراکم لایه‌های فوقانی خاک و همچنین سنگین‌تر شدن بافت خاک می‌باشد. روند تغییرات K نسبت به z در دشت شادگان مشابه نتایج کار سایر محققین بود (Pali و همکاران، ۲۰۱۴). طولانی شدن مدت‌زمان زهکشی خاک برای زمانی که سطح ایستابی پایین افتاده است در قیاس با موقعی که سطح ایستابی بالا است، ناشی از کاهش مقدار K می‌باشد. مقدار K در مطالعات زهکشی برای خاک با بافت سنگین بین ۰/۰۱ تا ۰/۵ متر بر روز توصیه‌شده است (FAO، ۱۹۸۰). محدوده تغییرات و میانگین‌های به‌دست‌آمده K در این تحقیق در همخوانی با محدوده توصیه‌شده فائو می‌باشد. مزیت عمده و نقطه قوت روش شرح داده جهت تخمین f و K، شده استفاده از حجم بزرگی از خاک و در مقیاس مزرعه‌ای، در نظر گرفتن ناهمروندی خاک و عدم استفاده مستقیم از معادلات زهکشی برای حالت غیرماندگار است.



شکل ۳ - متوسط تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به عمق سطح ایستابی

در این تحقیق به روش حل معکوس معادله هوخهات مقدار K، ۰/۶۲۵ $m.d^{-1}$ به دست آمد. مقدار f پیشنهادی متناظر با K به‌دست‌آمده از روش حل معکوس هوخهات به روش USBR-FAO، Vanbeers و Chossat & Saugnac به ترتیب برابر با ۰/۰۸۵، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۲۴ بود (USBR-FAO، ۱۹۸۴؛ ILRI، ۱۹۷۲؛ Chossat و Saugnac، ۱۹۸۵).بایستی توجه داشت روش هوخهات برای حالت ماندگار می‌باشد و دربرگیرنده کل جریان ورودی به داخل لوله زهکش نبوده و تنها معرف جریان اشباع خاک است(فرامرزی و همکاران ۱۳۸۴). اندازه‌گیری مستقیم K به روش چاهک در مزرعه و در محدوده مورد آزمایش مقادیر ۰/۴۳ تا ۰/۵۸ $m.d^{-1}$ را به دست داده است (مهندسین مشاور سامان آبراه، ۱۳۸۷). درروش چاهک، K به‌صورت نقطه‌ای تعیین می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده برای K معرف کل شرایط مزرعه‌ای نخواهد بود. در ادامه و به‌منظور ارزیابی مقادیر به‌دست‌آمده K و f، فاصله زهکش‌ها با فرمول گلور دام اصلاح‌شده محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- تعیین فاصله زهکش‌ها بر اساس مقادیر f و K محاسبه‌شده با فرمول گلور-دام اصلاح‌شده

t (day)	z (m)	f (m^3/m^3)	K ($m.day^{-1}$)	●L (m)	♥L (m)	♣L (m)	♦L (m)
۰	۰/۱۵	۰/۰۱۱۹۲	۰/۴۵۳۵	-	-	-	-
۱	۰/۳۶	۰/۰۱۱۶۹	۰/۲۷۳۹	۶۴/۷(۲۹/۳)[1]	۵۷/۱ (۱۴/۲)	۶۴/۰ (۲۸/۰)	۷۷/۶ (۵۵/۱)
۲	۰/۷۴	۰/۰۱۱۶۳	۰/۲۱۸۵	۴۹/۸ (-۰/۵)	۴۳/۹ (-۱۲/۱)	۴۹/۲ (-۱/۵)	۴۶/۸ (-۶/۳)
۳	۰/۹۱	۰/۰۱۱۶۰	۰/۱۹۰۸	۵۰/۹ (۱/۷۴)	۴۴/۹ (-۱۰/۱)	۵۰/۳ (۰/۷)	۴۲/۹ (-۱۴/۲)
۴	۱/۰۱	۰/۰۱۱۵۷	۰/۱۷۳۹	۵۳/۲ (۶/۳)	۴۶/۹ (-۶/۱)	۵۲/۶ (۵/۲)	۴۱/۹ (-۱۶/۱)
۵	۱/۰۸	۰/۰۱۱۵۶	۰/۱۶۲۳	۵۵/۶ (۱۱/۲)	۴۹/۱ (-۱/۸)	۵۵/۰ (۱۰/۰)	۴۱/۹ (-۱۶/۲)
۶	۱/۱۴	۰/۰۱۱۵۵	۰/۱۵۳۸	۵۷/۹ (۱۵/۹)	۵۱/۲ (۲/۴)	۵۷/۳ (۱۴/۷)	۴۲/۲ (-۱۵/۵)
۷	۱/۱۸	۰/۰۱۱۵۴	۰/۱۴۷۳	۶۰/۲ (۲۰/۴)	۵۳/۲ (۶/۴)	۵۹/۶ (۱۹/۲)	۴۲/۷ (-۱۴/۵)
۸	۱/۲۱	۰/۰۱۱۵۳	۰/۱۴۲۱	۶۲/۴ (۲۴/۸)	۵۵/۱ (۱۰/۲)	۶۱/۷ (۲۳/۵)	۴۳/۳ (-۱۳/۳)
۹	۱/۲۴	۰/۰۱۱۵۳	۰/۱۳۷۸	۶۴/۴ (۲۸/۹)	۵۶/۹ (۱۳/۸)	۶۳/۸ (۲۷/۵)	۴۴/۰ (-۱۲/۰)
۱۰	۱/۲۶	۰/۰۱۱۵۲	۰/۱۳۴۲	۶۶,۴ (۳۲/۸)	۵۸/۶ (۱۷/۳)	۶۵/۷ (۳۱/۴)	۴۴/۷ (-۱۰/۷)
۱۱	۱/۲۸	۰/۰۱۱۵۲	۰/۱۳۱۲	۶۸/۳ (۳۶/۶)	۶۰/۳ (۲۰/۶)	۶۷/۶ (۳۵/۲)	۴۵/۳ (-۹/۳)
۱۲	۱/۳۰	۰/۰۱۱۵۲	۰/۱۲۸۵	۷۰/۱ (۴۰/۲)	۶۱/۹ (۲۳/۸)	۶۹/۴ (۳۸/۷)	۴۶/۰ (-۸/۰)

●: فاصله زهکش براساس مفهوم میانگین تابع f و K برحسب متغیر z (K=۰/۳۰۹۳, f =۰/۰۱۱۷)

♥: فاصله زهکش براساس میانگین وزنی f و K برحسب وزن z (K=۰/۲۳۹۲, f =۰/۰۱۱۶)

♣: فاصله زهکش براساس میانگین ریاضی f و K (K=۰/۳۰۵۵, f =۰/۰۱۱۸)

♦: فاصله زهکش براساس f و K متغیر

۱: اعداد نوشته‌شده داخل پرانتز بیانگر درصد انحراف فاصله زهکش می‌باشد.

در روز اول، مقدار L برای تمامی حالات مطابق جدول (۲) حدود ۱۴ تا ۷۵ درصد بیش از مقدار واقعی تخمین زده شد. درزمانی که سطح ایستابی بالا و در نزدیکی سطح زمین باشد، عوامل زیادی روی K خاک تأثیر می‌گذارد. ازجمله این عوامل می‌توان به ریشه گیاهان و درختان، مدیریت اراضی کشاورزی، مواد افزودنی و کودهای آلی اضافه‌شده به خاک و ...اشاره کرد (Gupta، ۲۰۰۲). همچنین در روش اسگکز جهت تخمین K، از قسمت تبخیر آب از سطح خاک در معادله بوزینسک صرف‌نظر شده است. زمانی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین باشد مقدار تبخیر قابل‌توجه خواهد بود (Upadhyaya و Chauhan، ۲۰۰۰).

برای روز دوم و سوم، میانگین حسابی (مقادیر f و K)و میانگین تابع f و K برحسب z کمترین انحراف فاصله زهکش‌ها را در پی داشت. در روز چهارم، هر سه نوع میانگین مطرح‌شده تقریباً نتیجه یکسانی داشتند. از روز ۵ ام به بعد، میانگین وزنی f و K برحسب z در قیاس با دو میانگین دیگر دارای انحراف کمتری بود. از روز ۹ام به بعد درروش f و K متغیر، مقدار انحراف در برآورد L در قیاس با سه نوع میانگین f و K کمتر بود. در روزهای انتهایی به نحو قابل‌ملاحظه‌ای مقدار K کاهش یافت. در روش‌های میانگین‌گیری شرح داده‌شده، سهم کاهش K برای روزهای انتهایی مشخص نیست. به عبارت ساده‌تر باگذشت زمان و فروکش کردن سطح ایستابی، مقدار K کاهش می‌یابد و لذا با میانگین‌گیری از K نمی‌توان آن را در معادله گلور اصلاح‌شده لحاظ نمود زیرا باعث خطا و برآورد دست بالای L می‌شود. خطای حاصل از انحراف در تعیین L همچنین می‌تواند ناشی عدم در نظر گرفتن جز تبخیر از خاک در هنگام فرآیند زهکشی، عدم در نظر گرفتن افت ورود آب به داخل لوله زهکش و یا مربوط به فرضیات استفاده‌شده در معادله گلور اصلاح‌شده باشد.

به‌طورکلی توصیه شده است در طراحی زهکشی در حالت غیرماندگار، سطح ایستابی از سطح زمین طی مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت به مقدار حداقل ۳۰ سانتیمتر فروکش نماید و مدت‌زمان دقیق فروکش کردن سطح ایستابی به نوع گیاه کشت‌شده و آستانه تحمل غرقابی گیاه دارد (Bhattacharya و Michael، ۲۰۰۳). به‌عبارت‌دیگر زمانی که سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین است، عملکرد زهکشی زیرزمینی حالت غیرماندگار از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار بوده و زمانی که سطح ایستابی از عمق توسعه ریشه گیاه پایین‌تر می‌رود، از اهمیت زهکش آن کاسته می‌شود. جهت بررسی دقیق تغییرات سطح ایستابی یا تعیین فاصله زهکش‌ها در هنگامی‌که سطح ایستابی فروکش یافته است، توصیه می‌شود از روش f و K متغیر استفاده شود.

نتیجه‌گیری

روش حل معکوس، روشی کاربردی و دقیق جهت تخمین ضرایب هیدرودینامیکی خاک است. در این تحقیق با روش حل معکوس و ترکیب دو روش تیلور و اسکگز، مقادیر f و K برای سامانه زهکشی دشت شادگان در استان خوزستان تعیین شد. درروش ارائه‌شده نیاز به هیچ‌گونه آزمایش مستقل و جداگانه‌ای برای تعیین f و K نیاز نبوده و تنها با اندازه‌گیری ارتفاع سطح ایستابی و دبی خروجی از زهکش مبنا در بازه‌های زمانی روزانه مقادیر f و K تعیین شد. در تعیین ضرایب f و K از هیچ‌کدام از معادلات زهکشی حالت غیرماندگار استفاده نشد بنابراین از مقادیر به‌دست‌آمده برای f و K می‌توان برای ارزیابی انواع معادلات زهکشی حالت غیرماندگار استفاده کرد. مزیت قابل‌توجه روش ارائه‌شده در برگرفتن اثر تغییرات ناهمگنی و ناهمروندی خاک به‌واسطه در نظر گرفتن مقیاس واقعی خاک است.

باگذشت زمان و فروکش کردن سطح ایستابی و یا افزایش عمق سطح ایستابی (z) ضرایب f و K کاهش یافتند. استفاده از روش حل معکوس معادله هوخهات برای تعیین K و سپس استفاده از روابط پیشنهادی بین f و K جهت تخمین f با خطای قابل‌ملاحظه‌ای همراه بود. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که هرکدام از میانگین‌ها در بازه زمانی خاصی بهترین عملکرد رادارند. میانگین حسابی و میانگین تابع f و K برای روز دوم و سوم و میانگین وزنی از روز ۵ام تا ۸ام مناسب‌ترین عملکرد را داشتند. از روز ۹ام به بعد در نظر گرفتن f و K متغیر بهترین عملکرد را ارائه داد.

منابع

اکبری، م.، نظری، ب.، پارسی‌نژاد، م. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۱. تخمین معکوس هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل DRAINMOD. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۶۲: ۸۵-۹۲.

حسن‌اقلی، ع.ر.، اسماعیلی امینلویی، ع. و سخایی‌راد، ح. ۱۳۹۴. بررسی کمیت و کیفیت زهاب زهکش‌های زیرزمینی بدون پوشش در مقایسه با پوشش معدنی در دشت شادگان. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹: ۲۶۴-۲۷۵.

عزیزپور، س.، فتحی، پ. و نوبخت‌وکیلی، ک. ۱۳۹۱. برآورد توأم هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و تخلخل مؤثر با استفاده از رویکرد مسئله معکوس هوشمند. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، نشریه علوم آب‌وخاک، ۶۰: ۱۳-۲۲.

علیزاده، ا. ۱۳۸۹. زهکشی جدید برنامه‌ریزی طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی. دانشگاه امام رضا. مشهد.

فرامرزی، م.، مصطفی‌زاده، ب.، موسوی، س. ف. و ترابی، م. ۱۳۸۴. کاربرد هوخهات در زهکش‌های زیرزمینی در منطقه رودشت اصفهان. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۶(۱): ۱۳-۱۹.

مشایخی، پ.، قربانی دشتکی، ش.، مصدقی، م. ر.، شیرانی، ح.، پناهی، م. و نوری، م.ر. ۱۳۹۵. برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از داده‌های نفوذ استوانه‌های دوگانه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷: ۸۲۹-۸۳۸.

مهندسین مشاور سامان آبراه. ۱۳۸۷. گزارش خلاصه طرح ۲۵۰۰ هکتاری زهکشی زیرزمینی شهرستان شادگان. شرکت مشاور سامان آبراه.

نخعی، م.، امیری، و. و ودیعتی، م. ۱۳۹۴. تخمین معکوس پارامترها و توابع هیدرولیکی خاک غیراشباع با استفاده از داده‌های آزمون دیسک نفوذسنج. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴: ۳۹-۵۰.

ولی سامانی، ج. م.، همایی، م. کوچک‌زاده، م. و فتحی، پ. ۱۳۸۴. روشی ساده برای تخمین توأمان هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل مؤثر خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۲۳: ۱۴۳-۱۵۸.

یاری، ع.، درزی، ع.، شقاقی، م. و یاری، ر. ۱۳۸۹. مطالعه تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با زمان. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۱): ۲۱-۲۸.

Amoozegar A. and Warrick A. W. 1986. Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods. In klute, A. (Ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2 nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI., 735-770.

Asgarzadeh H., Mosaddeghi M. R., Dexter A. R., Mahboubi A. A. and Neyshabouri M. R. 2014. Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. Geoderma, 8: 226-227.

Bhattacharya A. K. and Michael A. M. 2003. Land drainage: principles, methods and applications. Konark PublishersPvt. Ltd., New Delhi.

Boast C. W. and Kirkham D. 1971. Auger hole seepage theory, Soil science Society of America Journal, 35: 365-374.

Chossat J. C. and Saugnac A. M. 1985. Relation entre conductivite hydraulique et porosite de drainage mesurees par la methode du puits et des piezometres. Sci. du Sol, 1985/3.

FAO. 1980. Drainage design factors. FAO Irrigation and Drainage. Rome, Italy.

ology. Water Resour. Res, 27: 1361–1373.

Simunek J., Wendroth O. and Van Genuchten M.Th. 1998. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J, 62:894-905.

Simunek J., Sejna M. and Van Genuchten M.Th. 2012. HYDRUS: model use, calibration and validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 55(4): 1261-1274.

Skaggs R.W. 1976. Determination of the hydraulic conductivity-drainable porosity ratio from water table measurements. Trans ASAE, 19: 73–80.

Snell A.W. and Van Schilfgaarde J. 1964. Four-well method of measuring hydraulic conductivity in saturated soils. Trans. ASAE, 91(7): 83-87.

Stephens D.B., Hsu K.C., Priksat M.A., Ankeny M.D., Blandford N., Roth T.L., Kelsey J.A. and Whitworth J.R. 1998. A comparison of estimated and calculated effective porosity. Hydrogeology Journal, 6: 156-165.

Taylor G.S. 1960. Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. Soil. Sci, 90: 38-345.

Upadhyaya A. and Chauhan H.S. 2000. An analytical solution for bi-level drainage design in the presence of evapotranspiration. Journal of Agricultural Water Management, 45: 169-184.

USBR. 1984. Drainage manual. A Water Resources Tech. Publication. Second printing. Denver, USA, US Dept. of Interior, Bureau of Reclamation, 286.

Vanclooster M., Javaux M. and Lambot S. 2007. Recent advances in characterizing flow and transport in unsaturated soil at the core and field. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, 3: 19-35.

Van Schilfgaarde J. 1963. Design of tile drainage for falling water tables. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89(2): 1-12.

Gupta SK. 2002. A century of subsurface drainage research in India. Journal of Irrigation and drainage systems, 16(1): 69-84.

Hooghoudt SB. 1940. Bijdragen tot de kennis Vaneenige natuurkundige Van den grand, 7. Algemeene beschonwing Van het problem Van de detail outwatering ende infiltratie door middle Van parallel loopende drains, grepples, Slotten en Kanalen. Versl Landbouwkd Onderz, 46: 515–707.

ILRI. 1972. Fieldbook for land and water management experts. Wageningen, Netherlands.

King K.W., Williams M.R., Macrae M.L., Fausey N.R., Frankenberger J., Smith D.R, Kleinman P. and Brown L. 2015. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review. Journal of environmental quality, 44(2): 467-485.

Kumar R., Bhakar S., Jhajharia D. and Morvejalahkami B. 2012. Evaluation of drain spacing equations in the Indira Gandhi Canal command area, India. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 18(3): 186-193.

Luthin J. N. 1966. Drainage engineering. John wiley & Sons. New York .

Moody W. 1966. Nonlinear differential equation of drain spacing. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 92(2): 1–10.

Pali A.K., Katre P. and Khalkho D. 2014. An unsteady subsurface drainage equation incorporating variability of soil drainage properties. Water Resources Management, 28(9): 2639-2653.

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.

Russo D., Bresler E., Shani U. and Parker J.C. 1991. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem method-