

Uncertainty Analysis of Infiltration Parameters of WinSRFR Furrow Irrigation Simulation Model with Monte Carlo Method

FATEMEH SOROUSH^{1*}, HOSSIEN RIAHI MADVAR²

1. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Vali-Asr University of Rafsanjan, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Vali-Asr University of Rafsanjan, Iran.

(Received: July. 31, 2018- Revised: Sep. 16, 2018- Accepted: Sep. 23, 2018)

ABSTRACT

The infiltration parameters, used in the surface irrigation simulation models, are not measured directly and their estimations are difficult and uncertain. Therefore, after calibration of model parameters, the uncertainty due to error in the model and the strategies should be considered to reduce and control the uncertainty of the results. For this reason, Monte Carlo simulation approach has been used in this study. Nowadays, the Monte Carlo simulation approach is used as a simultaneous and integrated approach to identify different types of uncertainty with various objective functions. Therefore, this research was conducted to analyze the uncertainty of the simulation results of the runoff hydrograph and the advance trajectory modeled by the WinSRFR software by developing the posterior analysis of the infiltration equation parameters and simulation of 1000 Monte Carlo samples. The results of the analysis indicated a high degree of uncertainty (bandwidth over 4) in initial selection of furrow irrigation infiltration parameters, Nash-Sutcliffe criteria was considered to district behavioral and non-behavioral simulations and the acceptable threshold value for NSE criteria defined as $NSE > 0.9$. By applying $NSE > 0.9$, the behavioral simulations were detected and used for uncertainty analysis of the model. The uncertainty analysis of the model was performed based on 5% and 95% confidence levels of behavioral simulations errors. In this case, the uncertainty band width (d-factor) of two response variables was less than one indicating a good calibration result. The results of uncertainty analysis showed that the uncertainty of model parameters was considerably decreased with application of Monte Carlo method. Therefore, the use of this method in the modeling and management of surface irrigation systems is recommended.

Keywords: Parameter Estimation, Outflow runoff hydrograph, Advance trajectory, Uncertainty.

تحلیل عدم قطعیت پارامترهای نفوذ مدل شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای WinSRFR با روش مونت کارلو

فاطمه سروش^{۱*}، حسین ریاحی مدوار^۲

۱. استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

۲. استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۶/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۱)

چکیده

پارامترهای نفوذ مورد استفاده در مدل‌های شبیه‌ساز آبیاری سطحی به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند و تعیین آن‌ها مشکل بوده و با عدم قطعیت همراه است. بنابراین باید پس از واسنجی پارامترهای مدل، عدم قطعیت ناشی از وجود خطا در مدل را بررسی نموده و راهکارهایی برای کاهش و کنترل عدم قطعیت نتایج ارائه گردد. به همین دلیل در این مطالعه از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. امروزه فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو به‌عنوان روشی برای تعیین یکپارچه و هم‌زمان انواع مختلف عدم قطعیت با توابع هدف گوناگون استفاده می‌شود. به این منظور این تحقیق با هدف تحلیل عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب خروجی و منحنی پیشروی مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار WinSRFR در آبیاری جویچه‌ای، با توسعه رویکرد تحلیل پسین ضرایب نفوذ و شبیه‌سازی ۱۰۰۰ نمونه مونت کارلو انجام شد. نتایج نشان‌دهنده عدم قطعیت بالا (پهنای باند اطمینان بزرگتر از ۴) در گزینش اولیه پارامترهای نفوذ آبیاری جویچه‌ای است. برای جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و غیرکارآمد شاخص نش-ساتکلیف مورد استفاده قرار گرفت و آستانه قابل-پذیرش شاخص $NSE > 0.9$ تعیین شد. با اعمال معیار $NSE > 0.9$ شبیه‌سازی‌های کارآمد شناسایی شدند و برای تحلیل عدم قطعیت هدفمند در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل عدم قطعیت مدل بر مبنای کران‌های عدم قطعیت ۵٪ و ۹۵٪ خطای شبیه‌سازی‌های کارآمد انجام شد. در این حالت پهنای باند عدم قطعیت (d-factor) دو متغیر پاسخ کمتر از یک بود که نشان‌دهنده لزوم توجه دقیق در فرآیند واسنجی مدل برای کاهش عدم قطعیت خروجی‌ها است. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان داد که با کاربرد روش مونت کارلو، عدم قطعیت پارامترهای مدل به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت و استفاده از این روش در مدل‌سازی و مدیریت سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تخمین پارامتر، هیدروگراف رواناب خروجی، منحنی پیشروی، عدم قطعیت.

مقدمه

آبیاری جویچه‌ای یکی از قدیمی‌ترین روش‌های آبیاری در جهان بوده و به دلیل هزینه اولیه کم، عدم نیاز به دانش فنی جدید و سهولت اجرا کاربردهای وسیعی در کشاورزی دارد. از طرف دیگر سیستم‌های آبیاری سطحی اغلب مشکلاتی نظیر عملکرد ضعیف، راندمان پائین، کاربرد غیریکنواخت آب و وجود تلفات رواناب و نفوذ عمقی زیاد دارند و نیازمند استفاده از مدل‌های ریاضی و عددی برای شبیه‌سازی مولفه‌های آبیاری سطحی به منظور دستیابی به شرایط بهینه طراحی و بهره‌برداری می‌باشند. مدل‌های شبیه‌سازی ابزار مفیدی برای بهبود طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای می‌باشند. نرم‌افزارهای متعددی از قبیل SIRMOD (Walker and Kasilingam, 2004) و WinSRFR (Bautista et al., 2009b) برای پیش‌بینی و مدل‌سازی عملکرد هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری و بهینه‌سازی

متغیرهای مؤثر در بهره‌برداری آبیاری سطحی توسعه داده شده است. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی و معادلات نفوذ (Taghizadeh et al., 2013; Rezaverdinejad et al., 2016)، طراحی ابعاد سیستم (طول و عرض مزرعه) و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی (دبی و زمان قطع) آبیاری سطحی (Heydari and Abbasi, 2016; Ghahremannejad et al., 2016) و شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، واسنجی و آنالیز حساسیت (Akbari et al., Sayari et al., 2016; Valipour and Montazer, 2012; Walker, 2005; al., 2018; Salahou et al., 2018) مدل‌های آبیاری سطحی انجام شده است. به هر حال صحت مدل‌سازی و سودمندی این مدل‌ها به دقت داده‌های مزرعه‌ای و قابلیت توصیف وضعیت مزرعه توسط داده‌های میدانی بستگی دارند. پارامترهای ورودی این مدل‌ها که در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مشخص می‌شوند؛ شامل شیب، طول

جویچه، خصوصیات نفوذ خاک، هیدروگراف ورودی، مقطع هندسی جریان و زبری سطح می‌باشند که اندازه‌گیری دقیق آن‌ها همواره همراه با خطا می‌باشد. علاوه بر این یکی از چالش‌های مدل‌سازی هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای پیش‌بینی فرایند نفوذ و مشخص نمودن ضرایب و پارامترهای معادلات نفوذ می‌باشد. اغلب مدل‌های شبیه‌سازی کاربردی آبیاری جویچه‌ای از معادلات تجربی نفوذ مانند کوستیاکف لوئیس برای پیش‌بینی نفوذ استفاده می‌نمایند (Bautista, 2016). پارامترهای معادلات نفوذ، در ابتدا از اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در تعداد معدودی از نقاط در طول مزرعه با استفاده از استوانه‌های مضائف تعیین می‌شدند. امروزه با توسعه مدل‌های هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری، برای تعیین پارامترهای معادله نفوذ از رفتار سیستم آبیاری در طی فازهای مختلف جریان (پیشروی، ذخیره و پسروی) به‌عنوان راه حل جایگزین استفاده می‌شود. در این صورت مدل‌های هیدرولیک آبیاری سطحی با حل معکوس معادلات جریان و معادله بیلان حجم برای چندین زمان در طی فازهای مختلف آبیاری اعمال می‌شود و سپس بهترین پارامترهای نفوذ را به سری نتایج روابط بیلان حجم برازش می‌دهند. روش‌های سنتی، معادله بیلان حجم را بر یک یا دو نقطه در یک فاز آبیاری برازش داده و بنابراین از دقت کمتری برخوردار هستند (Walker, 2005). از این رو برای یک مجموعه داده‌شده از هندسه جویچه، زبری و شرایط مرزی پایین‌دست، ترکیبات مختلفی از پارامترهای معادله نفوذ می‌تواند منجر به پیش‌بینی یکسان پیشروی، پسروی و رواناب خروجی شود (Bautista et al., 2009a). این حالت همپایانی^۱ نامیده می‌شود (Beven, 2006) که در نتیجه همبستگی بین پارامترها، حساسیت و عدم حساسیت پارامترها رخ می‌دهد و ممکن است موجب بروز عدم قطعیت در خروجی‌ها گردد. در این زمینه برخی از مطالعات پیشین به تحلیل حساسیت مدل‌های آبیاری نسبت به پارامترهای ورودی پرداخته‌اند. Zerihun et al. (1996) یک مدل آبیاری جویچه‌ای مبتنی بر رویکرد اینرسی-صفر را تحلیل حساسیت کردند. آن‌ها تغییرات پارامترهای خروجی ثانویه مدل مانند راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، نسبت رواناب، نسبت نفوذ عمقی، ضریب یکنواختی کریستیانسن و زمان رسیدن آب به انتهای جویچه با تغییر ۱۳ پارامتر ورودی هیدرولیکی و هندسی را مورد بررسی قرار دادند. از آنجایی که پارامترهای خروجی مدل که اثر تغییرات ورودی روی آن‌ها بررسی شده بود پارامترهای ثانویه بودند، آن‌ها نتوانستند به هیچ نتیجه کلی در ارتباط با اهمیت نسبی

پارامترهای ورودی بر خروجی مدل دست یابند. در مطالعه دیگری (McClymont, 1996) آنالیز حساسیت مدل SIRMOD با تغییرات پارامترهای ورودی (ضریب زبری، شیب، سطح مقطع جانبی در ورودی و خروجی) و بررسی اثر آن بر حجم رواناب و نفوذ پیش‌بینی شده انجام شد. Esfandiari and Maheshwari (2000) و همچنین Azad et al. (2017) حساسیت زمان‌های پیشروی و پسروی و رواناب شبیه‌سازی‌شده با مدل آبیاری جویچه‌ای SIRMOD را نسبت به پارامترهای ورودی مانند جریان ورودی، شیب طولی، ضریب زبری، پارامترهای نفوذ و هندسه جویچه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل حساسیت متوسط تا بالایی به نرخ جریان ورودی، خصوصیات نفوذ، ضریب زبری و شیب جویچه دارد. ضریب معادله نفوذ کوستیاکف لوئیس از درجه اهمیت بالاتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار بود. حساسیت فاز پیشروی و پسروی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SIRMOD در آبیاری جویچه‌ای نسبت به تغییرات دبی ورودی، شیب زمین و ضریب زبری مانینگ توسط Moradzadeh et al. (2013) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SIRMOD به تغییرات فراسنج‌های ورودی مذکور حساس است. Gholami Sefiedkouhi and Koulaian (2014) با تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولیکی هیدرودینامیک کامل، اینرسی صفر و موج سینماتیک نشان دادند که شاخص‌های ارزیابی آبیاری به پارامترهایی مانند دبی و زمان قطع جریان و ضرایب معادله نفوذ حساس می‌باشند. Walker (2005) نشان داد که زمان پیشروی و پسروی و شکل و مقدار هیدروگراف خروجی در آبیاری جویچه‌ای به ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف لوئیس (a ، k و f_0) حساس هستند، اما حساسیت آن‌ها یکسان نیست و زمان پسروی به پارامترهای a و k غیرحساس است. شکل و مقدار هیدروگراف خروجی تابعی از a و f_0 می‌باشد و زمان پیشروی نسبت به پارامترهای a و k حساس‌تر از f_0 یا n می‌باشد. بنابراین تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داده است که خروجی مدل‌های آبیاری جویچه‌ای به پارامترهای معادله نفوذ حساس می‌باشند.

از آنجایی که پارامترهای نفوذ برآورد شده با این روش‌ها و به‌عنوان ورودی مدل دارای عدم قطعیت هستند، پیش‌بینی‌های مدل نیز نامطمئن خواهند بود. درجه عدم قطعیت یک پیش‌بینی خاص به میزان زیادی به عدم قطعیت پارامترهایی که نسبت به آن‌ها حساس است، وابسته می‌باشد (Gallagher and Doherty, 2007). جریان سطحی و زیرسطحی آب در سیستم‌های آبیاری سطحی از روابط پیچیده غیرخطی پیروی می‌کند، بنابراین پیش‌بینی عملکرد این سیستم‌ها نیازمند استفاده از مدل‌های

۱. Equifinality

معادلات نفوذ بر پیش‌بینی عملکرد سیستم آبیاری جویچه‌ای، با رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو در مدل شبیه‌ساز آبیاری جویچه‌ای WinSRFR انجام گرفت. در این مطالعه روش اصلاح‌شده مونت کارلو (Marce *et al.*, 2004) که در تحلیل عدم قطعیت مدل‌های هیدرولیکی دقت مطلوبی نشان داده است (Riahi *et al.*, 2011) به دلیل جدید بودن و عملکرد مناسب، مورد استفاده قرار گرفت و تحلیل عدم قطعیت روی هیدروگراف رواناب خروجی و منحنی پیشروی در جویچه انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل WinSRFR

برنامه WinSRFR یک بسته نرم‌افزاری جامع برای تحلیل سیستم‌های آبیاری سطحی است. این نرم‌افزار، برنامه‌های شبیه‌سازی مستقل SRFR (Strelkoff *et al.*, 1998)، BORDER (Clemmens *et al.*, 1995) و BASIN (Strelkoff *et al.*, 1996) را به صورت یک برنامه کاربردی تحت ویندوز یکپارچه ساخته است. این برنامه با هدف ارائه ابزاری برای تحلیل‌های کاربردی در انواع مختلف سیستم‌های آبیاری سطحی و همین‌طور به‌عنوان یک بنیاد نرم‌افزاری برای ادامه پژوهش در هیدرولیک آبیاری سطحی از سال ۲۰۰۴ تاکنون در حال توسعه بوده است (Bautista *et al.*, 2009b). نرم‌افزار WinSRFR پیرامون چهار کارکرد؛ تحلیل واقعه، شبیه‌سازی، طراحی و تحلیل عملیاتی سازمان یافته است. تحلیل واقعه به ارزیابی داده‌های مزرعه‌ای و برآورد ویژگی‌های نفوذ مزارع می‌پردازد. طیف وسیعی از گزینه‌های عملیاتی و طراحی فیزیکی می‌تواند به آسانی در قسمت تحلیل عملیاتی و طراحی بررسی شود. محیط شبیه‌سازی امکان دسترسی به موتور شبیه‌سازی را فراهم می‌کند. شبیه‌سازی جریان غیرماندگار توسط مدل، امکان تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی را فراهم می‌آورد. نرم‌افزار WinSRFR امکان شبیه‌سازی برای تحلیل واقعه، دنیای عملیاتی و دنیای طراحی را فراهم می‌نماید (Bautista *et al.*, 2009c). شبیه‌سازی جریان سطحی توسط معادلات سنت و نانت که ترکیبی از معادلات پیوستگی و مومنتم برای جریان غیرماندگار یک بعدی است، انجام می‌شود (Strelkoff and Clemmens, 2007):

$$\frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial t} = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

(رابطه ۲)

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_y} \right) + \frac{\nu}{2} \frac{\partial A_z}{\partial t} \right] + g A_y \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0$$

$$A_z = z \times W \quad (\text{رابطه ۳})$$

غیرخطی با پارامترهای تنظیم‌شده دقیق است. همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد در مطالعات مدل‌سازی عملکرد سیستم‌های آبیاری، نااطمینانی به‌طور اجتناب‌ناپذیری تحت تاثیر وجود عدم قطعیت و خطا در متغیرهای مستقل ورودی مدل، پارامترها و ساختار مدل وجود دارد (Riahi *et al.*, 2011). به کمیت درآوردن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها برای رسیدن به پیش‌بینی‌های قابل اعتماد در مدل‌سازی، اهمیت اساسی دارد. عدم قطعیت به‌صورت بازه‌های محتمل از احتمالات وقوع پدیده تعریف می‌شود. در روش عمومی عدم قطعیت تشابه‌ها GLUE با فرض عدم وجود پارامترهای بهینه منحصر به فرد با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو چندین سری پارامترهای مختلف ایجاد شده و نتایج حاصل از سری‌های مختلف بر اساس نسبت اعتماد آن‌ها وزن گرفته و سپس از این وزن‌ها برای تعیین توزیع احتمالاتی پیش‌بینی استفاده می‌شود (Shafiei *et al.*, 2013). بررسی تحقیقات پیشین مرتبط با تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌ساز بیان‌گر آن است که روش‌های مختلفی برای تعیین عدم قطعیت در این مدل‌ها توسعه یافته است. از جمله می‌توان روش‌های Bootstrap و تخمین‌زننده ساندویچ (Tibshirani, 1995)، حداکثر درست‌نمایی و استنتاج بیزین (Dybowsky, 1997) و روش مونت کارلو پیشنهادشده توسط Marce *et al.* (2004) را نام برد. عدم قطعیت و وجود نااطمینانی در شبیه‌سازی فرایند حرکت آب در آبیاری سطحی از مشخصات بارز در ساختار مدل‌های آبیاری، اطلاعات ورودی و پارامترهای مدل است. به همین دلیل تخمین پارامترهای مدل یا واسنجی به‌خصوص در برخی مدل‌هایی که روابط بین پارامترهای آن‌ها به‌شدت غیرخطی است، همچون مدل‌های نفوذ و حرکت آب در آبیاری جویچه‌ای همواره با مشکلاتی همراه است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای عدم قطعیت در مدل‌های آبیاری سطحی مربوط به ضرایب معادلات تجربی نفوذ است و یافتن یک مجموعه پارامتر بهینه ممکن نیست. استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت و شبیه‌سازی مونت کارلو این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان اطلاعات بیشتری در مورد خروجی‌های مدل به دست آورد و خطاهای موجود در مدل‌سازی را به‌صورت بازه‌های اطمینان ارائه نمود (Shafiei *et al.*, 2013).

اگرچه تحلیل‌های عدم قطعیت در مطالعات منابع آب در دو دهه گذشته استفاده شده است ولی در زمینه مدل‌های آبیاری سطحی، تحلیل عدم قطعیت نتایج موضوع جدیدی محسوب می‌شود. علاوه بر این، یکی از موارد مهمی که برخلاف مطالعات شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در این مدل‌ها به آن پرداخته نشده است، تحلیل عدم قطعیت در هنگام ارائه نتایج می‌باشد. این تحقیق با هدف بررسی تاثیر عدم قطعیت ضرائب و پارامترهای

عدم قطعیت و یک مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری و تفسیر نتایج عدم قطعیت می‌باشد. در این مطالعه مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به آزمایش‌های (Soroush et al., 2012) و Soroush (2015) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی بوعلی سینا همدان واقع در روستای دستجرد مورد استفاده قرار گرفت. مزرعه آزمایشی خاک لوم رسی با شیب ۰/۰۱ متر بر متر داشت و با جویچه‌هایی به طول ۱۲۰ m و فاصله ۰/۷۵ m آبیاری می‌شد. در آزمایش انتخاب‌شده برای این مقاله زمان رسیدن آب به انتهای جویچه ۶۶ min بود و جریان ورودی در زمان ۶۶ min قطع گردید. اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای شامل اندازه‌گیری منحنی‌های پیشروی و پسروی در ایستگاه‌هایی به فواصل ۱۰ m در طول جویچه و اندازه‌گیری مقطع عرضی جویچه در سه ایستگاه در ابتدا، وسط و انتهای جویچه بود. هیدروگراف ورودی و خروجی با استفاده از فلوم قرائت گردید. متوسط دبی ورودی و خروجی به ترتیب ۱/۸ lit/s و ۱/۰۷ بودند (Soroush et al., 2015). مطالعات پیشین نشان داده است که شبیه‌سازی جریان آب در آبیاری سطحی به نفوذ حساس است (McClymont, 1996; Esfandiari and Maheshvari, 2000; Walker, 2005; Gholami and Sefidkouhi and Koulaian, 2014). مدل WinSRFR امکان استفاده از توابع مختلف نفوذ تجربی (شش تابع) را فراهم آورده است. در تحقیق حاضر با توجه به کاربرد وسیع معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده در طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی و همچنین امکان تهیه پایگاه داده معتبر از ضرایب معادلات تجربی کوستیاکوف اصلاح‌شده، پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده به منظور تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی دقت مدل انتخاب شدند.

منابع عدم قطعیت معادله نفوذ و توزیع‌های آماری

همان‌گونه که در قسمت قبلی بیان شد، تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو نیازمند شناسایی منابع مولد عدم قطعیت و تحلیل آماری آن‌ها به منظور دستیابی به نمونه‌های تصادفی با تعداد زیاد است. روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای هر پارامتر به تابع چگالی احتمال نیاز دارد و یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کیفیت نتایج شبیه‌سازی، مناسب بودن تابع چگالی احتمال برای پارامترها می‌باشد (Bates and Townley, 1988). محققین (Jacquin and Shamseldin, 2007) استدلال کرده‌اند که انتخاب تابع چگالی احتمال تنها برای به دست آوردن نمونه پارامترها از فضای پارامتری مربوطه اهمیت دارد. یکی از شایع‌ترین دلایل برای استفاده از توابع چگالی احتمال ساده مانند توزیع یکنواخت یا گوسی، فقدان اطلاعات لازم برای به دست آوردن توابع می‌باشد.

$$z = kt^a + f_0t \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن‌ها A_y = حجم ذخیره سطحی بر واحد طول مزرعه، Q = نرخ جریان، A_z = حجم نفوذ بر واحد طول جویچه، x = فاصله، t = زمان، v = سرعت جریان در سطح مقطع متوسط، g = شتاب ثقل، S_0 = شیب کف مزرعه، S_f = شیب اصطکاکی، W = فاصله جویچه‌ها، z = عمق نفوذ، k و a = ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده هستند.

شبیه‌سازی در مدل WinSRFR با استفاده تقریب اینرسی-صفر یا موج جنبشی معادلات سنت-ونانت انجام می‌شود. تحت شرایط مرسوم آبیاری، سرعت جریان و عدد فرود کوچک هستند (معمولاً کمتر از ۰/۲)، بنابراین تخمین اینرسی-صفر معادلات سنت وونانت از عبارات اینرسی در معادله مومنتم صرف نظر می‌کند و در نتیجه معادله مومنتم (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$gA_y \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (\text{رابطه ۵})$$

علاوه بر این زمانی که شیب کف مزرعه زیاد باشد، تقریب اینرسی-صفر سبب بروز تغییرات بسیار سریعی در نزدیکی نوک جبهه پیشروی می‌شود. در این شرایط از آنجایی که وزن سیال در تعادل با مقاومت اصطکاکی است، عبارت گرادیان فشاری کوچک و قابل چشم پوشی است که با تقریب موج سینماتیکی بیان می‌شود (Bautista et al., 2016). معادلات حاکم به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود ضمنی حل می‌شوند (Strelkoff and Clemmens, 2007). مدل موج جنبشی برای مزارع با شیب‌های بزرگتر و مساوی ۰/۰۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل اینرسی صفر برای مزارع انتها بسته و شیب‌های کمتر از ۰/۰۴ استفاده می‌شود. این مدل برخلاف مدل SIRMOD، می‌تواند آبیاری جویچه‌ای در شیب‌های منفی را شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این، نرم‌افزار می‌تواند با نرخ متغیر جریان ورودی تطبیق یابد و با تغییرات مکانی و زمانی ابعاد جویچه، شیب مزرعه و نرخ نفوذ خاک سازگار گردد (Gillies, 2008). نرم‌افزار WinSRFR از توابع تجربی برای نمایش نفوذ استفاده کرده است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، مدل نسبت به پارامترهای معادله نفوذ دارای حساسیت می‌باشد، بنابراین نتایج شبیه‌سازی در قسمت‌های مختلف مدل با عدم قطعیت روبرو خواهد بود.

توصیف آزمایش جویچه‌ای و انتخاب پارامترهای تحلیل عدم قطعیت

تحلیل عدم قطعیت مدل WinSRFR با استفاده از رویکرد مونت کارلو نیازمند تهیه یک پایگاه داده برای پارامترها و ضرایب تحلیل

(Gillies, 2008; Soroush, 2012; Afshar, 2015; Arabi, 2017). توزیع‌های احتمالاتی متناسب با نمونه داده‌ها، پایه مناسبی برای برآورد ارزش پارامترها برای تحقق مونت کارلو را فراهم می‌آورد. از این رو، به هر یک از پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف توزیع‌های احتمالاتی مختلف برازش داده شد. انتخاب توزیع آماری مناسب و برآورد پارامترهای توزیع با استفاده از روش گشتاورها در نرم‌افزار Easy Fit صورت گرفت و نکوئی برازش با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف انجام گردید (DeGroot, 1986). در جدول (۱) مشخصات آماری مجموعه داده‌های ضرایب معادله نفوذ که در برازش توزیع‌های آماری و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده‌اند، آمده است و مشاهده می‌شود که مجموعه ضرایب اندازه-گیری شده، محدوده وسیعی از ضرایب استفاده‌شده در مطالعات پیشین و مرتبط با نفوذ در آبیاری جویچه‌ای را پوشش می‌دهد.

بنابراین برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و تحلیل عدم قطعیت با قابلیت اعتماد بالاتری در این مقاله ابتدا یک پایگاه داده از منابع مولد عدم قطعیت گردآوری شد.

از بین عوامل مختلف شناسایی شده در بررسی رفتار سیستم‌های آبیاری سطحی جویچه‌ای، عواملی نظیر هیدروگراف ورودی، ابعاد و شکل هندسی جویچه و پارامترها و ضرایب تجربی نفوذ می‌توانند مولدهای عدم قطعیت باشند. در این مطالعه عدم قطعیت مربوط به پارامترهای معادله نفوذ اصلاح‌شده کوستیاکوف به‌عنوان اصلی‌ترین و اساسی‌ترین عامل عدم قطعیت پارامتری مدنظر قرار گرفته است.

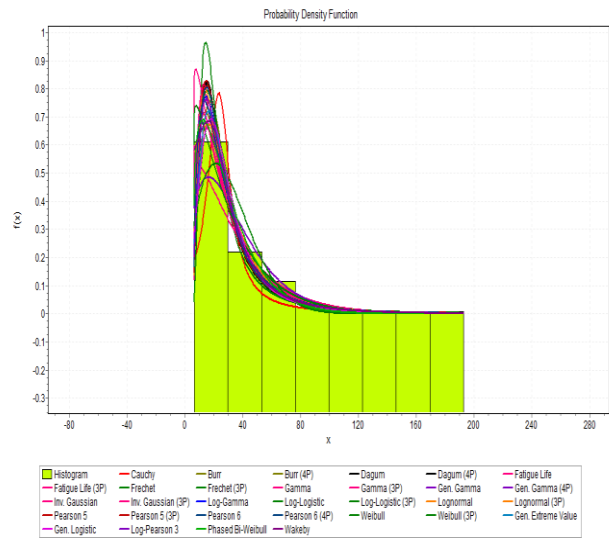
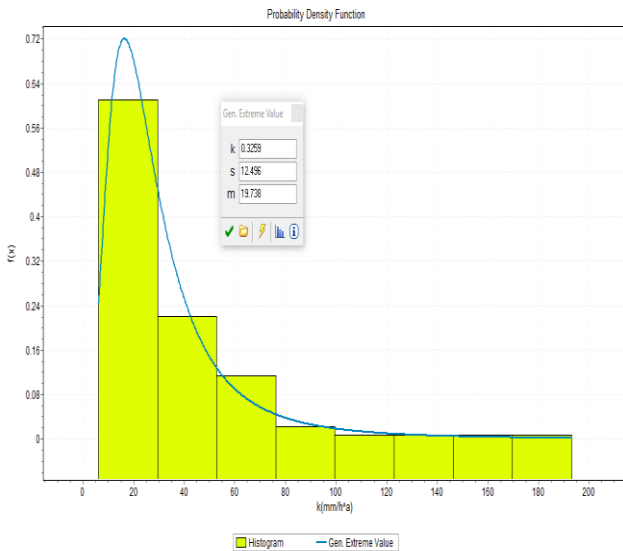
در این مطالعه برای استخراج تابع توزیع احتمال پارامترهای تابع نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده، ۱۳۱ سری پارامترهای معادله نفوذ آبیاری جویچه‌ای از منابع مورد استفاده قرار گرفت (Walker and Humphreys, 1983; Walker and Skogerboe, 1987;

جدول ۱- تحلیل آماری پایگاه داده‌ها و محدوده تغییرات پارامترهای نفوذ

پارامتر	سرعت نفوذ نهایی آب f_0 (mm/hr)	توان معادله نفوذ a	ضریب معادله نفوذ k (mm/hr ^۳)
میانگین	۱۱/۰۵	۰/۴۳	۳۲/۸۱
نما	۱۵/۰۰	۰/۵۰	۹/۲۰
انحراف معیار	۹/۰۳	۰/۱۹	۲۸/۵۷
حداقل	۰	۰/۰۱	۶/۲۰
چارک اول	۴/۷۷	۰/۲۹	۱۵/۱۸
میانه	۸/۸۸	۰/۵۰	۲۵/۸۱
چارک سوم	۱۵/۰۰	۰/۵۶	۳۶/۹۶
حداکثر	۵۵/۶۶	۰/۷۹	۱۹۲/۹۵
چولگی	۱/۷	-۰/۶۳	۲/۸۲
کشیدگی	۸/۲۵	۲/۴۰	۱۳/۵۸

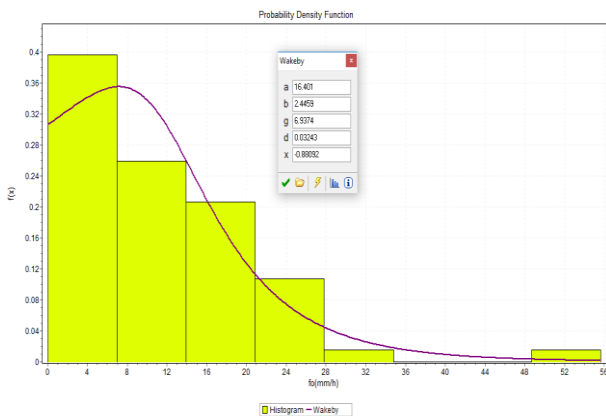
اسمیرنوف نشان دادند که فرض برازش توزیع Wakeby بر داده‌های a در سطح معنی‌داری $\alpha = 0/05$ رد نگردید. داده‌های توان معادله نفوذ و توزیع برازش داده شده بر آن‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. پس از تشخیص آنکه توزیع Wakeby بر داده‌های سرعت نفوذ نهایی آب به خاک (f_0) در طول جویچه برازش مناسبی دارد، انتخاب توزیع آماری برای داده‌های f_0 به شکل مشابهی انجام شد. علاوه بر این فرض برازش توزیع Wakeby بر داده‌های f_0 با آزمون آماری خی دو و کولموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌داری $\alpha = 0/05$ رد نشد. داده‌ها و توزیع برازش شده بر آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است و مشخصات بهترین توزیع آماری پسین برازش یافته بر ضرایب نفوذ و معادله هر توزیع و مقادیر پارامترهای آن در جدول (۲) ارائه شده است. از اطلاعات این جدول برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو و تولید نمونه‌های تصادفی با تعداد ۱۰۰۰ نمونه تصادفی برای پارامترهای k ، a و f_0 استفاده شد.

با استفاده از مجموعه ضرایب نفوذ اندازه‌گیری شده اقدام به برازش توزیع‌های آماری مختلف به پارامترهای k ، a و f_0 شد و از بین توزیع‌های آماری پیوسته مختلف برازش یافته، بهترین توزیع آماری پسین ضرایب بر اساس مقادیر آماره کولموگروف-اسمیرنوف انتخاب شد. نتایج نکوئی برازش توزیع‌های مختلف بر ضریب معادله نفوذ (k) نشان داد که فرض تناسب توزیع GEV بر داده‌ها در سطح معنی‌داری $\alpha = 0/05$ پذیرفته شده است. داده‌های ضرایب معادله نفوذ k و توزیع‌های احتمالاتی مختلف پیوسته برازش داده‌شده بر آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. از بین توزیع‌های آماری مختلف، بهترین توزیع برای پارامتر k توزیع GEV با پارامترهای جدول (۲) حاصل شد. شکل (۲) نمونه داده‌های k را با توزیع GEV انتخاب‌شده مقایسه می‌نماید. با روشی مشابه توزیع توان معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده (a) به دست آمد و طبق نتایج آماره نکوئی برازش توزیع Wakeby بهترین برازش را بر داده‌های a دارد. تست کای دو و کولموگروف-

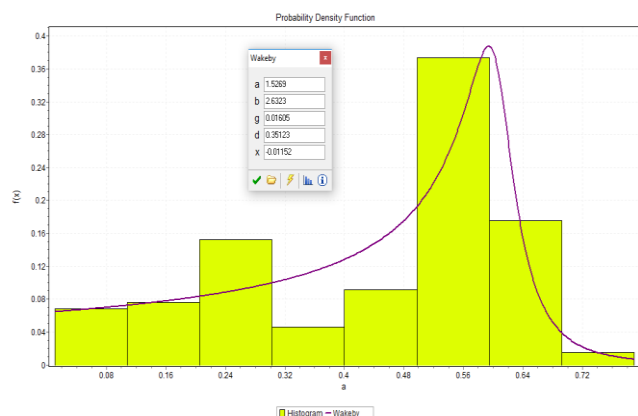


شکل ۲- مقایسه توزیع GEV برازش داده شده به نمونه داده های پارامتر k

شکل ۱- برازش توزیع های آماری مختلف بر نمونه داده های k



شکل ۴. مقایسه توزیع Wakeby برازش داده شده به نمونه داده های پارامتر f0



شکل ۳- مقایسه توزیع Wakeby برازش داده شده به نمونه داده های پارامتر a

جدول ۲- مشخصات توزیع های آماری پسین پارامترهای نفوذ

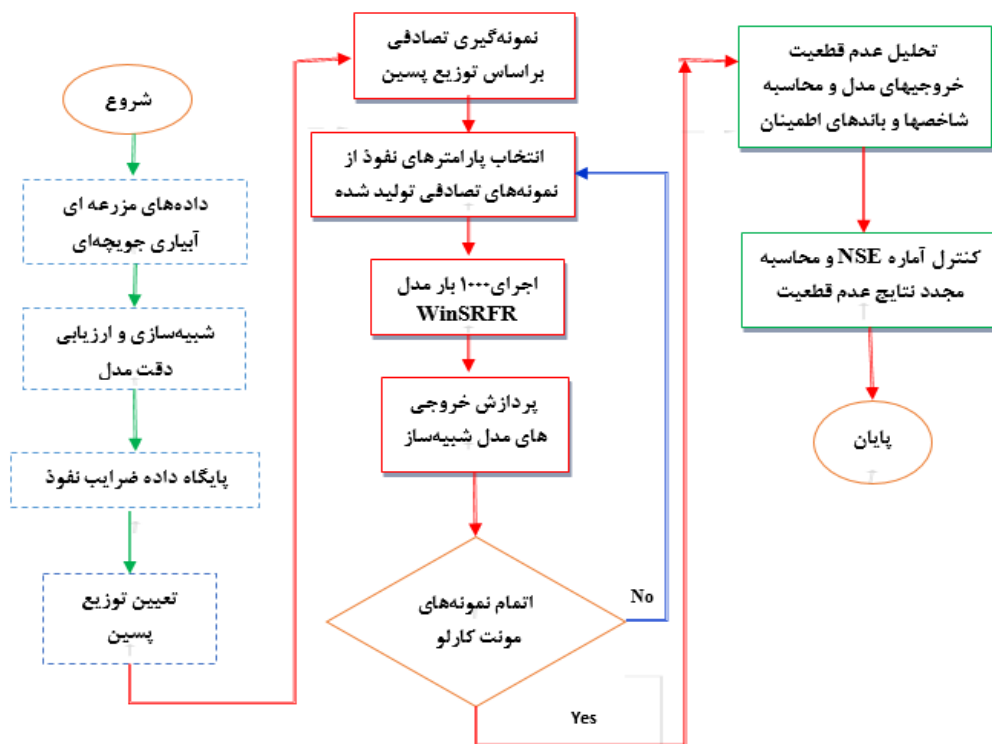
فرمول	پارامتر توزیع	توزیع	پارامتر مدل شبیه ساز
$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp(-(1+kz)^{-1/k}) (1+kz)^{-1-1/k} & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) & k = 0 \end{cases}$	$k = 0.2259; \sigma = 12.456; \mu = 19.738$	GEV	ضریب معادله نفوذ، k
$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} (1 - (1-F)^\beta) - \frac{\gamma}{\delta} (1 - (1-F)^{-\delta})$	$\alpha = 1/53; \beta = 2/63; \gamma = 0.02; \delta = 0.35; \xi = -0.1$	Wakeby	توان معادله نفوذ، a
$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{\beta} (1 - (1-F)^\beta) - \frac{\gamma}{\delta} (1 - (1-F)^{-\delta})$	$\alpha = 16/40; \beta = 2/44; \gamma = 6/94; \delta = 0.03; \xi = -0.88$	Wakeby	سرعت نفوذ نهایی، f0

پارامتر استفاده شد. در این روش برای تولید اعداد تصادفی با رعایت توزیع آماری پسین هر پارامتر، از تابع احتمال حاکم استفاده شد و سپس مقادیر تصادفی از هر مولفه با توجه به نوع

شبیه سازی مونت کارلو نفوذ آبیاری جویچه ای به منظور تحلیل عدم قطعیت نفوذ آبیاری جویچه ای از روش نمونه گیری تصادفی مونت کارلو بر اساس توزیع آماری پسین هر

و تعیین باند عدم قطعیت متناظر و یا تعیین تابع توزیع احتمالاتی برآورد گردید. فلوجارت مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل (۵) ارائه شده است. انجام این مراحل به تخمین عدم قطعیت در پارامترهای مدل و در نتیجه خروجی مدل، عدم اربب بودن میانگین خروجی مدل و تعیین حدود اطمینان مقادیر پیش‌بینی‌شده می‌انجامد (Marce et al., 2004). در نتیجه با استفاده از این تکنیک محاسباتی حجیم به‌جای پیش‌بینی یک منحنی مطلق برای هیدروگراف رواناب و منحنی پیشروی مطابق با آنچه در تحقیقات مشابه انجام گرفته، محدوده‌ای از خروجی‌ها به شکل منحنی‌های متناظر که نتیجه عدم قطعیت مدل ساخته شده می‌باشد، حاصل شد. این روش بر مبنای قرارگیری مدل‌های برازش توزیع آماری و شبیه‌سازی نفوذ در قالب یک پروسه نمونه‌گیری تصادفی مونت کارلو می‌باشد. در این تحقیق از آماره (NSE) نش-ساتکلیف^۱ (Nash and Sutcliffe, 1970) برای گزینش بهترین مقادیر برای ضرایب معادله نفوذ و محدود نمودن باندهای عدم قطعیت به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در شبیه‌سازی عدم قطعیت استفاده شد.

توزیع انتخابی تولید گردید. تولید نمونه‌های تصادفی به تعداد زیاد و ۱۰۰۰ مرتبه برای هر مولفه انجام شد. مبنای روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر پایه استفاده از اعداد تصادفی و دستیابی به تابع توزیع احتمالاتی خروجی یک مدل است. بدین‌صورت که منابع عدم قطعیت با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی پسین به‌طور تصادفی و به تعداد ۱۰۰۰ نمونه تولید شده، سپس این نمونه‌ها در یک فرآیند شبیه‌سازی پله‌ای به‌صورت خودکار توسط مدل WinSRFR فراخوانی می‌شود و مدل WinSRFR به تعداد ۱۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی جریان در آبیاری جویچه‌ای را با حل عددی معادلات حاکم انجام می‌دهد و خروجی معادل آن‌ها از مدل به دست می‌آید و این عمل بارها تکرار می‌شود تا اینکه شبیه‌سازی‌های عددی برای تمامی ۱۰۰۰ نمونه تصادفی تولیدشده تکمیل گردد. در حقیقت پارامترهای مدل به‌دفعات زیاد و هر بار بر اساس نمونه‌ای از وقایع اتفاق افتاده در گذشته به‌دست آمد. سپس نتایج خروجی مدل WinSRFR توسط زیر برنامه جانبی تحلیل پسین عدم قطعیت فراخوانی شد و عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل WinSRFR بر دو پارامتر هیدروگراف رواناب خروجی و منحنی پیشروی از طریق محاسبه شاخص‌های آماری



شکل ۵- فلوجارت تحلیل عدم قطعیت مدل شبیه‌ساز آبیاری جویچه‌ای به روش مونت کارلو

برای بررسی عدم قطعیت حدود اطمینان ۹۵٪ (95PPU)، برای پیش‌بینی‌ها مدنظر قرار گرفت که طبقه به دست آوردن آن

مجذور مربعات میانگین خطا (RMSD) را نشان می‌دهد (Taylor, 2001). در این نمودار ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره، انحراف معیار در محورهای افقی و قائم و RMSD به صورت دوایر متحدالمرکز آزمون شعاعی نسبت به مرکز دایره و نقطه مرجع (انحراف معیار اندازه‌گیری‌ها) نمایش داده می‌شوند. در این دیاگرام هر شبیه‌سازی که به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشد، بالاترین دقت را دارد و از اعتبار بالاتری برخوردار است. همچنین آنالیز حساسیت به روش تغییر یک پارامتر نفوذ در هر بار با ثابت نگه- داشتن پارامترهای دیگر معادله نفوذ انجام شد. حساسیت رواناب خروجی و زمان رسیدن به انتها نیز بر اساس ضرایب حساسیت مطلق S و حساسیت نسبی Sr از روابط زیر تعیین شد (Kumar et al., 2002):

$$S = \frac{(O_2 - O_1)}{(I_2 - I_1)}, \quad Sr = \frac{\bar{I}}{\bar{O}} \times \frac{(O_2 - O_1)}{(I_2 - I_1)} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این روابط O و I مقادیر پارامتر ورودی و خروجی قبل از تغییر (۱) و بعد از تغییر (۲) است.

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی دقت و تحلیل عدم قطعیت

در این مقاله ابتدا مشخصات هندسه جویچه و هیدروگراف ورودی مزرعه آزمایشی به مدل WinSRFR معرفی شد و شبیه‌سازی‌های اولیه توسط مدل انجام گردید. سپس، مقایسه بین مقادیر هیدروگراف رواناب خروجی جویچه و منحنی پیشروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل صورت گرفت. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۶-الف وب) مشاهده می‌شود که مدل WinSRFR پس از واسنجی ضرایب، دقت مطلوبی در شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب خروجی از جویچه و منحنی پیشروی دارد و به منظور بررسی دقیق‌تر کارایی مدل از رویکرد تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو استفاده شد. مقدار ضرایب بهینه واسنجی برای داده‌های مورد استفاده به ترتیب برابر با ۲۸/۴۳، ۰/۶ و ۱/۸۱ برای k و a و f₀ به دست آمد. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل نیز بدین صورت انجام شد که مدل با همین مقادیر پارامترهای بهینه برای یک آبیاری دیگر داخل همین مزرعه و بدون تغییر پارامترهای مرحله واسنجی اجرا شد و نتایج مرحله اعتبارسنجی نیز در شکل (۶-ج ود) ارائه شده است. مشاهده می‌شود در صورتی که ضرایب مدل به خوبی در مرحله واسنجی پارامترها تعیین شوند نتایج آن از اعتبار نسبتاً خوبی برخوردار بوده و در شبیه‌سازی‌های بعدی در مزرعه واسنجی شده قابل استفاده است، ولی باید به این نکته توجه نمود که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده در مرحله اعتبارسنجی افزایش یافته و خصوصاً

تعیین حدود ۲/۵٪ (X_L) و ۹۷/۵٪ (X_U) توزیع تجمعی احتمال تجربی به دست آمده از ۱۰۰۰ پیش‌بینی انجام شده می‌باشد. حدود اطمینان مناسب حدودی هستند که بالای ۸۰٪ از مقادیر مشاهده شده در آن حدود قرار گرفته باشند و دارای عرض متوسط قابل قبولی باشند. برای سنجش عرض متوسط باند اطمینان، شاخص عرض باند مطابق زیر پیشنهاد شده است (Abbaspour et al., 2007):

$$d.factor = \frac{\bar{d}_x}{\sigma_x} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن σ_x = انحراف استاندارد مشاهده شده و \bar{d}_x = عرض متوسط باند اطمینان می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{d}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i \quad (\text{رابطه ۷})$$

که مقدار عامل عرض باند کوچکتر از ۱ و \bar{d}_x برابر صفر مقدار بهینه به حساب می‌آید (Abbaspour et al., 2007). درصد داده‌های قرار گرفته در باند اطمینان ۹۵٪ نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود (Riahi-Madvar et al., 2017):

(رابطه ۸)

$$Bracketed\ by\ 95PPU = \frac{1}{n} count(Q|X_L \leq Q \leq X_U) \times 100$$

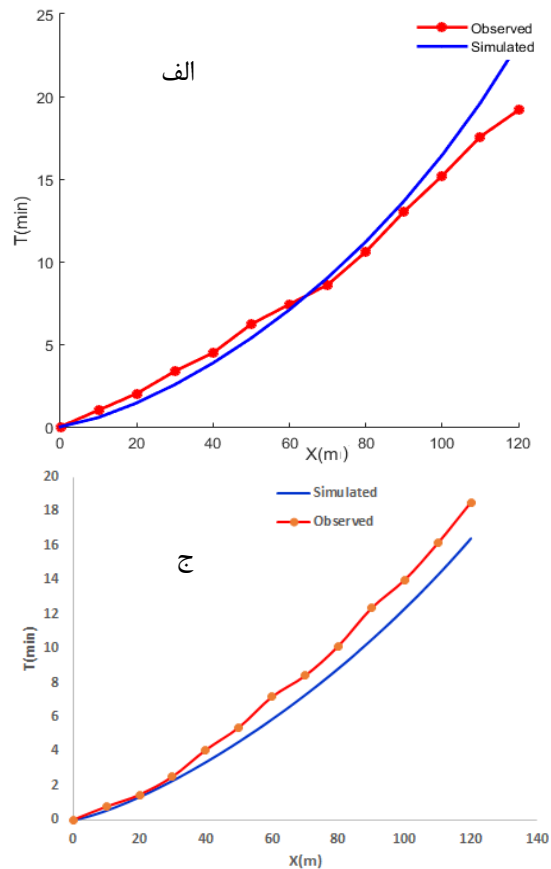
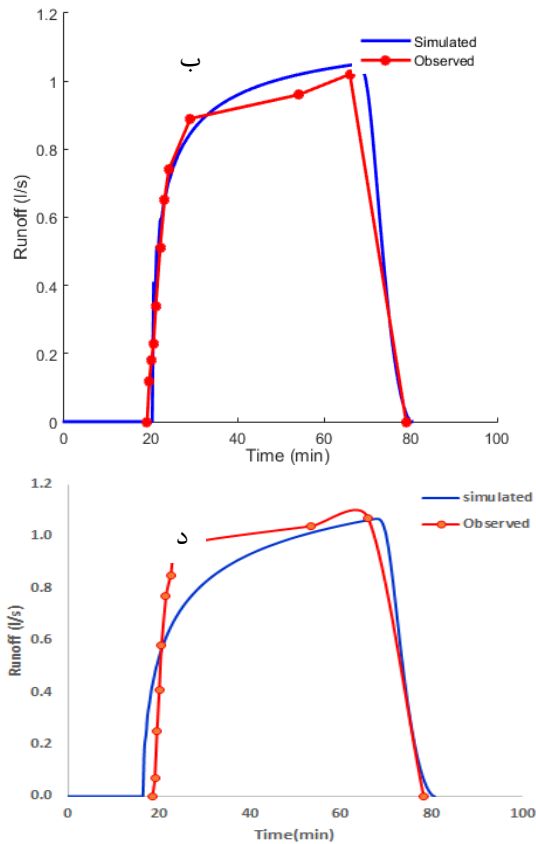
مقدار 95PPU برابر ۱۰۰ درصد مطلوب است و طبق نظر (Abbaspour et al., 2007) در صورتی که درصد داده‌های داخل باند اطمینان نزدیک به ۹۰٪ باشد عدم قطعیت‌ها کم خواهند بود. در این تحقیق مراحل توسعه و انتخاب توزیع پسین در محیط نرم‌افزار Easy Fit و شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل پسین نتایج WinSRFR و محاسبات عدم قطعیت با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB R2016 انجام شد. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی بیان شد معیار به‌گزینی محدوده پارامترها در آنالیز حساسیت و شبیه‌سازی مونت کارلو از شاخص NSE استفاده شد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این رابطه O_i مقدار اندازه‌گیری شده، P_i مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری است. محدوده تغییرات NSE از منفی بی‌نهایت تا یک است، به طوری که عدد ۱ مربوط به مدلی است که کاملاً با واقعیت مطابقت دارد. اگر NSE بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل رضایت‌بخش و اگر بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، نتایج مدل مطلوب است. همچنین در این تحقیق از دیاگرام تایلور برای نمایش طیف منحنی پاسخ در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. دیاگرام تایلور ارتباط هندسی و قطبی بین ضریب همبستگی (R)، انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده و

قطعیت ذاتی موجود در نتایج مدل است.

در مقادیر بزرگ این اختلاف بیشتر می‌شود و نشان‌دهنده عدم



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده (الف) منحنی پیشروی و (ب) هیدروگراف رواناب خروجی و (ج) منحنی پیشروی اعتبارسنجی و (د) هیدروگراف رواناب خروجی اعتبارسنجی

ضریب a است و در مرحله بعد حساسیت نسبت به k وجود دارد و کمترین حساسیت مربوط به b است. در این جدول مقادیر مثبت نشان‌دهنده اثر مثبت تغییر پارامتر بر خروجی‌های مدل WinSRFR است و مقادیر منفی بیانگر اثر معکوس است.

جدول ۳- نتایج تحلیل آنالیز حساسیت رواناب و پیشروی نسبت به

پارامترهای نفوذ				
پارامتر نفوذ	رواناب RO		زمان پیشروی TL	
	Sr	S	Sr	S
k	-۰/۸۳	-۰/۳	۰/۷	۰/۴۱
a	-۰/۱۳	-۲/۱۸	-۰/۸۶	-۲۴/۲۸
b	-۰/۳۶	-۰/۳۱	۰/۱	۰/۱۴

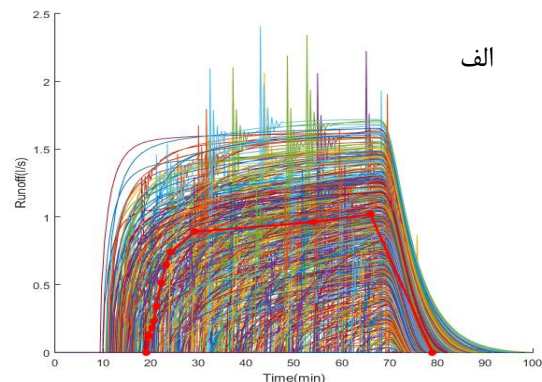
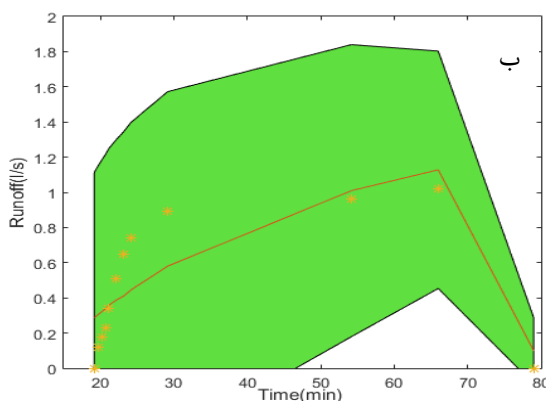
عدم قطعیت هیدروگراف رواناب خروجی

با توجه به وجود عدم قطعیت و نا اطمینانی در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای، در این تحقیق عدم قطعیت ناشی از پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار WinSRFR با محاسبات حدود اطمینان و عرض باندها برآورد شده است. نتایج ۱۰۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو صورت گرفته

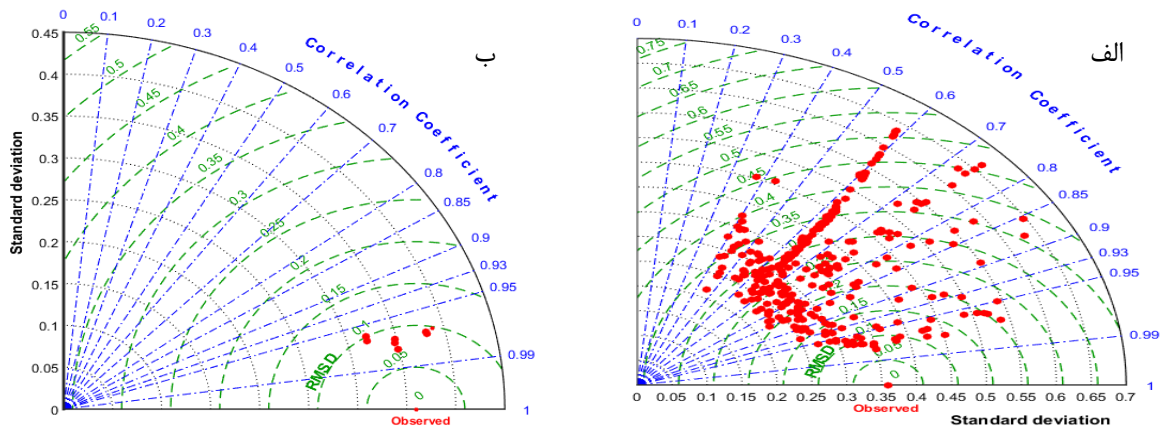
بدین منظور با توجه به نوع توزیع احتمالاتی مناسب هر پارامتر که در قسمت قبلی تعیین شده بود به تعداد ۱۰۰۰ نمونه تصادفی از هر پارامتر تولید شد. تولید نمونه‌های تصادفی بر اساس مقادیر پارامترهای توزیع پسین هر پارامتر صورت گرفت. بعد از توزیع نمونه‌های تصادفی، به ازای هر دسته از ضرایب معادله نفوذ نمونه تصادفی، شبیه‌سازی هیدروگراف ورودی در آبیاری جویچه-ای با استفاده از نرم‌افزار WinSRFR صورت گرفت و خروجی‌های متناظر شامل هیدروگراف رواناب خروجی و منحنی پیشروی آب در طول جویچه در هر مجموعه نمونه تصادفی تولید گردید. در مرحله بعدی خروجی ۱۰۰۰ شبیه‌ساز دسته‌ای، انجام‌شده در نرم‌افزار WinSRFR، در محیط نرم‌افزار MATLAB فراخوانی شد و محاسبات تحلیل عدم قطعیت خروجی‌ها صورت گرفت. همچنین آنالیز حساسیت رواناب RO و زمان رسیدن به انتهای جویچه TL نیز با تغییر $\pm 1\%$ ، $\pm 10\%$ ، $\pm 50\%$ پارامترهای k و a و f_0 نسبت به مقادیر بهینه انجام شد و مقادیر ضرایب حساسیت مطلق و نسبی در جدول (۳) آمده است. طبق این جدول مشاهده می‌شود که بیشترین حساسیت مربوط به زمان پیشروی و سپس رواناب با

نسبت به مقادیر اندازه‌گیری در مختصات قطبی را فراهم می‌کند. در این دیاگرام زاویه آزیموت، ضریب همبستگی و فاصله شعاعی نسبت به مبدا مشاهدات با انحراف معیار SD نشان داده می‌شود. طبق این شکل تمام ۱۰۰۰ نمونه شبیه‌سازی در محدود انحراف معیار ۰/۲ تا ۰/۶۵ لیتر بر ثانیه قرار دارند و بیشتر شبیه‌سازی‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی ضریب تبیین بزرگتر از ۰/۷ دارند که در سطح ۹۵٪ همبستگی معنی‌دار بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده قابلیت مدل در شبیه‌سازی الگوی کلی حاکم بر پدیده است هرچند اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در برخی موارد زیاد است و توزیع نتایج مدل در سطح وسیعی از دیاگرام تایلور وجود دارد. به همین منظور از معیار NSE برای به‌گزینی پارامترهای معادله نفوذ در تحلیل عدم قطعیت استفاده شد و یکبار دیگر محاسبات عدم قطعیت بر اساس پارامترهایی که $NSE > 0.9$ ایجاد می‌نمایند، صورت گرفت و نتایج در شکل (۸-ب) و شکل (۹) ارائه شده است. در این حالت مشاهده می‌شود که با استفاده از معیار $NSE > 0.9$ می‌توان عدم قطعیت‌های نتایج مدل شبیه‌ساز آبیاری جویچه‌ای را کاهش داده و محدوده با درجه اطمینان بالاتری برای پارامترهای معادله نفوذ به دست آورد. با استفاده از روابط (۸-۶) حدود اطمینان ۹۵٪ برای شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب خروجی جویچه از طریق تعیین مقادیر ۲/۵٪ و ۹۷/۵٪ توزیع احتمالاتی تجربی به‌دست‌آمده از ۱۰۰۰ شبیه‌سازی WinSRFR و در حالت استفاده از $NSE > 0.9$ مشخص گردید و شاخص‌های عدم قطعیت در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

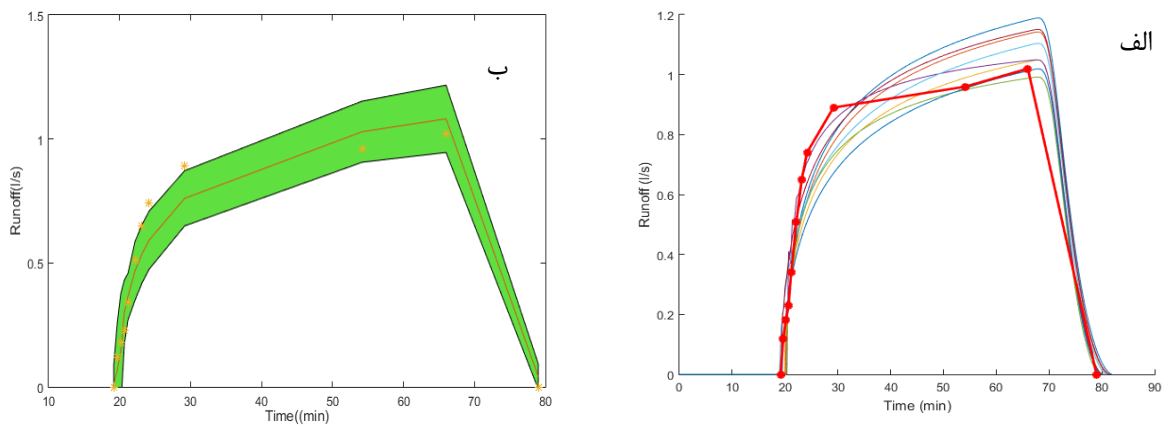
توسط نرم‌افزار WinSRFR و همچنین باندهای عدم قطعیت خروجی مدل در شکل (۷) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که سطح پاسخ (در شکل ۷-الف هیدروگراف خروجی) نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای معادلات نفوذ حساس بوده و محدوده وسیعی از برآوردها را تولید می‌کند و علاوه بر این در برخی موارد عدم قطعیت پارامترهای معادله نفوذ منجر به از دست رفتن الگوی هیدروگراف مشاهداتی شده و مقادیر دبی اوج رواناب و نوسان‌های شدید در نتایج شبیه‌سازی را ایجاد می‌کند. در تحقیق Khoi and Thom (2015) نیز بیان شده است که عدم قطعیت هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده در مدل SWAT که یک مدل مبتنی بر خصوصیات هیدرولوژی آب و خاک است بالاست و حساسیت به مقادیر پارامترها وجود دارد و روندیابی به روش موج سینماتیک توسط Cahoon (1998) نیز نشان داده است که پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف به شدت بر هیدروگراف جریان و منحنی پیشروی تأثیر می‌گذراند که در توافق با نتایج پژوهش حاضر است. طبق شکل (۷-ب) محدوده عدم قطعیت به رنگ سبز نشان داده شده و عدم قطعیت نتایج مدل نیز بسیار وسیع است و عرض باند عدم قطعیت گسترده بوده و نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ۱۰۰۰ نمونه-گیری تصادفی است. همچنین توزیع نقاط حاصله از ۱۰۰۰ شبیه‌سازی نسبت به مقادیر هیدروگراف مشاهداتی در دیاگرام تایلور (شکل ۸) ارائه شده است. دیاگرام تایلور انحراف معیار، انحراف جذر میانگین مربعات و ضریب تبیین را در یک گراف واحد خلاصه می‌کند و امکان مقایسه گرافیکی نتایج ۱۰۰۰ نمونه شبیه‌سازی



شکل ۷- الف) طیف پاسخ هیدروگراف‌های خروجی شبیه‌سازی شده در ۱۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و مشاهداتی و ب) باندهای عدم اطمینان ۱۰۰۰ شبیه‌سازی



شکل ۸- توزیع نتایج در دیاگرام تایلور هیدروگراف رواناب برای الف) ۱۰۰۰ شبیه‌سازی و ب) با $NSE > 0.9$ در مقایسه با هیدروگراف خروجی مشاهداتی



شکل ۹- الف) طیف پاسخ نتایج با شرط $NSE > 0.9$ و ب) باندهای اطمینان ۹۵٪ مدل WinsSRFR مربوط به هیدروگراف رواناب خروجی

خروجی در آبیاری جویچه‌ای نیازمند دقت ویژه در انتخاب و واسنجی پارامترهای معادله نفوذ به منظور کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌هاست. پژوهشی که در زمینه تحلیل عدم قطعیت جریان آب در خاک در مدل SWAP توسط Shafiei *et al* (2013) انجام شده است نیز نشان‌دهنده عدم قطعیت بالای نتایج مدل در اثر عدم قطعیت در پارامترهای خاک از قبیل درصد رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع (که همان سرعت نفوذ نهایی است) می‌باشد. در تحقیق Bhavsar and Patel (2018) و Heidari *et al*. (2005) نیز حساسیت و عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در اثر پارامترهای معادله نفوذ SCS و خصوصیات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گزارش شده است.

طبق نتایج مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از تمامی ۱۰۰۰ نمونه تصادفی، ۱۰۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری در محدوده باند اطمینان ۹۵٪ قرار می‌گیرند و پوشش کامل روی داده‌های اندازه‌گیری ایجاد می‌شود ولی از طرف دیگر طبق معیار d-factor در این حالت پهنای باند اطمینان ۴/۳۵ است که نسبتاً وسیع و بزرگ است و نشان‌دهنده عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی‌ها است. ولی در حالت استفاده از معیار $NSE > 0.9$ پهنای باند اطمینان هیدروگراف خروجی به ۰/۶۶ کاهش یافته و درصد پوشش داده‌های اندازه‌گیری در باند اطمینان نیز ۸۳/۳۳ درصد است که هر دو پارامتر مناسب بوده و نشان‌دهنده کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها در صورت انتخاب مناسب پارامترهای معادله نفوذ است و بنابراین مدل‌سازی هیدروگراف رواناب

جدول ۴- نتایج تحلیل عدم قطعیت مدل WinsSRFR در شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب خروجی جویچه

پارامتر عدم قطعیت	کل ۱۰۰۰ شبیه‌سازی	$NSE > 0.9$
درصد داده‌های در باند اطمینان ۹۵٪، 95PPU	۱۰۰	۸۳/۳۳
فاکتور پهنای باند، d-factor	۴/۳۵	۰/۶۶

مناسب در واسنجی ضرایب معادله نفوذ عدم قطعیت نتایج مدل WinSRFR کاهش یافته و مدل قابلیت اطمینان و اعتماد مطلوبی خواهد داشت. طبق مقادیر کمی شاخص‌های عدم قطعیت در جدول (۵) ملاحظه می‌شود که اعمال تابع هدف $NSE > 0.9$ باعث تغییر درصد پوشش از ۱۰۰ به ۹۲/۳۱ و تغییر فاکتور پهنای باند از ۴/۲۲ به ۰/۵۸ شده است و اعمال استراتژی $NSE > 0.9$ در گزینش نمونه‌های پارامتری نفوذ از توابع توزیع مولد احتمالاتی اولیه، عدم قطعیت مدل را به شدت کاهش داده است. همچنین مقایسه مقادیر کمی جدول (۳) با مقادیر کمی جدول (۵) نشان می‌دهد که در حالت کلی عدم قطعیت هیدروگراف خروجی و منحنی پیشروی بسیار زیاد است و در حالت گزینش بهینه پارامترها در هر دو مورد عدم قطعیت کاهش می‌یابد و در این حالت عدم قطعیت در منحنی پیشروی کمتر از عدم قطعیت در هیدروگراف خروجی است. طبق نتایج Nie et al. (2014) نیز حساسیت منحنی پیشروی در مدل WinSRFR نسبت به مقادیر پارامترهای نفوذ بسیار بالا است و نتایج شبیه‌سازی به شدت از تغییرات این پارامترها تاثیر می‌پذیرند. همچنین Khorami and Gharaman (2017) با شبیه‌سازی توزیع رطوبت و نفوذ آب در خاک و حل عددی معادله ریچاردز، عدم قطعیت بالا نسبت به پارامترهای رطوبتی و نفوذ را گزارش نمودند. Esfandiari and Maheshwari (2000) نیز حساسیت بالای مدل SIRMOD به پارامترهای نفوذ را گزارش کرده‌اند که همگی در توافق با نتایج عدم قطعیت پژوهش حاضر است.

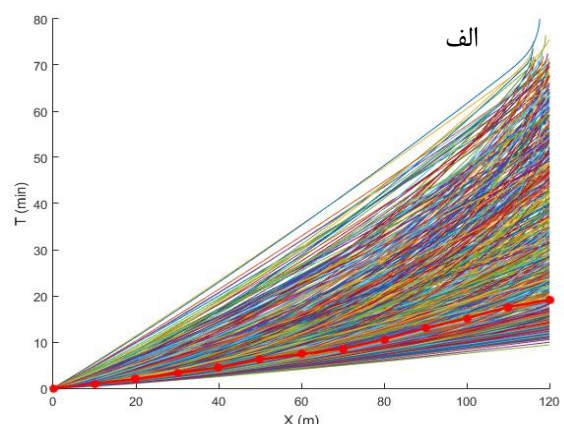
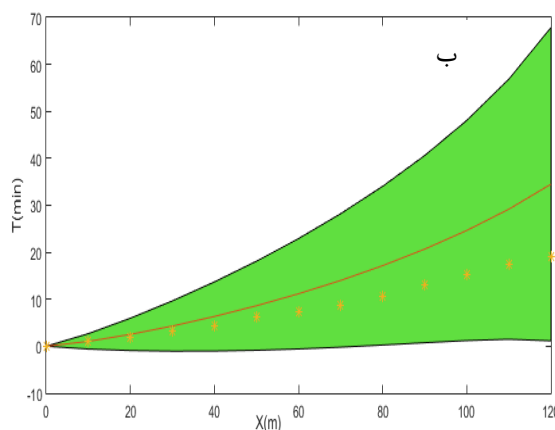
عدم قطعیت منحنی پیشروی

در این قسمت عدم قطعیت حاصله از پارامترهای معادله نفوذ بر منحنی پیشروی در طول جویچه بررسی شده است. در شکل (۱۰- الف وب) به ترتیب طیف پاسخ منحنی پیشروی نسبت به ۱۰۰۰ نمونه تصادفی پارامترها از توابع توزیع مولد (جدول ۲) آمده است. همچنین در شکل (۱۰- ب) باندهای عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده ارائه شده است. مشاهده می‌شود که محدوده باند عدم قطعیت در این حالت بسیار وسیع بوده و نشان‌دهنده عدم قطعیت بالای نتایج مدل نسبت به پارامترهای نفوذ است. به منظور تدقیق بهتر نتایج تحلیل عدم قطعیت و به‌گزینی پارامترهای معادله نفوذ از معیار NSE استفاده شد و بر اساس این معیار از بین مجموعه ۱۰۰۰ نمونه تصادفی تولیدشده ضرایب نفوذی انتخاب شد که معیار $NSE > 0.9$ دارند و مجدداً محاسبات عدم قطعیت روی خروجی‌های WinSRFR انجام شد. طبق نتایج ارائه‌شده در دیاگرام تایلور (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود که اعمال تابع هدف آماره $NSE > 0.9$ در گزینش نمونه‌های تصادفی پارامترهای نفوذ منجر به بهبود نتایج شبیه‌سازی شده و همگرایی مقادیر شبیه‌سازی به مقادیر اندازه‌گیری را باعث شده است.

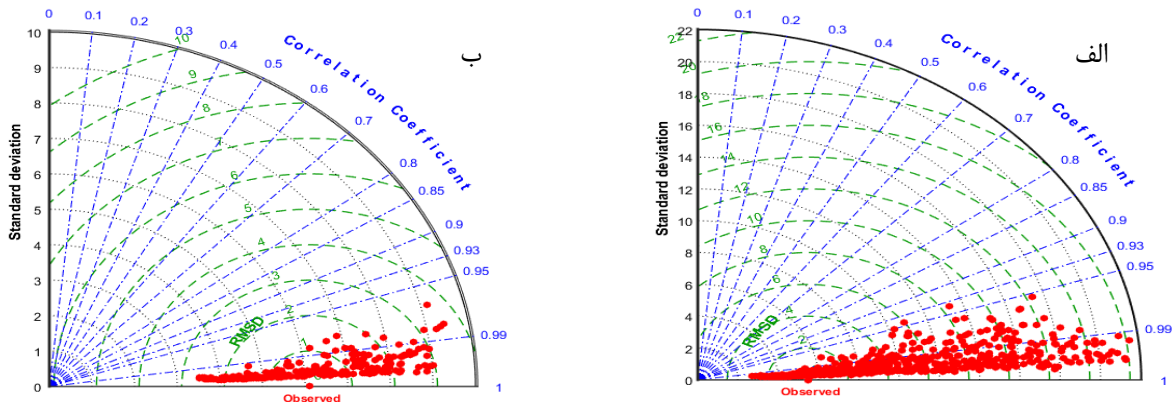
در شکل (۱۱- ب) طیف پاسخ منحنی پیشروی با اعمال تابع هدف $NSE > 0.9$ و باند اطمینان ۹۵٪ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. طبق این شکل در صورت انتخاب استراتژی

جدول ۵- نتایج تحلیل عدم قطعیت مدل WinSRFR در شبیه‌سازی منحنی پیشروی جویچه

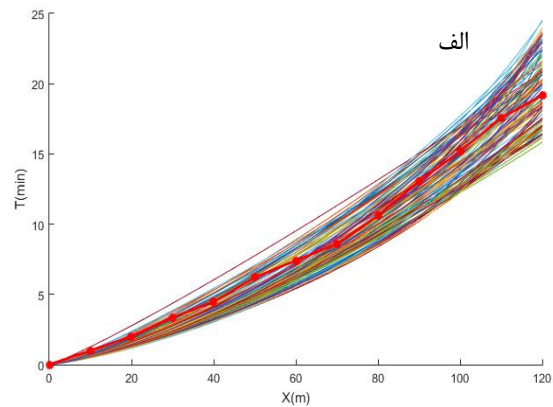
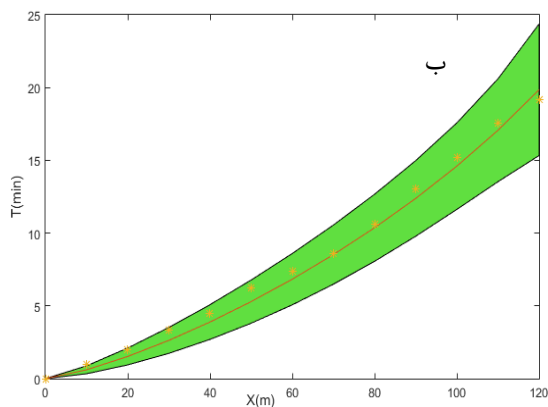
پارامتر عدم قطعیت	کل ۱۰۰۰ شبیه‌سازی	$NSE > 0.9$
درصد داده‌های در باند اطمینان ۹۵٪، 95PPU	۱۰۰	۹۲/۳۱
فاکتور پهنای باند، d-factor	۴/۲۲	۰/۵۸



شکل ۱۰- الف) طیف پاسخ منحنی پیشروی شبیه‌سازی شده در ۱۰۰۰ سری فرآیند مونت کارلو و مشاهداتی و ب) باندهای عدم اطمینان ۱۰۰۰ شبیه‌سازی



شکل ۱۱- توزیع نتایج در دیاگرام تایلور منحنی پیشروی: الف) ۱۰۰۰ شبیه‌سازی و ب) با $NSE > 0.9$ در مقایسه با منحنی پیشروی مشاهداتی



شکل ۱۲- الف) طیف پاسخ نتایج با شرط $NSE > 0.9$ و ب) حدود اطمینان ۹۵٪ مدل WinSRFR مربوط به منحنی پیشروی

معادله نفوذ گردآوری شد و توزیع آماری پسین آن‌ها تعیین شد و سپس با نمونه‌گیری مونت کارلو شبیه‌سازی‌ها انجام شد و ارزیابی دقت مدل و محاسبات عدم قطعیت آن صورت گرفت. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان‌دهنده عدم قطعیت بالا در گزینش اولیه پارامترهای نفوذ آبیاری جویچه‌ای است. حدود ۱۰٪ پیش-بینی‌های مدل WinSRFR در حالت عمومی که خصوصاً دربرگیرنده مقادیر حدی حداکثر و حداقل در باند اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی‌ها است نشان‌دهنده عدم احتمال رخداد عملکردهای خارج از محدوده پیش‌بینی مدل است و بیانگر الگوی مناسب شبیه‌سازی‌هاست ولی پهنای باند اطمینان بزرگتر از ۴ بیانگر وجود عدم قطعیت در پارامترهای نفوذ است. با اعمال معیار $NSE > 0.9$ نمونه‌گیری هدفمند پارامترها انجام شد و در این حالت برای هر دو مورد هیدروگراف خروجی و منحنی پیشروی عرض باند اطمینان عدم قطعیت کمتر از ۱به دست آمد که از مطلوبیت خوبی برخوردار است. علاوه بر این مقادیر d-factor عدم قطعیت در محدوده قابل قبول قرار دارند. طبق نتایج این تحقیق ملاحظه می‌شود که مدل WinSRFR در صورتی که پارامترهای معادله نفوذ آن بر اساس استراتژی‌های مطلوبی انتخاب نشوند،

با اصلاح خطاهای سیستماتیک اندازه‌گیری‌ها در آبیاری جویچه‌ای و اصلاح خطاهای حاصله از ورودی‌های مدل شبیه‌ساز و نیز در نظر گرفتن خطای ساختاری حاصله از فرضیات ساده‌سازی مدل می‌توان موجبات بهبود استنباط پارامترهای معادله نفوذ و کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها را فراهم نمود. رویکرد استفاده‌شده در این تحقیق عدم قطعیت پارامترها، تمامی انواع عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، عدم قطعیت ساختار مفهومی مدل و عدم قطعیت ضرایب و پارامترها را در بردارد. زیرا که جداسازی خطا به مؤلفه‌های منبع خطا مشکل است (Gupta et al., 2005) و خصوصاً در مدل‌های با ساختار غیرخطی آبیاری سطحی اندرکنش منابع خطا باعث افزایش انحراف از مقادیر اندازه‌گیری می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل WinSRFR در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای با توسعه رویکرد تحلیل پسین ضرایب نفوذ و شبیه‌سازی ۱۰۰۰ نمونه مونت کارلو انجام شد. بدین منظور ابتدا مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده ضرایب

شبیه‌سازی، مناطق مستعد ابتلا به عدم اطمینان بالاتر یا پایین‌تر وجود دارد. با این حال عدم قطعیت مدل در حالت $NSE > 0.9$ مطلوب بوده و نتایج شبیه‌سازی‌ها بیانگر لزوم توجه به عدم قطعیت‌های مدل در شرایط انتخاب پارامترهای نفوذ علیرغم دقت مطلوب شبیه‌سازی‌ها است. روش‌شناسی انجام این تحقیق به نحو مطلوبی مفاهیم عدم قطعیت را در مدل‌های شبیه‌سازی آبیاری سطحی مبتنی بر رویکرد مونت کارلو وارد نموده و با توجه به نتایج مناسب و منطقی به‌دست‌آمده، استفاده از این روش در مدل‌سازی و مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی توصیه می‌شود. مطالعات انجام‌شده در این پژوهش می‌تواند مکمل مطالعات ارزیابی دقت نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌سازی سیستم آبیاری جویچه‌ای باشد و برنامه‌ریزان به‌جای مواجهه با یک رقم واحد به‌عنوان پیش‌بینی، ترکیب این رقم و باند اطمینان را در اختیار داشته و می‌توانند تصمیمات واقع‌بینانه‌تری اتخاذ نمایند.

REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., and Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Afshar, V. (2015). Effect of polyacrylamide application on run-off, erosion and nutrient losses in common and alternative furrows irrigation. MS Thesis, Bu Ali-Sina University, Hamedan, Iran.
- Akbari, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B. and Shayannejad, M. (2018). Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management*, 201, 46-57.
- Arabi, H., (2017). Evaluation and comparison of three methods of infiltration management in furrow irrigation. MS Thesis, Bu Ali-Sina University, Hamedan, Iran.
- Azad, N., Rezaerdinejad, V., Besharat, S.; Behmanesh, J. and Ashraf Sadraddini, A. (2017). Optimization of surge irrigation system based on irrigation and furrow geometric variables using SIRMOD model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 7(1), 151-166. (In Farsi)
- Bates, B. C., and Townley, L. R. (1988). Nonlinear, discrete flood event models, 3. Analysis of prediction uncertainty. *Journal of Hydrology*, 99, 91-101.
- Bautista, E. (2016). Effect of infiltration modeling approach on operational solutions for furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001090)
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and Niblack, M., (2009a). Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR—Example application. *Agricultural Water Management*, 96, 1162-1169.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., and Schlegel, J. L. (2009b). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96, 1146-1154.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., and Strelkoff, T.S. (2009c). Structured application of the two-point method for the estimation of surface irrigation parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 566-578.
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18-36, 2006.
- Bhavsar, P. N., and Patel, J. N. (2018). Event-based rainfall-run-off modeling and uncertainty analysis for lower Tapi Basin, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-10.
- Clemmens, A. J., Detric, A. R. and Strand, R. J., (1995). BASIN—a computer program for the design of level-basin irrigation systems, version 2.0, WCL Report 19. USDA-ARS U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.
- Cahoon, J. (1998). Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(2), 127-130.
- DeGroot, M. H. (1986). Probability and statistics, 2nd Ed., Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Dybowski, R. (1997). Assigning confidence intervals to neural network predictions Technical report, Division of Infection (St Thomas' Hospital), King's College London, UK, 2 March 1997, available at <http://www.umds.ac.uk/microbio/richard/nnci.pdf>
- Esfandiari, M. and Maheshwari, B., (2000). Sensitivity of a furrow irrigation model to input parameters. *International Agricultural Engineering Journal*, 9(3):117-128
- Gallagher, M. and Doherty, J., 2007. Parameter

علیرغم دقت نسبتاً مطلوبی در پیش‌بینی‌ها، دارای عدم قطعیت زیاد خواهد بود. عواملی همچون تغییرات زمانی و مکانی ضرایب نفوذ، پیچیدگی‌های هندسی جویچه و تأثیر آن بر هیدرولیک جریان در طول جویچه، فرسایش و انتقال رسوبات و تغییرات قدرت جریان و نیروی برشی در طول جویچه، تداخل امواج دینامیک و سینماتیکی در طی فرآیند پیشروی و پسروی در طول جویچه باعث حساسیت نتایج به ضرایب و پارامترهای مدل می‌شوند. به این منظور با اعمال آماره هدف $NSE > 0.9$ محدوده مطمئن‌تری برای پارامترهای معادلات نفوذ مشخص شده و عدم قطعیت خروجی‌های مدل نیز کاهش می‌یابد و در محدوده قابل‌پذیرش قرار می‌گیرند. نتایج این مرحله نشان دادند که عدم قطعیت در یک شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب خروجی و منحنی پیشروی به‌طور یکنواخت در طول دامنه محاسباتی توزیع شده نیست و در محدوده و باند تغییرات متغیرهای مؤثر بر فرآیند

- estimation and uncertainty analysis for a watershed model. *Environmental Modelling and Software*, 22(7): 1000-1020.
- Ghahremannejad, M., Boroomandnasab, S. and Sheini Dashtegol, A. (2016). Determining the optimum values of the design parameters for furrow irrigation with WinSRFR 3.1 model (Case study: sugarcane fields of southern Ahvaz). *Water and Soil Science*, 26(1-1): 117-130. (In Farsi)
- Gholami Sefidkouhi, M. A. and Koulaian, A. (2014). Field evaluation and sensitivity analysis of the SIRMOD model in furrow irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(3): 473-483. (In Farsi)
- Gillies, M. H. (2008) Managing the effect of infiltration variability on surface irrigation. PhD Thesis, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia.
- Gupta, H. V. (2005, December). Transforming Information into Models: A Discussion of Uncertainty and Its Treatment. In AGU Fall Meeting Abstracts. American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, abstract id. H11E-01.
- Heidari, A., B. Saghfian and R. Maknoon. (2005). Flood Hydrograph Simulation with Uncertainty in Rainfall - Runoff Parameters. *jame*. 23 (2) :93-111 URL: <http://jame.iut.ac.ir/article-1-321-fa.html>
- Heydari, N. and Abbasi, F., (2016). Optimization of design and management parameters of border irrigation: A case study of Ramshir irrigation and Drainage network, *Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering*, 17(66): 55-70.
- Jacquin, A. P., and Shamseldin, A. Y. (2007). Development of a possibilistic method for the evaluation of predictive uncertainty in rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, W04425.
- Khoi, D. N., and Thom, V. T. (2015). Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. *Global Ecology and Conservation*, 4, 538-548.
- Khorammi, M., and Ghahraman, B. (2017). Analyzing the Effect of Uncertainty of Soil Parameters on Soil Moisture Profile Uncertainty using Fuzzy Set Theory. *Iran-water resources research Journal*. 13(1):126-138.
- Marcé, R., Comerma, M., García, J. C., and Armengol, J. (2004). A neuro- fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time- varying human impact. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2(11), 342-355.
- McClymont, D. J., Raine, S. R. and Smith, R. J. (1996). The prediction of furrow irrigation performance using the surface irrigation model SIRMOD, Irrigation Australia Conference and Exhibition, May 14-17, Adelaide, Convention and Exhibition Centre South Australia, 10p.
- Moradzadeh, M., Boroomandnasab, S., Lalehzari, R. and Bahrami, M., (2013). Performance evaluation and sensitivity analysis of various models of SIRMOD software in furrow irrigation design. *Water Engineering*, 6(18), 63-73. (In Farsi).
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nie, W., Fei, L., and Ma, X. (2014). Impact of infiltration parameters and Manning roughness on the advance trajectory and irrigation performance for closed-end furrows. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 1180-1191.
- Rezaverdinejad, R., Ahmadi, H., Hemmati, M. and Ebrahimian, H. (2016). Evaluation and comparison of different approaches of infiltration parameters estimation under different furrow irrigation systems and inflow regimes, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. *Water and Soil Science*, 20(76): 161-176. (In Farsi)
- Riahi-Madvar, H., Ayyoubzadeh, S., Namin, M., and Seifi, A. (2011). Uncertainty analysis of quasi-two-dimensional flow simulation in compound channels with overbank flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 59(3), 171-183.
- Riahi-Madvar, H., Khashaei, A., Seifi, A. (2017). Accuracy and uncertainty analysis of artificial neural network in predicting saffron yield in the south Khorasan province based on meteorological data. *Saffron agronomy and technology Journal*, 17(3), 255-271. DOI: 10.22048/jsat.2017.31901.1100 (In Farsi)
- Salahou, M. K., Jiao, X., and Lü, H. (2018). Border irrigation performance with distance-based cut-off. *Agricultural Water Management*, 201, 27-37.
- Sayari, S., Rahimpour, M. and Zounemat Kermani, M. (2016). Evaluation of furrow irrigation for different inflow hydrographs. *Journal of Water and Irrigation Management*, 5(2): 191-202. (In Farsi)
- Shafiei, M., Ansari, H., Davari, K., and Ghahreman, B. 2013. Calibration and uncertainty analysis of a semi-distributed model of soil water in a semi-arid region. *Water and Soil Science Journal* 17 (44): 137- 49. (In Persian with English Summary).
- Soroush, F. (2012). Numerical simulation and evaluation of fertigation and hydraulic performance of meandering furrow irrigation. PhD Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Soroush, F., Akhavan, S., and Afshar, V. (2015). Effect of polyacrylamide application on soil erosion in conventional and alternate furrow irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 9(1): 152-162. (In Farsi)
- Strelkoff, T. S. and Clemmens, A. J. (2007). Hydraulics of surface systems. Design and operation of farm irrigation systems, G. Hoffman and R. G. Evans, eds., American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J. and Schmidt, B. V. (1998). SRFR, Version 3.31—A model for

- simulating surface irrigation in borders, basins and furrows. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ
- Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J., Schmidt, B. V. and Slosky, E. J. (1996). BORDER—A Design and Management Aid for Sloping Border Irrigation Systems. WCL Report 21. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.
- Taghizadeh, Z., Verdinejad, V. R., Ebrahimian, H. and Khanmohammadi, N. (2013). Field evaluation and analysis of surface irrigation system with WinSRFR (Case Study Furrow Irrigation), *Journal of Water and Soil*, 26(6), 1450-1459. (In Farsi).
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Tibshirani, R. (1996). A comparison of some error estimates for neural network models. *Neural Computation*, 8(1), 152-163.
- Valipour, M. and Montazar, A. A. (2012). Sensitive analysis of optimized infiltration parameters in SWDC model. *Advances in Environmental Biology*, 2574-2582.
- Walker, W. R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 129-136.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). *Surface irrigation: Theory and Practice*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 386p.
- Walker, W. R., and Kasilingam, B. (2004). Another look at wetted perimeter along irrigated furrows—Modeling implications. Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress (EWRI/ASCE), ASCE, Reston, Va.
- Walker, W.R. and Humpheys, A. S. (1983). Kinematic wave furrow irrigation model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109: 377-392.
- Zerihun, D., Feyen, J. and Reddy, J. M. (1996). Sensitivity Analysis of Furrow-Irrigation Performance Parameters, ASCE, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(1): 49-57.