



Research Paper

Simulation and Evaluation of Furrow Irrigation in Potato Cultivation using SIRMOD Model

Kobra Lohrasbi¹, Mojtaba Khoshravesh^{2*} and Ali Ghadami Firouzabadi³

¹M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

²Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

³Assoc. Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran

Article information

Received: August 05, 2021

Revised: September 09, 2021

Accepted: September 10, 2021

Keywords:

Advanced Time
Application Efficiency
Hydrodynamic
Recession Time

*Corresponding author:
m.khoshravesh@sanru.ac.ir



Abstract

Surface irrigation models are tools for evaluating and designing surface irrigation methods. Using it, all stages of complete irrigation can be simulated and designed, and by changing the input factors, which are in fact design factors, a high-efficiency system can be achieved. The purpose of this study is to investigate the parameters of the infiltration equation, the depth of infiltrated water in the field, and the field evaluation parameters including water use efficiency in the field, percentage of runoff losses, uniformity efficiency, and deep infiltration by SIRMOD software. In this study, first, the required data were collected from the farm located in Kaboudar Ahang plain of Tasaran village with field measurements, then the existing models in SIRMOD software were evaluated and simulated which includes hydrodynamic model, zero-inertia, and kinematic wave. The results showed that the data estimated by the model were consistent with the advanced time data observed in the field. The best simulation results for infiltrated volume were predicted with an average error of 5.5%, and runoff volume was predicted with an average error of 0.8%. In general, based on the results of this study, the SIRMOD software has performed a good simulation of the furrow irrigation system.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

The most common irrigation method in Iran is surface irrigation. Most well-designed and managed irrigation systems have the ability to have an application efficiency above 90%, but most furrow irrigation systems have a lower application efficiency, which is mainly due to

poor design, inefficient management, and lack of evaluation and implementation of systems. One way to improve the performance and management of furrow irrigation is to use surface irrigation models. Having a proper mathematical model can prevent the repetition of many field experiments. Mathematical models of surface



irrigation are based on the equations of Saint-Venant, which the difference between them is in the form of applying the momentum equation. One of the most popular software that examines the three models of kinematic wave, hydrodynamic, and zero-inertia is the SIRMOD software, developed by Walker and Skogerboe (1987) at Utah State University, which is widely used in irrigation management and design. SIRMOD software covers all surface irrigation methods (strip, furrow, and basin) and can check different wave and cut-off currents. Despite the widespread use of SIRMOD software in different parts of the world to simulate and evaluate surface irrigation systems, this software has been less used in Iran. Hamedan province is also one of the major agricultural production areas of the country. This province, with 1.2% of the country's area, ranks first in terms of land use among other provinces. Among these, the main limiting factor of agriculture in this region in recent years is the issue of water and declining groundwater levels. The crisis of limited water resources in different parts of the country, especially in Hamadan province, has been significant in recent years. For this reason,

increasing water efficiency and optimal use of water resources is a necessity of the agricultural sector of Hamadan province. The purpose of this study is to investigate the parameters of infiltration equation, depth of infiltrated water in the field, and field evaluation parameters including water use efficiency in the field, percentage of runoff losses, uniformity efficiency, and deep percolation.

Materials and methods

In the present study, the data of potato cultivation farms located in the Kaboudar Ahang plain of Tasaran village of Hamedan province were used. The soil texture was clay loam and the water source of the farm was well and the irrigation method used in this farm was furrow irrigation. The area of the farm was one hectare, the length of the furrows was 130 meters and the width of each furrow was 75 centimeters. Some measured field parameters and information include field slope, determination of inlet flow to furrows, applied irrigation program, outflow runoff measurement, determination of advanced and recession time, and Faro geometric parameters. Specifications of the farm studied was showed in Table 1.

Table 1. Specifications of the studied farm

Irrigation Method	The length of the Furrow (m)	Width of Furrow (m)	Farm Area (ha)	Farm Slope (m/m)	Soil Texture
Furrow Irrigation	130	0.75	1	0.0035	Clay loam

First, the important input parameters were identified in furrow irrigation that may have significant errors in measuring or estimating them in the field. These parameters were cut-off time, input flow, Manning roughness coefficient, infiltration equation coefficients, and furrow slope. Therefore, these parameters were entered in the sensitivity analysis of this study to quantify the relative impact of each on the output

indicators including water use efficiency, water requirement efficiency, uniformity distribution coefficient, surface runoff ratio and advanced and recession times. In the sensitivity analysis of each input parameter, the value of change was considered equal to $\pm 50\%$ to provide the necessary conditions for sensitivity analysis, which the values are shown in Table 2.

Table 2 Input parameters to the SIRMOD model with the change of 50%

Parameter	Initial value	+50 % of Initial Value	-50 % of Initial Value
q (Lit/s)	1.39	2.085	0.695
Tcot (min)	100	150	50
k (m ³ /m/m)	0.00625	0.009375	0.003125
a	0.28	0.42	0.14
n	0.03	0.045	0.015
s (m/m)	0.0035	0.00525	0.00175

To compare and evaluate the accuracy of SIRMOD software in the prediction of advanced and recession time, infiltrated volume, and runoff volume, the statistical indicators of RMSE, R², EF and RE were used.

Results

The results of sensitivity analysis showed that the infiltration parameters of the Kostiakov-Lewis equation had the most impact on the calculation of water requirement efficiency. The current cut-

off time and inlet flow are in the next rank of this effect on water requirement efficiency. The results of Table 3 show that SIRMOD software has well estimated the amount of infiltration with all three models of the kinematic wave, zero-inertia, and hydrodynamic. In the middle and end of the season, the amount of runoff in all three models was higher than the amount of runoff

measured in the field, and consequently, the amount of water infiltrated in all three models was less than the amount measured in the field. In general, the lowest relative error rate of infiltrated water volume in all three models of hydrodynamics, zero inertia, and the kinematic wave is related to the beginning and end of the season.

Table 3 The comparison of measured and calculated values of infiltration by different models of SIRMOD software

Irrigation time	Input Water (m ³)	Kinematic Wave		Zero-Inertia		Hydrodynamic		Measured	
		Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)
Beginning of Season	8.34	2.1	6.3	2.1	6.2	2.1	6.2	1.99	6.35
Middle of Season	9.6	2.5	7.1	2.5	7.1	2.5	7.1	3.19	6.41
End of Season	9.9	2.6	7.4	2.6	7.3	2.6	7.3	2.8	7.1

Regarding the effect of inlet flow on furrow, it can be said that in all three models of hydrodynamic, zero-inertia, and kinematic wave, with increasing the inlet flow to the furrow at a constant length, the predicted values were estimated with higher accuracy. As the furrow length decreased, the simulation accuracy of all three models of hydrodynamic, zero-inertia, and kinematic wave increased.

Conclusion

According to the findings of this study, it can be concluded that: All three models predicted the best-simulated results of infiltrated volume with an average error of 5.5% and for runoff volume with an average error of -0.8%. So that the application efficiency with an error of less than 8% and the uniformity efficiency with an error of less than 1% and the output runoff for the

beginning and end of the season with a relative error of less than 4% are well estimated by all three models. For the middle of the season, the output runoff with a relative error of less than 11% is less accurate than at the beginning and end of the season. Input flow and infiltration parameters had the most effect on the advanced time. The cut-off time also had the least effect on the recession time.

Data Availability

Data can be sent from the corresponding author by email upon request.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir



مقاله پژوهشی

شبیه سازی و ارزیابی آبیاری جویچه ای در کشت سیب زمینی با استفاده از مدل SIRMOD

کبری لهراسبی^۱، مجتبی خوش روش^{۲*} و علی قدمی فیروز آبادی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

^۳ دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج، همدان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۵/۱۴]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۶/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۶/۱۹]

واژه های کلیدی:

راندمان کاربرد

زمان پسروری

زمان پیشروی

هیدرودینامیک

* نویسنده مسئول:

m.khoshravesh@sanru.ac.ir



چکیده

مدل های آبیاری سطحی وسیله ای جهت ارزیابی و طراحی روش های آبیاری سطحی هستند. با استفاده از آن می توان تمام مراحل یک آبیاری کامل را شبیه سازی و طراحی و با تغییر عوامل ورودی که در حقیقت عوامل طراحی هستند به سامانه ای با راندمان بالادست یافت. هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای معادله نفوذ، عمق آب نفوذ یافته در مزرعه، پارامترهای ارزیابی مزرعه شامل راندمان کاربرد آب در مزرعه، درصد تلفات رواناب، راندمان یکنواختی و نفوذ عمقی به وسیله نرم افزار SIRMOD است. ابتدا داده های مورد نیاز از محل مزرعه ای واقع در دشت کبودرآهنگ روستای طاسران با اندازه گیری های صحرائی جمع آوری شد. سپس مدل های موجود در مدل SIRMOD که شامل مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک است مورد ارزیابی و شبیه سازی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده های برآورد شده توسط مدل با داده های زمان پیشروی مشاهده شده در مزرعه مطابقت داشت. بهترین نتایج شبیه سازی حجم نفوذ یافته با متوسط خطای ۵/۵٪ و برای حجم رواناب با متوسط خطای ۸/۰٪ پیش بینی شد. به طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش، نرم افزار SIRMOD شبیه سازی مناسبی از سیستم آبیاری جویچه ای انجام داد.

۱- مقدمه

ایران جزو مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب می شود. محدودیت آب در ایران به یکی از عمده ترین مسائل در کشور تبدیل شده است. رایج ترین روش آبیاری در ایران، روش آبیاری سطحی است. میانگین بارندگی کشور mm/yr ۲۵۰ است که در حدود یک سوم میانگین جهانی است هم-چنین میانگین تبخیر آن mm ۲۱۰۰ می باشد که سه برابر میانگین جهانی است (Khoshravesh et al. 2018). بیش تر از ۸۰٪ آب شیرین در جهان و بیش تر از ۹۲٪ آب در کشور ایران در بخش کشاورزی مصرف می شود (Mohamad Jani and Yazdanian 2014). با توجه به این نکته، مدیریت بهینه آبیاری در بخش کشاورزی یکی از مهم ترین و اصلی ترین راهکارهای مقابله با مسئله بحران آب است. بیش

ایران جزو مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب می شود. محدودیت آب در ایران به یکی از عمده ترین مسائل در کشور تبدیل شده است. رایج ترین روش آبیاری در ایران، روش آبیاری سطحی است. میانگین بارندگی کشور mm/yr ۲۵۰ است که در حدود یک سوم میانگین جهانی است هم-چنین میانگین تبخیر آن mm ۲۱۰۰ می باشد که سه برابر میانگین جهانی است (Khoshravesh et al. 2018). بیش تر از ۸۰٪ آب شیرین در جهان و بیش تر از ۹۲٪ آب در کشور ایران در بخش کشاورزی مصرف می شود (Mohamad Jani and Yazdanian 2014). با توجه به این نکته، مدیریت بهینه آبیاری در بخش کشاورزی یکی از مهم ترین و اصلی ترین راهکارهای مقابله با مسئله بحران آب است. بیش



(Ebrahimian and Liaghat 2011) در پژوهشی نشان دادند که نرم‌افزار SIRMOD به‌طور موفقیت‌آمیزی می‌تواند سامانه‌های مختلف آبیاری سطحی را شبیه‌سازی نماید. (Gholami Sefidkouhi and Koulaian 2014) مدل‌های هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک موجود در بسته نرم‌افزار SIRMOD را مورد ارزیابی و آنالیز حساسیت قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از این است که مدل هیدرودینامیک، زمان‌های پیشروی و پسروی را با دقت بیش‌تری شبیه‌سازی می‌کند. همچنین تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولیکی نشان داد که پارامترهایی مانند دبی جریان، ضرایب معادله نفوذ و زمان قطع جریان تأثیر زیادی بر راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، نسبت رواناب و ضریب یکنواختی توزیع پایاب دارد. (Mahdizadeh et al. 2014) در تحقیقی به شبیه‌سازی سامانه‌های آبیاری نواری انتها باز و بسته با استفاده از نرم‌افزار SIRMOD پرداختند. برای این منظور، ۲۲ مجموعه داده شامل چهار نوار بدون کشت، ۹ نوار انتها باز بدون کشت و ۹ نوار انتها بسته برای کشت استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌ها شرایط نوارهای انتها باز را بهتر از نوارهای انتها بسته برای زمان پیشروی پیش‌بینی کرده‌اند. علاوه بر این، مدل‌های هیدرودینامیکی و اینرسی صفر، حجم آب نفوذ یافته را برابر یا کم‌تر از حجم آب مشاهده شده در تمام نوارها تخمین زده‌اند. اگرچه مدل هیدرودینامیک بدون ساده‌سازی از معادلات سنت -ونانت استفاده می‌کند، در حین حل عددی آن‌ها توسط مدل، عدم اطمینان به دلیل محاسبه‌های بیش‌تر نسبت به مدل‌های اینرسی صفر و موج سینماتیک مطرح می‌شود. این منجر به خطای بیش‌تر در مدل هیدرودینامیک در برخی موارد می‌شود. (Farasati et al. 2018) دقت شبیه‌سازی نرم‌افزارهای SIRMOD و WinSRFR را در مزرعه کشاورزی دانشگاه رازی مورد مقایسه و بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که درصد متوسط خطای پیش‌بینی زمان پیشروی در مدل WinSRFR به میزان ۷٪ کم‌تر از نرم‌افزار SIRMOD بود.

علی‌رغم پر کاربرد بودن نرم‌افزار SIRMOD در نقاط مختلف جهان جهت شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی، این نرم‌افزار در ایران کم‌تر استفاده شده است. استان همدان نیز یکی از مناطق عمده تولید کشاورزی کشور است. عمده‌ترین عامل محدود کننده کشاورزی این منطقه در چند سال اخیر، مسئله آب و افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی است.

تر سامانه‌های آبیاری که طراحی و مدیریت خوبی دارند دارای این قابلیت هستند که راندمان کاربرد بالای ۹۰٪ باشند ولی اکثر سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای راندمان کاربرد پایین‌تری دارند که عمدتاً به دلیل طراحی ضعیف، مدیریت ناکارآمد، عدم ارزیابی و اجرای نادرست سامانه‌ها است. (Mokari Gahroodi et al. 2013).

یکی از راه‌های بهبود عملکرد و مدیریت آبیاری جویچه‌ای، استفاده از مدل‌های آبیاری سطحی است. با داشتن یک مدل ریاضی مناسب می‌توان از تکرار بسیاری از آزمایش‌های مزرعه‌ای جلوگیری کرد. مدل‌های ریاضی آبیاری سطحی بر اساس معادلات سنت و نانت استوار هستند که تفاوت آنها در فرم به‌کارگیری معادله مومنتم است. یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارها که سه مدل موج سینماتیک، هیدرودینامیک و اینرسی صفر را مورد بررسی قرار می‌دهد، نرم‌افزار SIRMOD است که توسط Walker and Skogerboe (1987) در دانشگاه ایالتی یوتای ایالت متحده توسعه یافته است که کاربرد زیادی در مدیریت و طراحی آبیاری سطحی دارد. نرم‌افزار SIRMOD همه شیوه‌های آبیاری سطحی (نواری، شیری و کرتی) را در بر می‌گیرد و می‌تواند رژیم‌های مختلف جریان موجی و قطع جریان را بررسی نماید (Walker and Babazadeh 2005). (Behbahani and Babazadeh 2005) با استفاده از نرم‌افزار SIRMOD آنالیزهایی انجام داد که منجر شد بتواند مناسب‌ترین زمان قطع جریان و طول جویچه و اثرات آن‌ها را بر هم تحلیل نماید. Zeinalzadeh et al. (2008) در تحقیقی به تحلیل حساسیت پارامترهای آبیاری شیری با استفاده از SIRMOD پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص حساسیت برای رواناب خیلی زیاد و برای زمان‌های پسروی کم بود. در حالی که مقادیر شاخص حساسیت برای زمان‌های پیشروی متعادل بود. (Clark et al. 2009) در مطالعه‌ای نشان دادند که نرم‌افزار SIRMOD ابزاری مفید و کاربردی برای ارزیابی آبیاری سطحی است. (Bagheri and Alipour Hafshejani 2011) مدل‌های آبیاری سطحی در آبیاری جویچه‌ای نیشکر واقع در استان خوزستان را ارزیابی کردند. بررسی نتایج مرحله پسروی به‌وسیله نرم‌افزار SIRMOD حاکی از پیش‌بینی بسیار خوب کلیه مدل‌ها در این مرحله است. هم‌چنین در مرحله پیشروی نیز اختلاف بین پیش‌بینی توسط مدل و شرایط مزرعه، کم بود که نشان دهنده پیش‌بینی بسیار خوب مدل‌ها است.

مزرعه 1 ha، طول فاروها 130 m و عرض هر فارو 75 cm بود (شکل ۱). برخی پارامترها و اطلاعات اندازه‌گیری شده صحرائی شامل شیب مزرعه، تعیین دبی ورودی به جویچه‌ها، برنامه آبیاری اعمال شده، اندازه‌گیری رواناب خروجی، تعیین زمان پیشروی و پسروی و پارامترهای هندسی فارو است. جدول (۱) مشخصات مزرعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ارزیابی فنی این مزارع که تحت کشت سیب‌زمینی بودند، در سه مرحله اول، وسط و آخر فصل زراعی انجام شد.



شکل ۱- نمایی از مزرعه مورد مطالعه
Fig. 1 View of the studied farm

بحران محدودیت منابع آبی در مناطق مختلف کشور و به‌ویژه در استان همدان طی سال‌های اخیر حائز اهمیت بوده است. به همین دلیل افزایش کارایی آب و استفاده بهینه از منابع آب از ضروریات بخش کشاورزی استان همدان محسوب می‌شود. در این پژوهش با استفاده از آزمایش صحرائی و کشت گیاه سیب‌زمینی در شهرستان کبودرآهنگ از توابع استان همدان به بررسی پارامترهای معادله نفوذ، عمق آب نفوذ یافته در مزرعه، پارامترهای ارزیابی مزرعه شامل راندمان کاربرد آب در مزرعه، درصد تلفات رواناب، راندمان یکنواختی و نفوذ عمقی توسط نرم‌افزار SIRMOD پرداخته شد.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر از داده‌های مزرعه کشت سیب زمینی واقع در شهرستان کبودرآهنگ (روستای طاسران) واقع در شمال غربی استان همدان با طول جغرافیایی 48° و $61'$ شرقی و عرض جغرافیایی 35° و $34'$ شمالی استفاده شد. بافت خاک مزرعه لوم رسی، منبع آب مزرعه چاه و روش آبیاری مورد استفاده در این مزرعه، آبیاری جویچه‌ای بوده است. مساحت

جدول ۱- مشخصات مزرعه مورد مطالعه

Table 1 Specifications of the studied farm

Irrigation Method	Furrow Length (m)	Width of Furrow (m)	Farm Area (ha)	Farm Slope (m/m)	Soil Texture
Furrow Irrigation	130	0.75	1	0.0035	Clay Loam

شدت جریان (m^3/m) ، I_x شدت نفوذ $(m^3/s/m)$ ، S_0 شیب کف (m/m) ، S_f شیب اصطکاکی (m/m) ، g شتاب ثقل (m^2/s) ، t زمان (s) و V سرعت جریان (m/s) است. D ثابت عددی است به قانونی که معادله اندازه حرکت از آن استخراج شده بستگی دارد. اگر معادله اندازه حرکت از قانون دوم نیوتن استخراج شده باشد، این مقدار برابر یک است و اگر از قانون انرژئ مشتق شده باشد، برابر با $0/5$ است (Abbasi 2012).

۲-۱- مدل هیدرودینامیک

پیچیده‌ترین و دقیق‌ترین مدل شبیه‌سازی، مدل هیدرودینامیک است که از فرم کامل معادلات سنت و نانت یعنی هر دو معادله پیوستگی و مومنتم استفاده می‌کند. به دلیل دقت و صحت آن‌ها، اغلب برای ارزیابی و واسنجی مدل‌های ساده‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ebrahimian and Liaghat 2011).

در آبیاری سطحی، جریان آب از نوع متغیر مکانی و ناپایدار است؛ بنابراین برای تشریح حرکت آب در مدل‌های آبیاری سطحی، از زوج معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که به معادلات سنت و نانت موسوم است، استفاده می‌شود. این معادلات اولین بار توسط سنت-ونانت^۱ در سال ۱۸۷۱ معرفی شدند (Alizadeh 2004). این معادلات پس از تعدیل به فرم معادله پیوستگی به صورت رابطه (۱) و معادله اندازه حرکت (مومنتم) به صورت رابطه (۲) ارائه شد.

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial X} + I_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{DVI}{2gA} \quad (2)$$

که در آن، A سطح مقطع جریان (m^2) ، X فاصله از ابتدای زمین در امتداد جریان آب (m) ، y عمق جریان (m) ، Q

^۱Saint- Venant

۲-۲- مدل اینرسی صفر

اینرسی در معادله مومنتم اغلب در مقایسه با شیب کف و شیب اصطکاک ناچیز می‌باشد و به این معنی است که عمق جریان در طول فارو یکنواخت است. یعنی در معادله مومنتم، در مدل موج سینماتیک، علاوه بر عبارت شتاب از عبارت شیب عمق به دلیل کوچک بودن صرف نظر می‌شود. با این فرضیات یک رابطه منحصر به فردی بین سطح مقطع جریان و دبی (به‌عنوان تابعی از عمق جریان) می‌تواند طبق یکی از معادلات جریان یکنواخت نظیر رابطه مانینگ به‌دست آید (به صورت رابطه ۴). عموماً مدل‌های موج سینماتیک ساده بوده و زمان محاسباتی کم‌تری در مقایسه با مدل‌های اینرسی صفر نیاز دارد.

مدل اینرسی صفر یک شکل ساده‌شده از مدل هیدرودینامیک است که توسط Katopodes and Strelkoff (1977) ارائه شد. در این مدل معادله پیوستگی ثابت است و فرض اصلی این است که با توجه به این که در آبیاری سطحی سرعت کم است، از شتاب معادله مومنتم و ترم‌های اینرسی در بیش‌تر شرایط آبیاری سطحی صرف نظر می‌شود. با صرف نظر از عبارات اینرسی، رابطه (۱) به رابطه (۳) تبدیل می‌شود.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (3)$$

۲-۳- مدل موج سینماتیک

روش موج سینماتیک نیز معادله پیوستگی ثابت است و بر این فرض استوار است که شیب عمق جریان و نیز ترم‌های

$$S_0 = S_f \quad (4)$$

جدول ۲- پارامترهای ورودی به نرم‌افزار SIRMOD با تغییر $\pm 50\%$

Table 2 Input parameters to the SIRMOD model with the change of $\pm 50\%$

Parameter	Initial Value	+50 % of Initial Value	-50 % of Initial Value
q (l/s)	1.39	2.085	0.695
Tcot (min)	100	150	50
k (m ³ /m/m)	0.00625	0.009375	0.003125
a	0.28	0.42	0.14
n	0.03	0.045	0.015
s (m/m)	0.0035	0.00525	0.00175

q : دبی جریان، $Tcot$: زمان قطع جریان، K : ضریب نفوذ، a : توان نفوذ و s : شیب معادله نفوذ

۲-۴- آنالیز حساسیت مدل

جهت کمی کردن مقدار حساسیت هر یک از پارامترهای ورودی، رابطه‌ای به صورت رابطه (۵) به کار گرفته شد.

$$S = \frac{100 \sum_{i=1}^N \frac{(X_{ni} - X_{ci})}{X_{ci}}}{\Delta} \quad (5)$$

که، N : تعداد نقاط برای یک پارامتر خروجی، X_{ni} : مقدار جدید پارامتر خروجی در نقطه i ام به ازای تغییر در پارامتر ورودی، X_{ci} : مقدار پارامتر خروجی در نقطه i ام در حالت اجرای کنترل شبه‌سازی، بدون تغییر در پارامتر ورودی و Δ : مقدار مطلق تغییر در پارامتر ورودی است. علامت منفی در پارامتر شاخص حساسیت نشان دهنده این است که مقدار آن پارامتر نسبت به حالت اولیه خود در تجزیه تحلیل کم‌تر و علامت مثبت نشان می‌دهد که مقدار آن پارامتر در آنالیز حساسیت نسبت به حالت اولیه بیش‌تر شده است. در این پژوهش از روش متفاوتی استفاده شد به‌گونه‌ای که به‌طور هم‌زمان و به‌طور ترکیبی دو پارامتر تغییر داده شد و سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند تا با این روش بتوان اثر هم‌زمان پارامترهایی که در تحلیل حساسیت تک متغیره‌ای مؤثرتر بودند، بررسی شود. در مجموع شش حالت شامل

در این راستا، ابتدا پارامترهای ورودی مهمی را که در آبیاری جویچه‌ای ممکن است در اندازه‌گیری و یا تخمین آن‌ها در مزرعه خطاهای معنی‌داری به همراه داشته باشند، مشخص شدند. این پارامترها شامل زمان قطع جریان، دبی ورودی، ضریب زبری مانینگ، ضرایب معادله نفوذ و شیب جویچه‌ها هستند. لذا این پارامترها در آنالیز حساسیت این تحقیق وارد شد تا تأثیر نسبی هر کدام بر شاخص‌های خروجی شامل راندمان کاربرد آب، راندمان نیاز آبی، ضریب یکنواختی توزیع، نسبت رواناب سطحی و زمان‌های پیشروی و پسروی به‌صورت کمی مشخص شود. در تحلیل حساسیت هر پارامتر ورودی، مقدار تغییر معادل $\pm 50\%$ در نظر گرفته شد تا شرایط لازم تحلیل حساسیت را فراهم آورده باشد که مقادیر حاصله در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. خروجی‌های نرم‌افزار در وضعیت اولیه (بدون تغییر داده‌ها)، به‌عنوان خروجی مبنا در نظر گرفته شد. با تغییر هر یک از پارامترهای ورودی و ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترها، تأثیر آن بر روی پارامتر شاخص‌ها ارزیابی شد (Bautista et al. 2002).



نظر گرفته شد. جهت بررسی روند تغییرات و میزان حساسیت خروجی‌ها برای هر حالت برای هر جویچه، با ثابت نگه‌داشتن بقیه پارامترهای ورودی به جویچه برنامه SIRMOD، ۱۴۴ بار اجرا شد. شاخص حساسیت برای تغییرات هم زمان دو پارامتر به صورت رابطه (۶) است (Saltelli et al. 2009).

$$\text{Sensitivity} = \frac{\frac{|Ea_4 - Ea_1|}{Ea_1} \left[\frac{q}{|\Delta q| |Ea_4 - Ea_2|} + \frac{T_{CO}}{\Delta T_{CO} |Ea_4 - Ea_3|} \right]}{\frac{1}{|Ea_4 - Ea_2|} + \frac{1}{|Ea_4 - Ea_3|}} \quad (6)$$

دامنه تغییرات این کمیت از یک است. هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل است (Ebrahimian and Liaghat 2011).

ضریب کارایی مدل نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است و دامنه تغییرات آن از منفی بی‌نهایت تا یک است. مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت و مقدار یک در زمان برازش کامل داده‌ها است که از رابطه (۹) محاسبه شد (Lane and Ferrira 1982).

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (9)$$

که در معادله‌های فوق، N : تعداد نمونه‌ها، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل، Q_i : مقادیر واقعی، \bar{P} : میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و \bar{Q} : میانگین مقادیر واقعی است. از شاخص خطای نسبی به منظور ارزیابی مقادیر رواناب و حجم آب نفوذ یافته بر حسب % استفاده شد که به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد (Moravejalakhani et al. 2009).

$$RE = \frac{(V_p - V_0)}{V_0} \times 100 \quad (10)$$

که، RE : خطای نسبی مدل، V_p : حجم تخمین زده شده توسط مدل و V_0 : حجم اندازه‌گیری شده در مزرعه است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- آنالیز حساسیت

نتایج آنالیز حساسیت مدل‌های هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک، در ابتدای فصل زراعی به ازای تغییر معادل $\pm 5\%$ پارامترهای ورودی و تأثیر آن بر روی شاخص‌های خروجی شامل راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، یکنواختی توزیع، نسبت رواناب، زمان پیشروی و زمان پیشروی در جدول (۴) ارائه شد. در این جدول، حساسیت شاخص‌های آبیاری به پارامترهای ورودی با توجه به درجه

تغییرات هم‌زمان و ترکیبی زمان قطع جریان و دبی ورودی (q, T_{CO}) ، دبی ورودی و ضریب نفوذ (q, k) ، دبی ورودی و توان نفوذ (q, a) ، زمان قطع جریان و توان نفوذ (T_{CO}, a) ، زمان قطع جریان و ضریب نفوذ (T_{CO}, k) ، توان نفوذ و ضریب نفوذ (a, k) با فرض ثابت بودن بقیه پارامترها، انجام و اثرات این تغییرات بر شاخص‌های موردنظر مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت. مقدار تغییر معادل $\pm 5\%$ برای هر دو پارامتر در

که، Ea : راندمان کاربرد و Δ : مقدار تغییرات است. بر اساس مقادیر حاصل شده برای شاخص حساسیت، میزان حساسیت خروجی موردنظر برای تغییر هم‌زمان هر کدام از حالت‌های گفته شده به صورت جدول (۳) دسته‌بندی شد (Saltelli et al. 2009).

جدول ۳- طبقه‌بندی میزان حساسیت

Table 3 Sensitivity classification

Sensitivity	Sensitivity Range
Low	$0.1 < \text{Sensitivity} \leq 0.5$
Medium	$0.5 < \text{Sensitivity} \leq 2$
High	$2 < \text{Sensitivity} \leq 5$
Very High	$\text{Sensitivity} > 5$

۲-۵- ارزیابی دقت نرم‌افزار SIRMOD

برای مقایسه و ارزیابی دقت نرم‌افزار SIRMOD در پیش‌بینی زمان پیشروی، پسروی، حجم نفوذ یافته و حجم رواناب از شاخص‌های آماری معیار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، کارایی مدل (EF) و خطای نسبی (RE) استفاده شد (Milapalli et al. 2009). معیار RMSE بهترین شاخص برای ارزیابی و مقایسه و انتخاب مناسب‌ترین روش است و از رابطه (۷) محاسبه شد. این آماره همواره مثبت است و مقدار آن در هر مدلی کم‌تر باشد، آن مدل در مقایسه با بقیه مدل‌ها از دقت و عملکرد بالاتری برخوردار است (Milapalli et al. 2009).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (7)$$

در مقایسه با شاخص‌های ارزیابی، پارامتر ضریب تبیین کاربرد فراوانی دارد که از رابطه (۸) به دست آمد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q})]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

شاخص ضریب تبیین میزان خطای بودن رابطه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

روش‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. با مشاهده نمودار شکل (۲) و نتایج جدول (۳) مشخص می‌شود که دبی پایه در روزهای ۳ و ۵ سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ دارای بیش‌ترین مقدار خود بوده و از طرف دیگر نتایج گرافیکی این روش نشان می‌دهد که آب‌پایه درصد بالایی از کل جریان را به خود اختصاص نمی‌دهد.

اهمیت از راست به چپ ذکر شده است. پارامترهای توان نفوذ (a) و زمان قطع جریان (T_{cot}) و ضریب نفوذ (k) در رتبه‌های بعدی تأثیرگذاری بر راندمان کاربرد هستند.

نتایج این روش نشان داد که با جدا کردن جریان‌ات زیرسطحی از جریان کلی، روند جریان پایه از منطق مناسبی برخوردار بوده است، گرچه در مورد مقادیر آن تفاوت معنی‌داری وجود دارد. جدول (۳) نتایج ویژگی‌های آماری این روش و سایر

جدول ۴- حساسیت شاخص‌های آبیاری به پارامترهای ورودی در مدل‌های مختلف

Table 4 The sensitivity of irrigation indices to input parameters in different models

Model	Irrigation Indices	Sensitivity of Irrigation Indicators to Input Parameters
Hydrodynamic (HD)	Application Efficiency	n, S_0 , k, T_{cot} , a, q
	Water Requirement Efficiency	S_0 , n, q, T_{cot} , k, a
	Uniformity Coefficient	S_0 , n, T_{cot} , k, q, a
	Runoff Ratio	n, S_0 , T_{cot} , q, k, a
	Advanced Time	T_{cot} , S_0 , n, a, k, q
Zero-Inertia (ZI)	Recession Time	q, S_0 , n, k, a, T_{cot}
	Application Efficiency	S_0 , n, k, T_{cot} , a, q
	Water Requirement Efficiency	S_0 , n, q, T_{cot} , a, k
	Uniformity Coefficient	S_0 , n, k, T_{cot} , q, a
	Runoff Ratio	n, S_0 , T_{cot} , q, k, a
Kinematic Wave (KW)	Advanced Time	T_{cot} , S_0 , n, k, q, a
	Recession Time	q, S_0 , n, k, a, T_{cot}
	Application Efficiency	S_0 , n, q, T_{cot} , a, q
	Water Requirement Efficiency	S_0 , n, q, T_{cot} , a, k
	Uniformity Coefficient	S_0 , n, k, T_{cot} , q, a
	Runoff Ratio	n, S_0 , T_{cot} , q, k, a
	Advanced Time	T_{cot} , S_0 , n, k, q, a
	Recession Time	q, S_0 , n, k, a, T_{cot}

خشک شدن خاک ترک‌هایی که در آن ایجاد شده و بر روی سرعت پیشروی به خاطر پر شدن این ترک‌ها با آب حین پیشروی تأثیر دارد. زمان قطع جریان کم‌ترین تأثیر را بر روی زمان پیشروی داشت که با نتایج Zerihun et al. (1996) مطابقت دارد.

زمان قطع جریان بیش‌ترین تأثیر را بر زمان پسروی داشت که این پارامتر در رسیدن جریان به انتهای نوار و در نتیجه تخلیه آب از نوار مؤثر است. پارامترهای معادله نفوذ در رتبه‌های بعدی این تأثیرگذاری قرار دارند. همان‌طور که از نتایج پیداست پارامترهای شیب جریان و ضریب زبری مانینگ، تأثیر کم‌تری بر شاخص‌های خروجی داشتند و مقدار شاخص حساسیت آن در هر دو حالت افزایشی و کاهش‌ی مشابه هم است که با نتایج Zerihun et al. (1996) نیز مطابقت دارد.

پارامترهای نفوذ معادله کوسیاکف- لوییس بیش‌ترین تأثیر را در محاسبه راندمان نیاز آبی داشتند. زمان قطع جریان و دبی ورودی در رتبه بعدی این تأثیرگذاری بر راندمان نیاز آبی قرار دارند (جدول ۴). کاهش پارامترهای نفوذ، حساسیت بیش‌تری نسبت به افزایش آن بر راندمان نیاز آبی داشته است. به‌طور کلی پارامتر توان نفوذ و جریان ورودی به جویچه بیش‌ترین تأثیر را بر روی یکنواختی توزیع داشته‌اند. پارامترهای زمان قطع جریان و ضریب نفوذ در رتبه‌های بعدی این تأثیرگذاری هستند. بیش‌ترین تأثیر بر نسبت رواناب را پارامترهای معادله نفوذ کوسیاکف- لوییس و جریان ورودی داشته است. افزایش پارامترهای نفوذ نسبت به حالت کاهش آن حساسیت کم‌تری بر رواناب داشته است. پارامترهای معادله نفوذ کوسیاکف- لوییس و جریان ورودی بیش‌ترین تأثیر را بر روی زمان پیشروی داشت و ضریب زبری مانینگ در رتبه بعدی این تأثیرگذاری قرار دارد. دلیل آن می‌تواند به نوع بافت خاک مرتبط باشد که در حین

۳-۲- آنالیز حساسیت دو متغیره‌ای

افزایش دبی و کاهش زمان قطع در هر سه مدل حساسیتی بر روی زمان پیشروی نداشت. با کاهش هم‌زمان دبی و زمان قطع و کاهش دبی و افزایش زمان قطع در هر سه مدل، حساسیت کمی بر روی زمان پیشروی داشت.

نتایج آنالیز حساسیت دو متغیره‌ای در شرایط متفاوت تغییر هم‌زمان دبی ورودی و زمان قطع جریان، تغییر هم‌زمان دبی ورودی و ضریب نفوذ، تغییر هم‌زمان دبی ورودی و توان نفوذ، در جدول (۵) ارائه شد. با افزایش هم‌زمان دبی و زمان قطع و

جدول ۵- آنالیز حساسیت در شرایط تغییر هم‌زمان دبی ورودی و زمان قطع جریان

Table 5 The sensitivity analysis in the simultaneous change conditions of input flow and cut-off time

Parameter		Advanced Time			Recession Time		
		HD	ZI	KW	HD	ZI	KW
q+50	Tco+50	No	No	No	No	No	No
	Tco-50	No	No	No	No	No	Medium
q-50	Tco+50	Low	Low	Low	Medium	Medium	Medium
	Tco-50	Low	Low	Low	Medium	Medium	Medium
q+50	K+50	No	No	No	No	No	No
	K-50	No	No	No	Low	No	No
q-50	K+50	No	No	No	No	Low	Low
	K-50	No	No	No	No	No	No
q+50	a+50	Medium	Medium	Medium	Low	Low	Low
	a-50	Medium	Medium	Medium	Low	Low	Low
q-50	a+50	Medium	Medium	Medium	Low	No	No
	a-50	Medium	Medium	Medium	No	No	No
Tco+50	a+50	Low	Low	Low	Low	Low	Low
	a-50	Low	Low	Low	Medium	Medium	Medium
Tco-50	a+50	No	No	No	Medium	Medium	Medium
	a-50	No	No	No	Medium	Medium	Medium
Tco+50	K+50	No	No	No	No	No	No
	K-50	No	No	No	No	No	No
Tco-50	K+50	No	No	No	No	No	No
	K-50	No	No	No	No	No	No
a+50	K+50	No	No	No	Low	Low	Low
	K-50	No	No	No	No	No	No
a-50	K+50	No	No	No	No	No	No
	K-50	Medium	Medium	Medium	No	No	No

کاهش توان نفوذ و افزایش ضریب نفوذ در هر سه مدل بر روی زمان پسروی حساسیتی نداشت.

۳-۳- ارزیابی مدل

مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده میزان نفوذ توسط مدل‌های مختلف نرم‌افزار SIRMOLD در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که نرم‌افزار SIRMOLD میزان نفوذ را با هر سه مدل موج سینماتیک، اینرسی صفر و هیدرودینامیک به‌خوبی تخمین زده است. در وسط و انتهای فصل زراعی، میزان رواناب در هر سه مدل نسبت به مقدار رواناب اندازه‌گیری شده در مزرعه بیشتر شد و به‌تبع میزان حجم آب نفوذ یافته در هر سه مدل مذکور نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده در مزرعه کم‌تر است. زیرا از اواسط فصل رشد به بعد، کشاورزان با استفاده از فارور، جویچه‌ها را مرتب می‌کنند و همین امر باعث به هم خوردن خاک مزرعه و کاهش سرعت پیشروی آب در مزرعه و در

در شرایط تغییر هم‌زمان دبی ورودی و ضریب نفوذ، کاهش دبی و افزایش ضریب نفوذ k، بیش‌ترین حساسیت را بر روی زمان پیشروی در هر سه مدل داشت. بقیه تغییرات هم‌زمان این دو پارامتر حساسیت متوسط بر روی زمان پیشروی داشت. تغییر هم‌زمان دبی و ضریب نفوذ k بر روی زمان پسروی حساسیت نداشتند یا حساسیت کمی داشتند. افزایش و کاهش هم‌زمان توان نفوذ و ضریب نفوذ و همچنین افزایش توان نفوذ و کاهش ضریب نفوذ در هر سه مدل حساسیت متوسطی بر روی زمان پیشروی داشت. کاهش توان نفوذ و افزایش ضریب نفوذ بر روی زمان پیشروی در هر سه مدل بیش‌ترین حساسیت را داشت. افزایش هم‌زمان توان نفوذ و ضریب نفوذ و همچنین افزایش توان نفوذ و کاهش ضریب نفوذ در هر سه مدل بر روی زمان پسروی حساسیت کمی داشته‌اند و کاهش هم‌زمان توان نفوذ و ضریب نفوذ و



اندازه‌گیری شده با داده‌های مدل می‌شود. در اول فصل زراعی مقدار حجم آب نفوذ یافته کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده در مزرعه است. نتایج این قسمت از پژوهش با یافته‌های Behbahani and Babazadeh (2005) و McClymont et al. (1996) مطابقت دارد.

نتیجه کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب در مزرعه می‌شود که این امر باعث تفاوت مقادیر پیش بینی شده در مدل‌ها با داده‌های مزرعه‌ای دارد. همچنین رشد شاخ و برگ گیاه و گاه ریزش برگ گیاه در داخل جویچه باعث کاهش سرعت پیشروی آب در جویچه و افزایش میزان نفوذ و تفاوت مقدار

جدول ۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده میزان نفوذ توسط مدل‌های مختلف نرم‌افزار SIRMOD

Table 6. The comparison of measured and calculated values of infiltration by different models of SIRMOD software

Irrigation time	Input water (m ³)	Kinematic wave		Zero-inertia		Hydrodynamic		Measured	
		Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)	Infiltrated (m ³)	Runoff (m ³)
Beginning of Season	8.34	2.1	6.3	2.1	6.2	2.1	6.2	1.99	6.35
Middle of Season	9.6	2.5	7.1	2.5	7.1	2.5	7.1	3.19	6.41
End of Season	9.9	2.6	7.4	2.6	7.3	2.6	7.3	2.8	7.1

بیش‌ترین خطای نسبی در تخمین رواناب برابر ۱۰/۸٪ و بیش‌ترین خطای نسبی در تخمین حجم آب نفوذ یافته برابر ۲۱/۶٪ بود. یافته‌های این پژوهش با نتایج Behbahani and Babazadeh (2005) و Taghizadeh et al. (2013) مطابقت دارد.

شاخص‌های آماری شبیه‌سازی زمان پیشروی در مدل‌های مختلف و زمان‌های مختلف آبیاری در جدول (۷) ارائه شده است. با توجه به جدول (۷)، شاخص ضریب کارایی مدل، بیش‌تر تحت تأثیر مقادیر خیلی زیاد یا خیلی کم داده‌ها قرار می‌گیرد و در این پژوهش مقدار آن برای زمان پیشروی منفی شده است که علت آن، تخمین نامناسب زمان نهایی پیشروی (TL) توسط مدل‌ها است. همچنین ضریب تبیین در هر سه زمان آبیاری بین مدل‌های مختلف و مشاهدات مزرعه‌ای تطابق خوبی دارد به‌گونه‌ای که مقدار این شاخص نزدیک به یک است. بنابراین هر سه مدل توانستند با دقت خوبی زمان پیشروی را تخمین بزنند. در مجموع بر اساس شاخص‌های آماری می‌توان گفت که مدل هیدرودینامیک زمان پیشروی را نسبت به دو مدل دیگر با دقت بالاتری تخمین زده است. نتایج شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول (۷) نشان می‌دهد که نرم‌افزار SIRMOD به‌خوبی توانسته است زمان پیشروی را شبیه‌سازی نماید. مقدار شاخص کارایی برای هر سه مدل و برای هر سه زمان آبیاری تقریباً نزدیک به یک است که نشان‌دهنده تطابق داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. همچنین ضریب تبیین در هر سه زمان آبیاری بین مدل و مشاهدات مزرعه‌ای

به‌طور کلی کم‌ترین میزان خطای نسبی حجم آب نفوذ یافته در هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک مربوط به ابتدا و انتهای فصل زراعی است. چون در اوایل فصل آبیاری (به‌غیر از آبیاری اول) شکل جویچه‌ها تقریباً ثابت شده و مدل‌ها به‌راحتی می‌توانند پیشروی آب و نفوذ آب در جویچه را با دقت بالا تخمین بزنند. همچنین در اواخر فصل رشد نیز به‌دلیل تثبیت جویچه‌ها، مدل‌ها به‌خوبی شرایط مزرعه را پیش‌بینی می‌کنند؛ ولی در اواسط فصل رشد به دلیل فارو زدن جویچه‌ها توسط کشاورزان، سرعت پیشروی آب در مزرعه کند شده و مدل‌ها به‌خوبی نمی‌توانند میزان نفوذ و سایر پارامترها را تخمین بزنند. توضیح اینکه در مزارع سیب زمینی زارعین اواسط فصل رشد، جهت خاک-دهی پای بوته‌ها، جویچه‌ها را با فارور مرتب می‌کنند.

این مدل‌ها بهترین نتایج را با متوسط خطای ۵/۵٪ و ۷/۱٪- ارائه کردند. همچنین در هر سه مدل، حجم آب نفوذ یافته در وسط فصل زراعی با خطای نسبی ۲۱/۶٪ با دقت کم‌تری تخمین زده شد. تخمین حجم رواناب نسبت به حجم آب نفوذ یافته با دقت کم‌تری صورت گرفت. خطای نسبی حجم رواناب برای ابتدای فصل زراعی در هر سه مدل زیر ۳٪ است. همچنین میزان خطای نسبی تخمین زده شده رواناب برای وسط و انتهای فصل زراعی با دقت کم‌تری صورت گرفته است که برای وسط فصل زراعی در هر سه مدل، رواناب با خطای نسبی ۱۰/۸٪ و برای انتهای فصل زراعی در هر سه مدل این پارامتر با خطای نسبی کم‌تر از ۵٪ تخمین زده شد.

تطابق خوبی وجود دارد به گونه‌ای که مقدار این شاخص مدل‌های هیدرودینامیک و اینرسی صفر با دقت خوبی نزدیک به یک است. بنابراین هر سه مدل توانسته‌اند با دقت خوبی زمان پسروی را تخمین بزنند. بر اساس مقدار RMSE، زمان پسروی برای آبیاری در ابتدای فصل در بیش‌تر است.

جدول ۷- شاخص‌های آماری شبیه‌سازی زمان پیشروی در مدل‌های مختلف و زمان‌های مختلف آبیاری

Table 7. Statistical indicators of simulation of the advanced time in different models and different irrigation times

Time	Model	Statistical Indicators	The Beginning of the Season	The Middle of the Season	The End of the Season
Advanced Time	Hydrodynamic	EF	-0.57	-2.06	-2.83
		R ²	0.99	0.95	0.99
		RMSE	4.09	5.68	6.30
	Zero-Inertia	EF	-0.57	-2.06	-2.83
		R ²	0.98	0.95	0.99
		RMSE	4.09	5.69	6.31
	Kinematic Wave	EF	-0.72	-2.1	-2.92
		R ²	0.97	0.95	0.99
		RMSE	4.27	5.72	6.38
Recession Time	Hydrodynamic	EF	0.99	0.98	0.86
		R ²	0.99	0.99	0.97
		RMSE	0.71	1.08	3.30
	Zero-Inertia	EF	0.99	0.98	0.87
		R ²	0.99	0.99	0.97
		RMSE	0.71	1.08	3.20
	Kinematic Wave	EF	0.86	0.92	0.82
		R ²	0.96	0.98	0.95
		RMSE	2.30	2.20	3.75

جدول ۸- پارامترهای ارزیابی مدل‌ها در شرایط دبی‌های مختلف آبیاری در مراحل پیشروی و پسروی

Table 8 Evaluation parameters of models in different irrigation flow conditions in the advanced recession stages

Time	Discharge	Model	EF	R ²	RMSE
Advanced Time	q=1.49	Hydrodynamic	-0.58	0.89	2.10
		Zero-Inertia	-0.62	0.85	1.81
		Kinematic Wave	-0.55	0.87	2.70
		Average	-0.58	0.87	2.20
	q=1.59	Hydrodynamic	-0.73	0.92	1.74
		Zero-Inertia	-0.72	0.87	1.58
		Kinematic Wave	-0.68	0.91	1.79
		Average	-0.71	0.90	1.70
	q=1.69	Hydrodynamic	-0.85	0.97	0.99
		Zero-Inertia	-0.78	0.94	1.32
		Kinematic Wave	-0.84	0.93	1.44
		Average	-0.82	0.95	1.25
Recession Time	q=1.49	Hydrodynamic	0.93	0.88	0.97
		Zero-Inertia	0.84	0.85	0.95
		Kinematic Wave	0.87	0.87	0.99
		Average	0.88	0.87	0.97
	q=1.59	Hydrodynamic	0.96	0.93	0.89
		Zero-Inertia	0.86	0.89	0.91
		Kinematic Wave	0.94	0.91	0.92
		Average	0.92	0.91	0.91
	q=1.69	Hydrodynamic	0.99	0.99	0.72
		Zero-Inertia	0.98	0.99	0.77
		Kinematic Wave	0.87	0.97	0.74
		Average	0.95	0.98	0.84

۳-۴- اثر دبی ورودی به جویچه

نتایج می‌توان گفت که هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک، با افزایش دبی ورودی به جویچه در یک طول ثابت، مقادیر پیش‌بینی شده با دقت بالاتری تخمین زده شدند. مشابه این نتایج برای مرحله پشروی نیز تخمین زده شد. یافته‌های این بخش از پژوهش با نتایج Raghuwanshi et al. (2011) مطابقت دارد.

شاخص‌های آماری برای جویچه با طول ثابت، جهت بررسی اثر دبی مختلف بر عملکرد مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول (۸)، متوسط مقادیر ضریب تبیین، ضریب کارایی و ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله پیشروی برای دبی‌های ۱/۴۹، ۱/۵۹ و ۱/۶۹ l/s آورده شده است. با توجه به این

جدول ۹- پارامترهای ارزیابی مدل‌ها در شرایط طول‌های مختلف جویچه در مرحله پیشروی و پشروی

Table 9 Evaluation parameters of models in different furrow length conditions in the advanced and recession stages

Furrow	Model	EF	R ²	RMSE
Advanced Stage				
L=125	Hydrodynamic	-0.63	0.95	4.09
	Zero-Inertia	-0.71	0.92	5.51
	Kinematic Wave	-0.59	0.93	6.20
	Average	-0.64	0.93	5.27
L=120	Hydrodynamic	-0.82	0.98	3.97
	Zero-Inertia	-0.77	0.95	4.79
	Kinematic Wave	-0.73	0.93	5.38
	Average	-0.77	0.95	4.71
L=115	Hydrodynamic	-0.91	0.99	3.89
	Zero-Inertia	-0.86	0.98	4.71
	Kinematic Wave	-0.83	0.97	5.24
	Average	-0.87	0.98	4.61
Recession Stage				
L=125	Hydrodynamic	0.91	0.95	1.89
	Zero-Inertia	0.89	0.91	1.91
	Kinematic Wave	0.88	0.92	2.10
	Average	0.89	0.93	1.97
L=120	Hydrodynamic	0.97	0.96	1.73
	Zero-Inertia	0.93	0.92	1.84
	Kinematic Wave	0.94	0.94	1.88
	Average	0.95	0.94	1.82
L=115	Hydrodynamic	0.98	0.99	1.57
	Zero-Inertia	0.95	0.98	1.65
	Kinematic Wave	0.96	0.98	1.71
	Average	0.96	0.98	1.64

۳-۵- اثر طول جویچه

شبیه‌سازی هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک افزایش یافت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از داده‌های مزرعه کشت سیب زمینی واقع در شهرستان کبودرآهنگ از توابع استان همدان جهت ارزیابی و شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای به‌وسیله مدل‌های موجود در نرم‌افزار SIRMOD استفاده شد. در ادامه نتایج حاصل از پژوهش ارائه شده است:

۱- هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک بهترین نتایج شبیه‌سازی حجم نفوذ یافته را با متوسط خطای ۵/۵٪ و برای حجم رواناب با متوسط خطای ۸/۰٪ پیش‌بینی نمودند. به‌طوری که راندمان کاربرد با خطای

جدول (۹) نتایج شاخص‌های آماری مدل‌ها برای جویچه با دبی ورودی ثابت در شرایط طول‌های مختلف را در فاز پیشروی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول (۹) مشخص است که با کاهش طول جویچه، دقت شبیه‌سازی هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک افزایش یافت. چون با کاهش طول جویچه، مدت زمان کمتری جهت پیشروی آب در مزرعه صرف می‌شد و تلفات نفوذ عمقی در طول شیار نسبت به حالتی که طول شیار بیشتر است، میزان کمتری دارد. یافته‌های این بخش از پژوهش با نتایج Azad et al. (2017) مطابقت دارد. با کاهش طول جویچه، دقت

۴- با کاهش طول جویچه، دقت پیش‌بینی مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای در هر سه مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک افزایش پیدا کرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

کم‌تر از ۸٪ و راندمان یکنواختی با خطای کم‌تر از یک درصد و رواناب خروجی برای ابتدا و انتهای فصل زراعی با خطای نسبی کم‌تر از ۴٪ به‌خوبی توسط هر سه مدل تخمین زده شد.

۲- پارامترهای شیب جریان و ضریب زبری مانینگ تأثیر کم‌تری بر شاخص‌های خروجی دارند. پارامترهایی مانند دبی جریان، زمان قطع جریان و ضرایب معادله نفوذ تأثیر زیادی بر خروجی‌های مدل دارند. تحلیل حساسیت دو متغیره‌ای نشان داد که زمان قطع جریان بیش‌ترین تأثیر را بر روی مرحله پیشروی داشت و هم‌چنین پارامترهای معادله نفوذ در رتبه‌های بعدی این تأثیرگذاری قرار دارند.

۳- دبی ورودی و پارامترهای نفوذ بیش‌ترین تأثیر را بر روی زمان پیشروی داشت. هم‌چنین زمان قطع کم‌ترین تأثیر را بر روی زمان پسروی داشت.

References

- Abbasi, F. (2012). Principles of flow in surface irrigation. Publications of the national committee of irrigation and drainage, First Edition, 211 pp [In Persian].
- Alizadeh, A. (2004). Design of irrigation systems. Fifth Edition. Astan Quds Razavi Publications, 583 pp [In Persian].
- Azad, N., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, S. and Sadraddini, A. A. (2017). Optimization of surge irrigation system based on irrigation and furrow geometric variables using SIRMOD model. *J. Water Irrig. Manage.*, 7(1), 151-166 [In Persian].
- Bagheri, M. and Alipour Hafshejani, M. (2011). Evaluation of surface irrigation models in sugarcane furrow irrigation located in Khuzestan province. The First Conf. on Strategies for Achieving Sustainable Agriculture. Payame Noor University of Khuzestan, Ahvaz [In Persian].
- Bautista, E., Strelkoff, T. S. and Clemmens, A. J. (2002). Sensitivity of surface irrigation to infiltration parameters: implications for management. In: Burt, C.M., Anderson, S.S. Eds), Energy, climate, environment and water-issues and opportunities for irrigation and drainage. proc. USCID/EWRI Conf., San Luis Obispo, CA, July 10-13, pp. 475-485.
- Behbahani, M. R. and Babazadeh, H. (2005). Field evaluation of surface irrigation model (SIRMOD) (Case study in furrow irrigation). *J. Agr. Sci. Nat. Res.*, 12(2), 1-9 [In Persian].
- Clark, B., Hall, L., Walker, W. and Eckhardt, J. (2009). Application of SIRMOD to evaluate potential tail water reduction from improved irrigation management. World Environmental and Water Recourse Congress. American Society of Civil Engineers. May 17-21.
- Ebrahimian, H. and Liaghat, A. (2011). Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *J. Soil Water Res.*, 6(2), 91-101 [In Persian].
- Farasati, M., Farzi, S. and Pourmohammad, P. (2018). Field evaluation and analysis of furrow irrigation by SIRMOD and WinSRFR models. *J. Environ. Water Eng.*, 4(3), 207-215 [In Persian].
- Gholami Sefidkouhi, M. A. and Koulaian, A. (2014). Field evaluation and sensitivity analysis of the SIRMOD model in furrow irrigation. *Iran J. Irrig. Drain.*, 8(3), 473-483 [In Persian].
- Katopodes, N. D. and Strelkoff, T. (1977). Hydrodynamics of border irrigation-complete model. *J. Irrig. Drain. Div.*, 103(3), 309-324.
- Khoshraresh, M., Mirzaei, S. M. J., Shirazi, P. and Norooz Valashedi, R. (2018). Evaluation of dripper clogging using magnetic water in drip irrigation. *Appl. Water Sci.*, 8(3): 1177-1191.



- Lane, J. W. and Ferrira, V. A. (1982). Sensitivity analysis. In CREAM, A field scale model for chemical, Runoff and EROSION from Agricultural Management system, (ed.) W. G. Knisel, Vol. A. Model Documentation. USDA conservation Res. Report No. 26. 113-158. Washington, D.C.
- Mahdizadeh, K. M., Gholami, S. M. and Vlipour, M. (2014). Simulation of open- and closed-end border irrigation systems using SIRMOD, Arch. Agron. Soil Sci., 61(7), 929-941.
- McClymont, D. J., Raine, S. R. and Smith, R. J. (1996). The prediction of furrow irrigation performance using the surface irrigation model SIRMOD. In 13th National Conference. Irrigation Association of Australia. Adelaide.
- Milapalli, D., Singh, R. and Raghuvanshi, N. (2009). Physically based model for simulating flow in furrow irrigation. I: Model development. J. Irrig. Drain. Eng., 135, 739-746.
- Mohamad Jani, I. and Yazdani, N. (2014). The analysis of water crisis conjecture in Iran and the exigent and measures for its management. Ravand, 21(65, 66), 117-144 [In Persian].
- Mokari Gahroodi, E., Liaghat, A. M. and Nahvinia, M. J. (2013). Application of WinSRFR3.1 model in furrow irrigation simulation. Iran J. Irrig. Drain., 7(1), 59-67 [In Persian].
- Moravejalakhkami, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M. and Abbasi, F. (2009). Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a Zero-Inertia model with a multilevel calibration approach. Biosystems Eng., 103(3), 374-381.
- Raghuvanshi, N., Saha, R., Mailapalli, D. and Upadhyaya, S. (2011). Infiltration evaluation strategy for border irrigation management. J. Irrig. Drain. Eng., 137, 602-609.
- Saltelli, A., Chan, K. and Scott, M. (2009). Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons: New York, NY. 504 pp.
- Soltani A. and Soltani M. (2018). Assessment of base flow separation methods in Karaj dam watershed. J. Environ. Water Eng., 4(3), 216 – 228 [In Persian].
- Soltani A. and Soltani M. (2018). Assessment of base flow separation methods in Karaj dam watershed. J. Environ. Water Eng., 4(3), 216 – 228 [In Persian].
- Stewart M., Cimino J. and Ross M. (2007). Calibration of base flow separation methods with stream flow conductivity. Ground water, 45(1), 17-27.
- Stewart M., Cimino J. and Ross M. (2007). Calibration of base flow separation methods with stream flow conductivity. Ground water, 45(1), 17-27.
- Taghizadeh, Z., Verdinejad, V. R., Ebrahimian, H. and Khanmohammadi, N. (2013). Field evaluation and analysis surface irrigation system with win SRFR (case study furrow Irrigation). J. Water Soil (Agr. Sci. Tech.), 26(6), 1450-1459 [In Persian]
- Taimori M., Ghanbarpor M., Bashirgonbad M., Zolfaghari M., Kazemikia S. (2012). Comparing of base flow index of different methods of hydrograph analysis in some rivers of West Azerbaijan. J. Water Soil Sci., 15(57), 2019-228 [In Persian].
- Taimori M., Ghanbarpor M., Bashirgonbad M., Zolfaghari M., Kazemikia S. (2012). Comparing of base flow index of different methods of hydrograph analysis in some rivers of West Azerbaijan. J. Water Soil Sci., 15(57), 2019-228 [In Persian].
- Tallaksen L. M. and Van Lanen H. A. (2004). Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Stream flow and Groundwater, Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 579 pp.
- Tallaksen L. M. and Van Lanen H. A. (2004). Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Stream flow and Groundwater, Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 579 pp.
- Tavakoli M., Karimi H. and Norollahi H. (2018). Investigation the effects of climate change on water resources of Ilam Dam Watershed. Watershed Eng. Manag., 10 (2), 157-170 [In Persian].
- Tavakoli M., Karimi H. and Norollahi H. (2018). Investigation the effects of climate change on water resources of Ilam Dam Watershed. Watershed Eng. Manag., 10 (2), 157-170 [In Persian].
- Walker, W. R. (2003). SIRMOD III. Surface Irrigation simulation, evaluation and design.



- guide and technical documentation. Utah State University.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). Surface irrigation theory and practice. U.S.A. Prentice Hall.
- Willems P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environ. Model. Softw.*, 24(3), 311–321.
- Willems P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environ. Model. Softw.*, 24(3), 311–321.
- Zare Bidaki R., Gharahi N. and Mahdianfard M. (2019). Comparison of separation methods for baseflow from direct runoff in Doroud Basin, Lorestan, Iran. *J. Environ. Water Eng.*, 5(3), 200–212 [In Persian].
- Zare Bidaki R., Gharahi N. and Mahdianfard M. (2019). Comparison of separation methods for baseflow from direct runoff in Doroud Basin, Lorestan, Iran. *J. Environ. Water Eng.*, 5(3), 200–212 [In Persian].
- Zeinalzadeh, K., Broumandnasab, S., Naseri, A. A. and Soltani Mohamadi, A. (2008). Sensitivity analysis of furrow irrigation model parameters using SIRMOD computer code. The Second National Conference on Ahvaz Irrigation and Drainage Networks Management, Shahid Chamran University, Ahvaz [In Persian].
- Zerihun, D., Feyen, J. and Reddy, J. M. (1996). Sensitivity analysis of furrow-irrigation performance parameters. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 122(1), 49-57.

How to cite this paper:

Lohrasbi, K., Khoshravesh, M. and Ghadami Firouzabadi, A. (2022). Simulation and evaluation of furrow irrigation in potato cultivation using SIRMOD model. *Environ. Water Eng.*, 8(2), 395-410. DOI: 10.22034/JEWE.2021.296401.1600
