

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Deficit Irrigation on Temporal Changes of Infiltration in Furrow Irrigation

H. Ebrahimian^{1*}, E. Vatankhah², S. Khedmati³ and B. Dialameh⁴

- 1*- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (ebrahimian@ut.ac.ir).
- 2- M.Sc. Graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 3- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 4- M.Sc. Graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 2 July 2018

Revised: 26 May 2019

Accepted: 1 June 2019

Keywords: Maize, Kostiakov-Lewis equation, Final infiltration rate, Irrigation event, IPARM model.

DOI: 10.22055/jise.2019.26417.1777.

Introduction

Full irrigation is recommended for the regions with no limitation to access water for irrigating the farm lands. Due to the population increase and consequently, the increase in cultivation field's area, the climate changes etc., full irrigation is not possible in many regions (Kheyrabi et al., 1996). Under this condition, using the water management techniques, such as deficit irrigation, is necessary and its importance is undeniable. Deficit irrigation is an optimum procedure in producing the agricultural products under water limitation. In this technique, agricultural product decreases per unit area, but it is enhanced by increasing the cultivation fields. Deficit irrigation is a suitable procedure that allows planting to reduce the product by decreasing the water uptake. The main purpose of deficit irrigation is increasing the water use efficiency with decreasing applied water in each irrigation event.

Soil infiltration characteristics are very important in the design and management of furrow irrigation systems (Foroud et al., 1996; She et al., 2014). For this reason, extensive research have been done in the field of water infiltration and soil permeability process in surface irrigation (such as measuring and estimating the infiltration changes, advance time, recession time, surface storage, subsurface movement etc.). Soil infiltration changes over time affect the distribution uniformity of infiltrated water in the field, irrigation duration and finally irrigation efficiency in the furrow irrigation. Soil compaction and also cracking the furrow bottom after irrigation events are the main reasons for these changes, especially, after the initial irrigation events and under deficit irrigation conditions. Investigating the effect of deficit irrigation on the infiltration process and temporal infiltration changes and considering these changes in designing furrow irrigation systems is essential under water shortage condition. Therefore, the main purpose of this study was to investigate the temporal changes of Kostiakov-Lewis equation parameters under deficit irrigation conditions in different irrigation events during maize growing season.

Methodology

Field experiments were conducted at the experimental station of the College of Agriculture and Natural Resources of University of Tehran, Karaj. In this study, maize with the cultivar

single cross 704 cultivated for a cropping season with a density of 7000 plants per hectare. Furrows were trapezoidal. Furrow length, spacing, and bottom width were 51, 0.75, 0.15 m, respectively. In this research, four treatments were considered based on providing the plant water requirement at the end of the furrow (including irrigation providing full (control treatment), 75, 50 and 25 percent of required water depth at the end of the furrow). In general, 14 irrigation events were considered and the deficit irrigation technique was applied from the seventh irrigation event. Plant water requirement was determined based on the reference evapotranspiration in Karaj region which estimated by ET₀ Calculator software (Raes, 2009). Maximum, minimum, and average temperature and relative humidity, sunny hours and wind speed are the inputs of this software. The amount of crop coefficients during the growing season were obtained based on FAO 56's suggested coefficients and finally, by multiplying the reference evapotranspiration to the crop coefficient, crop evapotranspiration was calculated. Due to the soil, plant, and climate parameters, the irrigation interval was considered to be 7 days. Three furrows were used to collect the data for each treatment. Side furrows were applied as buffer furrows to preserve the edge effects. In order to control the inlet and outlet discharge, two WSC flumes (type II) were installed at the beginning and the end of the main furrow. Infiltration parameters were estimated by IPARM model using advance time and runoff discharge hydrographs for different treatments. The IPARM model estimates the Kostikov-Lewis parameters by the inverse solution.

Results and discussion

The most and the least variability of infiltration parameters (a , k and f_0) were observed in treatments 25D and 75D, respectively. It is concluded that by increasing the deficit irrigation, variability of infiltration parameters are increased. The soil surface cracking as a result of lacking enough moisture at surface soil in deficit irrigation condition causes this high variability. Many previous researchers have shown the infiltration parameters are different from each other in various initial and boundary conditions and also different irrigation events (Schwankl, 2000; Oyonarte and Mateos, 2003; Mateos and Oyonarte, 2005; Wang et al., 2009; Zhu et al., 2009; Gillies et al., 2011). The results indicated that the IPARM model estimated the parameters of infiltration equation in various irrigation events with high accuracy. As a result, the average error of the total volume of infiltrated water along the furrow was about six percent. Because of the lack of enough moisture in soil in deficit irrigation condition and subsequently, more value of matric potential in compared with fully irrigation, soil permeability was increased in deficit irrigation treatments, especially, in 25D. In general, deficit irrigation increased both the soil permeability and the variability of infiltration parameters. In addition, the advance time in deficit irrigation treatments was more than that of full irrigation treatment.

Conclusion

In this research, the Kostikov-Lewis parameters were determined under deficit irrigation condition by IPARM model. The results indicated that the IPARM model has good capability to determine the infiltration parameters under deficit irrigation condition. In order to design the irrigation systems in the regions with water shortage, infiltration equation parameters must be determined under the deficit irrigation conditions, due to the high variability under water shortage condition.

Acknowledgement

It should be noted that this study was conducted with the financial support of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran.

References

- 1- Foroud, N., George, E.St. and Entz, T., 1996. Determination of infiltration rate from border irrigation advance and recession trajectories. *Agricultural Water Management*. 30, pp.133–142.

- 2- Gillies, M.H., Smith, R.J. and Raine, S.R., 2011. Evaluating whole field irrigation performance using statistical inference of inter-furrow infiltration variation. *Biosystems Engineering*. 110(2), pp.134-143.
- 3- Kheyrabi, J., Asadollahi, S., Entesari, M. and Salamat, A., 1996. Controlled Deficit Irrigation, Its Importance and Necessity in Iran Current Condition. In *8th Irrigation and Drainage Committee of Iran Conference, Tehran, Iran*. 1(2), pp.271-290. (In Persian).
- 4- Mateos, L. and Oyonarte, N.A., 2005. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability. *Agricultural Water Management*. 76(1), pp.62-75.
- 5- Oyonarte, N.A. and Mateos, L., 2003. Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation. *TASAE*. 46(1), pp.85-94.
- 6- Raes, D. 2009. The ET₀ Calculator, Reference Manual Version 3.1. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- 7- Schwankl, L.J., Raghuvanshi, N.S. and Wallender, W.W., 2000. Furrow irrigation performance under spatially varying conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126(6), pp.355-361.
- 8- She, D.L., Liu, D.D., Xia, Y.Q. and Shao, M.A., 2014. Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: implications on water resource management. *Water Resources Management*. 28, pp.2063–2076.
- 9- Wang, W.H., Jiao, X.Y., Zhu, Y. and Li, F., 2009. Variability of roughness coefficient and its effect on border irrigation performance. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 25(16), pp.288-293.
- 10- Zhu, Y., Jiao, X.Y., Wang, W.H. and Wang, S.F., 2009. Spatial variability of infiltration parameters and its influences on border irrigation performance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 28(3), pp.46-49.



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر کم آبیاری بر تغییرات زمانی نفوذپذیری خاک در آبیاری جویچه‌ای

حامد ابراهیمیان^{۱*}، ابراهیم وطن خواه^۲، سعید خدمتی^۳ و بابک دیالمه^۴

* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران (ebrahimian@ut.ac.ir).

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۳/۵

دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۱

چکیده

نفوذپذیری خاک که اهمیت زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری جویچه‌ای دارد نسبت به زمان تغییر می‌کند. این مسئله بر یکنواختی توزیع آب نفوذ یافته در مزرعه، مدت زمان آبیاری و در نتیجه بر راندمان آبیاری جویچه‌ای تاثیر زیادی خواهد گذاشت. هدف این تحقیق، بررسی تغییرات زمانی پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در شرایط کم آبیاری جویچه‌ای در نوبت‌های مختلف آبیاری محصول ذرت بود. در این تحقیق، چهار تیمار براساس تامین نیاز آبی گیاه در انتهای جویچه (شامل آبیاری کامل (شاهد) و آبیاری در حد ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد عمق آب مورد نیاز در انتهای جویچه) مورد بررسی قرار گرفت. جویچه‌ها ذورنقه‌ای شکل و فاصله و طول آن‌ها به ترتیب ۰/۷۵ و ۵۱ متر بود. پارامترهای نفوذ با استفاده از داده‌های زمان پیشروی و هیدروگراف دبی ورودی و خروجی در تیمارهای مختلف به وسیله مدل IPARM برآورد شد. نتایج نشان داد که مدل IPARM در برآورد پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در نوبت‌های مختلف آبیاری دارای دقت خوبی بود، به طوری که میانگین خطای کل حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه حدود شش درصد به دست آمد. بیشترین و کمترین خطای نسبی در تخمین حجم آب نفوذ یافته به ترتیب برای تیمار کم آبیاری ۵۰ درصد در آبیاری دوازدهم (۱۹ درصد) و تیمار کم آبیاری ۷۵ درصد در آبیاری یازدهم (۰/۳ درصد) به دست آمد. بیشترین و کمترین تغییرپذیری پارامترهای معادله نفوذ برای تیمارهای کم آبیاری در حد ۲۵ و ۵۰ درصد انتهای جویچه به دست آمد. همچنین زمان پیشروی آب در طول جویچه در تیمارهای کم آبیاری بیشتر از تیمار آبیاری کامل به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: ذرت، معادله کوستیاکوف-لوییس، نفوذپذیری نهایی، نوبت آبیاری، مدل IPARM.

مقدمه

آب و آبیاری زیاد باشد، کم آبیاری راه کاری برای افزایش کارایی مصرف آب برای تولید محصولات کشاورزی خواهد بود. خصوصیات نفوذپذیری خاک از عوامل مهم در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری است. در اغلب روش‌های رایج طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی، نفوذپذیری خاک در طول فصل کشت ثابت در نظر گرفته می‌شود حال آن که در واقعیت، پارامترهای نفوذ آب در خاک در طول این دوره تغییر می‌کند (Linderman and Stegman, 1971). به دلیل همین تغییرپذیری مکانی و زمانی، تعیین مقدار دقیق پارامترهای نفوذ به سختی صورت می‌پذیرد (Foroud et al., 1996; She et al., 2014). از این رو، تحقیقات زیادی در مورد اندازه‌گیری و پیش‌بینی رخدادهای آبیاری سطحی مانند پیش‌روی، پس‌روی، ذخیره سطحی، حرکت زیر سطحی آب و تعیین بهترین معادله جهت تخمین حجم آب نفوذ یافته با در نظر گرفتن تغییرات مکانی و زمانی انجام شده است (Valiantzas, 1994; Childs et al., 1994).

آبیاری کامل محصولات کشاورزی برای مناطقی قابل توصیه است که ضریب فراوانی آب به زمین بیشتر از یک بوده و در کنار آن سایر عوامل تولید نیز در حد مطلوب باشد که در اکثر نقاط ایران هیچ کدام از این شرایط برقرار نیست (Kheyrabi et al., 1996). کم آبیاری یک راه‌کار بهینه برای تولید محصولات کشاورزی تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول در واحد سطح و افزایش آن با گسترش سطح است. کم آبیاری روشی مناسب است که در آن آگاهانه به گیاهان اجازه داده می‌شود با دریافت آب کمتر از نیاز، محصول خود را کاهش دهند (Fereses and Soriano, 2006). هدف اصلی از اجرای کم آبیاری، افزایش راندمان کاربرد آب، از طریق کاهش میزان آب آبیاری در هر نوبت و یا حذف آبیاری‌هایی است که کمترین بازدهی را دارند. هرگاه منابع آب محدود بوده و یا هزینه‌های

در اثر آبیاری بر پارامترهای معادله نفوذ یا میزان حجم آب نفوذیافته در واحد زمان، تأثیرگذار است. در شرایطی که به دلیل بحران آبی، روش مدیریتی کم آبیاری اعمال می‌شود، بر اثر کمبود رطوبت و خشکی سطح خاک جویچه نسبت به شرایط آبیاری کامل، در سطح جویچه درز و شکاف بیشتری به وجود می‌آید که این مسئله شرایط حاکم بر فرایند نفوذ را دستخوش تغییرات زیادی می‌کند. از این رو، بررسی تغییرات زمانی نفوذپذیری خاک از اهمیت زیادی در مدیریت سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای به خصوص در شرایط کم آبی برخوردار است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر کم آبیاری بر خصوصیات نفوذپذیری خاک در طول فصل رشد محصول ذرت تحت آبیاری جویچه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این مطالعه در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. کرج دارای آب و هوای مدیترانه‌ای است. متوسط بارندگی سالانه برابر ۲۶۵ میلی‌متر، بالاترین میانگین دمای ماهیانه در تیر ماه (۲۴/۵) درجه سانتی‌گراد و پایین‌ترین میانگین در دی ماه (۱/۲) درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر خاک‌شناسی اراضی منطقه در یک واحد فیزیوگرافی ناشی از رسوبات بادبزی رودخانه کرج قرار دارد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در ابتدا، وسط و انتهای مزرعه در جدول ۱ آورده شد. مشخصات فیزیکی مزرعه شامل فراوانی نسبی ذرات، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه‌ی پژمردگی به ترتیب به روش‌های هیدرومتری، سیلندر، صفحه‌ی فشار در مکش ۰/۳ بار، صفحه‌ی فشار در مکش ۱۵ بار اندازه‌گیری شد. خاک زراعی در این منطقه به دلیل وجود یک لایه سنگ‌ریزه محدود به عمق ۶۰ سانتی‌متر است.

در این تحقیق، ذرت علوفه‌ای با رقم سینگل کراس ۷۰۴ برای یک فصل زراعی با تراکم ۷۰۰۰۰ بوته در هر هکتار کشت شد (از ۲۳ تیر تا ۲۸ مهر ۱۳۹۳). ایجاد جویچه‌ها و کاشت همزمان بذر به صورت مکانیزه با فاصله ردیف ۷۵ سانتی‌متر، فاصله کشت ۱۹ سانتی‌متر در هر ردیف و طول ۵۱ متر انجام شد. جویچه‌ها در جهت شیب زمین احداث و سطح مقطع جریان در جویچه‌ها، با استفاده از اطلاعات مقطع سنج و پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان تعیین شد. سطح مقطع جویچه‌ها دوزنقه‌ای و عرض بالایی، عرض کف و عمق جویچه‌ها به ترتیب، ۶۵، ۱۵ و ۱۲ سانتی‌متر بود. آب مورد نیاز برای انجام آزمایش، از یک حلقه چاه عمیق تأمین و به وسیله شبکه انتقال بتنی مستقر در مزرعه، به ابتدای جویچه‌ها منتقل شد. به منظور ثابت کردن ارتفاع آب و در نتیجه ثابت شدن مقدار دبی ورودی به جویچه‌ها، یک منبع دارای سرریز در اول جویچه‌ها قرار داده شد.

Sepahvand et al. (1993; Subbaiah and Mashrum, 2013) با بررسی تغییرپذیری رطوبت خاک که ممکن است در طول فصل کشت رخ دهد، از بین معادله‌های مختلف نفوذ (کوستیاکوف، فیلیپ، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا و گرین-آپت اصلاح‌شده)، معادله‌های فیلیپ و کوستیاکوف-لوییس را برای برآورد پارامترهای نفوذ، مناسب عنوان کردند. Walker و Elliot (1982) با بررسی اطلاعات به دست آمده از بیش از ۱۰۰ آزمایش مزرعه‌ای، گزارش کردند که نفوذ آب به داخل خاک در آبیاری جویچه‌ای دارای تغییرات زمانی و مکانی چشم‌گیری است و در نهایت معادله کوستیاکوف-لوییس را دقیق‌ترین معادله جهت تخمین آب نفوذیافته در جویچه، معرفی کردند. Holzapfel et al. (2004) چهار روش دونقطه‌ای، نفوذسنج در جویچه، روش پیش‌روی و تک‌نقطه‌ای برای برآورد پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف را برای جویچه‌های پهن و باریک با خاک لوم رسی و دبی ورودی به ترتیب ۱/۴ و ۱/۰۷ لیتر بر ثانیه در طول فصل کشت (به منظور در نظر گرفتن تغییرات زمانی) مورد ارزیابی قرار دادند. براساس نتایج به دست آمده، روش دونقطه‌ای و روش یک‌نقطه‌ای به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند. Emdad et al. (2007) به بررسی تغییرات زمانی نفوذ نهایی و تجمعی خاک در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نفوذ نهایی خاک در انتهای فصل کشت، نسبت به ابتدای دوره به میزان ۳۴ درصد کاهش یافت که بیانگر تغییرات کاهش نفوذ در طول فصل و حاکی از افزایش زمان آبیاری به منظور نفوذ عمق مشخص آب جهت حصول به راندمان کاربرد بالا می‌باشد. Votrubova et al. (2017) با انجام آزمایش نفوذ به ترتیب در ۱۸ و ۱۴ تکرار مکانی و زمانی، نشان دادند که به دلیل تغییر در ساختمان خاک که منتج از فعالیت‌های بیوزیستی خاک و شرایط آب و هوایی است، مقدار نفوذ و همچنین پارامترهای آن تغییر می‌کنند. همچنین روش برآورد نفوذ نیز ممکن است بر مقدار نفوذ تعیین شده، اثرگذار باشد. Ziayi et al. (2016) تغییرات زمانی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در طی یک فصل زراعی محصول ذرت در شرایط آبیاری کامل در مشکین‌دشت کرج را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که به جز در آبیاری اول، تغییرات زمانی معنی‌داری بین مقادیر ضرایب معادله نفوذ در هر نوبت آبیاری در طول فصل رشد وجود نداشت، چرا که پس از آبیاری اول خاک به حالت تثبیت و تراکم رسیده و زبری کاهش چشم‌گیری داشته است. Germann و Beven (1982) با انجام یک مطالعه مروری به این نتیجه رسیدند که وجود درز و شکاف و همچنین منافذ درشت (macropore) در سطح خاک، منجر به تغییرپذیری معنادار نفوذپذیری خاک می‌شود. Dialameh et al. (2018) پژوهشی را به منظور تعیین اثر بار آبی و رطوبت اولیه بر آبیاری جویچه‌ای انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که تثبیت سطح خاک و همچنین به وجود آمدن درز و شکاف در کف جویچه‌ها

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Soil physical properties of the experimental field

Location	Depth (m)	Salinity of soil saturated extract (ds/m)	PWP ^a (Gravimetric %)	FC ^b (Gravimetric %)	Bulk density (g/cm ³)	Soil constituent particles			Soil texture
						Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Beginning	0 – 0.2	2.6	8.7	18.2	1.5	36.5	35	28.5	Clay loam
	0.2 – 0.4	1.8	8.1	17.5	1.45	37.8	33.8	28.5	Clay loam
	0.4 – 0.6	1.9	6	14.2	1.47	66.5	17.5	16	Sandy loam
Middle	0 – 0.2	2.1	8.5	18.1	1.5	44	30	26	Loam
	0.2 – 0.4	2.1	8	17.2	1.45	51.5	25	23.5	Sandy clay loam
	0.4 – 0.6	2	6.9	15.5	1.52	56.5	22.5	21	Sandy clay loam
End	0 – 0.2	3	8.4	18.1	1.51	37.3	31.7	31	Clay loam
	0.2 – 0.4	2.1	8.1	17.7	1.48	42.8	30.4	26.8	Loam
	0.4 – 0.6	2.5	6.6	15	1.49	55.3	24.5	20.2	Sandy loam

a: Permanent Wilting Point – b: Field Capacity

تحقیقات پیشین در منطقه، ۰/۶ در نظر گرفته شد (Verdinejad et al., 2011). در مجموع ۱۴ نوبت آبیاری در طول فصل رشد انجام شد. هفت نوبت اول آبیاری در همه تیمارها به مقدار یکسان و به اندازه نیاز آبی تعیین شده، انجام شد و اعمال تیمارهای مورد نظر در هفت آبیاری دوم صورت گرفت. دلیل این مسئله، جلوگیری از ایجاد تنش خشکی در مرحله جوانه زنی و هم چنین مرحله اولیه رشد گیاه است که گیاه حساسیت بیشتری به خشکی محیط ریشه دارد و کم آبیاری منجر به کاهش معنادار عملکرد گیاه می شود. زمان آبیاری برابر با مجموع زمان پیش روی آب و زمان فرصت نفوذ در انتهای جویچه در هر تیمار در نظر گرفته شد. پس از به دست آوردن مقادیر پارامترهای نفوذ، فرصت نفوذ لازم در انتهای جویچه برای هر چهار تیمار به دست آمد. پارامتر سرعت نفوذ نهایی خاک (f_0) به روش ورودی-خروجی طبق دستورالعمل Walker و Skogerboe (1987) اندازه گیری شد.

برآورد پارامترهای نفوذ

مدل IPARM پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس را به-طور معکوس با استفاده از اطلاعات هندسی مقطع، شیب و طول جویچه، دبی ورودی، زمان پیش روی و هیدروگراف رواناب خروجی برآورد می کند (Gillies et al., 2007). همان گونه که در بخش پیشین نیز به آن اشاره گردید، اطلاعات هندسی جویچه توسط مقطع سنج تعیین و زمان پیش روی در ایستگاههایی به فاصله شش متر در طول جویچه های ۵۱ متری اندازه گیری شد.

در این تحقیق، چهار تیمار براساس تأمین نیاز آبی گیاه در انتهای جویچه براساس نیاز آبی روزانه گیاه (تیمارهای آبیاری کامل (شاهد) و آبیاری در حد ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد عمق آب مورد نیاز در انتهای جویچه براساس نیاز آبی روزانه گیاه که در این تحقیق به ترتیب با 100D، 75D، 50D و 25D نشان داده می شوند) مورد بررسی قرار گرفت. هر تیمار از دو جویچه ای اصلی و دو جویچه ای محافظ تشکیل شد. در جویچه های اصلی برای کنترل جریان ورودی و خروجی در ابتدا و انتهای جویچه ها از فلوم های WSC تیپ ۲ استفاده شد. میخ های چوبی در طول جویچه در هر ۶ متر به منظور اندازه گیری زمان های پیش روی و پس روی نصب شدند. دور آبیاری با توجه به مشخصات گیاه ذرت و هم چنین ظرفیت نگهداری آب در خاک برابر هفت روز در نظر گرفته شد (آبیاری در زمانی که رطوبت خاک در محدوده بین رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی موقت قرار دارد). نیاز آبی با استفاده از داده های هواشناسی (دمای حداقل، حداکثر و میانگین، رطوبت نسبی حداقل، حداکثر و میانگین، ساعات آفتابی و سرعت باد) ایستگاه سینوپتیک مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران محاسبه شد. تبخیر تعرق مرجع، با استفاده از داده های هواشناسی و از نرم افزار ET₀ Calculator محاسبه شد (Raes, 2009). مقادیر ضریب گیاهی ذرت علوفه ای در طول فصل رشد طبق ضرایب پیشنهادی در نشریه فائو ۵۶ متناسب با شرایط اقلیمی به دست آمد. نیاز آبی گیاه از حاصل ضرب ضریب گیاهی در تبخیر تعرق گیاه مرجع تعیین شد (شکل ۱). ضریب تخلیه مجاز رطوبتی (Maximum Allowed Depletion - MAD) با توجه به

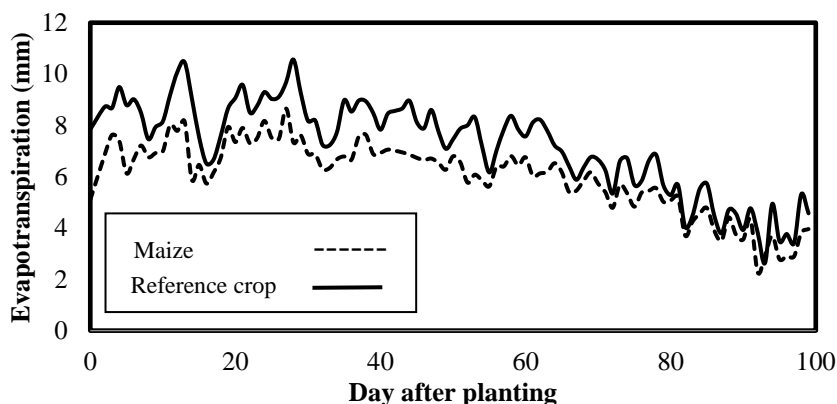


Fig. 1- Reference crop and maize evapotranspiration during growing season
شکل ۱- تبخیر تعرق گیاه مرجع و گیاه ذرت در طول فصل رشد

همچنین هیدروگراف رواناب خروجی با استفاده از فلوام تعبیه شده در انتهای جویچه تعیین شد. شیب و طول جویچه تعیین و دبی ورودی نیز با استفاده از فلوام WSC تیپ II اندازه‌گیری شد. معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس (رابطه ۱) برای گستره وسیعی از خاک‌ها مناسب بوده و بیشترین کاربرد را در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی دارد (Hanson et al., 1993):

همچنین هیدروگراف رواناب خروجی با استفاده از فلوام تعبیه شده در انتهای جویچه تعیین شد. شیب و طول جویچه تعیین و دبی ورودی نیز با استفاده از فلوام WSC تیپ II اندازه‌گیری شد. معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس (رابطه ۱) برای گستره وسیعی از خاک‌ها مناسب بوده و بیشترین کاربرد را در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی دارد (Hanson et al., 1993):

$$Z = kt^a + f_0t \quad (1)$$

در این رابطه، Z حجم نفوذ تجمعی در واحد طول (m^3/m)، f_0 بسرعت نفوذ نهایی ($m^3/m/min$)، t زمان (min) و a و k پارامترهای تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس هستند.

مدل IPARM با حداقل کردن ۱- فواصل پیش‌روی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده طی فاز پیش‌روی (رابطه ۲) و ۲- حجم رواناب اندازه‌گیری شده و محاسبه شده طی فاز ذخیره (رابطه ۳)، پارامترهای معادله نفوذ را برآورد می‌کند. در واقع این مدل، با ترکیب دو تابع هدف زیر، مساله را به یک مساله تک‌هدفه و بدون بعد تبدیل می‌کند.

$$OF1 = SSE_{Advance} = \sum_{i=1}^{N_r} \left(x_i - \frac{Qt_i}{\sigma_y A_0 + \sigma_{z1} kt_i^a + \sigma_{z2} f_0 t_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$OF2 = SSE_{Runoff} = \sum_{i=1}^{N_r} (V_{Ri} - (Qt_i - \sigma_{ys} A_0 L - \sigma_{z1} kL - \sigma_{z2} f_0 L))^2 \quad (3)$$

$$V_t = \sum_{i=1}^{n-1} \left(L_i \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right) \right) \quad (4)$$

در این رابطه، n تعداد ایستگاه‌ها، L_i فاصله ایستگاه‌ها (m) و Z_i و Z_{i+1} به ترتیب نفوذ تجمعی (m^3/m) برای ایستگاه i و $i+1$ ام می‌باشد.

درصد خطای نسبی (RE) نیز برای ارزیابی روش‌های برآورد پارامترهای نفوذ، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$RE = \frac{V_p - V_m}{V_m} \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه، V_m و V_p به ترتیب مقدار اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده حجم کل آب نفوذیافته (m^3) می‌باشند.

در این روابط، SSE مربع خطای استاندارد، t_i و V_{Ri} به ترتیب فواصل پیش‌روی اندازه‌گیری شده (m)، زمان (min) و حجم رواناب

نتایج و بحث

رطوبت اولیه خاک در طول جویچه شد. دلیل این مسئله، به وجود آمدن درز، شکاف و ترک در سطح جویچه در تیمارهای کم آبیاری، به علت رطوبت کم در پروفیل سطحی خاک است. با اعمال روش کم آبیاری و به تبع آن به وجود آمدن درز و شکافهای ناهمگون در سطح جویچه، شرایط اولیه حاکم بر پدیده نفوذ در هر واقعه آبیاری نظیر رطوبت اولیه و شکل درز و ترکها متفاوت می شود که این مسئله منجر به افزایش تغییرات پارامترهای معادله نفوذ در وقایع مختلف آبیاری می شود. مقادیر پارامترهای نفوذ بین جویچهها در همه ی آبیاریها متفاوت بود.

پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکوف-لوییس برای یک جویچه در طول فصل رشد گیاه ذرت متفاوت بود (جدول ۲). پارامترهای نفوذ در آبیاریهای هشتم و نهم فقط برای تیمار آبیاری کامل به دست آمد (به دلیل کامل بودن دادهها). بیشترین و کمترین تغییرپذیری پارامترهای f_0 و k برای تیمارهای 25D و 75D به دست آمد. نتایج نشان داد با افزایش کم آبیاری تغییرپذیری پارامترهای نفوذ در طول فصل رشد گیاه ذرت افزایش یافت. به عبارت دیگر کم آبیاری باعث افزایش تغییرپذیری

جدول ۲- پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکوف-لوییس در نوبت های مختلف آبیاری در تیمارهای مورد مطالعه

Table 2- Infiltration parameters of Kostiakov-Lewis equation in various irrigation events under different treatments

Treatment	Irrigation event	f_0 (m ³ /m/min)	k (m ³ /min ^a /m)	a (-)
Full irrigation	eighth	0.0019	0.0033	0.108
	ninth	0.000075	0.0013	0.426
	tenth	0.00005	0.00119	0.52
	eleventh	0.000126	0.00177	0.225
	twelfth	0.000136	0.0048	0.033
	thirteenth	0.000111	0.003	0.161
	fourteenth	0.000126	0.00325	0.0174
75D	tenth	0	0.00143	0.5
	eleventh	0.000009	0.00149	0.47
	twelfth	0.000038	0.00178	0.367
	thirteenth	0.0000134	0.00141	0.445
	fourteenth	0.000055	0.00168	0.31
50D	tenth	0	0.00177	0.51
	eleventh	0.000053	0.00136	0.45
	twelfth	0.000041	0.00163	0.5
	thirteenth	0.001193	0.00355	0.037
	fourteenth	0	0.00145	0.53
25D	tenth	0	0.00193	0.5
	eleventh	0.000083	0.00146	0.41
	twelfth	0.000187	0.0041	0.027
	thirteenth	0.00015	0.0048	0
	fourteenth	0.00011	0.00171	0.247

جویچه‌ها در تیمار کم‌آبیاری عنوان کرد. نتایج تحقیقات Sepahvand et al. (2010) نشان داد که نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی با افزایش رطوبت خاک کاهش می‌یابد.

در جدول ۳، عمق آب نفوذیافته اندازه‌گیری شده از روش ورودی-خروجی و برآوردشده توسط مدل IPARM و همچنین خطای نسبی برآورد عمق آب نفوذیافته نشان داده شده است. به‌طور کلی با نزدیک شدن به انتهای فصل رشد، نیاز آبی گیاه کاهش می‌یابد که به تبع، عمق آب نفوذیافته در طول آبیاری نیز کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول (۳) مشخص است، در تمامی موارد مدل IPARM با مقداری بیش‌برآورد عمق آب نفوذیافته را برآورد کرد. میانگین خطای برآورد حجم آب نفوذیافته توسط مدل IPARM برای کل آبیاری‌ها حدود شش درصد به‌دست آمد. بیشترین و کمترین خطای نسبی در تخمین حجم آب نفوذیافته به‌ترتیب برای تیمار 50D در آبیاری دوازدهم (۱۹ درصد) و تیمار 75D در آبیاری یازدهم (۰/۳ درصد) به‌دست آمد. Ebrahimiyan (2014) قدرمطلق میانگین خطای پارامترهای نفوذ با استفاده از روش‌های دونقطه‌ای، INFILT و IPARM به‌ترتیب ۵/۹، ۲۹/۵ و ۲/۲ درصد و خطای مدل IPARM در همه تیمارها و نوبت‌های آبیاری کمتر از پنج درصد گزارش کردند.

به‌دلیل کاهش رطوبت اولیه خاک (و در نتیجه کاهش پتانسیل ماتریک) و همچنین افزایش ترک‌ها و درزهای موجود در کف جویچه‌ها در تیمار کم‌آبیاری، کم‌آبیاری باعث افزایش زمان پیش‌روی شد (شکل ۳). تیمارهای 50D و 25D زمان پیش‌روی نزدیک به هم و بیشتر از تیمارهای آبیاری کامل و 75D داشتند. به‌دلیل اعمال کم‌آبیاری، فرصت زمان نفوذ در انتهای جویچه نیز نسبت به آبیاری کامل به‌طور آگاهانه کاهش داده می‌شود. این کاهش نسبت به افزایشی که بر اثر افزایش زمان پیش‌روی در مدت زمان کل آبیاری رخ می‌دهد بیشتر است و در نهایت و در حالت برآیندی، مدت زمان آبیاری کاهش می‌یابد. چون هدف اصلی از اعمال روش کم‌آبیاری، کاهش حجم آب ورودی با کاهش مدت زمان آبیاری (در شرایط ثابت بودن دبی ورودی) است.

مقادیر f_0 محاسبه‌شده توسط مدل IPARM نسبت به روش ورودی-خروجی دارای نوسان بیشتری بود. مقدار f_0 در پنج آبیاری به‌طور ثابت به‌دست آمد اما تحت همان شرایط، مدل IPARM f_0 را با مقادیر متفاوتی برآورد کرد (شکل ۴). میانگین مقادیر f_0 در روش ورودی-خروجی بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده توسط مدل IPARM به‌دست آمد. همان‌گونه که در بخش‌های پیشین بدان اشاره گردید، دلیل این مسئله، نحوه عملکرد مدل جهت برآورد پارامترهای معادله نفوذ است که پارامترها را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که بیشترین انطباق بین مقادیر برآوردشده و مشاهده‌شده آب نفوذیافته رخ دهد و ممکن است که در برخی موارد شرایط در نظر گرفته‌شده با واقعیت هم‌خوانی

بسیاری از محققان نشان دادند که پارامترهای نفوذ خاک بین جویچه‌های یک مزرعه و در وقایع مختلف آبیاری به‌طور قابل توجهی متفاوت است (Schwankl et al., 2000; Oyonarte and Mateos, 2003; Mateos and Oyonarte, 2005; Wang et al., 2009; Zhu et al., 2009; Gillies et al., 2011).

اگرچه پارامترهای نفوذ در طول فصل رشد متغیر بود ولی با هم‌پوشانی پارامترها، زمان و عمق آبیاری‌ها نزدیک به هم به‌دست آمد. در تیمار 25D در آبیاری سیزدهم مقدار پارامتر a برابر صفر به‌دست آمد و معادله نفوذ کاملاً خطی بود. در تیمار آبیاری کامل در آبیاری دوازدهم، تیمار 50D در آبیاری سیزدهم و تیمار 25D در آبیاری دوازدهم نیز مقدار پارامتر a نزدیک به صفر به‌دست آمد و معادله نفوذ به یک معادله خطی بسیار نزدیک شد. مدل IPARM با حداقل کردن فواصل پیش‌روی اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز پیش‌روی و همچنین حجم رواناب اندازه‌گیری‌شده و محاسبه‌شده طی فاز ذخیره، پارامترهای معادله نفوذ را برآورد می‌کند. از این رو با توجه به شرایط اولیه و مرزی حاکم بر واقعه آبیاری و همچنین پایه‌ریزی محاسبات مدل براساس روابط ریاضی، ممکن است مدل در برخی موارد پارامترها را به‌گونه‌ای برآورد کند که با فیزیک فرایند نفوذ در واقعیت هم‌خوانی نداشته باشد. همچنین مدل IPARM توانایی در نظر گرفتن مواردی هم‌چون جریان در منافذ درشت و درز و ترک‌ها که در شرایط واقعی وجود دارند (به‌خصوص در شرایط کم‌آبیاری) را ندارد. علاوه بر پارامتر a مقادیر f_0 برآوردشده توسط مدل IPARM نیز در برخی موارد، بیان‌گر مقدار نفوذ نهایی آب در خاک در شرایط واقعی نبود، به‌طوری‌که در آبیاری دهم تیمار 75D، آبیاری دهم و چهاردهم تیمار 50D و آبیاری دهم تیمار 25D مقدار f_0 برابر صفر به‌دست آمد که با ماهیت واقعی و فیزیکی فرایند نفوذ در تضاد است. به بیان دیگر، این موضوع بدین معنا نیست که نفوذپذیری نهایی خاک صفر است بلکه در این حالت‌ها مقادیر پارامترهای a و k و f_0 به‌گونه‌ای تغییر کرده است (مقادیر a و k افزایش یافته‌اند و مقدار f_0 صفر شده است) که در نهایت حجم آب نفوذیافته برآوردشده توسط مدل و مشاهده‌شده در مزرعه، بیشترین انطباق و نزدیکی را داشته باشد. در واقع این نتیجه برای هر سه پارامتر در همه‌ی جویچه‌ها و آبیاری‌ها مشاهده شد که با کاهش یک پارامتر، دو پارامتر دیگر افزایش یافتند.

نتایج نشان داد کم‌آبیاری باعث افزایش حجم آب نفوذ کرده در طول جویچه در واحد زمان شد (شکل ۲). در نوبت‌های دوازدهم و سیزدهم آبیاری، عمق آب نفوذیافته در واحد زمان در تیمار 25D بیشتر از تیمار آبیاری کامل بود. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که هر چه کم‌آبیاری بیشتر باشد، سرعت نفوذ آب به داخل خاک بیشتر می‌شود. علت آن را می‌توان کاهش رطوبت اولیه خاک و به تبع آن کاهش پتانسیل ماتریک و همچنین افزایش ترک‌ها و درزهای موجود در کف

قسمت غیرخطی معادله نفوذ (k و a) توسط مدل بیشتر برآورد شد که این نتیجه با یافته‌های Afshar-Chamanabad و Sepaskhah (2002) و Ebrahimiyan (2014) همخوانی دارد.

نداشته باشد. زمان پیش‌روی در نوبت‌های آبیاری‌های نهم و دهم (۳۷ و ۵۰ دقیقه) بیشتر از سایر نوبت‌های آبیاری بود. به همین دلیل مقادیر f_0 در آبیاری‌های نهم و دهم کمتر تخمین زده شد. به عبارت دیگر،

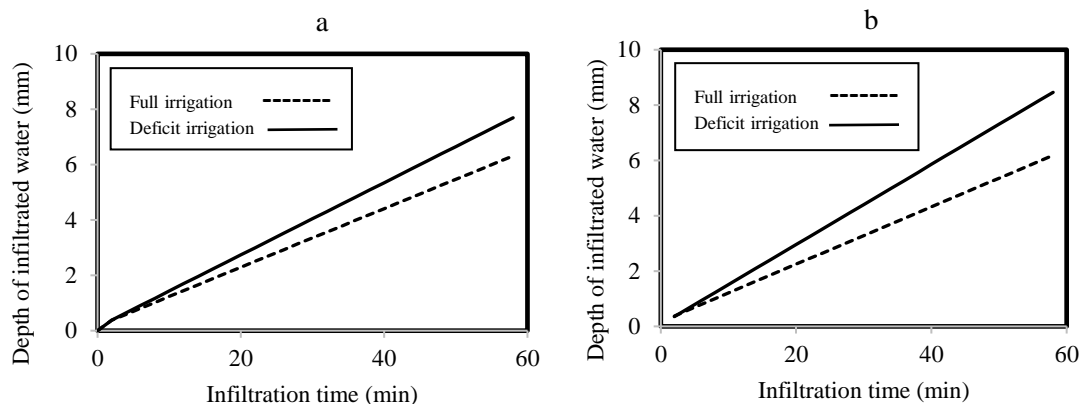


Fig. 2- Cumulative infiltration in full and 25D irrigation in two last irrigation events (a: Twelfth irrigation – b: Thirteenth irrigation)

شکل ۲- منحنی نفوذ تجمعی در تیمارهای آبیاری کامل و 25D برای دو آبیاری انتهای فصل (a: آبیاری دوازدهم – b: آبیاری سیزدهم)

جدول ۳- نفوذ تجمعی کل اندازه‌گیری شده و برآورد شده (mm) و خطای نسبی برآورد مدل IPARM (%)

Method	Treatment	Irrigation Event				
		tenth	eleventh	twelfth	thirteenth	fourteenth
Inflow-Outflow	Full irrigation	34.6	33.4	32.8	30.1	30.2
	75D	24.1	23.4	22.9	22	21.1
	50D	22.1	20.5	18.42	19.9	19.2
	25D	20.1	17.7	17.3	15	14.7
IPARM	Full irrigation	37.3	34.2	34.9	31.21	31.6
	75D	25.8	23.5	24.7	23.3	22.7
	50D	22.5	21.9	21.9	22.3	20.2
	25D	20.3	19.5	17.6	15.4	15.4
Relative Error (%)	Full irrigation	7.8	2.5	6.5	3.7	4.6
	75D	7.3	0.3	7.9	5.8	7.6
	50D	2	7.1	19	12	5
	25D	1	10.5	2	3	5

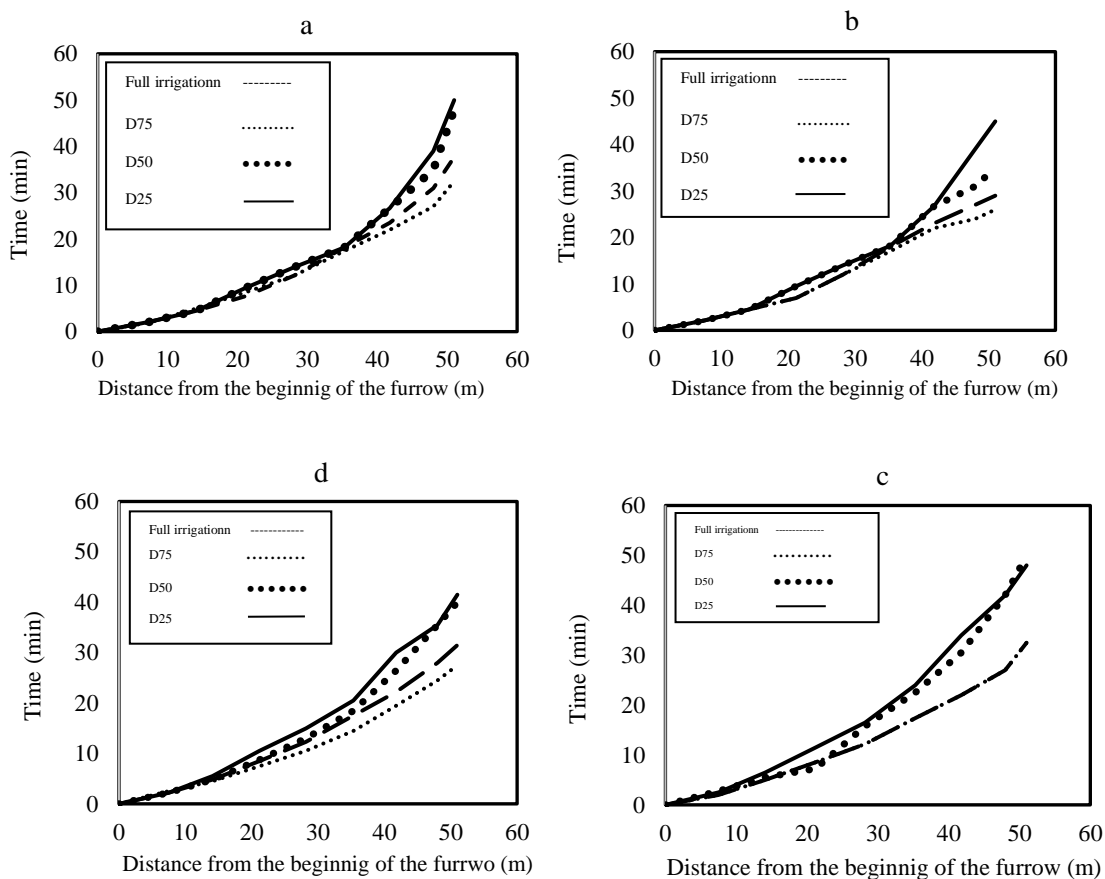


Fig. 3- Advance time in full and deficit irrigation treatments in four irrigation events (a: Tenth irrigation - b: Eleventh irrigation - c: Twelfth irrigation - d: Fourteenth irrigation)

شکل ۳- زمان پیش روی در تیمار آبیاری کامل و تیمارهای کم آبیاری در چهار واقعه آبیاری (a: آبیاری دهم - b: آبیاری یازدهم - c: آبیاری دوازدهم - d: آبیاری چهاردهم)

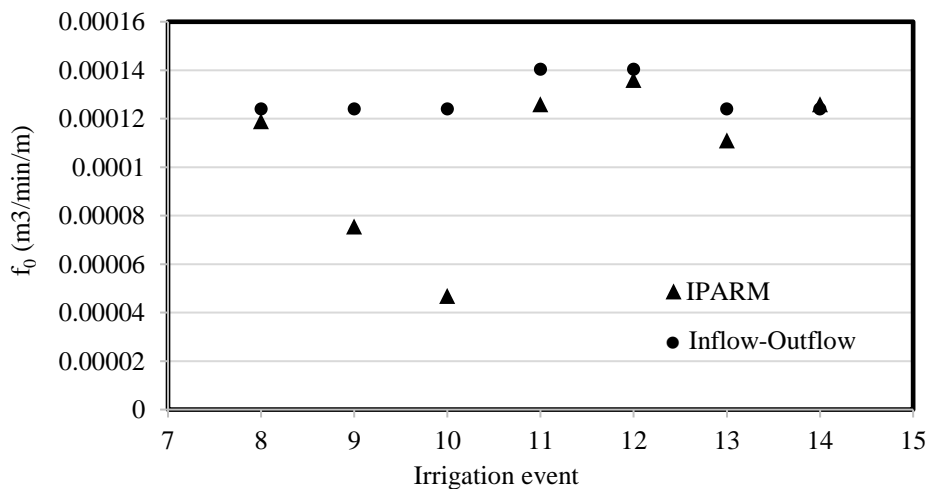


Fig. 4- The determined amount of f_0 in full irrigation by inflow-outflow method and IPARM model

شکل ۴- مقادیر f_0 برای تیمار آبیاری کامل در روش ورودی-خروجی و مدل IPARM

نتیجه گیری

در این تحقیق پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در شرایط کم آبیاری جویچه‌ای در نوبت‌های مختلف آبیاری محصول ذرت به دست آمد. مدل IPARM در برآورد پارامترهای معادله نفوذ در نوبت‌های مختلف آبیاری دارای دقت خوبی بود به طوری که میانگین خطای کل حجم آب نفوذ یافته در طول جویچه حدود شش درصد به دست آمد. اگرچه در همه‌ی تیمارها در آبیاری‌های مختلف پارامترهای نفوذ متفاوت بودند، اما کم آبیاری نیز سبب افزایش تغییرپذیری پارامترهای نفوذ شد. تغییر پارامترهای نفوذ تأثیر قابل توجهی بر تعیین مدت زمان آبیاری نداشت، زیرا تغییر یک پارامتر منجر به تغییر دیگر پارامترهای معادله نفوذ نیز می‌شود که در نهایت عمق آب برآورد شده با مدل، با عمق آب نفوذ یافته در شرایط مزرعه هم‌خوانی داشته باشد.

افزایش ترک‌ها و درزهای موجود در کف جویچه‌ها و افزایش زمان پیش‌روی در تیمارهای کم آبیاری سبب افزایش حجم آب نفوذ کرده در طول جویچه در واحد زمان شد. بنابراین، به دلیل تغییر ضرایب معادله نفوذ در شرایطی که در یک مزرعه به دلیل کمبود آب از روش کم آبیاری استفاده می‌شود، نسبت به شرایط آبیاری کامل، طراحی سیستم آبیاری جویچه‌ای باید براساس پارامترهای نفوذ به دست آمده در شرایط کم آبیاری انجام شود.

تقدیر و تشکر

لازم به ذکر است که این تحقیق با حمایت مالی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شده است.

References

- 1- Beven, K. and Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), pp.1311-1325.
- 2- Childs, J., Wallender, W.W., and Hopmans, J.W., 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(1), pp.74-90.
- 3- Dialameh, B., Parsinejad, M., Ebrahimian, H., and Mokhtari, A., 2018. Field comparison of infiltration in conventional and alternate furrow irrigation under various initial and boundary conditions. *Irrigation and Drainage*. 67(2), pp.156-165.
- 4- Ebrahimian, H., 2014. Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), pp.1904-1911.
- 5- Elliott, R.L., and Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*, 25(2), pp.396-0400.
- 6- Emdad, M.R., Shahabifar, M. and Fardad, H., 2007. Effect of Infiltration Temporal Changes on Furrow Irrigation Management. *Soil Researches*, 46(2), pp.24-32. (In Persian).
- 7- Fereres, E., and Soriano, M.A., 2006. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), pp.147-159.
- 8- Foroud, N., George, E.St. and Entz, T., 1996. Determination of infiltration rate from border irrigation advance and recession trajectories. *Agricultural Water Management*, 30, pp.133-142.
- 9- Gillies, M.H., Smith, R.J. and Raine, S.R., 2007. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrigation Science*. 25(2), pp.87-97.
- 10- Gillies, M.H., Smith, R.J. and Raine, S.R., 2011. Evaluating whole field irrigation performance using statistical inference of inter-furrow infiltration variation. *Biosystems Engineering*, 110(2), pp.134-143.
- 11- Hanson, B.R., Prichard, T.L. and Schulbach, H., 1993. Estimating furrow infiltration. *Agricultural Water Management*, 24(4), pp.281-298.

- 12- Holzapfel, E.A., Jara, J., Zuniga, C., Marino, M.A., Paredes, J. and Billib, M., 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 68(1), pp.19-32.
- 13- Kheyrabi, J., Asadollahi, S., Entesari, M. and Salamat, A., 1996. Controlled Deficit Irrigation, Its Importance and Necessity in Iran Current Condition. In *8th Irrigation and Drainage Committee of Iran Conference, Tehran, Iran*. 1(2), pp.271-290. (In Persian).
- 14- Linderman, C.L., and Stegman, E.C., 1971. Seasonal variation of hydraulic parameters and their influence upon surface irrigation application efficiency. *Transactions of the ASAE*, 14(5), pp.914-0918.
- 15- Mateos, L. and Oyonarte, N.A., 2005. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability. *Agricultural Water Management*, 76(1), pp.62-75.
- 16- Oyonarte, N.A. and Mateos, L., 2003. Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation. *Transactions of ASAE*, 46(1), pp.85-94.
- 17- Raes, D. 2009. The ET₀ Calculator, Reference Manual Version 3.1. *Food and Agricultural Organization of the United Nations* (FAO), Rome.
- 18- Schwankl, L.J., Raghuvanshi, N.S. and Wallender, W.W., 2000. Furrow irrigation performance under spatially varying conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(6), pp.355-361.
- 19- Sepahvand, A., Taaei, S.M., Mirnia, S. and Moradi, H., 2010. Assessing the Sensitivity of Infiltration Models to Soil Moisture Changes. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Industries)*, 25(2), pp.338-346. (In Persian).
- 20- Sepaskhah A.R. and Afshar-Chamanabad, H., 2002. Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation. *Biosystems Engineering*, 82(4), pp.479-484.
- 21- She, D.L., Liu, D.D., Xia, Y.Q. and Shao, M.A., 2014. Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: implications on water resource management, *Water Resources Management*. 28, pp.2063-2076.
- 22- Subbaiah, R. and Mashrum, H.H., 2013. Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. *Agricultural Engineering International*, 15(3), pp.1-10.
- 23- Valiantzas, J.D., 1994. Simple method for identification of border infiltration and roughness characteristics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(2), pp.233-249.
- 24- Verdinejad, V., Besharat, S., Abghari, H. and Ahmadi, H., 2011. Determining the Maize Maximum Allowed Depletion in Various Growth Stages by Difference of Green Canopy Cover and Air's Temperature. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Industries)*, 25(6), pp.1344-1352. (In Persian).
- 25- Votrubova, J., Dohnal, M., Vogel, T., Tesar, M., Jelinkova, V. and Cislerova, M., 2017. Ponded infiltration in a grid of permanent single-ring infiltrometers: Spatial versus temporal variability. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(3), pp.244-253.
- 26- Walker, W.R. and Skogerboe, G., 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 27- Wang, W.H., Jiao, X.Y., Zhu, Y. and Li, F., 2009. Variability of roughness coefficient and its effect on border irrigation performance. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(16), pp.288-293.

-
- 28- Zhu, Y., Jiao, X.Y., Wang, W.H. and Wang, S.F., 2009. Spatial variability of infiltration parameters and its influences on border irrigation performance, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 28(3), pp.46-49.
- 29- Ziayi, Gh., Abbasi, F., Babazadeh, H. and Kaveh, F., 2016. Study on Temporal Changes of Water Infiltration Parameters in Furrow Irrigation. *Journal of Iran Water and Soil Research*, 47(2), pp.229-236. (In Persian).