

## A Review on Different Methods for Determining Parameters of Infiltration Equations with Inverse Approach in Furrow Irrigation

MINA RAHIMI<sup>1</sup>, PAYAM KAMALI<sup>2</sup>, VAHID REZAVERDINEJAD<sup>1\*\*</sup>, HAMED EBRAHIMIAN<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2. Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aboureihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Department of Irrigation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Apr. 23, 2019- Revised: May. 30, 2019- Accepted: June. 10, 2019)

### ABSTRACT

In order to increase the efficiency of surface irrigation systems, it is necessary to estimate the coefficients of infiltration equations with high precision. Inverse modeling is a precise method for estimating the coefficients of infiltration equations. In this research in the first step, the performance of different infiltration equations including NRCS intake families, Kostiakov, modified Kostiakov, modified Kostiakov Branch Functions, Time-Rated Intake Family and Characteristic time were evaluated and compared. Then the best infiltration equation was determined so that it could estimate the advance, recession and runoff phases with the least error. By comparing different infiltration equations, the modified Kostiakov method with a mean percentage error of 2.14, 2.99 and 2.95 was determined as the best-performance infiltration equation in advance, recession and runoff phases, respectively. In the second step, based on the optimal infiltration equation (modified Kostiakov), three commonly used software for inverse estimation of infiltration equation parameters including: WinSRFR, IPARM and SIPAR-ID were compared using field data of four furrow irrigation under corn cultivation located at the research farm of agriculture and natural resources campus of university of Tehran in 2014. The results showed that the IPARM model with mean percentage errors of 2.40, 5.87, and 2.11, respectively, in advance, recession and runoff phases had a similar performance with the WinSRFR software, but it estimated the recession phase with an error of almost two times as compared to WinSRFR. The SIPAR-ID model in estimating the infiltration equation coefficients had poor performance with the highest volatility in the coefficients values.

**Keywords:** Surface irrigation, Infiltration parameters, Furrow, Inverse modeling

## مروری بر روش‌های مختلف تعیین پارامترهای معادلات نفوذ با رویکرد معکوس در آبیاری جویچه‌ای

مینا رحیمی<sup>۱</sup>، پیام کمالی<sup>۲</sup>، وحید رضاوردی نژاد<sup>۳\*</sup>، حامد ابراهیمیان<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۳/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۳/۲۰)

### چکیده

به منظور افزایش بازده سامانه‌های آبیاری سطحی، لازم است که ضرایب معادلات نفوذ با دقت بالایی تخمین زده شوند. مدل‌سازی معکوس از روش‌های دقیق در برآورد ضرایب معادلات نفوذ می‌باشد. در این تحقیق، در مرحله اول عملکرد معادلات مختلف نفوذ شامل خانواده نفوذ NRCS، کاستیاکف، کاستیاکف اصلاح شده، کاستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای، خانواده شدت نفوذ-زمان و زمان مشخص ارزیابی و مقایسه شدند. سپس بهترین معادله نفوذ بطوریکه که بتواند فازهای پیشروی، پسروی و رواناب را با کمترین خطا برآورد کند تعیین گردید. با مقایسه معادلات مختلف نفوذ، روش کاستیاکف اصلاح شده با متوسط درصد خطای ۲/۱۴، ۲/۹۹ و ۲/۹۵ به ترتیب در فازهای پیشروی، پسروی و رواناب، به عنوان معادله نفوذ با بهترین عملکرد تعیین شد. در مرحله دوم براساس معادله نفوذ بهینه (کاستیاکف اصلاح شده)، سه نرم‌افزار متداول در برآورد معکوس پارامترهای معادله نفوذ شامل: WinSRFR، IPARM و SIPAR-ID با استفاده از داده‌های میدانی چهار جویچه آبیاری تحت کشت ذرت واقع در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۳، مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل IPARM با متوسط درصد خطای ۲/۴۰، ۵/۸۷ و ۲/۱۱ به ترتیب در فازهای پیشروی، پسروی و رواناب عملکرد نسبتاً مشابهی با نرم‌افزار WinSRFR داشت؛ اما فاز پسروی را با خطای تقریباً دو برابری نسبت به آن برآورد نمود. مدل SIPAR-ID نیز عملکرد ضعیف با بیشترین نوسانات در مقادیر ضرایب را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری سطحی، پارامترهای نفوذ، جویچه، مدل‌سازی معکوس

### مقدمه

آبیاری سطحی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌های آبیاری در جهان است که از مزایای آن، صرف هزینه و انرژی کم می‌باشد. عملکرد آبیاری سطحی تابعی از طراحی مزرعه، ویژگی‌های نفوذ خاک و مدیریت آبیاری است. نفوذ مهم‌ترین عامل تاثیرگذار روی عملکرد، طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی است که تغییرات مکانی و زمانی آن بزرگترین محدودیت فیزیکی آن می‌باشد (Walker et al., 2006; Ebrahimian et al., 2010; Oyoonarte et al., 2002; McClymont and Smith, 1996). در آبیاری سطحی، نفوذ بر جبهه پیشروی و فاز پسروی تاثیرگذار است (Holzapfel et al., 2004). معادلات مختلفی برای نفوذ خاک ارائه شده‌اند که انتخاب روش مناسب بستگی به داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه دارد (Kazeroonian et al., 2017). از جمله معادلات نفوذ می‌توان به معادلات خانواده نفوذ NRCS، خانواده شدت نفوذ-زمان، زمان مشخص، کاستیاکف، کاستیاکف

اصلاح شده و کاستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای اشاره کرد. این معادلات توسط محققان مختلف بررسی، مقایسه و مورد استفاده واقع شده‌اند. (Walker et al., 2006) با بررسی خانواده نفوذ NRCS به این نتیجه رسیده‌اند که این معادلات به علت فرضیات ساده‌سازی شده بسیاری که دارند عملکرد ضعیفی در مطالعات آبیاری ارائه می‌دهند اما در غیاب داده‌های مزرعه‌ای در یک محل، اطلاعات کافی برای طراحی اولیه فراهم می‌نمایند. Soroush (2016) عملکرد خانواده نفوذ NRCS را با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای و مدل اینرسی صفر بررسی کرده و برای ارزیابی دقت تابع نفوذ منحنی پیشروی، توزیع زیرسطحی نفوذ و کل حجم نفوذ را ملاک قرار داد. این محقق در نتایج خود بیان داشته است که استفاده از روش NRCS در برخی موارد زمان‌های پیشروی و حجم نفوذ را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده و در برخی موارد نیز بیش‌برآورد داشته است که در حالت کلی از دقت مناسبی برای تخمین نفوذ برخوردار نبوده است. Maroufpoor et al.

بهترین برازش ایجاد شود (Gillies, 2008). Strelkoff *et al.* (2009) روش های موجود در تخمین پارامترهای نفوذ و ضریب زبری مانینگ را به دو بخش کلی تقسیم نمودند. بخش اول که در آن حل به صورت مستقیم است و از معادله بیلان حجمی با فرضیاتی ساده کننده استفاده می شود. در بخش دوم نیز از مدل - سازی معکوس استفاده می شود و با سعی و خطا و مقایسه نتایج اندازه گیری و شبیه سازی شده، پارامترهای معادلات نفوذ و ضریب زبری مانینگ تخمین زده می شود. کاربرد هر کدام از این روش ها بستگی به هدف استفاده و دقت تعیین نتایج دارد. (2015) Sedaghatdoost and Ebrahimian در مطالعه خود از مدل های ریاضی اینرسی - صفر، الگوریتم ژنتیک و هفت تابع هدف به صورت مدل سازی معکوس برای برآورد ضرایب نفوذ و زبری استفاده نمودند. براساس نتایج مشاهده شد که تابع هدفی که می تواند اختلاف مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده زمان های پیشروی، پسروی و حجم رواناب را به صورت همزمان بهینه کند ضرایب را نیز با دقت بالایی تخمین می زند. این توابع هدف براساس کمینه کردن اختلاف بین زمان پیشروی، پسروی و کل حجم رواناب خروجی می باشند. مدل های مختلفی برای برآورد معکوس ضرایب نفوذ خاک وجود دارد که می توان به روش های INFILT، IPARM و SIPAR-ID و اشاره کرد. محققان بسیاری به ارزیابی معکوس ضرایب معادله نفوذ کاستیاکف با استفاده از این مدل ها پرداخته اند. (2005) Khatri and Smith در مطالعه خود روش های دو نقطه ای، مدل INFILT، یک نقطه ای والیانتراس و همکاران، یک نقطه ای شپرد و همکاران، تابع خطی نفوذ و آپادهیا و راگوانشی را در برآورد پارامترهای نفوذ ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل INFILT دقت بالاتری نسبت به سایر روش ها داشت. (2009) Majdzadeh *et al.* در مطالعه ای که برای برآورد ضرایب معادله نفوذ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که روش INFILT و دو نقطه ای الیوت و واکر بهترین برآورد در تخمین ضرایب معادله نفوذ ارائه داده اند. (2007) Khatri از نرم افزارهای IPARM و INFILT و با استفاده از داده های پیشروی، رواناب و دبی ورودی، پارامترهای نفوذ معادله کاستیاکف اصلاح شده ( $f_0$  و  $k$  و  $a$ ) در جویچه را تعیین نمود. سپس از نرم افزار SIRMOD برای شبیه سازی استفاده کرده و عملکرد آبیاری شامل راندمان کاربرد، یکنواختی و کفایت را بررسی نمود. نتایج ارزیابی نفوذ نشان داد که منحنی های نفوذ تهیه شده با روش های مذکور از نظر شکل منحنی بسیار شبیه به توزیع تجمعی عمق نفوذ در کل مزرعه می باشد. (2014) Ebrahimian ضرایب معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده در جویچه های معمولی، یک در میان ثابت و یک در میان متغییر را با استفاده از

(2017) دقت معادله کاستیاکف اصلاح شده برای آبیاری جویچه - ای را بررسی کرده و مقادیر پیشروی برای هر آبیاری را با استفاده از معادله نفوذ مذکور در نرم افزارهای WinSRFR و SIRMOD شبیه سازی نمودند. این محققان در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که اگر در طراحی، شبیه سازی و ارزیابی سامانه های آبیاری جویچه ای از معادلات نفوذ اصلاح شده استفاده شود دقت نتایج به صورت قابل قبولی افزایش می یابد که باعث بهبود و افزایش شاخص های هیدرولیکی سامانه های آبیاری می شود. (2007) Parhi *et al.* با مقایسه معادلات نفوذ کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده روی ۴۰ مجموعه داده در پنج خاک مختلف در هند و ایالات متحده نشان دادند که معادله کاستیاکف اصلاح شده عملکرد بهتری در تمام خاک ها ارائه داده است. (1992) Maheshwari *et al.* معادلات نفوذ را در پنج خاک مختلف در آبیاری نواری مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که معادلات کاستیاکوف اصلاح شده و هورتن برازش خوبی روی داده های اندازه گیری شده در مزرعه دارد.

نفوذ آب در خاک با زمان و مکان متغیر است (Gillies and Smith, 2015) و ممکن است از یک نقطه مزرعه به نقطه دیگر و از زمانی به زمان دیگر، چندین برابر تغییر کند. به همین دلیل، تعیین پارامترهای نفوذ، سخت و زمان بر است (Sedaghatdoost and Ebrahimian, 2015). با تخمین دقیق ضرایب معادله نفوذ، طراحی دقیق صورت گرفته و بازده آبیاری نیز افزایش می یابد. روش های مختلفی برای اندازه گیری نفوذ در آبیاری سطحی وجود دارد که از آن جمله می توان به روش های ورودی - خروجی، دو نقطه ای الیوت - واکر (Elliott and walker, 1982)، تک نقطه ای شپرد و همکاران (Shepard *et al.*, 1993)، تک نقطه ای والیانتراس و همکاران (Valiantzas *et al.*, 2001) و بهینه سازی چند سطحی (Walker, 2005) اشاره کرد. اما همواره استفاده از روش های ساده تر با دقت بالا، ارجحیت دارد (Corradini *et al.*, 1997). (2009) Bautista *et al.* بیان کردند که استفاده از روش دو نقطه ای به سبب اطلاعات محدود آن، که تنها از داده های فاز پیشروی استفاده می کند، دقیق نبوده و با عدم قطعیت همراه است. مدل سازی معکوس روشی برای تعیین مقادیر پارامترهای نفوذ با استفاده از داده های اندازه گیری شده فازهای پیشروی، پسروی و رواناب می باشد (McClymont and Smith, 1996). در واقع مدل سازی معکوس فرآیند برآورد ورودی های یک معادله با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی و استفاده از داده های اندازه - گیری شده در مزرعه می باشد (Khatri and Smith, 2005). در این روش، پارامترهای معادله نفوذ به نحوی برآورد می شوند که بین مقادیر حاصل از مدل شبیه سازی و مقادیر اندازه گیری شده،

مدل‌های IPARM، INFILT و روش دو نقطه‌ای ارزیابی نمود. نتایج نشان داد که کمترین تلفات رواناب و بیشترین نفوذ در جویچه‌های یک در میان بوده است و نفوذ در روش آبیاری یک در میان متغیر بیشتر از روش آبیاری یک در میان ثابت بود. به علاوه مدل IPARM دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر داشت و مدل INFILT در مقادیر نفوذ بیش برآورد داشت که برای مطالعات مزرعه‌ای مدل مناسبی نمی‌باشد. در این مطالعه بیان شده است که برای رسیدن به نتایج رضایت‌بخش، استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب به طور همزمان ضروری است. Xiaoyan *et al.* (2008) در مطالعه خود با استفاده از نرم‌افزار IPARM و بر مبنای بیان حجمی پارامترهای نفوذ معادله کاستیاکف اصلاح شده در جویچه را برآورد و در این راستا از داده‌های پیشروی و رواناب برداشت شده از مزرعه استفاده نمودند. سپس با استفاده از نرم‌افزار WinSRFR جریان آب در جویچه را شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل IPARM دقت بالایی در ارزیابی پارامترهای نفوذ خاک در جویچه‌های آبیاری برای شبیه‌سازی و مدیریت آبیاری دارد. Kamali *et al.* (2015) روش‌های بهینه‌سازی چندسطحی که براساس استفاده از داده‌های پیشروی، پسروی و رواناب است و مدل IPARM که براساس استفاده از داده‌های پیشروی و رواناب است، پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده را تخمین زدند. این محققان با ۱۴ دوره آبیاری و با دو دبی ورودی ۰/۲۹ و ۰/۴۴ لیتر در ثانیه در طول فصل رشد ذرت، متوسط خطای نسبی برآورد حجم آب نفوذ یافته مدل IPARM و بهینه‌سازی چندسطحی را به ترتیب ۸/۱ و ۸/۵ درصد بدست آوردند. نتایج نشان داد که هر دو روش در تخمین حجم آب نفوذ یافته برای همه سری داده‌ها کم برآورد بوده‌اند اما روش IPARM خطای کمتری نسبت به روش بهینه‌سازی چندسطحی داشته است و در مجموع عملکرد هر دو روش برای برآورد پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای قابل قبول بوده است. Kamali *et al.* (2018) روش‌های تخمین معکوس ضرایب معادله نفوذ شامل دو نقطه‌ای، بهینه‌سازی چندسطحی، SIPAR-ID و IPARM را در شرایط کشت داخل جویچه بررسی کردند. براساس ضرایب تخمینی معادله نفوذ، مدل IPARM با متوسط خطای نسبی ۱/۲۴ و ۱/۵۲ درصد و روش بهینه‌سازی چندسطحی با متوسط خطای نسبی ۱/۴۴ و ۱/۵۸ درصد در تخمین حجم آب نفوذ یافته در خاک، بهترین عملکرد را به ترتیب در دبی‌های ۰/۲۹ و ۰/۴۴ لیتر در ثانیه داشتند ولی مدل SIPAR-ID در تخمین

ضرایب معادله نفوذ در جویچه‌های کشت شده عملکرد ضعیف و با نوسانات زیاد داشت. روش دو نقطه‌ای نیز عملکرد قابل قبولی در تخمین حجم نفوذ یافته با متوسط خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد ارائه نموده است. Ramezani *et al.* (2012) ضرایب معادله نفوذ کاستیاکف را در آبیاری جویچه‌ای در شش سری جویچه انتها بسته و شش سری جویچه انتها باز با شرایط مختلف مزرعه‌ای از جمله طول، شیب و رژیم جریان با استفاده از سه مدل EVALU، SIPAR-ID و INFILT تخمین زدند. ارزیابی نتایج ضرایب معادله نفوذ از طریق مقایسه حجم آب نفوذ یافته محاسبه و اندازه‌گیری شده در خاک انجام شد. این محققان بیان داشته‌اند که در برآورد میزان آب نفوذ یافته در خاک و ضرایب نفوذ، مدل‌های EVALU و SIPAR-ID کمترین خطا در حالت انتها بسته دارند و در حالت انتها باز نیز مدل SIPAR-ID عملکرد مناسبی داشته است. Nie *et al.* (2014) تحقیقی به منظور بررسی دقت مدل SIPAR-ID در برآورد ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری در فاروهای کشت نشده انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که این مدل برای ضرایب مذکور دقت قابل قبولی دارد. (2015) Tabatabaei and Asadi نیز در مطالعه خود دقت مدل SIPAR-ID در فاروهای کشت نشده به منظور برآورد ضرایب معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ بررسی کردند. نتایج این مطالعه حاکی از دقت بالای مدل در برآورد ضرایب مذکور داشت. Gillies (2015) and smith مدل SISCO را براساس معادلات یک بعدی سنت-ونانت برای شبیه‌سازی فرآیندهای آبیاری سطحی بسط دادند. این محققان در مطالعه خود، برای صحت‌سنجی مدل SISCO از مدل‌های WinSRFR و SIRMOD استفاده نمودند. براساس نتایج، هر سه مدل مراحل پیشروی، رواناب و عمق نفوذ را یکسان برآورد نمودند. همچنین هر سه مدل مقادیر پیک هیدروگراف رواناب را ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر مشاهداتی برآورد نمودند. با توجه به بررسی منابع، روش‌ها و معادلات مختلف نفوذ به صورت یکپارچه مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند؛ لذا در این مطالعه معادلات مختلف نفوذ شامل خانواده نفوذ NRCS<sup>۱</sup>، کاستیاکف<sup>۲</sup>، کاستیاکف اصلاح شده<sup>۳</sup>، کاستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای<sup>۴</sup>، خانواده شدت نفوذ-زمان<sup>۵</sup> و زمان مشخص<sup>۶</sup> که مبتنی بر معادله بیان حجم هستند، ارزیابی و با یکدیگر مقایسه گردیده و معادله نفوذ بهینه استخراج شده است. در گام بعدی با توجه به اهمیت برآورد معکوس پارامترهای معادلات نفوذ، براساس معادله نفوذ بهینه حاصل از مرحله اول، فرایند بهینه‌سازی با رویکرد حل

5- Time-Rated Intake Family  
6- Characteristic Time

1- NRCS Intake Family  
2- Kostiaikov  
3- Modified Kostiaikov  
4- Modified Kostiaikov branch function

شده شاخه‌ای، خانواده شدت نفوذ-زمان، زمان مشخص در نظر گرفته شد که معادلات آنها در ادامه تشریح می‌گردد.

#### معادله نفوذ کاستیاکف

معادله نفوذ کاستیاکف (Kostiakov, 1932) از ساده‌ترین و رایج‌ترین معادلات می‌باشد که در مطالعات آبیاری بسیار استفاده می‌شود (رابطه ۱):

$$Z = kt^a \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $a$  (بدون بعد) و  $k$  ( $m^3/m/min^a$ ) پارامترهای تجربی هستند که با استفاده از ارزیابی‌های مزرعه‌ای یا به روش معکوس برآورد می‌شوند.

مشکل اصلی این معادله این است که مشتق آن (مقدار نفوذ) در مدت زمان‌های طولانی نفوذ، به صفر میل می‌کند (Smerdon *et al.*, 1988). بنابراین این مدل برای مدت زمان‌های کوتاه مناسب است و در مدت زمان‌های طولانی کارایی قابل قبولی ندارد.

#### معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده

اندازه‌گیری‌های میدانی نشان داده است که سرعت نفوذ در برخی خاک‌ها قبل از اتمام آبیاری به یک مقدار ثابت میل می‌کند (Smerdon *et al.*, 1988). از آنجا که معادله نفوذ کاستیاکف برای مدت زمان‌های طولانی با یک مقدار مشخص نفوذ کارایی قابل قبولی ندارد، با افزودن مقدار نفوذ نهایی به آن می‌توان این معادله را برای مدت زمان‌های طولانی اصلاح کرد که رابطه ایجاد شده در این حالت، معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده یا کاستیاکف-لویس نامیده می‌شود (رابطه ۲) (Walker *et al.*, 2006). در بررسی اثر جریان‌های ترجیحی بر نفوذ مقدار  $c$  نیز به رابطه افزوده می‌شود (Strelkoff *et al.*, 1998).

$$Z = Kt^a + f_0t + C \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $t$  فرصت زمان نفوذ (min)،  $k$  ( $m^3/m/min^a$ )،  $a$  (بدون بعد) و  $f_0$  ( $m^2/min$ ) سرعت نفوذ نهایی می‌باشند.

#### معادله نفوذ NRCS

در سال ۱۹۵۰ سازمان حفاظت منابع طبیعی دپارتمان کشاورزی آمریکا استفاده از مفهوم خانواده نفوذ به عنوان روشی برای طبقه‌بندی نفوذ با توجه به رفتار نفوذ در خاک‌های مشابه را ارائه داد (Walker *et al.*, 2006). معادله نفوذ مربوطه به صورت رابطه (۳) ارائه شده است:

$$Z = kt^a + c \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن  $k$  و  $a$  ضرایب تجربی برای خانواده‌های مختلف نفوذ می‌باشند اما مقدار  $c$  برای همه خانواده‌ها عدد ثابتی است (۷)

معکوس در نظر گرفته شد. روش‌های IPARM و SIPAR-ID برای برآورد معکوس پارامترها در مطالعات مختلف بکار گرفته شده است؛ اما قابلیت مدل WinSRFR در تخمین معکوس پارامترهای نفوذ (بخش تحلیل رویداد مدل<sup>۷</sup>) بکار گرفته نشده و صرفاً از نرم‌افزار WinSRFR برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شرایط مزرعه استفاده شده است. در این مطالعه نرم‌افزارهای WinSRFR (Bautista *et al.*, 2009)، IPARM (Gillies *et al.*, 2005) و SIPAR-ID (Rodriguez and Martos, 2010) که قابلیت تخمین پارامترها به روش حل معکوس را دارند، استفاده گردیده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نکته حائز اهمیت دیگر این است که در سایر مطالعات صورت گرفته، تابع هدف کمینه‌سازی اختلاف کل حجم رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بوده و در بسیاری از موارد نتایج نشان می‌داد که حجم رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برابر بوده اما با این حال در برخی از مکان‌های هیدروگراف کم-برآوردی و در برخی از مکان‌ها بیش‌برآوردی روی داده است. اما در این مطالعه تابع هدف (کمینه‌سازی اختلاف حجم رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده)، بصورت نقطه به نقطه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مجموع اختلاف‌های حجم رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در طول هیدروگراف جریان، به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، در سال ۱۳۹۳ انجام گرفت. در این مطالعه، فواصل و طول جویچه‌ها به ترتیب ۰/۷۵ و ۱۱۰ متر و شیب طولی مزرعه ۰/۱۲ متر بر متر بود. همچنین عرض پایینی و بالایی جویچه یک، به ترتیب ۱۸ و ۳۰ سانتی‌متر، جویچه دو برابر ۲۰ و ۳۵ سانتی‌متر، جویچه سه ۲۳ و ۳۸ و برای جویچه چهار ۲۲ و ۳۷ با محصول تحت کشت ذرت علوفه‌ای ۷۰۴ کراس و بافت خاک لوم رسی می‌باشد. در این تحقیق هفت سری آزمایش (نوبت) آبیاری جویچه‌ای به صورت انتها باز انجام شد. جریان‌های ورودی و خروجی توسط فلوم‌های WSC تیپ دو برای چهار جویچه با دبی‌های مختلف اندازه‌گیری شد. دبی ورودی در جویچه یک در بازه ۰/۲۴-۰/۲۷، در جویچه دو ۰/۳۷-۰/۴۳، در جویچه سه ۰/۲۷-۰/۲۹ و در جویچه چهار در بازه ۰/۴۴-۰/۴۶ قرار دارد. در این مطالعه معادلات مختلف نفوذ شامل خانواده نفوذ NRCS، کاستیاکف، کاستیاکف اصلاح شده، کاستیاکف اصلاح

کاستیاف اصلاح شده است که تا قبل از رسیدن به نفوذ پایه و بخش دوم یک تابع خطی است که برای فرصت‌های نفوذ بیشتر از نفوذ پایه معتبر است.

جهت انتخاب معادله نفوذ بهینه، از آماره‌های خطا استفاده گردید. در مرحله دوم و براساس معادله نفوذ بهینه حاصل از مرحله اول، فرایند بهینه‌سازی با رویکرد حل معکوس در نظر گرفته شد. برای این منظور نرم‌افزارهای WinSRFR (Bautista et al., 2009) و IPARM (Gillies et al., 2005) و SIPAR-ID (Rodriguez and Martos, 2010) که قابلیت تخمین پارامترها به روش حل معکوس را دارند، بکار گرفته شد. مدل‌های تعیین نفوذ با رویکرد معکوس در ادامه تشریح می‌گردد.

#### مدل WinSRFR

در این نرم‌افزار دو روش برای ارزیابی پارامترهای نفوذ با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای وجود دارد که عبارتند از روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (Elliot and Walker, 1982) و روش مریام-کلر (Merriam and Keller, 1978). روش تعادل حجمی مریام-کلر، عمدتاً روی فاز پیشروی روش‌های آبیاری نواری، کرتی و جویچه‌ای به کار گرفته می‌شود. به علت مشکل بودن حل معادله هیدرودینامیک کامل، از معادلات مومنتم در این معادله صرف نظر می‌شود که مدل‌هایی که بر اساس این ساده‌سازی می‌باشند تعادل حجمی نامیده می‌شوند (Valipour et al., 2015). در ارزیابی‌های متعددی از روش تعادل حجمی برای ارزیابی پارامترهای نفوذ با استفاده از سری داده‌های ورودی و فرض‌هایی استفاده شده است (Alazba, Weibo et al., 2012; Hall, 1956). روش تعادل حجمی مریام کلر حجم نفوذیافته ( $V_Z$ ) را با استفاده از تعادل حجمی پس از آبیاری که در آن حجم ذخیره سطحی ( $V_Y$ ) صفر در نظر گرفته شده و با انتگرال‌گیری از عمق نفوذ که تابعی از فاصله  $x$  است ( $Z(x)$ ) محاسبه می‌کند (رابطه ۷):

$$V_Z = V_Q - V_{RQ} = \int_0^L z(x) WP dx \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن  $V_Q$ ،  $V_{RQ}$  و  $WP$  به ترتیب حجم ورودی، حجم رواناب و طول عرضی جریان خاک که نفوذ از طریق آن صورت می‌گیرد، می‌باشند. اگر زمان‌های پیشروی ( $t_{xi}$ ) و پسروی ( $t_{ri}$ ) در نقاط مشخصی از مزرعه اندازه‌گیری شده باشند در این صورت  $V_Z$  از رابطه (۸) قابل محاسبه خواهد بود (Bautista et al., 2009):

$$V_Z = \sum_{i=1}^N WP \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$Z_i = k(t_{xi} - t_{ri})^a + b(t_{xi} - t_{ri}) + c$$

میلی‌متر یا ۰/۲۸ اینچ). خانواده نفوذ NRC (USDA, 1974)، به علت عملکرد و کارایی گسترده آن در آبیاری سطحی بسیار استفاده می‌شود. این معادله تلاش می‌کند تا هر خانواده را با پارامترهایی که مبنای فیزیکی دارند تعیین نماید (Sayah et al., 2016). در این روش، خاک‌هایی که میزان نفوذ نهایی، ظرفیت آب در دسترس و منطقه ریشه‌دوانی تقریباً یکسان دارند در یک گروه قرار می‌گیرند. این تکنیک می‌تواند در فاز طراحی آبیاری اول که ویژگی‌های خاک از خاک‌های مشابه تخمین زده می‌شود مفید واقع شود (Gillies, 2008).

#### معادله نفوذ زمان مشخص

این مفهوم برپایه این فرض استوار است که برای تامین عمق مورد نیاز ( $D_{req}$ ) فرصتی برای نفوذ نیاز است. یعنی نفوذ می‌تواند با توجه به زمان مورد نیاز برای رسیدن به عمق مورد نیاز مشخص شود (Bautista et al., 2009). این رابطه به صورت رابطه (۴) ارائه شده است (Strelkoff et al., 1998):

$$Z = kt_c^a \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن،  $t_c$  فرصت زمان نفوذ برای تامین عمق مورد نیاز مشخص می‌باشد و  $k$  ضریب تجربی است.

#### معادله نفوذ خانواده شدت نفوذ-زمان

این رابطه مشابه مفهوم زمان نفوذ مشخص است که تا عمق ۱۰۰ میلی‌متری بکار برده می‌شود.  $t_{100}$  تنها داده‌ی ورودی مورد نیاز این روش است. در این فرمول توان  $a$  از رابطه (۵) که یک رابطه تجربی است محاسبه می‌شود (Merriam and Clemmens, 1985):

$$a = 0.675 - 0.2125 \log_{10}(t_{100}) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $t_{100}$  فرصت نفوذ مشخص تا عمق ۱۰۰ میلی‌متری (hr) می‌باشد.

#### معادله نفوذ کاستیاف اصلاح شده شاخه‌ای

معادله کاستیاف اصلاح شده به کاهش مداوم مقدار نفوذ اشاره دارد. در برخی از خاک‌ها مقدار نفوذ در دوره‌های زمانی کوتاه کاهش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد (Bautista et al., 2009) که این رفتار توسط توابع شاخه‌ای اصلاح می‌شود (رابطه ۶) (Clemmens, 1981):

$$\begin{aligned} Z &= C + kt^a & t \leq t_b \\ Z &= C_B + bt & t > t_b \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن  $t_b$  مدت زمان لازم برای رسیدن به سرعت نفوذ نهایی می‌باشد.

این رابطه دارای دو بخش است: بخش اول همان رابطه نفوذ

مدل برای تخمین ضرایب از معادله بیلان حجمی و روش حل معکوس استفاده کرده و از شبکه عصبی مصنوعی به منظور به حداقل رساندن اختلاف مرحله پیشروی اندازه گیری و شبیه سازی شده استفاده می کند (Rodriguez and Martos, 2010). این مدل توانایی انجام آنالیز حساسیت و عدم قطعیت نتایج خروجی را نیز دارد. در این مدل برای شبیه سازی فاز پیشروی از مدل بیلان حجمی استفاده می شود و حل عددی در مدل براساس ترکیب معادله بیلان حجمی و شبکه عصبی مصنوعی است (Strelkoff and Katopodes, 1977). در مدل SIPAR-ID برای یافتن پاسخ بهینه سراسری با همگرایی مناسب از الگوریتم تکاملی تفاضلی استفاده شده است.

#### ارزیابی عملکرد روش ها

پارامترهای نفوذ در تمامی معادلات نفوذ ذکر شده، توسط هر سه مدل نرم افزاری و برای هر هفت آبیاری برآورد شد. به منظور بررسی دقت و صحت روش های برآورد پارامترهای نفوذ و تعیین بهترین معادله نفوذ، مقادیر رواناب خروجی پیش بینی و اندازه گیری شده، برای هر جویچه آزمایشی مقایسه شد. برای این منظور از معیارهای خطا شامل: ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و نش ساتکلیف (NS) برای ارزیابی برآورد پارامترهای نفوذ، مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه } 12)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (P^t - M^t)^2}{\sum_{t=1}^T (M^t - \bar{M})^2} \quad (\text{رابطه } 13)$$

که در رابطه (۱۲)،  $P_i$  و  $M_i$  به ترتیب مقادیر پیش بینی و اندازه گیری شده بوده و  $n$  تعداد پارامترهاست. در رابطه (۱۳)،  $\bar{M}$  متوسط مقدار اندازه گیری شده،  $M^t$  مقدار اندازه گیری شده در زمان  $t$  و  $P^t$  مقدار برآورد شده در زمان  $t$  می باشند. هرچه مقدار شاخص NS به عدد یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده کارایی بیشتر مدل است (Nash and Sutcliffe, 1970).

#### نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای معادلات مختلف نفوذ، برای تمام جویچه ها و نوبت های آبیاری استخراج گردید که نتایج برای جویچه های یک و دو در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. نتایج برای جویچه های سه و چهار نیز مشابه نتایج ارائه شده برای جویچه های یک و دو می باشد که به علت حجم بالای داده ها از ارائه آن ها خودداری شد.

#### مدل IPARM<sup>A</sup>

روش های اصلی تخمین نفوذ، مبتنی بر بیلان حجمی براساس داده های پیشروی ایجاد شده اند. روش های مبتنی بر بیلان حجمی این ضعف را دارند که فقط از داده های مرحله پیشروی استفاده می کنند که در این صورت، بخشی از فرآیند جریان در تخمین پارامترهای نفوذ نادیده گرفته می شوند. مدل بیلان حجمی که در برآورد معکوس پارامترهای نفوذ استفاده می شود، به منظور وارد آوردن داده های رواناب و برای تخمین دقیق پارامترهای نفوذ اصلاح شد. بر این اساس (Gillis and Smith, 2005) این مدل کامپیوتری را برای برآورد پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکف با استفاده از داده های رواناب و پیشروی توسعه دادند. هدف این مدل به حداقل رساندن اختلاف پیشروی اندازه گیری و محاسبه شده و به حداقل رساندن رواناب اندازه گیری و محاسبه شده است. مدل IPARM از درون یابی خطی هیدروگراف ورودی برای محاسبه حجم کل ورودی برای هر نقطه پیشروی و رواناب استفاده می کند (Gillies et al., 2007). الگوریتم برای هر فاز به صورت روابط (۹) و (۱۰) می باشد:

$$SSE_{advance} = \sum_{i=1}^{N_a} \left[ x_i - \frac{Q_0 t_i}{\sigma_y A_0 + \sigma_{z1} k t_i^a + \sigma_{z2} f_0 t_i} \right]^2 \quad (\text{رابطه } 10)$$

$$SSE_{runoff} = \sum_{i=1}^{N_r} \left[ V_{Ri} - (Q_0 t_i - \sigma_{ys} A_0 L - \sigma_{z1} k t_i^a L - \sigma_{z2} f_0 L) \right]^2$$

که در آن SSE مجذور خطای استاندارد،  $x_i$  فاصله پیشروی اندازه گیری شده،  $t_i$  زمان،  $V_{Ri}$  حجم رواناب،  $N_a$  تعداد نقاط پیشروی و  $N_r$  تعداد نقاط اندازه گیری شده حجم رواناب است. در نهایت تابع هدف به صورت رابطه (۱۱) خواهد بود:

$$OF = \left( \frac{SSE_{advance}}{\sum_{i=1}^{N_a} x_i^2} \right) + w^* \left( \frac{SSE_{runoff}}{\sum_{i=1}^{N_r} V_{ri}^2} \right) \quad (\text{رابطه } 11)$$

که در آن  $w^*$  فاکتور وزن است که توسط کاربر برای تعیین اهمیت بخش پیشروی یا رواناب در مطالعات وارد می شود.

#### مدل SIPAR-ID

SIPAR-ID مدلی است که برای تخمین ضرایب نفوذ معادله کاستیاکف و ضریب زبری مانینگ در آبیاری سطحی پیشنهاد شده است (Rodriguez and Martos, 2010). محدودیتی از نظر باز یا بسته بودن انتهای مزرعه برای این مدل وجود ندارد. این

آبیاری دوم تا هفتم مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شبیه-سازی آبیاری جویچه‌ای، نرم‌افزار WinSRFR بکار گرفته شد.

آبیاری‌های اول به علت تغییرات گسترده و زیاد در مقادیر نفوذ، اغلب در نظر گرفته نمی‌شوند (Childs *et al.*, 1993). در این مطالعه نیز از بررسی آبیاری اول صرف نظر شده و نتایج از

جدول ۱. مقادیر پارامترهای معادلات مختلف نفوذ در جویچه یک

نوبت آبیاری	معادله	RMSE		NS		a	k (m <sup>3</sup> /min <sup>3</sup> /m)	b (m <sup>3</sup> /min/m)	عمق رواناب	عمق رواناب
		پیشروی	پسروی	رواناب	رواناب				اندازه‌گیری شده (L)	شبیه‌سازی شده (L)
۲	خانواده NRCS نفوذ	۳/۱۸	۳/۱۸	۳/۴۹	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۰۰۰۳۱۹	-	۱۷۳۲/۵۰	۱۷۳۲/۵۰
۳		۴/۵۳	۲/۸۴	۳/۶۲	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۰۰۰۳۱۹	-	۱۲۳۷/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۴		۱/۸۶	۳/۴۶	۳/۳۰	۰/۴۶	۰/۷۴	۰/۰۰۰۲۹۵	-	۱۰۷۲/۵۰	۹۹۰/۰۰
۵		۳/۲۴	۳/۱۴	۳/۵۰	۰/۵۰	۰/۷۵	۰/۰۰۰۳۱۹	-	۱۰۷۲/۵۰	۱۰۷۲/۵۰
۶		۴/۳۵	۸/۴۰	۳/۹۰	۰/۵۸	۰/۷۱	۰/۰۰۰۱۹۶	-	۱۴۰۲/۵۰	۱۵۶۷/۵۰
۷		۳/۰۴	۲/۳۳	۳/۴۰	۰/۵۲	۰/۷۴	۰/۰۰۰۲۹۵	-	۹۰۷/۵۰	۸۲۵/۵۰
۲		خانواده شدت نفوذ- زمان	۶/۵۵	۵/۶۲	۴/۳۷	۰/۳۸	۰/۵۸	۰/۰۰۰۶۷۳	-	۱۷۳۲/۵۰
۳	۶/۷۰		۵/۳۶	۳/۹۱	۰/۲۳	۰/۵۸	۰/۰۰۰۷۰۸	-	۱۲۳۷/۵۰	۱۳۲۰/۰۰
۴	۴/۳۴		۶/۴۱	۴/۵۰	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۰۰۰۶۳۸	-	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۵	۲/۴۶		۵/۸۱	۴/۵۴	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۰۰۰۶۸۲	-	۱۰۷۲/۵۰	۱۲۳۷/۵۰
۶	۱/۷۷		۱۰/۹۰	۳/۲۸	۰/۷۰	۰/۵۱	۰/۰۰۰۵۰۸	-	۱۴۰۲/۵۰	۱۵۶۷/۵۰
۷	۶/۰۲		۴/۶۶	۴/۰۷	۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۰۰۰۶۳۱	-	۹۰۷/۵۰	۸۲۵/۰۰
۲	زمان مشخص		۴/۹۶	۳/۷۸	۴/۱۷	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۰۰۰۱۸۳	-	۱۷۳۲/۵۰
۳		۷/۶۹	۲/۸۸	۳/۲۵	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۰۰۰۱۸۸	-	۱۲۳۷/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۴		۶/۳۸	۳/۵۵	۳/۵۰	۰/۳۹	۰/۶۵	۰/۰۰۰۱۶۸	-	۱۰۷۲/۵۰	۹۹۰/۰۰
۵		۳/۱۷۰	۶/۷۰	۶/۷۵	۰/۷۴	۰/۳۲	۰/۰۰۰۲۶۹	-	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۶		۳۲/۲۰	۱۵/۳۰	۶/۲۳	۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۰۰۰۲۴۳	-	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۸۵/۰۰
۷		۳/۴۳	۳/۴۳	۸/۲۰	۰/۱۷	۰/۵۰	۰/۰۰۰۱۸۹	-	۹۰۷/۵۰	۸۲۵/۰۰
۲		کاستیاکف	۴/۹۶	۳/۷۸	۴/۱۶	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۰۰۰۱۸۳	-	۱۷۳۲/۵۰
۳	۶/۳۳		۳/۰۷	۳/۵۵	۰/۳۴	۰/۶۳	۰/۰۰۰۱۹۳	-	۱۲۳۷/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۴	۶/۳۸		۳/۵۵	۳/۵۱	۰/۳۹	۰/۶۵	۰/۰۰۰۱۶۷	-	۱۰۷۲/۵۰	۹۹۰/۰۰
۵	۳۳/۹۰		۷/۰۷	۵/۳۰	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۰۰۰۲۷۵	-	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۶	۴/۴۹		۸/۶۶	۴/۹۲	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۰۰۰۱۶۷	-	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۸۵/۰۰
۷	۳/۴۳		۳/۴۳	۸/۳۰	۰/۱۸	۰/۵۰	۰/۰۰۰۱۸۹	-	۹۰۷/۵۰	۸۲۵/۰۰
۲	کاستیاکف اصلاح شده		۱/۴۳	۳/۱۴	۲/۷۲	۰/۶۸	۰/۲۶	۰/۰۰۰۱۱۷	۰/۰۰۰۰۶۴	۱۷۳۲/۵۰
۳		۱/۳۱	۲/۴۲	۲/۴۸	۰/۷۴	۰/۲۲	۰/۰۰۰۱۱۹	۰/۰۰۰۰۷۶	۱۲۳۷/۵۰	۱۲۳۷/۵۰
۴		۲/۴۷	۲/۸۵	۲/۳۶	۰/۷۳	۰/۲۶	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۷۲	۱۰۷۲/۵۰	۹۹۰/۰۰
۵		۵/۶۳	۲/۷۴	۲/۳۰	۰/۷۹	۰/۲۰	۰/۰۰۰۰۹۶	۰/۰۰۰۰۰۸	۱۰۷۲/۵۰	۱۰۷۲/۵۰
۶		۴/۶۷	۸/۴۶	۳/۵۰	۰/۶۵	۰/۲۰	۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۵۵	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۸۵/۰۰
۷		۲/۱۴	۲/۱۵	۲/۵۴	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۰۰۰۰۷۰	۰/۰۰۰۰۱۰۳	۹۰۷/۵۰	۹۰۷/۵۰
۲		کاستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای	۵/۳۷	۳/۳۱	۳/۵۹	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۰۰۰۱۸۱	۰/۰۰۰۰۷۲	۱۷۳۲/۵۰
۳	۶/۹۹		۲/۹۱	۳/۳۴	۰/۴۲	۰/۶۴	۰/۰۰۰۱۹۰	۰/۰۰۰۰۷۶	۱۲۳۷/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۴	۲/۴۷		۲/۸۵	۲/۳۶	۰/۷۲	۰/۲۶	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۷۲	۱۰۷۲/۵۰	۹۹۰/۰۰
۵	۱۴/۸۰		۳/۲۱	۶/۵۰	۰/۶۱	۰/۱۹	۰/۰۰۰۱۸۴	۰/۰۰۰۰۰۸	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۶	۲/۵۰		۵/۵۸	۳/۶۰	۰/۶۳	۰/۵۰	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۰۰۰۶۲	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۸۵/۰۰
۷	۱۰/۱۱		۲/۸۲	۶/۰۵	۰/۵۰	۰/۳۲	۰/۰۰۰۱۹۷	۰/۰۰۰۰۶۷	۹۰۷/۵۰	۹۰۷/۵۰



جدول ۲. مقادیر پارامترهای معادلات مختلف نفوذ در جویچه دو

نوبت آبیاری	معادله	RMSE		NS		ضریب a	ضریب k (m <sup>3</sup> /min <sup>2</sup> /m)	ضریب b (m <sup>3</sup> /min/m)	عمق رواناب اندازه گیری شده (L)	عمق رواناب شبیه سازی شده (L)
		پیشروی	پسروی	رواناب	رواناب					
۲	خانواده NRCS نفوذ	۲/۳۲	۳/۵۰	۲/۷۶	-۰/۹۲	۰/۷۴	-۰/۰۰۰۲۹۵	-	۳۱۳۵/۰۰	۳۰۵۲/۵۰
۳		۱/۱۹	۱/۶۱	۸/۶۶	-۰/۲۳	۰/۷۴	-۰/۰۰۰۲۹۵	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۷۲۲/۵۰
۴		۱/۱۰	۲/۳۶	۸/۲۰	-۰/۲۹	۰/۷۳	-۰/۰۰۰۲۴۵	-	۲۱۴۵/۰۰	۲۲۲۷/۵۰
۵		۱/۲۲	۲/۷۹	۳/۹۶	-۰/۷۷	۰/۷۵	-۰/۰۰۰۳۱۹	-	۲۲۲۷/۵۰	۲۱۴۵/۰۰
۶		۱/۳۴	۲/۲۴	۳/۰۶	-۰/۸۶	۰/۷۵	-۰/۰۰۰۳۱۹	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۴۷۵/۰۰
۷		۱/۲۶	۲/۵۷	۴/۶۱	-۰/۷۷	۰/۷۵	-۰/۰۰۰۳۱۹	-	۱۷۳۲/۵۰	۱۶۵۰/۰۰
۲		خانواده شدت نفوذ- زمان	۵/۰۸	۶/۷۶	۴/۱۸	-۰/۸۱	۰/۵۵	-۰/۰۰۰۶۰۵	-	۳۱۳۵/۰۰
۳	۲/۴۷		۳/۹۶	۷/۴۳	-۰/۴۳	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۶۱۷	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۸۰۵/۰۰
۴	۳/۴۰		۲/۰۱	۷/۵۲	-۰/۴۱	۰/۵۱	-۰/۰۰۰۵۰۴	-	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۵	۲/۳۲		۶/۳۸	۴/۱۲	-۰/۷۵	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۶۲۱	-	۲۲۲۷/۵۰	۲۳۱۰/۰۰
۶	۲/۳۶		۵/۶۳	۴/۱۱	-۰/۷۵	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۶۲۳	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۷۲۲/۵۰
۷	۴/۲۲		۵/۵۵	۴/۵۰	-۰/۸۱	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۶۱۰	-	۱۷۳۲/۵۰	۱۷۳۲/۵۰
۲	زمان مشخص		۱/۸۸	۴/۸۱	۵/۷۴	-۰/۶۴	۰/۵۲	-۰/۰۰۰۲۰۶	-	۳۱۳۵/۰۰
۳		۸/۸۶	۳/۰۵	۹/۶۰	-۰/۵۵	۰/۴۳	-۰/۰۰۰۲۴۰	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۴		۱/۲۲	۲/۲۳	۳/۴۳	-۰/۸۲	۰/۵۰	-۰/۰۰۰۱۷۱	-	۲۱۴۵/۰۰	۲۲۲۷/۵۰
۵		۲/۴۰	۳/۴۸	۳/۵۸	-۰/۸۱	۰/۶۰	-۰/۰۰۰۱۹۸	-	۲۲۲۷/۵۰	۲۲۲۷/۵۰
۶		۴/۲۷	۳/۸۳	۷/۶۳	-۰/۱۴	۰/۵۰	-۰/۰۰۰۲۲۲	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۷		۲/۵۳	۳/۳۶	۳/۳۴	-۰/۸۸	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۲۰۰	-	۱۷۳۲/۵۰	۱۶۵۰/۰۰
۲		کاستیاکف	۲/۴۵	۵/۱۰	۷/۴۱	-۰/۴۰	۰/۴۹	-۰/۰۰۰۲۱۴	-	۳۱۳۵/۰۰
۳	۸/۸۶		۳/۰۵	۹/۶۰	-۰/۵۵	۰/۴۳	-۰/۰۰۰۲۴۰	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۴	۶/۴۲		۲/۰۸	۳/۴۸	-۰/۸۵	۰/۳۵	-۰/۰۰۰۲۰۰	-	۲۱۴۵/۰۰	۲۲۲۷/۵۰
۵	۲/۴۰		۳/۴۸	۳/۵۹	-۰/۸۱	۰/۶۰	-۰/۰۰۰۱۹۸	-	۲۲۲۷/۵۰	۲۲۲۷/۵۰
۶	۴/۲۷		۳/۸۳	۷/۵۴	-۰/۱۶	۰/۵۰	-۰/۰۰۰۲۲۲	-	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۷	۲/۵۳		۳/۳۶	۳/۳۴	-۰/۸۸	۰/۵۶	-۰/۰۰۰۲۰۰	-	۱۷۳۲/۵۰	۱۶۵۰/۰۰
۲	کاستیاکف اصلاح شده		۱/۱۴	۳/۲۳	۳/۱۶	-۰/۸۹	۰/۲۰	-۰/۰۰۰۱۱۵	-۰/۰۰۰۰۷۱	۳۱۳۵/۰۰
۳		۱/۸۹	۱/۵۵	۵/۹۹	-۰/۶۳	۰/۲۰	-۰/۰۰۰۱۰۸	-۰/۰۰۰۰۸۰	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۴		۲/۶۰	۲/۲۱	۳/۲۲	-۰/۸۹	۰/۲۰	-۰/۰۰۰۱۴۷	-۰/۰۰۰۰۳۷	۲۱۴۵/۰۰	۲۲۲۷/۵۰
۵		۰/۷۱	۲/۲۸	۲/۸۹	-۰/۸۷	۰/۱۹	-۰/۰۰۰۰۹۳	-۰/۰۰۰۰۹۰	۲۲۲۷/۵۰	۲۲۲۷/۵۰
۶		۱/۲۵	۱/۹۹	۲/۳۰	-۰/۹۲	۰/۲۳	-۰/۰۰۰۱۰۷	-۰/۰۰۰۰۸۰	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۷		۰/۷۷	۲/۵۰	۲/۹۰	-۰/۹۰	۰/۲۱	-۰/۰۰۰۱۰۸	-۰/۰۰۰۰۸۲	۱۷۳۲/۵۰	۱۷۳۲/۵۰
۲		کاستیاکف اصلاح شده شاخه‌ای	۱/۹۹	۳/۸۰	۴/۴۳	-۰/۷۸	۰/۵۲	-۰/۰۰۰۲۰۲	-۰/۰۰۰۰۷۱	۳۱۳۵/۰۰
۳	۴/۱۴		۱/۵۵	۶/۸۰	-۰/۵۲	۰/۴۶	-۰/۰۰۰۲۱۳	-۰/۰۰۰۰۸۰	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۴	۶/۵۲		۲/۳۰	۸/۲۶	-۰/۱۱	۰/۲۰	-۰/۰۰۰۱۶۳	-۰/۰۰۰۰۶۲	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۵	۲/۴۰		۳/۴۸	۳/۵۸	-۰/۸۱	۰/۶۰	-۰/۰۰۰۱۹۸	-۰/۰۰۰۰۶۲	۲۲۲۷/۵۰	۲۲۲۷/۵۰
۶	۱۸/۶۰		۳/۸۵	۹/۷۷	-۰/۳۹	۰/۲۲	-۰/۰۰۰۲۵۹	-۰/۰۰۰۰۶۲	۲۶۴۰/۰۰	۲۷۲۲/۵۰
۷	۲/۲۱		۳/۰۶	۳/۳۲	-۰/۸۶	۰/۵۵	-۰/۰۰۰۲۰۰	-۰/۰۰۰۰۸۲	۱۷۳۲/۵۰	۱۷۳۲/۵۰

مرحله اول: عملکرد معادلات نفوذ و انتخاب معادله بهینه

عملکرد معادله نفوذ کاستیاکف براساس معیار خطای RMSE برای چهار جویچه آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت. در جویچه شماره ۱، میانگین خطاها برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب

به ترتیب برابر با ۹/۹۱، ۴/۹۲ و ۴/۹۵ درصد می‌باشند. حجم رواناب واقعی اندازه‌گیری و برآورد شده، تنها در آبیاری دوم با یکدیگر برابر می‌باشند. اما با محاسبه RMSE با در نظر داشتن میزان رواناب در هر زمان، مشاهده می‌شود که اگرچه حجم رواناب

اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان می‌باشند اما خطای ۴/۱۶ درصدی ایجاد شده است؛ به عبارتی هیدروگراف رواناب مشاهداتی با شبیه‌سازی، برازش خوبی روی یکدیگر ندارند. در جویچه شماره ۲، میانگین خطاها برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۴/۴۸، ۳/۴۸ و ۵/۸۲ درصد می‌باشند. در آبیاری‌های شماره ۵ و ۶، میزان رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان می‌باشند اما در آبیاری شماره ۶، میزان خطا به ۷/۵۴ درصد رسیده است. در جویچه شماره ۳، میانگین خطاها برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۱۰/۲۴، ۶/۷۱ و ۴/۷۲ درصد می‌باشند. در آبیاری‌های شماره ۵، ۶ و ۷ میزان رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان می‌باشند که در آبیاری شماره ۷، میزان خطا برابر با ۷/۲۶ درصد است. در جویچه شماره ۴ نیز میانگین خطاها برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۶/۷۰، ۷/۰۳ و ۶/۶۹ درصد می‌باشند که در آبیاری‌های شماره ۲ و ۵ میزان رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان می‌باشند اما میزان خطا در آبیاری شماره ۲ برابر با ۶/۱۷ درصد است. با این اوصاف می‌توان به این نتیجه رسید که مینا قرار دادن حجم رواناب در شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن میزان رواناب در هر زمان، از دقت شبیه‌سازی می‌کاهد. شاخص NS نشانگر برازش مناسب نمودار برآورد و اندازه‌گیری شده رواناب است. هرچه این عدد به یک نزدیکتر باشد نشانگر کارایی بیشتر مدل است. در جویچه ۱، میزان این خطا برای معادله کاستیاکف بسیار پایین‌تر از یک بوده و نشانگر برازش ضعیف است. در جویچه ۲ میزان شاخص NS به نسبت بالاتر است. در جویچه‌های ۳ و ۴ نیز این شاخص عملکرد مطلوب نشان نداده است.

(Smerdon *et al.* 1988) بیان داشته‌اند که معادله نفوذ کاستیاکف در مدت زمان‌های طولانی مقدار آب نفوذ یافته را کمتر از مقدار واقعی نفوذ یافته برآورد می‌کند. که در این حالت مقدار رواناب خروجی افزایش خواهد یافت. اما مطالعات صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد که معادله نفوذ کاستیاکف در برخی از آبیاری‌ها مقدار رواناب را بیشتر و در برخی دیگر کمتر برآورد نموده است. نکته مهم در بررسی این معادله این است که این معادله برآورد مناسبی از مقدار رواناب ارائه نمی‌دهد. به علاوه در برآورد فازهای پیشروی و پسروی نیز عملکرد مطلوبی نداشته است. مقادیر ضریب  $a$  در معادله کاستیاکف در بازه ۰/۲۵-۰/۶۵ و مقادیر  $k$  در بازه ۰/۰۰۰۱۵۹-۰/۰۰۰۲۸۵ ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند.

در معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده، درصد خطای RMSE برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب در جویچه ۱ به ترتیب، ۲/۹۴، ۳/۶۲ و ۲/۶۵ می‌باشد. در جویچه شماره ۲، در

تمامی آبیاری‌ها به جز آبیاری شماره ۴ (که در آن بیش‌برآورد صورت گرفته است)، مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان هستند هرچند که اختلافاتی از نقطه نظر زمان اندازه‌گیری‌ها صورت گرفته است. در جویچه شماره ۳، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۲/۶۰، ۳/۵۳ و ۲/۲۳ درصد می‌باشند. در جویچه شماره ۳، در تمامی آبیاری‌ها مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده و برآورد شده یکسان می‌باشند. در جویچه شماره ۴، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۱/۶۱، ۲/۵۴ و ۳/۳۶ درصد می‌باشند. شاخص NS در تمام آبیاری‌ها برای این روش مقادیر مطلوب ارائه داده است و نشانگر برازش مناسب نمودارهای اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب روی هم می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل کاستیاکف اصلاح شده دقت بالایی در برآورد مقادیر پیشروی و پسروی و به خصوص رواناب دارد و مدل مناسبتری نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده می‌باشد. محققان مختلفی در مطالعات خود برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌ها را بیان کرده‌اند. برای مثال در مطالعه صورت گرفته توسط Benham *et al.* (2000) با مقایسه دو معادله نفوذ کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده در سیستم آبیاری موجی نتیجه شد که روش کاستیاکف اصلاح شده دقیق‌تر از معادله کاستیاکف است.

(Gilles 2008) معتقد است که با کاهش مقادیر  $a$  و  $f_0$  مقدار رواناب افزایش می‌یابد که این نتیجه در این تحقیق هم مشاهده می‌شود. مقادیر ضریب  $a$  در روش کاستیاکف اصلاح شده در بازه ۰/۱۰-۰/۲۹ قرار داشته و دارای کمترین نوسان است. مقادیر  $k$  در بازه ۰/۰۰۰۱۶۷-۰/۰۰۰۰۹۱ ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند. مقادیر  $f_0$  نیز در بازه ۰/۰۰۰۱۰۳-۰/۰۰۰۰۰۸ ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند.

روش خانواده نفوذ NRCS از روش‌هایی است که در غیاب داده‌های مزرعه‌ای در یک منطقه، اطلاعات کافی برای طراحی اولیه فراهم می‌سازد. در جویچه شماره ۱، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۳/۸۹، ۳/۳۶ و ۳/۳۶ درصد می‌باشند. در جویچه شماره ۱ تنها در آبیاری‌های شماره ۲ و ۵ مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده یکسان است ولی در سایر آبیاری‌ها اغلب مقادیر رواناب کمتر برآورد شده‌اند. در جویچه شماره ۲، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۱/۴، ۲/۵۱ و ۵/۲۰ درصد می‌باشند. در این جویچه هیچ یک از مقادیر رواناب واقعی با مقادیر برآورد شده برابری ندارند. در جویچه شماره ۳، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروی و رواناب به ترتیب برابر با ۵/۰۲، ۳/۷۱ و ۳/۱۶

بازه  $0.000504 - 0.000703$  ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند.

بررسی های صورت گرفته در خصوص روش زمان مشخص، نشان داد که این روش در برآورد حجم رواناب نتایج مطلوبی ارائه نمی دهد و در برخی مواقع حالت بیش برآورد و در برخی مواقع حالت کم برآورد داشته است و در مجموع با در نظر داشتن خطاهای RMSE و NS می توان گفت که عملکرد این معادله مطلوب نیست.

خطاهای معادله کاستیاکف شاخه ای اصلاح شده برای مرحله های پیشروی، پسروری و رواناب براساس معیار خطای RMSE به ترتیب،  $6/25$ ،  $4/87$  و  $4/92$  درصد می باشد که نشانگر خطای نسبتا بالاست. شاخص NS در جویچه های ۱، ۲ و ۳ عملکرد مطلوب نداشته و در جویچه ۴ نیز عملکرد متوسط ارائه داده است. مقادیر ضریب  $a$  در این روش، در بازه  $0.14 - 0.64$  قرار داشته و نوسان زیادی ندارد. مقادیر  $k$  در بازه  $0.000270 - 0.00093$  ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند. مقادیر  $b$  در بازه  $0.000080 - 0.000008$  ( $m^3/min^a/m$ ) قرار دارند.

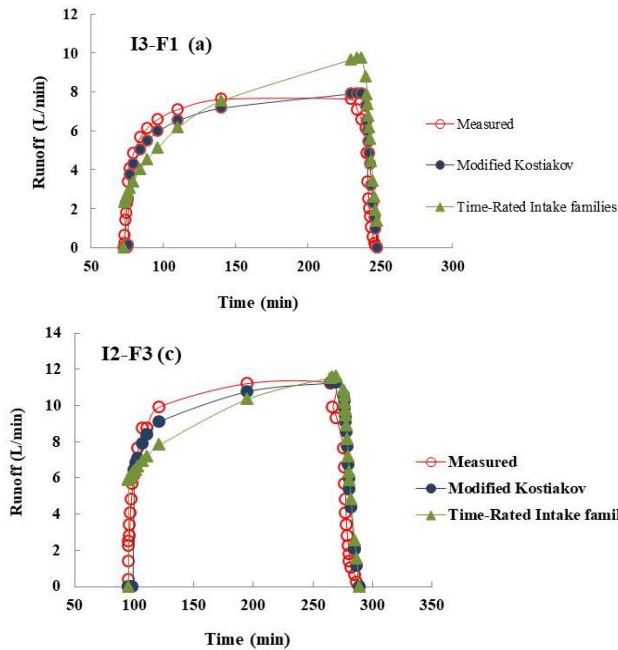
Clemmens (1981) عملکرد چندین مورد از توابع نفوذ را با استفاده از نفوذسنج و داده های اندازه گیری آبیاری نواری ارزیابی کرده و به این نتیجه رسید که معادلات کاستیاکف اصلاح شده و کاستیاکف اصلاح شده شاخه ای بهترین معادله در برآورد عمق نفوذ تجمعی و مقدار مصرف می باشند. در این مطالعه نیز به این نتیجه رسیده شد که در آبیاری جویچه ای معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده بهترین معادله در برآورد رواناب خروجی می باشد. با بررسی میزان نفوذ نهایی در دو معادله کاستیاکف اصلاح شده و کاستیاکف اصلاح شده شاخه ای مشاهده می شود که میزان نفوذ نهایی دارای نوساناتی در طی فصل رشد می باشد. مطالعات صورت گرفته نشان داده است که کاهش میزان نفوذ در طی یک فصل به دلایل مختلف نظیر تراکم خاک (Li et al., 2001) و شخم برای آماده سازی زمین و کشت گیاه (Childs et al., 1993) مرتبط است که با کاهش میزان نفوذ نهایی ( $f_0$  یا  $b$ ) همراه است. بنابراین در این مطالعه نیز تغییرات اندک در میزان نفوذ نهایی را می توان به تغییراتی نظیر کشت در زمین نسبت داد. با بررسی نتایج ارائه شده مشاهده شد که روش کاستیاکف اصلاح شده در برآورد فاز پیشروی در حالت کلی عملکرد مطلوب تری نسبت به سایر روش دارد. در بررسی نتایج مرحله پسروری نیز در حالت کلی روش کاستیاکف اصلاح شده بهترین عملکرد با کمترین خطا را داراست.

Bautista et al. (2009) بیان کردند که داده های رواناب می توانند اطلاعات مفیدتری در ارزیابی سامانه ها داشته و نتایج قابل قبول تری ارائه دهند. به همین دلیل در این مطالعه تمرکز اصلی روی داده های رواناب و برازش مناسب هیدروگراف های

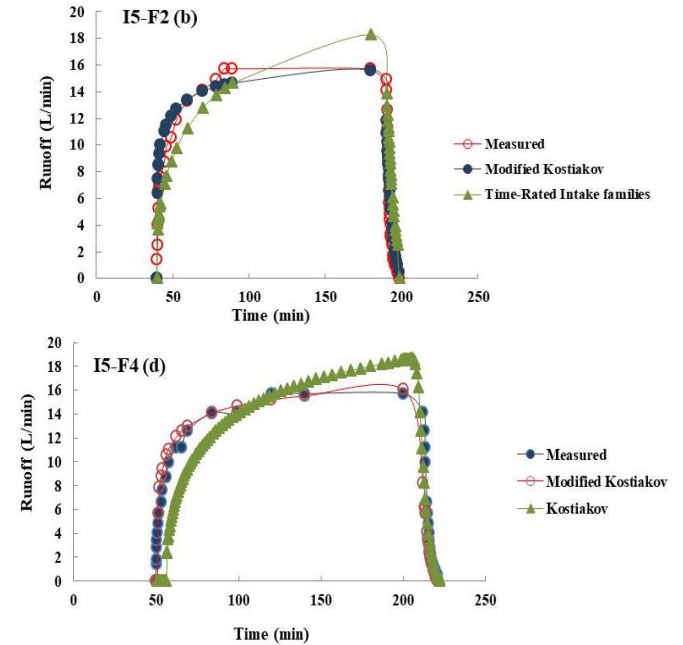
درصد می باشند. در جویچه شماره ۴ نیز مقادیر میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروری و رواناب به ترتیب برابر با  $3/54$ ،  $2/56$  و  $5/73$  درصد می باشند. مقادیر شاخص NS برای این روش مقادیر متفاوتی ارائه داده است. اما در حالت کلی با توجه به خطای بالای روش NRCS در تخمین مراحل مختلف جریان در طول جویچه، از دقت مناسبی برای تخمین پارامترهای نفوذ برخوردار نیست.

عملکرد معادله خانواده نفوذ شدت-زمان براساس معیار خطای RMSE برای ۴ جویچه آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت. در جویچه شماره ۱، میانگین خطا برای فازهای پیشروی، پسروری و رواناب به ترتیب برابر با  $4/64$ ،  $6/46$  و  $4/11$  درصد می باشند. در جویچه شماره ۲ نیز این مقادیر به ترتیب  $3/31$ ،  $5/05$  و  $5/31$  درصد می باشد. در این جویچه در آبیاری های ۲ و ۷ مقادیر رواناب های اندازه گیری و برآورد شده برابری می کنند. در جویچه های شماره ۳ و ۴، مقادیر خطاها به ترتیب برابر با  $5/71$ ،  $6/33$  و  $2/96$  درصد و  $5/06$ ،  $7/88$  و  $5/06$  درصد هستند. در جویچه های ۲ و ۳ در آبیاری های ۲ و ۴ مقادیر رواناب برآورد شده و اندازه گیری شده یکسان است اما درصد خطاهای آن ها نیز قابل ملاحظه است. این روش در برآورد مقادیر رواناب حالت بیش برآورد ارائه داده است. با بررسی خطای فازهای پیشروی و پسروری مشاهده می شود که مقادیر خطا قابل ملاحظه است. با توجه به این مطلب اینگونه استناد می شود که با توجه به این معادله آب به سرعت به انتهای مزرعه رسیده و زمانی برای نفوذ نداشته است و مقادیر رواناب بیشتر از مقدار واقعی به دست آمده است. در این معادله تنها ورودی، مدت زمان نفوذی است که آب باید خود را به عمق ۱۰۰ میلی متری برساند که مشاهده می شود معیار قرار دادن این مدت زمان نتایج مطلوبی ارائه نمی دهد. در روش های سنتی اندازه گیری نفوذ فرض بر این بود که تغییر در مقادیر نفوذ در آبیاری سطحی تنها متاثر از فرصت نفوذ است. در حالیکه عوامل دیگری بیشتر از فرصت نفوذ مهم می باشند (Amali et al., 1997). در این مطالعه، با توجه به روش حل معکوس، با وارد کردن مقادیر فرصت نفوذ که از داده های مراحل پیشروی و پسروری اندازه گیری شده در مزرعه حاصل می شود، مقادیر  $a$  و  $k$  و به دنبال آن مقادیر رواناب، زمان پیشروی و پسروری برآورد شد. اما نتایج نشان دادند که ملاک قرار دادن فرصت زمان نفوذ، باعث بروز خطا در برآورد مجهولات می شود. (Cavero et al., 2001) نیز بیان کردند که شبیه سازی براساس مراحل مختلف مکانیسم نفوذ، عملکرد بهتری در مقایسه با زمانی که تنها از زمان نفوذ در شبیه سازی استفاده می شود ارائه می دهد که اهمیت دخالت دادن مقدار نفوذ نهایی ( $f_0$ ) در محاسبات را آشکار می کند. مقادیر ضریب  $a$  در این روش، در بازه  $0/50 - 0/58$  قرار داشته و نوسان زیادی ندارد. مقادیر  $k$  در

داشته‌اند در چند جویچه و آبیاری انتخابی نمایش می‌دهد. به علت حجم بالای داده‌ها و نمودارهای مربوطه، چند جویچه و آبیاری به صورت نمونه ارائه شده‌اند.



رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روی هم می‌باشند. شکل (۱) نمودارهای مربوط به حجم رواناب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده براساس معادلات نفوذی که بهترین عملکرد را



شکل ۱. مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رواناب با معادلات مختلف نفوذ.

گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که روش کاستیاکف اصلاح شده بهترین معادله در برآورد میزان نفوذ می‌باشد.

#### مرحله دوم: مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی معکوس

در این مرحله براساس معادله نفوذ بهینه، عملکرد سه روش مدل‌سازی معکوس در غالب سه نرم‌افزار WinSRFR، IPARM و SIPAR-ID ارزیابی شد. مقادیر ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده برای هر نوبت آبیاری توسط روش‌های IPARM و SIPAR-ID استخراج شد که به ترتیب در جدول (۳) و (۴) ارائه گردیده است. مدل IPARM ضرایب معادله نفوذ را به صورت مستقل برآورد می‌کند. مدل SIPAR-ID نیز ضرایب معادله نفوذ را تخمین می‌زند ولی سرعت نفوذ نهایی را ارائه نمی‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه معادلات مختلف نفوذ، مشاهده شد که معادله کاستیاکف اصلاح شده بهترین معادله نفوذ می‌باشد. با مقایسه مقادیر  $a$  در هر سه روش به این نتیجه رسیده می‌شود که چون مدل SIPAR-ID مقدار سرعت نفوذ نهایی را برآورد نمی‌کند، مقدار ضریب  $a$  را در اکثر آبیاری‌ها بیشتر از روش‌های دیگر برآورد کرده است. تغییرات ضریب  $a$  در مدل IPARM در بازه  $0.08-0.45$  و در مدل SIPAR-ID در بازه  $0.1-0.1$  بود که نوسان‌های بسیار زیادی داشت. این تغییرات در نرم‌افزار WinSRFR در بازه  $0.16-0.29$  قرار داشت که نوسان کمتری

در جویچه شماره ۱ آبیاری ۳، حجم رواناب واقعی مزرعه  $1237/5$  لیتر است. براساس مقادیر ارائه شده در جدول (۳) مشاهده شد که فقط روش کاستیاکف اصلاح شده مقدار رواناب را برابر با مقدار واقعی آن برآورد نموده است. اما با دقت در شکل (۱-۱)، مشاهده می‌شود که دو نمودار (اندازه‌گیری و کاستیاکف اصلاح شده) کاملاً روی هم برآورد داده نشده‌اند. این امر اهمیت در نظر گرفتن مقدار رواناب در هر زمان را نشان می‌دهد. مقدار RMSE در این روش برابر  $2/48$  درصد است که کمترین خطا در مقایسه با سایر روش‌ها را دارد. شاخص NS نیز در این حالت نسبت به سایر معادلات بهترین عملکرد را ارائه داده است. روش خانواده نفوذ شدت- زمان نیز با بیشترین میزان خطا، حالتی بیش‌برآورد از مقدار واقعی ارائه داده است. شکل (۱-۲)، مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های کاستیاکف اصلاح شده و خانواده نفوذ شدت- زمان را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روش کاستیاکف اصلاح شده بهترین برآورد روی داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه داده است و مانند شکل (۱-۱)، روش خانواده نفوذ شدت- زمان بدترین حالت می‌باشد. در شکل (۱-۳) نیز حالتی مشابه با شکل (۱-۲) حاکم است. در شکل (۱-۴)، روش کاستیاکف اصلاح شده بهترین برآورد را داشته و روش کاستیاکف بدترین حالت می‌باشد. در نهایت با بررسی‌های صورت

پیشروی استفاده می کند کمتر است. (Cahoon 1998) نیز بیان داشته اند که مقادیر  $a$  و  $k$  زمانی که از داده های رواناب و پیشروی به صورت همزمان استفاده شود کم تر است.

### نتیجه گیری

با مقایسه معادلات نفوذ که مبتنی بر تعادل حجمی می باشند به این نتیجه رسیده شد که روش کاستیاکف اصلاح شده در مقایسه با سایر معادلات نفوذ عملکرد مطلوب تری دارد. این نتیجه با بررسی معیارهای خطای RMSE و NS که خطاهای بسیار پایینی در فازهای پیشروی، پسروی و رواناب داشتند حاصل شد. به علاوه با استفاده از این معادله مشاهده شد که حجم رواناب اندازه گیری و شبیه سازی شده تقریباً در تمام موارد مقادیر یکسانی داشته است. نمودارهای برازش مقادیر رواناب اندازه گیری و شبیه سازی شده با استفاده از معادله نفوذ کاستیاکف اصلاح شده نشان داد که برازش نقطه به نقطه رواناب اندازه گیری و شبیه سازی در وضعیت بسیار مطلوبی قرار دارد. روش های WinSRFR، IPARM و SIPAR-ID روش های معکوس در برآورد ضرایب نفوذ معادله کاستیاکف می باشند. با مقایسه سه روش در برآورد ضرایب نفوذ معادله کاستیاکف، مشاهده شد که روش IPARM عملکرد بهتری در برآورد رواناب ارائه داده است زیرا مقادیر رواناب اندازه گیری و برآورد شده توسط مدل برازش بسیار نزدیکی به یکدیگر داشتند. روش WinSRFR نیز عملکرد بهتری در فازهای پیشروی و پسروی داشت. مقادیر پارامترهای نفوذ در روش IPARM و WinSRFR نوسان کمتری داشتند اما در روش SIPAR-ID نوسانات بسیار زیاد بود. ضریب  $a$  در روش SIPAR-ID مقادیر بیشتری از دو مدل دیگر داشت، زیرا این مدل مقدار نفوذ نهایی را برآورد نمی کند. مقادیر  $a$  و  $k$  حاصل از سه روش IPARM، SIPAR-ID و WinSRFR نشان داد که این مقادیر در روش WinSRFR که از داده های حاصل از مراحل پیشروی، پسروی و رواناب برای برآورد پارامترهای نفوذ استفاده می کنند نسبت به روش IPARM و SIPAR-ID کمتر است. این مقادیر در روش IPARM که از داده های مراحل پیشروی و رواناب استفاده می کند نسبت به روش SIPAR-ID که فقط از داده های پیشروی استفاده می کند کمتر است. بنابراین در حالت کلی می توان به این نتیجه رسید که مدل هایی که از داده های مراحل مختلف آبیاری برای برآورد معکوس پارامترهای معادلات نفوذ استفاده می کنند مدل های مناسبی هستند. در این مطالعه به این نتیجه رسیده شد که در بین مدل های بررسی شده مدل IPARM روش مناسب برآورد معکوس پارامترهای معادله نفوذ می باشد.

نسبت به سایر روش ها دارد. (Clemens 1991) بیان کرد که تخمین صحیح از مقدار  $a$  بر مبنای داده های پیشروی نمی تواند صورت گیرد زیرا مقادیر آن به دقت در برداشت داده های مزرعه ای بسیار حساس است. بنابراین در نرم افزار IPARM از داده های مراحل پیشروی و رواناب به صورت همزمان استفاده شد و خطاهای جزئی ایجاد شده را نیز می توان ناشی از خطا در برداشت داده های پیشروی دانست. نفوذ نهایی (b) در دو روش IPARM و SRFR به ترتیب در بازه های  $0.000106-0.00053$  و  $0.00004-0.00083$  قرار داشت که اعداد نزدیکی به هم هستند. خطای فازهای پیشروی و پسروی در مدل SIPAR-ID در تمامی آبیاری ها بیشتر از دو مدل دیگر بود. اندازه گیری های میدانی متأثر از اشتباهات سیستماتیک و تکرار است. جایی که اندازه گیری های جریان برای ارزیابی پارامترهای توابع نفوذ استفاده می شود این خطاها تغییرات در ارزیابی پارامترهای نفوذ را افزایش می دهد (Gillies, 2008). در مدل SIPAR-ID از داده های جریان در برآورد معکوس پارامترها استفاده شد. با بررسی نتایج مشاهده شد که این مدل کارایی قابل قبول در برآورد پارامترهای نفوذ را نداشت که می توان آن را ناشی از همین خطاها دانست. در دو مدل SRFR و IPARM، در برخی از آبیاری ها IPARM عملکرد بهتری نسبت به روش WinSRFR داشت اما در حالت کلی می توان گفت که خطای روش SRFR در فازهای پیشروی و پسروی پایین تر بود.

با بررسی مقادیر خطا در برآورد رواناب در دو مدل IPARM و SRFR مشاهده شد که روش IPARM مقادیر خطای کمتری نسبت به روش SRFR دارد. در بهینه سازی، استفاده از داده های مراحل پیشروی (Elliot *et al.*, 1983) یا داده های پیشروی و رواناب به صورت همزمان (Gillies and Smith, 2005) نیاز است. (Etedali *et al.* 2011) نیز بیان داشتند که مدل IPARM روش مناسب در برآورد معکوس پارامترهای نفوذ به منظور برآورد مراحل اصلی آبیاری سطحی می باشد. (Scaloppi *et al.* 1995) بیان کردند که استفاده همزمان از داده های حاصل از پیشروی و رواناب، نتایج بهتری برای ارزیابی پارامترها نسبت به حالتی که فقط از داده های پیشروی یا رواناب استفاده می شود، ارائه می کند. با مقایسه مقادیر  $a$  و  $k$  بدست آمده از سه روش IPARM، SIPAR-ID و WinSRFR مشاهده می شود که این مقادیر در روش WinSRFR که از داده های حاصل از مراحل پیشروی، پسروی و رواناب برای برآورد پارامترهای نفوذ استفاده می کنند نسبت به روش IPARM و SIPAR-ID کمتر است. به علاوه این مقادیر در روش IPARM که از داده های مراحل پیشروی و رواناب استفاده می کند نسبت به روش SIPAR-ID که فقط از داده های

جدول ۳. مقادیر پارامترهای معادلات مختلف نفوذ با استفاده از نرم افزار IPARM

شماره آبیاری	جویچه	RMSE			a	ضریب k (m <sup>3</sup> /min <sup>2</sup> /m)	ضریب b (m <sup>3</sup> /min/m)	عمق رواناب اندازه گیری شده (L)	عمق رواناب شبیه سازی شده (L)
		پیشروی	پسروی	رواناب					
۲	F1	۲/۷۵	۴/۱۹	۱/۷۱	۰/۲۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۴۷	۱۷۳۲/۵۰	۱۸۱۵/۰۰
۳		۲/۱۴	۲/۹۲	۱/۸۴	۰/۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۶۳	۱۲۳۷/۵۰	۱۲۳۷/۵۰
۴		۱/۵۴	۴/۱۵	۱/۷۲	۰/۱۳	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۵۷	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۵		۲/۷۰	۳/۰۷	۱/۴۴	۰/۲۱	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۷۲	۱۰۷۲/۵۰	۱۰۷۲/۵۰
۶		۳/۲۱	۸/۰۰	۳/۵۲	۰/۴۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۸۵/۰۰
۷		۳/۳۰	۲/۷۶	۲/۷۶	۰/۲۱	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۰۵۶	۹۰۷/۵۰	۹۰۷/۵۰
۲		F2	۴/۱۶	۵/۹۳	۱/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰۳۶	۳۱۳۵/۰۰
۳	۲/۷۳		۱/۷۵	۲/۴۳	۰/۰۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۰۰۶۹	۲۶۴۰/۰۰	۲۷۲۲/۵۰
۴	۲/۵۹		۲۳/۱۰	۳/۷۰	۰/۱۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۵۹	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۵	۱/۷۴		۲/۶۵	۱/۲۶	۰/۱۶	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۰۸۲	۲۲۲۷/۵۰	۲۲۲۷/۵۰
۶	۱/۵۴		۳/۱۴	۱/۳۴	۰/۳۰	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۰۴۷	۲۶۴۰/۰۰	۲۶۴۰/۰۰
۷	۲/۰۲		۲/۹۵	۲/۲۹	۰/۲۲	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۶۹	۱۷۳۲/۵۰	۱۷۳۲/۵۰
۲	F3		۲/۳۰	۷/۳۰	۲/۷۹	۰/۳۱	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۲۶	۱۸۹۷/۵۰
۳		۲/۳۶	۳/۲۷	۱/۷۸	۰/۱۷	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۶۱	۱۳۲۰/۰۰	۱۳۲۰/۰۰
۴		۱/۹۰	۵/۶۸	۲/۲۸	۰/۳۳	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۲۸	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۰۲/۵۰
۵		۳/۰۸	۳/۵۷	۲/۳۹	۰/۱۳	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۰۵۳	۱۳۲۰/۰۰	۱۳۲۰/۰۰
۶		۲/۴۶	۱/۸۰	۲/۳۳	۰/۱۸	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۳۹	۱۲۳۷/۵۰	۱۲۳۷/۵۰
۷		۲/۷۷	۵/۱۲	۲/۷۷	۰/۲۱	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۴۲	۹۹۰/۰۰	۹۹۰/۰۰
۲		F4	۲/۳۵	۳/۹۱	۱/۷۳	۰/۱۴	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۴۹	۲۹۷۰/۰۰
۳	۱/۷۰		۵/۱۲	۲/۰۳	۰/۱۷	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۷۹	۲۱۴۵/۰۰	۲۲۵۰/۰۰
۴	۱/۶۷		۲۹/۶۰	۲/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰۷۹	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۹۲/۵۰
۵	۲/۰۲		۲/۳۰	۱/۵۷	۰/۲۶	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۵۲	۲۳۹۲/۵۰	۲۳۹۲/۵۰
۶	۲/۸۱		۳/۶۵	۱/۹۱	۰/۱۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۶۴	۲۰۶۲/۵۰	۲۱۴۵/۰۰
۷	۱/۸۴		۴/۹۶	۲/۰۲	۰/۱۹	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۵۳	۱۵۶۷/۵۰	۱۶۵۰/۰۰

جدول ۴. مقادیر پارامترهای معادلات مختلف نفوذ با استفاده از نرم افزار SIPAR-ID

شماره آبیاری	جویچه	RMSE			NS		ضریب k (m <sup>3</sup> /min <sup>2</sup> /m)	عمق رواناب اندازه گیری شده (L)	عمق رواناب شبیه سازی شده (L)
		پیشروی	پسروی	رواناب	رواناب				
۲	F1	۱۷/۲۴	۲/۱۰	۳/۸۰	۰/۵۲	-۰/۹۲	۰/۰۰۰۰۹	۱۷۳۲/۵۰	۱۵۶۷/۵۰
۳		۵/۳۲	۳۸/۴۰	۱۲/۵۱	-۰/۱۲	-۰/۰۰	۰/۰۰۲۸۰	۱۲۳۷/۵۰	۱۲۳۷/۵۰
۴		۴/۵۶	۱۴/۴۰	۹/۵۴	-۴/۱۰	-۰/۱۰	۰/۰۰۲۰۰	۱۰۷۲/۵۰	۱۰۷۲/۵۰
۵		۱۱/۹۱	۴/۶۴	۸/۵۶	-۰/۱۰	-۰/۵۰	۰/۰۰۳۳	۱۰۷۲/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۶		۱۵/۶۳	۸/۴۵	۳/۵۰	-۰/۵۲	-۰/۶۳	۰/۰۰۲۵	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۰۲/۵۰
۷		۱۸/۱۴	۰/۸۵	۹/۱۲	-۰/۲۳	-۰/۹۲	۰/۰۰۰۰۸	۹۰۷/۵۰	۹۰۷/۵۰
۲		F2	۱۰/۵۳	۲/۳۷	۱۰/۳۱	-۰/۲۱	-۰/۸۶	۰/۰۰۰۱۹	۳۱۳۵/۰۰
۳	۹۹/۹۹		۱/۸۲	۷/۹۰	-۰/۱۴	-۰/۸۴	۰/۰۰۰۲۲	۲۶۴۰/۰۰	۲۵۵۷/۵۰
۴	۹/۱۴		۲۴/۶	۸/۶۰	-۰/۱۱	-۰/۸۴	۰/۰۰۰۲۴	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۵	۱۲/۰۹		۱/۱۸	۶/۳۲	-۰/۳۵	۱/۰۰	۰/۰۰۰۱۱	۲۲۲۷/۵۰	۲۱۴۵/۰۰
۶	۸/۳۸		۲/۴۰	۵/۵۹	-۰/۴۹	-۰/۶۸	۰/۰۰۰۵۱	۲۶۴۰/۰۰	۲۵۵۷/۵۰
۷	۱۲/۴۹		۱/۱۲	۷/۵۶	-۰/۲۲	-۰/۹۹	۰/۰۰۰۱۲	۱۷۳۲/۵۰	۱۵۶۷/۵۰
۲	F3		۱۲/۱۸	۹/۳۷	۷/۲۶	-۰/۱۵	-۰/۳۵	۰/۰۰۰۶۲	۱۸۹۷/۵۰
۳		۸/۲۱	۷/۰۷	۶/۵۴	-۰/۲۳	-۰/۳۳	۰/۰۰۰۷۳	۱۳۲۰/۰۰	۱۳۲۰/۰۰
۴		۸/۸۹	۷/۲۹	۴/۱۶	-۰/۱۷	-۰/۳۸	۰/۰۰۰۵۹	۱۴۰۲/۵۰	۱۴۰۲/۵۰
۵		۵/۷۶	۶/۲۸	۳/۱۹	-۰/۴۸	-۰/۳۴	۰/۰۰۰۹۳	۱۳۲۰/۰۰	۱۳۲۰/۰۰
۶		۱۳/۰۱	۴/۰۷	۴/۲۵	-۰/۳۴	-۰/۷۸	۰/۰۰۰۱۵	۱۲۳۷/۵۰	۱۱۵۵/۰۰
۷		۷/۱۵	۶/۳۷	۳/۶۹	-۰/۴۲	-۰/۳۸	۰/۰۰۰۷۶	۹۹۰/۰۰	۹۹۰/۰۰
۲		F4	۵/۴۴	۵/۳۰	۲/۹۵	-۰/۵۱	-۰/۴۳	۰/۰۰۱۲۰	۲۹۷۰/۰۰
۳	۱۰/۱۵		۵/۵۰	۸/۴۳	-۰/۳۶	-۰/۶۰	۰/۰۰۰۵۱	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۴	۴/۴۵		۲۲/۹۰	۷/۴۵	-۰/۱۳	-۰/۱۵	۰/۰۰۳۳۰	۲۱۴۵/۰۰	۲۳۱۰/۰۰
۵	۹/۷۵		-۰/۹۱	۶/۱۶	-۰/۴۶	-۰/۶۷	۰/۰۰۰۴۳	۲۳۹۲/۵۰	۲۳۱۰/۰۰
۶	۱۰/۷		۵/۱۳	۳/۹۶	-۰/۱۰	-۰/۷۵	۰/۰۰۰۳۰	۲۰۶۲/۵۰	۲۰۶۲/۵۰
۷	۱۲/۵۵		-۰/۷۵	-۰/۴۱	-۰/۳۲	-۰/۹۵	۰/۰۰۰۱۳	۱۵۶۷/۵۰	۱۴۸۵/۰۰

## REFERENCES

- Alazba, A. A. (1994). Efficiency of irrigation borders as affected by inflow hydrograph shape. *The University of Arizona*.
- Amali, S., Rolston, D.E., Fulton, A.E., Hanson, B.R., Phene, C.J. and Oster, J.D. (1997). Soil water variability under subsurface drip and furrow irrigation. *Irrigation Science*, 17(4), 151-155.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. and Schlegel, J. (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146-1154.
- Benham, B. L., Reddell, D. L. and Marek, T. H. (2000). Performance of three infiltration models under surge irrigation. *Irrigation Science*, 20(1), 37-43.
- Cahoon, J. (1998). Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 127-130.
- Cavero, J., Playán, E., Zapata, N. and Faci, J. M. (2001). Simulation of maize grain yield variability within a surface-irrigated field. *Agronomy Journal*, 93(4), 773-782.
- 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), 74-90.
- Clemmens, A. J. (1981). Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agricultural Water Management*, 3(4), 251-267.
- Clemens, A. J. (1991). Direct solution to surface irrigation advance inverse problem. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 578-594.
- Corradini, C., Melone, F. and Smith, R. E. (1997). A unified model for infiltration and redistribution during complex rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 192(1-4), 104-124.
- Elliott, R. L. and Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*, 25, 396-400.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Ghanbarian-Alavijeh, B. and Abbasi, F. (2010). Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science*, 28(6), 479-488.
- Ebrahimian, H. (2014). Soil infiltration characteristics in alternate and conventional furrow irrigation using different estimation methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1904-1911.
- Etedali, H. R., Ebrahimian, H., Abbasi, F. and Liaghat, A. (2011). Evaluating models for the estimation of furrow irrigation infiltration and roughness. *Spanish Journal of Agricultural Research*, (2), 641-649.
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. (2005). Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*, 24(1), 25-35.
- 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), 87-97.
- Gillies, M. H. (2008). Managing the effect of infiltration variability on the performance of surface irrigation. *Doctoral dissertation, University of Southern Queensland, Australia*.
- Gillies, M. H. and Smith, R. J. (2015). SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrigation Science*, 33(5), 339-355.
- Hall, W. A. (1956). Permeability and infiltration relationships in one dimensional infiltration in a uniform soil. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 37(5), 602-604.
- Holzappel, 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), 19-32.
- Kazeroonian, S. M., Abbasi, F. and Sedghi, H. (2017). Statistical study of infiltration parameters variations of kostiakov-lewis equation in furrow irrigation during three farming seasons. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 83-101 (In Farsi).
- Kamali, P., Ebrahimian, H. and Rezaverdinejad, V. (2015). Evaluation and comparison of multilevel optimization method and IPARM model to estimate infiltration parameters in furrow. *Journal of Water and Irrigation Management*, 5(1), 43-54 (In Farsi).
- Kamali, P., Ebrahimian, H. and Parsinejad, M. (2018). Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows. *Irrigation Science*, 36(6), 339-348.
- Khatri, K. L. and Smith, R. J. (2005). Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. *Irrigation and Drainage*, 54(4), 467-482.
- Khatri, K. L. (2007). Toward real-time control of surface irrigation. *Doctoral dissertation, University of Southern Queensland, Australia*.
- Kostiakov, A. N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans. Sixth Comm. Int. Soc. Soil Sci.*, 1, 7-21.
- Maheshwari, B. L. and Jayawardane, N. S. (1992). Infiltration characteristics of some clayey soils measured during border irrigation. *Agricultural Water Management*, 21(4), 265-279.
- Majdzadeh, B., Ojaghloo, H., Ghobadi-Nia, M., Sohrabi, T. and Abbasi, F. (2009). Estimating infiltration parameter for simulation of advance flow in furrow irrigation. *In International Conference on Water Resources (ICWR 2009)*.
- Maroufpoor, E., Seyedzadeh, A. and Behzadynasab, M. (2017). Investigation of the accuracy of Non-point infiltration measurement methods in designing of furrow irrigation system. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2), 257-271 (In Farsi).
- McClymont, D. J. and Smith, R. J. (1996). Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*, 17(1), 15-22.
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. Farm

- irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University.
- Merriam, J. L. and Clemmens, A. J. (1985). Time rated infiltrated depth families. In Development and management aspects of irrigation and drainage systems, *ASCE*, 67-74.
- Nash J. E. and Sutcliffe J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Nie, W.B., Fei, L.J. and Ma, X.Y. (2014). Applied closed-end furrow irrigation optimized design based on field and simulated advance data. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 395-408.
- Ramezani, E.H., Ebrahimian, H., Abbasi, F. and Liaghat, A. (2012). Evaluation of EVALUE, SIPAR\_ID and INFILT models for estimating of Kostiaikov infiltration parameters in furrow irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(1), 1-9 (In Farsi).
- Rodriguez, J.A. and Martos, J.C. (2010). SIPAR\_ID: freeware for surface irrigation parameter identification. *Environmental Modelling & Software*, 25(11), 1487-1488.
- Oyonarte, N. A., Mateos, L. and Palomo, M. J. (2002). Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(1), 26-33.
- Parhi, P. K., Mishra, S. K. and Singh, R. (2007). A modification to Kostiaikov and modified Kostiaikov infiltration models. *Water Resources Management*, 21(11), 1973-1989.
- Sayah, B., Gil-Rodríguez, M. and Juana, L. (2016). Development of one-dimensional solutions for water infiltration. Analysis and parameters estimation. *Journal of Hydrology*, 535, 226-234.
- Scaloppi, E. J., Merkle, G. P. and Willardson, L. S. (1995). Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(1), 57-70.
- Shepard, J. S., Wallender, W. W. and Hopmans, J. W. (1993). One-point method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*, 36(2), 395-404.
- Sedaghatdoost, A. and Ebrahimian, H. (2015). Calibration of infiltration, roughness and longitudinal dispersivity coefficients in furrow fertigation using inverse modelling with a genetic algorithm. *Biosystems Engineering*, 136, 129-139.
- Strelkoff, T. and Katopodes, N. D. (1977). Border-irrigation hydraulics with zero inertia. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(3), 325-342.
- 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, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona*.
- Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J. and Bautista, E. (2009). Estimation of soil and crop hydraulic properties. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 537-555.
- Smerdon, E. T., Blair, A. W. and Reddell, D. L. (1988). Infiltration from irrigation advance data. I: Theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1), 4-17.
- Soroush, F. (2016). Accurate assessment of modified NRCS intake families using field data and zero inertia models. *5<sup>th</sup> Integrated water Resources Management Conference, Iranian Irrigation and Water Engineering Society, Kerman, Iran* (In Farsi).
- US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service. (1974). National Engineering Handbook. Section 15. *Border Irrigation. National Technical Information Service*, Washington, DC, Chapter 4.
- Valiantzas, J. D., Aggelides, S. and Salsalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, 52(1), 17-32.
- Valipour, M., Sefidkouhi, M. A. G. and Eslamian, S. (2015). Surface irrigation simulation models: a review. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 5(1), 51-70.
- Walker, W. R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 129-136.
- Walker, W. R., Prestwich, C. and Spofford, T. (2006). Development of the revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural water management*, 85(1-2), 157-164.
- Weibo, N., Liangjun, F. and Xiaoyi, M. (2012). Estimated infiltration parameters and Manning roughness in border irrigation. *Irrigation and Drainage*, 61(2), 231-239.
- Xiaoyan, G., Peiling, Y. and Ye, L. (2008). Estimation of soil infiltration parameters during furrow irrigation based on IPARM method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008 (1).