

## مقایسه مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام-کونژ با مدل‌های هیدرولیکی آبیاری در برآورد مرحله پیشروی آبیاری جویچه ای

مهدی بهرامی<sup>۱\*</sup>، سعید برومندنسب<sup>۲</sup> و عبدعلی ناصری<sup>۳</sup>

### چکیده

کسب اطلاعات لازم جهت پیش بینی و محاسبه منحنی‌های پیشروی و پسروی آب در جویچه مستلزم یکسری اندازه گیری‌های دقیق در داخل مزرعه می‌باشد که این کار باعث صرف هزینه و وقت زیادی می‌گردد. بکارگیری یک روش روندیابی هیدرولوژیکی در تعیین نرخ پیشروی جریان آب در جویچه و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولوژیکی (موجود در نرم افزار SIRMOD) هدف اساسی این مطالعه بوده است. مدل با استفاده از ۲۷ سری داده مزرعه ای اجرا شده و با نتایج مدل‌های نرم افزار SIRMOD مقایسه شد. آزمایش‌های صحرائی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. داده ها از سه جویچه به طول‌های ۶۰ و ۸۰ و ۹۰ متر، در سه تکرار و تحت سه دبی ۱ و ۱/۲۵ و ۱/۵ لیتر در ثانیه برداشت شد. جهت خطایابی از چهار شاخص آماری متوسط خطای پیش بینی مدل (Er)، توزیع نسبت به خط ۴۵ درجه (λ)، ضریب رگرسیون (R<sup>2</sup>) و متوسط خطای نسبی مدل (Ea) استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده از این مطالعه، مقادیر پیش بینی شده در فاز پیشروی برای تمامی مدل‌ها بیشتر از مقادیر مشاهده شده است. مدل‌های هیدرودینامیک و اینرسی صفر با متوسط خطای نسبی به میزان ۱۱/۱۹ درصد بهترین نتایج را در بر دارد. متوسط خطای نسبی در مدل ماسکینگام- کونژ ۱۳/۴۷ درصد بود که نشانگر مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی فاز پیشروی در جویچه می‌باشد. ضعیف ترین پیش بینی ها با متوسط خطای نسبی ۳۴/۴۶ درصد مربوط به مدل موج کینماتیک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه طول جویچه کمتر و میزان دبی ورودی به جویچه بیشتر باشد کارایی مدل ماسکینگام- کونژ بیشتر خواهد بود. کاهش شدت جریان ورودی به جویچه و از سوی دیگر بالا بودن ضریب زبری که خود باعث کندی پیشروی جریان خواهد بود سبب دور شدن شرایط بستر جویچه از حالت رودخانه ای شده و در این حالت روش ماسکینگام- کونژ از کارایی بالایی برخوردار نخواهد بود. میزان خطای نسبی مدل‌های نرم افزار SIRMOD بستگی به تغییر طول ندارد، و فقط در مدل موج کینماتیک با افزایش دبی ورودی به جویچه متوسط خطای نسبی افزایش می‌یابد. نهایتاً می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد روش‌های هیدرولوژیکی در سیستم‌های آبیاری سطحی امکان پذیر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری جویچه ای، ماسکینگام- کونژ، SIRMOD، فاز پیشروی

### مقدمه

آنها پیشروی و پسروی جبهه آب را بدون اندازه گیری در داخل مزرعه پیش بینی نمود که مختصراً به توضیح روش‌های موجود پرداخته خواهد شد.

معادلات مربوط به جریان سطحی، حاصل دو معادله پیوستگی و اندازه حرکت جریان می‌باشد که به معادلات سنت-ونانت مشهورند. این معادلات پس از تعدیل، به جهت شمول نفوذ آب، بصورت زیر ارائه گردید:

معادله پیوستگی:

$$\frac{A \partial v}{\partial x} + \frac{Bv \partial y}{\partial x} + \frac{B \partial y}{\partial t} + I = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت (ممنتوم):

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + \frac{vI}{2gA} \quad (2)$$

به دلیل وجود پدیده‌های نفوذ و ذخیره در آبیاری سطحی جریان از نوع غیر ماندگار و غیر یکنواخت با دبی کاهنده است. جهت پیش بینی و محاسبه منحنی‌های پیشروی و پسروی در جویچه باید اندازه گیری‌های دقیق در داخل مزرعه انجام گیرد که این کار موجب صرف هزینه و وقت زیادی می‌گردد. علاوه بر اندازه گیری منحنی‌های فوق در داخل مزرعه روش‌های دیگری نیز وجود دارد که می‌توان توسط

۱- دانشجوی دکتری، گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز

\* - نویسنده مسئول: (Email: mehdi\_Bahrami121@yahoo.com)

۲ و ۳- به ترتیب استاد و دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب

دانشگاه شهید چمران اهواز

$$S_f = S_0 \quad (۴)$$

این مدل ها، ابتدا برای کارهای هیدرولوژیکی توسعه یافت، سپس در آبیاری سطحی در تحقیقات مختلف بکار برده شده است که از جمله این تحقیقات می توان به موارد زیر اشاره کرد:

Walker and Hampherys (1983)، Strelkoff (1972)، Shayya et al. (1993)، Rayej and Wallender (1985)، Strelkoff (1994)، عباسی و محمودیان شوشتری (۱۳۷۵) و فرزام نیا (۱۳۷۶).

د) مدل توازن حجم: چون حل کامل معادلات هیدرودینامیک مشکل بود و نیاز به کامپیوترهای قوی داشت، بعضی از مطالعات اولیه در مورد مدلسازی آبیاری سطحی بر روی حل تحلیلی مسائل جریان متمرکز شد. بنابراین از معادله اندازه حرکت بکلی صرف نظر شد. این مدل ها به مدل های توازن حجم موسومند که بر مبنای قانون بقای جرم (قانون پیوستگی) و فرض جریان نرمال در ابتدای جریان می باشند.

نمونه های کاربرد مدل توازن حجمی را می توان در کارهای Wallender، Lewis and Milne (1938)، Davis (1961)، Fang and Singh (1990)، Alazba (1999) مشاهده کرد.

### روش های هیدرولوژیکی

یکی از روش های معروف و متداول در روندیابی سیل در مخزن و رودخانه روش ماسکینگام می باشد. اساس کار روش ماسکینگام معادله پیوستگی بوده و از معادله ممتوم صرف نظر شده است. در این روش حجم ذخیره تابعی خطی از دبی های ورودی و خروجی می باشد:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (۵)$$

بیانگر تغییرات حجم ذخیره در واحد زمان،  $I(t)$ : دبی ورودی و  $O(t)$ : دبی خروجی می باشد.

$$S = K[\theta I + (1 - \theta)O] \quad (۶)$$

معادله فوق رابطه کلی است که برای سطوح زمانی  $N$  و  $N+1$  بصورت زیر نوشته می شود:

$$S^N = K[\theta I^N + (1 - \theta)O^N] \quad (۷)$$

$$S^{N+1} = K[\theta I^{N+1} + (1 - \theta)O^{N+1}] \quad (۸)$$

با توجه به پیوستگی جریان معادله (۷) و (۸) به فرم زیر در می آید:

$$S^{N+1} - S^N = K[\theta I^N + (1 - \theta)O^N] - K[\theta I^{N+1} + (1 - \theta)O^N] \quad (۹)$$

$\theta$  ضریب بدون بعدی است که درجه اهمیت  $I$  و  $O$  را در تعیین ظرفیت ذخیره رودخانه نشان می دهد. مقدار  $\theta$  حداقل صفر و حداکثر  $0/5$  و بطور متوسط بین  $0/2$  و  $0/4$  تغییر می کند (علیزاده، ۱۳۸۱).  $K$

که در آن  $y$ : عمق آب،  $t$ : زمان از آغاز آبیاری،  $v$ : سرعت جریان آب (تابعی از  $x$  و  $t$ )،  $x$ : فاصله از ابتدای جویچه (یا نوار)،  $I$ : شدت نفوذ آب به داخل خاک (تابعی از  $x$  و  $t$ )،  $g$ : شتاب ثقل،  $S_0$ : شیب طولی جویچه (یا نوار)،  $S_f$ : شیب خط انرژی،  $A$ : سطح مقطع جریان،  $B$ : عرض بالایی جریان آب است.

روش های روندیابی جریان بطور کلی در دو قالب روش های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی قرار می گیرند. روش های هیدرولیکی مبتنی بر حل معادلات دیفرانسیل جزئی اندازه حرکت و پیوستگی بوده و توانائی تحلیل جریانهای غیرماندگار را خواهند داشت. معادلات حاکم غیرخطی و پیچیده بوده و در حل آنها از تفاضل های محدود و اجزاء محدود استفاده می شود و با وجود مشکل بودن روش حل دارای جوابهای دقیق و قابل اعتماد می باشند. روش های هیدرولوژیکی بر خلاف روش های هیدرولیکی در حل مسائل روندیابی ساده تر و قابل دسترس تر می باشند. یکی از مشکلات روش های هیدرولوژیکی، پایین بودن دقت آنها می باشد.

### روش های هیدرولیکی

حل معادلات حرکت و پیوستگی بر اساس چهار فرم کلی صورت گرفته که عبارتند از:

الف) مدل هیدرودینامیک: این مدل ها بر مبنای حل صورت کامل معادلات سنت-وانانت، پایه گذاری شده اند. نمونه هایی از این مدل ها در تحقیقات Kincaid، Kruger and Bassett (1965)، Walker and Gichuki (1985)، Bassett (1972)، (1970)، Walker (1989)، Bautista and Wallender (1992)، Strelkoff (1994) و عباسی (۱۳۷۳) دیده می شود.

ب) مدل اینرسی صفر: با توجه به اینکه بطور معمول، سرعت جریان آب در آبیاری سطحی کم می باشد، Strelkoff and Katopodes (1977) از ترمهای اینرسی در معادله ممتوم صرف نظر کردند. بدین ترتیب معادله زیر از معادله (۲) حاصل گردید:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (۳)$$

مدل هایی که بر پایه معادلات (۱) و (۳) بنا شده اند، مدل های اینرسی صفر نامیده می شوند. نمونه هایی از این مدلها در تحقیقات Schmithz and Schwankle and Wallender (1988)، Seus (1992)، Strelkoff (1994)، Abbasi et al. (2003) دیده می شود.

ج) مدل موج کینماتیک: گرادیان عمق جریان  $(\partial y / \partial x)$  و ترمهای اینرسی در معادله اندازه حرکت (معادله ۲)، اغلب در مقایسه با  $S_0$  و  $S_f$  کوچک می باشند، بنابراین در معادله (۲) می توان از ترمهای اینرسی و گرادیان عمق جریان صرف نظر کرد، در اینصورت خواهیم داشت:

زمانی مربوط به پیشروی در هر مقطع نیز با هر مقطع دیگر متفاوت و به تدریج از شروع به انتها، گامهای زمانی در حال افزایش خواهد بود. ایشان مدل پیشنهادی خود را با داده‌های صحرایی مقایسه کردند که خطای نسبی در فاز پیشروی حدود ۷ درصد و در فاز پسروی ۵ درصد بدست آمد.

Singh and Scarlatos (1988) یک مدل ریاضی با ترکیبی از معادله پیوستگی و روش ماسکینگام در آبیاری نواری بکار بردند. ایشان مدل را به کمک ۱۲ سری داده مقایسه نمودند که به نتیجه مطلوبی رسیدند. خطای نسبی در فاز پیشروی جبهه آب کمتر از ۱۶ درصد بدست آمد.

از آنجا که Singh and Scarlatos (1988) در این مدل نیز همچون مدل کاربردی در آبیاری شیاری از فاکتورهای وزنی استفاده نمودند لذا تغییر در درصد هر یک از این فاکتورها می‌تواند در نتیجه تأثیرگذار باشد اما با انجام آنالیز حساسیت، پارامتر K بیشترین تأثیر را در نتایج نشان داد.

در تحقیق Singh and He (1988) دو نکته قابل تأمل می‌باشد: در فرضیات بکار رفته در مدل فوق با توجه به رابطه (۱۵) پروفیل جریان سطحی در جبهه پیش رونده کاملاً خطی در نظر گرفته شده و این بدین معناست که  $Q_{i-1}$  در مدت زمان t ثابت بوده که عملاً این اتفاق نمی‌افتد و شدت جریان ورودی به مقطع مرحله پیشروی بتدریج در حال افزایش بوده و چنانچه  $\Delta t$  در حد چند دقیقه باشد این میزان خطا بیشتر مؤثر خواهد بود. با توجه به اینکه طول شیار به xهای مساوی تقسیم شده لذا با سیر نزولی جریان در مقاطع پایین دست گام مکانی افزایش و میزان خطا افزایش می‌یابد.

نکته دیگر ثابت بودن ضرایب وزنی است که به ظاهر جانشینی برای پارامتر  $\theta$  خواهد بود که عملاً نیز ثابت نبوده و تابعی از شرایط جریان خواهد بود. نهایتاً این پارامترها از طریق واسنجی مدل و با استفاده از نتایج چندین سری داده قابل حصول می‌باشد.

خوشاب (۱۳۷۹) با تلفیق دو روش ماسکینگام- کونژ و بیلان حجم اقدام به روندیابی جریان در فاز پیشروی در نوار نمود. وی مدل را با استفاده از ۳۰ سری داده استاندارد تست کرده و با نتایج مدل اینرسی صفر (نرم افزار Sirmod) مقایسه کرد. متوسط خطای نسبی در مدل مذکور ۱۰ درصد و در مدل اینرسی صفر ۶/۸ درصد بدست آمد. نهایتاً وی نتیجه گیری کرد که هر چه شرایط نوار از لحاظ قابلیت نفوذپذیری و شیب و سایر عوامل به شرایط رودخانه ای نزدیکتر باشد، نتایج بهتری گرفته می‌شود.

هدف تحقیق حاضر بکارگیری روش ماسکینگام- کونژ و معادله بیلان حجم جهت شبیه سازی منحنی پیشروی جریان در آبیاری جویچه ای می‌باشد. در این روش با بکارگیری پارامترهای هیدرولیکی نیازی به تخمین ضرائب معادله ماسکینگام و واسنجی وجود نداشته

پارامتر ذخیره و از جنس زمان می‌باشد که تقریباً برابر مدت زمانی است که سیل فاصله دو مقطع در طول رودخانه یا کانال را طی می‌کند.

اگر بجای  $S^N$  و  $S^{N+1}$  مقادیر مربوطه را در معادله پیوستگی قرار دهیم عبارت زیر را خواهیم داشت:

$$O^{N+1} = C_1 I^N + C_2 I^{N+1} + C_3 O^N \quad (10)$$

که  $C_3, C_2, C_1$  ضرایب روندیابی هستند که عبارتند از:

$$C_1 = \frac{0.5\Delta T - K\theta}{K(1-\theta) + 0.5\Delta T} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta T + K\theta}{K(1-\theta) + 0.5\Delta T} \quad (12)$$

$$C_3 = \frac{K(1-\theta) - 0.5\Delta T}{K(1-\theta) + 0.5\Delta T} \quad (13)$$

چنانچه مقادیر  $C_3, C_2, C_1$  را با هم جمع کنیم برابر یک خواهد شد.

برای حل معادله ماسکینگام باید مقادیر  $I_1, I_2, O_1$  در گام زمانی  $\Delta T$  مشخص باشد، همچنین لازم است ضرایب K و  $\theta$  را نیز داشته باشیم.

روش ماسکینگام - کونژ از لحاظ فیزیکی بر اساس روش ماسکینگام استوار است با این تفاوت که در روش ماسکینگام پارامترها بوسیله داده‌های رودخانه ای واسنجی می‌شوند حال آنکه در این روش پارامترهای روندیابی بر پایه جریان و خصوصیات کانال محاسبه می‌گردند و روش دقیق آن است که ضرایب K و  $\theta$  تابع شرایط زمانی و مکانی بدانیم. این روش این امکان را بوجود می‌آورد که در رودخانه‌های فاقد آمار روندیابی با دقت بالایی انجام پذیرد.

Singh and He (1988) اقدام به بکارگیری معادله ماسکینگام در تعیین میزان پیشروی و پسروی جریان آب در جویچه نمودند. اساس کار نامبردگان مدلی ریاضی بر پایه بیلان حجمی و ذخیره ماسکینگام بود. معادلات حاکم بر مدل سازی بکار گرفته شده بشرح زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dS}{dt} = I - O - G \quad (14)$$

معادله پیوستگی که دارای سه ترم جریان ورودی (I)، جریان خروجی (O) و شدت نفوذ (G) می‌باشد.

S: ذخیره آب سطحی تابعی از سه فاکتور معادله پیوستگی است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = K(A_1 I + A_2 G + A_3 O) \quad (15)$$

در معادله فوق  $A_1$  و  $A_2$  و  $A_3$  ضرایب وزنی هستند که مجموع آنها برابر واحد می‌باشد.

آنها ابتدا جویچه را به N مقطع تقسیم کردند که لازمه پیشروی جبهه آب و رسیدن به هر مقطع، سپری شدن N گام زمانی است. گام

با ورود آب به جویچه در یک گام مکانی مشخص حجمی از آن در سطح ذخیره و حجمی نیز نفوذ می کند. مدت زمان طی این فاصله به کمک معادله موازنه حجم به صورت زیر تعیین می شود:

$$\Delta X = \frac{\left[ \frac{O^{N+1} + O^N}{2} \right] \Delta T}{\delta_y A_0 + \delta_z Z_0} \quad (21)$$

$\delta_z$ : فاکتور شکل جریان زیرسطحی،  $\delta_y$ : فاکتور شکل جریان سطحی،  $A_0$ : سطح مقطع جریان ورودی،  $Z$ : عمق آب نفوذی،  $O^N$  و  $O^{N+1}$ : دبی ورودی در مرحله پیشروی در شروع و انتهای گام زمانی  $\Delta T$ .

در مرحله پیشروی جبهه جریان به سمت انتها از یک فاز خیس به یک فاز خشک وارد و فرآیندهای نفوذ و ذخیره سطحی بتدریج به انتهای جویچه توسعه می یابد. مقدار عمق آب نفوذی از معادله کاستیاکف-لوتیس به صورت زیر تعیین می شود:

$$Z = kT^a + f_0 T \quad (22)$$

در این مدل کارایی معادله موازنه حجم منحصر به جبهه جریان بوده ولی معادله ماسکینگام-کونژ علاوه بر جبهه انتهایی، از بالادست جریان را روندیابی کرده و پس از هر گام زمانی دبی های ورودی و خروجی را در هر مقطع محاسبه و در معادله موازنه حجم قرار می دهد. به عبارتی بعد از طی هر فاصله مکانی روندیابی مجدداً از نقطه صفر جویچه شروع و با لحاظ شدن حجم آب نفوذی و ذخیره، دبی خروجی از هر مقطع محاسبه و به عنوان دبی ورودی به مقطع بعدی وارد معادله معادله ماسکینگام-کونژ می گردد. بدین صورت معادله موازنه حجم جهت تعیین روند پیشروی در سطح زمانی  $N$  و روندیابی از روش ماسکینگام-کونژ در سطح زمانی  $N+1$  یعنی یک گام جلوتر صورت می گیرد.

### نرم افزار SIRMOD

این نرم افزار توسط Walker (1989) در دانشگاه ایالتی یوتا، کشور آمریکا، ارائه شده است که کاربری آسانی داشته و در بر گیرنده مدل های هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج کینماتیک می باشد. نرم افزار فوق در تمامی روشهای آبیاری سطحی (جویچه ای، نواری و کرتی) قابل استفاده بوده و قادر به فراهم آوردن سهولت مدیریت در جریانهای موجی و کاهش دبی است. در این نرم افزار، جهت توصیف خصوصیات نفوذ از معادله کاستیاکف-لوتیس استفاده شده است.

### مطالعه صحرائی

تعداد سه جویچه آزمایشی (به طولهای ۶۰، ۸۰ و ۹۰ متر، به عرض ۴۰ سانتیمتر و با شیب طولی ۰/۰۰۱ با بافت خاک لوم رسی) در مزرعه آزمایشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران

لذا بنظر می آید مطالعه بیشتر بر روی فرآیند این روش می تواند آن را به یک مدل کاربردی تبدیل نماید. این مدل با استفاده از ۲۷ سری داده صحرائی مورد ارزیابی قرار گرفت و با نتایج حاصل از مدل های هیدرودینامیک (HD)، اینرسی صفر (ZI) و موج کینماتیک (KW) که قابل اجرا با نرم افزار SIRMOD می باشند، مقایسه گردید. لازم به ذکر است حداقل اطلاعات ورودی یکی از نقاط قوت این روش می باشد.

## مواد و روش ها

### تئوری روش پیشنهادی

معادلات حاکم در روش پیشنهادی شامل روابط مانینگ، موازنه حجم، نفوذ کاستیاکوف-لوتیس و پیوستگی می باشند. اجزاء معادله ماسکینگام-کونژ همان معادلات مورد استفاده در روش ماسکینگام است، اما جهت تعیین ضرایب روندیابی از معادلات زیر استفاده می شود:

$$K = \frac{\Delta X}{C} = \frac{\Delta X}{\frac{\partial q}{\partial A}} \quad (16)$$

$$\theta = 0.5 - \frac{Q}{2BS_0 C \Delta X} \left(1 - \frac{4}{9} F^2\right) \quad (17)$$

$C$ : سرعت موج سیل که برابر است با  $\sqrt{gy}$ ،  $B$ ،  $C$ : پهنای سطح آب،  $F$ : عدد فرود،  $\Delta X$ : طول بازه،  $S_0$ : شیب جویچه.

نکته مهم در اینجا تفاوت شرایط جویچه آبیاری با رودخانه می باشد که این تفاوت ناشی از پدیده نفوذ در مزرعه می باشد. به عبارت دیگر در جویچه علاوه بر ذخیره سطحی، نفوذ نیز به عنوان عاملی مهم وارد این چرخه می گردد. همانگونه که در رودخانه ها یا کانال های بزرگ، کانال های فرعی به صورت ورودی یا خروجی به رودخانه وارد یا از آن منشعب می شوند پدیده نفوذ نیز می تواند بعنوان یک خروجی بر این مجموعه تأثیر گذارد. حال با لحاظ نمودن فرض فوق که می تواند به عنوان یک فرض درست بکار گرفته شود عملاً رابطه کاربردی زیر ارائه می شود:

$$O^{N+1} = C_1 I^N + C_2 I^{N+1} + C_3 O^N \pm Q_{LATERAL} \quad (18)$$

$$O^{N+1} = C_1 I^N + C_2 I^{N+1} + C_3 O^N - C_4 \left[ \frac{G^N + G^{N+1}}{2} \right] \quad (19)$$

که  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_3$  قبلاً تعریف شد و:

$$C_4 = \frac{1}{K(1-\theta) + 0.5\Delta T} \quad (20)$$

$G^N$  و  $G^{N+1}$  شدت نفوذ در دو زمان فرصت نفوذ متوالی را بیان می کنند.

همچنین شاخص ضریب تبیین ( $R^2$ ) تعیین کننده تناسب برآزش معادله فوق به داده ها می باشد. در این معادله مقادیر  $\lambda < 1$ ، نشان دهنده پیش بینی کمتر از مقدار واقعی و  $\lambda > 1$ ، نشان دهنده پیش بینی بیشتر از مقادیر واقعی می باشد. درصد متوسط خطای پیش بینی مدل های انتخاب شده، از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_r = |1 - \lambda| \times 100 \quad (24)$$

شاخص فوق، نشان دهنده روند کلی مقدار خطا در اکثر داده های بکار رفته در معادله (۲۳) می باشد.

به منظور ارزیابی کلی از قابلیت کاربرد مدل های انتخاب شده برای شرایط مزرعه ای از امکان کاربرد معیار درصد متوسط خطای نسبی مدل،  $E_a$ ، نیز استفاده شد تا بدین وسیله دیدگاهی کلی از عملکرد کلیه مدلها، بدست آید. این پارامتر بصورت زیر تعریف می شود:

$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{oi} - X_{pi}|}{X_{oi}} \quad (25)$$

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از شبیه سازی مرحله پیشروی در جدول (۱) آمده است. این نتایج نشان می دهد مقادیر پیش بینی شده در این مرحله برای تمامی مدلها بیشتر از مقادیر مشاهده شده است، ولی بطور کلی متوسط مقادیر  $\lambda$  و  $R^2$  به ترتیب به میزان  $1/0.746$  و  $98/99$  بیانگر مناسب بودن مدل های هیدرودینامیک و اینرسی صفر جهت پیش بینی فرآیند پیشروی جریان می باشد. همچنین این نتایج نشان می دهد تفاوتی بین پیش بینی های برآورد شده توسط مدل های هیدرودینامیک و اینرسی صفر وجود ندارد. متوسط خطای نسبی در مدل ماسکینگام - کونژ  $13/47$  درصد بود که نشانگر مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی فاز پیشروی در جویچه می باشد. شکل مربوط به برآزش نقاط واقعی و محاسبه ای در شکل های (۱) تا (۳) آمده است.

اهواز احداث و جهت ارزیابی مدل های مورد مطالعه در ۲۷ نوبت (با دبی های ۱،  $1/25$  و  $1/5$  لیتر در ثانیه و در سه تکرار) آبیاری شد. انتخاب این مقادیر به خاطر معمول بودن این محدوده از شدت جریان در آبیاری اراضی کشت و صنعت بوده است. در آبیاری هر جویچه اندازه گیری پیشروی، رواناب و همچنین عمق جریان صورت گرفت. طول جویچه ها به فواصل ۵ متری علامت گذاری شده و پیشروی آب در جویچه ثبت شد. دبی ورودی و خروجی هر جویچه نیز بوسیله فلوم های WSC (تیپ ۲) که در ابتدا و انتهای جویچه نصب شده بود اندازه گیری شدند. با استفاده از اطلاعات فوق و از طریق معادله مانینگ، ضریب زبری متوسط هر جویچه جهت استفاده در مدل ها استخراج گردید. ضرایب معادله نفوذ کاستیاکف - لوئیس در هر نوبت آبیاری، نیز به روش دو نقطه ای بدست آمد. در این مطالعه به کمک دو روش هیدرولوژیکی تحت عنوان روش روندیابی ماسکینگام - کونژ و روش بیلان حجم منحنی های پیشروی آب در طول جویچه به عنوان تابعی از زمان ترسیم شد. جهت رسیدن به این هدف به کمک نرم افزار Visual Basic اقدام به نوشتن یک برنامه جهت انجام محاسبات مربوطه شده است.

سپس منحنی های پیشروی محاسبه شده با مدل ماسکینگام - کونژ (MC) با منحنی های حاصل از مدل های هیدرودینامیک (HD)، اینرسی صفر (ZI) و موج کینماتیک (KW) که با نرم افزار SIRMOD اجرا شدند، مقایسه گردید.

لذا پس از اتمام اندازه گیری های مزرعه ای و استخراج خروجی هر مدل، آمار واقعی و شبیه سازی شده با هم مقایسه شدند. در این تحقیق برای مقایسه و ارزیابی مقادیر مشاهده شده  $X_o$  و مقادیر پیش بینی شده توسط مدلها  $X_p$ ، از برآزش داده ها به معادله رگرسیونی زیر استفاده شده است:

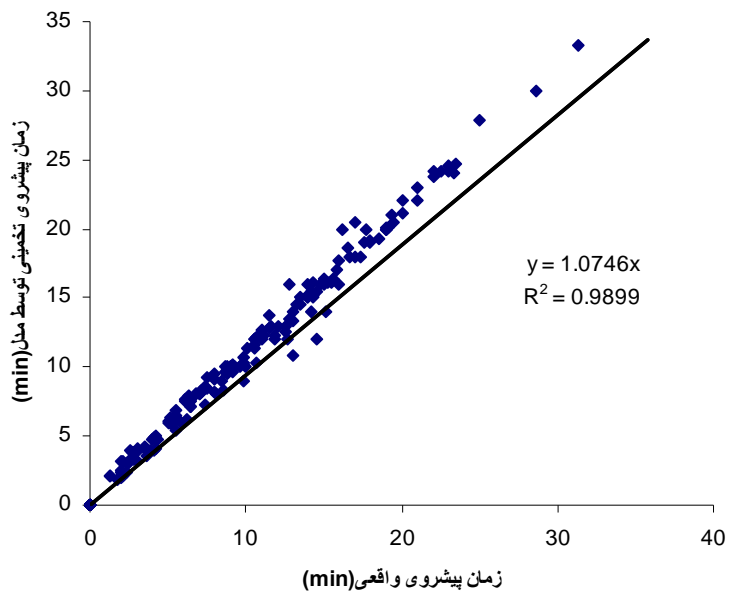
$$X_p = \lambda \times X_o \quad (23)$$

که در آن:

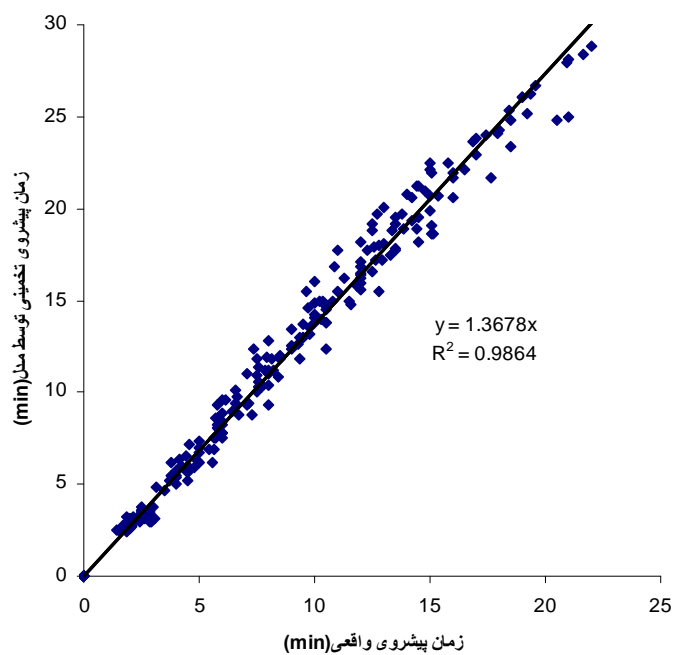
$\lambda$ ، شیب بهترین خط برآزش داده شده بر داده ها می باشد.

(جدول ۱) - متوسط مقادیر پارامترهای لازم جهت ارزیابی مدلها در مرحله پیشروی

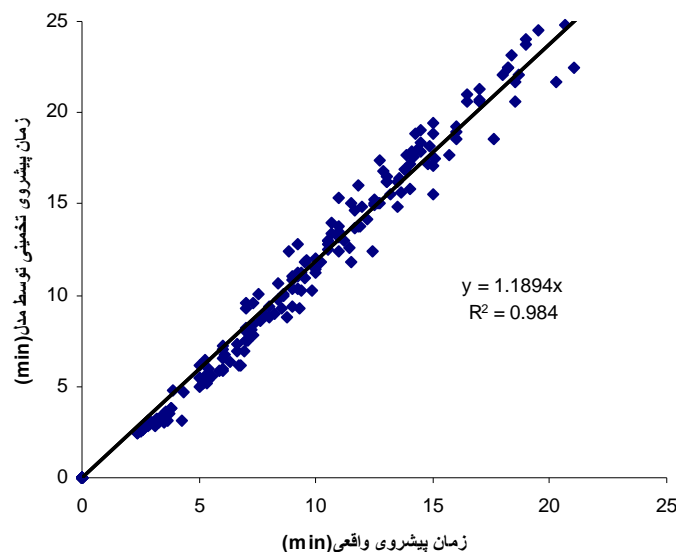
مدل	N (تعداد مشاهدات)	$\lambda$ (شیب خط)	$E_r$ (%) (متوسط خطای پیش بینی مدل)	$R^2$ (%) (ضریب تبیین)	$E_a$ (%) (متوسط خطای نسبی مدل)
HD	۲۰۹	$1/0.746$	$7/46$	$98/99$	$11/19$
ZI	۲۰۹	$1/0.746$	$7/46$	$98/99$	$11/19$
KW	۲۳۳	$1/3678$	$36/78$	$98/64$	$34/46$
MC	۱۹۲	$1/1894$	$18/94$	$98/4$	$13/47$



(شکل ۱) - شکل مربوط به داده های پیشروی مشاهده شده و پیش بینی شده توسط مدل های هیدرودینامیک و اینرسی صفر



(شکل ۲) - شکل مربوط به داده های پیشروی مشاهده شده و پیش بینی شده توسط مدل موج کینماتیک



(شکل ۳) - شکل مربوط به داده‌های پیشروی مشاهده شده و پیش بینی شده توسط مدل ماسکینگام- کونژ

(جدول ۲) - تعداد و درصد کل آبیاریها که در آن برای مرحله پیشروی  $Ea < 20\%$  می باشد

مدل	هیدرودینامیک (HD)	اینرسی صفر (ZI)	موج کینماتیک (KW)	ماسکینگام-کونژ (MC)
تعداد کل آبیاری	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷
تعداد آبیاری با $Ea < 20\%$	۲۵	۲۵	۱	۲۳
درصد قبولی	۹۲/۵۹	۹۲/۵۹	۳/۷	۸۵/۱۸

کونژ بیشتر خواهد بود. بعبارت دیگر هر چه میزان نفوذ در جویچه بیشتر باشد میزان خطای نسبی در این مدل بیشتر خواهد بود. لذا کاهش شدت جریان ورودی به جویچه و از سوی دیگر بالا بودن ضریب زبری که خود باعث کندی پیشروی جریان خواهد بود سبب دور شدن شرایط بستر جویچه از حالت رودخانه ای شده و در این حالت روش ماسکینگام- کونژ از کارایی بالایی برخوردار نخواهد بود.

### نتیجه گیری

۱- نتایج بدست آمده نشان می دهد مقادیر پیش بینی شده در مرحله پیشروی برای تمامی مدلها بیشتر از مقادیر مشاهده شده است که می توان آن را ناشی از رطوبت خاک قبل از آبیاری دانست که باعث تسریع پیشروی می شود، در حالیکه نمی توان این پارامتر را در مدلها لحاظ نمود. بطور کلی متوسط مقادیر  $\lambda$  و  $R^2$  به ترتیب به میزان  $0.746/1$  و  $0.9899/0$  بیانگر مناسب بودن مدلهای هیدرودینامیک و اینرسی صفر جهت پیش بینی فرآیند پیشروی جریان می باشد. همچنین این نتایج نشان می دهد تفاوتی بین پیش بینی های بدست آمده از مدلهای هیدرودینامیک و اینرسی صفر وجود ندارد. این موضوع تأیید کننده نتایج تحقیقات برومندنسب و همکاران (۱۳۸۱) و ناصری و همکاران (۱۳۸۵) می باشد.

درصد خطای حاصل از اندازه گیری پارامترهای مختلف مزرعه ای از قبیل خصوصیات نفوذ و مقاومت هیدرولیکی بدلیل ماهیت متغیر و در عین حاصل عدم وجود روشهای استاندارد در برآورد آنها ممکن است در خصوص قضاوت در مورد درجه دقت عملکرد مدلها تأثیر گذار باشد. از این نظر، برای تعدیل میزان خطا در کلیه مدلها جهت پیش بینی فاز پیشروی یک حد آستانه خطای مجاز تعریف شد. در این تحقیق بر اساس آزمایش های مزرعه ای انجام شده توسط (Esfandiari and Maheshwari, 2001) برومندنسب و همکاران (۱۳۸۱) و ناصری و همکاران (۱۳۸۵) مقدار حد آستانه خطای نسبی مجاز برای مرحله پیشروی ۲۰ درصد در نظر گرفته شد که نتایج حاصله در جدول (۲) آمده است. در مدلهای هیدرودینامیک و اینرسی صفر ۹۲/۵۹ درصد مشاهدات، خطای نسبی کمتر از حد آستانه مجاز داشته اند که مطلوبترین مقدار پیش بینی است و ضعیفترین آنها مربوط به مدل موج کینماتیک می باشد. در مدل ماسکینگام- کونژ ۸۵/۱۸ درصد مشاهدات، خطای نسبی کمتر از حد آستانه مجاز داشته اند که بیانگر مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی فاز پیشروی در جویچه می باشد.

طبق نتایج مندرج در جدول (۳) هر چه طول جویچه کمتر و میزان دبی ورودی به جویچه بیشتر باشد کارایی مدل ماسکینگام-

(جدول ۳) - نتایج ارزیابی مدل ماسکینگام - کونژ

طول جویچه (m)	دبی جویچه (l/s)	تکرار	$k(m^2/s^4)$	a	$f_0 (m^2/s)$	n	خطا (%)	میانگین خطا (%)
۶۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۳۰	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۴۳	۷/۶۳	۱۲/۳۶
		۲	-/۰۰۰۱۸۶	۰/۲۰۸	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۰	۱۴/۲۲	
		۳	-/۰۰۰۴۳۰	۰/۴۴۴	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۵۰	۱۵/۲۵	
۶۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۴۱۰	۰/۲۵۳	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۵۰	۱۲/۸۹	۱۰/۴۶
		۲	-/۰۰۰۲۰۹	۰/۱۰۶	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۳۷	۱۰/۰۷	
		۳	-/۰۰۰۲۱۰	۰/۱۱۴	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۳۷	۸/۴۲	
۶۰	۱/۵	۱	-/۰۰۰۱۷۴	۰/۲۱۳	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۳۸	۱۰/۵۴	۷/۷
		۲	-/۰۰۰۴۲۸	۰/۱۵۷	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۳۵	۵/۸۸	
		۳	-/۰۰۰۳۵۲	۰/۱۷۹	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۳۵	۶/۶۷	
۸۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۱۱۴	۰/۴۹۷	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۷۱	۲۱/۲۲	۱۴/۷
		۲	-/۰۰۰۲۰	۰/۳۵۶	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۵۵	۱۱/۰۳	
		۳	-/۰۰۰۰۵۴	۰/۲۲۹	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۶۵	۱۱/۸۷	
۸۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۱۰۰	۰/۱۲۸	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۵۹	۱۳/۴۱	۱۴/۲۳
		۲	-/۰۰۰۳۲۴	۰/۳۵۶	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۹	۱۵/۷۲	
		۳	-/۰۰۰۰۴۱	۰/۲۶۰	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۶	۱۳/۵۷	
۸۰	۱/۵	۱	-/۰۰۰۶۵۳	۰/۳۳۶	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۵۲	۱۵/۰۶	۱۳/۲۵
		۲	-/۰۰۰۶۲۸	۰/۰۸۳	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۵۲	۱۴/۳۵	
		۳	-/۰۰۰۰۵۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۱	۱۰/۳۵	
۹۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۳۱۵	۰/۶۹۷	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۴۵	۲۳/۳۸	۱۶/۷۹
		۲	-/۰۰۰۱۹۹	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۴۵	۱۶/۴۷	
		۳	-/۰۰۰۰۰۳	۰/۱۱۹	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۴۰	۱۰/۵۳	
۹۰	۱/۲۵	۱	-/۰۰۰۵۰۴	۰/۳۵۵	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۱	۲۴/۱۹	۱۶/۷۴
		۲	-/۰۰۰۳۳۴	۰/۳۶۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۵۱	۱۵/۰۸	
		۳	-/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۳۸	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۴۶	۱۰/۹۵	
۹۰	۱/۵	۱	-/۰۰۰۳۵۸	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۹	۱۱/۰۱	۱۴/۹۹
		۲	-/۰۰۰۵۹۲	۰/۲۴۲	۰/۰۰۰۰۰۴	۰/۰۵۹	۲۲/۲	
		۳	-/۰۰۰۱۴۴	۰/۱۸۸	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۵۸	۱۱/۷۶	

مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی فاز پیشروی در جویچه می باشد.

۴- در مدل ماسکینگام- کونژ با افزایش میزان دبی ورودی به جویچه متوسط خطای نسبی کاهش می یابد. این نتایج همچنین بیانگر مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی پیشروی در جویچه های با طول کمتر می باشد. به بیان دیگر هر چه طول جویچه کمتر و میزان دبی ورودی به جویچه بیشتر باشد کارایی مدل ماسکینگام- کونژ بیشتر خواهد بود.

۵- ارزیابی دقیقتر ۲۷ سری داده و نتایج مدل ماسکینگام- کونژ در جدول (۳) می تواند مبین این نکته باشد که هر چه میزان نفوذ در جویچه بیشتر باشد میزان خطای نسبی در این مدل بیشتر خواهد بود. لذا کاهش شدت جریان ورودی به جویچه و از سوی دیگر بالا بودن ضریب زبری که خود باعث کندی پیشروی جریان خواهد بود سبب

۲- میزان تغییرات خطای نسبی متوسط فرآیند پیشروی آب در جویچه ها، در نوسان بود. بطور کلی کمترین میزان خطای نسبی مربوط به مدل های هیدرودینامیک و اینرسی صفر بود. این مدلها بهترین نتایج را با متوسط خطای نسبی به میزان ۱۱/۱۹ درصد در بر داشتند. متوسط خطای نسبی در مدل ماسکینگام- کونژ ۱۳/۴۷ درصد بود که نشانگر مناسب بودن این مدل جهت پیش بینی فاز پیشروی در جویچه می باشد. ضعیفترین پیش بینی ها با متوسط خطای نسبی ۳۴/۴۶ درصد مربوط به مدل موج کینماتیک می باشد.

۳- در مدل های هیدرودینامیک و اینرسی صفر ۹۲/۵۹ درصد مشاهدات، خطای نسبی کمتر از حد آستانه مجاز داشته اند که مطلوبترین مقدار پیش بینی است و ضعیفترین آنها مربوط به مدل موج کینماتیک می باشد. در مدل ماسکینگام- کونژ ۸۵/۱۸ درصد مشاهدات، خطای نسبی کمتر از حد آستانه مجاز داشته اند که بیانگر



- Esfandiari, M. and Maheshwari, B. L., (2001), "Field evaluation of furrow irrigation models" J. Agric. Eng. Res. 79 (4), 459-479.
- Fang, X. Y. and Singh, V. P. (1990), "Analytical model for furrow irrigation", ASCE, J. Irrig. Drain. Div., 116(2), 154-171.
- Kincaid, D. C. (1970), "Hydrodynamic of border irrigation." PhD Dissertation Department of Agricultural Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
- Kruger, W. E. and Bassett, D. L. (1965), "Unsteady flow of water over a porous bed constant infiltration" Trans. Of the ASCE, 8(1), 60-61.
- Lewis, M. R. and Milne, W. E. (1938), "Analysis of border irrigation." Agriculture Engineering, 19, 267-272.
- Reyej, M. W., and Wallender, W. W., (1985), "Furrow irrigation simulation time reduction." J Irrig.Drain. Eng., 11(2) 134-146.
- Schmithz, G. H. and Seus, G. J. (1992), "Mathematical Zero-Inertia modeling of surface irrigation: Advance in furrow." J. Irrig. Drain. DIV., ASCE, 118(1), 1-18.
- Schwankle, L. J. and Wallender, W. W. (1988), "Zero-Inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics. Trans. Of the ASAE, 31(5), 1470-1475.
- Shayya, W. H., Barlts, V. F., and Segerlind, L. J. (1993), "kinematic-wave furrow irrigation analysis: a finite element approach. Trans.of the ASCE, 36(6), 1733-1742.
- Singh, V. P. and Scarlatos, P.D. (1988), "Muskingum model for border irrigation." J. Irrig. Drain.114(2), 266-280.
- Singh, V. P. and He, Y.C. (1988), "Muskingum model for furrow irrigation." J. Irrig. Drain.114(1), 89-103.
- Strelkoff, T. (1972), "Prediction of increases in surface-irrigation efficiencies." Proc., National Water Resource Meeting, ASCE, New York.
- Strelkoff, T., and Katopodes, N. D. (1977), "Border irrigation hydraulics with zero-inertia." J.Irrig. Drain.Div., 103(3), 325-342.
- Strelkoff, T.(1994), SRFR, A model of surface irrigation .U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix.
- Walker, W. R. and Humpherys, A. S. (1983), "Kinematic-wave furrow irrigatin model." J. Irrig. Drain. Eng., 109(4), 377-392.
- Walker, W. R., and Gichuki, F. (1985). "Documentation of surface irrigation models" Report. Utah State Univ., Logan, Utah.USA.
- Walker, W. R. (1989), SIRMOD. A model of surface irrigation Utah State Univ., Logan, Utah.USA,
- Wallender, W. W. (1986), "Furrow model with spatially varying infiltration" Trans. Of the ASCE, 29(4), 1012-1016
- دور شدن شرایط بستر جویچه از حالت رودخانه ای شده و در این حالت روش ماسکینگام- کونژ از کارایی بالایی برخوردار نخواهد بود.
- ۶- با توجه به نتایج حاصله می توان گفت که کاربرد روشهای هیدرولوژیکی در سیستمهای آبیاری سطحی نیز امکان پذیر است. عدم نیاز به واسنجی و اطلاعات ورودی محدود و از طرفی سادگی در حل مسأله نیز از مزایای این روش محسوب می شود.

## مراجع

- برومند نسب، س. ، م. بهزاد و ن. فروردین. (۱۳۸۱)، ارزیابی مدل‌های آبیاری جویچه ای با شرایط مزرعه ای در منطقه زرقان فارس. مجله علمی کشاورزی. جلد ۲۶. شماره ۱.
- خوشاب، ا. (۱۳۷۹)، طراحی آبیاری نواری به کمک مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- عباسی، ف. (۱۳۷۳)، کاربرد مدل‌های ریاضی در طراحی آبیاری نواری. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.
- عباسی، ف. و م. محمودیان شوشتری. (۱۳۷۵)، مطالعه پیشروی جریان آب در آبیاری جویچه ای با استفاده از مدل اینرسی صفر. مجموعه مقالات دومین کنگره ملی مسائل آب و خاک کشور. تهران.
- علیزاده، ا. (۱۳۸۱)، اصول هیدرولوژی کاربردی. بنیاد فرهنگی رضوی. موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.
- فرزام نیا، م. (۱۳۷۶)، مقایسه عملکرد هیدرولیکی آبیاری شیاری تحت روشهای (کات بک) واکر و اسکوگرپو و سنتی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ناصری، ع. ع. ، م. بهزاد. ، س، برومندنسب و س، جلیلی. (۱۳۸۵)، ارزیابی دقت شبیه سازی مدل‌های آبیاری سطحی در آبیاری نواری. مجله پژوهش کشاورزی. جلد ۶. شماره ۲.
- Abbasi, F. Mahmodian, S. M., and Feyen, J. (2003), "Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models." J. Irrig.Drain.Eng., 129(3) 208-213.
- Alazba, A. A. (1999), "Explicit volume balance model solution" J. Irrig. Drain.Eng. 125(5), 273-279
- Bassett, D. L. (1972), "A mathematic model of water advance in border irrigation" Trans. Of the ASCE, 15(5), 992-995.
- Bautista, E. and Wallender, W. W. (1992) "Hydrodynamic furrow irrigation model with specified steps." ASCE, J.Irrig. Drain..Eng., 118(3), 450-465.
- Davis, J. R. (1961), "Estimating rate of advance for irrigation furrows" Trans. Of the ASCE, 4(1), 52-54.

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۸۸/۶/۱۸

## Comparison of Muskingum – Cunge model with irrigation hydraulic models in estimation of furrow irrigation advance phase

M. Bahrami<sup>1\*</sup>, S. Boroomand Nasab<sup>2</sup>, and A. A. Naseri<sup>3</sup>

### Abstract

Prediction and calculation of advance and recession curves in furrows require a series of accurate field measurements which is both time consuming and expensive. The basic aim of this research is application of a flood routing method in simulation of advance rate in furrow irrigation and comparing it with results of SIRMOD models. Muskingum – Cunge model was performed with 27 series of field data and compared with SIRMOD results. Field experiments were performed in Shahid Chamran University field area, in Ahwaz, Iran. The tests were conducted in three furrows with length of 60, 80 and 90 meters, three discharges of 1, 1.25 and 1.5 liters per second and with three replications. For evaluation of the results, four indices: average prediction error of model ( $E_p$ ), distribution into 45° line ( $\lambda$ ), regression coefficient ( $R^2$ ) and average relative error of model ( $E_a$ ) were used. According to the results, estimated values of advance phase in all models were more than observed values. Hydrodynamic and Zero Inertia models owned the best results with 11.19 percent average relative error. Average relative error by the Muskingum – Cunge was 13.47 percent. This object showed that the Muskingum – Cunge model is a suitable model for predicting of advance phase in furrow. Kinematic wave model gained the weakest results with 34.46 percent of average relative error. Results indicated that with a smaller furrow length and the higher inlet discharge, predictability of the Muskingum – Cunge model will be better. Finally, the results showed that the Muskingum – Cunge model is simple and found to effectively simulate the hydraulics of the advance phase of furrow irrigation.

**Keywords:** Furrow irrigation; Muskingum – Cunge; SIRMOD; Advance phase

1 - Ph.D Student, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

(\*- Corresponding author Email: mehdi\_Bahrami121@yahoo.com)

2,3- Associate and Professor, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran, respectively