

ارزیابی مزرعه‌ای و آنالیز حساسیت مدل SIRMOD در آبیاری شیاری

محمدعلی غلامی سفیدکوهی^{۱*}، علی کولانیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۵

چکیده

امروزه استفاده از مدل‌های هیدرولیکی به منظور طراحی و ارزیابی آبیاری سطحی، دارای جایگاه ویژه می‌باشد. در این تحقیق مدل‌های هیدرودینامیک کامل (HD)، اینرسی صفر (ZI) و موج سینماتیک (KW) موجود در بسته نرم‌افزار SIRMOD مورد ارزیابی و تحلیل حساسیت قرار گرفت. بدین منظور، از سه سری داده مزرعه‌ای با بافت سبک، متوسط و سنگین استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی مدل‌ها زمان پیشروی را با دقت مناسب پیش‌بینی می‌نمایند ولی مرحله پسروی با دقت کم‌تری نسبت به مرحله پیشروی پیش‌بینی می‌شود. همچنین مدل هیدرودینامیک کامل، زمان‌های پیشروی و پسروی را با دقت بیش‌تری شبیه‌سازی می‌کند. یافته‌ها نشان داد که دقت پیش‌بینی میزان نفوذ تجمعی توسط مدل‌ها، تابع بافت خاک می‌باشد به طوری که کم‌ترین میانگین خطای مطلق متعلق به خاک با بافت متوسط می‌باشد. تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولیکی نشان داد که پارامترهایی مانند دبی جریان، زمان قطع جریان و ضرایب معادله نفوذ تأثیر زیادی بر راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، ضریب یکنواختی توزیع و نسبت رواناب پایاب دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، تحلیل حساسیت، مدل‌های هیدرولیکی

مقدمه

پیچیده بودن حل تحلیلی این مدل‌ها، امروزه نرم‌افزارهای متعددی به بازار عرضه شد تا حل عددی این مدل‌های ریاضی را انجام دهند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به WinSRFR، SURDEV و SIRMOD اشاره نمود (Koech et al, 2010). بسته نرم‌افزاری SIRMOD یکی از ابزارهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی آبیاری سطحی که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت بهینه آبیاری سطحی دارد (Walker, 1998, 2003; Walker and Skogerboe, 1987).

روابط حاکم بر هیدرولیک آبیاری سطحی

جریان آب در آبیاری سطحی، جریان متغیر مکانی ناپایدار است که به سرعت نفوذ آب در خاک بستگی دارد. معادلات مربوط به این جریان به معادلات سنت - ونانت مشهور است که یک جفت معادله دیفرانسیل جزئی بوده که به شکل کامل، فاقد حل تحلیلی است و معمولاً با روش‌های عددی حل می‌شوند (عباسی و همکاران، ۱۳۷۸). این معادلات پس از تعدیل، به صورت زیر ارائه شد:

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

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{DvI}{2gA} \quad (2)$$

y : عمق آب، t : زمان از آغاز آبیاری، v : سرعت جریان آب
(تابعی از x و t)، x : فاصله از ابتدای شیاری، I : شدت نفوذ آب به

آبیاری سطحی یکی از متداول‌ترین روش‌های آبیاری در ایران و جهان می‌باشد. علیرغم پیشرفت‌های قابل ملاحظه در چند دهه اخیر در علم و فن آوری و روی کار آمدن شیوه‌های نوین آبیاری، با این حال هنوز در بسیاری از کشورهای جهان حتی کشورهای پیشرفته، آبیاری سطحی به‌عنوان یک از رایج‌ترین روش‌های آبیاری بوده و محققین زیادی برای توسعه آن قدم برداشته و در حال توسعه و بهبود این روش می‌باشند (Strelkoff and Katopodes, 1977). اگر این روش آبیاری به طور دقیق طراحی و اجرا شود، یکی از بهترین روش‌ها محسوب می‌شود ولی چنانچه به خوبی اجرا نشود موجب تلفات آب، عدم یکنواختی توزیع آب، شور شدن و آلودگی آب‌های سطحی و منابع زیرزمینی می‌شود (Esfandiari and Maheshwari, 2001). از آنجایی که آب کالایی با ارزش محسوب شده، لذا باید طراحی سیستم آبیاری به نوعی انجام گردد که حتی‌الامکان از هدر رفتن آب جلوگیری شود. از این رو مدل‌های هیدرولیکی آبیاری سطحی برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری دارای اهمیت می‌باشند. به دلیل

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*- نویسنده مسئول: (Email: ma.gholami@sanru.ac.ir)

$$S_0 = S_f \quad (5)$$

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه استفاده از مدل‌های هیدرولیکی در ارتباط با مسائل آبیاری سطحی انجام شد. (Esfandiari and Maheshwari, 2001)، سه مدل هیدرودینامیک کامل، اینرسی صفر و موج سینماتیک را به منظور پیش‌بینی آبیاری شیاری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های هیدرودینامیک کامل و اینرسی صفر، دقت بیش‌تری در پیش‌بینی مرحله پیشروی جریان دارند. همچنین مدل‌های اینرسی صفر و موج سینماتیک پیش‌بینی بهتری را در مرحله پسروی ارائه می‌دهند. بهبهانی و بابازاده (۱۳۸۴) در تحقیقی به ارزیابی نرم‌افزار SIRMOD در مزرعه‌ای با بافت رس که با روش شیاری آبیاری می‌شد پرداختند. نتایج نشان داد زمان پیشروی و مقدار نفوذ در هر سه مدل از مقادیر مشاهده‌ای کم‌تر برآورد شد. بهرامی و همکاران (۱۳۸۸) در تحقیقی به منظور طراحی آبیاری جویچه‌ای، مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام-کونز و نرم‌افزار SIRMOD را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که در تمامی مدل‌ها، مقادیر پیش‌بینی شده در مرحله پیشروی، بیش‌تر از مقادیر مشاهده‌ای بود. همچنین (Ebrahimi and Liaghat, 2011) عملکرد SIRMOD را در روش‌های آبیاری جویچه‌ای و نواری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تفاوت زیادی بین مدل‌های هیدرودینامیک و اینرسی صفر در هر دو روش آبیاری وجود ندارد و عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان سطحی آب در آبیاری شیاری و نواری مناسب است.

هدف اصلی از انجام تحقیق حاضر، ارزیابی سه مدل شامل هیدرودینامیک کامل، اینرسی صفر و موج سینماتیک در برآورد پارامترهای مراحل پیشروی و پسروی، میزان نفوذ و بیلان آب در آبیاری شیاری در سه نوع خاک با بافت متفاوت می‌باشد. همچنین تحلیل حساسیت مدل‌ها نسبت به پارامترهای ورودی در سیستم آبیاری شیاری نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌های پژوهش

در این تحقیق از داده‌های آزمایشات مزرعه‌ای سه ایستگاه تحقیقاتی شامل مراکز تحقیقات کشاورزی صفی آباد دزفول (F₁)، توتون ارومیه (F₂) و گل‌مکان مشهد (F₃) استفاده شد (عباسی و همکاران، ۱۳۷۸). جدول (۱) مشخصات فیزیکی خاک مزارع مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات شیمیایی خاک نشان می‌دهد که از نظر شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه فاقد هر گونه مشکل زراعی می‌باشد. مشخصات هندسی و هیدرولیکی شیاریهای مورد آزمایش در مناطق مورد مطالعه در جداول (۲) و (۳) ارائه شد.

داخل خاک (تابعی از X و t)، g : شتاب ثقلی، S_0 : شیب طولی شیاری، S_f : شیب خط انرژی، A : سطح مقطع جریان، B : عرض بالایی جریان آب و D : ثابت عددی است که اگر معادله مومنتم از قانون دوم نیوتن مشتق شده باشد مقدار آن برابر با یک و در صورتی که از قانون بقای انرژی مشتق شده باشد مقدار آن ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (محمودیان، ۱۳۷۹). در مدل SIRMOD حجم آب نفوذ یافته در آبیاری شیاری توسط معادلات نفوذ کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیس برآورد می‌گردد که در تحقیق حاضر مبنای برآورد نفوذ، معادله کوستیاکف-لوئیس قرار گرفت که برای اکثر خاک‌ها مناسب می‌باشد (Maheshwari and McMahon, 1993).

$$Z = kt^a + f_o t \quad (3)$$

که در آن Z نفوذ تجمعی ($m^3 \cdot m^{-1}$)، f_o سرعت نفوذ نهایی ($m^3 \cdot m^{-1} \cdot min^{-1}$)، t زمان (min)، a و k پارامترهای تجربی معادله نفوذ کوستیاکف-لوئیس می‌باشند.

مدل هیدرودینامیک کامل (HD)

در این مدل، حل عددی معادلات سنت-ونانت انجام می‌شود. این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های هیدرولیکی از دقت بالاتری برخوردار بوده و به همین علت، اغلب از این مدل برای کالیبره نمودن و ارزیابی مدل‌های ساده‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Clemmens, 2009; Walker, 1998; Walker and Gichuki, 1985; Bautista and Wallender, 1992).

مدل اینرسی صفر (ZI)

این مدل اولین بار توسط Strelkoff and Katopodes (1977) مطرح شد. از آنجایی که در سرعت‌های خیلی پایین که معمولاً در آبیاری سطحی وجود دارد، تغییرات سرعت کم است، لذا در معادله اندازه حرکت، تأثیر جملات اینرسی در مقایسه با تأثیر بقیه پارامترها ناچیز در نظر گرفته شده و می‌توان از آن‌ها صرف نظر نمود. تحت چنین فرضی معادله شماره (۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود (Strelkoff and Katopodes, 1977).

$$\frac{\delta y}{\delta x} = S_0 - S_f \quad (4)$$

مدل موج سینماتیک (KW)

اگر شیب مزرعه به اندازه کافی تند باشد، گرادیان عمق جریان و پارامترهای جبری معادله مومنتم در مقایسه با شیب‌های پایین قابل چشم‌پوشی می‌باشد (ملک‌پور، ۱۳۷۴ و Clemmens, 2009). بنابراین معادله (۲) با در نظر گرفتن به صورت رابطه (۵) تغییر می‌یابد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مزارع آزمایشی

مزرعه	عمق خاک (cm)	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (g.cm ⁻³)	ظرفیت زراعی (درصد وزنی)	رطوبت پژمردگی (درصد وزنی)
F ₁	۰-۲۰	لوم رسی سیلتی	۱/۶۷	۲۳/۷۵	۱۲/۸
	۲۰-۴۰	لوم رسی سیلتی	۱/۵۹	۲۴/۵۰	۱۳
	۴۰-۶۰	لوم رسی سیلتی	۱/۶۷	۲۴/۶۵	۱۴
F ₂	۰-۲۵	لومی رسی	۱/۳	۲۲/۷	۱۳/۵
	۲۵-۵۰	لومی رسی	۱/۶	۲۱/۷	۱۴/۷
	۵۰-۷۵	لومی رسی	۱/۵	۱۹/۷	۱۳/۳
F ₃	۰-۲۰	لومی	۱/۵۳	۱۲/۱۴	۵/۳۵
	۲۰-۴۰	لومی ماسه‌ی	۱/۶۱	۱۱/۶	۴/۵
	۴۰-۶۰	لومی ماسه‌ی	۱/۶	۱۱/۹۲	۴/۸

جدول ۲- مشخصات هندسی شیارهای مورد آزمایش

مزرعه	فاصله (m)	طول (m)	شیب (m/m)
F ₁	۰/۷۵	۲۰۰	۰/۰۰۶۴
F ₂	۰/۷	۱۸۰	۰/۰۱۶۳
F ₃	۰/۷	۱۰۰	۰/۰۱۱۷

جدول ۳- مشخصات هیدرولیکی شیارهای مورد آزمایش

پارامترها	مزارع آزمایشی		
	F3	F2	F1
جریان ورودی (lps)	۰/۶۹	۰/۵۴۵	۰/۸۵
a	۰/۳۱۱	۰/۲۱۱	۰/۵۰۷
K(m ² /min ^{-a})	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۱۸
f ₀ (m ³ /min/m)	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۹
ضریب مانینگ n	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴
زمان قطع جریان (دقیقه)	۱۲۷	۱۸۰	۲۷۰

ارزیابی مدل‌ها

به منظور ارزیابی و بررسی دقت مدل‌ها از روابط رگرسیونی و خطای بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده توسط مدل‌ها استفاده شد (Esfandiari and Maheshwari, 2001).

$$X_p = \lambda X_o \quad (۶)$$

که در آن مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و X_o مقادیر مشاهده شده در مزرعه می‌باشد. در این معادله مقادیر $\lambda < 1$ نشان دهنده پیش‌بینی کمتر از مقدار واقعی و $\lambda > 1$ ، نشان دهنده پیش‌بینی بیش‌تر از مقادیر واقعی می‌باشد. درصد متوسط خطای پیش‌بینی مدل از رابطه زیر به دست می‌آید (McClymont et al, 1996).

$$E_r = |1 - \lambda| \times 100 \quad (۷)$$

شاخص فوق، نشان دهنده روند کلی مقدار خطا در اکثر داده‌های

به کار رفته در معادله (۶) می‌باشد. مقدار λ نزدیک به یک و E_r نزدیک به صفر نشان دهنده یک برآورد خوب توسط مدل‌ها می‌باشد. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف از ضرایب آماری مانند R^2 ، RMSE و EF استفاده شد. آماره ضریب تبیین (R^2) شاخصی است که میزان خطای بودن رابطه بین مقادیر مشاهده شده و محاسبه شده را نشان می‌دهد. هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، رابطه خطی مورد نظر مشهودتر است. (RMSE) مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا همواره مثبت بوده و بهترین حالت زمانی است که مقدار آن به صفر نزدیک شود. مقدار (EF) نشان دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت، تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها تغییر می‌کند. بیان ریاضی سه شاخص فوق به صورت زیر است.

علامت مثبت نشان دهنده عکس این موضوع می‌باشد.

نتایج و بحث

مراحل پیشروی و پسروی

با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، مدل‌های مختلف در نرم‌افزار SIRMOD اجرا و نتایج در شکل (۱) نشان داده شد. ملاحظه می‌شود که در هر سه ایستگاه، منحنی‌های پیشروی به خوبی توسط مدل‌های هیدرولیکی پیش‌بینی شد. جدول (۴) شاخص‌های ارزیابی در مرحله پیشروی جریان توسط هر یک از مدل‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این جدول متوسط مقادیر λ برای مزارع F_1 و F_2 به ترتیب ۰/۹۹۴۴ و ۰/۹۶۴۷ بدست آمد. بعبارتی دیگر این پارامتر نشان می‌دهد که تمامی مدل‌های هیدرولیکی در حالت پیشروی در بافت خاک متوسط و سنگین مقادیر کمتری را نسبت به مقدار مشاهده شده پیش‌بینی می‌کنند. این در حالی است که مقدار متوسط λ در مزرعه F_3 با بافت خاک سبک ۱/۰۸۹۰ می‌باشد که نشان دهنده پیش‌بینی بیش‌تر زمان پیشروی نسبت به مقادیر مشاهده شده در هر سه مدل می‌باشد. همچنین در خاک با بافت سبک به علت میزان نفوذ بیش‌تر در طول شیار، درصد خطای پیش‌بینی (EF) در مدل‌های هیدرولیکی بیش‌تر می‌باشد. به طوری که میزان متوسط این خطا در حالت پیشروی در شیارهای F_1 و F_2 به ترتیب ۲/۰۴ و ۳/۵۳ درصد بوده درحالی که متوسط مقدار این شاخص در شیار F_3 ۸/۹۱ درصد است. مقایسه شاخص‌های R^2 ، RMSE و EF نشان می‌دهد که پیش‌بینی زمان پیشروی در شیار F_3 از دقت کمتری برخوردار می‌باشد به گونه‌ای که متوسط این شاخص‌ها به ترتیب ۰/۹۷۷۵، ۳/۸۰۷۸ و ۰/۹۷۱۱ بدست آمد. علت پیش‌بینی کم مدل‌ها در این مزرعه (F_3) را می‌توان به دور شدن از فرضیات اولیه معادلات سنت-وانانت ارتباط داد، زیرا در این حالت به دلیل پایین بودن شدت جریان ورودی به شیار و بالا بودن ضریب زبری شیار، نفوذ بیش‌تر شده و این عوامل باعث کندی پیشروی جریان می‌شود.

با ارزیابی مقادیر آماری در هر سه شیار می‌توان بیان نمود که تمامی مدل‌های هیدرولیکی جهت پیش‌بینی فرآیند پیشروی جریان در طول شیار مناسب می‌باشند، اما مدل هیدرودینامیک کامل عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه می‌دهد به طوری که در هر سه شیار با شرایط متفاوت، بالاترین ضریب تبیین و ضریب کارایی و کمترین ضریب RMSE به این مدل اختصاص دارد. این مطلب با نتایج (Ebrahimi and Liaghat, 2011; Esfandiari and Maheshwari, 2001; McClymont et al, 1996) و (بهبهانی و همکاران، ۱۳۸۴) مطابقت دارد.

جدول (۵) مقادیر پارامترهای ارزیابی مدل‌های هیدرولیکی مختلف در مرحله پسروی جریان را نشان می‌دهد. مطابق این جدول

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)(X_p - \bar{X}_p) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^n (X_p - \bar{X}_p)^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_o)^2}{n}} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_p - X_o)^2}{\sum_{i=1}^n (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad (10)$$

آنالیز حساسیت مدل

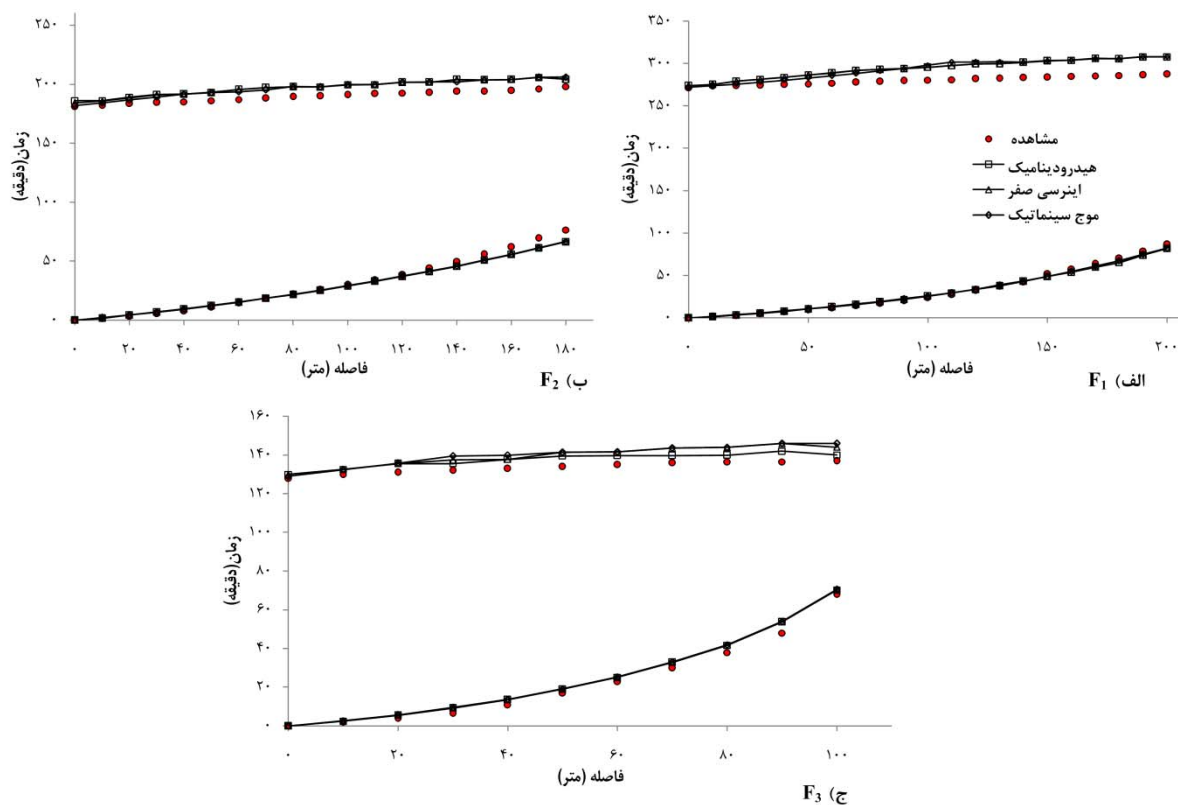
حساسیت یک مدل به یک پارامتر ورودی عبارتند از نسبت تغییر در پارامتر خروجی مدل به ازاء تغییر در پارامتر مذکور در حالتی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شوند (Bautista et al, 2002). پارامترهای ورودی مهم در آبیاری شیار عبارتند از زمان قطع جریان، دبی ورودی، ضرایب معادله نفوذ، ضریب زبری مانینگ و شیب مزرعه که اندازه‌گیری یا تخمین این پارامترها در مزرعه ممکن است با خطاهای معنی‌داری همراه باشد. لذا این پارامترها در تجزیه و تحلیل حاضر وارد شد تا تأثیر نسبی هر کدام بر شاخص‌های خروجی شامل راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، ضریب یکنواختی توزیع و نسبت رواناب به صورت کمی تعیین شود. در تحلیل حساسیت هر پارامتر ورودی، مقدار تغییر معادل ± 50 و ± 25 درصد در نظر گرفته شد تا شرایط لازم تحلیل حساسیت را فراهم آورده و حداکثر محدوده ممکن خطاها را در پارامترهای ورودی پوشش داده باشد. خروجی‌های مدل در وضعیت اولیه (بدون تغییر داده‌ها)، به عنوان خروجی مبنا در نظر گرفته شد. با تغییر هر یک از پارامترهای ورودی و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، تأثیر آن بر روی پارامتر شاخص‌ها ارزیابی شد. برای کمی‌سازی میزان حساسیت هر پارامتر ورودی، از رابطه (۱۱) استفاده شد (Ng and Loomis, 1984).

$$S = \frac{100 \sum_{i=1}^N (X_{ni} - X_{ci})}{N \sum_{i=1}^N X_{ci}} \Delta \quad (11)$$

N : تعداد نقاط برای یک پارامتر خروجی، X_{ni} : مقدار جدید پارامتر خروجی در نقطه i ام به ازای تغییر در پارامتر ورودی، X_{ci} : مقدار پارامتر خروجی در نقطه i ام در حالت اجرای کنترل شبیه‌سازی، بدون تغییر در پارامتر ورودی و Δ : مقدار مطلق تغییر در پارامتر ورودی. علامت منفی پارامتر شاخص حساسیت نشان می‌دهد که مقدار آن پارامتر در آنالیز حساسیت نسبت به حالت اولیه کمتر شده است و

به منظور مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌ها در مراحل پیش‌روی و پس‌روی، از آزمون t -استیودنت استفاده شد (جدول ۶). ملاحظه می‌شود که در مرحله پیش‌روی تمامی مدل‌ها در بافت‌های مختلف خاک اختلاف معنی‌داری با مقادیر مشاهده شده ندارند، این در حالی است که در مرحله پس‌روی جریان، در شیار اول هیچ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی در دو شیار دیگر، تفاوت بسیار معنادار می‌باشد. اختلاف در پیش‌بینی این سه مدل جریان را می‌توان مرتبط به معادلات به کار رفته و روش حل آن‌ها دانست.

زمان پس‌روی در تمامی مدل‌ها، بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده پیش‌بینی شد. شاخص‌های ارزیابی نشان می‌دهند که هر سه مدل هیدرولیکی زمان پس‌روی را با دقت پایین‌تری نسبت به مرحله پیش‌روی پیش‌بینی نموده‌اند. متوسط خطای مدل هیدرودینامیک کامل در این مرحله از جریان نسبت به مرحله پیش‌روی بیش‌تر می‌باشد. به نظر می‌رسد که خطای اندازه‌گیری داده‌های صحرایی، خطای نتایج مدل‌ها در نرم‌افزار SIRMOD و یا عدم یکنواختی شیب طولی مزرعه دلایل مختلفی برای عدم تطابق مدل‌های هیدرولیکی با مقادیر مشاهده شده در این مرحله می‌باشد.



شکل ۱- منحنی پیش‌روی و پس‌روی مشاهده شده و برآورد شده توسط مدل‌ها

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها در مرحله پیش‌روی

مزرعه	مدل	N	λ	Er(%)	R^2	RMSE(min)	EF
F ₁	HD	۲۱	۰/۹۸۵۳	۱/۴۷	۰/۹۹۸۶	۰/۸۲۵۷	۰/۹۹۳۶
	ZI	۲۱	۰/۹۷۵۷	۲/۴۳	۰/۹۹۸۴	۱/۰۹۱۹	۰/۹۸۸۸
	KW	۲۱	۱/۰۲۲۳	۲/۲۳	۰/۹۹۸۴	۱/۰۹۲۸	۰/۹۸۸۷
F ₂	HD	۱۸	۰/۹۶۵۲	۳/۴۸	۰/۹۹۸۵	۲/۸۲۸۷	۰/۹۷۹۰
	ZI	۱۸	۰/۹۶۴۸	۳/۵۲	۰/۹۹۸۵	۲/۸۳۲۵	۰/۹۷۸۹
	KW	۱۸	۰/۹۶۴۱	۳/۵۹	۰/۹۹۸۱	۲/۹۹۵۷	۰/۹۷۶۵
F ₃	HD	۱۱	۱/۰۸۱۶	۸/۱۶	۰/۹۹۷۸	۳/۷۰۷۸	۰/۹۷۳۶
	ZI	۱۱	۱/۰۸۲۰	۸/۲۱	۰/۹۹۷۵	۳/۸۵۶۲	۰/۹۷۰۴
	KW	۱۱	۱/۱۰۳۵	۱۰/۳۵	۰/۹۹۷۱	۳/۸۵۹۵	۰/۹۷۰۴

جدول ۵- شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها در مرحله پسروی

مزرعه	مدل	N	λ	Er(%)	R ²	RMSE(min)	EF
F ₁	HD	۲۱	۱/۰۴۷۲	۴/۷۲	۰/۹۸۹۹	۴/۶۹۰۹	-۱/۴۳۴۳
	ZI	۲۱	۱/۰۴۹۱	۴/۹۱	۰/۹۸۸۶	۴/۶۹۱۳	-۱/۴۳۶۲
	KW	۲۱	۱/۰۴۹۷	۴/۹۷	۰/۹۸۰۱	۴/۷۱۷۴	-۱/۵۶۳۸
F ₂	HD	۱۸	۱/۰۳۸۵	۳/۸۵	۰/۹۸۰۲	۷/۴۳۷۶	-۱/۸۶۱۶
	ZI	۱۸	۱/۰۴۰۶	۴/۰۶	۰/۹۷۸۱	۷/۷۴۳۷	-۲/۱۰۱۹
	KW	۱۸	۱/۰۴۱۳	۴/۱۳	۰/۹۷۵۱	۷/۷۴۳۷	-۲/۲۲۲۹
F ₃	HD	۱۱	۱/۰۲۹۴	۲/۹۴	۰/۹۸۵۴	۰/۶۸۸۲	-۱/۰۳۴۶
	ZI	۱۱	۱/۰۴۳۸	۴/۳۸	۰/۹۷۸۵	۰/۹۷۲۸	-۳/۸۰۳۶
	KW	۱۱	۱/۰۴۷۵	۴/۷۵	۰/۹۵۸۳	۲/۰۶۴۸	-۴/۷۴۷

جدول ۶- نتایج آزمون مقایسه t- استیودنت

مزرعه	درجه آزادی	t	مزرعه	درجه آزادی	t
F ₁	مشاهده- هیدرودینامیک	۲۰	F ₁	مشاهده- هیدرودینامیک	۲۰
	مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۱۸۲		مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۱۸۲
	مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۱۸۸		مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۱۸۸
F ₂	مشاهده- هیدرودینامیک	۱۷	F ₂	مشاهده- هیدرودینامیک	۱۷
	مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۲۸۶		مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۲۸۶
	مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۲۹۳		مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۲۹۳
F ₃	مشاهده- هیدرودینامیک	۱۰	F ₃	مشاهده- هیدرودینامیک	۱۰
	مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۱۵۵		مشاهده- اینرسی صفر	n.s/۱۵۵
	مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۱۶۸		مشاهده- موج سینماتیک	n.s/۱۶۸

n.s: اختلاف غیر معنی‌دار ** : اختلاف بسیار معنی‌دار در سطح یک درصد

نفوذ

مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های هیدرولیکی در شکل (۲) و شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها در جدول (۷) نشان داده شد. مطابق این جدول مقادیر متوسط شاخص R^2 ، RMSE و EF در شیار F₁ که دارای خاکی با بافت متوسط می‌باشد، به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۳، ۰/۰۰۰۷ و ۰/۹۶۳۳ می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که مقادیر نفوذ محاسبه شده در این شیار از دقت مناسبی برخوردار است. مقادیر نفوذ پیش‌بینی شده در دو شیار F₂ و F₃ که دارای خاک‌های با بافت سنگین و سبک می‌باشند، به ترتیب کم‌تر و بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در تمامی مدل‌ها مقادیر متوسط خطای نفوذ در این دو شیار بیش‌تر از شیار اول می‌باشد. به نظر می‌رسد این تفاوت‌ها به مشخصات فیزیکی خاک مزرعه مرتبط می‌باشد. با در نظر گرفتن شاخص‌های ارزیابی می‌توان بیان نمود که هر سه مدل هیدرولیکی با اختلاف اندکی مقادیر نفوذ را پیش‌بینی می‌کنند. این نتیجه می‌تواند به علت مقادیر کم جریان در آبیاری سطحی به‌خصوص آبیاری شیاری باشد (McClymont et al, 1996).

بیان آب

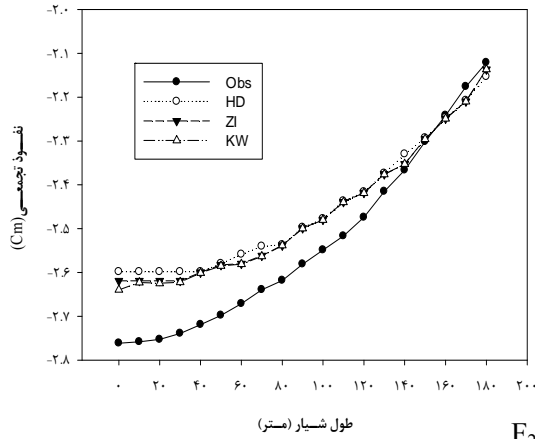
جدول (۸) مقدار حجمی آب نفوذ یافته و رواناب خروجی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود تمامی مدل‌های هیدرولیکی، حجم‌های نفوذ یافته و رواناب را با دقت پایینی پیش‌بینی می‌کنند. همان‌طور که در پژوهش (Abbasi et al, 2003; Clemmens, 2009; Ebrahimi and Liaghat, 2011) آمده است، این تفاوت‌ها احتمالاً با شرایط ماندابی در مرز پایین‌ست شیارها، تخمین نامناسب پارامترهای نفوذ و یا عدم دقت اندازه‌گیری جریان ورودی و خروجی هیدروگراف‌ها به کار رفته ارتباط دارد.

تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولیکی

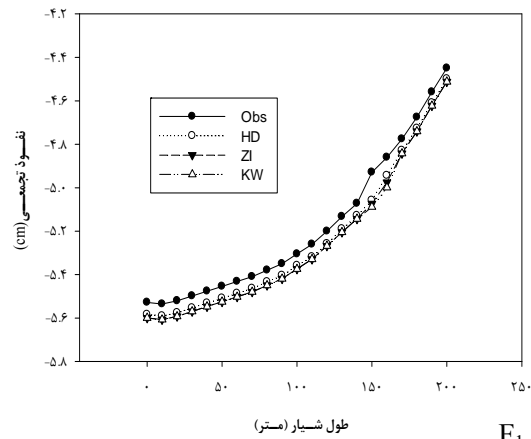
حساسیت مدل‌ها به اِزاء تغییرات ± 50 و ± 25 درصد پارامترهای ورودی و تأثیر آن بر روی شاخص‌های خروجی شامل راندمان کاربرد، راندمان نیاز آبی، یکنواختی توزیع و نسبت رواناب بررسی شد. با توجه به نتایج بخش‌های قبلی، شیار F₁ به دلیل دقت مناسب داده‌ها و مدل هیدرودینامیک کامل به دلیل پیش‌بینی دقیق‌تر، به‌منظور تحلیل و آنالیز حساسیت مدل رایانه‌ای انتخاب شدند. پارامترهای ورودی شیار

و نتایج در شکل (۳) نشان داده شد.

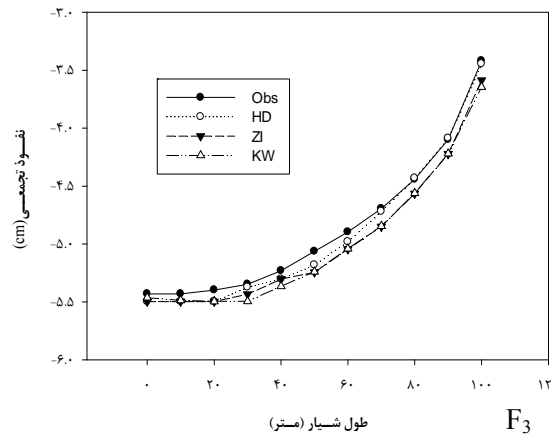
شامل دبی، زمان قطع جریان، شیب، ضریب زبری مایننگ و پارامترهای نفوذ خاک شامل $(f_0$ و $k, a)$ انتخاب و تغییرات لازم انجام



F₂



F₁



F₃

شکل ۲- منحنی نفوذ تجمعی مشاهده شده و برآورد شده

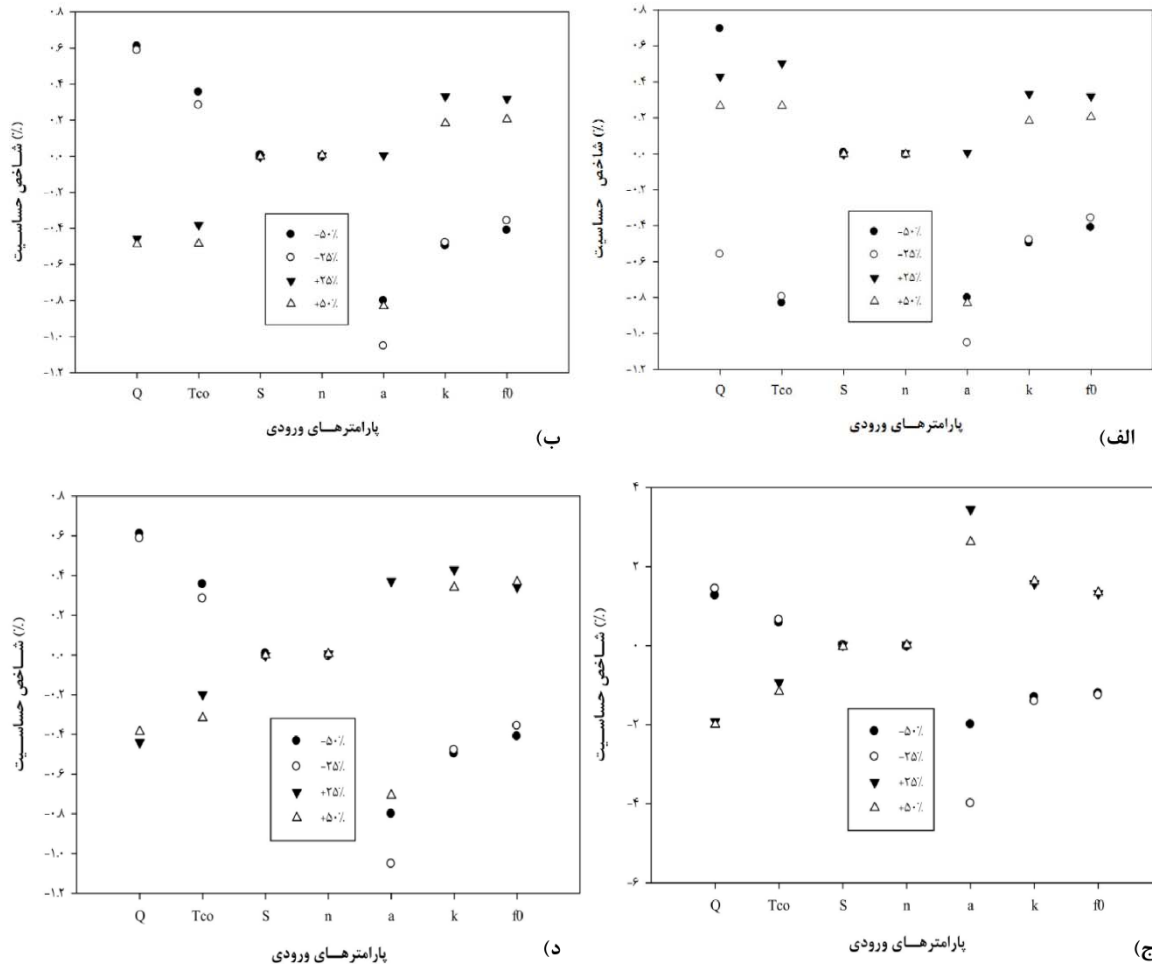
جدول ۷- شاخص‌های ارزیابی نفوذ تجمعی در مدل‌های مختلف

مزرعه	مدل	λ	Er(%)	R ²	RMSE(cm)	EF
F ₁	HD	۱/۰۱۸۳	۱/۸۳	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۰۶	۰/۹۸۸۹
	ZI	۱/۰۱۱۸	۱/۱۸	۰/۹۸۸۲	۰/۰۰۰۷	۰/۹۵۰۵
	KW	۱/۰۱۴۷	۱/۴۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۰۷	۰/۹۵۰۵
F ₂	HD	۰/۹۷۵۲	۲/۴۸	۰/۹۸۸۱	۰/۰۰۰۸	۰/۸۸۲۲
	ZI	۰/۹۷۴۴	۲/۵۶	۰/۹۸۷۷	۰/۰۰۰۹	۰/۷۶۷۹
	KW	۰/۹۷۱۴	۲/۸۶	۰/۹۸۷۵	۰/۰۰۰۹	۰/۷۲۸۱
F ₃	HD	۱/۰۱۹۹	۱/۹۹	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۰۵	۰/۸۶۷۲
	ZI	۱/۰۲۵۵	۲/۵۵	۰/۹۹۶۰	۰/۰۰۱۴	۰/۷۷۱۳
	KW	۱/۰۲۷۹	۲/۷۹	۰/۹۹۴۷	۰/۰۰۱۴	۰/۷۴۷۸

جدول ۸- مقایسه مدل‌های دربرآورد حجم رواناب و آب نفوذ یافته (مترمکعب)

مزرعه	مقدار اندازه گیری شده		هیدرودینامیک		اینرسی صفر		موج سینماتیک	
	حجم ورودی	حجم رواناب	حجم نفوذ یافته	حجم رواناب	حجم نفوذ یافته	حجم رواناب	حجم نفوذ یافته	حجم نفوذ یافته
F ₁	۱۳/۷	*-	-	۴/۱	۹/۶	۴/۲	۹/۵	۴/۲
F ₂	۵/۸۹	۱/۶۵	۴/۲۴	۱/۹	۴	۲/۱	۳/۸	۲/۱
F ₃	۵/۲۶	۰/۶۷	۴/۵۹	۰/۵	۴/۷	۰/۵	۴/۷	۰/۵

* اندازه گیری نشده



شکل ۳- شاخص حساسیت پارامتر ورودی برای الف) راندمان کاربرد ب) راندمان نیاز آبی ج) یکنواختی توزیع د) نسبت رواناب پایاب

جدول ۹- حساسیت مدل به پارامترهای ورودی

اهمیت پارامترهای ورودی مدل	راندمان
دبی- زمان قطع جریان- a - f ₀ - k - ضریب مانینگ- شیب	راندمان کاربرد
دبی- زمان قطع جریان- a - f ₀ - k - ضریب مانینگ- شیب	راندمان نیاز آبی
a - f ₀ - k - دبی- زمان قطع جریان- شیب- ضریب مانینگ	ضریب یکنواختی توزیع
a - k - دبی- f ₀ - زمان قطع جریان- شیب- ضریب مانینگ	نسبت رواناب پایاب

که تمامی مدل‌ها بیلان حجم آب در شیار را با دقت پایینی پیش‌بینی می‌کنند. تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داد که مقادیر دبی ورودی، زمان قطع جریان و ضرایب معادله نفوذ بیش‌ترین تأثیرگذاری را بر شاخص‌های مدل‌ها دارند. بنابراین برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان و افزایش دقت مدل‌ها، لازم است پارامترهای ورودی فوق با دقت بالاتری اندازه‌گیری شوند.

منابع

بهبهانی، م. و بابازاده، ح. ۱۳۸۴. ارزیابی مدل آبیاری سطحی SIRMOD (مطالعه موردی در آبیاری شیاری). علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۲): ۱-۱۰.

بهرامی، م.، برومندنسب، س. و ناصری، ع. ۱۳۸۸. مقایسه مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام - کونژ با مدل‌های هیدرولوژیکی آبیاری در برآورد مرحله پیشروی آبیاری جویچه ای. آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۲): ۴۰-۴۹.

عباسی، ف.، جلینی، م.، معیری، م. و طائفه‌رضایی، ح. ۱۳۷۸. تهیه یک مدل ریاضی برای طراحی و ارزیابی روش‌های آبیاری سطحی. گزارش پژوهشی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

محمودیان شوشتری، م. ۱۳۷۹. هیدرولیک آبیاری سطحی، جزوه درسی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

ملک‌پور، ا. ۱۳۷۴. مدل ریاضی حرکت آب در فارو. گزارش پژوهشی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

Abbasi, F., Shoostari, M.M., Feyen, J. 2003. Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(3), 208-213.

Bautista, E., Wallender, W.W. 1992. Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space steps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(3), 450-465.

Bautista, E., Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J. 2002. Sensitivity of surface irrigation to infiltration parameters: implications for management. In: Burt, C.M., Anderson, S.S. (Eds.), *Energy, Climate, Environment and Water-Issues and Opportunities for Irrigation and Drainage*. Proc. USCID/EWRI Conf.,

مطابق جدول (۹)، جریان ورودی به شیار، دارای بیش‌ترین تأثیر بر راندمان‌های کاربرد (E_a) و نیاز آبی (E_r) گذاشته است به‌طوری‌که در صورت بروز ۵۰ درصد خطا در اندازه‌گیری دبی ورودی، بطور متوسط حدود ۳۰ درصد خطا در محاسبه راندمان‌ها به وجود خواهد آمد. زیرا تغییر در دبی ورودی تا زمانی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شوند، بر روی رواناب و حجم آب نفوذ یافته تأثیر مستقیم خواهد داشت. زمان قطع جریان و پارامترهای معادله نفوذ (k , f_0 و a)، در رتبه‌های بعدی تأثیر گذار در محاسبه راندمان‌ها به‌شمار می‌آیند. به نظر می‌رسد که این نتایج به دلیل تأثیر پارامتر زمان قطع جریان به رواناب پایاب، ضرایب معادله نفوذ و حجم آب نفوذ یافته در طول شیار باشد. در مورد ضریب یکنواختی توزیع (DU) و نسبت رواناب پایاب (TWR) بیش‌ترین حساسیت مربوط به پارامتر معادلات نفوذ می‌باشد. چون این پارامتر بیش‌ترین تأثیر را بر حجم آب نفوذ یافته و در نتیجه رواناب شیار خواهند داشت. بنابراین لازم است دقت بیش‌تری در اندازه‌گیری این پارامترها صورت گیرد. یافته‌ها نشان می‌دهد که تأثیر پارامترهایی نظیر شیب جریان و ضریب زبری مانینگ بر شاخص‌های خروجی کم می‌باشد، به طوری که مقادیر شاخص حساسیت آن‌ها در هر دو حالت (افزایشی و کاهش) مشابه هم است. در مقابل پارامترهایی مانند دبی جریان، زمان قطع جریان و ضرایب معادله نفوذ که تأثیر فراوانی بر خروجی مدل دارند، باعث ایجاد اختلاف زیاد در مقادیر شاخص حساسیت در حالت افزایشی و کاهش شده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه سه مدل هیدرولوژیکی موجود در آبیاری شیاری شامل مدل‌های هیدرودینامیک کامل (HD)، اینرسی صفر (ZI) و موج سینماتیک (KW) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین منظور از بسته نرم‌افزاری SIRMOD و سه سری داده‌های مزرعه‌ای استفاده شد، این مزارع دارای بافت خاک F_1 (متوسط)، F_2 (سنگین) و F_3 (سبک) می‌باشند. نتایج نشان داد که هر سه مدل هیدرولوژیکی زمان پیشروی را با دقت پایین‌تری نسبت به زمان پیشروی شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین یافته‌ها نشان داد که پیش‌بینی جریان توسط مدل‌های هیدرولوژیکی در بافت‌های مختلف خاک، متفاوت می‌باشد، به طوری که مقادیر پیش‌بینی شده در شیارهای با بافت متوسط و سنگین در مرحله پیشروی کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری می‌باشد. در مرحله پیشروی در تمامی شیارها (بافت‌ها)، مقادیر پیش‌بینی شده بیش‌تر از مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. تحقیقات نشان داد که تمامی مدل‌ها توانائی خوبی در پیش‌بینی مقدار نفوذ در طول شیار با بافت خاک متوسط را دارا می‌باشند ولی در شیارهای با بافت‌های سنگین و سبک از دقت پیش‌بینی کاسته می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن است

- McClymont,D.J., Raine,S.R., Smith,R.J. 1996. The prediction of furrow irrigation performance using the surface irrigation model SIRMOD. In 13th National Conference. Irrigation Association of Australia. Adelaide.
- Ng,N., Loomis,R.S. 1984. Simulation of growth and yield of the potato crop.
- Strelkoff,T., Katopodes,N.D. 1977. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 103(3), 325-342.
- Walker,W.R. 1998. SIRMOD-Surface irrigation modeling software. Utah State University, Logan.
- Walker,W.R. 2003. SIRMOD III Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design. Guide and Technical Documentation. Dept of Biological and Irrigation Engineering, Utah St Univ, Logan, UT, USA.
- Walker,W.R., Gichuki,F. 1985. Documentation of surface irrigation models. Unpublished Report. Utah State University, Logan.
- Walker,W.R., Skogerboe,G.V. 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall.
- San Luis Obispo, CA, July 10-13, pp. 475-485.
- Clemmens,A.J. 2009. Errors in surface irrigation evaluation from incorrect model assumptions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(5), 556-565.
- Ebrahimian, H., & Liaghat, A. (2011). Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. Soil Water Res, 6(2), 91-101.
- Esfandiari,M., Maheshwari,B.L. 2001. SW-Soil and Water. Journal of Agricultural Engineering Research, 79(4), 459-479 .
- Koech,R.K., Gillies,M.H., Smith,R. 2010. Simulation modelling in surface irrigation systems. In Proceedings of the 2010 Southern Region Engineering Conference (SREC 2010) (pp. 1-8). Engineers Australia.
- Maheshwari,B.L., McMahon,T.A. 1993. Performance evaluation of border irrigation models for south-east Australia: Part 2, Overall suitability for field applications. Journal of Agricultural Engineering Research, 54(2), 127-139.

Field Evaluation and Sensitivity Analysis of the SIRMOD Model in Furrow Irrigation

M.A. Gholami Sefidkouhi^{1*}, A. Koulaian²

Received: Jan. 4, 2014 Accepted: Aug. 27, 2014

Abstract

Nowadays, Surface irrigation mathematical models are important for the evaluation and design purposes. In this study, mathematical models in the SIRMOD package including the Hydrodynamic (HD), Zero Inertia (ZI), and Kinematic wave (KW) models were evaluated and sensitized analysis. Three data series including light, medium, and heavy soil texture were used in this assessment. The results indicated that the performance of all models was satisfactory for the prediction of the advance times, but they predicted the advance times better than the recession times. The HD model predicted the advance and recession times better than the other models. The results showed that the accuracy of these models for the prediction of infiltrated and runoff volumes related to soil texture. Sensitivity analysis of the these models showed that the sensitivity of four irrigation parameters (E_a , E_r , DU, and TWR) to five variables (q_0 , t_{co} , k, a, and f_0) higher than the other variables.

Key words: Surface irrigation, Sensitivity Analysis, Hydraulic models

1 - Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

2 - M.S. Graduated from of Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

(*-Corresponding Author Email: ma.gholami@sanru.ac.ir)