

## بررسی کارایی و تحلیل حساسیت شبیه‌های مختلف نرم افزار SIRMOD در طراحی آبیاری

### جوینچه‌ای

مصطفی مرادزاده\*<sup>۱</sup>، سعید برومندنسب<sup>۲</sup>، رضا لاله زاری<sup>۱</sup>، مهدی بهرامی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۱۲

### چکیده

درصد زیادی از زمین‌های کشاورزی در ایران به‌صورت جوینچه‌ای آبیاری می‌شوند که تحقیق درباره‌ی کاربرد روش مزبور نیاز به توجه بیش‌تری دارد. از طرفی، کسب اطلاعات لازم برای پیش‌بینی و محاسبه‌ی منحنی‌های پیشروی و پسروی آب در جوینچه‌ها، مستلزم اندازه‌گیری‌های دقیق در داخل مزرعه می‌باشد، که این کار باعث صرف هزینه و وقت زیادی می‌گردد. مهم‌ترین هدف این پژوهش ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبیه‌های آب‌پویایی، لختی صفر، و موج تحرکی با کاربرد اطلاعات مزرعه‌ای با نرم افزار SIRMOD می‌باشد. هم‌چنین، این نرم افزار به‌وسیله‌ی سه فراسنج ورودی شامل بده، ضریب زبری مانینگ و شیب زمین نیز مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرد. آزمایش‌های صحرایی در مزرعه‌ی پژوهش‌های دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. داده‌ها از سه جوینچه با بافت متوسط رسی به طول‌های ۶۰، ۸۰ و ۹۰ متر، در سه تکرار و تحت سه بده‌ی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه برداشت شدند. برای خطایابی از چهار شاخص آماری توزیع نسبت به خط ۴۵ درجه ( $a$ )، متوسط خطای پیش‌بینی شبیه ( $E_T$ )، ضریب وایازی ( $R^2$ )، و متوسط خطای نسبی شبیه ( $E_a$ ) استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان دادند که نرم افزار SIRMOD به تغییرات فراسنج‌های ورودی مذکور حساس است. هم‌چنین، مقادیر پیش‌بینی شده در مرحله‌ی پیشروی برای همه تیمارها و تمامی شبیه‌ها بیش‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. بطور کلی، مقادیر  $a$  و  $R^2$  بیانگر مناسب بودن شبیه‌های آب‌پویایی، و لختی صفر برای پیش‌بینی فرایند پیشروی جریان در مقایسه با شبیه موج تحرکی بودند. با مقایسه‌ی شاخص‌های آماری مشاهده می‌شود که شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی در این‌جا نیز مانند مرحله‌ی پیشروی، مرحله‌ی پسروی را نسبت به شبیه موج تحرکی بهتر شبیه‌سازی می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری جوینچه‌ای، مرحله‌ی پیشروی، مرحله‌ی پسروی، تحلیل حساسیت، SIRMOD

<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۲</sup> - استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> - دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

\* - نویسنده مسؤل: moradzadeh.mostafa@gmail.com

## مقدمه

در بررسی و طراحی آبیاری جویچه ای و نواری، پیش بینی پیشروی جریان آب در جویچه و نوار اهمیت زیادی دارد. منحنی پیشروی و زمان رسیدن آب به انتهای جویچه یکی از معیارهای مدیریت سامانه‌های آبیاری، و بخصوص تعیین زمان قطع جریان است. منحنی پیشروی آب معمولاً با یک معادله‌ی نمایی، به شکل زیر توصیف می‌شود:

$$(Ta)x = P'x^{r'} \quad (1)$$

که در آن  $x$  فاصله‌ی پیشروی از ابتدای جویچه،  $(Ta)x$  زمان لازم برای پیشروی آب از ابتدای جویچه به نقطه‌ای که به فاصله‌ی  $x$  از آن قرار دارد، و  $P'$  و  $r'$  ضرایب ثابت برازش منحنی می‌باشند. انجام آزمایشهای لازم برای تعیین منحنیهای پیشروی و پسروی آب در جویچه مستلزم اندازه‌گیریهای مزرعه‌ای می‌باشد که باعث صرف وقت و هزینه زیادی می‌گردد. بدین منظور، می‌توان از برخی شبیه‌های ریاضی برای ارائه‌ی فرآیندهای آبیاری سطحی استفاده کرد. بیشتر شبیه‌های آبیاری سطحی بر پایه‌ی دو معادله‌ی پیوستگی و اندازه‌ی حرکت جریان استوار می‌باشند، که به معادلات سنت-ونانت مشهورند. این معادلات پس از تعدیل، به منظور شمول نفوذ آب، به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$\frac{A \partial v}{\partial x} + \frac{Bv \partial y}{\partial x} + \frac{B \partial y}{\partial t} + I = 0 \quad (2)$$

معادله اندازه‌ی حرکت (مومنوم):

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + \frac{vI}{2gA} \quad (3)$$

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

شبیه‌های ریاضی زیادی در آبیاری سطحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مبتنی بر حل معادلات دیفرانسیل جزئی اندازه‌ی حرکت و پیوستگی بوده، و

توانایی تحلیل جریانهای غیرماندگار را دارند. معادلات حاکم، غیرخطی و پیچیده بوده و در حل آنها از روش تفاضلهای محدود و اجزاء محدود استفاده شده، و با وجود مشکل بودن روش حل، دارای جوابهای دقیق و قابل اعتماد می‌باشند. از جمله این شبیه‌ها می‌توان شبیه‌های آب‌پویایی، لختی صفر و موج تحرکی را نام برد.

شبیه آب‌پویایی بر مبنای حل صورت کامل معادلات سنت و نانت پایه گذاری شده است. نمونه‌هایی از این شبیه‌ها در پژوهشهای کروگر و باست (۱۹۶۵)، کینکاید (۱۹۷۰)، باست (۱۹۷۲)، واکر و گیچوکی (۱۹۸۵)، باتیستا و والندر (۱۹۹۲)، استرلکف (۱۹۷۲) و عباسی (۱۳۷۳) دیده می‌شوند. با این حال، شبیه آب‌پویایی بسیار پیچیده بوده و استفاده از آن در شرایط معمولی چندان ساده نیست. برای این منظور در مورد آن ساده سازی‌هایی انجام گرفته است. برای مثال چون سرعت حرکت آب در آبیاری سطحی کوچک است، از اجزای لختی در معادله‌ی ۳ به صورت ساده زیر صرف نظر می‌شود.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (4)$$

شبیه‌هایی که بر اساس این فرض استوار بوده و در آنها از معادلات ۲ و ۴ استفاده می‌شود، به نام شبیه‌های لختی صفر مشهورند. نمونه‌هایی از این شبیه‌ها در پژوهشهای عباسی و محمودیان شوشتری (۱۳۷۵)، الیوت و همکاران (۱۹۸۲)، شونکل و والندر (۱۹۸۸) و عباسی و همکاران (۲۰۰۳) دیده می‌شوند.

شیب عمق جریان  $\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)$  و جمله‌های لختی در

معادله‌ی اندازه حرکت، اغلب در مقایسه با  $S_o$  و  $S_f$  کوچک می‌باشند، بنابراین می‌توان در معادله‌ی ۳ از جمله‌های لختی و شیب عمق جریان صرف نظر کرد. در این صورت خواهیم داشت:

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

شبیه‌هایی که بر پایه‌ی معادلات ۲ و ۵ استوارند شبیه موج تحرکی گویند. در این معادله عمق جریان در طول جویچه یا نوار یکنواخت فرض شده است. این شبیه در آبیاری سطحی در پژوهشهای مختلفی به کار برده شده است که از جمله این پژوهشهای می‌توان به پژوهشهای

SIRMOD و مقایسه‌ی نتایج این شبیه‌ها با مشاهدات مزرعه‌ای.

### مواد و روشها

به منظور ارزیابی شبیه‌های موجود در نرم افزار SIRMOD، آزمایش‌های صحرایی در مزرعه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز با خاکی با بافت لوم رسی انجام پذیرفت. داده‌ها از سه جویچه به طول های ۶۰، ۸۰ و ۹۰ متر و عرض بالایی ۵۰ سانتی متر، با شیب ۰/۰۰۱، در سه تکرار و با سه بدهی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه برداشت شدند. ضریب زبری در هر جویچه با استفاده از معادله‌ی مانینگ به دست آمد که مقادیر آن از ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ متغیر بود. بده‌ها با استفاده از نهر پایه‌دار W.S.C نوع ۲ اندازه‌گیری شدند. البته در این پژوهش از میانگین سه تکرار هر تیمار برای محاسبات استفاده گردید؛ بنابراین، از این داده‌ها تحت عنوان داده‌های معیار برای آزمایش شبیه‌ها استفاده، و نتایج به دست آمده با اطلاعات مزرعه‌ای مقایسه گردیدند. نحوه‌ی انتخاب و جمع‌آوری اطلاعات، با توجه به فراسنجهای مورد نیاز شبیه‌ها انجام گرفت، و ضرایب معادله‌ی نفوذ کاستیاکوف لویس در هر نوبت آبیاری در همه تیمارها و تکرارها نیز با کاربرد روش دونقطه‌ای (دو نقطه وسط و انتهای جویچه‌ها) به دست آمدند. این پژوهش در جویچه‌های از قبل آبیاری شده انجام گردید. پس از اتمام اندازه‌گیری مزرعه-ای و استخراج خروجی هر شبیه، مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده با هم مقایسه گردیدند.

### نرم افزار SIRMOD

این نرم افزار در سال ۱۹۸۹ به وسیله‌ی واکر در دانشگاه ایالتی یوتا، کشور آمریکا، ارائه شد که کاربری آسانی داشته و در برگیرنده شبیه‌های آب‌پویایی، لختی صفر، و موج تحرکی است. نرم افزار فوق در تمامی روشهای آبیاری سطحی (جویچه‌ای، نواری و کرتی) قابل استفاده بوده و قادر به فراهم آوردن سهولت مدیریت در جریانهای موجی و کاهش بده می‌باشد. در این نرم افزار، برای توصیف خصوصیات نفوذ از معادله‌ی کاستیاکوف-لویس استفاده شده است.

استرلکوف (۱۹۷۲)، واکر و هامفریس (۱۹۸۳)، ریج و والندر (۱۹۸۵)، شایا و همکاران (۱۹۹۳)، استرلکوف (۱۹۹۴)، و مصطفی زاده و همکاران (۱۳۷۵) اشاره کرد.

آبیاری سطحی، هنوز هم بیشترین کاربرد را در میان روشهای آبیاری دارد. مریام (۱۹۷۷) و کی (۱۹۹۰) بیان داشتند که بازده پایین در آبیاری سطحی مربوط به نوع روش نیست، بلکه مربوط به ضعف در طراحی، اجرا و مدیریت می‌باشد. با توجه به نیاز به کارمایه و سرمایه گذاری بیشتر در سامانه‌های تحت فشار و کمبود نقدینگی در کشور، و نیز مسأله‌ی مهم صرفه جویی در مصرف کارمایه، توجه به آبیاری سطحی می‌تواند کمک شایانی به اقتصاد کشور نماید. در آبیاری مزارع با کاربرد روش سطحی، حتی با انجام هزینه‌های گزاف و تسطیح اراضی، بازدهی آبیاری از ۵۰ درصد تجاوز نمی‌کند، و در وضعیت سنتی، که اکثر اراضی کشور ما به همین ترتیب آبیاری می‌شوند، این میزان حتی کمتر از ۳۵ درصد می‌باشد. این موضوع با توجه به کمبود منابع آبی کشور، و نیز آلودگی ایجاد شده به وسیله‌ی پسابهای کشاورزی و زهابهای نفوذ یافته به منابع آب دارای اهمیت فراوانی است. همچنین، مشکلاتی چون بالا آمدن سطح ایستابی، شوری خاک و باتلاقی شدن زمینهای کشاورزی، باز هم اهمیت توجه به مدیریت آبیاری سطحی و بهبود آن را نشان می‌دهد. به منظور رفع این مشکلات می‌توان از شبیه‌های رایانه‌ای نهایت استفاده را کرده و سعی در بهبود وضعیت موجود نمود. اما قابل اطمینان بودن شبیه‌ها با ارزیابی مزرعه‌ای آنها مشخص می‌شود. مهمترین هدف این تحقیق ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبیه‌های موجود در نرم افزار SIRMOD (واکر، نسخه ۲۰۰۵) با کاربرد اطلاعات مزرعه-ای می‌باشد. در این تحقیق داده‌های صحرایی از مزرعه‌ی پژوهشهای دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، و تحت آبیاری جویچه‌ای برداشت شدند.

اهداف این تحقیق بطور خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- تحلیل حساسیت نرم افزار SIRMOD به برخی فراسنجهای ورودی
- ۲- شبیه‌سازی پیشروی و پسروی جریان با شبیه‌های آب‌پویایی، لختی صفر، و شبیه موج تحرکی در نرم افزار

$$S = \frac{100 \sum_{i=1}^n (X_{ni} - X_{ci})}{N \Delta} \quad (۶)$$

که در آن،  $N$  تعداد نقاط یک فراسنج خروجی،  $X_{ni}$  مقدار جدید فراسنج خروجی برای نقطه  $i$ ام با یک مقدار تغییر داده شده فراسنج ورودی،  $X_{ci}$  مقدار فراسنج خروجی برای نقطه  $i$ ام در اجرای شبیه تنظیم شده‌ی مورد نظر، و  $\Delta$  مقدار مطلق تغییر در فراسنج ورودی بر حسب درصد مقدار آن در شبیه سازی می باشد. به این منظور، مقدار هر فراسنج ورودی با ثابت نگه داشتن سایر فراسنج‌ها، به میزان  $\pm 50\%$  درصد تغییر داده شد و میزان حساسیت فراسنج خروجی، که در واقع اندازه گیری میزان برگشت پذیری<sup>۱</sup> آن فراسنج است، تعیین گردید.

### نتایج و بحث

شکل‌های ۱ تا ۶ نتایج مربوط به تحلیل حساسیت شبیه‌های مختلف آبیاری سطحی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها، با تغییرات جداگانه‌ی فراسنجهای ورودی یعنی بده، ضریب زبری مانینگ و شیب، محور مثبت نشان دهنده‌ی افزایش شاخص حساسیت زمان پیشروی و پسروی، و محور منفی نشان دهنده‌ی کاهش آن می‌باشد. در این شکل‌ها نتایج تحلیل حساسیت هر سه شبیه آب‌پویایی، لختی صفر، و موج تحرکی برای سه مقدار بده‌ی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده اند.

نتایج تحلیل حساسیت نرم افزار SIRMOD نشان می‌دهند که کاهش و افزایش بده به ترتیب موجب افزایش و کاهش زمان پیشروی می‌شود (شکل ۱). برای پیش‌بینی زمان پیشروی، نرم افزار به کاهش بده بیش از افزایش آن حساس است. البته این حساسیت برای شبیه موج تحرکی نسبت به دو شبیه دیگر کمتر می‌باشد. با توجه به شکل ۲، برای بده‌های ۱ و ۱/۲۵ لیتر بر ثانیه، کاهش بده موجب افزایش زمان پسروی شده، و افزایش بده بر زمان پسروی تاثیر نگذاشته است، ولی برای بده‌ی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، کاهش و افزایش بده، دقیقاً به یک میزان به ترتیب موجب افزایش و کاهش زمان پسروی می‌شود. با توجه به نتایج،

### تحلیل حساسیت ورودیها و خروجی‌های شبیه

ورودیهای اصلی نرم افزار SIRMOD شامل شدت جریان ورودی، مشخصات هندسی سطح مقطع شیار، طول و شیب شیار، فراسنجهای نفوذپذیری و ضریب زبری مانینگ،  $n$ ، می‌باشند. خروجیهای نرم افزار نیز شامل زمانهای پیشروی و پسروی، رواناب از انتهای شیار و عمق آب نفوذ یافته در امتداد طولی شیار به شمار می‌روند.

### شبیه سازی جریان در شیارها با شاخص رایانه‌ای SIRMOD

مطالبی که در بخشهای فوق ارائه شدند به روشنی ضرورت انجام تحلیلهای جامع حساسیت را در روشهای آبیاری سطحی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بسیار رضایت بخش حاصل از شبیه سازی با شاخص رایانه‌ای SIRMOD برای شرایط کاربردی (اسفندیاری، ۱۹۹۷)، از این نرم افزار برای شبیه سازی فرایند آبیاری جویچه‌ای استفاده شده است. در این پژوهش برای تحلیل حساسیت فقط از اطلاعات مربوط به جویچه‌ی ۶۰ متری، و با هر سه بده‌ی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه، استفاده شد، به این ترتیب که با تغییر سه فراسنج ضریب زبری مانینگ، شیب و بده بطور جداگانه، تغییرات در کل زمان پیشروی و پسروی برای هر سه شبیه آب‌پویایی، لختی صفر، و موج تحرکی دوباره محاسبه شده، و درجه‌ی حساسیت این شبیه‌ها به تغییر سه فراسنج ورودی مورد نظر، ارزیابی گردید.

### شاخص حساسیت

حساسیت یک شبیه به یک فراسنج ورودی معین به صورت شدت تغییر در فراسنج خروجی شبیه نسبت به تغییر در مقدار فراسنج مذکور، در حالی که مقدار سایر فراسنجهای ورودی ثابت می‌باشند تحلیل حساسیت تعریف می‌شود (مک کوپین، ۱۹۷۳).

لویس در سال ۱۹۸۴ (به نقل از ماهشواری و همکاران، ۱۹۹۰)، شاخص حساسیت  $S$ ، را معرفی کرد که در سال ۱۹۹۰ به‌وسیله ماهشواری و همکاران، برای آبیاری نواری مورد استفاده قرار گرفته بودند:

<sup>۱</sup>-elasticity

یک بوده و این شاخص نشان دهنده‌ی روند کلی مقدار خطا می‌باشد. همچنین، شاخص ضریب تبیین،  $(R^2)$ ، تعیین کننده‌ی تناسب برازش داده‌ها با معادله‌ی فوق می‌باشد. این شاخص مشخص کننده‌ی مناسب بودن برازش معادله‌ی وایازی  $X_p = aX_{obs}$ ، بین داده‌های شبیه سازی شده و مقادیر مشاهده شده می‌باشد. بهینه ترین مقدار  $R^2$  برابر با یک است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (Xi_p - \overline{Xi_p})(Xi_{obs} - \overline{Xi_{obs}}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (Xi_p - \overline{Xi_p})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Xi_{obs} - \overline{Xi_{obs}})^2} \quad (8)$$

که در رابطه‌ی فوق  $\overline{Xi_p}$  و  $\overline{Xi_{obs}}$  به ترتیب مقادیر متوسط داده‌های شبیه سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشند. همچنین، مقدار درصد خطای پیش بینی شده شبیه‌های انتخاب گردیده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_r = |(1-a)| \times 100 \quad (9)$$

بطور کلی، شاخص  $E_r$  نشان دهنده‌ی روند کلی مقدار خطا می‌باشد.

به منظور ارزیابی کلی قابلیت کاربرد شبیه‌های انتخاب شده برای شرایط مزرعه‌ای از معیار درصد متوسط خطای نسبی شبیه،  $E_a$ ، نیز استفاده شد تا دیدگاهی کلی از عملکرد شبیه‌ها به دست آید. این فراسنج به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Xi_{obs} - Xi_p|}{Xi_{obs}} \quad (10)$$

در این معادله مقدار  $N$  برابر است با تعداد نقاط مشاهده شده و پیش بینی شده که با هم مقایسه می‌شوند، بقیه متغیرها از قبل تعریف شده‌اند. در نهایت، متوسط خطا در ۹ گروه داده محاسبه شد که نتایج در جداول ۱ و ۲ آمده‌اند.

مقادیر پیش بینی شده در مرحله‌ی پیشروی برای تمامی شبیه‌ها بیشتر از مقادیر مشاهده شده است، ولی بطور کلی، مقادیر  $a$  و  $R^2$  بیانگر مناسب بودن شبیه‌های

بطور کلی زمان پیشروی نسبت به زمان پسروی بیشتر تحت تاثیر تغییرات بده قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل ۳، افزایش ضریب زبری مانینگ موجب افزایش زمان پیشروی، و کاهش آن موجب کاهش زمان پیشروی شد، که در این‌جا، شبیه موج تحرکی حساسیت بیشتری را نسبت به دو شبیه دیگر نشان داد. شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی در این‌جا تقریباً مانند هم عمل کردند.

با در نظر گرفتن شکل ۴ مشخص می‌شود که برای زمان پسروی نیز افزایش ضریب زبری مانینگ موجب افزایش زمان پسروی، و کاهش آن موجب کاهش زمان پسروی شد، ولی در این‌جا شبیه موج تحرکی بر عکس حالت پیشروی نسبت به دو شبیه دیگر حساسیت کمتری را از خود نشان می‌دهد؛ حساسیت دو شبیه لختی صفر و آب‌پویایی به تغییرات ضریب زبری مانینگ یکسان بود.

همچنین، با توجه به نتایج تحلیل حساسیت نرم افزار به تغییرات شیب زمین، مشخص می‌شود که افزایش شیب موجب کاهش زمان پیشروی، و کاهش شیب موجب افزایش آن می‌شود (شکل ۵). شبیه موج تحرکی به این افزایش و کاهش نسبت به دو شبیه دیگر حساستر است. همچنین، رفتار دو شبیه لختی صفر و آب‌پویایی تقریباً یکسان است؛ بطور کلی، حساسیت همه‌ی شبیه‌ها به کاهش شیب بیش از افزایش آن می‌باشد. با توجه به شکل ۶، برای زمان پسروی نیز افزایش شیب موجب کاهش زمان پسروی، و کاهش شیب موجب افزایش آن می‌شود؛ حساسیت همه شبیه‌ها به کاهش شیب بیش از افزایش آن است.

در این تحقیق، برای مقایسه‌ی مقادیر مشاهده شده‌ی  $Xi_{obs}$ ، و مقادیر پیش بینی شده به وسیله‌ی شبیه‌ها  $Xi_p$ ، از برازش داده‌ها به معادله وایازی زیر استفاده شده است:

$$Xi_p = aXi_{obs} \rightarrow a = \frac{Xi_p}{Xi_{obs}} \quad (7)$$

که در آن  $a$  شیب بهترین خط برازش بر داده‌ها می‌باشد. مقادیر  $a < 1$  نشان دهنده‌ی پیش بینی کمتر از مقدار واقعی و مقادیر  $a > 1$  نشان دهنده‌ی پیش بینی بیشتر از مقدار واقعی است. بهینه‌ترین مقدار  $a$  برابر با

موجب کاهش زمان پیشروی، و کاهش شیب موجب افزایش آن می‌شود؛ برای زمان پسروی نیز افزایش شیب موجب کاهش زمان پسروی، و کاهش شیب موجب افزایش آن می‌شود، و حساسیت همه شبیه‌ها به کاهش شیب بیش از افزایش آن است. تغییرات شیب در مورد پسروی بیش از پیشروی تأثیر دارد. کم کردن شیب نسبت به افزایش شیب تأثیر خیلی بیشتری روی تخمین زمان پسروی می‌گذارد.

همچنین، مقادیر پیش بینی شده در مرحله‌ی پیشروی برای تمامی شبیه‌ها بیشتر از مقادیر مشاهده شده‌اند، ولی با توجه به شاخصهای آماری، شبیه‌های آب‌پویایی و لختی صفر برای پیش بینی فرایند پیشروی جریان در مقایسه با شبیه موج تحرکی بهتر می‌باشند.

شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی مرحله پسروی را نیز نسبت به شبیه موج تحرکی بهتر شبیه سازی می‌کنند. بطور کلی، با توجه به شاخصهای آماری، تفاوت زیادی بین شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی در برآورد مراحل پیشروی و پسروی وجود ندارد.

### تشکر و قدردانی

نویسنده‌ی مسؤول مقاله حاضر، مصطفی مرادزاده، با اجازه سایر نویسندگان، این پژوهش را به روان پاک مادر خود، خانم رجبی فومنی، تقدیم می‌کند. او به خاطر تمام فداکاریهایش، چه به عنوان مادری مهربان و چه آموزگاری دلسوز و وظیفه شناس، که سی سال به تربیت و آموزش علم و اخلاق به فرزندان این مرز و بوم همت گماشت، هرگز فراموش نخواهد شد.

آب‌پویایی و لختی صفر برای پیش بینی فرایند پیشروی جریان در مقایسه با شبیه موج تحرکی می‌باشد. با مقایسه‌ی درصد متوسط خطای نسبی شبیه،  $E_a$  و درصد خطای پیش بینی شده،  $E_r$  و با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی در این‌جا نیز مانند مرحله پیشروی، مرحله پسروی را نسبت به شبیه موج تحرکی بهتر شبیه سازی می‌کنند. با توجه به جداول ۱ و ۲، شاخصهای آماری نشان می‌دهند که تفاوت زیادی بین شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی در برآورد مراحل پیشروی و پسروی وجود ندارد.

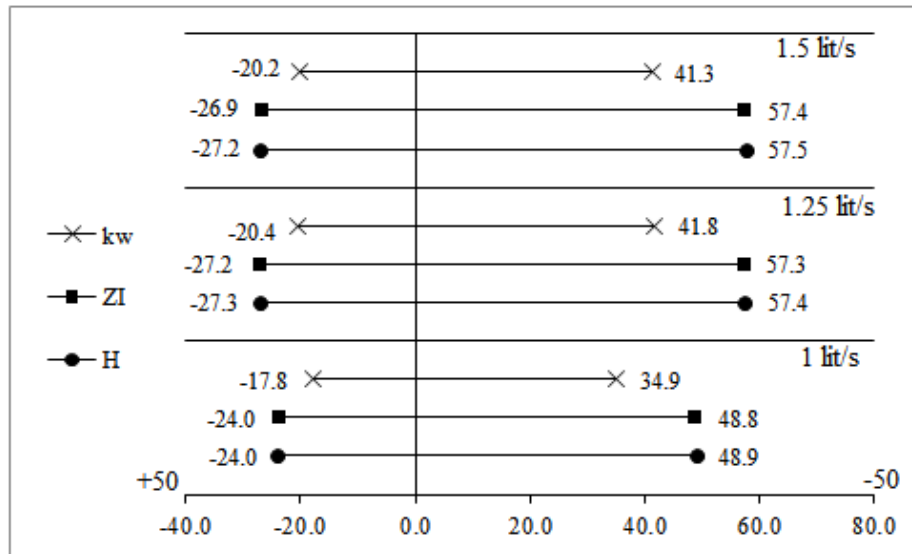
در مرحله‌ی پیشروی، کمترین میزان خطای نسبی مربوط به شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی بود. این شبیه‌ها بهترین نتایج را به ترتیب با متوسط خطای ۱۰/۵۵ و ۱۱/۱۷ درصد در بر داشتند. شبیه موج تحرکی با متوسط خطای ۳۷/۸۲ درصد نتایج ضعیفتری را ارائه کرد. در مرحله‌ی پسروی نیز کمترین میزان خطای نسبی مربوط به شبیه‌های لختی صفر و آب‌پویایی بود. این شبیه‌ها بهترین نتایج را به ترتیب با خطای نسبی ۸/۹۲ و ۸/۵۹ درصد در بر داشتند؛ ضعیف‌ترین پیش بینی مربوط به موج تحرکی با خطای نسبی ۱۱/۳ درصد بود.

### نتیجه گیری

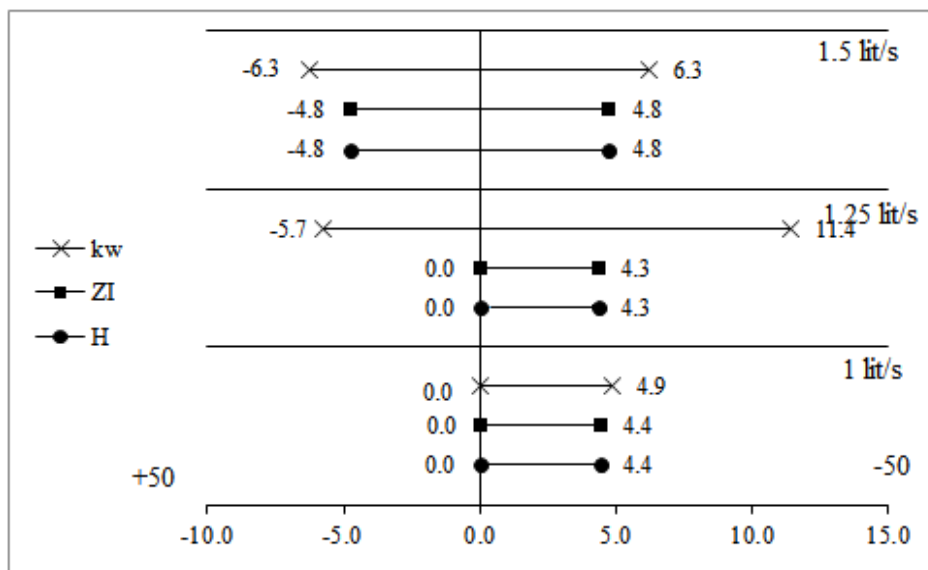
نتایج تحلیل حساسیت نرم افزار SIRMOD نشان می‌دهند که برای پیش بینی زمان پیشروی، نرم افزار به کاهش بده بیش از افزایش آن حساس است. بطور کلی، زمان پیشروی نسبت به زمان پسروی بیشتر تحت تأثیر تغییرات بده قرار می‌گیرد.

همچنین، افزایش ضریب زبری مانینگ موجب افزایش زمان پیشروی، و کاهش آن موجب کاهش زمان پیشروی شد. برای زمان پسروی نیز افزایش ضریب زبری مانینگ موجب افزایش زمان پسروی، و کاهش آن موجب کاهش زمان پسروی شد. شبیه موج تحرکی برای پیش بینی زمان پیشروی در مقایسه با دو شبیه دیگر نسبت به تغییر ضریب زبری حساسیت بیشتری دارد. ولی این شبیه برای پیش بینی حالت پسروی نسبت به دو شبیه دیگر به تغییر ضریب زبری حساسیت کمتری دارد.

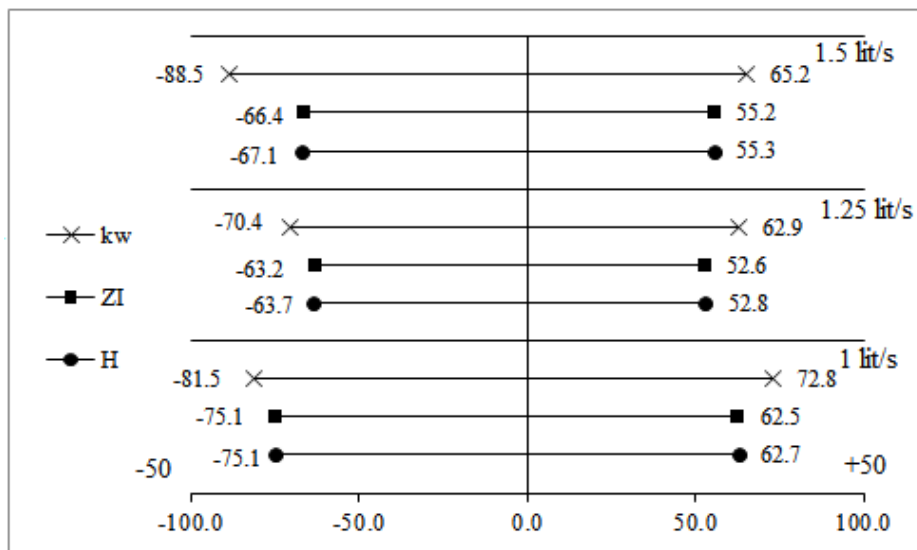
همچنین، با توجه به نتایج تحلیل حساسیت نرم افزار به تغییرات شیب زمین، مشخص می‌شود که افزایش شیب



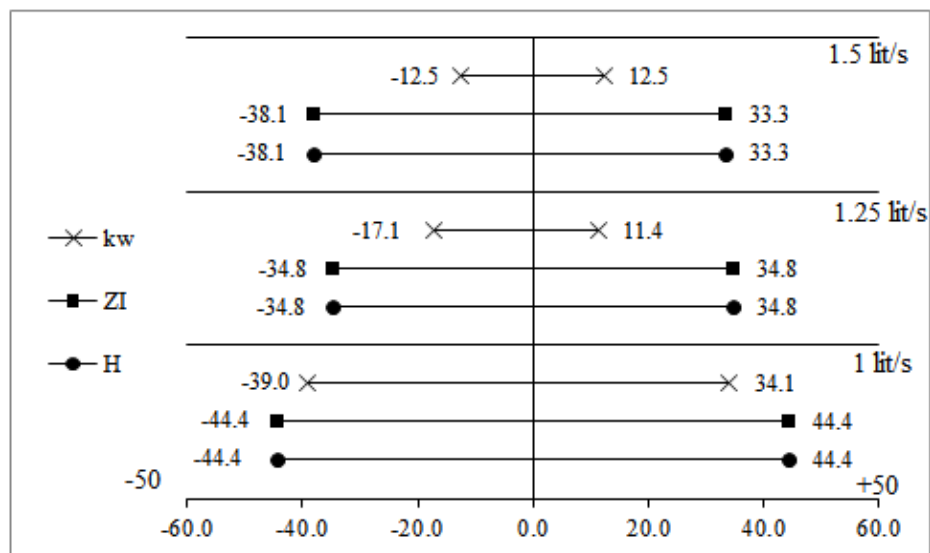
شکل ۱- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پیشروی با تغییرات بده برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.



شکل ۲- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پسروی با تغییرات بده برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.

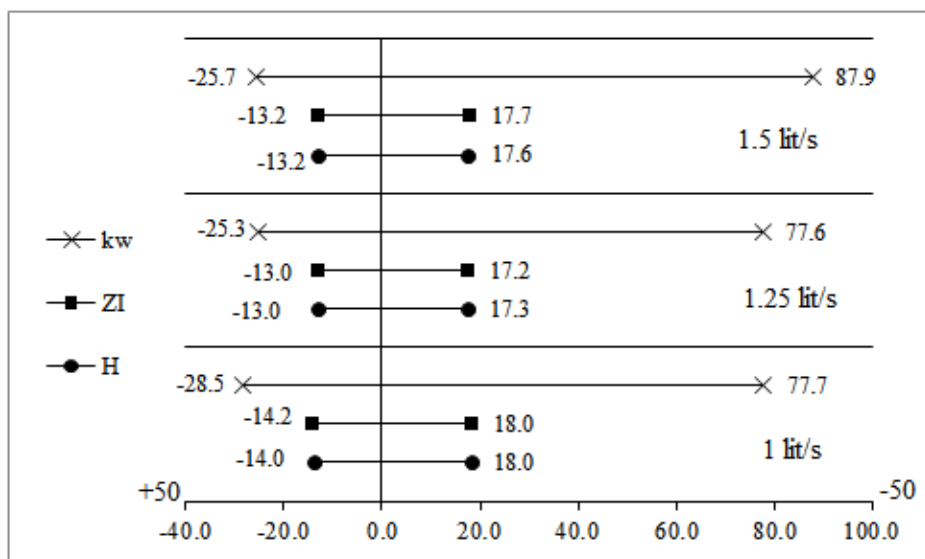


شکل ۳- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پیشروی با تغییرات ضریب زبری مانینگ برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.

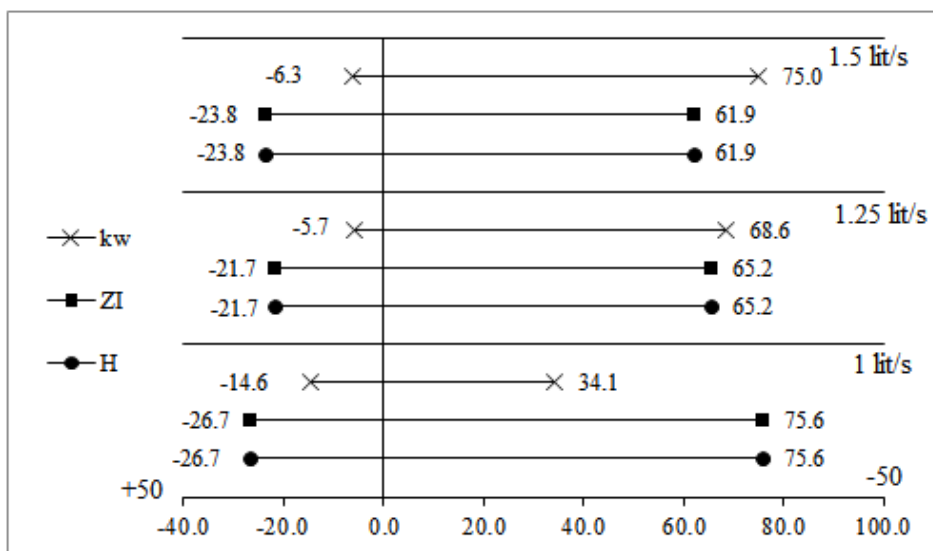


شکل ۴- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پسروی با تغییرات ضریب زبری مانینگ برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.





شکل ۵- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پیشروی با تغییرات شیب برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.



شکل ۶- مقادیر شاخص حساسیت (S)، تغییرات کل زمان پسروی با تغییرات شیب برای طول جویچه‌ی ۶۰ متری.

جدول ۱- متوسط مقادیر فراسنجهای لازم برای ارزیابی شبیه‌ها در مرحله‌ی پیشروی.

Ea(%)	R <sup>2</sup> (%)	Er(%)	a	N	شبیه
۱۱/۱۷	۰/۹۷۳	۶/۲	۱/۰۶۲	۷۷	HD*
۱۰/۵۵	۰/۹۸	۵/۲	۱/۰۵۲	۸۰	ZI**
۳۷/۸۲	۰/۹۶۳	۴۸/۹	۱/۴۸۹	۱۰۲	KW***

\* شبیه آب‌پویایی؛ \*\* شبیه لختی صفر؛ \*\*\* شبیه موج تحرکی

جدول ۲- متوسط مقادیر فراسنجهای لازم برای ارزیابی شبیه‌ها در مرحله‌ی پسروری.

شبه	N	a	Er(%)	R <sup>2</sup> (%)	Ea(%)
HD	۷۷	۱/۰۴۹	۴/۹	۰/۸۰۲	۸/۹۲
ZI	۸۰	۱/۰۴۵	۴/۵	۰/۷۹۸	۸/۵۹
KW	۱۰۲	۰/۹۰۶	۹/۴	۰/۷۲۷	۱۱/۳

## منابع

- Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
۱. عباسی، ف.، م. محمودیان شوشتری. ۱۳۷۵. مطالعه پیشروی جریان آب در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از شبیه‌لختی صفر. مجموعه مقالات دومین کنگره ملی مسائل آب و خاک کشور. تهران
  ۲. عباسی، ف. ۱۳۷۳. کاربرد شبیه‌های ریاضی در طراحی آبیاری نواری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس
  ۳. مصطفی‌زاده، ب.، ر. فتاحی، و ف. موسوی. ۱۳۷۵. کاربرد شبیه موج جنبشی در ارزیابی سامانه آبیاری شیاری. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۲۷. شماره ۳
  4. Abbasi, F., M. Mahmoodian Shooshtari, and J. Feyen. 2003. Evaluation of various surface irrigation numerical simulation models. *J Irrig. Drain. Eng. ASCE*. 129:208–213.
  5. Bassett, D. L. 1972. A mathematical model of water advance in border irrigation. *Trans ASCE*. 15: 992-995.
  6. Bautista, E., and W.W. Wallender. 1992. Hydrodynamic furrow irrigation model with specified steps. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*. 118: 450-465.
  7. Elliott, R.L., W.R. Walker, and G.V. Skogerboe. 1982. Zero inertia modeling of furrow irrigation advance. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*. 108: 179-195.
  8. Esfandiari, M. 1997. Evaluation of Furrow irrigation models for southeast Australia. Ph.D. thesis, University of Western Sydney, Richmond, Australia, 359p. (Unpublished).
  9. Key, M. 1990. Recent developments for improving water management in surface irrigation and overhead irrigation. *Agri. Water Manage.* 17: 7-23.
  10. Kincaid, D.C. 1970. Hydrodynamic of border irrigation. PhD Dissertation, Department of Agricultural Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado.
  11. Kruger, W.E, and D.L. Bassett. 1965. Unsteady flow of water over a porous bed constant infiltration. *Trans. ASCE*. 8: 60-61.
  12. Maheshwari, B.L., T.A. McMahon, and A.K. Turner. 1990. Sensitivity analysis of the parameters of border irrigation models. *Agri. Water Manage.* 18: 227-287.
  13. McCuen, R.H. 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *J. Hydrol.* 18:37-53.
  14. Merriam, J.L. 1977. *Efficient Irrigation*. California Polytechnic and State Univ., San Luis Obispo, Calif.
  15. Reyej, M.W., and W.W. Wallender. 1985. Furrow irrigation simulation time reduction. *J. Irrig. Drain. Eng.* 11: 134-146.
  16. Schwankl, L.J., and W.W. Wallender. 1988. Zero inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics. *Trans. Am. Soci. of Agri. Eng.* 31:1470-1475.
  17. Shayya, W.H., V.F. Barlts, and L.J. Segerlind. 1993. Kinematic-wave furrow irrigation analysis: a finite element approach. *Trans. ASCE*. 36:1733-1742.
  18. Strelkoff, T. 1972. Prediction of increases in surface-irrigation efficiencies. *Proc. Nati. Water Resour Meeting, ASCE, New York*.
  19. Strelkoff, T. 1994. SRFRR, A model of surface irrigation. U.S. Water Conserv. Lab. Phoenix, AZ.
  20. Walker, W.R., and F. Gichuki. 1985. Documentation of surface irrigation models. Report Utah State Univ., Logan, Utah, USA.
  21. Walker, W.R, and A.S. Humpherys. 1983. Kinematic-wave furrow irrigation

- 
- model. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 109: 377-392.
22. Walker, W.R., 1989. SIRMOD, A model of surface irrigation. Utah State Univ., Logan, Utah, USA.

