

## مقایسه روش‌های مختلف حل مدل بیلان حجمی در آبیاری سطحی

مهدی کوچک زاده\*، پرویز فتحی\*\*، مهدی همایی\*\*\*

### چکیده

پیش بینی دقیق مرحله پیشروی جریان، برای طراحی، مدیریت و ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی اهمیت فراوان دارد. یکی از مدل‌هایی که زمان پیشروی را پیش بینی می‌کند، مدل بیلان حجمی است. برای حل معادله بیلان حجمی روش‌های مختلفی ارائه شده که در آنها مرحله پیشروی با دقت‌هایی متفاوت پیش بینی می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی و انتخاب بهترین روش برای طراحی، مدیریت و ارزیابی سیستم‌های مختلف آبیاری سطحی است. بنابراین، از بین روش‌های موجود، روش‌های «هال»، «تصحیح شده هال»، «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر»، «فاکتور شکل جریان زیرسطحی متغیر» و «روش صریح حل معادله بیلان حجمی» شدند. برای هر یک از این روش‌ها، یک برنامه رایانه ای به زبان کوئیک بیسیک نوشته شد. برای مقایسه روش‌ها در آبیاری نواری، از داده‌های اندازه گیری شده توسط رات و همکاران (۱۹۷۴) و در آبیاری شیاری از داده‌های واگر و همکاران (۱۹۸۳) استفاده گردید. در مرحله بعد، داده‌های جمع آوری شده به عنوان ورودی به پنج برنامه رایانه ای ایجاد شده، معرفی و این برنامه‌ها برای نوارها و شیاری با خصوصیات مختلف اجرا گردید. خروجی این برنامه‌ها، مقادیر زمان‌های پیشروی در طول‌های مختلف از ابتدای شیار یا نوار (منحنی مرحله پیشروی) بود. سپس، برای هر شیار یا نوار خاص، زمان‌های پیشروی محاسبه شده به وسیله مدل‌های مختلف با مقادیر مشابه اندازه گیری شده مقایسه گردید. نتایج نشان داد که روش‌های «تصحیح شده هال» و «فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر» برای آبیاری نواری مناسب ترین روش‌ها جهت پیش بینی زمان پیش روی می‌باشند. در آبیاری شیاری، روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر»، زمان پیشروی را با دقتی بیش از سایر روش‌ها برآورد نموده است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، آبیاری شیاری، آبیاری نواری، مرحله پیشروی، مدل بیلان حجمی

\*- استادیار گروه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

\*\* - دانشجوی دکتری آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

\*\*\* - استادیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله ۸۱/۹/۲ تاریخ دریافت نسخه نهایی ۸۲/۲/۱۴

## مقدمه

طراحی سیستم آبیاری سطحی با بازده بالا، مستلزم پیش بینی دقیق عمق آب نفوذ یافته در هر زمان و در هر نقطه در طول نوار یا شیار است. عمق آب نفوذ یافته در هر نقطه، خود تابعی از فرصت زمان نفوذ است. برای پیش بینی فرصت زمان نفوذ در هر نقطه، بایستی زمان پیشروی و پیشروی با دقتی کافی پیش بینی گردد. مدل هیدرودینامیک<sup>۱</sup>، موج سینماتیک<sup>۲</sup> و اینرسی صفر<sup>۳</sup> از جمله مدل‌هایی هستند که مرحله پیشروی را با دقتی بالا پیش بینی می‌کنند. لیکن استفاده از این مدل‌ها مستلزم آشنایی با روش‌های پیشرفته عددی می‌باشد. یکی از مدل‌های ساده و بسیار کاربردی، مدل بیلان حجمی است. گرچه این مدل در مقایسه با مدل‌های عددی یاد شده دقتی کمتر دارد، لیکن در بسیاری از منابع و مقالات از آن به عنوان روش مرجع در طراحی و ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی نام برده شده است واکر و اسکوگربو (۱۹۸۷) و جیمز (۱۹۸۸).

اسماردن و همکاران (۱۹۸۸)، دتار (۱۹۸۹) و کریستیان و همکاران (۱۹۶۶) در پژوهش‌های خود از این مدل برای تخمین پارامترهای ثابت معادله نفوذ استفاده کرده‌اند. اهمیت مرحله پیشروی در آبیاری سطحی، پژوهش‌های فراوانی را به دنبال داشته است که به ابداع مدل‌ها، روش‌ها و معادلات گوناگون و با دقت پیش بینی کم تا زیاد و همچنین با ساختارهای ساده تا پیچیده انجامیده است (لوئیس و میلنه (۱۹۳۸)، هال (۱۹۶۷)، رات (۱۹۷۴)، واکر و اسکوگربو (۱۹۸۷)، والیانتراس (۱۹۹۷)، الازبا و استرلکوف (۱۹۹۴)، و الازبا (۱۹۹۹)).

هدف از این پژوهش، مقایسه پنج روش حل مدل بیلان حجمی یعنی روش‌های «هال»<sup>۴</sup>، «هال»<sup>۵</sup>، «فاکتور شکل جریان زیرسطحی متغیر»<sup>۶</sup>، «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر»<sup>۷</sup> و «صریح»<sup>۸</sup> و گزینش بهترین روش برای طراحی، مدیریت و ارزیابی سیستم‌های مختلف آبیاری سطحی بود.

## مبانی نظری

از دو اصل فیزیکی «قانون بقای جرم» و «قانون دوم نیوتن» برای توصیف جریان در کانال‌های روباز، استفاده می‌گردد. معادلات دیفرانسیلی حاصل از این دو اصل فیزیکی که اصطلاحاً به معادلات «سنت و نانت»<sup>۹</sup> موسومند و به ترتیب معادله پیوستگی جریان (معادله ۱) و مومنتم (معادله ۲) نیز به آنها اطلاق می‌گردد.

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + I_x = 0 \quad [1]$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad [2]$$

1-Hydrodynamic model  
4-Hall  
7-Variable surface shape factor

2-Kinematic wave  
5-Corrected Hall  
8-Explicit

3-Zero inertia  
6-Variable subsurface shape factor  
9-De Saint-Venant

که در آن،  $x$  فاصله از ابتدای کانال،  $t$  زمان،  $v$  سرعت جریان،  $A$  سطح مقطع جریان،  $I_x$  سرعت حجمی نفوذ آب در واحد طول کانال،  $y$  عمق جریان،  $S_0$  شیب کف کانال و  $S_f$  شیب خط انرژی می‌باشد.

معادله (۱) در کلیه مدل‌های پیش بینی مرحله پیشروی نظیر مدل هیدرودینامیک، اینرسی صفر و موج سینماتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت این مدل‌ها تنها در شکل معادله مومنتم است. در هر یک از این مدل‌ها، معادله (۲) با استفاده از فرضیاتی ساده شده ای به شکلی ساده تر اصلاح می‌گردد. سپس، با حل عددی و همزمان دو معادله پیوستگی جریان و مومنتم، ویژگی‌های جریان در هر نقطه از شیار یا نوار محاسبه می‌شود. در مدل هیدرودینامیک، معادله پیوستگی و شکل کامل معادله مومنتم (معادله ۲) همزمان به صورت عددی حل می‌شوند. در مدل بیلان حجمی نیز برای انجام محاسبات از معادله پیوستگی جریان استفاده می‌گردد. تفاوت این مدل با دیگر مدل‌ها در آن است که در این مدل معادله مومنتم، به‌عنوان مکمل معادله پیوستگی، به‌کار نمی‌رود بلکه به‌جای آن از فرضیاتی برای ساده سازی بیشتر مدل، استفاده می‌گردد.

معادله (۱) را می‌توان اینطور تفسیر نمود که از کل حجم آب ورودی به شیار یا نوار، بخشی به درون خاک نفوذ کرده و مابقی روی سطح خاک جریان می‌یابد. بنابراین

$$V_T(t) = V_y(t) + V_z(t) \quad [3]$$

که در آن؛  $V_T(t)$  کل حجم آب ورودی به ابتدای نوار یا شیار تا زمان  $t$ ،  $V_y(t)$  حجم آب جریان یافته در روی سطح خاک تا زمان  $t$  و  $V_z(t)$  حجم آب نفوذ یافته به درون خاک تا زمان  $t$  است. اگر  $Q_0$  دبی جریان در ابتدای شیار یا نوار باشد در این صورت:

$$V_T = Q_0 t$$

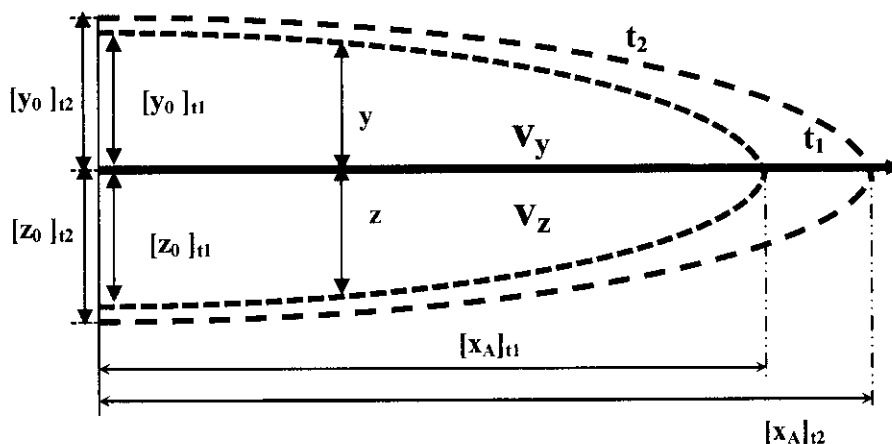
و با جایگزینی در معادله ۳:

$$Q_0 t = V_y + V_z \quad [4]$$

شکل ۱ نمای عمومی نیمرخ جریان آب سطحی و زیر سطحی را به هنگام پیشروی جریان نشان می‌دهد. با توجه به این شکل اجزای سمت راست معادله (۴) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$V_y = \int_0^x A(s, t) ds \quad [5]$$

$$V_z = \int_0^x Z(s, t - t_s) ds \quad [6]$$



شکل ۱- نیمرخ جریان آب سطحی و زیرسطحی در زمان پیشروی جریان در نوار یا شیار.

که در آن،  $A$  و  $Z$  به ترتیب مساحت سطح مقطع جریان سطحی و زیرسطحی،  $S$  طول پیشروی و  $t_s$  زمان لازم برای رسیدن جبهه پیشروی به نقطه  $s$  می‌باشد. طبق قضیه میانگین، معادله‌های ۵ و ۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\int_0^x A(s,t) ds = A_{av} \cdot x \quad [7]$$

$$\int_0^x Z(s,t - t_s) ds = Z_{av} \cdot x \quad [8]$$

که در آن،  $x$  طول پیشروی و  $A_{av}$ ،  $Z_{av}$  به ترتیب میانگین مساحت سطح مقطع جریان سطحی و زیرسطحی روی کل نیمرخ جریان می‌باشد. مقادیر این دو پارامتر را می‌توان به ترتیب به صورت تابعی از مساحت سطح مقطع جریان سطحی و زیرسطحی در ورودی نوار یا شیار فرض نمود. یعنی:

$$A_{av} = \sigma_y(t) \cdot A_0 \quad [9]$$

$$Z_{av} = \sigma_z(t) \cdot Z_0 \quad [10]$$

که در آن،  $A_0$ ،  $Z_0$  به ترتیب مساحت سطح مقطع جریان سطحی و زیرسطحی در ورودی نوار یا شیار و  $\sigma_z$ ،  $\sigma_y$  به ترتیب فاکتور شکل جریان سطحی و زیرسطحی می‌باشند.

$$\sigma_y = \frac{A_{av}}{A_0} \quad [11]$$

$$\sigma_z = \frac{\int_0^x Z(s, t - t_s) ds}{Z_0 X} \quad [12]$$

با در نظر گرفتن معادلات فوق، شکل کلی معادله ۳ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$Q_0 t = \sigma_y(t) \cdot A_0 \cdot x + \sigma_z(t) \cdot Z_0 \cdot x \quad [13]$$

که همان معادله «بیان حجمی» است.

در معادله (۱۳) فاکتورهای شکل  $\sigma_z, \sigma_y$  متغیر بوده و تابعی از زمان می‌باشند. مهم‌ترین مشکل مربوط به حل معادله بیان حجمی (محاسبه زمان پیشروی) یافتن مقادیری مناسب برای این دو فاکتور است. پژوهش‌ها نشان داده است که مقدار  $\sigma_y$  بین ۰/۷ تا ۰/۸ متغیر می‌باشد. واکر و اسکوگرو (۱۹۸۷) مقدار ۷۷/۰ را برای آن پیشنهاد کرده‌اند. مقدار  $\sigma_z$  نیز بین ۰/۵ تا ۰/۱ متغیر می‌باشد. هال (۱۹۶۷) میانگین ۰/۷۵ را برای آن پیشنهاد کرده است. بسته به ثابت یا متغیر در نظر گرفتن فاکتورهای  $\sigma_z, \sigma_y$  روش‌هایی متفاوت برای حل معادله بیان حجمی ارائه گردیده است که اصول آنها در زیر ارائه می‌شود.

روش هال: در این روش برای حل معادله بیان حجمی، مقادیر  $\sigma_z, \sigma_y$  ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود همچنین، عمق جریان در ابتدای شیار یا نوار برابر با عمق نرمال در نظر گرفته می‌شود. نیمرخ جریان سطحی در شیار و یا نوار نیز به صورت تابعی توانی از طول پیشروی جریان در نظر گرفته شده و در حقیقت فرض می‌شود که شکل نیمرخ جریان دارای تغییرات زمانی نمی‌باشد. برای محاسبه فاصله پیشروی، ابتدا یک گام زمانی ( $\Delta t$ ) دلخواه و ترجیحا کوچک انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از معادله بیان حجمی و با معلوم بودن سایر پارامترها، مقدار فاصله پیشروی جریان در اولین گام زمانی ( $\Delta x(1)$ ) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta x(1) = \frac{Q_0 \Delta t}{\sigma_y \cdot y_0 + \sigma_z \cdot Z(1)} \quad [14]$$

که در آن،  $y_0$  عمق نرمال جریان در ابتدای نوار یا شیار بوده که خود از «معادله مانینگ» به دست می‌آید.  $Z(1)$  عمق آب نفوذ یافته در ابتدای نوار یا شیار در انتهای گام زمانی اول ( $T = \Delta t$ ) است. مقدار فاصله پیشروی شده در طی گام زمانی دوم و بالاتر از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\Delta x(i) = \frac{Q_0 \Delta t - \sum_k^{i-1} \frac{Z(i-k+1) - Z(i-k-1)}{2} \Delta x(k)}{\sigma_y \cdot y_0 + \sigma_z \cdot Z(1)} \quad [15]$$

که در آن،  $\Delta x(i)$  مقدار فاصله پیشروی در طی گام زمانی  $i$  ام،  $Z(i-k+1)$  عمق آب نفوذ یافته در ابتدای نوار یا شیار تا زمان  $T = (i-k+1)\Delta t$  از شروع آبیاری،  $Z(i-k-1)$  عمق آب نفوذ یافته در ابتدای نوار یا شیار تا زمان  $T = (i-k-1)\Delta t$  از شروع آبیاری می‌باشد.

عمق آب نفوذ یافته تا زمان  $T$  (از شروع آبیاری تا انتهای گام زمانی  $i$  ام) از «معادله تجربی کوستیاکف» به دست می آید.

$$Z(i) = kT^a \quad [16]$$

که در آن،  $T = i\Delta t$  است. فاصله پیشروی تا زمان  $T = i\Delta t$  از رابطه زیر به دست می آید.

$$x = \sum_1^i \Delta x(j) \quad [17]$$

هرگاه مقدار فاصله پیشروی محاسبه شده ( $X$ ) با طول نوار یا شیار برابر گردد، محاسبات به پایان می رسد. با محاسبه مقدار طول پیشروی در زمان های مختلف از شروع آبیاری می توان منحنی مرحله پیشروی جریان را محاسبه و ترسیم نمود.

**روش های تصحیح شده:** در روش قبلی، برای محاسبه حجم آب نفوذ یافته ( $V_f$ ) در طول پیشروی جریان و در یک گام زمانی خاص از قانون دوزنقه استفاده می گردد. در عمل، نیمرخ آب نفوذ یافته در طول مسیر پیشروی خطی نیست و در نزدیکی جبهه پیشروی، انحنای شدیدی دارد (شکل ۱). این انحنای باعث می شود که قانون دوزنقه، حجم آب نفوذ یافته را بیشتر از مقدار واقعی آن محاسبه نماید. برای رفع این نارسایی آلازبا و استرلکوف (۱۹۹۴) معادله (۱۵) را به شکل زیر تصحیح کرده اند:

$$\Delta x(i) = \frac{Q_0 \Delta t - \sum_k^{i-1} \frac{Z(i-k+1) - Z(i-k-1)}{2} \Delta x(k) - \left(\frac{1}{2} - \sigma_z\right) \cdot Z(1) \cdot \Delta x(i-1)}{\sigma_y \cdot y_0 + \sigma_z \cdot Z(1)} \quad [18]$$

مقایسه معادلات (۱۸) و (۱۵) نشان می دهد که در معادله (۱۸) جمله زیر به صورت معادله (۱۵) افزوده شده است.

$$C = \left(\frac{1}{2} - \sigma_z\right) \cdot Z(1) \cdot \Delta x(i-1) \quad [19]$$

روش فاکتور شکل جریان زیرسطحی متغیر: فرض ثابت بودن مقادیر  $(\sigma_z, \sigma_y)$ ، باعث کاهش محسوس دقت محاسبه معادله بیلان حجمی می شود. از اینرو والیانزاس (۱۹۹۷) با ثابت در نظر گرفتن  $\sigma_y$  (۰/۷۷) و استفاده از رابطه (۱۶) به حل معادله پرداخت. با بی بعد کردن معادله بیلان حجمی و استفاده از روش های تصحیح شده، این معادله بی بعد برای مقادیر مختلف توان تابع معادله (۱۶) حل و مقدار  $\sigma_z$  برای زمان ها و فواصل پیشروی مختلف، محاسبه می گردد.

$$\sigma_z = R_1 + (R_0 - R_1)(2.6W^2 - 1.6W^3) \quad [20]$$

که در آن؛

$$R_0 = \frac{1}{1+a} \quad [21]$$

$$R_1 = \frac{a\pi(1-a)}{\sin(a\pi)} \quad [22]$$

$$W = \left[ \frac{\sigma_y A_0 X}{Q_0 T} \right]^{1+a} \quad [23]$$

که در آن،  $A_0$  سطح مقطع جریان در ابتدای نوار یا کانال است. هدف از حل معادله بیلان حجمی این است که برای هر زمان  $T$ ، فاصله پیش‌روی  $X$  با در نظر گرفتن تابع زمانی  $\sigma_z$  (تابع تحلیلی ۲۰) محاسبه گردد. این مراحل محاسباتی به صورت زیر می‌باشد. الف: حدس اولیه فاصله پیش‌روی  $(X(0))$ : برای این منظور بایستی معادله بیلان حجمی برای  $X(0)$  حل گردد. در این صورت خواهیم داشت:

$$X(0) = \frac{Q_0 T}{0.77 A_0 + \sigma_{z0} k T^a} \quad [24]$$

که در آن،  $\sigma_{z0}$  تخمین اولیه برای مقدار  $\sigma_z$  می‌باشد و از معادله (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{z0} = 0.5(R_0 + R_1) \quad [25]$$

ب: با محاسبه مقدار  $\sigma_{z0}$  و  $X(0)$  از معادله (۲۳) مقدار  $W$  و با استفاده از رابطه (۲۰) مقدار جدید  $\sigma_z$  ( $\sigma_{z1}$ ) محاسبه می‌شود.

با محاسبه  $\sigma_{z1}$ ، دوباره مقدار فاصله پیش‌روی  $(X(1))$  از معادله (۲۶) محاسبه می‌گردد.

$$X(1) = \frac{Q_0 T}{0.77 A_0 + \sigma_{z1} k T^a} \quad [26]$$

ج: مقدار  $X(1)$  محاسبه شده در مرحله دوم با  $X(0)$  مقایسه می‌شود. اگر اختلاف ناچیز باشد در این صورت  $(X(1))$  همان فاصله پیش‌روی می‌باشد. در غیر این صورت  $X(0) = X(1)$  در نظر گرفته شده و گام دوم تکرار می‌گردد. محاسبات تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که این دو مقدار با خطای ناچیزی با هم برابر شود. معمولاً با دو تکرار، جواب نهایی به دست خواهد آمد.

روش فاکتور شکل جریان سطحی متغیر: در این روش که توسط والیانزاس (۱۹۹۷) ارائه گردید، تغییرات زمانی فاکتور شکل جریان سطحی ( $\sigma_y$ ) نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. استخراج معادلات در این روش به این صورت است که ابتدا به وسیله مدل موج سینماتیک، منحنی مرحله پیش روی پیش بینی می‌گردد. قابلیت کاربرد مدل موج سینماتیک در شیارها و نوارهای با شیب کم با محدودیت مواجه می‌شود. در این وضعیت مدل اینرسی صفر جواب بهتری می‌دهد. با استفاده از منحنی مرحله پیشروی حاصله از روش موج سینماتیک، معادله بی‌بعد بیلان حجمی برای مقادیر مختلف توان تابع معادله نفوذ کوستباکف (a) و ضریب شکل کانال ( $\rho_2$ ) حل گردید و در نتیجه برای زمان‌ها و فواصل پیشروی مختلف، مقادیر  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  محاسبه گردید. با تحلیل سیستماتیک نتایج حاصله، رابطه‌ای (۲۷) برای محاسبه  $\sigma_y$  ارائه گردید.

$$\sigma_y = v(1 - \sigma_{y \min}) + \sigma_{y \min} \quad [27]$$

که در آن؛

$$\sigma_{y \min} = 0.8 + 0.055\rho_2^{1.3} - 0.47a^{0.6} \quad [28]$$

و

$$v = \left[ \frac{\sigma_y X A_0}{Q_0 T} \right]^{1+a} \quad [29]$$

مراحل حل معادله بیلان حجمی با فرض متغیر بودن فاکتور شکل جریان سطحی متغیر در فاصله X و در زمان T به صورت گام به گام به شرح زیر می‌باشد.

۱- تخمین اولیه‌ای برای فاکتورهای  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\sigma_{z0} = 0.5(R_0 + R_1) \quad \text{و} \quad \sigma_{y0} = 0.77$$

که در آن،  $R_0$  و  $R_1$  به ترتیب از معادلات (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند.

۲- با استفاده از معادله بیلان حجمی اولین تخمین از فاصله پیشروی ( $X(0)$ ) محاسبه می‌شود.

۳- با استفاده از روابط (۲۰) تا (۲۳) و (۲۷) تا (۲۹) تخمینی مجدد از  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  محاسبه می‌شود.

۴- مجدداً با استفاده از معادله بیلان حجمی، فاصله پیشروی ( $X_1$ ) محاسبه می‌شود.

۵- مقدار  $X_1$  با  $X_0$  مقایسه می‌شود. اگر اختلاف این دو از مقدار خطای مجاز کمتر بود، در این صورت  $X_1$  فاصله پیشروی در زمان T خواهد بود، در غیر این صورت  $X(0) = X(1)$  در نظر گرفته می‌شود و مراحل سوم تا پنجم تکرار می‌گردد.



روش صریح: آلازبا (۱۹۹۹)، معادله بیلان حجمی را به‌نحوی اصلاح نمود که امکان حل صریح آن به منظور پیش بینی مرحله پیشروی فراهم شود. در این روش  $\sigma_y$  ثابت و برابر  $0/77$  فرض می‌شود. به‌طور خلاصه در این روش ابتدا برای کاهش تعداد متغیرها در معادله بیلان حجمی اقدام به بی بعد نمودن آن می‌شود. معادله‌های محاسبه دبی بی بعد ( $Q^*$ )، عمق بی بعد ( $Y^*$ )، زمان بی بعد ( $T^*$ ) و فاصله پیشروی بی بعد ( $X^*$ ) به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} [30] \quad Q^* &= \frac{Q_0}{Q_R} & [31] \quad Y^* &= \frac{Y}{Y_R} & [32] \quad T^* &= \frac{T}{T_R} & [33] \quad X^* &= \frac{X}{X_R} \end{aligned}$$

که در آن؛

$$\begin{aligned} [34] \quad Y_R &= \sigma_y Y_0 & [35] \quad Q_R &= Q_0 & [36] \quad T_R &= \left[ \frac{Y_R}{k} \right]^{\frac{1}{a}} & [37] \quad X_R &= \frac{Q_R \cdot T_R}{Y_R} \end{aligned}$$

که در آن،  $Y_0$  عمق نرمال جریان در ابتدای شیار یا نوار،  $a$  و  $k$  ضرایب ثابت معادله کوستیاکف،  $Q_0$  دبی ورودی به شیار یا نوار می‌باشد. فاکتور شکل جریان زیرسطحی با کمک رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$\sigma_z = \frac{\alpha + \beta \left( \frac{X^*}{T^*} \right)}{1 + \gamma \left( \frac{X^*}{T^*} \right)} \quad [38]$$

که در آن؛

$$\begin{aligned} [39] \quad \alpha &= \frac{a\pi(1-a)}{\sin(a\pi)} & [40] \quad \beta &= 0.35a\pi - \frac{3}{5\pi}(1+4a^2) & [41] \quad \gamma &= 0.35a\pi - \frac{3}{5\pi}(1-2a^2) \end{aligned}$$

این معادلات از روش «حداقل مجموع مربعات خطا» به‌دست آمده‌اند. از جمله ویژگی‌های معادله (۳۸) این است که هرگاه در معادله بی بعد بیلان حجمی قرار می‌گیرد، این معادله تبدیل به یک

معادله درجه دوم بر حسب  $(T^*)$  خواهد شد. ریشه مثبت این معادله مقدار فاصله پیشروی را به دست خواهد داد. به عبارت دیگر معادله محاسبه ریشه مثبت این معادله درجه دوم، فرمول نهائی برای محاسبه فاصله پیشروی خواهد بود. این رابطه به شکل زیر می‌باشد.

[۴۲]

$$X = \frac{\sqrt{(T^* + \alpha \cdot \xi \cdot T^* - \gamma T^*)^2 + 4T^*(\beta \cdot \xi + \gamma)} - T^*(1 + \alpha \cdot \xi - \gamma)}{2(\beta \cdot \xi + \gamma)} \times X_R$$

که در آن  $\xi = (T^*)^a$  می‌باشد. مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب از معادله‌های (۳۹) تا (۴۱) و مقادیر  $X_R$  و  $T^*$  به ترتیب از معادله‌های (۳۷) و (۳۲) محاسبه می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق پنج روش برای حل مدل بیلان حجمی یعنی روش‌های «هال»، «هال تصحیح شده»، «فاکتور شکل جریان زیرسطحی متغیر»، «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» و «صریح»، انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای انجام محاسبات مربوط به هر روش، یک برنامه رایانه ای به زبان کوئیک بیسیک نوشته شد. در این برنامه‌ها دبی شیار یا دبی در واحد عرض نوار، شیب شیار یا نوار، مقدار ضریب زبری مانینگ، طول شیار یا نوار، مشخصات هندسی مقطع شیار یا نوار و ضرایب تابع معادله نفوذ کوستیاکف، ورودی‌های برنامه‌ها را تشکیل می‌دادند. مدت زمان پیشروی در فواصل مختلف از ابتدای شیار یا نوار (تا انتهای آن) خروجی برنامه‌ها بوده است.

برای آبیاری شیار از داده‌های واکر و همکاران (۱۹۸۳) استفاده شده. این داده‌ها حاصل از پژوهشی است که طی آن مدل موج سینماتیک برای آبیاری شیار بسط داده شد. این ارقام از سه سری داده صحرائی که در مراکز تحقیقاتی دانشگاه‌های کلرادو، یوتا و آیداهو اندازه‌گیری شده بود، به دست آمده‌اند. این داده‌ها محدوده وسیعی از انواع خاک‌ها، شیب‌ها و طول شیار را در بر می‌گیرند. برای آبیاری نواری از ارقام جمع آوری شده توسط رات و همکاران (۱۹۷۴) استفاده گردید. این ارقام که از هفت سری تشکیل می‌شوند نتیجه آزمایش‌هایی است که در دانشگاه آریزونا انجام شده است. آزمایش‌ها در نوارهایی به طول ۹۱/۵ و عرض ۵/۹ متر انجام شده است. با تقسیم نوار به ده بازه مساوی (هر بازه ۹/۱۵ متر) ارتفاع سطح آب و ارتفاع بستر در نقاط ابتدا و انتهای هر بازه اندازه‌گیری و با استفاده از این مقادیر، عمق جریان در ایستگاه‌های مختلف در امتداد طول نوار محاسبه شده است. پارامترهای دیگر نظیر شیب، ضریب زبری بستر جریان، کل زمان پیش روی، کل حجم آب ورودی و خروجی، کل حجم آب نفوذ یافته را اندازه‌گیری یا محاسبه نمودند.

به منظور ارزیابی روش‌های مختلف حل معادله بیلان حجمی، ابتدا با استفاده از داده‌های واکر و

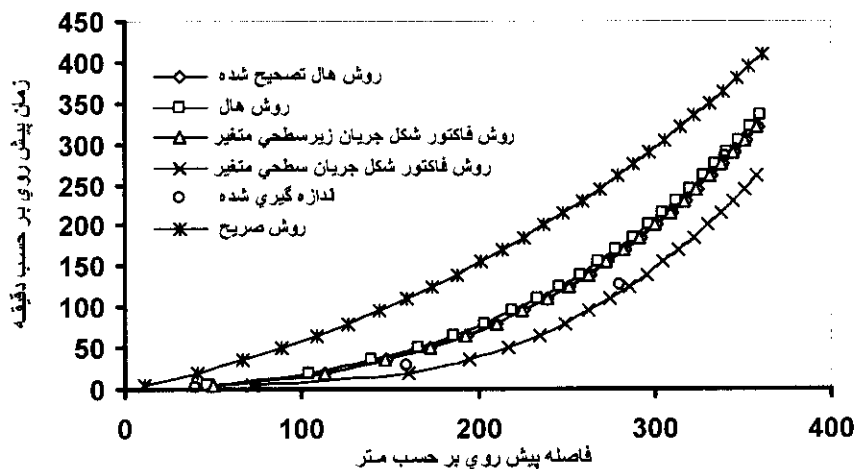
همکاران (۱۹۸۳)، روش‌های فوق‌الذکر اجرا و نتایج آنها با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شده دقت روش‌های مختلف در برآورد زمان پیشروی در آبیاری شیاری نیز تعیین گردید. سپس با استفاده از داده‌های رات و همکاران (۱۹۷۴) دقت هر یک از روش‌های یادشده در پیش بینی مدت زمان پیشروی در آبیاری نواری سنجیده شد.

به منظور تعیین تاثیر پارامترهای مختلف موجود در بیلان حجمی بر مدت زمان پیشروی تحلیل حساسیت انجام شد. این اقدام با این هدف صورت می‌گیرد که معلوم شود کدام یک از پارامترهای دخیل در معادله بیلان حجمی به روی زمان پیشروی جریان بیشترین تاثیر را دارد. برای انجام تحلیل حساسیت، هر پارامتر (نظیر فاکتور شکل جریان سطحی، زیرسطحی، ضریب زبری مانینگ) را جداگانه در نظر گرفته و به مقادیر آنها پنج درصد اضافه یا کم گردید با ثابت بودن پارامترهای دیگر مقدار زمان پیشروی محاسبه و با مقایسه با مقدار اندازه‌گیری شده، میزان خطای ایجاد شده محاسبه گردید. بیشترین تأثیر مربوط به پارامتری است که میزان خطای ناشی از آن حداکثر بوده است.

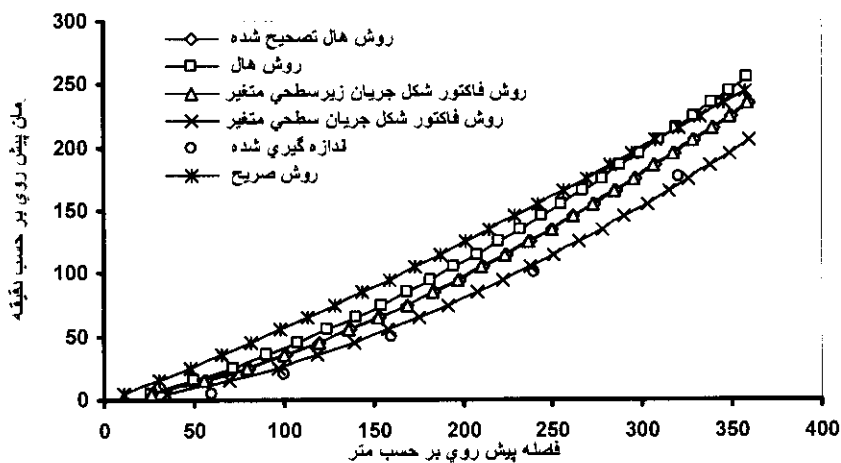
## نتایج و بحث

### آبیاری شیاری

مقایسه نتایج حاصل از روش‌های پنج‌گانه حل مدل بیلان حجمی با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو شیاری در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که روش صریح دارای بیشترین خطا در پیش‌بینی زمان پیشروی می‌باشد. از آنجا که نیمرخ جریان سطحی و زیر سطحی با زمان تغییر می‌کنند در نتیجه مقادیر  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  مقادیر ثابتی نبوده و دارای تغییرات زمانی و مکانی می‌باشند. مهم‌ترین منبع ایجاد خطا در روش‌های «هال» و «هال تصحیح شده» ثابت فرض کردن این مقادیر می‌باشد. در روش «صریح» علاوه بر فرضیات مورد استفاده در روش «هال تصحیح شده» (فرض ثابت بودن مقادیر  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$ )، تابع  $\sigma_z$  به گونه‌ای تعریف شده است که امکان حل صریح معادله بیلان حجمی را با تبدیل آن به یک معادله درجه دوم فراهم می‌کند. در نتیجه، خطای پیش‌بینی پیشروی در این روش بیشتر از روش‌های «هال» و «هال تصحیح شده» می‌باشد. از آنجا که در روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» پارامترهای  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  به صورت تابعی از زمان تعریف شده‌اند، مقدار خطا در پیش‌بینی پیشروی نسبت به سه روش متذکره قبلی بسیار کمتر شده است. نکته قابل توجه در این روش آن است که تابع زمانی برآورد  $\sigma_y$  بر مبنای مدل موج سینماتیک بسط و توسعه داده شده است. از جمله فرضیات این مدل، وجود شیب به اندازه کافی زیاد است به طوری که بتوان از تغییرات فشار هیدرواستاتیک در واحد وزن جریان صرف‌نظر نمود و جریان را یکنواخت در نظر گرفت. در شیاریها و نوارهایی که فرض مذکور برقرار باشد، میزان خطای پیش‌بینی روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» بسیار ناچیز شده است. در روش «فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر» مقدار  $\sigma_z$  بصورت تابعی زمانی تعریف شده لیکن مقدار  $\sigma_y$  ثابت در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، همانطوری که نتایج نیز نشان می‌دهند، دقت پیش‌بینی این روش بسیار مطلوبتر از روش‌های «هال» و «هال تصحیح شده» می‌باشد. لیکن، ثابت در نظر گرفتن  $\sigma_y$



شکل ۲- مقایسه منحنی پیشروی اندازه گیری شده در شیار اول و منحنی های پیشروی به دست آمده از مدل های مختلف در آبیاری شیاری.



شکل ۳- مقایسه منحنی پیشروی اندازه گیری شده در شیار دوم و منحنی های پیشروی به حاصله از مدل های مختلف در آبیاری شیاری.

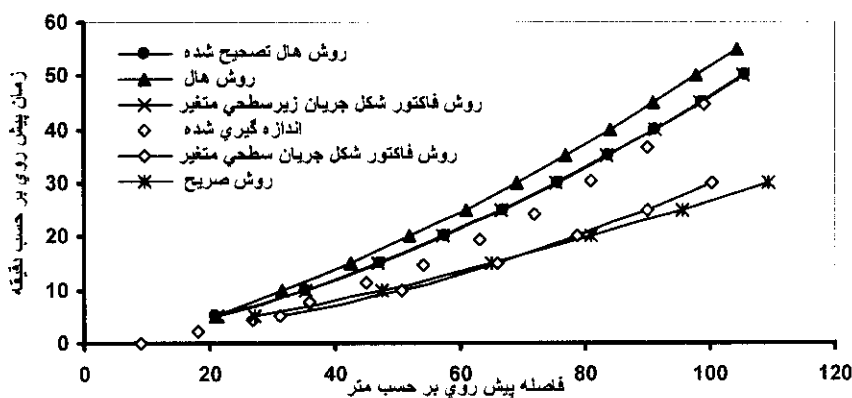
باعث کاهش دقت نسبت به روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» شده است. مقادیر ضریب همبستگی و شیب بهترین خط برازشی از میان مقادیر زمان پیشروی پیش بینی شده به وسیله روش‌های مختلف که در مقابل داده‌های آزمایشگاهی مشابه رسم گردیده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که در تمامی حالات، شیب بهترین خط برازش شده در روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» نزدیک به یک می‌باشد، مشاهده این جدول دقت نسبتاً خوب روش فوق‌الذکر را به اثبات می‌رساند.

جدول ۱- ضریب همبستگی و شیب بهترین خط برازشی از میان مقادیر زمان پیشروی اندازه‌گیری و پیش بینی شده به وسیله روش‌های مختلف در شیاهای ۱ و ۲

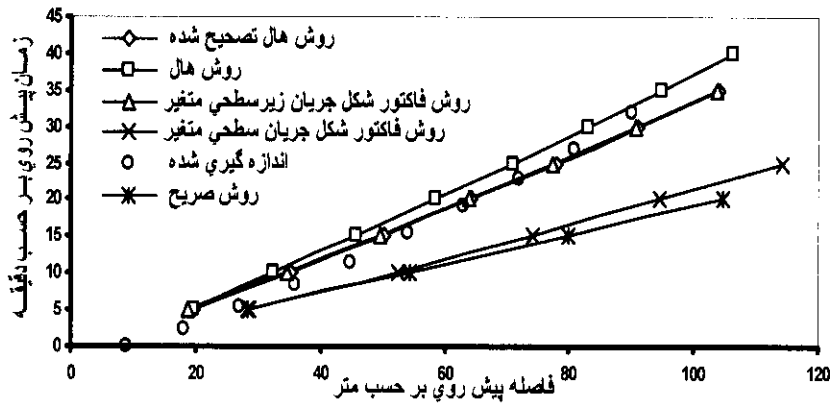
شماره شیار	روش‌های مورد آزمون	ضریب همبستگی	شیب بهترین خط
۱	هال	۰/۹۱۷۵	۰/۹۵۱۱
	هال تصحیح شده	۰/۹۳۲۱	۰/۹۶۵۹
	صریح	۰/۷۲۸۲	۰/۸۰۷۱
	فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر	۰/۹۳۱	۰/۹۶۴۶
	فاکتور شکل جریان سطحی متغیر	۰/۹۸۷۹	۱/۰۵۹۴
۲	هال	۰/۹۴۵۴	۰/۸۹۲۶
	هال تصحیح شده	۰/۹۵۲۶	۰/۹۳۹۸
	صریح	۰/۸۷۴۴	۰/۸۴۵۹
	فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر	۰/۹۵۲۷	۰/۹۳۹۸
	فاکتور شکل جریان سطحی متغیر	۰/۹۶۶	۱/۰۲۲۲

## آبیاری نواری

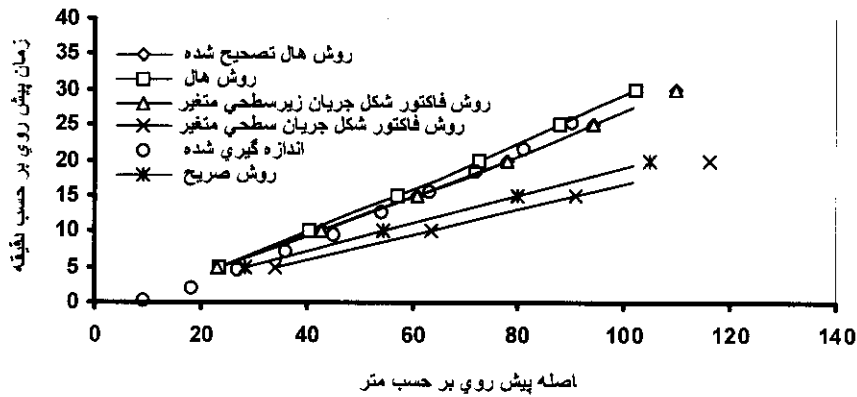
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ روش‌های مختلف حل معادله بیلان حجمی را با نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همچنین مقادیر ضریب همبستگی و شیب بهترین خط عبوری از میان مقادیر زمان پیشروی بینی شده به وسیله روش‌های مختلف که در مقابل داده‌های آزمایشگاهی مشابه رسم گردیده‌اند، در جداول ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است. مشاهده اشکال و جداول متذکره نشان می‌دهد که در آبیاری نواری روش «فاکتور شکل جریان زیرسطحی متغیر» بیشترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. با آنکه روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» دارای دقت بسیار زیادتری نسبت به این روش است لیکن در سه نوار آزمایش شده نتایج خوبی را نشان نمی‌دهد علت این امر شیب کم نوارهای مورد استفاده در آزمایش‌ها می‌باشد. کم بودن شیب در نوارها موجب نقض فرض یکنواختی جریان و ناچیز بودن تغییرات فشار هیدرواستاتیک که از فرضیات اساسی مدل موج سینماتیک است می‌شود. دقت در نتایج این نتیجه را نیز عاید می‌سازد که خطای ناشی از ثابت فرض کردن  $\sigma_y$  کمتر از خطای حاصله در اثر نقض فرض یکنواختی جریان در روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» می‌باشد.



شکل ۴- مقایسه منحنی پیشروی اندازه‌گیری شده نوار اول و منحنی‌های پیشروی بینی شده به وسیله مدل‌های مختلف در آبیاری نواری.



شکل ۵- مقایسه منحنی پیشروی اندازه‌گیری شده نوار دوم و منحنی‌های پیشروی پیش بینی شده به وسیله مدل‌های مختلف در آبیاری نواری.



شکل ۶- مقایسه منحنی پیشروی اندازه‌گیری شده نوار سوم و منحنی‌های به دست آمده از مدل‌های مختلف در آبیاری نواری.

جدول ۳- مقادیر ضریب همبستگی و شیب بهترین خط برازشی از میان مقادیر زمان پیشروی پیش بینی شده به وسیله روش های مختلف که در مقابل داده های آزمایشگاهی مشابه رسم گردیده اند، در آزمایش هشتم رات و همکاران (۱۹۷۴).

شیب بهترین خط	ضریب همبستگی	روش
۰/۸۴۴۱	۰/۹۹۱۱	هال
۰/۹۲۷۷	۰/۹۸۷۸	هال تصحیح شده
۱/۳۵۳۱	۰/۹۶۲۸	صریح
۰/۹۲۵۸	۰/۹۸۸۲	فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر
۱/۳۰۴۲	۰/۹۸۳۵	فاکتور شکل جریان سطحی متغیر

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی و شیب بهترین خط برازشی از میان مقادیر زمان پیشروی پیش بینی شده به وسیله روش های مختلف که در مقابل داده های آزمایشگاهی مشابه رسم گردیده اند، در آزمایش سیزدهم رات و همکاران (۱۹۷۴).

شیب بهترین خط	ضریب همبستگی	روش
۰/۹۲۰۷	۰/۹۹۵۹	هال
۱/۰۰۶۶	۰/۹۹۰۲	هال تصحیح شده
۱/۵۴۱۱	۰/۹۴۱۱	صریح
۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۸۱	فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر
۱/۴۵۳	۰/۹۷۸۴	فاکتور شکل جریان سطحی متغیر



جدول ۵- مقادیر ضریب همبستگی و شیب بهترین خط برازشی از میان مقادیر زمان پیشروی پیش بینی شده به وسیله روش‌های مختلف که در مقابل داده‌های آزمایشگاهی مشابه رسم گردیده‌اند، در آزمایش چهاردهم رات و همکاران (۱۹۷۴).

شیب بهترین خط	ضریب همبستگی	روش
۰/۹۴۶۰	۰/۹۹۷	هال
۱/۰۱۲۴	۰/۹۹۴۱	هال تصحیح شده
۱/۲۹۷۲	۰/۹۶۹۹	صریح
۱/۰۱۱۵	۰/۹۹۳۸	فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر
۱/۴۹۰۲	۰/۹۸۰۱	فاکتور شکل جریان سطحی متغیر

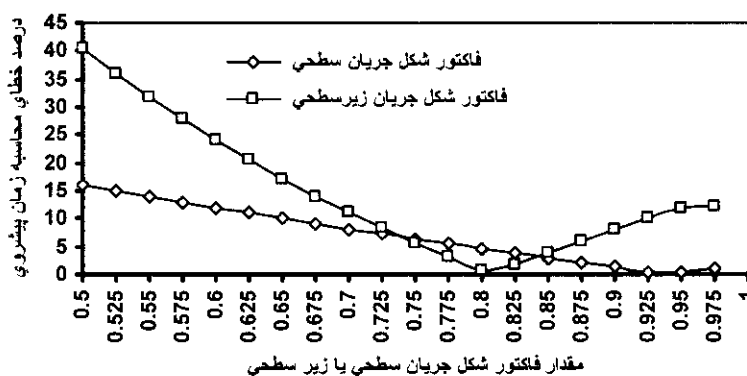
### تحلیل حساسیت

برای انجام تحلیل حساسیت، هر پارامتر (مانند فاکتور شکل جریان سطحی، فاکتور شکل جریان زیرسطحی، ضریب زبری مانینگ) را جداگانه در نظر گرفته و به مقادیر آنها پنج درصد افزودن گردید. با ثابت بودن پارامترهای دیگر، مقدار زمان پیشروی با استفاده از معادله بیلان حجمی محاسبه شده با مقایسه مقادیر به دست آمده از این راه و مقدار اندازه گیری شده مقدار خطا بر حسب درصد برآورد گردید. این اقدام برای هر یک از دیگر پارامترها نیز انجام گردید. مقادیر خطای ایجاد شده ناشی از خطای برآورد پارامترهای مختلف در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که با دوبرابر کردن مقادیر  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  حداکثر خطای ایجاد شده در برآورد زمان پیشروی به ترتیب (۱۴) و (۳۰) درصد می‌باشد. یعنی تاثیر فاکتور شکل جریان زیر سطحی در محاسبه زمان پیشروی بسیار بیشتر از تاثیر فاکتور شکل جریان سطحی می‌باشد. بنابراین، در نظر گرفتن مقداری مناسب برای فاکتور شکل جریان زیرسطحی یا استفاده از تابع زمانی مناسب به مقداری زیاد از خطای برآورد زمان پیش روی ممانعت می‌نماید.

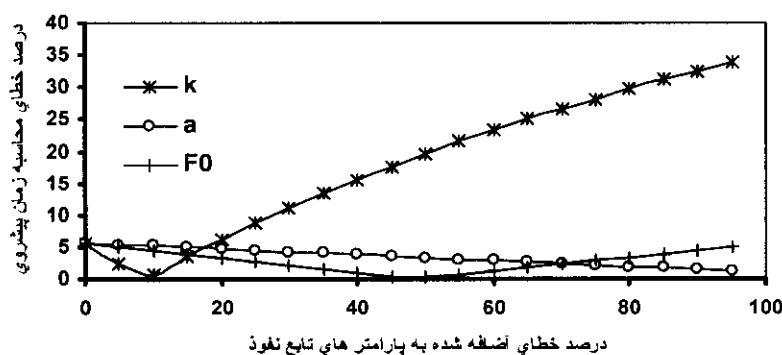
شکل ۸ حساسیت زمان پیشروی نسبت به خطای برآورد پارامترهای ثابت تابع نفوذ  $(k, a, f_0)$  را نشان می‌دهد. حداکثر میزان خطای ناشی از پارامترهای  $a, f_0$  در این حالت ۱۰ درصد می‌باشد، این در حالی است که با دوبرابر کردن مقدار پارامتر  $k$ ، زمان پیشروی پیش بینی شده به اندازه ۵۰ درصد خطا ایجاد می‌کند. بنابراین، حساسیت زمان پیشروی نسبت به پارامتر  $k$  بسیار بیشتر از دو

پارامتر دیگر بود.

به طور خلاصه و با توجه به نتایج بالا می توان این نکته را بر نتایج بالا افزود که در انتخاب روش حل معادله بیلان حجمی در نظر داشتن خصوصیات نوار یا شیار مورد مطالعه از جمله شیب دارای اهمیت زیادی است. در نوارها و شیارهای شیبدار روش «فاکتور شکل جریان سطحی متغیر» بهترین پیش بینی از پیشروی را به دست می دهد و در شیارها و نوارهای با شیب اندک روش «فاکتور شکل جریان زیر سطحی متغیر» دارای بالاترین دقت در برآورد زمان پیشروی می باشد.



شکل ۷ - میزان حساسیت زمان پیش روی (برحسب درصد) نسبت به خطای برآورد فاکتورهای شکل سطحی و زیرسطحی در فاصله ۱۰۰ متری از ابتدای شیار آزمایشی



شکل ۸ - میزان حساسیت زمان پیش روی (برحسب درصد) نسبت به خطای برآورد پارامترهای ثابت تابع نفوذ لویس - کوستیاکف در فاصله ۱۰۰ متر از ابتدای شیار آزمایشی

## منابع و مأخذ:

- 1- Alazba, A. A. 1999. Explicit volume balance model solution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(4): 273-279
- 2- Al-Azba, A. and Strelkoff T. 1994. Correct form of hall technique for border irrigation advance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(2): 292-307
- 3- Christiansen, J. E.; Bishop, A. A; Kiefer, F. W. Jr. and Fok, Y. S. 1966. Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. *Transaction of the ASAE*, 9(5): 671-674
- 4- Detar, W. R. 1989. Infiltration function from furrow stream advance. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 115(4): 722-730
- 5- Hall, W. A.; Haise, H. R. and Edminster, T. W. 1967. Estimating irrigation border flow. *Agriculture engineering*, 37(4): 263-265
- 6- James, L. G. 1988. Principles of farm irrigation system design. John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y.
- 7- Lewis, M. R., and Milne, W. E. 1938. Analysis of border irrigation. *Agricultural Engineering*, 19(June): 267-272
- 8- Roth, R. L.; Fonken, D. W.; Fangmeier, D. D. and Atchison, K. T. 1974. Data for border irrigation models. *Transaction of the ASAE*, 109(4): 157-161
- 9- Smardon, E. T.; Blair, A. W. and Reddle, D. L. 1988. Infiltration from irrigation advance.I: Theory. *J. Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE,114(1): 157-161
- 10- Valiantzas, J. D. 1997. Surface irrigation advance equation: variation of subsurface shape factor . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(4): 300-306
- 11- Valiantzas, J. D. 1997. Surface irrigation advance equation: variation of surface shape factor . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(4): 307-312
- 12- Walker, W. R. and Humpherys, A. S. 1983. Kinematic – wave furrow irrigation model . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109(4) : 377-392
- 13- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. 1987. Surface irrigation: theory and practice. Prentice – Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.