

## بررسی کاربرد روش های اصلاح شده در مدل ترکیبی بیلان حجمی-اینرسی صفر برای آبیاری جویچه‌ای

سودابه گلستانی<sup>۱</sup>، محمد شایان نژاد<sup>۲</sup> و سید حسن طباطبائی<sup>۳\*</sup>

### چکیده

دقت نتایجی که از مدل‌ها به دست می‌آید به کیفیت اطلاعات و انتخاب مدل مناسب بستگی دارد. به کارگیری مدل ترکیبی بیلان حجمی-اینرسی صفر (VB-ZI) توسط گلستانی و همکاران، باعث بهبود نتایج پیش‌بینی در آبیاری جویچه‌ای شده است. هدف این تحقیق، افزایش دقت مدل (VB-ZI) در تخمین مسافت پیشروی در آبیاری جویچه‌ای است. در این تحقیق از روش های اصلاح شده در محاسبه حجم ذخیره زیرسطحی استفاده شد. برای سنجش دقت مدل توسعه داده شده در آبیاری جویچه‌ای، از سه سری داده مربوط به مزارع با بافت و مشخصات مختلف استفاده شد. این اطلاعات شامل ضرایب هندسی و هیدرولیکی شکل مقطع جویچه، زمان پیشروی، دبی ورودی و خروجی جویچه، ضریب زبری مانینگ، شیب و ضرایب معادله نفوذ در هر جویچه است. سنجش مدل مذکور با استفاده از ضرایب آماره جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب جرم مانده (CRM) و کارایی مدل (ME) انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دقت مدل توسعه داده شده (MVB-ZI) در تخمین مسافت پیشروی، نسبت به مدل بیلان حجمی (VB) و همچنین نسبت به مدل (VB-ZI) افزایش یافته است. میزان RMSE برای مدل (MVB-ZI) در سری اول تا سوم داده‌ها به ترتیب ۲۶/۵۷، ۱۲/۷۱ و ۲۰/۴۹ به دست آمد که این مقادیر برای مدل (VB-ZI) به ترتیب ۳۰/۱۳، ۱۴/۶۳ و ۲۲/۴۸ است. مقدار CRM نیز برای سری اول، دوم و سوم داده‌ها به ترتیب ۰/۲۱۷، ۰/۲۷۲ و ۰/۳۰۳ به دست آمد که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل نسبت به مقادیر واقعی است. با توجه به سادگی مدل توسعه داده شده نسبت به مدل اینرسی-صفر و همچنین دقت بالاتر نسبت به مدل بیلان حجمی توصیه می‌شود از مدل توسعه داده شده، استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** جویچه، مسافت پیشروی، ذخیره سطحی، ذخیره زیرسطحی و مدل بیلان حجمی-اینرسی صفر اصلاح شده.

**ارجاع:** گلستانی س. شایان نژاد م. و طباطبائی س.ح. ۱۳۸۹. بررسی کاربرد روش های اصلاح شده در مدل ترکیبی بیلان حجمی-اینرسی صفر برای آبیاری جویچه‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۱۱-۱۸.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشجوی فعلی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

\*نویسنده مسئول: [stabaei@agr.sku.ac.ir](mailto:stabaei@agr.sku.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱/۱۱

## مقدمه

دسترسی به راندمان بالا در مصرف آب در مزرعه نیازمند طراحی دقیق و اجرای صحیح سیستم آبیاری است. در مدل سازی، پارامترهای ورودی، نقش مهمی در دقت نتایج نهایی به دست آمده دارند و دقت بیشتر در اندازه گیری آنها موجب اطمینان بیشتر به نتایج به دست آمده از مدل می شود. براساس ترکیب پارامترهای مختلف مؤثر در آبیاری، مدل های ریاضی متعددی ایجاد شده اند که در آنها با توجه به دقت ورودی ها، خروجی مناسب تخمین زده می شود. ورودی این مدل ها باید شامل پارامترهای طراحی و اجرا مانند توپوگرافی، طول، ضریب زبری، مشخصات نفوذ و هیدروگراف دبی خروجی باشد.

خروجی در این مدل ها شامل رواناب، مقدار آب نفوذ یافته، راندمان های آبیاری و غیره است که با مقایسه خروجی مدل و نتایج به دست آمده ناشی از اندازه گیری مزرعه ای میزان دقت مدل سنجیده می شود. مدل های ریاضی استفاده شده اکثراً براساس قانون بقای جرم به همراه یک فرضیه مشخص در مورد متوسط عمق جریان سطحی استوار است.

در مدل بیلان حجمی (VB<sup>1</sup>) فرضیات ساده کننده وجود دارد که این فرضیات باعث کاهش دقت مدل می شوند. یکی از محدودیت های مدل های VB وابستگی آنها به عمق نرمال است که این وابستگی کاربرد آن را به خصوص برای آبیاری های با شیب کم محدود می سازد. علاوه بر این انتخاب فاکتور شکل سطحی ثابت هم خطا ساز است (اسفندیاری و ماهشوری، ۱۹۹۷. والیانتر، ۲۰۰۱. واکر، ۲۰۰۵). والیانتر (۱۹۹۴) مدل VB را با استفاده از ترم مومنتم مدل اینرسی- صفر (ZI<sup>2</sup>) برای آبیاری نواری به نحوی اصلاح کرد که برای کلیه نوارهای مسطح یا شیب دار قابل استفاده باشد و وابستگی به عمق نرمال در آن از بین برود. به علاوه از یک فاکتور شکل اصلاح شده برای محاسبه حجم ذخیره سطحی<sup>۳</sup> استفاده کرده است. فرضیاتی که در این مدل اصلاح شده وجود دارد عبارتند از: ۱- دبی در واحد عرض نوار ثابت است. ۲- حجم نفوذ یافته به وسیله معادله کوستیاکف محاسبه می شود و ۳- برای جریان سطحی هم از یک تابع نمایی استفاده شده است که به صورت زیر است:

$$y(x, t) = Y(t) \times \left\{ 1 - \frac{x}{s(t)} \right\}^b \quad (1)$$

که در آن: Y(t) عمق در ابتدای نوار در زمان t (متر) و s(t) فاصله پیشروی در زمان t (متر) و b ضریب ثابت که وابسته به برخی خصوصیات جریان است. مقدار b براساس گزارش والیانتر (۱۹۹۴) با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود.

$$b = \frac{0.45}{(1+p)^{0.2}} \quad (2)$$

که p منعکس کننده خصوصیات دبی، شیب، و نفوذ است و از معادله زیر محاسبه می شود.

$$p = \left( \frac{q \times s_0 \times \left( \frac{y_n}{k} \right)^{1/a}}{y_n^2} \right) \quad (3)$$

که s<sub>0</sub> شیب مزرعه (متر بر متر)، n ضریب زبری مانینگ و q دبی ورودی نوار (متر مکعب بر ثانیه بر متر)، عمق نرمال (متر)، k و a ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف (Z = kt<sup>a</sup>) و Z نفوذ تجمعی (متر مکعب بر متر) است. نتایج به دست آمده با این روش در مقایسه با داده های صحرائی، دقت مناسب مدل در پیش بینی فاز پیشروی<sup>۴</sup> را نشان می دهد (والیانتر، ۱۹۹۴). نکته قابل توجه این است که دقت مدل های ارائه شده در پیش بینی فازهای مختلف آبیاری یکسان نیست. زیرا حساسیت مدل ها در فازهای مختلف نسبت به پارامترهای ورودی متفاوت است. لذا لازم است در انتخاب مدل مناسب به این نکته توجه لازم مبذول شود (هولزافل و همکاران، ۱۹۸۴).

گلستانی و همکاران (۱۳۸۹) از تابع نمایی مذکور برای محاسبه حجم ذخیره سطحی در آبیاری جویچه ای استفاده کردند. در معادله ۳، q دبی در واحد عرض نوار است. این

مقدار در جویچه به صورت  $\frac{Q}{w}$  در معادله استفاده شده است.

همچنین از روش حال (۱۹۵۶) برای محاسبه حجم ذخیره زیرسطحی<sup>۵</sup> استفاده کردند (والیانتر، ۱۹۹۴). ایشان از ترکیب این معادلات، مدل بیلان حجمی-اینرسی صفر (VB-ZI) را برای تخمین مسافت پیشروی در آبیاری جویچه ای استخراج کرده اند. مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مدل و مقادیر پیشروی اندازه گیری شده، دقت مدل را در تخمین

4- Advance phase  
5- Subsurface storage

1- Volume balance (VB)  
2- Zero inertia (ZI)  
3- Surface storage

حال (۱۹۵۶) دیده نمی‌شود. تکنیک اصلاح‌شده حال در محاسبه حجم ذخیره زیرسطحی به‌صورت زیر است:

$$\Delta v = \sum_{k=1}^{i-1} \left( \frac{z_{i-k+1} - z_{i-k-1}}{2} \right) (s_k - s_{k-1}) + \dots + \left( \frac{1}{2} - \sigma_z \right) z_1 (s_{i-1} - s_{i-2}) + \sigma_z z_1 (s_i - s_{i-1}) \quad (۴)$$

که در آن  $\sigma_z$  فاکتور شکل زیرسطحی است که به‌صورت  $\sigma_z = \frac{1}{1+a}$  محاسبه شده و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. با جانشینی حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی به‌دست آمده در معادله VB در فاز پیشروی (معادله ۵)، معادله نهایی به‌صورت معادله ۶ به‌دست می‌آید:

$$Q \times t = \Delta s + \Delta v \quad (۵)$$

$$Q \times t = \frac{1}{\sigma_2 b + 1} [\sigma_1 Y_i \sigma_2 s_i - \sigma_1 Y_{i-1} \sigma_2 s_{i-1}] + \dots + \sum_{k=1}^{i-1} \left( \frac{z_{i-k+1} - z_{i-k-1}}{2} \right) (s_k - s_{k-1}) + \dots + \left( \frac{1}{2} - \sigma_z \right) z_1 (s_{i-1} - s_{i-2}) + \sigma_z z_1 (s_i - s_{i-1}) \quad (۶)$$

در معادله بالا  $\Delta s$  حجم ذخیره زیرسطحی (مترمکعب)،  $\Delta v$  حجم ذخیره سطحی (مترمکعب)،  $Q$  جریان ورودی به جویچه (مترمکعب بر دقیقه)،  $t$  مدت زمان جریان (دقیقه)،  $w$  عرض جویچه (متر)،  $Y$  عمق آب در ابتدا در گامهای زمانی مختلف (متر) و  $s_i$  مسافت پیشروی در گامهای زمانی مختلف (متر) است. اگر این معادله برحسب فاکتور  $S_i$  مرتب شود تابع به‌صورت:

$$s_i = \frac{(\sigma_2 b + 1)(Q \times t) + \sigma_z z_1 s_{i-1} (\sigma_2 b + 1) + (\sigma_2 b + 1) \left( \frac{1}{2} - \sigma_z \right) z_1 (s_{i-1} - s_{i-2})}{(\sigma_2 b + 1) \sigma_z z_1 + \sigma_1 Y_i \sigma_2} + \dots - \frac{(\sigma_2 b + 1) \sum_{k=1}^{i-1} \left( \frac{z_{i-k+1} - z_{i-k-1}}{2} \right) (s_k - s_{k-1}) + \sigma_1 Y_{i-1} \sigma_2 s_{i-1}}{(\sigma_2 b + 1) \sigma_z z_1 + \sigma_1 Y_i \sigma_2} \quad (۷)$$

به‌دست می‌آید که به‌صورت خلاصه شده به‌صورت:

$$s_i = \frac{M}{\sigma_1 Y_i \sigma_2 + (\sigma_2 b + 1) \sigma_z z_1} \quad (۸)$$

است. در این معادله  $M$  صورت کسر معادله ۷ است. در معادله ۸ دو عامل مجهول  $Y, s$  دیده می‌شود که لازم است مقدار این دو عامل در هر بازه زمانی و همزمان محاسبه شوند. برای محاسبه عمق مجهول از ترم مومنتم مدل اینرسی صفر  $\left( \frac{\partial y}{\partial x} = s_0 - s_f \right)$ ، استفاده شده است. در صورتی که مقدار  $s_f$  از معادله مانینگ محاسبه شده و در

مسافت پیشروی نسبت به مدل بیلان حجمی معمولی نشان می‌دهد.

در روش حال (۱۹۵۶) مقدار نفوذ با استفاده از قانون دوزنقه تا گام زمانی  $i-1$  محاسبه شده و از فاکتور شکل زیر سطحی برای لحاظ کردن خمیدگی نوک پروفیل نفوذ در آخرین گام زمانی استفاده شده است. درحالی‌که خمیدگی پروفیل نفوذ در گام زمانی  $i-1$  نیز دیده می‌شود و لحاظ کردن ضریب شکل پروفیل زیرسطحی جریان فقط در آخرین سلول، باعث تخمین بیشتر حجم ذخیره زیرسطحی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی می‌شود. در روش اصلاح‌شده حال (آلازا و استرلکف، ۱۹۹۴) میزان این خمیدگی در هر دو گام زمانی در نظر گرفته شده است تا تخمین حجم ذخیره زیرسطحی با دقت بیشتری انجام شود. با توجه به تأثیر اجزا مدل بیلان حجمی در نتایج نهایی به‌دست آمده، ضروری است که برای تخمین دقیق این مقادیر کوشش بیشتری صورت گیرد. با بررسی ترم ذخیره زیرسطحی در مدل VB-ZI، به‌نظر می‌رسد که این جزء از مدل را می‌توان با دقت بیشتری تخمین زد و این امر در نهایت منجر به دقت بیشتر مدل در تخمین مسافت پیشروی می‌شود.

هدف از این تحقیق افزایش دقت مدل ترکیبی بیلان حجمی-اینرسی صفر (گلستانی و همکاران، ۱۳۸۹) در پیش‌بینی مسافت پیشروی در آبیاری جویچه‌ای با استفاده از روش اصلاح‌شده حال (آلازا و استرلکف، ۱۹۹۴) در تخمین حجم ذخیره زیرسطحی است.

## مواد و روش‌ها

### توسعه مدل

در مدل MVB-ZI برای آبیاری جویچه‌ای، محاسبه حجم ذخیره سطحی از معادله ۱ استفاده شده است که شرح معادله و مطالب مربوط به آن در مقاله گلستانی و همکاران (۱۳۸۹) آورده شده است و لذا در اینجا از ذکر آن خودداری می‌شود.

در روش اصلاح‌شده حال (آلازا و استرلکف، ۱۹۹۴) برای محاسبه حجم ذخیره زیرسطحی از جزء اصلاحی  $\left( \frac{1}{2} - \sigma_z \right) z_1 (s_{i-1} - s_{i-2})$

در ۶۰ کیلومتری غرب سیدنی جمع‌آوری شده است. سری سوم، اطلاعات پیشروی جمع‌آوری شده توسط اسفندیاری (۱۹۹۵) مربوط به ۲۲ جویچه است که از یک مزرعه تحقیقاتی با بافت شنی-رسی-لومی واقع در ۶۰ کیلومتری غرب سیدنی جمع‌آوری شده است. در این سه سری داده، اطلاعات مربوط به نفوذ، سطح مقطع جریان، دبی جریان ورودی، بافت خاک، شیب زمین، رطوبت قبل از آبیاری، قرائت پیشروی در ایستگاه‌ها جمع‌آوری و استفاده شده است. جدول ۱ محدوده اطلاعات مربوط به جویچه‌ها در هر سری از داده‌ها را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی دقت مدل توسعه داده‌شده، در سه سری اطلاعات، مسافت پیشروی با استفاده از سه مدل VB، VB-ZI و MVB-ZI تخمین زده شد. برای مقایسه نتایج به دست آمده از پارامتر آماری (RMSEI) استفاده شد. این پارامتر با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_p)^2}{n}} \quad (14)$$

که در آن:  $x_o$  = داده مشاهداتی (مسافت پیشروی)  $x_p$  = داده تخمین زده شده با مدل (مسافت پیشروی) و  $n$  = تعداد داده‌ها است. همچنین از آماره ضریب جرم مانده ( $CRM^1$ ) و ضریب کارایی مدل ( $ME^2$ ) استفاده شد که معادلات به شرح زیر است.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_o)}{\sum_{i=1}^n x_o} \quad (15)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (x_p - x_o)^2}{\sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x})^2} \quad (16)$$

در صورتی که CRM برابر با صفر باشد، کارایی مدل حداکثر است. مقادیر مثبت و منفی آن نشان‌دهنده بیش برآوردی یا کم برآوردی مدل نسبت به مقادیر واقعی است. مقدار ME نیز از منفی بی‌نهایت برای بدترین حالت تا ۱ برای بهترین حالت تغییر می‌کند.

ترم مومنتم جانشین شود، همچنین به جای پارامتر  $\gamma$  از تابع نمایی نسبت داده شده به پروفیل سطحی (معادله ۱) استفاده و نسبت به فاصله مشتق گرفته شود و در ترم مومنتم معادله اینرسی صفر جانشین شود، پس از ساده‌سازی، معادله نهایی به دست آمده برحسب  $S_i$  مرتب شده و در معادله ۸ جانشین می‌شود. معادله ۸ پس از جانشینی مقادیر به دست آمده برحسب متغیر  $\gamma$  مرتب می‌شود و معادله ۹ به شرح زیر برای محاسبه عمق جریان به دست می‌آید.

$$f(Y) = c_1 Y_i^{\sigma_2+1} + c_2 Y_i + c_3 Y_i^{(-\sigma_2 \rho_2)} + c_4 \quad (9)$$

ضرایب ثابت در این معادله عبارتند از:

$$c_1 = \frac{-b\sigma_1 w}{M} \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{-\sigma_z z_1 (\sigma_2 b^2 + b)}{M} \quad (11)$$

$$c_3 = \frac{Q^2 \times n^2}{3600 p_1 (\sigma_1)^{\rho_2}} \quad (12)$$

$$c_4 = -S_0 \quad (13)$$

که در آن  $\rho_1, \rho_2$  ضرایب هیدرولیکی جویچه و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. برای محاسبه مسافت پیشروی ( $S_i$ ) در هر گام زمانی، ابتدا عمق جریان با استفاده از معادله ۹ و روش نیوتن-رافسون محاسبه و سپس با استفاده از معادله ۸ و استفاده از روش سعی و خطا و مقایسه مقادیر محاسباتی و تخمین زده شده، مسافت پیشروی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر به دست آمده در هر بازه زمانی به عنوان شرایط مرزی در گام زمانی بعدی استفاده می‌شود. روند محاسبات با استفاده از برنامه نویسی در محیط Q.BASIC دنبال می‌شود.

## تأیید مدل

اطلاعات پیشروی مورد استفاده در این تحقیق، از سه مزرعه با بافت‌های مختلف (جدول ۱) جمع‌آوری شد. سری اول اطلاعات در تابستان ۱۳۸۶ از ۹ جویچه با طول‌های مختلف در مزرعه دشت ده در نزدیکی دانشگاه شهرکرد توسط گلستانی (۱۳۸۶) تهیه شد. بافت خاک در این سری از اطلاعات رسی-لومی است. سری دوم، اطلاعات پیشروی جمع‌آوری شده توسط اسفندیاری (۱۹۹۵) مربوط به ۲۳ جویچه است که از یک مزرعه تحقیقاتی با بافت شنی واقع

1- Coefficient of residual mass (CRM)

2- Model efficiency (EF)

جدول ۱- محدوده اطلاعات جویچه‌های آزمایشی در هر سری از داده‌ها

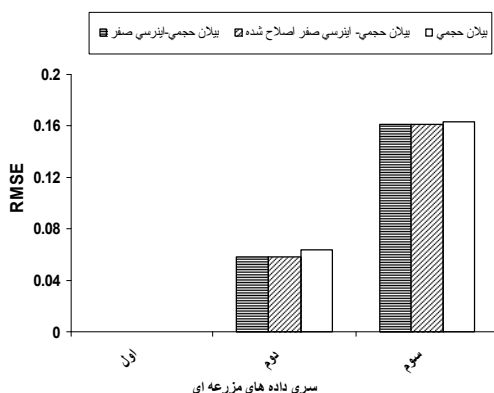
پارامتر	تعریف	واحد	سری اول داده	سری دوم داده	سری سوم داده
منبع داده ها	-	-	گلستانی (۱۳۸۶)	اسفندیاری (۱۹۹۵)	اسفندیاری (۱۹۹۵)
بافت خاک	-	-	رسی-لومی	شنی	شنی-رسی-لومی
$L$	طول جویچه	$m$	۱۵۳-۱۹۸	۵۹	۱۲۵
$K$	ضریب معادله نفوذ	$m^3 \cdot \min^{-a} \cdot m^{-1}$	۰/۰۱۹۶-۰/۰۱۷۱	۰/۰۰۴۷۳-۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۲۹-۰/۰۰۳۴
$a$	توان معادله نفوذ	-	۰/۰۱۱-۰/۴۷۸	۰/۶۲۲-۰/۹۶۹	۰/۰۲۰-۰/۸۱۴
$n$	ضریب زبری مانینگ	-	۰/۰۲	۰/۰۲-۰/۰۳۵	۰/۰۱-۰/۰۲۳
$Q$	دبی جویچه	$m^3 / \min$	۰/۰۱۵۶۶-۰/۰۸۵۵	۰/۰۲۱۶-۰/۱۰۵	۰/۰۱۰۵-۰/۱۸۶۶
$\rho_1$	ضریب هیدرولیکی مقطع	-	۰/۲۱۳-۲/۶۰۱	۰/۲۱۲-۲/۷۴	۰/۰۸۸۹-۲/۳۰۰
$\rho_2$	ضریب هیدرولیکی مقطع	-	۲/۴۶۴-۲/۹۸	۲/۶۲-۳/۱۴۵	۲/۸۱۷-۳/۱۱۶
$\sigma_1$	ضریب هندسی مقطع	$m^{1-2\sigma_2}$	۰/۴۳۴-۲/۰۲۶	۰/۲۱۵-۰/۴۷۶	۰/۲۲۱-۰/۴۱۹
$\sigma_2$	ضریب هندسی مقطع	-	۱/۲۷۰-۲/۴۳۱	۱/۰۵۹-۱/۷۴	۱/۰۶۴-۱/۲۵۶
$S_0$	شیب کف جویچه	$m / m$	۰/۰۱۱۳-۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۱۷-۰/۰۰۳۳۲	۰/۰۰۰۱۳۵-۰/۰۰۱۴
$w$	عرض جویچه	$m$	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۹۵

### نتایج و بحث

به‌منظور تعیین دقت MVB-ZI در برابر مدل VB و VB-ZI، از اطلاعات سه سری داده صحرائی در فاز پیشروی استفاده شد. نتایج بدست آمده به شرح زیر است.

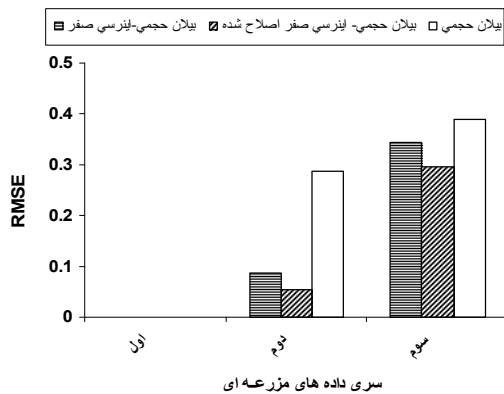
ابتدا پروفیل سطحی جریان در جویچه، در دو بافت شنی و شنی-رسی-لومی و عمق آب در ایستگاه‌های مختلف بر اساس تابع نمایی نسبت داده شده (معادله ۱) شبیه سازی و حجم ذخیره سطحی محاسبه شد. سپس برای تعیین میزان دقت تابع نمایی از نمایه‌های آماری ذکر شده، استفاده شد. نتایج نشان داد که در بافت شنی، RMSE حجم ذخیره سطحی بدست آمده با مدل VB-ZI در مسیر پیشروی برابر با ۰/۰۵۸ مترمکعب و RMSE حجم ذخیره سطحی تخمین زده شده با مدل VB در مسیر پیشروی ۰/۰۶۴ مترمکعب است. ضریب CRM در خاک شنی در مدل VB برابر ۰/۵۳ و در مدل MVB-ZI برابر ۰/۴۱ است. همچنین ضریب راندمان ME مدل VB در تخمین حجم ذخیره سطحی ۱۸/۶۴- و در مدل VB-ZI برابر با ۱۶/۲۶- بدست آمده است. در بافت شنی-رسی-لومی نیز RMSE حجم ذخیره سطحی بدست آمده با مدل VB-ZI در فاز پیشروی برابر با ۰/۱۶۱ مترمکعب و RMSE حجم ذخیره سطحی تخمین زده شده با مدل VB در فاز پیشروی ۰/۱۶۴ مترمکعب است. در این بافت ضریب CRM مدل VB برابر ۰/۷۵ و

ضریب CRM مدل VB-ZI نیز ۰/۶۲ بدست آمد. ضریب ME در این بافت و در مدل VB ۱۷/۴۵- و در مدل ME ۱۵/۱۴- بدست آمده است. مقادیر RMSE و CRM و ME بدست آمده دقت تابع نمایی را در تخمین حجم ذخیره سطحی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در مدل MVB-ZI نیز از تابع نمایی ذکر شده (معادله ۱) برای تخمین حجم ذخیره سطحی استفاده شده است، می‌توان دقت تابع فوق را در تخمین حجم ذخیره سطحی در این مدل نیز، تأیید کرد. لازم به ذکر است که در سری اول داده ها به دلیل عدم وجود داده‌های عمق آب در ایستگاه و زمان‌های مختلف امکان محاسبه خطای شبیه‌سازی پروفیل سطحی وجود نداشت.



شکل ۱- مقایسه RMSE مدل‌ها در پیش‌بینی حجم ذخیره سطحی

پیشروی ۲۴/۵۸-، در مدل VB-ZI ۱۹/۴۸-، در مدل MVB-ZI ۱۸/۹۳- به دست آمد.



شکل ۲- مقایسه RMSE سه مدل در پیش‌بینی حجم ذخیره زیرسطحی در دسته‌های مختلف داده‌ها

در سری دوم داده‌ها و در بافت شنی RMSE مسافت پیشروی تخمین زده شده با مدل VB-ZI ۱۴/۶۳ متر و RMSE تخمین زده شده با مدل VB ۱۶/۸۵ متر و RMSE مقادیر تخمین زده شده با مدل MVB-ZI ۱۲/۷۱ متر است. ضریب CRM مدل VB ۰/۴۳، مدل VB-ZI ۰/۳۶۲، مدل بیلان MVB-ZI ۰/۲۷۲ محاسبه شد. ضریب ME محاسبه شده در مدل VB ۲۰/۸۱-، در مدل VB-ZI ۱۸/۴۴-، و در مدل MVB-ZI ۱۷/۲۳- به دست آمد.

در سری سوم داده‌ها در بافت شنی-رسی-لومی RMSE تخمین زده شده با مدل VB-ZI ۲۲/۴۸ متر و RMSE تخمین زده شده با مدل VB ۲۴ متر گزارش می‌شود. در حالی که RMSE مسافت پیشروی تخمین زده شده با مدل MVB-ZI ۲۰/۴۹ متر است. ضریب CRM مدل VB ۰/۳۸۱، مدل VB-ZI ۰/۳۲۵، مدل MVB-ZI ۰/۳۰۳ به دست آمده است. ضریب ME مدل VB ۲۳/۳۶-، مدل VB-ZI ۲۰/۴۱-، مدل MVB-ZI برابر با ۱۸/۵۷- محاسبه شد.

در تمام نتایج به دست آمده ضریب CRM مثبت بوده است. یعنی مدلها در مقایسه با مقادیر حقیقی، تخمین بیشتری برای حجم ذخیره سطحی، حجم ذخیره زیرسطحی و مسافت پیشروی داشته‌اند. که البته مقدار آن در مدل MVB-ZI کمتر از دو مدل دیگر است. همچنین مقادیر ME

حجم ذخیره زیرسطحی تخمین زده شده با سه مدل نیز آزمایش شد. در بافت شنی RMSE حجم ذخیره زیرسطحی تخمین زده شده با مدل VB، VB-ZI و مدل MVB-ZI در مسیر پیشروی به ترتیب ۰/۲۸۸، ۰/۰۸۷ و ۰/۰۵۳ متر مکعب است (شکل ۲). ضریب CRM محاسبه شده در بافت شنی در مدل VB، VB-ZI و MVB-ZI به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۷۵، ۰/۶۶ به دست آمد. ضریب ME نیز در سه مدل به ترتیب ۲۱/۱۹-، ۱۸/۶۹-، ۱۷/۲۳- به دست آمد. در بافت شنی-رسی-لومی نیز RMSE حجم ذخیره زیرسطحی تخمین زده شده با مدل VB، VB-ZI و مدل MVB-ZI در مسیر پیشروی به ترتیب ۰/۳۸۸، ۰/۳۴۴ و ۰/۲۹۷ محاسبه شد. ضریب CRM در مدل VB، VB-ZI، MVB-ZI به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۹، ۰/۶۳ به دست آمده است. ضریب ME نیز در این سه مدل به ترتیب ۲۱/۷۵-، ۱۷/۶۲-، ۱۶/۱۴- به دست آمد. مقایسه مقادیر به دست آمده دقت بیشتر مدل MVB-ZI را در مقایسه با مدل VB-ZI در تخمین حجم ذخیره زیرسطحی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر نتایج به خوبی نشان می‌دهد که لحاظ کردن خمیدگی پروفیل نفوذ در گام زمانی  $t$  و گام زمانی  $t-1$  که در روش اصلاح شده حال به آن توجه شده است، باعث تخمین مناسب‌تر حجم ذخیره زیرسطحی نسبت به استفاده از روش حال و قانون دوزنقه در تمام گام‌های زمانی می‌شود. از آنجا که در سری اول داده‌ها قرائت اعماق آب در فاز پیشروی در ایستگاه‌های مختلف انجام نشده است امکان مقایسه ذخیره سطحی و زیرسطحی تخمین زده شده وجود ندارد. اما انتظار می‌رود که با توجه به تعداد زیاد نمونه‌های تست شده قبلی و نزدیکی خصوصیات جویچه‌ها، مشابه چنین نتایجی در این سری از داده‌ها نیز به دست آید.

شکل ۳ خطای RMSE مدلها در پیش‌بینی مسافت پیشروی را در سه سری داده‌ها نشان می‌دهد. در سری اول داده‌ها و در بافت رسی-لومی RMSE مسافت پیشروی تخمین زده شده با مدل MVB-ZI ۲۶/۵۷ متر، RMSE مسافت پیشروی تخمین زده شده با مدل VB-ZI ۳۰/۱۳ متر و RMSE مسافت پیشروی تخمین زده شده با مدل VB ۳۴/۷۶ متر به دست آمد (شکل ۳). ضریب CRM مدل VB ۰/۳۸، مدل VB-ZI ۰/۲۹۵، مدل MVB-ZI ۰/۲۱۷ محاسبه شد. ضریب ME مدل VB در تخمین مسافت

پیش‌بینی فاز پیشروی در آبیاری نواری تأیید کرد. گلستانی و همکاران (۱۳۸۹) نیز دقت مناسب مدل توسعه داده خود را در پیش‌بینی فاز پیشروی در آبیاری جویچه‌ای تأیید کردند. این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از توابع مناسب برای تخمین ذخیره سطحی و ذخیره زیرسطحی دقت پیش‌بینی مدل را افزایش داده است.

تغییر بافت خاک در میزان دقت مدل در تخمین نتایج نهایی تأثیر بسیار دارد. در بافت سبک به دلیل بالا بودن ضرایب نفوذ، حجم بیشتری از جریان در مسیر پیشروی نفوذ می‌کند و ذخیره سطحی درصد کمتری از کل جریان را در برمی‌گیرد. لذا تخمین دقیق حجم ذخیره زیرسطحی می‌تواند تأثیر بیشتری در تخمین مقادیر پیش‌بینی شده نهایی داشته باشد که این کار با استفاده از روش اصلاح شده حال امکان‌پذیر است. همچنین بررسی تأثیر عوامل مختلف بر دقت مدل نشان داد که حساسیت مدل به تغییر بافت خاک و ضرایب نفوذ و همچنین دبی ورودی جریان، بیشتر از سایر عوامل مانند شیب زمین است و لازم است در برداشت این داده‌ها دقت بیشتر مبذول شود.

### نتیجه‌گیری

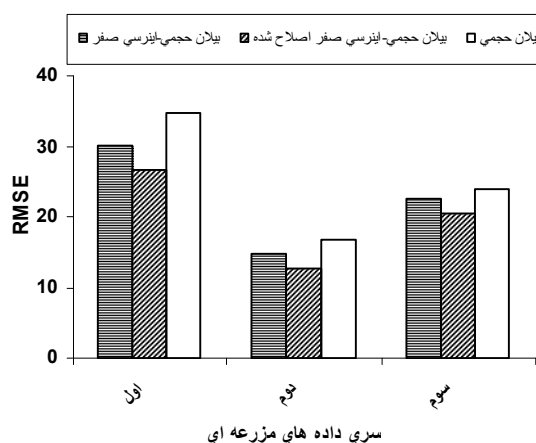
بر مبنای تحقیق حاضر نتایج زیر به دست آمد:

- حجم ذخیره زیرسطحی در روش حال اصلاح شده با مقادیر واقعی مطابقت بیشتری دارد.
- استفاده از روش اصلاح شده حال و تخمین دقیق‌تر حجم ذخیره زیرسطحی، به خوبی می‌تواند دقت مدل را در تخمین مسافت پیشروی نسبت به روش حال افزایش دهد.

### سپاسگزاری

در این تحقیق از برخی داده‌های پایان‌نامه کارشناسی ارشد گلستانی از دانشگاه شهرکرد و رساله دکتری اسفندیاری از University of Western Sydney استفاده شده است که بدین وسیله از ایشان سپاسگزاری می‌شود. همچنین از نظرات ارزشمند آقای دکتر صدرالدینی از دانشگاه تبریز که باعث ارتقا کیفیت مقاله شدند تقدیر می‌شود.

به دست آمده در سه مدل منفی است و در عین حال مقدار به دست آمده از مدل MVB-ZI به ۱ در هر سه مدل نزدیک‌تر است که دقت مدل مذکور را در تخمین مقادیر مورد نظر تأیید می‌کند.



شکل ۳- مقایسه RMSE سه مدل در پیش‌بینی مسافت پیشروی در دسته‌های مختلف داده‌ها

### بحث

با توجه به این که در هر سه مدل از یک سری داده مشخص استفاده شده است آنچه باعث ایجاد این اختلاف در نتایج نهایی مدل‌ها شده است، استفاده از توابع مختلف در تخمین حجم ذخیره سطحی و زیرسطحی است. نتایج به دست آمده نشان داده است که با استفاده از تابع نمایی ذکر شده (معادله ۱) حجم ذخیره سطحی با دقت بیشتری تخمین زده شده و مقادیر تخمین زده شده نسبت به مدل VB نزدیکی بیشتری با مقادیر مشاهداتی دارد. همچنین حجم ذخیره زیرسطحی نیز در مدل VB-ZI با دقت بیشتری نسبت به مدل VB برآورد شد و در مدل MVB-ZI نیز دقت مدل در تخمین حجم ذخیره زیرسطحی نسبت به هر دو مدل افزایش بیشتری یافت. در نهایت با توجه به اصلاح اجزاء مدل MVB-ZI، دقت در تخمین مسافت پیشروی افزایش می‌یابد و مقادیر پارامترهای آماری گزارش شده نیز این مطلب را تأیید می‌کند.

نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط والیانتر (۱۹۹۴) و گلستانی و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد. والیانتر (۱۹۹۴) با مقایسه داده‌های صحرايي و مقادیر تخمین زده شده، دقت مناسب مدل توسعه داده خود را در

## منابع

- ۱- طباطبائی س.ح. ۱۳۸۳. تغییرات زمانی معادله نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای متأثر از بافت خاک و مدیریت خاک. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۲- عباسی ف. محمودیان شوشتری م. خالقی م.ح. و کشاورز ع. ۱۳۷۵. تحقیق و مطالعه بروی مدل‌های آبیاری نواری و انتخاب مدل بهینه. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- ۳- گلستانی س. ۱۳۸۶. استفاده از ترم مومنت معادله اینرسی صفر جهت بهبود جریان در آبیاری جویچه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.
- ۴- گلستانی س. طباطبائی س. ح. و شایان‌نژاد م. ۱۳۸۹. اصلاح مدل بیلان حجمی با بهبود ترم ذخیره سطحی برای آبیاری جویچه‌ای. دانش کشاورزی دانشگاه تبریز (زیر چاپ)
- 5- Alazba A. 1994. Correct form of hall technique for border irrigation advance. Journal of Irrig & Drain Eng, ASCE. 120(2):292-307.
- 6- Esfandiari M. 1995. Evaluation of furrow irrigation models for south-east Australia. Ph.D. Dissertation University of Western Sydney, Sydney, Australia.
- 7- Esfandiari M. and Maheshwari B.L. 1997. Field value of the shape factor for estimating surface storage in furrow on a clay soil. Journal of Irrigation Science: 531-535.
- 8- Holzapfeel E.A. Marino M.A. and Chaves-morales J. 1984. Comparison and selection of furrow irrigation model. Journal of Agricultural Water Management. 9:105-125.
- 9- Valiantzas J. D. 1994. Border advance using improved volume-balance model. Journal of Irrig & Drain Eng, ASCE. 119(6):1006-1012.
- 10- Valiantzas D. 2001. Optimal furrow design, I: time of advance equation. Journal Irrig & Drain Eng, ASCE. 127(4): 201-208.