

## شبیه‌سازی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در شرایط غیر ماندگار، با استفاده

### از تکنیک تحلیل پویایی سیستم

حامد نوذری، عبدالمجید لیاقت\*، مجید خیاط خلقی و عسگر صدیقی\*\*

\* نگارنده مسئول: نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶۱(۲۲۴۱۱۱۹)، پیام‌نگار: aliaghat@ut.ac.ir

\*\* به‌ترتیب دانشجوی دکتری؛ دانشیاران گروه آبیاری و آبادانی دانشکده آب و خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ و کارشناس ارشد مهندسی صنایع مؤسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۲۶

### چکیده

روش تحلیل پویایی سیستم یکی از روش‌های شبیه‌سازی است که به صورت شی‌گرا و مبتنی بر روابط بازخورد است. این روش علاوه بر تشریح پویایی سیستم‌های پیچیده، می‌تواند قابلیت مدل‌سازی ساده و راحت را برای کاربر ایجاد کند و به عنوان ابزاری مفید در تصمیم‌گیری در مسائل مهندسی به کار رود. در این مقاله، با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم و به کمک معادلات بیان آبی در سطح خاک و ناحیه غیر اشباع، عملکرد یک سیستم زهکشی زیرزمینی در شرایط غیر ماندگار به طور کامل مدل‌سازی شد؛ و به منظور بررسی نتایج مدل، علاوه بر آنالیز حساسیت و آزمون شرایط حدی، مطالعه موردی روی مزرعه ۲۵ هکتاری ARC 2-5 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد امیرکبیر که یکی از واحدهای هفتگانه طرح توسعه نیشکر است، صورت گرفت. آبیاری این مزرعه در اوایل سال ۱۳۸۳ شروع شد و ۵ ماه طول کشید. با اجرای مدل فوق، تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر مدیریت تراز سطح آب و مقدار خروجی زه آب به صورت روزانه بررسی شد. تجزیه و تحلیل آماری بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شد نشان داد که انحراف معیار برای سطوح ایستایی و شدت زه آب خروجی به ترتیب ۱۰/۲ سانتی‌متر و ۰/۱۳ سانتی‌متر بر روز است. نتایج حاکی از آن است که مدل حاضر می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی برای مشاوران، کارفرمایان، پیمانکاران، و سایر علاقه‌مند این رشته به کار گرفته شود.

### واژه‌های کلیدی

تحلیل پویایی سیستم، تراز سطح آب، زهکشی زیرزمینی، شرایط غیر ماندگار، کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر

### مقدمه

احداث سیستم‌های زهکشی زیرزمینی است. بنابراین، طراحی و اجرای صحیح زهکشی‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد و هرگونه نقصی می‌تواند موجب تجمع نمک در خاک، از دست دادن تدریجی حاصلخیزی خاک، و پایین آمدن بازدهی محصول شود.

اما بررسی هر پدیده به صورت آزمایشگاهی هزینه‌بر و زمان‌بر است و نیاز به ساخت مدل فیزیکی دارد و به علاوه ثابت نگه‌داشتن شرایط آزمایش در طول تحقیق نیز بسیار دشوار خواهد بود، از این رو به منظور توسعه مدل‌های

شوری خاک یکی از مسائل اصلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با سطح ایستایی کم عمق است. ایران از لحاظ موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک است که حدود ۳۰ درصد از اراضی قابل کشت آن به دلیل جریان رو به بالا<sup>۱</sup> از سطح آب زیرزمینی کم عمق، شور شده است (Jorenush & Sepaskhah, 2003). لذا تنها راه بهره‌برداری مفید و مطلوب از این اراضی که اغلب فاقد سیستم زهکشی مناسب نیز هستند، تقویت و

زهکش‌ها و پروفیل شوری در خاک (بالا و پایین لوله زهکش) (Wahba & Christen, 2006).

بنابراین، بخشی از شوری زهاب از کیفیت آب خارج شده از منطقه توسعه ریشه و بخش دیگر از کیفیت آب زیر سطح زهکش ناشی می‌شود. حال اگر کیفیت آب زیر سطح زهکش نامناسب باشد، زهاب ورودی به زهکش کیفیت پایینی خواهد داشت و در پایین دست مشکلاتی را از لحاظ زیست محیطی و کشاورزی به وجود می‌آورد. لذا تهیه مدل کامپیوتری که بتواند پیچیدگی رفتار و تعاملات اجزای سیستم زهکشی را با دیگر سیستم‌های موجود، مانند محیط زیست، طی زمان شبیه‌سازی کند و بازتاب عملکرد این سیستم را نسبت به اتخاذ یک سیاست نشان دهد، ضروری به نظر می‌رسد.

یکی از روش‌های بسیار مؤثر موجود برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، پویایی سیستم (System Dynamics) است که یکی از قدرتمندترین و بصری‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی است. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نائل می‌سازند. دامنه کاربردی این روش بسیار وسیع است و به خصوص بر کاربرد آن در مسائل اجتماعی و اقتصادی تاکید بسیار می‌شود. در سال‌های اخیر، برای مدل کردن سیستم‌ها در تحقیقات مهندسی آب تمایل به استفاده از این تکنیک بیشتر شده است؛ از جمله می‌توان به تحقیقات پالمر و همکاران (Palmer *et al.*, 1993) اشاره کرد که فعالیت‌های زیادی در حوضه رودخانه با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی داشته‌اند. احمد و سیمینویچ (Ahmad & Simonovic, 2000) نیز با استفاده از روش فوق، سیستم مدیریت سیلاب را در مخزن مدل‌سازی کردند.

همچنین کارهای متعدد دیگری در زمینه استفاده از این روش در مدل‌سازی جامع منابع آب صورت گرفته

کامپیوتری تحقیقات زیادی شده است که از آن جمله می‌توان به مدل Drainmod اشاره کرد که به منظور شبیه‌سازی سطح ایستابی و زهاب خروجی زهکش‌های زیرزمینی در مناطق مرطوب با سطح ایستابی کم عمق توسعه یافته است (Skaggs, 1980). همچنین، مدل غیر خطی MINOS که بر مبنای روش بهینه‌سازی استوار است، به منظور طراحی زهکش‌های زیرزمینی ارائه شده است. در این مدل، معادله ریچارد به صورت یک قید به کار رفته است (Das, 2000). از تکین (Oztekin, 2001) با استفاده از روش المان محدود و به کمک مدل HYDRUS-2D، رابطه بین ارتفاع سطح ایستابی و دبی خروجی زهکش‌ها را در خاک‌های مطابق بررسی کرد. علاوه بر این، نتایج تحقیقات زیاد در زمینه مسیر جریان به سمت لوله‌های زهکش در اعماق مختلف حاکی از وابستگی مسیر جریان به عمقی است که لوله‌های زهکش نصب می‌شوند. در این خصوص، محققان نشان دادند شوری زهاب نیز تابعی از مسیر حرکت جریان است بدین معنی که زهاب زهکش‌های عمیق به مراتب شورتر از زهکش‌های کم‌عمق‌تر است (Fio & Deverel, 1991). طبق تحقیق جری و همکاران (Jury *et al.*, 2003)، اگر لوله‌های زهکش دقیقاً روی لایه غیر قابل نفوذ نصب شوند، زهاب حاصل از جریان‌ات فوقانی آب به سمت زهکش است و اگر لوله‌های زهکش در بالای لایه غیر قابل نفوذ و با فاصله‌ای نسبت به آن نصب شوند، بخشی از زهاب ناشی از جریان‌اتی خواهد بود که از زیر لوله زهکش وارد آن می‌شود. از سوی دیگر، فاصله بین زهکش‌ها تأثیری بسزا در میزان جریان ورودی از زیر لوله‌های زهکش به درون آنها دارد، به طوری که هر چه فاصله زهکش‌ها از یکدیگر کمتر باشد، جریان کمتری از لایه‌های تحتانی وارد لوله زهکش می‌شود (Ninghu *et al.*, 2005). لذا کمیت و کیفیت زهاب خروجی تابعی است از عمق و فاصله

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم

در این مدل، به منظور پوشش تغییرات عمودی ممکن بافت خاک در ناحیه غیر اشباع، از سطح خاک تا عمق نصب لوله‌های زهکش زیرزمینی، به چهار لایه تقسیم شده است. ضخامت و مشخصات لایه‌ها ممکن است متفاوت باشد. هر لایه به صورت یک متغیر حالت تعریف شده است. ورودی لایه فوقانی عبارت است از بارش، آب آبیاری، و جریان رو به بالا از لایه پایینی؛ خروجی این لایه، تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی است:

$$S_j = S_{j-1} + I_j + R_j + CR_j - ET_{aj} - P_j \quad (1)$$

که در آن،  $S_j$  و  $S_{j-1}$  = حجم آب ذخیره شده در هر لایه در روزهای  $j$  و  $j-1$  (میلی‌متر)؛  $I_j$  = آبیاری در روز  $j$  (میلی‌متر)؛  $R_j$  = میزان بارش در روز  $j$  (میلی‌متر)؛  $CR_j$  = میزان جریان رو به بالا از لایه پایینی در روز  $j$  (میلی‌متر)؛  $ET_{aj}$  = میزان تبخیر و تعرق واقعی هر لایه در روز  $j$  (میلی‌متر)؛ و  $P_j$  = میزان نفوذ عمقی در روز  $j$  (میلی‌متر) است.

آب ورودی به لایه‌های تحتانی شامل نفوذ عمقی لایه فوقانی و میزان جریان رو به بالا از تراز سطح آب زیرزمینی است؛ خروجی آنها نیز تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، و میزان آبی است که به صورت جریان رو به بالا به سمت لایه‌های فوقانی حرکت می‌کند:

$$S_{j,i} = S_{j-1,i} + P_{j,i-1} + CR_{j,i} - CR_{j,i-1} - ET_{aj,i} - P_{j,i} \quad i > 1 \quad (2)$$

که در آن،  $i$  شماره لایه را از سطح زمین نشان می‌دهد. همچنین فرض شده است تا زمانی که لایه فوقانی به حد ظرفیت مزرعه نرسد، آب به لایه پایینی نفوذ نکند. بنابراین، میزان آبی که هر لایه نیاز دارد تا به ظرفیت مزرعه برسد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

است (Simonovic, 2002 a, b). شبکه‌های آبیاری حوضه کیان تانگ (Khan, 2004) نیز با استفاده از روش پویایی سیستم شبیه‌سازی شدند. به کمک این مدل تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب در شبکه‌های آبیاری شامل تغییر بازده آبیاری سطحی و تحت فشار، تغییر الگوی کشت، و تغییر سطح اراضی هر یک از محصولات بررسی شده است. سیسل و همکاران (Saysel et al., 2002)، با استفاده از روش پویایی سیستم توانستند الگوی کشت، میزان محصول، و آلودگی حاضر از مواد شیمیایی در کشاورزی را در منطقه‌ای در جنوب ترکیه شبیه‌سازی کنند که در آن ۱۳ پروژه توسعه منابع آب برای تولید مواد غذایی لازم برای جمعیت منطقه اجرا شده بود. این محققان با ارائه سیاست‌های جدید، از جمله ترکیب تغییر سطح زیرکشت و استفاده از کشت چرخشی، الگوی مصرف کود و آفت‌کش‌ها و در نتیجه الگوی توزیع شوری در ناحیه ریشه را تغییر دادند و با مشاهده نتایج مدل، اجرای این سیاست‌ها را به عنوان راه حل پیشنهاد دادند.

بررسی تاریخچه روش‌های ارائه شده نشان می‌دهد که تحقیقات در زمینه تحلیل سیستم‌ها در محیط خاک برای کاربرد عملی چندان واقع‌گرا نیستند. از این رو، ضرورت به‌کارگیری روشی از شبیه‌سازی که هم بر واقعیت منطبق باشد و هم امکان دخالت کاربر را در توسعه مدل ایجاد کند، آشکار می‌شود.

هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی یک سیستم زهکشی زیرزمینی به روش تحلیل پویایی سیستم است تا بتوان ابتدا بازخوردهای بین اجزای این سیستم و تعاملات بین ناحیه اشباع و غیراشباع را شناسایی و سپس نوسانات سطح ایستابی ناشی از آبیاری یا بارندگی و حجم زه آب تولیدی را برآورد کرد. واسنجی مدل با داده‌های صحرائی، از دیگر اهداف این تحقیق است.

$$C.R. = ET_a \cdot e^{-\sigma \cdot d} \quad (۷)$$

که در آن،  $\sigma$  = پارامتر خاک (تابعی از بافت خاک)؛ و  $d$  = تراز سطح آب زیرزمینی از سطح زمین (میلی متر) است.

### مدل سازی پویایی سیستم

در فرایند مدل سازی، اولین گام شناخت مسئله است که در آن اهداف و نیازها مشخص می شود. پس از آن باید فرضیه دینامیکی فرموله و مدل شبیه سازی ایجاد شود. در گام بعد، برای اطمینان از نتایج مدل باید مدل نوشته شده آزمون و صحت سنجی گردد. سپس برای شناخت بهتر مسئله، سناریوهای مختلف ارزیابی شوند.

روش تحلیل دینامیکی سیستم بر پایه فرضیه فرایندهای بازخوردی است که از رفتار گذشته خود تأثیر می گیرند و از نتایج آن در رفتار آینده استفاده می کنند. این فرایند بازخوردی شامل حلقه های بازخوردی منفی و مثبت است که روابط علت و معلولی سیستم را نشان می دهد و در واقع ساختار اصلی سیستم است. حلقه منفی نشان می دهد که در اثر افزایش علت، معلول آن کاهش می یابد و اگر علت کاهش یابد، معلول آن روند افزایشی دارد. اما در حلقه مثبت، اگر علت افزایش یابد، معلول نیز افزایش می یابد و اگر علت کاهش یابد روند رفتار معلول آن نیز کاهشی خواهد بود.

در این تحقیق، ابزار تحلیل سیستم مورد استفاده به منظور مدل سازی، Vensim (محیطی برای نوشتن برنامه به زبان پویایی سیستم، به صورت شیء گرا و بر پایه بازخورد) است که چهار مؤلفه اصلی ذخایر یا ترازها<sup>۱</sup>، جریانها<sup>۲</sup>، اتصالات<sup>۳</sup>، و مبدلها<sup>۴</sup> دارد. ذخیره ها، انبارهایی هستند که حالات سیستم را مشخص و اطلاعات لازم را برای تصمیم گیری و اجرا تولید می کنند. جریانها، میزان تغییر را نشان می دهند، یعنی نشان دهنده فرایندهایی هستند که ذخایر را پر یا خالی می کنند. از اتصالات به

$$I = (\theta_{FC} - \theta_i) \Delta Z \quad (۳)$$

که در آن،  $\theta_i$  و  $\theta_{FC}$  = به ترتیب رطوبت لایه  $i$  و رطوبت ظرفیت مزرعه و  $\Delta Z$  ضخامت لایه است. در این تحقیق، تبخیر و تعرق واقعی از رابطه زیر محاسبه شده است (Allen et al., 1998):

$$ET_a = K_c \cdot K_s \cdot ET_o \quad (۴)$$

که در آن،  $ET_o$  = تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر بر روز)؛  $K_c$  = ضریب گیاهی (بدون بعد)؛ و  $K_s$  = ضریب بدون بعد است که تأثیر محدودیت رطوبت خاک روی تبخیر و تعرق گیاه را بیان می کند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta \geq \theta_{threshold} \\ \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_{threshold} - \theta_{pwp}} & \theta_{pwp} \leq \theta \leq \theta_{threshold} \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن،  $\theta_{pwp}$  و  $\theta_{threshold}$  = به ترتیب رطوبت پژمردگی و رطوبت آستانه (درصد حجمی) است که در آن گیاه دچار تنش رطوبتی می شود. رطوبت آستانه تنش به صورت زیر برآورد می شود:

$$\theta_{threshold} = (1 - p)\theta_{FC} + p \cdot \theta_{pwp} \quad (۶)$$

که در آن،  $P$  = نسبت آب سهل الوصول به کل آب قابل دسترس است.

میزان جریان روبه بالا از سطح آب زیرزمینی نیز از رابطه زیر محاسبه می شود (Li & Dong, 1998):

### رفتار مرجع

متغیرهایی که با آنها می‌توان رفتار سیستم را ارزیابی کرد، تراز سطح آب زیرزمینی و دبی خروجی زهاب هستند که چگونگی رفتار آنها به صورت داده‌های مشاهده‌ای در بخش اعتبارسنجی مدل نشان داده شده است.

### مرزهای مدل

مرز سیستم در روش پویایی سیستم به معنی تعیین متغیرهای درونزا (اجزای داخلی سیستم) و برونزاست. در این تحقیق، مدل‌سازی در سطح مزرعه است. با توجه به اینکه در اطراف مزرعه، زمین‌های دیگر رودخانه یا زهکش‌های روباز نیز قرار دارند، شرایط زیر به عنوان گزینه‌هایی برای تعیین مرز سیستم در مدل تعریف شدند.

### الف- نفوذ از سطح خاک

در این تحقیق برای برآورد میزان نفوذ سطحی از معادله گرین و آمپت استفاده شد. در این معادله سرعت نفوذ آب در خاک،  $f$ ، تابعی از مقدار کل آب نفوذی،  $F$ ، است:

$$f = k \left( \frac{\psi \Delta \theta}{F} + 1 \right) \quad (8)$$

$$\psi = \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \left( \frac{h_b}{2} \right) \quad (9)$$

$$\Delta \theta = \theta_s - \theta_i \quad (10)$$

که در آنها،  $\lambda$  = ضریب توزیع خلل و فرج (بدون بعد)؛  $h_b$  = پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا به خاک (سانتی‌متر)؛  $\theta_s$  = رطوبت اشباع خاک (درصد حجمی)؛  $\theta_i$  = رطوبت اولیه خاک (درصد حجمی)؛ و  $k$  =

منظور نشان دادن روابط بین متغیرهای مدل استفاده می‌شود. اتصالات در واقع اطلاعات را در مدل از یک جزء به جزء دیگر حمل می‌کنند. مبدل‌ها ورودی را به خروجی اتصال می‌دهند و می‌توانند به صورت روابط جبری یا نمودار و جدول باشند. این ابزار مدل‌سازی که یک محیط شبیه‌سازی شیء‌گرا است، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را که در مقایسه با زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم دشواری کمتری دارد به وجود می‌آورد.

### ساختار مدل

در این قسمت، مراحل مدل‌سازی سیستم زهکشی زیرزمینی به روش پویایی سیستم، تشریح شده است.

### بیان مسئله

نوسانات سطح ایستابی و حجم زهاب تولیدی در اراضی مجهز به سیستم زهکشی زیرزمینی به عوامل هیدرولوژیکی (از قبیل باران، آبیاری، تبخیر و تعرق، جریانات زیرسطحی و...)، خصوصیات خاک (شامل منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، تخلخل قابل زهکشی و ...) و مشخصات زهکش (شامل شعاع زهکش و عمق و فاصله نصب زهکش) بستگی دارد. شبیه‌سازی چنین سیستمی به کمک بازخوردهای بین اجزای ناحیه اشباع و غیراشباع، اساس کار این تحقیق است.

### متغیرهای کلیدی

از متغیرهای کلیدی و مفاهیمی که باید در این تحقیق به آنها توجه شود، می‌توان به میزان بارش، میزان آب آبیاری، میزان تبخیر و تعرق واقعی، هدایت هیدرولیکی خاک، تراز سطح آب زیرزمینی، حجم آب زیرزمینی ورودی به زهکش، میزان نفوذ عمقی، و خیز موینگی اشاره کرد.

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2s} \quad (12)$$

ضریب آبگذری غیراشباع خاک (سانتی‌متر بر روز) است.

ب- جریان عمودی در لایه محدودکننده زیرین

جریان عمودی در لایه محدود کننده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q = k_v \frac{h_1 - h_2}{D} \quad (11)$$

که در آن،  $k_v$  = ضریب هدایت هیدرولیکی عمودی لایه محدود کننده (سانتی‌متر بر روز)؛  $D$  = ضخامت لایه محدود کننده (سانتی‌متر)؛  $h_1$  = فاصله سطح ایستابی تا کف لایه محدودکننده (سانتی‌متر)؛ و  $h_2$  = فشار پیزومتری در زیر لایه محدودکننده (سانتی‌متر) است.

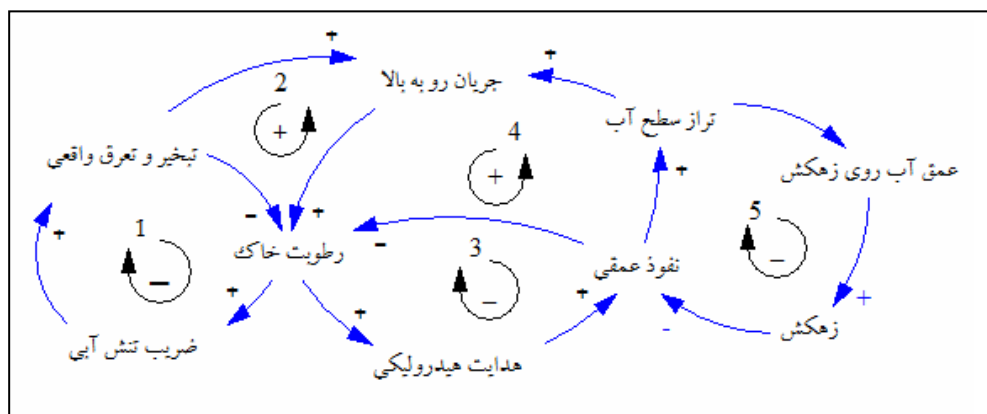
ج- نشت جانبی

در این مدل، دبی ورودی و یا خروجی در واحد عرض از سیستم به کمک رابطه داری به صورت زیر محاسبه شده است:

که در آن،  $k$  = هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مرز مزرعه (سانتی‌متر بر روز)؛  $h_1$  = بالاترین تراز سطح ایستابی در مرز داخلی (سانتی‌متر)؛  $h_2$  = تراز سطح ایستابی در مرز خارجی (سانتی‌متر)؛ و  $s$  = فاصله بین این دو تراز (سانتی‌متر) است.

### حلقه‌های علت و معلولی

در مدل‌سازی به روش پویایی سیستم، حلقه‌های علت و معلولی مکانیزم بازخوردهای اصلی را نشان می‌دهند. نمودارهای علت و معلولی تهیه شده در این تحقیق مربوط هستند به تغییرات رطوبت خاک در ناحیه غیر اشباع (ریشه گیاه) و چگونگی تغییرات سطح آب و میزان زهاب تولیدی در ناحیه اشباع (شکل ۱).



شکل ۱- حلقه‌های علت و معلولی سیستم خاک در حضور زهکش زیرزمینی

جریان رو به بالا از تراز سطح آب زیرزمینی را به همراه دارد که باعث افزایش رطوبت خاک می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی خاک تابعی از رطوبت خاک است، با افزایش رطوبت خاک هدایت هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش هدایت

ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت خاک، ضریب تنش آبی افزایش می‌یابد و با افزایش آن بر میزان تبخیر و تعرق واقعی افزوده می‌شود و افزایش تبخیر و تعرق واقعی نیز باعث کاهش رطوبت خاک می‌شود. اما افزایش تبخیر و تعرق، افزایش

### آنالیز حساسیت

در این قسمت، مدل شبیه‌سازی شده تحت شرایط عدم قطعیت پارامترها، شرایط اولیه، و مرزهای مدل آزمون می‌شود. برای مثال عکس‌العمل زهکش زیرزمینی نسبت به فاصله و عمق نصب لوله زهکش را می‌توان تست کرد.

### داده‌های صحرائی

بدین منظور، از داده‌های جمع‌آوری شده از مزرعه ۲۵ هکتاری ARC2-5 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد امیرکبیر استفاده شد که یکی از واحدهای هفت‌گانه طرح توسعه نیشکر است (Mansoori, 2005). عمق نصب لوله‌های زهکش در این مزرعه ۲ متر، فاصله زهکش‌ها ۴۰ متر، و طول آنها ۵۰۰ متر است. به منظور بررسی نوسانات سطح ایستابی در این مزرعه، سه ردیف پیژومتر در فواصل ۱۰۰، ۲۵۰، و ۳۷۵ متری از جمع‌کننده‌ها و در عمق زهکشی و در هر ردیف هفت پیژومتر در فواصل مختلف از زهکش فرعی نصب شده است. آبیاری این مزرعه با دور آبیاری ۵ روز، در اوایل سال ۱۳۸۳ شروع شد و ۵ ماه طول کشید. در این دوره، پارامترهای نوسانات سطح ایستابی قبل از هر آبیاری و بعد از اتمام آبیاری با فاصله زمانی ۱ تا ۲ روز از طریق پیژومترهای مشاهده‌ای، دبی خروجی زهکش‌ها ۲ تا ۳ روز از بعد از آبیاری و از طریق چاهک کنترل لوله زهکشی (چاهک مشاهداتی) در محل ورود به کلکتور، هدایت الکتریکی آب آبیاری، هدایت الکتریکی آب داخل پیژومترها، و هدایت الکتریکی خاک قبل از شروع آبیاری و بعد از برداشت محصول اندازه‌گیری شده است. در این تحقیق، برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی فقط از داده‌های نوسانات سطح ایستابی و دبی خروجی زهکش‌ها استفاده شده است.

همچنین میزان برآزش میان مقادیر اندازه‌گیری شده

هیدرولیکی، نفوذ عمقی افزایش و رطوبت خاک در ناحیه ریشه کاهش می‌یابد. از طرفی، افزایش نفوذ عمقی باعث افزایش تراز سطح آب می‌شود و با افزایش تراز سطح آب، رطوبت خاک به کمک جریان رو به بالا افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش تراز سطح آب باعث افزایش عمق آب روی زهکش و افزایش میزان زهاب می‌شود و سرانجام افزایش میزان زهاب باعث کاهش تراز سطح آب زیرزمینی می‌شود.

### تبدیل حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای ذخیره و جریان

برای اجرای یک مدل شبیه‌سازی با ابزار مدل‌سازی کامپیوتری مانند Vensim، باید حلقه‌های علت و معلولی را به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل کرد. برای مثال، پروفیل خاک به صورت یک متغیر حالت تعریف و به چهار لایه تقسیم شده است و هر لایه می‌تواند مشخصات متفاوتی داشته باشد. تراز سطح آب و آب زیرزمینی نیز به صورت متغیرهای حالت تعریف شده‌اند که هر یک میزان ورودی و خروجی مشخصی دارد. برای نمونه، میزان جریان ورودی به تراز سطح آب، نفوذ عمقی است و میزان جریان خروجی آن تخلیه به زهکش، نفوذ به آب زیرزمینی، و جریان رو به بالاست.

### آزمون صحت‌سنجی مدل

در این قسمت به کمک سه آزمون، شرایط حدی، آنالیز حساسیت، و داده‌های صحرائی صحت مدل سنجش قرار شد.

### شرایط حدی

شرایط حدی ممکن است اصلاً رخ ندهد، ولی مدل طبق این شرایط باید درست عمل کند.

### نتایج و بحث

مدل تهیه شده، بر اساس آزمون‌های شرایط حدی، آنالیز حساسیت، و داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی ارزیابی و صحت‌سنجی شد.

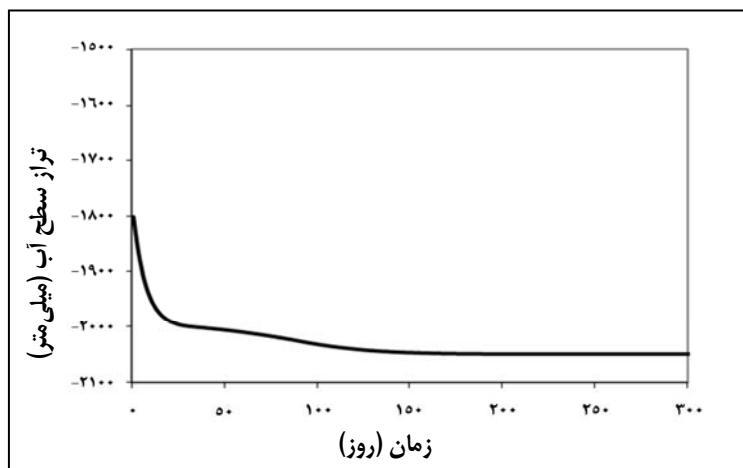
در آزمون شرایط حدی، فرض شد زهکش‌ها در عمق ۲ متری قرار دارند و تراز سطح آب نیز ابتدا در عمق ۱/۸ متری است. پس از آن، میزان آب آبیاری و بارش قطع شد. انتظار بر آن است که ابتدا تراز سطح آب زیرزمینی هم‌تراز لوله‌های زهکش شود و پس از آن تا اندازه‌ای پایین برود که تبخیر و تعرق از سطح خاک روی آن اثری نگذارد. در چنین شرایطی، میزان زهاب خروجی نیز باید تا زمانی که تراز سطح آب زیرزمینی زیر سطح زهکش قرار گیرد، کاهشی و پس از آن صفر باشد. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان گفت عکس‌العمل مدل نسبت به شرایط تعریف شده فوق منطقی بوده است.

سطح ایستابی و دبی خروجی زهکش‌ها و پیش‌بینی شده آنها، از لحاظ آماری، با محاسبه انحراف معیار (رابطه ۱۳)، و ضریب همبستگی داده‌ها (RMSE) از رابطه ۱۴، محاسبه شد:

$$S.E. = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (13)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (14)$$

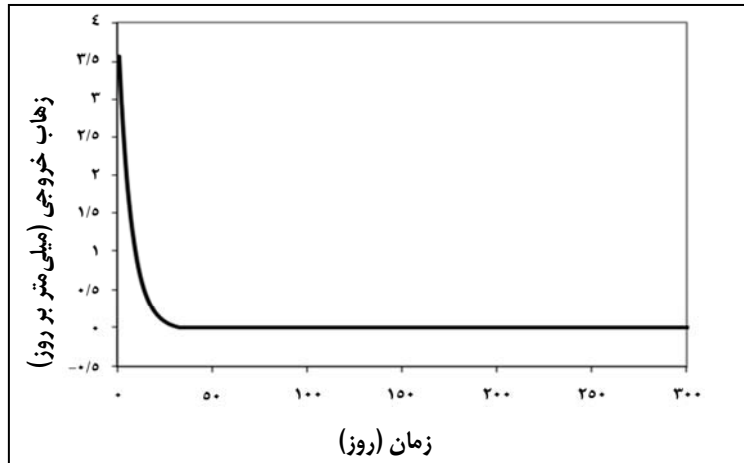
که در آن،  $S.E.$  = انحراف معیار؛  $n$  = تعداد روزهای دوره مورد مطالعه،  $Y_m$  = مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز؛  $Y_p$  = مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل؛ و  $\bar{Y}_m$  میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲- تغییرات تراز سطح آب تحت شرایط حدی



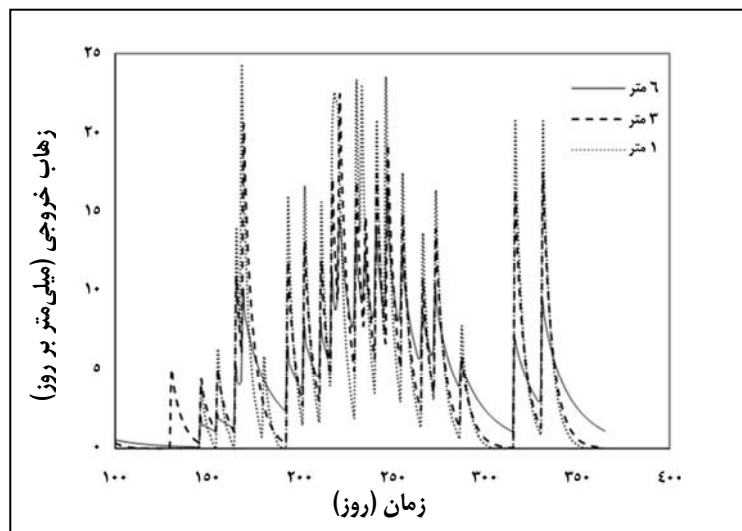
شبیه‌سازی سیستم‌های زهکش زیرزمینی در شرایط غیرماندگار...



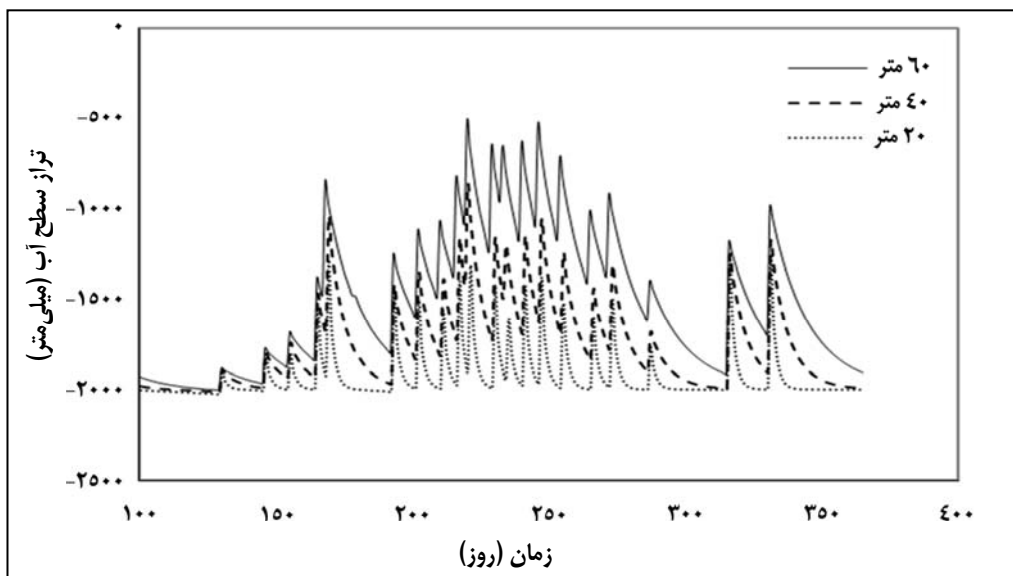
شکل ۳- تغییرات زهآب خروجی تحت شرایط حدی

زهآب خروجی کاهش می‌یابد. اما چند روز پس از آبیاری مقداری از آب ذخیره شده در خاک تخلیه می‌شود و میزان زهآب نسبت به زمانی که عمق زهکش کمتر است، افزایش می‌یابد (شکل ۴). همچنین با افزایش فاصله زهکش‌ها میزان زهآب خروجی کاهش و تراز سطح ایستابی افزایش می‌یابد (شکل‌های ۵ و ۶).

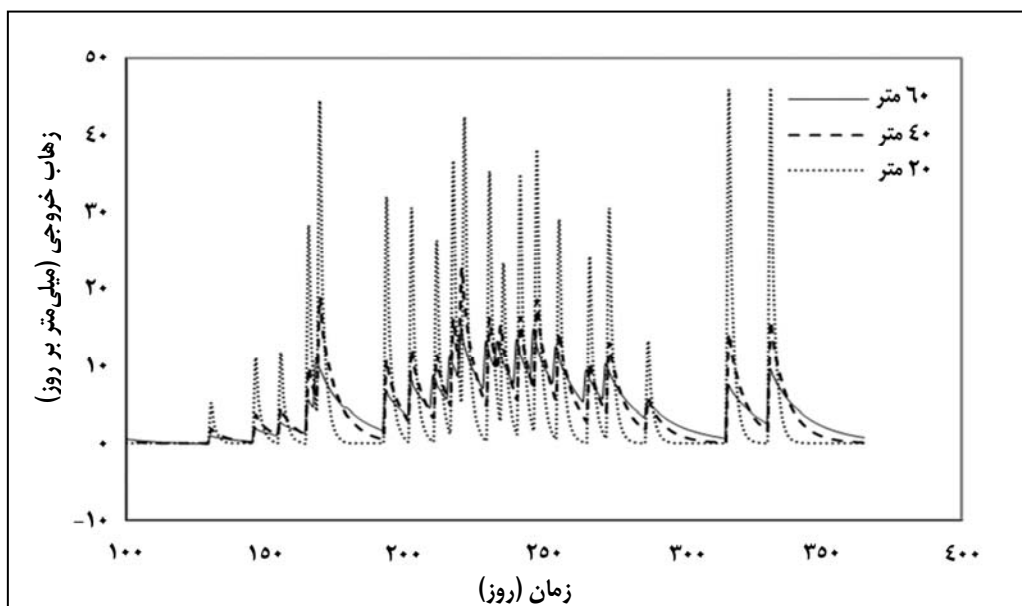
در آنالیز حساسیت مدل، عمق و فاصله زهکش‌ها آزمون شد. هنگامی که عمق زهکش افزایش یابد، به شرط هم‌تراز بودن عمق اولیه آب زیرزمینی با عمق زهکش، به دلیل افزایش عمق فضای خالی ناشی از خلل و فرج خاک روی زهکش افزایش و حجم ذخیره خاک روی زهکش افزایش می‌یابد. در این حالت، میزان



شکل ۴- تغییرات میزان زهآب خروجی در عمق‌های مختلف زهکش



شکل ۵- تغییرات تراز سطح آب در فاصله‌های مختلف زهکش

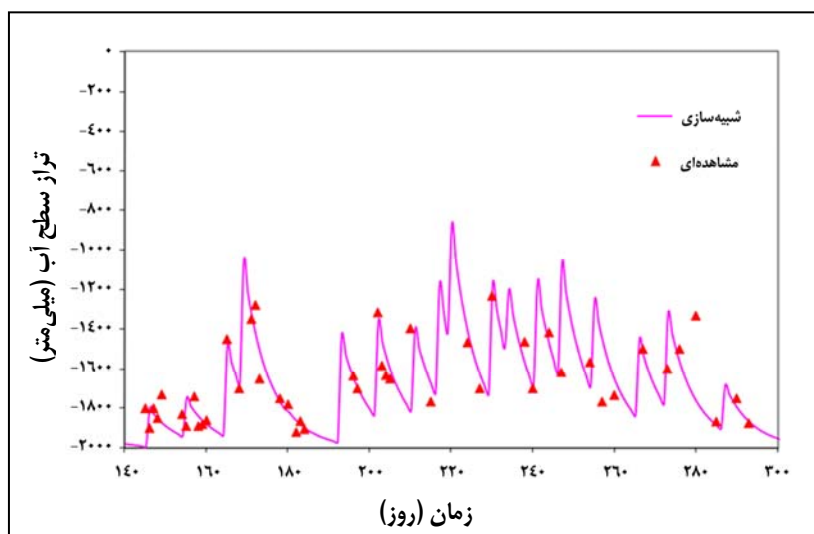


شکل ۶- تغییرات میزان زهاب خروجی در فاصله‌های مختلف زهکش

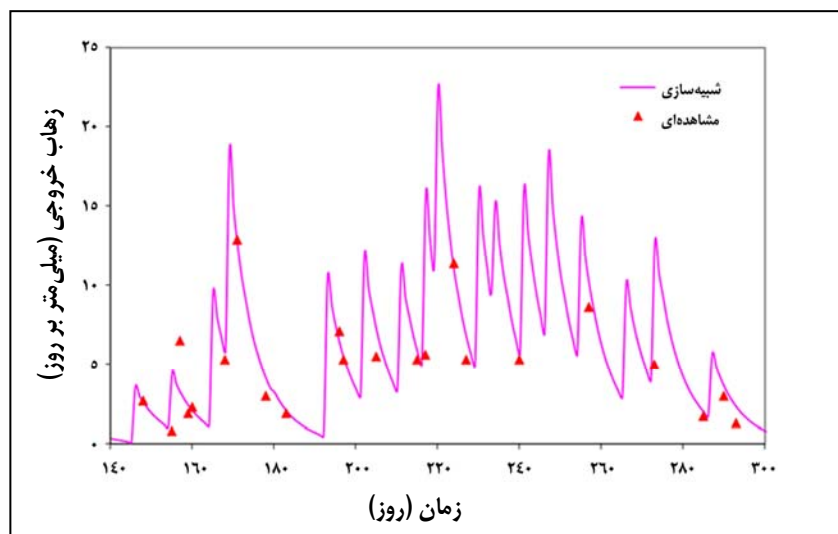
سطح ایستابی و دبی زهاب شبیه‌سازی شده با داده‌های مزرعه مورد مطالعه مقایسه شد (شکل‌های ۷ و ۸). طبق آزمون آماری، خطای استاندارد، RMSE، و ضریب همبستگی برای تراز سطح آب زیرزمینی در این تحقیق به ترتیب ۱۰/۲ سانتی‌متر، ۰/۰۶۱، و ۰/۷۲ و برای دبی زهاب خروجی ۰/۱۳ سانتی‌متر بر روز، ۰/۲۵ و ۰/۸ است.

در آزمون مقایسه با داده‌های صحرایی، تراز سطح ایستابی در شرایط اولیه هم‌تراز با عمق نصب زهکش و برابر با ۲ متر بود و با توجه به اینکه مزارع مجاور مزرعه آزمایشی کشت یکسانی داشتند و هم‌زمان آبیاری می‌شوند، جریان ورودی از مزارع مجاور به مزرعه آزمایشی و خروجی از آن به مزارع مجاور صفر فرض شد. سپس بین نتایج ارتفاع

شبیه‌سازی سیستم‌های زهکش زیرزمینی در شرایط غیرماندگار...



شکل ۷- تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نسبت به زمان (روز جولایوس)



شکل ۸- دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای خروجی زهکش نسبت به زمان (روز جولایوس)

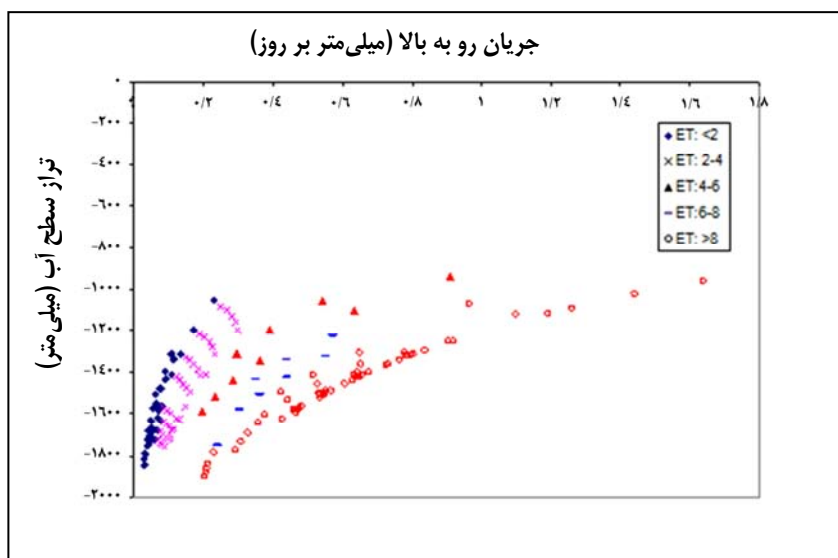
داده‌های صحرائی در تحقیق حاضر را قابل قبول دانست.

با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت که بعد از هر آبیاری در اثر افزایش تراز سطح آب، میزان دبی خروجی زهکش نیز افزایش می‌یابد. پس از تخلیه آب با زهکش، تراز سطح آب کاهش می‌یابد و باعث کاهش میزان دبی خروجی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازه تغییرات دبی خروجی از زهکش بین ۰/۱۰۴ تا ۲۲/۴۷ میلی‌متر بر

یادآور می‌شود که در مطالعاتی محققان در ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی تراز سطح آب و زهاب خروجی (مانند مدل Drainmod)، خطای استاندارد تا ۴۰ سانتی‌متر را برای تراز سطح آب و ۱ سانتی‌متر بر روز را برای زهاب خروجی خوب ارزیابی کرده‌اند (Maurizo *et al.*, 2000; Tekin, 2002; Singh *et al.*, 2006). بنابراین با توجه به مقادیر خطای استاندارد و همچنین RMSE، می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و

روز و میانگین این تغییرات ۶/۲۵ میلی‌متر بر روز است. تبخیر و تعرق بر حسب میلی‌متر بر روز نشان می‌دهد. ضریب زهکشی واحد امیرکبیر در هنگام طراحی ۶ میلی‌متر بر روز بوده است که با میانگین دبی خروجی از زهکش مطابقت دارد. شکل ۹، تغییرات جریان شبیه‌سازی شده رو به بالا از سطح آب را نسبت به سطح ایستابی برای بازه‌های مشخص

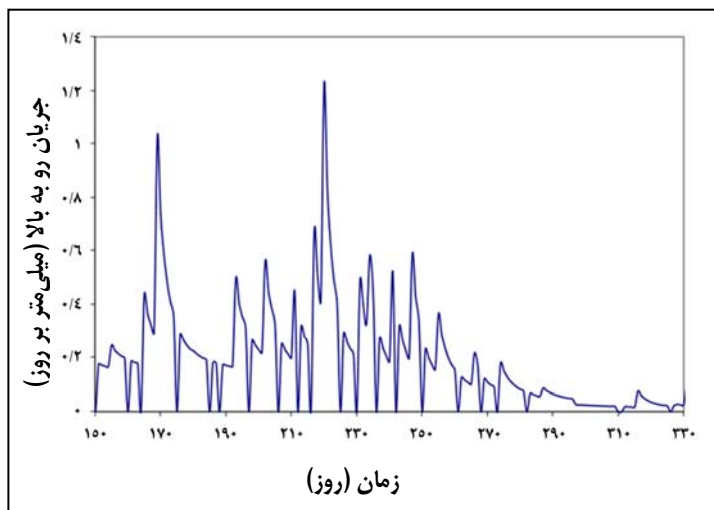
تبخیر و تعرق بر حسب میلی‌متر بر روز نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در بازه‌های مختلف تبخیر و تعرق، با بالا آمدن تراز سطح آب میزان جریان رو به بالا نیز افزایش و با کاهش آن، میزان جریان کاهش می‌یابد. در هنگام آبیاری و بارش، جریان رو به بالا صفر فرض شده است، بدین معنی که تبخیر و تعرق صورت نمی‌گیرد.



شکل ۹- تغییرات جریان رو به بالای شبیه‌سازی شده نسبت به تراز سطح آب

سطح ایستابی نسبت به فصل پاییز و زمستان (که میزان آبیاری کمتر است) بالاتر است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که دامنه تغییرات جریان رو به بالا بین ۰/۰۲ تا ۱/۱۲ میلی‌متر بر روز است، اما مقادیر صفر مربوط به زمان آبیاری است که تبخیر و تعرق صفر فرض شده است. با توجه به مقدار متوسط جریان رو به بالا که حدود ۰/۳۴ میلی‌متر بر روز در فصل آبیاری می‌باشد می‌توان در صورتی که شوری این آب مناسب باشد، آن را به عنوان بخشی از آب آبیاری در نظر گرفت.

شکل ۱۰، نتایج شبیه‌سازی میزان جریان رو به بالا را نسبت به زمان نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، متوسط جریان رو به بالا از روز صد و پنجاهم (۱۵۰) تا روز دویست و چهارم (۲۴۰)، بیشترین و حدود ۰/۳۴ میلی‌متر بر روز محاسبه شد که دلیل آن بالا بودن میزان تبخیر و تعرق در فصل تابستان است. متوسط جریان بعد از روز دویست و چهارم تا انتهای دوره حدود ۰/۰۹ میلی‌متر بر روز برآورد شد که مربوط به فصل پاییز و زمستان است. از طرف دیگر، به دلیل آبیاری زیاد و کوتاه بودن دور آبیاری در تابستان، عمق



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی تغییرات جریان رو به بالا نسبت به زمان

### نتیجه‌گیری

میزان برازش میان مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه تراز سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکش‌ها از لحاظ آماری با محاسبه خطای استاندارد (انحراف معیار) محاسبه شد. خطای استاندارد سطح ایستابی و دبی زهکش‌ها به ترتیب  $10/2$  سانتی‌متر و  $0/13$  سانتی‌متر بر روز برآورد شد که دقت نسبی را در مقایسه با شرایط واقعی نشان می‌دهد. همچنین، این پارامترها با محاسبه شاخص آماری RMSE نیز آزمون شدند که مقادیر آن برای تراز سطح ایستابی و دبی زهکش‌ها به ترتیب  $0/061$  و  $0/25$  برآورد شد که دقت بسیار خوبی را در مقایسه با شرایط واقعی نشان می‌دهد.

نتایج این تحقیق نشان داد که روش پویایی سیستم می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی اکثر فرایندهای شناخته شده در سیستم‌های پیچیده آب و خاک به کار رود. از قابلیت مدل تهیه شده در این تحقیق علاوه بر نمایش تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم، قابلیت تحلیل حساسیت و صرف زمان کمتر در

در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی سیستم زهکشی زیرزمینی به روش پویایی سیستم تهیه شده است. این مدل با توجه به روابط علت و معلولی، ساختار کلی یک سیستم زهکشی زیرزمینی را ایجاد کرد و به کمک آن می‌توان عملکرد سیستم را به سمت اهداف مورد نظر سوق داد. همچنین با اجرای مدل فوق می‌توان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر مدیریت سطح آب، میزان نفوذ عمقی آب آبیاری، میزان تبخیر و تعرق واقعی، میزان رواناب، میزان جریان رو به بالا، و میزان زه آب خروجی را بررسی کرد.

به منظور صحت‌سنجی مدل مذکور، شرایط حدی و آنالیز حساسیت آزمایش و رفتار منطقی مدل تایید شد. برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های صحرائی جمع‌آوری شده در اراضی تحت کشت نیشکر واحد امیرکبیر خوزستان استفاده شد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و شدت جریان خروجی زهکش‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه مقایسه شدند و انطباق قابل قبولی بین نتایج مشاهده شد.

اجرای برنامه اشاره کرد. بنابراین، آگاهی از کمیت و کیفیت زهاب تولید شده به منظور مدیریت و کنترل آن امری ضروری است. از این رو، توسعه مدل فوق به منظور شبیه‌سازی کیفیت زهاب و تهیه دستورالعملی پویا برای مدیریت زهاب‌ها به منظور استفاده مجدد، تخلیه، یا دفع زهاب‌ها به نحوی که کمترین اثر منفی برای محیط زیست و منابع آب داشته باشد، توصیه می‌شود. در کشت‌های آبی، زهکشی برای مهار و تنظیم شوری و جلوگیری از ماندابی شدن خاک اهمیت بسیار زیادی دارد. اما گاهی به دنبال این منافع، آثار منفی زیست محیطی نیز به وجود می‌آورد. برای مثال، تخلیه زهاب خروجی با کیفیت پایین به آب‌های موجود در طبیعت، باعث تخریب برخی از زیست بوم‌های آبی می‌شود.

## مراجع

- Ahmad, S., and Simonovic, P. S. 2000. System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *ASCE J. Comput. Civil Eng.* 14(3): 190-199.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO. Rome. Italy.
- Das, A. 2000. Optimization-based simulation and design of tile drainage system. *ASCE J. Irrig. Drain Eng.* 126(6): 381-388.
- Fio, J. L. and Deverel, S. J. 1991. Groundwater flow and solutemovement to drain laterals, western San Joaquin Valley, California. 1. Quantitative Hydrologic Assessment. *Water Resour. Res.* 27, 2247-2257.
- Jorenush, M. H. and Sepaskhah, A. R. 2003. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. *Agric. Water Manage.* 61, 125-141.
- Jury, W. A., Tuli, A. and Letey, J. 2003. Effect of travel time on management of a sequential reuse drainage operation. *Soil Sci. Soc. Ame. J.* 67, 1122-1126.
- Khan, S. 2004. Irrigation development, rational allocation of water resources and food security in china. Chinese National Committee on Irrigation and Drainage.
- Li, Y. H. and Dong, B. 1998. Real-Time irrigation scheduling model for cotton. *Water and The Environment: Innovative Issues in Irrigation and Drainage.*
- Mansoori Serenjaneh, F. 2005. Evaluation of design parameters of subsurface drainage systems in sugarcane development plan. M.Sc. Thesis. Department of Irrigation and Drainage. University of Tehran. Iran.
- Maurizio, B., Moraria, F., Bonaitia, G., Paaschb, M. and Skaggs, R. 2000. Analysis of DRAINMOD performances with different detail of soil input data in the Veneto region of Italy. *Agric. Water Manage.* 42, 259-272.

- Ninghu, S., Bethune, M., Mann, L. and Heuperman, A. 2005. Simulating water and salt movement in tile-drained fields irrigated with saline water under a Serial Biological Concentration management scenario. *Agric. Water Manage.* 78, 165–180.
- Oztekin, T. 2001. Simulating water to a subsurface drain in layered soil. *Turk. J. Agric.* 26, 179-185.
- Palmer, R. N., Keyes, A. M. and Fisher, S. 1993. Empowering stakeholders through simulation in water resources planning. In *Water Management in the 90s a Time for Innovation*. New York. ASCE, 451-454.
- Saysel, A. K., Barlas, Y. and Yenigun, O. 2002. Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. *Environmental Management.* 64: 247-260.
- Skaggs, R. W. 1980. DRAINMOD reference report. Method for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. USDA-SCS 329 PP.
- Simonovic, S. P. 2002a. Global Water Dynamics: Issues for the 21<sup>st</sup> century. *J. Water Sci. Techol.* 45(8): 53-64.
- Simonovic, S. P. 2002b. World Water Dynamics: Global Modeling of Water Resources. *J. Environ. Manage.* 66(3): 249-267.
- Singh, R., Helters, M. J. and Zhiming, Qi. 2006. Calibration and Validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. *Agric. Water Manage.* 85, 221–232.
- Tekin, Z. 2002. Hydraulic conductivity evaluation for a drainage simulation model (DRAINMOD). *Turk. J. Agric.* 26, 37-45.
- Wahba, M. A. S. and Christen, E. W. 2006. Modeling subsurface drainage for salt load management in southeastern Australia. *J. Irrig. Drain. Sys.* 20, 267-282.



## **Simulation of Subsurface Drainage Systems in Unsteady States Using System Dynamics**

**H. Nozari, A. M. Liaghat\*, M. Khiat-Kholghi and A. Sedighi**

\*Corresponding Author: Associate Professor. University of Tehran, P. O. Box: 4111, Tehran, Iran. E-mail: aliaghat@ut.ac.ir

The system dynamics technique is an object-oriented approach that studies and manages complex feedback systems. Its merits include the friendly and easy development and improvement of a model. It is also used as a decision tool for engineering problems. In this paper, the system dynamics technique was used to simulate the performance of a subsurface drainage system in an unsteady state. The model was validated using experimental field data collected from sugar cane farms in Khuzestan. The effect of different parameters on daily water table level and drainage discharge was investigated. The standard error (SE) index was calculated to determine the agreement between the observed and simulated values for water table and drainage discharge. The results indicated that the SE for water table and drainage discharge were 10.2 cm and 0.13 cm per day, respectively. In addition, the predicted upward flux in the soil showed that it can compensate for part of the water required during the irrigation season.

**Key Words:** Amir Kabir Sugar, Cane, System Dynamics, Subsurface Drainage, Unsteady State, Water Table Level