

شبیه سازی حرکت آب و نمکها در سامانه زهکشی زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم

حامد نوذری^{۱*}، عبدالمجید لیاقت^۲، مجید خیاط خلقی^۳

چکیده

کمیت و کیفیت زهاب تولید شده در اراضی شور که نیاز به آبشویی اولیه دارند، از شروع بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی تا قبل از رسیدن به شرایط تعادل، پیوسته در حال تغییر می‌باشد. زمان رسیدن به حالت تعادل در مناطق با آب زیرزمینی کم عمق و شور ممکن است چندین سال به طول بیانجامد. در چنین شرایطی، آگاهی از کمیت و کیفیت زهاب تولید شده به منظور مدیریت و کنترل آن امری ضروری می‌باشد. در این تحقیق عملکرد یک سیستم زهکشی در شرایط غیر ماندگار به کمک روش تحلیل پویایی سیستم که یک روش شبیه‌سازی به صورت شی‌گرا و مبتنی بر روابط بازخورد می‌باشد به طور کامل مدل سازی شد. جهت اعتباریابی نتایج مدل، مطالعه موردی روی مزرعه ۲۵ هکتاری ARC1-18 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد امیرکبیر که یکی از واحدهای هفتگانه طرح توسعه نیشکر می‌باشد صورت گرفت. با اجرای مدل فوق برای شرایط مزرعه روند تغییرات تراز سطح آب (WTL)، مقدار خروجی زهاب (DW)، شوری زهاب (ECd) و شوری آب زیرزمینی (ECg) به صورت روزانه مورد بررسی قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل آماری و محاسبه خطای استاندارد (SE) و درصد خطا نسبت به میانگین (RSE)، میزان برازش میان مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده روزانه پارامترهای فوق محاسبه گردید. خطای استاندارد WTL، DW و Ecd به ترتیب ۱۴/۴ سانتیمتر، ۰/۴۳ لیتر بر ثانیه، ۲/۸ دسی زیمنس بر متر و خطای استاندارد شوری آب زیرزمینی در سه عمق از بالا به پایین به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۲۹ و ۰/۳۶ دسی زیمنس بر متر برآورد گردید که دقت نسبتاً خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد. همچنین شاخص آماری RSE برای پارامترهای فوق به ترتیب برابر با ۸، ۲۰، ۱۹، ۱۲/۹، ۷/۵ و ۸/۲ درصد برآورد گردید که تطابق نسبی بین داده ها را تصدیق می‌کند. نتایج نشان داد که مدل حاضر می‌تواند فرصت مناسبی را جهت طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی برای مشاورین، کارفرمایان، پیمانکاران و سایر علاقمندان این رشته فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پویایی سیستم، زهاب، غیر ماندگار، سیستم زهکشی

مقدمه

گیاه مقاوم به شوری قابل استفاده و مفید باشد، باید قبل از دفع نهایی مجدداً برای آبیاری مورد استفاده قرار گیرد (Rhoades et al., 1977, 1989).

زهاب تولید شده ناشی از دو دسته جریان ورودی به زهکش می‌باشد: ۱- جریانهای عمودی و افقی ناشی از تلفات نفوذ عمقی آب آبیاری به طرف زهکش‌ها و ۲- جریانهای شعاعی زیرزمینی به طرف زهکشها که باز ناشی از ورود تلفات آب آبیاری به آبهای زیرزمینی می‌باشد. بنابراین نمک‌های ورودی به زهکش نیز شامل دو بخش می‌باشند: ۱- نمک‌های موجود در آب آبیاری و خاک قسمت فوقانی زهکش که بوسیله جریانهای عمودی و افقی ناشی از تلفات نفوذ وارد زهکش می‌شود و ۲- نمک‌های موجود در آبهای زیرزمینی که به وسیله جریانهای شعاعی و از زیر زهکش وارد آن می‌شود.

ژوری و همکاران (۲۰۰۳)، عملیات استفاده مجدد از زهاب جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی San Joaquin Valley در کالیفرنیا را شبیه سازی نمودند و نتیجه گرفتند که مقدار زیادی از آب زهکشی به

در کشت‌های آبی، زهکشی برای مهار و تنظیم شوری و جلوگیری از ماندابی شدن خاک از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. اما گاهی به دنبال این منافع، اثرات منفی زیست محیطی به وجود می‌آورد. برای مثال، تخلیه زهاب خروجی با کیفیت پایین به آب‌های موجود در طبیعت، باعث تخریب برخی از زیست بوم‌های آبی می‌شود. از سوی دیگر با توجه به رشد فزاینده جمعیت و نیاز به افزایش تولید مواد غذایی، جستجو برای منابع جدید آب نظیر بهره‌برداری از آب‌های با کیفیت پایین مانند زهاب، راه‌کاری ضروری و منطقی به نظر می‌رسد. در همین راستا رودز و همکاران (۱۹۷۷ و ۱۹۸۹) نتیجه گرفتند تا جایی که آب زهکشی از یک مزرعه یا یک پروژه برای یک

۱- دانشجوی دوره دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول : (Email: hanozari@yahoo.com)

۲و۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

آبیاری سطحی و تحت فشار، تغییر الگوی کشت و تغییر سطح اراضی هر یک از محصولات مورد بررسی قرار گرفته است (Khan, 2004). بررسی تاریخیچه روشهای ارائه شده نشان می‌دهد که تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل سیستم‌ها در محیط خاک بسیار محدود می‌باشد. از این رو ضرورت بکارگیری یک روش شبیه‌سازی که هم بر واقعیت منطبق باشد و هم امکان دخالت کاربر در توسعه مدل را ایجاد نماید، آشکار می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت این مسئله و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی سیستم زهکشی زیرزمینی در شرایط غیرماندگار و مدیریت زهاب‌های تولید شده گرفته شد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

- ناحیه غیراشباع

در این مدل، ناحیه غیر اشباع به چهار لایه تقسیم و هر لایه به صورت یک متغیر حالت تعریف شده است. ورودی لایه فوقانی شامل بارش یا آب آبیاری و جریان رو به بالا (Upward flux) از تراز سطح آب زیرزمینی و خروجی آن تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی می‌باشد (معادله ۱).

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

در این رابطه، S_j و S_{j-1} حجم آب ذخیره شده در هر لایه در روزهای j و $j-1$ ، I_j آبیاری در روز j ، R_j میزان بارش در روز j ، CR_j میزان جریان رو به بالا از تراز سطح آب در روز j و P_j میزان نفوذ عمقی در روز j می‌باشد.

آب ورودی به لایه‌های تحتانی شامل نفوذ عمقی لایه فوقانی و میزان جریان رو به بالا از تراز سطح آب زیرزمینی و خروجی آنها تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و میزان آبی که به صورت جریان رو به بالا به سمت لایه‌های فوقانی حرکت می‌کند می‌باشد (معادله ۲).

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

در این رابطه i شماره لایه از سطح زمین می‌باشد. همچنین فرض شده است تا زمانیکه لایه فوقانی به حد ظرفیت مزرعه نرسد، آب به لایه پایینی نفوذ نکند.

انتقال نمکها در ناحیه غیراشباع

چون رشد اغلب گیاهان زراعی و باغی تحت تاثیر نمک‌های محلول خاک می‌باشد، بنابراین تعیین غلظت نمکها در ناحیه ریشه از

آب زیرزمینی تعلق دارد و غلظت نمک زهاب خروجی تحت تاثیر شوری آب زیرزمینی قرار می‌گیرد. این محققین نشان دادند که عمق لایه غیر قابل نفوذ اثر زیادی در زمان به تعادل رسیدن شوری زهاب خروجی دارد و هر چه لایه غیر قابل نفوذ عمیق‌تر باشد، زمان بیشتری برای رسیدن به حالت تعادل لازم است (Jury et al., 2003). از سوی دیگر، فاصله زهکش‌ها تاثیر بسزایی در میزان جریان ورودی از زیر لوله‌های زهکش به درون آن 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 زه آب خروجی تابعی از عمق و فاصله زهکش‌ها و پروفیل شوری در خاک (بالا و پایین لوله زهکش) می‌باشد (Wahba and Christen, 2006). بنابراین با توجه به توضیحات فوق می‌توان گفت، اگر آب زیر سطح زهکش دارای کیفیت نامناسب باشد، در نتیجه زه آب ورودی به زهکش از کیفیت پایینی برخوردار خواهد بود و در پایین دست مشکلاتی را از لحاظ زیست محیطی و کشاورزی بوجود می‌آورد. همچنین میزان شوری آب زیرزمینی نیز بر مدت زمان به تعادل رسیدن شوری زهاب اثر دارد و هر چه شوری آب زیرزمینی بیشتر باشد، زمان رسیدن به حالت تعادل بیشتر خواهد شد. لذا در چنین شرایطی، تهیه یک مدل کامپیوتری که بتواند کمیت و کیفیت زهاب تولید شده را به منظور مدیریت و کنترل آن پیش بینی کند امری ضروری می‌باشد.

اما یکی از روش‌های بسیار موثر موجود برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، پویایی سیستم (System Dynamics) می‌باشد که یکی از قدرتمندترین و بصری‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی است. این روش ابتدا توسط فاستر (۱۹۶۱) جهت درک بهتر مسائل استراتژی در سیستم‌های دینامیکی پیچیده ابداع گردید. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند. زمینه‌های کاربردی این روش بسیار وسیع بوده و کاربرد آن در مسائل اجتماعی و اقتصادی بیشتر تاکید می‌شود. استفاده از این روش در تحقیقات آب نیز صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات پالمرو و همکاران در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ اشاره کرد. این محققین فعالیت‌های زیادی را در حوزه رودخانه با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی انجام دادند. فلچر این روش را به عنوان یک روش تحلیل تصمیم در مدیریت کم‌آبی استفاده نمود (Fletcher, 1998). همچنین سیمونیچ کارهای متعددی در زمینه استفاده از این روش در مدل‌سازی جامع منابع آب صورت داده است که در مراجع موجود می‌باشد (Simonovic, 2002). خان با استفاده از روش پویایی سیستم، بهره‌برداری از منابع آب در شبکه‌های آبیاری در حوزه Qiantang چین را مدل نمود. در این تحقیق تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب در شبکه‌های آبیاری، شامل تغییر راندمان

$$d_e = \frac{L}{8F} \quad (7)$$

$$F = \left[\frac{1}{\pi} \ln \frac{h}{r_0 \sqrt{2}} + \frac{(1 - \sqrt{2} h/L)^2}{8h/L} \right] \quad (8)$$

در این رابطه r_0 شعاع زهکش می‌باشد.

ملاحظه می‌شود که کمک رابطه (۶) که کاربرد بسیار زیادی در طراحی فاصله و عمق زهکشها دارد، می‌توان سهم آبی که از قسمت فوقانی، $\frac{4K_1 h^2}{L^2}$ ، و قسمت تحتانی، $\frac{8K_2 h d_e}{L^2}$ ، وارد زهکش می‌شود را تعیین نمود.

انتقال نمکها در ناحیه اشباع

ساز و کارهای مؤثر در انتقال نمکها، جریان روان، پخشیدگی مولکولی و انتشار آبی می‌باشند که برای بررسی جابجایی نمکها باید با یکدیگر جمع شوند. از طرفی پخشیدگی مولکولی و انتشار آبی که در طول مسیر جریان مایع در خلل و فرج خاک صورت می‌گیرد، به آسانی قابل تفکیک نیستند. بنابراین می‌توان معادله انتقال نمکها را بصورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{q}_y \frac{\partial C}{\partial y} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (9)$$

که در آن: C غلظت املاح، \bar{q}_y میانگین شدت جریان در جهت y و D ضریب پخشیدگی نمک می‌باشد.

در تحقیق حاضر با فرض تاثیر توأم ضریب پخشیدگی (D_s) و ضریب انتشار آبی (D_h) به همراه جریان، معادله فوق به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{q}_y \frac{\partial C}{\partial y} + (D_s + D_h) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (10)$$

با خطی فرض کردن ضریب انتشار آبی با سرعت بصورت $D_h = \lambda \bar{q}_y$ و با استفاده از بسط تیلور می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{q}_i \frac{C_{i+1/2} - C_i}{\Delta y_i / 2} + D_s \frac{C_{i+1/2} - 2C_i + C_{i-1/2}}{(\Delta y_i / 2)^2} + \lambda \bar{q}_i \frac{C_{i+1/2} - 2C_i + C_{i-1/2}}{(\Delta y_i / 2)^2} \quad (11)$$

که در آن:

$$C_{i+1/2} = \frac{C_{i+1} \Delta y_{i+1} + C_i \Delta y_i}{\Delta y_{i+1} + \Delta y_i}$$

اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این تحقیق از بیلان جرمی نمک برای تعیین غلظت نمکها در لایه‌های مختلف خاک استفاده شد که به صورت زیر می‌باشد:

$$D_{iw} \cdot EC_{iw} + D_{Pe} \cdot EC_{Pe} + D_g \cdot EC_g = D_p \cdot EC_p + \Delta \cdot EC \quad (3)$$

که در آن D_p ، D_g ، D_{Pe} ، D_{iw} به ترتیب مقدار آب آبیاری، آب حاصل از بارندگی، آبی که از سفره زیرزمینی وارد منطقه ریشه می‌شود و مقدار نفوذ عمقی و خارج شده از منطقه ریشه و EC_{iw} ، EC_{Pe} ، EC_g ، EC_p به ترتیب غلظت نمک در آب آبیاری، بارندگی، زیرزمینی و نفوذ عمقی از ناحیه ریشه و ΔEC تغییر مقدار نمک در محلول خاک در منطقه ریشه می‌باشد. در این معادله از مقدار نمکی که در خاک رسوب نموده و یا توسط گیاه جذب می‌شود صرف نظر شده است.

در تعیین مقدار EC_p باید توجه داشت که تمامی آبی که به صورت نفوذ عمقی از ناحیه ریشه می‌گذرد در شستشوی نمک مؤثر نیست، زیرا مقداری از آب آبیاری بدون اینکه با آب خاک ناحیه ریشه مخلوط شود از درز و شکافها و یا فضاها درشت خاک می‌گذرد (جریان ترجیحی). بنابراین با در نظر گرفتن راندمان آبیاری می‌توان تخمین بهتری از شوری منطقه ریشه و شوری آب نفوذ یافته به دست آورد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$EC_p = f \cdot EC_{FC} + (1 - f) \cdot EC_{iw} \quad (4)$$

در این رابطه f راندمان آبیاری و EC_{FC} هدایت الکتریکی خاک در ظرفیت زراعی در ناحیه ریشه می‌باشد. با توجه به اینکه ناحیه غیر اشباع به چند لایه تقسیم شده است، می‌توان رابطه فوق را بصورت زیر نوشت:

$$EC_{Pi} = f_i \cdot EC_{FCi} + (1 - f_i) \cdot EC_{P-i} \quad (5)$$

ناحیه اشباع

در این قسمت می‌توان سهم زهابی که از قسمت فوقانی و تحتانی وارد زهکش می‌شود را جهت تعیین مقدار R به کمک رابطه هوخها به دست آورد.

$$q = \frac{8K_2 h d_e}{L^2} + \frac{4K_1 h^2}{L^2} \quad (6)$$

در این رابطه q جریان ورودی به زهکشها، h عمق آب روی زهکشها، K_1 و K_2 به ترتیب ضرایب هدایت هیدرولیکی در قسمت فوقانی و تحتانی زهکشها، L فاصله بین زهکشها و d_e عمق معادل لایه غیر قابل نفوذ می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

به زمان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{D}{N} \frac{dC_i}{dt} = \left(\frac{2ND_s}{D} + \frac{N-i+1}{N} R \right) C_{i-1} - \left(\frac{4ND_s}{D} + \frac{N-i+1}{N} R \right) C_i + \left(\frac{2ND_s}{D} \right) C_{i+1} \quad (14)$$

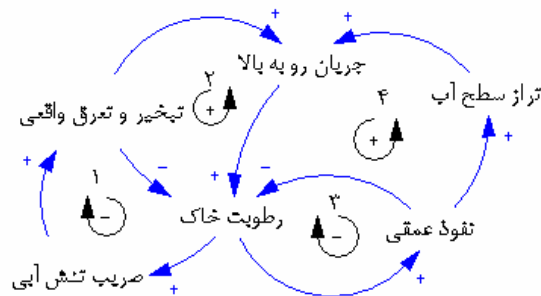
مدلسازی پویایی سیستم

همان‌طور که گفته شد، اساس روش تحلیل پویایی سیستم بر پایه فرضیه فرآیندهای بازخوردی می‌باشد که متأثر از رفتار گذشته خود است و از نتایج آن در رفتار آینده استفاده می‌نماید. این فرآیند بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی منفی و مثبت می‌باشد که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم می‌باشند. حلقه منفی نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن کاهش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن روند افزایشی دارد. حلقه مثبت نیز نشان می‌دهد که اگر علت افزایش یابد اثر آن نیز افزایش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد اثر آن نیز روند کاهش دارد. در این تحقیق، ابزار تحلیل سیستم مورد استفاده جهت مدل‌سازی، Vensim می‌باشد. این ابزار مدل‌سازی که یک محیط شبیه‌سازی شیء‌گرا می‌باشد، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با مشقت کمتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم به وجود می‌آورد.

ساختار مدل

- حلقه‌های علت و معلولی

در مدل‌سازی به روش پویایی سیستم، حلقه‌های علت و معلولی چگونگی بازخوردهای اصلی را نشان می‌دهند. شکل ۱ نمونه‌ای از نمودارهای علت و معلولی در این تحقیق می‌باشد.



(شکل ۱) - حلقه‌های علت و معلولی ناحیه غیر اشباع

$$C_{i-1/2} = \frac{C_{i-1} \cdot \Delta y_{i-1} + C_i \cdot \Delta y_i}{\Delta y_{i-1} + \Delta y_i}$$

اگر λ (ضریب انتشارپذیری) نصف ضخامت اجزاء $(\Delta y/2)$ فرض شود، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(\frac{2D_s}{\Delta y_i^2} + \frac{\bar{q}_i}{\Delta y_i} \right) C_{i-1} - \left(\frac{4D_s}{\Delta y_i^2} + \frac{\bar{q}_i}{\Delta y_i} \right) C_i + \left(\frac{2D_s}{\Delta y_i^2} \right) C_{i+1} \quad (12)$$

در این قسمت می‌توان معادله (۱۲) را به صورت تحلیلی زیر حل نمود:

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= \left(\frac{2D_s}{\Delta y_1^2} + \frac{R}{\Delta y_1} \right) C_{inp} - \left(\frac{4D_s}{\Delta y_1^2} + \frac{R}{\Delta y_1} \right) C_1 + \left(\frac{2D_s}{\Delta y_1^2} \right) C_2 \\ \frac{dC_2}{dt} &= \left(\frac{2D_s}{\Delta y_2^2} + \frac{\bar{q}_y(y_2)}{\Delta y_2} \right) C_1 - \left(\frac{4D_s}{\Delta y_2^2} + \frac{\bar{q}_y(y_2)}{\Delta y_2} \right) C_2 + \left(\frac{2D_s}{\Delta y_2^2} \right) C_3 \\ \frac{dC_N}{dt} &= \left(\frac{2D_s}{\Delta y_N^2} + \frac{\bar{q}_y(y_N)}{\Delta y_N} \right) C_{N-1} - \left(\frac{4D_s}{\Delta y_N^2} + \frac{\bar{q}_y(y_N)}{\Delta y_N} \right) C_N + \left(\frac{2D_s}{\Delta y_N^2} \right) C_{N+1} \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن R مقدار شدت جریان ورودی از لایه غیر اشباع به لایه فوقانی می‌باشد. اگر یک آبخوان به N مخزن با ضخامت‌های مساوی D تقسیم شود و هر کدام از آنها دارای غلظت اولیه C_0 باشد، آنگاه با توجه به روابط فوق و داشتن $\Delta y = \frac{D}{N}$ و

$$\bar{q}_y(y_i) = \frac{N-i+1}{N} R$$

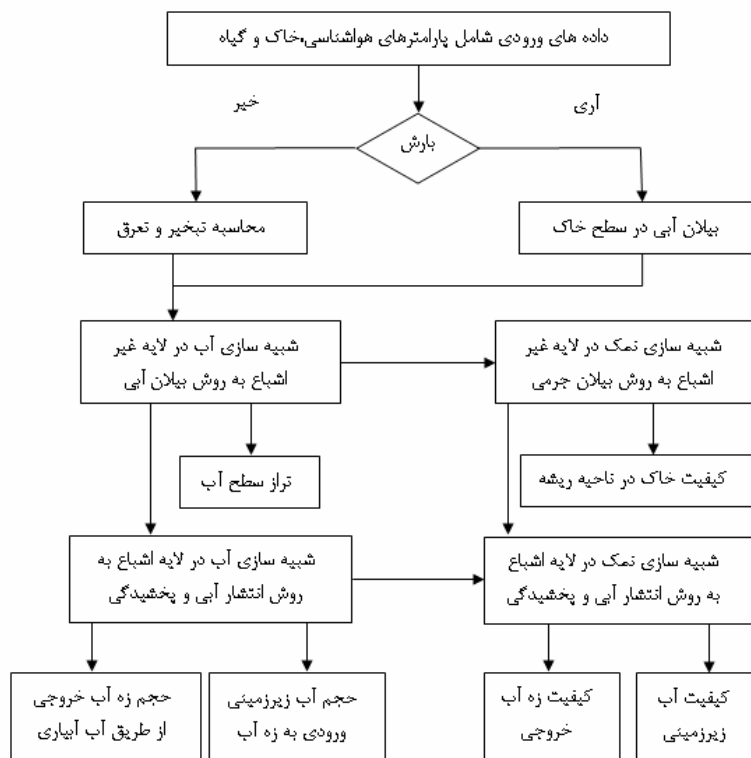
کامپیوتری مانند Vensim باید حلقه‌های علت و معلولی را به نمودارهای حالت و جریان تبدیل کرد. در واقع حالتها انباشتگی‌های سیستم می‌باشند و نشان دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیمات و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریانها نیز نرخهای تغییر را نشان می‌دهند یعنی نشان دهنده فرآیندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن تصمیمات اعمال می‌شود.

- ایجاد مدل شبیه سازی

این مرحله شامل تشخیص ساختار و قوانین تصمیم‌گیری، تخمین پارامترها، ارتباط‌های رفتاری و شرایط اولیه می‌باشد. الگوریتم کار شبیه سازی در شکل ۲ نشان داده شده است.

همان طور که ملاحظه می‌شود، در حلقه شماره یک با افزایش رطوبت خاک، ضریب تنش آبی افزایش می‌یابد و با افزایش آن، میزان تبخیر و تعرق واقعی افزایش می‌یابد که در نهایت موجب کاهش رطوبت خاک می‌شود و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. از طرفی با افزایش تبخیر و تعرق، میزان جریان رو به بالا از سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش رطوبت خاک می‌شود و حلقه مثبت دوم را تشکیل می‌دهد. در حلقه سوم با افزایش رطوبت خاک، نفوذ عمقی از ناحیه ریشه افزایش یافته و با افزایش نفوذ عمقی، رطوبت خاک در لایه‌های فوقانی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش نفوذ عمقی، تراز سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و با بالا آمدن تراز سطح آب، میزان جریان رو به بالا افزایش می‌یابد و در نهایت باعث افزایش رطوبت خاک در ناحیه غیر اشباع می‌شود (حلقه چهارم).

- تبدیل حلقه‌های علت و معلولی به نمودارهای حالت و جریان
برای اجرای یک مدل شبیه سازی به وسیله ابزار مدل‌سازی



(شکل ۲) - الگوریتم کار شبیه سازی مدل

(جدول ۱) - شوری اولیه آب زیرزمینی در لایه های زیرین لوله زهکش

| عمق لایه زیر زهکش (cm) | ۲۰۰-۲۴۰ | ۲۴۰-۲۸۰ | ۲۸۰-۳۲۰ | ۳۲۰-۳۶۰ | ۳۶۰-۶۰۰ |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| شوری (dS/m) | ۳/۵ | ۴ | ۵ | ۷ | ۲۵ |

(جدول ۲) - میانگین EC آب کانال امیرکبیر در طی ماههای مختلف سال ۱۳۸۶ (dS/m)

| فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | مهر | آبان | آذر | دی |
|---------|----------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-----|-------|
| ۱/۶۰۲ | ۰/۹۵۸ | ۱/۴۷۹ | ۱/۶۰۹ | ۱/۷۶۱ | ۲/۳۰۸ | ۲/۲۲۲ | ۱/۷۷ | ۱/۷ | ۱/۷۸۹ |

$$R.S.E. = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} / \bar{Y}_m \quad (۱۶)$$

در این رابطه \bar{Y}_m میانگین مقادیر اندازه گیری شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی و صحت‌سنجی مدل تهیه شده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده صحرائی انجام گرفت که به شرح زیر می‌باشد:

- سطح ایستابی

سطح ایستابی عاملی مهم در ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی به شمار می‌رود. عمق سطح ایستابی مزرعه مورد مطالعه قبل از هر آبیاری و بعد از اتمام آبیاری، با فاصله زمانی یک تا دو روز از طریق پیزومترهای مشاهده ای انجام شده است. شکل ۳ نوسانات سطح ایستابی مشاهده‌ای و شبه سازی شده را نسبت به زمان جولوس (شروع از روز اول ژانویه) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد.

- دبی خروجی زهکش

اندازه گیری دبی خروجی از زهکش‌ها هم زمان با قرائت تراز سطح آب، بعد از ۲ الی ۳ روز از انجام آبیاری و از طریق چاهک کنترل لوله زهکشی در محل ورود به کانال جمع آوری کننده صورت گرفته است. در شکل ۴ داده‌های صحرائی همراه با نتایج حاصل از مدل نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج مدل با داده‌های مشاهده ای وجود دارد.

- شوری آب زیرزمینی

شکل ۵ چگونگی تغییرات شوری و زمان به تعادل رسیدن شوری لایه‌های زیرزمینی را با داده‌های صحرائی جمع آوری شده از عمق‌های ۲/۲۰، ۲/۶۰ و ۳/۱۰ متری مقایسه می‌کند. همان گونه که ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین شوری آب زیرزمینی شبه سازی شده و داده‌های صحرائی وجود دارد.

ملاحظه می‌شود که با گذشت زمان، غلظت شوری آب زیرزمینی تحت تأثیر آبیاری با آب شیرین (حدود ۲ دسی زمینس بر متر)، کاهش می‌یابد و به شوری آب آبیاری نزدیک تر می‌شود. اما رفتار تغییرات شوری و زمان رسیدن به حالت تعادل در لایه‌های مختلف متفاوت است و با توجه به اینکه لایه‌های پایین تر شورتر می‌باشد

آزمون صحت سنجی مدل

پس از ترسیم نمودارهای علت و معلولی و تبدیل آنها به نمودارهای حالت و جریان، نوبت به آزمون صحت سنجی نتایج مدل می‌رسد. بدین منظور از داده‌های جمع آوری شده از مزرعه ۲۵ هکتاری ARC1-18 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد امیرکبیر که یکی از واحدهای هفتگانه طرح توسعه نیشکر می‌باشد، استفاده شد. جهت بررسی نوسانات سطح ایستابی در این مزرعه، سه ردیف پیزومتر که در هر ردیف سه عدد پیزومتر وجود دارد در فواصل ۱۰۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ متری از جمع کننده ها نصب گردید. در طی دوره آبیاری نیشکر (فروردین تا شهریور)، پارامترهای نوسانات سطح ایستابی به صورت روزانه، دبی خروجی زهکش‌ها، شوری آب آبیاری، شوری آب داخل پیزومترها و شوری زهاب ثبت گردید. اولین قرائت‌ها به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شد. در این تحقیق لایه اشباع زیر لوله زهکش به ۱۰ قسمت با ضخامت مساوی تقسیم شد تا تغییرات غلظت نمک در هر کدام از این لایه‌ها بررسی شود. با توجه به اینکه زهکش‌ها در عمق ۲ متری و لایه غیر قابل نفوذ در عمق ۶ متری قرار دارد و امکان نصب پیزومتر در اعماق پایین تر از ۳/۴ متر مقدور نبود، شوری اولیه آب زیرزمینی در لایه‌های فوقانی به کمک نصب پیزومتر اندازه گیری و شوری لایه‌های پایین تر با روش حل معکوس تعیین شد که نتایج آن همراه با داده‌های اندازه گیری شده از اعماق بالاتر در جدول ۱ نشان داده شده است.

آبیاری این مزرعه در اوایل سال ۱۳۸۶ شروع شد و به مدت ۶ ماه به طول انجامید. با توجه به اینکه آب آبیاری این مزارع از رودخانه کارون تأمین می‌شد، میزان شوری آن در ماه‌های مختلف متفاوت بود (جدول ۲).

همچنین میزان برازش میان مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده روزانه سطح ایستابی، زه آب خروجی، شوری زه آب خروجی و شوری آب زیرزمینی، توسط مدل از لحاظ آماری با محاسبه خطای استاندارد (رابطه ۱۵) و درصد خطا نسبت به میانگین مشاهدات (رابطه ۱۶) محاسبه گردید.

$$S.E. = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (۱۵)$$

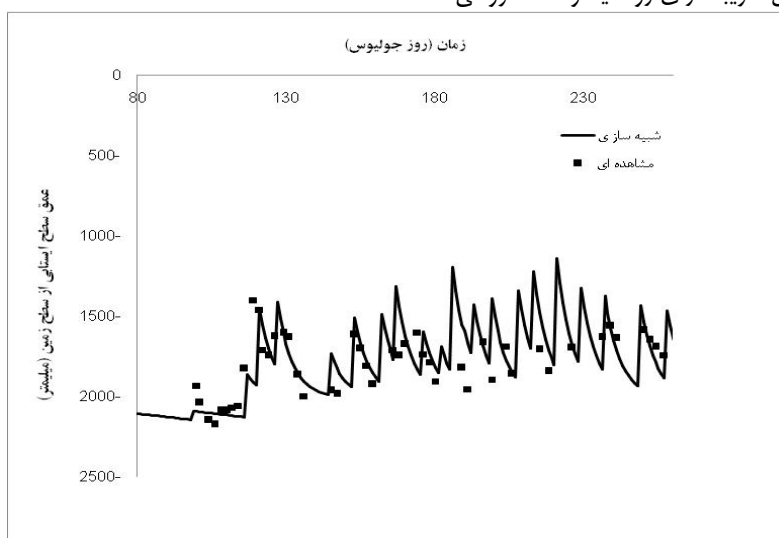
در این رابطه S.E.، خطای استاندارد یا انحراف معیار، n تعداد روزهای دوره مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش بینی شده توسط مدل می‌باشد.

در طول دوره آبیاری، ولی تغییرات شوری اندازه گیری شده دارای روند نوسانی می باشد. نوسانات شوری زهاب در شرایط واقعی ممکن است به دلیل تاثیر نوسانات سطح ایستابی بر عمق اختلاط (عمقی که جریانات شعاعی اتفاق می افتد) در لایه های زیرین عمق لوله زهکش باشد. به نظر می رسد بعد از آبیاری که سطح ایستابی بالا می آید عمق اختلاط افزایش یافته و در بین دو آبیاری که سطح ایستابی پایین می رود، عمق اختلاط کاهش می یابد. با توجه به اختلاف غلظت نمک در لایه های زیرین عمق نصب زهکش (جدول ۱)، به نظر می رسد که هرچه عمق اختلاط بیشتر باشد، شوری زهاب خروجی بیشتر و هرچه عمق اختلاط کمتر باشد شوری زهاب خروجی کمتر خواهد شد. (مذاکره شفاهی با دکتر پذیرا و مهندس اکرم)

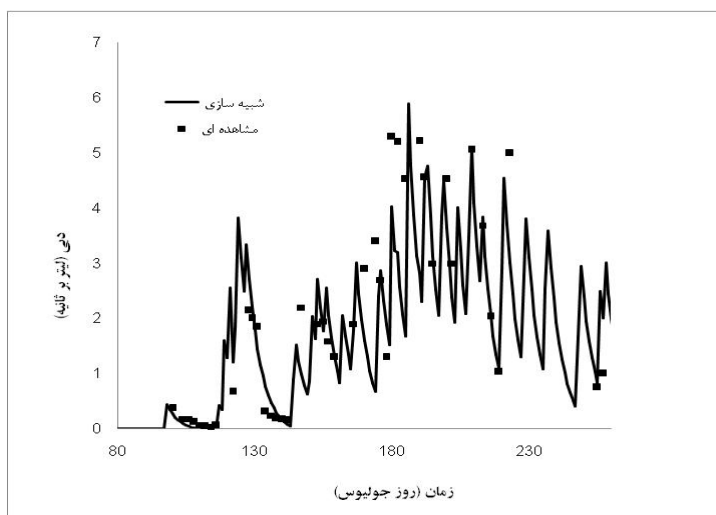
زمان رسیدن به تعادل در لایه های عمیق تر طولانی تر می باشد. در بیان علت این امر می توان گفت شوری لایه های نزدیک به لوله زهکش سریعتر با آب آبیاری نفوذ یافته ترکیب شده و تحت تأثیر جریان شعاعی از طریق لوله زهکش خارج می شوند. بنابراین سریعتر به حالت تعادل می رسند.

-شوری زهاب

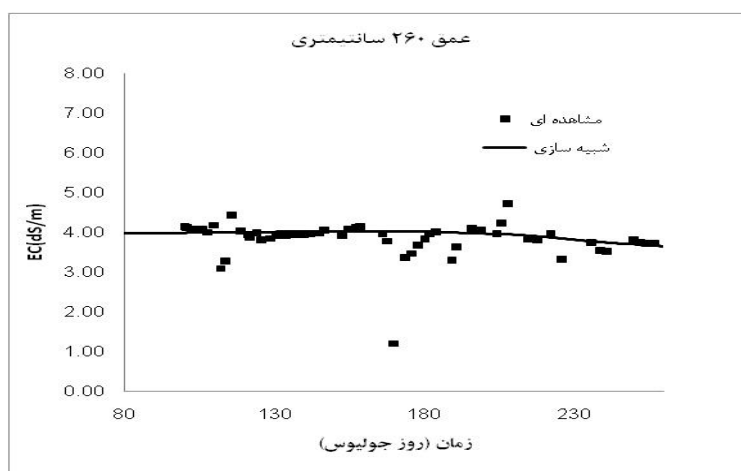
پس از قرائت دبی زهکش، مقداری از آب آن جهت تعیین EC به آزمایشگاه منتقل شد. شکل ۶ شوری زهاب اندازه گیری و شبیه سازی شده را نشان می دهد. با توجه به شکل فوق مشاهده می شود که تغییرات شوری زهاب خروجی و برآورد شده توسط مدل تقریباً دارای روند یکنواخت نزولی



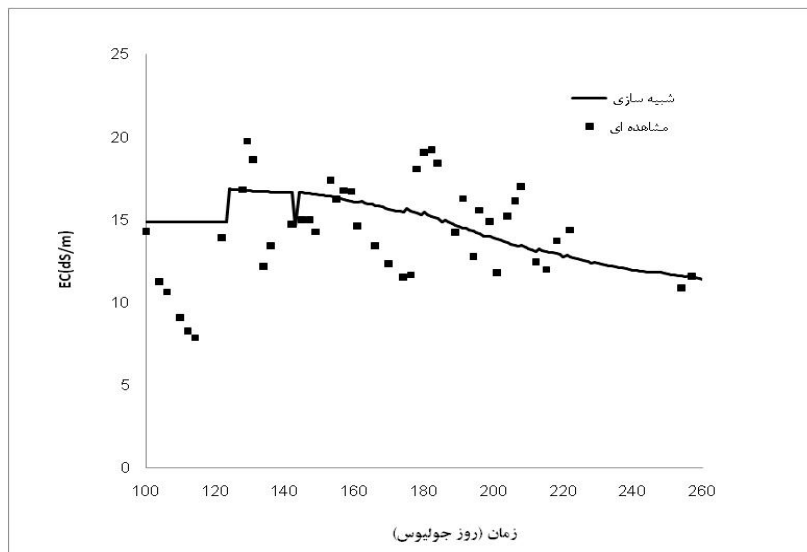
(شکل ۳) - مقایسه نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده و شبیه سازی شده مزرعه ARC1-18 طرح امیرکبیر در سال ۱۳۸۶



(شکل ۴) - مقایسه دبی خروجی زهکش مشاهده ای و شبیه سازی شده مزرعه ARC1-18 طرح امیرکبیر در سال ۱۳۸۶



(شکل ۵) - مقایسه تغییرات شوری آب زیرزمینی مشاهده ای و شبیه سازی شده در اعماق مختلف



(شکل ۶) - مقایسه شوری زهاب اندازه گیری و شبیه سازی شده (روز جولیس)

فقط روند عمومی خوبی را نشان می‌دهد، تطابق نسبی خوبی با داده‌های مشاهده‌ای دارد.

نتیجه گیری

نوسانات سطح ایستابی بین زهکش‌ها و دبی خروجی آنها توسط مدل محاسبه شد و نتایج با مقادیر اندازه گیری شده در سطح مزرعه هم‌سنجی و مقایسه گردید. نتایج نشان داد انطباق خوبی بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی وجود دارد.

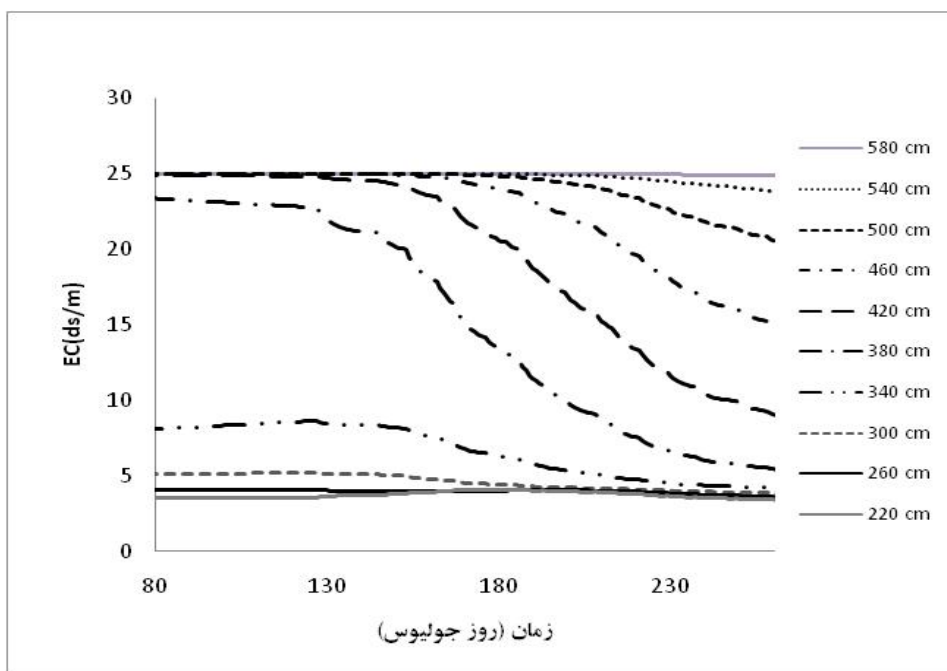
غلظت شوری آب زیرزمینی در لایه‌های مختلف شبیه سازی شد و نتایج آن با داده‌های صحرایی مقایسه گردید. پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها تطابق خوبی بین نتایج مدل و داده‌های جمع‌آوری شده ملاحظه شد.

نتایج مربوط به تغییرات شوری زهاب خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه هم‌سنجی و مقایسه گردید و مشاهده شد که مدل در روند عمومی تغییرات، از دقت نسبی خوبی نسبت به شرایط واقعی برخوردار است.

میزان برآزش میان مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روزانه سطح ایستابی، شدت تخلیه زهکش‌ها، شوری زه آب و شوری آب زیرزمینی در لایه‌های مختلف از لحاظ آماری با محاسبه خطای استاندارد (انحراف معیار) محاسبه گردید. خطای استاندارد این پارامترها به ترتیب ۱۴/۴ سانتیمتر، ۰/۴۳ لیتر بر ثانیه، ۲/۸ دسی‌زیمنس بر متر و خطای استاندارد لایه‌های آب زیرزمینی از بالا به پایین به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۲۹ و ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر برآورد گردید که دقت نسبتاً خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌شود که متوسط شوری زهاب خروجی در طول دوره شبیه‌سازی حدود ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد، در حالیکه شوری آب آبیاری (جدول ۲) و شوری آب زیرزمینی (جدول ۱) در سه عمق اندازه‌گیری شده، کمتر از ۵ دسی‌زیمنس بر متر است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که جریان‌های شعاعی در زیر لوله زهکش با آب زیرزمینی لایه‌های شور (جدول ۱ ملاحظه شود) ترکیب شده و باعث افزایش شوری زهاب می‌شوند. در نتیجه، عملیات آبیاری به مرور زمان باعث کاهش شوری لایه‌های پایین زیر لوله زهکش خواهد شد که این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ تغییرات شوری آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در لایه‌های زیرین لوله زهکش تا عمق ۶ متری را در طول مدت زمان ۶ ماه آبیاری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل به نظر می‌رسد که لایه‌های زیرین نزدیک‌تر به لوله زهکش، سریعتر با آب آبیاری به تعادل رسیده، اما لایه‌های تحتانی که شوری بیشتری دارند دیرتر به تعادل می‌رسند. دلیل این امر ممکن است به خاطر غالب بودن جریان توده‌ای نمک‌ها در لایه‌های نزدیک به لوله زهکش و غالب بودن جریان پخشیدگی (Diffusion) نمک‌ها در لایه‌های پایین‌تر از عمق اختلاط باشد. همانطور که گفته شد داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای تجزیه و تحلیل آماری شدند که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای تراز سطح ایستابی، دبی و شوری زه آب خروجی در برابر هم رسم شده و با خط ۴۵ درجه مقایسه شده‌اند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

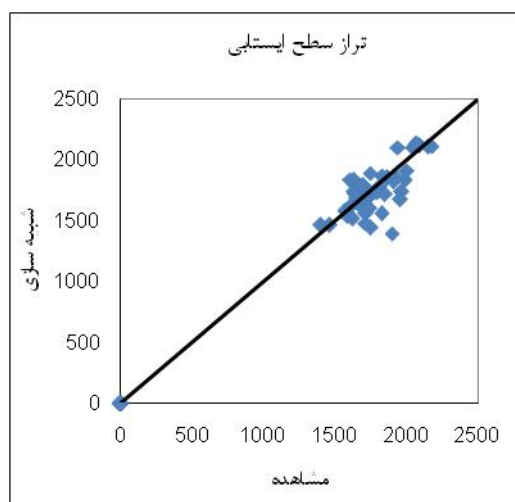
با توجه به مقادیر انحراف معیار و درصد خطا نسبت به میانگین و همچنین شکل شماره ۸ می‌توان گفت نتایج داده‌های شبیه‌سازی شده بجز در مورد شوری زه آب خروجی که دلیل آن بیشتر ذکر شد و



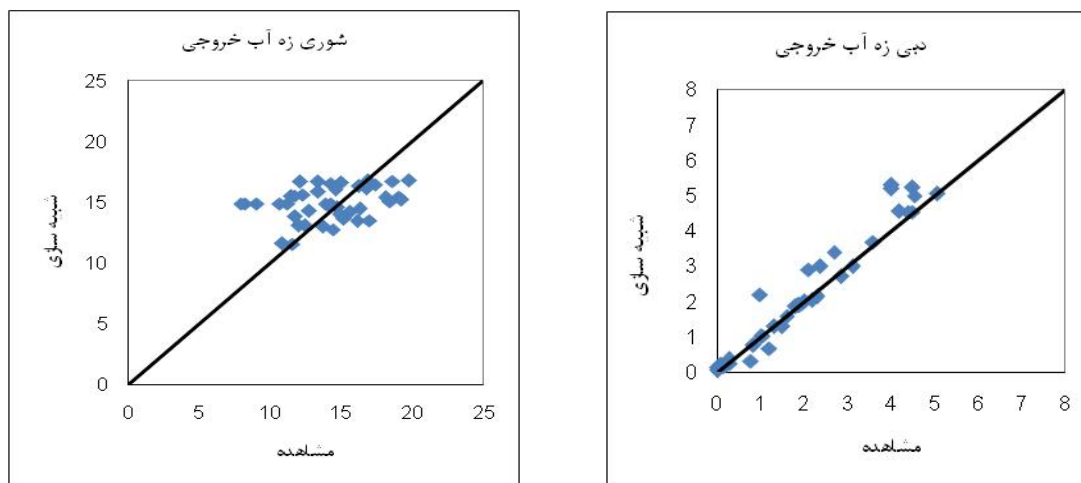
(شکل ۷) - شوری آب زیرزمینی شبیه سازی شده در لایه‌های تحتانی زهکشی (روز جولایوس)

(جدول ۳) - مقایسه نتیجه تجزیه و تحلیل آماری مقادیر مشاهده ای و پیش بینی شده توسط مدل

| شوری آب زیرزمینی | | | شوری زهاب | دبی زهاب خروجی | سطح ایستابی | پارامترهای مورد مطالعه |
|------------------|----------------|----------------|-----------|----------------|-------------|------------------------|
| ۳۰۰ سانتی متری | ۲۶۰ سانتی متری | ۲۲۰ سانتی متری | dS/m | Li/s | cm | S.E. |
| ۰/۳۶ | ۰/۲۹ | ۰/۴۹ | ۲/۸ | ۰/۴۳ | ۱۴/۴ | |
| ۸/۲ | ۷/۵ | ۱۲/۹ | ۱۹ | ۲۰ | ۸ | R.S.E. |



(مربوط به شکل ۸ می‌باشد)



(شکل ۸) - ترسیم داده‌های مشاهده‌ای در برابر مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل

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. *Agricultural Water Management* 78, pp. 165-180.

Palmer, R.N., Keyes, A.M., Fisher, S. (1993), Empowering Stakeholders through simulation in water resources planning. In *water management in the 90s A Time for Innovation*, New York., ASCE, pp. 451-454.

Rhoades, J.D., and A.D. Halvorson. (1977), Electrical conductivity methods for detecting and delineating saline seeps and measuring salinity in Northern Great Plains soils. *ARS W-42. USDA-ARS Western Region, Berkeley, CA.*

-Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, and W.J. Alves. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, pp. 433-43.

Simonovic, S.P., 2002. World water dynamics: global modeling of water resources. *Journal of Environment Management* 66(3), pp. 249-267.

Simonovic, S.P., (2002), Global water dynamics: Issues for the 21st century. *Journal of Water Science and Tech.*, 45(8), pp. 53-64.

Wahba, M.A.S. and Christen, E.W. (2006), Modeling subsurface drainage for salt load management in southeastern Australia. *Irrigation Drainage System* 20, pp. 267-282.

همچنین با استفاده از شاخص آماری RSE، درصد خطا نسبت به میانگین برای تخمین سطح ایستابی، دبی زه آب خروجی، شوری زه آب و شوری آب زیرزمینی در سه لایه به ترتیب برابر با ۸، ۲۰، ۱۹، ۱۲/۹، ۷/۵ و ۸/۲ درصد برآورد گردید که تطابق نسبی بین داده‌ها را تصدیق می‌کند.

از قابلیت مدل فوق علاوه بر ارائه تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد یک مدل، سادگی اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم و امکان توسعه گروهی مدل‌ها اشاره کرد.

مراجع

Fletcher, E. J. (1998), The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources. *Proc. 1st Int. Conf. on New Information Technolo. For Decision-Making in Civ. Engrg.*, University of Quebec, Montreal, Canada, pp. 909-920.

Forrester, J.W., (1961), *Industrial Dynamics*, Cambridge: Massachusetts, MIT Press.

Khan, S. 2004. *Irrigation Development, Rational Allocation of water Resources and food security in china*. Chinese National Committee on Irrigation and Drainage.

Jury W.A., A. Tuli and J. Letey, (2003), Effect of travel time on management of a sequential Reuse Drainage Operation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, pp. 1122-1126.

تاریخ دریافت: ۸۷/۷/۱۶

تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۱۳

Simulation of water and salt inflow in subsurface Drainage Systems, using system dynamics

H. Nozary^{1*}, A. liaghat², M. khayat kholghi³

Abstract

The quantity and quality of drain water should be determined to correct management on it. Therefore in this paper, the system dynamics technique was used to simulate the performance of a drainage system in unsteady state condition. The system dynamics technique is one of the object oriented approach that studies and manages complex feedback systems. Its merit includes friendly and easily development and improvement of the model. It's also used as a decision tool for engineering problems.

The model is capable of predicting many hydrological parameters such as water table fluctuation, drainage discharge, drain water salinity and ground water salinity. All above parameters were investigated theoretically and their trends were found to be legible. The model was validated using observed experimental field data collected from Amirkabir unit in sugarcane development plan located at khozestan, Iran. The results indicated the good agreement between the observed and simulated parameters.

Key words: System dynamics, Drainage system, quantity and quality of drain water

1 - PhD. Student, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(* - Corresponding author Email: hanozari@yahoo.com)

2,3 - Associate professor, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran