



ISSN 2251-7480

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال پنجم، شماره اول، پاییز ۱۳۹۴

## کاربرد مدل‌سازی سری زمانی در پیش‌بینی شدت تخلیه زهکشی زیرزمینی و نوسانات سطح ایستابی

شفیعه وزیرپور<sup>۱</sup>، فرهاد میرزایی اصل شیرکوهی<sup>۲</sup>، حامد ابراهیمیان<sup>۳\*</sup> و حامد رفیعی<sup>۴</sup>

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

۲) دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

۳\*) استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [ebrahimian@ut.ac.ir](mailto:ebrahimian@ut.ac.ir)

۴) استادیار گروه اقتصاد کشاورزی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۲۵

### چکیده

در این مقاله، از مدل‌سازی سری زمانی برای پیش‌بینی شدت تخلیه زهکشی زیرزمینی و نوسانات سطح ایستابی استفاده شده است. مدل‌های ARMAX و Drainmod برای این منظور به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که مدل Drainmod در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکشی زیرزمینی عملکرد بهتری دارد. همچنین، مدل Drainmod در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکشی زیرزمینی عملکرد بهتری دارد. همچنین، مدل Drainmod در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکشی زیرزمینی عملکرد بهتری دارد.

### کلیدواژه‌ها:

#### مقدمه

زهکشی اراضی از اقداماتی است که علاوه بر افزایش عملکرد در اراضی کشاورزی، استفاده پایدار از این اراضی را تضمین می‌کند. پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های زهکشی در کنترل سطح ایستابی و تخلیه زه‌آب می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت این سامانه‌ها کمک فراوانی کند (مختاران و همکاران، ۱۳۹۲). امروزه دانش مدل‌سازی به

دلیل کاهش هزینه‌ها و کوتاه کردن مدت زمان دستیابی به نتایج اجرای یک سناریو بر روی یک سیستم، به صورت گسترده‌ای در علوم مختلف بکار می‌رود. مدل Drainmod از جمله مدل‌های ریاضی است که برای شبیه‌سازی عملکرد سامانه‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی و همچنین شبیه‌سازی انتقال نمک‌ها و عناصر غذایی و

زمانی و مکانی هدایت الکتریکی زهاب زهکش‌های زیرزمینی نشان داد که استفاده از متغیر برونزا و مدل ARMAX سبب افزایش دقت مدل‌سازی داده‌ها می‌شوند (Tisu and Guitjens, 1986). استفاده از مدل سری زمانی ARX(1,0) برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی یک رابطه پویا بین بارش مازاد و سطح ایستابی را نشان داد (Knotters and Bierkens, 2001). در پژوهشی روش سری زمانی ARIMA برای برآورد تعرق از آسمانه گیاه با استفاده از اطلاعات جریان شیره گیاهی و اطلاعات هواشناسی بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل ARIMA(1,1,3) به عنوان بهترین مدل برای تخمین تعرق در دوره مرطوب می‌باشد (Chelcy et al., 2005). روش سری زمانی برای پیش‌بینی رطوبت خاک با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت در یک عمق مشخص به منظور تعیین دقیق زمان آبیاری بعدی و تأثیر آن روی رطوبت خاک در اعماق دیگر به کار گرفته شد و به منظور بررسی اثر آبیاری، از آبیاری به عنوان یک عبارت مداخله‌گر استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی سری زمانی توانست با دقت مطلوبی رطوبت خاک را برآورد کند (Aljoumani et al., 2012). در پژوهشی دیگر، برای شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب از مدل ARIMAX و بارش به عنوان داده ورودی مستقل برای پیش‌بینی رواناب آینده استفاده شد. دقت مدل ARIMAX در برآورد رواناب مطلوب گزارش شد (Nourani et al., 2013).

در مناطق مرطوب که دارای بارندگی قابل توجهی هستند، اراضی به صورت دیم کشت می‌شوند. زهکش‌ها در این اراضی معمولاً در موقع بارندگی فعال خواهند شد. از آنجا که بارش یک پدیده تصادفی است، می‌توان از دانش سری زمانی در پیش‌بینی عملکرد سامانه زهکشی زیرزمینی استفاده کرد. تاکنون مطالعات بسیار محدودی در زمینه کاربرد مدل‌سازی سری زمانی در سامانه زهکشی زیرزمینی انجام شده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق پیش‌بینی شدت تخلیه زهکش و عمق سطح

نیتروژن، توسعه و استفاده گسترده یافته است (Singh et al., 2006). نتایج بررسی عملکرد مدل Drainmod برای شبیه‌سازی سطح ایستابی در مصر نشان داد که انطباق خوبی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده وجود دارد و میانگین انحراف مطلق برای سطح ایستابی و شدت تخلیه در مزارع مختلف به ترتیب بین ۱۱ تا ۱۶ سانتیمتر و ۰/۲ تا ۰/۸۳ میلی‌متر در روز می‌باشد (Wahba et al., 2002). همچنین نتایج ارزیابی مدل Drainmod برای برآورد شدت تخلیه زهاب در منطقه جنوب غربی اوهایو نشان داد که میانگین انحراف مطلق و خطای استاندارد در مزارع مورد مطالعه به ترتیب بین ۰/۱ تا ۰/۷ و ۰/۳ تا ۱/۷ میلی‌متر در روز است و در نهایت عملکرد مدل مناسب تشخیص داده شد (Wang et al., 2006). به طور کلی بر اساس تحقیقات انجام شده، مقادیر خطای مطلق و خطای استاندارد برای پیش‌بینی عمق سطح ایستابی به ترتیب در محدوده ۴ تا ۲۴ و ۶ تا ۳۰ سانتی‌متر و برای شدت تخلیه زهاب به ترتیب برابر ۰/۶ تا ۱/۴ و ۰/۸ تا ۳/۶ میلی‌متر در روز گزارش شده است (Chang et al., Skaggs, 1978; Wang, Wahba et al., 2002; Gupta et al., 1993, 1983; et al., 2006; Skaggs et al., 2012).

سری زمانی مجموعه‌ای از داده‌های آماری است که در فواصل زمانی مساوی و منظم جمع‌آوری شده باشند و روش‌های آماری که این داده‌های آماری را مورد بررسی قرار می‌دهند، تحلیل سری‌های زمانی نامیده می‌شوند (Knotters and Bierkens, 2001). در سری‌های زمانی ویژگی مهم این است که معمولاً مشاهدات متوالی مستقل نیستند و دقیقاً این وابستگی است که بررسی شده و مدل می‌شود. تحلیل سری زمانی در علوم مختلف به منظور پیش‌بینی پدیده‌های مختلف کاربرد فراوان دارد (Sadorsky, 2006; Knotters and Bierkens, 2001). هدف از سری زمانی، تعیین قانونمندی و شناسایی رفتار آن برای پیش‌بینی در آینده می‌باشد (Sadorsky, 2006). نتایج استفاده از مدل سری زمانی ARIMA برای پیش‌بینی

### الگوی خودرگرسیون (AR)<sup>۲</sup>

اگر متغیر وابسته یا متغیر مورد نظر برای پیش‌بینی  $Y_t$  باشد، آنگاه فرآیند خود رگرسیون در حالت کلی به صورت رابطه (۲) خواهد بود (Gujarati, 1999):

$$(Y_t - \delta) = \alpha_1(Y_{t-1} - \delta) + \alpha_2(Y_{t-2} - \delta) + \dots + \alpha_p(Y_{t-p} - \delta) + U_t \quad (2)$$

که در آن  $Y_t$  یک فرآیند خودرگرسیون مرتبه  $p$ ،  $AR(p)$  است. به عبارت دیگر، متغیر  $Y_t$  از فرآیند خود رگرسیون مرتبه  $p$  پیروی می‌کند. در رابطه بالا،  $\delta$  میانگین  $Y$  و  $U_t$  جمله اختلال خالص است.

### الگوی میانگین متحرک (MA)<sup>۳</sup>

فرآیند میانگین متحرک در پیش‌بینی الگوی‌های سری‌زمانی به طور گسترده استفاده می‌شود. این الگو به صورت رابطه (۳) است (Sadorsky, 2006):

$$Y_t = \mu + \beta_0 U_t + \beta_1 U_{t-1} + \beta_2 U_{t-2} + \dots + \beta_q U_{t-q} \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $\mu$  مقدار ثابت و  $U$  جمله اختلال است. در الگوی بالا  $Y_t$  از فرآیند  $A(q)$  پیروی می‌کند.

### الگوی خودرگرسیون میانگین متحرک (ARMA)<sup>۴</sup>

به طور کلی فرآیندی را  $ARMA(p,q)$  گویند که شامل  $p$  مرتبه جمله خود رگرسیون و  $q$  مرتبه جمله میانگین متحرک باشد (به عبارت دیگر شامل  $p$  مرتبه جمله با وقفه از متغیر وابسته و  $q$  مرتبه جمله با وقفه از جملات اختلال باشد). همچنین اگر یک سری‌زمانی پس از  $d$  مرتبه تفاضل‌گیری ساکن و سپس توسط فرآیند  $ARMA(p,q)$  مدل‌سازی شود، سری‌زمانی دارای فرآیند خود رگرسیونی میانگین متحرک انباشته  $ARIMA(p,d,q)$  است (Gujarati, 1999). به طور کلی یک مدل عمومی  $ARMA(p,q)$  عبارت است از (Gujarati, 1999):

ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی با استفاده از تحلیل سری‌زمانی و مقایسه نتایج حاصل از آن با مدل شبیه‌سازی Drainmod می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### سری‌زمانی

برای بررسی وابستگی بین مشاهدات متوالی (مانند هیدروگراف دبی زهکش و سطح ایستابی) از تابع خود همبستگی و تابع خود همبستگی جزئی استفاده شد. خود همبستگی در تاخیر  $K$  عبارت است از همبستگی بین مشاهداتی که  $K$  واحد زمانی با یکدیگر فاصله دارند. تابع خود همبستگی نظری که با  $\rho_k$  نشان داده می‌شود و به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Chelcy et al., 2005):

$$\rho_k = \frac{\text{cov}(x_t, x_{t+k})}{\text{var}(x_t)} \quad (1)$$

همبستگی بین  $X_{t+k}$  و  $X_t$  بعد از حذف اثر متغیرهای  $X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_{t+k-1}$  را ضریب خودهمبستگی جزئی می‌نامند. در برآورد ضرایب الگو با استفاده از داده‌های سری‌زمانی، فرض بر این است که متغیرهای الگو ایستا هستند. یک متغیر سری‌زمانی وقتی ایستا است که میانگین، واریانس و ضریب خود همبستگی آن در طول زمان ثابت باقی بماند. در این مطالعه، برای بررسی پایایی متغیرها از آزمون دیکی-فولر<sup>۱</sup> استفاده شد (Dickey and Fuller, 1979) معمولاً برای تخمین الگوی سری‌زمانی، از روش باکس-جنکینز (Box et al., 2011) استفاده می‌شود که دارای چهار مرحله شناسایی، تخمین، کنترل تشخیصی و پیش‌بینی می‌باشد.

### الگوهای سری‌زمانی

<sup>1</sup> Dickey – Fuller Test

<sup>2</sup>Autoregressive

<sup>3</sup>Moving Average

<sup>4</sup>Autoregressive Moving Average

دیگر می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. به عبارتی داده‌هایی که کمترین و یا بیشترین مقدار را دارند سبب کاهش دقت مدل‌سازی سری زمانی می‌شوند. این مشکل ممکن است توسط ترم مداخله‌ای اصلاح شود (Nourani et al., 2013, Aljoumani et al., 2012). بر این پایه مدل‌های ARX و ARMAX به همین منظور توسعه داده شدند و مورد استفاده قرار گرفتند. در مدل‌های ARX و ARMAX با استفاده از متغیرهای برونزا که روی پدیده مورد نظر تاثیرگذار است، امکان مدل‌سازی بهتر پدیده فراهم شد. در این پژوهش، با توجه به ناکارآمدی مدل‌های AR و ARMA در توصیف شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی، مدل‌های جامع‌تر و کامل‌تر سری زمانی یعنی  $ARX(p,x)$  و  $ARMAX(p,q,x)$  بر روی داده‌های شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی توسعه داده شد. همچنین، متغیرهای مستقل متفاوتی که روی شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی تاثیرگذار هستند، مانند بارش در همان روز و روزهای قبل، ارزش گذاری روی هر روز و متوسط شدت تخلیه زهاب و متوسط عمق سطح ایستابی در روزهای قبل مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به این که داده‌های مورد استفاده، به صورت روزانه می‌باشد و پیش‌بینی پارامترهای عمق سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکشی نیز به صورت روزانه در این مطالعه مورد نظر بود، اولین متغیر برونزایی که برای بهبود عملکرد مدل‌های سری زمانی استفاده شد، ارزش‌گذاری روزانه بود. بدین منظور از روز اول هر سال، روز اول دارای ارزش یک و سایر روزها بدون ارزش (صفر)، در روز دوم هر سال، روز دوم دارای ارزش یک، روز اول و سایر روزها بدون ارزش، در روز سوم هر سال، روز سوم دارای ارزش یک، روز اول، دوم و سایر روزها بدون ارزش قلمداد شد و این روند تا روز ۳۶۴ ادامه پیدا کرد. بدین گونه متغیر برونزای  $d_{363}, d_{364}, \dots, d_2, d_1$  تعریف شد. با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه آبیاری

$$y_t = \mu + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + U_t - \theta_1 U_{t-1} - \theta_2 U_{t-2} - \dots - \theta_q U_{t-q} \quad (4)$$

در رابطه بالا  $\mu$  مقدار ثابت،  $U$  جمله اخلال،  $\phi$  و  $\theta$  ضرایب رابطه است.

#### الگوی خودرگرسیون میانگین متحرک همراه با متغیر برونزا (ARMAX)

مدل ARMAX تعمیمی از مدل ARMA می‌باشد. مواقعی که سری زمانی یک پدیده نتواند ویژگی‌های خود را به خوبی توصیف کند و یا به عبارت دیگر با تجزیه و تحلیل سری زمانی متغیر نتوان آن پدیده را توصیف نمود، از مدل خودرگرسیونی میانگین متحرک انباشته همراه با متغیر خارجی  $ARMAX(p,q,x)$  استفاده می‌شود (Tisu and Guitjens, 1986). مدل توسعه یافته ARMA است که با استفاده از رگرسیون خطی متغیر برونزا توصیف بهتر پدیده را امکان‌پذیر می‌سازد و به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (Bierens, 1987):

$$\phi(L)Y_t = \beta x_t + \theta(L)\varepsilon_t \quad (5)$$

در رابطه بالا  $x_t$  متغیرهای برونزای توضیحی،  $\beta$  ضرایب متغیرهای برونزای توضیحی،  $\varepsilon_t$  جمله خطا،  $\phi(L)$  جملات الگوی خودرگرسیونی،  $\theta(L)$  جملات الگوی میانگین متحرک و  $L$  عملگر تاخیر است.

در این مطالعه به منظور بررسی پایایی متغیرها، محاسبه ضریب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی و توسعه مدل‌های مختلف سری زمانی روی متغیرها و انجام پیش‌بینی‌های مورد نظر از نرم افزار Eviews 6.0 استفاده شد.

یکی از محدودیت‌هایی که در مدل‌های ARMA و AR وجود دارد در نظر گرفتن تنها همبستگی موجود بین متغیرها و خطاها در پیش‌بینی است. این در حالی است که در مواقع زیادی بهره‌گیری از یک یا چند پیش‌بینی کننده

<sup>1</sup>Autoregressive-moving-average model with exogenous inputs model

صورت نمی‌گیرد و تنها منبع تولید زهاب بارش می‌باشد، متغیر برونزای دیگر مورد بررسی، میزان بارش بود به طوری که تاثیر بارش در یک و دو روز قبل در شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی بررسی شد.

### مدل Drainmod

مدل Drainmod به منظور شبیه‌سازی سطح ایستابی و شدت زهاب خروجی از زهکش‌ها در مناطقی که سطح ایستابی در عمق کم قرار گرفته است به کار می‌رود (Skaggs, 1978). بسیاری از پارامترهای ورودی مدل Drainmod با اندازه‌گیری مستقیم در مزرعه به دست می‌آیند. در مورد تعدادی از این پارامترها مانند هدایت هیدرولیکی خاک عدم اطمینان وجود دارد. فرآیند تعیین غیرمستقیم پارامترهای ورودی نامطمئن را واسنجی مدل می‌گویند که در آن داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود.

### واسنجی مدل Drainmod

این تحقیق در شبکه زهکشی زیرزمینی ران بهشهر واقع در شمال شرقی شهرستان بهشهر و در حاشیه جنوبی خلیج گرگان انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم حرارتی نیمه مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و مرطوب و بارندگی کم و زمستان‌های معتدل با بارندگی زیاد است. متوسط بارندگی سالانه ۵۷۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه منطقه ۱۶ درجه سانتیگراد است (براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی تیرتاش بهشهر که در فاصله پنج کیلومتری از اراضی مورد مطالعه قرار دارد). وسعت شبکه زهکشی زیرزمینی ران بهشهر حدود ۸۵۰ هکتار است. به منظور بررسی عملکرد زهکش‌ها، یک مزرعه آزمایشی به وسعت ۳/۳ هکتار انتخاب گردید. طول زهکش‌های مزرعه ۴۴۰ متر، فاصله بین زهکش‌ها ۷۵ متر، عمق زهکش ۱/۵ متر و عمق لایه محدود کننده ۵/۵ متر می‌باشد. مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل با توجه به اطلاعات هواشناسی منطقه به روش تبخیر از تشت محاسبه شد.

کشت غالب منطقه گیاه جو می‌باشد که به صورت دیم کشت می‌شود. مطالعات لایه‌بندی خاک نشان داد که بافت خاک در لایه سطحی مزرعه آزمایشی سبکتر از لایه‌های عمیق‌تر است. بافت خاک لایه‌های اول تا سوم به ترتیب شنی لومی، لومی سیلتی و رسی سیلتی و ضخامت آنها به ترتیب ۴۰، ۶۰ و ۴۵۰ سانتی‌متر بدست آمد. مدل Drainmod در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های موجود دبی زهاب و سطح ایستابی در مزرعه آزمایشی شامل دوره سه ماهه (فصل پاییز) در سال ۱۳۸۳ و چهار ماهه (دی تا اسفند) در سال ۱۳۸۵ واسنجی شد. داده‌های عمق سطح ایستابی از صفر تا ۱۱۰ سانتی‌متر و شدت تخلیه زهکشی از ۰/۱ تا ۲/۴ میلی‌متر در روز متغیر بود. میانگین عمق سطح ایستابی و شدت تخلیه زهکشی به ترتیب ۳۱/۷ سانتی‌متر و ۰/۶۷ میلی‌متر در روز بود. مجموع بارندگی در دوره سه ماهه سال ۱۳۸۳ و دوره چهار ماهه سال ۱۳۸۵ به ترتیب ۲۵۸/۵ و ۴۴۵/۶ میلی‌متر بود. همچنین تعداد روزهای بارندگی در دوره سه ماهه سال ۱۳۸۳ و دوره چهار ماهه سال ۱۳۸۵ به ترتیب ۲۳ و ۵۳ بود. جدول ۱ مقادیر بارندگی سالانه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲ در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. پس از واسنجی مدل Drainmod اطلاعات مربوط به شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی بین دو زهکش، برای دوره زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۳ برآورد گردید. پس از تهیه این اطلاعات مورد نیاز، از روش باکس-جنکینز برای انجام مدل‌سازی سری زمانی استفاده شد. مدل‌های مختلف سری زمانی براساس نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod (سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۰) ایجاد شدند و سپس مورد ارزیابی قرار گرفتند تا مدل‌های منتخب برای پیش‌بینی شناسایی شود. سپس ارزیابی مدل‌های منتخب در پیش‌بینی شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی بین دو زهکش به مدت ۱۸ ماه (۳۰ درصد کل داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل Drainmod) از سال ۱۳۹۱ تا سال ۱۳۹۲ صورت گرفت. در پایان، عملکرد مدل منتخب

عدم تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی توسط مدل و ضریب کارایی پایین مدل، پارامترهای نشت عمودی یعنی هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی لایه غیر قابل نفوذ، ضخامت لایه محدود کننده و بار پیرومتریک آبخوان، واسنجی و مقادیر بهینه تعیین شد.

سری زمانی با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod در بازه زمانی ۱۸ ماهه ۹۲-۱۳۹۱ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

در این مطالعه ابتدا پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع افقی هر یک از سه لایه خاک واسنجی شد. به علت

جدول ۱. مقادیر بارندگی سالانه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲

سال	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲
بارندگی (میلی‌متر)	۹۲۵/۵	۶۵۴/۵	۵۴۰/۹	۴۷۸/۰	۴۳۳/۳	۶۵۹/۴	۳۷۵/۹	۶۶۵/۲	۸۲۷/۲	۶۶۶/۹

درون و برون نمونه‌ای کمتری داشته باشد مدل برتری است (Gemtzi and Stefanopoulos, 2011).

$$AIC = n \ln\left(\frac{SSR}{n}\right) + 2q \quad (9)$$

در رابطه بالا،  $SSR$  مجموع مربعات باقی‌مانده،  $n$  تعداد پیش‌بینی‌ها و  $q$  تعداد پارامترهای موجود در مدل است.

همچنین برای مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل‌های سری زمانی با نتایج مدل شبیه‌سازی Drainmod واسنجی شده از ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد (SE) استفاده شد.

#### نتایج و بحث

در جدول ۲ مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل Drainmod و همچنین مقادیر ضریب تعیین و میانگین ریشه مربعات خطای مدل واسنجی شده در برآورد عمق سطح ایستابی و شدت تخلیه زهاب آمده است. واسنجی مدل طبق مقادیر گزارش شده معیارهای ارزیابی مدل Drainmod (Skaggs, 2012) قابل قبول بود. بنابراین از مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی به منظور توسعه و ارزیابی مدل‌های سری زمانی استفاده شد.

#### معیارهای ارزیابی مدل‌ها

به منظور مقایسه قدرت پیش‌بینی و انتخاب برترین مدل سری زمانی، از معیارهای میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) و درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) استفاده شد (Haykin, 1994):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{Y_i} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

در روابط بیان شده،  $n$  تعداد پیش‌بینی‌ها،  $Y_i$  مقدار واقعی  $i$  ام و  $e_i$  خطای پیش‌بینی  $i$  ام است که از تفاوت مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی بدست می‌آید.

در مرحله کنترل تشخیصی بر اساس خطای برون نمونه‌ای، خطای درون نمونه‌ای و معیار آکائیک (AIC) بهترین مدل شناسایی شد. معیار آکائیک یکی از روش‌های مقایسه مدل‌های مختلف می‌باشد. این روش بر این مبنا استوار است که از بین مدل‌های مناسب، مدلی که دارای کمترین مقدار ضریب آکائیک باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود. همچنین از میان مدل‌های مختلف سری زمانی، مدلی که شاخص‌های MAPE، RMSE، MAE و

جدول ۲- مقادیر پارامترهای واسنجی شده و معیارهای ارزیابی مدل Drai nmod

هدایت هیدرولیکی لایه محدود کننده			ضخامت لایه محدود کننده			بار پیژومتریک آبخوان (سانتی‌متر)		
( )			( )			( )		
0/4	1/3	30	-	-	-	-	-	-
0/2	0/7	1/5	0/0012	30	100			
متغیر			R <sup>2</sup>			RMSE		
شدت تخلیه زهاب			0/48			0/02		
عمق سطح ایستابی			0/61			6/92		

خود همبستگی جزئی مدل‌های AR و ARMA با درجات مختلف بر روی داده‌های شدت تخلیه زهاب و سطح ایستابی توسعه داده شد. نتایج توسعه این مدل‌ها بر روی داده‌های شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ خلاصه شد.

پس از بررسی ایستابی متغیرهای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی و رسم نمودار خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی، مدل‌های مختلف سری زمانی با درجات مختلف به روی داده‌های متغیرهای مذکور توسعه داده شد. در ابتدا با توجه به نمودار خود همبستگی و

جدول ۳. توسعه مدل‌های AR و ARMA روی داده‌های شدت تخلیه زهاب

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	مدل
MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)	MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)		
0/02	0/03	۴۱/۲۱	0/02	0/03	۳۹/۵۹	0/۸۳	AR(2)
0/02	0/03	۴۱/۱۹	0/02	0/03	۳۹/۵۸	0/۸۳	ARMA(1,1)
0/02	0/03	۴۱/۳۵	0/02	0/03	۳۹/۶۵	0/۸۳	ARMA(1,2)
0/02	0/03	۴۱/۶۹	0/02	0/03	۳۹/۹۸	0/۸۴	ARMA(2,2)
0/02	0/03	۴۱/۴۸	0/02	0/03	۳۹/۵۸	0/۸۴	ARMA(3,2)

جدول ۴. توسعه مدل‌های AR و ARMA روی داده‌های عمق سطح ایستابی

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	مدل
MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)	MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)		
۱۴/۸۵	۱۸/۱۵	۴۳/۴۹	۱۴/۸۱	۱۸/۳۲	۴۴/۰۵	0/۹۶	AR(1)
۱۴/۸۳	۱۸/۱۴	۴۳/۵۰	۱۴/۸۰	۱۸/۳۲	۴۴/۰۵	0/۹۶	ARMA(1,1)
۱۴/۹۰	۱۸/۱۴	۴۳/۴۷	۱۴/۸۸	۱۸/۳۴	۴۴/۱۰	0/۹۶	ARMA(1,2)
۱۵/۰۲	۱۸/۱۵	۴۳/۴۸	۱۵/۰۰	۱۸/۳۴	۴۴/۰۵	0/۹۶	ARMA(2,2)
۱۵/۰۱	۱۸/۱۶	۴۳/۴۱	۱۵/۰۰	۱۸/۳۵	۴۴/۰۶	0/۹۶	ARMA(3,2)

توسعه مدل‌های ARX و ARMAX روی داده‌های

شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی

مدل‌های مختلف ARX و ARMAX با درجات مختلف و همراه با متغیرهای برونزای تعریف شده روی داده‌های شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی توسعه داده شد. خلاصه‌ای از مدل‌های مورد آزمون و نتایج آن‌ها برای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شد.

نتایج توسعه مدل‌های AR و ARMA با درجات مختلف نشان از ناکارآمدی این گونه مدل‌ها در توصیف ماهیت داده‌های شدت تخلیه زهاب و خطای مدل‌سازی بالا تا حدود ۴۲ درصد بود. همچنین نتایج مدل‌های مذکور بر روی داده‌های عمق سطح ایستابی نیز نامطلوب و خطای مدل‌سازی بالا و حدود ۴۴ درصد بود. لذا این مدل‌ها نتوانستند تغییرات روزانه دبی و عمق سطح ایستابی را به خوبی نشان دهند.

جدول ۵. توسعه مدل‌های ARX و ARMAX روی داده‌های شدت تخلیه زهاب همراه با متغیرهای برونزای ارزش روزانه و بارش روزهای قبل

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	مدل
MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)	MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)		
۰/۰۱	۰/۰۲	۱۵/۹۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۸/۲۵	۰/۸۶	ARX(1,0) <sup>a</sup>
۰/۰۱	۰/۰۳	۱۴/۸۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۷/۰۳	۰/۸۸	ARX(2,0) <sup>b</sup>
۰/۰۱	۰/۰۳	۱۴/۸۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۷/۰۳	۰/۹۰	ARX(2,0) <sup>c</sup>
۰/۰۱	۰/۰۳	۱۴/۸۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۷/۰۲	۰/۹۰	ARMAX(2,1,0) <sup>d</sup>
۰/۰۱	۰/۰۳	۱۴/۷۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۱۷/۰۰	۰/۹۰	ARMAX(1,2,0) <sup>e</sup>

a: ارزش روزانه و بارش همان روز به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

b: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

c, d و e: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

جدول ۶. توسعه مدل‌های ARX و ARMAX روی داده‌های عمق سطح ایستابی همراه با متغیرهای برونزای ارزش روزانه و بارش روزهای قبل

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	مدل
MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)	MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)		
۶/۱۰	۱۱/۳۱	۲۲/۰۰	۷/۰۰	۱۲/۹	۲۵/۱۸	۰/۹۹	ARX(1,0) <sup>a</sup>
۶/۲۵	۱۱/۵۱	۲۲/۵۸	۷/۱۸	۱۳/۱۷	۲۵/۸۶	۰/۹۹	ARX(2,0) <sup>b</sup>
۶/۰۲	۱۱/۱۳	۲۱/۹۲	۶/۹۶	۱۲/۷۹	۲۵/۲۵	۰/۹۹	ARX(2,0) <sup>c</sup>
۶/۰۲	۱۱/۱۳	۲۱/۹۲	۶/۹۵	۱۲/۷۹	۲۵/۲۵	۰/۹۹	ARMAX(2,1,0) <sup>d</sup>
۵/۹	۱۱/۰۹	۲۱/۸۳	۶/۹۵	۱۲/۷۸	۲۵/۲۳	۰/۹۹	ARMAX(3,2,0) <sup>e</sup>

a و b: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

c, d و e: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

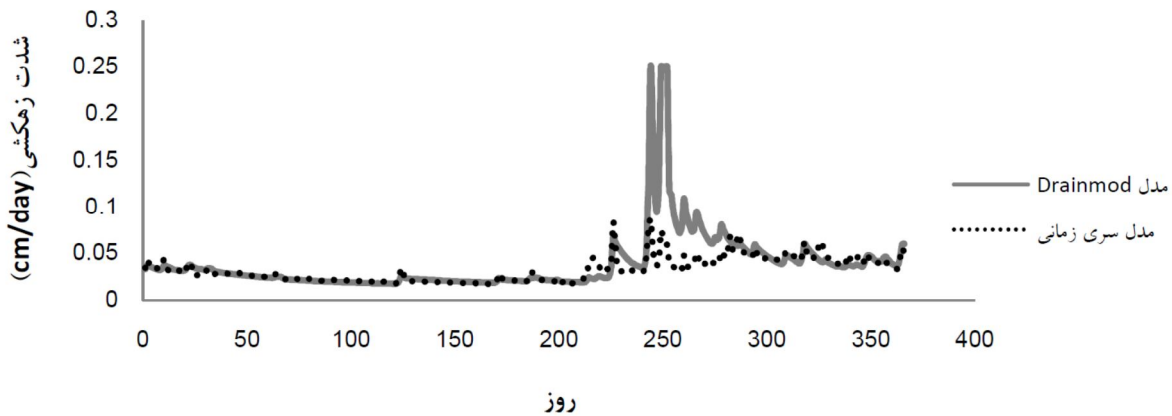
گرفته شده بود. خطای مدل‌سازی در مدل‌های ARX و ARMAX آزمون شده برای شدت تخلیه زهاب و عمق

نتایج مدل‌های ARX و ARMAX حاکی از کاهش خطای مدل‌سازی نسبت به مدل‌های AR و ARMA بکار

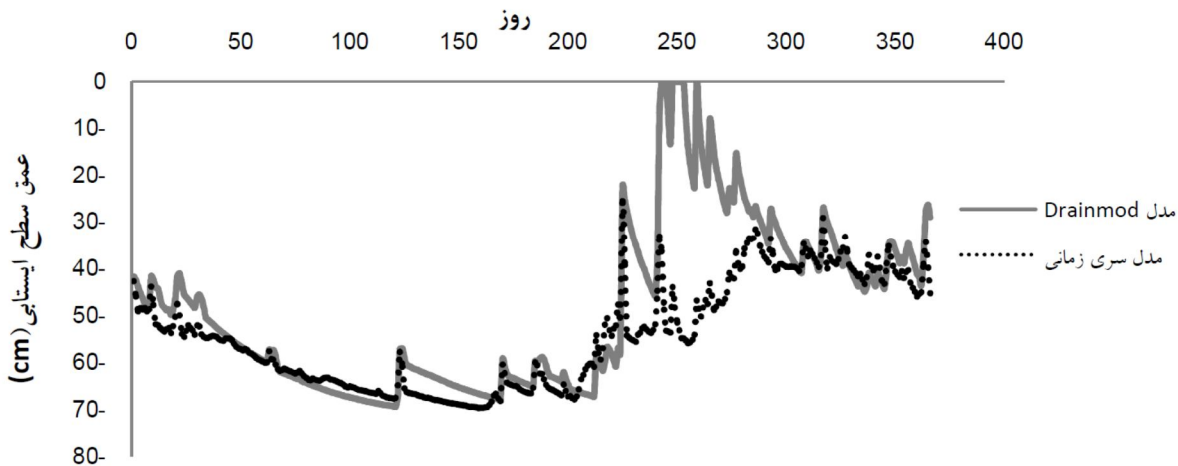


زمانی به خوبی نشان داده نشد و میزان شدت تخلیه زهاب کم برآورد مشاهده شد. از این نظر برای رفع مشکل کم برآورد مدل سری زمانی در دوره پیک شدت تخلیه زهاب از متغیر برونزای دیگر در این پژوهش استفاده شد. همچنین مدل بکار گرفته شده برای عمق سطح ایستابی نوسانات روزانه سطح ایستابی را به خوبی نشان می‌دهد. لیکن مانند مدل شدت تخلیه زهاب در فاصله روزهای ۲۲۱ تا ۲۹۱ که سطح ایستابی بالا است نتایج مطلوب نیست. در این مدل سری زمانی نیز در دوره نوسانات شدید، سطح ایستابی کم برآورد شده است. در نتیجه مدل‌های مذکور هم برای شدت تخلیه زهاب و هم برای عمق سطح ایستابی هر دو نیاز به اصلاح دارند، تا نتایج در دوره‌ی تغییرات شدید نیز بهبود یابد.

سطح ایستابی به ترتیب حدود ۱۷ و ۲۵ درصد بود که نسبت به مدل‌های AR و ARMA توسعه داده شده بر روی داده‌های شدت تخلیه زهاب حدود ۶۰ درصد و در مورد عمق سطح ایستابی ۶۲ درصد کاهش یافت. این امر ناشی از تاثیر مثبت متغیرهای برونزای به کار گرفته شده بود. نتایج مدل  $ARMAX(1,2,0)$  توسعه داده شده بر روی شدت تخلیه زهاب و مدل  $ARX(1,0)$  توسعه داده شده بر روی داده‌های عمق سطح ایستابی به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ در سال ۱۳۸۵ نشان داده شد. نتایج پیش‌بینی در دوره‌ای که تغییرات شدت تخلیه زهاب قابل ملاحظه نیست از روز اول تا روز ۲۲۰ و از روز ۳۰۰ تا ۳۵۰ مناسب بود لیکن در دوره‌ای که حداکثر تخلیه زهاب اتفاق می‌افتد و تغییرات شدت تخلیه زهاب شدید است از روز ۲۲۱ تا ۲۹۹ تغییرات توسط مدل‌های سری



شکل ۱. توسعه مدل  $ARMAX(1,2,0)$  روی داده‌های شدت تخلیه زهاب



شکل ۲. توسعه مدل  $ARX(1,0)$  روی داده‌های عمق سطح ایستابی

با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه حداکثر بارش از نظر مقدار و تعداد بارش و در نتیجه حداکثر شدت تخلیه زهاب و حداکثر خیز سطح ایستابی در فصل پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد برای لحاظ کردن تاثیر بارش در این دو فصل متغیر برونزای دیگری در نظر گرفته شد. برای تعریف این متغیر برونزا از میزان شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی در روزهای قبل استفاده شد. بدین منظور در دو فصل پاییز و زمستان متوسط شدت تخلیه زهاب و متوسط عمق سطح ایستابی در دو روز قبل یا جدول ۷. توسعه مدل‌های ARX و ARMAX روی داده‌های شدت تخلیه زهاب همراه با متغیرهای برونزای ارزش روزانه و بارش روزهای قبل و متوسط دبی در دو و سه روز قبل

متوسط عمق سطح ایستابی در سه روز قبل

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	معیار آکائیک	مدل
MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)	MAE (cm/day)	RMSE (cm/day)	MAPE (%)			
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۸/۸۶	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۱۰/۰۲	۰/۹۰	-۶/۹۱	ARMAX(1,1,0) <sup>a</sup>
۰/۰۰۵	۰/۰۱	۸/۷۳	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۱۰/۴۱	۰/۹۱	-۶/۹۷	ARMAX(1,4,0) <sup>b</sup>
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۸/۸۶	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۱۱/۸۰	۰/۹۱	-۶/۹۷	ARMAX(4,1,0) <sup>c</sup>
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۷/۴۴	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۸/۲۴	۰/۸۹	-۶/۸۳	ARMAX(2,2,0) <sup>d</sup>
۰/۰۰۵	۰/۰۱	۷/۸۲	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۹/۷۸	۰/۸۹	-۶/۸۵	ARMAX(3,3,0) <sup>e</sup>

a: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل و متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

b: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل، متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل و متوسط شدت تخلیه زهاب سه روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

c: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل و متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

d, e: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل و متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

جدول ۸. توسعه مدل‌های ARX و ARMAX روی داده‌های عمق سطح ایستابی همراه با متغیرهای برونزای ارزش روزانه و بارش روزهای قبل و متوسط عمق سطح ایستابی در دو و سه روز قبل

خطای درون نمونه‌ای			خطای برون نمونه‌ای			R <sup>2</sup>	معیار آکائیک	مدل
MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)	MAE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)			
۴/۸۶	۳/۹۵	۷/۸۰	۳/۰۹	۷/۸۰	۹/۶۳	۰/۹۹	۳/۹۹	ARX(1,0) <sup>a</sup>
۴/۳۵	۳/۶۷	۶/۵۴	۲/۸۳	۶/۵۴	۸/۵۹	۰/۹۹	۳/۹۳	ARMAX(2,2,0) <sup>b</sup>
۳/۱۲	۵/۱۰	۱۰/۲۷	۳/۹۰	۶/۴۷	۱۳/۰۴	۰/۹۹	۳/۷۵	ARX(2,0) <sup>c</sup>
۴/۰۲	۶/۹۴	۱۳/۶۶	۵/۱۰	۸/۸۹	۱۷/۵۲	۰/۹۹	۴/۰۵	ARMAX(2,1,0) <sup>d</sup>
۳/۵۶	۵/۶۴	۱۰/۹۹	۴/۵۱	۷/۷۶	۱۵/۲۳	۰/۹۹	۴/۰۳	ARMAX(3,1,0) <sup>e</sup>

a و b: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل و متوسط عمق سطح ایستابی دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

c: ارزش روزانه، بارش همان روز، روز قبل و دو روز قبل و متوسط عمق سطح ایستابی دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

d و e: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل و متوسط سطح ایستابی سه روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

اولاً معیار آکائیک آن حداقل و همچنین سایر شاخص‌های خطای برون نمونه‌ای و درون نمونه‌ای آن نیز حداقل باشد. نتایج مدل‌های برتر برای هر یک از متغیرهای نام برده در جدول ۹ خلاصه شد. همچنین نمودار مدل‌های برتر برای هر یک از متغیرهای بالا (شکل‌های ۳ و ۴) آورده شد. در مرحله چهارم جزء خطا مورد آزمون ایستایی قرار گرفت و نتایج انتخاب بهترین مدل بار دیگر بررسی شد. جزء خطا برای مدل‌های برگزیده شده برای هر یک از متغیرها ایستا و بنابراین مدل‌های برگزیده صحیح بود.

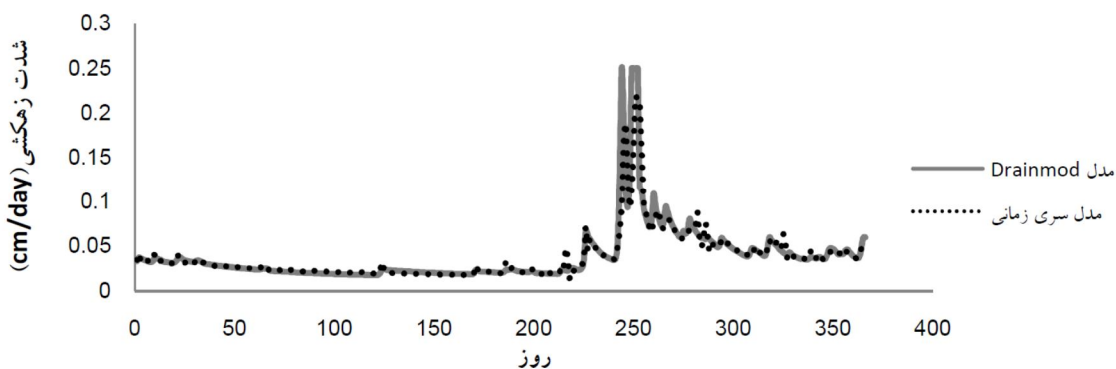
به کارگیری متغیر برونزای متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل و متوسط عمق سطح ایستابی دو روز قبل در بهبود مدل‌سازی شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی تاثیر مثبت داشتند و خطای مدل‌سازی برای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی حدود ۱۰ درصد بود. در نتیجه این متغیر برونزا سبب کاهش خطای مدل‌سازی برای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی شد. با توجه به شاخص‌های خطایی مدل‌های آزموده شده برای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی (جدول ۵ و ۶)، مدل‌های برتر برای هر یک شناسایی شد. برای هر یک از متغیرها، مدلی به عنوان مدل برتر انتخاب شد، که

جدول ۹. مدل‌های برتر انتخاب شده متغیرهای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی

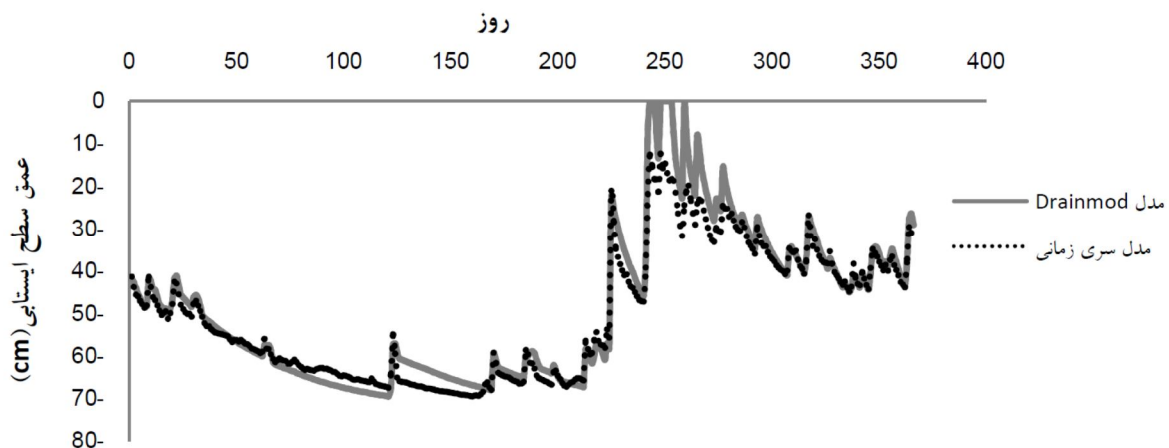
نام متغیر	مدل	معیار آکائیک	R <sup>2</sup>	خطای برون نمونه‌ای			خطای درون نمونه‌ای		
				MAE	RMSE	MAPE (%)	MAE	RMS E	MAPE (%)
شدت تخلیه زهاب (سانتی‌متر در روز)	ARMAX(2,2,0) <sup>a</sup>	-۶/۸۳	۰/۸۹	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۸/۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۷/۴۴
سطح ایستابی (سانتی متر)	ARMAX(2,2,0) <sup>b</sup>	۳/۹۳	۰/۹۹	۲/۸۳	۶/۵۴	۸/۵۹	۴/۳۵	۳/۶۷	۶/۵۴

a: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل و متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.

b: ارزش روزانه، بارش همان روز و روز قبل و متوسط عمق سطح ایستابی دو روز قبل به عنوان متغیرهای برونزا در نظر گرفته شد.



شکل ۳. مقایسه شدت تخلیه زهاب شبیه‌سازی شده توسط مدل Drainmod و پیش‌بینی شده توسط مدل برگزیده سری زمانی



شکل ۴. مقایسه سطح ایستابی شبیه‌سازی شده توسط مدل Drainmod و پیش‌بینی شده توسط مدل برگزیده سری زمانی

سیستم‌ها یا فرآیندهای پیچیده را امکان‌پذیر سازند. از این نظر کاربرد مدل‌های سری زمانی همراه با متغیر برونزا (متغیر مستقل) می‌تواند در توصیف و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف مفید و راه‌گشا باشد.

#### مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل‌های سری زمانی با نتایج

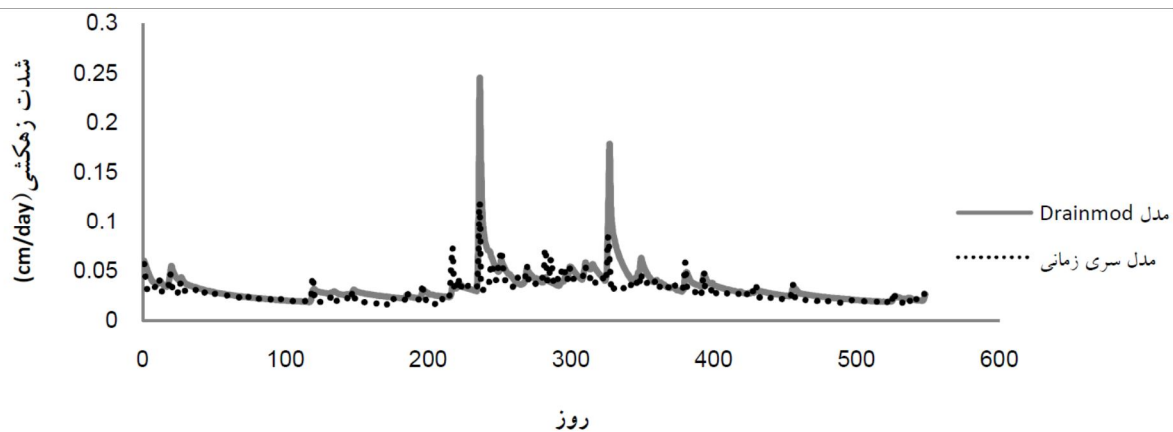
##### مدل Drainmod

در نهایت توسط مدل‌های برگزیده سری زمانی متغیرهای شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی پیش‌بینی شدند. نتایج پیش‌بینی مدل‌های برگزیده سری زمانی با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod مقایسه (شکل‌های ۵ و ۶) و نتایج آن در جدول ۱۰ خلاصه شد. ریشه میانگین مربعات خطای مدل سری زمانی در پیش‌بینی شدت تخلیه زهاب ۰/۱ میلی‌متر بر روز بود که نسبت به ضریب زهکشی منطقه که ۲/۵ میلی‌متر بر روز در نظر گرفته شده بود قابل قبول و مطلوب است. همچنین ریشه میانگین مربعات خطای مدل سری زمانی در پیش‌بینی عمق سطح ایستابی حدود ۸/۶ سانتی‌متر بود. به طور کلی مقایسه نتایج مدل آماری سری زمانی با مدل شبیه‌سازی Drainmod حاکی از عملکرد مطلوب مدل سری زمانی بود.

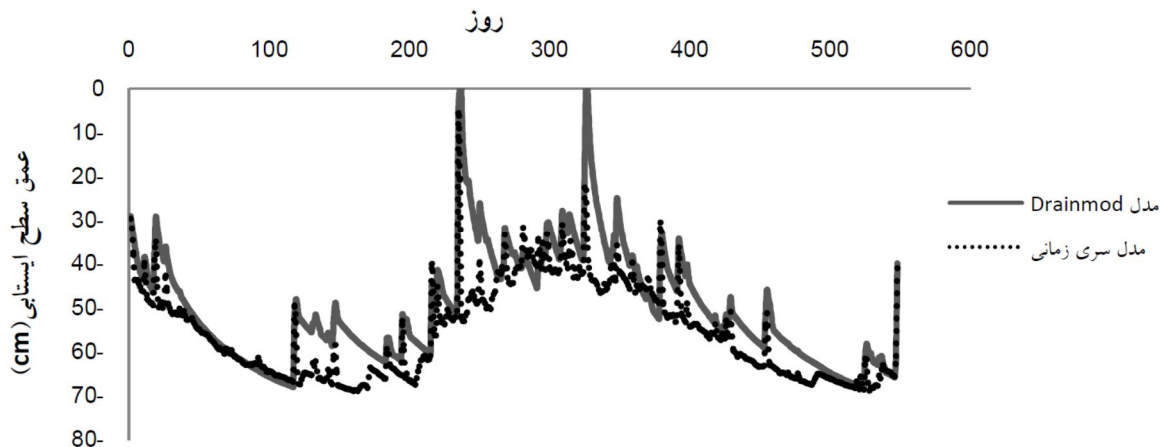
محققین زیادی از مدل‌های مختلف سری زمانی در پیش‌بینی متغیرهای مختلف استفاده کرده‌اند. استفاده از متغیر برونزا و مدل‌های ARMAX برای پیش‌بینی زمانی و مکانی هدایت الکتریکی زهاب زهکش‌های زیرزمینی سبب افزایش دقت مدل‌سازی داده‌ها می‌شوند (Tisu and Guitjens, 1986). همچنین به کارگیری مدل ARX برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با بکارگیری متغیر برونزای بارش مازاد (Knotters and Bierkens, 2001)، استفاده از متغیر برونزای تابش فتوسنتز فعال در مدل ARIMAX برای پیش‌بینی تعرق از آسمانه گیاهان (Chelcy et al., 2005)، بهره‌گیری از متغیرهای میزان انرژی مصرف شده برای برداشت آب از آبخوان و همچنین پارامترهای هواشناسی مانند بارش، دما و تبخیر-تعرق به عنوان پارامترهای مستقل برای بهبود مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی (Gemtzi and Stefanopoulos, 2011)، استفاده از مدل ARIMAX برای پیش‌بینی رطوبت خاک و به کارگیری آبیاری به عنوان یک متغیر برونزا (متغیر مستقل) به منظور بررسی اثر آبیاری (Aljoumani et al., 2012) و کاربرد مدل ARIMAX برای شبیه‌سازی بارش-رواناب (Nourani et al., 2013) از جمله تحقیقاتی است که توسط محققین صورت گرفته است. مدل‌های سری زمانی چند متغیره می‌توانند رابطه بین متغیرهای مختلف را در طول زمان شناسایی کنند و به این ترتیب پیش‌بینی

جدول ۱۰. مقایسه پیش‌بینی مدل‌های برگزیده سری زمانی با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod

متغیر	R <sup>2</sup>	RMSE	SE
شدت تخلیه زهاب	۰/۵۱	۰/۰۱ (cm/day)	۰/۴۷
عمق سطح ایستابی	۰/۷۴	۸/۶۱ (cm)	۰/۱۶



شکل ۵. پیش‌بینی شدت تخلیه زهاب توسط مدل برگزیده سری زمانی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod



شکل ۶. پیش‌بینی عمق سطح ایستابی توسط مدل برگزیده سری زمانی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا مدل Drainmod براساس داده‌های مشاهده‌ای عمق سطح ایستابی و شدت تخلیه زهاب واسنجی شد. مدل Drainmod طبق مقادیر گزارش شده برای ضریب کارایی مدل و متوسط خطای استاندارد توسط Skaggs و همکاران (۲۰۱۲) به خوبی واسنجی شد. از این نظر از مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه‌ای منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. به منظور بررسی قابلیت روش تحلیل سری زمانی در

مدل‌سازی عملکرد زهکش‌های زیرزمینی، پس از استخراج داده‌های شدت تخلیه و عمق سطح ایستابی، از روش باکس-جنکینز برای مدل‌سازی متغیرهای نامبرده استفاده و الگوهای مختلف سری زمانی توسعه داده شد. به کارگیری متغیر برونزای ارزش روزانه، بارش و متوسط شدت تخلیه زهاب دو روز قبل و متوسط عمق سطح ایستابی دو روز قبل در بهبود مدل‌سازی سری زمانی شدت تخلیه زهاب و عمق سطح ایستابی تاثیر مثبت داشتند و خطای مدل‌سازی برای هر دو متغیر به ۸ درصد

عملکرد سامانه زهکشی کارآمد بود. پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت مدل‌های سری زمانی، از داده‌های مشاهداتی چند ساله برای ساخت و ارزیابی این مدل‌ها استفاده گردد.

کاهش یافت. نتایج مقایسه پیش‌بینی مدل‌های سری زمانی با نتایج شبیه‌سازی مدل Drainmod نشان داد ضریب تعیین، خطای استاندارد و ریشه میانگین مربعات خطا برای متغیرهای شدت تخلیه زهاب و سطح ایستایی مناسب و در نتیجه مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی

#### فهرست منابع

مختاران، ر.، ناصری، ع.، کشکولی، ح. و برومندنسب، س. ۱۳۹۲. اثر عمق زهکش و لایه محدود کننده بر دبی و شوری زهاب در اراضی فاریاب جنوب خوزستان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۳ (۱): ۶۱-۷۳.

Aljoumani, B., Sánchez-Espigares, J., Canameras, N., Josa, R. and Monserrat, J. 2012. Time series outlier and intervention analysis: Irrigation management influences on soil water content in silty loam soil. *Journal of Agricultural Water Management*, 111: 105–114.

Bierens, H. 1987. ARMAX Model Specification Testing, With an Application to Unemployment to The Netherlands. *Journal of Econometrics*, 35: 161-90.

Box, G. E., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C. 2011. *Time series analysis: forecasting and control*, (Vol. 734). John Wiley & Sons.

Chang, A.C., Skaggs, R.W., Hermsmeier, L.F. and Johnson, W.R. 1983. Evaluation of a water management model for irrigated agriculture. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, 26(2): 412-418.

Chelcy, R., Carol, E., Robert, J., Rodney, E., Robert, O. 2005. Modeling canopy transpiration using time series analysis A case study illustrating the effect of soil moisture deficit on *Pinus taeda*. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 163–175.

Dickey, D.A. and Fuller, W. A. 1979. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, 74 (366): 427–437.

Gemitzi, A. and Stefanopoulos, K. 2011. Evaluation of the effects of climate and man intervention on ground waters and their dependent ecosystems using time series analysis. *Journal of Hydrology*, 403: 130–140.

Gujarati, D. N. 1999. *Basic econometrics*. New York Graw Hill International Edition, 838.

Gupta, G.P., Prasher, S.O., Chieng, S.T., Mathur, I.N. 1993. Application of DRAINMOD under semi-arid conditions Agriculture. *Journal of Water Management*, 24: 63–80.

Haykin, S. 1994. *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. Macmillan. New York, 340.

Knotters, M. and Bierkens, M.F.P. 2001. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. *Journal of Geoderma*, 103: 51–77.

Nourani, V., Hosseini-Baghaman, A., Adamowski, J., Gebremichael, M. 2013. Using self-organizing maps and wavelet transforms for space-time pre-processing of satellite precipitation and runoff data in neural network based rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 476: 228–243.

Sadorsky, P. 2006. Modeling and forecasting petroleum futures volatility, *Journal of Energy Economics*, 28: 467-488.

Singh, R., Helmers, M.J., Qi, Z. 2006. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. *Journal of Agricultural Water Management*, 85: 221-232.

Skaggs, R.W. 1978. A water management model for shallow water table soils. Technical Report No. 134 of the Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, North Carolina State University, Raleigh, NC.

- Skaggs, R.W., Youssef, M.A., Chescheir, G.M. 2012. Drainmod: model use, calibration and validation. Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN, 55(4): 1509-1522.
- Tisu, P. and Guitjens, J. 1986. Predicting EC for drainage water management. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112: 274-281.
- Wahba, M.A. S. El-Ganainny, M. Abdel-Dayem, M. S. Kandil, H. and Atef Gobran.2002. Evaluation of DRAINMOD-S for simulating water table management under semi-arid conditions. Journal of Irrigation and Drainage, 51: 213-216.
- Wang, X., Mosley, C.T., Frankenberger, J.R., Klavivko, E.J. 2006. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacings using DRAINMOD. Journal of Agricultural Water Management, 79: 113-136.

