



مدل سازی و پیش بینی تراز آب زیرزمینی با کاربرد مدل های سری زمانی (مطالعه موردی: دشت های استان همدان)

علی افروزی^۱ و حمید زارع ابیانه^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا
۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، (نویسنده مسوول: zare@basu.ac.ir)
تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۷

چکیده

با توجه به اتکاء بخش های کشاورزی، صنعت و شرب در استان همدان به منابع آب زیرزمینی، مدل سازی و پیش بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی برای بهره برداری از این منبع یک ضرورت اساسی است. مدل های سری زمانی یکی از روش های قابل استفاده در این زمینه است، که با کاربرد اصولی و صحیح آن ها، در عین سادگی، پیش بینی های کوتاه مدت خوبی را به دست می دهند. بدین منظور داده های خام چاه های مشاهداتی دشت های استان همدان تهیه شدند، که پس از ویرایش و استفاده از چندضلعی تیسن، سری زمانی تراز آب زیرزمینی هر دشت تشکیل شد. آزمون من-کندال وجود روند قطعی در تمام سری های زمانی دشت های استان همدان را نشان داد، که بدین ترتیب لازم شد با کسر جمله روند از سری های زمانی تراز آب زیرزمینی روندزایی شود. سپس آزمون ریشه واحد برای بررسی مانایی سری های زمانی انجام شد و با توجه به روش باکس-جنکینز، مدل های ARIMA فصلی روی داده های نمونه برازش و مناسب ترین آن ها انتخاب شدند. سپس از مدل های ARIMA فصلی برای پیش بینی ۱۲ ماهه استفاده شد که پیش بینی های خارج از نمونه خوبی را به دست دادند. به طوری که بین همه دشت های تحت مطالعه کمترین ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۳+ و بیشترین جذر میانگین مربع خطا ۰/۷۳+ متر برای دشت همدان-بهار به دست آمد. همچنین بهترین پیش بینی ۱۲ ماهه در دشت کبودرآهنگ با مقدار ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۹+ و جذر میانگین مربع خطا ۰/۲۰+ متر صورت گرفت.

واژه های کلیدی: افت آب زیرزمینی، باکس-جنکینز، روند، ARIMA فصلی، SARIMA

مقدمه

پیش بینی تراز آب زیرزمینی بوده است (۱۲،۳۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴). ایزدی و همکاران (۱۳) یک مدل رگرسیونی با داده های بارندگی، سطح آب اولیه، دمای حداکثر، حداقل و میانگین هوا، برای پیش بینی سطح آب در تعدادی از پیژومترهای دشت نیشابور ارائه نمودند. نتایج آنان حاکی از دقت مناسب روش فوق در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی بود. نادریان فر و همکاران (۲۰) اثرات بارندگی و شرایط اقلیمی بر نوسانات سطح ایستابی دشت نیشابور را مطالعه نمودند و نشان دادند بارندگی بیشترین همبستگی را با نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد. نتایج مطالعه نخی و صابری نصر (۲۲) حاکی از دقت مناسب روش شبکه عصبی موجهک برای پیش بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه در مقایسه با روش عددی MODFLOW بود. مهدوی و همکاران (۱۷) با شبیه سازی تغییرات سطح ایستابی دشت همدان-بهار در یک دوره دو ساله به کمک مدل PMWIN، تغییرات سطح ایستابی پنج ساله دشت را پیش بینی نمودند. زارع ابیانه و همکاران (۳۵) با مطالعه روند نوسانات ارتفاع آب زیرزمینی دشت ملایر به روش من-کندال کاهش حجم ذخایر آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی را گزارش نمودند. مک کی و همکاران (۱۶) با استفاده از یک مدل مفهومی یک پارچه، سری زمانی تراز آب زیرزمینی را در چهار آبخوان آزاد انگلستان شبیه سازی کردند. نتایج آنان نشان داد که مدل AquiferMod در عین سهولت و سرعت اجرا، توانایی پیش بینی تراز آب زیرزمینی در آبخوان را دارد.

مدل سری های زمانی از جمله روش های تحلیل سری های هیدرولوژیکی است (۶،۱۱) که در مطالعاتی مختلفی چون نوترز و وان والسام (۱۴)، بیرکنز و نوترز (۴)، آهن (۲)، سامانی (۲۵)، گوان (۸) و ادامووسکی و چان (۱) برای مدل سازی و پیش بینی نوسانات آب زیرزمینی استفاده شده است. نادریان فر و همکاران (۲۱) از مدل

آب های زیرزمینی در استان همدان با سهم ۸۳ درصدی در فراهم سازی آب مورد نیاز بخش های کشاورزی، صنعت و شرب، مهم ترین منبع آب استان می باشد. بهره برداری از این منبع از حدود ۱۷۵۰۰ حلقه چاه، ۱۴۰۰ رشته قنات و ۲۸۰۰ دهنه چشمه صورت می گیرد. این امر سبب بیابان منفی ۲۵۲ میلیون متر مکعب و ممنوعه بودن دشت های استان شده است. در این بین دشت کبودرآهنگ، با افت بلندمدت سالانه ۱/۶۹ متر، ممنوعه بحرانی است (۹). در سایر استان ها نیز این وضعیت قابل مشاهده است. به طور نمونه روند افت سطح آب زیرزمینی دو استان فارس و خراسان به عنوان تولید کنندگان گندم و چغندر قند تهدیدی برای کشت پایدار آبی است (۲۸).

توسعه برداشت آب زیرزمینی در بیشتر مناطق خشک و نیمه خشک از سال ۱۹۵۰ بوده است (۲۶). حفر و راه اندازی بیش از ۲۰ هزار حلقه چاه عمیق در پاکستان در ۱۰ سال گذشته باعث افت سطح ایستابی و بیابانی شدن اراضی کشاورزی، افت کیفیت آب زیرزمینی، خشک شدن باغات میوه و مشکلات اجتماعی شده است (۳۴). رشد اقتصادی، اعمال سیاست خودکفایی در تولید مواد غذایی و افزایش جمعیت از جمله عوامل برداشت بی رویه منابع آب زیرزمینی در ناحیه شمال کشور چین بوده است. به گونه ای که در برخی مناطق سطح آب زیرزمینی تا صدها متر افت داشته است (۳۳). به همین ترتیب برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی سبب بروز تهدید اقتصادی در ناحیه مرکزی آمریکا شده است (۳).

اهمیت منابع آب زیرزمینی و مخاطره آمیز بودن برداشت بیش از حد، سبب شکل گیری برخی مطالعات مدل سازی و پیش بینی نوسانات آب زیرزمینی در سال های اخیر شده است. در این راستا شبکه عصبی یکی از پرکاربردترین روش ها در شبیه سازی و

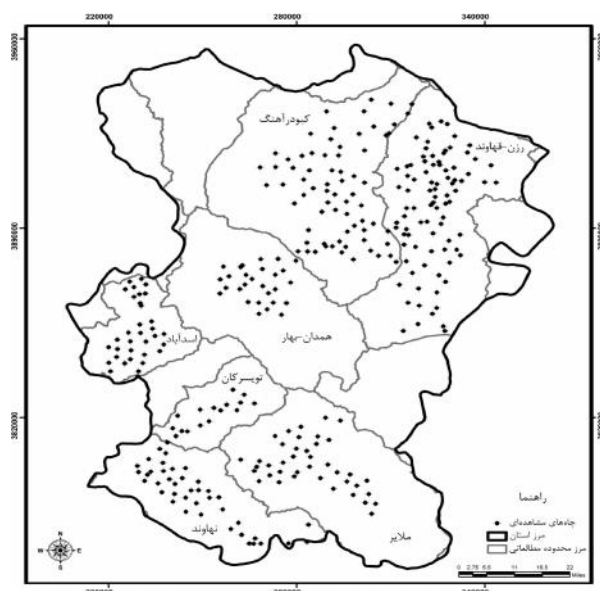
استفاده از مدل‌های سری زمانی مبتنی بر روش‌شناسی باکس و جنکینز (۵) از سوی دیگر موجب شد تا پتانسیل مدل‌های سری زمانی ARIMA فصلی مورد بررسی قرار گیرد. در واقع روش فوق مدلی گذشته‌نگر است که با به‌کارگیری اطلاعات تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای وضعیت آبی هر آبخوان را شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌نماید.

مواد و روش‌ها

استان همدان در گستره‌ای به مساحت ۱۹۴۹۱ کیلومتر مربع، بین ۳۳° ۵۹' تا ۳۵° ۴۴' عرض شمالی و ۴۷° ۴۷' تا ۴۹° ۳۰' طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). این استان هفت دشت مستقل دارد که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق این جدول بیابان آبی تمام دشت‌ها منفی است و دشت کبودرآهنگ بحرانی‌ترین وضعیت را از نظر افت سطح ایستایی دارد.

فصلی $ARIMA(0, 1, 0) \times (0, 1, 1)_{12}$ برای پیش‌بینی موفقیت آمیز تراز آب زیرزمینی دشت نیشابور استفاده کردند. شیرمحمدی و همکاران (۳۷) با کاربرد مدل سری‌های زمانی نوع آرما تراز آب زیرزمینی دشت مشهد را پیش‌بینی نمودند. ملکی‌نژاد و پورشرعیانی (۱۸) از مدل غیرفصلی $ARIMA(1, 1, 0)$ برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت مروست استان یزد استفاده کردند. پورمحمدی و همکاران (۳۳) با مدل‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی یکی از زیر حوزه‌های دریاچه بختگان با شبکه عصبی و سری‌های زمانی، مدل غیرفصلی $ARMA(1, 2)$ را پیشنهاد دادند. میرزاوند و همکاران (۱۹) از مدل $AR(2)$ برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت کاشان استفاده کردند.

با عنایت به اهمیت آبخوان دشت‌های مختلف استان در تأمین آب و لزوم انجام مطالعات شبیه‌سازی جهت تصمیم‌گیری مدیران برای مدیریت بهتر منابع آب استان از یک سو و دقت و سهولت



شکل ۱- محدوده‌های مطالعاتی استان همدان در غرب ایران و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای

Figure 1. The study area of Hamadan province in western Iran and the location of the observation wells

جدول ۱- مشخصات دشت‌های استان همدان (۹)

Table 1. The characteristics of the plains of Hamadan province (9)

حلقه چاه‌های مشاهده‌ای	تغییرات تراز آب زیرزمینی (m)		دوره آماری		وسعت (km ²)		نحوه پیدایش	دشت
	دراز مدت سالانه	در دوره آماری	طول (سال)	سال آبی	آبخوان	محدوده مطالعاتی		
۲۳	-۱/۲۳	-۲۳/۳۹	۱۹	۹۲/۰۷ تا ۷۳/۰۷	۲۹۸	۹۶۳	تراکمی	اسدآباد
۱۷	-۰/۷۳	-۱۴/۶۷	۲۰	۹۲/۰۷ تا ۷۲/۰۷	۱۵۰	۸۰۵	فرسایشی	تویسرکان
۷۳	-۰/۸۶	-۲۱/۶۰	۲۵	۹۲/۰۷ تا ۶۷/۰۷	۱۷۰۹	۳۰۸۵	تراکمی	رزن-قهاوند
۵۳	-۱/۶۹	-۴۰/۵۴	۲۵	۹۲/۰۷ تا ۶۷/۰۷	۱۱۸۶	۳۴۴۸	تراکمی	کبودرآهنگ
۴۰	-۱/۱۷	-۲۲/۲۲	۱۹	۹۲/۰۷ تا ۷۳/۰۷	۵۱۹	۲۹۸۴	فرسایشی	ملایر
۳۷	-۰/۵۹	-۹/۹۸	۱۷	۹۲/۰۷ تا ۷۵/۰۷	۴۵۷	۱۹۰۲	تراکمی	نهادند
۲۶	-۰/۸۲	-۱۸/۱۳	۲۲	۹۲/۰۷ تا ۷۰/۰۷	۴۶۸	۲۴۹۲	تراکمی	همدان-بهار

چاه‌های ماهانه عمق آب در چاه‌های مشاهده‌ای از ابتدای دوره آماربرداری تا پایان سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ و موقعیت جغرافیایی آن‌ها از شرکت آب منطقه‌ای همدان دریافت شدند. سپس با کسر عمق آب چاه از ارتفاع دهانه چاه از سطح دریای آزاد، ارتفاع مطلق آب زیرزمینی که همان ارتفاع سطح آب داخل چاه از سطح دریای آزاد باشد، به‌دست آمد. با توجه به موقعیت

داده‌های ماهانه عمق آب در چاه‌های مشاهده‌ای از ابتدای دوره آماربرداری تا پایان سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ و موقعیت جغرافیایی آن‌ها از شرکت آب منطقه‌ای همدان دریافت شدند. سپس با کسر عمق آب چاه از ارتفاع دهانه چاه از سطح دریای آزاد، ارتفاع مطلق آب زیرزمینی که همان ارتفاع سطح آب داخل چاه از سطح دریای آزاد باشد، به‌دست آمد. با توجه به موقعیت

$$AIC = (2k - 2 \ln(L))/N \approx \ln(\hat{\sigma}^2) + 2k/N \quad (۲)$$

$$SC = \ln(\hat{\sigma}^2) + k \ln N/N \quad (۳)$$

$$HQC = \ln(\hat{\sigma}^2) + 2k \ln(\ln N)/N \quad (۴)$$

که در روابط فوق L حداکثر تابع درست‌نمایی و $\hat{\sigma}^2$ واریانس باقی‌مانده‌ها است که معادل با مجموع مجذور خطا تقسیم بر درجه آزادی آن یعنی $n - k$ است که $k = p - q + 1$ با N مشاهده‌ها می‌باشد. در انتخاب مدل با توجه به روابط (۲) تا (۴) هدف این است که مقدار معیار اطلاعات حداقل گردد. در گام بعدی، مدل با روش حداقل مربعات معمولی برآورد و سپس مورد بازبینی قرار گرفت و کفایت آن بررسی شد. در این مرحله از روش پیشنهادی باکس و جنکینز (۵) استفاده شد. بدین ترتیب که به مرتبه AR و MA تا زمانی که مدل کفایت کند، افزوده شد. سپس مستقل بودن باقی‌مانده‌ها و نبود وابستگی خطی در باقی‌مانده‌ها بررسی شد. همچنین در این مطالعه به‌منظور تشخیص خودهمبستگی مرتبه اول، در مدل‌های برازش داده شده، از آماره دوربین-واتسون (DW) به‌صورت زیر استفاده شد.

$$DW = \sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2 / \sum_{i=2}^n e_i^2 \quad (۵)$$

که در رابطه فوق e_i خطای مدل در برآورد مقدار واقعی اندازه‌گیری شده در زمان i می‌باشد. مقدار DW برابر صفر، ۲ و ۴ به‌ترتیب به‌معنی خودهمبستگی کامل مثبت، عدم خودهمبستگی و خودهمبستگی کامل منفی است. برای ارزیابی پیش‌بینی‌ها، از جنر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد، که به‌ترتیب زیر می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (۶)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (۷)$$

در دو رابطه فوق O_i داده مشاهده‌ای نام، P_i داده پیش‌بینی شده نام، n تعداد کل مشاهدات و \bar{P} و \bar{O} مقادیر متوسط O_i و P_i با $i = 1, 2, 3, \dots, n$ می‌باشند.

نتایج و بحث

شکل ۲ هیدروگراف دشت‌های استان همدان را نشان می‌دهد که با توجه به آن روند ادامه‌دار و معنی‌دار افت سطح ایستابی و نبود توازن بین برداشت و تغذیه مشاهده می‌شود. معادله خطی روند نزول تراز آب زیرزمینی بر روی داده‌ها برازش داده شد، که ضرایب معادله و مقدار ضریب تبیین (R^2) آن در شکل ۲ آورده شده است. در این معادلات GWH تراز آب زیرزمینی (متر) و t زمان (ماه) است. همچنین نتایج آزمون من-کنندال حاکی از وجود روند قطعی در سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی دشت‌های استان همدان می‌باشد. بدین ترتیب جمله روند (t) از داده‌های تراز آب زیرزمینی در دشت‌های مختلف کسر شد و از سری‌های زمانی روندزدایی شده در مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده شد، که در شکل ۲ آورده شده‌اند. روندزدایی از سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی در

استفاده از این روش به‌دلیل در نظر گرفتن همه داده‌ها و به‌تبع دقت مناسب در برآورد داده‌های پرت و گمشده در مطالعات آب زیرزمینی معمول است (۱۳۰۱۲۰۷).

در مدل‌سازی با استفاده از سری‌های زمانی می‌بایست وجود روند در داده‌ها بررسی شود و در صورتی که وجود روند در سری زمانی قطعی تشخیص داده شد، با کسر جمله روند از سری زمانی روندزدایی نمود (۲۹). بدین ترتیب، از آزمون من-کنندال، در سطح معنی‌داری ۵ درصد، برای بررسی وجود روند در سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی هر دشت استفاده شد. نتایج حاکی از وجود روند قطعی در سری‌های زمانی بود، که با کسر جمله روند، کلیه سری‌های زمانی روندزدایی شدند. همچنین در مدل‌سازی سری‌های زمانی بررسی ایستایی یا مانایی متغیرها، جهت اطمینان از نبود رگرسیون کاذب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه مانایی سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی در دشت‌های مختلف با آزمون دیکی-فولر تعمیم‌یافته بررسی شد و سری‌های زمانی نامانا با تقاضل‌گیری به سری‌های زمانی مانا تبدیل شدند. در این پژوهش مدل‌سازی با مدل فصلی ARIMA انجام گرفت. این مدل، برای متغیر Z_t که یک سری زمانی گسسته اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی برابر است، به‌صورت زیر نوشته می‌شود (۵):

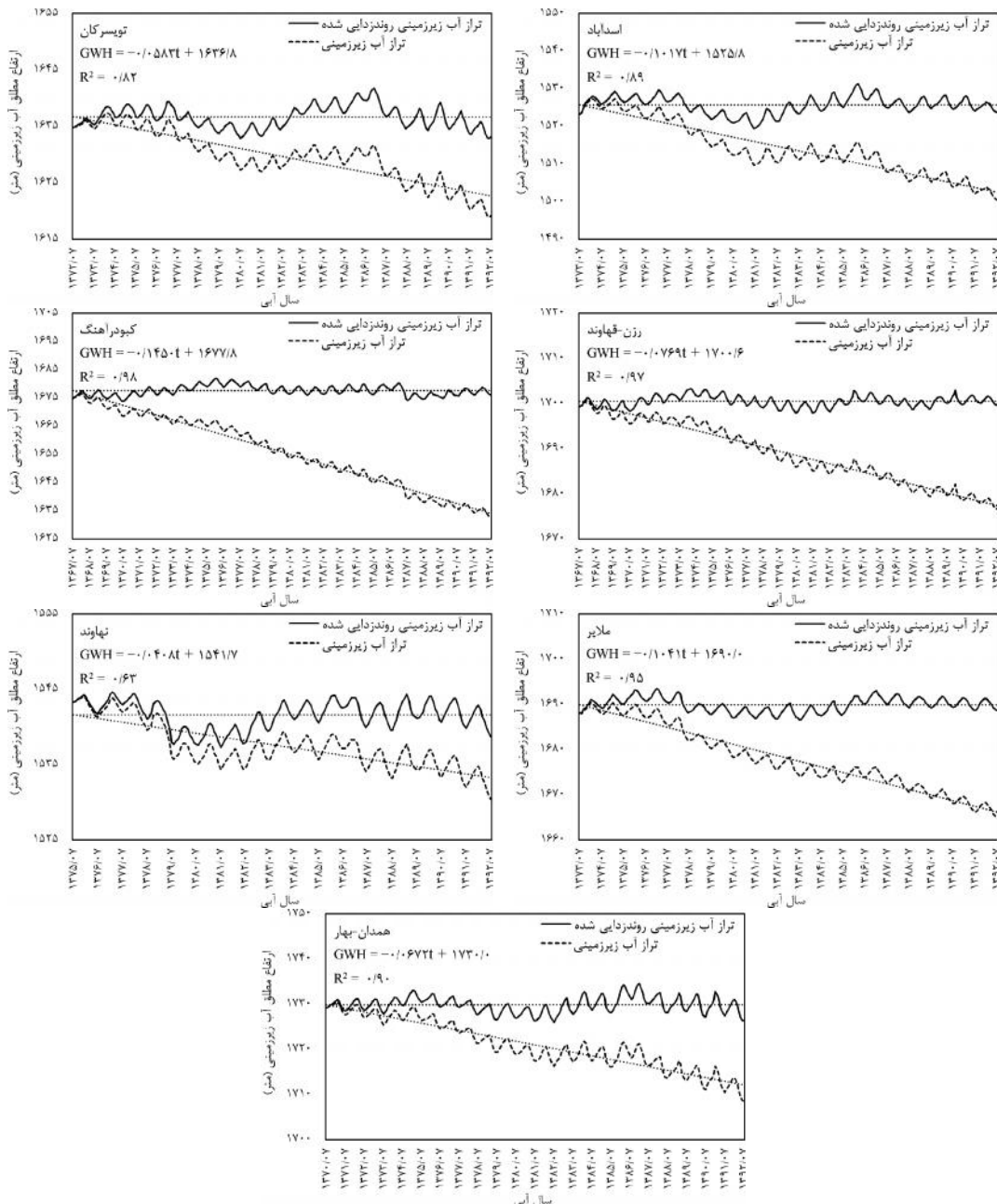
$$\phi_p(B) \Phi_p(B^s) \nabla^d \nabla_s^D Z_t = \theta_q(B) \Theta_q(B^s) a_t \quad (۱)$$

که دوره فصلی سری زمانی که برای داده‌های ماهانه تراز آب زیرزمینی برابر ۱۲ است، B عملگر پسرو است، a_t فرآیند نوفه‌ی سفید مستقل، $\Phi(B)$ عملگر اتورگرسیو غیرفصلی (AR) با درجه p است، ∇^d عملگر تقاضل‌گیری غیرفصلی با درجه d است، B^s عملگر فصلی AR با درجه P است، ∇_s^D عملگر تقاضل‌گیری فصلی درجه D است؛ $\Theta(B)$ عملگر غیرفصلی میانگین متحرک (MA) با درجه q است و B^s عملگر فصلی MA با درجه Q می‌باشد. مدل ARIMA فصلی با توجه به رابطه (۱) به‌صورت $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ نمایش داده می‌شود که در آن (p, d, q) درجه عملگرهای غیرفصلی و (P, D, Q) درجه عملگرهای فصلی هستند. پس از روندزدایی از داده‌های تراز آب زیرزمینی، مدل‌سازی بر اساس رابطه (۱) در محیط نرم‌افزار Eviews 7 صورت گرفت.

مدل‌سازی سری‌های زمانی در قالب مدل‌های ARIMA شامل سه مرحله تشخیص، تخمین و کنترل تشخیصی یا بازبینی اجرا می‌باشد (۵). در مرحله اول توابع خودهمبستگی (AC) و خودهمبستگی جزئی (PAC) رسم شدند، که علاوه بر کمک برای تشخیص درجه مدل، معنی‌داری ضرایب خودهمبستگی مدل را نشان می‌دهند و قابلیت مدل‌های ARIMA در شبیه‌سازی را بیان می‌کنند. تعداد وقفه‌ها در توابع AC و PAC بنا به توصیه هیپیل و همکاران (۱۰) بین ۲۰ تا ۴۰ وقفه بوده که در این پژوهش ۲۲ وقفه لحاظ شد. تفسیر AC و PAC برای تشخیص مدل وقتی از داده‌های واقعی استفاده می‌شود غالباً مشکل و نیازمند استدلال‌های ذهنی است. به‌همین دلیل در این پژوهش برای انتخاب مدل‌های ARIMA از سه معیار اطلاعات آکایک (AIC)، شوارتز (SC) و حنان-کوئین (HQC) در قالب معادلات زیر استفاده شد.

در این شکل هیستوگرام تراز آب زیرزمینی قبل و بعد از روندزایی نشان داده شده است.

دشت‌های استان همدان باعث شد توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک‌تر شود. این مسئله به‌طور نمونه برای دشت اسدآباد در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج برای سایر دشت‌ها نیز مشابه بودند.



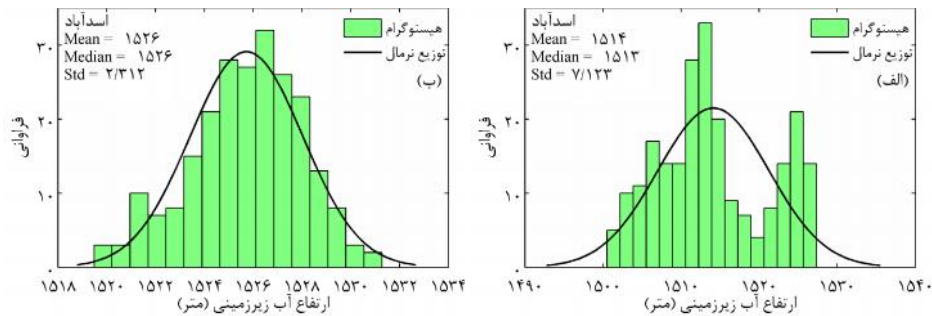
شکل ۲- تراز ماهانه آب زیرزمینی و معادله روند برازش داده شده برای دشت‌های استان همدان
Figure 2. Monthly groundwater level and the fitted trend equation for the plains of Hamadan province

مدت تراز آب زیرزمینی برابر ۹/۹۸ متری را داشته است با ۳۹ درصد رخ داد. کاهش انحراف معیار در اثر روندزایی نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها کمتر شده است. پس از روندزایی از داده‌ها حداکثر و حداقل انحراف معیار برابر ۲/۳۱ و ۱/۱۷ متر به ترتیب در اسدآباد و رزن-قهاوند به‌دست آمد. همچنین روندزایی باعث شد

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که روندزایی باعث کاهش انحراف معیار (Std) شده است. بیشترین تغییر انحراف معیار در دشت کبودرآهنگ که بیشترین افت سطح ایستابی بلندمدت برابر ۴۰/۵۴ متری را داشته است با ۸۷ درصد کاهش اتفاق افتاد و کمترین تغییرات انحراف معیار در دشت نهاوند که کمترین افت بلند

کنترل در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ برای دشتهای استان همدان مشابه بودند، این نتایج به‌طور نمونه تنها برای دشت اسدآباد ارائه شد.

که مقادیر میانگین (Mean) و میانه (Median) برابر شوند. نزدیک‌تر شدن توزیع داده‌ها به توزیع نرمال تأثیر مستقیم بر مقادیر AC و PAC گذاشت، به‌نحوی که دقت در مرحله تشخیص مدل را افزایش داد. با توجه به اینکه نتایج مراحل تشخیص، تخمین و



شکل ۳- نمونه هیستوگرام تراز آب زیرزمینی در دشت اسدآباد، (الف) قبل و (ب) بعد از روندزدایی
Figure 3. Typical histogram of groundwater level in Asadabad plain (a) before and (b) after the detrending

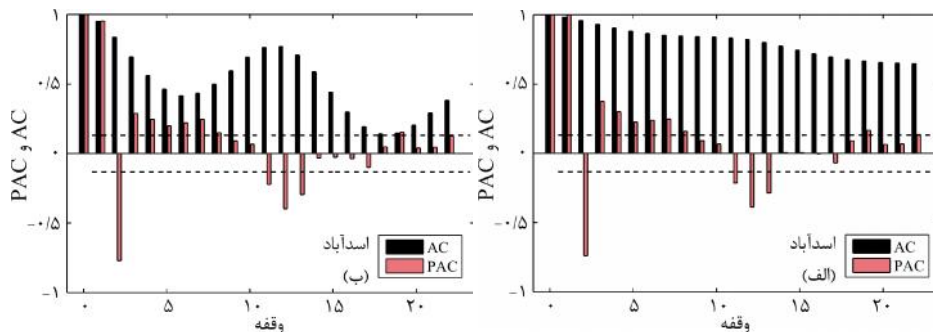
جدول ۲- انابیی سری زمانی تراز آب زیرزمینی روندزدایی شده

Table 2. Stationary of the detrended groundwater level time series

دشت	آماره ADF	مقدار بحرانی آزمون در سطح ۵ درصد	نتیجه آزمون	آماره DW
اسدآباد	-۲/۶۰	-۳/۴۳	نامانا	۲/۰۳
تویسرکان	-۲/۸۲	-۳/۴۳	نامانا	۱/۹۴
رزن-قهاوند	-۲/۱۸	-۳/۴۳	نامانا	۲/۰۶
کیودرآهنگ	-۲/۴۱	-۳/۴۳	نامانا	۲/۰۲
ملایر	-۲/۱۹	-۳/۴۳	نامانا	۲/۱۳
نهادند	-۲/۲۵	-۳/۴۳	نامانا	۱/۹۹
همدان-بهار	-۲/۷۱	-۳/۴۳	نامانا	۱/۹۶

سری‌هایی مانا تبدیل شدند. نزدیک بودن مقادیر آماره دوربین- واتسون به ۲ نشان می‌دهد مدل‌ها خود همبستگی مرتبه اول ندارند و تعداد وقفه‌های در نظر گرفته شده برای آزمون ریشه واحد مناسب می‌باشند.

نتایج آزمون ریشه واحد دیکی-فولر تعمیم یافته، برای بررسی مانایی سری‌های زمانی روندزدایی شده تراز آب زیرزمینی، در جدول ۲ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که در سطح ۵ درصد کلیه سری‌های زمانی دارای ریشه واحد هستند و نامانا می‌باشند. سری‌های زمانی نامانا با تفاضل‌گیری مرتبه اول به



شکل ۴- توابع PAC و AC برای سری زمانی آب زیرزمینی دشت اسدآباد، (الف) قبل و (ب) بعد از روندزدایی
Figure 4. The AC and PAC functions for the groundwater level time series of Asadabad plain; (a) before and (b) after the detrending

نمودارهای میله‌ای از خطوط نقطه‌چین بیانگر معنی‌دار بودن AC یا PAC در وقفه مشخص است. همان‌طور که در شکل ۴- الف مشاهده می‌شود با استفاده از داده‌های روندزدایی نشده تراز آب زیرزمینی، پیک محلی در مقادیر تابع AC در وقفه‌های ضرایب ۱۲ قابل تشخیص نمی‌باشد. بدین ترتیب روندزدایی از سری زمانی آب

نمودار توابع AC و PAC برای سری‌های زمانی قبل و بعد از روندزدایی در شکل ۴ به‌طور نمونه برای دشت اسدآباد آورده شده است. نتایج برای سایر دشتهای نیز مشابه بود. در این شکل مقادیر توابع AC و PAC به‌وسیله نمودار میله‌ای و حدود معنی‌داری آن‌ها با دو خط نقطه‌چین موازی با محور افقی نشان داده شده است. عبور

شکل ۴-ب نشان می‌دهد که سری زمانی تراز آب زیرزمینی از نوع فرآیندهای کاملاً تصادفی نبوده و می‌توان آن‌ها را بر اساس مقادیر گذشته‌شان پیش‌بینی کرد. الگوی نزولی مستقیم و نوسانی در مقادیر AC و PAC در شکل ۴-ب نشان می‌دهد که سری‌های زمانی به‌ترتیب از نوع AR و MA، یا به‌عبارت دیگر از نوع ARMA می‌باشند.

زیرزمینی باعث شد که مقدار تابع AC در وقفه‌های ضرایب ۱۲ به پیک محلی برسد (شکل ۴-ب). این مسئله نیز لزوم روندزدایی از سری‌های زمانی که در آن‌ها روند قطعی وجود دارد را مشخص می‌کند. وجود پیک محلی در تابع AC در وقفه‌ها با ضرایب ۱۲ در شکل ۴-ب نشان می‌دهد که سری زمانی، روندی فصلی با دوره ۱۲ دارد ($s = 12$). همچنین معنی‌دار بودن مقادیر AC و PAC در

جدول ۳- الگوهای سری‌های زمانی انتخابی

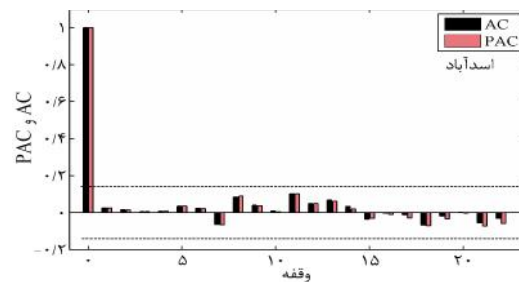
Table 3. The selected time series models

AIC	مدل بهینه فصلی ARIMA	دشت
-۰/۴۸	ARIMA(3, 1, 4) × (0, 1, 1) ₁₂	اسداباد
-۰/۱۷	ARIMA(5, 1, 4) × (0, 1, 1) ₁₂	تویسرکان
-۰/۰۸	ARIMA(3, 1, 3) × (1, 0, 1) ₁₂	رزن-قهاوند
-۰/۲۸	ARIMA(4, 0, 3) × (0, 1, 1) ₁₂	کیوراهنگ
-۰/۰۵	ARIMA(2, 1, 2) × (0, 1, 1) ₁₂	ملایر
-۰/۲۱	ARIMA(2, 0, 0) × (0, 1, 1) ₁₂	نهادن
-۰/۵۸	ARIMA(2, 1, 3) × (1, 0, 1) ₁₂	همدان-بهار

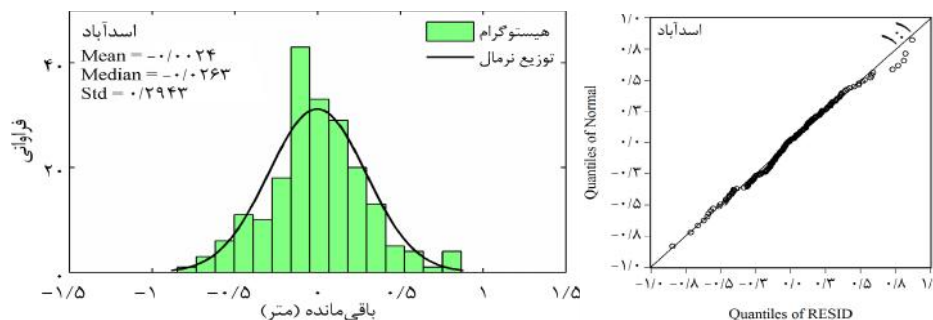
دشت‌ها مشابه بود. شکل ۵ که ترسیم مقادیر AC و PAC می‌باشد، نشان می‌دهد خودهمبستگی مقادیر باقی‌مانده در وقفه‌های مختلف، تفاوت معنی‌داری از صفر ندارند. به‌عبارت دیگر باقی‌مانده‌ها مستقل و ناهمبسته می‌باشند. شکل ۶ نمودار Q-Q و هیستوگرام مقادیر باقی‌مانده حاصل از برازش مدل بر روی داده‌های سری زمانی تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در شکل ۶ با توجه به نزدیک بودن نقاط نمودار Q-Q به خط ۱:۱ و برازش خوب هیستوگرام مقادیر باقی‌مانده با توزیع نرمال، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر باقی‌مانده توزیعی نرمال دارند. به‌طور کلی شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که مدل‌های ارائه شده، به‌خوبی نوسانات تراز آب زیرزمینی را شبیه‌سازی و تبیین کردند.

با تغییر مقادیر p و q از صفر تا ۶ در ترکیب‌های مختلف و تغییر درجه پارامترهای فصلی، کلیه حالات ممکن در نظر گرفته و مدل‌های $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ بر روی سری‌های زمانی برازش داده شدند. سپس بهترین مدل برای هر دشت بر اساس AIC، HQC، SC، بازبینی باقی‌مانده‌ها و DW انتخاب شد (جدول ۳). همچنین کنترل شد که قدر مطلق ریشه‌های معادله مشخصه هر مدل برازش شده اتورگرسیو (AR) و میانگین متحرک (MA) کوچکتر از یک باشند. به‌عبارت دیگر شرط مانایی فرآیندهای AR و MA مورد بررسی قرار گرفت.

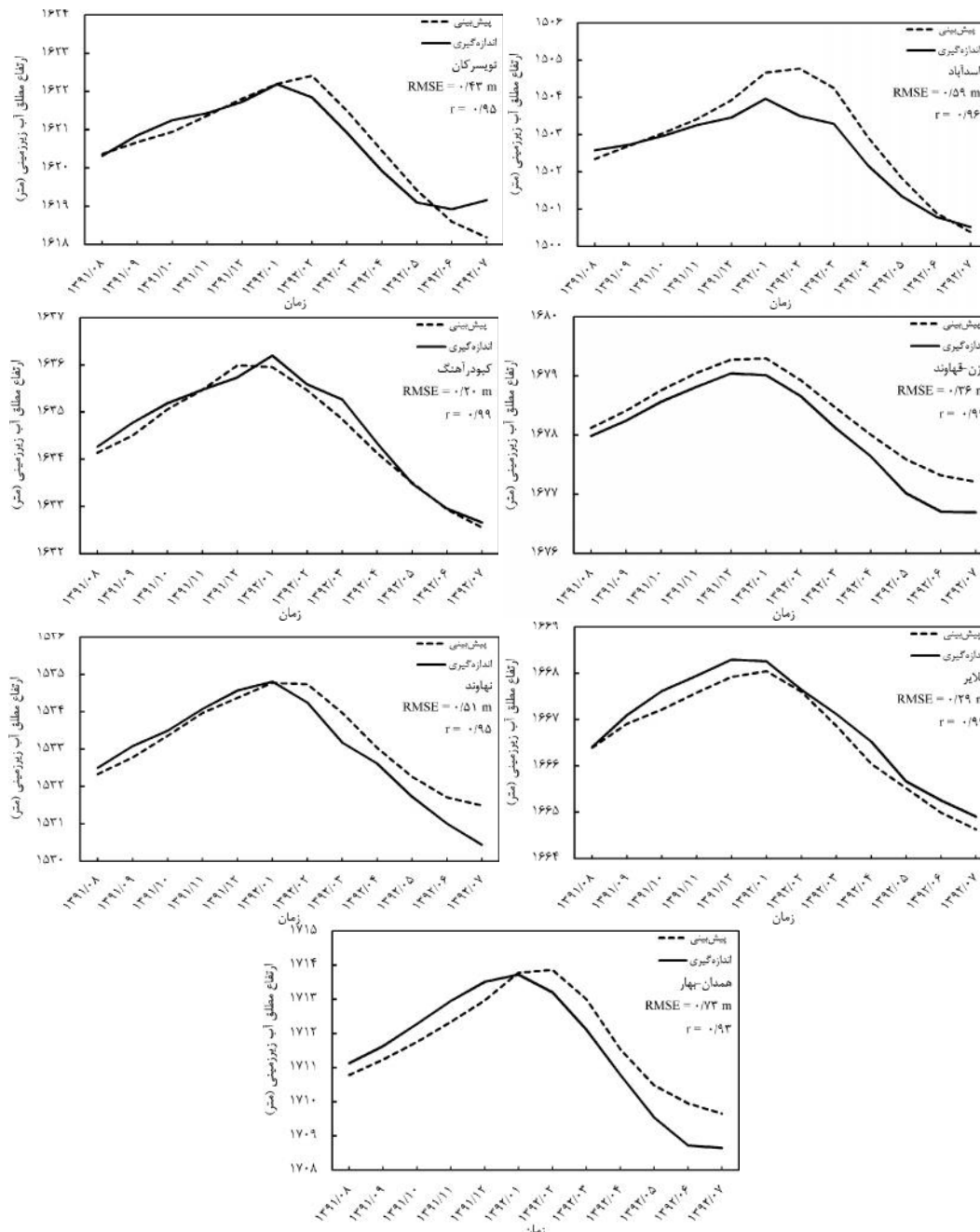
بازبینی و کنترل باقی‌مانده‌ها برای تمامی مدل‌های برازش داده شده انجام شد، که نمودارهای آن تنها برای مدل‌های انتخاب شده در شکل‌های ۵ و ۶ در دشت اسداباد آورده شده است. نتایج سایر



شکل ۵- نمودار توابع AC و PAC برای باقی‌مانده‌های مدل سری زمانی برازش داده شده، به‌طور نمونه در دشت اسداباد
Figure 5. The AC and PAC functions for the residuals of the fitted time series model, typically represented for Asadabad plain



شکل ۶- نمودار Q-Q و هیستوگرام مقادیر باقی‌مانده حاصل از برازش مدل سری زمانی به‌طور نمونه در دشت اسداباد
Figure 6. The QQ-plot and the histogram for the residuals of the fitted time series model, Asadabad plain typically represented



شکل ۷- نمودار سری های زمانی متوسط تراز آب زیرزمینی اندازه گیری و پیش بینی شده با استفاده از ARIMA فصلی
 Figure 7. The observed and forecasting of the average groundwater level time series using seasonal ARIMA

را نشان می دهد. این شکل و مقادیر RMSE و r نشان می دهند، دقت مدل های ARIMA فصلی برازش شده در پیش بینی تراز آب زیرزمینی ۱۲ ماهه مناسب است. در پیش بینی های انجام شده، مقادیر r از ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ و RMSE از ۰/۳۰ تا ۰/۷۳ متر به دست آمد و بهترین و ضعیف ترین پیش بینی ها به ترتیب در دشت های کیودرآهنگ و همدان-بهار صورت گرفت.

پیش بینی های خارج از نمونه با استفاده از مدل های انتخابی فصلی تنها برای ۱۲ ماه انجام شد. زیرا این مدل ها اساساً برای پیش بینی های کوتاه مدت ارائه شده اند و از سوی دیگر پیش بینی های کوتاه مدت نسبت به بلندمدت مطمئن تر هستند (۲۹). با توجه به اینکه پیش بینی ها برای سری های زمانی روندزایی شده انجام شده بود، مقدار جمله روند به آن ها اضافه شد. شکل ۷ مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده تراز آب زیرزمینی در سال آبی ۹۱-۹۲

خشک شده به دلیل محدودیت‌های قانونی عدم جایگزینی و ارائه تسهیلات و حمایت‌های ارزان قیمت می‌باشد. از طرفی ادامه مداخلات انسانی به موازات تغییرات طبیعی نظیر تغییر اقلیم و خشک‌سالی‌ها می‌تواند مقدار تغییرات منفی را در دوره‌های آتی تشدید نماید. تشکیل موارد متعدد فروچاله به ویژه در دشت کبودرآهنگ نتیجه مداخلات انسانی در برداشت خارج از ظرفیت منابع آب زیرزمینی است. از آنجا که اقتصاد استان همدان بنیان کشاورزی دارد، توصیه می‌شود که بهره‌برداری از آبخوان‌های استان همدان محدود و متوازن شود. همچنین توصیه می‌شود ضمن ارتقاء راندمان آبیاری و استفاده روش‌های نوین آبیاری، گسترش زمین‌های کشاورزی آبی محدود گردد. اعمال کم‌آبیاری به همراه تغییر الگوی کشت نظیر جایگزینی کشت دیم محصولات گندم و جو به جای کشت آبی آن‌ها اقدام شود. خلاءهای قانونی در عدم جایگزینی چاه‌های خشک و کف شکنی چاه‌های کم آب مرتفع گردد. استفاده از آب‌های نامتعارف در تأمین بخشی از آب کشاورزی و عدم توسعه صنایع آبر بر جدید در دستور کار مدیریت اجرایی استان قرار گیرد. فرهنگ استفاده بهینه از آب در همه بخش‌های مصرف نظیر شرب، کشاورزی و صنایع از طریق راه‌کارهایی نظیر افزایش قیمت آب بهاء، اعمال جریمه‌های مصارف مازاد، نصب کنتورهای هوشمند و آگاهی‌رسانی از طریق رسانه‌ها ایجاد گردد.

تشکر و قدردانی

از شرکت آب منطقه‌ای همدان که با در اختیار گذاشتن داده‌ها به این مطالعه کمک کرده‌اند، صمیمانه سپاس‌گزار می‌شود.

در این مطالعه سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی ماهانه در دشت‌های استان همدان تشکیل و مدل‌های مختلف ARIMA فصلی بر روی آن‌ها برازش داده شدند. بهترین مدل در هر دشت با استفاده از معیارهای اطلاعات، بازبینی باقی‌مانده‌ها و DW انتخاب شد. از مدل‌های انتخابی برای پیش‌بینی‌های خارج از نمونه ۱۲ ماهه استفاده و نتایج آن با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل‌های ARIMA فصلی پیشنهادی، تراز آب زیرزمینی را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند، به طوری که در همه دشت‌ها مقادیر r بیشتر از $0/93$ و RMSE کوچک‌تر از $0/73$ متر به‌دست آمد. بنابراین می‌توان از مدل‌های ارائه شده در پیش‌بینی‌ها و محاسبه داده‌های مفقود تراز آب زیرزمینی در دشت‌های مورد مطالعه استفاده کرد. کاربرد مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی‌های بلند مدت توصیه نمی‌شود. زیرا با افزایش دوره زمانی پیش‌بینی از کیفیت پیش‌بینی کم می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود این مدل‌ها تنها در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت استفاده شوند. در مدل‌سازی سری‌های زمانی غالباً چندین مدل می‌توان یافت که برازش خوبی روی داده‌های نمونه دارند و پیش‌بینی از طریق تک‌تک آن‌ها امکان‌پذیر است. اما نباید به‌سادگی تصور نمود که مدل با برازش بهتر، الزاماً پیش‌بینی‌های بهتر را ارائه می‌دهد.

بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی تمامی دشت‌ها براساس داده‌های گذشته نشان داد مقدار افت سالانه بین $0/59$ متر در دشت نهاوند تا $1/69$ متر برای دشت کبودرآهنگ در نوسان بود. به طوری که بخشی از این نوسانات به‌واسطه گسترش کشت‌های آبی جدید ناشی از توسعه آبیاری تحت فشار، جایگزینی چاه‌های

منابع

- Adamowski, J. and H.F. Chan. 2011. A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407: 28-40.
- Ahn, H. 2000. Modeling of groundwater heads based on second-order difference time series models. *Journal of Hydrology*, 234: 82-94.
- Amosson, S., L. Almas, B. Golden, B. Guerrero, J. Johnson, R. Taylor and E. Wheeler-Cook. 2009. Economic Impacts of selected water conservation policies in the Ogallala aquifer. Report on Ogallala Aquifer Project, Texas AgriLife Extension Service, Texas, US, 50 pp.
- Bierkens, M.F.P. and M. Knotters. 1999. Calibration of transfer function-noise models to sparsely or irregularly observed time series. *Water Resources Research*, 35(6): 1741-1750.
- Box, G.E.P., G.M. Jenkins and G.C. Reinsel. 2008. Time series analysis: forecasting and control. 4th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, US, 746 pp.
- Chow V.T. and S.J. Karelitis. 1970. Analysis of stochastic hydrologic systems. *Water Resources Research*, 6(6): 1569-1582.
- Engel, B.A. and K.C.S. Navulur. 2006. The role of geographical information systems in groundwater engineering. In: Delleur, J. W. (ed.) *The handbook of groundwater engineering*. 717-732 pp., CRC press, Boca Raton, Florida, US.
- Guan, X., S. Wang, Z. Gao, Y. Lü and C. Wang. 2011. Groundwater depth forecast based on multi-variate time series CAR model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27(7): 64-69.
- Hamadan Regional Water Authority, 2014. Basic research reports of the Hamadan province water resources. Hamadan Regional Water Authority co., Hamadan, Iran, 197 pp. (In Persian).
- Hipel K.W., A.I. McLeod and W.C. Lennox. 1977. Advances in Box-Jenkins modeling 1. model construction. *Water Resources Research*, 13(1): 567-575.
- Hipel, K.W. and A.I. McLeod. 1994. Time series modelling of water resources and environmental systems. Vol. 45 In: *Developments in water science*, Elsevier, New York, US, 1012 pp.
- Izadi, A., K. Davari, A. Aliazdeh, B. Ghahreman and S.A. Haghayeghi Moghadam. 2007. Water table forecasting using artificial neural networks. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(2): 59-71 (In Persian).
- Izadi, A., K. Davari, A. Aliazdeh and B. Ghahreman. 2008. Application of Panel Data Model in Predicting Groundwater Level. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(2): 133-144 (In Persian).
- Knotters, M. and P.E.V. van Walsum. 1997. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component. *Journal of Hydrology*, 197: 25-46.

15. Llamas, M.R. and A. Garrido. 2007. Lessons from intensive groundwater use in Spain: economic and social benefits and conflicts. In Giordano, M. and K.G. Villholth (eds) *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development*. 266-298, CABI, Trowbridge, UK.
16. Mackay, J.D., C.R. Jackson and L. Wang. 2014. A lumped conceptual model to simulate groundwater level time-series. *Environmental Modelling & Software*, 61: 229-245.
17. Mahdavi, M., B. Farokhzadeh, A. Salajeghe, A. Malakian and Souri M. 2012. Simulation of Hamedan-Bahar aquifer and investigation of management scenarios by using PMWIN. *Watershed Management Research*, 98: 108-116 (In Persian).
18. Malekinezhad, H. and R. Poorshareiati. 2013. Application and Comparison of Integrated Time Series and Artificial Neural Network Model for Prediction of the Variations of Groundwater Level (Case study: Plain Marvast). *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 36(3): 81-92 (In Persian).
19. Mirzavand, M., J. Sadatinejad, H. Ghasemieh, R. Imani, M. Soleymani Motlagh. 2014. Prediction of ground water level in arid environment using a non-deterministic model. *Journal of Water Resource and Protection*, 6: 669-676.
20. Naderianfar, M., H. Ansari, A. Ziaie and K. Davary. 2011. Evaluating the groundwater level fluctuations under different climatic conditions in the basin Neyshabour. *Irrigation and Water Engineering*, 1(3): 22-37 (In Persian).
21. Naderianfar, M., H. Ansari, H. Dehghan and M. Salari. 2009. Forecasting the groundwater oscillation of the Nishapur plain using the time series models. *National Conference on Sustainable Development Patterns in Water Management*, 779-794 pp., Mashhad, Iran (In Persian).
22. Nakhaei, M. and A. Saberi Nasr. 2012. Groundwater oscillation forecasting of the Qorveh plain using wavelet-neural network and comparing with the MODFLOW numerical model. *Advanced Applied Geology*, 1(4): 47-58 (In Persian).
23. Poormohammadi, S., H. Malekinezhad and R. Poorshareyati. 2013. Comparison of ANN and time series appropriately in prediction of ground water table (Case Study: Bakhtegan basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(4): 251-262 (In Persian).
24. Qureshi, A.S., P.G. McCornick, A. Sarwar and B.R. Sharma. 2010. Challenges and prospects of sustainable groundwater management in the Indus Basin, Pakistan. *Water Resources Management*, 24(8): 1551-1569.
25. Samani, N. 2001. Response of karst aquifers to rainfall and evaporation, Maharlu Basin, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies*, 63(1): 33-40.
26. Shah, T. 2005. Groundwater and human development: challenges and opportunities in livelihoods and environment. *Water Science and Technology*, 51(8): 27-37.
27. Shirmohammadi, B., M. Vafakhah, V. Moosavi and A. Moghaddamnia. 2013. Application of several data-driven techniques for predicting groundwater level. *Water Resources Management*, 27: 419-432.
28. Soltani, G. and M. Saboohi. 2008. Economic and social impacts of groundwater overdraft: the case of Iran. *Equity and Economic Development EFR 15th ERF annual conference*, 1-16, Cairo, Egypt.
29. Souri, A. 2012. *Econometrics with the application of Eviews7*. Farhangshenasi Publication and Noor-e Elm Publication, Tehran, Iran, 519 pp (In Persian).
30. Srekanth, P.D., N. Geethanjali, P.D. Sreedevi, S. Ahmed, N.R. Kumar and P.K. Jayanthi. 2009. Forecasting groundwater level using artificial neural networks. *Current science*, 96(7): 933-939.
31. Taormina, R., K.W. Chau and R. Sethi. 2012. Artificial neural network simulation of hourly groundwater levels in a coastal aquifer system of the Venice lagoon. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(8): 1670-1676.
32. Trichakis, I.C., I.K. Nikolos and G.P. Karatzas. 2009. Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response. *Hydrological Processes*, 23(20): 2956-2969.
33. Yang, L. 2013. Evaluation of the Impact of Government Policy on the Overuse of Groundwater in the Minqin Basin in China. *Computational Water, Energy and Environmental Engineering*, 2: 59-68.
34. Yoon, H., S.C. Jun, Y. Hyun, G.O. Bae and K.K. Lee. 2011. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *Journal of Hydrology*, 396(1): 128-138.
35. Zare Abianeh, H., M. Bayat Varkeshi and S. Marofi. 2012. Investigating Water Table Depth Fluctuations in the Malayer Plain. *Water and Soil Science*, 22(2): 173-190 (In Persian).

Groundwater Level Modeling and Forecasting using the Time Series Models (Case Study: the Plains of Hamadan Province)

Ali Afruzi¹ and Hamid Zare Abyaneh²

1- Ph.D. Student, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University

2- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University (Corresponding author: zare@basu.ac.ir)

Received: February 19, 2016

Accepted: October 8, 2016

Abstract

Regarding the reliance of the agricultural and industrial sections and the drinking water on the groundwater resources in Hamadan province, the modeling and forecasting groundwater level fluctuations to utilize the resources is a basic necessity. One of the usual method in this way is the utilization of the time series models that give simply and clearly good short-term forecasts if the models are used in the correct way. Therefore, the raw data of piezometers in the plains of Hamadan province are taken and after the preprocessing job and using the Thiessen polygon, the time series of each plain is formed. The Mann-Kendall test showed deterministic trend in all the time series of the plains which consequently it is needed to detrend by excluding the trend term from the time series. Subsequently, the unit root test is carried out for whether the time series are stationary, and then using the Box-Jenkins method, seasonal ARIMA models are applied to the sample data and the bests are selected. Afterwards, the ARIMA models are used in the 12 months forecasting that gives the good out-of-sample forecasts, which in all the plains the lowest Pearson's correlation coefficient and the highest root mean square error are calculated 0.93 and 0.73 m, respectively, for the Hamadan-Bahar plain. Moreover, the best 12-months forecast is obtained in the Kaboudarahang plain with a Pearson's correlation coefficient of 0.99 and a root mean square error of 0.20 m.

Keywords: Box-Jenkins, Groundwater level decline, SARIMA, Seasonal ARIMA, Trend