

## پیش‌بینی تراز سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل استوکاستیکی باکس - جنکینز و پویایی سیستم

حامد نوذری<sup>۱\*</sup> و ندا قشلاقی<sup>۲</sup>

### چکیده

امروزه چالش منابع آب، دغدغه بسیاری از کشورهای خاورمیانه است. این موضوع در ایران، در مورد دریاچه ارومیه که در دهه اخیر دچار بحران شده است، اهمیت دوچندان دارد. با توجه به تغییرات بارندگی، وقوع خشکسالی‌ها و احداث سدها، تراز سطح آب دریاچه ارومیه دست‌خوش تغییرات و نوسانات زیادی شده است؛ بنابراین هدف اصلی در این تحقیق، بررسی روش‌های استوکاستیکی برای شبیه‌سازی نوسانات و پیش‌بینی تراز آبی دریاچه ارومیه است تا به کمک آن، بتوان سناریوهایی را برای مدیریت آن تعریف کرد. در ابتدا تراز آب دریاچه، به صورت مستقیم و با استفاده از مدل‌های سری زمانی در محیط نرم‌افزار Minitab برای دوره زمانی ۳۲ ساله از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۶، شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. سپس به مدل‌سازی دریاچه ارومیه با توجه به رویکرد پویایی سیستم‌ها در محیط VENSIM پرداخته و پس از آن، شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان‌های ورودی و خروجی به دریاچه با استفاده از مدل‌های سری زمانی انجام و نتایج پیش‌بینی وارد مدل شد. مقایسه این دو روش شبیه‌سازی تراز آب دریاچه ارومیه نشان داد که شبیه‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی و وارد کردن آن‌ها در مدل VENSIM نتایج دقیق‌تری نسبت به شبیه‌سازی مستقیم تراز سطح آب با استفاده از مدل‌های سری زمانی در پی خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** پویایی سیستم، تراز آب دریاچه ارومیه، مدل‌های سری زمانی، Minitab.

**ارجاع:** نوذری ح. و قشلاقی ن. ۱۳۹۶. پیش‌بینی تراز سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل استوکاستیکی باکس - جنکینز و پویایی سیستم. مجله پژوهش آب ایران. ۲۴: ۵۵-۶۴.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

\* نویسنده مسئول: [hanozari@yahoo.com](mailto:hanozari@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۳

## مقدمه

تراز دریاچه ارومیه طی سال‌های اخیر، با کاهش جدی مواجه شده است که برای آن دلایل مختلفی را مانند تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی بیان کرده‌اند. فرآیند خشک شدن دریاچه ارومیه، آثار نامطلوبی را به دنبال خواهد داشت؛ بنابراین درک مناسبی از رفتار دریاچه برای بررسی علل این واقعه و تحلیل سری زمانی تراز سطح آب آن ضروری است. در این رابطه، ذوالجودی و دیده‌ور اصل (۲۰۱۴) نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه را با تغییرات بلندمدت متغیرهای هواشناسی بررسی کردند. نتایج نشان داد تغییرات تراز آب در مقایسه با بارش، همبستگی بیشتری با دما دارد. سیما و تجریشی (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های سنجش از دور به استخراج معادلات سطح-حجم-ارتفاع پرداختند که به کمک آن‌ها، می‌توان میزان آب دریاچه ارومیه را با دقت بیشتری تخمین زد. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تعیین عوامل اصلی در کاهش سطح دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم پرداختند، که نتایج نشان داد احداث چهار سد علویان، نهند، زربنه‌رود و مهاباد حدود ۲۵ درصد، تغییر بارش بر سطح دریاچه در حدود ۱۰ درصد و اضافه برداشت از منابع آب سطحی ۶۵ درصد در کاهش تراز سطح آب دریاچه در سال‌های اخیر تأثیر داشته است. در رابطه با تحلیل سری زمانی حاجی بیگلو و همکاران (۱۳۹۲) بارندگی ماهانه را با استفاده از مدل  $SARIMA(0,1,2)(0,1,4)_{12}$  برای دوره زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۰ شبیه‌سازی و سپس دوره ده ساله ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ را پیش‌بینی کردند. ضریب تعیین ۰/۶۴۵ عملکرد خوب مدل را نشان می‌دهد. دابرال و همکاران (۲۰۱۴) به مدل‌سازی تبخیر از تشتک با استفاده از سری‌های زمانی پرداختند. آن‌ها روند موجود در سری را حذف و جهت مدل‌سازی استوکاستیکی از مدل میانگین متحرک استفاده کردند. مدرس و اسلامیان (۲۰۰۶) با استفاده از مدل  $SARIMA(1,0,0)(0,1,4)_{12}$  جریان رودخانه زاینده‌رود را شبیه‌سازی کردند. پیش‌بینی جریان رودخانه برای ۲۴ ماه آینده توانایی مدل را برای پیش‌بینی نشان داد. پریوالسکی (۱۹۹۲)، به پیش‌بینی تغییرات تراز سطح آب دریاچه آری<sup>۱</sup>، واقع در شمال کشور آمریکا، با استفاده از داده‌های

ماهانه و سالانه در دوره زمانی ۱۹۸۸-۱۸۶۰ پرداخت. در این بازه زمانی، تراز آب سالانه و ماهانه هم در میانگین و هم در واریانس ناپایستا می‌باشند. نتایج نشان داد با مدل‌های خود همبسته ( $AR^2$ ) و خودهمبسته فصلی ( $SAR^4$ ) می‌توان تراز آب دریاچه را شبیه‌سازی کرد. در تحقیق حاضر، کارایی مدل‌های استوکاستیکی در استفاده مستقیم از داده‌های تراز آب دریاچه ارومیه و همچنین عملکرد این‌گونه مدل‌ها در پیش‌بینی غیرمستقیم تراز آب دریاچه، به کمک پیش‌بینی پارامترهای مستقل ورودی و خروجی دریاچه و با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی، ارزیابی و نتایج روش‌های مذکور به منظور انتخاب دقیق‌ترین روش مقایسه می‌شود.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران بین  $37^{\circ} 17' 38''$  عرض شمالی و بین  $44^{\circ} 56' 45''$  طول شرقی با طول حدود ۱۴۶ کیلومتر و عرض حداکثر برابر با ۵۸ کیلومتر قرار دارد. شکل ۱ نشان‌دهنده موقعیت دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران است.

## روش تحقیق

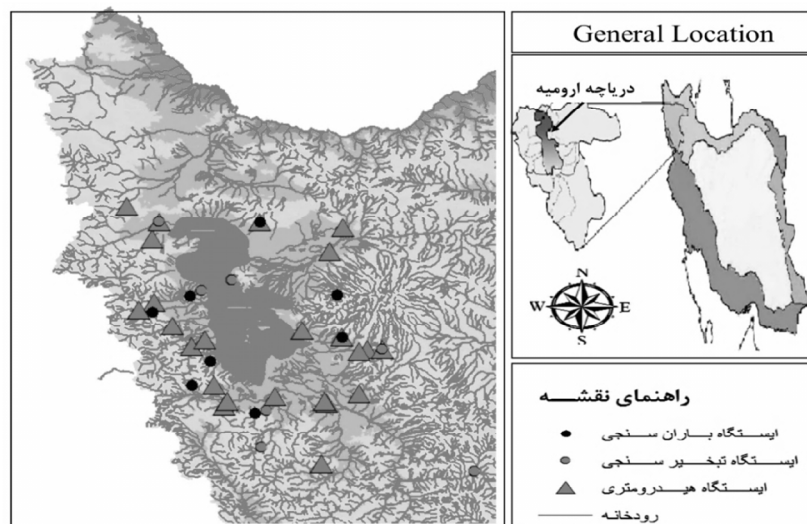
برای انجام این تحقیق ابتدا آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری (میان‌دوآب- سیمینه‌رود، نظام‌آباد، گردیعقوب، پل بهراملو سنتو، قاسملو، بالقچی، بابارود، بند ارومیه، تپیک، کریم آباد ارزین، اوربان، تمر ارومیه، بالقوز آغاچ، نقده، اسلام‌آباد- چشمه دول، پل سنخ، آخولا، خرمازرد، چکان، شیشوان، مغانجیق، قشلاق امیر، شیرین کند و دریان)، ایستگاه‌های بارانسنجی (پل بهراملو سنتو، بابارود، خرمازرد، دریان، گردیعقوب، صوفیان، صوفیان چای، بندارومیه و قرمزگل)، ایستگاه‌های تبخیرسنجی (پی قلعه، داشخانه، هاشم‌آباد بی‌بکران، آجاجلو سفلی، جزیره اسلامی، مقانجق و تازه کند میان‌دوآب)، از سازمان مدیریت منابع آب ایران تهیه شد. سپس به کمک روش‌های آماری، همگنی داده‌ها کنترل و داده‌های ناقص ایستگاه‌ها در طول دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۵۵ تکمیل گردید. پس از آن تراز سطح آب دریاچه به دو روش، شبیه‌سازی و پیش‌بینی

3- Auto Regressive  
4- Seasonal Auto Regressive

1- Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average  
2- Lake Erie

کمک مدل‌های استوکاستیکی پیش‌بینی شدند و با ورود این آمار به مدل شبیه‌سازی به روش پویایی سیستم و اجرای آن، تراز سطح آب دریاچه پیش‌بینی شد که در ادامه مراحل انجام کار توضیح داده شده است. شکل ۲ فلوجارت ترکیب روش مدل‌سازی استوکاستیکی و پویایی سیستم را نشان می‌دهد.

گردید. در روش اول تراز سطح آب دریاچه مستقیماً به کمک مدل‌های استوکاستیک و با استفاده از سری زمانی طولانی‌مدت تراز سطح آب در محیط نرم‌افزار Minitab شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. در روش دوم ابتدا به کمک روش پویایی سیستم تراز سطح دریاچه مدل‌سازی شد، سپس پارامترهای خروجی و ورودی به دریاچه از قبیل تبخیر، بارش و دبی رودخانه‌های منتهی به دریاچه به



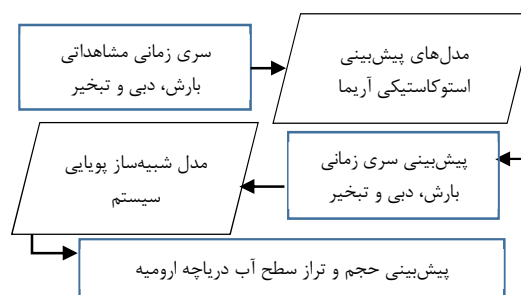
شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ایران

(ARIMA<sup>۲</sup>) را معرفی کردند. مدل‌های باکس و جنکینز دو شکل کلی دارند که عبارتند از: آریمای غیر فصلی (ARIMA(p,d,q)) و آریمای فصلی (SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)) و q به ترتیب مرتبه اتورگرسیو و میانگین متحرک غیر فصلی و P و Q مرتبه اتورگرسیو و میانگین متحرک فصلی است. دو پارامتر دیگر، یعنی d و D به ترتیب تعداد تفاضل‌های غیرفصلی و فصلی را نشان می‌دهد. شکل کلی مدل آریمای فصلی در رابطه (۱) و آریمای غیرفصلی در رابطه (۲) ارائه شده است (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹).

$$u_t = \sum_{i=1}^p \phi_i u_{t-i} + \varepsilon_t - \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (1)$$

$$\Phi(B^{\omega})\phi(B)(1-B^{\omega})^d(1-B)^d Z_t = \theta(B^{\omega})\theta(B)\varepsilon_t \quad (2)$$

که در آن u سری حاصل از تفاضل dام سری اصلی است. P مرتبه جزء خودهمبسته، d مرتبه تفاضل و q مرتبه جزء میانگین متحرک است.



شکل ۲- فلوجارت ترکیب مدل‌سازی استوکاستیک و پویایی سیستم

### مدلسازی سری‌های زمانی

اولین بار توماس و فایرینگ (۱۹۶۲)، از مدل‌های خودهمبسته برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی استفاده کردند. پس از آن، باکس و جنکینز (۱۹۷۶) مدل‌های میانگین متحرک خودهمبسته (ARMA<sup>۱</sup>) و میانگین متحرک تجمعی خودهمبسته

$x_{t+k}$  بعد از حذف اثر متغیرهای  $x_{t+2}, \dots, x_{t+k-1}$  است و با  $\emptyset$  نشان داده می‌شود.

$$\emptyset_k = \frac{\rho_k - \sum_{i=1}^{k-1} \emptyset_i(k-1)\rho_{k-i}}{1 - \sum_{i=1}^{k-1} \emptyset_i(k-1)\rho_i} \quad (4)$$

پس از انتخاب مدل، با توجه به ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی، برای تخمین پارامترهای مدل روش‌های مختلف آماری مانند روش گشتاورها، کمترین مربعات و ماکزیمم درست‌نمایی استفاده می‌شود. برای کنترل صحت مدل انتخابی می‌توان آزمون نرمال بودن و استقلال باقیمانده‌ها در زمان را استفاده نمود (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹).

### بررسی مدل بر اساس معیار آکائیک

آزمون و معیار آکائیک، یکی از روش‌های مقایسه مدل‌های مختلف است. اگر برای یک مجموعه داده چند مدل مختلف قابل قبول وجود داشته باشد، مدلی مناسب‌تر است که  $AIC^3$  کمتری داشته باشد و اگر در بین آن‌ها این معیار مشابه باشد، طبق اصل امساک، مدلی مناسب‌تر است که تعداد پارامتر  $(p, q)$  کمتری داشته باشد (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹). رابطه (۵) بیانگر فرمول ریاضی محاسبه معیار آکائیک است.

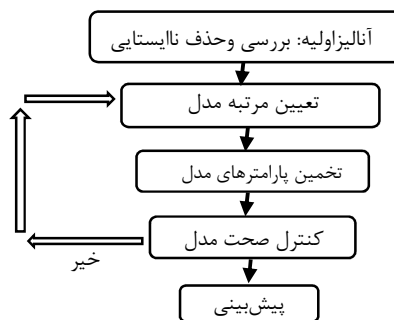
$$AIC = N \ln(\sigma_\varepsilon^2) + 2(p + q) \quad (5)$$

که در آن  $N$  تعداد داده‌های مشاهداتی و  $\sigma_\varepsilon$  انحراف معیار مدل است.

### مدل‌سازی پویایی سیستم

در فرایند مدل‌سازی، اولین گام تعریف و شناخت دقیق مسأله است. پس از آن باید فرضیه دینامیکی، فرموله و مدل شبیه‌سازی ایجاد و سپس برای اطمینان از صحت مدل، نتایج حاصل از مدل ارزیابی شود. ابزار مورد استفاده در این مطالعه به منظور مدل‌سازی عملکرد دریاچه ارومیه، مدل Vensim است که محیطی برای نوشتن برنامه به زبان پویایی سیستم می‌باشد. این محیط به صورت شیء‌گرا و بر پایه بازخورد بنا شده و دارای چهار مؤلفه اصلی: ذخایر، جریان‌ها، اتصالات و مبدل‌ها است. یک سیستم بازخورد، متأثر از رفتار گذشته خود است و یک ساختار حلقه بسته دارد که نتایج را از فعالیت‌های گذشته می‌گیرد و در فرآیندهای آینده استفاده می‌کند. این فرایند

که در آن  $\varepsilon_t$  متغیر تصادفی،  $B$  عملگر تفاضل به صورت  $B(Z_t) = Z_{t-1}$ ،  $(1 - B^d)$  امین تفاضل فصلی به اندازه  $d$ ،  $(1 - B^q)$  امین تفاضل غیرفصلی،  $p$  مرتبه مدل خودهمبسته غیرفصلی،  $q$  مرتبه مدل میانگین متحرک غیرفصلی،  $P$  مرتبه مدل خودهمبسته فصلی،  $Q$  مرتبه مدل میانگین متحرک فصلی،  $\emptyset$  پارامتر مدل خودهمبسته غیرفصلی،  $\theta$  پارامتر مدل میانگین متحرک غیرفصلی،  $\Phi$  پارامتر مدل خودهمبسته فصلی و  $\Theta$  پارامتر مدل میانگین متحرک فصلی است. مراحل مدل‌سازی سری زمانی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل مدل‌سازی سری زمانی

سری‌های زمانی به دو دسته ایستا و نایستا تقسیم می‌شوند. از آنجا که نیاز بسیاری از مدل‌های آماری در تحلیل سری‌ها ایستا بودن آن‌ها است، در درجه اول ایستا کردن سری لازم است. از روش‌های از بین بردن روند و ایستا کردن سری‌های زمانی، استفاده از تبدیل باکس-کاکس و انجام تفاضل در سری‌هاست. در تعیین و تشخیص نوع و مرتبه مدل، ضرایب خودهمبستگی  $(ACF^1)$  و خودهمبستگی جزئی  $(PACF^2)$  ابزارهایی مهم می‌باشند. خودهمبستگی عبارت است از: همبستگی بین مشاهداتی که  $k$  واحد زمانی با یکدیگر فاصله دارند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_k = \frac{cov(x_t, x_{t+k})}{var(x_t)} = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} \quad (3)$$

که در آن  $\rho_k$  مقدار تابع خودهمبستگی سری زمانی با تأخیر  $k$ ،  $x_t$  و  $x_{t+k}$  به ترتیب مقدار متغیرها با داده‌های سری زمانی در مرحله زمانی  $t$  و مرحله با تأخیر زمانی  $k$ ،  $\gamma(k)$  تابع اتوکواریانس سری  $x_t$  با تأخیر  $k$  است. در مورد ضریب خودهمبستگی جزئی، همبستگی بین  $x_t$  و

1- Autocorrelation Functions

2- Partial Autocorrelation Functions

3- Akaike Information Criterion

و ۰/۲۴ است. شکل ۴ تراز سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در روش دوم نیاز به یک مدل شبیه‌ساز تراز سطح آب دریاچه است که در این تحقیق برای شبیه‌سازی آن از روش پویایی سیستم و برنامه‌نویسی در محیط Vensim استفاده شد.

### حلقه‌های علت و معلولی

در مدل‌سازی به روش پویایی سیستم حلقه‌های علت و معلولی، چگونگی بازخوردها را نشان می‌دهند. شکل ۵ نشان‌دهنده نمودارهای علت و معلولی این تحقیق است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، در حلقه شماره یک با افزایش حجم دریاچه، تراز دریاچه، نیز افزایش می‌یابد و با افزایش تراز دریاچه مساحت آن و متعاقب حجم بارش نیز افزایش یافته و تشکیل حلقه مثبت می‌دهند. از طرفی در حلقه شماره دو، اگر سطح دریاچه افزایش یابد، مساحت بین حوضه آخرین ایستگاه‌های هیدرومتری و دریاچه ارومیه کاهش می‌یابد و با کاهش آن، حجم آب سطحی و در پی آن حجم دریاچه کاهش می‌یابد و تشکیل حلقه منفی می‌دهد. در حلقه شماره سه، با افزایش حجم و سپس تراز و در پی آن افزایش مساحت، حجم تبخیر از سطح دریاچه نیز افزایش می‌یابد و همین امر باعث کاهش حجم دریاچه و تشکیل حلقه منفی می‌شود.

### نمودار ذخیره و جریان

پس از مشخص کردن متغیرها و پارامترها، اتصالات و ارتباطات بین آن‌ها تعریف شد. در گام بعدی روابط ریاضی و منطقی بین متغیرها و پارامترها تعریف و داده‌های بارش، تبخیر و دبی به صورت ماهانه وارد مدل شد. نمودار ذخیره و جریان مدل در شکل ۶ نشان داده شده است. پس از بسط مدل بالا، اجرا و واسنجی آن برای دوره آماری ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۶، پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین محاسبه شدند که مقدار آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۳۳ متر و ۰/۹۶ است. این نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی تراز دریاچه است. نمودار حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. در این قسمت جهت پیش‌بینی تراز آب دریاچه در سال‌های ۸۷ و ۸۸ و ارزیابی مدل مذکور، ابتدا عوامل

بازخوردی شامل حلقه‌های مثبت و منفی است که روابط علت و معلولی سیستم را نشان می‌دهد. در حلقه منفی اگر علت افزایش یابد، اثر آن کاهش می‌یابد و اگر علت کاهش یابد، اثر آن افزایش می‌یابد. در حلقه مثبت نیز اگر علت افزایش یابد، اثر آن افزایش و اگر علت کاهش یابد اثر آن نیز روند کاهشی خواهد داشت.

### ضرایب آماری

پس از اجرای مدل و واسنجی آن برای دوره آماری ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۶، پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> و ضریب تعیین<sup>۲</sup> مطابق با روابط (۶) و (۷) محاسبه خواهد شد.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{t=1}^n (Q_i - \bar{Q})(\dot{Q}_t - \bar{Q}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{t=1}^n (\dot{Q}_t - \bar{Q})^2}} \right\}^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \dot{Q}_t)^2}{n}} \quad (7)$$

در این روابط،  $Q_i$  تراز آب به دست آمده از مدل،  $\bar{Q}$  میانگین تراز آب مشاهداتی،  $\dot{Q}_t$  تراز آب مشاهداتی،  $\bar{Q}$  میانگین تراز آب بدست آمده از مدل و  $n$  تعداد ماه‌ها در دوره زمانی مورد مطالعه است.

### نتایج و بحث

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، در این پژوهش پیش‌بینی تراز آب دریاچه ارومیه به دو روش انجام شد. در روش اول، ابتدا سری زمانی تراز دریاچه در محیط نرم‌افزار Minitab شبیه‌سازی و سپس پیش‌بینی گردید. برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تراز، ابتدا داده‌ها ایستا شدند، سپس مدل‌های مناسب بر داده‌ها برازش داده شدند. جدول ۱ نتایج مربوط به برازش مدل و مقدار شاخص‌های آماری  $AIC$ ،  $R^2$ ،  $RMSE$  را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مدل آریمای فصلی  $ARIMA(1,1,2)(0,1,1)_{12}$  به دلیل داشتن معیار آکائیک کمتر، ضریب تعیین بالاتر و جذر میانگین مربعات خطای کمتر بیشترین دقت را در بین مدل‌های مورد بررسی دارد. بنابراین به کمک این مدل، تراز سطح آب دریاچه برای سال‌های ۸۷ و ۸۸ پیش‌بینی شد که در آن مقدار ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطای بین مقدار پیش‌بینی و مشاهده‌ای به ترتیب ۰/۷۳

1- RMSE

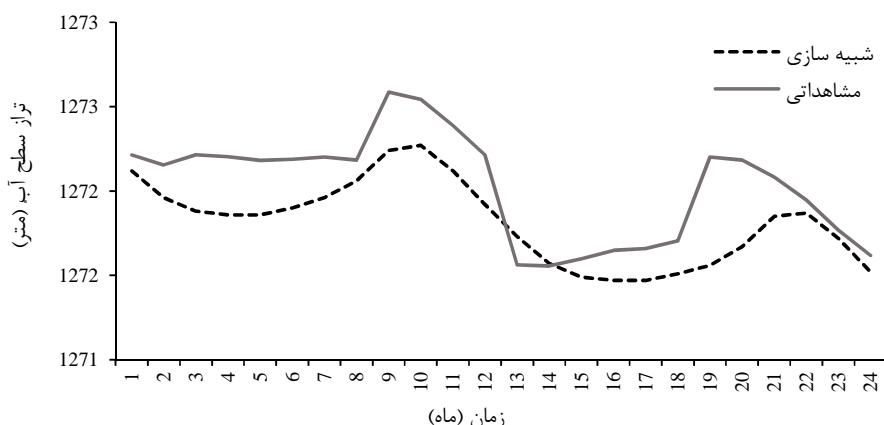
2-  $R^2$

داده شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به شاخص‌های آماری  $AIC$ ,  $R^2$ ,  $RMSE$  که مقدار آن‌ها به ترتیب برابر با ۲۲/۴۵ میلی‌متر، ۰/۴۳ و ۲۱۹۶/۰۸ است، مدل آریمای فصلی  $ARIMA(1,0,1)(0,1,1)_{12}$  به عنوان مدل مناسب انتخاب شد.

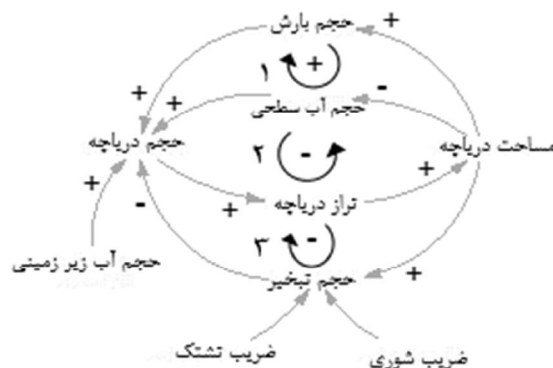
ورودی به دریاچه (دبی و بارش) و عامل خروجی از دریاچه (تبخیر) با استفاده از مدل‌های استوکاستیکی سری‌های زمانی از سال ۱۳۵۵ تا سال ۱۳۸۶ شبیه‌سازی شدند. به همین منظور ابتدا داده‌های بارش در محیط نرم‌افزار Minitab به کمک تبدیل باکس-کاکس ایستا شدند، سپس مدل‌های مناسب استوکاستیکی بر داده‌ها برازش

جدول ۱- مقایسه آماری مدل‌های مختلف آریمای فصلی برای پیش‌بینی تراز آب دریاچه ارومیه

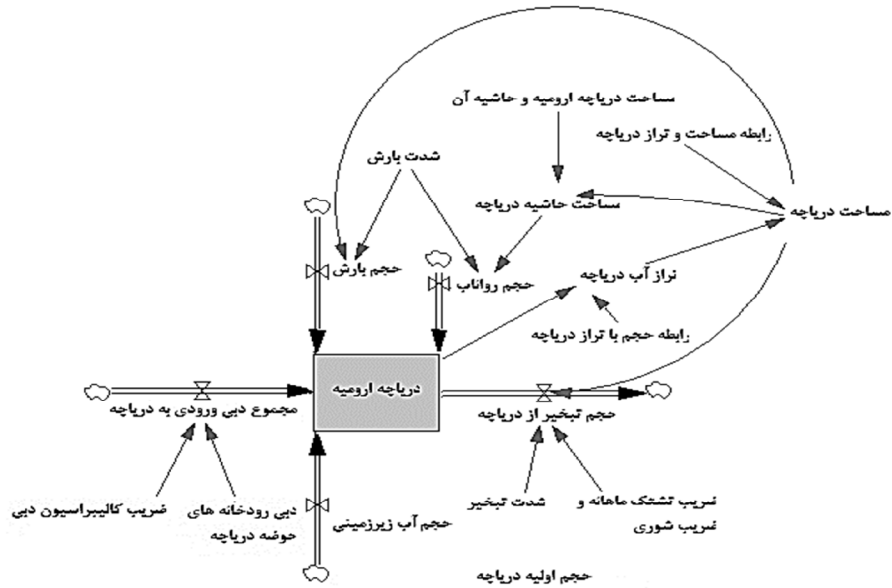
نوع مدل	تعداد پارامتر	AIC	RMSE(m)	$R^2$
ARIMA(1,1,3)(0,1,2)	۶	-۲۰۷۸/۳۵	۰/۳۸	۰/۶۱
ARIMA(1,1,4)(0,1,1)	۶	-۲۰۷۷/۳۸	۰/۳۳	۰/۶۶
ARIMA(1,1,2)(0,1,1)	۴	-۲۰۶۶/۶۹	۰/۲۴	۰/۷۳
ARIMA(1,1,3)(0,1,1)	۵	-۲۰۶۵/۰۴	۰/۲۴	۰/۷۲



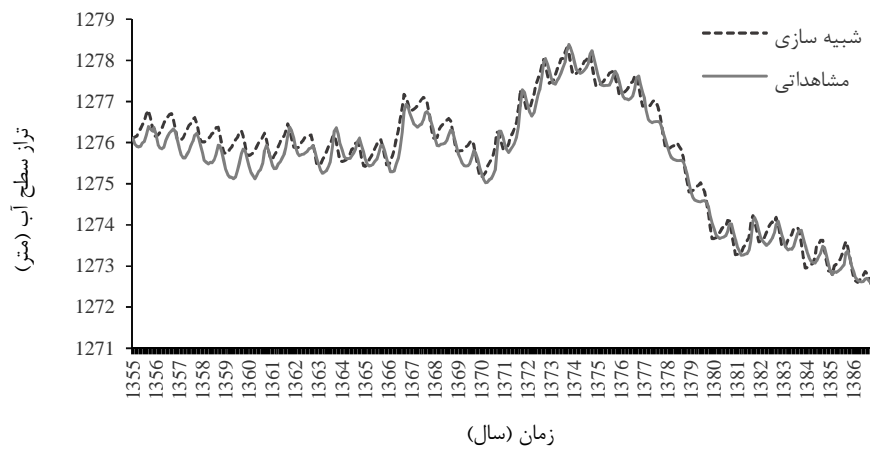
شکل ۴- تراز آب مشاهداتی و پیش‌بینی شده با مدل  $ARIMA(1,1,2)(0,1,1)_{12}$  در طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۸



شکل ۵- نمودار علت- معلولی دریاچه ارومیه



شکل ۶- نمودار ذخیره و جریان دریاچه ارومیه در محیط Vensim

شکل ۷- تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل  $ARIMA(1,0,1)(0,1,1)_2$  بعد از واسنجی

جدول ۲- مقایسه آماری مدل‌های مختلف آریمای فصلی جهت پیش‌بینی بارش ماهانه

نوع مدل	تعداد پارامتر	AIC	RMSE(mm)	$R^2$
ARIMA(3,0,2)(0,1,0)	۵	۲۳۴۶/۲۷	۳۴/۱۷	۰/۰۱
ARIMA(2,0,1)(1,1,0)	۴	۲۳۰۹/۹۳	۲۷/۶۴	۰/۲۹
ARIMA(1,0,1)(0,1,1)	۳	۲۱۹۶/۰۸	۲۲/۴۵	۰/۴۳
ARIMA(1,0,1)(0,1,2)	۴	۲۲۰۱/۸۸	۲۲/۵۳	۰/۴۱

برازش داده شد که از بین آن‌ها با توجه به پارامترهای آماری  $R^2$ , RMSE و مقدار آن‌ها که به ترتیب برابر ۹۳/۹۷ میلیون مترمکعب، ۰/۸۳، ۳۸۵۸/۹۶ مدل آریمای فصلی  $ARIMA(1,1,2)(0,1,1)_2$  انتخاب شد. مدل‌های برازش داده شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی دبی ورودی به دریاچه ابتدا داده‌های دبی ماهانه ۲۴ ایستگاه هیدرومتری انتخابی را از سال ۵۵ تا سال ۸۶ باهم جمع و سپس این داده‌ها وارد محیط نرم‌افزار minitab و با استفاده از تبدیل لگاریتمی ایستا شدند، در گام بعدی مدل‌های مناسب بر داده‌ها

جدول ۳- مقایسه آماری مدل‌های مختلف آریمای فصلی برای پیش‌بینی دبی ورودی به دریاچه

R <sup>2</sup>	RMSE(mcm)	AIC	تعداد پارامتر	نوع مدل
۰/۲۰	۲۳۱/۴۷	۴۰۳۹/۶۶	۴	ARIMA(2,1,2)(0,1,0)
۰/۵۶	۲۰۳/۶۷	۴۰۷۹/۴۱	۵	ARIMA(2,1,2)(1,1,0)
۰/۸۳	۹۳/۹۷	۳۸۵۸/۹۶	۴	<b>ARIMA(1,1,2)(0,1,1)</b>
۰/۸۱	۱۰۸/۲۴	۳۸۵۳/۳۴	۶	ARIMA(2,1,2)(1,1,1)

داده شدند. جدول ۴ نشان‌دهنده مدل‌های آماری مختلف برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تبخیر است که از بین آن‌ها مدل آریمای فصلی  $ARIMA(2,1,3)(0,1,0)_{12}$  با آکائیک  $2798/93-$  ضریب تعیین  $0/95$  و میانگین جذر مربعات  $0/05$  متر، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

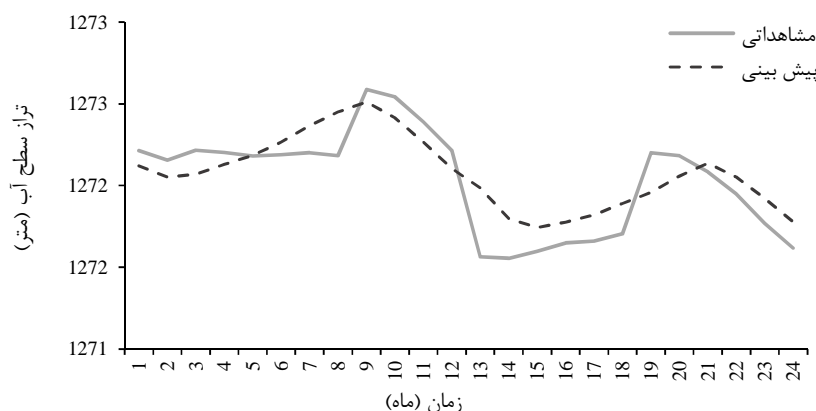
در گام بعدی به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تبخیر از سطح دریاچه پرداخته شد. میانگین ماهانه تبخیر از هفت ایستگاه تبخیر سنجی به عنوان داده‌های ورودی وارد محیط نرم‌افزار Minitab شد و با استفاده از تبدیل لگاریتمی داده‌ها ایستا و مدل‌های استوکاستیکی برازش

جدول ۴- مقایسه آماری مدل‌های مختلف آریمای فصلی جهت پیش‌بینی تبخیر از سطح دریاچه

R <sup>2</sup>	RMSE(m)	AIC	تعداد پارامتر	نوع مدل
۰/۸۶	۰/۰۷	-۲۷۱۷/۶۱	۶	ARIMA(4,1,2)(0,1,0)
۰/۹۴	۰/۰۶	-۲۷۹۵/۷۶	۵	ARIMA(4,1,1)(0,1,0)
۰/۹۵	۰/۰۵	-۲۷۹۸/۹۳	۵	<b>ARIMA(2,1,3)(0,1,0)</b>
۰/۹۳	۰/۱۰	-۲۸۱۶/۹۳	۴	ARIMA(2,1,2)(0,1,0)

این مدل برای سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ ارزیابی گردید. نتایج نشان می‌دهد مقدار RMSE و R<sup>2</sup> به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۷۵ است شکل ۸ مقدار شبیه‌سازی و مشاهده شده تراز آب دریاچه را نشان می‌دهد.

پس از شبیه‌سازی بارش، دبی ورودی به دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه برای سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۶ و پیش‌بینی این متغیرها برای سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ مقدار پیش‌بینی شده وارد مدل Vensim شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از



شکل ۸- تراز سطح آب دریاچه ارومیه در سال‌های ۸۷ و ۸۸ در مدل ونسیم با استفاده از مقدار پیش‌بینی شده مدل‌های استوکاستیکی

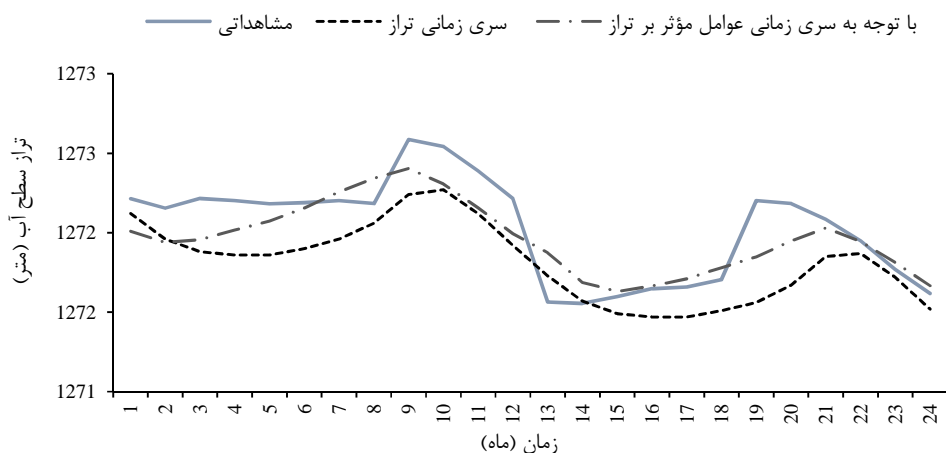
سیستم دارد. نتایج در جدول ۵ ارائه شده است. شکل ۹ نشان دهنده نتایج حاصل از دو روش پیش‌بینی تراز سطح دریاچه ارومیه است.

نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی تراز به روش مستقیم با استفاده از مدل‌های استوکاستیک دقت کمتری را نسبت به شبیه‌سازی و پیش‌بینی با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر تراز آب دریاچه ارومیه و به کمک مدل شبیه‌سازی پویایی



جدول ۵- مقایسه آماری روش‌های شبیه‌سازی تراز سطح آب دریاچه ارومیه

R <sup>2</sup>	RMSE	روش پیش‌بینی
۰/۷۳	۰/۲۴	استفاده مستقیم از داده‌های سری زمانی تراز سطح آب
۰/۷۵	۰/۱۷	استفاده از داده‌های سری زمانی جریان‌های ورودی و خروجی از دریاچه و مدل Vensim



شکل ۹- مقایسه نتایج دو روش پیش‌بینی تراز سطح آب دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸

### نتیجه‌گیری

خطا در این روش، به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۷۵ متر محاسبه شد؛ بنابراین نتایج نشان داد که پیش‌بینی تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از سری زمانی جریان‌های ورودی و خروجی به دریاچه و شبیه‌سازی دریاچه به کمک روش پویایی سیستم، دقت بیشتری را نسبت به پیش‌بینی تراز سطح آب دریاچه به صورت مستقیم و با استفاده از سری زمانی تراز دارد.

در تحقیق حاضر از مدل سری زمانی ARIMA به همراه مدل‌سازی به روش پویایی سیستم در برآورد تراز آب دریاچه ارومیه استفاده گردید. برای پیش‌بینی تراز به صورت مستقیم، مدل فصلی  $ARIMA(1,1,2)(0,1,1)_{12}$  انتخاب شد و مقدار معیارهای آماری ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا برای مدل مذکور به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۲۴ متر محاسبه شدند. سپس برای مدل‌سازی عوامل خروجی و ورودی دریاچه با استفاده از سری زمانی و بررسی تأثیر آن‌ها بر تراز دریاچه، ابتدا مدل شبیه‌سازی دریاچه با استفاده از روش پویایی سیستم در محیط نرم‌افزار Vensim توسعه داده شد و سپس شبیه‌سازی عوامل ورودی و خروجی با استفاده از سری‌های زمانی در نرم‌افزار Minitab صورت گرفت. مدل‌های انتخاب شده برای بارش، دبی و تبخیر به ترتیب مدل‌های فصلی  $ARIMA(1,0,1)(0,1,1)_{12}$ ،  $ARIMA(1,1,2)(0,1,1)_{12}$  و  $ARIMA(2,1,3)(0,1,0)_{12}$  می‌باشند. پس از واسنجی نتایج مدل شبیه‌سازی دریاچه در محیط Vensim، جریان‌های ورودی و خروجی پیش‌بینی شده دریاچه به کمک مدل‌های استوکاستیکی برای سال‌های ۸۷ و ۸۸ وارد مدل شدند و مدل، اجرا شد. ضریب تعیین و میانگین مربعات

### منابع

- حاجی‌بیگلو م. فزل سوقلو ع. ع. و علی‌میرزائی ح. ۱۳۹۲. بررسی و پیش‌بینی متوسط بارندگی ماهانه با بکارگیری تکنیک SARIMA (مطالعه موردی: ایستگاه باران‌سنجی بابامان بجنورد). مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۶(۳): ۴۱-۵۴.
- کارآموز م. و عراقی‌نژاد ش. ۱۳۸۹. هیدرولوژی پیشرفته. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۴۶۴ ص.
- Box G. E. P. and Jenkins G. M. 1976. Time Series Analysis: Forecasting and Control. revised ed. Holden-Day.
- Dabral P. P. Jhajharia D. Mishra P. Hangshing and L. Doley B. J. 2014. Time series modelling of pan evaporation: a case

- study in the northeast INDIA. *Global NEST Journal*. 16(2):280-292.
5. Hassanzadeh E. zarghami M. and Hassanzadeh Y. 2012. Determining the Main Factors in Declining the Urmia Lake Level by Using System Dynamics Modeling. *Water Resour Manage*. 26(1):129-145.
  6. Modarres R. and Eslamian. S. S. 2006. Streamflow Time Series Modeling Of Zayandehrud River. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*. 30(B4): 566-570.
  7. Privalsky V. 1992. Statistical Analysis and Predictability of Lake Erie Water Level Variations. *Journal of Great Lakes Research*. 18(1):236-243.
  8. Sima S. and Tajrishy M. 2013. Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*. 39(1): 90-99.
  9. Thomas H. A. and Fiering M. B. 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for analysis of river basins by simulation. *Design of water resources systems*. 459-493.
  10. Zoljoodi M. and Didevarasl A. 2014. Water-Level Fluctuations of Urmia Lake: Relationship with the Long-Term Changes of Meteorological Variables (Solutions for Water-Crisis Management in Urmia Lake Basin). *Atmospheric and Climate Sciences*. 4(3): 358-368.