

ارزیابی عملکرد مدل‌های سری زمانی خطی ARMA و غیرخطی آستانه TAR در مدل‌سازی دبی روزانه (مطالعه موردی: رودخانه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود)

فرشاد فثیان^{۱*} - احمد فاخری فرد^۲ - یعقوب دین پژوه^۳ - سید سعید موسوی ندوشنی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

چکیده

مدل‌های سری زمانی از ابزارهای مهم در مدل‌سازی و پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی است که به منظور طراحی و مدیریت علمی پروژه‌های منابع آب به کار می‌روند. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی میانگین دبی روزانه ۶ ایستگاه آب‌سنجی واقع در بالادست سد زرینه‌رود از مدل‌های خطی خودهمبسته میانگین متحرک (ARMA) و غیرخطی خودهمبسته آستانه (TAR) ۲ و ۳ رژیم استفاده شده است. به دلیل اینکه داده‌ها دارای نوسانات فصلی می‌باشند، در ابتدا داده‌های دبی روزانه برای یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۷)، با استفاده از سری فوریه و برآورد شاخص‌های آماری نظیر میانگین و انحراف استاندارد، استاندارد شدند. سپس، داده‌های استاندارد شده برای یک دوره ۱۳ ساله (۲۰۰۹-۱۹۹۷) واسنجی و یک دوره ۲ ساله (۲۰۱۱-۲۰۱۰) صحت‌سنجی شدند. در نهایت، مدل‌های خطی و غیرخطی مناسب با استفاده از معیارهای آکائیکه و آزمون استقلال باقیمانده‌های مدل (Ljung-Box) انتخاب شدند. نتایج این تحقیق نشان داده است که بر اساس معیارهای ارزیابی، عملکرد مدل‌های غیرخطی آستانه ۲ و ۳ رژیم برای همه ایستگاه‌ها دارای برتری نسبت به مدل خطی در مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه‌های بالادست سد زرینه رود می‌باشد. همچنین مدل‌سازی و مقایسه مدل‌های غیرخطی آستانه نشان داد که مدل غیرخطی ۳ رژیم دارای معیارهای ارزیابی مناسب‌تری نسبت به مدل ۲ رژیم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، دریاچه ارومیه، فرآیندهای هیدرولوژیکی، مدل‌های ۲ و ۳ رژیم، معیارهای ارزیابی

مقدمه

متغیرهای هیدرولوژیکی، اولین گام در مدیریت یکپارچه منابع آب است. از طرف دیگر، اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب بر پایه مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی می‌باشد (۱۰).

یکی از دغدغه‌های اصلی محققان در مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی این است که آیا فرآیند مورد نظر باید به صورت خطی مدل‌سازی شوند یا غیرخطی (۱۶). مدل‌های خطی سری‌های زمانی به طور گسترده در هیدرولوژی و منابع آب برای متغیرهای مختلف، نظیر بارش (۴ و ۱۴)، جریان رودخانه (۱ و ۱۸)، سیلاب (۲۳)، خشکسالی (۱۵) و کیفیت آب (۲۷ و ۱۲) بکار گرفته شده‌اند. از جمله مدل‌های خطی می‌توان به مدل‌های خود همبسته (AR)، میانگین متحرک (MA) و خود همبسته- میانگین متحرک (ARMA) اشاره کرد.

در سال‌های اخیر، کاربرد مدل‌های غیرخطی سری‌های زمانی در هیدرولوژی به صورت چشمگیری مورد توجه محققین واقع شده است. به طور کلی، مدل‌های غیرخطی بیشتر در علوم مرتبط با آمار، اقتصاد و

تحلیل سری‌های زمانی به طور وسیعی در بسیاری از زمینه‌های مهندسی، علوم فیزیک، اقتصاد به کار گرفته می‌شوند. تحلیل سری‌های زمانی معمولاً دو هدف را دنبال می‌کند، ابتدا مدل‌سازی بر طبق مکانیزم متغیرهای تصادفی بر فرآیند هیدرولوژیکی مورد نظر انجام شده و دوم پیش‌بینی نمودن مقادیر آینده سری که بر مبنای تاریخ گذشته آن صورت می‌گیرد (۶). در طول دهه‌های اخیر، تحلیل و مدل‌سازی سری‌های زمانی در زمینه علوم هیدرولوژی، منابع آب و اقلیمی، توجه قابل قبولی را برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی جلب کرده است. به طوری که، ارزیابی منابع آب موجود، تخمین دقیق میزان رواناب و تغییرات آن در حوضه آبریز و پیش‌بینی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*- نویسنده مسئول: (Email: farshad.fathian@tabrizu.ac.ir)

۴- استادیار مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

سیکل‌های سالانه) هستند، در نظر گرفته شد. در این رودخانه‌ها، سیکل‌های مذکور دارای نوسانات بسیار کم در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر می‌باشند، ولی برای بقیه ماه‌ها این نوسانات زیاد می‌باشد. وجود چنین نوساناتی در جریان رودخانه می‌تواند به دلیل الف) وسعت حوضه آبریز که رودخانه‌ها در آن جریان دارند و ب) شرایط اقلیمی حوضه آبریز در زمان‌های مختلف از سال، باشد. بنابراین، فرض می‌شود زمانیکه بارش با شدت زیاد در منطقه رخ دهد، حوضه آبریز قادر به جذب همه آب‌های حاصل از بارش نیست و در نتیجه جریان سطحی به وجود می‌آید. برعکس، چنانچه برای یک دوره زمانی، بارشی رخ ندهد یا مقدار آن کم باشد، جریان آب ناشی از بارش به دلیل اینکه از مقدار آستانه (مقدار جذب آب توسط خاک و پرشدن ظرفیت حوضه آبریز) کمتر می‌باشد، سهم ناچیزی در رواناب سطحی رودخانه خواهد داشت (۹). این رفتار متفاوت اقلیمی در زمان‌های مختلف سال و نیز پیچیدگی ساختار جریان سطحی در حوضه آبریز، انگیزه اصلی کاربرد مدل‌های آستانه نظیر TAR برای مدل‌سازی داده‌ها در مطالعه حاضر است. بنابراین، با توجه به اهمیت مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه و کاربرد آن در مدیریت و برنامه ریزی منابع آب، هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی میانگین جریان روزانه رودخانه‌های بخش بالادست سد زرنه‌رود با استفاده از مدل‌های سری زمانی خطی (ARMA) و غیرخطی آستانه ۲ و ۳ رژیمی (SETAR) و ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد آنها است.

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده در این تحقیق، حوضه آبریز بالادست سد زرنه‌رود می‌باشد. حوضه آبریز زرنه‌رود، بزرگترین زیرحوضه درجه ۲ از حوضه بسته دریاچه ارومیه است که در بخش جنوب و جنوب شرقی دریاچه ارومیه قرار گرفته است. حوضه بالادست سد زرنه‌رود از چهار زیرحوضه تشکیل شده که مساحت کلی آن حدود ۷۰۸۱ کیلومتر مربع و دامنه تغییرات ارتفاع آنها بین ۱۷۴۶ تا ۲۱۲۱ متر می‌باشد. چهار رودخانه اصلی واقع در چهار زیرحوضه، به ترتیب از غرب به شرق به نام‌های سقزچای، جیغاتوچای، خرخره‌چای و ساروق‌چای موسوم هستند و جریان آب خود را به درون دریاچه سد تخلیه می‌کنند (شکل ۱) و مساحت زهکش بالادست هر یک از ایستگاه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

در این مطالعه از داده‌های میانگین دبی روزانه جریان رودخانه‌های منطقه مطالعاتی که شامل ۶ ایستگاه آبسنجی می‌باشد، استفاده شد. علاوه بر رژیم تصادفی بودن رودخانه، آبرگیری از رودخانه‌ها و نیز برداشت از آب زیرزمینی توسط زارعین انجام می‌شود. البته لازم به ذکر است که بیشتر رودخانه‌های پایین دست سد از نوع فصلی می‌باشند، بنابراین بیشتر اراضی تحت کشت آبی نیاز خود را از

ریاضیات مورد بحث قرار گرفته و توسعه یافته‌اند و به طور نسبی تلاش‌ها و مطالعه‌های کمی در زمینه منابع آب و هیدرولوژی انجام شده است (۱۶). البته لازم به ذکر است که آزمون‌های زیادی برای تشخیص وجود یا عدم وجود رفتار غیرخطی در سری زمانی مورد نظر وجود دارند، اما آزمون غالب و منحصر بفردی که نوع غیرخطی بودن را به طور دقیق نشان دهد، وجود ندارد. بدین منظور، اکثر هیدرولوژیست‌ها در قالب یک مقاله جداگانه، ایستایی و غیرخطی بودن سری‌های زمانی مورد نظر را بررسی کرده‌اند.

از جمله نگرش‌های غیرخطی، استفاده از مدل‌های خودهمبسته آستانه^۱ TAR می‌باشند. انواع مختلفی از مدل غیرخطی TAR وجود دارند که عبارتند از: SETAR^۲، STAR^۳، LSTAR^۴، ESTAR^۵ (۷). بیشتر تحقیقات و بکارگیری این مدل‌ها در زمینه علوم اقتصادی و مالی می‌باشد و تعداد مطالعات مربوط به این مدل‌های غیرخطی در مقایسه با مدل‌های خطی در زمینه علوم هیدرولوژی و منابع آب، بسیار اندک است. به طوری که، به نظر می‌رسد تاکنون در ایران مطالعه‌ای در زمینه کاربرد این مدل‌ها در مورد فرایندهای جریان رودخانه وجود نداشته و در سطح جهانی نیز بسیار معدود می‌باشد. از پیشگامان استفاده از این مدل‌ها می‌توان به کارهای آمدلا و سوزتی (۳) و تانگ (۲۲) اشاره نمود که در آن سری زمانی بارش هدف مدل‌سازی واقع شده بود (۲۰). Svetlíková (۲۰) با بکارگیری مدل‌های خطی ARMA و غیرخطی SETAR، سری‌های زمانی بارش و دبی ماهانه را در اسلوواکی مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که برای دبی، مناسب‌ترین مدل‌ها، مدل‌های SETAR بودند که بهترین نتایج را فراهم آوردند. در حالی که، در مورد بارش، مدل‌های SETAR در مقایسه با مدل‌های خطی ARMA عملکرد پائین‌تری داشته است. والت و همکاران (۲۴) غلظت نیترات موجود در آب رودخانه دانوب را با مدل‌های خطی ARMA و غیرخطی SETAR مدل‌سازی نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که مدل غیرخطی داده‌های کیفی آب رودخانه دانوب را در مقایسه با مدل خطی بهتر برازش می‌کند، زیرا این مدل دارای حداقل مقدار مجموع مربعات باقیمانده (RSS) می‌باشد. Gishani و Järas (۹) برای مدل‌سازی داده‌های جریان دو رودخانه در انگلستان، از مدل‌های خطی و غیرخطی ARMA و SETAR استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که عملکرد مدل‌های غیرخطی بهتر از مدل‌های خطی می‌باشد.

در این تحقیق، سری‌های زمانی دبی روزانه رودخانه‌های بالادست سد زرنه‌رود که دارای تغییرپذیری زیادی (به صورت

- 1- Threshold Auto-Regressive
- 2- Self-Existing Threshold Auto-Regressive
- 3- Smooth Transition Auto-Regressive
- 4- Logistic Smooth Transition Auto-Regressive
- 5- Exponential Smooth Transition Auto-Regressive

آمار مورد استفاده شامل تعداد ۵۴۷۵ داده در مقیاس روزانه است که از این تعداد ۴۷۴۵ داده اولیه (ابتدای ژانویه ۱۹۹۷ تا پایان دسامبر ۲۰۰۹) به منظور تعیین پارامترهای مدل (واسنجی مدل) استفاده شده‌اند. ۷۳۰ داده پایانی (ابتدای ژانویه ۲۰۱۰ تا پایان دسامبر ۲۰۱۱) برای صحت‌سنجی مدل انتخاب شده‌اند.

سد تامین می‌کنند و در بالادست سد (منطقه مطالعاتی موردنظر) بر اساس آمار و اطلاعات، کمتر از ۲ درصد مساحت حوضه بالادست سد زرينه‌رود را کشت آبی (حدود ۱۳۳ کیلومتر مربع) تشکیل می‌دهد (۲). موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ و مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است. دوره آماری مورد استفاده از روز اول ماه ژانویه سال ۱۹۹۷ تا روز آخر ماه دسامبر سال ۲۰۱۱ (دوره ۱۵ ساله) می‌باشد. در واقع

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های آبسنجی منطقه مطالعاتی

Table 1- Properties of hydro gauge stations of the study area

ایستگاه Station	حوضه رودخانه River basin	عرض جغرافیایی Latitude (degree)	طول جغرافیایی Longitude (degree)	ارتفاع Elevation (m)	مساحت حوضه Drainage area (km ²)
ققیلو Ghabghablou	سقرچای Saghez Chai	36.18 N	46.17 E	1500	661
دره پنبه‌دان Darepanbedan	سقرچای Saghez Chai	36.28 N	46.37 E	1470	1041
پل قشلاق Pol Gheslagh	جیغاتوچای Jighato Chai	36.10 N	46.35 E	1436	1091
پل آنیان Pol Anian	جیغاتوچای Jighato Chai	36.20 N	46.43 E	1460	1328
سنه Sonnateh	خورخوره چای Khorkhoreh Chai	36.17 N	46.55 E	1434	1233
صفاخانه Safakhaneh	ساروق چای Sarogh Chai	36.40 N	46.70 E	1475	2209

مدل خطی ARMA

مدل سری زمانی خطی استفاده شده در این تحقیق، مدل خود همبسته میانگین متحرک می‌باشد. این مدل را می‌توان برای سری‌های زمانی غیرفصلی بکار گرفت. مدل ARMA پارامترهای فصلی را در نظر نمی‌گیرد و به صورت زیر در نظر گرفته شد (۸):

$$\phi_p(B)Y_t = \theta_q(B)\varepsilon_t \quad (1)$$

که در آن Y_t سری زمانی مشاهده شده، ϕ_p چندجمله‌ای مرتبه p ، θ_q چندجمله‌ای مرتبه q ، B عملگر تاخیر و ε_t خطای تخمین یا نوفه سفید یا خطای نرمال توزیع شده مستقل یکنواخت با میانگین صفر و انحراف استاندارد σ_ε می‌باشند. مدل‌سازی خطی در سه مرحله شناسایی مدل، تخمین مدل و تشخیص و کنترل کردن مدل انجام شد.

مدل غیرخطی SETAR

از بین مدل‌های غیرخطی، مدل TAR در ابتدا توسط تانگ (۲۱) معرفی شد. مدل‌های TAR معمولاً به مدل‌های خطی قطعه‌ای یا

مواد و روش‌ها

در مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی فرض بر این است که متغیرها دارای توزیع نرمال بوده و بررسی نرمال بودن آنها امری ضروری می‌باشد. زیرا نظریه‌ی سری‌های زمانی بر اساس نرمال بودن داده‌ها توسعه یافته و در صورتی که داده‌ها نرمال نباشند بایستی از روش‌های مختلف نظیر لگاریتم‌گیری، جذر، نمایی و تبدیل توانی آنها را نرمال کرد (۸ و ۱۹). علاوه بر این، در این تحقیق برای مدل‌سازی داده‌های دبی روزانه (که معمولاً دارای فصلیت بالایی) می‌باشند، ابتدا از داده‌های دبی روزانه همه ایستگاه‌ها عمل لگاریتم‌گیری انجام گردید. سپس، با استاندارد کردن آنها (کم کردن مقادیر میانگین از سری‌های لگاریتم‌گیری شده و تقسیم کردن آنها بر انحراف استاندارد سری)، داده‌ها استاندارد شدند. لازم به ذکر است به منظور استانداردسازی داده‌ها، شاخص‌های آماری (میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی) با استفاده از سری فوریه محاسبه شدند (۱۹ و ۲۵). علاوه بر این، به دلیل اینکه برخی از مقادیر میانگین دبی روزانه صفر هستند، قبل از عمل لگاریتم‌گیری به همه داده‌ها مقدار 0.005 اضافه شده است (۲۶).

1- Independent identically distributed (i.i.d) normal error

که تعداد کل داده‌ها، p مرتبه مدل AR، n_1 و n_2 به ترتیب تعداد داده‌های واقع شده در رژیم‌های پائین و بالا، $\hat{\sigma}_1^2$ و $\hat{\sigma}_2^2$ نیز واریانس خطاها حاصل از مجموع مربعات باقیمانده‌ها می‌باشند. پس از آن، برای مقادیر τ و d ثابت شده و با به حداقل رساندن AIC^T ، مرتبه‌های دو مدل پائین و بالا تخمین زده می‌شوند (رابطه ۴).

$$Y_t = \begin{cases} \alpha_{10} + \sum_{i=1}^p \alpha_{1i} Y_{t-i} + \varepsilon_t & \text{if } Y_{t-d} \leq \tau_1 \\ \alpha_{20} + \sum_{i=1}^r \alpha_{2i} Y_{t-i} + \varepsilon_t & \text{if } \tau_1 < Y_{t-d} \leq \tau_2 \\ \alpha_{30} + \sum_{i=1}^q \alpha_{3i} Y_{t-i} + \varepsilon_t & \text{if } Y_{t-d} > \tau_2 \end{cases} \quad (5)$$

آزمون‌های کفایت مدل‌های خطی و غیرخطی

به منظور آزمون کفایت مدل، در ابتدا ACF^F باقیمانده‌های مدل انتخاب شده بررسی شد. برای سری‌های زمانی مستقل و تصادفی با طول n ، ضریب خودهمبستگی با مرتبه تاخیر k دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس $1/n$ بوده و حدود اطمینان آن در سطح ۹۵٪ برابر است با $\pm 1.96/\sqrt{n}$ می‌باشد (۱۶، ۱۷). بنابراین، با رسم کردن نمودار ACF باقیمانده‌های مدل‌های خطی و غیرخطی برآزش یافته، چنانچه مقادیر ضرایب خودهمبستگی‌ها در باند اطمینان ۹۵٪ واقع شوند، مدل برآزش یافته کفایت لازم را دارد.

از جمله آزمون‌های دیگر، آزمون Ljung-Box (معمولاً به عنوان آزمون Portmanteau نامیده می‌شود) می‌باشد که به منظور آزمون کفایت مدل استفاده می‌شود (۱۳). آزمون مورد نظر با محاسبه آماره Q که از توزیع χ^2 با درجه آزادی $(L-p-q)$ پیروی می‌کند، به شرح زیر انجام شد:

$$Q = N(N+2) \sum_{k=1}^L (N-k)^{-1} r_k^2(\varepsilon) \quad (6)$$

طبق این رابطه، N تعداد نمونه، L تعداد تاخیرهای تابع خودهمبستگی و r_k^2 مربع مقدار خودهمبستگی سری‌های زمانی باقیمانده (۵) در تاخیر k ام می‌باشند. آماره Q محاسبه شده با مقدار کای دو مستخرج از جدول در سطح معنی‌داری ۵ درصد مقایسه شد. کفایت مدل در صورتی که مقدار Q از مقدار کای دو جدول کمتر می‌شد، مورد تایید

مدل‌های رژیم-سوئیچینگ نسبت داده می‌شوند. این مدل شامل k بخش $AR(p)$ می‌باشد و مرتبه مدل خودهمبسته هر بخش متفاوت می‌باشد. به طوری که، یک فرآیند بر طبق یک مقدار مشاهده شده (یک آستانه) به فرآیند دیگری تغییر می‌کند. مدل‌های TAR معمولاً به صورت $TAR(k,p)$ نشان داده می‌شوند که p مرتبه تابع خود همبسته در هر رژیم یا قطعه است. از آنجائی که تعداد مرتبه‌های تابع خود همبسته در هر رژیم متفاوت می‌باشد، مدل گاهی اوقات به صورت $TAR(k)$ نشان داده می‌شود. همانطور که در بخش ۱ مقاله اشاره شد، یکی از حالت‌های خاص از مدل TAR مدل SETAR می‌باشد که توسط Tong (۲۱) معرفی شد و در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود. در مدل SETAR، جایجائی‌ها بین رژیم‌ها توسط یک متغیر که آستانه نامیده می‌شود، کنترل می‌شوند، با این تفاوت که مقدار آستانه مدل SETAR به صورت خودالقائی^۱ می‌باشد. به این معنی که، برخلاف مدل TAR که آستانه به عنوان یک متغیر برون‌زا فرض می‌شود، متغیر آستانه مدل SETAR یک مقدار تاخیر داده شده از خود سری زمانی می‌باشد و به صورت متغیر درون‌زا محسوب می‌شود (۹). مدل SETAR که دارای دو رژیم می‌باشد، $SETAR(2;p,r)$ ، به صورت زیر در نظر گرفته شد.

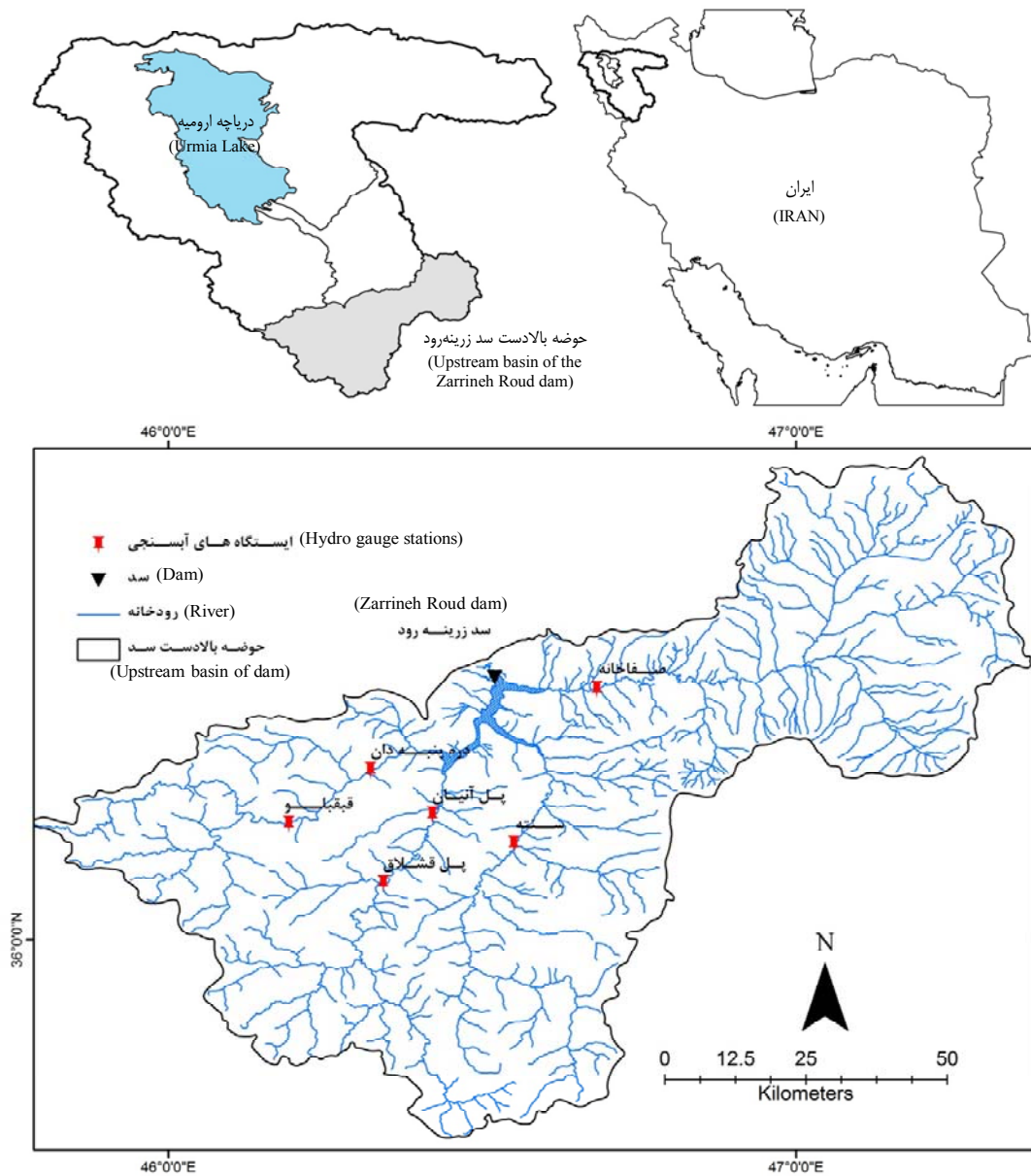
$$Y_t = \begin{cases} \alpha_{10} + \sum_{i=1}^p \alpha_{1i} Y_{t-i} + \varepsilon_t & \text{if } Y_{t-d} \leq \tau \\ \alpha_{20} + \sum_{i=1}^r \alpha_{2i} Y_{t-i} + \varepsilon_t & \text{if } Y_{t-d} > \tau \end{cases} \quad (2)$$

که در آن ε_t نوفه سفید، p و r بترتیب مرتبه‌های مدل AR رژیم‌های پائین ($Y_{t-d} \leq \tau$) و بالا ($Y_{t-d} > \tau$)، α ضرایب معادله‌ها، τ مقدار آستانه و d زمان تاخیر معادله دو رژیمی بالا را نشان می‌دهد و با حداکثر کردن تابع درستنمایی ذکر شده در مرجع ۶ این مقادیر محاسبه می‌شوند. بنابراین، مقادیر مشاهداتی میانگین دبی روزانه (Y_t) بر طبق معادله ۲، در دو دسته یا رژیم مختلف که کمتر یا بیشتر از حد آستانه است، قرار می‌گیرند. در نتیجه، برای هر رژیم به صورت جداگانه یک مدل AR با مرتبه p و r برآزش داده می‌شود. به منظور برآورد یک مدل TAR، ابتدا باید پارامترهای آستانه (τ) و زمان تاخیر (d) برآورد شوند. سپس، داده‌ها به دو رژیم پائین و بالا تقسیم می‌شوند و در نهایت، ضرایب معادله‌های AR در هر رژیم محاسبه می‌شود. با حداکثر کردن تابع لگاریتم-درستنمایی^۲، مقادیر τ و d از طریق رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$l(\tau, d) = -\frac{n-p}{2} \{1 + \log(2\pi)\} - \frac{n_1(\tau, d)}{2} \log((\hat{\sigma}_1(\tau, d))^2) - \frac{n_2(\tau, d)}{2} \log((\hat{\sigma}_2(\tau, d))^2) \quad (3)$$

3- Minimum Akaike Information Criterion (MAIC)
4- Auto-Correlation Function

1- Self-Exciting
2- Profile log-likelihood function



شکل ۱- موقعیت حوضه بالادست سد زرنه رود و ایستگاه های آیسنجی
Figure 1- Location of upstream basin of Zarrineh Roud dam and hydro gauge stations

معیارهای ارزیابی مدل

در این تحقیق، به منظور ارزیابی عملکرد هر یک از مدل های ذکر شده از تعدادی از معیارهای عملکرد مختلف مطابق روابط زیر استفاده شد. روابط (۷) تا (۱۰) معیارهای ارزیابی خطای مطلق^۴، رابطه (۱۱) خطای نسبی^۲، و روابط (۱۲) و (۱۳) معیار ارزیابی بدون بعد^۳ را بیان

می کنند.

۴ - حداکثر خطای مطلق^۴

$$AME = \max(|Q_i - \hat{Q}_i|) \quad (7)$$

۵ - اختلاف حداکثری^۵

3- Dimensionless metrics
4- Absolute Maximum Error
5- Peak Difference

1- Metrics for calculating absolute error
2- Metrics for calculating relative error

روزهایی با مقادیر متوسط دبی بالا، مقادیر انحراف استاندارد آنها نیز بالا می‌باشد، و این یک ویژگی است که به خوبی شناخته شده است (۲۵). به طوریکه می‌توان گفت، علت این تغییر یا نوسانات زیاد انحراف استاندارد دبی در این روزها، به دلیل وجود ریزش بارش‌های باران و برف در منطقه مطالعاتی می‌باشد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ۱۲۰ روز اول (ژانویه تا آوریل یا معادل آن اوایل دی تا اردیبهشت‌ماه) و ۶۰ روز آخر (نوامبر و دسامبر یا معادل آن اوایل آبان تا آذرماه)، این تغییر واریانس‌ها قابل مشاهده می‌باشد که به طور متعاقب ضریب تغییرات بالای دبی را در این روزها در پی دارد. این رفتار برای سایر ایستگاه‌ها مشابه بود.

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، برای مدل‌سازی داده‌های دبی روزانه داده‌ها استاندارد شدند. شکل‌های ۳- و ۴- (الف) و (ب) به ترتیب هیستوگرام و نمودار $Q-Q$ (چندک-چندک) داده‌های دبی روزانه ایستگاه قبقلو، به عنوان نمونه، قبل و بعد از عمل استاندارد کردن را نشان می‌دهد. همانطور که شکل‌ها نشان می‌دهند داده‌های اصلی از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. اما، داده‌ها پس از لگاریتم‌گیری و استاندارد کردن توسط سری فوریه به فرم زنگوله‌ای تبدیل شده و تا حد قابل قبولی نرمال شده‌اند.

نتایج مدل‌سازی خطی جریان روزانه رودخانه‌ها

در این تحقیق برای مدل‌سازی داده‌های دبی روزانه از روش مدل‌های ARMA غیر فصلی شده^۷ استفاده شد. به منظور ساختن یک مدل ARMA برای سری زمانی مورد نظر، ابتدا تابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF)^۸ داده‌ها بررسی گردید و مدل برتر شناسایی شد. در این مرحله با توجه به مشخصات آماری سری زمانی و مقایسه با خواص مدل‌های مختلف، نوع و فرم مدل تعیین گردید (۱۹ و ۸). پس از آن پارامترهای مدل برآورد، و در انتها، کفایت مدل انتخاب شده بررسی شد. شکل ۵- (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر ACF و PACF سری زمانی داده‌های دبی روزانه استاندارد شده ایستگاه قبقلو، به عنوان نمونه، را تا تاخیر زمانی^۹ ۳۵ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تابع ACF به صورت نمایی تنزل می‌نماید و تابع PACF دارای روند نزولی می‌باشد و بعد تاخیر ۵، مقادیر PACF درون باند اطمینان قرار می‌گیرند. بنابراین، با توجه به منابع علمی (۸، ۱۹) حدس اولیه به این صورت است که ضریب مدل AR، ۵ حداکثر می‌باشد. پس از بررسی حالت‌های ممکن بر مدل ARMA، ضرایب و سایر عوامل مدل برآورد گردید. سپس مدل مناسب برآزش یافته بر اساس کمترین معیار اطلاعات آکایکه^۱ (AIC) و آزمودن

$$PDIFF = \max(Q_i) - \max(\hat{Q}_i) \quad (۸)$$

- متوسط خطای مطلق^۱

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |Q_i - \hat{Q}_i| \quad (۹)$$

- ریشه میانگین مربعات خطا^۲

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n}} \quad (۱۰)$$

- خطای مطلق نسبی^۳

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i|}{\sum_{i=1}^n |Q_i - \bar{Q}_i|} \quad (۱۱)$$

- ضریب تعیین^۴

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(\hat{Q}_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q})^2}} \right] \quad (۱۲)$$

- شاخص توافق^۵

$$IoAd = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Q}_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2} \quad (۱۳)$$

در معادلات بالا، Q_i سری زمانی مشاهده شده، \hat{Q}_i سری زمانی پیش‌بینی شده، \bar{Q} متوسط سری زمانی مشاهده شده و \bar{Q} متوسط سری زمانی پیش‌بینی شده هستند (۱۶، ۱۷).

نتایج و بحث

نتایج تحلیل اولیه جریان روزانه رودخانه‌ها

در این بخش قبل از بیان نتایج مدل‌سازی مدل‌ها، به بیان مختصری از ویژگی‌های داده‌های میانگین دبی روزانه مورد استفاده پرداخته می‌شود. جدول ۲ مشخصات آماری سری زمانی دبی روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه و شکل ۲ نیز، به عنوان نمونه، نمودار میانگین و انحراف استاندارد سری‌های زمانی دبی روزانه ۱۵ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۷) ایستگاه قبقلو را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲،

6- Quantile-Quantile plot

7- Deseasonalized ARMA model

8- Partial Auto Correlation Function

9- Lag time

1- Mean Absolute Error

2- Root Mean Square Error

3- Relative Absolute Error

4- Coefficient of Determination

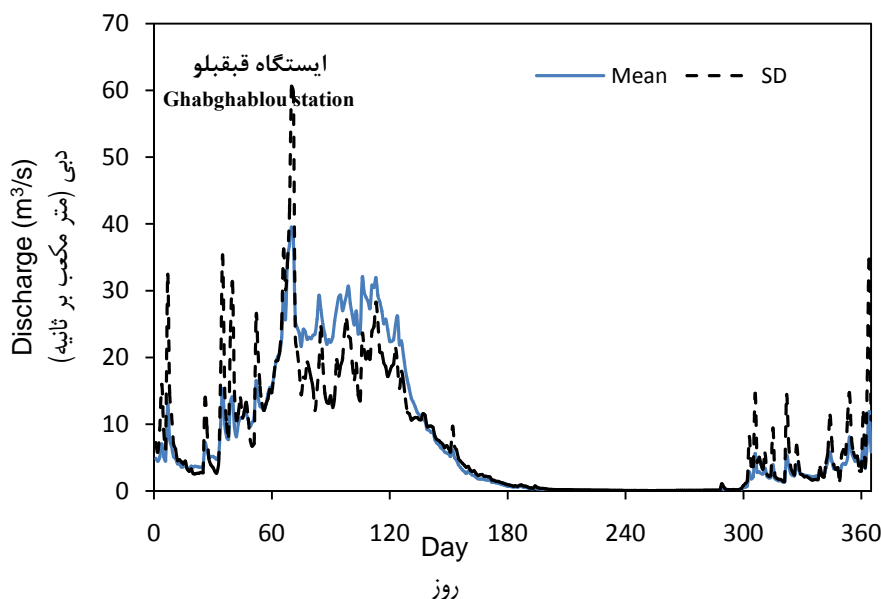
5- Index of Agreement

باقیمانده‌های مدل، به منظور بررسی کفایت باقیمانده‌های مدل برتر، انتخاب شد. به عنوان نمونه برای ایستگاه آبسنجی قیقلو مطابق جدول ۳، مدل ARMA(5,1) از بین مدل‌های حدس اولیه به عنوان مدل مناسب تشخیص داده شد. این فرآیند برای سایر ایستگاه‌ها نیز تکرار شد.

جدول ۲- مشخصات آماری سری زمانی دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

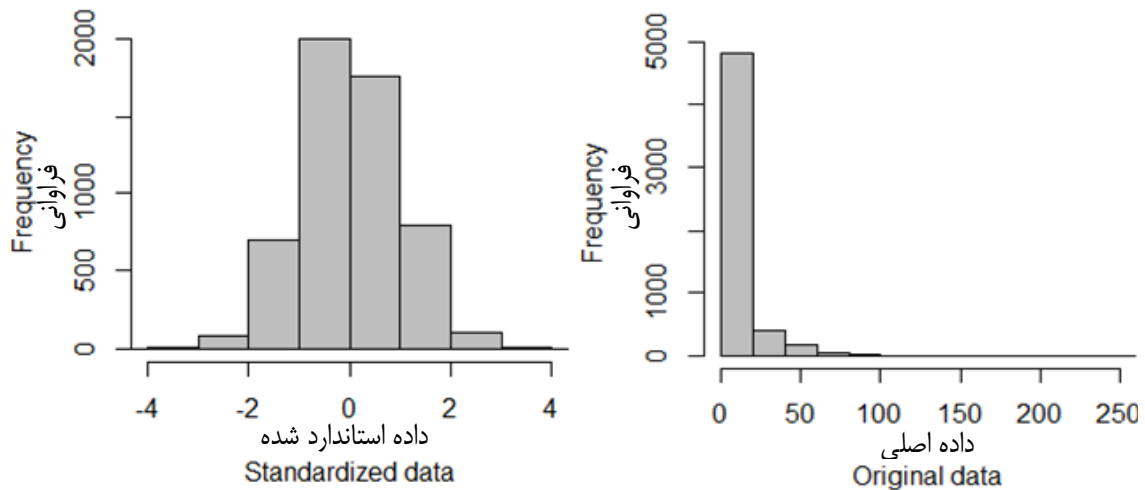
Table 2- Statistical characteristics of daily streamflow time series of the case study stations

ایستگاه Station	میانگین Mean (m ³ /s)	انحراف استاندارد Standard deviation (m ³ /s)	ضریب چولگی Skewness coefficient	ضریب کشیدگی Kurtosis coefficient	ضریب خودهمبستگی مرتبه (۱) Lag one autocorrelation coefficient
قیقلو Ghabghablou	7.58	15.01	4.29	33.51	0.909
دره پنه‌دان Darepanbedan	7.77	14.05	3.80	22.60	0.917
پل قشلاق Pol Gheslagh	10.1	21.95	5.15	41.21	0.932
پل آنیان Pol Anian	11.47	24.26	4.51	28.53	0.929
سنه Sonnateh	7.76	16.12	4.61	33.08	0.923
صفاخانه Safakhaneh	6.23	13.34	4.93	37.05	0.954



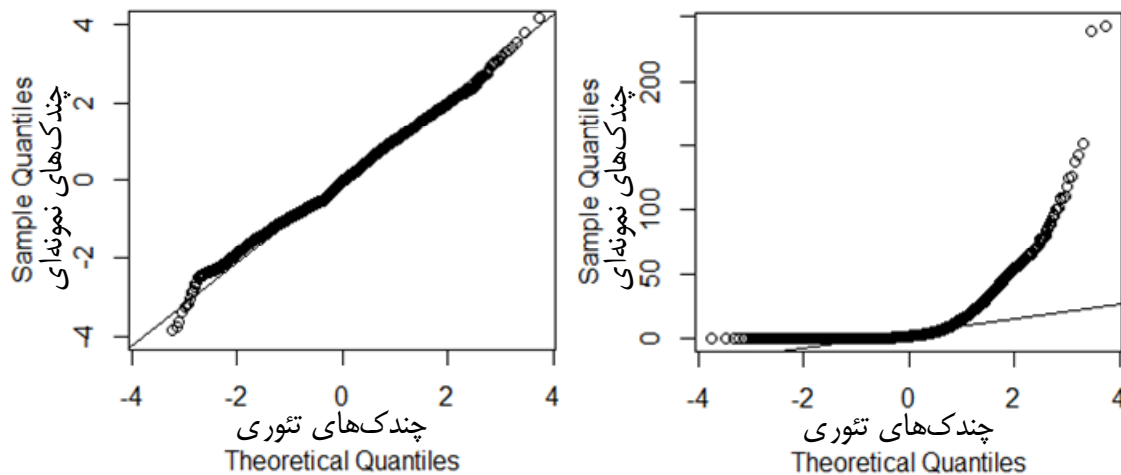
شکل ۲- تغییرات میانگین و انحراف استاندارد سری زمانی دبی روزانه ایستگاه قیقلو برای دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۷) (اولین روز متعلق به اول ژانویه و آخرین روز متعلق به آخر دسامبر می‌باشد)

Figure 2- Variation in daily mean and standard deviation of streamflow processes at Ghabghablou station for a period of 15 years (1997-2011) (The first day is corresponding to January, 1 and the latest day is corresponding to December, 31)



شکل ۳- هیستوگرام داده‌های دبی روزانه ایستگاه آبسنجی قیقلو (الف) قبل از استاندارد کردن (شکل سمت راست) و (ب) بعد از استاندارد کردن (شکل سمت چپ) برای دوره ۱۹۹۷-۲۰۱۱

Figure 3- Histogram of Ghabghablou hydro gauge station data (a) before standardization (right figure) and (b) after standardization (left figure) for 1997-2011 period



شکل ۴- نمودار Q-Q داده‌های دبی روزانه ایستگاه آبسنجی قیقلو (الف) قبل از استاندارد کردن (شکل سمت راست) و (ب) بعد از استاندارد کردن (شکل سمت چپ) برای دوره ۱۹۹۷-۲۰۱۱

Figure 4- Q-Q plot of daily streamflow data of Ghabghablou hydro gauge station (a) before standardization (right figure) and (b) after standardization (left figure) for 1997-2011 period

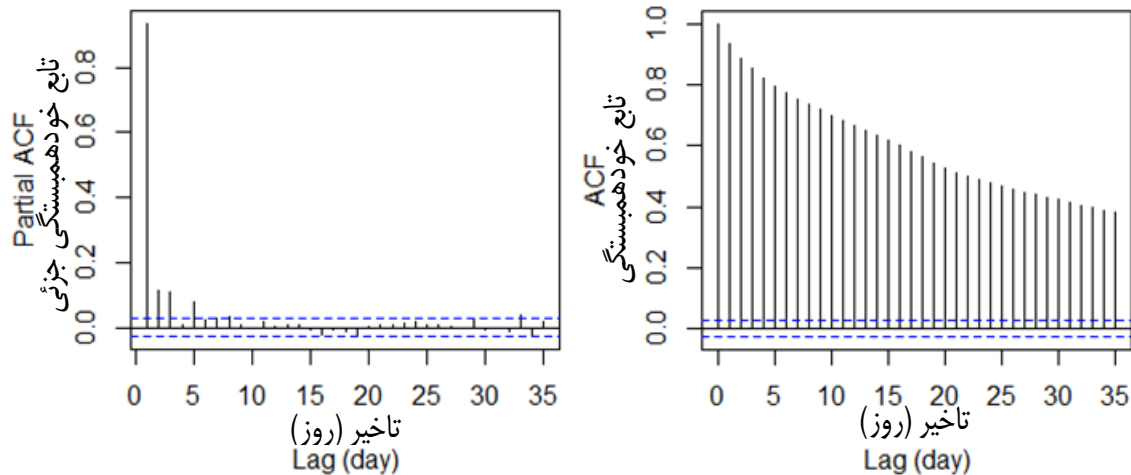
value آزمون Ljung-Box و تابع خودهمبستگی باقیمانده‌ها مدل $ARMA(5,1)$ برای سری زمانی دبی روزانه ایستگاه قیقلو به منظور بیان کفایت مدل انتخابی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ مقادیر ACF باقیمانده‌ها در محدوده مجاز $(\pm 1.96/\sqrt{n})$ قرار گرفته است، لذا باقیمانده‌ها ایستا بودند و هیچ‌گونه روندی را از خود نشان ندادند. همچنین مقادیر p -value باقیمانده‌ها بزرگتر از سطح معنی‌داری ۵٪ بود، در نتیجه فرض صفر آزمون Ljung-Box قبول شد و سری باقیمانده‌ها تصادفی در نظر گرفته شدند. جدول ۵، نتایج

در این مطالعه مدل برتر از بین مدل‌های حدس اولیه، مدلی انتخاب می‌شد که علاوه بر کفایت باقیمانده‌های مدل برازش یافته با استفاده از آزمون بررسی کفایت، معنی‌دار بودن و رعایت امساک^۱ در پارامترهای مدل، آماره‌های AIC، RMSE و SSR^2 مدل برازش یافته نیز نسبت به سایر مدل‌ها کمتر باشد. جدول ۴ مشخصات مدل خطی $ARMA(5,1)$ برازش داده شده به سری دبی روزانه ایستگاه قیقلو را نشان می‌دهد. شکل ۶- (الف) و (ب) نیز به ترتیب، مقادیر p -

- 1- Parsimony
- 2- Sum of Squared Residuals

بالتر می‌باشد. دلیل آن شاید به خاطر ذوب برف و زهکش شدن جریان بالادست منطقه و زمان تاخیر طولانی در تخلیه شدن آن در پائین دست زیرحوضه‌ها می‌تواند باشد.

مدل‌های خطی برازش یافته به داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های حوضه بالادست سد زرینه‌رود را نشان می‌دهد. بر طبق جدول، ایستگاه‌هایی که در پائین دست هر زیرحوضه مربوط به خود قرار دارند دارای حافظه طولانی‌تری هستند و در نتیجه، مرتبه‌های AR آن‌ها



شکل ۵- (الف) ACF (شکل سمت راست) و (ب) PACF (شکل سمت چپ) سری زمانی دبی روزانه استاندارد شده برای ایستگاه آبسنجی قبقبلو و برای دوره آماری ۱۹۹۷-۲۰۱۱

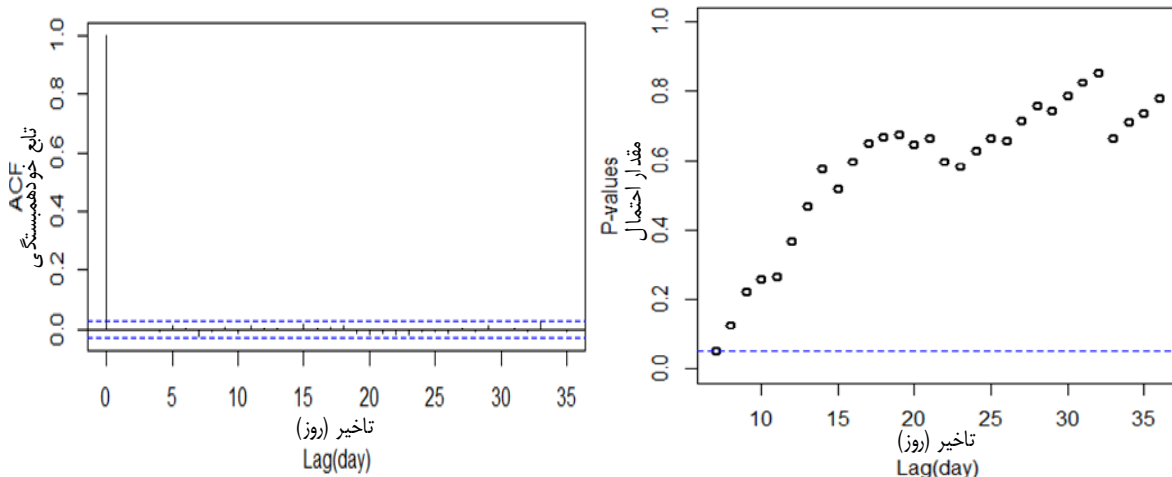
Figure 5- (a) ACF (right figure) and (b) PACF (left figure) standardized daily streamflow time series for Ghabghablou hydro gauge station and for 1997-2011 time period

جدول ۳- نتایج مدل‌های مختلف ARMA برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه استاندارد شده ایستگاه قبقبلو برای دوره ۱۹۹۷-۲۰۰۹
Table 3- Results of different models of fitted ARMA to standardized daily streamflow time series of Ghabghablou station for 1997-2009 period

ARMA(p,q) (p,q) آرما	Model(5,0) (5,0) مدل	Model(5,1) (5,1) مدل	Model(5,2) (5,2) مدل	Model(5,3) (5,3) مدل
AIC معیار آکائیکه	3013.03	3006.95	3007.93	3007.64
SSR مجموع مربعات باقیمانده‌ها	522.59	521.70	521.60	521.33
RMSE ریشه میانگین مربعات خطا	0.3318	0.3315	0.3315	0.3315

جدول ۴- مشخصات مدل ARMA(5,1) برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه قبقبلو
Table 4- Properties of fitted ARMA (5,1) model to daily streamflow time series of Ghabghablou station

ضرایب Coefficients	مقادیر تخمینی Estimated values	خطای استاندارد Standard error	آماره آزمون z Test statistic z	مقدار احتمال p-value
ϕ_1	1.458	0.114	12.78	0.000
ϕ_2	-0.539	0.096	-5.61	0.000
ϕ_3	0.136	0.026	5.12	0.000
ϕ_4	-0.130	0.027	-4.82	0.000
ϕ_5	0.060	0.016	3.64	0.000
θ_1	-0.636	0.114	-5.58	0.000



شکل ۶- (الف) p -value آزمون Ljung-Box (شکل سمت راست) و (ب) ACF باقیمانده‌های مدل $ARMA(5,1)$ (شکل سمت چپ) سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه قبقبلو

Figure 6- (a) p -value of Ljung-Box test (right figure) and (b) ACF of residuals of $ARMA(5,1)$ model (left figure) for daily streamflow time series of Ghabghablou station

جدول ۵- نتایج مدل‌های $ARMA$ برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه منطقه مطالعاتی
Table 5- Results of fitted $ARMA$ models to daily streamflow time series of study area

ایستگاه Station	نوع مدل Model type	معیار آکائیکه AIC
قبقبلو Ghabghablou	$ARMA(5,1)$	3006.95
دره پنبه‌دان Darepanbedan	$ARMA(27,0)$	1765.89
پل قشلاق Pol Gheshlagh	$ARMA(8,1)$	1214.04
پل آنیان Pol Anian	$ARMA(13,2)$	-83.72
سنته Sonnateh	$ARMA(16,0)$	1196.32
صفاخانه Safakhaneh	$ARMA(6,2)$	1629.39

برازش داده شده به دبی روزانه را نشان می‌دهد. مقدار آستانه تخمین زده شده به صورت استاندارد شده می‌باشد که با تبدیل معکوس کردن (مطابق عکس آنچه که در بخش ۳ بیان شده است) معادل با ۰/۲۰ مترمکعب بر ثانیه بدست آمد. بر طبق مطالعات Jāras و Gishani (۹) این مقدار آستانه را می‌توان به عنوان سطح بحرانی^۱ حوضه آبریز از مقدار ذخیره آب در خاک^۲ تفسیر نمود. مطالعات آن‌ها بر روی داده‌های جریان رودخانه Oykel واقع در شمال اسکاتلند نشان داد که در یک مدل ۲ رژیم، مقدار آستانه برابر ۴/۴۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. آن‌ها در مطالعاتشان بیان کردند که چنانچه مقدار کل آب

نتایج مدل‌سازی غیرخطی جریان روزانه رودخانه‌ها

در این بخش به ارائه نتایج مدل‌سازی داده‌های دبی روزانه منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل غیرخطی SETAR ۲ و ۳ رژیم، مطابق آنچه در بخش مواد و روش‌ها ارائه شده، پرداخته می‌شود. برای برازش دادن مدل SETAR ۲ رژیم به داده‌ها، ابتدا با استفاده از تابع لگاریتم-درست‌نمایی مقادیر d و T برآورد شدند. سپس، بر اساس روش حداقل کردن AIC مرتبه‌های مدل AR رژیم‌های پائین و بالا برآورد شدند. سپس، با آزمون باقیمانده‌های مدل بر اساس آزمون Ljung-Box، مدلی که کفایت لازم را داشت به عنوان مدل مناسب تشخیص داده شد. جدول ۶ به عنوان نمونه برای ایستگاه آبسنجی قبقبلو، مشخصات مدل ۲ رژیم SETAR(2;4,5) به عنوان مدل مناسب

1- Critical level

2- Water storage in the soil

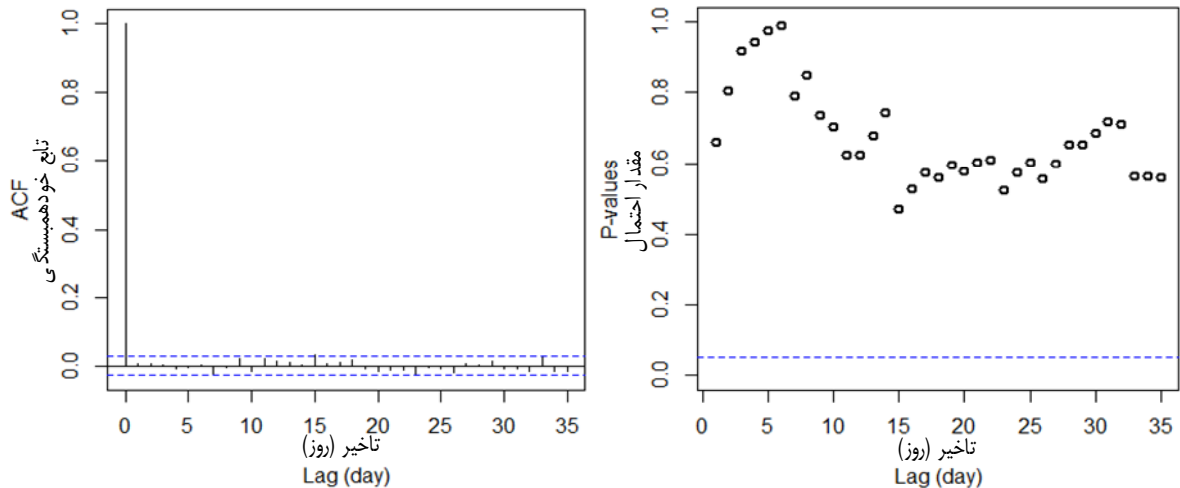
باقیمانده‌های ایستا بودند. مقادیر p -value باقیمانده‌ها نیز بزرگتر از مقدار بحرانی در سطح معنی‌داری ۵٪ بودند، بنابراین سری زمانی باقیمانده‌های مدل مستقل از هم و تصادفی در نظر گرفته شدند. مراحل ذکر شده در این بخش برای مدل غیرخطی SETAR(3) رژیمی نیز تکرار شد. جدول ۷، به عنوان نمونه برای ایستگاه آبسنجی قبقلو، مشخصات مدل ۳ رژیمی SETAR(3;5,1,3) به عنوان مدل مناسب برازش داده شده به دی روزانه را نشان می‌دهد. شکل ۸- (الف) و (ب) نیز به ترتیب، مقادیر p -value آزمون Ljung-Box و تابع خودهمبستگی باقیمانده‌ها مدل ۳ رژیمی SETAR(3;5,1,3) برای سری زمانی دی روزانه ایستگاه قبقلو به منظور بیان کفایت مدل انتخابی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، مقادیر ACF باقیمانده‌ها در محدوده باند مجاز قرار دارند ($\pm 1.96/\sqrt{n}$)، لذا سری باقیمانده‌های ایستا هستند. جداول ۸ و ۹ به ترتیب، نتایج مدل‌های غیرخطی SETAR ۲ و ۳ رژیمی برازش یافته به داده‌های دی روزانه ایستگاه‌های حوضه بالادست سد زرنه رود را نشان می‌دهند.

موجود شامل آب ناشی از ذوب برف و یخ، بارش و تگرگ از این مقدار آستانه تجاوز کند، نتیجه آن راه افتادن جریان‌های سطحی خواهد بود که می‌تواند به تدریج تبدیل به سیلاب شود، و چنانچه از این مقدار آستانه کمتر باشد به عنوان ذخیره آب در خاک در حوضه رودخانه Oykel در نظر گرفته می‌شود. مطابق جدول، رژیم بالایی در مقایسه با رژیم پائینی دارای مرتبه AR بیشتر می‌باشد. بر اساس تفسیر مطالعات Gishani و Järas (۹)، مفهوم آن این است که جریان فعلی رودخانه در رژیم بالا (جریان‌های بزرگتر از ۴/۴۷ مترمکعب بر ثانیه) در مقایسه با رژیم پائین، وابستگی بیشتری به مقدار جریان در روزهای قبلی دارد. بر اساس تفسیر آن‌ها، دلیل آن شاید می‌تواند این باشد که هنگام وقوع بارش با مدت دوام طولانی، جریان آب در رژیم بالایی قرار می‌گیرد و این جریان به همان سرعتی که بارش به میزان کمتر رخ می‌دهد، ناپدید نمی‌شود. شکل ۷- (الف) و (ب) نیز به ترتیب، مقادیر p -value آزمون Ljung-Box و تابع خودهمبستگی باقیمانده‌ها مدل ۲ رژیمی SETAR(2;4,5) برای سری زمانی دی روزانه ایستگاه قبقلو به منظور بیان کفایت مدل انتخابی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، مقادیر ACF باقیمانده‌ها در محدوده باند مجاز قرار گرفته ($\pm 1.96/\sqrt{n}$)، لذا سری

جدول ۶- مشخصات مدل ۲ رژیمی SETAR(2;4,5) برازش یافته به سری‌های زمانی دی روزانه ایستگاه قبقلو

Table 6- Properties of fitted SETAR(2;4,5) two-regime model to daily streamflow time series of Ghabghablou station

مدل (Model): SETAR(2;4,5)، پارامتر تاخیر (Lag time parameter): $d=1$								
آستانه برآورد شده (Estimated threshold): -1.132 ($0.20 \text{ m}^3/\text{s}$)								
AIC = 2308; RMSE (مربع خطا) = 0.317; SSR (مجموع مربعات باقیمانده‌ها) = 475.54 (معیار آکائیکه)								
رژیم بالایی Upper regime					رژیم پائینی Lower regime			
ضرایب Coefficients	مقادیر تخمینی Estimated values	خطای استاندارد Standard error	آماره آزمون t Test statistic t	مقدار احتمال p-value	مقادیر تخمینی Estimated values	خطای استاندارد Standard error	آماره آزمون t Test statistic t	مقدار احتمال p-value
α_0	-0.0013	0.0047	-0.285	0.775	-0.452	0.0909	-4.972	0.000
α_1	0.9631	0.0146	65.77	0.000	0.2223	0.0516	4.304	0.000
α_2	-0.0934	0.018	-5.188	0.000	0.0533	0.0773	0.689	0.490
α_3	0.0778	0.0175	4.438	0.000	0.5401	0.0842	6.417	0.000
α_4	-0.031	0.0178	-1.741	0.081	-0.1258	0.0598	-2.102	0.036
α_5	0.0512	0.0134	3.832	0.000	--	--	--	--
تعداد مشاهدات ۴۲۶۶ Number of observations is 4266					تعداد مشاهدات ۴۷۴ Number of observations is 474			



شکل ۷- (الف) p -value آزمون Ljung-Box (شکل سمت راست) و (ب) ACF باقیمانده‌های مدل ۲ رژیم SETAR(2;4,5) (شکل سمت چپ) سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه قیقلو

Figure 7- (a) p -value of Ljung-Box test (right figure) and (b) ACF of residuals of SETAR (2;4,5) two-regime model (left figure) for daily streamflow time series of Ghabghablou station

جدول ۷- مشخصات مدل ۳ رژیم SETAR(3;5,1,3) برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه قیقلو

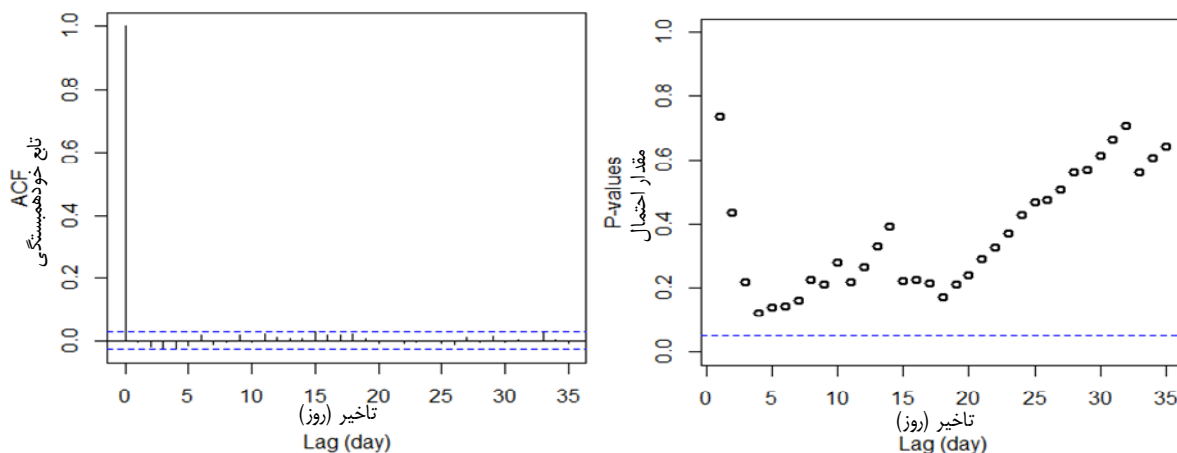
Table 6- Properties of fitted SETAR(3;5,1,3) three-regime model to daily streamflow time series of Ghabghablou station

$d=1$: (Lag time parameters) پارامتر تاخیر (Model): SETAR(3;5,1,3)

آستانه‌های برآورد شده (Estimated thresholds): -0.8761 و 0.8581 ($0.02 \text{ m}^3/\text{s}$)

501.02 = (مجموع مربعات باقیمانده‌ها) SSR; 0.325 = (ریشه میانگین مربعات خطا) RMSE; -10640 = (معیار آکائیکه) AIC

ضرایب Coefficients	رژیم بالایی Upper regime			رژیم میانی Middle regime			رژیم پائینی Lower regime		
	مقادیر تخمینی Estimated values	آماره آزمون t Test statistic t	مقدار احتمال p-value	مقادیر تخمینی Estimated values	آماره آزمون t Test statistic t	مقدار احتمال p-value	مقادیر تخمینی Estimated values	آماره آزمون t Test statistic t	مقدار احتمال p-value
α_0	0.1983	6.154	0.000	0.0019	0.319	0.749	-0.1465	-3.741	0.000
α_1	0.6258	22.802	0.000	0.9688	89.92	0.000	0.7458	26.704	0.000
α_2	0.1121	3.084	0.000	--	--	--	-0.2117	-6.484	0.000
α_3	0.0775	3.6741	0.000	--	--	--	0.4783	9.748	0.000
α_4	--	--	--	--	--	--	-0.3328	-6.187	0.000
α_5	--	--	--	--	--	--	0.1740	4.720	0.000
	تعداد مشاهدات ۱۰۷۰ Number of observations is 1070			تعداد مشاهدات ۲۸۶۶ Number of observation is 2866			تعداد مشاهدات ۸۰۴ Number of observation is 804		



شکل ۸- (الف) p -value آزمون Ljung-Box (شکل سمت راست) و (ب) ACF باقیمانده‌های مدل ۳ رژیمی SETAR(3;5,1,3) (شکل سمت چپ) سری‌های زمانی دبی روزانه ایستگاه قیقلو

Figure 8- (a) p -value of Ljung-Box test (right figure) and (b) ACF of residuals of SETAR(3;5,1,3) three-regime model (left figure) for daily streamflow time series of Ghabghablou station

جدول ۸- نتایج مدل‌های ۲ رژیمی SETAR برآزش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه منطقه مطالعاتی

Table 8- Results of fitted SETAR two-regime models to daily streamflow time series of study area

ایستگاه Station	نوع مدل Model type	زمان تاخیر d	مقدار آستانه τ	معیار آکائیکه AIC
قیقلو Ghabghablou	SETAR(2;4,5)	1	(0.20 m ³ /s) -1.132	2308
دره پنه‌دان Darepanbedan	SETAR(2;4,10)	7	(0.40 m ³ /s) -0.2487	1358
پل قشلاق Pol Gheshlagh	SETAR(2;4,8)	1	(1.7 m ³ /s) -0.6929	928
پل آنیان Pol Anian	SETAR(2;2,10)	1	(10 m ³ /s) -1.211	-287.2
سنته Sonnateh	SETAR(2;4,15)	3	(0.01 m ³ /s) -0.9527	999
صفاخانه Safakhaneh	SETAR(2;4,8)	6	(2.5 m ³ /s) -0.276	1166

جدول ۹- نتایج مدل‌های ۳ رژیمی SETAR برآزش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه منطقه مطالعاتی

Table 9- Results of fitted SETAR three-regime models to daily streamflow time series of study area

ایستگاه Station	نوع مدل Model type	زمان تاخیر d	مقدار آستانه ۱ τ_1	مقدار آستانه ۲ τ_2	معیار آکائیکه AIC
قیقلو Ghabghablou	SETAR(3;5,1,3)	1	(1.45 m ³ /s) -0.8761	(0.02 m ³ /s) 0.8581	-10640
دره پنه‌دان Darepanbedan	SETAR(3;2,1,8)	3	(1.1 m ³ /s) -0.9301	(0.90 m ³ /s) -0.2848	-11779
پل قشلاق Pol Gheshlagh	SETAR(3;2,3,8)	7	(1.7 m ³ /s) -0.6733	(0.55 m ³ /s) -0.4921	-12396
پل آنیان Pol Anian	SETAR(3;4,1,8)	1	(29 m ³ /s) -0.2157	(7 m ³ /s) 0.1819	-13641
سنته Sonnateh	SETAR(3;3,3,15)	1	(1.9 m ³ /s) -2.0806	(0.01 m ³ /s) -0.9629	-12436
صفاخانه Safakhaneh	SETAR(3;2,3,4)	2	(1.9 m ³ /s) -0.9979	(1.1 m ³ /s) 0.5971	-11907

نقاطی که آبدهی‌ها صعود و نزول پی در پی دارند و رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند، پیش‌بینی مناسبی انجام نشده است. در مطالعات دیگری که برای مدل‌سازی دبی روزانه رودخانه با استفاده از مدل خطی AR توسط Kisi (۱۱) و نیز مقایسه روش‌های خطی ARMA و غیرخطی بی‌لینیر توسط زمانی و همکاران (۲۸) انجام شد، نتایج تحقیق مورد نظر را تأیید می‌کنند.

با توجه به جداول ۵، ۸ و ۹ که به ترتیب، مناسب‌ترین مدل‌های برازش یافته خطی و غیرخطی ۲ و ۳ رژیمی را نشان می‌دهند، عملکرد مدل‌ها بر اساس همه معیارهای ارزیابی بیان شده برای کل طول دوره سری‌های زمانی دبی روزانه (۱۵ سال)، در جدول ۱۱ آورده شده است. مطابق جدول، مقادیری که به صورت پررنگ و ایتالیک نشان داده شده‌اند، عملکرد بهتر مدل را در مقایسه با مدل‌های دیگر نشان می‌دهد. عملکرد معیارهای ارزیابی AME و PDIFF برای این ایستگاه‌ها در مدل‌های غیرخطی بهتر از مدل خطی ARMA می‌باشند. به عبارت دیگر، مدل‌های غیرخطی، میزان اختلاف دبی حداکثر مشاهداتی و برآورد شده کمتری را نشان می‌دهند و دلالت بر این دارد که مدل‌های غیرخطی SETAR برای تخمین دبی حداکثری کارآمدتر می‌باشند. بر اساس معیار SSR نیز، مدل‌های غیرخطی مجموع مربعات باقیمانده‌های کمتری را نسبت به مدل خطی نشان دادند و میزان بهبود نسبی^۲، $RI = (SSR_{ARMA} - SSR_{SETAR}) / SSR_{ARMA}$ ، در مدل‌های SETAR ۲ و ۳ رژیمی نسبت به مدل خطی ARMA مثبت می‌باشد. به طوری که، این میزان در تمام ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه قبیلوب) رای مدل SETAR(3) این میزان بیشتر از SETAR(2) می‌باشد. در مورد ایستگاه قبیلوب، میزان بهبود نسبی در مدل SETAR ۲ و ۳ رژیمی بترتیب ۹ و ۴ درصد می‌باشد. اما در مورد سایر معیارهای ارزیابی مدل‌ها، تفاوت قابل توجهی در مقادیر مدل‌های مختلف قابل مشاهده نیست. هرچند، که این معیارها برتری نسبی مدل‌های غیرخطی را نسبت به مدل خطی نشان می‌دهند. بنابراین، با توجه به نتایج ذکر شده در این جدول، می‌توان مدل‌های غیرخطی SETAR ۲ و ۳ رژیمی را مناسب‌تر از مدل خطی ARMA در مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه‌های حوضه بالادست سد زربینه رود دانست و عملکرد بهتری را نشان دادند.

نتیجه‌گیری کلی

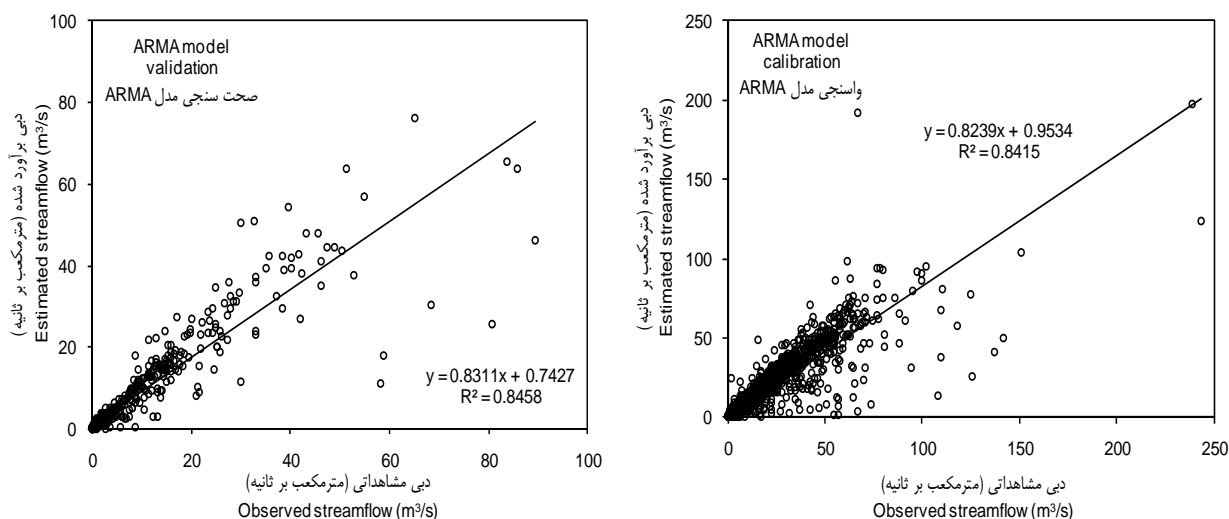
در تحقیق حاضر تلاش شد که دبی روزانه ۶ ایستگاه آب‌سنجی واقع بر رودخانه‌های حوضه بالادست سد زربینه رود واقع شده در جنوب حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی مدل‌سازی شوند و عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند.

نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های خطی و غیرخطی

در این بخش، نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های سری زمانی (با بکارگیری معیارهایی که در بخش ۴.۳ بیان شده‌اند) ارائه می‌شوند. همانطور که قبلاً اشاره شد، پس از واسنجی انتخاب مدل مناسب با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۱۳ سال، صحت‌سنجی مدل برای جریان رودخانه‌ها در طی سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ انجام شد. جدول ۱۰ نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌های برازش یافته به سری زمانی دبی روزانه رودخانه‌های منطقه مطالعاتی مربوط به بخش واسنجی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، برای هر دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی، مدل‌های غیرخطی SETAR نسبت به مدل خطی ARMA بهتر توانسته‌اند دبی روزانه جریان رودخانه‌های منطقه مطالعاتی را مدل‌سازی کنند. شکل‌های ۹-، ۱۰- و ۱۱- (الف) و (ب) نیز، به عنوان نمونه برای ایستگاه قبیلوب، نمودار پراکندگی مقادیر دبی تخمین زده شده در برابر دبی مشاهداتی را به ترتیب برای مدل‌های SETAR، ARMA و ۲ و ۳ رژیمی برای هر دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. شکل ۱۲ نیز، نمودار جریان روزانه مشاهداتی و برآورد شده برای دوره صحت‌سنجی را، به عنوان نمونه برای ایستگاه آب‌سنجی قبیلوب، برای مدل‌های SETAR، ARMA و ۲ و ۳ رژیمی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، نمودار پراکندگی نشان می‌دهند که همه مدل‌ها در تخمین مقادیر دبی بالا ضعیف هستند، اما عملکرد آنها در تخمین دبی‌هایی با مقادیر کم برای هر ۳ مدل خوب می‌باشد. به طور کلی، نتایج نشان دادند که هر دو مدل خطی و غیرخطی در بیشتر ایستگاه‌ها، مقادیر بالای دبی را کمتر از مقدار مشاهداتی تخمین می‌زنند و این را اصطلاحاً "تخمین کم" می‌نامند. با این حال باید اذعان نمود که در نقاطی که آبدهی رودخانه با صعود و نزول‌های متوالی همراه بوده مدل خطی در مقایسه با مدل‌های غیرخطی نتوانسته است دبی جریان را به طور رضایت‌بخش تخمین بزند. شاید علت این امر رفتار غیرخطی باشد که در مدل لحاظ نشده است. اما، مدل‌های غیرخطی SETAR نسبت به مدل خطی مقادیر دبی بالا را بهتر تخمین می‌زنند و مدل‌های غیرخطی در بهترین حالت خود به خوبی توانسته دبی جریان روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه را شبیه‌سازی کنند. مطالعات بنی‌حییب و همکاران (۵) نتایج این بخش از تحقیق را تأیید می‌کند. آن‌ها برای صحت‌سنجی پیش‌بینی دو سال آینده جریان روزانه ورودی به مخزن سد دز از مدل ARMA استفاده کردند و توانایی این مدل را برای مدل‌سازی جریان ورودی تحلیل کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که مدل منتخب خطی توانسته است روند آبدهی را به صورت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. اما در

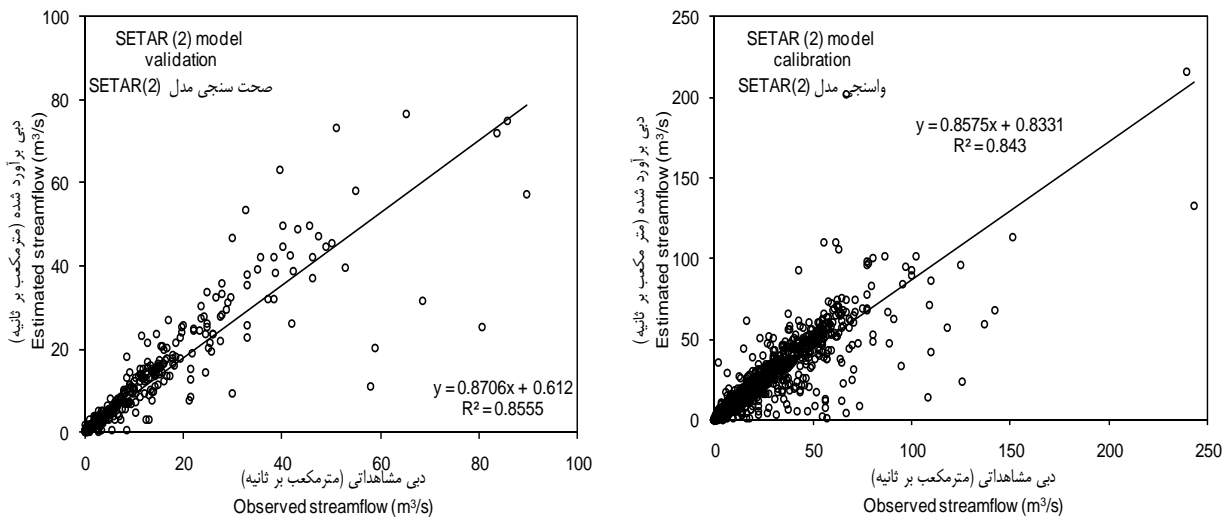
جدول ۱۰- معیارهای ارزیابی مدل‌های برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه منطقه مطالعاتی برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی
Table 10- Evaluation criteria of fitted models to daily streamflow time series of the study area for calibration and validation periods

ایستگاه Station	مدل Model	واسنجی Calibration		صحت‌سنجی Validation	
		RMSE (m ³ /s)	R ²	RMSE (m ³ /s)	R ²
قبیلو Ghabghablou	ARMA	6.153	0.841	4.743	0.845
	SETAR(2)	6.115	0.843	4.586	0.855
	SETAR(3)	6.172	0.84	4.727	0.848
دره پنبه‌دان Darepanbedan	ARMA	5.415	0.86	4.422	0.834
	SETAR(2)	5.42	0.861	4.217	0.849
	SETAR(3)	5.406	0.861	4.55	0.826
پل قشلاق PolGheshlagh	ARMA	7.785	0.881	5.931	0.89
	SETAR(2)	7.851	0.879	5.93	0.89
	SETAR(3)	7.865	0.878	5.73	0.898
پل آنیان Pol Anian	ARMA	8.686	0.875	8.01	0.871
	SETAR(2)	8.662	0.876	7.946	0.872
	SETAR(3)	8.636	0.877	8.096	0.868
سننه Sonnateh	ARMA	6.462	0.855	2.127	0.941
	SETAR(2)	6.486	0.855	2.071	0.943
	SETAR(3)	6.44	0.856	2.121	0.94
صفاخانه Safakhaneh	ARMA	3.974	0.917	3.096	0.912
	SETAR(2)	3.987	0.916	3.068	0.913
	SETAR(3)	3.971	0.917	3.093	0.91



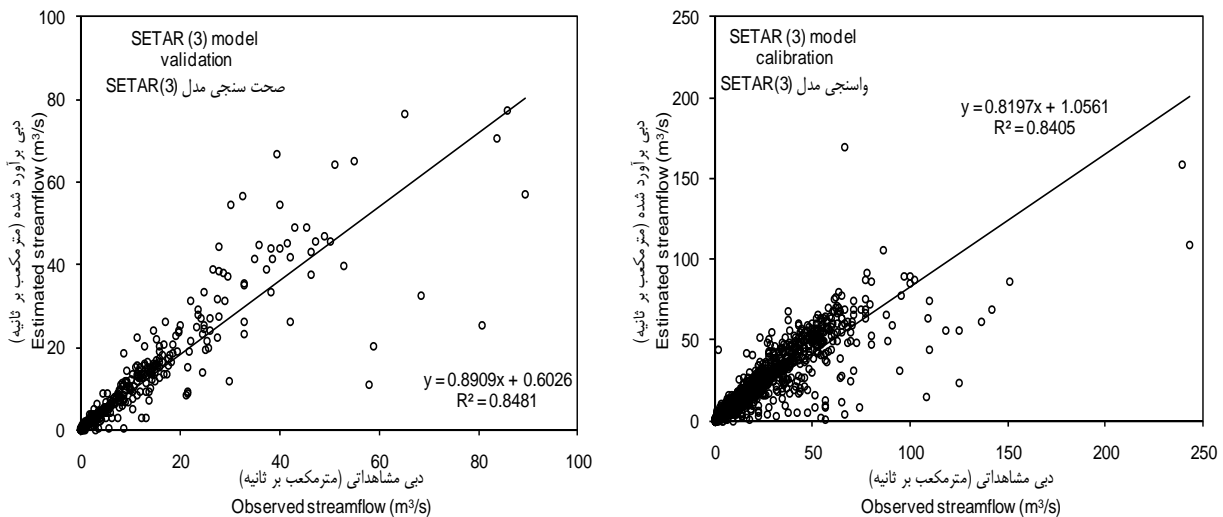
شکل ۹- نمودار پراکندگی دبی روزانه مشاهده شده و برآورد شده مدل ARMA الف) برای دوره واسنجی (شکل سمت راست) و ب) برای دوره صحت‌سنجی (شکل سمت چپ) ایستگاه قبیلو

Figure 9- Scatter plot of observed against estimated streamflow for ARMA model (a) for calibration period (right figure) and (b) for validation period (left figure) for Ghabghablou station



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی دبی روزانه مشاهده شده و برآورد شده مدل SETAR ۲ رژیمی الف) برای دوره واسنجی (شکل سمت راست) و ب) برای دوره صحت‌سنجی (شکل سمت چپ) ایستگاه قیقلو

Figure 10- Scatter plot of observed against estimated streamflow for two-regime SETAR model (a) for calibration period (right figure) and (b) for validation period (left figure) for Ghabghablou station

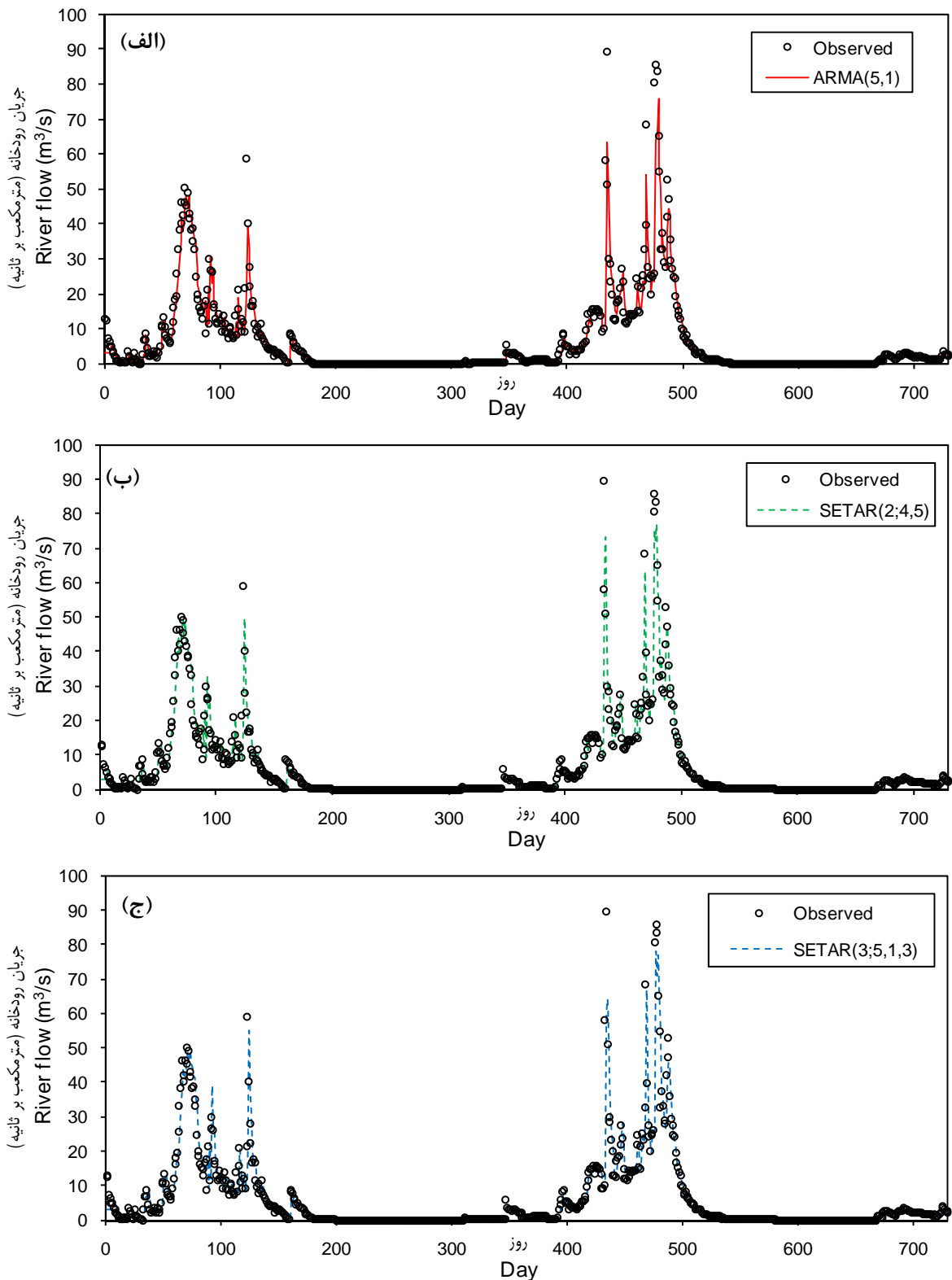


شکل ۱۱- نمودار پراکندگی دبی روزانه مشاهده شده و برآورد شده مدل SETAR ۳ رژیمی الف) برای دوره واسنجی (شکل سمت راست) و ب) برای دوره صحت‌سنجی (شکل سمت چپ) ایستگاه قیقلو

Figure 11- Scatter plot of observed against estimated streamflow for three-regime SETAR model (a) for calibration period (right figure) and (b) for validation period (left figure) for Ghabghablou station

منابع آب معرفی و استفاده شده است. مدل SETAR ۲ و ۳ رژیمی با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق با سری زمانی جریان رودخانه‌ها همخوانی داشته و عملکرد مدل‌های غیرخطی SETAR در مقایسه با مدل خطی ARMA دارای نتایج بهتری می‌باشند. به طوری که، مدل‌های غیرخطی آستانه باعث بهبود نتایج نسبت به مدل‌های خطی شده و می‌توانند.

مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه‌ها معمولاً دارای رفتار غیرخطی می‌باشند از عوامل مهم و تاثیر گذار در زمینه هیدرولوژی و مدیریت منابع آب حوضه آبریز، نظیر پیش‌بینی سیلاب، تصحیح و تکمیل دبی‌های روزانه و ... می‌باشد. در حالی که بسیاری از محققان در مطالعات گذشته از مدل‌های خطی و هوش مصنوعی در مدل‌سازی فرآیند جریان رودخانه‌ها استفاده کرده‌اند، در این تحقیق یکی از مدل‌های غیرخطی، مدل خود همبسته آستانه ۲ و ۳ رژیمی، در زمینه



شکل ۱۲- جریان دبی روزانه مشاهده شده و برآورد شده برای دوره صحت‌سنجی (۲۰۱۰ و ۲۰۱۱) در ایستگاه قبقبلو با استفاده از مدل‌های

ARMA (الف)، SETAR(2) (ب) و SETAR(3) (ج)

Figure 12- Observed and estimated daily streamflow for validation period (2010, 2011) at Ghabghablou station using (a)- ARMA, (b)- SETAR(2) and (c)-SETAR(3) models

جدول ۱۱- معیارهای ارزیابی مدل‌های برازش یافته به سری‌های زمانی دبی روزانه منطقه مطالعاتی
Table 11- Evaluation criteria of fitted models to daily streamflow time series of the study area

ایستگاه Station	مدل Model	حداکثر خطای مطلق AME(m ³ /s)	اختلاف حداکثری PDIF (m ³ /s)	متوسط خطای مطلق MAE (m ³ /s)	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE (m ³ /s)	خطای مطلق نسبی RAE	ضریب تعیین R ²	شاخص توافق IoAd	مجموع مربعات باقیمانده‌ها SSR	بهبود نسبی RI (%)
قبقبلو Ghabghablou	ARMA	125.46	45.22	1.52	5.98	0.17	0.84	0.95	521.7	0%
	SETAR(2)	135.30	27.44	1.50	5.93	0.16	0.84	0.96	475.54	9%
	SETAR(3)	133.91	73.96	1.54	6.00	0.17	0.84	0.95	501.02	4%
دره پنبه‌دان Darepanbedan	ARMA	122.37	33.80	1.32	5.29	0.15	0.86	0.96	396.25	0%
	SETAR(2)	109.36	11.19	1.30	5.27	0.15	0.86	0.96	395.43	0.2%
	SETAR(3)	108.13	19.87	1.30	5.30	0.15	0.86	0.96	393.76	0.6%
پل قشلاق PolGheshlagh	ARMA	146.03	29.73	1.91	7.54	0.15	0.88	0.97	356.86	0%
	SETAR(2)	145.43	25.96	1.92	7.60	0.15	0.90	0.97	354.26	0.7%
	SETAR(3)	144.81	27.00	1.92	7.60	0.15	0.88	0.97	345.41	3%
پل آنیان Pol Anian	ARMA	164.39	27.78	2.25	8.56	0.16	0.87	0.96	270.50	0%
	SETAR(2)	165.36	22.40	2.24	8.54	0.16	0.88	0.97	271.34	-0.3%
	SETAR(3)	165.08	26.44	2.23	8.54	0.16	0.88	0.97	265.72	2%
سننه Sonnateh	ARMA	169.49	47.12	1.28	6.06	0.14	0.86	0.96	353.88	0%
	SETAR(2)	171.78	32.94	1.27	6.08	0.14	0.86	0.96	350.46	1%
	SETAR(3)	169.00	34.04	1.28	6.06	0.14	0.86	0.96	341.37	3.5%
صفاخانه Safakhaneh	ARMA	72.56	15.43	0.97	3.87	0.13	0.91	0.97	389.83	0%
	SETAR(2)	72.83	11.53	0.97	3.88	0.13	0.92	0.98	387.84	0.5%
	SETAR(3)	72.68	18.91	0.96	3.86	0.13	0.92	0.97	383.58	1.6%

مشخص می‌کند) به سهولت می‌توانند در زمینه مهندسی منابع آب مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر، مدل‌های غیرخطی در این مطالعه باعث شده که نسبت به مدل‌های خطی برای هر ایستگاه تعداد پارامترهای برازش یافته به مدل کمتر شود و به عبارتی رعایت امساک در پارامترهای مدل صورت بگیرد.

برای مدل‌سازی و تحلیل رودخانه‌های مورد مطالعه مناسب باشند. از طرف دیگر، مدل SETAR ۳ رژیم‌ی نسبت به مدل SETAR(2) برای همه ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه قبقبلو) دارای مقادیر SSR کمتر و به تبع آن بهبود نسبی بیشتری می‌باشد. مدل SETAR به دلیل اینکه شباهت زیادی با مدل AR دارد (تنها تفاوت آن این است که توسط یک متغیر آستانه رژیم مدل‌های AR برای مدل‌سازی را

منابع

- 1- Adeloeye A.J., and Montaseri M. 2002. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study, Hydrological Sciences Journal, 47: 679-692.
- 2- Ahmadzadeh H. 2012. Assessment of Agricultural Water Productivity using the SWAT: A Case Study in the Zarrinerud Basin, M.A Thesis. Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian)
- 3- Amendola A., and Storti G. 1999. A Threshold Model for Rainfall-Flow Non-Linearity, Book of short papers, S.Co.
- 4- Astel A., Mazerski J., Polkowska Z., and Namieśnik J. 2004. Application of PCA and time series analysis in studies of precipitation in Tricity (Poland), Advances in Environmental Research, 8: 337-349.
- 5- Banihabib M.E., Bandari R., and Mousavi Nadoushani S.S. 2011. Analysis ability of the autoregressive integrated moving average model for forecasting of reservoir daily inflow of Dez reservoir, Journal of Irrigation and Water Engineering, 7(2): 46-57. (in Persian)

- 6- Cryer J. D., and Kellet N. 1986. Time Series Analysis, Vol. 101. Boston: Duxbury Press.
- 7- Franses P.H., and Van Dijk D. 2000. Non-Linear Time Series Models in Empirical Finance, Cambridge University Press.
- 8- Hipel K.W., and McLeod A.E. 1996. Time Series Modeling of Water Resources and Environmental Systems, Elsevier: Amsterdam, the Netherlands.
- 9- Järas J., and Gishani A.M. 2010. Threshold Detection in Autoregressive Non-Linear Models, M.A Thesis, Department of Statistics, Lund University.
- 10- Karamouz M., and Araghi Nejad Sh. 2005. Advanced Hydrology, Amirkabir University of Technology Press. p. 480. (in Farsi)
- 11- KiSi O. 2005. Daily river flow forecasting using artificial neural networks and auto-regressive models, Turkish J. Eng. Env. Sci, 29: 9-20.
- 12- Kurunç A., Yürekli K., and Çevik O. 2005. Performance of two stochastic approaches for forecasting water quality and streamflow data from Yeşilirmak River, Turkey, Environmental Modelling & Software, 20(9): 1195-1200.
- 13- Ljung G.M., and Box G.E.P. 1978. On a measure of lack of fit in time series models, Biometrika, 65: 297-303.
- 14- Machiwal D., and Jha M. 2008. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: application to hydrological time series, Hydrological Sciences Journal, 53: 353-366.
- 15- Modarres R. 2007. Streamflow drought time series forecasting, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21: 223-233.
- 16- Modarres R., and Ouarda T.B.M.J. 2012a. Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity modelling of hydrologic time series, Hydrological Processes, 27(22): 3174-3191.
- 17- Modarres R., and Ouarda T.B.M.J. 2012b. Modelling heteroscedasticity of streamflow time series, Hydrological Sciences Journal, 58(1): 54-64.
- 18- Ouarda T.B.M.J., Labadie J.W., and Fontane G. 1997. Indexed sequential hydrologic modeling for hydropower capacity estimation, Journal of the American Water Resources Association, 33: 1-13.
- 19- Salas J.D., Delleur W., Yevjevich V., and Lane W.L. 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series, Water Resources Publications, Littleton, Colorado 80161, U.S.A.
- 20- Svetlíková D., Komorníková M., Kohnová S., Szolgay J., and Hlavčová K. 2008. Analysis of discharge and rainfall time series in the region of the Káštorské lúky wetland in Slovakia, In XXIVth conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting. Conference E-papers. Bled.
- 21- Tong H. 1983. Threshold Models in Non-Linear Time Series Analysis, Springer, New York.
- 22- Tong H. Non-Linear Time Series. 1990. A Dynamical System Approach, Oxford University Press, UK.
- 23- Toth E., Montanari A, and Brath A. 1999. Real-time flood forecasting via combined use of conceptual and stochastic models, Physics and Chemistry of the Earth (B), 24: 793-798.
- 24- Valent P., Szolgay J., Komorníková M., and Šúrek P. 2009. Time series analysis of nitrates in Danube river, ftp://152.66.121.2/Floodrisk/_DC/docs/7_07_valent.pdf.
- 25- Wang W. 2006. Stochasticity, Nonlinearity and Forecasting of Streamflow Processes, Ios Press.
- 26- Wang W., Van Gelder P.H.A.J.M., and Vrijling J.K. 2005. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in Western Europe in the 20th century, In Proceedings: IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece, 8-10 July.
- 27- Worrall F., and Burt T.P. 1999. A univariate model of river water nitrate time series, Journal of Hydrology, 214: 74-90.
- 28- Zamani R., Ahmadi F., and Radmanesh F. 2015. Comparison of the gen expression programming, nonlinear time series and artificial neural network in estimating the river daily flow (case study: The Karun river), 28(6): 1172-1182.

Performance Evaluation of Linear (ARMA) and Threshold Nonlinear (TAR) Time Series Models in Daily River Flow Modeling (Case Study: Upstream Basin Rivers of Zarrineh Roud Dam)

F. Fathian^{1*} - A. Fakheri Fard² - Y. Dinpashoh³ - S. S. Mousavi Nadoshani⁴

Received: 16-08-2015

Accepted: 04-01-2016

Introduction: Time series models are generally categorized as a data-driven method or mathematically-based method. These models are known as one of the most important tools in modeling and forecasting of hydrological processes, which are used to design and scientific management of water resources projects. On the other hand, a better understanding of the river flow process is vital for appropriate streamflow modeling and forecasting. One of the main concerns of hydrological time series modeling is whether the hydrologic variable is governed by the linear or nonlinear models through time. Although the linear time series models have been widely applied in hydrology research, there has been some recent increasing interest in the application of nonlinear time series approaches. The threshold autoregressive (TAR) method is frequently applied in modeling the mean (first order moment) of financial and economic time series. This type of the model has not received considerable attention yet from the hydrological community. The main purposes of this paper are to analyze and to discuss stochastic modeling of daily river flow time series of the study area using linear (such as ARMA: autoregressive integrated moving average) and non-linear (such as two- and three- regime TAR) models.

Material and Methods: The study area has constituted itself of four sub-basins namely, Saghez Chai, Jighato Chai, Khorkhoreh Chai and Sarogh Chai from west to east, respectively, which discharge water into the Zarrineh Roud dam reservoir. River flow time series of 6 hydro-gauge stations located on upstream basin rivers of Zarrineh Roud dam (located in the southern part of Urmia Lake basin) were considered to model purposes. All the data series used here to start from January 1, 1997, and ends until December 31, 2011. In this study, the daily river flow data from January 01 1997 to December 31 2009 (13 years) were chosen for calibration and data for January 01 2010 to December 31 2011 (2 years) were chosen for validation, subjectively. As data have seasonal cycles, statistical indices (such as mean and standard deviation) of daily discharge were estimated using Fourier series. Then ARMA and two- and three-regime SETAR models applied to the standardized daily river flow time series. Some performance criteria were used to evaluate the models accuracy. In other words, in this paper, linear and non-linear models such as ARMA and two- and three-regime SETAR models were fitted to observed river flows. The parameters associated to the models, e.g. the threshold value for the SETAR model was estimated. Finally, the fitted linear and non-linear models were selected using the Akaike Information Criterion (AIC), Root Mean Square (RMSE) and Sum of Squared Residuals (SSR) criteria. In order to check the adequacy of the fitted models the Ljung-Box test was used.

Results and Discussion: To a certain degree the result of the river flow data of study area indicates that the threshold models may be appropriate for modeling and forecasting the streamflows of rivers located in the upstream part of Zarrineh Roud dam. According to the obtained evaluation criteria of fitted models, it can be concluded the performance of two- and three- regime SETAR models are slightly better than the ARMA model in all selected stations. As well as, modeling and comparison of SETAR models showed that the three-regime SETAR model have evaluation criteria better than two-regime SETAR model in all stations except Ghabghablou station.

Conclusion: In the present study, we attempted to model daily streamflows of Zarrineh Roud Basin Rivers located in the south of Urmia Lake by applying ARMA and two- and three-regime SETAR models. This is mainly because very few efforts and rather less attention have been paid to this non-linear approach in hydrology and water resources engineering generally.

Therefore, two types of data-driven models were used for modeling and forecasting daily streamflow: (i) deseasonalized ARMA-type model, and (ii) Threshold Autoregressive model, including Self-Existing TAR

1, 2 and 3- Ph.D student, Professor and Associate Professor of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(* - Corresponding Author Email: farshad.fathian@tabrizu.ac.ir)

4- Assistant professor of Water Resources Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Abbaspour School of Engineering, Shahid Beheshti University

(SETAR) model. Each ARMA and SETAR models were fitted to daily streamflow time series of the rivers located in the study area. In general, it can be concluded that the overall performance of SETAR model is slightly better than ARMA model. Furthermore, SETAR model is very similar AR model, therefore, it can be easily used in water resources engineering field. On the other hand, due to apply these non-linear models, the number of estimated parameters in comparison with linear models has decreased.

Keywords: Forecasting, Urmia Lake, Hydrological processes, Two- and three-regime models, Evaluation criteria