تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهارم، شماره ۲، پائیز ۱۳۸۷
Volume 4, No. 2, Fall 2008 (IR-WRR)
۱۴-۲۲

پیش‌بینی زمان واقعی جریان ورودی روزانه به مخزن سد کارون ۳ با تلفیق روش اتورگـــرسیو و پیش‌بینی‌های بارندگی

حسین صمدی بروجنی [۱] و منصور استادعلی عسکری [۲]

چکیده

پیش‌بینی در زمان واقعی جریان رودخانه‌ها در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب و به ویژه سدهای مخزنی به عنوان پیش‌نیازهای اصلی و اساسی مطرح هستند ولی به دلیل پیچیدگی بالای وقایع هیدروکلیماتولوژی، انجام پیش بینی در زمان واقعی بسیار دشوار و غالباً توأم با خطا می‌باشد. این امر باعث شده کارهای زیادی برای دست یافتن به مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت جریان رودخانه‌ها و به ویژه جریان ورودی مخازن سدها انجام گیرد و به تبع آن مدل‌های متنوعی تهیه و ارائه شده است. در حوضه کارون به دلیل تعدد سدهای بزرگ ساخته شده یا در دست ساخت و اهمیت بالای تولید بهینه برق آبی در این حوضه، انجام پیش‌بینی جریان ورودی به مخازن در زمان واقعی اهمیت ویژه‌ای داشته لذا در این تحقیق رودخانه کارون به عنوان نمونه موردی انتخاب شده و پیش بینی در زمان واقعی جریان ورودی به مخزن کارون ۳ در دوره زمانی ابتدای آذر تا پایان اسفندماه ۱۳۸۳ که مصادف با آبگیری مخزن سد کارون۳ بود، با روش تلفیقی تکنیک اتورگرسیو و پیش‌بینی‌های بارندگی انجام گرفت. در این روش که براساس روند تغییرات دبی روزانه ورودی به مخزن سد کارون۳ در یک دوره پنج روزه قبلی، دبی روزهای بعدی پیش‌بینی می‌گردد، جهت ایجاد یک ارتباط منطقی با شرایط دوره آتی مورد نظر، چندین سری اعداد تصادفی تولید شده و یکی از این سری اعداد تصادفی که بیشترین تطابق را با روند بارندگی‌های روزهای آتی دارد انتخاب گردید. همچنین به منظور مقایسه نتایج، پیش‌بینی جریان با روش اتورگرسیو ساده نیز انجام گرفت. نتایج حاکی از آنست که خطای روش پیشنهادی برای روزهای غیربارانی ۱۲/۷ درصد و در روزهای بارانی ۳۱/۸ درصد بوده است و بطور میانگین خطای این روش در ۱۰۹ روز پیش‌بینی انجام گرفته برابر ۲۱ درصد بدست آمد که در مقایسه با روش اتورگرسیو ساده که دارای خطای متوسط ۳۰ درصد بود، دارای دقت بیشتری می‌باشد.

کلمات کلیدی: پیش بینی، سیلاب، سد کارون۳، دبی روزانه

تاریخ دریافت مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۸ مهر ۱۳۸۷

۱- استادیار دانشگاه شهرکرد و رئیس مرکز تحقیقات منابع آب
۲- کارشناس ارشد منابع آب ، شرکت مهندسین مشاور پورآب

Real Time Forecasting of Daily Inflow to Karun-III Reservoir using Combination of Auto-Regressive Technique and Precipitation Forecasts

H.Samadi-Boroujeni [1] and M.OstadAli-Askari [2]

Abstract

Real time forecasting of river flow is an essential tool in optimum operation of water recourses systems espacially storage dams. Because of high complexity of hydro climatology events, real time inflow forecasting is a difficult task. Many researches have accordingly been carried out and various models have been developed for inflow real time forecasting.

Many storage dams, mainly hydropower dams, were constructed or are under construction in the Great Karun basin in south western Iran. The optimization of hydropower generation in this system is therefore of great importance. In this regard the inflow real time forecasting would also be an important item. In this study the Karun-III reservoir inflow real time forecasting was conducted using combination of autoregressive technique and the precipitation forecasts information available for a period of 22, November, 2004 to 20, March, 2005. In this research, various stochastic series data are generated based on the 5-day observed discharges. A series with the most agreement with the daily precipitation forecasts in the following days, is then selected to forecast the daily inflow in the next 5 days. Results showed that relative errors of the proposed method for rainy and non-rainy days was about %31.8 and %12.7, respectively. The average error for all the 109 days forecasted data was also reported as %21 which is quite below the average relative errors obtained in simple autoregressive technique which was about %30.

Keywords: Forecasting, Real time, Karun-III dam, Daily discharges.

1- Assistant Professor, Shahrekord University and Chairman of Water Resources Research Center. Email: samadi153@yahoo.com
2- Senior Engineer, PurAb Consultant Company.

۱- مقدمه

بسیاری از فعالیت‌های مرتبط با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، نیاز به پیش بینی وقایع هیدروکلیماتولوژی در آینده دارد که پیش‌بینی کوتاه مدت جریان رودخانه‌ها در زمان واقعی از جمله این موارد است. با توجه به پیچیدگی‌های زیاد این وقایع، محققین مختلف تلاش کرده‌اند با ابداع روش‌های متفاوت، این پیش‌بینی‌ها را با دقت بالاتر انجام دهند. ولی می‌توان انواع روش‌های پیش‌بینی جریان در زمان واقعی را در دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول روش‌هائی که بصورت مفهومی و بر مبنای قوانین حاکم بر فرآیندهای تشکیل رواناب در حوضه‌های آبخیز توسعه یافته‌اند که می‌توان آنها را مدل‌های تبدیل بارش به رواناب نیز خواند. دسته دوم روش‌هائی هستند که با استفاده از تکنیک‌های آماری و مفاهیم سری‌های زمانی سعی می‌کنند بر مبنای وقایع قبلی، رویدادهای آتی را پیش‌بینی کنند (Kisi, 2005).

مدل‌های تبدیل بارش به رواناب به لحاظ اینکه فرآیندهای تولید رواناب وبه‌بیان‌دیگر شرایط واقعی حوضه را درنظرمی‌گیرد، جواب‌های قابل اعتمادی بدست می‌دهد (Kitanidis and Bras, 1980). ولی این دسته از روش‌ها دارای محدودیت‌هائی هستند که از جمله آنها می‌توان به وابسته بودن آنها به حل معادلات پیچیده ریاضی، تعدد پارامترهای دخیل در فرآیندهای هیدرولوژیکی، دشواری کالیبره کردن مدل، هزینه بر بودن تهیه اطلاعات اولیه مدل و ... اشاره کرد (Hsu, et al., 1995). با توجه به پیچیدگی زیاد مدل‌سازی بارش-رواناب، محققین زیادی سعی کرده‌اند بر پایه مشاهدات و اطلاعات موجود، روابط و فرمول‌های تجربی را بدست آورند که انجام پیش‌بینی را با استفاده از اطلاعات اولیه کمتر و بطور ساده‌تری امکان پذیر کند. به هر حال انتخاب روش تجربی مناسب برای حصول دقت قابل قبول حائز اهمیت بالائی است.

در دسته دوم اگرچه محدودیتها و دشواری‌های مدل‌های بارش-رواناب وجود ندارد ولی دقت در انتخاب مدل آماری مناسب و ارزیابی داده‌های مورد استفاده حائز اهمیت بوده و امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در توسعه مدل‌های آماری و با توجه به پیدایش روش‌های نوین همبستگی نظیر مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، استفاده از روش‌های دسته دوم مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است (Yapo et al., 1996).

یکی از روش‌های آماری که در پیش‌بینی جریان رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اتورگرسیو است. این روش همانگونه کـه از نام آن نیز برمی آید، بر پایه رابطه زیر توسعه یافته است:

$$X_t = a_1 X_{t-1} + ... + a_p X_{t-p} + Z_t \qquad (۱)$$

که در آن: X_t مقدار پارامتر در زمان t ، و $a_p,...,a_2,a_1$ ضرایب اتورگرسیو و Z_t عامل تصادفی معادله می باشد.

در برخی موارد مدل اتورگرسیو با میانگین متحرک تشکیل مدل آرما (ARMA) را می‌دهد که رابطه آن را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$X_t = \phi_1 . X_{t-1} + V_t - \theta_1 . V_{t-1} \qquad (۲)$$

که در آن V_tها متغیرهای تصادفی مستقل از توزیع یکنواخت نرمال هستند.

در کاربرد مدل‌های اتورگرسیو باید توجه داشت که بین مقادیر گذشت و مجهولات آینده یک رابطه مشخص وجود داشته باشد. در غیر این صورت مدل اتورگرسیو قابلیت کاربرد را نخواهد داشت.

با توجه به اینکه در مدل اتورگرسیو هر داده مربوط به زمان جاری در یک سری زمانی به داده یا داده‌های قبلی در همان سری ربط داده می‌شود لذا در مواقعی که مقادیر دبی جریان در زمانهای قبلی در دسترس باشد می‌توان از این روش در انجام پیش‌بینی استفاده نمود. اگرچه استفاده از چنین مدلی برای پیش‌بینی جریان رودخانه در فصول خشک که نوسانات جریان اندک و روند آن مشخص است پاسخ‌های نسبتاً معقولی به دست می‌دهد ولی در فصول پرآبی و در مواقع سیلابی به دلیل ناپیوستگی ناشی از بارندگی، این شیوه به تنهائی نمی‌تواند منجر به پیش‌بینی قابل قبول آبدهی گردد و لازم است به گونه ای شرایط وقوع جریان در روزهای آتی را در محاسبات وارد کرد. با توجه به پیشرفت‌هائی که در پیش‌بینی بارندگی صورت گرفته و نتایج این پیش‌بینی‌ها هر روزه از طریق اینترنت در اختیار همگان قرار می گیرد، یک راه مناسب برای لحاظ کردن شرایط وضع آتی در انجام پیش بینی، استفاده از عامل بارندگی می باشد. استفاده از روش تلفیقی اتورگرسیو و پیش‌بینی‌های بارندگی این امکان را بوجود می آورد که پیش بینی جریان از یک طرف با درنظر گرفتن دبی روزهای قبلی و از طرف دیگر با لحاظ کردن شرایط آتی انجام پذیرد.

کیسی (Kisi, 2003) برای تعدادی از رودخانه‌ها در آمریکا و ترکیه با استفاده از دو روش شبکه‌های عصبی و اتورگرسیو سعی نمود جریان این رودخانه‌ها را بصورت روزانه در یک دوره ۴ ساله پیش‌بینی

نماید. نتایج نشان داد روش شبکه‌های مصنوعی جواب‌های بهتری نسبت به روش اتورگرسیو بدست داد. با این حال دقت روش اتورگرسیو مرتبه ۵ برای پیش بینی جریان روزانه رودخانه‌های مورد مطالعه مناسب تشخیص داده شد.

یو و تسینگ (Yu and Tseng, 1996) از مدل اتورگرسیو برای پیش‌بینی در زمان واقعی جریان سیلاب رودخانه پاچنگ کریک در تایوان استفاده کردند. در این مطالعه از احتمال افزایش دبی ویژه برای لحاظ کردن عدم قطعیت در انجام پیش‌بینی‌ها استفاده کردند. نتایج حاصل از مدل اتورگرسیو مرتبه ۵ نشان داد که این با تلفیق مدل‌های احتمالاتی می‌تواند در پیش‌بینی در زمان واقعی سیلاب کارائی لازم داشته باشد. این محققین معتقد بودند حتی روش اتورگرسیو کارائی بالاتری نسبت به مدل‌های بارش ـ رواناب دارد.

آچو ریورا و دیگران (Ochoa-Rivera et al., 2002) در دو رودخانه در اسپانیا با استفاده از مدل اتورگرسیو مرتبه ۲ جریان ماهانه را پیش‌بینی کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان داده که این مدل کارایی لازم در پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه‌های مورد مطالعه داشته است.

در مقاله حاضر روش فوق برای پیش بینی جریان ورودی به مخزن سد کارون ۳ مورد استفاده قرار گرفته است و محاسبات لازم انجام شده است. این محاسبات بصورت روزانه و در یک دوره چهار ماهه، از ابتدای آذر ۱۳۸۳ تا پایان همان سال که مصادف با آبگیری مخزن سد کارون ۳ بود، انجام گرفت. این کار در قالب مطالعاتی بود که به سفارش سازمان آب و برق خوزستان انجام گرفت. محاسبات در زمان واقعی و بصورت هفتگی انجام می گرفت و نتایج پیش‌بینی برای هر هفته بعدی (که با توجه به دبی روزانه هفته قبلی محاسبه می‌شد)، طی گزارشی جهت استفاده سیستم بهره‌بردار سدهای منطقه خوزستان ارسال می‌گردید. بدین صورت پس از گذشت هر هفته، این امکان برای سازمان آب و برق خوزستان بوجود می‌آمد که نتایج پیش‌بینی در زمان واقعی را مورد ارزیابی قرار دهد و این نکته از جمله نقاط قوت و مثبت کار به حساب می‌آید.

۲- مواد و روشها

برای انجام پیش بینی در زمان واقعی جریان ورودی به مخزن سد کارون ۳، نیاز به آمار دبی روزانه ورودی به مخزن سد کارون ۳ بود، که قبل از شروع آبگیری مخزن کارون۳، این اطلاعات از طریق ایستگاه پل شالو بدست می‌آمد و پس از شروع آبگیری مخزن کارون۳ که ایستگاه مذکور به زیر آب رفت، دبی جریان ورودی به مخزن با روش بیلان حجم برآورد می شد. برای انجام یک هفته پیش بینی جریان ورودی به مخزن کارون۳، دبی جریان ۵ تا ۷ روز قبل مورد استفاده قرار می گرفت. پیش بینی بارندگی در هفت روز بعدی که در انجام پیش‌بینی‌ها به عنوان داده‌های اولیه مورد نیاز بود، از طریق اینترنت بدست می‌آمد.

به منظور سهولت در انجام پیش بینی جریان، سعی شد از امکانات نرم‌افزاری موجود استفاده شود. چون در مدلHEC-4 از مدل اتورگرسیو برای پیش بینی جریان استفاده شده است و این مدل از اعتبار جهانی برخوردار است لذا در تحقیق حاضر از این نرم افزار استفاده شد. در مدل HEC-4 جهت کاهش ضریب تغییرات رابطه همبستگی میان لگاریتم داده‌ها برازش داده می‌شود و پس از پیش‌بینی، آنتی لوگ نتایج محاسبه و ارائه می‌گردد. متدولوژی محاسبات در این نرم افزار به شرح زیر است(USCE, 1971).

۱ـ داده‌های آبدهی روزانه مشاهده‌ای به صورت ستونی و به ترتیب زمان وقوع نوشته شوند.

۲ـ لگاریتم پایه ۱۰ اعداد بصورت زیر محاسبه شود.

$$X_i = \text{Log } Q_i \qquad (۳)$$

۳ـ میانگین، انحراف معیار و ضریب چولگی ارقام بند ۲ برآورد گردد.

$$\overline{X_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \qquad (۴)$$

$$S_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - X)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۵)$$

$$g_i = \frac{n \sum_{i=1}^{n} (X_i - X)^3}{(n-1)(n-2) S_i^3} \qquad (۶)$$

۴ـ ارقام بند (۲) به متغیر استاندارد تقریبی P3 (توزیع پیرسون) و سپس به متغیر استاندارد نرمال تبدیل شوند.

$$K_i = \frac{(X_i - \overline{X})}{S_i} \qquad (۷)$$

$$t_i = \frac{6}{g_i} \left[\left((g_i K_{i/2}) + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] + \frac{g_i}{6} \qquad (۸)$$

۵ـ بین ارقام متغیر استاندارد نرمال روابط خود همبستگی با تأخیر ۱ الی ۵ روزه محاسبه و مناسب‌ترین رابطه همبستگی انتخاب گردد.

۶ـ با استفاده از رابطه منتخب مقادیر متغیرهای وابسته (برای متغیرهای مستقل مشاهده‌ای) برآورد گردد.

۷ـ به تعداد روزهای لازم برای پیش بینی، اعداد تصادفی با توزیع مستطیلی یکنواخت تولید شوند. (W_i) سپس با استفاده از روابط ذیل تبدیل به متغیر استاندارد نرمال گردند.

$$Z_1 = (-2\,Log_e\ w_i)^{1/2}\ Cos\ (2\pi w_2) \qquad (۹)$$

$$Z_2 = (-2\,Log_e\ w_i)^{1/2}\ \sin\ (2\pi w_2) \qquad (۱۰)$$

۸ـ جریان آبدهی روزهای مورد نظر به صورت متغیر استاندارد نرمال پیش‌بینی شوند :

$$T_i = f(x)\sqrt{1-R^2}.Z_i \qquad (۱۱)$$

۹- متغیرهای مذکور در بند (۸) به متغیر استاندارد پیرسون (P3) تبدیل گردند.

$$K_i = \left\{\left[\left(\frac{g_i}{6}\right)\left(t_i - \frac{g_i}{6}\right)+1\right]^3 - 1\right\}\frac{2}{g_i} \qquad (۱۲)$$

۱۰ـ ارقام بند قبل به لگاریتم آبدهی تبدیل و سپس آنتی لگاریتم آنها محاسبه و جریان‌های روزانه با واحد مربوطه حاصل خواهد شد.

$$X_i = \overline{X} + K_i\,.S_i \qquad (۱۳)$$

$$Q_i = Anti\,Log\,X_i = 10^{x_i} \qquad (۱۴)$$

همانگونه که در متدولوژی فوق دیده می‌شود پارامتر تصادفی Z می‌تواند نقش قابل توجهی در مقادیر پیش‌بینی ایفا نماید و با این فرآیند می‌توان سری متعددی از اعداد تصادفی تولید کرد. اگر سری اعداد تصادفی انتخاب شده متناسب با شرایط آبدهی در آینده باشد، می‌توان انتظار داشت نتایج پیش‌بینی با دقت بالاتر بدست آید. به بیان دیگر هرچه سری اعداد تصادفی از وضعیت آتی بیشتر تبعیت کند دقت پیش‌بینی نیز افزایش می‌یابد. لذا اگر از بین تعداد زیادی سری اعداد تصادفی تولید شده، آن سری زمانی که روندی مشابه با روند بارندگی‌های روزهای بعد داشته باشد انتخاب گردد، می‌توان به پیش‌بینی‌هائی دست یافت که شرایط آینده را بهتر در نظر گرفته و در نتیجه دقیق‌تر باشند.

این استدلال در انجام پیش‌بینی‌های مدل اتورگرسیو جریان ورودی به مخزن سد کارون۳، مورد استفاده قرار گرفت و در هر دوره حداقل ۶ سری عدد تصادفی تولید شد و با توجه به پیش‌بینی‌های بارندگی که در دوره‌های چند روزه از طریق اینترنت قابل دستیابی بود، آن سری اعداد تصادفی که بیشترین مطابقت را با روند بارندگی روزهای بعد داشت، انتخاب و پیش‌بینی جریان بر اساس آن انجام گرفت. در این مطالعه جمعاً ۱۰۹ روز پیش‌بینی انجام گرفت که با توجه به اینکه هر دوره پیش‌بینی بین ۳ تا ۶ روز را پوشش می‌داد، لذا این ۱۰۹ روز جمعاً ۲۵ دوره را شامل می‌شد. (۴۶ روز از این دوره ۱۰۹ روزه بارندگی وجود داشت که حدوداً ۴۲ درصد روزها را شامل می‌شد.)

۳- دوره‌های پیش‌بینی و نتایج حاصله

پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد کارون۳، با استفاده از روش فوق (ترکیب اتورگرسیو و روند پیش‌بینی‌های بارندگی روزهای بعد) از اول آذر ۱۳۸۳ لغایت پایان آن سال انجام گرفت. در این مطالعه برای پیش‌بینی بارندگی روزهای بعد از سایت اینترنتی استفاده شد (مراجعه شود به فهرست منابع). این سایت یکی از سایت‌های معتبر پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی آمریکا است که سابقه پیش‌بینی آن به سال ۱۹۸۲ برمی‌گردد. این سایت در بیش از ۷۷ هزار نقطه از مناطق مختلف جهان پیش‌بینی‌های بارندگی روزانه را برای یک دوره ۷ روزه پیش‌رو انجام می‌دهد (۳۴ مورد آن در ایران قرار دارد). پیش‌بینی‌های بارندگی در این سایت در بازه‌های مختلف بارندگی از جمله صفر تا ۰/۱ اینچ، ۰/۱ تا ۰/۵ اینچ، ۰/۵ تا ۱ اینچ و ... به تفکیک روزهای آینده ارائه می‌شود. این سایت برای استفاده همگان رایگان بوده و بدلیل سابقه و اعتبار آن، به عنوان یکی از سایت‌های معروف، مطرح می‌باشد.

با توجه به آنچه در این مطالعه اولین دوره پیش‌بینی از اول تا هفتم آذرماه براساس دبی ورودی به مخزن کارون۳ از ۲۶ تا ۳۰ آبان ۱۳۸۳ انجام شد، در این پیش‌بینی بهترین سری اعداد تصادفی تولید شده که مطابقت بیشتری با روند پیش بینی بارندگی حوضه بالادست کارون۳ در دوره اول تا هفتم آذرماه داشت، مورد استفاده قرار گرفت. به همین ترتیب، تا پایان اسفند ۱۳۸۳ جمعاً تعداد ۲۵ مورد پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن کارون ۳ در زمان واقعی انجام گرفت که نتایج این پیش‌بینی‌ها بصورت روزانه در جدول(۱) ذکر شده است. در این جدول N/A به معنی عدم انجام پیش‌بینی جریان می‌باشد.

ویژگی مهم این مطالعه این بود که در انتهای هر هفته، نتایج پیش‌بینی هفته بعد طی یک نامه رسمی به سازمان آب و برق خوزستان اعلام می‌شد و سازمان آب و برق خوزستان از نتایج این پیش‌بینی برای مدیریت بهره‌برداری مخازن سدهای پائین دست استفاده می‌کرد. علاوه‌بر آن، وضعیت آبگیری سد کارون ۳ از یک هفته قبل مورد بررسی قرار می‌گرفت. ضرورت انجام این مطالعه به این موضوع برمی‌گشت که در سال ۱۳۸۳، جریان رودخانه کارون نسبتاً کاهش یافته بود و ذخیره سدهای پائین دست به حداقل مقدار خود رسیده بود و برای پیشگیری از وقوع بحران کیفیت آب رودخانه

کارون و مدیریت بهتر مخازن یکی از اقدامات، پیش‌بینی در زمان واقعی جریان بود.

به منظور ارزیابی بهتر نتایج حاصل از روش پیشنهادی فوق، با استفاده از روش اتورگرسیو ساده (مرتبه ۱)، اقدام به پیش‌بینی مجدد دبی‌های ورودی به مخزن سد کارون ۳ گردید. روابط بدست آمده در این روش بر مبنای آمار روزانه یک دوره آماری ۳۰ ساله ایستگاه پل شالو (جمعاً ۱۰۹۰۰ داده روزانه)، برای پیش‌بینی دبی روزهای اول تا پنجم یک دوره پیش‌بینی ۵ روزه (Q_{i+1} تا Q_{i+5}) برحسب دبی معلوم یک روز ماقبل دوره (Q_i) به شرح روابط (۱۵) تا (۱۹) بدست آمد. علت انتخاب فرمت این روابط به نحوه پیش‌بینی دبی در روش تلفیقی مورد بحث در این مقاله برمی‌گردد تا بر این اساس بتوان نتایج روش پیشنهادی را با روش اتورگرسیو ساده مقایسه کرد.

$$Q_{i+1}=0.893Q_i+42.772 \quad , R^2 = 0.7976 \qquad (۱۵)$$

$$Q_{i+2}=0.7767Q_i+89.323 \quad , R^2 =0.6032 \qquad (۱۶)$$

$$Q_{i+3}=0.7092Q_i+116.3 \quad , R^2 =0.503 \qquad (۱۷)$$

$$Q_{i+4}=0.6723Q_i+131.09 \quad , R^2 =0.452 \qquad (۱۸)$$

$$Q_{i+5}= 0.647Q_i+141.26 \quad , R^2 =0.4185 \qquad (۱۹)$$

که در روابط فوق دبی‌ها برحسب مترمکعب برثانیه می‌باشد.

در روش اتورگرسیو ساده (AR)، برخلاف روش پیشنهادی در این مطالعه، روند بارندگی‌های روزهای بعد در انجام پیش‌بینی دخالت داده نشده است و پیش‌بینی‌ها تنها برمبنای دبی روز ماقبل انجام گرفته است. لذا با کاربرد روابط فوق در هر روز از دوره مورد مطالعه، برمبنای دبی‌های قبلی پیش‌بینی جریان ورودی روزهای بعد انجام گرفت. نتایج حاصل از پیش‌بینی‌ها با استفاده از روش اتورگرسیو ساده در همان جدول (۱) ارائه شده است. این نتایج در ارزیابی نتایج روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- نتایج و بحث

همانگونه که گفته شد، از ابتدای آذر تا پایان اسفندماه ۱۳۸۳ جمعاً به تعداد ۲۵ مورد پیش بینی جریان ورودی در زمان واقعی به مخزن سد کارون ۳ انجام گرفت و نتایج در جدول (۱) ارائه گردید و تغییرات آن در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است. تعداد روزهای پیش‌بینی شده جمعاً ۱۰۹ روز بود. البته در یک مورد، ملاحظه می‌شود که پیش‌بینی جریان انجام نشده است که این روز مربوط به تاریخ ۸۳/۱۲/۰۲ می‌باشد. این امر ناشی از تعطیلی روزهای بیست و نهم و سی‌ام بهمن و اول اسفندماه سال ۱۳۸۳ بوده که منجر به عدم دریافت اطلاعات روزهای بیست و هشتم بهمن تا اول اسفندماه شده است و چون نتایج پیش‌بینی بطور مرتب از یک هفته قبل به سازمان آب و برق خوزستان اعلام می‌شد، لذا هیچ رقمی برای روز مذکور اعلام نگردید.

به منظور بررسی دقت روش‌های مورد استفاده در این مطالعه از شاخص درصد خطا در هر روز که مطابق رابطه زیر است، استفاده می‌شود:

$$RE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{X_e - X_o}{X_o}\right|_i \qquad (۲۰)$$

که در آن: RE میانگین درصد خطای برآورد پارامتر نسبت به مقدار واقعی آن، X_o و X_e به ترتیب مقادیر واقعی (مشاهداتی) و محاسباتی (پیش‌بینی شده) و n تعداد داده‌ها می‌باشد. با توجه به این رابطه، درصد خطای دو روش مورد استفاده (روش پیشنهادی و روش اتورگرسیو ساده) در روزهائی که جریان ورودی به مخزن سد کارون۳ پیش‌بینی شده بود (جمعاً ۱۰۹ روز) محاسبه گردید که نتایج در جدول(۱) ارائه شده است.

در این جدول ملاحظه می‌شود، در کل دوره مورد مطالعه، متوسط درصد خطا (بصورت مطلق) برای روش پیشنهادی معادل ۲۱/۱ درصد و برای روش اتورگرسیو ساده ۳۰ درصد بدست آمده است. این نتیجه بیانگر اینست که روش پیشنهادی نسبت به روش اتورگرسیو ساده دقت بالاتری دارد.

برآوردهای انجام شده با روش پیشنهادی در ۵۴ روز از دوره (معادل ۴۹/۵ درصد روزها) کمتر از مقدار واقعی با متوسط خطای ۲۳/۳- درصد و درمابقی روزها (معادل ۵۰/۵ درصد) برآوردها بیشتر از مقدار واقعی با متوسط خطای ۱۹+ درصد بوده است. نتایج فوق برای روش اتورگرسیو ساده نیز بدست آمد که در جدول (۲) این نتایج ارائه شده است. ملاحظه می‌شود این روش در مقایسه با روش پیشنهادی برآوردها را دست بالاتر نشان می‌دهد.

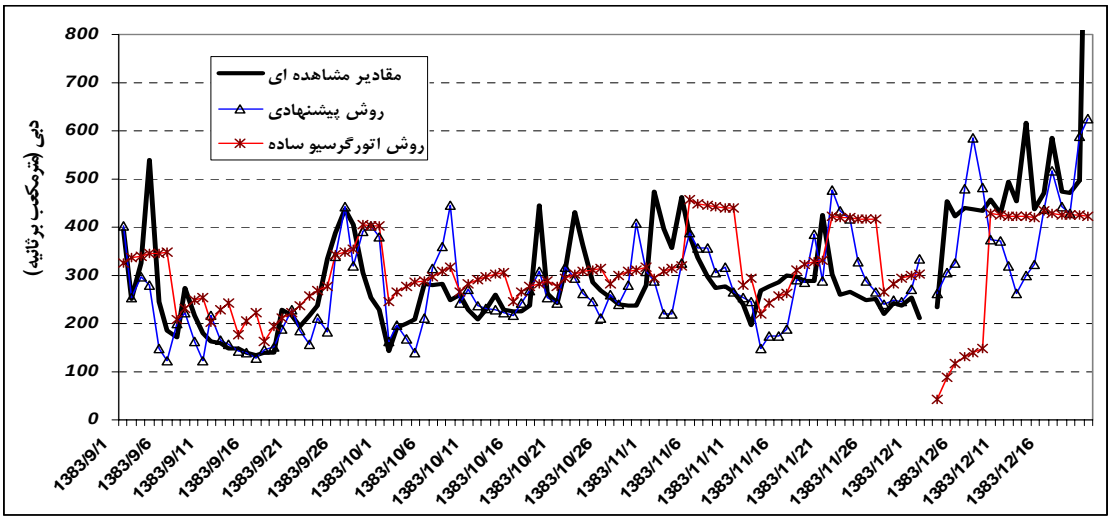
به منظور بررسی بهتر نتایج دوره ۱۰۹ روزه مورد مطالعه بر مبنای کلاس دبی جریان، به سه دوره تفکیک شد که محدوده دبی این دوره‌ها به ترتیب صفر تا ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه، ۲۵۰ تا ۴۰۰ و بیشتر از ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه انتخاب شد.

در جدول (۳) متوسط خطای مطلق در هر یک از سه کلاس دبی و برای دو روش مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه دبی اندازه‌گیری و پیش‌بینی با روش‌های مورد استفاده و درصد خطای پیش‌بینی (دبی‌ها بر حسب مترمکعب برثانیه)

روش AR ساده		روش پیشنهادی		مقادیر	تاریخ	روش AR ساده		روش پیشنهادی		مقادیر	تاریخ
خطا%	پیش‌بینی	خطا%	پیش‌بینی	مشاهده		خطا%	پیش‌بینی	خطا%	پیش‌بینی	مشاهده	
12%	284	3%	261	254	1383/10/26	–17%	326	2%	402	395	1383/9/1
25%	299	0%	240	240	1383/10/27	34%	336	2%	256	250	1383/9/2
30%	308	18%	279	237	1383/10/28	5%	341	–9%	296	326	1383/9/3
32%	313	72%	408	237	1383/10/29	–36%	344	–48%	279	539	1383/9/4
13%	316	10%	309	281	1383/10/30	41%	347	–40%	149	247	1383/9/5
–38%	294	–39%	288	476	1383/11/1	89%	348	–34%	122	185	1383/9/6
–22%	307	–44%	221	396	1383/11/2	21%	208	17%	201	172	1383/9/7
–12%	315	–38%	221	358	1383/11/3	–15%	233	–18%	224	274	1383/9/8
–31%	320	–30%	325	463	1383/11/4	13%	247	–26%	162	218	1383/9/9
19%	456	2%	390	383	1383/11/5	42%	255	–32%	122	179	1383/9/10
34%	449	6%	358	336	1383/11/6	24%	203	33%	217	163	1383/9/11
50%	445	20%	356	296	1383/11/7	44%	229	4%	166	159	1383/9/12
62%	442	12%	305	273	1383/11/8	62%	243	5%	158	150	1383/9/13
59%	441	14%	318	278	1383/11/9	19%	177	–3%	144	148	1383/9/14
66%	440	0%	265	265	1383/11/10	46%	206	–2%	139	141	1383/9/15
16%	279	5%	254	241	1383/11/11	65%	223	–4%	130	135	1383/9/16
49%	295	24%	246	198	1383/11/12	18%	163	5%	147	139	1383/9/17
–18%	220	–45%	148	267	1383/11/13	39%	194	9%	153	140	1383/9/18
–13%	243	–37%	175	278	1383/11/14	–7%	212	–17%	189	228	1383/9/19
–10%	257	–39%	174	286	1383/11/15	2%	222	5%	228	217	1383/9/20
–12%	264	–37%	190	300	1383/11/16	21%	236	–4%	187	194	1383/9/21
5%	311	–1%	293	296	1383/11/17	19%	258	–27%	158	217	1383/9/22
11%	322	–1%	285	289	1383/11/18	14%	270	–11%	210	237	1383/9/23
14%	329	33%	384	289	1383/11/19	–18%	277	–46%	182	335	1383/9/24
–22%	333	–33%	287	427	1383/11/20	–12%	342	–13%	340	390	1383/9/25
39%	424	57%	477	304	1383/11/21	–20%	350	1%	443	438	1383/9/26
62%	421	68%	436	260	1383/11/22	–13%	354	–21%	320	405	1383/9/27
58%	419	57%	417	266	1383/11/23	32%	405	28%	392	306	1383/9/28
62%	418	28%	329	257	1383/11/24	59%	404	59%	403	254	1383/9/29
68%	418	16%	289	249	1383/11/25	77%	404	66%	379	228	1383/9/30
66%	417	6%	265	251	1383/11/26	71%	247	14%	164	144	1383/10/1
22%	267	10%	241	219	1383/11/27	40%	267	4%	198	191	1383/10/2
17%	284	2%	247	242	1383/11/28	38%	278	–16%	169	201	1383/10/3
23%	294	3%	247	238	1383/11/29	36%	285	–32%	141	209	1383/10/4
18%	300	7%	271	254	1383/11/30	2%	289	–26%	211	284	1383/10/5
43%	304	58%	335	212	1383/12/1	5%	296	11%	313	281	1383/10/6
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1383/12/2	9%	310	27%	361	284	1383/10/7
–82%	43	12%	262	235	1383/12/3	28%	318	79%	446	249	1383/10/8
–80%	89	–33%	306	453	1383/12/4	2%	265	–7%	242	259	1383/10/9
–72%	116	–23%	325	422	1383/12/5	23%	282	18%	270	229	1383/10/10
–70%	131	9%	481	440	1383/12/6	40%	293	14%	238	210	1383/10/11
–68%	141	34%	585	436	1383/12/7	31%	298	1%	231	228	1383/10/12
–66%	149	12%	484	433	1383/12/8	16%	302	–12%	228	260	1383/10/13
–6%	430	–18%	375	456	1383/12/9	34%	305	–2%	222	227	1383/10/14
–1%	426	–13%	373	428	1383/12/10	9%	246	–3%	218	225	1383/10/15
–14%	424	–35%	320	494	1383/12/11	18%	266	8%	244	225	1383/10/16
–7%	422	–42%	264	454	1383/12/12	17%	278	13%	268	238	1383/10/17
–32%	422	–51%	301	618	1383/12/13	–36%	284	–30%	309	444	1383/10/18
–4%	421	–26%	324	438	1383/12/14	9%	288	–4%	253	263	1383/10/19

–8%	434	–7%	437	472	1383/12/15	15%	278	0%	243	242	1383/10/20
–27%	430	–12%	517	586	1383/12/16	–6%	294	1%	317	313	1383/10/21
–10%	427	–7%	444	475	1383/12/17	–30%	303	–32%	294	431	1383/10/22
–10%	426	–9%	428	470	1383/12/18	–15%	308	–27%	263	362	1383/10/23
–15%	425	19%	590	497	1383/12/19	9%	312	–14%	246	285	1383/10/24
–69%	424	–55%	625	1381	1383/12/20	16%	314	–21%	213	270	1383/10/25



شکل ۱- مقادیر دبی مشاهده‌ای ورودی به مخزن کارون۳ و دبی پیش‌بینی با روشهای مورد استفاده در یک دوره ۱۰۹ روزه

نتایج نشان می‌دهد با کاهش دبی جریان، دقت روش پیشنهادی بیشتر شده ولی در روش اتورگرسیو ساده یک روند مشخص بدست نیامده است. نتایج روش پیشنهادی منطقی‌تر به نظر می‌رسد زیرا دبیهای پائین عمدتاً مربوط به جریان پایه رودخانه است و پیش‌بینی این جریانها بطور معمول با دقت بیشتری انجام می‌شود. همچنین این نتایج نشان داده در تمامی کلاسهای دبی، دقت روش پیشنهادی بیشتر از روش اتورگرسیو ساده می‌باشد.

همانگونه که دیده می‌شود در روش پیشنهادی علیرغم اینکه پارامترهای تصادفی که از میان سری‌های تصادفی مختلف انتخاب شده باتوجه به پیش بینی‌های کوتاه مدت بارندگی در حوضه به کار رفته است، با این وجود در پاره‌ای مواقع به ویژه در دوره‌های وقوع بارش، داده‌های مشاهداتی آبدهی نسبت به مقادیر پیش بینی شده اختلاف قابل توجهی را نشان می‌دهد. بهرحال وقوع بارندگی در حوضه، روند آبدهی‌های رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا پیش‌بینی که روند بارندگی‌های روزهای بعد را در نظر می‌گیرد، ارتباط منطقی خود را با داده‌های واقعی حفظ کرده و همین امر نقطه قوت روش پیشنهادی در این مطالعه است. با این حال بررسی نتایج نشان داده که دقت روش پیشنهادی در روزهای بارندگی نسبت به سایر روزها کمتر است.

می‌توان از جمله علل این امر به این نکته اشاره کرد که پیش‌بینی‌های بارندگی توأم با خطا است و علاوه برآن در روش پیشنهادی تمامی عوامل دخیل در تشکیل رواناب (نظیر عوامل فیزیکی حوضه، پراکنش مکانی و زمانی بارش و ....) در نظر گرفته نمی‌شوند.

جدول ۲- درصد خطای روشهای مورد استفاده در حالتهای مختلف

شرح	روش پیشنهادی		روش اتورگرسیو ساده	
	تعداد روز	٪ خطای متوسط	تعداد روز	٪ خطای متوسط
موارد تخمین بیشتر از واقعی	۵۵	۱۹	۷۰	۳۲
موارد تخمین کمتر از واقعی	۵۴	-۲۳/۳	۳۹	-۲۶/۷

جدول ۳- متوسط خطای مطلق به تفکیک کلاس دبی

کلاس دبی (m^3/s)	متوسط درصدخطا (با قدر مطلق)	
	روش پیشنهادی	روش اتورگرسیو ساده
Q<۲۵۰	۱۸	۳۴
۲۵۰<Q<۴۵۰	۲۲	۲۵
Q>۴۵۰	۲۵	۳۱

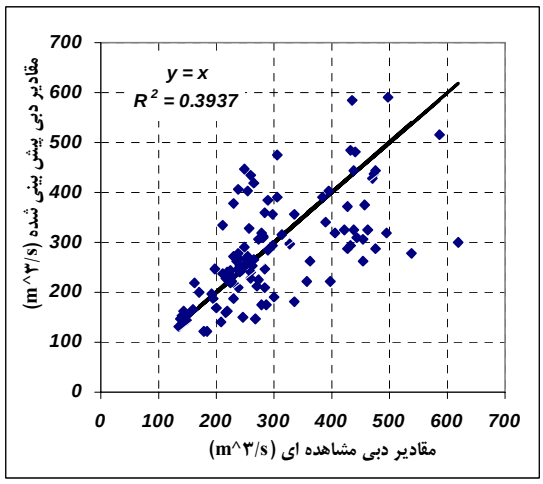
در جدول (۴) میزان میانگین خطا برای مقادیر پیش بینی شده با روش پیشنهادی به تفکیک روزهای بارانی و غیر بارانی ارائه شده است. این میانگین خطا برای روزهای بارانی حدود ۳۱/۸ درصد و برای روزهای غیربارانی حدود ۱۲/۷ درصد بدست آمده است.

جدول ۴- اعتبارسنجی مدل پیش بینی به تفکیک روزهای بارانی و غیر بارانی

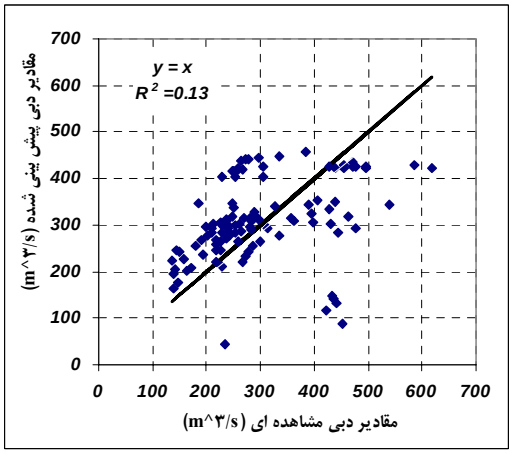
شرح	تعداد روزها	میانگین مقادیر مشاهده	میانگین مقادیر پیش بینی شده	متوسط * خطا (٪)
روزهای بارانی	۴۸	۳۷۰/۴	۲۹۹/۰۳	۳۱/۷۹
روزهای غیربارانی	۶۱	۲۵۸/۶	۲۷۵/۶۷	۱۲/۷۳
کل روزها	۱۰۹	۳۰۷/۸	۲۵۸/۹۶	۲۱/۱۲

در روزهای بارانی حداکثر خطای پیش بینی مربوط به مورخ ۸۳/۱۰/۰۸ و معادل ۷۹ درصد و حداقل آن ۱/۵ درصد در روز ۸۳/۱۰/۱۲ بوده است. در روزهای غیر بارانی حداکثر خطای پیش بینی مربوط به مورخ ۸۳/۱۰/۲۹ و معادل ۷۲ درصد و حداقل آن حدود صفر درصد در روزهای ۸۳/۱۱/۵ و ۸۳/۱۱/۱۰ بوده است.

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده، در نمودار شکل‌های (۲) و (۳) مقادیر پیش‌بینی و مشاهده‌ای در مقابل هم نشان داده شده‌اند و نقاط بدست آمده نسبت به خط آرمانی Y=X مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی داده‌های روش پیشنهادی بالاتر از روش اتورگرسیو ساده بدست آمده که این نتیجه نشان‌دهنده دقت بالاتر روش پیشنهادی است.



شکل ۲- مقادیر دبی مشاهده‌ای و دبی پیش‌بینی با روش پیشنهادی (تلفیق اتورگرسیو و پیش‌بینی بارندگی)



شکل ۳- مقادیر دبی مشاهده‌ای و دبی پیش‌بینی با روش اتورگرسیو ساده

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق سعی شده کارایی یک روش پیش‌بینی جریان که تلفیقی از تکنیک اتورگرسیو و پیش‌بینی‌های بارندگی است برای پیش‌بینی در زمان واقعی جریان ورودی به مخزن کارون۳، مورد ارزیابی قرار گیرد. برای کاربرد این روش از قابلیت نرم‌افزار HEC4 استفاده شد. از طرف دیگر برای ارزیابی بهتر نتایج حاصل از روش پیشنهادی، این پیش‌بینی‌ها با روش اتورگرسیو ساده نیز تکرار شد.

بر اساس نتایج حاصله، در دوره ۱۰۹ روزه مورد مطالعه متوسط درصد خطا برای روش پیشنهادی (تلفیق اتورگرسیو و روند پیش‌بینی‌های بارندگی) معادل ۲۱/۱ درصد بدست آمد حال آنکه این خطا برای روش اتورگرسیو ساده ۳۰ درصد بود. این نتیجه بیانگر این‌است که روش پیشنهادی نسبت به روش اتورگرسیو ساده دقت و کارایی بالاتری دارد.

همچنین نتایج نشان داد که روش اتورگرسیو ساده در مقایسه با روش پیشنهادی برآوردها را دست بالا ارائه می‌دهد.

به منظور بررسی بهتر نتایج، درصد خطای دو روش مذکور در کلاس‌های مختلف دبی جریان بدست آمد که نتایج نشان داد با کاهش دبی جریان، دقت روش پیشنهادی بیشتر شده ولی در روش اتورگرسیو ساده یک روند مشخص بدست نیامده است. لذا نتایج روش پیشنهادی منطقی‌تر به نظر می‌رسد زیرا دبی‌های پائین عمدتاً مربوط به جریان پایه رودخانه است و پیش‌بینی این جریانها بطور معمول با دقت بیشتری انجام می‌شود.

در مجموع اگرچه درصد خطای روش پیشنهادی نسبت به روش اتورگرسیو ساده کمتر بود ولی در مواقع سیلابی خطای روش پیشنهادی نسبتاً زیاد بدست آمد (با متوسط ۳۱/۸ درصد) و اگرچه این خطا همچنان کمتر از روش اتورگرسیو ساده است ولی برای منظورهای بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها ممکن است دست بالا به‌نظر آید. به هر حال با توجه به دقت‌های مرسوم در هیدرولوژی، می‌توان روش پیشنهادی را در زمره مدل‌های پیش‌بینی جریان ورودی مخازن سدها در زمان واقعی قرار داد.

۶- تشکر

بدینوسیله از سازمان آب و برق خوزستان، بویژه جناب آقای دکتر ایزدجو که امکان انجام این تحقیق را بوجود آوردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

USCE (US Army corps of Engineers), (1971), "HEC-4 Monthly stream flow simulation", *the Hydrologic Engineering Center CPD-4,* 85p.

Kisi, O., (2005), "Daily River Flow Forecasting Using Artificial Neural Networks and Auto-Regressive Models", *Turkish J. Eng. Env. Sci*., 29, pp.9-20.

Kitanidis, P.K. and Bras, R.L., (1980), "Real-Time Forecasting With a Conceptual Hydrological Model", *Water Resour. Res*., 16., pp.740-748.

Hsu, K., Gupta, H.V. and Sorooshian,S., (1995), "Artifcial Neural Network Modeling of the Rainfall-Runoff Process", *Water. Resour. Res. J.,* 31., pp.2517-2530.

Yapo, P., Gupta, V.K. and Sorooshian, S., (1996), "Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models: Sensitivity to Calibration Data", *J.Hydrol.,*181., pp.23-48.

Ochoa-Rivera, J.C., R. García-Bartual and J. Andreu, (2002), Multivariate synthetic stream flow generation using a hybrid model based on artificial neural networks, *J. Hydrology and Earth System Sciences* , 6(4), pp. 641–654

YU, P.Sh. and Yih Tseng, T., (1996), A model to forecast flow with uncertainty analysis, *Hydrological Sciences -Journal*, 4l(i), pp.327-344.

http://weather.yahoo.com/regional/IRXX.htm