

Drought early warning system based on the risks and uncertainties in operation of Zayandeh-Rud dam with solutions of water deficit reduction

M. Golamzadeh¹, S. Morid^{2*} and M. Delavar³

Abstract

For water resources management in dry areas that rely on dams and surface water storage, the use of Drought Early Warning System (DEWS) with the hydrological indicator that capability to deal with the drought and water shortage are very useful and it also prevents the reducing of water reserves. In this research, it is tried to develop a drought early warning system, relying on effective component in reservoir management. The developed drought early warning system consists of five essential elements, namely, (1) Drought monitoring, (2) Prediction and uncertainty analysis of water consumption in the future, (3) Calculation of an index for drought alert (4) Risk and uncertainty analysis and (5) Policy Making for Drought Management that used in Zayandeh-Rud dam. To design this system, at the first stage the inflow was predicted by using Artificial Neural Networks (ANNS) in a period of 6-months with considering the relevant uncertainty and difference of probability levels. Also drought conditions were categorized in five levels by using of historical data (1983-2005) of reservoir water storage and using Self Organizing Feature Map (SOFM). The levels are none, slightly severe, fairly severe, severe and very severe. Then a drought alert index was calculated with current drought monitoring conditions of reservoir and water consumption measuring in a 6-month forecast period. Based on the results of calculated index, warning of different levels of green status (normal condition) to red status (severe condition) with relevant uncertainty and different confidence levels was determined. In the next step, a nonlinear optimization model was used to determine optimum reduction of demands for maximum reservoir incomes. Finally, the performance of this system and its role in reducing the severity of the drought has been studied in the period of 1998-2001 as a severe drought in the study region. Results showed that the developed DEWS can alert droughts with overall accuracy of about 75%. Furthermore, it can determine the optimal water release in different management scenarios. So this system can be an effective tool for water resources management in areas that rely on dams.

Keywords: Drought early warning system, Uncertainty, Prediction, Drought, Optimization, ZayandehRud dam.

Received: June 12, 2010

Accepted: February 18, 2013

سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی براساس ریسک و عدم قطعیت در بهره‌برداری از سد زاینده رود همراه با ارائه راهکارهای کاهش کمبود آب

مهدی غلامزاده^۱، سعید مرید^{۲*} و مجید دلاور^۳

چکیده

برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک که اتکای بیشتری به سدها و ذخیره‌سازی آب‌های سطحی دارند، استفاده از سیستم‌های زود هنگام هشدار خشکسالی (Drought Early Warning System) با معرف‌های هیدرولوژیکی، می‌تواند برای آمادگی بیشتر و جلوگیری از کاهش شدید ذخایر آبی تا حد زیادی مفید واقع شود. در تحقیق حاضر چنین سیستمی با تکیه بر مؤلفه‌های موثر در مدیریت سدهای مخزنی توسعه یافته است. سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی توسعه داده شده شامل پنج زیر مدل اصلی: (۱) پایش خشکسالی (۲) اندازه‌گیری و پایش کمبود آب در آینده همراه با تحلیل عدم قطعیت (۳) محاسبه یک شاخص هشدار برای اعلام هشدارهای لازم (۴) تحلیل ریسک و عدم قطعیت و (۵) ارائه راهکارهای مناسب جهت کاهش کمبود آب می‌باشد که برای سد زاینده رود ارائه شده است. در طراحی این سیستم ابتدا مصارف برای یک دوره ۶ ماهه با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به سطوح احتمالاتی مختلف پیش‌بینی می‌شود، همچنین براساس اطلاعات تاریخی ذخیره آب مخزن و به روش نگاشت خود سامان یافته (Self Organizing Feature Maps) پایش خشکسالی در پنج دسته (بدون خشکسالی، خشکسالی ضعیف، خشکسالی با شدت کم، خشکسالی شدید و خشکسالی خیلی شدید) انجام می‌گردد. سپس یک شاخص هشدار خشکسالی (Drought Alert Index-DAI) با توجه به شرایط جاری مخزن سد و کمبود آب در دوره آبی ۶ ماهه، ارائه می‌شود و بر اساس نتایج حاصل از آن، سطوح مختلف هشدار از وضعیت نرمال تا شرایط کم آبی شدید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوطه مشخص می‌گردد. نهایتاً با بکار بردن یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی با هدف حداکثر سازی درآمد مخزن، سطوح کاهش رهاسازی نسبت به هر یک از مقادیر DAI با استفاده از سناریوهای مختلف بدست می‌آید. نهایتاً عملکرد این سیستم و نقش آن در کاستن از شدت خشکسالی طی دوره ۱۳۸۰-۱۳۷۷ که خشکسالی شدیدی بر منطقه حاکم بود، بررسی گردید. نتایج نشان داد که سیستم هشدار سریع ارائه شده به خوبی توانست هشدارهای لازم را با دقت ۷۵ درصد ارائه و همچنین مقدار بهینه کاهش رهاسازی از سد را با توجه به سناریوهای مختلف مدیریتی تعیین نماید. لذا این سیستم را می‌توان ابزار مناسبی برای مدیریت منابع آب در مناطقی که متکی به آب ذخیره شده در سد می‌باشند، قلمداد کرد.

کلمات کلیدی: سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی، عدم قطعیت، پیش‌بینی،

خشکسالی، بهینه‌سازی، سد زاینده رود

تاریخ دریافت مقاله: ۲۲ خرداد ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۳۰ بهمن ۱۳۹۱

1- M.Sc. of Water Resources Eng. Dept., College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor of Water Resources Eng. Dept., College of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. Email: morid_sa@modares.ac.ir

3- Assistant Professor of Water Resources Eng. Dept., College of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

(فرخ نیا و مرید، ۱۳۸۷، Sharma and Tiwari 2009)؛
(Noori et al. 2009).

با این مقدمه تحقیق حاضر تلاشی است در ادامه کارهای قبلی برای توسعه سیستم‌های زود هنگام هشدار خشکسالی برای بهره‌برداری و مدیریت مخزن سد زاینده رود به طوری که سیستم، ریسک و عدم قطعیت عوامل مربوطه و بخصوص پیش‌بینی‌ها را مد نظر قرار دهد و علاوه بر آن راهکارهایی را نیز جهت کاهش کمبود ارائه نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مورد مطالعاتی

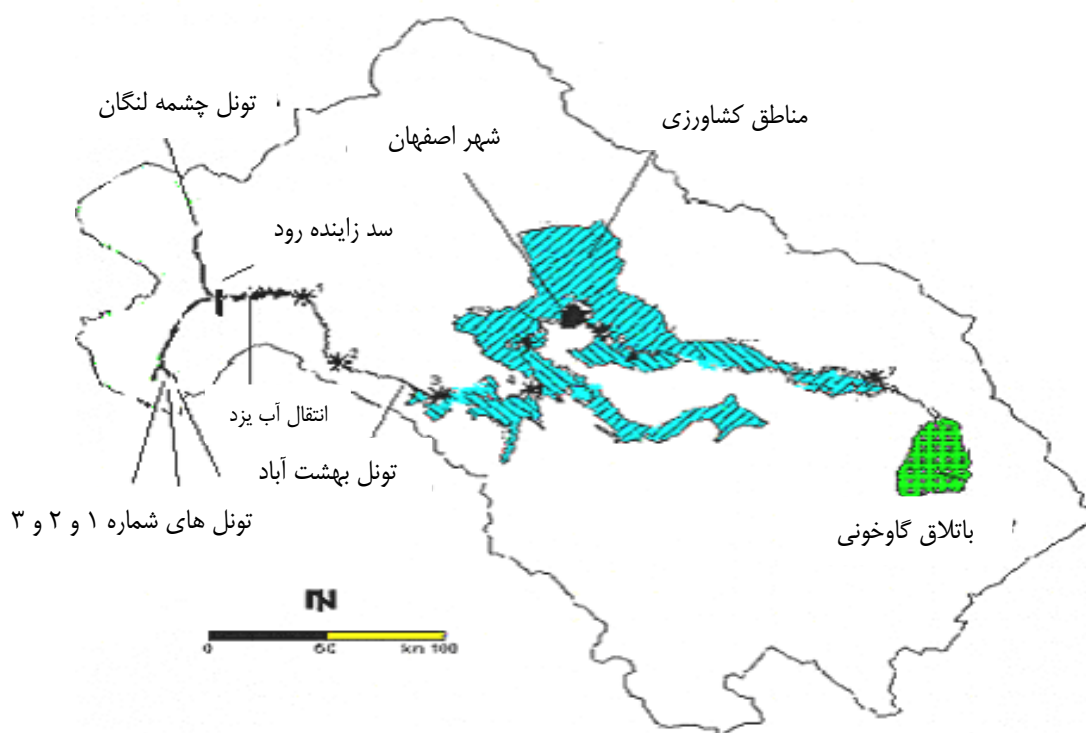
حوضه آبریز زاینده رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران واقع شده و جزء مناطق کم آب کشور به شمار می‌رود (شکل ۱). سد مخزنی زاینده رود در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد. متوسط سالانه جریان ورودی به سد ۱۶۰۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که در حدود ۶۰۰ میلیون متر مکعب آن از حوضه رودخانه کارون است (عراقی‌نژاد، ۱۳۸۴). حجم کل مخزن سد ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد که تأمین آب مورد نیاز شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاها را بر عهده دارد و نیاز کشاورزی حدود ۷۰٪ کل تقاضای پایین دست را شامل می‌شود. در این تحقیق با توجه به اولویت‌های بهره‌برداری، ابتدا نیاز شرب و صنعت تأمین می‌شود و سپس آب مازاد در اختیار بخش کشاورزی قرار می‌گیرد.

آمار و اطلاعات هواشناسی مورد نیاز در این تحقیق شامل متوسط بارندگی و دمای ماهانه بوده که از ایستگاه سینوپتیک اصفهان تهیه شده است. اطلاعات هیدرولوژیکی نیز شامل جریان ماهانه ورودی به سد، ذخیره ماهانه سد و میزان رهاسازی می‌باشد که از شرکت مدیریت منابع آب ایران برای سال‌های آبی ۱۳۶۲-۱۳۶۱ تا ۱۳۸۴-۱۳۸۳ تأمین شده است. میزان تقاضای ماهانه بخش کشاورزی نیز از جمله اطلاعات مورد نیاز می‌باشد که از تحقیق حسینی-صفا و همکاران (۱۳۸۸) تهیه شده است. در جدول ۱ میانگین دبی ورودی به سد، رهاسازی از سد، سطح آب مخزن و تقاضا در طی دوره ۱۳۸۴-۱۳۶۲ برای اراضی پایین دست سد زاینده رود آمده است.

۲-۲- مدل مفهومی سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی

ساختار مدل مفهومی سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی^۲ (DEWS) مورد نظر در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. سیستم DEWS ترکیبی از ۵ زیر مدل اصلی می‌باشد که به ترتیب عبارتند از:

امروزه شاخص‌های جهانی متنوعی برای پایش خشکسالی توسعه یافته است، ولی برای مدیریت سیستم‌های منابع آب، استفاده از معرف‌های منطقه‌ای و روش‌هایی که بیشتر مبین شرایط خاص آن‌ها باشد، می‌تواند مؤثرتر عمل کنند. به عنوان مثال برای مناطقی که وابستگی به آب ذخیره شده در سد و ذخایر سطحی دارند، وارد کردن اطلاعات تراز یا حجم ذخیره موجود برای اعلام هشدارهای لازم، بسیار سودمند خواهد بود. بدین منظور (Chang and Kleopa (1999) سیستم پایشی را بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژی ارائه دادند. مرید و پایمزد (۱۳۸۶) نیز این روش را برای سیستم آب استان تهران مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش نمودند که نسبت به پایش تنها با متغیرهای هواشناسی از حساسیت بیشتری برخوردار است. در بخش کشاورزی، (Liu and Steinmetz (1993) یک سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی را برای برزیل ارائه دادند که شامل سه زیر سیستم: (۱) شاخص آب و هوایی، (۲) ارزیابی ماهواره‌ای و (۳) پیش‌بینی بازده محصولات بود. (Lohani and Loganathan (1997) برای یک سیستم زود هنگام هشدار در مدیریت خشکسالی کشاورزی شاخص پالم را به کار گرفتند. همچنین در این زمینه (Kumar (1998) برای توسعه مدل زود هنگام هشدار برای خشکسالی کشاورزی در هندوستان، از محصول گندم که عمده محصول این نواحی است، به عنوان شاخص آسیب پذیری و هشدار استفاده نمود. در این راستا نیز (Huang and Yuan (2004) یک سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی برای بهره‌برداری زمان واقعی مخازن چندگانه ارائه نمودند. غلام زاده (۱۳۸۸) سیستم پیشنهادی این محققین را با تغییراتی برای سد زاینده رود استفاده کردند و سطوح مختلف هشدار را برای دوره پیش‌بینی مورد نظر مشخص کردند. اما نقطه ضعفی که در این مطالعات به چشم می‌خورد، عدم توجه کافی به بحث ریسک و عدم قطعیت‌ها بوده است. در جهت رفع این نقیصه (Hung and Chuo (2008) سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی را با استفاده از رویکرد ریسک برای بهره‌برداری از مخزن با توجه به میزان ذخیره آن بکار بردند. استفاده از اطلاعات آتی نیز مانند ورودی‌ها و مصارف آینده در کنار اطلاعات موجود از وضعیت منابع آب، در ارتقاء این سیستم‌ها می‌تواند بسیار مؤثر واقع گردند. لذا مؤلفه دیگری که می‌تواند به این سیستم اضافه شود، مدل پیش‌بینی است. در این رابطه گزارشات مثبتی از عملکرد مدل شبکه عصبی^۱ (ANN) توسط محققین نقل شده است (Dawson and Wilby (2001); Maier and Dandy (2000); Gupta et al. (2000)). ضمن اینکه در مراجع جدید برای تحلیل عدم قطعیت این مدل‌ها روش‌های مناسبی ارائه شده است



شکل ۱- شماتیک منطقه مطالعاتی

جدول ۱- میانگین دبی ورودی، رهاسازی، تقاضا (m³/s) و ارتفاع سطح آب سد (m) در طی دوره ۱۳۸۴-۱۳۶۲ در منطقه مطالعاتی

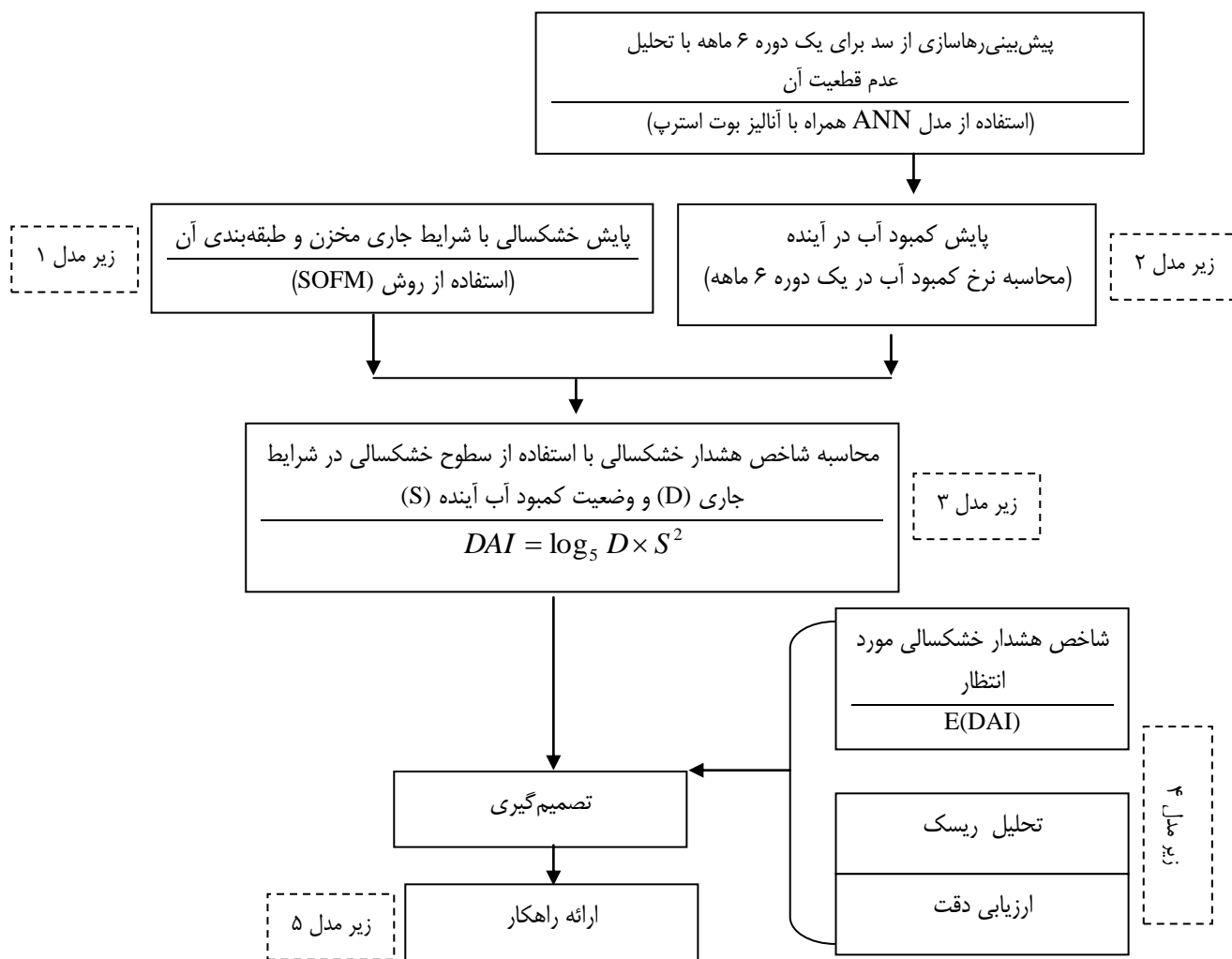
میانگین	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دبی ورودی (Q _i)	۱۱۲/۱	۱۲۰/۵۷	۷۱/۳۹	۵۱/۲۹	۲۹/۰۷	۱۶/۶۳	۱۴/۹۶	۲۰/۲۷	۲۵/۴۳	۳۲/۸	۲۸/۱	۶۰/۳۶
رهاسازی (R _i)	۱۱۰/۰۵	۱۲۱/۹۴	۷۱/۷۷	۴۶/۳۶	۲۸/۶۳	۱۶/۶۸	۱۸/۱۴	۲۰/۵۶	۳۴/۰۱	۲۴/۱۴	۲۱/۶	۵۱/۲۷
تقاضا (D _e)	۴۰/۵	۵۶/۷۱	۶۰/۷۶	۴۸/۶۱	۴۸/۶۱	۳۶/۴۵	۱۶/۲	۲۸/۳۵	۲۴/۳	۱۲/۵	۱۲/۵	۲۰/۲۵
سطح آب سد	۲۰۴۴/۷۳	۴۵۲۰/۵۰	۲۰۳۹/۰۹	۲۰۳۶/۳۲	۲۰۳۶/۲۸	۲۰۳۴/۲۹	۲۰۲۵/۷	۲۰۳۵/۱۴	۲۰۳۴/۵۱	۲۰۳۶	۲۰۳۸/۶۹	۲۰۴۱/۱۱

آب مخزن در شرایط مختلف هیدرولوژیکی به ۵ طبقه شامل: (بدون خشکسالی، خشکسالی ضعیف، خشکسالی با شدت کم، خشکسالی شدید و خشکسالی خیلی شدید) تقسیم شدند. بدین منظور از روش SOFM استفاده گردید (Kohonen, 2001) که قابلیت دسته‌بندی اطلاعات بر اساس مشاهدات طی دوره آماری را دارد است. نهایتاً طبقات خشکسالی با توجه به سطح آب مخزن برای ماه‌های مختلف مطابق شکل ۳ از "بدون خشکسالی" تا "خشکسالی خیلی شدید" مشخص شد و به صورت D برابر ۱ تا ۵ ارائه گردید. بدین منظور عملکرد روش SOFM با استفاده از آزمون t-Student ارزیابی شد و داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ طبقه بندی شدند.

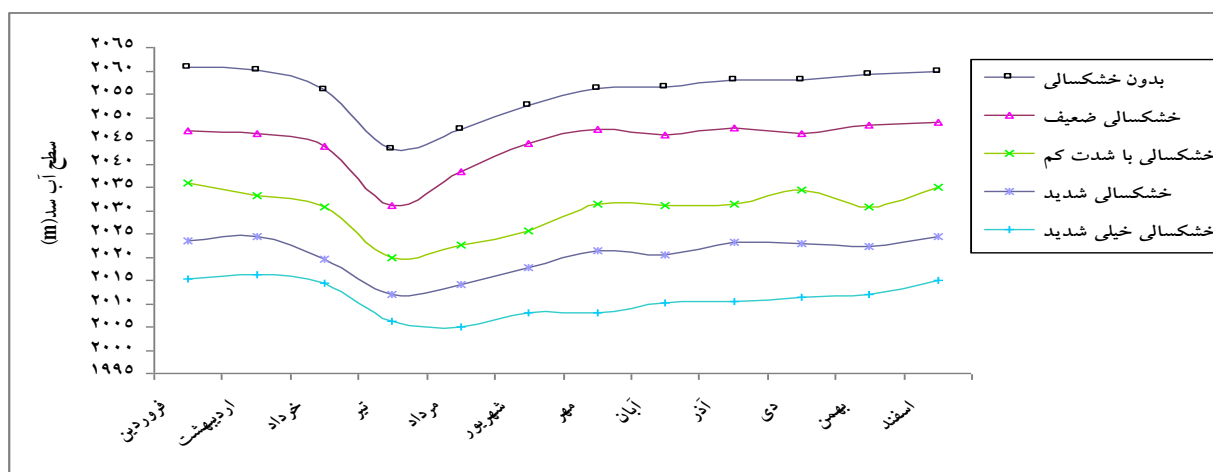
(۱) پایش خشکسالی بر اساس شرایط جاری مخزن (D)، (۲) اندازه‌گیری و پایش کمبود آب در آینده همراه با تحلیل عدم قطعیت آن، (۳) محاسبه یک شاخص هشدار خشکسالی^۴ (DAI) با استفاده از سطوح خشکسالی در شرایط جاری (D) و وضعیت کمبود آب در زاینده (S) به منظور اعلام هشدارهای لازم و تنظیم مدیریت سد بر اساس آن، (۴) تحلیل ریسک و عدم قطعیت و (۵) ارائه راهکارهای مناسب جهت مدیریت بهینه رهاسازی از مخزن سد. در ادامه شرح مختصری در مورد هر یک از زیر مدل‌ها ارائه می‌گردد.

۲-۱-۲- زیر مدل پایش خشکسالی

برای پایش خشکسالی ابتدا سری مشاهداتی از اطلاعات تراز سطح



شکل ۲- اجزاء سیستم زودهنگام هشدار خشکسالی (DEWS) و نحوه ارتباط آن‌ها



شکل ۳- تقسیم‌بندی خشکسالی بر اساس سطح آب در مخزن سد زاینده رود

۲-۲-۲- زیر مدل پایش کمبود آب

که به عنوان مثال چنانچه DR بین ۵۰ تا ۶۰ درصد قرار گیرد، سیستم در سطح کمبود آب ۴ قرار گرفته است (S=۴).

جدول ۲- طبقه‌بندی سطوح مختلف کمبود برای بخش کشاورزی

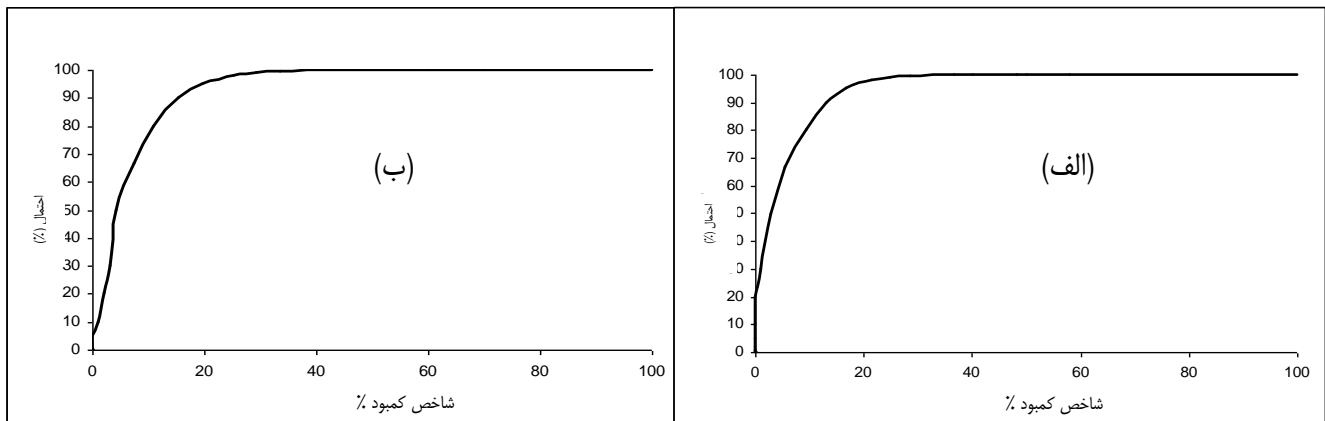
شاخص کمبود (DR) (%)	سطوح کمبود آب (S)
۰	نرمال (۱)
۰-۳۵	کمی زیاد (۲)
۳۵-۵۰	نسبتاً زیاد (۳)
۵۰-۶۰	زیاد (۴)
> ۶۰	خیلی زیاد (۵)

برای محاسبه میزان کمبود در احتمالات مختلف ابتدا توابع توزیع پارامترهای مورد نیاز در محاسبه این شاخص مشخص شد و سپس با توجه به آن و با استفاده از روش مونت کارلو، تابع چگالی احتمال DR برای هر یک از ماه‌ها به دست آمد. اشاره می‌گردد که روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای شبیه‌سازی متغیرها و روابط بین آن‌ها استفاده می‌کند. بدین صورت که هر متغیر با استفاده از اعداد تصادفی تولید شده و تابع توزیع احتمالاتی مربوط به آن، شبیه‌سازی شده و سپس متناظر با آنها خروجی هر مدل یا معادله محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب با نمونه‌گیری و اجرای مکرر مدل، تابع توزیع احتمال نتایج خروجی آن با توجه به نحوه تغییرات متغیرهای ورودی تعیین می‌گردد (Eckhardt *et al.*, 2003). به عنوان نمونه تابع چگالی احتمال DR برای ماه‌های خرداد و شهریور سال ۱۳۸۱ در شکل (۴- الف و ب) ارائه شده است. بدین ترتیب برای هر احتمال P، بر اساس تابع چگالی احتمال رهاسازی از سد در ماه مورد نظر، DR مربوط شکل ۴ محاسبه شده و سپس از جدول ۲، سطح کمبود آب (S) برآورد می‌گردد.

برای این قسمت، پیش‌بینی رهاسازی از سد مورد نیاز می‌باشد که به شکلی مبین نیاز آبی پایین دست سیستم است. بدین منظور با استفاده از شبکه‌های عصبی و از نوع شبکه پیشرو (ASCE, 2002)، این پیش‌بینی‌ها انجام گردید. بهترین ورودی‌ها برای پیش‌بینی رهاسازی ۶ ماه آبی شامل جریان ورودی، دمای ماهانه و شماره ماه مورد نظر بود که مؤثرترین عملکرد را به همراه داشتند. داده‌های فوق طی سال‌های آبی ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۴ تهیه و به مدل شبکه عصبی معرفی گردید (۷۰ درصد آن برای آموزش، ۲۰ درصد برای صحت‌یابی و ۱۰ درصد برای آزمون مدل). کارایی مدل با استفاده از ضریب تعیین R^2 ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) و متوسط قدر مطلق خطا (MAE) بررسی شد. به عنوان نمونه R^2 نهایی برای پیش‌بینی رهاسازی ۰/۷۵ بدست آمد که رقم قابل قبولی است. در ادامه برای تحلیل عدم قطعیت مدل شبکه عصبی، از روش باز نمونه‌گیری بوت استرپ^۸ استفاده گردید که شرح آن در مرجع فرخ نیا و مرید (۱۳۸۷) قابل دسترس است. همچنین با توجه به نحوه مدیریت و بهره‌برداری مرسوم از سد، میزان کمبود آب در قالب شاخص کمبود، در یک دوره ۶ ماهه و با در نظر گرفتن مقادیر تقاضا (حاصل از پیش‌بینی قبل) در ماه‌های مختلف، مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود (Huang and Chou, 2008):

$$DR = \begin{cases} \frac{(D_e - R_t)}{D_e} \times 100 & D_e > R_t \\ 0 & D_e \leq R_t \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه شاخص کمبود، R_t رهاسازی از سد و D_e مقادیر تقاضا برای ماه‌های مختلف سال می‌باشد. در ادامه با محاسبه شاخص DR بر اساس داده‌های تاریخی، مشابه تقسیم‌بندی خشکسالی که در قبل آمد (روش SOFM)، پنج سطح کمبود (S) شامل: نرمال، کمی زیاد، نسبتاً زیاد، زیاد و خیلی زیاد در سطح اطمینان ۹۵٪ برای آن بدست آمد که در جدول ۲ قابل مشاهده است. مقادیر جدول بدین معناست



شکل ۴- توابع چگالی احتمال تجمعی DR، (الف) در خرداد ماه و (ب) در شهریور ماه ۱۳۸۱

۲-۳- زیر مدل محاسبه شاخص هشدار خشکسالی

همان گونه که در شکل ۲ آمد، برای مشخص کردن سطوح هشدار خشکسالی با استفاده از مدل DEWS از یک شاخص هشدار خشکسالی بنام DAI استفاده می‌گردد که در ادامه شرح آن می‌آید. در تشریح روش و نحوه مشخص کردن تعداد سطوح هشدار، فرض می‌شود که یک پدیده تصادفی گسسته (X)، دارای n رخداد می‌باشد. اندازه‌گیری عدم قطعیت این پدیده می‌تواند به صورت زیر تعریف گردد:

$$U(x) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (2)$$

به طوری که U(x) عدم قطعیت و P_i نشان دهنده احتمال و رخداد i می‌باشد (برای یک پدیده قطعی، $U(x)=0$). در شرایط رخداد یکسان $P_i = 1/n$ است، سپس:

$$U(x) \sum_{i=1}^n \log_2\left(\frac{1}{n}\right) = \log_2 n \quad (3)$$

به عنوان مثال برای یک سکه سالم، $U(x) = \log_2(2) = 1.0$ و برای یک تاس سالم $U(x) = \log_2(6) = 2.58$ است. بدین معنی که تاس دارای عدم قطعیت بیشتری نسبت به سکه می‌باشد برای یک پدیده‌ی پیوسته شامل متغیرهای x و y معادله (۲) می‌تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$U(x, y) = -\sum_{i,j} P_{ij} \log_2(P_{ij}) \quad (4)$$

به طوری که P_{ij} احتمال پیوسته در ارتباط با هر جفت از مقادیر فضای x, y و $U(x, y)$ ، در واقع تخمینی از تعداد وضعیت‌های x و y می‌باشد. از معادله (۴) متناسب با اهداف این تحقیق n_1 وضعیت خشکسالی (x) و n_2 وضعیت کمبود آب (y) را در بر می‌گیرد که با توجه به تقسیم بندی مرسوم آن، ۵ وضعیت برای هر کدام از متغیرها در نظر گرفته شده است. در نتیجه $U(x, y) = \log_2(n_1 n_2) = \log_2(25) = 5$ و بنابراین عدم قطعیتی برابر ۵ دارد.

بر اساس معادله (۴)، شاخص DAI با در نظر گرفتن سطوح هشدار خشکسالی بر اساس شرایط جاری مخزن (D) و طبقه شدت کمبود آب در یک دوره ۶ ماهه (S)، به منظور مشخص کردن شدت خشکسالی در مدل DEWS به وسیله یک معادله غیر خطی، به صورت DS^k با رابطه لگاریتمی زیر تعیین می‌گردد (Huang and Chou, 2005):

$$DAI = \log_{n_1}(D) + k \log_{n_2}(S) \quad (5)$$

که در آن k یک عدد صحیح، n_1 مربوط به طبقات خشکسالی، n_2 مربوط به طبقات کمبود آب و $0 \leq DAI \leq k+1$ می‌باشد. در معادله (۵) به شرایط کمبود در آینده، وزن بیشتری داده شده است. Huang and Yuan, (2004) برای اولین بار از یک رابطه خطی در محاسبه این شاخص استفاده کردند. از طرفی Huang and Chou, (2005) با تصحیح این رابطه و دادن وزن بیشتری به وضعیت کمبود آب ($k=2$) و با استفاده از فرم لگاریتمی به نتایج بهتری دست یافتند. واضح می‌باشد که هر چه DAI به صفر نزدیک گردد، نشان دهنده شرایط مساعدتری از لحاظ وضعیت منابع آب خواهد بود. مقدار k در تعیین سیگنال‌های هشدار نیز تأثیرگذار خواهد بود که در این تحقیق نیز مقدار ۲ برای آن در نظر گرفته شده است. نهایتاً بر اساس معادله (۶) مقادیر به دست آمده از شاخص در پنج دسته و سطوح هشدار^۱ (WL) نسبت به آن مطابق جدول ۳ تقسیم‌بندی گردید:

$$DAI = \log_5 DS^2, \forall D = 1, 2, \dots, 5; S = 1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$

جدول ۳- مقادیر شاخص هشدار خشکسالی و سطوح هشدار

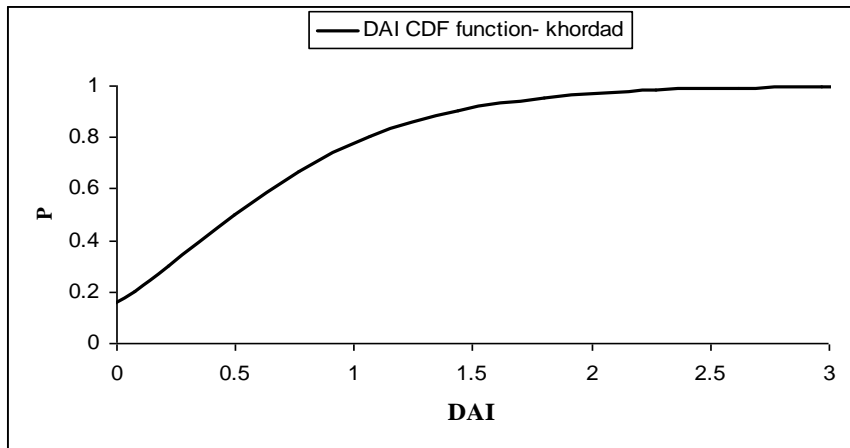
مختلف نسبت به آن

شاخص هشدار خشکسالی (DAI)	سطوح هشدار (WL)
$0 \leq DAI \leq 1$	سبز
$1 < DAI \leq 1.5$	آبی
$1.5 < DAI \leq 2$	زرد
$2 < DAI \leq 2.5$	نارنجی
$2.5 < DAI \leq 3$	قرمز

جدول ۳ برای $n_1 = n_2 = 5$ و تعداد ۵ سیگنال هشدار، مقادیر DAI و میزان کاهش رهاسازی نسبت به مقادیر مختلف آن را با در نظر گرفتن $k=2$ نشان می‌دهد.

۲-۳-۴- زیر مدل تحلیل ریسک و عدم قطعیت DAI

مانند قبل برای برآورد تابع توزیع احتمالاتی شاخص DAI با توجه به عدم قطعیت موجود در شرایط کمبود آب از روش مونت کارلو استفاده گردید و نهایتاً با توجه به آن مقادیر شاخص هشدار خشکسالی با احتمالات مختلف به منظور تصمیم‌گیری مناسب تعیین شد. بدین منظور پس از محاسبه توابع توزیع شاخص DR مطابق با آنچه در بخش ۲-۲-۲ بیان شد، با استفاده از روش مونت کارلو و نمونه‌گیری‌های تصادفی، تابع توزیع احتمالاتی مربوط به شاخص DAI شبیه‌سازی شد. به عنوان نمونه تابع توزیع احتمال تجمیعی DAI در خرداد ۱۳۸۱ در شکل ۵ نشان داده شد. بدین ترتیب،



شکل ۵- تابع چگالی احتمال تجمعی DAI در خرداد ماه ۱۳۸۱

استاندارد^{۱۱} مقایسه شد. در سناریو C، مدل تخصیص آب کشاورزی برای بهره‌برداری مخزن سد زاینده رود با استفاده از تلفیق نتایج مدل بهینه‌سازی Moghadasi *et al.* (2009) و مدل فازی توسعه یافت. بدین منظور آن‌ها با اتکا به مقادیر بهینه رهاسازی از مخزن و تقاضای متغیر بخش کشاورزی با استفاده از روش‌های خودکار، توابع عضویت و قواعد فازی را جهت تعیین خروجی مخزن سد استخراج نمودند. برای شرح بیشتر این روش‌ها مراجعه به مراجع ذکر شده، توصیه می‌گردد.

۲-۵-۱- بهینه‌سازی ضرایب کاهش رهاسازی از مخزن سد

برای محاسبه درصد کاهش رهاسازی نسبت به هر یک از سطوح DAI، از یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی (NLP) به منظور حداکثر سازی در آمد سالانه مخزن برای هر یک از سناریوهای مدیریتی بالا استفاده شد. بدین منظور تابع هدف مسأله با توجه به تابع درآمد سالانه مخزن و بر اساس تحقیق مقدسی (۱۳۸۸) مطابق با معادله زیر در نظر گرفته شد:

$$f(Q) = -0.000000669Q^2 + 244.58Q - 1010531575835 \quad (7)$$

که در آن Q مقدار خروجی سالانه از مخزن سد برای بخش کشاورزی می‌باشد. در این صورت اگر مقدار رهاسازی ماهانه بخش کشاورزی R_t باشد، مقدار Q از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q = \sum_{t=1}^{12} R_t \quad (8)$$

قیودات و محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی نیز با توجه به معادلات مورد استفاده در محاسبه شاخص DAI شامل معادلات (۱) و (۵) و همچنین معادله بیلان مخزن در نظر گرفته شد. نمایش ریاضی مسأله بهینه‌سازی تابع هدف و قیودات مربوط به آن مطابق زیر هستند:

احتمال وقوع هر یک از مقادیر DAI قابل برآورد می‌شود. به عنوان مثال با توجه به شکل ۵ احتمال اینکه مقدار شاخص در خرداد ۱۳۸۱ کمتر از ۱/۵ باشد، برابر ۸۰ درصد است.

۲-۲-۵- زیر مدل ارائه راهکاری جهت مدیریت بهینه

منظور از ارائه راهکار در واقع تعیین میزان نرخ کاهش رهاسازی از مخزن بر اساس شاخص هشدار خشکسالی (DAI) است. بدین منظور از ۳ سناریو مدیریتی استفاده شد که عبارتند از: (۱) استفاده از آمار ثبت شده ورودی، خروجی و ذخیره مخزن (سناریو A) که مبین مدیریت فعلی سد است، (۲) مدیریت سد با مقدار تقاضای ثابت و رهاسازی بر اساس مدل بهینه‌سازی و قوانین محدود کننده (Hedging) برگرفته از تحقیق Moghadasi *et al.* (2009) (سناریو B) و (۳) مدیریت سد با استفاده از مدل بهینه‌سازی در شرایط تقاضای متغیر برگرفته از تحقیق حسینی- صفا و همکاران (۱۳۸۸)، (سناریو C). بر اساس روش‌های مدیریتی اعمال شده در بهره‌برداری از مخزن سد و محاسبه شاخص هشدار با توجه به آن و اعمال مدل بهینه‌سازی، میزان نرخ کاهش رهاسازی از مخزن برای هر یک از سناریوها تعیین شد.

در سناریوی B راهبردهای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با تاکید بر مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در دوره‌های خشکسالی ارائه گردیده است. در این سناریو محققین ابتدا بهینه‌سازی تخصیص آب را برای تقاضا در سه لایه شامل: تخصیص بین شبکه‌ای، محصولات درون هر شبکه و مراحل مختلف رشد آن‌ها انجام دادند. سپس مدل‌سازی برای بخش عرضه با استفاده از قوانین محدود کننده (Hedging) با هدف حداکثر کردن در آمد و حداقل نمودن خسارات خشکسالی به انجام رسید و نتایج آن را با قاعده بهره‌برداری

$$\text{Objective Function } \text{Max}(Z) = \sum f(Q) = \{f_1(Q), f_2(Q) \dots, f_n(Q)\} \quad \forall Q = \sum_{i=1}^{12} R_i \times (1 - \alpha_{i-1})$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} 0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2; \alpha_2 < \alpha_3; \alpha_3 < \alpha_4; \alpha_4 < \alpha_5; \alpha_5 < 1 \\ 0 \leq DR = \frac{(De_{j,i} - R_{j,i} \times (1 - k_{j,i-1}))}{De_{j,i}} \leq 1 \\ \text{if } \begin{cases} DR_{j,i} = 0, S_{j,i} = 1 \\ 0 < DR_{j,i} \leq .35, S_{j,i} = 2 \\ .35 < DR_{j,i} \leq 0.5, S_{j,i} = 3 \\ 0.5 < DR_{j,i} \leq 0.6, S_{j,i} = 4 \\ DR_{j,i} > 0.6 \quad S_{j,i} = 5 \end{cases} \\ 0 \leq DAI_{j,i} = \text{Log}_5 D_{j,i} \times S_{j,i}^2 \leq 3 \\ \text{if } \begin{cases} 0 \leq DAI_{j,i} \leq 1, k_{j,i-1} = \alpha_1 \\ 1 < DAI_{j,i} \leq 1.5, k_{j,i-1} = \alpha_2 \\ 1.5 < DAI_{j,i} \leq 2, k_{j,i-1} = \alpha_3 \\ 2 < DAI_{j,i} \leq 2.5, k_{j,i-1} = \alpha_4 \\ DAI_{j,i} > 2.5 \quad k_{j,i-1} = \alpha_5 \end{cases} \\ ST_{t+1} = ST_t + Q_{INT} - R_t \\ ST_t \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

فروردین و دیگری ابتدای مهر ماه به انجام رسیده است. با توجه به پیش‌بینی انجام شده در دوره‌های ۶ ماهه و محاسبه سطوح کمبود آب نسبت به هر یک از ماه‌ها در آن و محاسبه سطوح شدت (D) اول هر یک از دوره‌ها، مقادیر هشدار بر اساس احتمالات مختلف به دست آمده است.

همان‌طور که از جدول ۴ مشاهده می‌گردد، ارزیابی پایش خشکسالی با اطلاعات سطح آب مخزن در این سال نشان می‌دهد که وضعیت خشکسالی در ماه‌های مختلف آن بین سطوح خشکسالی با شدت کم (D=۳)، شدید (D=۴) و خیلی شدید (D=۵) در نوسان است. از طرفی مقادیر احتمالاتی پیش‌بینی شده کمبود (S)، حاکی از آن می‌باشد که به غیر از ماه‌های فروردین، اردیبهشت، دی، بهمن و اسفند، در بقیه ماه‌های سال شرایط حاد می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به سطوح مختلف شدت خشکسالی (D) و کمبود (S)، مقادیر DAI (محاسباتی توسط مدل DEWS) و همچنین سطوح هشدار (WL) بر اساس احتمالات مختلف برای ماه‌های فروردین تا اسفند مشخص می‌شود. به عنوان مثال WL در احتمالات مختلف در شهریور ماه از "زرد" تا "قرمز" تغییر می‌کند. برای انتخاب سطح هشدار مناسب و نهایتاً تصمیم‌گیری بر اساس آن، لازم است تا دقت مدل در احتمالات مختلف ارزیابی شود که در ادامه خواهد آمد.

۳-۲- اجرای مدل DEWS با قابلیت به هنگام شدن در هر ماه در سال آبی ۱۳۸۲
سیستم پیش‌بینی در این قسمت مانند قبل است و تنها تفاوت آن این

در این معادلات n تعداد سال‌ها، Q حجم رهاسازی سالانه از سد، D طبقه شدت خشکسالی، De مقدار تقاضای بخش کشاورزی، DAI شاخص هشدار خشکسالی، α_i درصد کاهش رهاسازی از سد نسبت به هر یک از سطوح هشدار، DR شاخص کمبود، ST ذخیره مخزن، Q_{IN} ورودی به مخزن و S نیز طبقه شدت کمبود می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل بهینه‌سازی فوق شامل مقدار DAI اولیه، رهاسازی ماهانه (R_t)، ورودی به مخزن (Q_{IN})، مقادیر سطوح خشکسالی در هر یک از ماه‌ها (D) و همچنین مقادیر تقاضا برای هر یک از ماه‌های سال (De) می‌باشد. نهایتاً خروجی این مدل شامل سطوح درصد کاهش رهاسازی بر اساس مقادیر مختلف شاخص هشدار خشکسالی α_i و مقادیر تابع هدف (z) می‌باشد. فلوچارت این مراحل برای تشریح بهتر مدل بهینه‌سازی در شکل ۶ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

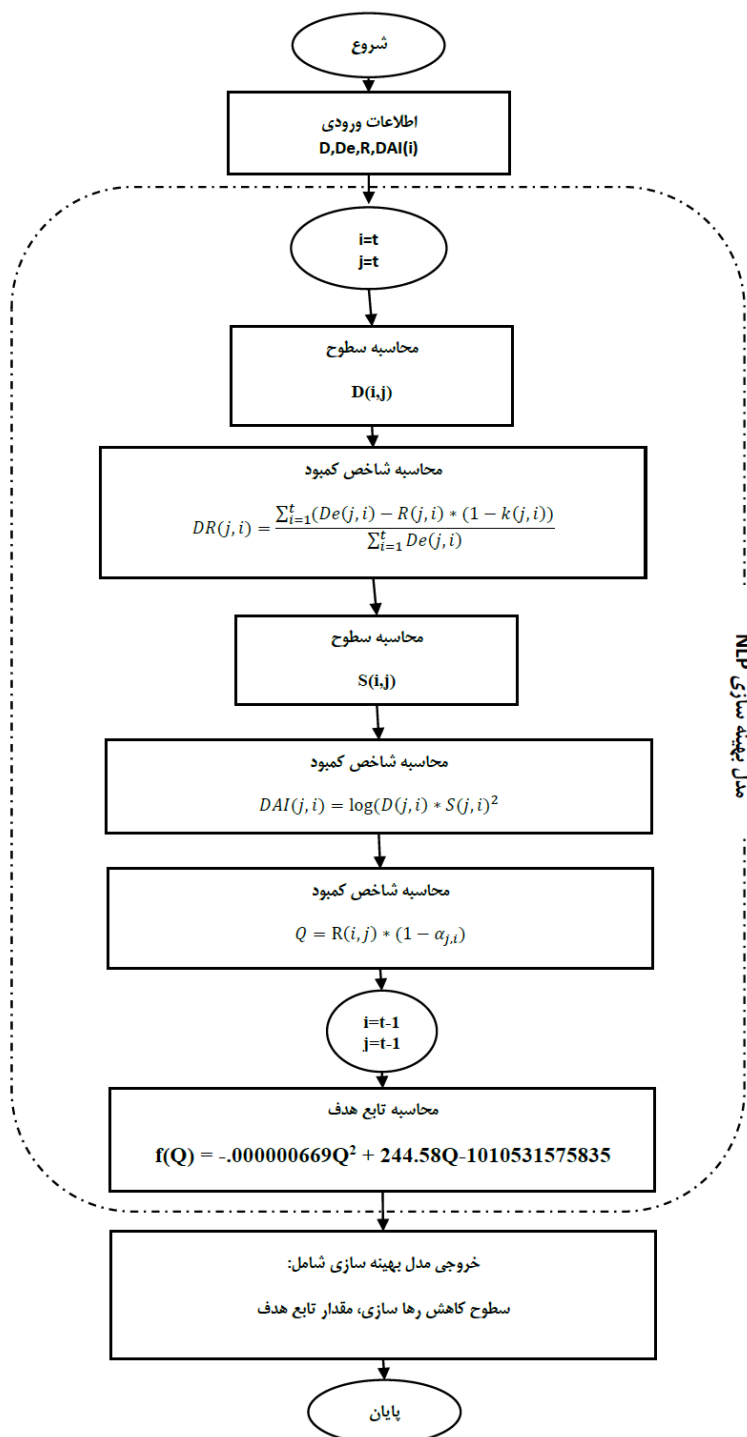
برای شرح مدل و همچنین ارزیابی عملکرد مدل با توجه به عدم قطعیت مدل پیش‌بینی، نحوه اجرای سیستم برای خشکسالی سال ۱۳۸۲ در دو حالت با به هنگام شدن پیش‌بینی‌ها و بدون آن بیان می‌گردد:

۳-۱- اجرای مدل DEWS بدون قابلیت به هنگام شدن

جدول ۴ خروجی مدل برای سال ۱۳۸۲ و رویکرد بدون قابلیت به هنگام شدن ارائه شده است. پیش‌بینی‌ها در دو تاریخ، یکی ابتدای

به عنوان نمونه جداول ۵ و ۶ نتایج حاصل از اجرا مدل DEWS که خود نوعی تحلیل ریسک برای مقادیر DAI می‌باشد، در ماه فروردین و اردیبهشت سال ۱۳۸۲ را نشان می‌دهد. تغییرات نتایج بعد از احتمالات ۵۰٪ بیشتر قابل مشاهده هستند.

است که با گذشت زمان پیش‌بینی‌ها به هنگام می‌گردند. به عنوان مثال پس از پیش‌بینی فروردین تا شهریور، در انتهای فروردین و بعد از ورود اطلاعات جدید، از اردیبهشت تا شهریور مجدداً پیش‌بینی‌ها تکرار و به هنگام می‌شوند. همین روال برای سایر ماه‌ها نیز تکرار خواهد شد.



شکل ۶- الگوریتم مدل بهینه‌سازی درصد کاهش رها سازی از مخزن

جدول ۴ - مدیریت خشکسالی مخزن سد زاینده رود در سال ۱۳۸۲

میانگین	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
سطح آب سد (m)	۲۰۳۳/۳	۲۰۲۵/۸	۲۰۱۸/۴	۲۰۱۷/۱	۲۰۱۸/۹	۲۰۱۷/۶	۲۰۱۹/۵	۲۰۱۸/۵	۲۰۱۵/۹	۲۰۱۶/۲	۲۰۱۷/۱	۲۰۳۲/۶
سطوح شدت خشکسالی (D)	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۵	۵	۳
وضعیت کمبود آب در آینده (دوره ۶ ماهه) با احتمالات مختلف (S)												
P(=۱۰٪)	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۲	۱	۱
P(=۳۰٪)	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۳	۳	۳	۳	۱	۱
P(=۵۰٪)	۱	۱	۲	۳	۳	۲	۴	۳	۳	۳	۱	۱
P(=۷۰٪)	۲	۱	۳	۳	۳	۲	۵	۴	۴	۴	۱	۱
P(=۸۰٪)	۳	۲	۴	۴	۴	۳	۵	۴	۴	۴	۲	۲
P(=۹۰٪)	۴	۴	۵	۵	۴	۳	۵	۴	۴	۴	۲	۳
P(=۹۵٪)	۵	۵	۵	۵	۵	۴	۵	۴	۵	۵	۳	۳
سطوح هشدار خشکسالی (WL)												
P(=۱۰٪)	G	G	G	O	O	G	O	Y	Y	Y	G	G
P(=۳۰٪)	G	G	G	O	O	G	O	O	O	O	G	G
P(=۵۰٪)	G	G	Y	R	R	G	R	O	O	O	G	G
P(=۷۰٪)	G	G	O	O	O	Y	R	R	O	O	G	G
P(=۸۰٪)	O	Y	R	R	R	O	R	R	R	R	Y	Y
P(=۹۰٪)	O	R	R	R	R	O	R	R	R	R	Y	Y
P(=۹۵٪)	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	O	O

R = سبز، G = آبی، B = زرد، Y = نارنجی، O = قرمز

گردید، X_{ij} تعداد مشاهدات مربوط به هشدار خاص می‌باشد، به طوری که i ، مبین مقدار به دست آمده از مدل DEWS و j مقادیر واقعی آن می‌باشد. مقدار پیش‌بینی در صورت $i=j$ "درست"، $i < j$ "برآورد دست پایین" و اگر $i > j$ "برآورد دست بالا" است.

جدول ۵ - تحلیل ریسک در فروردین ماه سال ۱۳۸۲

P (%)	اردیبهشت (t=1)	خرداد (t=2)	تیر (t=3)	مرداد (t=4)	شهریور (t=5)	مهر (t=6)
	DAI	DAI	DAI	DAI	DAI	DAI
۱	G	G	G	G	G	G
۱۰	G	G	G	G	G	G
۳۰	G	G	G	G	G	G
۴۰	G	G	G	G	G	G
۵۰	G	G	G	G	G	G
۶۰	G	G	G	G	G	G
۷۰	G	G	G	G	B	B
۸۰	G	G	G	B	B	B
۹۰	G	G	G	B	B	B
۹۵	G	G	B	B	Y	Y

جدول ۶ - تحلیل ریسک در اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۲

P (%)	خرداد (t=1)	تیر (t=2)	مرداد (t=3)	شهریور (t=4)	مهر (t=5)	آبان (t=6)
	DAI	DAI	DAI	DAI	DAI	DAI
۱	G	G	G	G	G	G
۱۰	G	G	G	G	G	G
۳۰	G	G	G	G	G	G
۴۰	G	G	G	G	G	G
۵۰	G	B	B	B	B	B
۶۰	G	B	B	B	B	B
۷۰	G	G	Y	Y	B	B
۸۰	G	Y	Y	Y	Y	Y
۹۰	B	Y	Y	O	Y	Y
۹۵	B	O	O	O	Y	Y

۳-۳- ارزیابی دقت و اعتبار سنجی مدل

برای اعتبار سنجی و ارزیابی دقت مدل از داده‌های تاریخی شامل جریان ماهانه، سطح آب مخزن، مقادیر رهاسازی ماهانه و تقاضای آب از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۴ استفاده شد. بدین منظور از یک ماتریس خطا، مطابق جدول ۷ استفاده گردید که جزئیات این روش در تحقیق قبلی محققین آمده است (غلام زاده، ۱۳۸۸). در این ماتریس فرض

"ریسک پذیری مثبت"^{۱۷} ، $UE < OE$ "ریسک‌پذیری منفی"^{۱۸} و $UE = OE$ "بدون ریسک" را نشان می‌دهد. همچنین مقدار $OA + UE + OE$ برابر یک می‌باشد.

۳-۳-۱- محاسبه شاخص ریسک در مدل DEWS

پس از تشکیل ماتریس خطا برای به دست آوردن شاخص ریسک در سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی از معادله زیر استفاده شد:

$$RI = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} (i - j) \cdot X_{ij} \quad (15)$$

که در آن مؤلفه ماتریس خطا است، به طوری که i مربوط به مقدار پیش‌بینی شده و j مربوط به مقادیر واقعی می‌باشد. با این تعریف $RI < 0$ ، $RI = 0$ ، و $RI > 0$ به ترتیب نشان دهنده وضعیت ریسک‌پذیری مثبت، بدون ریسک و ریسک‌پذیری منفی برای تصمیم‌گیری می‌باشند. برای بررسی دقت مدل و همچنین ریسک‌پذیری آن در احتمالات مختلف، ماتریس خطا با توجه به سطوح هشدار تولید شده بر اساس احتمال $0/01$ تا $0/99$ تشکیل شد. به عنوان نمونه جدول ۸ ارزیابی دقت مدل را در احتمال $P = 0/7$ را نشان می‌دهد.

بر اساس معادله (۱۰) دقت کلی مدل در طول دوره شبیه‌سازی $74/7$ درصد به دست آمد. شکل ۷ تغییرات دقت مدل نسبت به احتمالات مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دقت مدل در احتمال بین $0/6$ و $0/7$ رخ می‌دهد که در این فاصله $UE = OE$ است و مطابق شرح قبل، کم‌ترین ریسک در تصمیم‌گیری مربوط به این بازه می‌باشد.

همچنین مقدار تغییرات شاخص ریسک در احتمالات مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این روش از ۳ نوع معیار ارزیابی شامل: دقت کلی^{۱۲} (OA)، دقت استفاده‌کننده^{۱۳} (UA_i) و زامین دقت تولید شده^{۱۴} (PA_j) استفاده گردید که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^5 X_{ii}}{N} \quad (10)$$

$$UA_i = \frac{X_{ii}}{\sum_{j=1}^5 X_{ij}} \quad \forall i \quad (11)$$

$$PA_j = \frac{X_{jj}}{\sum_{i=1}^5 X_{ij}} \quad \forall j \quad (12)$$

به طوری که N تعداد کل مشاهدات در طول دوره می‌باشد، X_{ij} یعنی تعداد دفعاتی که سیستم در وضعیت واقعی i قرار داشته و به درستی هم i را اعلام کرده است. X_{ij} یعنی تعداد دفعاتی که سیستم در وضعیت i اعلام کرده در صورتی که وضعیت واقعی j بوده است. در واقع همان‌طور که در قسمت بالا گفته شد، اگر $i=j$ باشد، اعلام هشدار درست است.

همچنین خطای برآورد دست پایین^{۱۵} (UE) و خطای برآورد دست بالا^{۱۶} (OE) با توجه به روابط زیر تعیین می‌شود (به عبارتی مبین وضعیت هشدارها در بالای قطر ماتریس جدول ۷ و پائین آن هستند):

$$UE = \frac{\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} X_{ij}}{N}, i < j \quad (13)$$

$$OE = \frac{\sum_{\forall j} \sum_{\forall i} X_{ij}}{N}, i > j \quad (14)$$

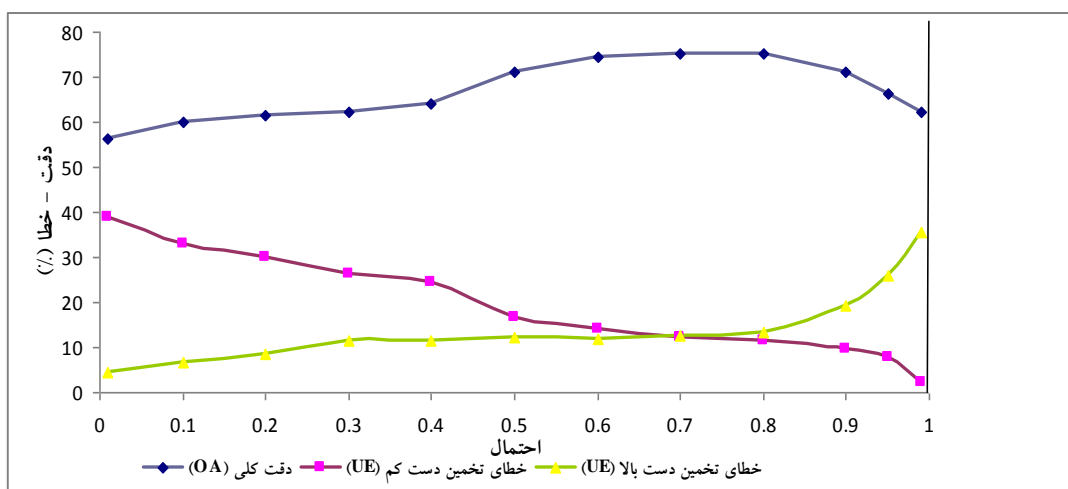
در معادله‌های (۱۳) و (۱۴)، UE و OE به ترتیب نشان دهنده خطای کلی در ماتریس پایین مثلثی و خطای کلی در ماتریس بالا مثلثی ماتریس مربعی خطا می‌باشد، به طوری که $UE > OE$ ،

جدول ۷- ماتریس خطا برای تحلیل مقادیر DAI در طی دوره ۱۳۸۴-۱۳۶۲

سیگنال پیش‌بینی شده	سیگنال واقعی					دقت استفاده‌کننده (UA_i) %
	سبز	آبی	زرد	نارنجی	قرمز	
سبز	۹۲	۱۱	۸	۲	۰	۸۱/۴
آبی	۸	۲۵	۱۲	۱	۱	۵۳/۱
زرد	۳	۶	۲۷	۵	۴	۶۰/۰
نارنجی	۲	۱	۸	۲۰	۶	۵۴/۰
قرمز	۰	۰	۱	۲	۳۲	۹۱/۴
دقت تولید شده (PA_j) %	۸۷/۶	۵۸/۱	۴۸/۲	۶۶/۶	۷۴/۴	

جدول ۸- ماتریس خطا برای تحلیل مقادیر DAI در احتمال $P = 0.7$

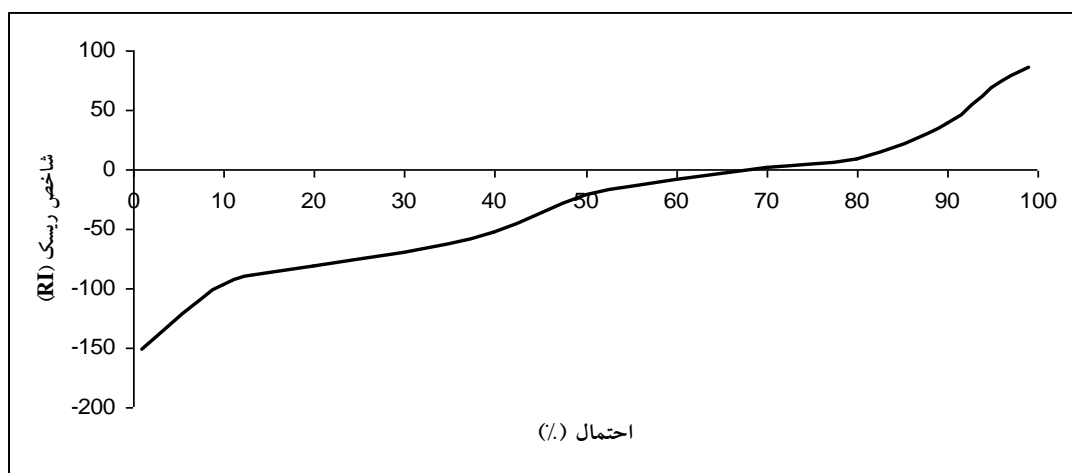
سیگنال پیش‌بینی شده	سیگنال واقعی					دقت استفاده کننده %.(UA _i)
	سبز	آبی	زرد	نارنجی	قرمز	
سبز	۸۲	۴	۴	۰	۱	۹۰/۱
آبی	۷	۳۴	۳	۲	۰	۷۳/۹۱
زرد	۷	۲	۴۷	۳	۱۱	۶۷/۱۴
نارنجی	۵	۳	۲	۲۳	۱۷	۴۶
قرمز	۵	۰	۰	۱	۱۹	۷۶
دقت تولید شده %.(PA _i)	۷۷/۳۵	۷۹/۰۶	۸۳/۹۲	۷۹/۳۱	۳۹/۸۵	



شکل ۷- تغییرات دقت نسبت به احتمالات مختلف در مدل

بیشتر از UE می‌باشد و مقدار ریسک‌پذیری مثبت است. بدین ترتیب برای احتمالات بین ۰/۶ و ۰/۷ می‌توان مقدار شاخص ریسک برابر صفر دانست (RI=0, OE=UE) که برای تصمیم‌گیری مدیریت رها سازی از سد انتخاب گردید.

ملاحظه می‌گردد که در احتمال کوچک‌تر از ۰/۶ ($P < 0.6$) ریسک‌پذیری منفی وجود دارد. در واقع در این حالت مقدار خطای برآورد دست کم (UE) بیشتر از برآورد دست بالا (OE) می‌باشد (UE < OE). از طرفی در احتمال بیشتر از ۰/۷ ($P < 0.7$) مقدار OE



شکل ۸- تغییرات شاخص ریسک در احتمالات مختلف

۳-۴- نتایج حاصل از تعیین میزان نرخ کاهش رهاسازی از مخزن بر اساس شاخص هشدار خشکسالی

همان‌طور که در بخش ۲-۲-۵ توضیح داده شد، برای تعیین درصد کاهش رهاسازی از مخزن سد زاینده رود بر اساس شاخص DAI از سه سناریوی مدیریتی A، B و C استفاده گردید. در شکل ۹ مقایسه درصد کاهش رهاسازی در این ۳ سناریو آورده شده است که در واقع خروجی مدل بهینه سازی تشریح شده در بخش ۲-۲-۵-۱ یعنی مقادیر α می‌باشند. ملاحظه می‌گردد، مقادیر درصد کاهش بر اساس سناریوهای B و C نسبت به رویکرد مدیریت فعلی (A) کمتر بوده است. این نتایج از دو منظر قابل توجه می‌باشد، اول اینکه به شکلی نتایج مدل‌سازی مقدسی (۱۳۸۸) و حسینی-صفا و همکاران (۱۳۸۸) را که به لحاظ محاسباتی بسیار حجیم هستند را به دست‌ورالعملی خلاصه و کاربردی تبدیل کرده است. از طرفی نشان می‌دهد که چگونه در شرایط یکسان مواجهه با کاهش منابع آبی می‌توان با اعمال مدیریت تقاضا (سناریوهای B و C)، اقدامات انقباضی کمتری در رهاسازی آب اعمال نمود.

به عنوان مثال شرایط قرمز با مدیریت فعلی سد (A)، کاهش ۶۴ درصد توصیه می‌کند، ولی در همین شرایط، سناریوهای B و C آن را به ۴۷ و ۵۳ درصد می‌رساند. ارقام کمتر سناریوی B را می‌توان مربوط به استفاده از قوانین محدود کننده (Hedging) و امکان ذخیره بین سالی (Carry over) دانست.

۳-۴-۱- نقش اعمال کاهش‌های رهاسازی در کاستن شدت خشکسالی ۱۳۷۷-۱۳۸۰

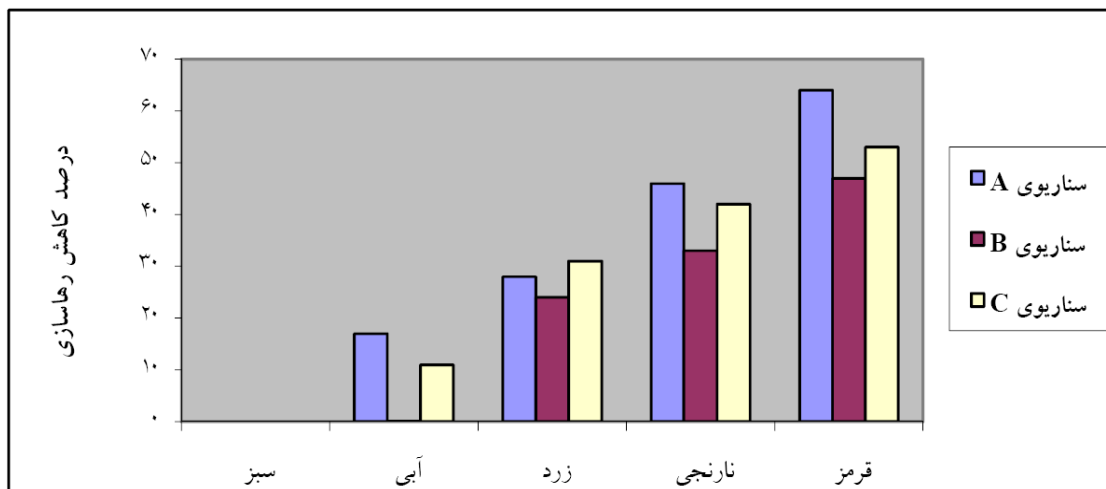
در این قسمت به نقش اعمال درصدهای اعلام شده برای کاهش

خروجی از سد (شکل ۹) در کاستن فراوانی و شدت خشکسالی (DAI) سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ پرداخته می‌گردد. این مقایسه در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد، اعمال مقادیر بهینه ضرایب کاهش خروجی از مخزن به ویژه در مواقع بحرانی تأثیر قابل توجهی در کاهش شاخص هشدار خشکسالی داشته است. این امر به خصوص برای مقادیر حداکثر DAI به خوبی قابل مشاهده است. به طور مثال شاخص DAI در ماه‌های خرداد و تیر سال ۱۳۷۸ با اعمال ضرایب کاهش خروجی از مخزن، از سطح "خیلی شدید" به "شدید" تغییر وضعیت داده است. مشابه همین وضعیت در ماه‌های شهریور و آبان سال ۱۳۷۹ و ماه‌های تیر، مرداد و آبان ۱۳۸۰ قابل مشاهده می‌باشد، ایامی که حداکثر تقاضا وجود دارد.

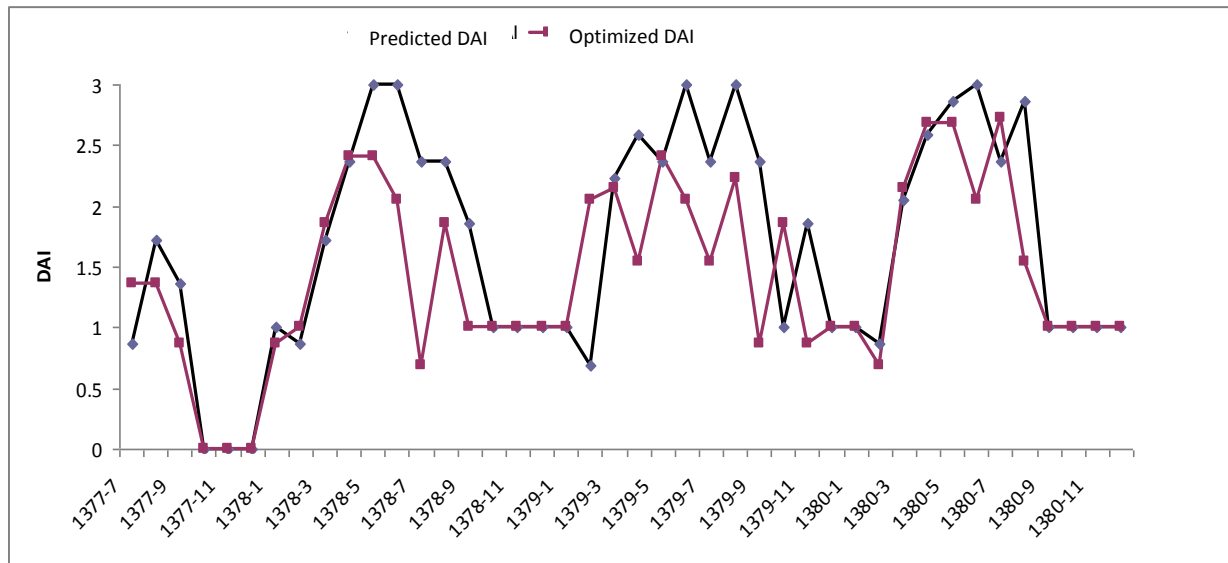
۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاشی بود برای طراحی یک سیستم هشدار سریع خشکسالی با استفاده از متغیرهای هیدرولوژیکی در سد زاینده رود. این سیستم ضمن پایش وضعیت موجود منابع آب، اطلاعات آتی کمبود را نیز پیش‌بینی و دخالت می‌دهد و با توجه به عدم قطعیت‌ها به خصوص در پیش‌بینی‌ها، روش‌شناسی مناسبی را برای دخالت آن‌ها، ارزیابی ریسک سیستم و همچنین ارائه راهکارها توسعه داد که نهایتاً نتایج زیر حاصل گردید:

۱- از ویژگی‌های DEWS مراحل تنظیم و توسعه آن است که برای یک سیستم منابع آبی خاص تهیه گردید، لذا برخلاف سایر سیستم‌های پایش، DEWS به خوبی می‌تواند برای مدیریت سازمان‌های آب استانی که متکی به سد هستند، مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۹- مقایسه درصد کاهش رهاسازی بر اساس سناریو A، B و C



شکل ۱۰- مقایسه شاخص DAI در حالت پیش‌بینی شده و پس از اعمال کاهش رهاسازی در طی دوره خشکسالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰

روشن‌شناسی مورد استفاده در تحلیل عدم قطعیت آن به خوبی مدل‌سازی مربوط را به انجام رسانید.

۷- ارزیابی دقت انجام شده از مدل در طول دوره شبیه‌سازی (۱۳۸۴-۱۳۶۲) حدود ۷۵٪ می‌باشد، بدین معنی که هشدارهای اعلام شده در ۷۵٪ مواقع صحیح بوده‌اند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Artificial Neural Networks
- 2- Drought Early Warning System
- 3- Self- Organizing Feature Maps
- 4- Drought Alert Index
- 5- R- Square
- 6- Root Mean Square Error
- 7- Mean Absolute Error
- 8- Boot Strap Re-sampling
- 9- Monte Carlo Simulation
- 10- Warning Levels
- 11- Standard Operating Policy
- 12- Overall Accuracy
- 13- User's Accuracy
- 14- Producer's Accuracy
- 15- Under estimate error
- 16- Over estimate error
- 17- Risk seeking
- 18- Risk averse

۲- نوع معرف‌های مورد استفاده و به خصوص دخالت پیش‌بینی ورودی و کمبود در پایش، عاملی برای افزایش دقت و سرعت هشدارها می‌باشد و قابلیت آن را در مدیریت منابع آب می‌افزاید. این ویژگی‌ها از شاخص‌های مرسوم مانند SPI، نمی‌تواند قابل انتظار باشد. در نهایت بر اساس نتایج حاصل، سطوح مختلف هشدار از وضعیت سبز (شرایط نرمال) تا قرمز (شرایط کم آبی شدید) برای دوره پیش‌بینی مورد نظر و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوطه، با سطوح مختلف اطمینان مشخص شده است.

۳- برتری اصلی مدل DEWS، توانایی آن هم در هشدار و هم در اعلام اقدام مناسب در میزان کاهش رهاسازی از سد می‌باشد که در هیچ یک از شاخص‌های دیگر وجود نداشته است.

۴- کار بهینه‌سازی این تحقیق روی مدل DEWS توانست مقادیر بهینه کاهش رهاسازی از سد را بر اساس مدیریت فعلی تعیین نماید و هم‌اینکه مقدار کاهش برای هر گونه مدیریت دیگر را فراهم می‌کند.

۵- بررسی نقش اعمال درصد‌های اعلام شده برای کاهش خروجی از سد در کاستن شدت خشکسالی برای دوره ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ توانست در کلیه موارد شدت‌های "بسیار شدید" را به "شدید" تقلیل دهد.

۶- با توجه به نیاز DEWS به پیش‌بینی نسبتاً بلند مدت (۶ ماهه) کمبود آب، نتایج استفاده از شبکه‌های عصبی نشان داد که این تکنیک با دقت مطلوبی این کار را انجام داده است. همچنین

۵- مراجع

- Huang, W.C. and Chou, C.C. (2008). "Risk- based drought early warning system in reservoir operation. " *Advances in Water Resources*, 31, pp. 649-660.
- Huang, W.C. and Chou, C.C. (2005). "Drought early warning System in reservoir operation: theory and practice. " *Water Resources Research*, 41, 10, 1029/2004 WR003830.
- Huang, W.C. and Yuan, L.C. (2004). "A drought early warning system on real time multi reservoir operation. " *Water Resources Research*, 40(6): W06401, doi: 10. 1029/2003 WR002910. W0461.
- Kohonen, T. (2001). "Self- Organizing Maps (2nd edition). " Germany: Springer.
- Kumar, V. (1998). "Improving a drought early warning model for arid region using s soil- moisture index." *Applied Geography*, 29, pp. 402-408.
- Liu, W. T. and Steinmetz, S. (1993). "Drought early warning system for crop production. " *Anais do VII SBSR*.
- Lohani V. K. and Loganathan G.V. (1997). "An early warning system for drought management using the palmer drought index. " *Journal of American Water Resources Association*, 33 (6), pp. 1375-86.
- Marier, H. and Dandy, G.C. (2000). "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modeling issues and applications. " *Environmental Modeling and Software*, 15, pp.101-124.
- Moghaddasi, M., Araghinejad, Sh. and Morid, S. (2009). "Long- term operation of irrigation dams considering variable demands: Case study of Zayandeh- Rud reservoir, Iran." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 136(5): pp.309-316
- Noori, R., Abdoli, M.A., Farokhnia, A. and Abbasi, M. (2009). "Results uncertainty of solid waste generation forecasting by hybrid of wavelet transform ANFIS and wavelet transform- neural network." *Expert System with Application: An International Journal*. 36(6), pp. 9991-9999.
- Sharma, S.K., and Tiwari, K. N. (2009). "Bootstrap based artificial neural network (BANN) analysis for hierarchical prediction of monthly runoff in upper Damodar Vally catchments." *Journal of Hydrology*. 374, pp.209-222.
- Shannon, C.E. (1948). "A mathematical theory of communication, Bell Syst." *Technology Journal* .27, pp.379-423,623-656.
- فرخ نیا، ا. و مرید، س. (۱۳۸۷) " تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبکه عصبی و نر و فازی برای پیش‌بینی جریان رودخانه"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵، صص ۱۴-۲۷.
- حسینی صفا، ح. و مرید، س. و مقدسی، م. (۱۳۸۸). "ارزیابی روش‌های تولید قوانین فازی برای بهره‌برداری از مخزن سد"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۹، صص ۱۳-۲۵.
- عراقی‌نژاد، ش. (۱۳۸۴) " مدیریت منابع آب برپایه تحلیل‌های اقلیمی"، رساله‌ی دکتری دانشکده فنی دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- غلام‌زاده، م. (۱۳۸۸) "سیستم زود هنگام هشدار خشکسالی براساس ریسک و عدم‌قطعیت در بهره‌برداری سد زاینده رود". پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی تربیت مدرس. تهران.
- مرید، س. و پایمزد، ش. (۱۳۸۶) "مقایسه روش‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی جهت پیش‌روانه خشکسالی. مطالعه موردی دوره خشکسالی ۱۳۷۷ لغایت ۱۳۸۰ استان تهران". *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۴۲، صص ۳۲۵-۳۳۴.
- مقدسی، م. (۱۳۸۸) "راهبردهای بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها با تاکید بر مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در دوره‌های خشکسالی". رساله دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس. تهران.
- ASCE Task Committee, (2000). "Artificial neural networks in hydrology I: Preliminary concepts." *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2) pp.115-123.
- Chang, T.J. and Kleopa, X. (1999). "A proposed method for drought monitoring" *Water Resources Management*, 2, pp. 275-281.
- Dawson, C.W. and Wilby, R.L. (2001). "Hydrological modeling using artificial neural networks. " *Progress in Physical Geography*, 25 (1), pp.80-108.
- Eckhardt K., Breur L. and Frede H. G. (2003). "Parameter uncertainty and the significance of Simulated land use change effects." *Journal of Hydrology*, 273, pp.164-176.
- Gupta, H.V., Hsu, K. and Sorooshian, S. (2000)." Effective and efficient modeling for streamflow forecasting. In: Govindaraju, R.S., Rao, A.R. (Eds.)." *Artificial Neural Networks in Hydrology*, Kluwer, Dordrecht, the Netherland. pp. 7-22.