



## الگوی پیش‌بینی شدت و مدت خشکسالی: مطالعه موردی

محمد کارآموز<sup>۱</sup>، سارا نظیف<sup>۲</sup>، کبیر رسولی<sup>۳</sup>، ساناز ایمن<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>استاد دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران،

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری عمران- آب، دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup>کارشناس ارشد عمران- آب، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات تهران

<sup>۴</sup>کارشناس ارشد عمران- آب، دانشکده عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران

Email: karamouz@ut.ac.ir

### چکیده:

خشکسالی از جمله بحران‌های طبیعی است که در تمام اقلیم‌ها رخ داده و زندگی و حیات افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو پیش‌بینی خشکسالی از چند ماه قبل، در اتخاذ سیاست‌های صحیح و به موقع مواجهه با آن ضرورت دارد. هر پدیده خشکسالی با ۳ پارامتر شدت، بزرگی و مدت شناخته می‌شود. مطالعات پیش‌بینی خشکسالی که تاکنون صورت گرفته تنها به پیش‌بینی شدت خشکسالی در یک گام زمانی پرداخته‌اند. در مقاله حاضر مشخصات سه‌گانه خشکسالی توأمآ پیش‌بینی می‌شوند. برای این منظور ابتدا با بررسی سری زمانی خشکسالی‌های به وقوع پیوسته، الگوی عمومی خشکسالی‌ها تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از شبکه عصبی به پیش‌بینی مشخصات خشکسالی‌های آتی با توجه به الگوی تعیین شده پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه متغیرهای اقلیمی بارش، دما و رطوبت خاک عوامل تعیین‌کننده در تغییرات وضعیت منابع آبی و به تبع آن خشکسالی هستند، مقادیر این متغیرها در ماه‌های قبل به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده می‌شود. روش ارائه شده در این مقاله برای حوزه‌ی اهرچای واقع در شمال‌غرب ایران مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه در این رویکرد الگوی تداوم و تغییرات خشکسالی در طول زمان ارائه می‌گردد، می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت بهنگام، صحیح و جامع خشکسالی ایفا کند. در این رویکرد با اطلاع از تغییرات آبی وضعیت کم‌آبی می‌توان روند بهره‌برداری از منابع موجود و اعمال سیاست‌های مناسب را از قبل تعیین نمود.

کلمات کلیدی: الگوی خشکسالی، شاخص خشکسالی، پیش‌بینی، شبکه عصبی

### مقدمه:

خشکسالی از ویژگی‌های طبیعی هر اقلیم است و تقریباً در هر منطقه‌ی اقلیمی رخ می‌دهد، ولی خصوصیات و مشخصه‌های آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است. تغییرات اقلیمی و در پی آن خشکسالی‌های متعدد در نقاط مختلف کره‌ی زمین موجب شده، محققان هیدولوژی و اقلیم‌شناسی در طول دهه‌های اخیر، مطالعات خود را بیشتر به تغییرات اقلیمی و آثار و تبعات آن بر زندگی انسان و محیط‌زیست معطوف نمایند. خشکسالی بر خلاف سایر پدیده‌های طبیعی از جمله سیل و یا زمین‌لرزه به صورت تدریجی شروع شده و دارای تداوم زیاد می‌باشد. میزان خسارتی که خشکسالی بر جای می‌گذارد بسیار بیشتر از سیل و طغیان رودخانه‌ها می‌باشد و با توجه به اینکه اکثر کشورهای جهان با آن مواجه هستند، مقابله با آن دست رفتن منابع طبیعی در اثر خشکسالی، ضرورتی انکارناپذیر است که مستلزم ارائه‌ی راه‌کارهای مؤثرتر جهت کاهش این خسارات می‌باشد. بر این اساس شناخت دقیق و پیش‌بینی ویژگی‌های این پدیده جهت مقابله با آن و تعدیل آثار و تبعات آن امری ضروری می‌باشد. در این مقاله، رویکردی جهت کمی‌سازی و پیش‌بینی مشخصه‌های خشکسالی شامل شدت، مدت و تداوم با استفاده از ابزار شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه می‌شود. (Dracup et al., 1980) به بررسی خصوصیات آماری وقایع خشک از طریق سری‌های دبی جریان پرداخته‌اند. (Beric et al., 1990) با استفاده از اطلاعات نقطه‌ای بارش مربوط به چند ایستگاه باران‌سنجی، به بررسی دوره‌های اقلیمی خشک در فصل رشد پرداختند و در تحقیقات خود بسیاری از مشخصات مهم دوره‌های خشکسالی نظیر تداوم، زمان وقوع، تعداد دوره‌های خشک و خشکسالی با بزرگترین تداوم در یک بازه زمانی معین، و زمان وقوع آن را با هدف استفاده در زراعت مدنظر قرار دادند.

(Griffiths 1990) با استفاده از بررسی کمبودهای بارش در مقیاس ماهانه به بررسی توزیع دوره‌های خشکسالی ماهانه و مشخصات مربوط به آنها نظیر تعداد دوره‌های خشکسالی، توزیع تعداد دوره‌های خشک و تر، نحوه‌ی تغییرات عمق بارش در هر دوره، تابع چگالی احتمال برای مدل کمبود بارش و بالاخره بررسی خواص و طول دوره‌ی خشک با حداکثر تداوم پرداخت. (Sen 1990) با استفاده از تکنیک زنجیره مارکوف مرتبه دو به تحلیل خشکسالی بحرانی و یافتن توابع توزیع احتمالی بحرانی‌ترین مشخصه‌های خشکسالی‌ها از طریق روش‌های عددی پرداخته است. (Moye & Kapadia, 1995) آماره‌های حدی طول دوره‌ی خشکسالی (تداوم) را با استفاده از تئوری



ران پیشگویی نمودند. (Shin et al., 2000) الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی‌های اقلیمی را با استفاده از شبکه‌های عصبی مورد تحلیل قرار داده و کمی سازی نمودند.

(Karamouz et al., 2004) خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و زراعی را در ناحیه‌ی مرکزی ایران با استفاده از تحلیل آماری به طور جامع مورد مطالعه قرار دادند؛ ایشان الگوریتمی را ارائه کردند که خصوصیت‌های خشکسالی از جمله تداوم و شدت و توابع چگالی احتمال این خصوصیت‌ها را برای منطقه‌ی مورد نظر بررسی می‌کند. (Karamouz et al., 2007) تأثیر تغییرات اقلیمی را بر مشخصه‌های دوره‌های خشکسالی با استفاده از شبکه‌های عصبی احتمالاتی<sup>۱</sup> (PNN) مورد مطالعه قرار دادند.

در مطالعاتی که در مورد مشخصه‌های مختلف خشکسالی صورت گرفته بیشتر تحلیل‌های آماری صورت گرفته و در مواردی که هدف پیش‌بینی خشکسالی بوده، شدت آن مدنظر بوده است. در مقاله حاضر الگوی تغییرات شدت خشکسالی در حین تداوم آن پیش‌بینی می‌شوند. در ادامه ابتدا الگوریتم و متدولوژی مدنظر این مقاله تشریح شده، مراحل مختلف کار مشخص می‌شود. سپس شبکه‌های عصبی چندلایه‌ی پرسپترون<sup>۲</sup> (MLP) که به عنوان ابزار شبیه‌سازی و پیش‌بینی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته معرفی می‌شود و در ادامه مطالعه موردی و نتایج حاصل از روش پیشنهادی در محدوده‌ی مطالعاتی ارائه شده و در نهایت نتایج جمع‌بندی می‌شود.

### متدولوژی و روش کار

وقایع خشکسالی با سه معیار، تداوم، شدت و بزرگی تعریف می‌شوند. تداوم به تعداد گام‌های زمانی متوالی اطلاق می‌شود که در آن‌ها شاخص خشکسالی از آستانه‌های تعریف شده کوچک‌تر می‌باشند. به عنوان مثال عدد ۲- در مورد شاخص شدت خشکسالی پالمر نشان دهنده‌ی شروع خشکسالی می‌باشد. شدت خشکسالی تجمع مقادیر کمبود برای تداوم شاخص مورد بررسی می‌باشد و بالاخره بزرگی متوسط کمبود شاخص مورد نظر در تداوم مذکور می‌باشد. (Dracup et al., 1980) رابطه‌ی بین این سه مشخصه‌ی خشکسالی را به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$\text{تداوم}(D) / \text{شدت}(S) = \text{اندازه} \quad (1)$$

$$(M)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱) فرض می‌شود که خشکسالی در یک زمان خاص شروع شده و با یک بزرگی ثابتی تداوم داشته و در یک زمان خاصی خاتمه می‌پذیرد. ولی به نظر می‌رسد ماهیت وقوع پدیده‌ی خشکسالی متفاوت است بدین ترتیب که بین زمان شروع خشکسالی و زمان رسیدن شدت آن به اوج،  $D_1$  و همچنین بین زمان اوج و خاتمه‌ی خشکسالی،  $D_2$ ، فاصله‌ی زمانی وجود دارد. پیش‌بینی زمان‌های  $D_1$  و  $D_2$  می‌تواند نقش قابل توجهی در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح خشکسالی داشته باشند. مدت زمان  $DI$  فرصت لازم را برای برنامه‌ریزی صحیح منابع آب به نحوی که بتوان ذخیره لازم را برای دوره خشک فراهم نمود، ایجاد می‌نماید همچنین پس از کاهش شدت دوره خشکسالی در زمان  $D_2$  با توجه به رو به اتمام بودن دوره خشک، می‌توان روند استفاده از منابع را به تدریج به وضعیت قبل از خشکسالی برگردانده و در نتیجه از خسارات بیشتر جلوگیری نمود. در این مقاله فرض می‌شود که بزرگی خشکسالی به تدریج افزایش یافته و به اوج خود می‌رسد و برای مدتی در حالت اوج ثابت می‌ماند سپس به تدریج افت کرده و به شرایط عادی برمی‌گردد.

در این مقاله سعی بر آن است تا بتوان برای هر خشکسالی را تعیین نمود. به منظور تحلیل پدیده‌ی خشکسالی، شاخص ترکیبی خشکسالی<sup>۳</sup> (HDI) که از ترکیب شاخص بارش استاندارد شده<sup>۴</sup> (SPI)، شاخص کمبود رطوبت خاک<sup>۵</sup> (SMDI) و شاخص آبهای سطحی<sup>۶</sup> (SWSI)، با در نظر گرفتن ارقام خسارت ناشی از خشکسالی محاسبه می‌شود و در نتیجه به طور جامع جنبه‌های مختلف این پدیده را در نظر می‌گیرد مورد استفاده قرار گرفته است (Karamouz et al., 2007). همچنین شاخص کمبود رطوبت خاک به خاطر اهمیتی که در میزان بازدهی محصولات زراعی دارد انتخاب شده است که با توجه به آن که توضیحات مربوط به نحوه محاسبه این شاخص کمتر در مراجع ذکر شده است در بخش بعدی به نحوه محاسبه‌ی آن پرداخته می‌شود. بدین ترتیب دوره‌های خشکسالی و مشخصه‌های آن مشخص شده و با به کارگیری مقادیر متغیرهای اقلیمی با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، الگوی خشکسالی‌ها در منطقه پیش‌بینی می‌شوند. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، در شکل (۱) ارائه شده است. به طور خلاصه مراحل انجام کار شامل موارد زیر می‌باشد:

○ محاسبه‌ی سری زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی (HDI)

<sup>1</sup> Probabilistic Neural Networks

<sup>2</sup> Multi-Layer Perceptron

<sup>3</sup> Hybrid Drought Index

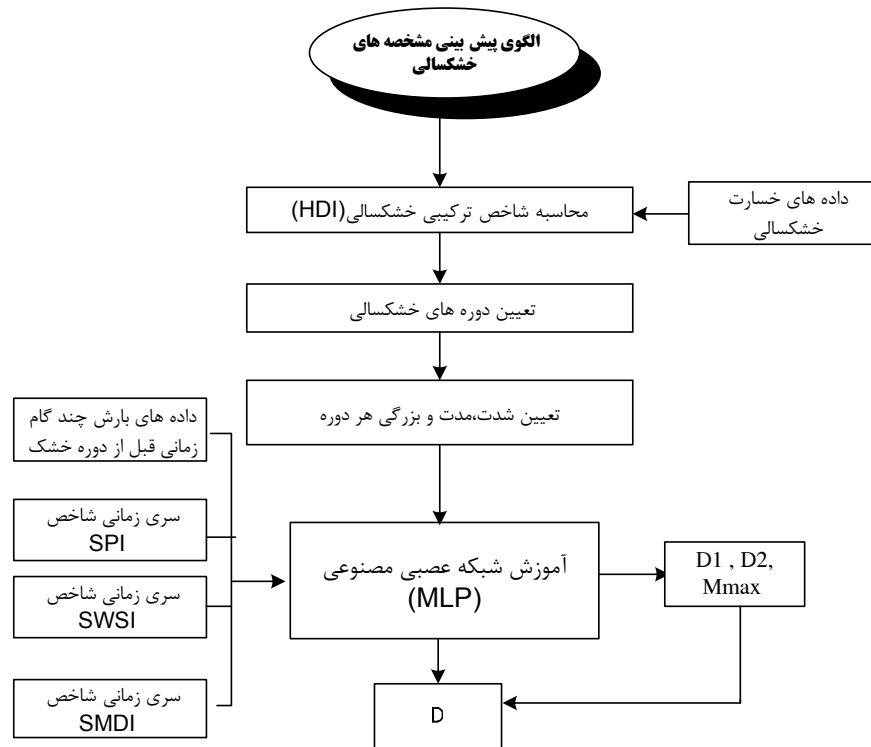
<sup>4</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>5</sup> Soil Moisture Deficit Index

<sup>6</sup> Surface Water Supply Index



- تعیین دوره‌های خشکسالی براساس شاخص مذکور
- تعیین مشخصه‌های خشکسالی
- تعیین مقادیر بارش، دما و رطوبت خاک برای بازه‌های چند ماه قبل از دوره‌های خشکسالی
- تعیین ارتباط بین سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی با مشخصه‌های دوره‌های خشکسالی متنظر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی



شکل (۱) الگوریتم پیشنهادی برای پیش‌بینی مشخصه‌های مختلف خشکسالی

شاخص کمبود رطوبت خاک،  $SMDI$

با توجه به اینکه رطوبت خاک نقش مهمی در رشد گیاه دارد، شاخص کمبود رطوبت خاک،  $SMDI$  شاخص مناسبی در ارزیابی شدت خشکسالی از دید زراعی و کشاورزی قلمداد می‌شود. با استفاده از میانه‌ی بلند مدت داده‌های کمبود یا مازاد رطوبت خاک این شاخص به صورت زیر محاسبه می‌شود (Narasimhan and Srinivasan, 2005):

$$SD_j = \frac{SW_j - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100 \quad \text{if } SW_j < MSW_j \quad (2)$$

$$SD_j = \frac{SW_j - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100 \quad \text{if } SW_j > MSW_j \quad (3)$$

که در آن  $SD_j$  مقدار کمبود رطوبت خاک به درصد،  $SW_j$  متوسط ماهانه رطوبت موجود در پروفیل خاک به میلی‌متر و  $MSW_j$ ،  $\min SW_j$  و  $\max SW_j$  به ترتیب میانه، حداکثر و حداقل درازمدت میزان رطوبت خاک در پروفیل خاک برحسب میلی‌متر می‌باشند (ماه  $j=1-12$ ). شاخص  $SD$  به منظور هماهنگی و مشابهت با سایر شاخص‌های خشکسالی به صورت زیر به  $SMDI$  تبدیل می‌شود:

$$SMDI_j = 0.5SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \quad (4)$$



شاخص  $SMDI$  در هر گام زمانی بین ۴- تا ۴+ تغییر می‌کند که به ترتیب نشانگر خشکسالی شدید و ترسالی شدید می‌باشد. از آنجا که این شاخص دارای محدوده‌ی تغییرات و کلاس‌بندی مشابه سایر شاخص‌های خشکسالی است امکان مقایسه نتایج با سایر شاخص‌ها نیز وجود دارد.

#### شاخص ترکیبی خشکسالی، $HDI$

شاخص ترکیبی خشکسالی،  $HDI$  توسط *Karamouz et al. (2007)* جهت کمی کردن شدت خشکسالی با در نظر گرفتن اثرات جمعی آن در بخش‌های مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی و زراعی برای یک گام زمانی جلوتر ارائه شده است. دلیل تأخیر لحاظ شده، وجود فاصله‌ی زمانی بین وقوع خشکسالی و مشاهده‌ی خسارات ناشی از آن می‌باشد. با استفاده از منحنی احتمال تجمعی برآزش داده شده به خسارات خشکسالی،  $P_i$ ، شاخص ترکیبی خشکسالی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$HDI_i = \frac{P_i - 100}{24} \quad (5)$$

ساختار فوق مشابه ساختار شاخص  $SWSI$  است با این تفاوت که صرفاً دوره‌های خشک یا محدوده‌ی اعداد منفی متنظر با روش  $SWSI$  انتخاب شده‌اند.  $HDI$  بین صفر و ۴- می‌باشد که به ترتیب نشانگر حالت نرمال و خشکسالی بسیار شدید هستند. براساس شاخص ترکیبی  $HDI$ ، دوره‌های خشکسالی از زمانی شروع می‌شود که مقدار این شاخص کمتر از ۲- شده و تا زمانی تداوم دارد که به مقدار ۱- برسد. دلیل در نظر گرفتن این مقادیر به عنوان آستانه‌های دوره‌های بلند مدت خشکسالی این است که تا رسیدن مقدار این شاخص به ۲- (آستانه‌ی خشکسالی متوسط) تغییرات چندانی در میزان خسارت مشاهده نمی‌شود. بویژه این تغییرات تا رسیدن به ۱- (آستانه‌ی خشکسالی با شدت کم) قابل اغماض است. در ادامه شرح مختصری از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه ارائه می‌گردد.

#### شبکه‌های چندلایه‌ی پرسپترون $(MLP)^y$

شبکه‌ی عصبی مصنوعی ابزاری است برای تخمین نگاشت‌های پیچیده‌ی خطی یا غیرخطی، در زمانی که نتوان این نگاشت را با استفاده از روابط ریاضی معمولی بیان نمود. شبکه‌ی عصبی در جریان آموزش خود تا حدود زیادی این ارتباط را تخمین می‌زند. لذا امروزه انواع مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی برای اهداف مختلف چون پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفته و توسعه یافته‌اند. در این مقاله با توجه به کاربرد شبکه‌های عصبی چندلایه‌ی پرسپترون  $(MLP)$  در مسائل پیش‌بینی و قابلیت بالای آن‌ها در تعمیم نتایج، از این شبکه‌ها برای پیش‌بینی مشخصه‌های خشکسالی، استفاده شده است. شبکه‌های عصبی  $MLP$  نمونه‌ای از شبکه‌های استاتیکی می‌باشند. تعیین معماری یک شبکه عصبی نخستین گام در استفاده از این ابزار می‌باشد که با اثبات قضیه‌ی تقریب‌ساز توسط تیم تحقیقاتی *Hornik et. al (1989)* چنین بیان شد که یک شبکه عصبی پیشرو با یک لایه‌ی مخفی زیگموئیدی و لایه‌ی خروجی خطی قادر به تخمین هر نگاشت پیچیده‌ای با هر درجه‌ی تقریبی خواهد بود. این قضیه تعداد لایه‌های مخفی را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد و از این رو در کاهش پیچیدگی شبکه نقش بسزائی ایفا خواهد کرد. پس از آن میزان کارایی شبکه به انتخاب مناسب تعداد نرون‌های لایه‌ی مخفی بستگی خواهد داشت. با توجه به قضیه فوق، در مطالعه حاضر از شبکه‌های عصبی با یک لایه مخفی برای پیش‌بینی مشخصات خشکسالی استفاده شده است. برای تعیین شبکه‌های عصبی بهینه، دو مرحله سعی و خطا صورت گرفته است:

#### ۱- تعیین تعداد ورودی‌های بهینه شبکه عصبی

در این مرحله علاوه بر شاخص‌های سه‌گانه خشکسالی  $SWSI$ ،  $SPI$  و  $PDSI$ ، داده‌های بارش ماهانه به صورت مختلف به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. در حالت اول داده‌های بارش ۱ تا ۶ ماه قبل از شروع خشکسالی به صورت مجزا به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شدند و در حالت دوم مجموع بارش یک تا ۶ ماه به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به این ترتیب ۱۱ ترکیب مختلف برای ورودی‌های مدل در نظر گرفته شده است.

#### ۲- تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی و نیز نوع تابع زیگموئیدی

تعداد نرون‌های لایه مخفی بین ۲ تا ۱۵ تغییر داده شده‌اند و همچنین تابع محرک لایه مخفی به صورت لگاریتمی و یا تانژانتی مورد استفاده قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که در این مطالعه مقادیر  $D1$ ،  $D2$  و  $M$  با استفاده از سه شبکه عصبی مجزا پیش‌بینی شده‌اند و خروجی پیش‌بینی شده این مقادیر به عنوان سه ورودی جدید در مدل شبکه عصبی پیش‌بینی کننده مقدار  $D$ ، علاوه بر ورودی‌های قبلی، در نظر گرفته شده‌اند.

مطالعه موردی

<sup>7</sup> Multi-Layer Perceptron



محدوده مورد مطالعه، حوزه آبریز اهرچای با مساحتی در حدود ۲۲۳۲ کیلومترمربع می‌باشد. این حوزه در شمال غربی ایران، در استان آذربایجان شرقی و در محدوده جغرافیایی  $20^{\circ} 38'$  تا  $45^{\circ} 38'$  عرض شرقی و  $20^{\circ} 46'$  تا  $30^{\circ} 47'$  طول شمالی قرار دارد. در شکل (۲) موقعیت رودخانه اهرچای و سرشاخه‌های آن، در حوزه آبریز اهرچای و نیز سد ستارخان، مهمترین سد مخزنی حوزه، نمایش داده شده است. متوسط بارش منطقه براساس آمار سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۵۲ برابر با ۳۲۰ میلیمتر است. علی‌رغم اینکه بارش متوسط سالانه حوزه مقدار نسبتاً مناسبی است ولی به علت وجود تنها یک سد مخزنی (سد ستارخان)، میزان آسیب‌پذیری حوزه نسبت به کم‌آبی بالا می‌باشد. از میان ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در محدوده حوزه، دو ایستگاه هواشناسی کسانق و اهر و ایستگاه هیدرومتری اورنگ، به ترتیب به عنوان ایستگاه شاخص جهت پیش‌بینی بارش، دما و شبیه‌سازی رواناب در محدوده بالادست سد ستارخان، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مشخصات و بازه آماری موجود هر یک از این ایستگاه‌ها، در جدول ۱ به تفکیک ارائه شده‌اند.

جدول ۱- خصوصیات و طول بازه آماری موجود ایستگاه‌های به کار رفته در این مطالعه

نام ایستگاه هواشناسی	کسانق	اهر	اورنگ
طول جغرافیایی	$46^{\circ}-51'$	$47^{\circ}-04'$	$46^{\circ}-52'$
عرض جغرافیایی	$38^{\circ}-31'$	$38^{\circ}-26'$	$38^{\circ}-28'$
نوع ایستگاه	باران‌سنجی	سینوپتیک	هیدرومتری
دوره آماری (سال)	۱۳۵۰-۱۳۷۹	۲۰۰۳-۱۹۸۶	۱۳۸۳-۱۳۶۲

سد مخزنی ستارخان در محدوده جغرافیایی  $28^{\circ} 38'$  عرض شرقی و  $53^{\circ} 46'$  طول شمالی در استان آذربایجان شرقی احداث شده است، وسعت حوزه آبریز اهرچای در محل ساختگاه سد ۹۵۰ کیلومترمربع می‌باشد. عملیات بهره‌برداری از این سد از فروردین ۱۳۷۷ آغاز شده است. متوسط آورد سالانه ورودی به سد ستارخان ۵۱ میلیون مترمکعب شامل آوردهای طبیعی حوزه سد می‌باشد. سد ستارخان تنها سد مخزنی در محدوده حوزه آبریز اهرچای است، که به منظور دستیابی به اهداف تأمین آب مورد نیاز بخش‌های شرب، صنعت شهرستان اهر و بخش‌های کشاورزی و زیست محیطی احداث شده است.



شکل (۲) موقعیت اهرچای و سرشاخه‌های آن، در حوزه آبریز اهرچای به همراه محل سد ستارخان

نتایج

در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن ابعاد مختلف خشکسالی اعم از خشکسالی اقلیمی، هیدرولوژیکی، زراعی و اقتصادی، از شاخص ترکیبی خشکسالی در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی جهت مدل‌سازی، پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوزه اهرچای با استفاده از مدل‌های آماری *ARIMA* و پیش‌بینی بلندمدت بسط داده شده‌اند.



(Karamouz et al., 2007). برای هر ۱۶۰ دوره خشکسالی تعیین شده در مجموعه اطلاعات شبیه‌سازی شده، پارامترهای  $M$ ،  $DI$ ،  $D_2$  و  $D_1$  هر دوره تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که به علت اقلیم نسبتاً مرطوب منطقه، دوره تداوم خشکسالی‌های منطقه کوتاه می‌باشد و اغلب فاصله‌ی قابل توجهی بین دوره‌ی تشدید خشکسالی و افول آن وجود ندارد. تغییرات دوره‌های خشکسالی به صورت مثلثی می‌باشد. از ۱۲۰ دسته داده برای کالیبراسیون و از ۴۰ دسته مابقی داده‌ها برای تست شبکه استفاده شده است. خطای کلی از اختلاف فاصله‌ی بردار چهار بعدی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، مطابق رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$Error = \sqrt{err_1^2 + err_2^2 + err_3^2 + err_4^2} \quad (6)$$

$$err_i = \frac{Obs_i - Sim_i}{Obs_i} \quad (7)$$

در روابط فوق  $Obs_i$  و  $Sim_i$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط شبکه‌های عصبی  $MLP$  می‌باشد. نتایج خطاها برای کل دوره و دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی در جدول (۲) نشان داده شده است. براساس این جدول کمترین خطا در پیش‌بینی تداوم خشکسالی بدست آمده است.

جدول ۲- خطای پیش‌بینی پارامترهای  $M$ ،  $DI$ ،  $D_2$  و  $D_1$

دوره	خطای پارامتر ورودی	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	Paver	Paver	Paver <sub>4</sub>	Pave <sub>5</sub>	Pave <sub>6</sub>
کل دوره	خطای کل	۰/۷۷۳	۰/۷۳۴	۰/۷۳۹	۰/۶۶۰	۰/۷۱۲	۰/۷۳۸	۰/۷۵۷	۰/۷۰۴	۰/۶۸۱	۰/۶۹۳
	M	۰/۳۲۵	۰/۳۳۹	۰/۳۴۸	۰/۳۳۳	۰/۳۲۱	۰/۳۳۹	۰/۳۵۱	۰/۳۴۲	۰/۳۲۶	۰/۳۴۰
	D <sub>1</sub>	۰/۵۳۰	۰/۵۰۵	۰/۴۶۸	۰/۴۳۵	۰/۴۴۲	۰/۵۳۴	۰/۵۰۸	۰/۴۵۹	۰/۴۰۳	۰/۴۱۹
	D <sub>2</sub>	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۰	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴
دوره کالیبراسیون	خطای کل	۰/۷۵۵	۰/۶۶۳	۰/۶۸۳	۰/۶۶۰	۰/۶۹۸	۰/۷۰۷	۰/۷۱۵	۰/۶۶۷	۰/۶۴۹	۰/۶۷۸
	M	۰/۳۰۷	۰/۳۱۴	۰/۳۰۹	۰/۳۱۷	۰/۳۲۵	۰/۳۲۲	۰/۳۲۸	۰/۳۳۴	۰/۳۱۸	۰/۳۲۰
	D <sub>1</sub>	۰/۴۶۸	۰/۴۱۷	۰/۴۱۷	۰/۴۲۹	۰/۴۳۵	۰/۴۵۸	۰/۴۶۰	۰/۴۰۶	۰/۴۰۳	۰/۴۹۷
	D <sub>2</sub>	۰/۰۵۰	۰/۰۴۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۴۰	۰/۰۵۳	۰/۰۴۹	۰/۰۴۹	۰/۰۵۰	۰/۰۴۶
دوره صحت‌سنجی	خطای کل	۰/۸۱۷	۰/۹۶۸	۰/۸۲۶	۰/۶۵۹	۰/۷۴۹	۰/۸۳۴	۰/۸۶۹	۰/۸۰۱	۰/۷۰۸	۰/۷۳۴
	M	۰/۳۱۸	۰/۳۲۸	۰/۳۲۲	۰/۲۸۶	۰/۲۹۳	۰/۲۸۵	۰/۲۳۳	۰/۲۹۳	۰/۳۱۸	۰/۳۳۳
	D <sub>1</sub>	۰/۵۳۹	۰/۵۹۶	۰/۴۸۸	۰/۴۵۴	۰/۴۶۳	۰/۵۹۲	۰/۵۴۳	۰/۵۱۳	۰/۴۰۴	۰/۴۸۸
	D <sub>2</sub>	۰/۱۲۱	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸	۰/۰۹۶	۰/۱۲۱	۰/۱۳۳	۰/۱۲۱	۰/۱۰۸	۰/۱۰۸
D	۰/۴۸۰	۰/۳۹۸	۰/۴۷۰	۰/۳۳۶	۰/۵۰۲	۰/۳۷۲	۰/۴۲۵	۰/۳۹۵	۰/۴۴۳	۰/۴۹۵	

با توجه به جدول (۱)، بهترین حالت زمانی اتفاق می‌افتد که ورودی شبکه‌ی  $MLP$  شامل ۷ داده یعنی، سه شاخص  $SWSI$ ،  $SPI$  و  $SMDI$  و بارش ۴ ماه قبل از دوره خشکسالی به طور مجزا باشد. متوسط خطای پیش‌بینی در مجموع دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی برای بزرگی خشکسالی، ۳۳ درصد، برای تداوم ۳۶ درصد و برای  $DI$  و  $D_2$  به ترتیب ۴۳ و ۸ درصد می‌باشد. با پیش‌بینی چهار پارامتر مذکور می‌توان شدت دوره‌های خشکسالی را نیز بدست آورد.

جدول ۳- تعداد نورون‌های بهینه برای حالت‌های مختلف ورودی

پارامتر ورودی	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	Paver	Paver	Paver	Pave <sub>5</sub>	Pave <sub>6</sub>
M	۵	۱۳	۱۳	۷	۴	۱۵	۸	۶	۱۲	۴
D <sub>1</sub>	۵	۱۵	۵	۴	۶	۱۴	۱۲	۱۳	۴	۱۴
D <sub>2</sub>	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۱۵	۳	۱۰	۷
D	۸	۲	۹	۳	۵	۳	۶	۵	۷	۴

براساس خطاهای محاسباتی برای ۴ شبکه‌ی  $MLP$  که هر کدام یکی از پارامترهای چهارگانه را پیش‌بینی می‌کند تعداد نورون‌های بهینه لایه‌ی مخفی به صورت جدول (۳) بدست می‌آید. برای پارامتر  $DI$  و مشخصه‌ی بزرگی خشکسالی که با  $M$  نشان داده می‌شود تعداد نورون بهینه شبکه برابر با ۱۲، برای شبکه‌ی پیش‌بینی  $D_2$  تعداد ۲ نورون و برای شبکه‌ی پیش‌بینی تداوم یعنی  $D$  تعداد ۳ نورون در لایه‌ی مخفی انتخاب شده است.



### خلاصه و نتیجه گیری

هر پدیده‌ی خشکسالی را در هر بازه زمانی می‌توان با سه مشخصه‌ی شدت، مدت و بزرگی مشخص کرد. اما در این مقاله سعی شده است تا با بررسی تغییرات بزرگی خشکسالی در طول دوره تداوم آن، اطلاعات دقیق‌تری در ارتباط با خشکسالی به دست آورده و بتوان با بهره‌گیری از اطلاعات موجود برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع در دسترس را به نحو بهینه انجام داد. در این مقاله سعی شده است با استفاده از شاخص‌های استاندارد خشکسالی از جمله *SPI*، *SWSI* و *SMDI* و شاخص ترکیبی (*HDI*) دوره‌های خشکسالی و مشخصه‌های آنها تعیین شود. در تعیین این شاخص‌ها متغیرهای مختلف اقلیمی نظیر بارش، دبی جریان رودخانه و رطوبت خاک و متغیر اقتصادی خسارت ناشی از خشکسالی با هدف ارزیابی بهتر وضعیت خشکسالی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه به کار گرفته شده‌اند. نتایج بررسی‌های خشکسالی نشان می‌دهند که تداوم دوره‌های خشک در منطقه کوتاه بوده اما فرکانس وقوع دوره‌های خشک قابل توجه می‌باشد. با استفاده از این شاخص‌ها و به کارگیری ابزار شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (*MLP*)، تداوم، بزرگی و نیز دوره آغاز و افول خشکسالی شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌شود و این امکان را به مدیران تصمیم‌گیری منابع آب می‌دهد که اقدامات و طرح‌های مقتضی جهت کاستن خسارات ناشی از خشکسالی را تدوین و اجرا نمایند. در این مطالعه، برای پیش‌بینی مشخصه‌های خشکسالی، چهار شبکه‌ی *MLP* آموزش داده شده است. در آموزش شبکه‌های فوق، ورودی‌های شبکه و نیز معماری شبکه تغییر داده شده‌اند تا بتوان به شبکه بهینه جهت پیش‌بینی مشخصه‌های خشکسالی دست پیدا نمود. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از این روش می‌توان تغییرات دوره‌های خشکسالی را تا حدی پیش‌بینی نمود. به این ترتیب می‌توان برنامه‌های کاهش خسارات خشکسالی و نیز بازگشت به شرایط عادی را به طور گام به گام به کار برد و بدین ترتیب فرصت لازم را برای تطبیق منابع با شرایط محیطی فراهم نمود.

### مراجع

- 1) Beric, M.; E. Zelenhasic; and B. Srdjevic; 1990; "Extreme dry weather intervals of the growing season in Backa, Yugoslavia"; *J. Water Resources Management*, Vol. 4.
- 2) Dracup John A., Kil Seong Lee, Edwin G. Paulson, Jr., 1980; "On the Statistical Characteristics of Drought Events"; *J. Water Resources Research*, vol.16, No.2, PP.289-296, April 1980.
- 3) Griffiths, G. A.; 1990; "Rainfall Deficits: Distribution of Monthly Runs"; *Journal of Hydrology*, Vol. 115.
- 4) Hornik, K., Stimpchcombe, M., and White, H., 1989; "Multilayer Feedforward Network are Universal Approximators"; *Neural Networks*, No.2, pp.359-366.
- 5) Karamouz M., Sedigheh Torabi, Shahab Araghinejad, Sept 2004; "Analysis of Hydrologic and Agricultural Droughts in Central Part of Iran"; *J. Hydrologic Engineering*, vol.9, No.5.
- 6) Karamouz, M., Nazif, S., and Rasouli, K., Aug. 2007; "Evaluation of Dry Spans Characteristics Considering Climate Change Effect"; Vol. 1, *ICESM2007-A-0043*, Second International Conference on Earth Systems Modeling (ICESM).
- 7) Moye, L. A. and A. S. Kapadia; 1995; "Predictions of Drought Length Extreme Order Statistics Using Run Theory"; *Journal of Hydrology*, Vol. 169.
- 8) Narasimhan, B., and R. Srinivasan, 2005, "Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring" *J. Agri. & Forest Meteo.*, 133, PP.69-88.
- 9) Sen, Z.; 1990; "Critical Drought Analysis by Second-Order Markov Chain"; *Journal of Hydrology*, Vol. 120.
- 10) Shin Hyun-Suk, 2000; "Regional Drought Analysis Based on Neural Networks"; *J. Hydraulic Engineering*, Vol.5, No.2