



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN 2980-7786

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

ارزیابی پارامترهای تاثیرگذار بر میزان آب دریاچه ارومیه با استفاده از الگوریتم‌های داده کاوی

حامد رضا حاج قاسم^۱، نفیسه حاج قاسم^۲، محدثه قاسمی^۳، عطیه نظری^{۴*}

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (آب و سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
- ۲- دانش آموخته کارشناسی مهندسی کامپیوتر (نرم‌افزار) دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی، قزوین، ایران.
- ۳- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (محیط‌زیست)، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- ۴- دکترا تخصصی زمین‌شناسی (آب زیرزمینی)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

Nazary_atieh@yahoo.com

چکیده

تغییرات در آب و هوا و افزایش دمای جهانی از مسائل بسیار مهم در حوزه‌ی زیست محیطی هستند که در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی انجام شده است. مسائل زیست‌محیطی اکنون نسبت به مسائل مرتبط با زیرساخت‌های فیزیکی و سازه‌ها، اهمیت بسیار بیشتری پیدا کرده‌اند، با این وجود، در گذشته به ندرت مورد توجه قرار می‌گرفتند. این موضوع به دلیل اثرات مخرب زیست محیطی از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم‌هایی که برای تخمین و پیش‌بینی خشکسالی و برنامه‌ریزی برای مقابله و مدیریت آن استفاده می‌شوند، از جمله ابزارهای بسیار ضروری برای بررسی تغییرات مکانی و میزان خشکسالی در یک منطقه هستند. بر اساس هشدارهای این سیستم‌ها، عملیات‌های مرتبط با مقابله با خشکسالی، از جمله زمان و نوع اقدامات مورد نیاز، تعیین می‌شوند. برای انجام این کار، الگوریتم‌های مبتنی بر داده به تحلیل سری‌های زمانی متغیرهایی مانند دما، بارش بر روی سطح دریاچه ارومیه، جریان‌های سطحی ورودی به دریاچه، تبخیر از سطح دریاچه و حجم آب دریاچه در طول مدت زمان طولانی مورد استفاده قرار گرفتند. در ابتدا، داده‌های تاریخی مرتبط با دریاچه ارومیه در یک دوره زمانی مشخص مورد استفاده قرار گرفت و سپس این داده‌ها برای آموزش و آزمون مورد تکرار قرار گرفتند. عواملی که منجر به کاهش سریع‌تر سطح آب در دریاچه در چند سال اخیر شده‌اند، شامل عوامل خشکسالی و عوامل مرتبط با انسان مانند برداشت نامتعادل آب‌های سطحی و زیرزمینی است. این تغییرات می‌تواند توزیع ماهانه و سالانه دبی آب را تغییر دهد. در صورت خشک شدن دریاچه، هوای منطقه به گونه‌ای تغییر می‌کند که به هوای گرمسیری با بادهای نمکی تبدیل می‌شود و محیط زیست منطقه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به همین دلیل، در این مقاله از ترکیب روش‌های توانمندی مانند الگوریتم‌های تکاملی درخت، برنامه‌ریزی بیان ژن، و ماشین‌های بردار پشتیبان که جزو روش‌های مبتنی بر داده هستند، برای پیش‌بینی به صورت تصادفی استفاده شد. در اینجا، ۷۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۳۰٪ برای آزمون انتخاب شدند. نتایج این تحقیق نسبت به روش‌های قبلی بهبودهای چشمگیری ارائه دادند. برای محاسبه پارامترهای مختلف تأثیرگذار در خشکسالی، تغییرات اقلیمی را در دو دوره آینده در حوضه دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفت.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، تحلیل خشکسالی، آب‌های زیرزمینی، ترکیب الگوریتم‌ها، داده مینا.

۱- مقدمه



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

رودخانه‌ها به عنوان جزء اساسی از طبیعت شناخته می‌شوند و بشر به آن‌ها به شدت وابسته است. اقلیم کره زمین همواره تغییر کرده و تغییرات اقلیم نمایانگر نوسانات گسترده در آب و هوای مناطق مختلف بوده و به گرم شدن دمای کره زمین نیز مرتبط است. در حال حاضر، تهدیدات محیطی متعددی در سراسر جهان وجود دارند که شامل افزایش جمعیت پیش‌بینی شده، نوسانات ناپایدار در شرایط زمینی، آلودگی کره زمین، اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، کاهش منابع آب زیرزمینی و منابع غذایی اقیانوس‌ها، افزایش سطح دریاها و تغییرات در الگوهای آب و هوایی می‌شوند (شیران‌زایی و آقاجانی، ۱۴۰۲). تغییرات اقلیم و افزایش گرمایش جهانی از مسائل مهم در حوزه زیست محیطی هستند. مطالعات متعددی در خصوص تغییرات پارامترهای اقلیمی در گذشته انجام شده‌اند که بیشتر آن‌ها به تغییرات در الگوی بارش و دما تمرکز داشته‌اند.

خشکسالی یک بلای طبیعی است که پس از دوره‌های بارانی کوتاه یا بلند به وقوع می‌پیوندد و در تمام نواحی جغرافیایی قابل وقوع است. این پدیده هر ساله آسیب‌های زیادی را به ارث می‌گذارد و به معنای وقوع وضعیتی کم‌آبتر از معمول در یک منطقه است. خشکسالی به طور معمول با کاهش بارش آغاز می‌شود و می‌تواند آسیب‌های غیرقابل جبرانی ایجاد کند. این پدیده به وسیله شاخص‌های بارش استاندارد شده برای دوره‌های ۲۴ و ۴۸ ماهه پیش‌بینی و پایش می‌شود (Mcconkey et al., ۱۹۹۹). برای این اندازه‌گیری شدت و محدوده خشکسالی از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود. بیشتر شاخص‌های مورد استفاده در این زمینه بر اساس معیارهای هواشناسی عمل می‌کنند و متغیرهایی نظیر رطوبت خاک، دما، و به‌ویژه بارش را مورد بررسی قرار می‌دهند. با توجه به دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای متنوع و پراکنده، امکان مطالعه و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از این تکنولوژی نیز فراهم شده است (عبدی نهاری و همکاران، ۱۴۰۲).

استفاده از داده‌های قابل اعتماد و تخمین دقیق پارامترهای تأثیرگذار بر آب رودخانه بسیار حیاتی است، زیرا تخمین نادرست این پارامترها می‌تواند در مراحل طراحی پروژه‌های آبی هزینه‌های اضافی و سنگینی ایجاد کند. تعیین دقیق زمان شروع و پایان خشکسالی چالش‌برانگیز است و به دلیل پیچیدگی و پیش‌بینی‌ناپذیر بودن این پدیده، به طور معمول به صورت تخمینی انجام می‌شود. برای بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، تعیین دوره‌های بازگشت مشترک و مشروط برای وقوع خشکسالی ضروری است. با گذر زمان، علم نیز پیشرفت می‌کند و روش‌های جدیدتر و بهتری به کار گرفته می‌شود. روش‌های علمی نوین به دنبال کشف محدودیت‌های روش‌های قدیمی هستند و از آن‌جا که روش‌های آماری به معنایی قدیمی تر از روش‌های Data mining محسوب می‌شوند، این حقیقت که دارای محدودیت‌های خود هستند، اعمال می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

تاریخ دریاچه ارومیه به دوران باستان بازمی‌گردد. در دوران رومیان، این دریاچه به نام دریاچه ماتیانوس شناخته می‌شد و در متون اولیه فارسی به آن دریاچه اسپوتا اشاره شده است. دریاچه ارومیه از اواسط دهه ۸۰ میلادی شروع به خشک شدن کرد و امروزه در خطر خشک شدن کامل قرار دارد. برای خشک شدن این دریاچه، دلایل متعددی ذکر شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده بی‌رویه از منابع آب حوضه آبریز دریاچه و کاهش بارش برف و باران در سال‌های اخیر اشاره کرد که با چالش‌های زیست محیطی زیادی همراه بوده است.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران تصمیم به ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی و داده‌های موجود گرفته‌تند. در دهه‌های اخیر روش‌های داده مینا [مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network; ANN)، برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic Programming; GP)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM) و مدل‌های نرو-فازی (Nero fuzzy; NF)] برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها از طبیعت الهام گرفته‌اند و ویژگی‌های خاص خود را دارند. همچنین، در گذشته از روش برنامه‌ریزی ژنتیک برای تخمین پارامترهای مختلف استفاده شده است، از جمله پیش‌بینی بارش-رواناب با استفاده از شبیه‌سازی نوسانات



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN 2980-7786

تراز آب (Kisi et al., 2013). با وجود تمام تلاش‌های انجام شده، دریاچه همچنان در وضعیت بحرانی قرار دارد و سطح آب همچنان در حال کاهش است. حفظ این دریاچه باستانی یک چالش مداوم برای آینده است.

سلامتیان و همکاران (1402) به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در دشت قم از مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی بهره بردند. با استفاده از این روش، امکان مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی مانند آب‌های زیرزمینی بدون نیاز به درک دقیق از ویژگی‌های فیزیکی مسئله و اطلاعات پیچیده زمین‌شناسی فراهم شد. در این مقاله، نه چاه مشاهده‌ای در محدوده دشت قم انتخاب شد و نتایج نشان داد که تراز آب زیرزمینی در ماه‌های قبل و میزان تخلیه چاه به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در مناطق با آب و هوای خشک و نیمه‌خشک مانند دشت قم، وارد مدل‌سازی مناسبی شده است.

(Singh & Song, 2010) از جفت پلاکت برای مدل‌سازی احتمال مشترک سه ویژگی خشکسالی شامل شدت، مدت و زمان بین ورود استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای مدت زمان و زمان بین ورود، توزیع Weibull بهترین است و از نظر شدت، توزیع گاما به خوبی برازش دارد. پارامترهای جفت پلاکت با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) برآورد و با روش تابع \log -pseudolikelihood (LPLF) مقایسه شد. نتایج نشان داد که توزیع‌های دو متغیره و سه متغیره با توزیع‌های تجربی با پارامترهای محاسبه شده توسط GA براساس تحلیل خطا (یعنی معیار RMSE) مطابقت دارند.

سبزی پرور و کاظمی (1389) به مقایسه هفت شاخص خشکسالی با آمار بارندگی 35 ساله در 22 ایستگاه در استان همدان پرداختند و نشان دادند شاخص‌هایی همچون DI و RAI و Z از نظر آماری به هم شبیه بوده و در ارزیابی خشکسالی در شرایط اقلیمی سرد و نیمه خشک استان همدان به نتایج مشابهی ختم می‌شوند آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI علیرغم توانایی آن در شروع خشکسالی، شاخص مناسبی جهت پایش خشکسالی در مقیاس ماهیانه در شرایط اقلیمی سرد و نیمه خشک نمی‌باشد.

حاج‌قاسم و همکاران، (1401) در پژوهشی ضمن آشنایی با پدیده ی تغییر اقلیم، اثرات آن بر منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی شده است. برای این کار از داده‌های بارش، دما (ماکزیمم، مینیمم)، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی استفاده گردید. ابتدا از داده‌های تاریخی برای یک دوره 70 ساله استفاده گردید، سپس این داده‌ها برای 3000 نمونه تکرار شدند. بدین منظور با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های داده مینا، سنجش از دور و روش رگرسیون خطی به بررسی سری‌های زمانی دما، بارش برسطح دریاچه، جریان‌های سطحی ورودی به دریاچه، تبخیر از سطح دریاچه و حجم آب دریاچه با هدف یافتن روندی معنادار در دوره‌ی زمانی دراز مدت به کار گرفته شدند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ترکیبی M5-GEP داده‌ها را دسته‌بندی، پیش‌بینی جهت میزان خشکسالی تخمین زدند. در نهایت نتایج حاصل از آزمون M5-GEP بر اساس پارامترهای مختلف خشکسالی میزان تغییرات اقلیمی را در دو دوره آبی در حوضه دریاچه ارومیه را بترتیب، 37 و 44 درصد را نشان داد.

(Ekanayake & Perera, 2014) ویژگی‌های خشکسالی منطقه Anuradhapura در سریلانکا را با استفاده از SPI 3 ماهه بر اساس داده‌های بارندگی ماهانه طی سال‌های 2007-1951 تعیین کردند. نتایج نشان داد که در مورد شدت و مدت خشکسالی، توزیع گاما به عنوان توزیع حاشیه‌ای بهتری انتخاب شد. همچنین، مفصل فرانک به عنوان بهترین مفصل برای تجزیه و تحلیل خشکسالی انتخاب گردید. (Tosunoglu & Can, 2016) اقدام به مدل‌سازی توزیع احتمال مشترک خشکسالی در ترکیه کردند. آن‌ها با استفاده از توابع مفصل، ویژگی‌های اصلی خشکسالی، به عبارت دیگر مدت و شدت آن را با استفاده از SPI محاسبه کردند. براساس آزمون مجذور کای، توزیع‌های خشکسالی Weibull گاما و پارتو تعمیم‌یافته به عنوان بهترین توزیع‌ها برای شدت انتخاب شدند، در حالی که توزیع دو پارامتری لگ نرمال به عنوان توزیع مناسب برای مدت خشکسالی شناسایی شد. در نهایت، از چهار مفصل دو متغیره برای محاسبه احتمال مشروط و دوره بازگشت خصوصیات خشکسالی استفاده شد.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

Amirataee et al. (۲۰۱۸) از توابع مفصل در استخراج رابطه شدت خشکسالی-منطقه- فراوانی (SAF) در حوضه دریاچه ارومیه، ایران استفاده کردند. مفصل فرانک به عنوان تابع مناسب برای استخراج منحنی SAF در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. Van de Vyver & Van den Bergh (۲۰۱۸) یک تابع با دو پارامتر را به منظور مدل سازی وابستگی بارش تجمعی پیشنهاد دادند. آن ها از شاخص کسری مشترک با توزیع گاوسی برای تصنیف خشکسالی بهره بردند.

Ayantobo et al. (۲۰۱۸) مدل سازی رویدادهای خشکسالی را در چین با استفاده از توابع دو بعدی بررسی کردند. آن ها از شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI) بهره بردند و از روش تخمین حداکثر درست نمایی (MLE) و روش برازش منحنی (CFM) برای تخمین پارامترهای مفصل استفاده کردند. نتایج نشان داد که احتمال وقوع خشکسالی های طولانی تر در مناطق زیرمجموعه ارتباط دارد و این خشکسالی ها دارای شدت در دوره های بازگشت کوتاه تر بیشتری هستند.

Nabaei et al. (۲۰۱۹) با استفاده از داده های بارندگی ماهانه از ۱۰۲ ایستگاه در ایران، وضعیت خشکسالی هواشناسی را با استفاده از SPI و توابع مفصل ارزیابی می کنند. آنها سه ویژگی مهم خشکسالی، یعنی شدت، مدت و اوج خشکسالی را تخمین زدند. نقشه های فضایی تولید شده اطلاعات مفیدی در خصوص وضعیت خشکسالی را فراهم می کنند و می توانند بهبود مدیریت خشکسالی را تسهیل کنند.

Zhang et al. (۲۰۲۰) خطر خشکسالی را در آسیای مرکزی با استفاده از مفصل چند بعدی بر اساس شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI) بررسی کردند. نتایج نشان داد که خطر خشکسالی با استفاده از توزیع مشترک سه بعدی با توزیع دو بعدی یکسان است.

Mehr et al. (۲۰۲۰) تحلیل خشکسالی هواشناسی در سراسر پایتخت ترکیه، یعنی آنکارا، با استفاده از سه مدل آب و هوای جهانی (GCM) به صورت منطقه ای را انجام دادند. به منظور این تحلیل، آنها شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص استاندارد تبخیر و تعرق بارش (SPEI) تحت سناریوهای RCP۴,۵ و RCP۸,۵ گازهای گلخانه ای را بکار گرفتند. به طور کلی، نتایج آنان نشان داد که آنکارا در طول دوره مرجع ۱۹۷۱-۲۰۰۰ شش حادثه خشکسالی شدید و دو حادثه خشکسالی شدید را تجربه کرده است. با این حال، پیش بینی ها نشان می دهد که در دوره آینده نزدیک ۲۰۱۶-۲۰۴۰، حادثه های خشکسالی کمتری بدون حوادث خشکسالی شدید بالقوه خواهد بود.

Da Rocha Júnior et al. (۲۰۲۰) دوره بازگشت حوادث خشکسالی دو متغیره را در منطقه شمال شرقی که پرجمعیت ترین منطقه نیمه خشک در جهان است و به شدت مستعد خشکسالی است، ارزیابی کردند. هدف آنها ارزیابی فراوانی حوادث خشکسالی در NRB و محاسبه دوره بازگشت هر حادثه خشکسالی با استفاده از تکنیک copula برای بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس زمانی سه ماهه را داشت. این تکنیک مدت و شدت خشکسالی در NRB را در یک توزیع دو متغیره مشترک ادغام می کند و سه خانواده از توابع جفت ارضمیدسی (Frank و Clayton، Gumbel-Hougaard) را آزمایش کردند. نتایج آنان نشان داد که نوار شرقی NRB دارای طولانی ترین دوره بازگشت (بیش از ۶۰ ماه)، بیشتر در بخش جنوب شرقی است که دوره بازگشت بیش از ۹۰ ماه مشاهده شد. NRB شمالی کوتاه ترین دوره بازگشت (۴۵ ماه) را نشان می دهد، که این است که این بخش NRB با بیشترین فراوانی حوادث خشکسالی شدید است. این نتایج به مدیران خطر خشکسالی در NRB اطلاعات مفیدی ارائه داد.

۳- داده‌ها روش‌ها

مطالعه منطقه موردی:

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دسته‌بندی شش گانه حوضه‌های آبریز ایران، در شمال غرب کشور واقع شده و بخش‌های زیادی از اراضی استان‌های آذربایجان غربی و شرقی را در بر می‌گیرد. دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و بزرگ‌ترین دریاچه آب شور در منطقه خاورمیانه است. این حوضه با وسعتی برابر ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع و مساحتی معادل ۳/۲۱ درصد مساحت کل کشور بین مدارهای ۳۸°۲۹' تا ۳۵°۴۰' عرض شمالی ۴۷°۵۳' تا ۴۴°۱۳' طول شمالی قرار گرفته است. جریان‌های سطحی در این حوضه آبریز برای تأمین آب شرب و کشاورزی مردم منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. بلندترین ارتفاع در حوضه در نزدیکی قله سبلان و با ارتفاعی معادل ۸۳۱۰ متر قرار دارد و اختلاف ارتفاع در حوضه تخمین زده شده حدود ۲۱۱۹ متر است. (شکل ۱ و ۲)



شکل شماره (۲): موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

شکل شماره (۱): موقعیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه

شاخص استاندارد بارش و ویژگی‌های خشکسالی

با توجه به شناخته شدن SPI (شاخص استاندارد بارش) به عنوان یک شاخص مناسب برای تحلیل خشکسالی (Hayes et al. ۱۹۹۹)، سری زمانی SPI از بارندگی ماهانه برای معیارگذاری و محاسبه ویژگی‌های خشکسالی مانند مدت و شدت استفاده شد (McKee et al. ۱۹۹۳). اهمیت شدت و مدت زمان برای مدیریت خشکسالی بسیار زیاد است. خشکسالی به عنوان دوره‌هایی تعریف می‌شود که SPI به زیر -۱ و یا کمتر می‌رسد و شرایط مرطوب و خشک بر اساس مقادیر SPI دسته‌بندی می‌شوند.

توجه به این نکته ضروری است که برخی از حوادث خشکسالی ممکن است مدت زمان طولانی داشته باشند اما SPI در طی هر دوره به مقدار -۱ یا کمتر نمی‌رسد. در واقع، SPI تجمعی برای این نوع رخدادها وجود دارد که احتمال وقوع آنها کمتر از رخدادهای با مدت زمان کوتاه است، اما SPI همچنان از -۱ کمتر است (میرعباسی و همکاران، ۱۳۹۲). در طبقه بندی دیگری، خشکسالی می‌تواند به عنوان یک دوره پیوسته تعریف شود که SPI زیر صفر است (Shiau ۲۰۰۶). به این ترتیب



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

مدت زمان خشکسالی نمایانگر یک دوره مداوم با SPI منفی است و شدت خشکسالی به عنوان مقادیر تجمعی SPI در طی مدت خشکسالی محاسبه می‌شود، که در معادله ۱ توضیح داده شده است.

$$S = -\sum_{i=1}^D SPI_i \quad (1)$$

که در آن S شدت خشکسالی و D طول دوره خشکسالی (بر حسب ماه) است (McKee et al. ۱۹۹۳). در موقعیت‌های مشروط، می‌توان دوره‌های بازگشت شدت و مدت خشکسالی را با استفاده از معادلات ۲ و ۳ توصیف نمود. همانند موارد گذشته، برای این وضعیت، دو حالت ممکن وجود دارد. اولی شامل دوره بازگشت مدت خشکسالی است که شدت خشکسالی در آن بیشتر از مقدار آستانه است، و دومی شامل دوره بازگشت شدت خشکسالی است که مدت زمان خشکسالی در آن بیشتر از مقدار آستانه ثابت است (Shiau ۲۰۰۶).

$$T_{D|S \geq s} = \frac{E(L)}{[1-F_S(s)][1-F_D(d)-F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))]} \quad (2)$$

$$T_{S|D \geq d} = \frac{E(L)}{[1-F_D(d)][1-F_D(d)-F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))]} \quad (3)$$

که در آن $T_{S|D \geq d}$ دوره بازگشت مشروط برای S را نشان می‌دهد وقتی $D \geq d$ و $T_{D|S \geq s}$ نشان‌دهنده دوره بازگشت مشروط برای D زمانی است که $S \geq s$.

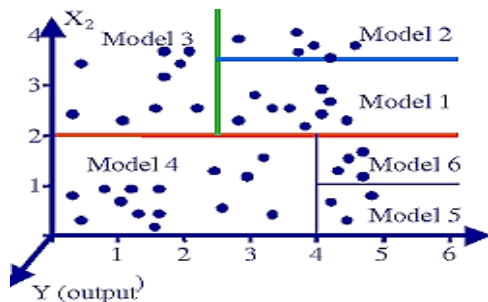
برای نظارت بر دوره‌های خشکی، تدوین یک شاخص که در آن مقیاس زمانی مشخصی مدنظر باشد، اهمیت ویژه‌ای دارد که مشخصاً برای تجزیه و تحلیل این پدیده و تأثیرات آن بر محیط زیست کاربردهای متعددی دارد. به همین دلیل، می‌توان از شاخص استاندارد شده بارندگی استفاده کرد. این شاخص تنها شاخصی است که در آن مقیاس زمانی برای پایش دوره‌های خشک در نظر گرفته شده است. در مقابل، شاخص‌های دیگر مانند شاخص پالمر، که در سطح جهانی کاربرد دارد، این امکان را فراهم نمی‌کنند و به طور ذاتی یک مقیاس زمانی ۱۲ ماهه را در محاسبات خود استفاده می‌کنند (Palmer, ۱۹۶۵).

مدل با استفاده از الگوریتم‌ها داده مینا

در این تحقیق، مجموعه داده‌ها به روش دسته‌بندی به دست آمد. این مجموعه داده‌ها شامل سری‌های زمانی مختلف از دما، بارش بر روی سطح دریاچه، جریان‌های سطحی ورودی به دریاچه، تبخیر از سطح دریاچه و حجم آب در دریاچه ارومیه بودند. برای انجام این دسته‌بندی از الگوریتم درخت $G5$ استفاده شد و از الگوریتم‌های تکاملی برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان برای دوره زمانی مشخصی که شامل سال‌های ۱۳۴۴ تا ۱۴۰۱ می‌شود، بهره‌برداری شد. این دوره زمانی شامل ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش^۱ مدل‌ها و ۳۰ درصد باقیمانده به عنوان داده‌های آزمون^۲ برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل زیر نحوه دسته‌بندی داده‌ها توسط الگوریتم درخت را نمایش می‌دهد.

^۱ Train

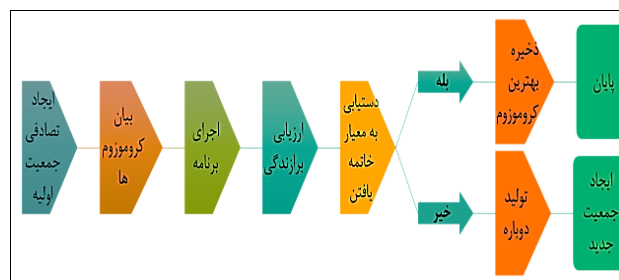
^۲ Test



	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8	Var9
1	0.30011	0.45195	0.12075	0.14113	0.33979				
2	0.2122	0.74101	0.12075	0.10830	0.11129				
3	0.15005	0.64340	0.12075	0.11536	0.14495				
4	0.19001	0.58287	0.15431	0.12008	0.20759				
5	0.27813	0.48621	0.12075	0.13327	0.32640				
6	0.08473	0.53807	0.16841	0.12711	0.42798				
7	0.33527	0.28698	0.18693	0.19799	0.23883				
8	0.18022	0.38301	0.14481	0.15489	0.11041				
9	0.13308	0.34482	0.14481	0.17044	0.15200				

شکل (۳) : نحوه دسته بندی الگوریتم M5

بعد از تحلیل داده‌های پوششی، تاثیر پارامترهای استفاده شده در مدل‌های برتر با انجام آنالیز حساسیت بررسی شد. آنالیز حساسیت با استفاده از دو روش آنالیز حساسیت OAT و آنالیز حساسیت فاکتوریل اجرا شد. در آنالیز حساسیت OAT، هر یک از پارامترهای ورودی مدل برتر به تنهایی حذف شد و سپس مدل مجدداً اجرا شد. سپس با محاسبه سه معیار ارزیابی عملکرد مدل (R, DC, RMSE)، تاثیر پارامتر حذف شده در کاهش دقت مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. تابع برازش به وسیله ارزیابی تعدادی از مسائل هدف، که به عنوان مسائل برازش هم شناخته می‌شوند، ارزیابی می‌شود. اگر کیفیت قابل قبولی در یک راه حل پیدا شود و یا تعداد نسل‌ها به تعداد مشخصی برسد، فرآیند تکامل به پایان می‌رسد و بهترین راه حل یافت شده تا کنون گزارش می‌شود. از سوی دیگر، اگر شرایط توقف تعیین نشود، بهترین راه حل از نسل فعلی به عنوان نخبگان نگه‌داشته می‌شود (به معنای گزینش نخبگان) و سایر راه‌حل‌ها به فرآیند گزینش واگذار می‌شوند. این گزینش یا انتخاب نقش بقا را انجام می‌دهد و بر اساس آن، افراد برتر فرصت بهتری برای تولید فرزندان دارند. این کل فرآیند تکراری است که برای چندین نسل انجام می‌شود، و با پیشرفت نسل به جلو، انتظار می‌رود کیفیت جمعیت در مجموعه‌ای متوسط بهبود یابد (Lopes & Weinert ۲۰۰۴). فلوجارت روند GEP به صورت زیر است:



شکل (۴) : چارت الگوریتم GEP

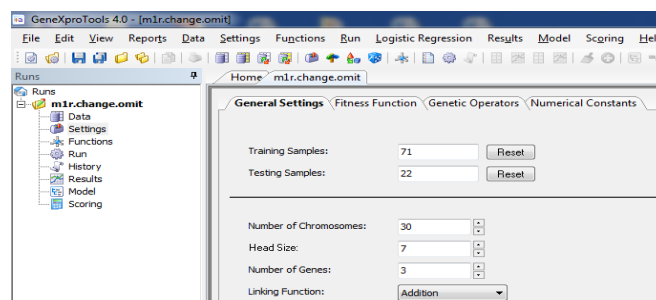
الگوریتم SVM یکی از الگوریتم‌های دسته‌بندی و تشخیص الگو است که وپنیک آن را در سال ۱۹۹۵ معرفی نمود. این الگوریتم برای تشخیص الگوها و دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، SVM یکی از روش‌های نسبتاً جدید است که در سال‌های اخیر نشان داده است که به طور مؤثری می‌تواند در مسائل دسته‌بندی عملکرد خوبی داشته باشد و از روش‌های قدیمی‌تر مانند شبکه‌های عصبی پرسپترون عملکرد بهتری ارائه دهد. می‌توان گفت که محبوبیت فعلی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به نسبت مقایسه با شبکه‌های عصبی در دهه‌ای اخیر افزایش یافته است. دلیل این افزایش محبوبیت نیز قابلیت این الگوریتم در حل مسائل متنوع می‌باشد. الگوریتم SVM بر اساس تقسیم خطی

داده‌ها عمل می‌کند و سعی می‌کند خطی را انتخاب کند که حاشیه اطمینان بیشتری دارد. این الگوریتم از اصول احتمالاتی استفاده نمی‌کند و همواره به یک پاسخ یکتا منجر می‌شود و زمان کمتری برای یافتن جواب بهینه مصرف می‌کند و فرآیند آموزش آن نسبت به بسیاری از الگوریتم‌ها آسان‌تر است.

در مراحل آموزش مدل‌ها از مجموعه داده‌های آموزش استفاده شده و مجموعه داده‌های آزمایش نیز برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار رفته است. انتخاب داده‌های آموزش نیز به نحوی انجام می‌شود که تمامی دامنه داده‌ها را در برگیرد.

طراحی برنامه ریزی بیان ژن

با توجه به ماهیت این الگوریتم، فضای پاسخ‌های ممکن به صورت کامل‌تری جستجو شده‌است. برای این کار از نرم افزار GeneXproTools ۴ استفاده شد.

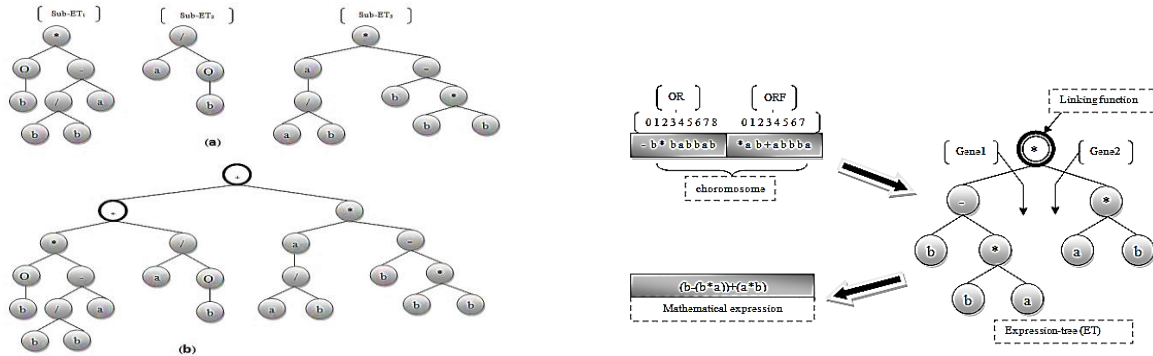


شکل (۵): آزمایش و دسته بندی داده‌ها

در این مطالعه، کروموزوم‌ها با استفاده از نمایش درختی (ETS) نمایش داده شده‌اند. در این مرحله، یک تابع برازش برای ارزیابی کیفیت یک راه‌حل در محدوده مسئله استفاده می‌شود. این تابع برازش با پردازش تعدادی از مسائل هدف، که به آنها مسائل برازش نیز می‌گویند، ارزیابی می‌شود. در صورتی که کیفیت یک راه‌حل به اندازه‌ای مناسب یافت شود یا تعداد مشخصی از نسل‌ها تولید شود، فرآیند تکامل متوقف می‌شود و بهترین راه‌حل یافت شده تا کنون گزارش می‌شود. از سوی دیگر، اگر شرایط توقف ایجاد نشود، بهترین راه‌حل از نسل فعلی نگه‌داشته می‌شود (که به عبارتی نخبه‌گزینی می‌شود) و راه‌حل‌های دیگر به فرآیند انتخابی ترکیب می‌شوند.

ابداع کروموزوم‌های قابل نمایش به صورت درخت تجزیه، ایده‌ای بنیادین در (GEP) است. یک زبان به نام "زبان کاروا" طراحی شده تا بتواند اطلاعات کدگذاری شده در کروموزوم‌ها را خوانده و مفهوم دهد. علاوه بر این، ساختار کروموزوم‌ها به گونه‌ای طراحی شده که اجازه دهد چندین ژن را ایجاد کرد، که هر یک از آنها برای برنامه‌های کوچک‌تر یا برای کدگذاری به صورت درختی تقسیم می‌شوند. در (GEP)، هر ژن به صورت درختی کدگذاری می‌شود. در مورد کروموزوم‌های چندژنی، تمام بیان‌های درختی به وسیله تابع پیوند از ریشه خود به یکدیگر متصل می‌شوند. شکل (۶) نشان می‌دهد که یک کروموزوم با دو ژن چگونه به صورت یک رشته خطی کدگذاری شده و به صورت درختی ET بیان می‌شود.

هر ژن، به صورت یک بیان زیر درختی (sub-ET) کدگذاری شد. sub-ETs (زیر بیان درختی‌ها) به وسیله اثر متقابل بر یکدیگر، یک مجموعه از چند زیر واحد ET را تشکیل داده و خروجی مورد نظر را می‌دهند.



شکل (۶): کدگذاری به فرم رشته خطی و کد برداری به صورت ET درختی رابطه

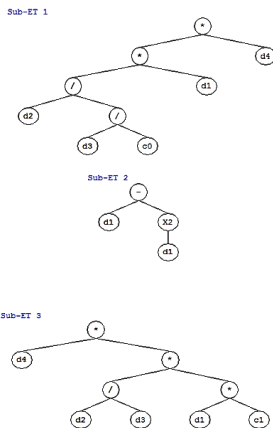
یک کروموزوم با دو ژن در (GEP)

شکل (۷): بیان

یکی از جنبه‌های حیاتی در روش (GEP)، مشخص کردن تابع برازش است، و هدف اصلی آن، یافتن یک راه‌حل که برای همه موارد برازش با دقتی مشخص به خوبی عمل کند. از نظر ریاضی، برازش تابع f_i از یک برنامه اختصاصی i به شکل رابطه (۴) تعبیر می‌شود:

$$f_i = \sum_{j=1}^n \left(R - \left| 100 * \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \right| \right) \quad (4)$$

در محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده به وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n مورد برازش) و T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. قابل توجه است که عبارت داخل قدر مطلق متناظر با درصد خطای نسبی است و این عبارت را دقت می‌نامند. چنانچه $P_{ij} = T_j$ خطا صفر می‌شود. بنابراین برای یک برازش کامل که در آن $P_{ij} = T_j$ است عبارت داخل قدر مطلق صفر و $f_i = f_{\max} = nR$ خواهد شد. رابطه پیش‌بینی خشکسالی بر اساس درخت تصمیم در روش برنامه‌ریزی بیان ژن:



این ساختار نه تنها کدگذاری هر برنامه متصور را می‌پذیرد، بلکه اجازه یک سیر تکاملی مؤثر را نیز می‌دهد.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های مورد استفاده در تخمین خشکسالی دریاچه ارومیه، از سه پارامتر آماری بهره‌برداری شد که به شرح زیرند: ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی (R)، همبستگی خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی (DC) که یکی از شاخص‌های اساسی برای ارزیابی قابلیت عملکرد یک مدل است. هر چه مقدار DC به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده بهتر بودن ارتباط مدل با داده‌های واقعی است، و همچنین ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) که معیاری برای اندازه‌گیری انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از واقعی مقادیر می‌باشد. هر چه مقادیر CC و DC به یک نزدیک‌تر و مقدار RMSE کمتر و نزدیک به صفر باشد، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل است. معادلات محاسبه این پارامترهای آماری به صورت زیر می‌باشد و می‌توان آن‌ها را با استفاده از معادلات ۵ تا ۷ محاسبه نمود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum (T_i - O_i)^2}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T}_i)^2}} \quad (6)$$

$$CC = \frac{\sum (T_i - \bar{T}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (7)$$

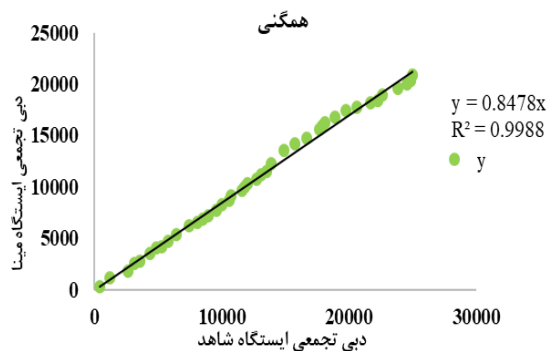
در روابط بالا، O معرف مقدار خروجی برای هر داده، T_i مقدار واقعی برای آامین خروجی، \bar{O}_i میانگین خروجی‌ها، \bar{T}_i میانگین مقادیر واقعی و N بیانگر تعداد کل نمونه‌ها می‌باشد. لازم به توضیح است که در روش الگوریتم بیان ژن، مقادیر مربوط به طول سر، تعداد ژن‌ها، تعداد کروموزوم‌ها، و تابع پیوند از طریق یک روند آزمون و خطا تعیین و بهترین مقادیر شاخص‌های آماری و فرمول خروجی مناسب انتخاب شدند.

جدول (۱): پارامترهای مدل‌های GEP استفاده‌شده در این مقاله.

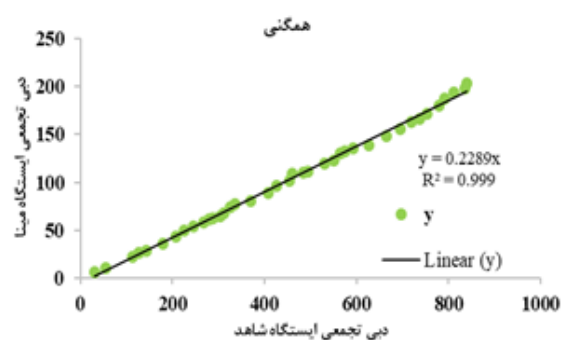
تنظیمات پارامتر	پارامتر
۷	اندازه سر (Head Size)
۳۵	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)
۳.۴	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم‌ها (Number of genes)
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)
۰/۱	نرخ وارون سازی (Inversion Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب تک - (One-Point Recombination Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب دو - (Two-Point Recombination Rate)
۰/۱	نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)
۰/۱	نرخ ترانهش درج متوالی (IS Transposition Rate)
۰/۱	نرخ ترانهش ریشه درج (RIS Transposition Rate)

۰/۱	نرخ ترانهش ژن (Gene Transposition Rate)
RMSE	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
+	تابع پیوند (Linking Function)

برای پیدا کردن بهترین مقادیر پارامتر تابع کرنل (γ) و مقادیر پارامتر جریمه (C) و حداکثر حاشیه اطمینان (ϵ) از روش آزمون و خطا استفاده شد و با امتحان مقادیر مختلف، مقدار بهینه این پارامترها انتخاب شد. روش انجام کار به این شکل بود که ابتدا برای یک مقدار ثابت γ ، مقادیر بهینه ϵ و C به دست آمدند، سپس مقدار γ تغییر کرد و با محاسبه پارامترهای آماری، مقدار بهینه آن محاسبه شد. در نمودارهای زیر، درجه همبستگی با توجه به روابط فوق را نشان می‌دهند:



شکل (۸):



شکل (۷): همگنی ایستگاه‌ها

همگنی ایستگاه‌ها

۴- بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر داده به دلیل تصادفی بودن انتخاب داده‌ها و دقت بالای این الگوریتم‌ها صورت گرفت. در جدول زیر، نتایج حاصل از ترکیب این الگوریتم‌ها آورده شده است.

جدول (۲): نتایج حاصل از تست تصادفی و ایستایی بودن داده‌ها

نام ایستگاه	میرآباد				بی قلعه			
	Test		Trend		Test		Trend	
Oct.	-۰,۴۲	±۱,۹۶	۱,۲۸	±۲	-۱,۵۵	±۱,۹۶	۰,۵۹	±۲
Nov.	-۰,۶۲	±۱,۹۶	۰,۶۴	±۲	-۱,۰۲	±۱,۹۶	۱,۳۴	±۲
Dec.	-۰,۱۹۵	±۱,۹۶	۲,۱۹	±۲	-۲,۳۹	±۱,۹۶	۲,۴	±۲
Jan	-۰,۹۴	±۱,۹۶	۱,۱۴	±۲	-۱,۰۷	±۱,۹۶	۲,۰۶	±۲



Feb.	-۱,۵۹	±۱,۹۶	۱,۴۴	±۲	-۲,۰۵	±۱,۹۶	۱,۷۸	±۲
Mar.	-۰,۶۳	±۱,۹۶	-۰,۷۹	±۲	۰,۵۹	±۱,۹۶	-۰,۲۳	±۲
Apr.	-۰,۸۸	±۱,۹۶	۱,۸۱	±۲	-۰,۵۸	±۱,۹۶	۱,۷	±۲
May.	۰,۰۶۵	±۱,۹۶	۱,۰۷	±۲	-۰,۳۲	±۱,۹۶	۱,۲۸	±۲
Jun.	۰,۰۶۴	±۱,۹۶	۰,۸۷	±۲	۱,۴۱	±۱,۹۶	۰,۶۲	±۲
Aug.	-۱,۶۸	±۱,۹۶	۰,۳۲	±۲	-۰,۲۸	±۱,۹۶	۰,۵۳	±۲
Sep.	-۱,۶۹	±۱,۹۶	۱,۳۱	±۲	-۱,۵۴	±۱,۹۶	۰,۶۷	±۲

دما

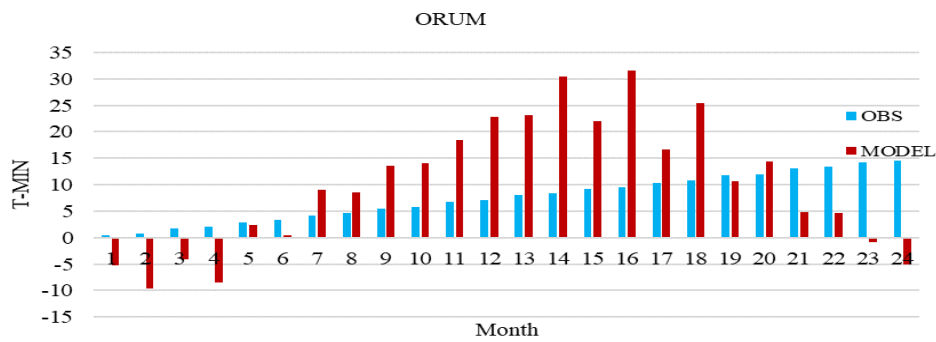
جدول شماره ۳ نتایج آزمون M۵-GEP برای دما ماکزیمم و مینیمم در ایستگاه‌های سینوپتیک شاخص را نشان می دهد:

جدول (۳): نتایج آزمون M۵-GEP برای دما به صورت ماهانه و سالانه

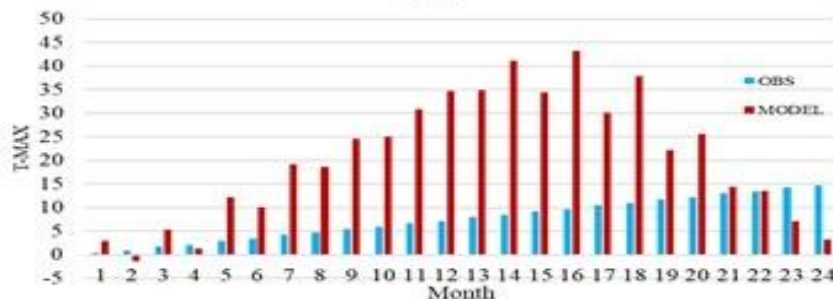
Temprate	Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
MIN	Urmia	.	.	-	.	-	.	-	-	-	-	-	-	.
MAX	Urmia	.	-	-	.	.	.	-	-	-	.	.	.	-

+ : روند افزایشی . : روند خنثی - : روند کاهشی

با افزایش مدت زمان‌های خشکسالی، احتمال تجمعی عدم وقوع خشکسالی افزایش می‌یابد، به طوری که احتمال وقوع خشکسالی در منطقه برای داده‌های شبیه‌سازی شده با دوره پنج ساله و بیشتر، به صفر نزدیک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات دما در ارومیه به صورت مثبت و رو به افزایش است. در نمودار زیر، میانگین دمای پیش‌بینی و تخمین شده را مشاهده می‌کنید:



شکل (۹) : مقایسه مینیمم زمان مشاهده شده و مدل شده ماهانه



شکل (۱۰) : مقایسه ماکزیمم زمان مشاهده شده و مدل شده ماهانه

در جدول زیر دمای ارومیه توسط الگوریتم M۵-SVM پیش بینی شده است.

جدول (۴) : اختلاف الگوریتم پیش بینی شده با نتایج رخ داده

MAX	MIN	Temprate
ارومیه	ارومیه	Station
۱۷,۲	۵,۰۸	مشاهداتی
۱۷,۸۵	۴,۹۷	Pridection
۰,۸۳	۰,۱۱	اختلاف

بارش

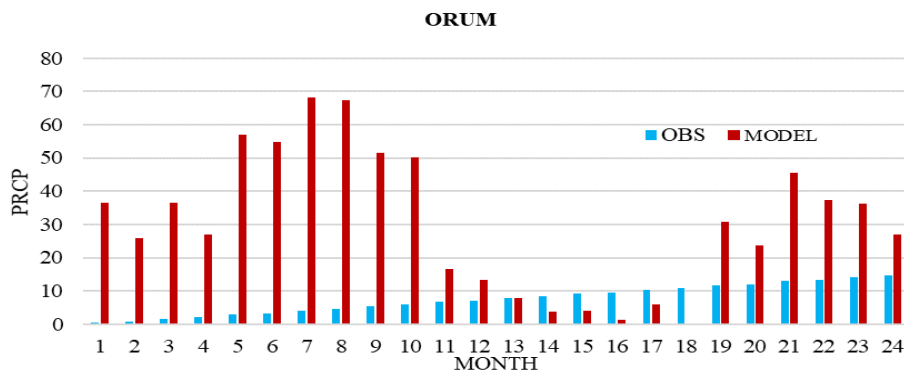
در جدول زیر نتایج تخمین و پیش بینی روش M۵-SVM برای بارش ماهانه و سالانه در ایستگاه سینوپتیک شاخص را نشان می‌دهد.

جدول (۵) : تخمین و پیش بینی روش M۵-SVM برای بارش ماهانه و سالانه در ایستگاه سینوپتیک

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
Urmia	.		-	.	-	.	-	-	-	-	-	-	.

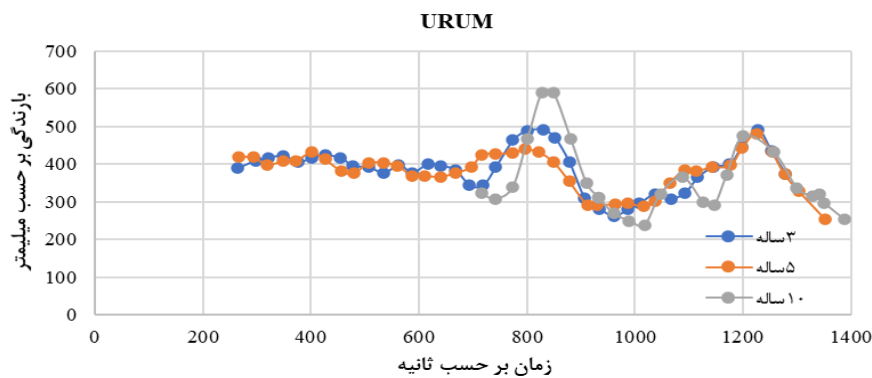
+ : روند افزایشی * : روند خنثی - : روند کاهش

با بررسی پارامتر بارش همانطور که مشخص است روند بارش ماهانه و سالانه نزولی می باشد.



شکل (۱۱) : مقایسه میزان بارش مشاهده شده و مدل شده ماهانه

مقادیر بارش از سال ۲۱۲۱ تا ۲۰۲۱ را می توان در نمودار زیر نمایش داد:
تحلیل های مبتنی بر تغییرات اقلیم و خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد در دوره ها و مناطق مختلف می تواند نمای کلی از وضعیت اقلیم و خشکسالی ارائه دهد. به عبارت دیگر، این شاخص می تواند تغییرات اقلیمی را به خوبی در اکثر ایستگاه های واقع در شرق دریاچه ارومیه در دوره های آتی نشان دهد.



شکل (۱۲) : میانگین دینامیک ایستگاه ارومیه

همانطور که نمودارهای بالا نشان می دهد براساس شاخص بارش استاندارد بر اساس این پارامتر مشابه پارامترهای قبلی در اکثر ایستگاه های آذربایجان غربی شاهد تغییرات اقلیمی خواهیم بود.

جدول (۶): بارش پیش بینی شده توسط M۵-SVM

ارومیه	ایستگاه
۲۵,۱	مشاهداتی
۲۵,۳۴	پیش بینی
۰,۳۱	درصد کاهش

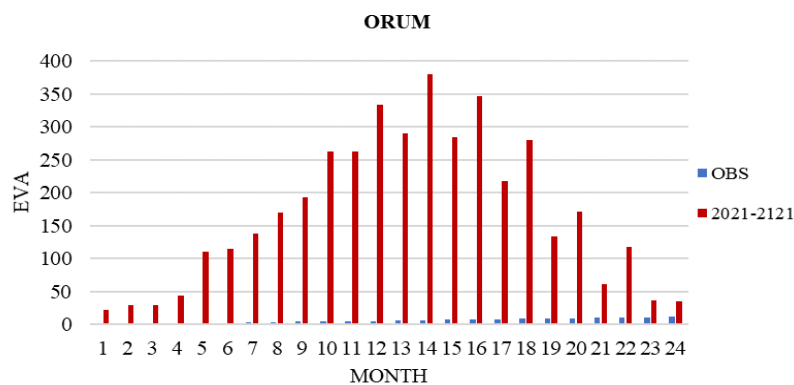
شدت خشکسالی

در این تحقیق، برای تخمین شدت خشکسالی به منظور دستیابی به یک درک بهتر، مقادیر مثبت را برای این متغیر در نظر گرفته شده است. (جدول ۷) نمونه‌ای از شدت‌های خشکسالی که با استفاده از شاخص بارش استاندارد برای ایستگاه‌های نمونه محاسبه شده است، را نمایش می‌دهد. نتایج این بخش با نتایج پژوهشی انجام شده توسط امیر عطایی در سال ۱۳۹۰ که مدل‌سازی خشکسالی را با استفاده از شبیه‌سازی بر روی شمال غرب ایران انجام داده‌اند، تطابق دارد. جدول زیر نتایج آزمون برای تبخیر ماهانه در ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد:

جدول (۷): نتایج آزمون برای تبخیر به صورت ماهانه و سالانه

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
Urmi a	.	.	.	+	+	+	+	+	+	+	.	.	+

جدول ۷ نشان می‌دهد روند تبخیر دما افزایشی می‌باشد.



شکل (۱۳): تخمین مقادیر تبخیر در دوره ۲۰۲۱-۲۱۲۱ در ایستگاه‌های سینوپتیک

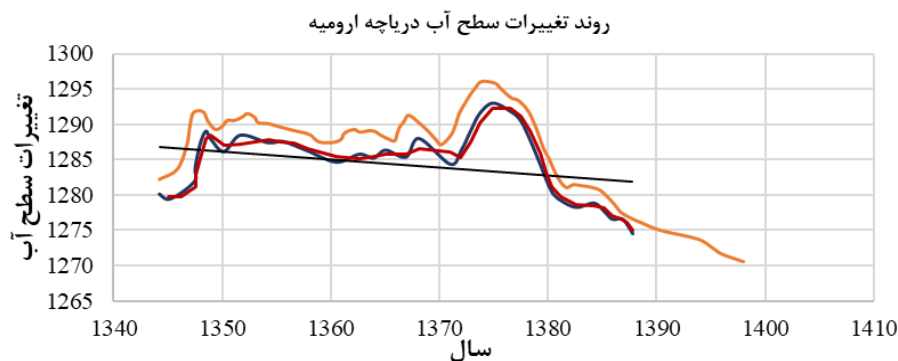
جدول (۸)- تبخیر پیش بینی شده توسط M۵-SVM

ارومیه	ایستگاه
۳۸,۷	مشاهداتی
۳۸,۲	پیش بینی
۱,۰۱۳	درصد کاهش

مقایسه شاخص بارش استاندارد براساس کلاس بندی مقادیر ترسالی و خشکسالی

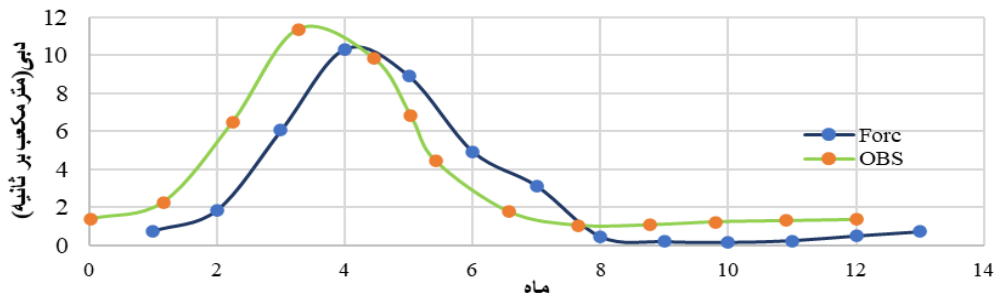
در این مقاله، از داده‌هایی که از خلاصه نتایج مطالعات پایه گزارش‌های هواشناسی و هیدرولوژی مدیریت جامع منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه گرفته شده بود، استفاده شده است. تأکید می‌شود که داده‌های مورد مطالعه در اصل به نحوی به طور تقریبی یکسان و همگن از نظر آماری بوده‌اند.

بعد از آماده‌سازی داده‌ها و دسته‌بندی آن‌ها با استفاده از الگوریتم $M5$ ، تأثیر عوامل هواشناسی و هیدرولوژیکی مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، برای استفاده از مدل $M5-SVM$ و رگرسیون خطی، تغییرات پارامترهای دما، بارش، تبخیر از سطح دریاچه، رواناب سطحی ورودی به دریاچه، تغییرات تراز سطح آب دریاچه و حجم دریاچه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمون $M5-SVM$ و روش رگرسیون در جدول ۹ گزارش شده است. به عنوان نمونه، تغییرات سطح آب دریاچه برای بازه زمانی هفتاد ساله مذکور در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل (۱۴): روند تغییرات سطح آب دریاچه ارومیه برای دوره آماری ۷۰ ساله

همانطور که نمودار بالا نشان می‌دهد تغییرات آب علاوه بر تغییر اقلیم با توجه به نتایج زیر می‌تواند بر روی دبی ماهانه و سالانه تأثیرات زیادی بگذارد.



شکل (۱۵): میزان تغییرات دبی ماهانه دریاچه ارومیه

جدول (۹): نتایج آزمون M5-SVM

سری زمانی	معادله رگرسیون	R ^۲
متوسط سطح آب دریاچه	$Y = -0.3X + 1234$	۰.۸۷٪
متوسط ارتفاع بارش بر دریاچه	$Y = -0.17X + 253$	۰.۱۲٪
متوسط جریان سطحی ورودی	$Y = -85.3X + 10008$	۱۳.۲٪
متوسط حجم بارش بر دریاچه	$Y = -4.53X + 1448$	۳.۳٪
متوسط حجم تبخیر از دریاچه	$Y = 30.8X + 7745$	۲۷.۱٪
تغییرات حجم دریاچه	$Y = -19.01X + 19124$	۰.۳٪
تغییرات دما	$Y = 0.4X + 8.96$	۲۰.۱٪

برای صحت سنجی مدل، نتایج آن با مدل مطالعه حاج قاسم و همکاران (۱۴۰۱) مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که مدل ترکیبی حاضر (M5-GEP) در مقایسه با مدل حاج قاسم و همکاران عملکرد بهتری داشت و تغییرات اقلیمی در دو دوره آبی در حوضه دریاچه ارومیه را به ترتیب به نسبت ۳۹ و ۴۶ درصد تخمین زده شده است.

۵- نتایج

نتایج این تحقیق درباره تعداد دوره‌های خشکسالی نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های واقع در شرق دریاچه، به عبارت دیگر در مناطق آذربایجان شرقی، در دوره‌های آبی ما خواهیم دید که تعداد دوره‌های خشکسالی نوسان خواهد داشت، و در برخی از ایستگاه‌های آذربایجان غربی نیز نوسان در دوره‌های خشکسالی خواهیم داشت. این نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی در دوره‌های آبی است. نتایج محاسبات همچنین نشان می‌دهد که بر اساس شاخص بارش استاندارد و پارامتر تعداد دوره‌های خشکسالی، دریاچه ارومیه با خطر خشکسالی مواجه خواهد شد. این تحلیل‌ها هشدار می‌دهند که باید تدابیری برای مدیریت خشکسالی اتخاذ شود. در این تحلیل، ما از روش ماشین بردار پشتیبان برای انتخاب تابع هسته مناسب با کرنل‌های مختلف استفاده کردیم و نتایج نشان داد که تابع هسته (RBF) بهترین نتیجه را در تخمین میزان آب دریاچه ارائه می‌دهد. در نهایت،



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

نتایج آزمون M5-SVM بر اساس پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی را در دو دوره آبی حوضه دریاچه ارومیه به ترتیب به نسبت ۳۹ و ۴۶ درصد توانایی، پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۱، میزان سطح آب دریاچه، جریان سطحی ورودی به دریاچه، حجم متوسط بارش بر روی دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه، تغییرات معناداری را تجربه کرده‌اند. همچنین، نتایج آزمون مرتبط با پارامتر دما نشان می‌دهد که دما در این دوره زمانی روند افزایشی داشته است. بر اساس نتایج آزمون رگرسیون خطی، تغییرات معناداری در میانگین جریان ورودی به حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تبخیر از سطح دریاچه، با روند پراهمیتی منفی همراه بوده است. همچنین، اهمیت روند افزایشی دما از نتایج آزمون نمایان می‌شود. در واقع، تبخیر از سطح دریاچه نیز به علت روند افزایشی دما در سال‌های اخیر، یک روند کاهش‌ی را نشان می‌دهد. دلیل اصلی این موارد ممکن است کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و افزایش شوری آب دریاچه باشد. به طور کلی، نتایج این مقاله نشان می‌دهند که با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و مطالعات انجام شده در ارتباط با اقلیم منطقه و مقایسه آن با نواحی دیگر، در منطقه مورد مطالعه، میزان بارش متوسط در ارومیه بین ۶۰۰ تا ۶۱۰ میلی‌متر و میانگین دما بین ۹۱ تا ۹۹ درجه سانتی‌گراد بوده و اختلافات دما به حدی معنادار نبوده که بتوان تغییرات سطح آب دریاچه را به دلیل تغییرات اقلیمی صددرصد نسبت داد. این نتایج می‌توانند برای مناطق دیگر کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، استفاده از متخصصین علوم محیطی و استفاده از ابزارهای محاسباتی پیشرفته برای پیش‌بینی و تخمین خشکسالی و ارائه راهکارهای موثر برای مدیریت بهتر خشکسالی امری ضروری به نظر می‌آید. همچنین، بهره‌گیری از دانشمندان متخصص در زمینه‌های علمی و استفاده از روش‌های الگوریتمی در سیستم‌های هشدار به منظور پیش‌بینی و تخمین خشکسالی به شدت به بهبود کارایی و اثربخشی اقدامات مقابله با خشکسالی کمک خواهد کرد.

مراجع

۱. امیر عطایی، ب.، منتصری، م.، یاسی، م.، ۱۳۹۲. مقایسه عملکرد ذاتی هفت شاخص خشکسالی در پایش خشکسالی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۳، شماره ۱.
۲. امیر عطایی، ب. پایان نامه کارشناسی ارشد. ۱۳۹۰. ارزیابی شاخص های خشکسالی در سیستم های چندگانه با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو، دانشگاه ارومیه.
۳. سبزی پرور، ع.، کاظمی، آ. ۱۳۸۹. ارزیابی تطبیقی هفت نمایه خشکسالی هواشناسی با استفاده از تحلیل خوشه ای " مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست.
۴. سلامتیان، سید امین؛ حسین ابراری و عطیه نظری پیش بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی (مطالعه موردی: دشت قم)، مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۳، شماره ۳ (۱۴۰۲)
۵. شیران زایی ش.، آقاجانی د.، آسیب شناسی فرآیند تدوین خط مشی های محیط زیست (مورد مطالعه سنجش محیط - زیست طبیعی - دریاچه ارومیه). علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره دو، اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ (۷۱-۸۶).
۶. حاج قاسم، نفیسه و گرایلی، علیرضا و کرم زاده، فریده، پیش بینی تخمین میزان خشکسالی با استفاده از الگوریتم های داده مبنا (مطالعه موردی دریاچه ارومیه) ماهنامه پایا شهر، دوره ۴ شماره : <https://civilica.com/doc/۱۵۸۵۵۰۶۰۴۳> (۱۴۰۱)



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

۷. رحیم زاده ف.، هدایت دزفولی ا.، پوراصغریان، آ.، ۱۳۸۹. ارزیابی روند و جهش نمایه های حدی دما و بارش در استان هرمزگان. فصل نامه جغرافیا و توسعه، شماره ۲۹، صفحات ۱۱ تا ۹۹۹.
۸. عبادی نهاری، زهرا و عرفانیان، مهدی و کاظم پور چورسی، سیما، ۱۴۰۲، ارائه یک روش نوین برای ارزیابی و پایش جامع خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص تلفیقی خشکسالی، فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دوره: ۲۳، شماره: ۶۸.
۹. قهرمان ن.، بذرافشان ج.، قره خانی ا.، ۱۳۸۹. تحلیل روند تغییرات تبخیر از تشت در مقیاس سالانه و فصلی در استان خوزستان با استفاده از روش های پارامتری و ناپارامتری. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر.
۱۰. کوثری م.، اختصاصی م.، تازه م.، صارمی نائینی م.ع.، ۱۳۸۹. بررسی روند تغییرات بارش، دما و رطوبت نسبی در ۲۹ ایستگاه سینوپتیک کشور. ویژه نامه منابع طبیعی.
۱۱. میرعباسی نجفآبادی، ر.، فاخری فرد، ا.، دین پژوه، ی. و اسلامیان، س. ۱۳۹۲. پایش بلندمدت خشکسالی های ارومیه با استفاده از شاخص کمبود توأم. نشریه دانش آب و خاک، ۳۳ (۴): ۸۷-۱۰۳.
۱۲. Abebe, A., and Forch, G. ۲۰۰۷. Stochastic Simulation of the Severity of Hydrology Drought, *J. Water and Environment*, ۲۱: ۲۲۳-۲۳۳.
۱۳. Amirataee B, Montaseri M, Rezaie H. ۲۰۱۸. Regional analysis and derivation of copula-Mining drought severity-area-frequency curve in Lake Urmia basin, Iran. *J Environ Manag* ۲۰۶:۱۳۴-۱۴۴.
۱۴. Da Rocha Júnior RL, dos Santos Silva FD, Costa RL, Gomes HB, Pinto DDC, Herdies DL (۲۰۲۰) Bivariate assessment of drought return periods and frequency in Brazilian northeast using joint distribution by copula method. *Geosciences* ۱۰(۴):۱۳۵.
۱۵. Ekanayake E, Perera K. ۲۰۱۴. Analysis of drought severity and duration using copulas in Anuradhapura, Sri Lanka. *British J Environ Climate Change* ۴(۳):۳۱۲-۳۲۷.
۱۶. Grieser J., S. Tromel, C.D. Schonwiese. ۲۰۰۲: statistical time series decomposition into significant components and application to European temperature, *Theor. Appl. climatol.* ۷۱, pp. ۱۷۱-۱۸۳.
۱۷. Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho OV. ۱۹۹۹ Monitoring the ۱۹۹۶ drought using the standardized precipitation index. *Bull Am Meteorol Soc* ۸۰(۳):۴۲۹-۴۳۸.
۱۸. Kim TW, Valdés JB, Yoo C. ۲۰۰۳. Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid regions. *J Hydrol Eng* ۸(۵) ۲۳۷-۲۴۶
۱۹. Kisi, O., Shiri, J. & Tombul, M. ۲۰۱۳ Modeling rain fall-runoff process using soft computing techniques. *Computers Geosciences*, ۵۱, ۱۰۱۸-۱۱۷.



۲۰. Lopes, H. S., & Weinert, W. R. ۲۰۰۴. EGIPSY: an enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, ۱۴(۳), ۳۷۵-۳۸۴.
۲۱. Mcconkey, G. smith, P.G. Jefferson. ۱۹۹۹. climate change in the semiarid prairie of south western saakthwestern:late winter-early spring .can.plant.sci.۷۹:۳۴۳-۳۵۳.
۲۲. McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. ۱۹۹۳. The relation of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings, ۸th Conference on Applied Climatology*, ۱۷-۲۲ January, ۳۷۹-۳۸۴.
۲۴. Mehr, A.D.; Sorman, A.U.; Kahya, E.; Afshar, M.H. Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: Case study of Ankara, Turkey. *Hydrol. Sci. J.* ۲۰۲۰, ۶۵, ۲۵۴-۲۶۸
۲۵. Nabaei S, Sharafati A, Yaseen ZM, Shahid S.۲۰۱۹. Copula Mining assessment of meteorological drought characteristics: regional investigation of Iran. *Agric For Meteorol* ۲۷۶:۱۰۷۶۱۱.
۲۶. Palmer, W.C. ۱۹۶۵. Meteorological Drought. Research. Paper No. ۴۵, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
۲۷. Paulo, A.A., Ferreira, E., Coelho, C., Pereira, L.S. ۲۰۰۵. Drought class transition
۲۸. Serinaldi F, Bonaccorso B, Cancelliere A, Grimaldi S. ۲۰۰۹. Probabilistic characterization of drought properties through copulas. *Phys Chem Earth* ۳۴ (۱۰-۱۲):۵۹۶-۶۰۵
۲۹. Steinmann, A. ۲۰۰۳. Drought Indicators and Triggers: A Stochastic Approach to Evaluation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, ۳۹(۵):۱۲۱۷-۱۲۳۳.
۳۰. ۲۷. Shiau J.۲۰۰۶. Fitting drought duration and severity with twodimensional copulas. *Water Resour Manag* ۲۰(۵):۷۹۵-۸۱۵.
۳۱. Song S, Singh VP.۲۰۱۰. Frequency analysis of droughts using the Plackett copula and parameter estimation by genetic algorithm. *Stoch Env Res Risk A* ۲۴:۷۸۳-۸۰۵.
۳۲. Tosunoglu F, Can I.۲۰۱۶. Application of copulas for regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts in Turkey. *Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards* ۸۲:۱۴۵۷-۱۴۷۷
۳۳. Van de Vyver H, Van den Bergh J. ۲۰۱۸. The Gaussian copula model for the joint deficit index for droughts. *J Hydrol* ۵۶۱:۹۸۷-۹۹۹.



Zhang L, Wang Y, Chen Y, Bai Y, Zhang Q. ۲۰۲۰. Drought risk assessment in Central Asia using a probabilistic copula function approach. Water ۱۲(۲):۴۲۱