

صص ۶۱-۷۹

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز لار با استفاده از مدل SWAT و مقایسه نتایج آن با شبکه‌های بیزین و مدل‌های هوشمند هیبریدی

مهسا سلیمانی‌پور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

امیر پویا صراف*

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۲۷

چکیده

قرار گرفتن ایران بر کمربند خشک و نیمه‌خشک دنیا و همچنین سوء مدیریت منابع آبی، سبب ایجاد وضعیت هشدار دهنده کمبود آب در بسیاری از مناطق کشور شده است. پژوهش حاضر آثار ناشی از تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب در دوره‌های آتی با کمک مدل آماری LARS-WG و مدل مفهومی هیدرولوژیکی SWAT برای حوضه آبریز لار مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای تخمین میزان دبی جریان رودخانه، به بررسی قابلیت عملکرد شبکه بیزین و مدل ترکیبی موجک - شبکه عصبی هم پرداخته می‌شود. پس از وارد کردن اطلاعات بارش و دمای منطقه، نسبت به شبیه‌سازی رواناب برای دو ایستگاه هیدرومتری گزلدرد و پلور اقدام شده و رواناب خروجی ایستگاه پلور به‌عنوان نقطه کنترل بین سال‌های (۱۹۷۹-۲۰۱۸) مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی کارایی از معیارهای ضریب تبیین و نشر - سا تکلیف استفاده شده است. طبق پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی، بیشترین افزایش دما در دوره انتهایی و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 حدود ۱۰ درصد افزایش دما در فصل بهار و زمستان را نشان می‌دهد. در نهایت از بین این مدل‌ها، مدل فیزیکی با پیش‌بینی متوسط سالانه ۶,۰۴ مترمکعب بر ثانیه با توجه به دوره مشاهداتی، کاهش رواناب را نشان داد.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، مدل LARS-WG، مدل SWAT، شبکه‌های بیزین، مدل موجک - شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز حساسیت.

مقدمه

تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه، نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است. در نیم‌قرن اخیر، آب و هوا و محیط‌زیست جهانی دستخوش تغییرات بزرگی شده است. گسترش صنعت و استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت ایجاد انرژی مورد نیاز بشر، منجر به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای چون CH_4 ، N_2O ، CFC و به‌ویژه CO_2 شده است. آنچه مسلم است افزایش

گازهای جاذب گرما در جو زمین، درجه حرارت زمین را افزایش خواهد داد. انتخاب یک مدل از بین مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف که بتواند تأثیرات تغییر اقلیم را با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی بر روی سیستم منابع آب یک منطقه شبیه‌سازی کند، تأثیر بسزایی در ارزیابی اثرات این پدیده و تصمیم‌گیری بهتر سازمان‌ها و ذی‌نفعان خواهد داشت، بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که مدل¹ SWAT به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و مدیریت کشاورزی (مانند رواناب، تبخیر و تعرق و آب‌های زیرزمینی) و متغیرهای گیاهی (مانند عملکرد) در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی هست. این مدل ضمن دارا بودن این امکانات، می‌تواند تحلیل‌های لازم را در محیط GIS به‌طور مکانی انجام دهد. مرادی و همکاران (۱۳۹۲)، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه گرگانرود را با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی انجام دادند. بدین منظور مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه و الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. نتایج نشان دادند که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی (۲۰۹۹-۲۰۷۰) مقدار بارندگی سالانه حوضه به میزان ۳/۲ تا ۶/۷ درصد و مقدار رواناب سطحی به میزان ۰/۴ تا ۷/۷ درصد با کاهش مواجه خواهد شد. رجایی و شهابی (۱۳۹۳)، در پژوهشی توانایی مدل ترکیبی موجک - شبکه عصبی را در پیش‌بینی کوتاه مدت تراز سطح دریا در بندر چابهار را بررسی و نتایج به دست آمده را با دو روش شبکه عصبی و رگرسیون خطی مقایسه نمودند. داده‌های پیشین تراز سطح دریا به‌صورت ساعتی برای پیش‌بینی ۱۲ ساعت آینده در این مطالعه استفاده شد. مطابق نتایج حاصله، دقت پیش‌بینی در حدود ۱۱ تا ۱۶ درصد در مدل ترکیبی موجک - شبکه عصبی نسبت به دو مدل دیگر بالاتر بود. شایان توجه است با استفاده از تبدیل موجک، زیر سری‌های زمانی با فرکانس‌های مختلف متناسب با تغییرات دوره‌ای سطح دریا استخراج شده و به‌صورت مجزا به شبکه عصبی وارد می‌شوند. ورودی این زیر سری‌ها با اطلاعات مفید و تجزیه‌شده به‌صورت مجزا باعث وزن دهی بهتر و متناسب‌تر در ساختار شبکه عصبی به ورودی‌ها شده و دقت پیش‌بینی را در نتایج مدل بالا می‌برد. جیحونی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی جهت بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی در تراز آب زیرزمینی دشت شبستر ابتدا از طریق مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) تحت گزارش پنجم، بهترین مدل‌ها را برای منطقه مورد مطالعه به دست آورده و با توجه به نیاز افزایش شفافیت مکانی توسط روش ریزمقیاس نمایی آماری برای سه سناریوی نشر (خوش بینانه RCP 2.6، حد متوسط RCP 4.5 و بدبینانه RCP 8.5)، برای دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۴۹)، ریزمقیاس نمایی انجام گرفت. نتایج این مدل نشان از افزایش دما و کاهش بارندگی در منطقه مورد مطالعه دارد. در گام بعد، مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با پیش‌پردازش موجک، جهت مطالعه رفتار آبخوان مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نتایج شبکه عصبی مصنوعی با انواع ورودی‌های بارش، دما، خروجی تراز آب زیرزمینی با تأخیرهای زمانی مختلف نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت در مدل بکار رفته مربوط به بارش یک ماه قبل بوده که برای پنج چاه مشاهداتی انتخاب شده، قادر به

¹ Soil and Water Assessment Tool

شبیه‌سازی است. صراف و افخمی فر (۱۳۹۹)، در پژوهشی به ارزیابی عملکرد دو مدل ماشین یادگیری بهینه (ELM) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و همچنین، تلفیق آن دو مدل با الگوریتم تبدیل موجک پرداختند و برای بالابردن قدرت پیش‌بینی و بهینه کردن وزن‌های ورودی (وزن‌های مابین لایه ورودی و پنهان) مدل‌ها، از الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات کوانتومی (QPSO) استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل هیبرید تبدیل موجک ماشین یادگیری بهینه‌ساز ازدحام ذرات کوانتومی از عملکرد و دقت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد بکار گرفته شده در پیش‌بینی سطح تراز آبخوان زیرزمینی دارد. صراف و سلیمانی‌پور (۱۳۹۸)، در پژوهشی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر حوضه آبریز لار با استفاده از مدل آگروهیدرولوژیکی SWAT پرداختند و نتایج آن را با شبکه‌های بیزین و مدل هیبریدی موجک - شبکه عصبی مصنوعی مقایسه نمودند بطوریکه نتایج مدل‌ها حاکی از آن بود که بیشترین افزایش دما در دوره انتهایی و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 حدود ۱۰ درصد افزایش دما در فصل بهار و زمستان را نشان می‌دهد.

پیش‌بینی‌های هیدروکلیماتولوژی و هیدرولوژیکی همراه با پیچیدگی بالا، پویا و نا ایستا هستند. این در حالی است که این موارد نقش اساسی در مدیریت منابع آب، محیط‌زیست و همچنین در کاهش فجایع مربوط به آب دارند. در سال‌های اخیر افزایش قابل ملاحظه‌ای در تعدد رویکردهای علمی صورت پذیرفته است، از جمله روش‌های مرسوم "داده محور" و "مبتنی بر داده" مانند مدل‌هایی که می‌توان آن‌ها را بر اساس ارتباطات بین متغیرها (وضعیت سیستم)، متغیرهای ورودی، میانی و خروجی تنها با تعداد محدودی از فرضیات ساخته‌شده بر اساس رفتارهای فیزیکی سیستم تعریف نمود. شبکه تصمیم‌گیری بیزین، روشی سودمند است که می‌تواند اطلاعات و داده‌های کمی را به‌خوبی با دانش کیفی کارشناسی تجمیع نماید (باران و جانتون، ۲۰۰۴).

سوویگنت و همکاران (۲۰۱۰)، عملکرد مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM را تحت سناریوهای A2 و B2 در مدل گردش عمومی جو HadCM3 مورد ارزیابی قرار دادند. از آنجایی که در مناطق کوهستانی خشک وقوع پتانسیل تغییر اقلیم و کاهش منابع آب شیرین زیاد است، لذا بالادست حوضه خشک الکیو واقع در شیلی برای مطالعه در خصوص تغییرات فصلی بارش و دما انتخاب شده و دمای حداقل و حداکثر برای روندهای خطی و نیز پدیده‌های حدی به‌دقت مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، روش SDSM از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی بارش برخوردار نیست که یکی از دلایل آن می‌تواند تغییرات بین فصلی باشد. ماه‌سواران و خوسا (۲۰۱۳)، نتایج مدل غیرخطی مبتنی بر موجک پویا (مدل ترکیبی موجک ولتر (WVC) با WLR، ANN و WANN و DAR را در پیش‌بینی درازمدت سطح آب زیرزمینی مقایسه کرده و نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر موجک عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های معمولی داشتند. کاظمی و همکاران (۲۰۱۴)، روش SDSM را برای خروجی دمای روزانه الگوی جهانی ECHAM5 بکار بردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که داده‌های ریزمقیاس شده بسیار دقیق‌تر از داده‌های الگوی ECHAM5 است. ضریب همبستگی داده‌های ریزمقیاس شده با داده‌های مشاهده شده بین ۸۱ تا ۹۴ درصد است. در حالی که همین همبستگی برای داده‌های الگوی جهانی بین ۷۳ تا ۸۷ درصد است. موسوی و همکاران (۲۰۱۴)

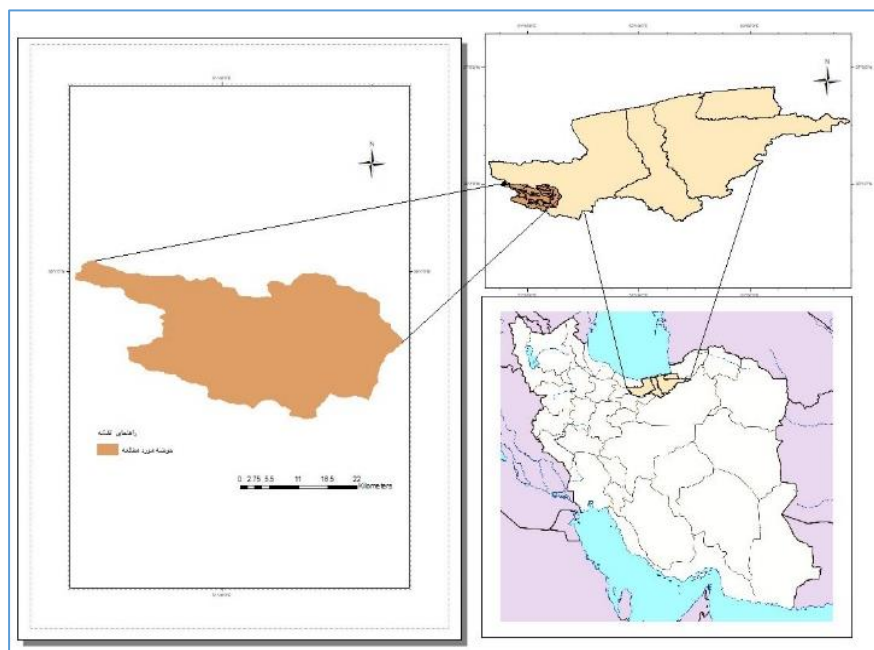
ساختارهای بهینه مدل‌های WANN و WANFIS را در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی پژوهش کردند. این پژوهش نشان داد که توابع انتقال در ANN و انواع تابع عضویت در ANFIS در کنار نوع موجک مادر، فاکتورهای مهمی در عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS هستند. مقایسات نشان داد که عملکرد WANFIS از WANN بهتر بود. بنی حبیب و همکاران (۲۰۱۵)، یک شبکه عصبی مصنوعی دینامیکی (DANN) را برای ارزیابی سناریوهای شاخص تغییر کاربری اراضی (LUCI) بر میانگین وزنی شده هشدار سیلاب در بازه زمانی وقوع آن (WAWLTF) در حوضه آبریز تجریش واقع در شمال تهران پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که مدیریت مناسب حوضه در آینده می‌تواند شاخص WAWLTF را بهبود بخشیده اما اثرات منفی شهری سازی هیچ‌گاه جبران نخواهد شد. در نهایت این نتیجه حاصل شد که این مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد در حوزه‌های مشابه شهری برای ارزیابی دو شاخص ذکر شده به کار برده شود. حسینی و همکاران (۲۰۱۵)، از روش تلفیق مدل‌های هوش مصنوعی SVR و ANN و تکنیک GA مدل جدید SVR-GANN را جهت مدل‌سازی بارش - رواناب استفاده نمودند. در آن پژوهش از یک مدل SVR به‌عنوان مدل پایه استفاده شده و از مدل MLP (شبکه عصبی مصنوعی) به‌عنوان تابع کرنل بهره گرفته شده بود. مدل ارائه‌شده با مدل‌های ANN-BP، ANFIS و ANN مقایسه و نتایج نشان داد دقت پیش‌بینی مدل هیبریدی به‌مراتب از مدل‌های دیگر بالاتر بوده و برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها در مدل‌سازی بارش - رواناب مشخص گردید. لطفی منش و بارانی (۲۰۱۹) به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد زاینده‌رود واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود در یک دوره پنج‌ساله با توجه به دو سناریوی تغییر اقلیم A2 و B1 یک مدل را بر مبنای الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزاری MATLAB توسعه دادند و نتایج نشان داد که مدل قادر به تأمین ۷۴ درصد نیاز پائین دست بوده به‌طوری که برای سناریوی A2 درصد تأمین نیاز، قابلیت اعتماد حجمی و آسیب‌پذیری به ترتیب ۵۹/۳۸، ۵۳ و ۸۰ درصد و برای سناریوی B1 این مقادیر به ترتیب برابر با ۶۱، ۶۶/۲۷ و ۶۷ تخمین زده شد. زمانی و همکاران (۲۰۱۹) ضمن بررسی احتمالاتی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با تحلیل عدم قطعیت در حوضه رود زرد در جنوب غربی ایران، تحت دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 در دوره (۲۰۲۵-۲۰۵۴) نشان دادند که میانگین دمای سالانه به مقدار ۲/۰۴-۱/۶۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP 4.5 و ۲/۴-۱/۸۵ تحت سناریوی RCP 8.5 افزایش می‌یابد؛ همچنین نتایج شبیه‌سازی رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم در حالت کلی حاکی از کاهش میانگین رواناب شبیه‌سازی شده برای دوره آینده نسبت به دوره پایه است. به‌طوری که بیشترین کاهش رواناب مورد انتظار در شرایط بحرانی به مقدار ۵۱ درصد تحت سناریوی RCP 8.5 می‌باشد.

معظمی‌گودرزی و همکاران (۲۰۲۰) ارزیابی اثرات تغییر اقلیم را بر تولید رواناب سطحی حوضه آبریز مهارلو پایش نمودند. بطوریکه داده‌های اقلیمی دوره‌های آتی را با دو مدل گردش عمومی جو MICROC5 و HadGEM2-ES مدل نموده و تغییرات دما و بارش را تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP4.5 و RCP8.5 برآورد نمودند. نتایج ارزیابی مدل‌ها حاکی از شبیه‌سازی موفقیت‌آمیز رواناب روزانه بود. مضاف بر این، نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز SWAT نیز از دقت مناسبی برای کالیبراسیون مدل در ایستگاه‌های منتخب برخوردار بود. معظمی‌گودرزی و همکاران (۲۰۲۰) در

پژوهشی به مطالعه دو مجموعه پایگاه داده CMORPH و SM2RAIN-ASCAT در دریاچه ماهارلو که منطقه‌ای نیمه‌خشک در ایران است، پرداختند. نتایج نشان داد که این دو مجموعه داده نزدیک به زمان، اطلاعات دقیقی از این حوضه نداشته اما با این وجود، آمار احتمال تشخیص (POD)، شاخص موفقیت حیاتی (CSI) و نسبت هشدار کاذب (FAR) دقت قابل قبولی را در تشخیص میزان بارندگی از خود نشان دادند. همچنین ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا دارای دقت غیرقابل قبولی در این زمینه است. همچنین تغییرات ماهانه در هر یک از شاخص‌ها نشان داد که پایگاه داده CMORPH در ماه‌های بهار خطای بیشتری داشته، اما در ماه‌های دیگر میزان خطای SM2RAIN-ASCAT نسبت به CMORPH، بهبود و دقت بیشتری را از خود نشان داده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه لار یکی از حوضه‌های دامنه شمالی توده کوهستانی در منطقه شمال کشور است، این حوضه از قزل‌دره، سفیدآب، دلیچای که سرچشمه آن از دماوند و والارود است، نشأت می‌گیرد و همچنین از زیر حوضه‌های هراز - قره‌سو به شمار می‌رود که در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. این حوضه ما بین مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه واقع شده که مساحت آن ۵۷۶ کیلومترمربع بوده و سدی که در این حوضه واقع گردیده دارای متوسط آبدهی سالانه به میزان ۱۸۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. از نظر جغرافیایی این حوضه به‌طور تقریبی در فاصله ۷۵ کیلومتری تهران و ۱۰۰ کیلومتری امل قرار دارد. در شکل ۱، موقعیت حوضه آبریز محدوده مطالعاتی به تصویر کشیده شده است.



ماخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز لار

توصیف داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های روزانه و ماهانه مجموع ۴ ایستگاه آب‌سنجی پلور، سفیدآب، دلیچای و گزلدرد در ارتفاعات و ایستگاه پلور به‌عنوان نقطه خروجی در حوضه آبریز مورد مطالعه استفاده شده است. همچنین بررسی روند متغیرهای هیدرو اقلیمی در ایستگاه‌های آب‌سنجی و بارانسجی به‌صورت ماهانه با دوره آماری ۴۰ ساله (۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸) در نظر گرفته شده است. در بخش مطالعه ریزمقیاس کردن و استفاده از نتایج در پیش‌بینی تغییرات آبی، به علت کفایت و صحت بیشتر داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، از ایستگاه پلور استفاده شده است.

داده‌ها و روش‌ها

سناریوهای غیر اقلیمی

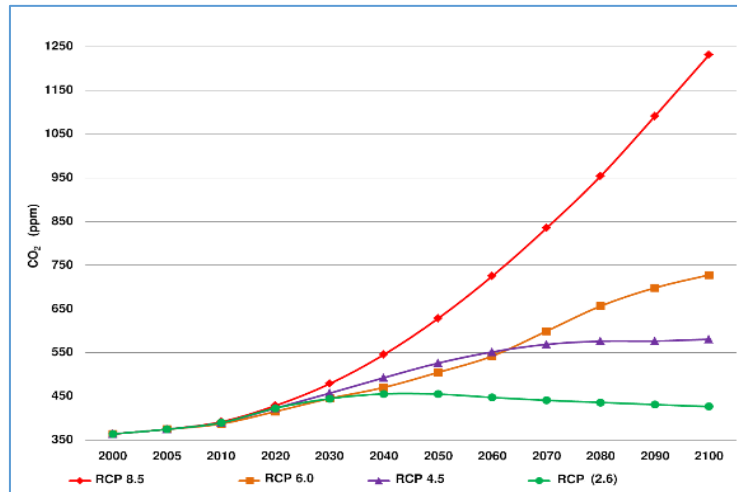
هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ که در سال ۱۹۸۸ به‌وسیله سازمان هواشناسی جهان^۲ و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل^۳ تأسیس شد، وظیفه شناخت کلیه جنبه‌های پدیده تغییر اقلیم را عهده‌دار بوده و سری اولیه سناریوهای انتشار را در سال (۱۹۹۲) بانام IS92 (IPCC Scenario) ارائه کرده است. در این سناریوها مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. جدیدترین سناریوهای انتشار که در گزارش ارزیابی پنجم از آن استفاده شده، نماینده خط سیر غلظت^۴ نام دارد که شامل ۴ سناریو RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 باشد. این سناریوها جایگزین سناریوهای قبلی SRES شده که چهار آینده اقلیمی ممکن را توصیف کرده و تمام آن‌ها بر این اصل استوارند که میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای به چه میزان در آینده منتشر خواهند شد. اسامی این چهار سناریو بر اساس میزان انرژی بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ میلادی تعریف شده است. میزان غلظت کربن دی‌اکسید در طی زمان در هر سناریو در شکل ۲، نمایش داده شده است.

¹ Intergovernmental Panel of Climate Change

² WMO: World Meteorological Organization

³ UNEP: United Nation Environmental Program

⁴ Representative Concentration Pathways



مأخذ: IPCC for its 5th assessment report (AR5) in 2014

شکل ۲: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای طبق سناریوهای جدید هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم

ساختار مدل SWAT

SWAT یک مدل نیمه توزیعی فیزیکی، هیدرولوژیکی و پیوسته زمانی است که توسط USDA-ARS توسعه یافته است. در این مدل تعریف واحدهای همگن هیدرولوژیکی^۱ HRU جهت اجرای مدل و شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر (متغیرهای هیدرولوژیکی، عملکرد و ...) بسیار اهمیت دارد. این واحدها با ترکیب لایه‌های DEM کاربری اراضی و نوع خاک به وجود می‌آیند بطوریکه در هر یک از این واحدها نوع خاک و کاربری اراضی یکسان بوده و مدل فرض می‌کند که رفتار هیدرولوژیکی آن‌ها یکسان خواهد بود. مدل SWAT مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، روندیابی مخازن و رودخانه‌ها، مدل رشد گیاه، درجه حرارت، خصوصیات خاک، مدیریت کشاورزی، فرسایش و مواردی از قبیل کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود. این مدل دارای یک پایگاه داده‌های (Database) جامع و قوی برای مؤلفه‌های مختلف مذکور می‌باشد. داده‌های نقطه‌ای؛ شامل آمار و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی، نقطه ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها و یا آب‌های زیرزمینی، اطلاعات مکانی شامل لایه‌های رقمی ارتفاع (DEM)، لایه کاربری اراضی و لایه نوع خاک می‌باشد. این لایه‌ها در واقع توزیع و پراکندگی مکانی مقادیر متغیرهای موردنظر در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

ساختار مدل LARS-WG

LARS-WG یک مولد آب و هوای تصادفی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده مورد استفاده قرار گیرد. این مدل، سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند. یک مولد آب و هوای تصادفی، از آب و هوای روزانه مشاهده شده در یک

¹ Hydrologic Response Unit

ایستگاه، برای محاسبه مجموعه‌ای از پارامترهای توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای هواشناسی به‌علاوه ارتباط بین آن‌ها استفاده کرده و از طریق دخالت پارامترهای توزیع‌ها برای یک ایستگاه به همراه تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای منتج شده، سناریوی اقلیم روزانه برای ایستگاه موردنظر را تولید می‌کند.

شبکه‌های تصمیم‌گیری بیزین

شبکه بیزین یک مدل گرافیکی احتمالاتی است که مجموعه‌ای از متغیرها و احتمالات مربوط به هر کدام از آن‌ها را نشان می‌دهد. این شبکه، یک گراف مستقیم و غیر چرخه‌ای است که در آن، گره‌ها در حکم متغیرهای مسئله هستند. ساختار یک شبکه بیزین در واقع علاوه بر این که کیفیت رابطه بین متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد، کمیت ارتباط بین این متغیرها را نیز به نمایش می‌گذارد که به‌صورت عددی از توزیع احتمال مشترک آن‌ها استفاده می‌کند.

مدل موجک - شبکه عصبی مصنوعی

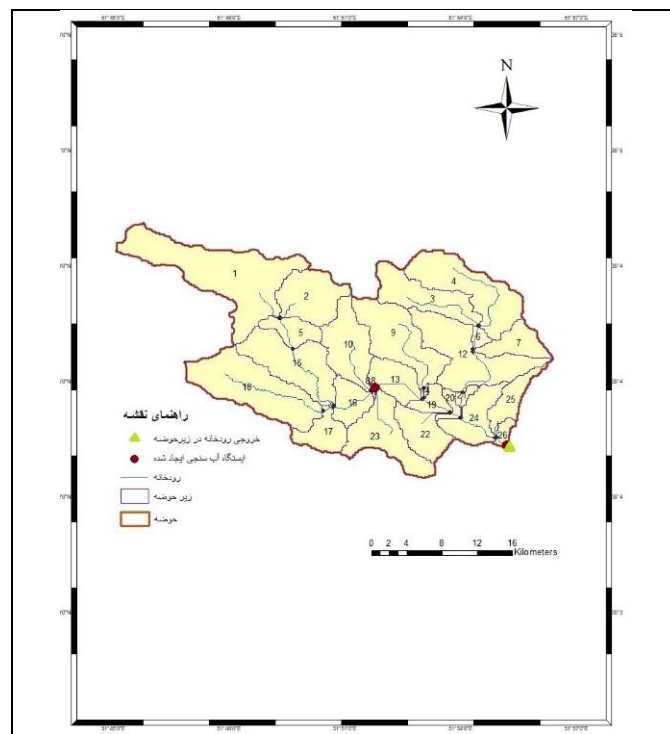
تبدیل موجکی تابعی است که نسخه بهبودیافته تبدیل فوریه را تداعی می‌نماید. تبدیل فوریه در آنالیز سیگنال‌های نا ایستا، به شکست منجر می‌شود. درحالی‌که تبدیل موجکی اجازه می‌دهد که سیگنال‌های نا ایستا نیز به‌خوبی آنالیز شوند. در شبکه‌های عصبی موجکی، موقعیت و مقیاس موجک‌ها علاوه بر وزن‌ها بهینه‌سازی می‌شوند. در اصل، شبکه عصبی - موجکی به شبکه عصبی با استفاده از موجک اشاره دارد. برای انجام محاسبات مربوط به این قسمت از موجک مادر دابچیز نوع چهار به دلیل گستردگی استفاده از آن بهره برده‌ایم. همچنین، عملیات تجزیه سری‌های زمانی داده‌های آموزش و تست را تا سطح دوم به انجام رسیده و در نهایت، داده‌های پردازش شده را برای ورود به شبکه عصبی مصنوعی تنظیم نموده‌ایم. این روش عملیاتی ترکیبی بین این دو رویکرد به‌اختصار شبکه عصبی - موجکی (W-ANN) نامیده می‌شود.

آنالیز حساسیت و واسنجی مدل SWAT

به دلیل تعدد پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی هم‌زمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی در این مدل، مدل جدیدی به نام SWAT-CUP جهت آنالیز حساسیت و واسنجی آن توسعه داده شده است. در این مدل، دو روش آنالیز حساسیت موضعی یا یک پارامتر در یک‌زمان و آنالیز حساسیت Global یا سراسری وجود دارد که غالباً روش اول مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش با ثابت نگه‌داشتن کلیه پارامترها، یکی از پارامترها را در محدوده‌ای که قبلاً برای تغییرات آن تعریف شده، تغییر داده و میزان تغییرات خروجی مدل با توجه به تغییرات در مقدار هر پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر پارامتری که مقدار قدر مطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، تأثیر بیشتری بر متغیر موردنظر دارد. شایان توجه است که در این پژوهش از روش SUFI2 برای واسنجی مدل استفاده شده است.

ساخت مدل مفهومی حوضه آبریز

در این پژوهش با استفاده از لایه DEM ۳۰ متری و لایه کاربری اراضی مربوط به سال ۲۰۱۴، اقدام به ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT شده است. پس از انجام مراحل ساخت مدل، حوضه به ۲۶ زیر حوضه و ۵۸ HRU تقسیم شده است (شکل ۴). در این پژوهش پس از وارد کردن اطلاعات بارش و دمای روزانه منطقه، نسبت به شبیه سازی رواناب (۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸) اقدام و سپس آمار تخصیص آب به مدل وارد شده است. ایستگاههای هیدرومتری گزلدیره و پلور در این پژوهش به عنوان نقاط کنترلی، جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT مورد استفاده واقع گردیدند (جدول ۱). همچنین دو شاخص آماری ضریب کارایی نش - سا تکلیف و ضریب تبیین، به منظور برآورد دقت و خطای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. موقعیت این ایستگاهها در شکل ۳، نشان داده شده است.



ماخذ: نگارندگان

شکل ۳: موقعیت ایستگاهها و زیر حوضهها

جدول ۱: مشخصات ایستگاههای هیدرومتری مورد استفاده در پژوهش حاضر

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	طول دوره آماری
پلور	هیدرومتری	۵۲/۰۵	۳۵/۸۵	۲۲۰۳	۱۹۷۹-۲۰۱۸
گزلدیره	هیدرومتری	۵۱/۸۸	۳۵/۹۱	۲۵۲۰	۱۹۷۹-۲۰۱۸

ماخذ: نگارندگان

نتایج و بحث

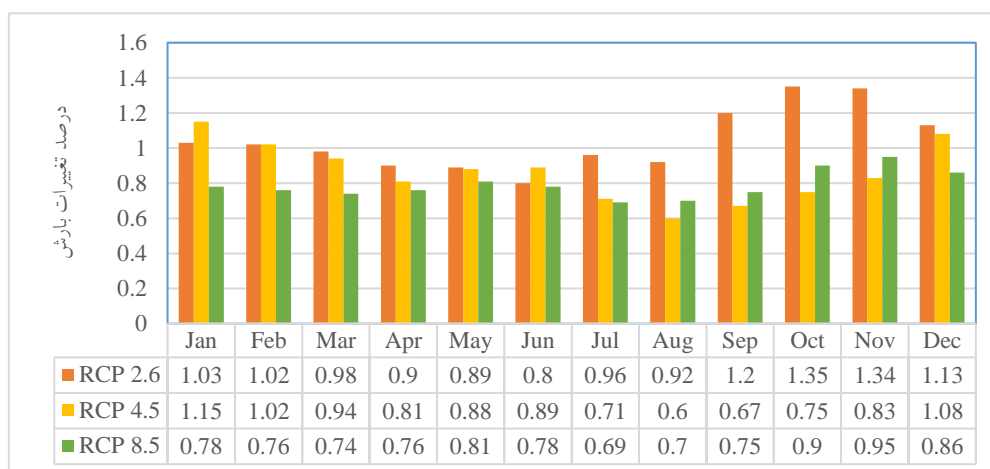
تحلیل روند تغییرات متغیرهای هیدرو اقلیمی طی سه دهه گذشته (۱۹۷۹-۲۰۱۸)

نتایج تحلیل روند نشان داد که متغیرهای اقلیمی در طول ۴ دهه گذشته دارای روند بوده و مطالعه اثر تغییر اقلیم و استفاده از سناریوی تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی بر حوضه آبریز لار ضروری می‌باشد. خاطرنشان می‌گردد با توجه به حجم قابل توجه مطالب بخش‌های آتی، از ارائه برخی جداول در این بخش صرف‌نظر شده است.

ریزمقیاس سازی متغیرهای اقلیمی دمای حداقل، حداکثر و بارش

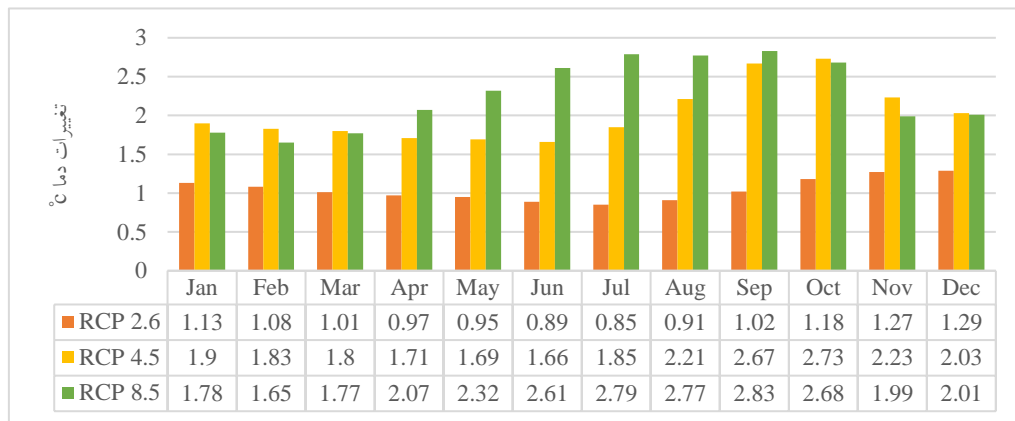
مراحل تولید سناریوهای اقلیم ماهانه توسط مدل LARS-WG در سه گام انجام می‌شود. در ابتدا مدل، توسط داده‌های مشاهداتی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی ۴۰ ساله (۱۹۷۹-۲۰۱۸) ایستگاه پلور مورد واسنجی قرار می‌گیرد. گام دوم صحت‌سنجی مدل می‌باشد که در این مرحله توانایی مدل در شبیه‌سازی اقلیم ایستگاه پلور بررسی می‌شود. برای این منظور ۳۵ سال داده‌های ساختگی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی توسط پارامترهای به دست آمده در طی واسنجی مدل، تولید شده و سپس مشخصه‌های آماری داده‌های هواشناسی مشاهده شده و ساختگی برای تعیین اینکه آیا اختلافات معنی‌داری وجود دارد یا خیر از طریق مقایسه دو فایل آماری تحلیل می‌شوند. طبق پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در کلیه مدل‌ها، بیشترین افزایش دما در دوره انتهایی و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 خواهد بود.

در ماه‌های فصول زمستان و بهار طبق پیش‌بینی مدل‌ها، بارش حدود ۱۰ درصد افزایش خواهد داشت، اما این افزایش بارش با افزایش تبخیر - تعرق همراه خواهد بود و عملاً آب در دسترس کاهش خواهد یافت بطوریکه در شبیه‌سازی رواناب این موارد کاملاً مشخص می‌باشند. بدین منظور در شکل‌های ۴، ۵ و ۶، تغییرات سناریوهای اقلیمی ترسیم شده‌اند. شایان توجه است که درصد تغییرات در شکل بدین مفهوم است که اگر درصد یادشده بالای یک باشد، افزایش بارش و اگر کمتر از یک باشد، کاهش بارش را به همراه خواهد داشت.



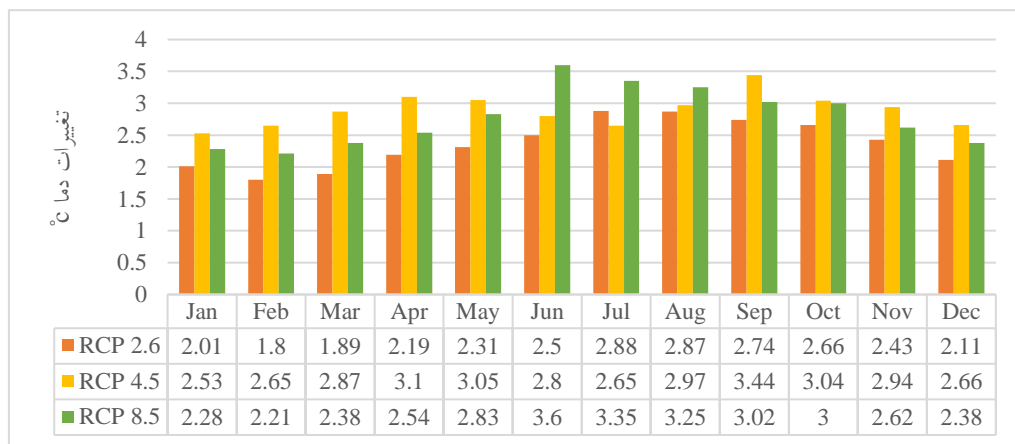
ماخذ: نگارندگان

شکل ۴: نمودار تغییرات بارش تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تحت دوره (۲۰۲۱-۲۰۸۰)



مأخذ: نگارندگان

شکل ۵: نمودار تغییرات دمای کمینه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تحت دوره (۲۰۲۱-۲۰۸۰)



مأخذ: نگارندگان

شکل ۶: نمودار تغییرات دمای بیشینه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تحت دوره (۲۰۲۱-۲۰۸۰)

با توجه به نمودارها، نتایج تغییرات دمای بیشینه، کمینه و بارش به شرح زیر است:

RCP2.6: تغییرات دمایی نشان می‌دهد که تمامی دوره‌های آینده به‌طور متوسط حدود ۲-۱/۸ درجه افزایش خواهند داشت و در فصل پاییز این افزایش دما به حدود ۲/۶ درجه و دمای بیشینه به حدود ۳ درجه افزایش خواهد رسید.

RCP4.5: با توجه به نمودار، تحت این سناریو بارش در ماه‌های فصل پاییز تحت سه دوره اقلیمی با کاهش مواجه خواهد بود و تغییرات دمایی نشان می‌دهد که در دوره‌های آینده دما به‌طور متوسط حدود ۳-۲/۵ درجه افزایش خواهد داشت.

RCP8.5: همان‌طور که در نمودار مشخص است، تحت این سناریو بارش در فصل زمستان در همه دوره‌های اقلیمی با افزایش مواجه خواهد بود و بیشترین افزایش برای ماه‌های پاییز اتفاق خواهد افتاد. همچنین تغییرات دمایی دوره آینده به‌طور متوسط حدود ۳-۴ درجه افزایش خواهند داشت.

شبیه‌سازی بارش - رواناب

آنالیز حساسیت پارامترهای مدل

پارامترهای فراوانی در نتایج مدل دخالت دارند و لازم است آن‌هایی که خروجی مدل به‌دقت آن‌ها حساسیت بیشتری دارد، مشخص و در واسنجی‌ها مورد توجه بیشتری قرار گیرند. لذا نتایج این مرحله از محاسبات توسط نرم‌افزار SWAT-CUP به انجام رسیده است. پس از تحلیل حساسیت مدل، واسنجی آن توسط نرم‌افزار

SWAT-CUP با الگوریتم SUFI2 با تعداد تکرارهای ۵۰۰ تایی انجام گرفته و در نهایت بازه پارامترهای مؤثر در رواناب به صورت جدول ۲، حاصل گردید. در جدول یادشده، ترتیب میزان تأثیرگذاری پارامترها از بالا به پایین به صورت نزولی است بطوریکه رتبه‌بندی آن‌ها توسط دو مقدار p-value و t-state مشخص می‌شود، به این صورت که هر چقدر قدر مطلق t-state بیشتر و p-value آن نزدیک به صفر باشد، آن پارامتر اثرگذاری بیشتری دارد. با توجه به داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری لار، واسنجی مدل در دوره ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۸ و اعتبارسنجی مدل از سال ۲۰۰۸ لغایت ۲۰۱۸، به انجام رسیده و نتایج حاصل از آن‌ها در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۲: آنالیز حساسیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT

ایستگاه	واسنجی (Validation)		اعتبارسنجی (Calibration)	
	Ns	R ²	Ns	R ²
پلور	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۷۱	۰/۷۵
گزلدره	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۶۴	۰/۶۶

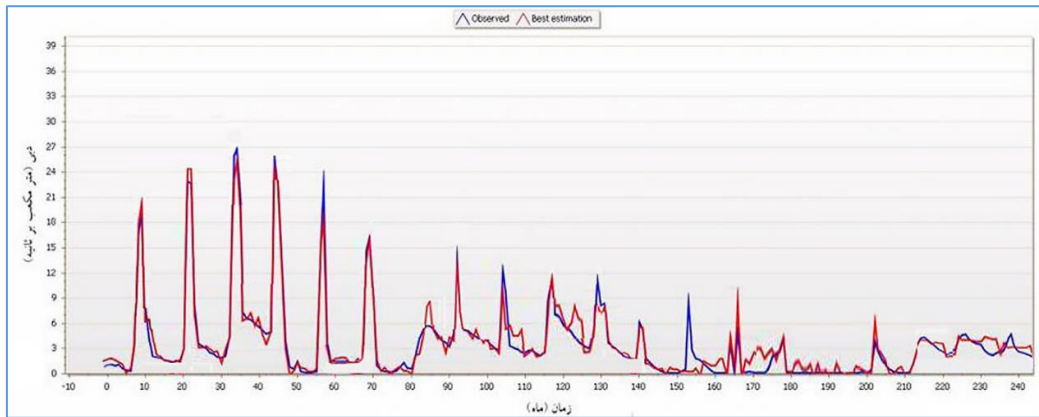
ماخذ: نگارندگان

جدول ۳: معیارهای عملکرد مربوط به مرحله واسنجی برای دو ایستگاه گزلدره و پلور در مدل SWAT تحت در دوره (۱۹۷۹-۲۰۰۸)

ردیف	نام پارامتر	توضیحات	زیر مدل	t-stat	p-value
۱	CN2	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	.mgt	-۲۳/۶۷	۰/۰۰
۲	PLAPS	افتاهنگ بارش	.sub	۲۰/۷۰	۰/۰۰
۳	SOL-BD	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی	.sol	۳/۸۱	۰/۰۰
۴	CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	.rte	-۳/۷۶	۰/۰۰
۵	ALPHA-BF	ضریب آلفای جریان و از پارامترهای مورد استفاده در محاسبات آبخوان کم عمق	.gw	۱/۹۸	۰/۰۶
۶	HRU_SLP	متوسط شیب	.hru	۱/۹۰	۰/۰۷
۷	LAT-TTIME	زمان تأخیر جریان‌های زیرسطحی	.hru	-۱/۸۳	۰/۰۸
۸	SLSUBBSN	طول شیب متوسط و از پارامترهای مؤثر در محاسبه نرخ پیک رواناب	.hru	-۱/۶۶	۰/۱۲
۹	RCHRG-DP	ضریب نفوذ آب به آبخوان عمیق	.gw	۱/۵۸	۰/۱۲
۱۰	CH-K2	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	.rte	-۱/۵۲	۰/۱۳
۱۱	SOL-K	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی	.sol	۱/۵۶	۰/۱۵
۱۲	REVAPMN	عمق آب آستانه در آبخوان کم عمق برای بالا کشیدن آب	.gw	۱/۵۲	۰/۱۷
۱۳	GW-DELAY	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی	.gw	-۱/۴۷	۰/۱۹
۱۴	CH-K2	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	.rte	۱/۲۹	۰/۲۰
۱۵	GWQMN	حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی	.gw	-۱/۲۲	۰/۲۲

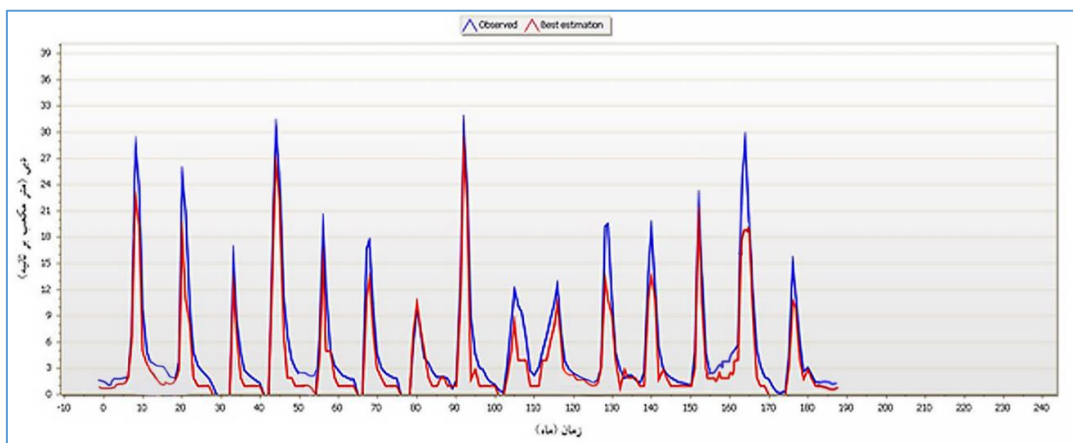
ماخذ: نگارندگان

در پژوهش‌های صورت گرفته ضریب NS بیشتر از ۰/۵ و ضریب R^2 بیشتر از ۰/۶ نتایج جدول فوق نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد رواناب در دوره واسنجی می‌باشد. در شکل‌های ۷ و ۸، سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده به همراه مقادیر مشاهداتی برای هر دو ایستگاه ترسیم شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۷: سری زمانی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ایستگاه پلور طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی (۱۹۷۹-۲۰۱۸)



مأخذ: نگارندگان

شکل ۸: سری زمانی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ایستگاه گلدره طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی (۱۹۷۹-۲۰۱۸)

شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل تصمیم‌گیری بیزین

با توجه به اینکه پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رواناب به صورت ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، نتایج برای دو دوره آموزش و آزمون مدل محاسبه گردیده است. پارامترهای بارش، رواناب و دما برای شبیه‌سازی رواناب به مدل وارد شده‌اند و نتایج در جدول ۴، درج گردیده است. لازم به ذکر است که ۷۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی برای دوره آموزش و ۳۰ درصد دیگر به صورت تصادفی برای دوره آزمون در نظر گرفته شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی، کلیه پارامترها با تأخیر تا ۶ ماه در نظر گرفته شده‌اند و در یکی از سری‌های شبیه‌سازی شده زمانی، پارامتر دما در نظر گرفته نشده و در گام بعدی، پارامتر دما اضافه شده است.

جدول ۴: نتایج دقت شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل بیزین طی سال‌های (۲۰۱۸-۱۹۷۹)

ردیف	پارامترهای مؤثر بر تولید رواناب	آموزش		آزمون	
		NSE	R ²	NSE	R ²
۱	Q1,P1	-۰/۵۳	-۰/۵۴	-۰/۵۶	-۰/۵۶
۲	Q1,P1,Q2,P2	-۰/۵۸	-۰/۵۹	-۰/۵۸	-۰/۵۵
۳	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3	-۰/۶۴	-۰/۶۳	-۰/۶۰	-۰/۶۲
۴	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4	-۰/۷۳	-۰/۶۷	-۰/۶۳	-۰/۶۵
۵	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5	-۰/۷۶	-۰/۷۷	-۰/۷۷	-۰/۷۸
۶	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,Q6,P6	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۷۳	۰/۸۲
۷	Q1,P1,T1	-۰/۵۰	-۰/۵۷	-۰/۵۵	-۰/۵۷
۸	Q1,P1,Q2,P2,T1,T2	-۰/۵۳	-۰/۶۵	-۰/۵۶	-۰/۶۰
۹	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,T1,T2,T3	-۰/۶۰	-۰/۶۸	-۰/۵۸	-۰/۶۳
۱۰	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,T1,T2,T3,T4	-۰/۶۳	-۰/۷۳	-۰/۶۳	-۰/۶۵
۱۱	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,T1,T2,T3,T4,T5	-۰/۶۶	-۰/۷۶	-۰/۶۷	-۰/۷۰
۱۲	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,Q6,P6,T1,T2,T3,T4,T5,T6	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۷۶

مأخذ: نگارندگان

با توجه به اعداد جدول در ردیف ۶ و ۱۲، بهترین نتایج سری زمانی شبیه‌سازی شده به دست آمده و این موضوع نشان‌دهنده آن است که با افزایش پارامترهای ورودی، نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی مصنوعی

با توجه به اینکه پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رواناب به صورت ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، نتایج برای دو دوره آموزش و آزمون مدل محاسبه شده و پارامترهای بارش، رواناب و دما برای شبیه‌سازی رواناب به مدل وارد شده‌اند که نتایج آن در جدول ۵، درج گردیده است. لازم به ذکر است، همانند مدل بیزین ۷۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی برای دوره آموزش و ۳۰ درصد باقیمانده به صورت تصادفی برای دوره آزمون در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اعداد جدول در ردیف ۶ و ۱۲، بهترین نتایج سری زمانی شبیه‌سازی شده به دست آمده و این موضوع نشان‌دهنده آن است که با افزایش پارامترهای ورودی، نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

جدول ۵: نتایج دقت شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی مصنوعی طی سال‌های (۲۰۱۸-۱۹۷۹)

ردیف	پارامترهای مؤثر بر تولید رواناب	آموزش		آزمون	
		NSE	R ²	NSE	R ²
۱	Q1,P1	-۰/۵۳	-۰/۵۸	-۰/۵۷	-۰/۵۹
۲	Q1,P1,Q2,P2	-۰/۵۶	-۰/۵۶	-۰/۵۹	-۰/۵۶
۳	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3	-۰/۶۳	-۰/۶۰	-۰/۶۷	-۰/۶۴
۴	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4	-۰/۶۸	-۰/۶۵	-۰/۷۴	-۰/۷۱
۵	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5	-۰/۷۰	-۰/۷۳	-۰/۶۵	-۰/۷۲
۶	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,Q6,P6	+۰/۷۴	+۰/۷۸	+۰/۷۹	+۰/۷۸
۷	Q1,P1,T1	-۰/۵۳	-۰/۵۳	-۰/۵۳	-۰/۵۴
۸	Q1,P1,Q2,P2,T1,T2	-۰/۵۷	-۰/۵۷	-۰/۵۵	-۰/۵۵
۹	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,T1,T2,T3	-۰/۶۲	-۰/۵۶	-۰/۵۸	-۰/۵۸
۱۰	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,T1,T2,T3,T4	-۰/۶۵	-۰/۶۳	-۰/۶۵	-۰/۶۵
۱۱	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,T1,T2,T3,T4,T5	-۰/۶۷	-۰/۶۷	-۰/۶۸	-۰/۶۸
۱۲	Q1,P1,Q2,P2,Q3,P3,Q4,P4,Q5,P5,Q6,P6,T1,T2,T3,T4,T5,T6	+۰/۷۳	+۰/۷۱	+۰/۷۱	+۰/۷۲

مأخذ: نگارندگان

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب

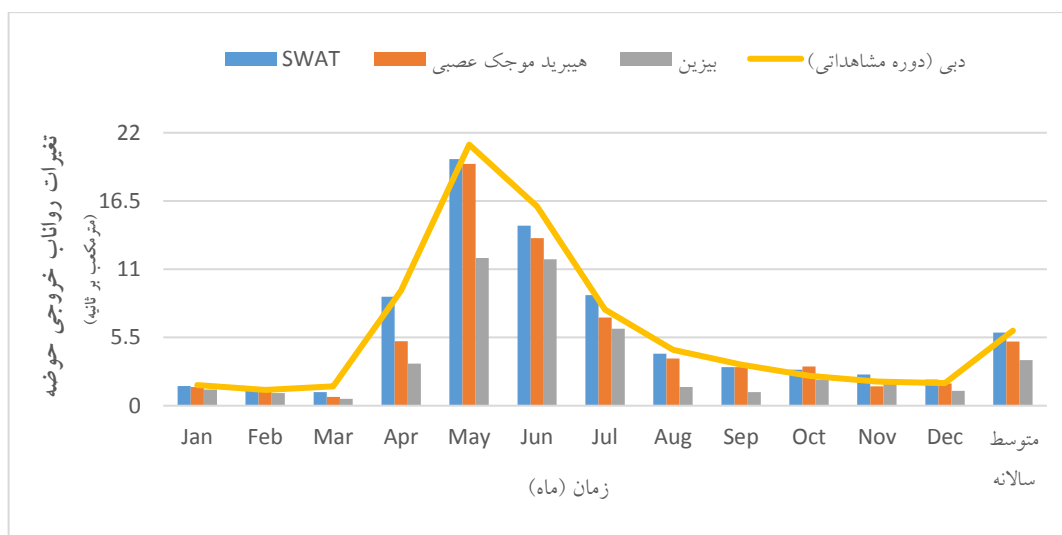
پس از شبیه‌سازی رواناب با استفاده از روش‌های محاسبات نرم و مدل‌سازی با استفاده از مدل SWAT و برآورد تغییرات دما و آب و هوا با استفاده از سناریوهای RCP از نرم‌افزار LARS-WG برای خروجی حوضه آبریز، رواناب آینده مورد ارزیابی قرار گرفته است. تغییرات ماهانه رواناب با استفاده از هریک از مدل‌ها برای آینده به شرح زیر به دست آمد (جدول ۶).

جدول ۶: تغییرات ماهانه رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها طی سال‌های (۲۰۱۸-۱۹۷۹)

ماه	بازه آینده (دوره مشاهداتی)	مدل‌های شبیه‌ساز		
		بیزین	هیبرید موجک - شبکه عصبی	SWAT
Jan	۱/۶۷	۱/۲۳	۱/۸۰	۱/۶۱
Feb	۱/۳۱	۱/۱۲	۱/۳۵	۱/۵۵
Mar	۱/۴۹	-۰/۶۱	-۰/۸۵	۲/۰۱
Apr	۹/۱۱	۳/۸۶	۶/۳۰	۷/۳۰
May	۲۰/۸۷	۱۲/۱۰	۱۸/۹۰	۲۰/۵۵
Jun	۱۵/۹۳	۱۱/۶۵	۱۴/۷۰	۱۳/۸۰
Jul	۷/۵۵	۵/۹۰	۸/۰۰	۷/۸۰
Aug	۴/۳۱	۱/۸۰	۴/۳۰	۵/۳۰
Sep	۳/۳۵	۱/۲۵	۴/۱۲	۴/۰۰
Oct	۲/۳۸	۲/۳۱	۳/۳۳	۳/۱۰
Nov	۱/۹۲	۲/۰۸	۲/۱۳	۲/۲۲
Dec	۱/۸۱	۱/۱۰	۱/۹۸	۲/۳۰
متوسط سالانه	۶/۱۳	۳/۷۵	۵/۶۴	۶/۰۴

مأخذ: نگارندگان

طبق جدول، مدل بیزین بیشترین کاهش رواناب در آینده را نشان داده است. همچنین مدل SWAT برای آینده متوسط سالانه ۶/۰۴ مترمکعب بر ثانیه را پیش‌بینی کرده و همچنین شبیه‌سازی با مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی، ۵/۶۴ مترمکعب بر ثانیه را پیش‌بینی کرده است. جدول فوق نشان‌دهنده تغییرات ماهانه و متوسط سالانه رواناب می‌باشد. همچنین در شکل ۹، تغییرات رواناب به صورت ماهانه درج شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۹: نمودار تغییرات رواناب خروجی (ایستگاه پلور) به صورت ماهانه در کلیه مدل‌ها با توجه به رواناب متوسط سالانه طی

سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۷

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم تأثیرات مهمی بر منابع آب حوضه‌های آبریز داشته و در اختیار داشتن اطلاعات با ملحوظ کردن اثر گرم شدن جهانی بسیار محدود بوده و ارزیابی ناحیه‌ای این اثر برای درک تغییرات هیدرولوژیکی بسیار مهم و ضروری می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از لایه DEM ۳۰ متری و لایه کاربری اراضی مربوط به سال ۲۰۱۴، اقدام به ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT شده و همچنین پس از انجام مراحل ساخت مدل، حوضه به ۲۶ زیر حوضه و ۵۸ واحد واکنش هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شده است. پس انجام مراحل آماده‌سازی و تنظیم داده‌های ورودی (اطلاعات بارش و دما) اجرای مدل در مقیاس زمانی ماهانه طی سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ به انجام رسید. ایستگاه‌های هیدرومتری گزیده و پلور در این پژوهش به‌عنوان نقاط کنترلی مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفتند و نتایج شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه توسط شاخص‌های آماری نش - سا تکلیف و ضریب تبیین سنجیده شدند. لذا نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی در این حوضه آبریز با دقت خوبی انجام پذیرفته است. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای CN2 (شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی)، PLAPS (آفتاب‌نگ بارش)، SOL-BD (چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی) و CH-

N2 (ضریب مانینگ رودخانه اصلی) بیشترین تأثیر را در فرآیند مدل سازی داشته‌اند. در ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مشاهده شد که معیارهای کنترلی در تمام موارد در دامنه مجاز و قابل قبولی قرار داشته و مدل در مجموع در هر یک از ایستگاه‌ها و همچنین در خروجی حوضه قادر بوده تغییرات جریان را به خوبی شبیه سازی نماید. شایان ذکر است، ایستگاه پلور که در خروجی حوضه واقع شده با مقدار ضریب همبستگی $0/86$ و ضریب نش - سا تکلیف $0/82$ ، نسبت به ایستگاه گزلدرد با مقدار ضریب همبستگی $0/85$ و ضریب نش - سا تکلیف $0/83$ که در سرشاخه‌های رودخانه قرار گرفته است، موفق تر عمل کرده است.

خاطر نشان می‌گردد که بازه دوره واسنجی مدل از سال ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۸ و دوره اعتبارسنجی آن از سال ۲۰۰۸ لغایت ۲۰۱۸، در نظر گرفته شده است. در شبیه سازی اقلیمی نتایج آزمون‌ها برای داده‌های بارندگی، دمای حداقل و حداکثر در تمامی ماه‌های سال نشان می‌دهد که کلیه مقادیر p-value در سطح معنی داری یک درصد قابل قبول بوده و می‌توان اذعان نمود مدل LARS-WG، توانمندی لازم برای شبیه سازی متغیرهای بارندگی و دمای ایستگاه کلیماتولوژی در منطقه مطالعاتی را داشته است. همچنین تغییرات بارش و رواناب نشان داد که در آینده بارش و دما دستخوش تغییرات خواهند شد بطوریکه دما تا حدود $3/5$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و همچنین بارش با تغییرات متفاوتی در ماه‌های مختلف، همراه خواهد بود. همچنین تغییرات رواناب در هر یک از مدل‌ها با کاهش مواجه خواهد شد. طبق پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در همه مدل‌ها، بیشترین افزایش دما در دوره انتهایی و تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 خواهد بود. در ماه‌های فصول زمستان و بهار، طبق پیش‌بینی مدل‌ها حدود ۱۰ درصد افزایش را از خود نشان می‌دهند؛ اما این افزایش بارش، همراه با افزایش تبخیر - ترقق بوده و عملاً آب در دسترس کاهش خواهد یافت بطوریکه در شبیه سازی رواناب این موارد مشخص شده‌اند. به صورت کلی می‌توان به این نکته اشاره کرد که با وجود افزایش دما و همچنین افزایش بارش، در آینده با کاهش رواناب سطحی روبرو خواهیم بود. میزان تبخیر - ترقق واقعی و تبخیر - ترقق پتانسیل در دوره‌های آینده در همه سناریوها افزایش یافته و باعث افزایش تلفات آب خواهند شد. در ادامه با استفاده از مدل‌های شبکه بیزین و مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی مصنوعی، اقدام به شبیه سازی گردیده و نتایج حاصل از مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج پژوهش حاضر و بسیاری از پژوهش‌ها از جمله نوری و همکاران (۱۳۸۶) نشان داد که مدل‌های هیبریدی، افزایش دقت مدل سازی را به همراه خواهند داشت. چرا که مدل شبکه عصبی مصنوعی به تنهایی، قادر به غلبه بر نا ایستایی سیگنال نبوده در حالی که تبدیل موجکی، با جدا نمودن سیگنال به فرکانس‌های بالا و پائین، ویژگی‌های چند مقیاسی سیگنال را در اختیار داشته و دقت مدل را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نهایت نتایج حاکی از آن بود استفاده از مدل‌های محاسبات نرم و مدل فیزیکی و نیمه توزیعی SWAT، می‌تواند در شبیه سازی رواناب به خوبی عمل نمایند. ضمن اینکه مدل SWAT مقادیر پیش‌بینی رواناب را نیز نزدیک تر و واقعی تر از سایر مدل‌ها به دوره مشاهداتی، پیش‌بینی نموده است. با توجه به اینکه این مدل تمامی فرآیندهای هیدرولوژیکی را در نظر می‌گیرد، لذا می‌توان به نتایج این مدل نیز اطمینان بیشتری داشت. شایان توجه است که علیرغم مناسب بودن مقادیر معیارهای

ارزیابی مدل در خروجی حوضه آبریز مورد مطالعه، در برخی از سال‌ها مقدار جریان شبیه‌سازی شده نسبت به جریان اندازه‌گیری شده بیش برآورد و یا کم‌بر آورد شده و در برخی از سال‌ها نیز مقدار دبی پایه، کم برآورد شده که البته روند مشخصی در این خصوص مشاهده نمی‌شود. لذا این عدم انطباق‌ها میان جریان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ناشی از خطای سیستماتیک نبوده و مرتبط با ماهیت پیچیده فرآیندهای غالب هیدرولوژیک در منطقه، همچنین فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژیک در حوضه می‌باشد. به‌عنوان مثال عوامل متعددی از جمله برداشت‌های پنهان آب در مسیر رودخانه خصوصاً در مناطق بالادست و در فواصل نامعلوم از رودخانه، مصرف کل آب خروجی از زیر حوضه گذرده قبل از پیوستن به رودخانه اصلی، مشخص نبودن مقدار دقیق آب برگشتی به رودخانه، عدم وجود آمار دقیق در مقیاس زمانی مناسب از برداشت‌های انجام شده از منابع آب سطحی، عدم وجود آمار دقیق و مدون از مدیریت کشاورزی در منطقه و ضعف در اندازه‌گیری دقیق جریان در ایستگاه‌های آب‌سنجی، از سایر موارد ایجاد عدم قطعیت در خروجی مدل می‌باشند. از سوی دیگر برخی از کاستی‌های مدل از جمله ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف و سهم آن در تشکیل دبی پایه در مناطق مرتفع و یکسان در نظر گرفتن ضریب تخلخل برای کل لایه‌های پروفیل خاک نیز می‌توانند منجر به عدم انطباق کامل جریان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده گردد.

یقیناً این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد جریان رودخانه و بیلان آبی حوضه آبریز لار در اختیار قرار داده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر پروژه‌های منابع آب کمک شایانی نموده است. در پایان با توجه به اهمیت موضوع اثرات تغییر اقلیم، ضروری به نظر می‌رسد که توجه بیشتری نسبت به آن معمول گردد چراکه عدم توجه به آن موجب خواهد شد تا کشورها هزینه‌هایی گزافی را در آینده‌ای نه‌چندان دور به دلیل نداشتن استراتژی خاص در مقابله با اثرات منفی این پدیده بپردازند. لذا برای تحقق این مهم لازم است تا کلیه دستگاه‌های اجرایی و قانون‌گذار پژوهش‌های متعدد و گسترده‌ای را در زمینه برنامه‌های کوتاه و بلندمدت به انجام برسانند. همچنین پیشنهاد می‌شود دیگر پارامترهای اقلیمی نیز برای اثبات توانایی این مدل‌ها در پیش‌بینی‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته و با توجه به گسترش مدل‌های جدیدتر در حوزه علوم هوش مصنوعی و مدل‌های استوکاستیک و ترکیب آن‌ها با مدل‌های مبتنی بر هوش محاسباتی (فرا ابتکاری) در زمینه مطالعات اقلیم‌شناسی، به بررسی مستمر و مداوم این پدیده پرداخته شود.

منابع

- ۱- افخمی فر س. صراف ا. پ. (۱۳۹۹): پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه با استفاده از مدل هیبرید تبدیل موجک - ماشین یادگیری بیشینه و بهینه‌سازی با ازدحام ذرات کوانتومی، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صص ۳۵۱-۳۶۴.

- ۲- جیحونی ا. محمدی مع. اسلامیان س.س. زارعیان م.ج (۱۳۹۷): ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی (مطالعه موردی: دشت شبستر)، اولین کنفرانس ملی مهندسی زیرساخت‌ها (دانشگاه ارومیه).
- ۳- رجایی ط. شهبایی. (۱۳۹۳): کاربرد مدل ترکیبی موجک - شبکه عصبی در پیش‌بینی تغییرات کوتاه مدت تراز سطح دریا (مطالعه موردی: بندر چابهار)، نشریه علمی - پژوهشی دریا فنون. دوره ۱. شماره ۲. صص ۴۲-۵۳.
- ۴- سلیمانی‌پور م. صراف ا. پ. (۱۳۹۸): ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز لار با استفاده از مدل SWAT و مقایسه نتایج آن با شبکه‌های بیزین و مدل‌های هوشمند هیبریدی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.
- ۵- مرادی ح. ر. آذریم. ثقفیان ب. فرامرزی. (۱۳۹۲): ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز گرگانرود، نشریه آب و خاک، شماره ۳، صص ۵۳۷-۵۴۷.
- ۶- نوریم. میرحسینی سم. زینالزاده م. ب. (۱۳۸۶): الگوی جدید بارش - رواناب حوضه آبریز هلیل‌رود با استفاده از مدل هیبرید موجک - شبکه عصبی مصنوعی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۲، شماره ۲: صص ۴۷۲-۴۵۱.
- 7- Banihabib, M. E. Arabi, A. And Salha, A. A. (2015): A Dynamic Artificial Neural Network For Assessment Of Land-Use Change Impact On Warning Lead-Time Of Flood. *International Journal Of Hydrology Science And Technology*. 5(2): Pp. 163-178.
- 8- Baran, E. And Jantunen. (2004): Stakeholders Consultation for Bayesian Decision Systems In Environmental Management, Proceeding Of The Regional Conference On Ecological And Environmental Modeling (ECOMOD 2004), Universiti Stans Malaysia.
- 9- Kazemi, D. H. Rasul, G. Li, J. And Cheema. S. B. (2014): Comparative Study For ECHAM5 And SDSM In Downscaling Temperature For A Geo-Climatically Diversified Region. Pakistan. *Applied Mathematics*. 5: Pp. 137-143.
- 10- Lotfimanesh, B. And Barani, G.A. (2019): Optimal Utilization Of Surface Waters Due To Climate Change Effect By Genetic Algorithm (Case Study Of Zayandeh-Rood Basin), 5th Annual National Conference On Civil Engineering. Architecture And Design Of Iran. Mashhad Scientific Institute And Research, Mashhad, Iran (In Persian).
- 11- Maheswaran, R And Khosa, R. (2013): Long Term Forecasting Of Groundwater Levels With Evidence Of Nonstationary And Nonlinear Characteristics. *Computers & Geosciences*. 52: Pp. 422-436.
- 12- Moazami Goudarzi F. Sarraf A. P. And Ahmadi H. (2020): Prediction Of Runoff Within Maharlou Basin For Future 60 Years Using RCP Scenarios. *Arabian Journal Of Geosciences*, (2020) 13: Pp. 605, 1-17.
- 13- Moazami Goudarzi F. Sarraf A. P. And Ahmadi H. (2020): Assessment Of SM2RAIN-ASCAT And CMORPH Satellite Precipitation Products Over Maharlou Lake Basin In Iran. *Water Supply* (2020) 20 (5): Pp. 1799-1806.
- 14- Moosavi, V. Vafakhah, M. Shirmohammadi, B. And Ranjbar, M. (2014): Optimization Of Wavelet-ANFIS And Wavelet-ANN Hybrid Models By Taguchi Method For Groundwater Level Forecasting. *Arabian Journal For Science And Engineering*, 39(3): Pp. 1785-1796.
- 15- Souvignet, M. Gaese, H. Ribbe, L. Kretschmer, N. And Oyarzun, R. (2010): Statistical Downscaling Of Precipitation And Temperature In North- Central Chile: An Assessment Of Possible Climate Change Impacts In An Arid Andean Watershed. *Hydrological Sciences Journal*. 55(1): Pp. 41-57.
- 16- Zamani, R. Akhund Ali, A. And Roozbahani, M. A. (2019): Investigating The Impact Of Climate Change On Runoff Under Different Probabilistic Levels Using The Uncertainty Approach (Case Study: Yellow River Basin). *Irrigation Science And Engineering*, In Press (In Persian).