

مدل سازی و تحلیل دو متغیره خشکسالی هواشناسی با استفاده از داده‌های تولیدی با رویکرد تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دریاچه ارومیه)

فرزاد خضری^۱، محسن ایراندوست*^۲، نوید جلال کمالی^۳ و نجمه یزدان پناه^۴

۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.
۲) استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.
۳) استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.
۴) دانشیار گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: irandostmo@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: تغییر اقلیم یکی از عوامل مهمی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان روی کره زمین را تحت تأثیر قرار خواهد داد و تأثیرات زیانباری بر منابع زیست‌محیطی، اقتصادی اجتماعی و به‌ویژه منابع آب خواهد داشت. آگاهی از تغییرات اقلیمی در زمینه خشکسالی می‌تواند برنامه‌ای جامع در حوزه‌های مختلف مدیریت در خصوص پایش خشکسالی‌ها و خطرات احتمالی ناشی از آنها ارائه دهد. پدیده خشکسالی در هر منطقه‌ای حتی مناطق مرطوب ممکن است اتفاق بیافتد. این پدیده به عوامل و پارامترهای مختلفی وابسته بوده و یکی از مهم‌ترین نمادهای این پدیده یعنی وقوع خشکسالی کاهش میزان بارندگی است و در نتیجه تجزیه و تحلیل داده‌های بارش برای بررسی خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از مطالعه حاضر تحلیل دو متغیره خشکسالی با استفاده از دو شاخص SPI و SPI^{mod} و توابع مفصل می‌باشد

روش پژوهش: در این تحقیق به منظور مدل‌سازی تحلیل چند متغیره خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه با بکارگیری سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP4.5 و نیز با بکارگیری مدل‌های گردش عمومی جو با استفاده از داده‌های تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۹۱)، برای سه افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)، متوسط (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰) شبیه‌سازی و تولید داده گردید سپس با استفاده از داده‌های تولیدی، توسط شاخص SPI^{mod} و توابع مفصل، تحلیل چند متغیره خشکسالی در محیط نرم‌افزار متلب صورت گرفت. در بیان کلی‌تر، در ابتدا با استفاده از شاخص‌های مذکور (دو شاخص SPI^{mod} و SPI) مشخصات شدت و مدت خشکسالی استخراج، سپس با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار متلب از هشت خانواده توابع مفصل ارشمیدسی استفاده گردید

یافته‌ها: نتایج حاصل از تحلیل چند متغیره نشان داد که تابع مفصل جوئی به‌عنوان تابع مفصل برتر جهت تحلیل چند متغیره خشکسالی (برای تحلیل توأم شدت و مدت خشکسالی برای منطقه مورد مطالعه) می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از احتمال و دوره بازگشت توأم نشان داد که در دوره‌های آتی حداقل خشکسالی‌های هم‌سطح خشکسالی‌های تاریخی و حتی شدیدتر رخ خواهد داد. بدین صورت که با مطالعه‌ی دوره بازگشت‌های توأم و شرطی و کنдал، نتایج نشان داد که در یک سطح احتمال بحرانی معین، مقدار دوره بازگشت کنдал خیلی بیشتر از دوره بازگشت استاندارد می‌باشد، بطوریکه این تفاوت با افزایش آن مقدار معین، افزایش می‌یابد

نتایج: در نهایت نتایج حاصل از تحقیق با رویکرد تغییر اقلیم بر روی خشکسالی هواشناسی دریاچه ارومیه نشان داد که در دوره‌های آتی شاهد افزایش دما خواهیم بود که این موضوع بر میزان بارندگی‌های منطقه و منابع آب تأثیر خواهد گذاشت، از طرفی چون که داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیک جهت محاسبات انواع خشکسالی‌ها بکار می‌روند بنابراین خشکسالی‌ها متأثر از تغییرات اقلیم بوده بگونه‌ای که در دوره‌های آتی ۴۶ تا ۴۸ درصد ماه‌ها در افق‌های مختلف خشک خواهند بود؛ و در آخر، نتایج حاصل از سری زمانی شاخص‌ها نشان داد که در طی دوره آماری حداقل ۴۰ درصد ماه‌ها خشک بوده و این شدت خشکسالی‌ها در ایستگاه ارومیه به‌مراتب بیشتر از سایرین می‌باشد و در زمینه عملکرد شاخص‌ها به‌منظور تحلیل خشکسالی نتایج نشان داد که استفاده از شاخص SPI اصلاح شده تا حدود زیادی معایب SPI متداول را برطرف می‌کند و تغییرات فصلی بارش را در محاسبه شاخص SPI لحاظ می‌نماید.

کلید واژه‌ها: توابع مفصل، تحلیل چند متغیره، تغییر اقلیم، سناریوهای انتشار، خشکسالی



شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰

شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیکی:

iauwsrj@srbiau.ac.ir

iauwsrj@gmail.com

سال یازدهم

شماره دو

زمستان ۱۴۰۰

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۰/۰۶/۰۶

صفحات: ۴۹-۶۸



مقدمه

(Bahri et al., 2015) تغییرات اقلیمی دوره و اثر آن بر خشکسالی حوضه آبخیز اسکندری واقع در استان اصفهان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیقشان نشان از افزایش ۷/۲ تا ۱۰/۹ درصدی متوسط بارش سالانه دارد. شدیدترین خشکسالی با توجه به SPI شش ماهه مربوط به آگوست و شدیدترین خشکسالی بر اساس SPI دوازده ماهه متعلق به دسامبر است. تحلیل سالانه این شاخص نشان داد که ۷۵ درصد سالها وضعیتی نرمال دارد، بنابراین حوضه آبخیز اسکندری در دهه ۲۰۲۰ با افزایش فراوانی وقوع خشکسالی روبرو نخواهد بود، اما انتظار می‌رود بارش به سمت فصل گرم جابجا شود. ایلدرمی (Ildermi et al., 2016) ارزیابی خشکسالی و تغییر اقلیم در دوره‌ی آتی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو در حوضه‌ی آبخیز گرگان رود-قره‌سو - ایران مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو GCM (دو مدل HadCM3 و ECHAM4) و ریزگردانی آنها به کمک نرم‌افزار، LARS-WG اقدام به تولید داده‌های بارندگی به مدت ۲۰ سال (طی دوره آماری (۲۰۳۰-۲۰۱۱)) نمودند. نتایج حاصل از تحقیقشان اولاً بیانگر تأیید عملکرد شاخص‌های مورد مطالعه جهت تحلیل خشکسالی می‌باشد. ثانیاً در دوره‌های آتی خشکسالی‌ها در مقایسه با دوره تاریخی به‌طور نسبی افزایش خواهد یافت که این موضوع بیانگر تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه در تحقیق می‌باشد؛ از طرفی الگوی زمانی بارندگی تغییر یافته و با کاهش بارندگی‌ها در فصل زمستان می‌تواند مشکلاتی را در دوره‌های آتی کم‌آبی و کاهش ذخیره‌ی آب و تشدید خشکسالی را به وجود آورد. نوده فراهانی (Nodeh Farahani et al., 2018) بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی حوضه شادگان را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این تحقیق از خروجی سه مدل گردش کلی MPI-ESM-LR، BCC-CSM1-1 و NORESM1-M تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیقشان بیانگر

پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آتی در هر منطقه برای مدیریت منابع آب بسیار اهمیت دارد. در نیمکره شمالی، مناطق واقع در عرض‌های جغرافیایی مابین ۱۵ تا ۴۵ درجه، مستعد خشکسالی‌های شدیدتر می‌باشند که کشور ایران نیز در این منطقه واقع شده است (Mousavi, 2005). کشور ایران به لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص خود نسبت به گردش عمومی جو و خصوصیات پستی و بلندی خود در کمربند خشک جهان قرار گرفته و در مجاورت با پرفشار جنب‌حاره‌ای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. در نتیجه در بیشتر سال‌ها دچار خشکسالی شدید شده است. پدیده خشکسالی موجب کاهش سریع جریان‌های سطحی، افت مخازن زیرزمینی، فرسایش آبی و بادی خاک، تغییر کیفیت منابع آب و خاک، افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و نشست زمین می‌شود. از این‌رو برای کاهش آثار این پدیده و مدیریت خطر آن، ارزیابی خشکسالی و تداوم دوره‌های آن ضروری است که به همین منظور خشکسالی‌های آینده را در نقاط مختلف کشور بررسی نمودند (Moafi Madani et al., 2012). در زمینه خشکسالی و تغییر اقلیم مطالعاتی صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: گل محمدی و مساح بوانی (Golmohammadi and Masah, 2011) بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداختند. آنها برای این منظور از شاخص SPI و مدل Hadcm3 استفاده کردند. مقایسه نتایج حاصل از تحقیقشان حاکی از این است که حوضه در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی شاهد افزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. این کاهش شدت، برای مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای خشکسالی‌های ۲۴ ماهه با افزایش دوره بازگشت، شدت خشکسالی حوضه بیش از دوره پایه خواهد شد. بحری

بیشتر سال‌ها بر اساس شاخص SPI می‌توان در کلاس طبیعی طبقه‌بندی کرد و بیشترین میزان بارش در ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و مه رخ می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که طبق تئوری Run، بیشترین مدت خشک‌سالی ۳۲ ماه، طبق شاخص خشکسالی SPI با مقیاس ۱۲ ماهه و بیشترین شدت خشکسالی ۳۶/۳۷ در این منطقه بوده است، همچنین بیشترین درصد فراوانی خشکسالی در داده‌های پیش‌آگهی به گروه شدید اختصاص یافت. ژائو (Zhao et al., 2019) تأثیرات تغییر اقلیم بر روی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه در رودخانه ویبی در چین مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای این منظور از سه مدل گردش عمومی جو (GCM) دو سناریوی دو سناریو انتشار (RCP4.5، RCP8.5) و مدل هیدرولوژیکی ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیقشان نشان داد که (۱) فراوانی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی، مدت‌زمان و شدت آنها در آینده تحت (GCM) روند افزایشی آشکاری خواهد داشت با این حال یک روند کاهشی تحت (GCM) برای شرایط مرطوب وجود خواهد داشت؛ (۲) تغییر در بارش‌های آبی عامل اصلی تغییر در ویژگی‌های احتمالاتی خشکسالی خواهد بود. به طوری که چهل طرح انجام شده با مدل‌های GCMs تغییرات بارندگی را از ۳/۴۲- تا ۱۴/۲۴ درصد پیش‌بینی می‌کند که بزرگترین منبع عدم قطعیت می‌باشد. داننده مهر (Danandeh Mehr et al., 2020) تأثیرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی هواشناسی با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI در آنکارای ترکیه را مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای این منظور از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 گازهای گلخانه‌ای استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیقشان نشان داد که آنکارا در بازه زمانی ۲۰۰۰-۱۹۷۱ شش خشکسالی شدید و دو خشکسالی خیلی شدید را تجربه کرده است. با این حال پیش‌بینی‌ها رخداد خشکسالی‌های کمتری برای بازه زمانی نزدیک ۲۰۴۰-۲۰۱۶ و بدون خشکسالی شدید را پیش‌بینی می‌کنند. درحالی‌که سناریوی RCP4.5 نشان می‌دهد که دوره‌های

افزایش دمای حداکثر و حداقل در تمام ماه‌های سال در دوره آینده نسبت به دوره پایه در حوضه شادگان می‌باشد. از طرفی بارش در دوره آبی روند مشخصی ندارد. همچنین نتایج نشان داد تحت سناریوی RCP4.5 و در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه به ترتیب ۱۷/۱۶، ۱۴/۷۰ و ۱۸/۷۴ درصد از کل ماه‌ها در دوره آبی دارای وضعیت خشک و تحت سناریوی RCP8.5 در دوره آبی در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه به ترتیب ۱۶/۴۵، ۱۷/۰۳ و ۱۵/۲۱ درصد از ماه‌ها دارای وضعیت خشک می‌باشند. ماه‌های با وضعیت خشک در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت RCP4.5 و RCP8.5، در مقیاس ۶ ماهه به ترتیب ۲/۲۷ و ۱/۵۶ درصد افزایش، در مقیاس ۱۲ ماهه به ترتیب ۲/۷۷ و ۰/۴۴ درصد کاهش و در مقیاس ۲۴ ماهه به ترتیب ۰/۲۰ و ۵/۵۳ درصد کاهش خواهد یافت. پیش‌بینی می‌شود در دوره آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوضه شادگان، تعداد ماه‌های خشکسالی نسبت به تعداد ماه‌های با وضعیت نرمال و مرطوب کمتر می‌باشد. خانی تملیه (Khani Tamaleh et al., 2020) تحلیل فراوانی سه متغیره مشخصه‌های خشکسالی‌ها را در شرق ایران با استفاده از توابع مفصل تودرتو مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیقشان با استفاده از شاخص SPI^{mod} نشان داد که بیشترین درصد تعداد ماه‌های خشک مربوط به ایستگاه سبزوار با ۵۲ درصد و کمترین آن مربوط به ایستگاه تربت حیدریه ۳۵ درصد بود که به ترتیب به عنوان مناطقی که بیشتر و کمتر در معرض خشکسالی قرار گرفته‌اند، شناخته شدند و همچنین تابع مفصل HRT بهترین عملکرد را در تحلیل چند متغیره خشکسالی را داشته‌اند. مصباح زاده و ساردو (Mesbahzadeh and Sardoo, 2019) به ارزیابی و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم در جنوب شرقی ایران پرداختند. آنها در این مطالعه با استفاده از مدل LARS-WG به پیش‌بینی پارامترهای بارش پرداختند. برای پیش‌بینی بارش از سه سناریو (A1، A1B و B2) استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که در منطقه مورد مطالعه

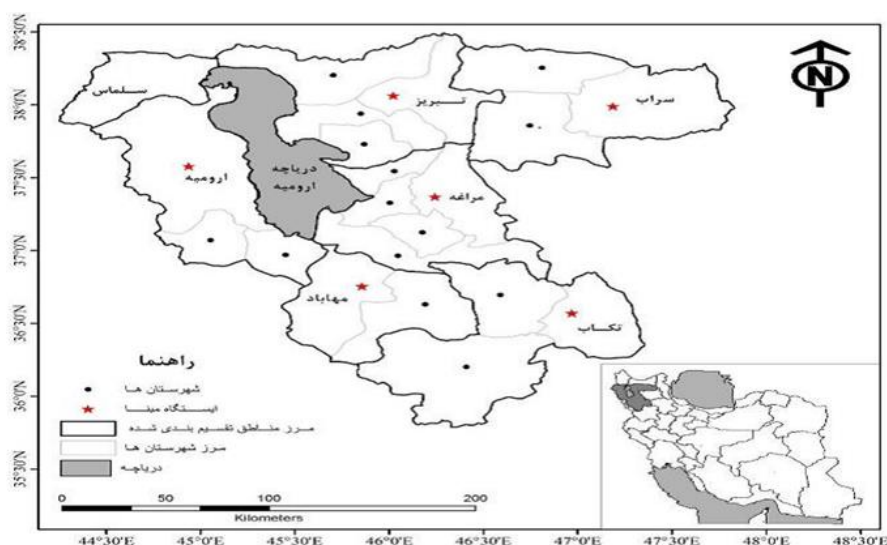
۴۰-۳۵ تا ۳۰-۳۸ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه در شمال غربی ایران قرار گرفته و به وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس، دامنه جنوبی کوه سبلان و دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت شرق به حوضه آبریز رودخانه سفیدرود، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه‌های سفیدرود و سیروان و از غرب به حوضه آبریز رودخانه زاب محدود گشته است. حدود ۳۵۱۵۰ کیلومترمربع از سطح حوضه آبریز را مناطق کوهستانی و ۹۰۰۰ کیلومترمربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها و ۷۳۱۰ کیلومترمربع آن را دریاچه و مناطق باتلاقی اطراف آن تشکیل می‌دهد. در این تحقیق به ارزیابی تحلیل چند متغیره اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص SPI^{mod} و همچنین پارامترهای دما و بارش حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و ریزمقیاس کننده LARC-WG برای سه دوره با دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته شد. برای این منظور از داده‌های شش ایستگاه ارومیه، تبریز، تکاب، سراب، مراغه و مهاباد استفاده گردید؛ که موقعیت جغرافیایی آنها در شکل (۱) و مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه گردیده است.

خشک در نیمه دوم نزدیک به دوره آینده نزدیک غالب خواهند بود، از طرفی سناریوی RCP8.5 پیش‌بینی کرد که دوره‌های خشک در کل دوره آینده نزدیک توزیع می‌شوند. از جمله مطالعات دیگر می‌توان به مطالعات خانی تملیه (Khani Tamaleh et al., 2020)، حسامی افشار (Hesami Afshar et al., 2016)، آیانتوبو (Ayantobo et al., 2019) و بوعدلی (Bouabdelli et al., 2020) اشاره کرد. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل چند متغیره خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از توابع مفصل و مدل‌های گردش عمومی جو (HadGem2- ES, IPSL-CM5A-LR و NorESM1-M) تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشد. از جمله جنبه‌های نوآوری تحقیق می‌توان به استفاده از توابع مفصل جهت تحلیل چند متغیره با رویکرد تغییر اقلیم و اثرات تغییر اقلیم با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده اصلاحی (SPI^{mod}) که برای اولین بار مورد مطالعه قرار گرفته است، اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۱۸۰۱ کیلومترمربع بین مختصات ۱۴-۴۴ تا ۵۳-۴۷ طول شرقی و



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های منتخب حوضه دریاچه ارومیه

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	سال تأسیس
ارومیه	۴۵° ۰۵'	۳۷° ۵۶'	۱۳۳۵	۱۳۳۰
تبریز	۴۶° ۱۴'	۳۸° ۰۷'	۱۳۶۴	۱۳۳۰
نکاب	۴۷° ۰۹'	۳۶° ۳۹'	۱۸۷۱	۱۳۶۴
سراب	۴۷° ۲۳'	۳۷° ۵۶'	۱۳۶۲	۱۳۶۵
مراغه	۴۶° ۱۲'	۳۷° ۲۱'	۱۳۴۴	۱۳۶۲
مهاباد	۴۵° ۷۱'	۳۷° ۵۶'	۱۳۵۲	۱۳۶۲

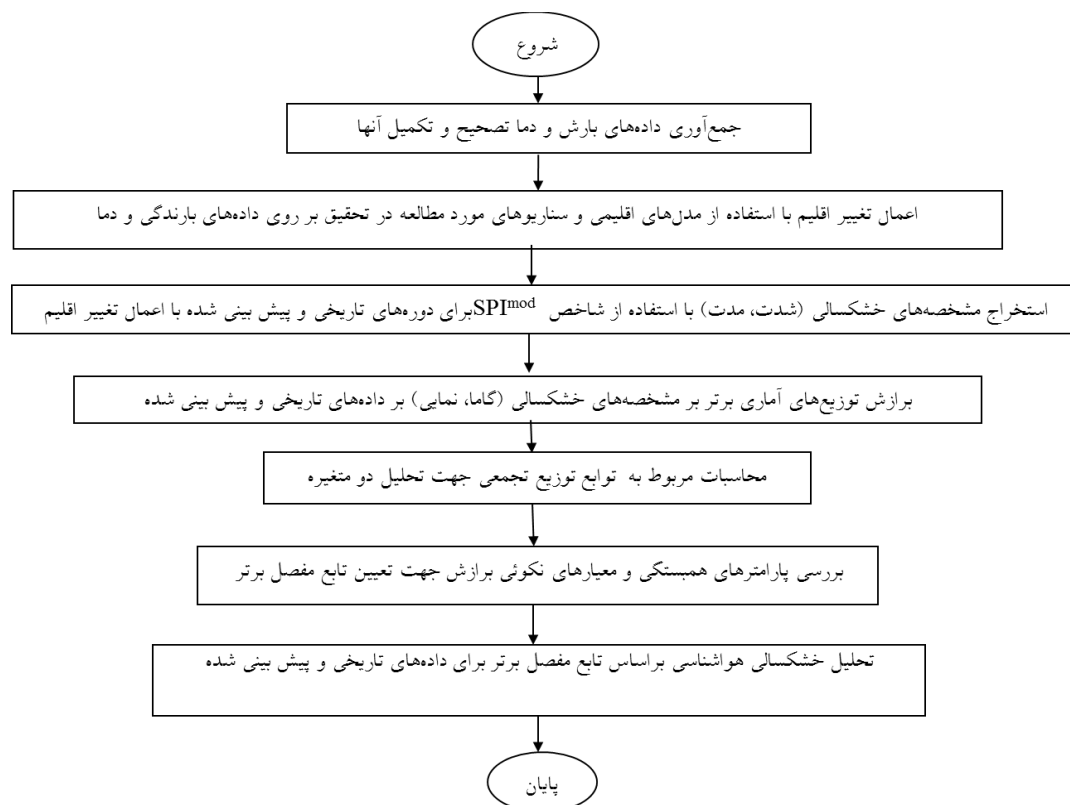
روش کار

آماري معنی‌داری وجود داشته باشد، در این قسمت تحلیل و برطرف می‌شود؛ ۳) تولید اطلاعات (Generator): تولید اطلاعات آب و هوایی ساختگی به منظور این‌که داده‌های آب و هوایی ساختگی با داده‌های آب و هوایی مشاهداتی یکسان باشند، LARS-WG در مدت تنظیم پروسه از اطلاعات آب و هوایی مشاهداتی اصلی استفاده می‌کند؛ اما تفاوت در داده‌های آب و هوایی ساختگی از یک روز به روز دیگر اساساً به وسیله یک سناریوی تغییر اقلیم ویژه برای محل صورت می‌گیرد. LARS-WG این توانایی را دارد تا از تغییرات پارامترهای بارش، دما و تشعشع خورشید یک مدل تغییر اقلیم سراسری بسازد (Semenov, Wilby et al., 2002, and Stratonovitch, 2010). برای این منظور با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) و سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 شبیه‌سازی اقلیمی برای دوره‌های آتی انجام گرفت. کدهای محاسبه مراحل مختلف تحقیق در محیط برنامه نویسی متلب نوشته شد سپس جهت تحلیل‌های اقلیمی از نرم‌افزارهای اقلیمی استفاده گردید (Zhang et al., 2016). مراحل مختلف روش کار مطالعه حاضر به صورت فلوچارت در شکل (۲) ارائه شده است.

شاخص بارش استاندارد اصلاح شده

این شاخص توسط کائو و گوینداراجو (Kao and Govindaraju, 2010). به منظور رفع نواقص شاخص SPI که نمی‌تواند به‌طور کامل و دقیق شرایط خشکسالی را

در این مطالعه، ابتدا اثرات تغییر اقلیم بر روی پارامترهای بارش و دما در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آماری (۲۰۱۰-۱۹۹۱) اعمال گردید. سپس به پیش‌بینی داده‌های بارندگی در دوره‌های (۲۰۳۰-۲۰۱۱)، (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و (۲۰۹۹-۲۰۸۰) با استفاده از سناریوها و مدل‌های اقلیمی پرداخته شد. سپس تغییرات در مقادیر بارش و دما در دوره‌های آتی با رویکرد تغییر اقلیم بررسی گردید. جهت تحلیل چند متغیره خشکسالی ابتدا سری زمانی شاخص بارش استاندارد شده اصلاحی (SPI^{mod}) برای داده‌های بارش ماهانه تاریخی و تولیدی (با رویکرد تغییر اقلیم) محاسبه شد. سپس مشخصات خشکسالی نظیر شدت و مدت استخراج گردید. در ادامه با استفاده از توابع مفصل به تحلیل چند متغیره خشکسالی‌های هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه پرداخته شد و توابع مفصل برتر برای داده‌های تاریخی و تولیدی (پیش‌بینی شده) تعیین گردید. همچنین اثرات ناشی از تغییرات اقلیمی بر مشخصه‌های خشکسالی نیز بررسی گردید. برای این منظور با استفاده از مدل LARS-WG فرآیند تولید داده‌های آب و هوایی به سه اقدام مجزا به شرح زیر می‌تواند تقسیم شود: ۱) آنالیز داده‌ها (Analysis): تنظیم کردن مدل، آنالیز داده‌های آب و هوایی مشاهداتی برای تعیین مشخصات آماری آنها؛ ۲) آزمون و ارزیابی (Q Test): تصدیق مدل، اگر بین مشخصات آماری مشاهداتی و اطلاعات آب و هوایی تولید شده توسط برنامه تفاوت



شکل ۲. الگوریتم مراحل مختلف تحقیق

نشان دهد و برای مقیاس‌های مختلف نتایج متناقضی را ارائه می‌دهد، با عنوان شاخص بارش اصلاحی

$$X_w^{month}(g) = X_w(12(g-1)+1) = X_w(t) \quad (1)$$

که در آن، g شاخص سال و m شاخص ماه و برابر ۱ (ژانویه)، ۲ (فوریه)، ۱۲ (دسامبر) و t شاخص زمان و برابر $t=12(g-1)+m$ می‌باشد. از این رو با برآزش توزیع‌های جداگانه برای هر گروه یعنی $u_w^m = F_{x_w^m}(X_w^m), w=1,2,\dots,12, m=1(Jan)\dots 12(jan)$ ، SPI^{mod} می‌تواند با تبدیل u_w^m به متغیر نرمال استاندارد به صورت رابطه (۲) محاسبه شود:

$$SPI^{mod} = SPI_w^m = \varphi^{-1}(u_w^m) \quad (2)$$

که در آن، $\varphi^{-1}(u_w^m)$ تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک است. بر طبق تعریف مکی (Mckee et al., 1993) یک دوره خشکی زمانی که مقدار SPI (به‌طور مشابه برای شاخص SPI^{mod}) به‌طور مداوم منفی و مقدار آن مساوی یا کمتر از -۱ باشد، آغاز می‌شود (بطوریکه محدوده صفر تا -۰/۹۹-

نشان دهد و برای مقیاس‌های مختلف نتایج متناقضی را ارائه می‌دهد، با عنوان شاخص بارش اصلاحی SPI^{mod} ارائه شد. اگر X_w نشان دهنده کل بارش در خلال یک بازه زمانی W ماهه باشد، با برآزش توزیع گامای دو پارامتری به سری زمانی X_w ، تابع توزیع تراکمی یا CDF حاشیه‌ای $u_w = F_{X_w}(x_w)$ به دست می‌آید. سپس شاخص SPI نظیر هر مشاهده با تابع معکوس نرمال یا $\varphi^{-1}(u_w)$ محاسبه می‌شود. با اینکه روش محاسبه SPI از نظر ظاهری، منطقی به نظر می‌رسد، با این حال ایراداتی نیز دارد. برای نمونه، شاخص SPI در رژیم سالانه بارش نمی‌تواند تغییرات فصلی را محاسبه کند. از این رو کائو و گویندراجو پیشنهاد دادند که بارش جمع شده برای پنجره زمانی معین $X_w(t)$ بر اساس ماه پایانی گروه‌بندی شود. بنابراین، در شاخص بارش استاندارد شده اصلاحی (SPI^{mod})، $X_w(t)$ به $X_w^m(y)$ تغییر پیدا می‌کند که m نشان‌دهنده ماه پایانی پنجره زمانی w است

بازگشت توأم، احتمال توأم (عکس دوره بازگشت)، دوره بازگشت کندال روابط (۸) تا (۱۰). لازم به ذکر است با توجه به محدودیت صفحات از ذکر جزئیات صرف نظر گردید.

$$r = \frac{E[(X - \bar{x})(Y - \bar{y})]}{\text{Std}[X]\text{Std}[Y]} \quad (5)$$

$$\tau = P[(x_i - x_{i+1})(y_i - y_{i+1}) > 0] - P[(x_i - x_{i+1})(y_i - y_{i+1}) < 0] \quad (6)$$

$$\rho = 1 - \frac{6d_i^2}{n(n^2 - 1)}, d_i = x_i - y_i \quad (7)$$

$$T_{XY} = \frac{E(L)}{P(X > x \text{ or } Y > y)} = \frac{E(L)}{1 - F_{X,Y}(x, y)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (8)$$

$$T'_{XY} = \frac{E(L)}{P(X > x \text{ and } Y > y)} = \frac{E(L)}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + F_{X,Y}(x, y)} \quad (9)$$

$$T_p = \frac{E(L)}{1 - K_C(t)} = \frac{E(L)}{1 - P\{u \in I^d : C(u) \leq t\}} \quad (10)$$

در رابطه (۴)، \bar{y} و \bar{x} به ترتیب میانگین متغیرهای X و Y می‌باشند و $E[.]$ امید ریاضی و $\text{Std}[.]$ انحراف معیار پیشامدها می‌باشند. در رابطه (۵)، n تعداد نمونه و d_i تفاضل بین (x_j, y_j) می‌باشد و در رابطه (۶) دو جفت (x_i, y_i) و (x_j, y_j) زمانی همگام به حساب می‌آیند که $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$ باشد و زمانی ناهمگام محسوب می‌شوند که $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$ باشد. در حالتی که حاصل ضرب مذکور برابر صفر باشد، دو جفت نه همگام هستند و نه ناهمگام محسوب می‌شوند (Nelsen, 2006). رابطه (۷) دوره بازگشت در حالت «و» و رابطه (۸) دوره بازگشت در حالت «یا» می‌باشد؛ که در آنها مقدار مشاهده شده از x یا از y تجاوز نموده باشد (یعنی، $X > x$ یا $Y > y$) می‌باشد و همچنین $F_X(x)$ و $F_Y(y)$ به

بر اساس این طبقه‌بندی محدوده خشکسالی ملایم تعریف می‌شود. این دوره، زمانی که SPI (یا SPI^{mod}) به مقادیر مثبت برگردد، تمام می‌شود. شدت خشکسالی برابر مقادیر تجمعی SPI (یا SPI^{mod}) رابطه (۳)، در طول مدت یک رویداد خشکسالی در نظر گرفته می‌شود.

$$S = -\sum_{j=1}^D SPI_{ij} \text{ or } SPI_{ij}^{mod} \quad (3)$$

که در آن، D مدت خشکسالی و S شدت خشکسالی می‌باشند. Z برای هر مقیاس زمانی i ماهه با اولین ماه خشکسالی آغاز می‌شود و تا ماه پایانی خشکسالی یا به اندازه تداوم خشکسالی ادامه می‌یابد.

تئوری توابع مفصل^۱

تئوری این توابع برای اولین بار توسط اسکالار (Sklar, 1959) ارائه گردید. توابع مفصل توابعی هستند که توابع توزیع حاشیه‌ای تک متغیره را برای متغیرها برآزش داده سپس تشکیل یک تابع توزیع چندمتغیره، به هم پیوند می‌دهد (Nelsen, 2006). فرض کنید X و Y دو متغیر تصادفی همبسته باشند. به عنوان مثال شدت و مدت خشکسالی (یا هر جفت مشخصاتی دیگر) در این صورت توابع توزیع حاشیه‌ای برآزش یافته بر دو متغیر تصادفی X و Y با تابع توزیع دومتغیره F_{XY} و توابع توزیع حاشیه‌ای آنها F_X و F_Y آنگاه تابع مفصل دومتغیره به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$F_{XY}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) = C(x, y) \quad (4)$$

که در آن، x و y به ترتیب مشخصه‌هایی هستند که توابع مفصل بر آنها برآزش داده می‌شود. در این تحقیق به منظور تحلیل چند متغیره خشکسالی مواردی که جهت تحلیل چند متغیره بکار برده می‌شوند عبارتند از: ضرایب همبستگی پیرسون، تاوکندال^۲ و اسپیرمن (Nelsen, 2006)، روابط (Khani Tamaleh et al., 2020) (۵) تا (۷)، دوره

^۱ Copula Functions

^۲ Kendall tau

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [C_{pi} - C_{ei}]^2} \quad (13)$$

که در آنها، n اندازه نمونه، C_p مقادیر محاسبه شده مفصل پارامتری، C_e مقادیر مشاهداتی احتمال به دست آمده از مفصل تجربی، \bar{C}_e میانگین مقادیر مشاهداتی احتمال به دست آمده از مفصل تجربی، $\ln ML$ مقدار بیشینه تابع لگاریتم درستنمایی و k تعداد پارامترهای برازش داده شده می باشند در جدول (۲) رابطه چند نمونه از توابع مفصل ارشمیدسی بکار گرفته در تحقیق ارائه شده است (Schwarz, 1978, Nash and Sutcliffe, 1970).

ترتیب توابع توزیع حاشیه ای شدت و مدت خشکسالی و رابطه (۹) $E(L)$ میانگین زمان بین آغاز دو خشکسالی متوالی Kc یک معیار احتمالاتی تجمعی است که بر اساس مولد توابع مفصل محاسبه می گردد. در ادامه جهت تعیین تابع مفصل برتر از معیارهای نکوئی برازش از معیارهای آکائیکه (۱۱) (AIC)، نش - ساتکلیف (۱۲) (NSE) و میانگین مربعات خطا (۱۳) (RMSE) به استناد مطالعات صورت گرفته استفاده شد (Shiau, 2006, Nelsen, 2006, Khani Tamaleh et al., 2020)

$$AIC = -2 \ln ML + 2k \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_{pi} - C_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n (C_{ei} - \bar{C}_e)^2} \quad (12)$$

جدول ۲. روابط توابع مفصل ارشمیدسی

دامنه پارامتر	C(u,v)	تابع مفصل
$\theta \geq 1$	$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}\}$	گامبل-هوگارد
$\theta \geq 0$	$C(u, v) = uv \exp\left\{\left[(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta}\right]^{\frac{1}{\theta}}\right\}$	گلامبوس
$\theta \neq 0$	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right]$	فرانک
$\theta \geq 0$	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	کلایتون
$\theta \geq 0$	$C(u, v) = \frac{1}{2} \frac{1}{\theta - 1} \left\{ \left[1 + (\theta - 1)(u + v) - \left[(1 + (\theta - 1)(u + v))^2 - 4\theta(\theta - 1)uv \right]^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$	پلاکت
$-1 \leq \theta \leq 1$	$C(u, v) = uv [1 + \theta(1 - u)(1 - v)]$	فارلی - گامبل - مورگنسترن
$\theta \geq 0$	$C(u, v) = 1 - \left[(1 - u)^\theta + (1 - v)^\theta - ((1 - u)(1 - v))^\theta \right]^{\frac{1}{\theta}}$	جوئی Joe
$-1 \leq \theta \leq 1$	$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1 - u)(1 - v)}$	علی میخائیل حق

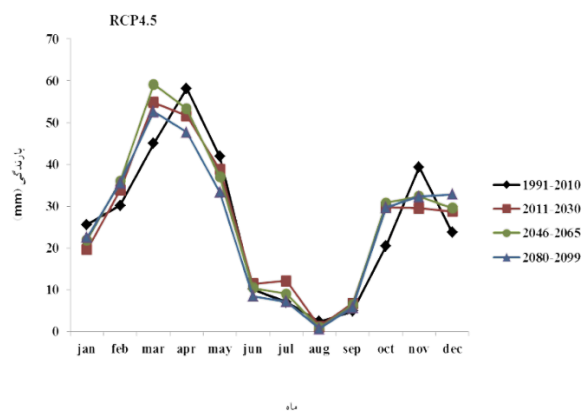
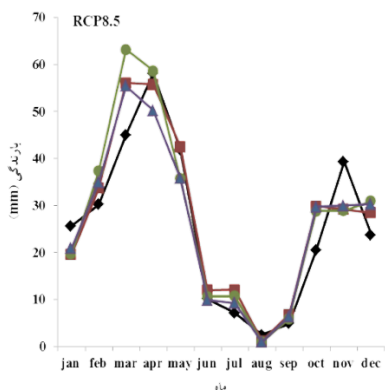
(Nelsen, 2006)

نتایج و بحث

تغییرات بارش و دما در دوره‌های آتی

برای تجزیه و تحلیل تغییر اقلیم و تأثیر آن بر خشکسالی‌های حوضه دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی، لازم است عامل بارش و دما در ایستگاه‌های منتخب مورد بررسی قرار گیرد. در ابتدا نتایج حاصل از همگنی داده‌های بارش و دما که جهت بررسی تحلیل‌های هواشناسی و هیدرولوژی می‌باشد بررسی گردید، نتایج حاصل نشان داد که با ضریب تبیین ۰/۹۹۵ و بالاتر داده‌های مورد استفاده از همگنی و همچنین ایستایی لازم برخوردار دارند. در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده از مدل اقلیمی NorESM1-M برای ایستگاه تبریز تحت سناریو RCP8.5 با استفاده در دوره نزدیک ۶/۱۲ میلی‌متر افزایش بارش نسبت به دوره تاریخی مشاهده گردید و در دوره متوسط این مقدار به ۱۳/۷۳ میلی‌متر رسید و در دوره دور با کاهش ۳/۵۶ میلی‌متر نسبت به دوره تاریخی مواجه شدیم. به طوری که تحت سناریو RCP4.5 این روند تغییرات به ترتیب دوره به ۰/۶۲ میلی‌متر کاهش و ۱۰/۲۹ و ۱۳/۳۰ میلی‌متر افزایش نسبت به دوره تاریخی (متوسط ۳۵۰ میلی‌متر) مشاهده می‌گردد. این افزایش‌ها در هر سه دوره برای ماه‌های ژانویه تا مارس پیش‌بینی می‌شود. برای ایستگاه سراب با سناریو RCP8.5 در دو دوره نزدیک و متوسط ۵/۷۷ و ۳/۲۴ میلی‌متر افزایش و در دوره دور ۱۱/۶۰ میلی‌متر کاهش نسبت به دوره تاریخی مشاهده

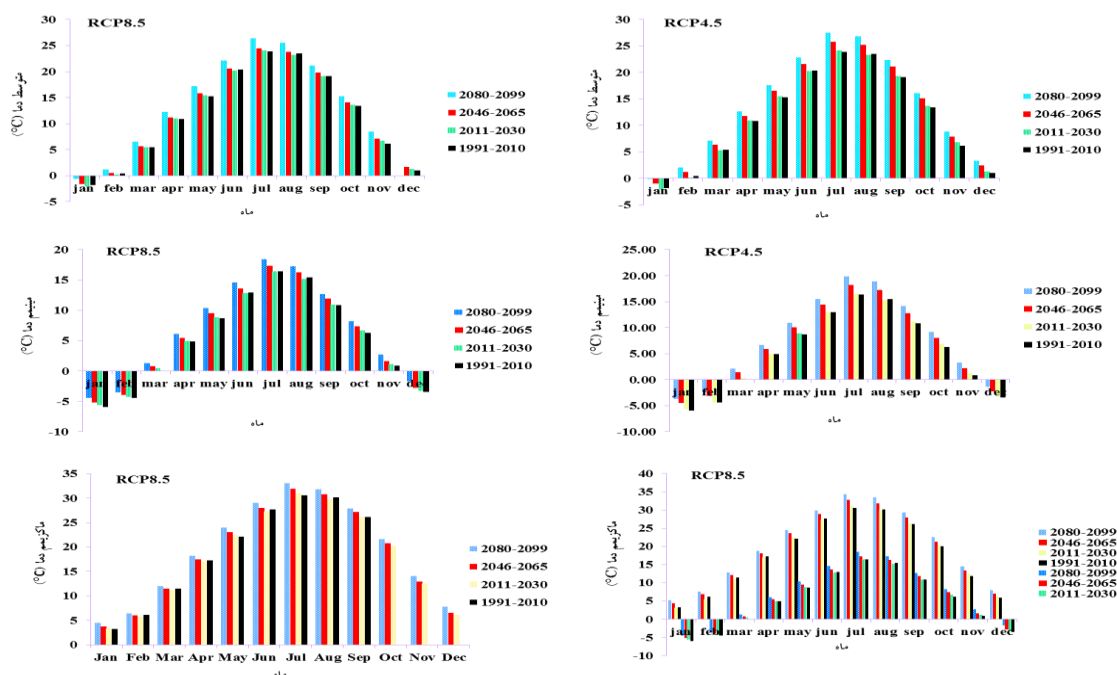
گردید. با در نظر گرفتن سناریو RCP4.5 به ترتیب ۴/۰۸، ۸/۰۹ افزایش و ۲/۰۵ کاهش مشاهده گردید. افزایش بارش صورت گرفته همانند ایستگاه تبریز برای ماه‌های ژانویه تا مارس اتفاق می‌افتد. تغییراتی که در ایستگاه مراغه مشاهده گردید، تحت سناریو RCP8.5 به ترتیب ۴۹/۲۶، ۵۳/۲۵، ۴۱/۴۲ میلی‌متر افزایش نسبت به دوره تاریخی (مقیاس سالانه) (در مقیاس ماهانه به ترتیب ۴/۱۰، ۴/۴۳ و ۳/۴۵ میلی‌متر) می‌باشد و تحت سناریو RCP4.5 به ترتیب ۴۵/۷۱، ۴۵/۲۳، ۵۰/۰۴ میلی‌متر افزایش نسبت به دوره تاریخی می‌باشد (مقیاس سالانه) (در مقیاس ماهانه به ترتیب ۳/۸۰، ۳/۷۶ و ۴/۱۷ میلی‌متر). در ایستگاه ارومیه در ماه‌های اکتبر تا دسامبر برخلاف شش ایستگاه مذکور کاهش بارش صورت می‌گیرد. افزایش بارش ایستگاه‌های تبریز، ارومیه، سراب تحت هر دو سناریو برای سه دوره نزدیک و متوسط و دور خیلی چشمگیر نبوده است. به طوری که این افزایش برای ایستگاه‌های تکاب و مهاباد قابل تأمل بوده و در ماه‌های ژانویه تا مارس و از سپتامبر تا دسامبر می‌باشد. این افزایش تحت سناریو RCP8.5 دوره متوسط بیشتر از دوره نزدیک و دوره نزدیک بیشتر از دوره دور می‌باشد و همچنین تحت سناریو RCP4.5 این روند صعودی در دوره سوم بیشتر از دوره دوم و دوره دوم بیشتر از دوره اول می‌باشد شکل (۳) تغییرات بارندگی را برای ایستگاه



شکل ۳. نمودار بارش مشاهداتی و پیش‌بینی شده ایستگاه ارومیه برای داده‌های تاریخی سه سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای سه افق نزدیک، میانی و دور

سانتی‌گراد افزایش و در دوره (۲۰۴۶-۲۰۶۵) ۱/۳۴ درجه سانتی‌گراد افزایش و در دوره (۲۰۸۰-۲۰۹۹) ۲/۴۲ درجه سانتی‌گراد افزایش نسبت به دوره تاریخی مشاهده گردید. به طوری که این افزایش دما تحت سناریو RCP4.5 به ترتیب ۰/۱۱، ۲/۵۴، ۰/۹۵ خواهیم داشت. در ایستگاه ارومیه این روند تغییرات تحت سناریو RCP8.5 در سه دوره به ترتیب ۰/۱۸، ۱/۴۹، ۲/۵۵ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریو RCP4.5، ۰/۱۹، ۱/۰۵، ۲/۶۷ درجه سانتی‌گراد افزایش نسبت به دوره تاریخی می‌باشد. پس با توجه به ایستگاه‌های منتخب در حوضه دریاچه ارومیه دمای حداقل تحت سناریو RCP8.5 برای دوره نزدیک ۰/۱۴ درجه سانتی‌گراد و برای دوره متوسط ۱/۴۳ درجه سانتی‌گراد و برای دوره دور ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت. در حالی که این روند افزایش دمای حداقل تحت سناریو RCP4.5 برای دوره‌ها به ترتیب ۰/۱۵، ۱، ۲/۶۱ سانتی‌گراد می‌باشد و برای ایستگاه‌های مهاباد و تکاب و مراغه افزایش دمای حداقل برای افق دور تحت سناریو RCP4.5 پررنگ‌تر از افق‌های دیگر است. ایستگاه سراب بیشتر از سایر ایستگاه‌های مذکور دچار این

ارومیه برای دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۰) و برای داده‌های پیش‌بینی تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 را نشان می‌دهد. برای سناریوهای مختلف بهترین سناریو برای مطالعات بارش سناریو RCP4.5 با ضریب همبستگی ۰/۷۶۳ شناخته شد. همان‌طور که قبلاً بیان شد یکی از مهم‌ترین عوامل که در آینده دچار تغییرات چشمگیری خواهد بود عامل دما می‌باشد، از این‌رو در این پژوهش به بررسی تغییر دمای حداقل و دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. پس از بررسی کیفیت مدل در شبیه‌سازی دوره پایه، اقدام به تولید داده‌های شبیه‌سازی شده، برای دوره‌های آتی در سه افق نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰)، افق متوسط (۲۰۳۰-۲۰۴۶) و افق دور (۲۰۴۶-۲۰۹۹) شد. داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره‌های زمانی آتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۰) ایستگاه‌های منتخب ارومیه نمودار شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای فوق در ایستگاه‌های منتخب تغییرات دمای حداقل در سه دوره نسبت به دوره تاریخی تحت دو سناریو اقلیمی سیر صعودی به خود داشته است. در ایستگاه تبریز تحت سناریو RCP8.5 در دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۰)، ۰/۰۹ درجه



شکل ۴. نمودار دمای متوسط، مینیمم و ماکزیمم داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده ایستگاه ارومیه،

برای سه سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای سه افق نزدیک، میانی و دور

موضوع مؤید این مطلب است که حداقل در آینده انتظار رخداد خشکسالی‌هایی در سطح داده‌های تاریخی وجود دارد. به‌عنوان مثال ضریب آلفا برای داده‌های تاریخی ۱/۱۵۰؛ و برای داده‌های پیش‌بینی افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱) برای سناریوی مذکور این مقدار به ترتیب ۱/۱۵۰، ۱/۱۳۵ و ۱/۱۴۵ به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت چندانی بین این ضرایب در داده‌های تاریخی با پیش‌بینی وجود ندارد. چرا که این ضرایب نشأت گرفته از محاسبات ناشی از داده‌های بارندگی می‌باشند؛ که تغییرات در این مقادیر ولو در سطح کم خود نشان‌دهنده وجود تغییرات اقلیمی بر میزان بارندگی، دما و به‌تبع آن خشکسالی‌ها در دوره‌های آتی خواهد بود. نتایج حاصل از ضریب نش-ساتکلیف جهت بررسی تحلیل چند متغیره برای تمامی ایستگاه‌ها و برای تمامی داده‌های تاریخی و پیش‌بینی مقدار ۰/۹۹۸ به دست آمد که این موضوع به‌نوبه خود اولاً مؤید عملکرد توابع مفصل در تحلیل می‌باشد، ثانیاً از آنجائی که احتمال رخ دادن وقایعی مشابه داده‌های تاریخی یا مقادیر بیشتر یا کمتر از آنها در دوره‌های آتی وجود دارد نتایج این بخش نیز مؤید عملکرد مناسب نرم‌افزار LARS-WG در پیش‌بینی‌های تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشد. در ادامه در این مطالعه به‌منظور تخمین پارامتر وابستگی مفصل (θ) از روش پارامتری IFM استفاده شد. دلیل استفاده از این روش سادگی، دقت قابل قبول و متداول بودن آن بود. این روش شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله نخست توزیع‌های حاشیه‌ای بر سری‌های مدت و شدت خشکسالی برآزش داده شده و پارامترهای آنها با روش حداکثر درستنمایی برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده تحت تأثیر تغییر اقلیم و سناریوهای بکار رفته، تخمین زده شدند جدول (۳). در مرحله بعد با جاگذاری پارامترهای توزیع‌های حاشیه‌ای در تابع لگاریتم حداکثر درستنمایی مفصل این تابع بیشینه شد تا پارامتر وابستگی مفصل (θ) به دست آید. مقادیر تابع لگاریتم حداکثر درستنمایی و پارامتر وابستگی برای مفصل‌های مختلف در ایستگاه‌های

تحولات افزایش دما بخصوص در افق دور خواهد بود. سناریو RCP4.5 برای تمامی ایستگاه حالت بحرانی‌تری را نشان می‌دهد. با توجه به مطالب فوق می‌توان چنین بیان داشت که دمای ماکزیمم حوضه دریاچه‌ی ارومیه رو به افزایش است به‌طوری‌که این افزایش دما در دوره سوم روند تندی را به خود می‌گیرد. با افزایش دمای مینیمم و ماکزیمم ایستگاه‌های منتخب دریاچه ارومیه، دمای متوسط این حوضه مهم نیز رو به افزایش خواهد گذاشت. نتایج حاصل نشان داد که برای دما سناریوی RCP8.5 با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ به‌عنوان سناریوی برتر جهت پیش‌بینی و مطالعات اقلیمی شناخته شد.

بررسی روابط همبستگی، معیارهای نکوئی برآزش با استفاده از شاخص SPImod با رویکرد تغییر اقلیم

در این قسمت از تحقیق به بررسی مشخصه‌های خشکسالی با استفاده از شاخص SPI^{mod} برای داده‌های تاریخی و داده‌های پیش‌بینی شده با رویکرد تغییر اقلیم با استفاده از سه سناریو RCP4.5، RCP8.5 در حوضه دریاچه ارومیه پرداخته شد. سپس پارامترهای توابع توزیع برآزش یافته بر مشخصه‌های خشکسالی استخراج گردید و به بررسی همبستگی بین مشخصه‌ها با سه معیار ضریب همبستگی پیرسون، τ کندال و ρ اسپیرمن پرداخته شد. سپس جهت تعیین توابع مفصل از معیارهای نکوئی برآزش استفاده گردید. نتایج حاصل از این قسمت در جداول (۳) تا (۴) آورده شده است. نتایج به دست آمده از ضرایب توزیع‌های برآزش یافته رایج در هیدرولوژی (توزیع‌های نمایی، گاما، بتا، تابع معکوس گوسی، تابع معکوس گوسی سه پارامتری، توزیع پارتو، توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته، توزیع پیرسون، نرمال، لوگ نرمال، لوگ پیرسون تیپ سه، ویبول، ویبول سه پارامتره، تابع گامای سه، پارمتره، لوگ لجستیک تعمیم‌یافته، نرمال تعمیم‌یافته، پارتوی تعمیم‌یافته و گامبل با استفاده از آمون کولموگروف اسمیر نوف (K-S) برای دوره‌های تاریخی و پیش‌بینی غالباً باهم اختلاف معناداری ندارند که این

مفصل برابر یک بدست آمد. همچنین نتایج حاصل از حداکثر درست نمایی تابع مفصل برتر نشان می‌دهد که این مقدار برای افق متوسط (۲۰۴۶-۲۰۶۵) و افق دور (۲۰۸۰-۲۰۹۹) بمراتب بیشتر از افق نزدیک و داده‌های تاریخی بوده است. نتایج حاصل از حداکثر درست نمایی مشابه سایر موارد بررسی شده حاکی از وجود تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی می‌باشد. نتایج حاصل از ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که بالاترین میزان همبستگی مربوط به ضریب همبستگی پیرسون و ضرایب همبستگی اسپیرمن و کندال در مراتب بعدی قرار دارند. از آنجائی که شرط استفاده از توابع مفصل وجود همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی می‌باشد، نتایج حاصل از ضرایب همبستگی مؤید این مطلب می‌باشد، همچنین نتایج حاصل از ضرایب همبستگی و تفاوت در مقادیر آنها در داده‌های تاریخی با افق‌های نزدیک، متوسط و دور خود ناشی از تغییر اقلیم در دوره‌های آتی می‌باشد و همچنین میزان وابستگی بین متغیرها در افق‌های پیش‌بینی شده به نسبت بیشتر از داده‌های تاریخی می‌باشد که این امر نیز صحت استفاده از توابع مفصل با رویکرد تغییر اقلیم را تأیید می‌کند، در پایان نتایج حاصل از مقیاس‌های مختلف سری زمانی خشکسالی‌ها در دوره‌های تاریخی و پیش‌بینی نشان داد که در هر دوره شاهد ۴۶ تا ۴۸ درصد تعداد ماه‌های خشک در طی دوره‌های مذکور خواهیم بود.

مورد مطالعه در جداول مذکور آورده شده است. در نهایت، با مقایسه نتایج هر کدام از مفصل‌ها با نتایج حاصل از احتمال تجربی، مفصل مناسب برای داده‌های مورد نظر انتخاب گردید. در این مطالعه، برای آزمون نیکویی برازش از دو روش استفاده شد. روش اول مقادیر ناپارامتری مفصل تجربی با مقادیر مفصل‌های پارامتری مقایسه گردید و هر مفصلی که مقادیر آن به مقادیر مفصل تجربی نزدیک تر بود، به عنوان مفصل مناسب انتخاب گردید. برای تعیین میزان نزدیکی مقادیر مفصل‌ها با مقدار ناپارامتری آن از معیارهای RMSE, NSE و AIC استفاده شد. لازم ذکر است که در بسیاری از مطالعات معیار انتخاب مفصل مناسب مقدار لگاریتم تابع حداکثر درست‌نمایی می‌باشد، بدین صورت که فرض می‌شود هر مفصلی که لگاریتم تابع درست‌نمایی بزرگتری داشته باشد، برازش بهتری بر داده‌های مشاهداتی داشته است (Shiau et al., 2007; Ayantobo et al., 2019; Khani Tamaleh et al., 2020). مقادیر تابع حداکثر درست‌نمایی، RMSE, NSE و AIC برای مفصل‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول مذکور آورده شده است. نتایج حاصل از معیارهای نکویی برازش نشان داد که تابع مفصل برتر بر داده‌های تاریخی برازش داده شده و بر داده‌های پیش‌بینی برازش داده شده تابع مفصل جوئی می‌باشد که برای غالب ایستگاه‌ها مقدار پارامتر بهینه تابع

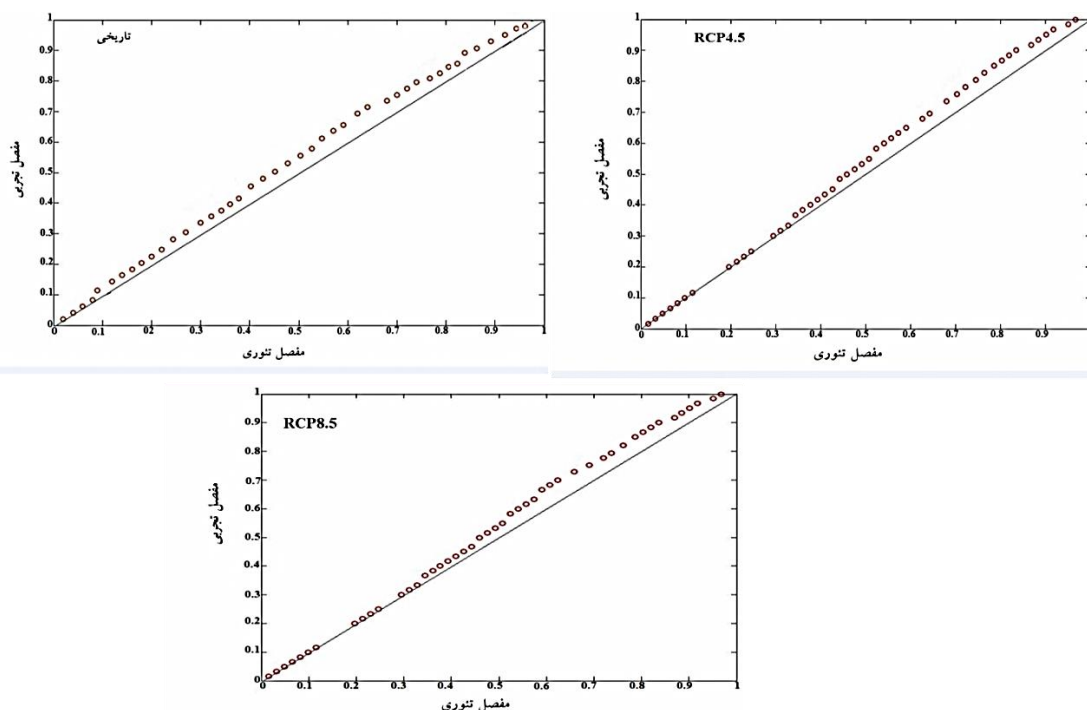
جدول ۳. بررسی پارامترهای توابع توزیع برتر، ضرایب همبستگی و معیارهای نکویی برازش داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده بر اساس سناریوها

Period	1991-2010		2011-2030		2046-2065		2080-2099	
	Historical	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	
Mahabad								
Alfa	0.771	0.958	1.009	1.012	1.019	0.961	0.970	
Beta	1.662	1.442	1.349	1.344	1.337	1.384	1.405	
Lambda	1.944	1.793	1.873	1.891	1.909	1.875	1.909	
R	0.730	0.772	0.806	0.778	0.772	0.776	0.771	
Rspearman	0.610	0.524	0.490	0.490	0.493	0.495	0.485	
Tkendalj	0.509	0.429	0.360	0.360	0.360	0.365	0.352	
Max Likelihood	74.746	74.575	79.103	79.741	80.518	79.393	80.456	
AIC	0.253	0.255	0.204	0.197	0.188	0.200	0.189	
NSE	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	
teta_optimized	1	1	1	1	1	1	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	
Maragheh								
Alfa	0.816	1.154	1.023	0.935	0.916	0.901	0.998	
Beta	1.759	0.973	1.072	1.390	1.422	1.417	1.445	
Lambda	1.926	1.679	1.632	1.745	1.745	1.692	1.830	
R	0.831	0.748	0.772	0.788	0.789	0.770	0.724	
Rspearman	0.573	0.521	0.504	0.564	0.564	0.556	0.573	
Tkendalj	0.506	0.449	0.459	0.478	0.480	0.468	0.261	
Max Likelihood	80.368	63.777	62.017	67.029	67.070	65.996	76.511	
AIC	0.190	0.391	0.415	0.347	0.347	0.361	0.233	

Period	1991-2010		2011-2030		2046-2065		2080-2099	
	Historical	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	
Mahabad								
NSE	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	
teta_optimized	1	1	1	1	1	1	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	
Alfa	1.490	1.138	1.170	1.211	1.183	1.190	1.369	
Beta	1.094	1.467	1.321	1.301	1.325	1.291	1.163	
Lambda	1.817	2.039	1.927	1.963	2.000	1.964	1.887	
R	0.809	0.768	0.855	0.859	0.819	0.877	0.835	
Rspearman	0.557	0.659	0.613	0.636	0.647	0.638	0.619	
Tkendalj	0.482	0.543	0.508	0.525	0.531	0.532	0.507	
Max Likelihood	92.311	89.422	86.272	86.531	89.209	90.751	82.896	
AIC	0.069	0.097	0.128	0.126	0.099	0.084	0.163	
NSE	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	
teta_optimized	1	1	1.0001	1	1	2.4964	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	
Tabriz								
Alfa	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5	
Alfa	1.358	1.290	1.353	0.904	1.413	1.629	1.196	
Beta	1.042	1.007	1.282	1.739	1.270	1.075	1.251	
Lambda	1.946	1.638	2.019	1.982	2.151	1.930	1.810	
R	0.571	0.749	0.809	0.816	0.882	0.793	0.753	
Rspearman	0.518	0.433	0.673	0.575	0.625	0.486	0.501	
Tkendalj	0.376	0.388	0.549	0.506	0.491	0.403	0.418	
Max Likelihood	85.294	72.426	89.326	90.551	94.843	93.270	86.223	
AIC	0.138	0.280	0.098	0.086	0.046	0.061	0.129	
NSE	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	
teta_optimized	1	1	1.0001	1	1	1	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	
Tekab								
Alfa	Historical	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP8.5	0.843	
Alfa	1.097	0.913	0.917	0.843	1.046	1.046	1.847	
Beta	1.335	1.661	1.626	1.847	1.460	1.460	1.893	
Lambda	1.873	1.909	1.857	1.893	1.891	1.891	0.838	
R	0.699	0.828	0.790	0.838	0.748	0.748	0.580	
Rspearman	0.550	0.593	0.584	0.580	0.579	0.579	0.579	
Tkendalj	0.407	0.470	0.461	0.466	0.450	0.450	0.466	
Max Likelihood	84.326	85.761	85.205	87.793	86.283	86.283	87.793	
AIC	0.148	0.133	0.139	0.113	0.128	0.128	0.128	
NSE	0.991	0.991	0.991	0.991	0.991	0.991	0.991	
teta_optimized	1	1.0001	1	1	1	1	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	
Urmia								
Alfa	Historical	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5	RCP4.5	
Alfa	1.505	1.150	1.510	1.145	1.046	1.105	0.843	
Beta	0.968	1.166	0.986	1.172	1.460	1.157	1.847	
Lambda	1.857	1.583	1.842	1.583	1.891	1.557	1.893	
R	0.620	0.744	0.674	0.745	0.748	0.707	0.838	
Rspearman	0.542	0.413	0.529	0.414	0.579	0.389	0.580	
Tkendalj	0.422	0.408	0.388	0.411	0.450	0.369	0.466	
Max Likelihood	72.729	75.424	84.409	75.446	86.283	73.354	87.793	
AIC	0.277	0.245	0.147	0.245	0.128	0.269	0.113	
NSE	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	
teta_optimized	1	1	1	1	1	1	1	
Best Copula Function	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	Joe	

در ادامه مقادیر مفصل تئوری و تجربی برازش داده‌شده بر داده‌های شدت و مدت خشکسالی برای ایستگاه ارومیه در شکل‌های (۵) برای دو سناریو نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود نقاط به خط ۴۵ درجه بسیار نزدیک می‌باشند که این نشان می‌دهد مقادیر مفصل جوئی برازش داده‌شده از تطابق قابل قبولی با مقادیر به دست آمده از مفصل تجربی برخوردارند این موضوع برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده تحت سناریوهای مورد مطالعه صدق می‌کند.

ارزیابی احتمالات توأم - پس از تعیین تابع مفصل مناسب و تعیین پارامتر وابستگی مفصل و همچنین پس از تعیین توابع توزیع

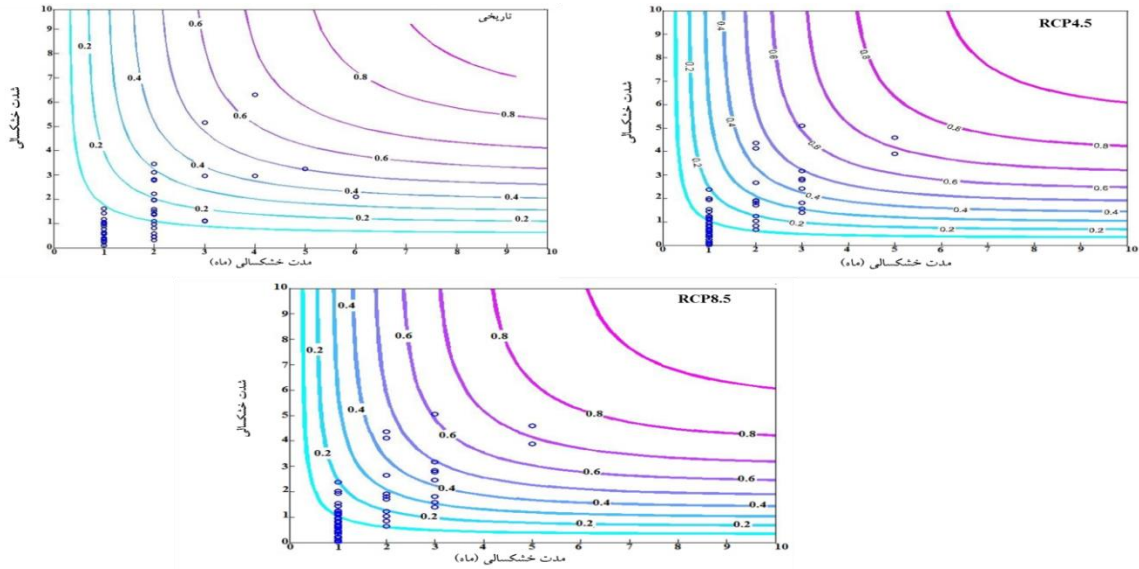


شکل ۵. مقادیر مفصل تجربی در برابر مفصل تئوری جوئی برازش داده شده بر داده‌های شدت و مدت خشکسالی ایستگاه ارومیه برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)

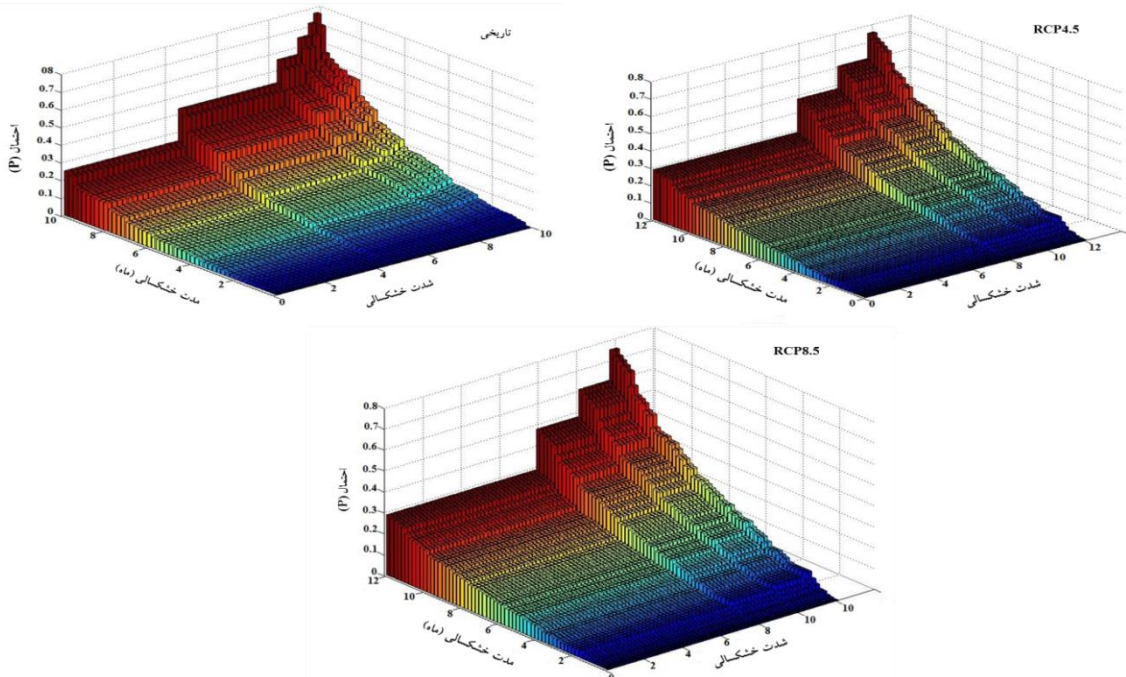
مفیدی در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان جهت بهبود مدیریت منابع آبی تحت شرایط خشک‌سالی می‌گذارد. برای مثال، در شکل (۶) برای داده‌های تاریخی احتمال وقوع خشکسالی با مدت بیش از شش ماه ($D_d > 6$) و شدت بزرگ‌تر از چهار ($D_s > 4$) در ایستگاه ارومیه حدود ۰/۵ می‌باشد درحالی‌که برای دو سناریو RCP8.5، RCP4.5 برای افق نزدیک این میزان شدت و مدت دارای احتمال وقوع بیشتر از ۰/۶ و برای افق میانی برای بیشتر از ۰/۷ و برای افق دور همین مقادیر دارای احتمال وقوع ۰/۵ می‌باشند (در این پژوهش یکی از افق‌ها به‌طور نمونه برای ایستگاه ارومیه در ادامه تحقیق ارائه شده است). در ادامه نمودار سه‌بعدی شدت، مدت و احتمال وقوع خشکسالی برای ایستگاه ارومیه برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج حاصل از احتمال توأم خشکسالی برای داده‌های تاریخی و مقایسه آن با داده‌های پیش‌بینی گواه بر این مدعاست که در دوره‌های آتی با تغییرات اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه مواجه خواهیم بود. از این‌رو آگاهی از احتمال وقوع رویدادهای

حاشیه‌ای برازش شده رایج در هیدرولوژی بر داده‌های شدت و مدت خشکسالی که در آنها توزیع‌های گاما و نمایی به ترتیب بر شدت و مدت خشکسالی به‌عنوان توابع توزیع برتر شناخته شدند. می‌توان با جایگذاری مقادیر توزیع تراکمی حاشیه‌های شدت و مدت خشک‌سالی در تابع مفصل منتخب، احتمالات توأم را محاسبه نمود. از آنجائی که ترکیبات مختلف مدت و شدت خشکسالی می‌تواند به‌احتمال یکسانی منجر شود، احتمالات توأم به‌وسیله خطوط کنتور نمایش داده می‌شوند. نمودار کنتور احتمالات توأم شدت و مدت خشکسالی‌های ایستگاه ارومیه، برای داده‌های تاریخی در شکل (۶) و برای داده‌های پیش‌بینی شده با رویکرد تغییر اقلیم برای سه سناریو RCP4.5، RCP8.5 برای سه افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)، افق میانی (۲۰۴۵-۲۰۴۶) و افق دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰) که با استفاده از مفصل‌های برتر رسم شده‌اند را به همراه مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهند. احتمال اینکه هر دوی شدت و مدت خشکسالی به‌طور هم‌زمان از سطوح آستانه معین بیشتر باشند، اطلاعات

خشکسالی با رویکرد تغییر اقلیم می‌تواند در حوزه‌های مختلف مدیریتی نظیر منابع آب، کشاورزی، زیست‌محیطی، برقایی، اقتصادی و اجتماعی و همچنین آمادگی در برابر خطرات مخرب ناشی از خشکسالی اطلاعات مفیدی را در اختیار برنامه ریزان حوزه‌های ذی‌ربط قرار دهد.



شکل ۶. نمودار کنتور احتمال توأم شدت و مدت خشکسالی‌های مشاهده شده در ایستگاه‌های ارومیه برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده در افق نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰)



شکل ۷. نمایش سه‌بعدی احتمال توأم شدت و مدت خشکسالی ایستگاه ارومیه بر اساس سناریوهای اقلیمی برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی در افق نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰)

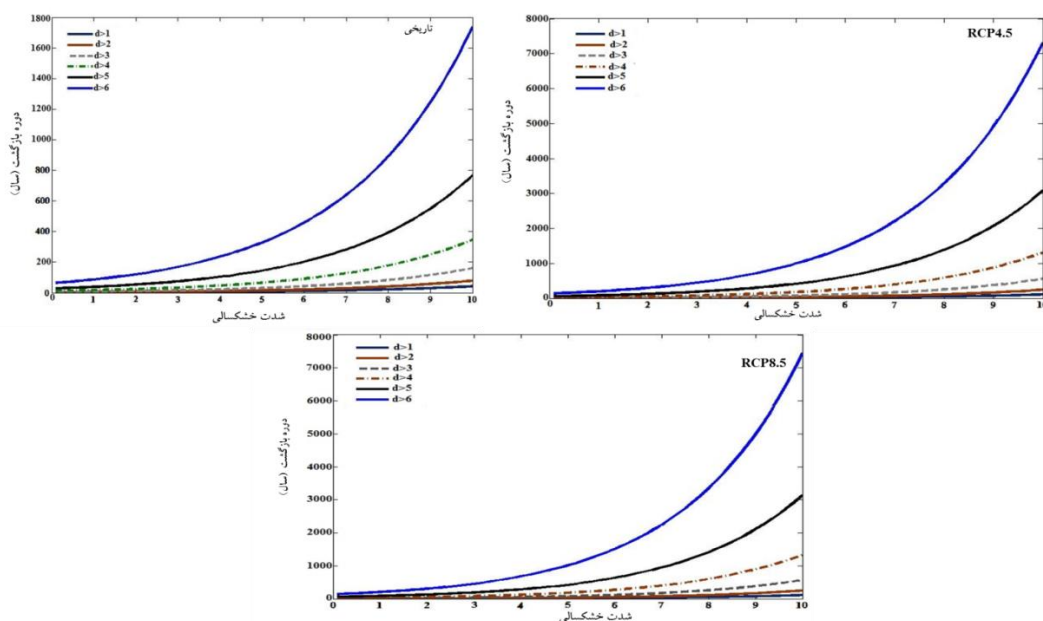
با افزایش مقادیر شدت و مدت خشک‌سالی دوره بازگشت‌ها نیز افزایش می‌یابد که این مورد در خصوص داده‌های تاریخی و پیش‌بینی صدق می‌کند. علاوه بر آگاهی و اطلاعات در سیستم‌های منابع آب و کشاورزی، این نمودارها در یک سیستم مرتعی و آبخیزداری قبل و بعد از احداث سیستم‌های پخش سیلاب نیز دارای کاربرد می‌باشند. همچنین اطلاعاتی مفید جهت ارزیابی ریسک خشک‌سالی و تحلیل آن در اختیار مدیران، مهندسان منابع آب قرار می‌دهند و می‌توانند معیارهای طراحی برای مخازن آبی و حوزه‌های مرتبط با آب مورد استفاده قرار گیرند. نتایج حاصل از این بخش نیز مؤید این مطلب است که در دوره‌های آتی با خشک‌سالی‌هایی مواجه خواهیم بود.

ارزیابی دوره بازگشت کندال

استفاده از تعریف دوره بازگشت استاندارد منتج به برآوردی کمتر از مقدار واقعی می‌گردد. جهت رفع این مسئله دوره بازگشت کندال بر اساس توابع توزیع کندال محاسبه شد. در این تحقیق جهت مقایسه دو دوره بازگشت استاندارد و کندال برای داده‌های تاریخی و

ارزیابی دوره بازگشت شرطی

در این بخش از تحقیق به بررسی و ارزیابی دوره بازگشت‌های شرطی برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده تحت سه سناریو RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته شد. در این حالت دوم دوره بازگشت شدت خشک‌سالی برای حالتی که مدت آن از یک حد آستانه مشخصی تخطی کند ($T_{S|D \geq d}$)، دوره‌های بازگشت توأم و شرطی مشخصات خشک‌سالی (شدت و مدت)، برای حالات مذکور ارائه شده است. به‌عنوان مثال اگر یک مخزن تأمین آب نتواند آب کافی را در شرایط خشک‌سالی برای ایستگاه ارومیه با شدت بیشتر از پنج ($D_s > 5$) و مدت بیشتر از چهار ماه ($D_d > 4$) تأمین نماید، در این صورت و برای این شرایط، دوره بازگشت برای داده‌های تاریخی زیر ۲۰۰ سال می‌باشد، در حالی که همین شدت و مدت برای سه سناریو در افق نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) برای سناریو RCP8.5 زیر ۱۰۰۰ سال و به‌طور مشابه برای سناریو RCP4.5 نیز چنین است شکل (۸)، برای افق متوسط (۲۰۴۶-۲۰۶۵) برای سناریو RCP8.5 این دوره بازگشت زیر ۲۰۰۰ سال برای سناریو RCP4.5 زیر ۵۰۰ می‌باشد؛ و برای افق دور (۲۰۸۰-۲۰۹۹) برای هر دو سناریو این مقدار زیر ۱۰۰ سال می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت



شکل ۸. دوره بازگشت شرطی شدت خشک‌سالی S برای حالت‌هایی که مدت خشک‌سالی از یک حد آستانه معین D بیشتر باشد، برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی شده در ایستگاه ارومیه با رویکرد تغییر اقلیم (۲۰۱۱-۲۰۳۰)

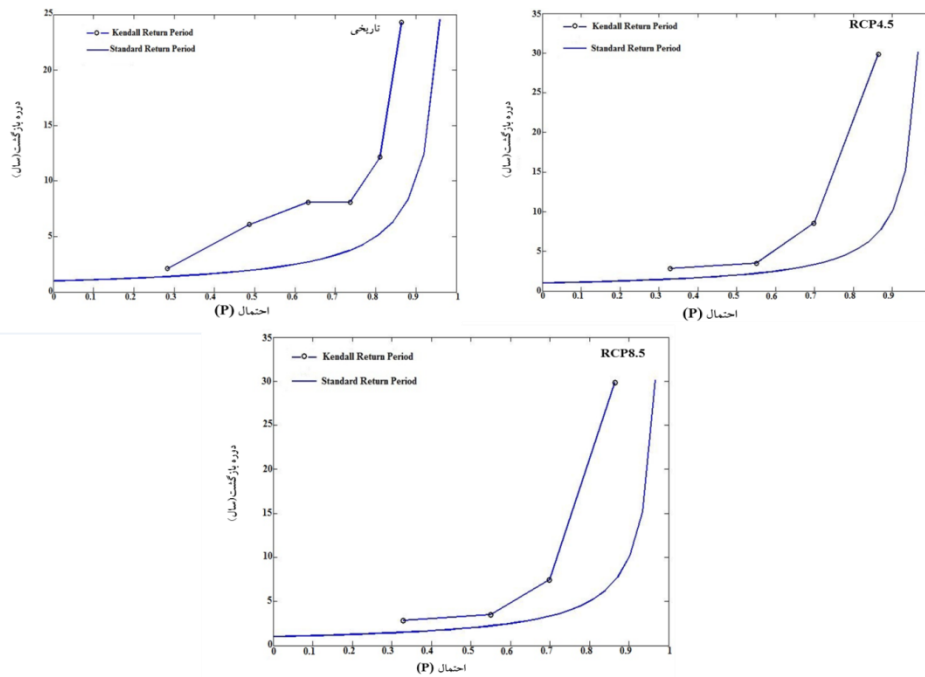
واضح است که برآوردهای کمتر از واقعیت به دست آمده ناشی از تعریف استاندارد دوره بازگشت باعث ایجاد خطا در تحلیل ریسک خشکسالی‌ها خواهد شد؛ بنابراین با استفاده از تعریف دوره بازگشت کنдал نتایج تحلیل ریسک برای موارد دو متغیره صحیح‌تر می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از تمام دوره بازگشت‌ها نشان می‌دهد که با تغییرات جزئی در مقادیر بارش، میزان تغییرات در دوره بازگشت‌ها کاملاً به‌طور معناداری مشخص خواهد بود. با توجه به تغییرات حاصل در مقادیر دوره بازگشت‌های استاندارد، کنдал و شرطی می‌توان استنباط کرد که این تغییرات به نوبه خود حاکی از وجود تغییر اقلیم در دوره‌های آتی خواهد بود که این تغییرات در دوره بازگشت‌ها که بر مبنای داده‌های بارندگی محاسبه شده‌اند انعکاس‌دهنده تغییرات در مقادیر بارش می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی و منابع آب و اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه به‌عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد و در آن تغییرات احتمالی که روی دما، بارش که بیشترین اتکا در پدیده تغییر اقلیم به آن می‌باشد و همچنین شاخص بارش اصلاحی (SPI^{mod}) جهت تحلیل خشکسالی ارزیابی گردید. برای این منظور از مدل‌های گردش عمومی جو و دو سناریو انتشار RCP8.5 و RCP4.5 استفاده گردید.

یافته‌های این بخش از تحقیق با بیان توضیحات فوق در دو بخش تنظیم شده که در ادامه ارائه گردیده است. در ابتدا نتایج حاصل از همگنی داده‌های بارش و دما نشان داد که با ضریب تبیین ۰/۹۹۵ و بالاتر داده‌های مورد استفاده از همگنی و همچنین ایستایی لازم برخوردارند. مقایسه متوسط ماهانه و فصلی دما و بارندگی در موقعیت ایستگاه‌های مختلف حوضه دریاچه ارومیه با

پیش‌بینی شده در سه افق نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) شکل (۹)، افق متوسط (۲۰۴۶-۲۰۶۵) و افق دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰)، تحت دو سناریو RCP8.5 و RCP4.5 برای ایستگاه‌های مورد مطالعه و ایستگاه منتخب ارومیه پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نمودارها برای سطوح احتمالاتی بحرانی ($P=1$) ایستگاه مذکور ترسیم شده است. با توجه به اینکه تعداد داده‌های مشاهداتی کم بوده است، لذا برآورد دوره بازگشت‌های بزرگ بر اساس دوره بازگشت کنдал صورت نگرفته است. از این‌رو شکستگی موجود در دوره بازگشت‌های کنдал به خاطر کم بودن تعداد داده‌های مشاهداتی می‌باشد. با توجه به شکل (۹) تفاوت بین دوره بازگشت کنдал با دوره بازگشت استاندارد برای ایستگاه ارومیه برای داده‌های تاریخی $P > 0.28$ و برای دو سناریو RCP8.5 و RCP4.5، برای افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱) و میانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) و برای افق دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰)، $P > 0.28$ در شکل (۹) (محل شروع شکستگی) مشهود است. برای مثال طبق شکل (۹) دوره بازگشت کنдал برای سطح احتمال بحرانی $P = 0.5$ برای ایستگاه‌های ارومیه، برای دوره تاریخی تقریباً هفت سال در حالی که برای افق نزدیک برای دو سناریو مذکور برای همین سطح احتمال این مقدار تقریباً برابر سه سال می‌باشد و برای افق میانی برای دو سناریوی مذکور سه سال و برای افق دور تقریباً پنج سال می‌باشد در حالی که دوره بازگشت استاندارد آن‌ها برای همین سطح احتمال برای سه سناریو و در افق‌های مختلف، تقریباً دو سال می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش زمان تفاوت بین دوره بازگشت کنдал با دوره بازگشت استاندارد افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در این شکل‌ها ارائه شده است، مطابق گزارش‌های سالوادوری (Salvadori et al., 2011) و دورانتو و (Durante and Salvadori, 2010)، دوره‌های بازگشت کنдал تفاوت فراوانی با دوره‌های بازگشت توأم دارند.



شکل ۹. دوره بازگشت کندال، T_p بر اساس تابع توزیع کندال تجربی و دوره بازگشت استاندارد، T'_{DS} بر اساس توابع مفصل جوئی برای داده‌های تاریخی ایستگاه ارومیه و داده‌های پیش‌بینی شده تحت سناریوهای مورد مطالعه در افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)

فصلی) ایستگاه‌های ارومیه، سراب و تکاب نسبت به ایستگاه‌های تبریز، مراغه و مهاباد دچار تغییرات توزیع بارش کمتری باشد. جهت تحلیل خشکسالی از هفت تابع مفصل جوئی، کلایتون، علی - میخائیل - حق، فارلی - گامبل - مورگن اشترن، فرانک، گامبل هوگارد، پلاکت استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل خشکسالی با رویکرد تغییر اقلیم نشان داد که برای افق نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱)، ۴۲ درصد از ماه‌ها خشک خواهند بود و برای افق میانی (۲۰۶۵-۲۰۴۶)، ۴۶ درصد ماه‌ها و برای افق دور (۲۰۹۹-۲۰۸۰)، ۴۰ درصد ماه‌ها بر اساس شاخص بارش اصلاحی (SPI^{mod}) خشک خواهند بود به طوری که شدت خشکسالی‌ها در پاره‌ای از موارد نسبت به دوره تاریخی بیشتر خواهد بود. همچنین نتایج حاصل از ضریب نش ساتکلیف ۰/۹۹۸ به دست آمد که نشان داد تابع مفصل برتر برای منطقه مورد مطالعه برای داده‌های تاریخی و پیش‌بینی تابع مفصل جوئی می‌باشد.

Reference:

Ayantobo, O.O., Li, Y. and Song, S. 2019 Multivariate Drought Frequency Analysis using Four-Variate Symmetric and Asymmetric Archimedean Copula Functions. *Water Resour Manage* 33, 103-127 2019. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2090-6>.

داده‌های مشاهداتی این شش ایستگاه و بررسی نوسانات ماهانه اقلیم حوضه دریاچه ارومیه برای سه افق نزدیک، متوسط و دور تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای سه دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰ نشان می‌دهد که هرچه به انتهای قرن بیست و یکم نزدیک‌تر می‌شویم، میزان افزایش دما در منطقه مورد مطالعه بیشتر می‌شود. ولی تغییرات بارندگی در این سه دوره برای افق‌های میانی و دور شاهد تغییرات اندکی در میزان بارندگی‌ها خواهیم بود. بر اساس ضرایب همبستگی به دست آمده برای سناریوهای مختلف بهترین سناریو برای مطالعات بارش سناریو RCP4.5 با ضریب همبستگی ۰/۷۶۳ و برای دما سناریوی RCP8.5 با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ به‌عنوان سناریوهای برتر جهت پیش‌بینی و مطالعات اقلیمی شناخته شدند. بررسی وضعیت توزیع بارش در ایستگاه‌های منتخب مختلف در دوره‌های آتی نشان از تغییرات کم توزیع بارش منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه دارد. به طوری که توزیع بارش (ماهانه،

- Bahri, M. Command, M.T. and Goodarzi, M. 2015. Study of droughts in the decade 2030-2011 due to climate change, Case study: Eskandari watershed, Isfahan province. *Watershed engineering and management*. 7 (2), 171-157. [in Persian]
- Bouabdelli, S., Meddi, M., Zeroual, A., and Alkama, R. 2020. Hydrological drought risk recurrence under climate change in the karst area of Northwestern Algeria. *Journal of Water and Climate Change*.
- Danandeh Mehr, A., Sorman, A. U., Kahya, E., and Hesami Afshar, M. 2020. Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254-268.
- Durante, F. and Salvadori, G., 2010. On the construction of multivariate extreme value models via copulas. *Environmetrics*, 21: 143-161.
- Golmohammadi, M. and Masah Bovani, A. 2011. Investigation of changes in the severity and return period of drought in Qarasu Basin in future periods affected by climate change. *Journal of Soil* 25 (2), 326-315.
- Hesami Afshar, M., Unal Sorman, A. and Tugrul Yilmaz, M., 2016. Conditional Copula-Based Spatial-Temporal Drought Characteristics Analysis—A Case Study over Turkey. *Water* 2016, 8, 426; doi:10.3390/w8100426.
- Ildermi, A., Nouri, H. and Karami, M. 2016. Assessment of Drought and Climate Change in the Future Period Using General Atmospheric Circulation Models (Case Study: Gorgan-Qarahsu Watershed - Iran). *Journal of Geographical Studies of Arid Areas*. 7 (26), 124-111.
- Khani Tamaleh, Z., Rezaei, H. and Mir Abbasi Najafabadi, R. 2020. Frequency analysis of three variables of drought characteristics in eastern Iran using nested joint functions. *Iranian Water Resources Research*, 16 (2), 213-202. [in Persian]
- Khani Tamaleh, Z., Rezaei, H. and Mir Abbasi Najafabadi, R. 2020. Application of nested joint functions for frequency analysis of four variables of meteorological droughts (Case study: West of Iran). *Journal of Soil Resources Conservation*, 10 (1), 112-93. [in Persian]
- Kao SC, and Govindaraju RS, 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology* 380(1-2): 121-134.
- Moafi Madani, S., Mousavi Baigi, S., and Ansari, H. 2012. Prediction of drought situation in Khorasan Razavi province during 2030-2011 using statistical exponential microscale of LARS-WG model output. *Geography and Environmental Hazards*, 1 (3), 21-37.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, paper presented at Eighth Conference on Applied Climatology. Am. Meteorol. Soc., Anaheim, CA.
- Mesbahzadeh, T., and Sardoo, F. S. 2019. Assessment and Prediction of Droughts Using Climate Change Scenarios (The Case Study: Southeastern Iran). *Russian Meteorology and Hydrology*, 44(8), 548-554.
- Mousavi, S-F. 2005. Agricultural drought management in Iran. *Proc. Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*. National Academies Press, pp.106-13.
- Nodeh Farahani, M., Rasekhi, A., Permas, B and Keshvari, A. 2018. Investigation of the effects of climate change on temperature, precipitation and droughts of the future period of Shadegan Basin, *Iranian Water Resources Research*. 14 (3), 139-125. [in Persian]
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles, *J Hydrol*, 10:282-290.
- Nelsen, R. B., 2006, *An Introduction to Copulas*, Springer, New York. 269 pp.
- Salvadori, G., De Michele C. and Durante, F. 2011. On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8:5523-5558. doi:10.5194/hessd-8-5523-2011.
- Schwarz, G. 1978. Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics* 6(2):461-464.
- Semonov, M. A., and Stratonovitch, P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*. 41: 1-14.
- Shiau JT, 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water Resources Management* 20,795-815. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-9008-9>.
- Shiau JT, Feng S and Nadarajah S, 2007. Assessment of hydrological droughts for the Yellow River, China, using copulas. *Hydrological Processes* 21(16): 2157-2163.
- Sklar, A., 1959. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges, *Publications de l'Institut de Statistique de L'Université de Paris*, 8: 229-231.
- Wilby R.L., Dawson C.W., and Barrow, E.M. 2002. SDSM- a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modeling & Software*, 17: 147-159
- Zhang, Y., You, Q., Chen, C., and Ge, J., (2016), Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China, *Atmospheric Research*, 178, 521-534.
- Zhao, P., Lü, H., Yang, H., Wang, W. and Fu, G., 2019. Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. *Quaternary international*, 513, pp.37-46.



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 11
No. 2
Winter 2022

Received:
2021-06-24

Accepted:
2021-08-28

Pages: 49-68

Modeling and Bivariate Analysis of Meteorological Drought Using Data Generation with Climate Change Approach (Case Study: Lake Urmia)

Farzad Khezri¹, Mohsen Irandoust*², Navid Jalalkamali³ and Najme Yazdanpanah⁴

- 1) Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Kerman Unit, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
 - 2) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kerman Unit, Islamic Azad University, Kerman,
 - 3) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kerman Unit, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
 - 4) Associate Professor, Department of Water Engineering, Kerman Unit, Islamic Azad University, Kerman, Iran.
- *Corresponding author email: Iran.randostmo@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: Climate change is one of the important factors that will affect different parts of human life on the planet and will have detrimental effects on the environment, socio-economic, and especially water resources. Knowledge of climate change can provide comprehensive plans in various areas of management regarding the monitoring of droughts and their potential risks. Drought can occur in any area, even wetlands. This phenomenon depends on various factors and parameters and one of the most important symbols of this phenomenon is the occurrence of drought is a decrease in rainfall and therefore the analysis of precipitation data is of special importance to study drought. The purpose of this study is to analyze drought variables using SPI and SPImod indices and detailed functions.

Method: In this study, to model the multivariate analysis of drought in Lake Urmia basin using RCP8.5 and RCP4.5 representative concentration pathway scenarios, data and models of atmospheric circulation of historical data (1991-2010) for three near horizons (2030- 2011), medium (2065-2046) and round (2099-2080) were simulated and produced. Then, using SPImod index and copula functions, drought multivariate analysis was performed in MATLAB software environment. In general, first, using the mentioned indicators (two indicators, SPI and SPImod), the characteristics of drought intensity and duration were extracted, then, using coding in MATLAB software environment, eight families of Archimedean detailed functions were used.

Results: The results of multivariate analysis showed that the Joe copula function is the best copula function for drought multivariate analysis (For analysis of both severity and duration of drought for the study area). Also, the results of probability and the joint return period showed that in the coming periods, at least droughts of the same level as historical droughts and even more severe will occur. Thus, by studying the period of combined and conditional returns and Kendall, the results showed that at a certain critical probability level, the amount of Kendall return period is much more than the standard return period, so that this difference increases with increasing that certain amount.

Conclusion: The results obtained with the climate change approach on the meteorological drought of Lake Urmia showed that in the coming periods we will see an increase in temperature, which will affect the rate of trade in the region and water resources, on the other hand, because the data Meteorology and hydrology are used to calculate the types of droughts, so droughts affected by climate change will be so that in future periods 46% to 48% of the months will be dry in different horizons. Finally, the results of the time series of indicators showed that during the statistical period at least 40% of the months were dry and this intensity of droughts in the Urmia station is much higher than others. The modified SPI largely eliminates the disadvantages of conventional SPIs and takes into account seasonal variations in precipitation in the calculation of the SPI index.

Keywords: Copula Functions, Multivariate Analysis, Climate Change, Pathway Scenarios, Drought

