

ارزیابی اثر تغییر اقلیم و سیاست‌های اجرایی بر آسیب‌پذیری سیستم منابع آب (مطالعه موردی: حوضه زرينه‌رود)

قاسم فلکی ایلخچی^۱، حجت احمدی^{۲*}، بهزاد حصاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷

چکیده

حوضه زرينه‌رود نقش قابل توجهی در تامین آب دریاچه ارومیه، نیاز شرب و کشاورزی منطقه دارد. توسعه کشاورزی، انتقال آب این حوضه به خارج از آن و تغییر اقلیم باعث کاهش جریان به داخل دریاچه ارومیه گردیده است. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر همزمان تغییر اقلیم و سیاست‌گذاری‌های مدیران بر موجودیت منابع آب حوضه زرينه‌رود، ابتدا با استفاده از مدل AOGCM و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و سناریوهای انتشار A2 و B2، داده‌های دما و بارندگی برای سال‌های ۲۰۷۰ تا ۲۰۸۴ تولید و سپس با استفاده از مدل SWAT، آورد حوضه محاسبه گردید. نتایج حاکی از افزایش متوسط حداکثر دما به مقدار ۶/۲۹ و ۵/۲۷ درجه سانتی‌گراد و کاهش متوسط دبی سالانه ورودی به دریاچه تا ۶۴۰ و ۷۴۱ میلیون متر مکعب برای سناریوهای A2 و B2 بود. در مرحله بعد، مدل جامع پویای سیستم حوضه زرينه‌رود با در نظر گرفتن مجموعه عوامل موثر بر آن تدوین و پس از صحت‌سنجی و کالیبره مدل تاثیر بازخورد بر منابع آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر وجود تقابلی بین بخش کشاورزی و نیاز محیط‌زیستی دریاچه ارومیه می‌باشد که افزایش تولیدات و سطوح کشاورزی باعث کاهش ورود جریان به دریاچه ارومیه خواهد گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه زرينه‌رود، پویایی سیستم، مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SWAT، SDSM

مقدمه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارای تنوع کاربری آبی بالا می‌باشد که بخش کشاورزی و صنعتی، مناطق شهری و روستایی متعدد، اکوسیستم غنی دریاچه ارومیه و تالاب‌های اقماری را در خود جای داده است. از طرفی توسعه فزاینده فعالیت‌های کشاورزی و احداث سد‌های متعدد در طی سال‌های اخیر باعث بروز مشکلاتی در تامین نیاز محیط‌زیستی دریاچه ارومیه و خشک شدن بخش‌هایی از آن گردیده است. بدین ترتیب، هرگونه تغییری در متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه می‌تواند باعث تشدید وضعیت این دریاچه و حتی به خطر افتادن سلامت انسانی منطقه گردد. لذا، پرداختن به عوامل تاثیرگذار بر منابع آب دریاچه ارومیه و بررسی تغییر اقلیم و راهبردهای سازگاری در آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در

این تحقیق، با توجه به اینکه حوضه زرينه‌رود نقش موثری در تامین نیاز آبی دریاچه ارومیه دارد مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات صورت گرفته در سطح دنیا رشد سریع فعالیت‌های صنعتی و افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر باعث برهم خوردن تعادل متغیرهای اقلیمی کره زمین بخصوص تابش خورشیدی، دما و بارش شده است که به آن پدیده تغییر اقلیم^۴ اطلاق می‌شود (IPCC, 2001). گزارش ارزیابی علمی کمیته بین‌المللی تغییرات آب و هوایی (IPCC) نشان می‌دهد که میانگین دمای جهانی تا پایان قرن با دو برابر شدن میزان غلظت CO₂ در جو بین ۱/۴ تا ۸/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. طبق گفته دانشمندان، تغییر اقلیم بر محیط‌زیست، بخش‌های اجتماعی و اقتصادی و از جمله منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی، سلامت انسان، اکوسیستم‌های زمینی و تنوع زیستی و مناطق ساحلی تاثیر می‌گذارد (McCarthy et al., 2001). مدل‌های مختلفی جهت پیش‌بینی وضعیت تغییر اقلیم ارائه شده است. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی استوار بوده و از معتبرترین ابزارها جهت تولید سناریوهای بررسی تغییر اقلیم به حساب

۱- دانشجوی دکتری مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir)

همچنین نتایج آن‌ها نشان داد در صورت ثابت بودن دما و افزایش بارندگی، تبخیر - تعرق و بهره‌وری آب افزایش خواهد یافت (Song et al., 2012). دارن و همکاران به کمک مدل SWAT، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه کشاورزی سان جوانگ در کالیفرنیا را به تغییرات CO_2 (۹۷۰ و ۵۵۰ ppm)، دما (۱/۱ و ۶/۴ درجه سانتی‌گراد) و بارش (۱۰٪ و ۲۰٪) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت CO_2 تا ۹۷۰ ppm و دما تا ۶/۴ درجه سانتی-گراد باعث کاهش آب قابل دسترس و کاهش ۳۷/۵٪ تبخیر-تعرق، کاهش ۸٪ مصرف آب آبیاری و نیز کاهش جریان رودخانه در منطقه تا ۲۳/۵٪ طی ۵۰ سال آینده خواهد گردید (Darren et al., 2009). استیل دانی و همکاران تاثیر تغییر اقلیم را بر جریان رودخانه‌ای واقع در ایرلند با استفاده از مدل ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B و مدل HBV-Light برای سال‌های ۲۰۶۰-۲۰۱۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش میزان بارش‌های زمستانه، کاهش بارش‌های تابستانه و کاهش مقدار دبی رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم بود (Steele Dunee et al., 2008). شاپرلینگ و همکاران و وارد و همکاران نشان دادند سیاست اعطای یارانه برای افزایش راندمان آبیاری نمی‌تواند حفاظت از منابع آبی را تضمین نماید (Scheierling et al., 2006, ward et al., 2008). در مقابل فیلپ و همکاران در استان نیمه‌خشک وسکا در شمال شرق اسپانیا، برای مواجهه صحیح با روند کاهشی منابع آب، توسعه روش‌های نوین آبیاری را توصیه نمودند (Philip et al., 2014). کولی و همکاران برای حفظ کشاورزی پایدار در کالیفرنیا، استفاده از روش‌های نوین آبیاری (بارانی و قطره‌ای) به همراه مدیریت صحیح در برنامه‌ریزی آبیاری و کم‌آبیاری را پیشنهاد کردند (Cooley et al., 2009). در مطالعات متعددی از رویکرد مدل‌سازی SD برای حل مشکل بحران آب استفاده شده و همچنین تاکید کرده‌اند که SD روشی برای درک و الگوسازی رفتار سیستم‌های پیچیده در طول زمان می‌باشد (Li et al., 2018; Xiao-qing et al., 2012; Yang et al., 2019; Zomorodian et al., 2018). محققانی همچون، مدنی و مارینو با استفاده از پویایی سیستم، مدلی برای مدیریت منابع آب حوضه زاینده‌رود ارائه نمودند. مدل ارائه شده نشان داد با مدیریت تقاضا و کنترل جمعیت می‌توان با بحران کمبود آب مواجه شد و انتقال بین حوضه‌ای آب راه‌حل مناسبی برای مدیریت منابع در حوضه زاینده‌رود نمی‌باشد (Madani and Marino, 2009). گوهری و همکاران با توسعه مدل ارائه شده توسط مدنی و مارینو (۲۰۰۹) در حوضه زاینده‌رود، به ارزیابی توسعه پایدار در بهره‌برداری منابع آب حوضه زاینده رود پرداختند. این مطالعه نشان داد اتکای صرف به انتقال بین حوضه‌ای آب در مواجهه با بحران کمبود آب موثر نمی‌باشد و باعث تقاضای بیشتر آب در حوضه می‌گردد (Gohari et al., 2013). گوده و همکاران (۲۰۱۹)، تاثیر تغییر اقلیم بر مراتع نیمه خشک استرالیا را با

می‌آیند (Lane et al., 1999). سناریوها جهت بررسی تغییر اقلیم به دو بخش سناریوهای اقلیمی و سناریوهای غیراقلیمی تفکیک می‌گردند. سناریوی غیر اقلیمی حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی-اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین بوده (سناریوهای انتشار^۱) و مربوط به یکی از خانواده‌های A1، B1، A2 و B2 می‌باشند. در این تحقیق از نرم‌افزار SDSM 4.2 توسعه یافته توسط (Wilby & Dawson, 2007) جهت کوچک مقیاس‌سازی آماری استفاده گردید. این مدل به عنوان ترکیبی از تولیدکننده تصادفی و روش‌های تابع انتقال در نظر گرفته شده است (Souvignet et al., 2010). محققانی همچون، کانگ و همکاران (۲۰۱۵) تاثیرات پدیده تغییر اقلیم را بر پارامترهای اقلیمی در حوضه مورای دارلینگ (جنوب شرق استرالیا) بررسی کردند. پیش‌بینی‌های آن‌ها بیان‌گر افزایش مقدار دمای هوا و تبخیر-تعرق برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ و افزایش بارندگی تا سال ۲۰۲۰ و سپس کاهش آن برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بود (Kang et al., 2015). داسگوپتا، اثرات تغییر اقلیم را تحت سناریوهای تغییرات اقلیم بر روی میزان تولیدات مواد غذایی در هند مورد بررسی قرار داد. تحقیقات آنان نشان می‌دهد تغییر دما بر تغییرات عملکرد و تغییر در بارندگی فصلی بر سطح زیر کشت تاثیر می‌گذارد. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰، چندین ایالت از جمله بنگال غربی و مادیا پرادش تحت تاثیر قرار می‌گیرند و تولیدات غذایی از ۱۹/۱ میلیون تن به کمتر از ۱۸/۵ میلیون تن تا سال ۲۰۵۰ کاهش خواهد یافت (Dasgupta, 2018). استجکویک و همکاران، رفتار سیستم مخزن لیم در کشور صربستان را تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم (SDSM) برای دوره آتی، سال‌های ۲۰۵۵-۲۰۰۶ و دوره مرجع، سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج حاصل، نشان‌دهنده تغییر سالانه تولید برق آبی از ۳/۵ درصد به ۱۷/۹ درصد می‌باشد. این تغییر در فصل زمستان تا ۲۰/۳٪ و برای فصل تابستان تا ۳۳/۶٪ بوده است (Stojkovic et al., 2019). بر اساس تحقیق نادری و همکاران (۱۳۹۸) جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و عملکرد چغندر قند در حوضه دریاچه ارومیه با کمک مدل SWAT نتایج حاکی از افزایش دمای ۷/۲ درجه سانتی-گراد و تغییر بارش بین ۱۲٪- تا ۳۵٪+ طی اکثر سناریوها بوده و همچنین افزایش دما باعث افزایش تبخیر و در نتیجه افزایش فشار بر منابع آبی و رواناب خواهد گردید. سانگ و همکاران با مدل SWAT جریان حوضه رودخانه بیجینگ را شبیه‌سازی و سپس واکنش هیدرولوژیکی حوضه را تحت تغییر اقلیم آنالیز نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت ثابت بودن مقدار بارندگی و افزایش دما، متوسط سالانه تبخیر - تعرق افزایش و بهره‌وری آب کاهش خواهد یافت.

به عنوان یک مدل مفهومی پرداخته شد و در پی آن بر اساس ایده حلقه‌های کارایی، سه استراتژی بر پایه سه شاخص معرفی شده در آن، به عنوان راهکارهای سیستمیک شناسایی گردید.

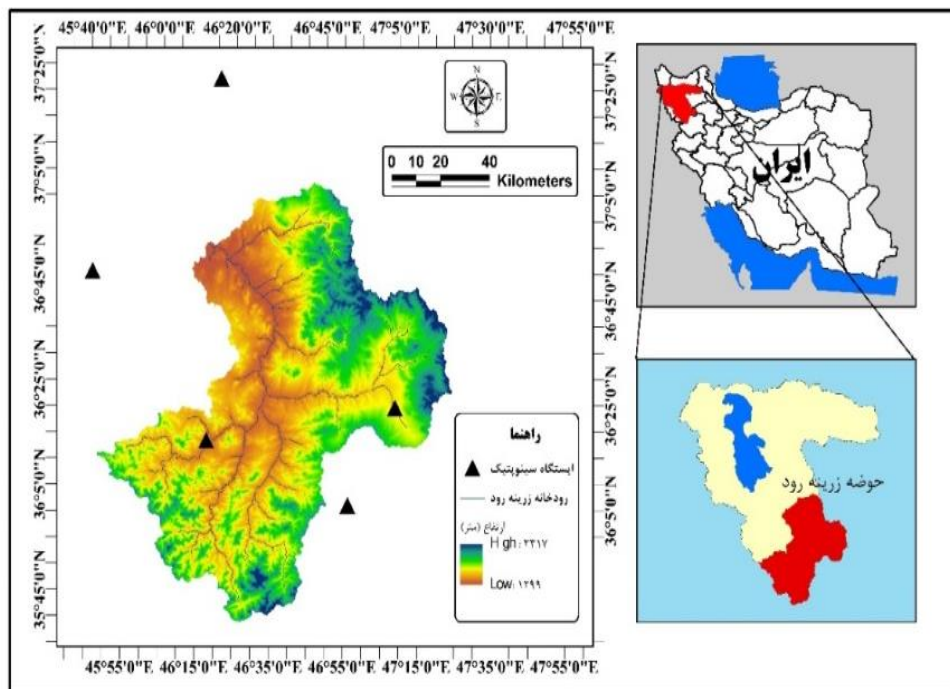
مواد و روش‌ها

الف- منطقه مورد مطالعه

رودخانه زربینه رود در شمال غربی ایران در $35^{\circ}45' - 47^{\circ}35'$ طول شرقی و $37^{\circ}50' - 35^{\circ}45'$ عرض شمالی، در جلگه جنوبی دریاچه ارومیه، قرار دارد (شکل ۱). این رودخانه با طول ۳۰۲ کیلومتر یکی از طولانی‌ترین و پرآب‌ترین رودهای شمال غرب کشور می‌باشد که از کوه‌های چهل چشمه در سقز سرچشمه می‌گیرد و پس از گذر از شهرستان‌های بوکان، شاهین دژ و میاندوآب در جنوب دریاچه ارومیه ضمن تشکیلیک دلتای وسیع به عرض حدود ۱۰ کیلومتر در مراتع باتلاقی تالاب قشلاق به دریاچه ارومیه می‌ریزد. در طول این مسیر چندین رودخانه فصلی از جمله خورخوره، ساروق، هولاسو، هاچه سو، محمودآباد، آجرلو به زربینه رود ملحق می‌شوند. لیلان چای نیز به عنوان آخرین شاخه در وسط شهر میاندوآب به این رودخانه می‌ریزد. سد مخزنی شهید کاظمی در بوکان و سد انحرافی نورزولو در میاندوآب و غیره برای کنترل سیلاب‌های این رودخانه و مصارف کشاورزی و صنعتی بر روی زربینه رود احداث گردیده‌اند.

استفاده از رویکرد پویایی سیستم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رابطه بین تغییرات میانگین بارش، الگوی بارش و شیوه‌های کشاورزی را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم تجزیه و تحلیل کردند و مشاهده کردند که میزان تولید علوفه و میزان نگهداری حیوانات به طور معنی‌داری تحت تاثیر شدت و دوام خشکسالی و همچنین روند طولانی مدت تغییر اقلیم قرار می‌گیرد (Godde et al., 2019). براتی و همکاران، مدیریت هوشمندانه آب‌های زیرزمینی را برای کمک به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران با استفاده از رویکرد پویایی سیستم، برای درک بهتر تاثیرات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقدامات، برنامه‌ها و خط‌مشی‌ها، در کشور ایران را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن-ها حاکی از آن است که، بیلان آب زیرزمینی بسیار مهم بوده و روند فعلی مدیریت آب‌های زیرزمینی در کشور هوشمندانه نیست. آن‌ها نتیجه گرفتند که بهترین استراتژی برای مدیریت هوشمندانه منابع آب زیرزمینی شامل افزایش نرخ نفوذ و کاهش نرخ برداشت (یا افزایش راندمان آب) است (Barati et al., 2019).

با وجودی که برخی محققان تلاش کرده‌اند که وزن تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های بشری را در خشک شدن دریاچه کمی کنند (Shadkam et al., 2016) در تحقیق حاضر، به منظور بررسی همزمان اثرات سیاست‌های مدیریتی و گرمایش جهانی بر منابع آب حوضه زربینه رود در سال‌های آینده، از مدل‌سازی پویایی سیستم با استفاده از مدل VENSIM استفاده گردید. سپس به شناسایی مکانیزم اصلی خسارات سیستمیک در منطقه بر پایه حلقه‌های علیتی



شکل ۱- موقعیت حوضه زربینه رود با ایستگاه‌های دما و بارش

پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد. اصلی‌ترین لایه اطلاعاتی نرم‌افزار SWAT نقشه DEM^۲ لایه کاربری اراضی و لایه نقشه خاکمی‌باشد. در این تحقیق از لایه DEM با اندازه سلولی ۳۰ متری جهت تولید اطلاعات فیزیوگرافی، رودخانه‌ها، حوضه‌ها و زیر حوضه‌ها استفاده گردید. برای انجام شبیه‌سازی، حوضه به زیرحوضه‌هایی تقسیم شده و فرآیندها در هر زیر حوضه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اطلاعات هر زیر حوضه شامل آب و هوا، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs)، برکه‌ها یا مرداب، آب زیرزمینی و آبراهه اصلی می‌باشد. مدل کردن چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است. برای شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارندگی حوضه مورد مطالعه از روش شماره منحنی SCS استفاده شد. در مدل SWAT تبخیر از خاک و پوشش گیاهی نیز به طور مجزا محاسبه می‌شود. در این تحقیق به منظور محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل از روش هارگریوز استفاده گردید. برای محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از روش هارگریوز سامانی به اطلاعات تابش، دمای هوا، رطوبت نسبی نیاز دارد. به منظور واسنجی مدل SWAT نیز از بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده گردید که تحلیل‌های عدم قطعیت و حساسیت را انجام می‌دهد. این نرم‌افزار روش‌های مختلفی را بدین منظور استفاده می‌کند که در این تحقیق از روش SUFI-2 استفاده شده است.

پ- ساختار کلی مدل VENSIM

پویایی سیستم یک تکنیک مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای توصیف ساختار سیستم‌های پیچیده و تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی آن‌ها است (Forrester, 1961). این رویکرد در اصل با هدف تسهیل تعاملات بین مدل‌های ذهنی مدیران و مدل‌های قراردادی تحلیل-گران توسعه یافته است (Akhtar et al., 2013). پویایی سیستم با نگرش جامع به مسائل قادر است روابط و بازخورد فرآیندهای طبیعی را با جنبه‌های اجتماعی-اقتصادی سیستم‌های منابع آب، با استفاده از ساختارهای ذخیره و جریان، بیان کند (Sterman, 2000). سیستم-های منابع آب شامل تعامل عوامل مختلف است و عدم قطعیت در روابط خطی و غیرخطی میان این عوامل، بررسی و ارزیابی مسائل و مشکلات منابع آب را پیچیده‌تر می‌کند (Chen and Wei, 2014). نرم‌افزار VENSIM که توسط پروفوسور کروود (Kirwood) در دانشگاه ایالتی آریزونا توسعه پیدا کرده است جزء بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پویایی سیستم است. نرم‌افزار VENSIM یک نرم‌افزار شبیه‌سازی و یک محیط مدل‌سازی گرافیکی شی‌گرا می‌باشد. به طوری که بعد از اجرای مدل، رفتار تک تک متغیرهای موجود طی

ب- مواد و روش شبیه‌سازی تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های HadCM3 و SDSM

در این بخش ابتدا به نحوه تولید داده‌های اقلیمی دما و بارندگی از مدل HadCM3 تحت دو سناریو انتشار A2 و B2 پرداخته شده و مختصری از مدل SDSM، نحوه انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌شونده‌ها و نیز نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارائه می‌شود. داده‌های بارندگی و دما برای مطالعه از سازمان هواشناسی ایران تهیه گردید. شبیه‌سازی تغییرات آب و هوا براساس دوره پایه اقلیمی به عنوان یک دوره مرجع صورت می‌گیرد (Houghton, 2001). دوره پایه برای بسیاری از مطالعات اخیر تغییر آب و هوا از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ به دلیل مزیت آن در پوشش‌دهی و دسترسی به اطلاعات مربوط به آب و هوا نسبت به زمان قبل از سال ۱۹۶۱ می‌باشد (McCarthy et al., 2001). در این مطالعه برای ریزمقیاس‌نمایی از اطلاعات پنج ایستگاه سینوپتیک مهاباد، تکاب، مراغه، سقز و زرینه مطابق شکل ۱ استفاده شد و با توجه به همپوشانی داده‌ای میان آن‌ها دوره ۲۶ ساله از ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۲ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور، ریزمقیاس‌نمایی داده‌های آب و هوایی در سطح محلی از نرم‌افزار SDSM استفاده گردید. از این نرم‌افزار برای ایجاد ارتباط کمی بین GCM بزرگ مقیاس (پیش‌بینی‌کننده) و متغیرهای محلی (مانند بارش و دما) با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه-های هواشناسی و براساس تکنیک رگرسیون چندگانه استفاده می‌شود. اطلاعات بازنگری شده اتمسفری از مرکز ملی آمریکا برای پیش‌بینی محیط زیست (NCEP) همراه با داده‌های مشاهده شده برای کالیبراسیون مدل و اعتبارسنجی استفاده شد. به منظور افزایش کیفیت خروجی مدل، کنترل کیفیت داده‌های مورد استفاده در مدل SDSM بسیار مهم است (Wilby & Dawson, 2007). لذا قبل از غربالگری متغیرهای SDSM، داده‌های گمشده، ناپایدار و ناقص هواشناسی برای تمام ایستگاه‌ها شناسایی و بررسی انسجام با منحنی دوسویه صورت گرفت. غربالگری متغیرها برای همه مدل‌های ریز مقیاس‌نمایی آماری مهم است (Wilby & Dawson, 2007; Huang et al., 2011). غربالگری برای انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (مانند فشار متوسط دریا) برای تعیین سناریوی آب و هوایی ریزمقیاس شده استفاده می‌شود.

پ- ساختار کلی مدل SWAT

مدل SWAT در مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه داده شده است (Arnold et al., 1993). این مدل به منظور شبیه‌سازی نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، و

2- Digital Elevation Model

1- Double Mass Curve

ریز مقیاس‌نمایی آماری می‌باشد. به این صورت که در این مرحله با اعمال آزمون‌های همبستگی، همبستگی جزئی و همبستگی متقابل بین متغیرهای اقلیمی (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و داده‌های بزرگ مقیاس NCEP (پیش‌بینی‌کننده‌ها) بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده را برای محل و متغیر اقلیمی مورد نظر انتخاب کرده و آن را برای پیش‌بینی اقلیمی آینده بکار می‌برد. در جدول ۱ خروجی مدل SDSM برای مرحله غربالگری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده دما و بارش برای ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی نشان داده شده است. برای بارش، "رطوبت ویژه سطحی" با مقدار R^2 برابر با ۰/۴۸ در ایستگاه سقز بهترین همبستگی و برای حداکثر دما، "جهت باد در ۵۰۰ hpa" با مقدار R^2 برابر با ۰/۶۸ در ایستگاه زرینه قوی‌تر از پیش‌بینی‌کننده‌های دیگر بود. با این حال، همبستگی (جزئی) برای بارش رضایت‌بخش نبود.

نمودارها و جداولی قابل ملاحظه خواهد بود. در این نرم‌افزار نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که با روش اولر یا رانگ کوتا حل می‌شوند، ساخته می‌شود که در آن با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود رفتار سیستم را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. روش مدل‌سازی در این نرم‌افزار به این صورت است که پیشرفت از کلیات به جزئیات صورت می‌گیرد به طوری که به صورت تدریجی توابع و اجزای متصل شده بیشتر می‌شود تا یک مدل کامل شده برای اجرا آماده گردد.

نتایج و بحث

الف- نتایج شبیه‌سازی تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های GCM و ریز مقیاس‌سازی با مدل SDSM
غربالگری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده یکی از مهمترین گام‌های

جدول ۱- انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برای پیش‌بینی‌شونده‌ها

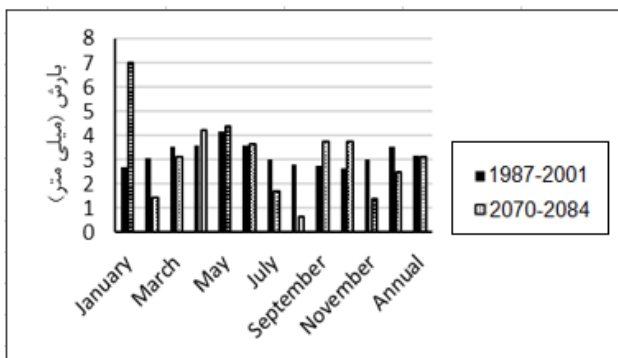
پیش‌بینی‌شونده: دما										پیش‌بینی‌کننده
ایستگاه										
مهاباد		تکاب		مراغه		سقز		زرینه		
p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	
۰/۳۵۱	۰/۱۶	۰/۳۳۹	۰/۲۳	۰/۳۸۲	۰/۱۲	۰/۳۳۹	۰/۳۳۹	۰/۳۹۰	۰/۲۷	فشار متوسط سطح دریا
۰/۳۲۲	۰/۲۷	۰/۳۱۲	۰/۴۰	۰/۳۱۹	۰/۲۱	۰/۲۴۱	۰/۲۴۱	۰/۵۱۲	۰/۰۷	سرعت مدیترانه‌ای در ۵۰۰ hpa
۰/۳۹۰	۰/۰۸	۰/۴۱۸	۰/۲۵	۰/۴۶۲	۰/۰۲	۰/۳۸۷	۰/۳۸۷	۰/۴۶۳	۰/۰۳	ژئو پتانسیل در ۵۰۰ hpa
۰/۲۶۹	۰/۱۱	۰/۲۰۱	۰/۰۹	۰/۲۳۶	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۶۷۸	۰/۴۸	جهت باد در ۵۰۰ hpa
۰/۲۷۸	۰/۴۵	۰/۴۳۰	۰/۲۴	۰/۲۱۵	۰/۳۱	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	۰/۵۴۹	۰/۴۶	واگرایی در ۵۰۰ hpa
۰/۲۵۸	۰/۱۲	۰/۳۲۱	۰/۴۳	۰/۴۳۲	۰/۱۷	۰/۳۱۹	۰/۳۱۹	۰/۴۲۵	۰/۳۳	رطوبت نسبی سطحی
۰/۳۵۴	۰/۳۹	۰/۲۴۲	۰/۲۳	۰/۵۳۲	۰/۳۳	۰/۲۷۱	۰/۲۷۱	۰/۶۱۴	۰/۲۱	متوسط دما در ارتفاع دو متری
پیش‌بینی‌شونده: بارش										پیش‌بینی‌کننده
ایستگاه										
مهاباد		تکاب		مراغه		سقز		زرینه		
p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	p-value	R^2	
۰/۲۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴۳	۰/۱۸	۰/۱۷۲	۰/۳۴	۰/۱۹۵	۰/۱۹۵	۰/۰۸۶	۰/۰۷	فشار متوسط سطح دریا
۰/۱۲۸	۰/۱۵	۰/۱۸۴	۰/۰۸	۰/۰۴۳	۰/۲۶	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۱۱۲	۰/۰۵	سرعت مدیترانه‌ای سطحی
۰/۲۱۷	۰/۰۹	۰/۱۳۸	۰/۱۶	۰/۱۷۵	۰/۰۸	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	۰/۱۶۲	۰/۵۰	سرعت مداری در ۵۰۰ hpa
۰/۱۳۹	۰/۴۵	۰/۱۲۷	۰/۴۵	۰/۰۹۴	۰/۱۶	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۱۵۸	۰/۰۰	ژئو پتانسیل در ۵۰۰ hpa
۰/۲۱۸	۰/۳۷	۰/۲۶۰	۰/۱۱	۰/۲۶۹	۰/۲۱	۰/۳۱۰	۰/۳۱۰	۰/۲۱۲	۰/۳۹	قدرت جریان در ۸۵۰ hpa
۰/۱۷۵	۰/۴۹	۰/۳۱۲	۰/۳۰	۰/۰۸۴	۰/۰۳	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	۰/۱۸۴	۰/۱۷	ژئوپتانسیل در ۸۵۰ hpa
۰/۰۸۴	۰/۰۹	۰/۰۸۴	۰/۰۲	۰/۲۷۴	۰/۱۲	۰/۲۳۶	۰/۲۳۶	۰/۲۰۴	۰/۵۳	جهت باد در ۸۵۰ hpa
۰/۲۷۴	۰/۵۳	۰/۱۰۱	۰/۲۶	۰/۱۱۷	۰/۴۹	۰/۴۸۱	۰/۴۸۱	۰/۰۳۸	۰/۲۱	رطوبت ویژه سطحی
۰/۱۱۷	۰/۱۱	۰/۲۱۳	۰/۲۷	۰/۲۱۱	۰/۲۷	۰/۱۲۸	۰/۱۲۸	۰/۱۶۲	۰/۰۹	متوسط دما در ارتفاع دو متری

بیشترین مقدار و برای متغیر پیش‌بینی‌شونده دمای حداکثر در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در ایستگاه سقز برابر ۰/۷۹ و

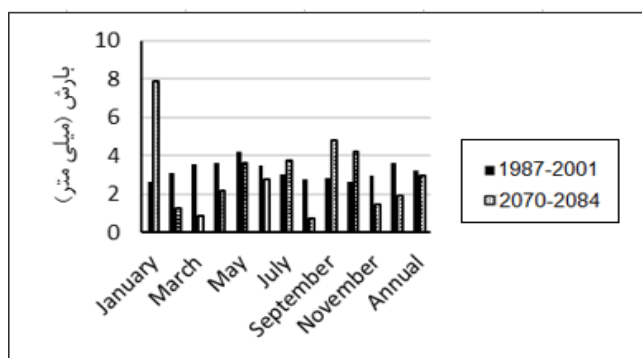
مقدار شاخص R^2 برای متغیر پیش‌بینی‌شونده بارش در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در ایستگاه زرینه با ۰/۴۳ و ۰/۳۸

سناریو A2 می‌باشد، اما میزان افزایش و کاهش متوسط بارش ماهانه متفاوت است به طوری که بارش برای تمام ماه‌ها به غیر از ژانویه، آپریل، می، سپتامبر و اکتبر کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل روند بارش سالانه برای ایستگاه زربینه برای هر دو سناریوی A2 و B2 نشان داد (شکل ۴) که بارش سالانه برای دوره ۲۰۸۴-۲۰۷۰ دارای روند خاصی نیست. حداقل بارندگی ماهانه ۰/۱ میلی‌متر برای A2 و ۰/۱۶ میلی‌متر برای B2 بود، در حالی که حداکثر بارندگی ماهانه ۲۶۱ میلی‌متر برای A2 و ۲۶۰ میلی‌متر برای سناریوی B2 بود. این نشان می‌دهد طیف گسترده‌ای از بارش‌های حداکثر در منطقه مورد مطالعه برای سناریوهای مورد نظر، دارای عدم قطعیت هستند.

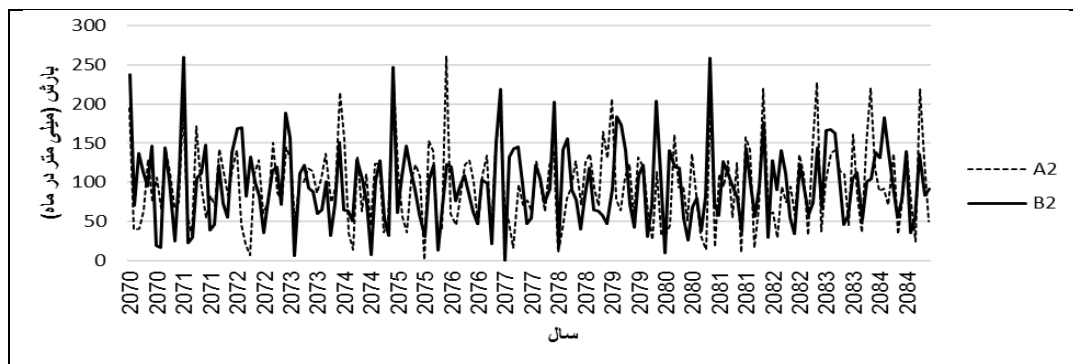
۰/۷۷ دارای بیشترین مقدار می‌باشد. مقادیر پایین R^2 در مورد بارش در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان‌دهنده عملکرد ضعیف SDSM در شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه است. تغییرات فصلی دمای شبیه‌سازی شده (حداکثر و حداقل) به طور قابل توجهی با درجه حرارت مشاهده شده در همه ایستگاه‌ها منطبق بوده که نشان‌دهنده عملکرد خوب SDSM برای شبیه‌سازی دما در حوضه می‌باشد. شکل‌های ۲ و ۳ تغییر ماهانه الگوی بارش برای ایستگاه زربینه را در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۸۷) نشان می‌دهد. تغییر ماهانه بارندگی نشان می‌دهد که بارندگی در هر ماه به جز در ماه‌های ژانویه، سپتامبر و اکتبر کاهش می‌یابد و هیچ تغییری در سناریوی A2 وجود ندارد. در مورد سناریوی B2 نیز روند تغییر بارندگی ماهانه همانند



شکل ۳- تغییرات بارش برای سناریوی B2 در ایستگاه زربینه



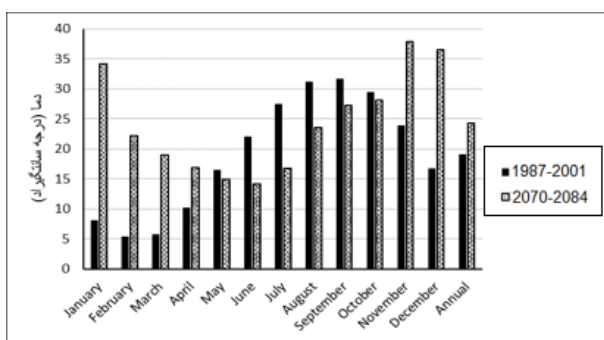
شکل ۲- تغییرات بارش برای سناریوی A2 در ایستگاه زربینه



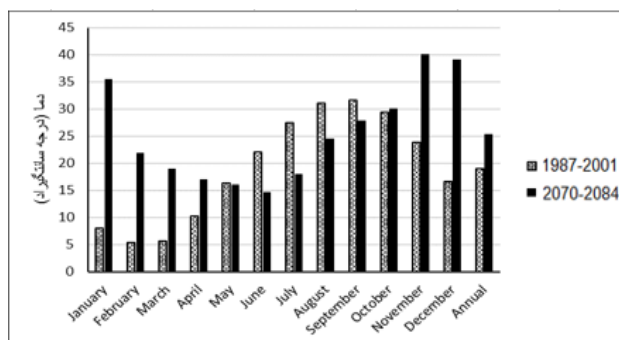
شکل ۴- روند تغییرات بارش برای سناریوهای A2 و B2 در ایستگاه زربینه

ب- نتایج شبیه‌سازی منابع آب حوضه زربینه رود تحت تاثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل SWAT
 نتایج خروجی نرم‌افزار SWAT-CUP جهت بررسی حساسیت پارامترهای مختلف در مدل توسط دو مقدار p-value و t-stat در جدول ۲ مشخص گردیده و در واسنجی مدل مورد توجه بیشتری قرار گرفتند. بر اساس نتایج این جدول، شماره منحنی (CN2) و چگالی مطلق خاک (SOL_BD) بیشترین تاثیر را روی دبی خروجی از حوضه داشته‌اند.

تولید سناریو برای حداکثر درجه حرارت نیز نشان می‌دهد که دما در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارچ، نوامبر و دسامبر در آینده افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش حداکثر دما در ماه‌های ژانویه رخ می‌دهد و حداقل افزایش در ماه اکتبر خواهد بود. میانگین تغییرات پیش‌بینی شده ماهانه حداکثر دما در ایستگاه سقز برای سناریوی A2 و B2 برابر ۶/۲۹ و ۵/۲۷ درجه سانتی‌گراد مطابق شکل‌های ۵ و ۶ خواهد بود.



شکل ۶- تغییرات دما برای سناریوی B2 در ایستگاه سقز



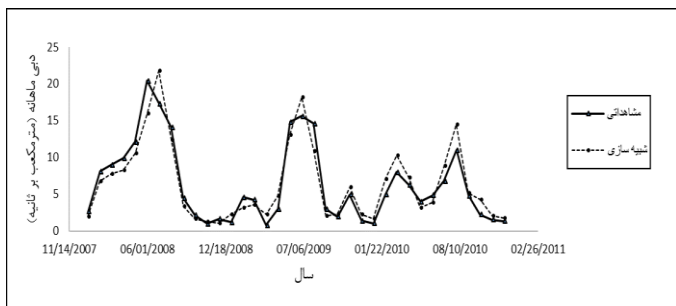
شکل ۵- تغییرات دما برای سناریوی A2 در ایستگاه سقز

جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر p-value و t-stat مربوط به هر کدام از پارامترها

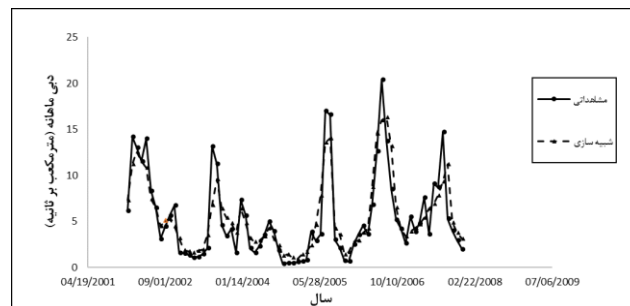
رتبه	پارامتر	p-value	t-stat
۱	CN2	۰/۰۰۷	۵/۱۴
۲	SOL-BD	۰/۰۱۴	۲/۸۵
۳	GW-DELAY	۰/۰۴۱	۲/۷۵
۴	GWQMN	۰/۰۶۵	۲/۲۵
۵	SOL-AWC	۰/۰۹	۲/۱۵
۶	GW-REVAP	۰/۲۷	۱/۲۱

مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۶۶ و ۰/۵۱ می‌باشد. تغییرات سری زمانی دبی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه آب‌سنجی نظام‌آباد در شکل ۷ و نتایج مربوط به دوره صحت‌سنجی توسط مدل SWAT در شکل ۸ آورده شده است.

به منظور واسنجی و صحت‌سنجی جریان رودخانه از داده‌های ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد و برای ارزیابی آن از شاخص‌های ضریب تبیین R^2 و ضریب نش‌سانتکیف NS استفاده گردید. مقدار شاخص-های R^2 و NS به ترتیب در مرحله واسنجی برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۱ و در



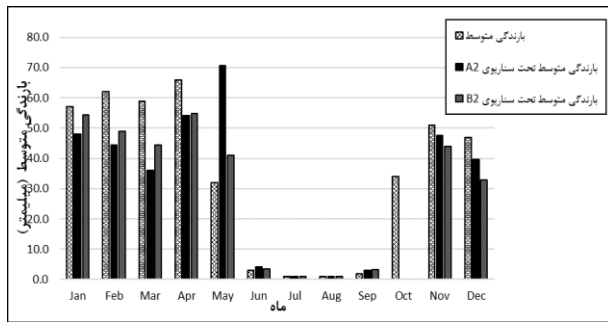
شکل ۸- مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره صحت‌سنجی در ایستگاه نظام‌آباد



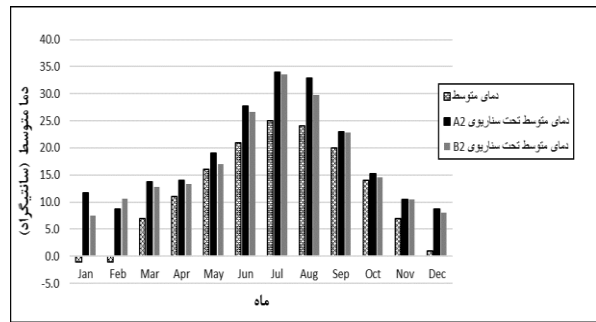
شکل ۷- مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی در ایستگاه نظام‌آباد

داده‌های مشاهداتی دوره پایه (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۲) و دوره آتی (۲۰۷۰ تا ۲۰۸۴) به مدل اعمال گردید. بعد از اعمال درصد تغییرات بارندگی و دمای متوسط تحت سناریوهای A2 و B2 در مدل SWAT تغییرات این متغیرها بطور حوضه‌ای با استفاده از روش میان‌یابی عکس فاصله ارزیابی شدند که نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های این تحقیق برآورد میزان آب وارده از رودخانه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه تحت تاثیر شرایط تغییر اقلیم می‌باشد. بدین منظور ابتدا میزان آب وارده به دریاچه تحت شرایط موجود (سناریوی پایه) برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ شبیه‌سازی گردید. سپس به منظور اعمال تغییر اقلیم در سیستم حوضه زرينه‌رود ابتدا درصد تغییرات میانگین ماهانه بارندگی و اختلاف دمای متوسط بین



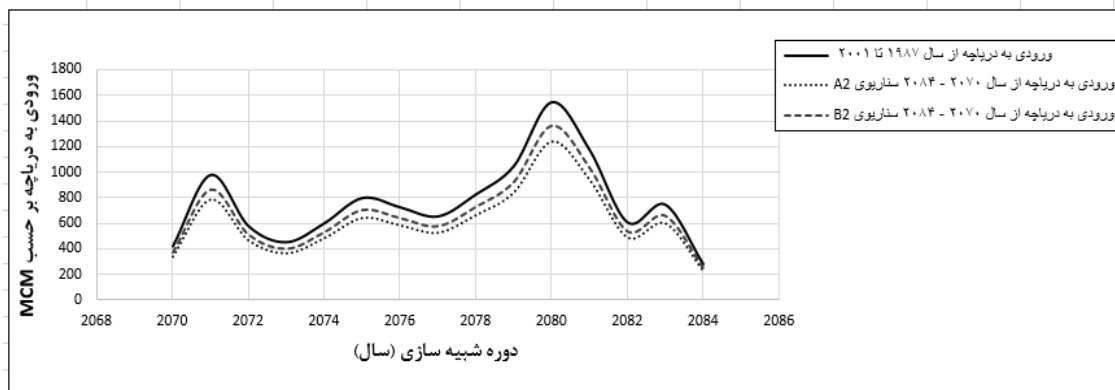
شکل ۱۰- نتایج شبیه سازی متوسط بارندگی ماهانه حوضه آبریز زربنده رود طی سال های ۲۰۸۴-۲۰۷۰ تحت سناریوهای A2 و B2



شکل ۹- نتایج دوره شبیه سازی میانگین دمای ماهانه حوضه آبریز زربنده رود طی سال های ۲۰۸۴-۲۰۷۰ تحت سناریوهای A2 و B2

ملاحظه می گردد که کاهش قابل توجهی در ورودی به دریاچه ارومیه مخصوصاً تحت سناریو A2 صورت خواهد پذیرفت. تغییرات دبی ورودی به دریاچه در مقیاس ماهیانه نیز برای ایستگاه های مزبور تحت هر دو سناریو انتشار A2 و B2 مقایسه شده اند که نتایج در همه ماه ها نشان از کاهش قابل ملاحظه دبی برای هر دو ایستگاه را دارد.

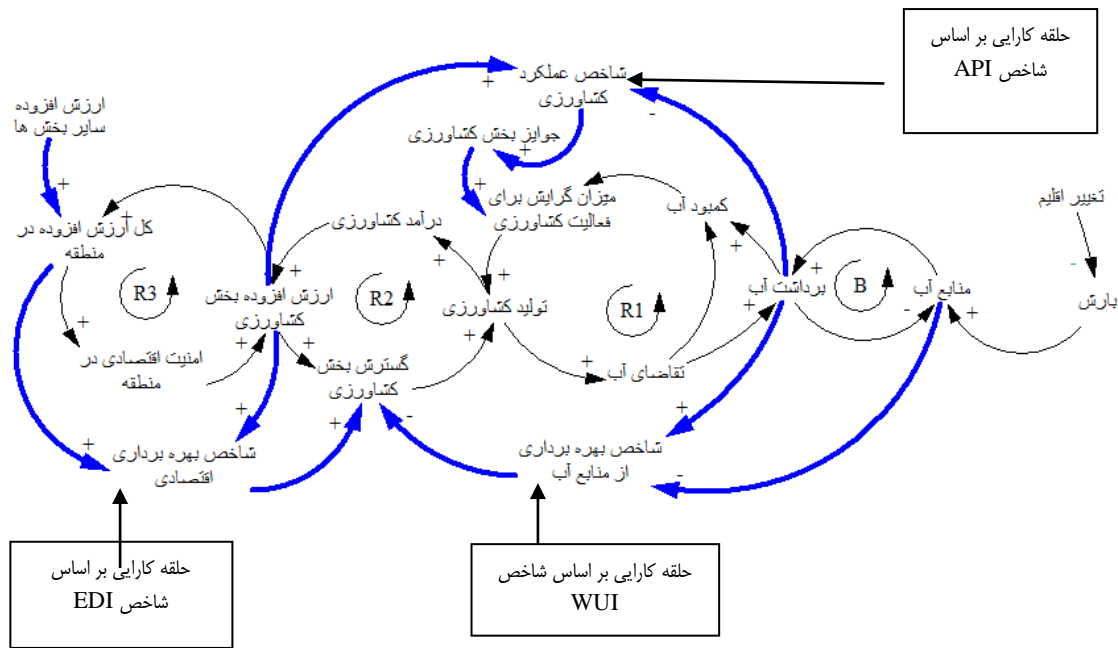
با توجه به شکل های ۹ و ۱۰، تحت سناریوهای A2 و B2، میانگین ماهانه بارندگی در حوضه کاهش و متوسط دمای ماهانه افزایش می یابد. افزایش دما در سناریو A2 شدیدتر است. تغییرات فوق توسط مدل بر رواناب حوضه شبیه سازی گردید. شکل ۱۱ جمع آب خروجی از حوضه را تحت سناریوهای A2 و B2 نشان می دهد.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج شبیه سازی حجم آب خروجی حوضه زربنده رود تحت سناریوهای A2 و B2 طی سال ۲۰۸۴-۲۰۷۰

محدودیت رشد می باشد. حلقه تقویتی R1 با نام مکانیزم تولید محصول، حلقه تقویتی R2 با نام مکانیزم توسعه تک محوری و حلقه تقویتی R3 با نام مکانیزم اقتصاد منطقه ای نامگذاری شده است. شاخص مصرف آب (WUI): این شاخص، شاخص تصمیم گیری برای کنترل میزان برداشت آب بر اساس فراوانی منابع آب منطقه می باشد. بالا بودن میزان این شاخص نشان از عدم هماهنگی بین میزان منابع آب موجود و برداشت از آن دارد. اعمال این سیاست با افزایش میزان ضریب WUI تمایل جهت کشت محصول را کاهش می دهد.

پ- نتایج شبیه سازی حوضه زربنده رود تحت تاثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل پویای سیستم در این بخش با استفاده از آمار و اطلاعات و نتایج بدست آمده از بخش شبیه سازی جریان حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم، مدل پویای سیستم حوضه زربنده رود با استفاده از نرم افزار VENSIM تهیه و پس از صحت سنجی و کالیبره آن، حوضه مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور با شناسایی مکانیزم اصلی خسارات سیستمیک در منطقه بر پایه ترسیم حلقه های علیتی به عنوان یک مدل مفهومی پرداخته شد و در پی آن بر اساس ایده حلقه های کارایی، سه استراتژی بر پایه سه شاخص معرفی شده در آن، به عنوان راهکارهای سیستمیک شناسایی گردید. این حلقه ها در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. در این شکل حلقه B حلقه تعادلی مصرف آب بوده و معرف تشکیل ساختار



شکل ۱۲- اعمال حلقه کارایی مبتنی بر شاخص‌های WUI، API، EDI بر "حلقه اصلی تولید خسارت"

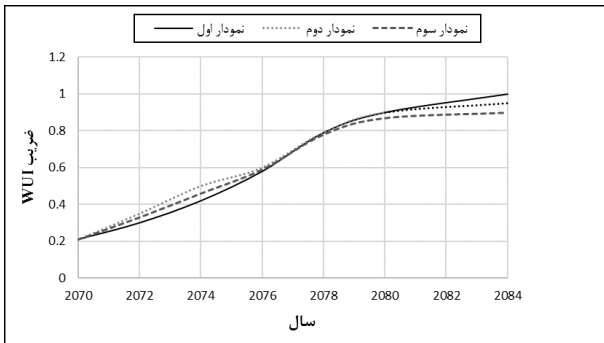
شود. اعمال سیاست با استفاده از مقدار شاخص API می‌تواند حلقه تولید محصول را براساس نسبت ارزش افزوده تولیدی در بخش کشاورزی به ازای آب مصرفی کنترل نماید. این شاخص با در نظر گرفتن میزان ارزش افزوده در منطقه و بر اساس میزان آب مصرفی جهت تولید این ارزش افزوده، توسعه در بخش کشاورزی را با شاخص API کنترل می‌نماید (شکل ۱۵). بدین صورت که با ضرب متغیر مذکور در متغیر میزان تبدیل زمین‌های قابل کشت به زمین‌های کشت شده تغییر می‌نماید. لذا، آنالیز حساسیتی به صورت اشکال ۱۵ و ۱۶ برای اعمال این سیاست در نظر گرفته شده است. با قضاوت از روی شکل ۱۶، مشابه سیاست WUI، می‌توان به این نتیجه رسید که تفاوت معنی‌داری بین اعمال شیب‌های مختلف برای نمودارهای فوق در بهبود شاخص API وجود ندارد، بلکه آنچه مهم است حفظ روند صعودی آن می‌باشد. شاخص تنوع اقتصادی در منطقه (EDI^2): این شاخص، معیار مناسبی را جهت کنترل توسعه تک محوری و افزایش نقش دیگر بخش‌ها در تولید ارزش افزوده در منطقه، برای حلقه‌های کارایی فراهم می‌نماید.

بیشتر بودن این شاخص نشان‌دهنده وابستگی زیاد به یک بخش خاص (در اینجا بخش کشاورزی) می‌باشد. وارد نمودن شاخص EDI در کنترل حلقه توسعه تک محوری، با تغییر رفتار تابع lookup مربوط به متغیر ارزش افزوده مورد انتظار بخش کشاورزی انجام می‌شود. بر این اساس رفتار تابع فوق بر اساس نسبت ارزش افزوده کشاورزی بر کل ارزش افزوده در منطقه، به صورتی که در شکل ۱۷ نشان داده

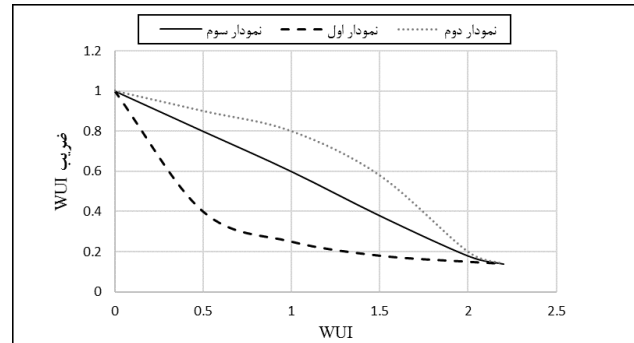
این شاخص تحت یک تابع lookup کشت محصول را کنترل می‌نماید تا پایداری سیستم از نظر برداشت از منابع آب حفظ شود. آنچه در اینجا مهم است شکل تابع فوق از نظر صعودی یا نزولی بودن می‌باشد. بدین منظور سه نمودار با عملکردی یکسان ولی متفاوت در سرعت پاسخگویی به تغییرات شاخص WUI، در شکل ۱۳، آورده شده‌اند. ضریب WUI، ضریب کاهش تمایل جهت کشت محصول را بدست می‌دهد که از ضرب ضریب فوق در متغیر محصول تولیدی مورد انتظار، میزان تمایل جهت کشت محصول تحت کنترل شاخص فوق در می‌آید (شکل ۱۳). لازم به ذکر است که بسته به چگونگی رفتار منحنی فوق، می‌توان سیاست‌های متفاوتی را استخراج نمود. شکل ۱۴ بیانگر این مطلب است که بین اعمال نمودارهای فوق، جهت کنترل شاخص WUI، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. شاخص کارایی بخش کشاورزی (API^1): این شاخص بر اساس میزان آب برداشت شده از منابع آب منطقه برای کشاورزی و میزان تولید محصول در منطقه، فعالیت حلقه تولید محصول را کنترل می‌نماید. در این مورد بایستی بر حلقه تقویتی متمرکز شد و رشد آن را بر اساس محدودیت منابع یا حلقه تعدیلی کنترل نمود. زیاد بودن مقدار شاخص API تضمینی بر بهره‌وری مناسب از منابع آب موجود می‌باشد. بر اساس این حلقه کارایی بر اساس قضاوت از روی مقدار شاخص نرمال API با کنترل تمایل تولید محصول کشاورزی در قالب کاهش یا افزایش آن در منطقه، از تولید بیش از اندازه و یا تولید کمتر از پتانسیل موجود جلوگیری نموده و پایداری در سیستم را موجب می-

به متغیر ارزش افزوده مورد انتظار بخش کشاورزی انجام می‌شود. بر این اساس رفتار تابع فوق بر اساس نسبت ارزش افزوده کشاورزی بر کل ارزش افزوده در منطقه، به صورتی که در شکل ۱۷ نشان داده شده است تغییر می‌یابد. این سیاست با استناد به مقدار شاخص EDI با اعمال کنترل بر حلقه توسعه تک محوری از وابستگی بیش از حد اقتصاد منطقه به بخش کشاورزی با توجه به مصرف بالای آب و تولید ارزش افزوده کمتر، جلوگیری می‌نماید.

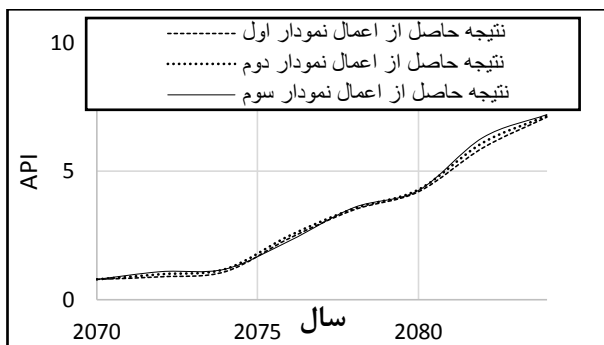
شده است تغییر می‌یابد. این سیاست با استناد به مقدار شاخص EDI با اعمال کنترل بر حلقه توسعه تک محوری از وابستگی بیش از حد اقتصاد منطقه به بخش کشاورزی با توجه به مصرف بالای آب و تولید ارزش افزوده کمتر، جلوگیری می‌نماید. بیشتر بودن این شاخص نشان‌دهنده وابستگی زیاد به یک بخش خاص (در اینجا بخش کشاورزی) می‌باشد. وارد نمودن شاخص EDI در کنترل حلقه توسعه تک محوری، با تغییر رفتار تابع lookup مربوط



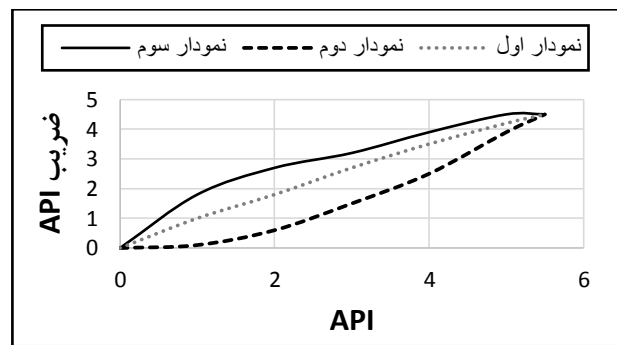
شکل ۱۴- نمودارهای مربوط به ضریب WUI تحت نمودارهای شکل ۱۳



شکل ۱۳- طریقه اعمال سیاست یک به همراه ضریب کاهش تمایل جهت کشت محصول در برابر مقدار ضریب WUI



شکل ۱۶- ضریب کنترل توسعه زمین‌های کشاورزی در برابر شاخص API

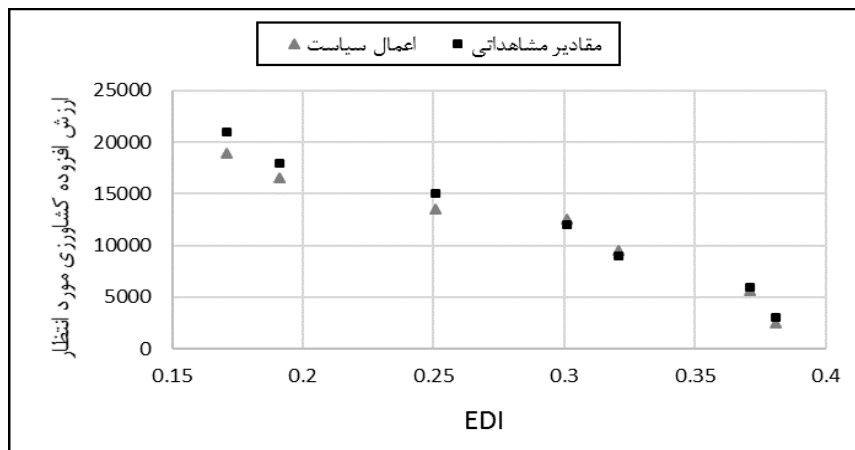


شکل ۱۵- نحوه اعمال سیاست دو و ضریب کنترل توسعه زمین‌های کشاورزی در برابر شاخص API

۲۰۸۴) را نشان داد، به طوری که متوسط سالانه ورودی به دریاچه از ۹۱۲ میلیون متر مکعب در شرایط حاضر به ۶۴۰ و ۷۴۱ میلیون متر مکعب تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 تقلیل یافت. نتایج بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارندگی و رواناب در حوضه زربنه‌رود توسط منصوری و همکاران (۱۳۹۳) نیز کاهش ۲۸ درصدی ورودی سد زربنه‌رود و افزایش متوسط درجه حرارت بیشینه و کمینه را در دوره‌های آتی نشان داد. در ادامه این تحقیق به منظور افزایش درک آسیب‌پذیری منطقه به حوادث طبیعی با توجه به وجود تعاملات و پس‌خورهای موجود در سیستم، فرآیند ترسیم مدل مفهومی از تعاملات موجود بین اجزای محیط و انسان با استناد به آمار تراز آب دریاچه ارومیه به عنوان بارزترین مشکل در منطقه به عنوان خط فکری اولیه آغاز گردید.

نتیجه گیری

نتایج تجزیه و تحلیل روند بارش سالانه برای سناریوی A2 و B2 نشان داد که بارش سالانه برای دوره ۲۰۸۴-۲۰۷۰ دارای روند خاصی نیست. میانگین افزایش پیش‌بینی شده ماهانه حداکثر دما ۶/۲۹ و ۵/۲۷ درجه سانتی‌گراد، در سناریوی A2 و B2 بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل وقوع رخداد‌های خشکسالی و یا رخنه‌های خشکسالی در حوضه در حال وقوع است، بنابراین لازم است اقدامات سازگاری با تغییر اقلیم صورت پذیرد. نتایج شبیه‌سازی رواناب حوضه با مدل SWAT نیز در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مناسب بوده است. اعمال داده‌های خروجی مدل SDSM به مدل SWAT، کاهش شدید ورودی به دریاچه در سال‌های دوره شبیه‌سازی (۲۰۷۰-



شکل ۱۷- مقادیر شاخص EDI برای دو مقدار مشاهده شده و اعمال سیاست

- Akhtar, M.K., Wibe, J., Simonovic, S.P., and MacGee, J. 2013. Integrated assessment model of society biosphere-climate-economy-energysystem. *Environmental modeling & Software*. 49:1-21.
- Arnold, J.G., Allen, P.M and Bernhardt, G. 1993. A comprehensive surface groundwater flow model. *Journal of Hydro*. 142:47-69.
- Barati, A., Azadi, H. and Scheffran, J. 2019. A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management* 221: 502-518.
- Chen, Z. and Wei, S. 2014. Application of system dynamics to water security research. *Water resources management*. 28: 287-300.
- Cooley, H., Christian-Smith, J. and Gleick, P. 2009. *Sustaining California agriculture in an uncertain future*, Tech. Rep., July, Pac. Inst, Oakland, Calif.
- Darren, L. F., Yuzhou, L., Eike, L. and Minghua, Z. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 374: 16-29.
- Dasgupta, P. (2018). *Climatic Change impacts on foodgrain production in India*. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Forrester, J.W. 1961. *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: The M.I.T. Press.
- Godde, C., Dizze, K., Ash, A., Thornton, P. 2019. Climate change and variability impacts on grazing herds: Insights from a system dynamics approach for semi-arid Australian rangelands. *Glob Change Biol*, 25:3091-3109.
- Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A.M., and Madani, K. 2013. Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 491: 23-39.
- Houghton J.T. 2001 *Climate change 2001*. The scientific

برهمن اساس سه شاخص کارایی به عنوان سیاست‌های سیستمیک در مدل مفهومی جهت بهبود وضعیت سیستم منابع آب حوضه مورد مطالعه شناسایی گردیدند. شاخص کارایی WUI جهت کنترل اثرات منفی ناشی از بهره‌وری نامناسب از منابع آب و در پی آن کاهش زود هنگام این منابع (فعالیت حلقه مصرف آب)، مورد استفاده قرار گرفت. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد نشان از بهره‌وری مناسب از منابع آب موجود در منطقه خواهد داشت. شاخص API نیز جهت کنترل فعالیت حلقه توسعه تک محوری در منطقه، منطقی بودن و یا نبودن تولید بیشتر در منطقه را بررسی نموده و با کنترل توسعه بخش کشاورزی از طریق کنترل افزایش زمین‌های کشاورزی، فعالیت این حلقه را کنترل می‌نماید. حلقه کارایی آخر، با قضاوت از روی شاخص EDI بر تصمیم سیاست‌گذاران، مبنی بر افزایش ارزش افزوده در منطقه بر پایه افزایش فعالیت کشاورزی اثرگذار بوده و از این طریق وابستگی به بخش کشاورزی و در پی آن افزایش آسیب‌پذیری به این بخش را کاهش می‌دهد. زیاد بودن مقدار این شاخص حاکی از وابستگی زیاد اقتصاد منطقه به بخش کشاورزی می‌باشد.

منابع

- منصوری، ب.، احمدزاده، ح.، مساح بوانی، ع.، مرید، س.، دلاور، م. و لطفی، س. ۱۳۹۳. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زربینه رود با استفاده از مدل SWAT. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸(۶): ۱۱۹۱-۱۲۰۳.
- نادری، س.، حجازی زاده، ز.، علیجانی، ب.، حیدری، ح.، عباسپور، ک. ۱۳۹۸. چشم انداز تاثیر تغییر اقلیم آینده بر منابع آب و عملکرد چغندر قند در حوضه دریاچه ارومیه. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.

- investments: hydrologic, agronomic, and economic assessment. *Water Resources Research*, 42: 1-11.
- Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., Nolan. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology* 356: 28– 45.
- Sterman, J. 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill.
- Stojkovic, M. and Slobodan, P. 2019. System Dynamics Approach for assessing the Behaviour of the Lim Reservoir system (Serbia) under Changing Climate Conditions. *Water* 2019, 11, 1620.
- Song, Lironga., and ZHANG, J. 2012. Hydrological response to climate change in Beijiang River Basin Based on the SWAT Model. *Journal of Procedia Engineering* 28: 241–245.
- Souvignet M., Gaese H., Ribbe L., Kretschmer N. and Oyarzún 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-Journal des Sciences Hydrologiques* 55(1): 41-57.
- Ward, F.A. and Pulido-Velazquez, M. 2008. Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47): 18215-18220.
- Wilby R.L. and Dawson C.W. 2007. A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. United Kingdom.
- Xiao-qing, Z., Hui, R., Qi, Y., Chun-lan, H., Hong-hui, Y. 2012. Scenarios simulation on carrying capacity of water resources in Kunming City. *Procedia Earth Planet. Sci.* 5: 107-112.
- Yang, Z., Song, J., Cheng, D., Xia, J., Li, Q., Ahamad, M.I. 2019. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi' an city, China. *J. Environ. Manag.* 230: 221-233.
- Zomorodian, M., Lai, S.H., Homayounfar, M., Ibrahim, S., Fatemi, S.E., and El-Shafie, A. 2018. The state-of-the-art system dynamics application in integrated water resources modeling. *J. Environ. Manag.* 227: 294–304.
- basis 881.
- Huang J., Zhang J., Zhang Z., Xu C., Wang B. and Yao J. 2011. Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25:781-92.
- IPCC., Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H. and Dokken, D.J.(Eds.). 2001. *Special Report on the Regional Impacts of Climate Change, An Assessment of Vulnerability*. Cambridge University Press, UK.
- Kang Y., Khan S., and Ma X. 2015. Analysing Climate Change Impacts on Water Productivity of Cropping Systems in the Murray Darling Basin, Australia. *Irrigation and Drainage*, doi: 10.1002/ird.1914.
- Lane, M.E., Kirshen, P.H. and Vogel, R.M. 1999. Indicators of impact of global climate change on U.S water resources. *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*. 125(4): 194-204.
- Li, Z., Li, C., Wang, X., Peng, C., Cai, Y., Huang, W. 2018. A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in Zhengzhou City, China. *J. Hydrol.* 556: 50-60.
- Madani, K. and Mariño, M.A. 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Water Resources Management*, 23: 2163-2187.
- McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. and White K.S. 2001. *Climate change: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Philip, J.-M., Sanchez-Choliz, J. and Sarasa C. 2014. Technological change in irrigated agriculture in a semiarid region of Spain. *Water Resources Research*, 50: 9221–9235, doi: 10.1002/2014WR015728.
- Shadkam, S., Ludwig, F., van Oel, P., Kirmit, Ç, and Kabat, P. 2016. Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake. *Journal of Great Lakes Research*, 42(5), 942-952.
- Scheierling, S.M., Young, R.A. and Cardon, G.E. 2006. Public subsidies for water-conserving irrigation

Assessment of the Impact of Climate Change and Implementing Policies on Water Supply Vulnerabilities (Case Study: ZarrinehRoud Basin)

Gh. Falaki Ilkhchi¹, H. Ahmadi^{2*}, B. Hesari³

Received: Jan.24, 2020

Accepted: Mar.07, 2020

Abstract

Zarrineh Roud basin plays an important role in supplying water to Lake Urmia and the region's drinking and agricultural needs. Agricultural development, water transfer outside the basin and climate change have reduced the flow into Lake Urmia. In this study, we investigate the simultaneous impact of climate change and managers' policies on the availability of water resources in the Zarrineh Roud basin. For this purpose, first using the AOGCM model and SDSM downscaling model and considering two A2 and B2 emission scenarios, the Minimum and maximum temperature, and rainfall data for 2070 to 2084 are reduced and then basin's change was calculated by using SWAT model. The results showed an average increase in water and temperature stress to 6,29 and 5,27 Celcius and an average decrease in annual discharge into the lake under A2 and B2 emission scenarios. In the next step, a comprehensive dynamic system model of the Zarrineh Roud basin was developed by taking into account the set of factors affecting it, and the impact of inland and out of case study basin on water resources was investigated after validation and calibration of the model. The results indicate a conflict between the agricultural sector and the environmental need of Lake Urmia that increased production and agricultural levels would reduce the inflow into Lake Urmia.

Keywords: Climate change, Dynamics System, Statistical downscaling model (SDSM), SWAT, ZarinehRoud Basin

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

(* - Corresponding Author Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir)