

The Effect of Climate Change on the Hydrological and Agricultural Drought Characteristics in Zarinehrud Basin Using SRI and SSWI Indices and SWAT Model

ZOHREH POURKARIMI¹, MAHNOOSH MOGHADASI^{2*}, ASADOLAH MOHSENI MOVAHED³,
MAJID DELAVAR⁴

1. Master of Science, Water Engineering Department, University of Arak, Arak, Iran

2. Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Arak, Arak, Iran

3. Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Arak, Arak, Iran

4. Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

(Received: Dec. 10, 2017- Revised: Jan. 28, 2018- Accepted: Feb. 18, 2018)

ABSTRACT

In this study the drought characteristics of Zainehrud Basin have been evaluated under climate change condition using Standardized Runoff Index (SRI), Standardized soil moisture Index (SSWI) and SWAT model. The SWAT model was calibrated and validated over the period 1987-2010 using four meteorological stations and five hydrometric stations. The SRI and SSWI indices were calculated for all sub-basins during the base period (1981-2010) based on the runoff and soil moisture derived from SWAT model. Then, the downscaled results of AOGCM models presented at the AR5 under two emission scenarios were introduced to the SWAT model and the drought indices were simulated for the future period (2017-2046) and they were compared with the ones of based period. The results showed that the mean highest occurrence and continuity of drought of the whole basin in the future compared to the based period will increase by 23%, under the scenario 3 (BNU-ESM model under RCP2.6 emission scenario), and by 19.7% under scenario 4 (model BNU-ESM under the RCP8.5 emission scenario) based on SRI and SSWI respectively. Also, according to the results, agricultural drought is more sensitive to climate change than hydrological drought. Thus, it can be said that Zarinehrud basin is still in danger of continuous and long term droughts due to current trend of activities and possible climate changes in near future.

Keywords: Climate Change, Drought, SWAT, Zarrinehrud Basin, SSWI, SRI

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه زرينه رود با استفاده از شاخص های SRI و SSWI و مدل SWAT

زهرة پور کریمی^۱، مه‌نوش مقدسی^{۲*}، اسدا... محسنی موحد^۳، مجید دلآور^۴

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۴. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹)

چکیده

در این تحقیق خصوصیات خشکسالی حوضه زرينه رود، تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از دو شاخص استاندارد شده ی رواناب (SRI) و شاخص رطوبت خاک استاندارد شده (SSWI) و مدل SWAT بررسی شده است. بدین منظور مدل SWAT با استفاده از اطلاعات چهار ایستگاه هواشناسی و پنج ایستگاه هیدرومتری، مورد واسنجی (۱۹۸۷-۱۹۹۹) و اعتبارسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۰) قرار گرفت. سپس بر اساس رطوبت خاک و رواناب شبیه سازی شده توسط مدل، دو شاخص مذکور در همه زیرحوضه ها برای دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) محاسبه شده است. در ادامه با معرفی نتایج ریزمقیاس شده ی دو مدل گردش عمومی جو موجود در گزارش پنجم (AR5) تحت دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 به مدل SWAT، شاخص های خشکسالی برای دوره آینده (۲۰۴۶-۲۰۱۷) شبیه سازی و مقادیر آن با دوره پایه مقایسه گردید. نتایج نشان داد میانگین بیشترین وقوع و تداوم خشکسالی کل حوضه در آینده نسبت به دوره پایه مربوط به شاخص SRI به ترتیب با ۲۳ درصد افزایش تحت سناریوی سه (مدل BNU-ESM تحت سناریو انتشار RCP2.6) و ۱۹٫۷ درصد افزایش در سناریوی چهار (مدل BNU-ESM تحت سناریو انتشار RCP8.5) و شدت خشکسالی مربوط به شاخص SSWI با ۲۴٫۷ درصد افزایش در سناریوهای سه و چهار می باشد. همچنین بر اساس نتایج، خشکسالی کشاورزی (SSWI) بیشتر از خشکسالی هیدرولوژیکی (SRI) نسبت به تغییر اقلیم حساسیت نشان می دهد. بنابراین می توان گفت با ادامه روند کنونی فعالیت های موجود در حوضه و نیز تغییرات اقلیمی محتمل در آینده، حوضه ی زرينه رود همچنان در معرض خطر خشکسالی های متعدد و طولانی قرار دارد.

واژه های کلیدی: تغییر اقلیم، خشکسالی، SWAT، SRI، SSWI

مقدمه

تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از مدل سازی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفته است (Shimola and Krishnaveni, 2014; Musau *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015) در حالی که اثر تغییر اقلیم بر انواع خشکسالی در مطالعات محدودتری انجام شده است (Ashofte and Massah, 2008). با طرح این سؤال که آیا تغییر اقلیم خشکسالی های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی را به یک میزان تحت تأثیر قرار می دهد، در تحقیقی Wang *et al.*, 2011 به ارزیابی این پدیده در سطوح مختلف خشکسالی پرداختند. آنها به کمک مدل هیدرولوژیکی^۱ SWAT و معرفی شاخص جدید تحت نام شاخص استاندارد شده ی رطوبت خاک^۲ (SSWI) در کنار

اهمیت پدیده تغییر اقلیم و خطرات ناشی از آن امروزه به اندازه ای است که آن را در صدر عوامل تهدید آمیز بشر، حتی بالاتر از فقر، سلاح های هسته ای، کمبود غذا و ... در قرن ۲۱ قرار داده است (IPCC, 2007; Kamal and Massah Bavani, 2010). تغییرات آب و هوایی نه تنها به طور قابل توجهی فرآیندهای هیدرولوژیکی در طول دهه های گذشته را تحت تأثیر قرار داده است بلکه همچنان این روند به مراتب شدیدتر از قبل در حوضه های آبریز ادامه دارد (Van Quan and Kim, 2014). از مهم ترین تبعات تغییرات اقلیمی، افزایش وقوع پدیده های حدی چون خشکسالی و سیل است. در بیشتر تحقیقات، تأثیر

1. Soil and Water Assessment Tool
2. Standardized Soil Water Index

* نویسنده مسئول: mah_moghaddasi@hotmail.com

انسانی با توجه به دوره‌های زمانی مختلف می‌تواند مبنای تصمیمات مدیریتی برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل و خشکسالی و همچنین مدیریت بهینه منابع آب باشد. با توجه به تحقیقات فوق در این مطالعه تلاش می‌شود اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه زربینه رود با استفاده از دو شاخص SRI و SSWI و با استفاده از مدل SWAT بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه زربینه رود با وسعتی بیش از ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع که در موقعیت جغرافیایی ۴۵°۴۷ تا ۴۷°۲۰ طول جغرافیایی و ۳۵°۴۱ تا ۳۷°۲۷ عرض جغرافیایی قرار گرفته است، بزرگترین زیر حوضه درجه ۲ دریاچه ارومیه شناخته می‌شود (شکل ۱). مهمترین سد حوضه که منبع اصلی کشاورزی و شرب منطقه است، سد مخزنی شهید کاظمی بوکان (زربینه رود) می‌باشد. این سد در ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی بوکان قرار گرفته و در چرخه هیدرولوژیکی حوضه نقش بسزایی را ایفا می‌کند. مسیر رودخانه اصلی حوضه، از به هم پیوستن چهار شاخه اصلی به نام‌های سقرچای، جیغاتوچای، خرخره‌چای و ساروق‌چای در قسمت جنوب حوضه آغاز می‌شود، پس از عبور از سد زربینه رود و تلاقی با دیگر سرشاخه مهم خود به نام آجرلو، در محل سد انحرافی نوروزلو ادامه پیدا کرده و پس از گذر از شهر میاندوآب به موازات سیمینه رود به سمت دریاچه ارومیه پیش می‌رود و در نهایت در روستای قره گوزلو وارد این دریاچه می‌گردد.

مدل شبیه‌ساز SWAT و داده‌های مورد استفاده

SWAT مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی، پیوسته زمانی با پایه فیزیکی است. این مدل به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز ابتدا حوضه را به قسمت‌های کوچکتری به عنوان زیر حوضه تقسیم می‌کند. هر زیر حوضه نیز بسته به میزان تنوع در خاک، کاربری اراضی و شیب به قسمت‌های کوچکتری به نام واحدهای همگن هیدرولوژیکی^۵ (HRU) تقسیم می‌شود (Arnold et al., 1998). واحدهای پاسخ هیدرولوژیک بر اساس توپوگرافی، نوع کاربری اراضی و ویژگی‌های خاک تقسیم‌بندی می‌گردد که تقسیم‌بندی حوضه به HRUهای کوچکتر موجب افزایش دقت شبیه‌سازی می‌شود (Mansouri et al., 2015). ورودی‌های اصلی مدل SWAT شامل بارش، دمای حداکثر و

شاخص‌های بارندگی استاندارد شده^۱ (SPI) و شاخص رواناب - استاندارد شده^۲ (SRI) به ترتیب به بررسی خشکسالی‌های کشاورزی، هواشناسی و هیدرولوژیکی پرداختند. نتایج نشان داد اثرات خشکسالی هواشناسی بر روی دیگر سطوح خشکسالی یعنی کشاورزی و هیدرولوژیکی تشدیدکننده خواهد بود. همچنین حساسیت خشکسالی کشاورزی به تغییرات اقلیمی بیشتر از دو سطح دیگر (هواشناسی و هیدرولوژیکی) است. در تحقیق دیگری Liu et al., 2012 با استفاده از سه شاخص SPI، SRI و شاخص خشکسالی پالم^۳ (PDSI)، به بازسازی خشکسالی‌های گذشته و پیش‌بینی خشکسالی‌های مشابه در آینده تحت تغییرات اقلیمی پرداختند و عملکرد این سه شاخص را با یکدیگر مقایسه نمودند. بر اساس نتایج این تحقیق، دو شاخص SRI و PDSI در پیش‌بینی خطرات خشکسالی در آینده تحت تأثیر گرمایش حاصل از تغییر اقلیم مناسب‌تر بوده است. Moorhead et al (2015) در منطقه‌ی هایپلنز تگزاس در تحقیقی به شناسایی و ارزیابی یک شاخص مناسب برای پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی پرداختند. بدین منظور مروری بر شاخص‌های خشکسالی با تمرکز بر شناسایی شاخصی با روش محاسبه ساده و در عین حال با کاربرد بهینه در مناطق خشک انجام دادند که بر اساس نتایج، شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق^۴ (SPEI) شاخصی مناسب جهت ارزیابی خشکسالی کشاورزی در این منطقه شناخته شد. Wanders and Wada, 2014 اثر همزمان تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی (کشاورزی و سد) بر خشکسالی هیدرولوژیکی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ثابت کردند تأثیر فعالیت‌های انسانی بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی که در آینده پیش‌بینی می‌شود، قطعی است اما این موضوع یعنی در نظر گرفتن عامل انسانی در شدت بخشی اثرات تغییر اقلیم در اکثر مطالعات کاملاً نادیده گرفته می‌شود. در تحقیق دیگری Sohrabi et al., 2015 شاخص جدیدی تحت عنوان شاخص خشکی رطوبت خاک^۵ (SODI) معرفی نمودند. اساس محاسبه این شاخص مقدار آب مورد نیاز خاک برای رسیدن به ظرفیت زراعی به منظور بررسی دقیق‌تر مشخصات خشکسالی به ویژه در بخش کشاورزی است. همچنین Zhang et al., 2016 در تحقیق خود تحت عنوان ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در جریان حوضه دریاچه پویانگ چین نشان دادند، در نظر گرفتن اثرات ناشی از تغییر اقلیم و نیز اثرات

1. The Standardized Precipitation Index
2. Standardized Runoff Index
3. Palmer Drought Severity Index
4. Soil moisture drought Inde

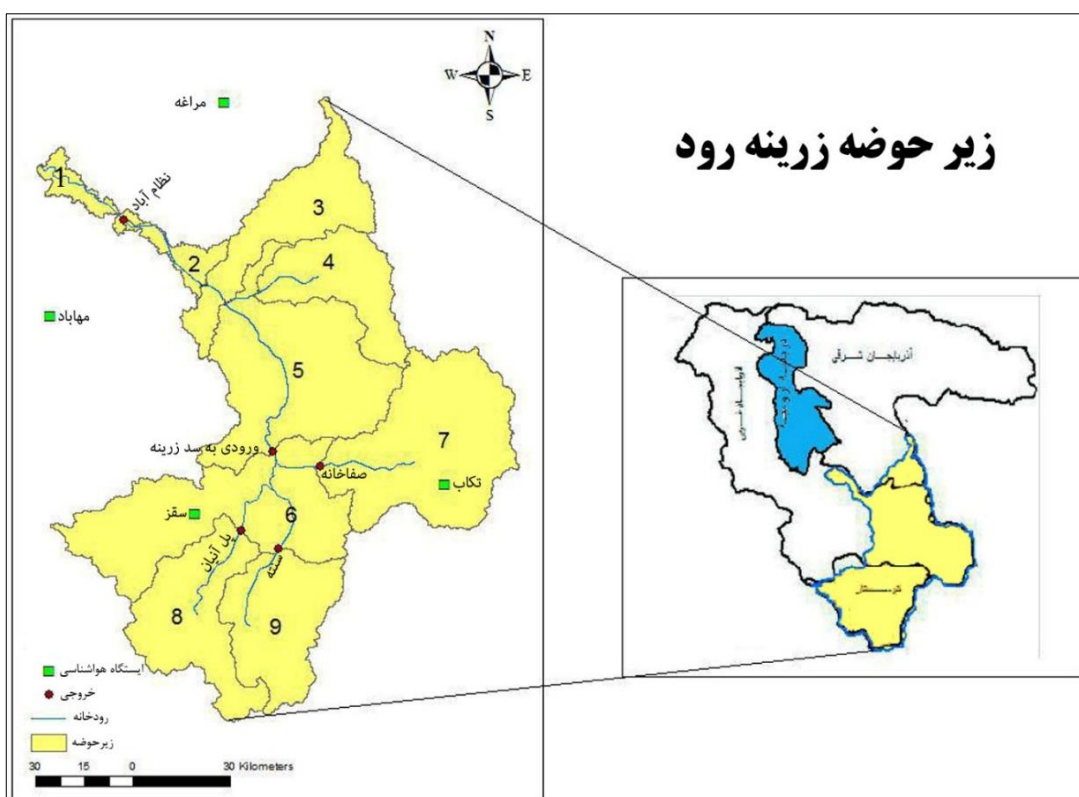
حداقل، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک (شکل ۲-ب) و نقشه رقومی ارتفاعی می‌باشد. در این تحقیق شبیه‌سازی حوضه و شبکه آبراهه‌ها در مدل SWAT به کمک لایه رقومی کاربری اراضی (شکل ۲-الف) با اندازه سلولی ۱۰۰۰ متری تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در ۱۳۸۳ و نقشه خاک (FAO, 1996) و لایه رقومی ارتفاع^۱ (DEM) (شکل ۲-ج) با اندازه سلولی ۳۰ متری انجام شد. چرخه هیدرولوژیک که توسط SWAT شبیه‌سازی می‌شود بر اساس معادله بیلان زیر استوار

1-Digital Elevation Model

است:

(رابطه ۱)

$SW_t = SW_0 + \sum^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i$
 در این معادله، SW_t میزان نهایی آب در خاک (میلی‌متر آب) در روز t ، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر آب)، بر سب روز و R_{day} میزان بارندگی در روز i (میلی‌متر آب)، Q_{surf} مقدار رواناب در روز i (میلی‌متر آب)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i (میلی‌متر آب)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i از منطقه ریشه خارج می‌شود (میلی‌متر آب) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i (میلی‌متر آب) است.



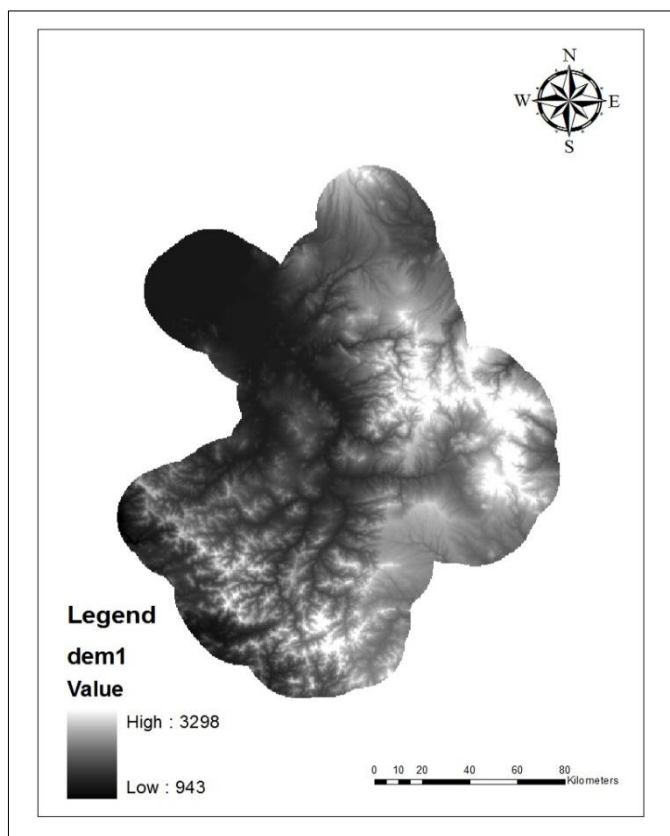
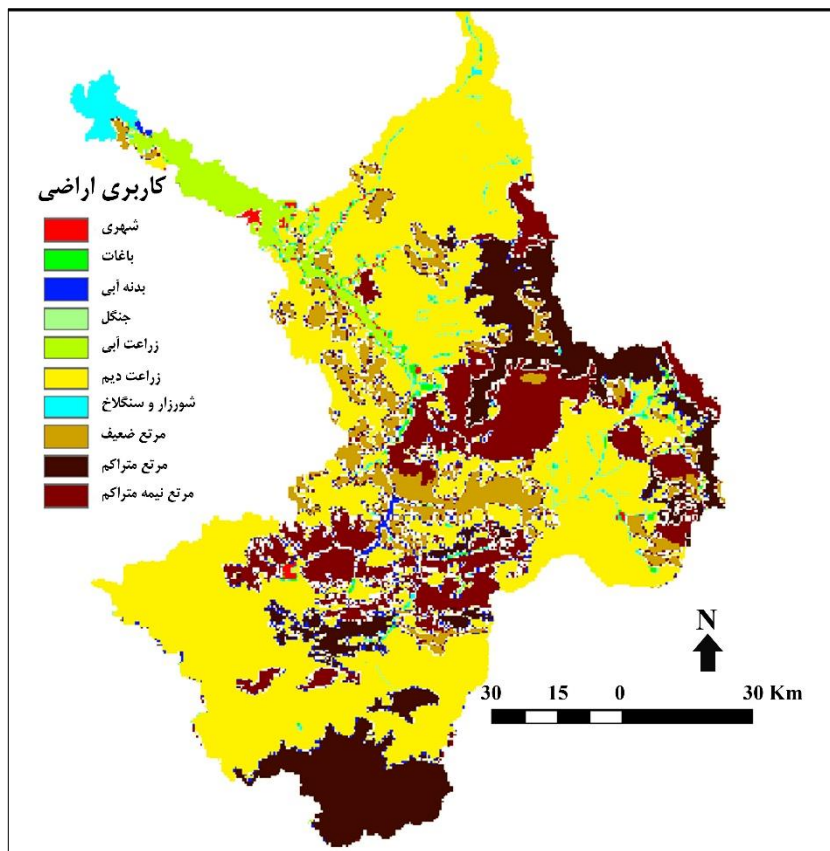
شکل ۱. موقعیت حوضه زیننه رود، زیرحوضه‌های آن و ایستگاه‌های مورد استفاده

داده‌های روزانه دما و بارندگی چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مورد نیاز مدل SWAT از ایستگاه‌هایی که در منطقه مطالعاتی قرار داشته و یا نزدیک‌ترین فاصله را با حوضه مطالعاتی داشته‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است. موقعیت و اطلاعات چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۹ برای واسنجی و ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ جهت اعتبارسنجی استفاده شد، مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. (جدول ۲).

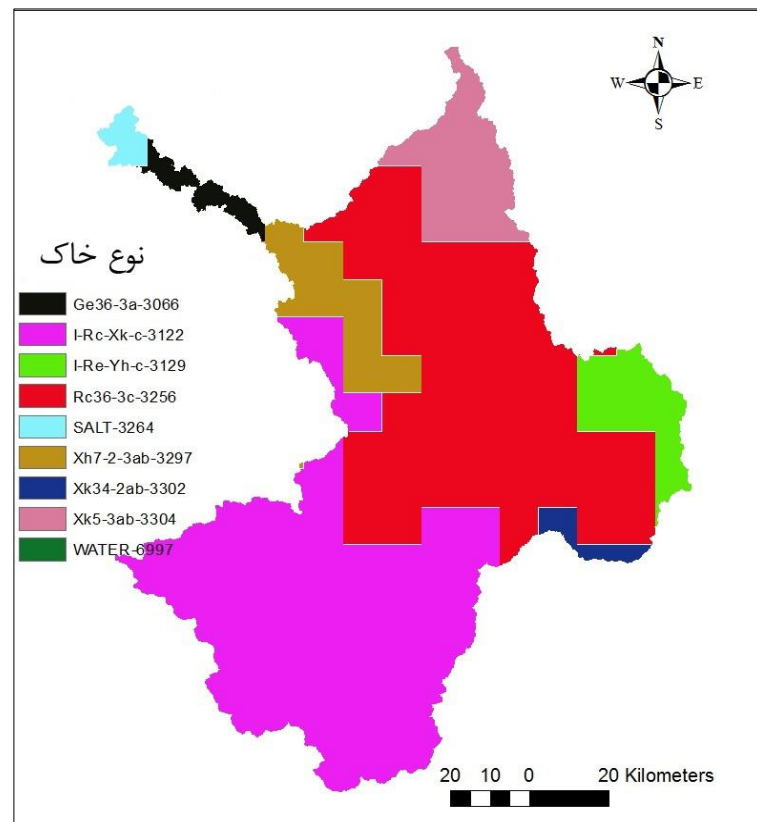
داده‌های روزانه دما و بارندگی چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مورد نیاز مدل SWAT از ایستگاه‌هایی که در منطقه مطالعاتی قرار داشته و یا نزدیک‌ترین فاصله را با حوضه مطالعاتی داشته‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است. موقعیت و اطلاعات چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک طی سال‌های

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	طول دوره آماری
سقز	۴۶/۲۶	۳۶/۲۵	۱۵۲۲/۸	۲۰۱۰-۱۹۸۷
تکاب	۴۷/۱۱	۳۶/۳۸	۱۷۶۵	۲۰۱۰-۱۹۸۷
مهاباد	۴۵/۷۱	۳۶/۷۶	۱۳۸۵	۲۰۱۰-۱۹۸۷
مراغه	۴۶/۲۶	۳۷/۴۰	۱۴۷۷/۷	۲۰۱۰-۱۹۸۷



الف



ج

ب

شکل ۲. الف - نقشه کاربری اراضی، ب-نقشه خاک، ج- نقشه DEM حوضه زربینه رود

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

ایستگاه	رودخانه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	طول دوره آماری
پل آنیان	جیغاتوچای	۴۶/۴۳	۳۶/۲	۱۴۵۵	۲۰۰۷-۱۹۸۸
سنته	خرخره چای	۴۶/۵۵	۳۶/۱۷	۱۵۸۱	۲۰۰۷-۱۹۸۸
صفاخانه	ساروق چای	۴۶/۷	۳۶/۴	۱۵۳۳	۲۰۰۷-۱۹۸۸
ورودی به سد	زربینه رود	۴۶/۵۳	۳۶/۴۲	۱۳۸۳	۲۰۰۷-۱۹۸۸
نظام آباد	زربینه رود	۴۵/۹۴	۳۷/۰۵	۱۲۸۲	۲۰۰۷-۱۹۸۷

تغییر اقلیم و تولید سناریوهای اقلیمی

در این تحقیق دو مدل گردش عمومی جو از جدیدترین گزارش IPCC^۱ تحت عنوان گزارش پنجم^۲ (AR5)، با نام‌های CCSM4 و BNU-ESM استفاده شده است (جدول ۳). سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در گزارش پنجم تحت خانواده RCPs^۳ به تصویب رسیده‌اند. سناریوهای خانواده RCP بر اساس میزان تغییر در انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی و تغییرات کاربری اراضی و در چهار دسته با عناوین: RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 بر اساس میزان سطح واداشت‌های تابشی^۴ که به ترتیب برای هر کدام از آنها برابر با ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸ (وات بر مترمربع) است، نامگذاری شده‌اند (Van Vuuren et al., 2011). در بین این سناریوها، سناریوی

RCP2.6 حالت خوش‌بینانه و سناریوی RCP8.5 حالت بحرانی را در نظر می‌گیرد که در این تحقیق نیز از این دو سناریو استفاده شده است. برای ریزمقیاس نمایی از روش Change Factor استفاده شده که در این روش برای دما از اختلاف بین دو متغیر و برای بارش از نسبت بین آنها استفاده می‌شود. (رابطه ۲)

$$P = P_{obs} * ((P_{(GCM.fut.i)}) / (P_{(GCM.base.i)}))$$

$$T = T_{obs} + ((T_{(GCM.fut.i)}) - (T_{(GCM.base.i)})) \quad (۳)$$

در این روابط P_{obs} نشان‌دهنده سری زمانی بارش ماهانه مشاهداتی در دوره پایه، $\overline{P_{GCM.fut.i}}$ میانگین ۳۰ ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM در دوره‌های آتی، $\overline{P_{GCM.base.i}}$ میانگین ۳۰ ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM در دوره مشاهداتی (یکی از دوره‌های پایه‌ی فوق‌الذکر) و P سری زمانی سناریوی اقلیمی بارش است. تعمیم این موارد برای دما نیز صادق بوده و نتیجه، سری زمانی سناریو اقلیمی دما نام دارد (Massah Bavani, 2005).

1 - Intergovernmental Panel on Climate Change
2 - Assessment Report 5
3- Representative Concentration Pathways
4 - Radiative forcing

جدول ۳. مشخصات مدل‌های استفاده شده در تحقیق (www.ccsn.ec.gc.ca)

نام مدل	موسسه، کشور	قدرت تفکیک مکانی
CCSM4	مرکز ملی تحقیقات جوی، ایالات متحده آمریکا	1.25° × 0.9°
BNU-ESM	دانشکده علوم تغییرات جهانی و سیستم زمین، دانشگاه نرمال پکن، چین	2.8° × 2.8°

دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر SPI از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد (Wu et al., 2007).

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \quad (۴)$$

که در آن X_i بارندگی در هر ماه، \bar{X} میانگین بارندگی در مقیاس زمانی معین، S_x انحراف معیار بارندگی در مقیاس زمانی معین است. در این تحقیق هر دو این پارامترها (رواناب و رطوبت خاک) توسط مدل SWAT برای دوره پایه و آینده شبیه‌سازی شده‌اند. بر پایه نتایج حاصل از تحقیقات متعدد، شاخص خشکسالی در مقیاس‌های بلند مدت (۱۲ یا ۲۴ ماهه) جهت بررسی اثرات بر منابع آبی و دوره‌های آینده مناسب هستند (Buttafuoco et al., 2015). بنابراین هر دو شاخص در مقیاس

شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی

برای بیان خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی به ترتیب شاخص استاندارد شده‌ی رواناب SRI و شاخص استاندارد شده‌ی رطوبت خاک SSWI انتخاب شدند. روش محاسبه این شاخص‌ها کاملاً شبیه روش محاسبه شاخص SPI بوده، با این تفاوت که پارامتر ورودی به جای بارش در SRI رواناب و در SSWI رطوبت خاک است (Wang et al., 2011; Vu et al., 2015). برای محاسبه‌ی شاخص SPI که از شناخته‌ترین شاخص‌ها است، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهیانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن محاسبه شده، سپس با انتقال احتمال تجمعی به

نظر گرفتن عامل انسانی نیز ابتدا سد زرینه رود و مدیریت‌های کشاورزی که شامل معرفی کشت‌های غالب منطقه، میزان مصرف آبی و نیز منابع آبی آنها می‌گردد به مدل معرفی شدند و سپس رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل در هر زیر حوضه جهت محاسبه شاخص SRI استخراج شد. تعیین طبقات مختلف خشکسالی دو شاخص نیز بر اساس شاخص SPI از طبقه‌بندی مک کی (جدول ۴) انجام شده است.

۱۲ ماهه و به کمک نرم‌افزار DIP محاسبه شدند (مرید، ۱۳۸۴). گفتنی است مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی رواناب طبیعی و واقعی بوده که در شبیه‌سازی رواناب طبیعی، سدها، آب‌بندها و مصارف کشاورزی در روند شبیه‌سازی دخالت داده نشده و فقط بارندگی، رواناب سطحی و جریانات آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شوند. در شبیه‌سازی رواناب واقعی مصارف کشاورزی و سدهای موجود در حوضه که در مدل معرفی شده باشند نیز در شبیه‌سازی دخالت داده می‌شوند. در این تحقیق به منظور در

جدول ۴. طبقه‌بندی خشکسالی (McKee et al., 1993)

ترسالی ملایم ۱,۰۰ تا ۱,۴۹	۰,۹۹- تا صفر	خشکسالی خفیف
ترسالی شدید ۱,۵۰ تا ۱,۹۹	-۱ تا -۱,۴۹	خشکسالی متوسط
ترسالی بسیار شدید ۲ و بالاتر	-۱,۵۰ تا -۱,۹۹	خشکسالی شدید
	≤ -۲	خشکسالی بسیار شدید

به نام SWAT-CUP^۱ جهت آنالیز حساسیت و واسنجی آن توسعه داده شد (Abbaspour et al., 1999). بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT در این تحقیق با استفاده از الگوریتم SUFI-2^۲ در برنامه SWAT-CUP صورت گرفته است. در این الگوریتم تمام عدم قطعیت‌ها (پارامتر، مفهوم‌سازی مدل، ورودی‌ها) در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر در نظر گرفته شده و روند کالیبراسیون به گونه‌ای است که در نهایت بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در دامنه ۹۵ درصد عدم قطعیت قرار گیرند. ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس دو پارامتر نش-ساتکلیف (ENS) و ضریب تعیین (R^2) انجام شد که مقدار NS در واقع تفسیر عملکرد مدل و R^2 درجه همراستا بودن داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

نتایج و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی حوضه، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و با معرفی نقشه‌های DEM (جهت محاسبه تغییرات شیب)، کاربری اراضی و خاک حوضه به مدل SWAT. حوضه به ۹ زیر حوضه تقسیم شد که این ۹ زیر حوضه خود به ۱۹۷ واحد هیدرولوژیکی یکسان (HRU) تقسیم گردید. پس از تشکیل HRUها، مدیریت‌های کشاورزی مربوط به هر محصول براساس آمار موجود در منطقه به مدل معرفی شدند (Ahmadzade, 2012). پس از این مرحله، مدل با استفاده از آمار دبی پنج ایستگاه هیدرومتری در دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۹ مورد واسنجی و در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت که نتایج آن به تفکیک هر ایستگاه در جدول (۵) آمده است. به دلیل زیاد بودن پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی همزمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی در این مدل، مدل جدیدی

1 -SWAT Calibration and Uncertainty Programs

2 -Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2)

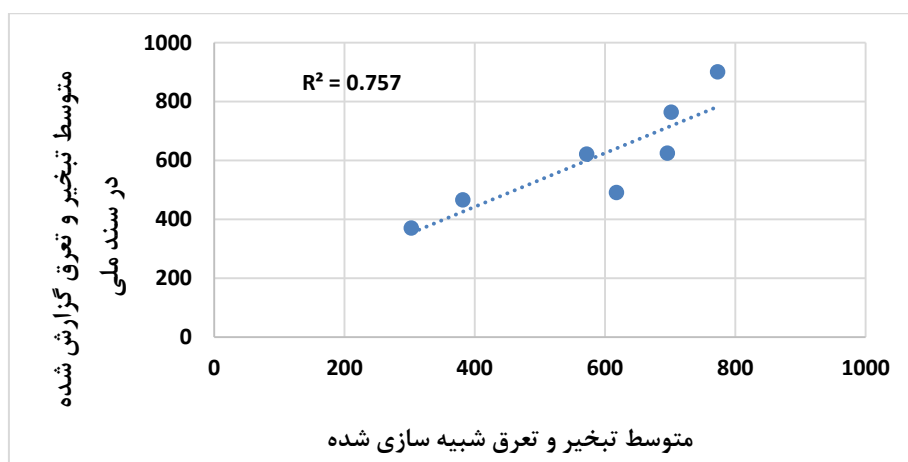
جدول ۵. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

شماره ایستگاه	رودخانه	ایستگاه	واسنجی		اعتبارسنجی			
			دوره آماری	NS	R^2	دوره آماری	NS	R^2
۱	جیغاتوچای	پل آنیان	۱۹۹۹-۱۹۸۸	۰/۸۱	۰/۷۰	۲۰۰۰-۲۰۰۷	۰/۸۳	۰/۵۳
۲	خرخره چای	سنته	۱۹۹۹-۱۹۸۸	۰/۸۱	۰/۵۹	۲۰۰۰-۲۰۰۷	۰/۸۰	۰/۷۳
۳	ساروق چای	صفاخانه	۱۹۹۹-۱۹۸۸	۰/۷۲	۰/۶۹	۲۰۰۰-۲۰۰۷	۰/۸۶	۰/۶۳
۴	زرینه رود	ورودی به سد	۱۹۹۹-۱۹۸۸	۰/۸۵	۰/۸۲	۲۰۰۰-۲۰۰۷	۰/۸۸	۰/۷۴
۵	زرینه رود	نظام آباد	۱۹۹۷-۱۹۸۷	۰/۶۴	۰/۴۲	۱۹۹۸-۲۰۰۷	۰/۵۴	۰/۴۰

شاخص خشکسالی دوره پایه

پس از مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، مدل برای دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) اجرا شد و با استفاده از پارامترهای رطوبت خاک و رواناب واقعی شبیه‌سازی شده، به ترتیب شاخص‌های SSWI و SRI برای این دوره و برای هر ۹ زیر حوضه محاسبه گردید. ارزیابی خصوصیات خشکسالی در دوره پایه و آینده بر اساس سه مشخصه شدت، مدت و فراوانی خشکسالی تحت سناریوهای مختلف انجام شد. نتایج این بخش بر اساس بیشترین، طولانی‌ترین و شدیدترین خشکسالی در جدول (۶) ارائه شده است.

همچنین با تنظیم تقویم زراعی محصولات غالب منطقه (گندم، جو، سیب‌زمینی، گوجه، چغندرقلند، یونجه و سیب)، نیاز آبی آنها و همچنین تنظیم پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق و عملکرد محصول در مدل SWAT، مدل بر اساس تبخیر و تعرق واقعی نیز مورد واسنجی قرار گرفت و سپس متوسط مقادیر تبخیر و تعرق سالانه شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر گزارش شده در سند ملی آب مقایسه گردید (جدول ۶). از آنجا که اطلاعات مشاهداتی در خصوص تبخیر و تعرق واقعی محصولات در دسترس نمی‌باشد و تنها مرجع قابل استناد در کشور در این زمینه سند ملی آب است، لذا به منظور بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی این متغیر، از اطلاعات این سند استفاده گردید (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده و موجود در سند ملی آب

جدول ۶. مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده و موجود در سند ملی آب برای همه محصولات

محصول	گندم	جو	سیب‌زمینی	گوجه	چغندرقلند	یونجه	سیب
متوسط مقادیر تبخیر و تعرق حداکثر گزارش شده از سند ملی آب (میلی‌متر)	۳۸۲	۳۰۳	۶۱۸	۵۷۲	۶۹۶	۷۷۳	۷۰۲
متوسط مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل	۴۴۶	۴۰۶	۵۷۶	۶۶۲	۸۰۰	۸۶۹	۸۰۰

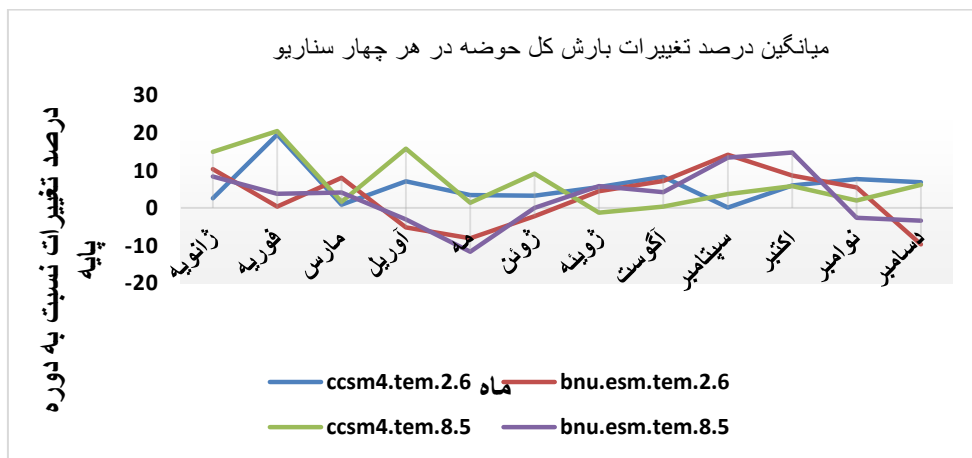
جدول ۶. نتایج خصوصیات خشکسالی‌های حدی حوضه مطالعاتی در دوره پایه

شدت (SRI)	مدت (SRI)	فراوانی (SRI)	شدت (SSWI)	مدت (SSWI)	فراوانی (SSWI)	زیر حوضه
-۳/۴۴	۴۰	۹	۲/۳	۴۰	۶	۱
-۳/۵	۴۰	۱۰	۲/۴۳	۳۹	۸	۲
-۳/۵	۴۰	۱۰	۱/۷۷	۷۳	۶	۳
-۳	۳۹	۱۰	۲/۰۵	۵۷	۶	۴
-۳/۰۵	۴۶	۹	۲/۱۲	۳۸	۷	۵
-۲/۹۵	۴۶	۱۰	-۲	۳۷	۸	۶
-۲/۲۴	۴۸	۸	۲/۸۳	۵۴	۴	۷
-۳/۵	۴۶	۸	۲/۴۶	۴۵	۹	۸
-۳/۲	۴۴	۸	۲/۱۲	۴۳	۷	۹

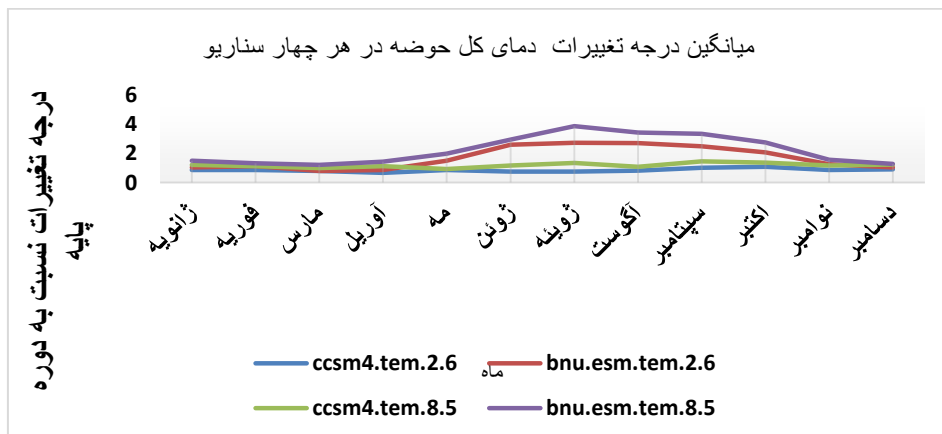
شاخص خشکسالی در دوره آینده

بررسی تغییرات آب و هوایی آینده بر اساس ریز مقیاس نمایی داده‌های دو مدل CCSM4 و BNU-ESM تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 برای ۳۰ سال آینده (۲۰۱۷-۲۰۴۶) و نسبت به داده‌های پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) به دست آمد. در مجموع ۴ سناریو در این تحقیق در نظر گرفته شده است: سناریو ۱ (مدل CCSM4 تحت سناریو انتشار RCP2.6)، سناریو ۲ (مدل CCSM4 تحت سناریو انتشار RCP8.5)، سناریو ۳ (مدل BNU-ESM تحت سناریو انتشار RCP2.6) و سناریو ۴ (مدل BNU-ESM تحت سناریو انتشار RCP8.5). بر اساس نتایج ۴ سناریو میانگین دمای کل حوضه در ۳۰ سال آینده به طور متوسط افزایش خواهد یافت که بیشترین مقدار آن برابر با ۴/۰۶ درجه در سناریو ۴ در ایستگاه تکاب است (شکل ۵). روند تغییرات بلند مدت سالانه بارش کل حوضه با وجود برخی نوسانات روندی افزایشی دارد. بیشترین افزایش بارش در ایستگاه سقز تحت سناریو ۲ پیش‌بینی می‌شود که ۲۳ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت (شکل ۴).

بیشترین وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی (SRI) در دوره پایه برابر با عدد ۱۰ به دست آمد که در زیر حوضه‌های ۲، ۳، ۴ و ۶ روی می‌دهد. طولانی‌ترین خشکسالی نیز برابر با ۴۸ ماه در زیر حوضه ۷ اتفاق می‌افتد. شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی اما در دوره پایه در حوضه‌های ۲، ۳ و ۸ دیده می‌شود و برابر با ۳/۵- است. لازم به توضیح است که زیر حوضه‌های ۲ و ۳ در قسمت شمالی حوضه زرينه‌رود و پایین‌دست سد (زیر حوضه ۶) قرار گرفته‌اند. بر اساس شاخص SSWI، بیشترین وقایع خشکسالی کشاورزی در دوره‌ی پایه برابر با عدد ۹ بوده که در زیر حوضه ۸ روی می‌دهد. بیشترین تداوم خشکسالی برابر با ۷۳ ماه در زیر حوضه ۳ دیده می‌شود و شدیدترین خشکسالی کشاورزی در حوضه ۷ رخ داده که مقدار ۲/۸۳- را نشان می‌دهد. زیر حوضه‌ی ۷ شاهد بیشترین تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی است و همین زیر حوضه شاهد شدیدترین خشکسالی کشاورزی است؛ که تأثیر متقابل این دو نوع خشکسالی را بر یکدیگر بیان می‌کند. همچنین زیر حوضه‌ی ۳ که در آن خشکسالی هیدرولوژیکی شدید رخ می‌دهد در خشکسالی کشاورزی نیز بیشترین تداوم را نشان می‌دهد.



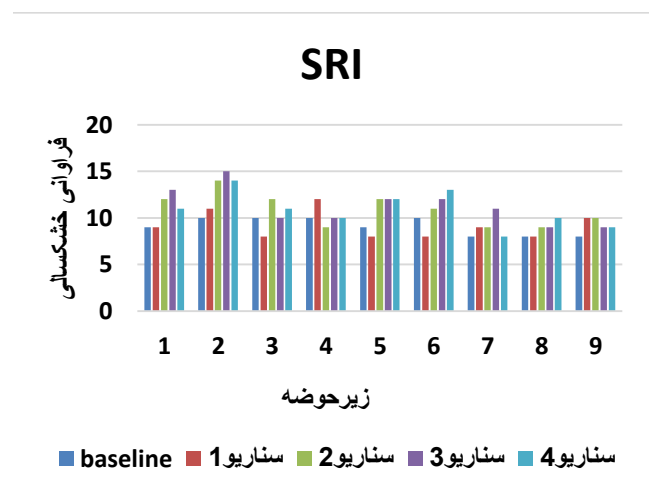
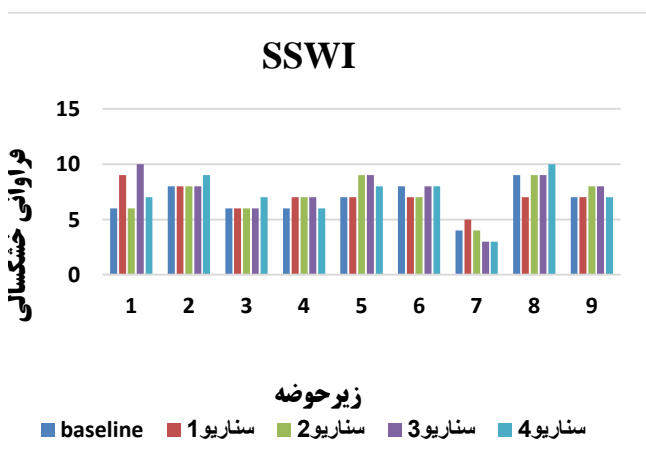
شکل ۴. سری‌های زمانی بارش بر اساس پیش‌بینی هر ۴ سناریو



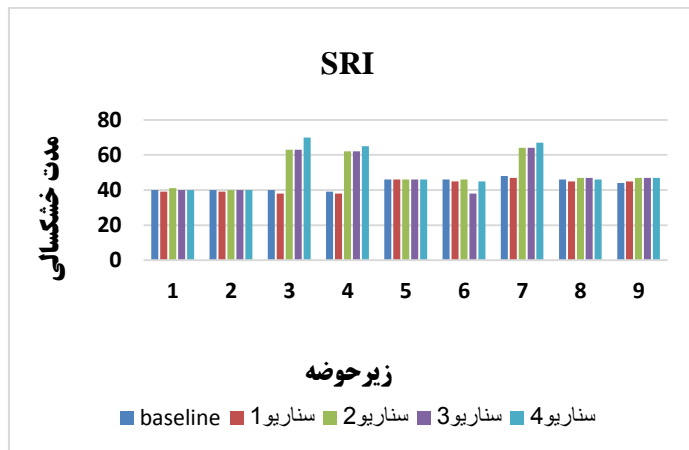
شکل ۵. سری‌های زمانی دما بر اساس پیش‌بینی هر ۴ سناریو

بقیه سناریوها طول دوره هر دو نوع خشکسالی به طور میانگین در کل حوضه افزایش خواهد یافت. تنها در سناریو ۱ شاهد کاهش تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی نسبت به زمان پایه هستیم که میزان آن در خشکسالی کشاورزی بیشتر است. نکته‌ی قابل ملاحظه‌ی دیگر در مورد بیشترین تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی است که در دوره پایه در زیر حوضه ۷ و در دوره آینده در زیر حوضه ۳ دیده می‌شود. شدیدترین میزان خشکسالی هیدرولوژیکی برابر $3/68$ - خواهد بود که نسبت به دوره پایه که $3/5$ - است، افزایش نشان می‌دهد. این مقدار در سناریوی ۳ و ۴ و در زیر حوضه‌ی ۲ اتفاق می‌افتد. با تفاوت کمی زیر حوضه ۱ نیز شاهد خشکسالی هیدرولوژیکی شدیدی خواهد بود (شکل ۷). شدت خشکسالی در این زیر حوضه برابر با $3/63$ - است که تحت سناریوی ۴ رخ خواهد داد. در خشکسالی کشاورزی بیشترین شدت برای دوره آینده مقداری برابر با $3/58$ - دارد که در زیر حوضه ۹ و تحت سناریوی ۴ رخ می‌دهد. با توجه به مکان زیر حوضه ۹، نزدیکترین ایستگاه‌های سینوپتیک به آن سقز و تکاب هستند که این ایستگاه‌ها تحت این سناریو بیشترین افزایش دما را پیش‌بینی می‌کنند. رطوبت خاک شدیداً تحت تأثیر افزایش دما قرار دارد بنابراین خشکسالی کشاورزی نسبت به تغییر اقلیم حساسیت بیشتری نشان می‌دهد (شکل ۸).

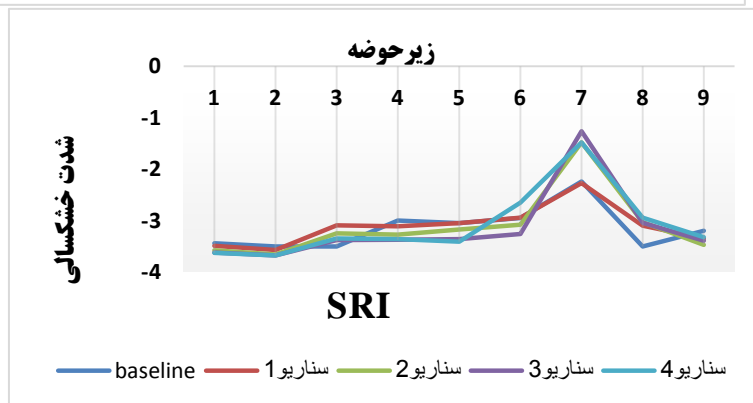
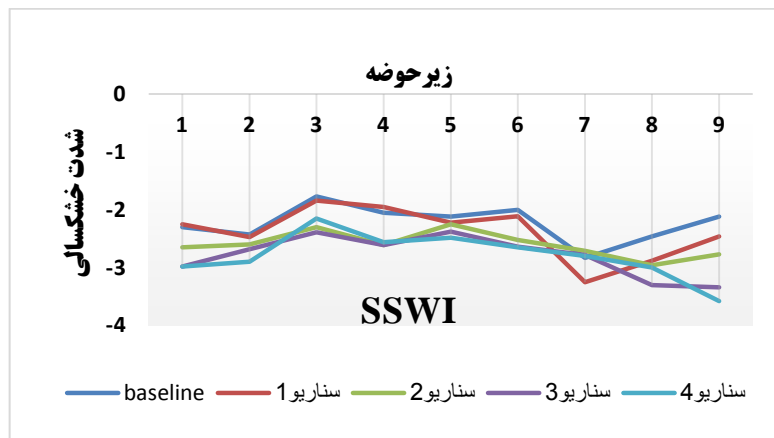
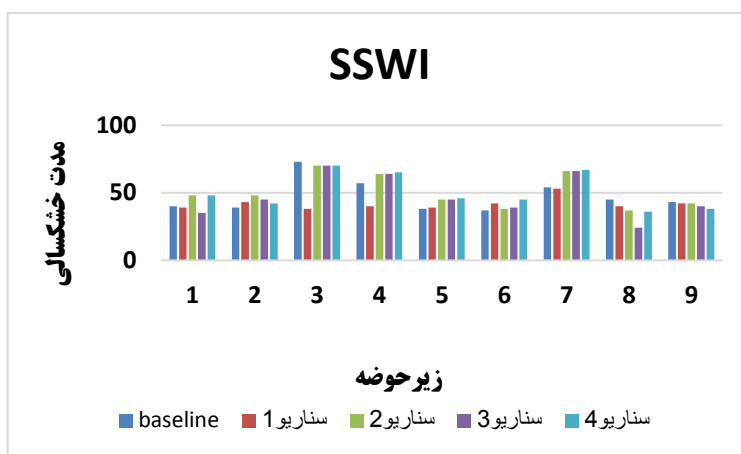
به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی، نتایج ریزمقیاس شده سناریوها به مدل SWAT معرفی و این بار مدل برای دوره ۳۰ ساله آینده (۲۰۴۶-۲۰۱۷) اجرا شد و سپس با استفاده از خروجی آن شاخص‌های خشکسالی مورد نظر محاسبه گردید. بیشترین وقوع خشکسالی در آینده بر اساس شاخص SRI برابر با ۱۵، تحت سناریو ۳ و در زیر حوضه ۲ روی خواهد داد که نسبت به دوره پایه به مقدار ۵ واحد بیشتر است. بر اساس شاخص SSWI بیشترین وقوع خشکسالی کشاورزی برابر با عدد ۱۰ پیش‌بینی می‌شود که تحت سناریو ۳ در زیر حوضه ۱ و تحت سناریو ۴ در زیر حوضه ۸ روی می‌دهد. تحت همه سناریوها و در کل حوضه، خشکسالی کشاورزی تعداد وقوع کمتری نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی دارد. بر اساس نتایج، در همه‌ی سناریوها میانگین تعداد خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی کل حوضه نسبت به دوره‌ی پایه افزایش خواهد یافت (شکل ۶). طولانی‌ترین مدت خشکسالی هیدرولوژیکی در ۳۰ سال آینده برابر با ۷۰ ماه است که در سناریو ۴ و زیر حوضه ۳ رخ می‌دهد. گفتنی است طولانی‌ترین خشکسالی کشاورزی نیز برابر با ۷۰ ماه پیش‌بینی می‌شود که در همین زیر حوضه و تحت همین سناریو مشاهده می‌گردد. همانطور که پیشتر آمد بیشترین افزایش دمای پیش‌بینی شده، تحت همین سناریو (سناریو ۴) رخ می‌دهد و نشان می‌دهد افزایش دما عاملی مهم در شدت‌بخشی خصوصیات خشکسالی است. به جز سناریو ۱ در



شکل ۶. الف-فراوانی بر اساس شاخص SSWI. ب-فراوانی بر اساس شاخص SRI



شکل ۷. الف-تداوم بر اساس شاخص SSWI. ب-تداوم بر اساس شاخص SRI



شکل ۸. پ- شدت بر اساس شاخص SSWI. ت- شدت بر اساس شاخص SRI

خلاصه و جمع‌بندی

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه‌ی زربینه‌رود با استفاده از مدل SWAT است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های کمی رواناب و رطوبت خاک می‌باشد. نتایج نشان داد واکنش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی به تغییرات اقلیمی یکسان نخواهد بود و خشکسالی کشاورزی بیشتر نسبت به تغییرات اقلیمی حساسیت نشان می‌دهند. تفاوت‌های موجود در خصوصیات هر دو شاخص (شدت، مدت، فراوانی) نشان

داد، جهت ارزیابی بهینه‌ی خشکسالی، در نظر گرفتن نوع خشکسالی و انتخاب شاخص مناسب در حصول نتایج بهتر، از اهمیت بالایی برخوردار است. چنانچه در این تحقیق دیده شد نتایج حاصل از دو شاخص در وقوع، شدت و مدت خشکسالی با یکدیگر تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت در ۳۰ سال آینده وقوع و تداوم خشکسالی (هر دو نوع) به طور میانگین در کل حوضه و تحت همه سناریوها روند افزایشی می‌یابد. همچنین شدت خشکسالی بویژه خشکسالی کشاورزی به طور میانگین در کل حوضه افزایش خواهد یافت.

REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Sonnleitner, M. A. and Schulin, R. (1999). Uncertainty in estimation of soil hydraulic parameters by inverse modeling: example lysimeter experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3), 501-509.
- Ahmadzade, H. (2012). Estimation of agricultural water productivity by using SWAT (A case study, Zarrinehrud basin). Ms.c. thesis, Tarbiat Modarres University (In Persian).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Ashofte, P. and Massah Bavani, A. (2008). The Influence of Uncertainty on Flood Diversion Case Study of Aydoghmoush Basin, East Azarbaijan, Iran. *Water Resources Research*, 5(2).
- Buttafuoco, G., Caloiero, T. and Coscarelli, R. (2015). Analyses of drought events in Calabria (southern Italy) Using Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management*, 29(2), 557-573.
- Kamal, A. and Massah Bavani, A. (2010). The impact of climate fluctuations on runoff with the involvement of uncertainty hydrological models. *Journal of soil and water*, 5, 920-931 (In Persian).
- Liu, L., Hong, Y., Bednarczyk, C. N., Yong, B., Shafer, M. A., Riley, R. and Hocker, J. E. (2012). Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in Blue River Basin, Oklahoma. *Water Resources Management*, 26(10), 2761-2779.
- Vu, M. T., Raghavan, V. S., & Liang, S. Y. (2015). Ensemble climate projection for hydro-meteorological drought over a river basin in Central Highland, Vietnam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(2), 427-433.
- Massah Bavani A. (2005). Assessing the Risk of Climate Change and its Impact on Water Resources, Case study: Zayandehrud Basin. Ph.D. Deteration, Tarbiat Modares University.
- Mansouri, B., Ahmadzade, H., Massah Bavani, A., Morid, S., Delavar, M. and Lotfi, S. (2015). Assessment of climate change impacts on water resources in zarrinehrud basin using SWAT model. *Journal of Water and Soil*, 28(6), 1191-1203 (In Persian).
- Moorhead, J. E., Gowda, P. H., Singh, V. P., Porter, D. O., Marek, T. H., Howell, T. A. and Stewart, B. A. (2015). Identifying and Evaluating a Suitable Index for Agricultural Drought Monitoring in the Texas High Plains. *Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 807-820.
- Musau, J., Sang, J., Gathenya, J. and Luedeling, E. (2015). Hydrological responses to climate change in Mt. Elgon watersheds. *Journal of Hydrology Regional Studies*. 3, 233-246.
- Van Quan, N. and Kim, G. (2014). Assessment of climate change effects on future drought levels by combining a hydrological model and Standardized Precipitation Index (SPI) index in the Nakdong river basin, Korea. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 6(9), 239-251.
- Shimola, K. and Krishnaveni, M. (2014). Sensitivity of SWAT simulated reservoir inflow to climate change in a semiarid basin. *MAUSAM*, 66(2), 181-186.
- Sohrabi, M. M., Ryu, J. H., Abatzoglou, J. and Tracy, J. (2015). Development of soil moisture drought index to characterize droughts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(11), 04015025.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F. and Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5.
- Wanders, N. and Wada, Y. (2014). Human and climate impacts on the 21 st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 526, 208-220.
- Wang, D. Hejazi, M., Cai, X. and Valocchi, A. J. (2011). Climate change impact on meteorological agricultural and hydrological drought in central Illinois. *Water Resources Research*, 47(9).
- Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of*

Climatology, 27(1), 65-79.

Zhang, Y., Su, F., Hao, Z., Xu, C., Yu, Z., Wang, L. and Tong, K. (2015). Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River Basin, *Hydrological Processes*, 29(20), 4379-4397.

Zhang, Q., Liu, J., Singh, V., Gu, X. and Chen, X. (2016). Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang lake basin, China. *Hydrological Processes*, 30(14), 2562-2576.