

یادداشت تحقیقاتی

ارزیابی خشکسالی کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم با مدل SWAT (مطالعه موردی: قسمتی از حوضه آبریز اترک)

مهديه پورنامداری^۱، حسین ثنایی نژاد^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

چکیده

تعیین خصوصیات اقلیمی و هیدرولوژیکی هر حوضه آبریز در مطالعات اقلیم کشاورزی و منابع آب اهمیت دارد. دیدبانی عوامل هواشناسی به ویژه بارندگی، دما و نیز پایش خشکسالی نقش بسزایی در شناخت شرایط حوضه آبریز خواهد داشت. پژوهش حاضر با هدف تعیین شرایط خشکسالی در محدوده زیرحوضه رودخانه اترک با استفاده از مدل SWAT انجام شد. بیشترین میزان وقوع خشکسالی در آینده بر اساس شاخص SRI برابر با ۱۵ و تحت سناریوی ۳ (مدل BNU ESM, RCP2.6) روی خواهد داد که نسبت به دوره پایه، ۵ واحد بیشتر است. بر اساس شاخص SSWI بدترین وقوع خشکسالی در آینده برابر با عدد ۱۰ پیش‌نگری می‌شود که تحت سناریوی ۳ روی می‌دهد. در مجموع، تحت تمامی سناریوها و در کل محدوده مورد مطالعه، خشکسالی کشاورزی تعداد وقوع کمتری نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی دارد. بر اساس نتایج، در تمامی سناریوها، میانگین تعداد خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. طولانی‌ترین مدت خشکسالی هیدرولوژیکی در طی ۳۰ سال آینده برابر با ۷۰ ماه بوده که در سناریو ۴ (مدل BNU ESM, RCP8.5) رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که طولانی‌ترین دوره خشکسالی کشاورزی نیز برابر با ۷۰ ماه محاسبه شده است که تحت سناریو ۴ صورت می‌گیرد. نتایج نشان داد که واکنش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی به تغییر اقلیم یکسان نخواهد بود و خشکسالی کشاورزی بیشتر نسبت به تغییر اقلیم واکنش نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه اترک، خشکسالی کشاورزی، مدل SWAT

مقدمه

دیگر قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی است که در پیدایش شرایط خشکی و بیابانی شدن نقش اساسی دارند و بیش از ۴۳ درصد ایران را آب و هوای بیابانی تشکیل می‌دهد (Khosrowshahi et al., 2010). به طور کلی بارش و دما مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی هستند که سبب تمایز نواحی اقلیمی ایران می‌شوند (Masoudian, 2010). تفاوت‌های مکانی بارش در ایران نیز بسیار زیاد است. اقلیم از جمله عوامل مهم اکولوژیکی محسوب می‌شود که تغییرات آن در عصر حاضر به منزله مهم‌ترین تهدید برای توسعه پایدار مطرح است (Shiri et al., 2013). به طور کلی وضعیت غالب کمیت‌های مشخص کننده وضع هوای یک منطقه را بدون توجه به

ساختار وضعیت جغرافیایی کشور ایران دارای دو ویژگی بارز است: نخست، کوهستانی و ناهموار بودن آن که غالباً منطبق بر رشته کوه‌های زاگرس و البرز می‌باشد. این ناهمواری‌ها آرایش مکانی عناصر اقلیمی به ویژه دما و بارش را تعیین می‌کنند (Masoudian, 2010). ویژگی بارز

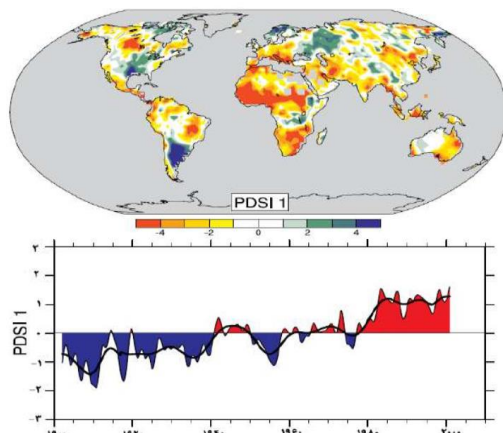
^۱ دانش آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
^۲ استاد هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(* نویسنده مسئول: sanaein@gmail.com)

نحوه ارجاع مقاله:

روزانه در کلیه ماه‌ها نسبت به دوره حاضر افزایش نشان داد. بطوریکه دمای حداقل ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر ۱/۴ سانتی‌گراد در دوره آتی نزدیک (۴۰-۲۰۱۱) افزایش خواهد یافت. شبکه عصبی در شبیه‌سازی دبی حداقل از دقت مناسبی برخوردار نشد. بطوریکه متوسط خطای نسبی در پایه زمانی ۱۵ روزه در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ برابر ۴۷۵ و کل دوره ۸۴ درصد بدست آمد. دو مدل SWAT و IHACRES دقت خوبی در شبیه‌سازی جریان حداقل داشتند. بطوریکه در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ مدل روزانه SWAT در کلیه پایه زمانی خطای نسبی کمتر از ۶ درصد و مدل IHACRES خطای نسبی کمتر از ۵۰ درصد را به خود اختصاص دادند. Salehnia et al. (2017) جهت بررسی خشکسالی‌های هواشناسی با استفاده از خروجی بارش مدل EARTH-EC تحت سناریوی RCP4.5 استفاده کردند و نشان دادند که مدل مذکور در سطح اطمینان ۹۹ درصد با ضریب همبستگی بطور متوسط ۶۴ درصد در پیش‌بینی مقادیر بارش، توانمند است. تحلیل نتایج بدست آمده در سه دهه‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۶-۱۹۸۷) نشان داد که تعداد وقوع خشکسالی‌ها افزایش، اما بطور متوسط از شدت خشکسالی‌های آینده کاسته خواهد شد. Pourkarimi et al. (2018) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه زرينه‌رود با استفاده از شاخص‌های SRI و SSWI و مدل SWAT پرداختند. 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 خشکسالی کشاورزی (SSWI) با ۲۴/۷ درصد افزایش در سناریوهای سه و چهار می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، شاخص SSWI بیشتر از شاخص SRI نسبت به تغییر اقلیم حساسیت نشان می‌دهد. Samavati et al. (2023) بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی هیدرولوژیکی آینده در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SWAT بر اساس مدل CMIP5 را صورت دادند. بر اساس برآورد Miroc5 (RCP8.5)، رواناب سالانه در دوره مذکور نسبت به

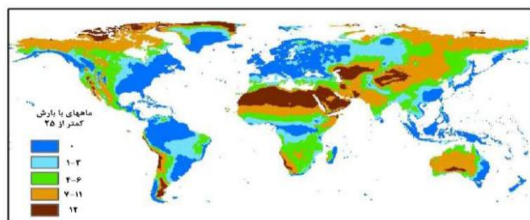
لحظه وقوع آن‌ها اقلیم یا آب و هوای آن منطقه می‌گویند. اقلیم نتیجه تأثیر توأم پدیده‌های هواشناسی است که در اثر عوامل مختلف می‌تواند دستخوش تغییرات پایدار و ناپایدار شود (Ceesay et al., 2023; Alizadeh, 2016). بنابراین تغییر در اقلیم دارای ارکان متعدد و بسیار گسترده‌ای بوده و در نهایت منجر به تغییر در مقدار رطوبت خاک، تغذیه آب‌های زیرزمینی، فراوانی سیلاب و وقوع خشکسالی در مناطق مختلف می‌شود (Moradi et al., 2012). تأثیر عمده بروز پدیده تغییر اقلیم، برقراری الگوهای نامنظم بارندگی است، به نحوی که متفاوت از دوره‌های بلندمدت بوده و همین امر مشکلات قابل توجهی را به وجود می‌آورد. هوای گرم قادر به نگهداری رطوبت بیشتری در خود می‌باشد که افزایش تبخیر از سطح مرطوب را به همراه دارد. با افزایش رطوبت در اتمسفر، رخدادهای بارش باران و برف شدیدتر شده و پتانسیل وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار رطوبت در خاک برای تبخیر کم و یا ناچیز می‌باشد، میزان بازتابش خورشیدی از سطح خاک بیشتر شده که این نیز به شدت و مدت گرم شدن می‌افزاید (Dai et al., 2018). وقوع خشکسالی عمده‌ترین تأثیر قابل توجه در این راستا می‌باشد. از این رو در پژوهش حاضر، ارزیابی شاخص‌های مختلف خشکسالی با استفاده از نرم‌افزار SWAT صورت گرفته و بدین ترتیب ضمن بررسی رابطه بین آنها، پایشی از وضعیت خشکسالی در محدوده مورد مطالعه به دست می‌آید. در این زمینه پژوهش‌های مختلفی هم صورت گرفته که در اینجا به مهم‌ترین آنها پرداخته می‌شود. Soleimani et al. (2012) اثر تغییر اقلیم بر تاریخ کشت، طول دوره رشد و تبخیرتعلق گندم را در دوره‌های آتی در منطقه بهشهر بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که درجه حرارت در تمامی ماه‌های سال افزایش می‌یابد، دوره زمانی مناسب برای کاشت گندم بین ۹ تا ۲۷ روز زیاد می‌شود و طول دوره رشد گیاه بین ۴ تا ۱۴ روز کوتاه خواهد شد. Ghermez Cheshmeh et al. (2020) بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان حداقل با استفاده از مدل‌های SWAT، IHACRES و شبکه عصبی در حوضه کن را بررسی نمودند. نتایج هر سه مدل در پایه زمانی ماهانه و سالانه با دقت مناسبی شبیه‌سازی را انجام دادند. در دوره‌های آتی بارش کاهشی معنی دار نداشت و دمای حداقل و حداکثر

بخش پایینی شکل ۲ روند این شاخص مشخص شده است.



شکل ۱- الگوی فضایی شاخص خشکسالی پالمر
Figure 1- Spatial pattern of the Palmer Drought Severity Index (PDSI)

هنگامی که این شاخص در نمودار پایین مثبت (منفی) است. نواحی قرمز و نارنجی در نقشه فوق خشک‌تر (مرطوب‌تر) و نواحی آبی یا سبز مرطوب‌تر (خشک‌تر) از حد متوسط هستند و خط منحنی نیز تغییرات دهه‌ای را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- طول فصول خشک طی دوره ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۶
Figure 2- Length of dry seasons during the period 1961 to 1996 SWAT software

مدل SWAT

مدل نیمه‌توزیع یافته SWAT در اوایل سال ۱۹۹۰ توسط مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا، برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. این مدل با ادغام داده‌های مختلف مکانی، زمانی و توصیفی و بر اساس روابط بین این داده‌ها و با استفاده از الگوریتم‌های فیزیکی، رواناب سطحی را در سطح حوزه آبریز شبیه‌سازی می‌کند. مدل SWAT یک مدل سری زمانی است که مبنای فیزیکی

گذشته ۸/۳۶ درصد کاهش خواهد داشت. در مقیاس فصلی، بیشترین کاهش رواناب ۷۵ درصد در تابستان (تحت Miroc5 (RCP4.5)) و در مقیاس ماهانه، ۷۹ درصد در آوریل خواهد بود که به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و در سپتامبر به ۳۳۵ درصد می‌رسد (تحت Miroc5 (RCP8.5)). روند رواناب آبی با استفاده از مدل من-کندال و روش تخمین رگرسیون بررسی شد. نتایج نشان داد که در دوره مذکور روند معنی‌داری وجود نخواهد داشت و روند شدت خشکسالی آبی تحت تمامی سناریوهای مورد مطالعه روند افزایشی خواهد داشت. Sam et al (2023) اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی در حوضه رودخانه بی را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی می‌شود خشکسالی کشاورزی در فراوانی، شدت و مدت (تا حد زیادی بسته به زمان و سناریوهای انتشار) افزایش یابد. علاوه بر این، رویدادهای خشکسالی و کمبود آب در فصل خشک به احتمال زیاد به زودی در حوضه رودخانه بی رخ می‌دهد.

مواد و روش‌ها

مبانی نظری

تخمین زده شده است که به طور قابل توجهی، فعالیت‌های انسانی در تغییرات مشاهده شده در بارش ناحیه‌ای و جهانی نقش داشته است (Arnold et al., 2021). در شکل ۱ شاخص خشکسالی کشاورزی پالمر مشاهده می‌گردد. با استفاده از شاخص PDSI^۱ از اواسط دهه ۱۹۵۰، روند خشکسالی بزرگی در نیمکره شمالی رخ داده که به خوبی در اوراسیا، آفریقای شمالی، کانادا و آلاسکا قابل مشاهده است. در نیمکره جنوبی، سطح زمین در دهه ۱۹۷۰ مرطوب و در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۹۰ خشک بوده و بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۹۸، روند خشکی قابل مشاهده است. همچنین طول فصول خشک در شکل ۱، به طور مشخص، به خوبی تعداد ماه‌های با بارش کمتر از ۲۵ میلی‌متر نشان داده شده است. طول خشکی دوازده ماهه در قسمت‌هایی از آفریقای شمالی، آفریقای جنوبی، عربستان و ایران و قسمت‌هایی از آسیا مشهود است. در

^۱ Palmer Drought Severity Index

در این معادله SW_t مقدار نهایی آب خاک، SW_0 مقدار اولیه‌ی آب خاک، R_{day} مقدار بارندگی در روز t ام، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز t ام، $E_a - W_{seep}$ تبخیرتغرق در روز t ام، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز t ام و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز t ام است. تمامی پارامترها بر حسب میلی‌متر می‌باشند. مدل SWAT با استفاده از نقشه‌های رقومی DEM، کاربری اراضی، خاک و شیب به همراه مطالعات اقلیمی دمای بیشینه و کمینه و بارش روزانه ساخته می‌شود. مطالعات مدیریتی حوضه آبریز نظیر الگوی کشت، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی توسط کشاورزی، اطلاعات سدهای موجود در منطقه نیز به صورت اختیاری قابل ارائه به مدل می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش بخشی حوضه آبریز اترک انتخاب شده است. این حوضه در تقسیم‌بندی‌های حوضه‌های آبریز وزارت نیرو جزو زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریای خزر است. مساحت این حوضه، ۲۶۴۳۰ کیلومتر مربع و رود اصلی آن، اترک می‌باشد. در شکل ۳ نمایی از محدوده این حوضه آبریز نسبت به سایر حوضه‌ها مشخص شده است.



شکل ۳- حوضه آبریز اترک به عنوان بخشی از حوضه آبریز دریای خزر

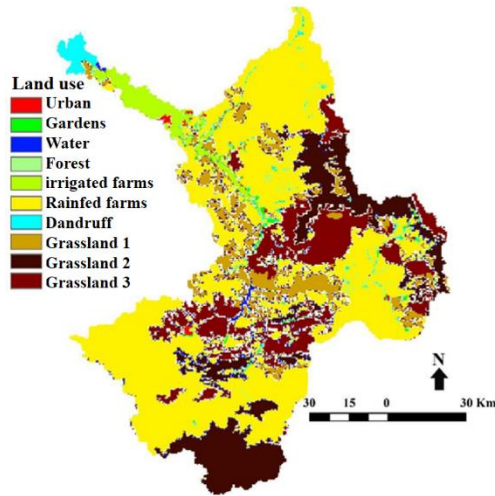
Figure 3- The Atrak watershed as a part of the Caspian Sea watershed

مناطق کم‌ارتفاع (زیر ۵۰۰ متر ارتفاع) عموماً از سازندهای لسی تشکیل یافته‌اند. قسمت شرق اراضی به عنوان بالادست مرتفع‌تر و کوهستانی بوده و ارتفاعات آن به بیش از ۴۰۰۰ متر می‌رسد، ارتفاعات مهم منطقه شامل کوه سونگی داغ، کوه‌های قازان قایه و باباشملی در شرق و کوه‌های خالد نبی و نارلی با ارتفاع متوسط در قسمت

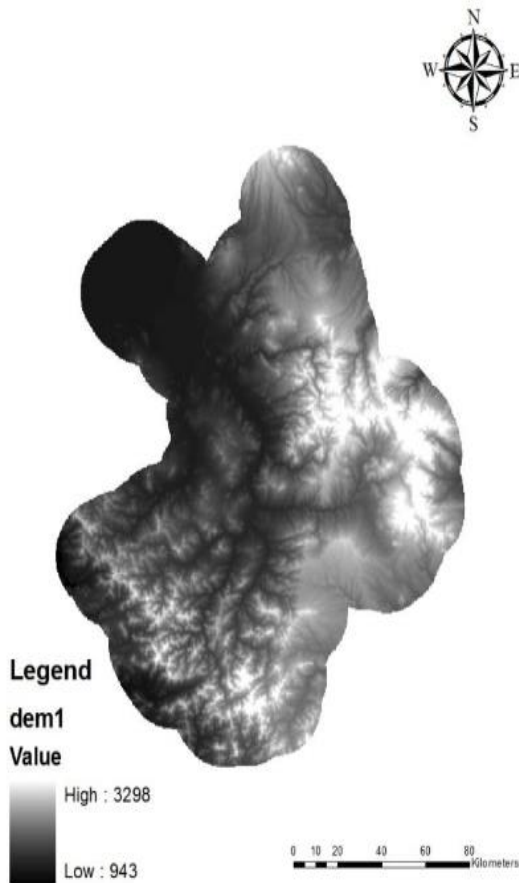
دارد. این مدل قابلیت اتصال به نرم‌افزار ArcGIS را دارد، لذا حجم وسیعی از داده‌ها به صورت لایه‌های اطلاعاتی مانند کاربری اراضی و خاک را دارا می‌باشد. توسعه واسطه کاربری این نرم‌افزار با مبنای GIS که یک ابزار ساده برای تبدیل کاربری اراضی، داده‌های توپوگرافیک خاک به ورودی‌های مدل را فراهم می‌کند. پیگیربندی SWAT را برای یک حوزه آبریز تسهیل کرده و امکان استفاده از قابلیت‌های تجزیه و تحلیل موجود در محیط GIS را هم ایجاد می‌کند. این مدل به طور عمده در مدل‌سازی حوضه‌های زراعی و کم شیب به کار می‌رود. از این مدل در تخمین میزان فرسایش حوضه و برای اجزای معادله بیلان آبی سالانه حوضه و مقایسه آن‌ها به کار می‌رود (Tripathi et al., 2005). از دیگر خصوصیات این مدل قابلیت مدل‌سازی حوضه‌های کم داده یا با داده‌های مفقود می‌باشد (Nyeko et al., 2015). پارامترسازی مکانی در مدل SWAT با تقسیم حوزه آبریز به تعدادی زیرحوضه، با توجه به توپوگرافی منطقه انجام می‌شود. استفاده از زیرحوضه‌ها در شبیه‌سازی، به خصوص زمانی که مناطق مختلف حوضه دارای نوع خاک و کاربری‌های گوناگون هستند و ناهمگنی و تفاوت آن‌ها می‌تواند در هیدرولوژی حوضه تأثیر داشته باشد، بسیار مفید است. در مرحله بعد، این زیرحوضه‌ها به واحدهایی تبدیل می‌شوند که مبتنی بر ترکیب منحصر به فرد از ویژگی‌های کاربری اراضی، خاک و شیب هستند. رواناب در هر واحد به طور مستقل محاسبه و روندیابی شده و در نهایت مقدار کل رواناب حوضه برآورد می‌شود. این روش دقت محاسبات را افزایش داده و توصیف فیزیکی بهتری از بیلان آبی حوضه به دست می‌دهد. مدل SWAT به صورت گسترده برای مدل‌سازی در مقیاس‌های مکانی مختلف به کار برده شده است. همانطور که بیان گردید این مدل یک برنامه الحاقی به نرم‌افزار ArcMap به نام ArcSWAT دارد. این مدل به صورت مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متفاوت است که برای شبیه‌سازی پارامترهای متفاوت به صورت روزانه، ماهانه و سالانه طراحی شده است (Mohammadi et al., 2017). در مدل SWAT، چرخه هیدرولوژی بر اساس معادله‌ی بیلان آب از معادله ۱ شبیه‌سازی می‌شود.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (1)$$

Latitude 4172500
 Longitude 492115
 The length of the statistical period 1987-2010



شکل ۵- نقشه کاربری اراضی (محقق)
 Figure 5 - Land Use Map



شکل ۶- نقشه DEM (محقق)
 Figure 6 - DEM Map

برای بیان خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی به ترتیب شاخص استاندارد شده‌ی رواناب SRI و شاخص استاندارد شده‌ی رطوبت خاک SMDI انتخاب

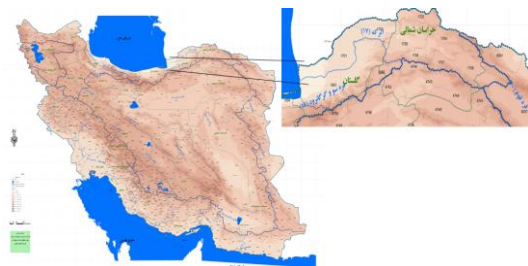
میانی و جنوبی حوضه واقع شده‌اند؛ ولی قسمت میانی منطقه شامل جلگه لسی چات (قسمت شمالی) تا داشلی برون و تپه ماهورهای چوپانجیق (در قسمت جنوبی و دامنه کوه‌های خالد نبی) بوده و قسمت غرب نیز شامل دشت مسطح سیلندی رسی با سطح آب زیرزمینی بالا (راضی تنگلی تا گمیشان) است که منطقه‌ای باز با بلندی‌های کمی است. زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز اترک مطابق با جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- زیرحوضه‌های حوضه آبریز اترک

Table 1- Sub-basins of the Atrak Watershed

No.	Name of sub-basin	Area (km ²)
1	Atrak River from the mouth to the confluence of the Sombar branch (Atrak Payab)	4902
2	Sombar River	1957
3	Atrak River from the confluence of Sombar branch to the confluence of Khartot branch (Middle Atrak 1)	3258
4	Atrak River from the confluence of the Khartot branch to the confluence of the Samalqan branch (Middle Atrak 2)	4701
5	Atrak River between Pish Qala and Reza Abad (Middle Atrak 3)	5982
6	Atrak River upstream of Rezaabad (Sarab Atrak)	5630

به منظور ارزیابی شاخص خشکسالی، محدوده مورد مطالعه به بخش اترک میانی ۱ محدود گردید. داده‌های روزانه دما و بارندگی نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری دایر و موجود در منطقه برای سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ جهت اجرای مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۲ مشخصات ایستگاه مورد نظر مشخص شده است. اطلاعات کلی منطقه در شکل ۴ مشخص شده است.



شکل ۴- وضعیت زیرحوضه‌های حوضه آبریز اترک
 Figure 4 - Sub-basin status of the Atrak watershed

جدول ۲- مشخصات ایستگاه مورد نظر

Table 2 - Specifications of the Target Station

Station	Aghmazar
Altitude	563

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 SMDI کمبود رطوبت خاک است (Wang et al., 2011; Vu et al., 2015). به منظور محاسبه شاخص SPI که از شناخته شده‌ترین شاخص‌ها است، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهیانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن محاسبه شد. سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر SPI از معادله ۲ محاسبه می‌گردد.

شده‌اند. 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 SMDI کمبود رطوبت خاک است (Wang et al., 2011; Vu et al., 2015). به منظور محاسبه شاخص SPI که از شناخته شده‌ترین شاخص‌ها است، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهیانه یا مجموع بارندگی در هر بازه زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن محاسبه شد. سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده، مقادیر SPI از معادله ۲ محاسبه می‌گردد.

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \quad (2)$$

که X_i بارندگی در هر ماه، X میانگین بارندگی در مقیاس زمانی معین و S_x انحراف معیار بارندگی در مقیاس زمانی معین است. در این پژوهش هر دو مقدار پارامترها توسط مدل SWAT برای دوره پایه (دوره زمانی ۱۹۷۶ لغایت ۲۰۰۵ میلادی) و آینده (دوره زمانی ۲۰۱۷ لغایت ۲۰۴۶ میلادی) شبیه‌سازی شده‌اند. در جدول ۳ طبقات مختلف خشکسالی بر اساس شاخص SPI نمایش داد شده است.

جدول ۳- حدود تغییرات خشکسالی

Table 3 - Drought Severity Changes

Drought severity	Threshold Values
Very severe humidity	Greater than 2
severe humidity	1/5 to 1/99
mild Humid	1 to 1/49
Mild Drought	0 to 0.99
Moderate Drought	-1 to -1.49
Severe Drought	-1/5 to -1/99
Very Severe Drought	Smaller than -2

تغییر اقلیم و تولید سناریوهای اقلیمی

در این پژوهش دو مدل گردش عمومی جو از گزارش IPCC^۱ تحت عنوان گزارش پنجم با نام‌های CCSM4 و BNU ESM استفاده شده است. سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در گزارش پنجم تحت خانواده RCPs^۲ به تصویب رسیده‌اند. سناریوهای تحت خانواده RCP بر اساس میزان انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی و تغییرات کاربری اراضی و در چهار دسته RCP

نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و با معرفی نقشه‌های DEM به منظور محاسبه تغییرات شیب، کاربری اراضی و خاک حوضه به مدل SWAT، حوضه به ۹ زیر حوضه تقسیم شد. به دلیل زیاد بودن پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی همزمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی، از مدل SWAT-CUP جهت آنالیز حساسیت و واسنجی بهره برده شد. پس از این مراحل، مدل برای دوره پایه ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ اجرا و شاخص‌های خشکسالی SRI و SMDI برای این دوره و هر ۹ زیرحوضه محاسبه شد. ارزیابی خصوصیات خشکسالی در دوره پایه و آینده بر اساس سه مشخصه شدت، مدت و فراوانی خشکسالی تحت سناریوهای مختلف انجام شد. نتایج شدیدترین و طولانی‌ترین دوره خشکسالی در جدول ۴ مشخص شده است. بیشترین وقایع خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره پایه برابر با ۱۰ به دست آمد که در زیرحوضه‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۶ روی می‌دهد. طولانی‌ترین دوره خشکسالی نیز برابر با ۴۸ ماه در زیرحوضه ۷ اتفاق افتاده است. بر اساس شاخص SSWI، بیشترین وقایع خشکسالی کشاورزی در دوره پایه برابر با عدد ۹ بوده که در زیرحوضه ۸ رخ می‌دهد. بیشترین تداوم خشکسالی نیز در این فاز برابر با ۷۳ ماه در زیرحوضه ۳ دیده می‌شود. شدیدترین خشکسالی کشاورزی بر مبنای این شاخص نیز در حوضه ۷ بوده و ۲/۸۳- می‌باشد. شایان ذکر است که در زیرحوضه ۳ که شدیدترین خشکسالی هیدرولوژیکی روی می‌دهد، خشکسالی کشاورزی نیز صورت می‌گیرد (Alizadeh, 2017). بررسی تغییرات آب و هوایی آینده بر اساس ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دو مدل CCSM4 و BNUESM تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 برای ۳۰ سال آینده (در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۶ میلادی) و نسبت به داده‌های پایه (بازه ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ میلادی) به دست آمد. در

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Representative Concentration Pathway

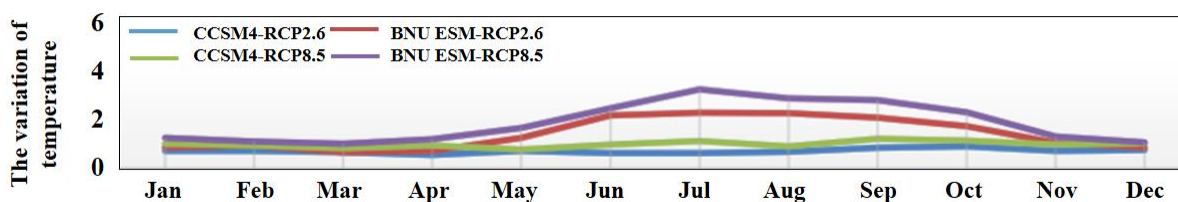
سناریو ۴ در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. در شکل ۵ تغییرات سری‌های زمانی دما بر اساس پیش‌بینی هر ۴ سناریو ارائه شده است. علاوه بر این، روند تغییرات بلندمدت سالانه بارش کل حوضه با وجود برخی نوسانات دارای روند افزایشی می‌باشد. بیشترین مقدار افزایش بارش تحت سناریو ۲ پیش‌بینی می‌شود که ۲۳ درصد نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد. در شکل ۶ تغییرات بارندگی ارائه شده است.

مجموع ۴ سناریو در نظر گرفته شد که عبارتند از: سناریو ۱ شامل مدل CCSM4 تحت سناریو انتشار RCP2.6، سناریو ۲ شامل مدل CCSM4 تحت سناریو انتشار RCP8.5، سناریو ۳ شامل مدل BNU ESM تحت سناریو انتشار RCP2.6، سناریو ۴ شامل مدل BNU ESM تحت سناریو انتشار RCP8.5. بر اساس نتایج ۴ سناریو در نظر گرفته شده، میانگین دمای کل حوضه در طی ۳۰ سال آینده به طور متوسط افزایش خواهد یافت، بنحوی که بیشترین مقدار آن برابر با ۴/۰۶ درجه سانتی‌گراد در

جدول ۴- نتایج خصوصیات خشکسالی در ایستگاه مورد مطالعه

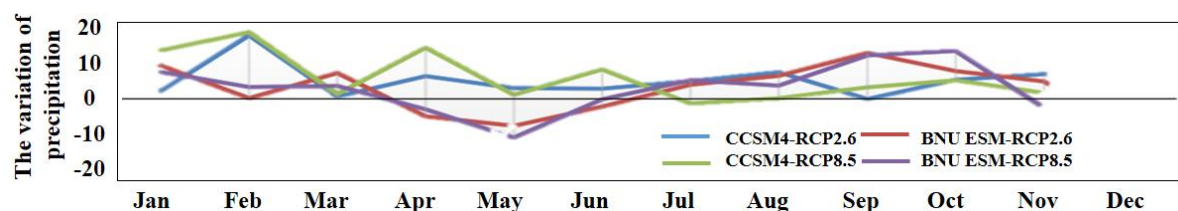
Table 4 - Results of Drought Characteristics at the Study Station

Sub-basin	Frequency of SMDI	SMDI duration	SMDI intensity	Frequency of SRI	SRI term	SRI intensity
1	6	40	3.2	9	40	44.3-
2	8	39	43.2	10	40	5.3-
3	6	73	77.1	10	40	5.3-
4	6	57	05.2	10	39	3-
5	7	38	12.2	9	46	05.3-
6	8	37	2-	10	46	95.2-
7	4	54	83.2	8	48	24.2-
8	9	45	46.2	8	46	5.3-
9	7	43	12.2	8	44	2.3-



شکل ۷- سری‌های زمانی دما بر اساس پیش‌بینی سناریوهای مورد نظر

Figure 7 - Time series of temperature based on predicted scenarios



شکل ۸- سری‌های زمانی بارش بر اساس پیش‌بینی سناریوهای مورد نظر

Figure 8 - Time series of precipitation based on predicted scenarios

بیشتر است. بر اساس شاخص SSWI بیشترین وقوع خشکسالی در آینده برابر با عدد ۱۰ پیش‌بینی می‌شود که تحت سناریو ۳ روی می‌دهد. در مجموع، تحت تمامی سناریوها و در کل محدوده مورد مطالعه، خشکسالی کشاورزی تعداد وقوع کمتری نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی دارد. بر اساس نتایج، در تمامی سناریوها، میانگین تعداد خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی

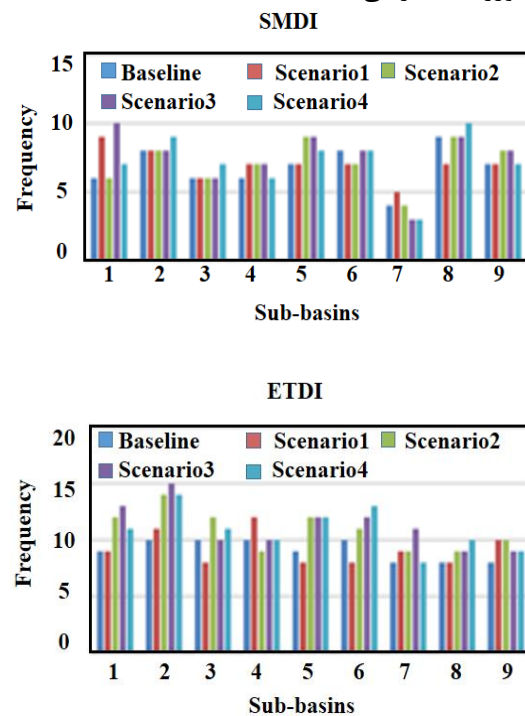
به منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی، نتایج ریزمقیاس شده سناریوها به مدل SWAT معرفی و مدل برای دوره ۳۰ ساله ۲۰۱۷ تا ۲۰۴۶ اجرا شد و سپس با استفاده از خروجی آن شاخص‌های خشکسالی مورد نظر محاسبه گردید. بیشترین میزان وقوع خشکسالی در آینده بر اساس شاخص SRI برابر با ۱۵ و تحت سناریو ۳ روی خواهد داد که نسبت به دوره پایه به مقدار ۵ واحد

مؤلفه‌های کمی رواناب و رطوبت خاک می‌باشد. نتایج نشان داد واکنش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی به تغییرات اقلیمی یکسان نخواهد بود. تفاوت‌های موجود در خصوصیات هر دو شاخص (شدت، مدت و 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 که در طی سال‌های آینده، وقوع و تداوم خشکسالی (هر دو نوع) به طور میانگین دارای رویکرد افزایشی بوده و همچنین شدت خشکسالی به ویژه خشکسالی کشاورزی افزایش مشهودی خواهد داشت.

منابع

- Alizadeh, A, 2017, Principles of applied hydrology, Publications of Imam Reza University. (In Farsi)
- Arnold, W., Feldman, D. R., Tadić, J. M., Schwarz, A. 2021. Establishing a range of extreme precipitation estimates in California for planning in the face of climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147 (9), 04021056.
- Ceesay, E. K., Francis, P. C., Jawneh, S., Njie, M., Belford, C., Fanneh, M. M. 2023. Climate Change, Growth in Agriculture Value Added, Food Availability and Economic Growth Nexus in the Gambia: A Granger Causality and ARDL Modeling Approach. In *Food Security and Safety*, 2, 435-468.
- de Oliveira Serrão, E. A., Silva, M. T., Ferreira, T. R., de Ataíde, L. C. P., dos Santos, C. A., de Lima, A. M. M., ... Gomes, D. J. C. 2022. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research*, 37 (1), 54-69.
- Dibaba, W. T., Ebsa, D. G. 2022. Identifying Erosion Hot Spot Areas and Evaluation of Best Management Practices in the Toba Watershed, Ethiopia. *Water Conservation Management*, 6, 30-38.
- Ghermez Cheshmeh, B, Hajmohamadit M, Porhemat, J, Hoseini, A. 2020. The effect of climate change on minimum flow using SWAT, IHACRES and neural network models in the Ken basin, Soil and Water Research Institute Publisher.

نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که در شکل ۹ این امر نشان داده شده است. طولانی‌ترین مدت خشکسالی هیدرولوژیکی در طی ۳۰ سال آینده برابر با ۷۰ ماه بوده که در سناریو ۴ رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که طولانی‌ترین دوره خشکسالی کشاورزی نیز برابر با ۷۰ ماه محاسبه شده است که تحت سناریو ۴ صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه بیشترین افزایش دمای پیش‌بینی شده نیز تحت سناریو ۴ رخ می‌دهد، بنابراین می‌توان بیان نمود که افزایش دما عاملی مهم در شدت بخشی خصوصیات خشکسالی است. این روند به جز در سناریو ۱، در بقیه سناریوها طول دوره هر دو نوع خشکسالی به طور میانگین در کل حوضه افزایش خواهد یافت. فقط در سناریو ۱ کاهش خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی نسبت به زمان پایه رخ می‌دهد که میزان آن در خشکسالی کشاورزی بیشتر می‌باشد.



شکل ۹- میزان فراوانی بر اساس شاخص‌های SMDI و SRI

Figure 9 - Frequency Distribution Based on SMDI and SRI Indices

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی اثر تغییرات اقلیم بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه‌ی اترک در زیرحوضه اترک میانی با استفاده از مدل SWAT است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی

- and agricultural drought characteristics of Zarineh-Rood basin using SRI and SSWI indices and SWAT model, Iran water and soil research, 5(49),1203-1217. (In Farsi)
- Salehnia, N., Alizadeh, A., Sanaei Nejad, H., Bannayan, M., Zarrin, A. 2017. Investigating the Output of Numerical Prediction Models under RCP4.5 Scenario for Forecasting Meteorological Droughts. Irrigation and drainage in Iran, 12 (6), 1315-1326. (In Farsi)
- Sam, T. T., Nhi, P. T. T., Mai, N. T. H., Loi, P. T. (2023, April). The climate change effects on agricultural drought in the Be River Basin. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1170(1), 012006. IOP Publishing.
- Samavati, A., Babamiri, O., Rezai, Y., Heidarimozaffar, M. 2023. Investigating the effects of climate change on future hydrological drought in mountainous basins using SWAT model based on CMIP5 model. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37 (3), 849-875.
- Soleimani, M., Parsinejad, M., Araghi nejad, Sh., Massah, A. 2012. Occurrence of climate change and its effect on sowing date, length of growing cycle and evapotranspiration of winter wheat, Iran water research, 6 (10), 11-20. (In Farsi)
- Yuan, Y., Koropecjy-Cox, L. 2022. SWAT model application for evaluating agricultural conservation practice effectiveness in reducing phosphorous loss from the Western Lake Erie Basin. Journal of Environmental Management, 302, 114000.
- Habibi, A., gudarzi, M. 2018. The application of the semi-distributed SWAT model in simulating runoff in the Hablah River basin. Iran-Watershed Management Science and Engineering, 15(43), 40-49. (In Farsi)
- Hosseini, S., Ghaffarzadeh, H., Abedi, Z., Nima Shiry. 2014. Assessment of Climate Change and its Impacts on the Natural Land use of Gorgan River Basin. Natural Environment Magazine, 67 (1), 25-39. (In Farsi)
- Khosroshahi, M., Kalirad, A., Marandy, H. 2010. Comparison of geological and climatological deserts domain of Iran. Iranian journal of Range and Desert Reseach, 18 (2), 352-336. (In Farsi)
- Koltsida, E., Mamassis, N., Kallioras, A. 2021. Hydrological modeling using the SWAT Model in urban and peri-urban environments: The case of Kifissos experimental sub-basin (Athens, Greece). Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 1-24.
- Makhtum, m. 2012. Foundation of Land Development, Tehran University Publications, 300
- Miananadi, A., Alizadeh A., Davary, K. 2014. Assessment of the SEBAL Algorithm to Estimate Actual Evapotranspiration in Neishaboor-Rokh Watershed Using SWAT Model. Journal of water research in agriculture, 30 (4), 525-541. (In Farsi)
- Mohammadi, H., Amiri, A., Rabani, F. 2018. Climate change and climate models. Tehran University Publications.
- Pourkarimi, Z., Moghadasi, M., Delavar, M. The effects of climate change on the hydrological



Technical note

Evaluation of agricultural drought under climate change scenarios with SWAT model (Case study: Atrak watershed)

M. Pournamdari^{1*}, H. Sanaeinejad²

Received: 27/03/2024

Accepted: 22/05/2024

Abstract

Determining the climatic and hydrologic characteristics of each watershed is essential for agro-climatic and water resources studies of given region. Observation of rainfall, temperature and other meteoroidal variables, as well as drought monitoring plays a significant role in understanding the conditions of the watershed under BNU ESM Model, RCP2.6 climate change scenarios (Scenario 3) during the future period. The current research was conducted with the aim of determining drought conditions in the Atrak River sub-basin using the SWAT model. According to the SRI index the highest projected drought index value during the future period under scenario 3 is be equal to 15 and, which is 5 units more than the corresponding baseline period. According to the SSWI index, the highest occurrence of drought in future periods is under scenario 3 in projected to be to be 10. In general, under all selected scenarios and in the entire study area, agricultural drought has a lower number of occurrences than hydrological drought. Based on the results, in all scenarios, the average number of hydrological and agricultural droughts will increase compared to the baseline period. The longest period of hydrological drought in the next 30 years is equal to 70 months, which occurs under the 4th climate change scenario (BNU ESM Model, RCP8.5). It should be noted that the longest period of agricultural drought is calculated as 70 months, which would occur under scenario 4. The results showed that the response of hydrological and agricultural droughts to climate change will not be the same, and agricultural droughts responds more significantly.

Keywords: Agricultural Drought, Atrak basin, Climate change, SWAT Model



¹ Ph. D. graduated of Agro-Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*Corresponding Author Email Address: sanaein@gmail.com)

² Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

نحوه ارجاع مقاله:

پورنامداری، م.، ثنائی نژاد، ح. ۱۴۰۴. ارزیابی خشکسالی کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم با مدل SWAT (مطالعه موردی: قسمتی از حوضه آبریز اترک). نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۳(۲)، ۷۴-۸۲. DOI: 10.22125/agmj.2024.453509.1167

Pournamdari, M., Sanaeinejad, H. 2026. Evaluation of agricultural drought under climate change scenarios with SWAT model (Case study: Atrak watershed). Journal of Agricultural Meteorology, 13(2), 74-82. DOI: 10.22125/agmj.2024.453509.1167