

ارزیابی تأثیر توأم تغییر متغیرهای اقلیمی و کاربری اراضی بر روند تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبی چای

حجت احمدزاده^{۱*}، احمد فاخری فرد^۱، محمدعلی قربانی^۱ و مسعود تجریشی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۵)

چکیده

به منظور مدیریت بهینه منابع آب یک حوضه، تعیین میزان تبخیر و تعرق واقعی و بررسی روند زمانی آن ضروری است. در این راستا در مقاله حاضر به شبیه سازی سری زمانی تبخیر و تعرق واقعی و تحلیل روند آن با توجه روند مؤلفه های اقلیمی و کاربری اراضی در حوضه آبی چای طی دوره ۱۳۹۴-۱۳۶۶ پرداخته شد. به این منظور، مدل جامع SWAT برای حوضه آبی چای تنظیم، واسنجی و صحت سنجی شد. همچنین متوسط تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی شده محصولات (در سال های پرباران) با مقادیر نظیر در سند ملی آب مقایسه شد. نتایج آزمون روند من کندانال نشان داد که بارندگی سالانه در اکثر ایستگاه های هواشناسی روند نزولی داشته و در ۱۰ ایستگاه، روند بارندگی به طور معنی داری کاهش یافته است. در حالی که دمای حداکثر سالانه در همه ایستگاه ها و دمای حداقل در اکثر آنها روند افزایشی معنی دار داشته است. بررسی نقشه های کاربری اراضی نشان داد که سطح کشت آبی حوضه طی دوره مورد مطالعه ۳۹ درصد افزایش داشته است. بر اساس نتایج تحقیق تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه با شیب ۲/۵۴ میلی متر در سال دارای روند افزایشی معنی دار بوده است. نتایج نشان داد که با وجود روند صعودی تبخیر و تعرق پتانسیل و سطح اراضی کشاورزی آبی، تبخیر و تعرق واقعی حوضه به دلیل کاهش بارندگی، با نرخ ۲/۲ میلی متر در سال روند کاهشی معنی دار داشته است.

واژه های کلیدی: متغیرهای اقلیمی، کاربری اراضی، تبخیر و تعرق واقعی، SWAT، تحلیل روند، حوضه آبی چای

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: tajrishy@sharif.edu

مقدمه

تبخیر و تعرق واقعی یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان هیدرولوژیکی یک حوضه آبریز محسوب می‌شود به طوری که بخش عمده‌ای از منابع آب در کشور از طریق تبخیر و تعرق واقعی از سیستم منابع آب حوضه‌ها خارج می‌شود (۲۶). لذا بررسی مقدار تبخیر و تعرق واقعی و روند تغییرات آن نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه سیستم منابع آب دارد. میزان تبخیر و تعرق واقعی در یک حوضه تابعی از متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی (بارندگی، دما، سرعت باد، رواناب و...)، متغیرهای فیزیکی حوضه (توپوگرافی، خاک و...)، نوع گیاه، موجودیت آب و عوامل انسانی صورت گرفته در راستای مدیریت‌های منابع آبی و کشاورزی حوضه است. توسعه اراضی کشاورزی، احداث سدها و تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر در میزان تبخیر و تعرق واقعی محسوب می‌شوند (۱۰). تغییر هر یک از این عوامل میزان تبخیر و تعرق واقعی در حوضه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. در دهه‌های اخیر در کنار تغییرات اقلیمی به‌ویژه افزایش دما، در بسیاری از زیرحوضه‌های کشور اراضی کشاورزی آبی و همچنین احداث سدهای کشاورزی به‌طور بی‌رویه افزایش پیدا کرده است. بسته به شدت تغییرات هر یک از این عوامل در یک حوضه ممکن است روند قابل توجهی در میزان تبخیر و تعرق واقعی آن به وجود آید. تحقیق حاضر سعی دارد تا تأثیر توأم عوامل اقلیمی، محیطی و انسانی بر روند تغییرات مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در حوضه آبریز آجی‌چای مورد ارزیابی قرار دهد. لذا حوضه آبریز آجی‌چای به‌عنوان بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه منطقه مورد مطالعه تحقیق حاضر است.

استفاده از رویکرد مدل‌سازی در این تحقیق برای شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این راستا استفاده از مدلی که بتواند تأثیرات توأم عوامل اقلیمی (بارندگی، دما و...)، محیطی (توپوگرافی، خاک و...) و انسانی (توسعه اراضی کشاورزی آبی، تغییر کاربری اراضی و...) بر میزان تبخیر و تعرق واقعی را به‌صورت مکانی مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار دهد، الزامی است. به این منظور در تحقیق

حاضر از مدل جامع هیدرولوژیکی - گیاهی SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (۴)، استفاده خواهد شد. این مدل به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه‌سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و گیاهی در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی است (۲۳).

تاکنون تحقیقات مختلفی در مورد تحلیل روند تبخیر و تعرق واقعی و همچنین متغیرهای اقلیمی مؤثر بر آن (دما، بارندگی و...) صورت گرفته است. البته سابقه و تعداد مطالعات مربوط به بررسی روند متغیرهای اقلیمی تأثیرگذار بر تبخیر و تعرق واقعی به مراتب بیشتر از خود تبخیر و تعرق واقعی است. بوفانی و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی روند بارندگی در مقیاس سالانه و فصلی در ۳۲ ایستگاه هواشناسی در کشور ایتالیا پرداختند. نتایج آنها نشان داد که برای فصول مختلف در مناطق گوناگون روندهای متفاوتی وجود دارد (۶). فتحیان و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی و مقایسه روند تغییرات متغیرهای دما و بارندگی به صورت ماهانه و سالانه در سطح حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش‌های غیرپارامتری پرداختند. آنها در این تحقیق با مطالعه ۱۱ ایستگاه دماسنجی و ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی نشان دادند که دما در سطح حوضه به‌طور معنی‌دار روند افزایشی دارد. اما بارندگی‌های سالانه و ماهانه رفتارهای متفاوت دارند (۱۱ و ۱۲). جین و همکاران (۲۰۱۳) نیز به تحلیل روند متغیرهای بارندگی و دما در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در قسمت شمال غرب کشور هند پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق بارندگی در هیچ مقیاس زمانی روند معنی‌دار نداشته ولی دما در هر سه مقیاس زمانی به‌طور معنی‌دار افزایشی بوده است (۱۶). دارابی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش من‌کنندال روند متغیرهای دما، رطوبت نسبی و بارندگی را برای استان قم طی دوره ۱۳۹۲-۱۳۶۸ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که متغیرهای دما و رطوبت نسبی دارای روند افزایشی بوده ولی بارندگی فاقد روند است (۸). در تحقیقی دیگر ویو و کیان (۲۰۱۷) روند تغییرات بارندگی سالانه و فصلی را در

استان شانگشی (در کشور چین) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بارندگی سالانه در حوضه وی و شمال فلات لس روند کاهشی داشته است در حالی که در مقیاس فصلی تنها در تعداد معدودی از ایستگاه‌ها روند معنی‌داری وجود داشته است (۳۳). در تحقیقی دیگر کنعانی و همکاران (۱۳۹۷) روند تغییرات تدریجی و سریع متغیرهای هیدرواقلمی حوضه آبریز ليقوان را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد در فصل بهار تمام متغیرهای مرتبط با بارش روند کاهشی دارند در حالی که روند متغیرهای دمای هوا (میانگین، حداکثر و حداقل) در اکثر مقیاس‌های زمانی افزایشی است (۱۸).

برخی از تحقیقات نیز به بررسی روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی پرداختند. گاریچت و همکاران (۲۰۰۴) به مطالعه تغییرات زمانی بارندگی و تبخیر و تعرق در ایالات متحده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که در دو دهه اخیر بارندگی به میزان قابل توجهی افزایش یافته ولی افزایش مقدار تبخیر و تعرق در نتیجه این تغییرات بارندگی کمتر بوده است (۱۳). در تحقیقی دیگر برون و هس (۲۰۰۷) با بررسی روند تبخیر و عوامل تأثیرگذار بر آن در کانادا به این نتیجه رسیدند که میزان تبخیر و همچنین سرعت باد روند کاهشی داشته است (۷). بندیویدهای و همکاران (۲۰۰۹) روند تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع طی دوره ۲۰۰۲-۱۹۷۱ را با استفاده از آزمون من‌کندل در کشور هند مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل افزایش رطوبت نسبی و کاهش سرعت باد روند تبخیر و تعرق گیاه مرجع منفی بوده است (۵). در تحقیقی دیگر طبری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های ۲۰ ایستگاه سینوپتیک به مطالعه روند تبخیر و تعرق گیاه مرجع در غرب کشور پرداختند. نتایج تحقیق آنها حاکی از افزایش معنی‌دار تبخیر و تعرق مرجع سالانه در ۷۰ درصد از ایستگاه‌ها بود (۲۸). طالقانی و خوش‌منش (۱۳۹۷) روند تغییرات متغیرهای بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب را در طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ در حوضه آبریز کن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق، کاهش اندک بارندگی، افزایش

تبخیر و تعرق پتانسیل و کاهش رواناب را نشان داد (۲۹). بعضی دیگر از پژوهشگران روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی را مورد بررسی قرار دادند. یانگ و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی طی سه دهه اخیر در فلات لس پرداختند. آنها از مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل CLM (Community Land Model) استفاده کردند. نتایج حاکی از روند کاهشی مقدار تبخیر و تعرق واقعی به میزان ۰/۷۸ میلی‌متر در سال بود (۳۴). گوروشی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی را طی دوره ۲۰۰۶-۱۹۸۳ در کل کشور هند به کمک روش ناپارامتری من‌کندل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به طور کلی تبخیر و تعرق واقعی در این کشور طی دوره مورد مطالعه روند کاهشی دارد. در کشور ایران به دلیل کمبود داده تبخیر و تعرق واقعی و پیچیدگی‌های مربوط به محاسبات تبخیر و تعرق واقعی بررسی روند تغییرات این متغیر توسط پژوهشگران کمتر صورت گرفته است (۱۴).

همچنین در راستای ارتباط کاربری اراضی و میزان تبخیر و تعرق تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. اولچو و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل SWAT به مطالعه تأثیر تغییر کاربری اراضی در میزان تبخیر و تعرق از سطح جنگل‌های بارانی و گرمسیری سولواوسی مرکزی (اندونزی) پرداختند. نتایج مدل‌سازی این تحقیق نشان داد که مقدار تبخیر و تعرق ماهانه و تعرق از گیاه به ترتیب ۲ و ۶ درصد کاهش یافته ولی میزان تبخیر از خاک حدود ۲۱ درصد افزایش یافته است (۲۴). ولی‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) به برآورد تبخیر و تعرق واقعی و تحلیل ارتباط آن با کاربری زمین در شهرستان مشکین‌شهر پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تبخیر و تعرق واقعی در کاربری مراتع خوب و کمترین آن در اراضی شهری اتفاق افتاده است (۳۲). در تحقیقی دیگر دوستی رضایی و همکاران (۱۳۹۲) روند تغییرات دما و تغییر کاربری اراضی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تأثیر آن در تبخیر و تعرق پتانسیل و حقیقی حوضه و سطوح آزاد آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در نتیجه

یونجه، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار و سیب از محصولات عمده این حوضه محسوب می‌شوند.

داده‌های مورد استفاده در تحقیق به دو دسته نقطه‌ای و مکانی قابل تقسیم است. داده‌های نقطه‌ای شامل سری زمانی متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی بوده و داده‌های مکانی شامل نقشه‌های توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز آجی‌چای است. متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی مورد استفاده در تحقیق شامل بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر و رواناب ماهانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در حوضه آبریز آجی‌چای است. برای تهیه سری زمانی روزانه متغیرهای اقلیمی طی دوره مورد مطالعه (۱۳۹۴-۱۳۶۶) از تمام انواع ایستگاه‌های هواشناسی حوضه شامل ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و تبخیرسنجی استفاده شد. در شکل ۱ اسامی و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. برای تولید شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها از DEM (Digital Elevation Model) با دقت ۳۰ متری استفاده شد که در شکل ۱ شبکه آبراهه‌های تولید شده ارائه شده است. همچنین به‌منظور تولید واحدهای هیدرولوژیکی همگن در زیرحوضه‌های حوضه از نقشه‌های خاک و کاربری‌های اراضی دریافت شده از طرح "ارائه راهکارهای اجرایی کردن کاهش ۴۰ درصدی مصارف آب کشاورزی در حوضه آبریز آجی‌چای" استفاده شد (۳۰ و ۳۱). در شکل ۲ نقشه خاکشناسی حوضه آبریز آجی‌چای نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۲ حوضه آبریز آجی‌چای از ۲۱۷ پهنه خاک تشکیل شده است که هر کدام از این پهنه‌ها از سطح زمین تا سطح آب‌های زیرزمینی (منطقه غیر اشباع خاک) دارای لایه‌بندی پروفیل خاک است. لازم به ذکر است که در هر یک از پهنه‌های خاک، برای هر یک از لایه‌های پروفیل خاک، پارامترهای مورد نیاز مدل SWAT، براساس آمار و اطلاعات دریافت شده وارد مدل شد. نقشه‌های کاربری اراضی حوضه برای

تغییرات کاربری اراضی حوضه، میزان تبخیر و تعرق از سطح حوضه افزایش یافته است (۹).

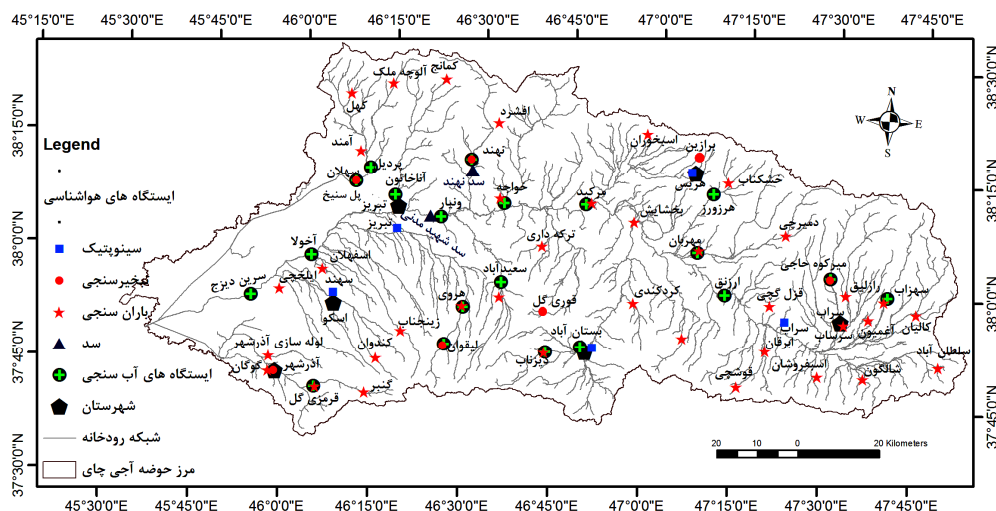
تحقیق حاضر سعی دارد ضمن ارزیابی تأثیر توأم تغییرات متغیرهای اقلیمی و کاربری اراضی بر میزان تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز آجی‌چای، روند تغییرات زمانی این متغیر را طی دوره مورد مطالعه مورد بررسی قرار دهد که به‌نوبه خود از مطالعات منحصربه‌فرد در سطح کشور محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

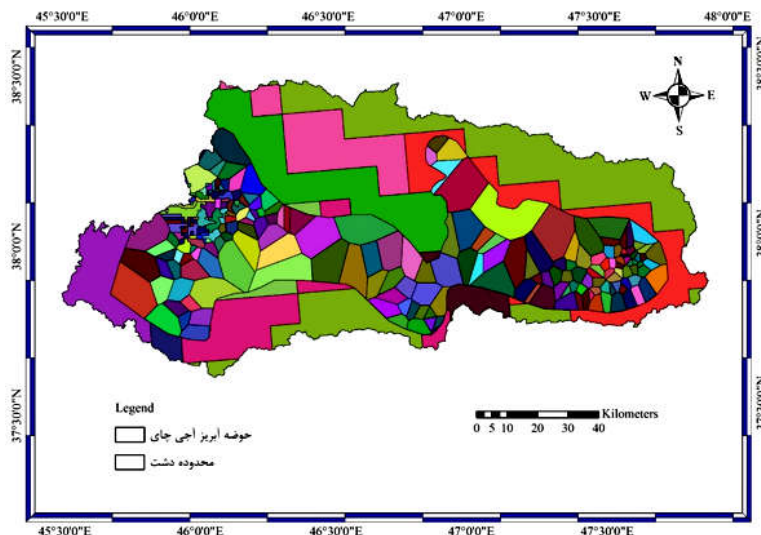
منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر حوضه آبریز آجی‌چای است. این حوضه با مساحتی بالغ بر ۱۲۶۰۰ کیلومتر مربع بعد از حوضه زرنه‌رود بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه به شمار می‌آید. این حوضه در شمال غرب ایران (استان آذربایجان شرقی) و شرق دریاچه ارومیه بین طول‌های جغرافیایی ۴۵° ۴۶' و ۴۷° ۵۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷° ۳۹' و ۳۸° ۲۸' شمالی واقع شده است. شهرهای تبریز، آذرشهر، سراب، بستان‌آباد، هریس و اسکو نقاط مهم شهری حوضه آبریز آجی‌چای به‌شمار می‌آیند. در شکل ۱ نمایی کلی از حوضه آجی‌چای، موقعیت آن در کل حوضه دریاچه ارومیه و شهرستان‌های واقع در آن، نشان داده شده است.

تلخه‌رود (آجی‌چای) آب‌های منطقه وسیعی از استان آذربایجان شرقی را جمع‌آوری و به دریاچه ارومیه می‌رساند. دمای متوسط سالانه حوضه آبریز آجی‌چای طی دوره مورد مطالعه (۱۳۹۴-۱۳۶۶) برابر با ۱۱/۳ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه این حوضه نیز برابر با ۳۲۰ میلی‌متر است. براساس طبقه‌بندی دومارتن، حوضه آجی‌چای دارای اقلیم نیمه‌خشک است. بر اساس نقشه کاربری اراضی مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۳)، در سال ۱۳۹۴، مناطق مسکونی، بدنه‌های آبی، اراضی کشاورزی آبی زراعی، باغات، اراضی دیم، مراتع و اراضی باپروشور به‌ترتیب ۳۵۴/۶، ۱۲، ۱۱۹/۴، ۱۸۰/۹، ۱۹۳۱، ۶۵۹۴ و ۲۷۳۱/۳ کیلومتر مربع از سطح حوضه آبریز آجی‌چای را به‌خود تخصیص دادند. گندم، جو،



شکل ۱. نمای کلی حوضه آبریز آجی‌چای، شبکه رودخانه‌های آن و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، آب‌سنجی و سدها در آن (رنگی در نسخه الکترونیکی)



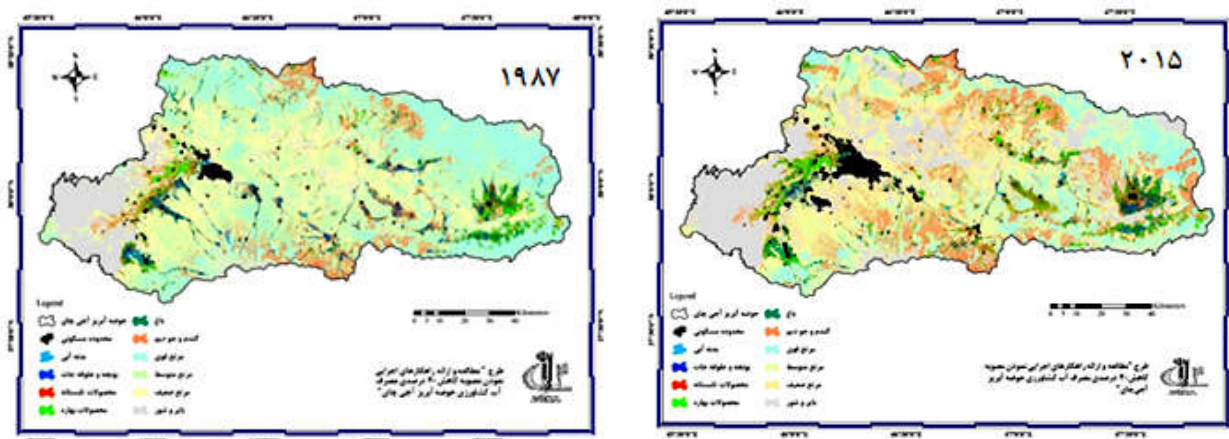
شکل ۲. پهنه‌های خاک حوضه آبریز آجی‌چای (رنگی در نسخه الکترونیکی)

کاربری اراضی سال‌های ۱۹۸۷ (۱۳۶۶) و ۲۰۱۵ (۱۳۹۴)، مساحت کل کشت آبی حوضه در سال ۱۹۸۷ برابر با ۷۲۰۰۵ هکتار و در سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۰۰۰۳۰ هکتار است که به میزان ۲۸۰۲۵ هکتار (۳۹ درصد) افزایش داشته است.

لازم به ذکر است که اطلاعاتی از قبیل تقویم زراعی (تاریخ کشت و برداشت و...)، تقویم آبیاری، میزان کود مصرفی و الگوی کشت به تفکیک شهرستان‌های حوضه از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی دریافت شد.

۵ مقطع زمانی شامل ۱۹۸۷، ۱۹۹۲، ۱۹۹۹، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵ دریافت شده است که در شکل ۳ برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۵ (شروع و پایان دوره مورد مطالعه) ارائه شده است.

کلاس‌های کاربری اراضی نشان داده شده در شکل ۳ عبارتند از: محصولات بهاره (گندم و جو آبی، عدس آبی و ...)، محصولات تابستانه (سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار، هندوانه، لوبیا و ...)، یونجه و علوفه‌جات، باغات، دیم، مراتع، بایر و شور، محدوده مسکونی و پیکره آبی. بر اساس نقشه‌های



شکل ۳. کاربری اراضی حوضه آبریز آجی‌چای برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۵

حوضه از چندین نوع کاربری اراضی و خاک تشکیل شده باشد، مفید است. هر زیرحوضه نیز بسته به میزان تنوع به چند قسمت دیگر به نام واحد هیدرولوژیکی یکسان (HRU) (Hydrological Response Unit) تقسیم می‌شوند. این واحدها قسمت‌های درون هر زیرحوضه هستند که دارای نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی هستند (۳).

معادله بیلان از روابط اصلی در شبیه‌سازی‌های مدل SWAT است که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (۲۳):

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

در این معادله، SW_t مقدار نهایی آب در خاک (mm) در روز t ، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (mm)، t زمان برحسب روز و R_{day} میزان بارندگی در روز i (mm)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i از منطقه ریشه خارج می‌شود (mm) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i (mm) هستند.

حجم رواناب سطحی ناشی از بارندگی یکی از متغیرهای اصلی جریان رودخانه است که مدل از روش شماره منحنی SCS بر اساس نوع کاربری اراضی، خاک، رطوبت پیشین خاک، وضعیت بارش و توپوگرافی زمین (شیب زمین) برای برآورد روزانه آن استفاده می‌کند. بدین ترتیب که پس از آنکه در مدل SWAT بر اساس نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب حوضه واحدهای هیدرولوژیکی یکسان

همچنین آمار و اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی به تفکیک منابع آب سطحی (انهار و سدها) و زیرزمینی (چاه‌های مجاز و غیرمجاز) برای هر یک از رودخانه‌های حوضه از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت شد.

مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی، پیوسته زمانی، نیمه‌توزیعی و با پایه فیزیکی است که توسط USDA-ARS (Agricultural United States Department of Agriculture - Research Service) توسعه یافته و پشتیبانی می‌شود. ابزاری جامع و بین رشته‌ای، بسیار انعطاف‌پذیر و قوی برای شبیه‌سازی مسائل مختلف مربوط به حوضه آبریز است. قابل ذکر است که از این مدل می‌توان در مقیاس‌های کوچک (۱۵ و ۱۹)، مقیاس‌های بزرگ (۲۱) و حتی قاره‌ای (۲۵) برای شبیه‌سازی متغیر-های مورد نظر استفاده کرد. مدل SWAT مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، روندیابی مخازن و رودخانه‌ها، مدل رشد گیاه، درجه حرارت، خصوصیات خاک، مدیریت کشاورزی، فرسایش و مواردی از قبیل کیفیت آب سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود (۲). مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی فرایندهای گوناگون در سطح حوضه است و برای شبیه‌سازی، ابتدا آن را به چند زیرحوضه تقسیم می‌کند. این روش در مواردی که

شبه‌سازی تعرق

در مدل SWAT مقدار تعرق پتانسیل از گیاهان در هر روز به شاخص سطح برگ آنها در آن روز بستگی داشته و با استفاده از روابط ۲ محاسبه می‌شود (۲۳):

$$E_t = \frac{LAI \times E'_0}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (2)$$

در این رابطه E_t مقدار تعرق پتانسیل (mm) در یک روز مشخص است. به علت محدودیت مقدار آب موجود در خاک، مقدار تعرق واقعی از گیاه ممکن است از مقدار پتانسیل آن کمتر باشد. به طور کلی مقدار تعرق واقعی گیاه برابر با مقدار آب واقعی جذب شده توسط گیاه در نظر گرفته می‌شود (۲۳):

$$E_{t,act} = W_{actualup} \quad (3)$$

در این رابطه $E_{t,act}$ تعرق واقعی از گیاه (mm) و $W_{actualup}$ مقدار آب واقعی جذب شده توسط گیاه است (mm) که با استفاده از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$W_{actualup} = \sum_{ly=1}^n W_{actual,ly} \quad (4)$$

در این رابطه، $W_{actual,ly}$ مقدار آب واقعی جذب شده توسط گیاه در هر لایه خاک (mm) و n تعداد لایه‌هایی از خاک است که گیاه می‌تواند از آنها آب جذب کند. برای به دست آوردن مقدار $W_{actual,ly}$ می‌توان از رابطه ۵ استفاده کرد (۲۳):

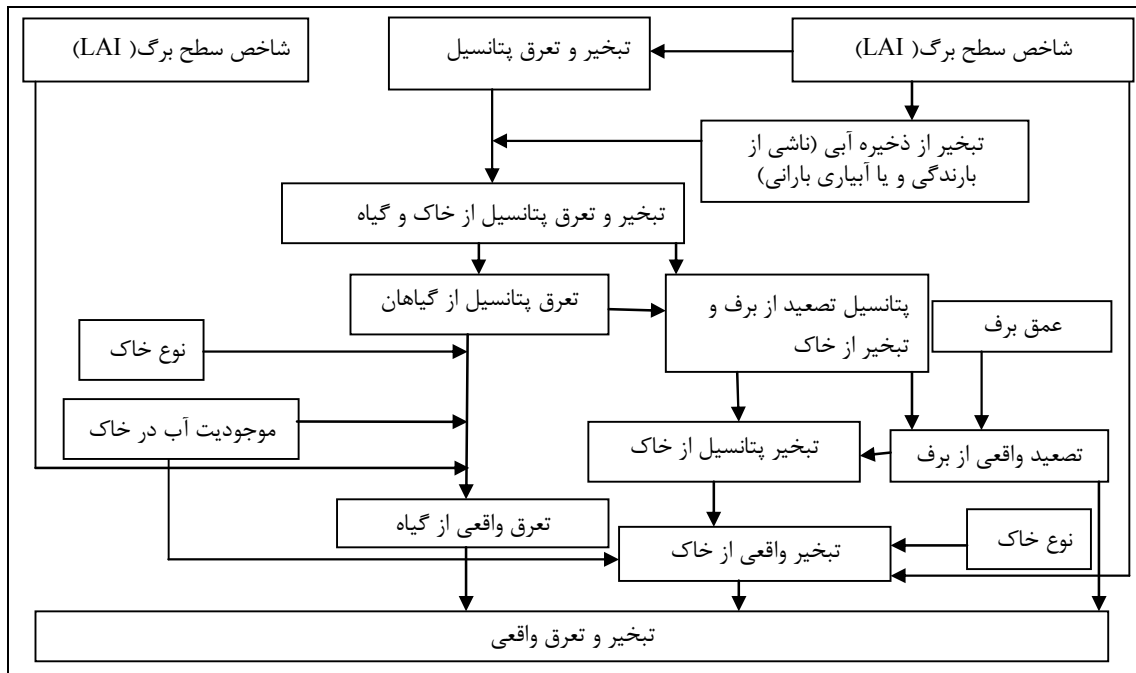
$$W_{actual,ly} = \min [w_{up,ly}^*, (SW_{ly} - PW_{ly})] \quad (5)$$

در این رابطه $w_{up,ly}^*$ مقدار اصلاح شده پتانسیل جذب آب توسط گیاه برای لایه ly با توجه به شرایط رطوبتی خاک بوده (mm) و SW_{ly} و PW_{ly} نیز به ترتیب مقدار رطوبتی خاک (mm) و نقطه پژمردگی خاک (mm) در لایه ly و در یک روز مشخص هستند. با توجه به اینکه پتانسیل جذب آب توسط گیاه تابعی از موجودیت آب در خاک بوده و هر چقدر آب موجود در لایه‌های خاک کاهش یابد توانایی جذب آب توسط گیاه به علت جذب بیشتر آب توسط ذرات خاک کمتر می‌شود، بنابراین

(HRU) برای هر یک از زیرحوضه‌های حوضه مورد مطالعه شکل گرفت برای هر HRU، مقدار رواناب سطحی روزانه (Q_{surf}) به روش اصلاح شده شماره منحنی SCS بعد از وارد کردن مقادیر بارندگی روزانه محاسبه می‌شود (۲۷).

شبه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی در مدل SWAT

در مدل SWAT در ابتدا مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل به یکی از سه روش پنمن-مانتیت، هارگریوز و پریستلی-تیلور محاسبه شده و سپس مقدار تبخیر و تعرق واقعی بر اساس شاخص سطح برگ گیاه (LAI) (Leaf Area Index)، موجودیت آب در خاک و نوع خاک و خصوصیات آن برای تمام واحدهای هیدرولوژیکی یکسان (HRU) حوضه برآورد می‌شود. در تحقیق حاضر با توجه به داده‌های موجود از روش هارگریوز برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد (۲۳). ذکر این نکته ضروری است که برای شبه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی در واحدهای (HRU) مربوط به اراضی کشاورزی آبی و دیم لازم است ابتدا مراحل مختلف رشد هر یک از محصولات مورد کشت به خوبی به مدل معرفی شوند، به طوری که تغییرات زمانی شاخص سطح برگ LAI شبه‌سازی شده با واقعیت همخوانی کافی داشته باشد. در مدل با توجه به عوامل شاخص سطح برگ (LAI) گیاه، عمق توسعه گیاه، موجودیت آب در خاک و نوع خاک و خصوصیات از مجموع مقادیر تبخیر واقعی از خاک (و یا تصعید از برف) و تعرق واقعی از گیاه به صورت روزانه شبه‌سازی می‌شود. و در نهایت مقدار کل تبخیر و تعرق واقعی از مجموع مقادیر تبخیر واقعی از خاک (و یا تصعید از برف) و تعرق واقعی گیاه به دست می‌آید (۲۳). در حالت کلی تنش‌های چهارگانه دما، آب، نیتروژن و فسفر باعث کاهش مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه می‌شوند. در شکل ۴ به طور خلاصه مراحل شبه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی از کاربری‌های مختلف اراضی نشان داده شده است.



شکل ۴. ساختار و ترتیب مراحل محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در مدل SWAT (مؤلفین مقاله)

در این رابطه $W_{up,ly}$ مقدار پتانسیل جذب آب توسط گیاه (mm) در لایه ly بوده و W_{demand} مقداری از تقاضای آب برای جذب گیاه است که توسط لایه‌های بالایی تأمین نشده باشد (mm). همچنین ضریب جبران جذب گیاهی است که مقدار آن از ۰/۰۱ تا ۱/۰ متغیر است. لازم به ذکر است که برای محاسبه $W_{up,ly}$ یک لایه ly ابتدا باید مقدار آن را برای عمق های بالایی و پایینی لایه ly مطابق با رابطه زیر محاسبه کرده و سپس آنها را از هم کم کرد (۲۳):

$$W_{up,z} = \frac{E_t}{[1 - \exp(-\beta_w)]} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-\beta_w \times z}{Z_{root}}\right) \right] \quad (9)$$

در این رابطه $W_{up,z}$ مقدار پتانسیل جذب آب توسط گیاه (mm) از سطح خاک تا عمق مشخص شده z (mm) بوده و Z_{root} عمق توسعه ریشه (mm)، β_w پارامتر توزیع استفاده از آب و E_t مقدار تعرق پتانسیل (mm) هستند. مقدار β_w معمولاً برابر با ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. پس از محاسبه کردن $W_{up,z}$ برای عمق بالا (z_u) و پایین (z_l) لایه ly می‌توان با استفاده از رابطه ۱۰ مقدار پتانسیل جذب آب را برای این لایه به دست آورد:

$$W_{up,ly} = W_{up,zl} - W_{up,zu} \quad (10)$$

مقدار پتانسیل جذب آب توسط گیاه باید به صورت زیر اصلاح شود (۲۳):

$$W''_{up,ly} = W'_{up,ly} \times \exp\left[5 \times \left(\frac{SW_{ly}}{(0.25 \times AWC_{ly})} - 1 \right) \right]$$

اگر

$$SW_{ly} < (0.25 \times AWC_{ly}) \quad (6)$$

$$W''_{up,ly} = W'_{up,ly} \quad \text{اگر} \quad SW_{ly} \geq (0.25 \times AWC_{ly}) \quad (7)$$

در این رابطه $W'_{up,ly}$ مقدار اصلاح شده پتانسیل جذب آب توسط گیاه با توجه مشارکت لایه‌های پایینی در تأمین آب مورد نیاز برای گیاه در لایه ly بوده (mm) و AWC_{ly} ظرفیت آب قابل دسترس در لایه ly (mm) است. در مدل SWAT، چنانچه پتانسیل جذب آب توسط گیاه ($W_{up,ly}$) کمتر از تعرق پتانسیل باشد، می‌توان از آب موجود در لایه‌های پایینی برای جبران کمبود آب استفاده کرد. بنابراین مقدار اصلاح شده پتانسیل جذب آب توسط گیاه با توجه مشارکت لایه‌های پایینی از رابطه ۸ به دست خواهد آمد (۲۳):

$$W'_{up,ly} = W_{up,ly} + (W_{demand} \times epco) \quad (8)$$

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \quad \text{اگر} \quad SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad (14)$$

در این روابط $E'_{soil,ly}$ مقدار تبخیر رخ داده از لایه ly با توجه به محدودیت رطوبت موجود در خاک (mm) است.

واسنجی مدل SWAT

در این تحقیق از نرم‌افزار (SWAT- SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Program) و الگوریتم SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version2) برای انجام واسنجی مدل SWAT استفاده شده است. در نرم‌افزار SWAT-CUP عملکرد الگوریتم مذکور در واسنجی متغیرهای مدنظر (از جمله رواناب) با استفاده از شاخص‌هایی همانند R -factor، P -factor، NS - ساتکلیف و ضریب تعیین (R^2) ارزیابی می‌شود. شاخص P -factor نشان‌دهنده درصد حضور داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) است. مقادیر این شاخص بین صفر تا یک بوده و هر چقدر عدد به دست آمده برای این شاخص به عدد یک نزدیک تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده است. شاخص R -factor نشان‌دهنده ضخامت پهنای باند عدم قطعیت (95PPU) بوده و حالت بهینه آن، حالتی است که در آن باند عدم قطعیت، کمترین ضخامت را داشته باشد. لازم بذکر است که مقدار شاخص R -factor بین صفر تا بی‌نهایت است (۱).

آزمون روند من - کندال

در تحقیق حاضر از آزمون من - کندال (Mann-Kendall Test) برای تحلیل روند سری زمانی متغیرهای اقلیمی استفاده خواهد شد. این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) توسعه یافت و کاربرد آن توسط سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۶۶) توصیه شده است (۲۰ و ۲۲). از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره کرد. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌شوند نیز از دیگر مزایای

در این رابطه $W_{up,ly}$ ، $W_{up,zl}$ و $W_{up,zu}$ به ترتیب مقدار پتانسیل جذب آب در لایه ly (mm)، پتانسیل جذب آب در عمق پایینی لایه ly (mm) و پتانسیل جذب آب در عمق بالایی لایه ly (mm) برای یک روز مشخص هستند. لازم به یادآوری است که تراکم ریشه گیاه در لایه سطحی خاک نسبت به لایه‌های پایینی بسیار بالا بوده و بیشتر مقدار آب جذب شده برای گیاه مربوط به این لایه است.

شبیه‌سازی تبخیر از خاک

مقدار تبخیر پتانسیل در پروفیل خاک (E'') در هر نقطه با توجه به عمق آن از سطح خاک متغیر بوده و مقدار آن از بالا به پایین کاهش می‌یابد. رابطه ۱۱ نحوه تغییرات مقدار پتانسیل تبخیر در اعماق مختلف را نشان می‌دهد (۲۳):

$$E_{soil,z} = \frac{z}{z + \exp(2.374 - (0.00713 \times z))} \times E''_s \quad (11)$$

در این رابطه $E_{soil,z}$ مقدار تبخیر پتانسیل خاک (mm) در عمق z (mm) از سطح خاک در یک روز مشخص است. لازم به ذکر است که این رابطه با این فرض به دست آمده است که ۵۰ درصد از نیاز تبخیر خاک از ۱۰ میلی‌متر اول خاک و همچنین ۹۵ درصد تبخیر پتانسیل خاک از ۱۰۰ میلی‌متر بالایی خاک تأمین می‌شود. برای محاسبه مقدار تبخیر پتانسیل از خاک از لایه ly در یک روز مشخص می‌توان از رابطه ۱۲ استفاده کرد:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad (12)$$

در این رابطه $E_{soil,ly}$ ، $E_{soil,zl}$ و $E_{soil,zu}$ به ترتیب مقدار پتانسیل تبخیر از خاک در لایه ly (mm)، پتانسیل تبخیر از خاک در عمق پایینی لایه (mm) و پتانسیل تبخیر از خاک در عمق بالایی آن (mm) هستند. چنانچه مقدار آب موجود در خاک کمتر از ظرفیت زراعی آن (FC) کمتر باشد آنگاه مقدار تبخیری که از خاک صورت می‌گیرد از روابط ۱۳ و ۱۴ به دست می‌آید (۲۳):

$$E'_{soil,ly} = \exp\left(\frac{2.5 \times (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \times E_{soil,ly}$$

اگر

$$SW_{ly} < FC_{ly} \quad (13)$$

رودخانه (Rte) بر اساس آمار و داده‌های موجود به مدل معرفی شدند. لازم به ذکر است که مدیریت‌های آبیاری و کشاورزی از قبیل تقویم زراعی، میزان آبیاری، دور آبیاری و کوددهی برای هر یک محصولات در هر یک از زیرحوضه‌ها، در زیربخش مدیریتی مدل SWAT (Mgt). در HRU های مربوطه اعمال شد. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی حوضه روی مقدار تبخیر و تعرق واقعی، نقشه‌های کاربری اراضی حوضه طی سال‌های ۱۹۸۷ (۱۳۶۶)، ۱۹۹۲ (۱۳۷۱)، ۱۹۹۹ (۱۳۷۸)، ۲۰۰۷ (۱۳۸۶) و ۲۰۱۵ (۱۳۹۴) در زیربخش Land Use Update (LUP) به مدل SWAT معرفی شد.

برای واسنجی مدل، ابتدا آنالیز حساسیت پارامترها صورت گرفته و پارامترهای مهم دخیل در رواناب تعیین شدند. نتایج این تحلیل در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول درجه تأثیر بعضی از پارامترهای مهم دخیل در شبیه‌سازی دبی خروجی از زیرحوضه‌ها با رتبه و همچنین مقدار p-value و t-stat آنها مشخص شده است. هر پارامتری که مقدار قدرمطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، تأثیر بیشتری روی دبی داشته است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب پاسخ جریان پایه (ALPHA-BF)، حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی (GWQMN)، هدایت هیدرولیکی مؤثر در رودخانه اصلی (CH-K2)، ضریب مانینگ رودخانه اصلی (CH-N2) و حداقل دما لازم برای ذوب برف (SMTMP) به ترتیب بیشترین تأثیر را در رواناب شبیه‌سازی شده زیرحوضه‌های حوضه آبی‌چای دارند. پس از آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل صورت گرفت. در ادامه به نتایج واسنجی و صحت‌سنجی ماهانه مدل SWAT اشاره می‌شود. لازم به ذکر است که دوره مورد مطالعه در تحقیق حاضر از ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ است که دوره ۱۳۸۳-۱۳۶۶ برای واسنجی و دوره ۱۳۹۴-۱۳۸۴ برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. در جدول ۲ نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارائه شده است. در شکل ۵ به عنوان نمونه سری زمانی رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT و رواناب مشاهداتی نظیر آنها در ایستگاه

استفاده از آن است (۱۱). در این آزمون مقادیر منفی آماره Z نشان‌دهنده روند کاهشی و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده روند صعودی متغیر مورد مطالعه است. چنانچه مقدار قدر مطلق متغیر Z از ۱/۹۶ بیشتر باشد آنگاه سری زمانی متغیر مورد بررسی در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای روند است. همچنین اگر مقدار قدرمطلق Z از ۲/۵۸ بیشتر باشد آنگاه در سطح اطمینان ۹۹ درصد سری زمانی متغیر مدنظر دارای روند است. در این تحقیق روند سری زمانی متغیرهای بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر، تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس سالانه طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ برای حوضه آبریز آبی‌چای مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

نتایج و بحث

پیکربندی مدل و صحت‌سنجی آن

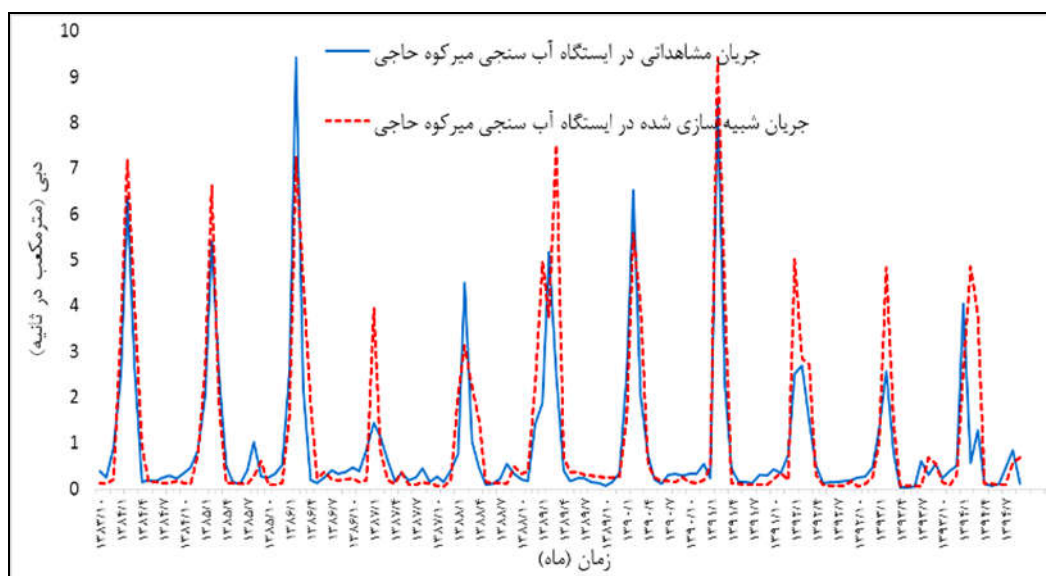
بر اساس لایه DEM مورد استفاده، حوضه آبریز آبی‌چای به ۱۴۰ زیرحوضه تقسیم شد. برای تخصیص منابع آب موجود به محصولات مختلف کشاورزی در هر یک از زیرحوضه‌ها در مدل SWAT و همچنین مدل‌سازی مقدار تبخیر و تعرق واقعی از اراضی کشاورزی آبی، در هر یک از زیرحوضه‌ها پیاده‌سازی الگوی کشت (نوع محصول و سطح زیرکشت آنها) صورت گرفت. به این منظور ابتدا بر اساس آمار و اطلاعات اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی، در هر یک از شهرستان‌های واقع در حوضه آبریز آبی‌چای محصولات عمده تعیین شده و درصد سطح زیرکشت آنها محاسبه شد. در نهایت درصد استخراجی برای هر کدام از محصولات در هر یک از زیرحوضه‌ها (با توجه به شهرستانی که در آن واقع شدند) روی نقشه‌های کاربری اراضی اعمال شد. در نتیجه این عمل و با توجه به نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و خاکشناسی حوضه، به تعداد ۷۱۰۳ HRU برای حوضه آبریز آبی‌چای تشکیل شد که از این تعداد ۴۳۳۸ HRU دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی است. بعد از تشکیل HRUها در ادامه پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی (Dat)، خاکشناسی (Sol)، سدها (Res)، مدیریت (Mgt)،

جدول ۱. نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر نهایی پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی رواناب زیرحوضه‌های آبی چای

رتبه	پارامتر	t-stat	p-value	محدوده نهایی پارامترها	واحد
۱	CN2	۴/۸۵	۰/۰۰۸	۳۱-۹۲	بدون بعد
۲	ALPHA-BF	۴/۶۵	۰/۰۲	۰/۰۰۰۰۰۵-۰/۰۲۵	یک بر روز (1/day)
۳	GWQMN	۴/۲۳	۰/۰۴	۳۰۰۰-۷۰۰۰	میلی‌متر (mm)
۴	CH-K2	۳/۹۶	۰/۰۴۹	۴-۱۵	میلی‌متر در ساعت (mm/hr)
۵	CH-N2	۳/۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۳۵-۰/۰۵	بدون بعد
۶	SFTMP	۳/۴۸	۰/۰۸۴	۱	درجه سانتی‌گراد (°C)
۷	SMTMP	۳/۱۵	۰/۰۸۷	۰/۵	درجه سانتی‌گراد (°C)
۸	GW-DELAY	۳/۰۷	۰/۰۹۶	۲-۶	روز (day)
۹	GW-SPYLD	۲/۹۸	۰/۱۰۶	۰/۰۱-۰/۰۶	متر بر متر (m/m)
۱۰	GW-REVAP	۲/۷۶	۰/۱۱۴	۰/۰۲	بدون بعد
۱۱	SOL-AWC(1)	۲/۱۲	۰/۱۳۷	۰/۰۷-۰/۲	بدون بعد
۱۲	SOL-K(1)	۱/۹۵	۰/۱۷۲	۰/۱-۲۲۵	میلی‌متر در ساعت (mm/hr)
۱۳	SOL-BD(1)	۱/۴۷	۰/۲۰۵	۱/۲-۱/۵	گرم در سانتی‌متر مکعب (gr/cm ³)
۱۴	ESCO	۱/۰۸	۰/۲۳۲	۰/۹۵	بدون بعد
۱۵	EPCO	۰/۹۸	۰/۲۸۶	۰/۰۱	بدون بعد
۱۶	CANMX	۰/۷۷	۰/۳۰۴	۵	میلی‌متر (mm)
۱۷	SMFMN	۰/۵۳	۰/۳۵۷	۴/۵	میلی‌متر بر درجه در روز (mm/day-°C)
۱۸	SMFMX	۰/۴۹	۰/۳۹۲	۴/۵	میلی‌متر بر درجه در روز (mm/day-°C)
۱۹	TIMP	۰/۲۴	۰/۴۲۷	۱	بدون بعد
۲۰	ALPHA-BNK	۰/۰۶	۰/۵۰۱	۰-۰/۵	یک بر روز (1/day)

جدول ۲. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT در حوضه آبریز آبی چای

نام ایستگاه	نام رودخانه	R	NS	P-factor	R-factor	R	NS	P-factor	R-factor	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
میرکوه	تاجیار	۰/۸۸	۰/۵۳	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۹۱	۰/۴۷	۰/۷۴	۰/۵۹	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
سهباب	آغمیون چای	۰/۶۳	۰/۱	۰/۵۴	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۱۴	۰/۵۶	۰/۷۶	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
بستان آباد	اوجان چای	۰/۷۱	۰/۱۵	۰/۶۹	۰/۸۵	۰/۸	۰/۳۵	۰/۷۱	۰/۷۷	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
سد نهند	نهندچای	۰/۸۳	۰/۴۷	۰/۷۱	۰/۶۷	۰/۷۶	۰/۴۳	۰/۶۸	۰/۸	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
سعیدآباد	سعید	۰/۶۳	-۰/۷	۰/۲۱	۱/۳	۰/۵	-۰/۳	۰/۲۵	۱/۱۵	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
ارزئق	آبی چای	۰/۷۷	۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۷۲	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
آناختون	گمناب چای	۰/۸۶	۰/۵	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۸	۰/۴۳	۰/۶۹	۰/۶۴	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
لیقوان	لیقوان چای	۰/۸۵	۰/۴۲	۰/۸	۰/۴۷	۰/۸۰	۰/۳۹	۰/۷۳	۰/۶۷	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
هروی	لیقوان چای	۰/۸۷	۰/۴۴	۰/۸۱	۰/۴۴	۰/۸۲	۰/۴۲	۰/۷۱	۰/۵۹	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
پل سنخ	پل سنخ چای	۰/۶۷	-۰/۲۵	۰/۲۸	۱/۱	۰/۳۵	-۰/۳۲	۰/۱۱	۱/۵	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
قرمزی گل	گمبرف چای	۰/۸۵	۰/۴	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۹	۰/۵	۰/۸۰	۰/۵۵	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
آخولا	آبی چای	۰/۷۸	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۶۹	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
سرین دیزج	آبی چای	۰/۸	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۸۹	۰/۵۶	۰/۷۴	۰/۶۱	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
مهربان	چکی چای	۰/۸۳	۰/۳۹	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۴۳	۰/۶۴	۰/۶۲	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
دیزناب	اوجان چای	۰/۸۲	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۱۲	۰/۵۳	۰/۸۴	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
مرکید	آبی چای	۰/۷۹	۰/۳۳	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۸۱	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
خواجه	پاژچای	۰/۶	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۹۸	۰/۵۶	۰/۰۸	۰/۴۵	۱/۰۴	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
پردیل	سنخ چای	۰/۷	-۰/۲	۰/۳۳	۱/۰۷	۰/۴	-۰/۲۷	۰/۱۷	۱/۴۲	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
هرزه ورز	هرزورزچای	۰/۷	۰/۲	۰/۴۲	۰/۹۵	۰/۶۳	۰/۱	۰/۳۱	۱/۱۱	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی
ونیار	آبی چای	۰/۸۸	۰/۴۳	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۸۳	۰/۴	۰/۶۷	۰/۸۹	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	صحت‌سنجی



شکل ۵. سری زمانی رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نظیر آنها در ایستگاه آب سنجی میرکوه حاجی طی دوره صحت سنجی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

مقدار تبخیر و تعرق واقعی محصولات به علت استرس‌های دمایی و کودی (علاوه بر کمبود آب در دسترس) بایستی از مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل آنها کمتر باشد که با توجه به جدول ۳ این اصل در تمامی دشت‌های حوضه برای همه محصولات عمده حاکم است.

تحلیل روند داده‌های اقلیمی حوضه

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها گفته شد در تحقیق حاضر تحلیل روند متغیرهای اقلیمی حوضه آبریز آجی‌چای شامل بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر به روش من‌کنندال انجام شد. در جدول ۴ نتایج تحلیل روند بارندگی در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آجی‌چای (شکل ۱) ارائه شده است.

مطابق با جدول ۴ به غیر از تعداد معدودی از ایستگاه‌های باران سنجی حوضه مقدار Z من‌کنندال مربوط به بارندگی سالانه در بیشتر ایستگاه‌ها طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ منفی است. ولی در ده ایستگاه روند کاهش بارندگی سالانه معنی‌دار بوده و در بقیه ایستگاه‌ها روند نزولی بارندگی سالانه معنی‌دار نیست. البته لازم به ذکر است که در تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌ها نیز از قبیل

آب سنجی میرکوه حاجی طی دوره صحت سنجی (۱۳۸۴-۱۳۹۴) ارائه شده است.

صحت سنجی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی

به دلیل نبودن هیچ گونه داده مشاهداتی برای واسنجی و صحت سنجی مقدار تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده محصولات، به منظور صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها، سعی شد متوسط مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده محصولات در سال‌های پرباران با مقادیر نظیر آنها در سند ملی آب مقایسه شود. در جدول ۳ نتایج این مقایسه ارائه شده است.

مطابق با جدول ۳ بین متوسط مقادیر تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد محصولات (در سال‌های پرباران) با مقادیر نظیر ارائه شده در سند ملی آب اختلاف کمی وجود دارد. به طوری که مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۲۰ میلی‌متر به دست آمده است که نشان از عملکرد مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محصولات دارد. این اختلاف در تمامی دشت‌ها برای محصول سیب‌زمینی بیشترین و برای محصول سیب‌کمرین مقدار را دارد. ضمن اینکه این نکته را هم باید در نظر داشت که

جدول ۳. مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده محصولات عمده در طول دوره رشد آنها (در سال‌های پرباران) با مقادیر ارائه شده در سند ملی آب در برخی از دشت‌های اصلی حوضه آبریز آجی‌چای

دشت	محصول	مقدار تبخیر و تعرق واقعی	مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل	اختلاف مقدار تبخیر و تعرق
		شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد محصول	محصول در طول دوره رشد آن بر	واقعی شبیه‌سازی شده با مقدار
		محصول (میلی‌متر)	اساس سند ملی آب (میلی‌متر)	سند ملی آب (میلی‌متر)
سراب	گندم	۳۲۳	۳۴۴	-۲۱
	یونجه	۷۳۸	۷۵۲	-۱۴
	سیب‌زمینی	۵۹۳	۶۱۱	-۱۸
	سیب	۶۲۳	۶۲۷	-۴
بستان آباد	گندم	۳۷۶	۴۰۲	-۲۶
	یونجه	۸۳۲	۸۴۵	-۱۳
	سیب‌زمینی	۷۴۰	۷۸۰	-۴۰
	سیب	۸۲۲	۸۳۵	-۱۳
بیلوردی	گندم	۳۴۹	۳۶۵	-۱۶
	یونجه	۸۳۱	۸۴۲	-۱۱
	سیب‌زمینی	۷۰۹	۷۴۲	-۳۳
	سیب	۸۱۳	۸۲۰	-۷
تبریز	گندم	۴۲۷	۴۵۴	-۲۷
	یونجه	۹۰۶	۹۱۹	-۱۳
	سیب‌زمینی	۷۷۳	۷۹۶	-۲۳
	سیب	۸۴۲	۸۵۱	-۹
	گوجه فرنگی	۷۱۸	۷۲۵	-۷

جدول ۴. مقادیر Z من‌کندال و شیب خط روند مربوط به سری زمانی سالانه بارندگی در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آجی‌چای

نام ایستگاه	Z من‌کندال	شیب خط روند	نام ایستگاه	Z من‌کندال	شیب خط روند	نام ایستگاه	Z من‌کندال	شیب خط روند
کمانج	-۲/۸۷ (**)	-۸/۷	هروی	-۰/۹۹	-	لیقوان	۰/۰۶	-
آلوجه ملک	-۱/۳۱	-	اسفهان	-۲/۰۱ (*)	-۴/۵۸	کالیان	-۱/۵۲	-
کهل	-۱/۱۱	-	دمیرچی	-۲/۰۱ (*)	-۴/۲۲	بستان آباد	-۲/۸۷ (**)	-۷/۲۵
افشرد	-۰/۲۶	-	مهربان	-۱/۱۴	-۱/۴۴	اسفروشان	-۱/۰۷	-
سهلان	-۰/۱۹	-	ایلخچی	-۲/۱۲ (*)	-۴/۹۲	گوگان	-۱/۶۳	-
آمند	-۰/۶۲	-	کردکندی	-۱/۲۲	-	آذرشهر	-۲/۱۹ (*)	-۴/۸۸
سد نهند	۰/۴۳	-	میرکوه حاجی	-۰/۲۸	-	آغمیون	-۱/۰۹	-
اسبخوران	-۰/۸۸	-	زینجناب	-۲/۷۶ (**)	-۵/۹۸	سراب	۰/۸۴	-
مرکید	-۰/۳۴	-	سعید آباد	-۱/۶۷	-	دیزناب	-۳/۳۸ (**)	-۹/۵
خشکناپ	-۱/۲۲	-	قزل گچی	-۰/۵۳	-	سلطان آباد	-۱/۰۷	-
خواجه	۰/۳۶	-	سهباب	۰/۹	-	شالگون	-۱/۱۴	-
ترکه‌داری	-۰/۷۷	-	قرمزگل	-۰/۵۸	-	گمبرف	-۰/۹۹	-
تبریز	۰/۳۶	-	رازلیق	-۰/۱۳	-	ابرقان	-۰/۳۲	-
هریس	-۰/۵۱	-	شربیان	-۲/۰۱ (*)	-۳/۳۲	سرساب	۱/۱۱	-
بخشایش	-۲/۰۴ (*)	-۳	کندوان	-۰/۹۹	-۳/۲۴	لوله‌سازی آذرشهر	۰/۲۸	-
قوشچی	-۰/۶۹	-						

* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

در تحقیق خود به این نتیجه دست یافتند که دمای حداقل و حداکثر سالانه در حوضه دریاچه ارومیه دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده ولی بارندگی سالانه حوضه روند کاهشی دارد (۱۷).

تغییرات کاربری اراضی حوضه

بر اساس نقشه‌های کاربری اراضی استخراج شده برای سال‌های مختلف، در جدول ۶ مساحت مربوط به هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی در سال‌های مختلف آورده شده است. مطابق با این جدول، مساحت کل کشت آبی حوضه در سال ۱۹۸۷ (۱۳۶۶) برابر با ۷۲۰۰۵ هکتار و در سال ۲۰۱۵ (۱۳۹۴) برابر با ۱۰۰۰۳۰ هکتار است که به‌میزان ۲۸۰۲۵ هکتار (۳۹ درصد) افزایش داشته است. با توجه به این جدول از سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۱۵ هر یک از کلاس‌های محدوده مسکونی، محصولات بهاره، محصولات تابستانه، باغات و کشت دیم به‌ترتیب ۱۷۰۶۵ (۹۳ درصد)، ۱۷۲۶۴ (۵۹ درصد)، ۳۰۷۰ (۳۳ درصد)، ۱۱۳۴۶ (۱۶۸ درصد) و ۷۴۰۹۲ (۶۲ درصد) هکتار افزایش داشته‌اند. البته در طی دوره گفته شده مساحت کشت یونجه و علوفه‌جات ۳۶۵۵ (۱۴ درصد) هکتار کاهش داشته است. نتایج تحقیق فتحیان و همکاران (۱۳۹۲) نیز حاکی از افزایش قابل توجه اراضی کشاورزی آبی در حوضه آبریز آجی‌چای است (۱۲).

تحلیل روند تبخیر و تعرق پتانسیل واقعی در حوضه

در تحقیق حاضر روند تبخیر و تعرق واقعی سالانه برای اراضی کشاورزی آبی و همچنین کل حوضه طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ نمودار سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده برای کل اراضی کشاورزی آبی حوضه آجی‌چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ ارائه شده است. با انجام آزمون روند من‌کندال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق واقعی، مقدار Z من‌کندال ۳/۵۵ به‌دست آمد که نشان از روند افزایشی معنی‌دار تبخیر و تعرق واقعی سالانه از اراضی کشاورزی آبی حوضه آجی‌چای در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. لازم به ذکر است که شیب این روند افزایشی طی دوره مورد

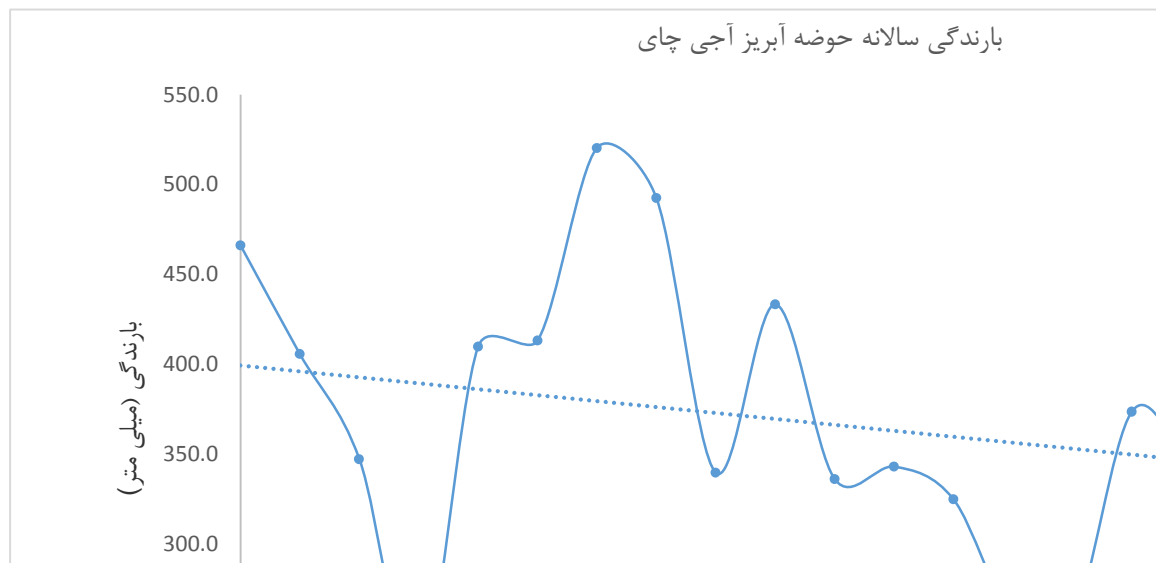
آلوچه ملک، کهل، خشک‌ناب، کردکندی، سعیدآباد، کالیان و گوگان مقدار Z من‌کندال به میزان معنی‌داری این آماره در سطح اطمینان ۹۵ درصد (۱/۹۶) نزدیک است که نشان از کاهش چشم‌گیر بارندگی سالانه در ایستگاه‌های گفته شده دارد. علاوه بر بررسی ایستگاهی، روند زمانی مقدار بارندگی متوسط حوضه آبریز آجی‌چای در مقیاس سالانه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۶ نمودار سری زمانی سالانه بارندگی متوسط کل حوضه آجی‌چای و روند تغییرات آن طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ ارائه شده است.

پس از انجام آزمون روند من‌کندال بر روی سری زمانی بارندگی سالانه حوضه آبریز آجی‌چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴، مقدار Z من‌کندال ۲/۱۲- به‌دست آمد که بیانگر روند کاهشی معنی‌دار بارندگی سالانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. همچنین شیب خط روند برابر با ۳/۱۵- میلی‌متر در سال به‌دست آمد.

تحلیل روند دمای حداقل و حداکثر سالانه حوضه

در جدول ۵ نتایج تحلیل روند دمای حداقل و دمای حداکثر سالانه در ایستگاه‌های تبخیرسنجی و سینوپتیک حوضه آجی‌چای آورده شده است. بر اساس جدول ۵ حداقل دمای سالانه در تمامی ایستگاه‌های حوضه به‌غیر از سه ایستگاه برازین، میکوه‌حاجی و آذرشهر به‌طور معنی‌دار افزایش یافته است. نرخ زمانی این افزایش در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق با این جدول این شیب برای دمای حداقل سالانه از ۰/۲۹ تا ۰/۱ سانتی‌گراد در سال متغیر است. همچنین مطابق با جدول ۵ دمای حداکثر سالانه در تمامی ایستگاه‌های حوضه آجی‌چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده است. لازم به ذکر است که سطح معنی‌داری در اکثر ایستگاه‌ها ۹۹ درصد است. نرخ افزایشی دمای حداکثر سالانه در ایستگاه‌ها از ۰/۴۸ تا ۰/۱۰۶ سانتی‌گراد در سال متغیر است.

نتایج تحقیق حاضر با نتایج حاصل از مطالعات فتحیان و مرید (۱۳۹۱) که به تحلیل روند متغیرهای اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه پرداخته بودند، مطابقت دارد. ایشان نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیده بودند که دمای سالانه حوضه دارای روند افزایشی بوده و بارندگی سالانه حوضه نیز بیشتر روند کاهشی دارد (۱۱). جلالی عنصرودی و همکاران (۱۳۹۴) نیز



شکل ۶. نمودار سری زمانی سالانه متوسط بارندگی کل حوضه آبی چای و روند تغییرات آن طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴

جدول ۵. مقادیر Z من کندال و شیب خط روند مربوط به سری زمانی دمای حداقل و حداکثر سالانه در

ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبی چای

نام ایستگاه	Z من کندال	شیب روند	شیب روند	نام ایستگاه	Z من کندال	شیب روند	Z من کندال	شیب روند
سد نهند	۲/۰۸(*)	۲/۹۵(***)	۰/۰۳۸	سهند	۱/۹۷(*)	۰/۰۶۸	۳/۷۳(***)	۰/۰۷۴
سهلان	۳(***)	۲/۶۱(***)	۰/۰۵۶	میرکوه حاجی	-۰/۳۹	۰/۰۵۲	۲/۰۸(*)	۰/۰۴۸
برازین	۰/۲۸	۲/۸۳(***)	-	سراب	۳/۱۳(***)	۰/۰۸۹	۲/۰۸(*)	۰/۰۵۵
هریس	۱/۹۸(*)	۲/۸۷(***)	۰/۰۲۹	بستان آباد	۲/۲۳(*)	۰/۰۰۶	۳/۰۶(***)	۰/۰۰۷
تبریز	۲/۲۷(*)	۳/۵(***)	۰/۰۳۸	لیقوان	۳/۲۵(***)	۰/۰۷۴	۲/۰۴(*)	۰/۰۷۵
قوری گل	۲/۰۴(*)	۲/۸۷(***)	۰/۰۳۷	آذرشهر	-۱/۰۷	۰/۰۷۳	۳/۷(***)	۰/۱۰۶

جدول ۶. مساحت کلاس‌های کاربری اراضی حوضه آبی چای در سال‌های مختلف

کلاس کاربری	۱۳۶۶	۱۳۷۱	۱۳۷۸	۱۳۸۶	۱۳۹۴
محدوده مسکونی	۱۸۳۹۳	۲۲۱۲۱	۲۶۴۶۱	۲۹۵۵۱	۳۵۴۵۸
بدنه آبی	۷۷۰	۴۳۵۰	۷۳۲۹	۱۹۲۷	۱۲۰۳
یونجه و علوفه جات	۲۶۷۱۲	۲۵۲۱۵	۲۰۲۹۲	۳۷۱۶۶	۲۳۰۵۸
محصولات تابستانه	۹۲۱۵	۱۱۲۰۴	۱۳۵۴۶	۸۸۹۹	۱۲۲۸۵
محصولات بهاره	۲۹۳۳۴	۳۴۳۰۸	۲۴۸۷۸	۴۳۸۲۱	۴۶۵۹۸
باغ	۶۷۴۴	۷۱۱۹	۱۰۰۸۵	۱۴۶۶۴	۱۸۰۹۰
کشت دیم	۱۱۹۰۰۴	۱۶۶۷۰۱	۱۰۹۸۷۰	۲۸۰۴۸۹	۱۹۳۰۹۶
مرتع	۸۸۵۱۸۹	۳۷۷۳۱۵	۳۲۵۲۰۰	۶۷۱۷۷۷	۶۵۹۴۰۱
بایر و شور	۱۶۶۹۵۷	۶۱۳۹۸۶	۷۲۴۶۵۶	۱۷۴۰۲۶	۲۷۲۹۹۹

حوضه شده است. چرا که این اراضی تحت آبیاری نبوده و منبع تغذیه رطوبت خاک آنها تنها بارندگی است.

نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی تأثیر توأم تغییرات عوامل اقلیمی و کاربری اراضی بر روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی طی دوره ۱۳۹۴-۱۳۶۶ در حوضه آبریز آجی چای انجام شد. برای این منظور ابتدا مدل جامع هیدرولوژیکی - گیاهی SWAT برای حوضه تنظیم شده و سپس مورد واسنجی و صحت سنجی قرار گرفت. در ادامه شبیه سازی سری زمانی تبخیر و تعرق واقعی برای دوره مورد مطالعه به عمل آمد. همچنین با استفاده از آزمون من کندانال تحلیل روند تغییرات زمانی متغیرهای اقلیمی و تبخیر و تعرق واقعی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT، پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب پاسخ جریان پایه (ALPHA-BF)، حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی (GWQMN) به ترتیب بیشترین تأثیر را در رواناب شبیه سازی شده زیرحوضه های حوضه آجی چای دارند. به منظور ارزیابی دقت مدل، میزان مطابقت رواناب ماهانه شبیه سازی شده با مقادیر مشاهداتی در ۲۰ ایستگاه آب سنجی واقع در حوضه با استفاده از چهار شاخص P-factor، R-factor، نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل در شبیه سازی رواناب طی دوره های واسنجی و صحت سنجی دارد. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی، متوسط مقادیر تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی شده در طول دوره رشد محصولات (در سال های پرباران) با مقادیر نظیر ارائه شده در سند ملی آب مورد مقایسه قرار گرفت که مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۲۰ میلی متر به دست آمد. بررسی نقشه های کاربری اراضی طی دوره ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ نشان داد که مساحت کل کشت آبی حوضه در سال ۱۹۸۷ برابر با ۷۲۰۰۵ هکتار و در سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۰۰۰۳۰ هکتار است که

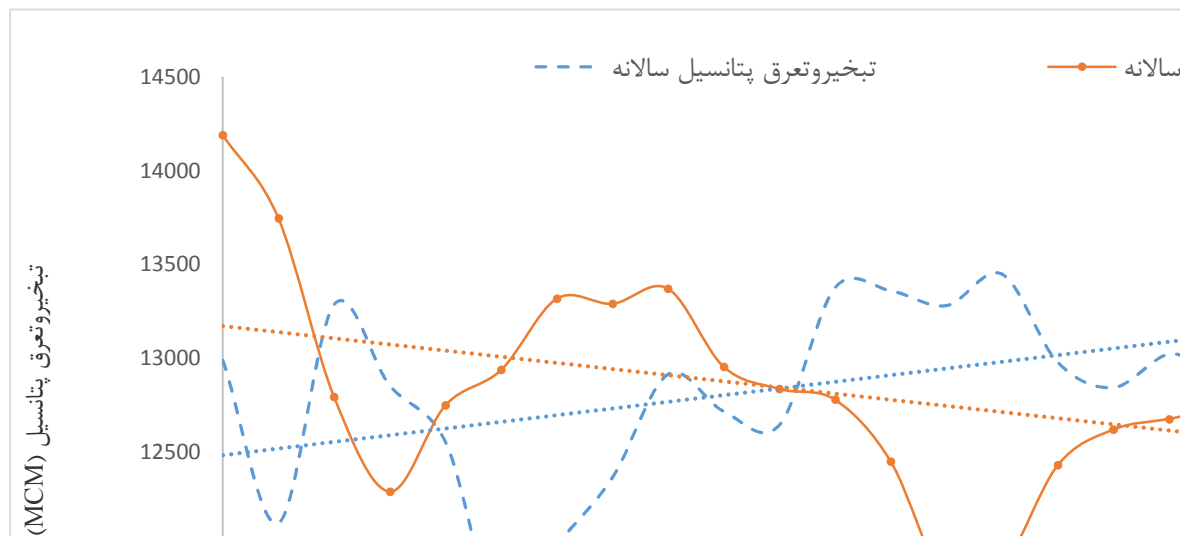
مطالعه MCM ۷ در سال است که بیانگر افزایش مقدار تبخیر و تعرق واقعی از اراضی کشاورزی حوضه سالانه به میزان MCM ۷ است.

علاوه بر اراضی کشاورزی آبی حوضه، روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی سالانه در کل حوضه آبریز آجی چای نیز مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۷ سری زمانی حجم تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی سالانه شبیه سازی شده در کل حوضه آبریز آجی چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ و روند تغییرات آنها نشان داده شده است.

انجام تحلیل روند با استفاده از روش من کندانال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داد که طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ این متغیر دارای روند صعودی است. مقدار Z من کندانال برابر با ۲/۹۵ به دست آمد که حاکی از روند افزایشی معنی دار تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبریز آجی چای در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. همچنین شیب خط روند برابر با ۳۲ میلیون متر مکعب در سال شد که با توجه مساحت حوضه آجی چای (۱۲۶۰۰ km^2) معادل ۲/۵۴ میلی متر در سال است.

انجام آزمون روند من کندانال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق واقعی نشان داد که طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ این متغیر روند نزولی دارد. مقدار Z من کندانال برای دوره مذکور ۲/۷۶- به دست آمد که نشانگر کاهش معنی دار تبخیر و تعرق واقعی حوضه آجی چای در سطح اطمینان ۹۹ درصد طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ است. شیب خط روند برای متغیر تبخیر و تعرق واقعی برابر با MCM ۲۷/۶- در سال (معادل ۲/۲ میلی متر در سال) است. به این معنی که از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ به طور متوسط در هر سال ۲/۲ میلی متر تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه کمتر شده است.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به اینکه مساحت کاربری های اراضی دیگر از قبیل مراتع، اراضی بایر و دیم نسبت به اراضی کشاورزی آبی به مراتب زیاد است لذا کاهش تبخیر و تعرق واقعی در این اراضی در نتیجه کاهش بارندگی در مجموع باعث کاهش حجم تبخیر و تعرق واقعی سالانه در کل



شکل ۷. سری زمانی حجم تبخیر و تعرق پتانسیل و تبخیر و تعرق واقعی سالانه شبیه‌سازی شده در کل حوضه آبریز آجی‌چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ و روند تغییرات آنها (رنگی در نسخه الکترونیکی)

و تعرق واقعی سالانه در این اراضی در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارد. لازم به ذکر است که شیب این روند افزایشی طی دوره مورد مطالعه ۷ MCM در سال است. انجام تحلیل روند با استفاده از روش من‌کنندال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل مقدار Z من‌کنندال برابر با ۲/۹۵ را حاصل کرد که حاکی از روند افزایشی معنی‌دار تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبریز آجی‌چای در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. شیب این روند افزایشی ۲/۵۴ میلی‌متر در سال است. انجام آزمون روند من‌کنندال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق واقعی از کل حوضه، نشانگر کاهش معنی‌دار تبخیر و تعرق واقعی حوضه آجی‌چای در سطح اطمینان ۹۹ درصد طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ است. به طوری که از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۴ به طور متوسط در هر سال ۲/۲ میلی‌متر تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوضه کمتر شده است.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد با وجود افزایش سطح زیرکشت آبی در حوضه آبریز آجی‌چای و همچنین افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر و در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در این، به دلیل روند کاهشی بارندگی (کاهش میزان موجودیت آب)، میزان تبخیر و تعرق واقعی کل حوضه آجی‌چای طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ روند نزولی داشته و مقدار آن کاهش یافته است.

به میزان ۲۸۰۲۵ هکتار (۳۹ درصد) افزایش داشته است. تحلیل روند سری زمانی سالانه بارندگی طی دوره ۱۳۶۶-۱۳۹۴ نشان داد که به غیر از تعداد معدودی از ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه مقدار Z من‌کنندال در بیشتر ایستگاه‌ها منفی است. ولی در ۱۰ ایستگاه روند کاهش بارندگی سالانه معنی‌دار است. علاوه بر بررسی ایستگاهی، روند زمانی متوسط بارندگی سالانه کل حوضه آبریز آجی‌چای نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر روند کاهشی معنی‌دار بارندگی سالانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارد. همچنین شیب خط روند برابر با ۳/۱۵- میلی‌متر در سال به دست آمد. نتایج تحلیل روند دمای حداقل و دمای حداکثر سالانه در ایستگاه‌های تبخیرسنجی و سینوپتیک حوضه آجی‌چای نشان داد که دمای حداقل سالانه در اکثر ایستگاه‌ها و دمای حداکثر سالانه در تمامی ایستگاه‌های حوضه به‌طور معنی‌دار افزایش یافته است. نرخ زمانی این افزایش برای دمای حداقل سالانه از ۰/۰۲۹ تا ۰/۱ سانتی‌گراد در سال و برای دمای حداکثر سالانه از ۰/۰۴۸ تا ۰/۱۰۶ سانتی‌گراد در سال متغیر است.

با انجام آزمون روند من‌کنندال روی سری زمانی سالانه تبخیر و تعرق واقعی از اراضی کشاورزی آبی حوضه، مقدار Z من‌کنندال ۳/۵۵ به دست آمد که نشان از روند افزایشی معنی‌دار تبخیر

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K. C. 2008. SWAT calibration and uncertainty programs. A User Manual. Department of systems analysis, integrated assessment and modelling (SIAM), Eawag, Swiss federal institute of aquatic science and technology, Duebendorf, Switzerland, 95pp.
2. Arnold, J. G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes* 19(3): 563-572.
3. Arnold, J. G., R. S. Muttiah, R. Srinivasan and P. M. Allen. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River basin. *Journal of Hydrology* 227(1-4): 21-40.
4. Arnold, J. G., P. Srinivasan, R. S. Muttiah and J. R. Williams. 1998. Large areahydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.
5. Bandyopadhyay, A., A. Bhadra, N. S. Raghuwanshi and R. Singh. 2009. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(5): 508-515.
6. Buffoni, L., M. Maugeri and T. Nanni. 1999. Precipitation in Italy From 1833 to 1996. *Theoretical and Applied Climatology* 63: 33.
7. Burn, D. H. and N. M. Hesch. 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology* 336: 61-73.
8. Darabi, H., A. Jafari and K. Akhavan Farshchi. 2016. Analysis of climate change trends in Qom province and its consequences. *Journal of Environmental Sciences Studies* 5: 25-40. (in Farsi).
9. Dosti Rezaei, M., F. Dadravan, E. Rezaei Abajlou and M. A. Mahdavi. 2013. Investigation of temperature increase and land use change in Urmia Lake catchment area and its effect on potential and actual evapotranspiration of the basin and free water levels. 5th Iranian Water Resources Management Conference, Tehran, Iran.
10. Ehsani, A., H. Arzani, M. Farahpour, H. Ahmadi, M. Jafari and M. Akbarzadeh. 2012. Evapotranspiration estimation using climatic data, plant characteristics and cropwat 8.0 software (Case Study: Steppic Region of Markazi Province, Roodshore Station). *Iranian Journal of Range and Desert Research* 19: 1-16. (in Farsi).
11. Fathian, F. and S. Morid. 2012. Investigation of meteorological and hydrological variables trend in Urmia Lake basin using non-parametric methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 3(43): 259-269. (in Farsi).
12. Fathian, F., S. Morid and S. Arshad. 2013. Trend assessment of land use changes using remote sensing technique and its relationship with streamflows trend (Case Study: The East Sub-Basins of Urmia Lake). *Journal of Water and Soil* 27: 642-655. (in Farsi).
13. Garbrecht, J., M. Van Liew and G. O. Brown. 2004. Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States. *Journal of Hydrological Engineering* 9(5): 360-367.
14. Goroshi, S., R. Pradhan, R. P. Singh, K. K. Singh and J. S. Parihar. 2017. Trend analysis of evapotranspiration over India: Observed from long-term satellite measurements. *Journal of Earth System Science* 126(8): 1-21.
15. Green, C. H. and A. V. Griensven. 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modeling and Software* 23: 422-434.
16. Jain, S. K., V. Kumar and M. Saharia. 2013. Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. *International Journal of Climatology* 33: 968-978.
17. Jalali Ansarodi, T., F. Sarafuzeh and B. Zainali. 2015. Trend analysis of climatic variables in Urmia Lake basin, 5th Regional Conference on Climate Change, Tehran. (in Farsi).
18. Kanani, R., A. Fakheri Fard, M. A. Ghorbani and Y. Dinpashoh. 2019. Trend analysis of gradual and rapid variations of hydro-climatological factors (Case Study: Lighvanchai Basin). *Water and Soil Science* 29: 97-110. (in Farsi).
19. Kang, M. S., S. W. Park, J. J. Lee and K. H. Yoo. 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* 79: 72-92.
20. Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Methods, Oxford Univ. Press, New York.
21. Luo, Y., C. He, M. Sophocleous, Z. Yin, R. Hongrui and Z. Ouyang. 2008. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology* 352: 139-156.
22. Mann, H. B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend, *Econometrica*, 13, 245-259. Published by: The Econometric Society.
23. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009). Texas Water Resource Institute Technical Report.
24. Olchev, A., A. Ibrom, J. Priess, S. Erasmi, C. Leemhuis, A. Twele, K. Radler, H. Kreilein, O. Panferov and G. Gravenhorst. 2008. Effects of land-use changes on evapotranspiration of tropical rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia): Modelling study with a regional SWAT model. *Ecological Modeling* 212(1-2): 131-137.
25. Schuol, J., K. C. Abbaspour, R. Srinivasan and H. Yang. 2008. Estimation of freshwater availability in the West

- African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology* 352: 30-49.
26. Sharghi, T., H. Bari Abarghuei, M. A. Asadi and M. R. Kousari. 2010. Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. *Arid Biome* 1: 25-33. (in Farsi).
 27. Soil Conservation Service, 1972. Section 4: "Hydrology in National Engineering Handbook." SCS.
 28. Tabari, H., S. Marofi, A. Aeni, P. Hosseinzadeh Talaei and K. Mohammadi. 2011. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(2): 128-136.
 29. Taleghani, D. A. and B. Khoshmanesh. 2018. Assessment of Precipitation, Evapotranspiration and Discharge Changes of Kan River Basin, with Regard to Climate Change. Vol. 62:1-18. (in Farsi).
 30. Urmia Lake Restoration Program, Project of study and present solutions to implement the decree of 40% reduction of agricultural water consumption in Ajichai basin, report 2: Soil studies of Ajichai basin. (in Farsi).
 31. Urmia Lake Restoration Program, Project of study and present solutions to implement the decree of 40% reduction of agricultural water consumption in Ajichai basin, Report 3: Landuse studies of Ajichai basin. (in Farsi).
 32. Valizadeh Kamran, K. H., S. Jahanbakhsh, M. Zahedi and B. Rezaei. 2012. Estimation of actual evapotranspiration and analysis of its relationship with land use in GIS environment (Case study: Meshkinshahr city). *Geographical-Space* 12: 39-54. (in Farsi).
 33. Wu, H. and H. Qian. 2017. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. *International Journal of Climatology* 37(2): 2582-2592.
 34. Yang, Z., Q. Zhang, X. Hao and G. Liu. 2016. Evapotranspiration trend and its relationship with precipitation over the loess plateau during the last three decades. *Advances in Meteorology* 2016: 1-10.

Evaluation of the Simultaneous Effect of Changes of Climatic Variables and Land Use on the Actual Evapotranspiration Trend Using the SWAT Model in the Ajichi Basin

H. Ahmadzadeh^{1*}, A. Fakheri Fard¹, M. A. Ghorbani¹ and M. Tajrishy²

(Received: November 12-2020 ; Accepted: November 6-2021)

Abstract

Determining the actual evapotranspiration value and analyzing its temporal trend is essential for optimal water resources management in a basin. In the present paper, the actual evapotranspiration time series is simulated and its trend is analyzed according to the trend of climatic variables and land use in the Ajichi basin during the period of 2015-1987. The comprehensive SWAT model was set up, calibrated, and validated for the Ajichi basin. Also, the average of simulated actual evapotranspiration of crops (in wet years) was compared with similar values in the National Water Document. The results of the Mann-Kendall trend test showed that the annual rainfall in most meteorological stations had a decreasing trend and the rainfall trend in the ten stations decreased significantly. While the annual maximum temperature at all stations and the annual minimum temperature in most of them have significantly increased. Investigation of land use maps illustrated that the irrigated land area of the basin has increased by a 39% during the study period. According to the study's results, the potential evapotranspiration of the basin has had a significant increasing trend with a rate of 2.54 mm per year. The results indicated that despite the increasing trend of potential evapotranspiration and irrigated land area, the actual evapotranspiration of the basin had a significant decreasing trend with a rate of 2.2 mm per year due to the decrease in rainfall.

Keywords: Climate variables, Land use, Actual evapotranspiration, SWAT, Trend analysis, AjiChi basin.

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2. Department of Water and Environment Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: tajrishy@sharif.edu