

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های آبی به کمک تکنیک سنجش از دور و الگوریتم توازن انرژی سبال

سمانه پورمحمدی^۱، محمدتقی دستورانی^۲، مهران فاطمی^۳، علیرضا مساح بوانی^۴، هادی جعفری^۵

(۱) دکتری علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشگاه یزد (شرکت آب و نیروی ایران).

(۲) دانشیار و عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) عضو هیات علمی دانشگاه میبد.

(۴) عضو هیات علمی دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان.

(۵) عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شاهرود.

*نویسنده مسئول: s.poormohammadi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

چکیده

تبخیر و تعرق از مهم‌ترین منابع هدر رفت آب در حوزه‌های آب‌خیز بوده و بنابراین شناخت ابعاد مختلف آن در مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد. از طرف دیگر آگاهی از تبخیر و تعرق واقعی دشت‌ها جهت مدیریت الگوی کشت و تعیین برنامه ریزی‌های آبیاری مناطق باغی و زراعی حائز اهمیت است. با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر تمامی ابعاد زیست محیطی حوزه‌های آب‌خیز، بررسی این تغییرات بر تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آب‌خیز به عنوان عامل اساسی در تعیین بیلان آب و مدیریت آبیاری جهت برنامه ریزی‌های مدیریت پایدار منابع طبیعی و محیط زیست ضروری می‌باشد. بنابراین هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر تبخیر و تعرق واقعی حوزه آب‌خیز تویسرکان در غرب کشور می‌باشد. به این منظور از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و الگوریتم سبال جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی ۱۰ ساله حوزه آب‌خیز تویسرکان استفاده شد. بررسی اثرات تغییر اقلیم از طریق ۱۵ مدل گردش عمومی جو و تحت دو سناریوی AIB و B1 در نرم‌افزار LARS-WG صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که به احتمال وقوع ۸۰٪ در دوره‌های آبی دمای کمینه از ۱۳٪ تا ۲۰٪ و دمای بیشینه از ۴/۲ تا ۴/۶ درصد افزایش داشته است. تبخیر و تعرق واقعی نیز به احتمال وقوع ۸۰٪ در دوره‌های آبی از ۰/۰۴ تا ۱/۴٪ افزایش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، تبخیر و تعرق واقعی، الگوریتم سبال، LARS-WG

مقدمه

تبخیر، تغییر فاز آب مایع به بخار است و در هیدرولوژی، مدیریت منابع آب، هواشناسی، اقلیم‌شناسی، بوم‌شناسی و کشاورزی از متغیرهای اصلی محسوب می‌شود. بنا به تعریف، تبخیر و تعرق بالقوه عبارت از اتلاف آب از سطح خاک مرطوب کاملاً پوشیده شده با گیاه می‌باشد، به نحوی که مساحت ناحیه به حدی بزرگ باشد که اثرات واحه‌ای بر آن، قابل چشم‌پوشی باشد (Koloskov et al., 2006). برآورد تبخیر و تعرق بالقوه به کمک سنجش از دور در سطح جهان صورت گرفته است. نقشه جهانی تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و مدل پنمن - مانیتیت در سال ۱۹۹۸ تهیه شد (Bastiaanssen et al., 1998). در این عملیات، آلبیدوی سطح، معادل ۲۳ درصد منظور و سایر اطلاعات از طریق برقراری روابط تجربی میان متغیرهای ماهواره‌ای و اطلاعات زمینی تهیه شده‌اند. کاربرد سنجش از دور در تعیین نیازآبی محصولات و حتی ضرایب گیاهی نیز به تعدد صورت گرفته است. در این ارتباط می‌توان به مدل ارتباط خطی و فرم‌های اصلاح شده غیرخطی آن اشاره کرد (Bastiaanssen et al., 1998). در این مدل‌ها، ارتباط غیرخطی میان تفاضل دمای سطح و اتمسفر با اجزاء معادله بیلان انرژی از جمله گرمای نهان تبخیر، از طریق روابط رگرسیونی برقرار می‌گردد. اما محدودیتی برای این روابط وجود دارد و آن، محدودیت کاربرد آن‌ها در زمان و مکان توسعه مدل می‌باشد. بدین معنی که این مدل‌ها در دوره‌های زمانی خارج از دوره توسعه مدل و مناطقی به جز منطقه توسعه مدل، عموماً قابل کاربرد نیستند، مگر از طریق واسنجی در نواحی جدید (Bastiaanssen, 2000). در مقابل معادلات تجربی، روش‌های مبتنی بر فیزیک پدیده تبخیر قرار دارد که عموماً در آن‌ها، معادله بیلان انرژی سطح برای کمیت گرمای نهان تبخیر حل می‌گردد و سایر اجزاء معادله مستقیماً با استفاده از تفسیر اطلاعات ماهواره‌ای و یا به طور غیرمستقیم از مقادیر داده‌های زمینی تعیین و بکار گرفته می‌شوند. در میان این مدل‌ها می‌توان به مدل شناخته شده "سبال" اشاره کرد (Bastiaanssen and Menenti, 1990). تفکیک سطوح با کاربری متفاوت توده‌های آب، خاک خشک، کشتزار، مرتع، جنگل، کاربری شهری و غیره از سایر عوارض از دیگر قابلیت‌های سنجش از دور می‌باشد که به سادگی به وسیله طول موج‌های مرئی و فروسرخ نزدیک قابل انجام است (Bastiaanssen and Menenti, 1990). از آنجا که آب در طول موج‌های بزرگتر (فروسرخ نزدیک و میانی) اکثر انرژی الکترومغناطیسی دریافتی را جذب و مقادیر ناچیزی از آن را بازتاب می‌نماید، در تصاویر این باندها، توده‌های آب سطحی و خاک مرطوب به صورت سلول‌های تیره رنگ ظاهر می‌گردد (Krause and Bronstert, 2005). همان‌طور که در بالا ذکر شد تعیین تبخیر و تعرق واقعی توسط سنجش از دور توسط الگوریتم‌های پایه فیزیکی مثل سبال، سپس، متریک و غیره محاسبه می‌شود. تهیه نقشه تبخیر و تعرق واقعی در مدیریت کشاورزی و الگوی کشت و همچنین جهت مدیریت منابع آب در حوزه‌های آبخیز حائز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر تغییرات اقلیمی تمام محیط طبیعی بشر را دستخوش تغییر قرار داده است و تبخیر و تعرق واقعی از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. شبیه‌سازی تبخیر و تعرق در دوره‌های آتی علت پیچیدگی این فرایند، کار دشواری می‌باشد و کمتر در سطح ملی و بین‌المللی به آن پرداخته شده است. Huo و همکاران (۲۰۱۳) تحقیقی را

بر روی اثر تغییرات اقلیم بر تبخیر و تعرق مرجع در حوزه‌ای در شمال چین به انجام رساندند. نتایج نشان داد که روند دما، بارش و رطوبت رو به افزایش و تشعشع و سرعت باد رو به کاهش بوده است و تبخیر و تعرق تحت تاثیر تغییرات اقلیم کاهش یافته است. Thompson و همکاران (۲۰۱۴) طی تحقیقی به بررسی عدم قطعیت‌های ناشی از تغییر اقلیم و روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع پرداختند. در این تحقیق از روش پنمن، هارگریوز سامانی و پریستلی تیلر در تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل و از مدل گردش عمومی جو استفاده شد. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق در دوره‌های آتی تحت مدل‌های مختلف بین ۲ تا ۲/۵ برابر با استفاده از فرمول‌های مختلف در دوره آتی افزایش خواهد یافت. King و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل با الگوریتم جدیدی که تابش برون زمینی را مدنظر قرار می‌دهد، در حوزه‌ای در شمال آمریکا پرداختند. به این منظور از داده‌های دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۸۱ استفاده نمودند و داده‌های ۲۰۷۰-۲۹۹ را برای تبخیر و تعرق شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد تحت مدل هادلی ۳۵ درصد، تحت تاثیر مدل MIROC ۴۵٪ و تحت تاثیر مدل CSIR ۷/۳٪ تبخیر و تعرق نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. Nam و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق مرجع در قسمت‌های شمالی کره جنوبی پرداختند. این تحقیق در دوره ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۲ صورت گرفت نتایج نشان داد که تغییرات زمانی و مکانی در تبخیر و تعرق مرجع در طول دوره مطالعاتی رخ داده است و این تغییرات کاملاً وابسته به سطح زیرکشت و کشاورزی منطقه و افزایش پارامتر دما بوده است. Dastorani و همکاران (۲۰۱۰) طی تحقیقی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه یزد پرداختند. در این تحقیق دو شاخص خشکسالی RDI و SPI را تحت تاثیر مدل‌های گردش عمومی جو (Hadcm3) و تحت دو سناریوی A2 و B2 مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق دوره پایه را ۱۹۹۰-۱۹۶۱ در نظر گرفتند و با پیش‌بینی دما و بارش در دوره آتی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ شاخص‌های خشکسالی را در این دوره محاسبه نمودند. روند نمودارهای شاخص‌های RDI و SPI تحت سناریوی A2 منفی و رو به خشک‌سال شدن و روند این شاخص‌ها تحت سناریوی B2 مثبت و رو به ترسال شدن را نشان می‌داد. Poormohammadi و Malekinejad (۲۰۱۳) طی تحقیقی به بررسی طبقه‌بندی مناطق همگن اقلیمی کشور ایران تحت تاثیر تغییر اقلیم با استفاده از تکنیک گشتاور خطی در کل کشور پرداختند. به همین منظور با استفاده از مدل Hadcm3 و با دو سناریوی A2 و B2 به بررسی اثرات تغییر اقلیم در ۴۰ ایستگاه سینوپتیک کشور در بازه زمانی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ پرداخته شد. سپس بر اساس سه پارامتر بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه در دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و دوره آتی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و با استفاده از روش آنالیز خوشه به جداسازی مناطق همگن اقلیمی اولیه پرداخته شد. آنگاه با استفاده از روش تجزیه عاملی به تعیین موثرترین پارامتر اقلیمی در تعیین مناطق همگن اقدام شد. سرانجام جهت تعیین مناطق همگن نهایی از تکنیک گشتاور خطی استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داد که مهم‌ترین پارامتر در تعیین مناطق همگن اقلیمی دمای کمینه بود و در تعیین مناطق همگن نهایی به کمک تکنیک گشتاور خطی از این پارامتر استفاده گردید. Dastorani و همکاران (۲۰۱۱) طی تحقیقی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه یزد پرداختند. آن‌ها از مدل

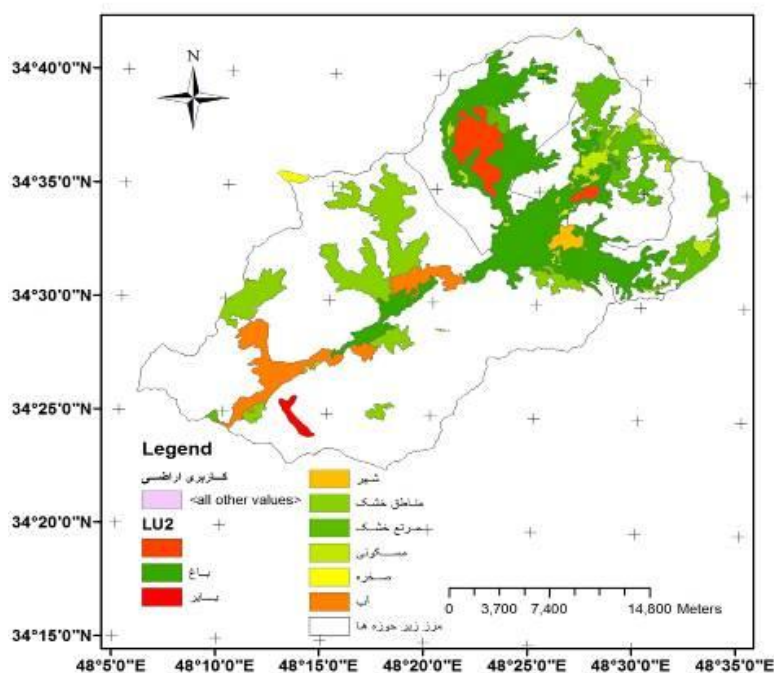
Hadcm3 و تحت دو سناریوی A2 و B2 جهت شبیه‌سازی دمای کمینه و بیشینه در دوره آتی ۲۰۳۹-۲۰۱۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آتی ۰/۴ میلی‌متر در سال افزایش خواهد. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های آتی و با احتمال وقوع ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد می‌باشد.

مواد روش‌ها

حوزه آبخیز تویسرکان در قسمت غربی استان همدان واقع شده است. حوزه آبخیز تویسرکان به وسعت ۷۹۱/۹۰ کیلومترمربع می‌باشد که ۲۰/۷ درصد از مساحت آن را دشت تویسرکان با مساحت ۱۶۴/۴۶ کیلومتر مربع تشکیل می‌دهد. این حوزه آبخیز دارای کاربری‌های اراضی متعددی بوده و بخش اصلی دشت را مناطق کشاورزی آبی و دیم تشکیل می‌دهد. جدول (۱) ویژگی‌های اقلیم حوزه آبخیز تویسرکان را نمایش می‌دهد. در شکل (۱) نیز نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تویسرکان نمایش داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های اقلیم حوزه آبخیز تویسرکان

میانگین دمای بیشینه	میانگین دمای کمینه	میانگین بارش سالانه
۱۹/۵	۳/۹	۳۳۵



شکل ۱: نقشه کاربری اراضی در حوزه آبخیز تویسرکان

این تحقیق شامل سه قسمت مجزا می‌باشد. در بخش اول به کمک الگوریتم توازن انرژی سببال، تبخیر و تعرق واقعی محاسبه می‌شود. در بخش دوم رابطه بین تبخیر و تعرق واقعی و پارامترهای اقلیمی توسط تکنیک تحلیل عاملی تعیین می‌شود و در گام سوم به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق واقعی دشت تویسرکان پرداخته خواهد شد. در این تحقیق از ۳۶

تصویر ماهوره‌ای مودیس از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد. سعی شد تصاویر دریافتی مربوط به فصول مختلف سال باشند. ولی به علت برفگیر بودن منطقه و وجود سیستم‌های ابرناکی متعدد به ویژه در فصول سرد سال، تجمع تصاویر در فصول گرم و معتدل سال بیش‌تر شد. در جدول (۲) لیستی از تصاویر استفاده شده نمایش داده شده است. جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان از الگوریتم توازن انرژی سبال استفاده شد. به علت کوهستانی بودن منطقه از نسخه سبال کوهستانی استفاده گردید.

نسخه کوهستانی الگوریتم سبال

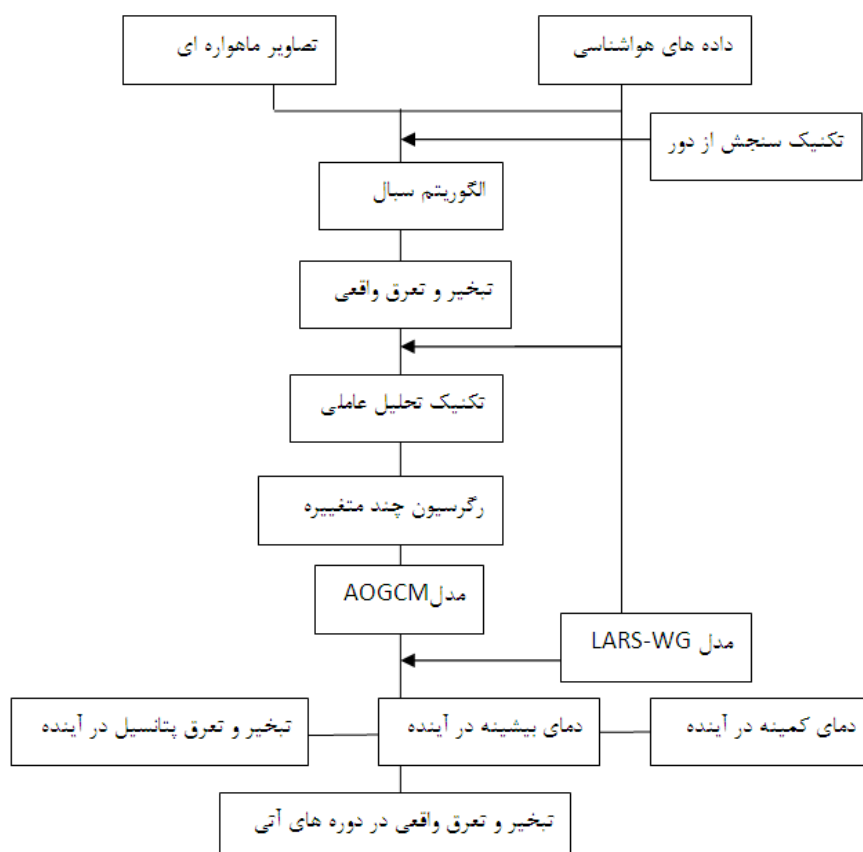
الگوریتم سبال تخمین صحیحی از تبخیر و تعرق در اراضی کشاورزی نسبتاً مسطح ارائه می‌دهد. برای استفاده از این الگوریتم در مناطق کوهستانی که دارای پستی و بلندی‌های زیاد همراه با تنوع در شیب و جهت شیب می‌باشد، مدل سبال کوهستانی توسعه یافت (Allen et al., 2003). مدل سبال کوهستانی اصلاحاتی را بر اساس شیب، جهت شیب و ارتفاع انجام داده است. در نیمکره شمالی تشعشع خورشیدی ۲۴ ساعته (روزانه) به طور عمومی در شیب‌های جنوبی نسبت به شیب‌های شمالی بسیار بزرگ‌تر می‌باشد. چنانچه تصحیحاتی برای شیب، جهت شیب و ارتفاع صورت نگیرید، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده در شیب‌های شمالی و مناطق مرتفع بسیار زیاد خواهد بود. چراکه سبال به طور ناصحیح دمای سطح را پیش‌بینی نموده و حتی به عنوان مناطق مرطوب شناسایی خواهد کرد. این در حالی است که دمای سردتر ثبت شده در شیب‌های شمالی و مناطق مرتفع به دلیل رطوبت این مناطق نبوده بلکه به دلیل افت دمای ناشی از افزایش ارتفاع و نرسیدن نور خورشید به دلیل جهت شیب این مناطق بوده است. پیش‌بینی جریان هوا و سرعت باد در مناطق کوهستانی با مشکلاتی همراه است. دلایل این امر به سقوط هوای سرد ناشی از عوامل ارتوگرافی، افزایش جریان هوای عبوری از بین کوه‌ها به واسطه اثرات ونتوری و اثرات کشش هوا به واسطه توپوگرافی موج می‌باشد که همه این عوامل منجر می‌شوند تا پیش‌بینی سرعت باد بسیار مشکل و پیچیده شود. به این منظور این الگوریتم از نقشه رقومی ارتفاع جهت تشخیص درجه و جهت شیب استفاده می‌کند و با استفاده از روابط مختلف می‌تواند مناطق کوهستانی را از غیرکوهستانی شناسایی نماید و خطاهای ایجاد شده در اثر سایه‌اندازی و تشخیص نقاط سرد و گرم را برطرف نماید (Poormohammadi et al., 2014).

جدول ۲: تصاویر مورد استفاده جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی

شماره تصویر	روز ژولیبوسی	تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	شماره تصویر	روز ژولیبوسی	تاریخ شمسی	تاریخ میلادی
۱	۸۷	۸ فرودین ۸۲	۲۸ مارس ۲۰۰۳	۱۷	۷۹	۱ فرودین ۸۶	۲۱ مارس ۲۰۰۷
۲	۱۴۴	۳ خرداد ۸۲	۲۴ می ۲۰۰۳	۱۸	۱۲۱	۱۹ اردیبهشت ۸۶	۱ می ۲۰۰۷
۳	۲۱۰	۷ مرداد ۸۲	۲۹ ژوئیه ۲۰۰۳	۱۹	۱۸۱	۹ تیر ۸۶	۷ ژوئن ۲۰۰۷
۴	۲۹۹	۴ آبان ۸۲	۲۶ اکتبر ۲۰۰۳	۲۰	۳۲۴	۲۹ آبان ۸۶	۷ نوامبر ۲۰۰۷
۵	۸۶	۷ فرودین ۸۳	۲۶ مارس ۲۰۰۴	۲۱	۲۹۸	۳ آبان ۸۷	۲۴ اکتبر ۲۰۰۸
۶	۱۵۸	۸ مرداد ۸۳	۴ ژوئن ۲۰۰۴	۲۲	۸۰	۱ فرودین ۸۷	۲۱ مارس ۲۰۰۸
۷	۲۱۱	۷ مرداد ۸۳	۲۹ ژوئیه ۲۰۰۴	۲۳	۱۵۱	۸ مرداد ۸۷	۳۱ می ۲۰۰۸
۸	۲۹۸	۳ آبان ۸۳	۲۴ اکتبر ۲۰۰۴	۲۴	۲۱۱	۸ مرداد ۸۷	۳۰ ژوئیه ۲۰۰۸
۹	۸۰	۱ فرودین ۸۴	۲۱ مارس ۲۰۰۵	۲۵	۸۷	۱۰ فرودین ۸۸	۲۸ مارس ۲۰۰۹
۱۰	۱۵۱	۸ مرداد ۸۴	۳۱ می ۲۰۰۵	۲۶	۱۴۴	۳ خرداد ۸۸	۲۴ می ۲۰۰۹
۱۱	۲۱۱	۸ مرداد ۸۴	۳۰ ژوئیه ۲۰۰۵	۲۷	۲۱۰	۷ مرداد ۸۸	۲۹ ژوئیه ۲۰۰۹
۱۲	۳۰۰	۵ آبان ۸۴	۲۷ اکتبر ۲۰۰۵	۲۸	۲۹۹	۴ آبان ۸۸	۲۶ اکتبر ۲۰۰۹
۱۳	۸۰	۱ فرودین ۸۵	۲۱ مارس ۲۰۰۶	۲۹	۸۷	۱۱ فرودین ۸۹	۲۸ مارس ۲۱۰
۱۴	۱۵۰	۹ خرداد ۸۵	۳۰ می ۲۰۰۶	۳۰	۱۴۴	۶ خرداد ۸۹	۲۴ می ۲۰۱۰
۱۵	۲۱۱	۸ مرداد ۸۵	۳۰ ژوئیه ۲۰۰۶	۳۱	۲۱۰	۱۱ مرداد ۸۹	۲۹ ژوئیه ۲۰۱۰
۱۶	۲۹۳	۲۸ مهر ۸۵	۲۰ اکتبر ۲۰۰۶	۳۲	۲۹۹	۷ آبان ۸۹	۲۶ اکتبر ۲۰۱۰

به علت اینکه جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی نیاز به تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد و تصاویر ماهواره‌ای در دوره‌های آتی موجود نمی‌باشد، بنابراین از رابطه رگرسیونی بین تبخیر و تعرق واقعی و پارامترهای اقلیمی در دوره پایه استفاده شد. در این مرحله با استفاده از تکنیک تحلیل عاملی جهت تعیین فاکتورهای موثر بر تبخیر و تعرق واقعی از ۳۶ تصویر ذکر شده استفاده شد. پارامترهای اقلیمی ارائه شده شامل: دمای کیمنه، دمای بیشینه، دمای میانگین، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد می‌باشد. تکنیک تجزیه عاملی از جمله روش‌های آماری چند متغیره است که هدف اساسی در آن توصیف مجموعه‌ای از p متغیر x_1, x_2, \dots, x_p بر حسب تعداد کمتری از شاخص‌ها و عوامل، به منظور روشن کردن رابطه بین این متغیرها می‌باشد. در این روش هر چقدر مقدار هم‌بستگی داخلی بین متغیرها نزدیک‌تر باشد، تعداد عامل‌های پدید آمده کم‌تر خواهد بود. در تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه رابطه عددی بیش از دو متغیر را در یک زمان می‌توان بررسی نمود. ولی با افزایش تعداد متغیرها، معادله رگرسیون چندگانه به‌طور فزاینده‌ای غیرقابل کنترل می‌گردد. ولی این مشکل در تجزیه و تحلیل عاملی وجود ندارد و ضمناً اهمیت و وزن هر عامل نشان داده می‌شود. برای انجام تجزیه عاملی مراحل استانداردسازی داده‌ها، تعیین ماتریس وزن عامل‌ها، انتخاب تعداد عامل‌ها و دوران آن‌ها انجام می‌شود. برای تجزیه عاملی مشخصه‌های اقلیمی مورد مطالعه و تعیین عوامل موثر بر تبخیر و تعرق واقعی از تکنیک مولفه‌های اصلی و از دوران نوع "واریماکس" استفاده شد. با انجام تجزیه عاملی، ۲ عامل که در هر یک از آن‌ها یکی از پارامترهای اقلیمی نقش مهم‌تری دارد مشخص گردید. در این روش ۱۰ مشخصه اقلیمی در سه فاکتور گروه‌بندی شد و از بین مشخصه‌های قرار گرفته در هر فاکتور، مشخصه دارای بیش‌ترین وزن تعیین می‌شود. در مرحله بعد رابطه رگرسیونی بین دو پارامتر مهم انتخاب شده توسط تحلیل عاملی و تبخیر و تعرق واقعی بدست آمد. آماره‌های خطای

مطلق، ریشه خطای استاندارد و بایاس بین تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده ناشی از فرمول رگرسیونی بدست آمده و تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سیال محاسبه گردید. در این مرحله به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دمای کمینه و بیشینه حوزه آبخیز تویسرکان پرداخته می‌شود. به این منظور تغییرات بارش، دمای کمینه و بیشینه به کمک ۱۵ مدل گردش عمومی جو تحت دو سناریوی A1B و B1 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ استخراج گردید. سپس با استفاده از توزیع آماری بتا تغییرات دمای کمینه و بیشینه استخراج شده از ۱۵ مدل گردش عمومی جو، در احتمال وقوع ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد محاسبه گردید. در نهایت با استفاده از رابطه رگرسیونی ارائه شده، تبخیر و تعرق واقعی در دوره آتی تحت دو سناریوی A1B و B1 و احتمال وقوع ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد تعیین شد. لازم به ذکر است در تعیین تبخیر و تعرق واقعی عوامل متعددی از جمله الگوی کشت و استفاده از منابع آب در دسترس تاثیر به سزایی دارد که در دوره آتی به ناچار این عوامل ثابت و همانند شرایط فعلی فرض شد. در شکل ۲ نمودار جریان‌ی تحقیق مشاهده می‌شود.

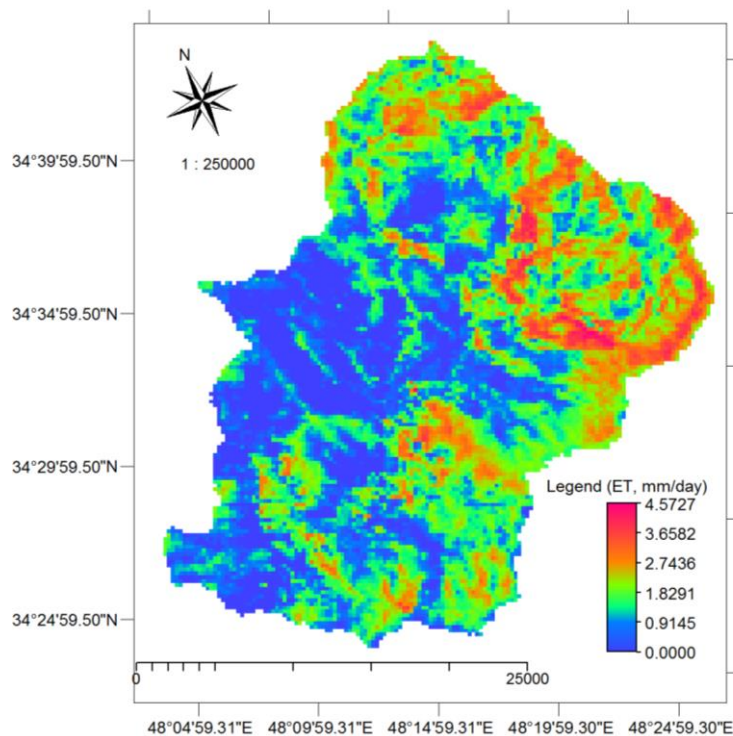


شکل ۲: مراحل بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق واقعی

نتایج و بحث

در شکل (۳) نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق واقعی روز ۲۵۸ ژوئیه سال ۲۰۰۹ به عنوان نمونه نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تا حد قابل قبولی مناطق کوهستانی و سایه‌انداز از مناطق غیرکوهستانی تفکیک شده‌اند.

به طوری که الگوریتم سبال توانسته است ارتفاعات کوهستانی بخش غربی حوزه را به خوبی تشخیص داده و کمترین میزان تبخیر و تعرق را برای این بخش‌ها تخمین زده است. تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده، با استفاده از الگوریتم سبال از صفر در مناطق کوهستانی تا ۴/۵ در مناطق با پوشش گیاهی متغییر می‌باشد.



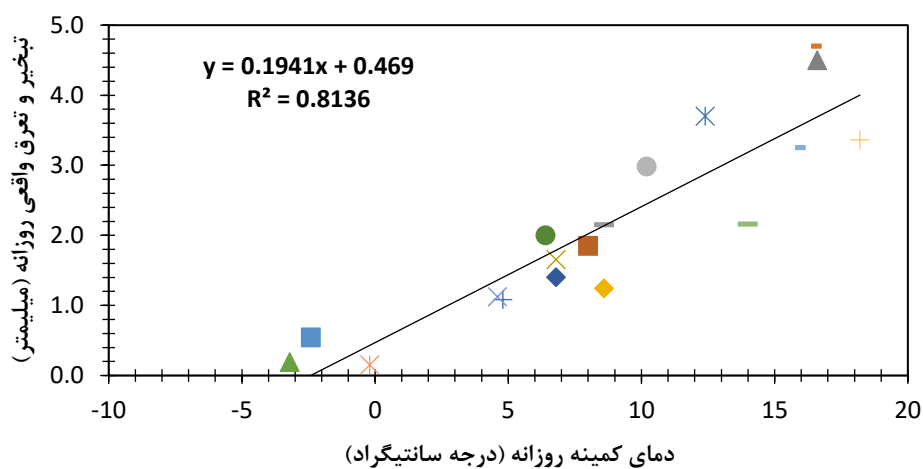
شکل ۳: نقشه تبخیر و تعرق واقعی روز ۲۵۸ ژوئیه سال ۲۰۰۹

میانگین تبخیر و تعرق واقعی برآوردی الگوریتم سبال کوهستانی ۱/۴۴ میلی‌متر در روز می‌باشد. Poormohammadi (۲۰۰۹) نیز موضوع بیان شده در بالا را در تحقیق خود تائید نمودند. به طوری که به اصلاح بخشی از نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه آب‌خیز بدست آمده از الگوریتم سبال پرداختند. دلیل آن هم کوهستانی و سایه‌انداز بودن این بخش از حوزه و برآورد عدد غیرواقعی برای آن بود. لذا استفاده از نسخه کوهستانی الگوریتم سبال این مشکل را برای حوزه‌های آب‌خیز برطرف می‌کند. در جدول ۳ نتایج تحلیل عاملی تبخیر و تعرق واقعی و ۴ پارامتر اقلیمی موثر بر آن نمایش داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۳، دمای میانگین، دمای کمینه و دمای بیشینه، به ترتیب مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر تبخیر و تعرق واقعی حوزه تویسرکان می‌باشد. از آنجایی که پارامتر میانگین دما که به عنوان فاکتور اول انتخاب شده است، خود به خود، دمای بیشینه (فاکتور سوم) را شامل می‌شود. بنابراین تنها دو فاکتور اول یعنی دمای میانگین و کمینه به عنوان مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر تبخیر و تعرق انتخاب شدند.

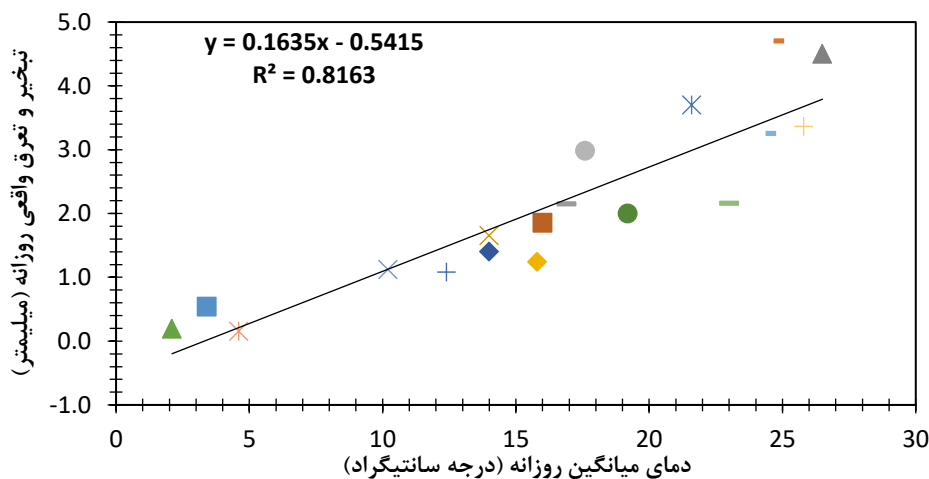
اشکال (۴) و (۵) همبستگی پارامترهای دمای کمینه و میانگین را با تبخیر و تعرق واقعی در دوره پایه را نمایش می دهد. با توجه به نمودارها، بین پارامتر دمای کمینه و تبخیر و تعرق واقعی همبستگی ۸۲٪ و دمای میانگین و تبخیر و تعرق واقعی دشت تویسرکان همبستگی ۸۱٪ در دوره پایه وجود دارد.

جدول ۳: نتایج تحلیل عاملی تبخیر و تعرق واقعی و پارامترهای اقلیمی

Variable	Factor1	Factor1	Factor1	Communality
Tmax	0.909	0.360	0.081	0.962
Tmean	0.948	0.314	0.047	1.000
n	0.097	0.681	0.038	0.475
Tmin	0.530	0.810	0.166	0.965
ET_actual_basin	0.476	0.794	0.029	0.858



شکل ۴: همبستگی بین تبخیر و تعرق واقعی و دمای کمینه در دوره پایه



شکل ۵: همبستگی بین تبخیر و تعرق واقعی و دمای میانگین در دوره پایه

رابطه (۱) نشان دهنده رابطه بین تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال با دو پارامتر منتخب دمای کمینه و دمای میانگین دشت توپسرکان می‌باشد. از این معادله جهت شبیه‌سازی داده‌های تبخیر و تعرق واقعی دشت توپسرکان برای دوره‌های آبی استفاده شد.

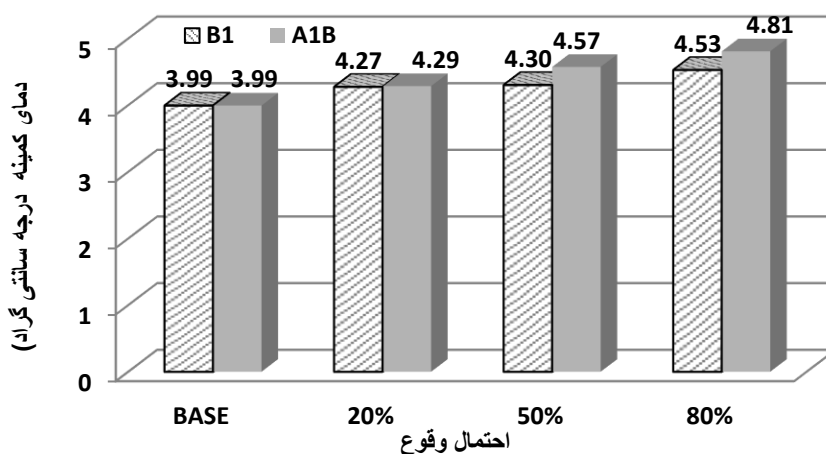
$$ET_actual_basin = - 0.098 + 0.091 T_{min} + 0.0889 T_{mean} \quad \text{رابطه ۱:}$$

جدول (۴) آماره‌های خطای معادله استخراج شده جهت پیش‌بینی تبخیر و تعرق واقعی دشت توپسرکان را نمایش می‌دهد. این آماره‌ها مربوط به تبخیر و تعرق واقعی حاصله از الگوریتم سبال و معادله ارائه شده در رابطه (۱) می‌باشد. ضریب تعیین ۰/۹۸ و ضریب نش‌ساتکلیف، ۰/۹۷ و خطاهای آماری استاندارد و مطلق به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۳۳ میلی‌متر، نشان دهنده مناسب بودن معادله ارائه شده جهت شبیه‌سازی داده‌های تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های آبی می‌باشد.

جدول ۴: آماره‌های خطای معادله استخراج شده جهت پیش‌بینی تبخیر و تعرق واقعی

ضریب تعیین	خطای استاندارد	خطای مطلق	ضریب نش ساتکلیف
۰/۹۸	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۹۷

شکل (۶) مقایسه تغییرات سالانه کمینه در احتمال وقوع مختلف تحت سناریوی A1B و B1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد، تحت هر دو سناریوی مذکور، از احتمال وقوع ۲۰٪ به ۸۰٪ دمای کمینه در دوره‌های آبی افزایش می‌یابد. در سناریوی B1 دمای کمینه از احتمال وقوع ۲۰٪ به ۸۰٪ به ترتیب از ۴/۲۷ به ۴/۵۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در سناریوی A1B دمای کمینه از احتمال وقوع ۲۰٪ به ۸۰٪ به ترتیب از ۴/۲۹ به ۴/۸۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. به‌طور کلی افزایش دمای کمینه تحت سناریوی A1B بیشتر از B1 می‌باشد و تحت هر دو سناریو دمای کمینه در دوره‌های آبی بیش‌تر خواهد شد.



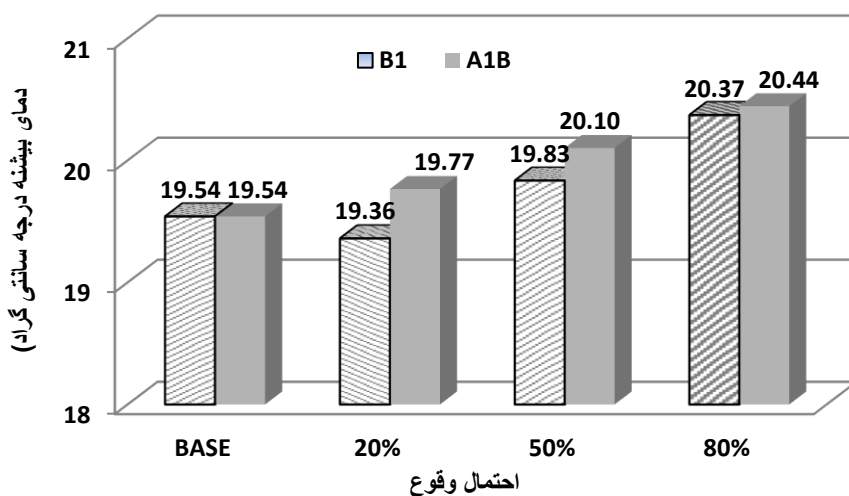
شکل ۶: مقایسه تغییرات سالانه کمینه در احتمال وقوع مختلف تحت سناریوی A1B و B1

جدول (۵) تغییرات فصلی دمای کمینه دوره پایه و تحت سناریوهای A1B و B1 با احتمال وقوع ۰/۸۰٪ را نشان می‌دهد. بیش‌ترین تغییرات فصلی دمای کمینه تحت سناریوی A1B به ترتیب در فصل بهار و پائیز به میزان ۱ و ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بوده و تحت سناریوی B1، در فصل بهار و زمستان به ترتیب به میزان ۱ و ۰/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۵: تغییرات فصلی دمای کمینه دوره پایه و تحت سناریوهای A1B و B1 (واحد: درجه سانتی‌گراد)

فصل	A1B (۰/۸۰٪)	B1 (۰/۸۰٪)	دوره پایه
پائیز	۰/۸	۰/۳	۰/۳
زمستان	-۴/۶	-۴	-۴/۶
بهار	۸/۷	۸/۷	۷/۷
تابستان	۱۳	۱۲/۷	۱۲/۳

شکل (۷) مقایسه تغییرات سالانه بیشینه دما در احتمال وقوع مختلف تحت سناریوی A1B و B1 را نمایش می‌دهد. دمای بیشینه از احتمال وقوع ۲۰ به ۸۰ درصد تحت هر دو سناریو در حال افزایش می‌باشد. در سناریوی B1 دما از ۱۹/۳۶ در احتمال وقوع ۲۰٪ به ۲۰/۳۷ در احتمال وقوع ۸۰ درصد رسیده است. تحت سناریوی A1B نیز دمای بیشینه از ۱۹/۷۷ درجه سانتی‌گراد در سال به ۲۰/۴۴ درجه سانتی‌گراد در سال افزایش یافته است. به‌طورکلی افزایش دما تحت سناریوی A1B در تمامی احتمال وقوع‌ها بیش‌تر از B1 می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه تغییرات سالانه بیشینه دما در احتمال وقوع مختلف تحت سناریوی A1B و B1

در جدول (۶) تغییرات فصلی دمای بیشینه دوره پایه و تحت سناریوهای A1B و B1 را در احتمال وقوع ۰/۸۰٪ در قیاس با دوره پایه نشان داده شده است. تحت هر دو سناریو افزایش دما در تمامی فصول محسوس می‌باشد. بیش‌ترین افزایش دما مربوط به فصل بهار بوده که متوسط دمای بیشینه از ۲۳/۹ به ۲۵/۴ و ۲۵/۳ درجه سانتی‌گراد به ترتیب تحت سناریوهای A1B و B1 می‌رسد. فصل زمستان با افزایش دمایی ۱/۱ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی A1B و فصل تابستان با افزایش دمایی ۱/۱ درجه سانتی‌گراد در رتبه دوم، افزایش دمای بیشینه قرار دارند.

جدول ۶: تغییرات فصلی دمای بیشینه دوره پایه و تحت سناریوهای A1B و B1 (واحد: درجه سانتی‌گراد)

فصل	A1B (%۸۰)	B1 (%۸۰)	دوره پایه
پائیز	۱۴/۳	۱۴/۳	۱۴/۲
زمستان	۸/۳	۸	۷/۲
بهار	۲۵/۴	۲۵/۳	۲۳/۹
تابستان	۳۳/۶	۳۳/۷	۳۲/۷

در جدول (۷) بررسی درصد تغییرات پارامترهای اقلیمی تحت تاثیر دو سناریوی A1B و B1 نسبت به دوره پایه ارائه شده است. در احتمال وقوع ۰/۸۰، ۴/۶ درصد افزایش دمای بیشینه و ۲۰ درصد افزایش دمای کمینه در دوره‌های آبی تحت سناریوی A1B وجود خواهد داشت و تحت تاثیر سناریوی B1 و احتمال وقوع ۰/۸۰، کمینه دما ۱۳ درصد و بیشینه دما، ۴/۲ درصد افزایش داشته است.

جدول ۷: بررسی درصد تغییرات پارامترهای اقلیمی نسبت به دوره پایه

نام سناریو	احتمال وقوع	دمای بیشینه (%)	دمای کمینه (%)
A1B	۰/۲۰	۱	۷/۲
	۰/۵۰	۲/۸	۱۴/۵
	۰/۸۰	۴/۶	۲۰
B1	۰/۲۰	-۰/۹	۷
	۰/۵۰	۱/۵	۷/۷
	۰/۸۰	۴/۲	۱۳

با تحلیل صورت گرفته در بالا به طور کلی می‌توان بیان داشت تغییر اقلیم در دوره‌های آبی باعث افزایش دمای کمینه و بیشینه در دشت تویسرکان خواهد شد. این نتایج با نتایج Poormohammadi و Malekinezad (۲۰۱۳) و Dastorani و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم، افزایش دما به ویژه در فصول سرد سال می‌باشد. این تغییرات بر الگوی کشت منطقه نیز تاثیر به‌سزایی خواهد داشت. به طوری که زمان کشت دیم منطقه آن نیز با توجه به تغییرات زمانی متفاوت خواهد شد. در جدول ۸ تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده در دوره آبی تحت سناریوی A1B و B1 و احتمال وقوع ۰/۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد نشان داده شده است. با توجه به رابطه مستقیم دما و تبخیر و تعرق و از طرفی افزایش دما از احتمال وقوع ۰/۲۰ به ۰/۸۰، به طور طبیعی تحت هر دو سناریوی مذکور تبخیر و تعرق از احتمال وقوع ۰/۲۰ به ۸۰ درصد افزایش می‌یابد. در احتمال وقوع ۰/۸۰، تحت سناریوی‌های A1B و B1 تبخیر و تعرق واقعی به ترتیب ۷۵۴ و ۷۴۳ میلی‌متر در سال خواهد بود که در قیاس با تبخیر و تعرق واقعی دوره پایه (میانگین ۷۴۰ میلی‌متر در سال)، افزایش داشته است و این میزان افزایش تحت سناریوی A1B بیش‌تر از B1 می‌باشد، که به علت افزایش دمای بیش‌تر سناریوی A1B در قیاس با B1 می‌باشد.

نکته قابل تامل آنکه به علت در دسترس نبودن تصاویر ماهواره‌ای و عدم اطلاع از الگوی کشت، پوشش گیاهی و منابع آب در دسترس و همچنین پارامترهای اقلیمی مثل رطوبت نسبی در دوره‌های آبی، شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی در آینده همراه با عدم قطعیت زیادی می‌باشد. چراکه تبخیر و تعرق واقعی با میزان آب در دسترس و پوشش گیاهی ارتباط مستقیمی دارد. هر

چه این دو منبع کم‌تر باشد به تبع تبخیر و تعرق کم‌تر می‌شود و از آنجایی که پیش‌بینی می‌شود در دوره‌های آتی بارش و منابع آب محدودتر شود،

جدول ۸: تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده در دوره آتی

نام سناریو	احتمال وقوع	تبخیر و تعرق واقعی (میلی متر در سال)
A1B	٪۲۰	۷۳۱
	٪۵۰	۷۴۲
	٪۸۰	۷۵۴
B1	٪۲۰	۷۳۳
	٪۵۰	۷۳۹
	٪۸۰	۷۴۳

لذا به نظر می‌رسد سطح زیرکشت و آب در دسترس کم‌تر باشد. بنابراین اصولاً باید تبخیر و تعرق واقعی کاهش یابد. اما از آنجایی که در تحقیق حاضر اجباراً تنها از دو پارامتر هواشناسی دمای کمینه و میانگین جهت شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی در آینده استفاده شد، لذا تبخیر و تعرق در دوره آتی در احتمال وقوع ٪۸۰ از ۰/۰۴ تا ۱/۴٪ افزایش یافته که بنا به دلایل ذکر شده در بالا دارای عدم قطعیت‌های فراوان می‌باشد. نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات King و همکاران (۲۰۱۵)، Thompson و همکاران (۲۰۱۴) و Dastorani و همکاران (۲۰۱۱) تطابق دارد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های این تحقیق نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های آتی خواهد شد. به طوری که بر اساس روابط بدست آمده برای دوره پایه، مشخص شد که افزایش دمای کمینه و بیشینه تحت هر دو سناریوی A1B و B1 مستقیماً بر افزایش تبخیر و تعرق تاثیر گذار است. همین مساله موجب پیش‌بینی افزایش تبخیر و تعرق در دوره‌های آتی نیز شده است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تبخیر و تعرق واقعی علاوه بر پارامترهای اقلیمی، تحت تاثیر پوشش گیاهی سطح و حجم منابع آب در دسترس نیز می‌باشد. در صورت فراهم بودن شرایط اقلیمی برای انجام تبخیر و تعرق، هر چه پوشش‌های گیاهی بیش‌تر و منابع آب سطحی نیز در دسترس‌تر باشد، تبخیر و تعرق واقعی بیش‌تر می‌شود. این در حالی است که اطلاعات موجود از آینده، فقط شامل پارامترهای اقلیمی همچون دما بوده است. همچنین ضرورت دارد که این موضوع از دیدگاه گیاه بدن پرداخته شود و تاثیر تغییر در میزان CO₂ ناشی از تغییرات اقلیمی بر وضعیت و میزان باز و بسته شدن روزنه‌های برگ و تاثیر آن بر تبخیر و تعرق گیاهان موجود در دشت مورد کنکاش بیش‌تری قرار گیرد. بنابراین تبخیر و تعرق واقعی پیش‌بینی شده در دوره آتی با عدم قطعیت‌هایی همراه است که افزایش دقت این برآوردها، تحقیقات جداگانه و جامعی را در این زمینه طلب می‌کند.

منابع

- Allen, R. Morse, A. and Tasumi, M. (2003).** Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. ICID workshop on remote sensing of ET for large regions.
- Bastiaanssen, W.G.M. and Menenti, M. (1990).** Mapping groundwater losses in the western Desert of Egypt with satellite measurements of surface reflectance and surface temperature. *Water Management and Remote Sensing*, J. C. Hooghart, ed., TNO, The Hague, The Netherlands, pp: 61-90.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R. and Holtslag, A. (1998).** A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, pp: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000).** SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated ediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229 (1-2), pp: 87-100.
- Dastorani, M.T., Massah Bavani, A.R., Poormohammadi, S. and Rahimian, M.H. (2011).** Assessment of potential climate change impacts on drought indicators (Case study: RDI and SPI in Yazd station, Iran). *Desert journal*, 16 (2), pp: 159-167.
- Dastorani, M.T., Poormohammadi, S., Massah, A.R. and Rahimian, M.H. (2010).** Evaluation of evapotranspiration Yazd station under uncertainty scenarios of greenhouse gas emissions and evapotranspiration models. *Journal of watershed management research*, 1(2), pp: 1-12.
- Huo, Z., Dai, X., Feng, S., Kang, S. and Huang, G. (2013).** Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *Journal of Hydrology*, 492 (7), pp: 24-34.
- Krause, S. and Bronstert, A. (2005).** An advanced approach for catchment delineation and water balance modelling within wetlands and floodplains. *Advances in Geosciences*, 5, pp: 1-5.
- Koloskov, G., Mukhamejanove, Kh. and Tanton, T.W. (2006).** Monin-Obukhov Length as a Cornerstone of the SEBAL Calculations of Evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), pp: 170-179.
- King, D.A., Bachelet, D.M., Symstad, A.J., Ferschweiler, K. and Hobbins, M. (2015).** Estimation of potential evapotranspiration from extraterrestrial radiation, air temperature and humidity to access future climate change effect on the Northern Great Plains, USA. *Ecological Modelling*, 297 (10), pp: 86-97.
- Nam, W., Hong, E. and Choi, J. (2015).** Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea?, *Agricultural Water Management*, 150(1), pp: 129-138.
- Poormohammadi, S. and Malekinejad, H. (2013).** Classification of homogeneous climatic regions under the impact of climate change and greenhouse gas emissions scenarios using L-moments technique in Iran. *Journal of watershed management research*, 4(8), pp: 58-76.
- Poormohammadi, S. (2009).** Evaluation and assessment components of the water balance in arid basins using remote sensing and GIS (Case Study: Yazd Manshad Basin). *Watershed Engineering*, MSc Thesis, University of Yazd, 110p.
- Poormohammadi, S., Dastorani, M.T., Masah Bavani, A. and Jafari, H. (2014).** Application of mountain SEBAL and MODIS imagery for estimation of catchment actual evapotranspiration (case study: TUYSERKAN catchment, Hamedan). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5), pp: 1-21.
- Thompson, J.R., Green, A.J. and Kingston, D.G. (2014).** Potential evapotranspiration-related uncertainty in climate change impacts on river flow: An assessment for the Mekong River basin. *Journal of Hydrology*, 492(7), pp: 24-34.

Impact of climate change on actual evapotranspiration in future periods using remote sensing techniques and SEBAL energy balance algorithms (Case study: Plain Tuyserkan Hamedan)

Samaneh poormohammadi¹, Mohammad Taghi Dastorani², Mehran Fatemi³, Alireza Massah Bavani⁴, Hadi Jafari⁵

- 1) PHD student of science and watershed engineering in Yazd University
- 2) Faculty member of Ferdowsi University of Mashhad
- 3) Faculty member of Meibod University
- 4) Faculty member of Abureyhan University of Tehran
- 5) Faculty member of Shahrud University of Technology

*Correspondence author: s.poormohammadi@yahoo.com

Received Date: 2021. 07. 11

Accepted Date: 2021. 10. 10

Abstract

Evapotranspiration is the main source of water loss in basin and so knowledge of various aspects of water resources management is essential. Type text or a website address or translate a document. On the other hand, knowledge of the actual evapotranspiration plains is important to determine and manage crop pattern and irrigation of horticultural and agricultural. Due to the effects of climate change on all environmental aspects of watersheds, Check these changes on actual evapotranspiration of catchment is essential as a key factor in determining the water balance and water management planning for the sustainable management of natural resources and the environment. The aim of the present study is investigation of climate change effective on actual evapotranspiration in Tuyserkan Basin in west of Iran. For this aim MODIS satellite images and SEBAL algorithms was used to estimating of actual evapotranspiration in Tuyserkan basin for 10 years old. Impact of climate change was analyses through 15 atmospheric general circulation model and under two scenarios A1B and B1 in Software LARS-WG. The results showed that the probability of 80% in future periods, minimum temperature from 13 to 20% and maximum temperature from 2.4 to 6.4 percent has increase. Actual evapotranspiration is the probability of 80% in future periods will increase from 0.4 to 1.4%.

Keywords: Climate change actual evapotranspiration, SEBAL algorithm, LARS-WG.