



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره پنجم، ۱۳۹۴
<http://jwsc.gau.ac.ir>

استفاده از مدل سبال کوهستانی در تخمین تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز توپسرکان، همدان)

*سمانه پورمحمدی^۱، محمدتقی دستورانی^۲، علیرضا مساح‌بوانی^۳،

هادی جعفری^۴ و محمدحسن رحیمیان^۵

^۱ محقق مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها، مؤسسه تحقیقات آب ایران، استاد دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۲ دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران پردیس ابوریحان، ^۳ استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی شاهرود، ^۴ محقق مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان ترویج، آموزش، تحقیقات تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: کاهش منابع آب نه تنها بر بخش کشاورزی و منابع طبیعی تأثیرات منفی نهاده است بلکه اثرات اقتصادی و اجتماعی زیادی را در حوزه‌های آبخیز ایجاد نموده است. در این میان مدیریت مناسب منابع آب حوزه‌های آبخیز امری حیاتی و مهم می‌باشد. از آنجایی که مهم‌ترین و بیش‌ترین هدررفت آب در حوزه‌های آبخیز تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی تبخیر و تعرق واقعی حوزه نیمه‌خشک توپسرکان پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: به این منظور از ۲۷ تصویر ماهواره‌ای مودیس و ۳ تصویر ماهواره‌ای لندست و تکنیک سنجش از دور جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز توپسرکان استفاده شد. نتایج تبخیر و تعرق واقعی ارائه شده توسط مدل سبال کوهستانی با نیاز آبی ارائه شده توسط سند ملی آبیاری مقایسه و ارزیابی گردید. سپس نقشه‌های تهیه شده توسط تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس به کمک تصاویر لندست ریزمقیاس نمایی شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که نسخه کوهستانی الگوریتم توزان انرژی سبال با دقت بسیار بالاتر و صحت بیش‌تری نسبت به نسخه سبال مناطق مسطح می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز را نشان دهد، همچنین در صورت در دسترس نبودن داده‌های لایسیمیتری یا نمونه‌گیری‌های صحرائی می‌توان از نیاز آبی ارائه شده در سند ملی آبیاری برای گیاهان دشت‌های مختلف جهت ارزیابی نتایج الگوریتم سبال جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی استفاده نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که تبخیر و تعرق برآورد شده برای گیاه گردو که گیاه باغی غالب منطقه ۷۵۲ میلی‌متر در سال برآورد شد، برای گیاه جو که گیاه زراعی غالب منطقه می‌باشد ۴۱۰ میلی‌متر در سال برآورد شد در نهایت در این پژوهش الگوریتم توزان انرژی سبال کوهستانی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز توپسرکان را با دقت ۸۲٪ برآورد نمود.

* مسئول مکاتبه: s.poormohammadi@yahoo.com

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم توازن انرژی سبال می‌تواند کارایی مناسبی در تخمین تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز به‌عنوان مهم‌ترین عامل هدررفت آب در حوزه داشته باشد بنابراین جهت مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز و تخمین بیلان آبی حوزه استفاده از این الگوریتم پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تصاویر مودیس، ریزمقیاس نمایی، سنجش از دور، حوزه آبخیز تویسرکان

مقدمه

پدیده تبخیر یک پدیده منطقه‌ای است و نه نقطه‌ای و با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر اعم از سطح تبخیرکننده و عوامل محیطی مؤثر بر آن، در برآورد مقدار تبخیر یا تعرق بایستی اقدام به مدل‌سازی توزیعی آن در مکان نمود. اقلیم یک ناحیه شامل اتمسفر، سطح زمین و پوشش آن، موجودیت توده آب‌های سطحی و مقادیر انرژی خورشیدی دریافتی؛ دارای چنان پیچیدگی و پویایی است که درک کامل آن در گرو این مدل‌های منطقه‌ای و بعضاً مدل‌سازی‌های بسیار پیچیده می‌باشد. از آنجا که در سطوح وسیع امکان تهیه اطلاعات مورد نیاز مدل‌ها از برداشت‌های زمینی به سادگی میسر نیست، از فنون سنجش از دور در این ارتباط بهره‌گیری می‌شود. یکی از اولین اقدامات گسترده در زمینه به‌کارگیری سنجش از دور در مباحث مربوط به علم هیدرولوژی، سلسله مطالعات چرخه آب و انرژی کره زمین می‌باشد. از طرفی یکی از مهم‌ترین منابع هدررفت آب در حوزه‌ها است و از مهم‌ترین اجزای بیلان آب در حوزه‌های آبخیز، تبخیر و تعرق می‌باشد. بنابراین استفاده از الگوریتم توازن انرژی که می‌تواند به‌صورت نقشه وضعیت تبخیر و تعرق واقعی حوزه را نمایش دهد، یکی از راهکارهای کاربردی به‌ویژه در برآورد بیلان آب حوزه‌های آبخیز به حساب می‌آید. در ارتباط با استفاده از الگوریتم توازن انرژی سبال در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در داخل و خارج کشور پژوهش‌های متنوعی انجام شده است که در ادامه به

برخی از آنها اشاره می‌شود. طی پژوهشی که رحیمیان و پورمحمدی (2012) انجام دادند به بررسی برآورد تبخیر و تعرق واقعی گندم تحت تنش شوری پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم توازن انرژی برای زمین (سبال) جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده گردید. تبخیر و تعرق واقعی به‌صورت روزانه و فصلی در سال زراعی ۸۶-۸۷ محاسبه گردید. ارزیابی نتایج از طریق فرمول عملکرد محصول نشان داد که الگوریتم سبال با دقت بالایی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در شرایط تنش را دارا می‌باشد (9) در پژوهشی که بورچارد و همکاران (2012) انجام دادند از الگوریتم توازن انرژی برای زمین (سبال) جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیزی در کنیا در آفریقا استفاده کردند. در این پژوهش از باندهای حرارتی ۱۴ تصویر ماهواره‌ای استر استفاده شد. نتایج نشان از تغییرات شدید تبخیر و تعرق واقعی در سرتاسر حوزه داشت به‌طوری‌که تبخیر و تعرق در این حوزه از ۴۵۰ میلی‌متر در سال در شمال حوزه آبخیز تا ۲۰۰۰ میلی‌متر در سال در آن دیده می‌شد (3). در پژوهشی که توسط دستورانی و همکاران (2012) در ارتباط با برآورد تبخیر و تعرق واقعی باغات پسته اردکان صورت گرفت از الگوریتم توازن انرژی برای زمین (سبال) استفاده شد. در این پژوهش از ۱۲ تصویر ماهواره‌ای مودیس در فصل رشد پسته از فرودین تا مهر ۱۳۸۶ استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نیاز آبی برآورد شده برای پسته با استفاده از الگوریتم سبال در قیاس با نیاز آبی پیشنهاد شده

پیدا کردن سایر مجهولات کمک کند. در این پژوهش تبخیر و تعرق گیاه پنبه در یک دوره زمانی کوتاه محصول دهی یعنی ماه‌های آگوست، ژولای و سپتامبر اندازه‌گیری شد (7). در پژوهشی که در منطقه نیمه‌بیابانی برزیل توسط تکسیرا و همکاران (2009) صورت گرفت تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده مورد استفاده در الگوریتم سبال در 4 منطقه و 7 ایستگاه اقلیمی شامل: آلبیدو سطحی، دمای سطحی، انعکاس اتمسفری و سطحی، شار گرمایی زمین، زبری سطح، تابش خالص، گرادیان دمای هوا، شار گرمایی محسوس و جزء تبخیری کالیبره شدند. سپس تبخیر و تعرق روزانه برای زمین‌های کشاورزی مخلوط و اکوسیستم‌های طبیعی محاسبه گردید. در این پژوهش ضرایب در الگوریتم سبال با توجه به شرایط محلی توسعه داده شدند که این عمل منجر به تعیین اثرات توسعه کشاورزی آبی بر روی بیلان آبی منطقه‌ای همچون کارایی مصرف آب در بخش محصولات باغی آبی که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در منطقه نیمه‌خشک برزیل می‌باشد به صورت کمی تعیین شد. به این منظور از 10 تصویر بین سال‌های 2001 تا 2007 جهت تعیین تبخیر و تعرق از گیاه انگور، انبه و پوشش طبیعی استفاده شد (15). در مقاله‌ای که توسط باستین سن و همکاران (2005) ارائه شده است بیان می‌دارد که سبال تاکنون در بیش‌تر از 30 کشور به‌طور کاربردی استفاده شده است و طی 10 سال 26 پژوهش در دست انجام بوده که 17 تای آن به پایان رسیده است. وی در این پژوهش به مطالعه الگوریتم سبال در دو مقیاس مزرعه‌ای و حوزه پرداخته و نتایج این پژوهش بیان می‌دارد که به‌طور روزانه دقت این روش که از مقایسه مقایر اندازه‌گیری شده و نتایج الگوریتم سبال حاصل شد، برای مزرعه 85٪ و در پایه فصلی تا 95٪ می‌باشد و در مقیاس حوزه دقت این الگوریتم تا 96٪ هم می‌رسد. در این پژوهش از

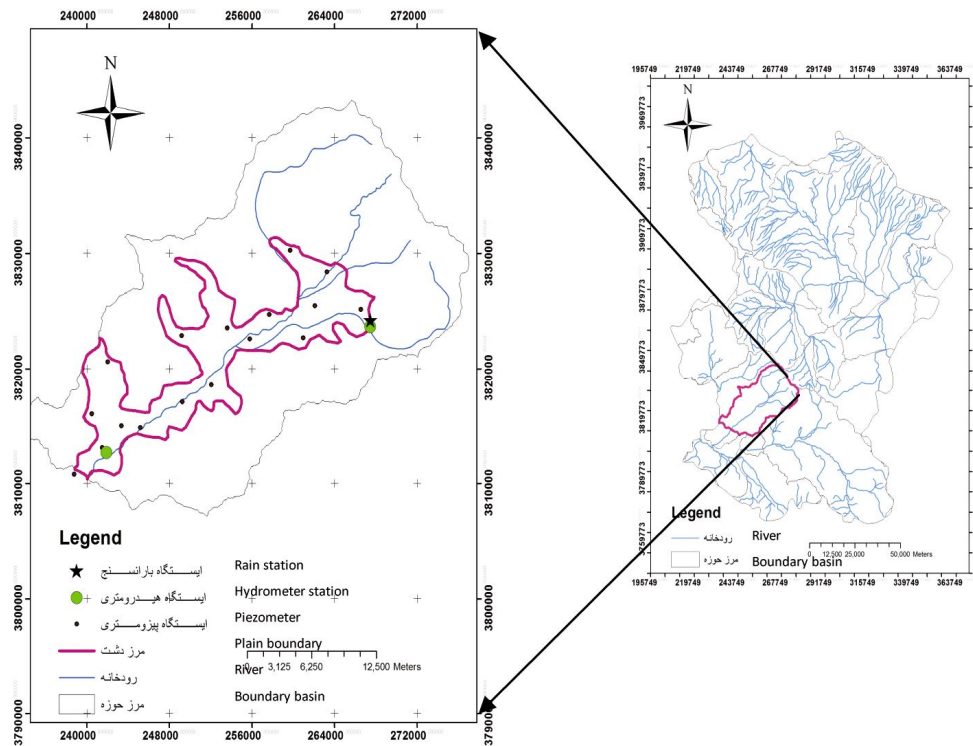
توسط منابع معتبر مثل فائو و نت وات نزدیک می‌باشد (5). تانگ و همکاران (2013) به بررسی تأثیر مکانی پیکسل‌های سرد و گرم در الگوریتم سبال پرداختند. در این پژوهش از 23 تصویر مودیس از ژانویه 2010 تا اکتبر 2011 استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که زمانی که پیکسل‌های سرد و گرم در طول زمان مورد بررسی بر روی تصاویر ثابت باشند بزرگ و کوچک بودن پیکسل‌ها بر روی شار گرمایی محسوس تأثیر چندانی نخواهد داشت. در پژوهش که توسط ساری و همکاران (2013) صورت گرفت به تعیین میزان آب مصرفی گیاه برنج در منطقه‌ای در جاوا پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم سبال برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی برنج استفاده شد این پژوهش در سال خشک 2004 در طول فصل رشد انجام گرفت. نتایج نشان داد که میانگین تبخیر و تعرق واقعی برنج 247 میلی‌متر در طول فصل با انحراف معیار $\pm 44/7$ می‌باشد (13). در پژوهشی که توسط پورمحمدی و همکاران (2010) و دستورانی و پورمحمدی (2012) انجام شد به بررسی بیلان آبی حوزه آبخیز خشک و کوهستانی منشاء پرداختند. جهت تعیین برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه از الگوریتم سبال و 15 تصویر ماهواره‌ای مودیس در طول سال آبی 1387-1386 استفاده نمودند نتایج پژوهش نشان از دقت 85 درصدی الگوریتم توازن انرژی سبال جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز را نشان داد (6). در پژوهشی که در ناحیه‌ای در کشور قزاقستان صورت گرفت، کلوزوف و همکاران (2006) نشان دادند که طول ابوخوف در به‌دست آوردن جز شار گرمایی محسوس در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به روش الگوریتم سبال نقش اساسی و بنیادی دارد و با ارائه فرمولی از طول مانین ابوخوف بیان می‌دارد که این فرمول درتشکیل لوپ (فرآیند چرخه‌ای محاسبه شار گرمایی محسوس) می‌تواند در

تبخیر و تعرق کاربری‌های مختلف اراضی بالادست حوضه رودخانه توکلا در آفریقا را به کمک سبال محاسبه نمودند. آن‌ها با کمک دستگاه سنتیلومتر نتایج کار خود را مثبت ارزیابی کرده‌اند (14). همچنین کارماری و همکاران (2012) در تعیین تبخیر و تعرق غلات با کمک چهار تصویر ماهواره‌ای مودیس از دیگر نمونه‌های استفاده از سبال در نقاط مختلف دنیا است نتایج این پژوهش نیز دقت بالای الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق واقعی را نشان داد (4). نکته قابل توجه آن‌که با توجه به این‌که حوزه‌های آبخیز دارای بخش‌های کوهستانی می‌باشند بنابراین استفاده از نسخه معمولی الگوریتم سبال که بیش‌تر برای اراضی زراعی مسطح و مزارع و باغات استفاده می‌شود، نمی‌تواند نتایج مناسبی جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز داشته باشد. بنابراین باید از نسخه سبال کوهستانی جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوزه‌های آبخیز استفاده شود. بنابراین هدف از پژوهش حاضر برآورد تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز سرد و کوهستانی تویسرکان با استفاده از نسخه الگوریتم سبال کوهستانی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی: این پژوهش در حوزه آبخیز تویسرکان در استان همدان در غرب کشور ایران انجام شده است. حوزه آبخیز تویسرکان به وسعت ۷۹۱/۹۰ کیلومتر مربع می‌باشد، که ۲۰/۷ درصد از حوزه آبخیز را دشت تویسرکان با مساحت ۱۶۴/۴۶ کیلومتر مربع تشکیل می‌دهد. این حوزه آبخیز دارای کاربری اراضی متعدد می‌باشد و بخش اصلی حوزه را مناطق کشاورزی آبی و دیم تشکیل می‌دهد یعنی ۲۴ درصد از حوزه آبخیز دارای اراضی دیم و آبی می‌باشد. در شکل ۱ شمای کلی حوزه آبخیز تویسرکان بر روی نقشه استان همدان نشان داده شده است.

الگوریتم سبال جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دو شرایط خاک خشک و پوشش گیاهی استفاده نموده است (2). در پژوهشی دیگر که توسط والتین و همکاران (2007) انجام شد از سنسورها و مدل‌های چندگانه جهت مطالعه بیلان آبی و بیلان انرژی بر روی گندم زمستانه در شمال شرق آلمان انجام دادند. برای آنالیز بیلان انرژی از نسبت بوون استفاده شد و رطوبت پروفیل خاک در اعماق مختلف اندازه‌گیری شد. در نهایت نتیجه گرفتند که میزان تبخیر و تعرق گندم زمستانه با رطوبت خاک همبستگی مناسبی ندارد (16). در پژوهشی که توسط روماس و همکاران (2008) در دره ابرو در اسپانیا صورت گرفت تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده از مدل سبال در طی ۴ سال با تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده توسط معادله پنمن مانیت مقایسه شد. به این منظوراز دو گیاه مرجع چمن و ذرت استفاده شد و خطای مربوط به مدل سبال در مورد ذرت یک میلی‌متر در روز و برای گیاه چمن ۰/۳ میلی‌متر در روز بود (12). ژونگ‌پینگ و همکاران (2011) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم سبال اقدام به تعیین تبخیر و تعرق کاربری‌های مختلف اراضی نظیر سطوح آبی و باتلاقی، اراضی کشاورزی، چمن‌زار، اراضی روستایی، شهری و اراضی بایر در اطراف دریاچه نانی در چین نموده‌اند (18). آن‌ها نتایج این روش را رضایت‌بخش اعلام کرده‌اند. به‌طور مشابه، پژوهشی توسط یانگ و همکاران (2012) در منطقه هتائو در شمال چین انجام شد و به کمک تصاویر ماهواره‌ای مودیس و الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق کاربری‌های مختلف اراضی در یک بازه زمانی ده ساله محاسبه گردید. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی مناطق با کاربری کشاورزی در طی ۱۰ سال افزایش یافته است (17). کونگو و همکاران (2012) نیز از ۲۸ تصویر ماهواره‌ای مودیس استفاده کردند و



شکل ۱- نمای کلی حوزه آبخیز تویسرکان و موقعیت آن بر روی نقشه استان همدان.

Figure 1. Tuiserkan catchment view and Hamedan map.

در جدول ۱ ویژگی‌های سطح زیر کشت شهرستان تویسرکان شرح داده شده است. با توجه به جدول موجود، سطح راضی آیش این شهرستان ۱۱۷۰۰ هکتار، سطح زیر کشت محصولات سالانه و دائمی ۳۸۲۷۴۱ هکتار و وسعت مراتع این مناطق ۷۹۸۱۴ هکتار می‌باشد. از میان محصولات متنوعی که در این شهرستان کشت می‌شود محصول زراعی جو با

سطح زیر کشت ۱۷۵۵۸ هکتار گیاه غالب زراعی و محصول باغی گردو با سطح زیر کشت ۵۴۹۹ هکتار گیاه غالب باغی در حوزه آبخیز تویسرکان می‌باشد. از آنجایی که حوزه آبخیز تویسرکان جزئی از شهرستان تویسرکان به حساب می‌آید بنابراین از اطلاعات شهرستان برای حوزه آبخیز تویسرکان استفاده شد.

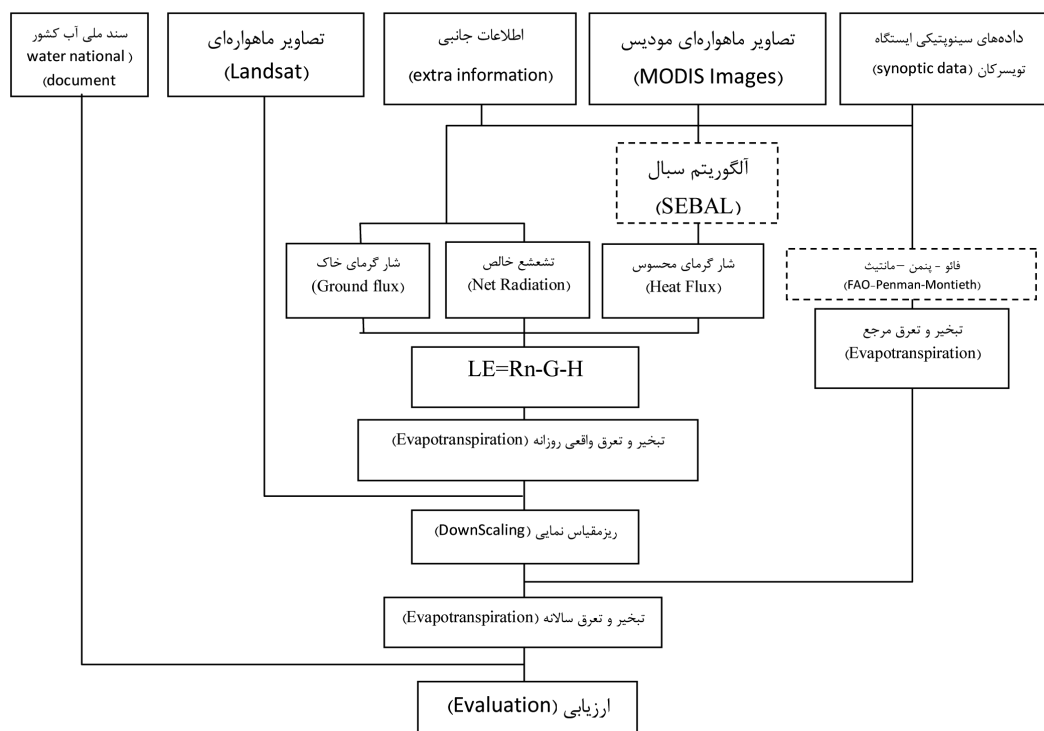
جدول ۱- ویژگی‌های سطح زیر کشت شهرستان تویسرکان.

Table 1. Properties of farm area in tuiserkan basin.

سطح زیر کشت محصولات دائمی (بارور و غیربارور)	محصول زراعی غالب	محصول باغی غالب	وسعت مراتع (هکتار)	محصولات کشاورزی	سطح اراضی آیش (هکتار)
The area under permanent crops	dominant product crop	dominant horticultural crops	pasture	Annual and permanent crops	fallow land
91126	17585	5499	79814	382741	11700

شد و با استفاده از نقشه کاربری اراضی، تبخیر و تعرق واقعی برای هر کاربری ارائه شد. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در فصول مختلف سال به ریزمقیاس نمایی تصاویر ماهواره‌ای مودیس پرداخته شد. در نهایت با استفاده از نیاز آبی گیاهان غالب در منطقه مطالعاتی (ارائه شده توسط سند ملی آبیاری) به ارزیابی نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل الگوریتم سبال پرداخته شد. در شکل ۱ نمایی از مراحل انجام پژوهش مشاهده می‌شود.

روش پژوهش: در این پژوهش از سه نوع داده اولیه جهت انجام الگوریتم سبال استفاده شد که شامل: داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک تویسرکان، ۲۷ تصویر ماهواره‌ای مودیس و ۳ تصویر ماهواره‌ای لندست و اطلاعات جانبی از ویژگی‌های گیاهان کشت شده و کاربری اراضی و... استفاده شد. این پژوهش مربوط به سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ و در حوزه سرد و کوهستانی تویسرکان همدان انجام شد. در این پژوهش از نسخه کوهستانی الگوریتم سبال استفاده



شکل ۲- روندنمای انجام پژوهش.

Figure 2. Flowchart research.

فصل زمستان و اوایل بهار به علت ابری بودن و برفی بودن منطقه تهیه تصویر با فواصل ۱۰ روزه مقدور نبود. و از سه تصویر لندست شامل روزهای ۱۵۰، ۲۱۴ و ۲۷۰ ژولپوسی استفاده شد (از تصویر ۲۸ تا ۳۰ موجود در جدول ۲).

جدول ۲ ویژگی‌های تصاویر استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این پژوهش از ۲۷ تصویر ماهواره‌ای مودیس استفاده شده و سعی گردیده است که هر ۱۰ روز یک تصویر ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی استفاده شود. باید توجه شود که در اواخر پاییز،

جدول ۲- ویژگی‌های تصاویر استفاده شده در این پژوهش.

Table 2. properties of remote sensing images.

تاریخ میلادی	روز ژولیبوسی	شماره تصویر	تاریخ میلادی	روز ژولیبوسی	شماره تصویر
Gregorian dates	Julian Day	Number of Image	Gregorian dates	Julian Day	Number of Image
29 می	149	16	22 سپتامبر	266	1
7 ژوئن	158	17	3 اکتبر	277	2
18 ژوئن	169	18	13 اکتبر	287	3
27 ژوئن	178	19	23 اکتبر	297	4
7 ژولای	188	20	7 نوامبر	312	5
18 ژولای	199	21	6 دسامبر	341	6
28 ژولای	209	22	17 دسامبر	352	7
17 اگوست	219	23	29 دسامبر	364	8
17 آگوست	229	24	8 ژانویه	8	9
26 آگوست	238	25	13 فوریه	44	10
4 سپتامبر	247	26	25 فوریه	56	11
15 سپتامبر	258	27	8 مارس	67	12
27 سپتامبر	270	28	20 مارس	79	13
30 می	150	29	14 آوریل	104	14
2 آگوست	214	30	22 سپتامبر	111	15

حالیست که دمای سردتر (دمای کم‌تر) 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 نورخورشید 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 فیزیکی جو، 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. توضیحات زیر به منظور انجام اصلاحاتی بر روی مدل سبال مسطح ارائه شده است که در مناطق کوهستانی قابل استفاده می‌باشد (آلن و همکاران، 2002).

معرفی الگوریتم سبال (نسخه کوهستانی): 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. مدل سبال کوهستانی اصلاحاتی را بر اساس شیب، جهت شیب و ارتفاع انجام داده است. در نیم‌کره شمالی تشعشع خورشیدی ۲۴ ساعته (روزانه) به‌طور عمومی در شیب‌های جنوبی نسبت به شیب‌های شمالی بسیار بزرگ‌تر می‌باشد. چنانچه تصحیحاتی برای شیب، جهت شیب و ارتفاع صورت نگیرد، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده در شیب‌های شمالی و مناطق مرتفع بسیار زیادتر خواهد بود چرا که سبال به‌طور ناصحیح دمای سطح را پیش‌بینی نموده و حتی به‌عنوان مناطق مرطوب شناسایی خواهد کرد. این در

(۱)

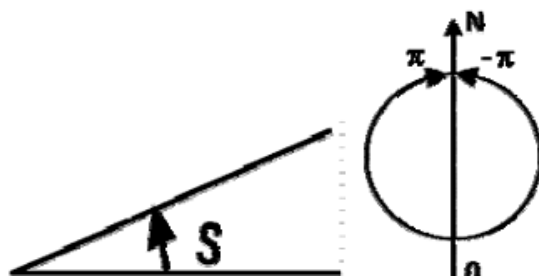
$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(s) - \sin(\delta) \\ &\cos(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\phi) \\ &\cos(s) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \cos(\gamma) \\ &\cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(s) \sin(\omega) \end{aligned}$$

که در آن، دلتا (δ) میزان انحراف زمین و بر حسب رادیان بوده (در نیمکره شمالی و در تابستان عدد مثبتی است). مقدار فی (ϕ) عرض جغرافیایی هر پیکسل بر حسب رادیان (در نیمکره شمالی مثبت است)، S شیب بر حسب رادیان است که در حالت افقی برابر با صفر و در حالت عمودی برابر $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. عدد شیب عموماً مثبت بوده و نشان‌دهنده شیب رو به پایین در جهت‌های مختلف می‌باشد. گاما (γ) زاویه جهت شیب بر حسب رادیان است که برای جهت جنوب برابر صفر و برای جهت شرق برابر $\frac{-\pi}{2}$ ، برای غرب $\frac{\pi}{2}$ و برای شمال $\pm\pi$ می‌باشد (شکل ۳). مقدار اومگا (ω) به زاویه ساعتی معروف است که در ظهر خورشیدی برابر با صفر بوده در قبل از ظهر منفی و در بعد از ظهر مثبت می‌باشد.

الف) برای تهیه داده‌های ارتفاعی به مدل رقومی ارتفاعات (DEM) نیاز است. واحد این نقشه بر حسب متر و اندازه پیکسل آن معادل اندازه پیکسل داده‌های ماهواره‌ای باید باشد. در این مرحله برشی از نقشه DEM که منطقه مطالعاتی را پوشش می‌دهد تهیه خواهد شد.

ب) نقشه‌های شیب و جهت شیب: مدل کوهستانی سبال برای انجام محاسبات به اطلاعات شیب و جهت شیب نیاز دارد. این اطلاعات از طریق نقشه مدل رقومی ارتفاعات استخراج می‌شود.

ج) محاسبه کوسینوس زاویه برخورد امواج خورشید به زمین (کوسینوس تتا): زاویه برخورد تشعشعات خورشید زاویه‌ای است که شعاع خورشید با خط عمود بر سطح زمین می‌سازد. در مدل مسطح سبال فرض بر این است که سطح زمین کاملاً افقی است و بنابراین محاسبه کوسینوس تتا بسیار ساده بوده و در سطح تمامی منطقه مطالعاتی ثابت می‌باشد. این در حالی است که در مدل کوهستانی سبال کوسینوس تتا برای هر پیکسل متفاوت بوده و وابسته به شیب و جهت شیب زمین در آن نقطه است. سبال رابطه ۱ را برای محاسبه کوسینوس تتا استفاده می‌نماید:



شکل ۳- تعریف شیب و جهت شیب در مدل سبال کوهستانی.

Figure 3. Slop and slope direction in mountainous SEBAL.

ه) قابلیت انتقال: برای هر پیکسلی متغیر بوده و به صورت تابعی از ارتفاع خواهد بود که به کمک نقشه Dem محاسبه می شود.

و) آلبیدوی سطح: این پارامتر به کمک نقشه قابلیت انتقال محاسبه می شود.

ز) تشعشع ورودی با طول موج کوتاه: از آنجایی که مقدار کوسینوس تتا در هر پیکسل مقداری متغیر است می توان تشعشع ورودی با طول موج کوتاه (R_s) برای هر پیکسل جداگانه محاسبه کرد.

ح) دمای سطح: به طور کلی و تحت شرایط پایداری جو دمای هوا با هر کیلومتر افزایش ارتفاع از سطح دریا حدود ۶/۵ درجه سانتی گراد کاهش می یابد. از آنجایی که دمای سطح به شدت در تعامل با دمای هوا می باشد می توان نرخ کاهش دمای سطح را معادل با نرخ کاهش دمای هوا منظور نمود. در طی فرایند پیش بینی اختلاف دمای نزدیک به سطح dt ، الگوریتم سبال رابطه بین dt و دمای سطح (T_s) را به صورت خطی فرض می کند. برای تعیین دمای سطح و تخمین صحیحی از dt نیاز به یک سطح مرجع از نظر ارتفاعی می باشد. در غیر این صورت مناطق مرتفع تر که سردتر هم می باشند ممکن است به اشتباه مقادیر بالاتری از ET را نشان دهند. بنابراین در مدل سبال کوهستانی نیاز به تهیه نقشه ای است که روند کاهشی دمای سطح را نشان دهد ($\text{laps } T_s$). این کار کمک می کند که تغییرات dt همانند پروفیل معمولی هوا بوده و با افزایش ارتفاع از سطح دریا، کاهش دمای سطح را نشان دهد. به این منظور از مدل رقومی ارتفاعات استفاده شده و دمای سطح به کمک رابطه ۷ تصحیح می شود.

$$T_{sdem} = T_s + 0.0065 \Delta Z \quad (7)$$

که در آن، ΔZ : ارتفاع هر پیکسل منهای ارتفاع سطح مرجع بر حسب متر است این پارامتر در صورتی که ارتفاع پیکسل از سطح مرجع بزرگتر باشد مثبت

به منظور حل معادله فوق ابتدا مقادیر سینوس و کوسینوس شیب و جهت شیب محاسبه می شوند و سپس میزان انحراف (δ) عرض جغرافیایی (ϕ) و زاویه ساعتی (ω) همگی بر حسب رادیان از طریق رابطه های ۲ تا ۴ محاسبه می شود.

$$\delta = 0.409 \sin\{(2\pi/365 \times \text{DOY}) - 1.39\} \quad (2)$$

$$\phi = \text{latitude in degrees} \times \pi/180 \quad (3)$$

$$\omega = \pi/12\{(t+0.06667(Lz - Lm) + Sc) - 12\} \quad (4)$$

که در این آن ها، t زمان استاندارد مربوط به عبور ماهواره بر حسب ساعت (مثلاً برای ۱۴:۳۰ عدد ۱۴/۵ خواهد بود)، Lz طول جغرافیایی نقطه میانی ناحیه زمان محلی است (local time zone) که بر حسب درجه نسبت به غرب گرینویچ بیان می شود. در کشور ما چنانچه طول جغرافیایی یک منطقه کوچک تر از ۵۲ درجه شرقی باشد، عدد ۴۵ و چنانچه بیش تر از ۵۲ درجه شرقی باشد، عدد ۶۰ برای Lz منظور خواهد شد. Lm طول جغرافیایی مربوط به نقطه میانی تصویر ماهواره ای بر حسب درجه نسبت به غرب گرینویچ و Sc تصحیح فصلی زمان خورشیدی بر حسب ساعت است که از طریق رابطه های ۵ و ۶ محاسبه می شود.

$$Sc = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (5)$$

$$b = 2\pi(\text{DOY} - 81)/364 \quad (6)$$

در نظر گرفتن کوسینوس تتا در این محاسبات به این مفهوم است که سبال تمامی شار انرژی محاسباتی را بر پایه مقدار معادل افقی آن مورد آنالیز قرار خواهد داد.

د) بازتابش: برای محاسبه بازتابش از نقشه کوسینوس تتا به جای یک عدد ثابت استفاده خواهد شد.

ل) **تشعخ خالص سطح**: این پارامتر (Rn) همانند مدل سطح سبال محاسبه می‌شود تنها تفاوت محاسبه Rn در مدل سبال کوهستانی به نقشه‌های RL ورودی و RS ورودی بر می‌گردد که به جای مقادیر ثابت از نقشه‌های آن‌ها استفاده خواهد شد.

م) **شارگرمای خاک**: محاسبه شارگرمای خاک (G) و G/Rn همانند مدل سبال سطح بوده و با کمک دمای سطحی تصحیح‌نشده (Ts) به دست می‌آید.

ن) **طول زبری مومتوم**: این پارامتر (Zom) ابتدا همانند مدل سطح سبال و با کمک نقشه کاربری اراضی و شاخص سطح برگ (LAI) محاسبه شده و سپس بر اساس نقشه شیب و رابطه ۹ اصلاح می‌شود.

$$Zom(mnt) = Zom \times [1 + (\text{slope} - 5)/20] \quad (9)$$

س) **سرعت اصطکاکی اولیه و مقاومت آیرودینامیک در مقابل انتقال حرارت**: قبل از محاسبه سرعت اصطکاکی (U^*) و مقاومت در برابر انتقال حرارت (rah)، سرعت باد در ارتفاع ۲۰۰ متر (u_{200}) بر اساس تغییرات ارتفاع اصلاح می‌شود. اثرات ارتفاع بر روی سرعت باد بسیار پیچیده بوده و کمی‌سازی آن مشکل می‌باشد. ضریب با نام ضریب وزنی سرعت باد کوهستانی (ω) برای اصلاح u_{200} مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه ۱۰ می‌باشد:

$$\omega = 1 + 0.1 \left[\left(\frac{\text{elevation} - \text{elevation station}}{100} \right) \right] \quad (10)$$

که در آن، منظور از Elevation ارتفاع از سطح دریای هر پیکسل و منظور از Elevation station ارتفاعی است که سرعت باد در آن اندازه‌گیری شده است. پس از محاسبه ω و ضرب آن در u_{200} ، مقدار u_{200} برای هر پیکسل اصلاح خواهد شد.

ف) **شار گرمایی محسوس**: این پارامتر (H) همانند مدل سطح سبال محاسبه می‌شود. برای محاسبه

خواهد بود. ارتفاع معرف هر تصویر (که معمولاً ارتفاع ایستگاه هواشناسی می‌باشد) به عنوان ارتفاع مرجع در نظر گرفته می‌شود.

ط) **تشعخ خروجی با طول موج بلند**: محاسبه این پارامتر (RL) همانند محاسبات مدل سبال سطح بوده که از دمای سطح تصحیح‌نشده (Ts) برای این کار استفاده می‌نمایند.

ی) **انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم**: برای انتخاب دو پیکسل سرد و گرم از نقشه دمای سطح تصحیح شده (Ts_Dem) استفاده می‌شود. همان‌طوری‌که اشاره شد به دلیل اثرات ارتفاع، نقشه Ts پیکسل‌های سرد و گرم را به جای پیکسل‌های مرطوب و خشک نمایش می‌دهد. برای پیکسل‌هایی که از نظر ارتفاعی بزرگ‌تر از سطح مرجع می‌باشند تصحیح افت دما به Ts اضافه شده و بنابراین Ts_dem از Ts بزرگ‌تر خواهد بود. بنابراین نقشه Ts_dem قدرت انتخاب پیکسل‌های واقعی مرطوب و خشک را به ما خواهد داد. بنابراین در مرحله تعیین پیکسل‌های سرد و گرم در مدل سبال کوهستانی نقشه TS_dem جایگزین نقشه Ts خواهد شد.

ک) **تشعخ با طول موج بلند ورودی**: از آنجایی‌که قابلیت انتقال هوا برای پیکسل‌های مختلف عدد ثابتی نیست این پارامتر (RI) نیز برای هر پیکسل متغیر به دست خواهد آمد. در این مرحله دمای مرجع (T_{cold}) بر اساس اثر افت دمای ناشی از ارتفاع با توجه به رابطه ۸ تصحیح خواهد شد.

$$T_{cold}(\text{each pixel}) = T_{cold} + 0.0065 \Delta Z \quad (8)$$

که در آن، ΔZ حاصل ارتفاع پیکسل سرد منهای ارتفاع پیکسل‌های هر کدام از تصاویر می‌باشد. ارتفاع پیکسل سرد از طریق موقعیت این نقطه بر روی نقشه DEM به دست می‌آید.

وجود دارد تفکیک مناطق پوشش‌دار از مناطق بایر در تصاویر مودیس با اشکالات زیادی همراه است و از طرفی به علت در دسترس بودن تصاویر مودیس در تمامی روزهای سال، جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی یک سال آبی بسیار مناسب هستند، بنابراین استفاده از تصاویر مودیس لازم می‌باشد تا درونیابی تبخیر و تعرق واقعی در طول سال آبی یا دوره کشت گیاه با حداقل خطای ممکن همراه باشد (رحیمیان، ۲۰۱۳). بنابراین در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست جهت کوچک مقیاس کردن و بالا بردن دقت تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز استفاده شده است. در این پژوهش از تصاویر لندست به سه منظور استفاده گردید: (۱) تطابق بیش‌تر تصاویر لندست با الگوریتم سبال به علت این‌که اصل فرمول‌نویسی الگوریتم سبال برای تصاویر ماهواره‌ای لندست بوده است و همچنین ریزولوشن بالای تصاویر لندست (۳۰*۳۰ متر) نسبت به تصاویر مودیس (۲۵۰*۲۵۰ متر) و تفکیک مناسب هر پیکسل از مناطق با پوشش گیاهی یا مناطق لخت می‌باشد. (۲) تعیین توزیع مکانی مناسب تبخیر و تعرق واقعی توسط تصاویر لندست و تهیه نقشه نسبت تعیین می‌شود (۳) اصلاح مقدار بیش برآورد و یا کم برآورد تبخیر و تعرق واقعی تصویر مودیس به کمک تصویر لندست. در همین راستا از تصاویر لندست در سه فصل بهار (ماه می)، فصل تابستان (ماه آگوست) و فصل پاییز (ماه سپتامبر) استفاده شد (به‌علت محدودیت تصاویر ماهواره‌ای لندست از نظر زمانی، تصویر مناسبی برای فصل زمستان یافت نشد). با استفاده از این سه تصویر مقدار بیش برآورد و یا کم برآورد هر یک از تصاویر مودیس نسبت به تصاویر لندست تخمین، نقشه نسبت‌ها که توزیع مناسب تبخیر و تعرق را نشان می‌دهد تهیه و سپس نقشه تبخیر و تعرق واقعی سالانه حوزه آبخیز تویسرکان اصلاح گردید.

چگالی هوا از دمای سطح اصلاح‌نشده (Ts) و برای محاسبه dT از دمای سطح اصلاح‌شده (Ts_DEM) استفاده می‌شود.

ظ) تصحیح پایداری جو: فرایند رفت و برگشتی تصحیح پایداری جو در مدل سبال کوهستانی همانند مدل مسطح سبال بوده و به کمک صفحه گسترده اکسل انجام می‌شود.

ق) کاربردها و اقدامات لازم مدل سیبال کوهستانی: مدل سبال کوهستانی به منظور بهبود محاسبه اجزای بیلان انرژی در مناطق شیب‌دار معرفی گردیده است. اما به هر حال برخی عدم قطعیت‌ها در این زمینه وجود دارد. به‌طوری‌که اگرچه مدل کوهستانی تخمین‌های بهتری از تبخیر و تعرق در مناطق کوهستانی ارائه می‌دهد، اما تخمین‌های ET در چنین شرایطی با عدم قطعیت‌های بیش‌تر نسبت به نتایج مدل سبال مسطح همراه است. در شرایطی که در مقیاس زیرحوزه اقدام به محاسبه ET شود، نتایج مدل سبال کوهستانی به‌طور محتمل منطقی‌تر به‌دست خواهد آمد. دلیل این امر به از بین رفتن برخی از عدم قطعیت‌ها نظیر ناشناخته بودن سرعت و جهت باد در چنین شرایطی برمی‌گردد.

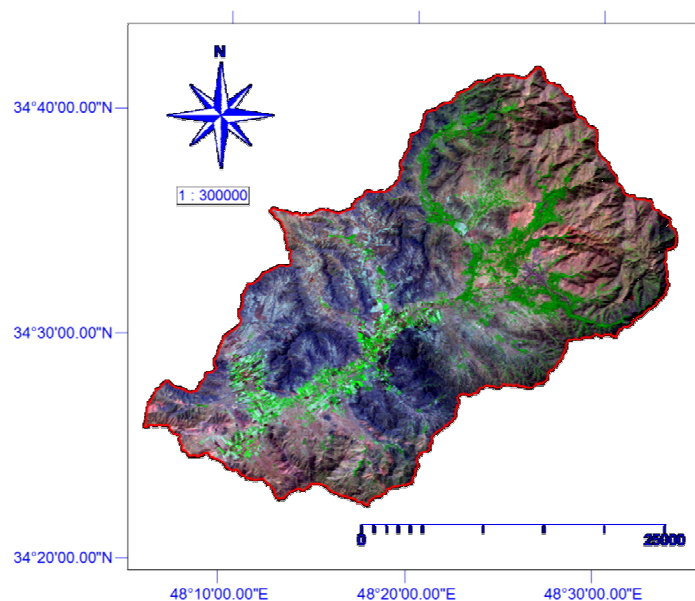
کوچک مقیاس کردن تصاویر مودیس: یکی از مشکلات اساسی استفاده از تصاویر مودیس بزرگ بودن ابعاد هر پیکسل و پایین بوده وضوح هر یک از آن‌ها می‌باشد، این امر باعث می‌شود در بسیاری مواقع مناطق با پوشش گیاهی از زمین‌های بایر به درستی از هم تفکیک نشوند این موضوع به‌ویژه در برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای حوزه‌های آبخیز بیش‌تر خود را نشان می‌دهد چرا که در برآورد تبخیر و تعرق واقعی مزارع و باغات، حریم منطقه کشت شده تا حدودی مشخص و امکان ایجاد تفکیک مناطق لخت و پوشش‌دار از هم دقیق‌تر صورت می‌گیرد ولی در یک حوزه آبخیز که کاربری‌های متفاوتی در اراضی منطقه

تبخیر و تعرق واقعی به‌دست آمده از الگوریتم سبال در بخش کشاورزی حوزه آبخیز تویسرکان محاسبه و ارزیابی شد.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج الگوریتم سبال اراضی مسطح با نسخه کوهستانی: در شکل ۴ تصویر ترکیب رنگی حوزه آبخیز تویسرکان به همراه مناطق کوهستانی حوزه آبخیز به خوبی نشان داده شده است. با توجه به تصویر در هر ۴ طرف حوزه تویسرکان مناطق کوهستانی قرار دارند و در مرکز حوزه بیش‌ترین پوشش گیاهی واقع شده است. البته در ارتفاعات پایین‌تر مناطق کوهستانی در حوزه کشت دیم صورت می‌گیرد و در بخش‌هایی از سال دارای پوشش مرتعی می‌باشند.

ارزیابی نتایج برآورد تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم توازن انرژی: یکی از روش‌های ارزیابی نتایج حاصل شده از الگوریتم توازن انرژی سبال، مقایسه نتایج با نیاز آبی گیاهان غالب در منطقه مطالعاتی می‌باشد که توسط سند ملی آبیاری ایران و توسط نرم‌افزار نت وات ارائه شده است (فرض بر دقت بودن عدد ارائه شده نیاز آبی برای هر گیاه در سند ملی آبیاری می‌باشد) (رحیمیان، ۲۰۱۳). به این منظور با توجه به غالب بودن گیاه جو از گیاهان زراعی و درخت گردو از محصولات باغی حوزه آبخیز تویسرکان در این پژوهش از نیاز آبی این دو گیاه جهت صحت‌سنجی نتایج الگوریتم سبال استفاده شد. با توجه به دوره رشد گیاه گردو در منطقه (۲۱۶ روز سال) که از ۲۰ فرودین تا ۲۰ آبان‌ماه و گیاه جو (۲۴۰ روز سال) از ۲۰ مهر تا ۲۰ خرداد می‌باشد،



شکل ۴- تصویر ترکیب رنگی به همراه مناطق کوهستانی حوزه آبخیز تویسرکان.

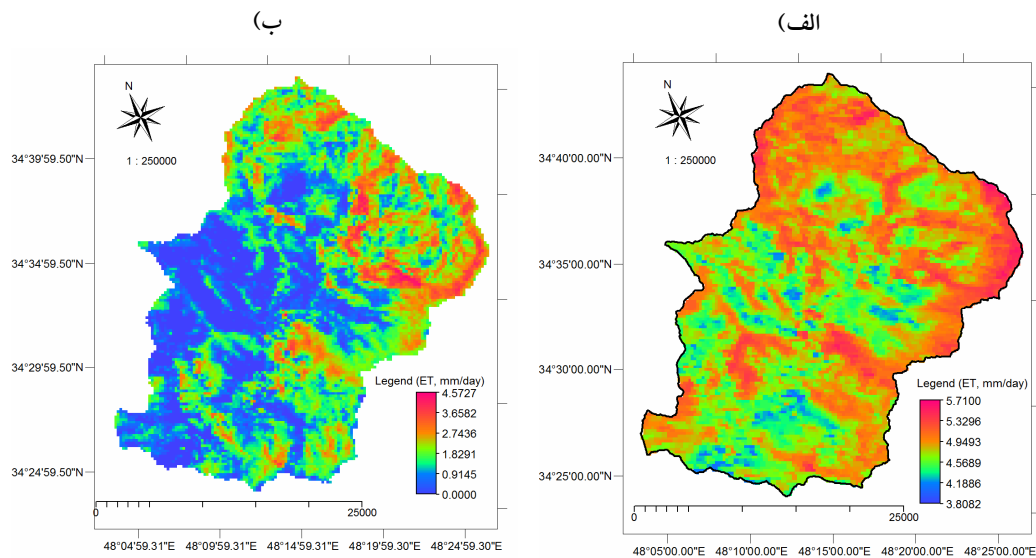
Figure 4. Colored composition image with mountainous region in Tuyserkan basin.

همان‌طور که از نقشه تبخیر و تعرق واقعی به‌دست آمده از دو نوع الگوریتم توازن انرژی مشخص می‌باشد الگوریتم سبال برای مناطق مسطح نتوانسته

در شکل ۵ الف تصویر روز ۲۵۸ با الگوریتم سبال مناطق پست و در شکل ۵ ب تصویر روز ۲۵۸ با الگوریتم سبال مناطق کوهستانی با هم مقایسه شده‌اند.

این بخش‌ها تخمین زده است. با توجه به تبخیر و تعرق برآوردی دو نوع الگوریتم سبال اراضی مسطح و کوهستانی به خوبی مشخص است که میزان تبخیر و تعرق در هر دو نقشه متفاوت بوده به طوری که نقشه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال اراضی پست از ۳/۸ تا ۵/۷ میلی‌متر در روز ۲۵۸ ژولوسی می‌باشد این در حالیست که در نقشه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی این دامنه تغییرات از صفر در مناطق کوهستانی تا ۴/۵ در مناطق پوشش‌دار می‌باشد.

است به خوبی تبخیر و تعرق را در مناطق کوهستانی حوزه آبخیز برآورد نماید به طوری که حتی بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق را در ارتفاعات کوهستانی شمال‌شرقی حوزه آبخیز برآورد نموده است که خطای زیادی را ایجاد می‌نماید. اما در شکل ۵ ب نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه که به کمک الگوریتم توازن انرژی سبال کوهستانی تهیه شده است تا حدودی توانسته است مناطق کوهستانی و سایه‌انداز را از مناطق غیرکوهستانی تفکیک نماید. به طوری که ارتفاعات کوهستانی بخش غربی حوزه را به خوبی تشخیص داده و کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق را برای



شکل ۵- الف) تصویر روز ۲۵۸ با الگوریتم سبال مناطق پست ب) تصویر روز ۲۵۸ با الگوریتم سبال مناطق کوهستانی.

Figure 5. A) Image of 258 day with lowland SEBAL B) Image of 258 day with mountainous.

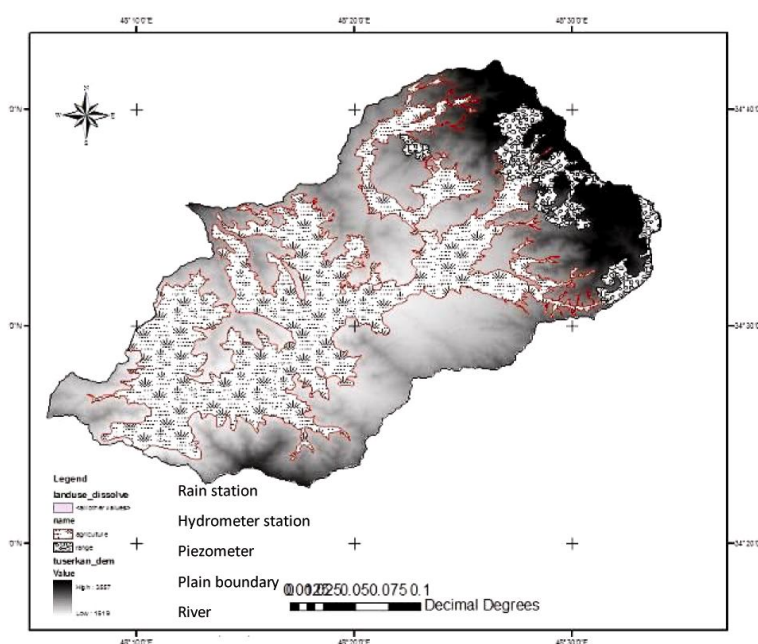
تفاوت محسوس به علت تشخیص و تفکیک مناسب‌تر مناطق کوهستانی و سایه‌انداز از مناطق غیرکوهستانی در الگوریتم سبال کوهستانی می‌باشد. در پژوهشی که توسط پورمحمدی و همکاران (2011) انجام گرفت، به اصلاح بخشی از نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز برآورد شده از الگوریتم سبال پرداختند دلیل آن هم کوهستانی و سایه‌انداز بودن این بخش از حوزه و

مقایسه میانگین تبخیر و تعرق واقعی برآوردی از دو نوع الگوریتم سبال کوهستانی و الگوریتم مناطق مسطح روز ۲۵۸ ژولوسی (۲۴ شهریور) در حوزه آبخیز توپسرکان نشان می‌دهد که میانگین تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز با استفاده از الگوریتم سبال مسطح ۴/۸ میلی‌متر در روز و با استفاده از الگوریتم سبال کوهستان ۱/۴۴ میلی‌متر در روز می‌باشد که این

باغی (دیم و آبی)، مناطق با پوشش طبیعی و مرتعی و مناطق کوهستانی و سنگلاخی تقسیم شده‌اند. همان‌طور که در نقشه مشخص است مناطق مرکزی حوزه را اراضی باغی و زراعی شامل کشت دیم و آبی تشکیل داده و اراضی مرتعی هم در بخش‌هایی از ارتفاعات شمال شرقی حوزه آبخیز مشاهده می‌شود.

برآورد عدد غیرواقعی برای آن بود بنابراین استفاده از نسخه کوهستانی الگوریتم سبال این مشکل را برای حوزه‌های آبخیز برطرف می‌کند.

تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان: در شکل ۶ نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تویسرکان نمایش داده شده است. با توجه به نقشه مذکور حوزه آبخیز تویسرکان به سه بخش کلی، مناطق زراعی و

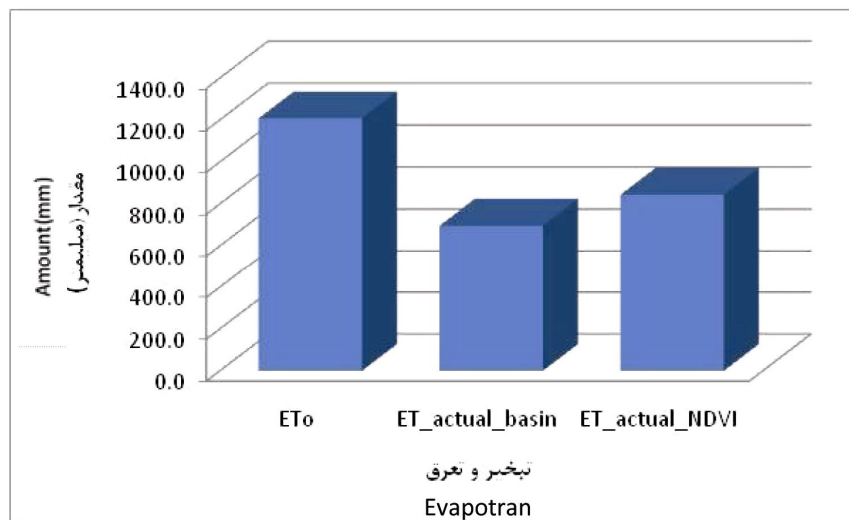


شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تویسرکان به همراه نقشه DEM.

Figure 6. Land use and DEM map in Tuyserkhan basin.

میانگین وزنی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در بخش مراتع $946/3$ میلی‌متر در سال و در بخش کشاورزی $837/2$ میلی‌متر می‌باشد. یکی از دلایل زیاد بودن تبخیر و تعرق بخش مراتع نسبت به بخش کشاورزی، دیم‌کاری در دشت تویسرکان و آیش بودن زمین در بخش‌هایی از سال می‌باشد. این در حالیست که پوشش‌های مرتعی بخش بیش‌تری از سال نسبت به کشت دیم سبزینگی دارند.

نتایج الگوریتم توزان انرژی در حوزه آبخیز تویسرکان: نتایج تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان به تفکیک دو کاربری در بخش کشاورزی و مراتع در قیاس با تبخیر و تعرق پتانسیل نمایش داده شده است. تبخیر و تعرق پتانسیل حوزه آبخیز تویسرکان $1208/3$ میلی‌متر در سال می‌باشد و این در حالیست که متوسط وزنی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز در سال آبی ۸۸-۸۷، $698/6$ میلی‌متر بوده است.

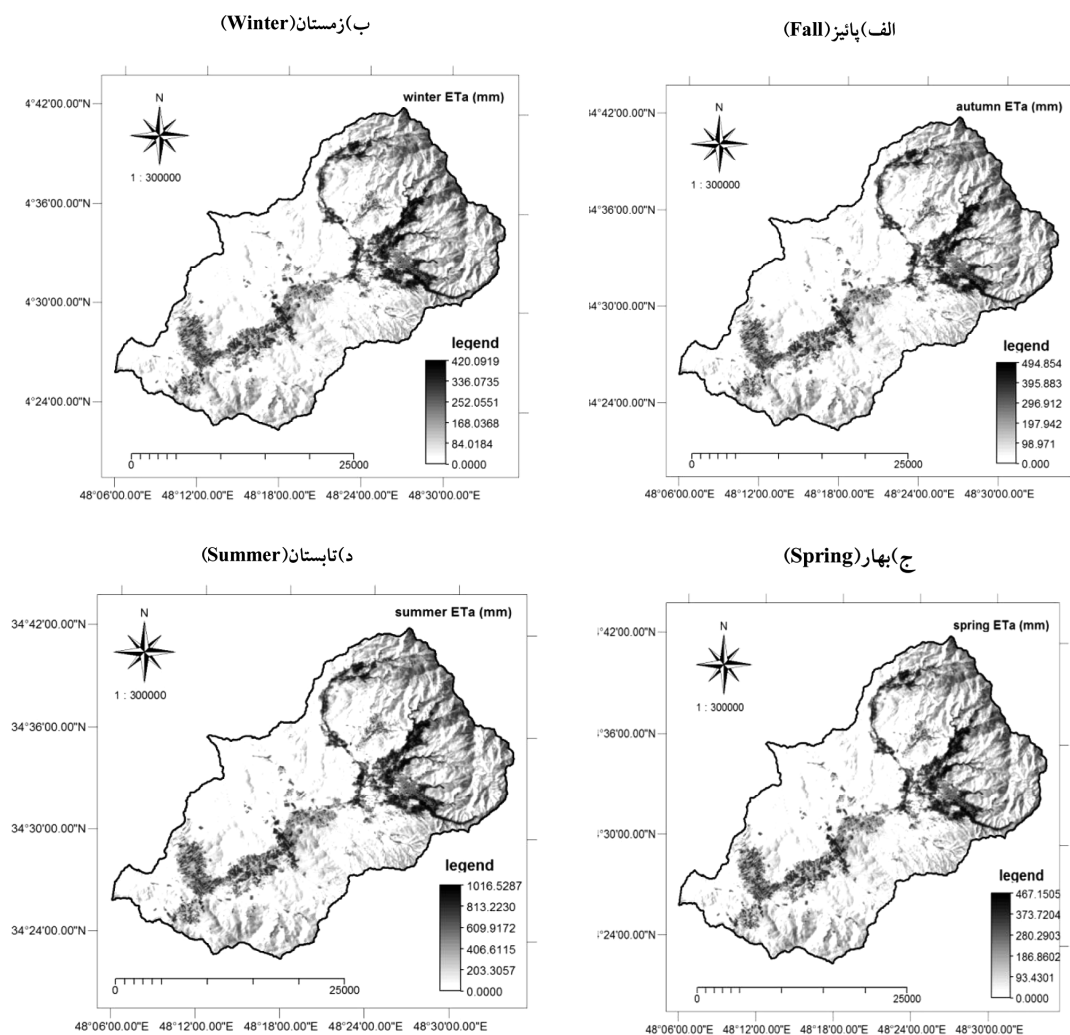


شکل ۷- تبخیر و تعرق واقعی حوزه تویسرکان، بخش کشاورزی، مرتع و تبخیر و تعرق پتانسیل.

Figure 7. Actual and potential evapotranspiration in farm and rangeland of tuyserkan basin.

در بخش ج نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در فصل بهار دیده می‌شود. با توجه به راهنمای نقشه، تبخیر و تعرق واقعی حوزه در این فصل ۲۲۶/۶۸ میلی‌متر می‌باشد. در بخش د نقشه نیز تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در فصل تابستان مشاهده می‌شود. میانگین تبخیر و تعرق واقعی در این فصل ۲۱۹/۳۳ میلی‌متر می‌باشد. در این دو فصل نیز، تبخیر و تعرق واقعی حوزه در بخش‌های مرکزی حوزه بیش‌تر از بخش‌های حاشیه‌ای که کوهستانی و صخره‌ای می‌باشد، است. بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق در فصل بهار می‌باشد که علت این موضوع هم وجود بیش‌ترین میزان پوشش گیاهی و سبزیگی در فصل بهار می‌باشد. با توجه به کاهش سطح پوشش گیاهی در فصل تابستان به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی و مناطق مرتعی، باعث کاهش تبخیر و تعرق واقعی نسبت به فصل بهار می‌باشد. در زمستان به‌علت پوشیده بودن سطح زمین از برف و کاهش پوشش گیاهی کشاورزی و مرتعی حوزه آبخیز کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق واقعی را دارا می‌باشد.

نتایج الگوریتم توزان انرژی کوچک مقیاس شده: در شکل ۸ نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در ۴ فصل سال آبی ۸۸-۸۹ مشاهده می‌شود. در نقشه شکل ۸ الف تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در فصل پاییز مشاهده می‌شود. با توجه به راهنمای نقشه، تبخیر و تعرق در بخش‌های مرکزی و شمالی حوزه که مربوط به بخش‌های کشاورزی و مرتعی می‌باشد، بیش‌ترین و در بخش‌های صخره‌ای و کوهستانی حوزه آبخیز کم‌تر می‌باشد. میانگین وزنی تبخیر و تعرق حوزه آبخیز تویسرکان در فصل پاییز، ۱۳۶/۸۸ میلی‌متر می‌باشد. بخش ب نقشه ۸ نقشه تبخیر و تعرق واقعی فصل زمستان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود تبخیر و تعرق واقعی در بخش‌های مرکزی و شمالی حوزه آبخیز (بخش‌های مرتعی و کشاورزی) بیش‌ترین بوده است و در نقاط صخره‌ای و کوهستانی کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق دیده می‌شود. میانگین وزنی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان در این فصل ۱۱۶/۲ میلی‌متر می‌باشد.

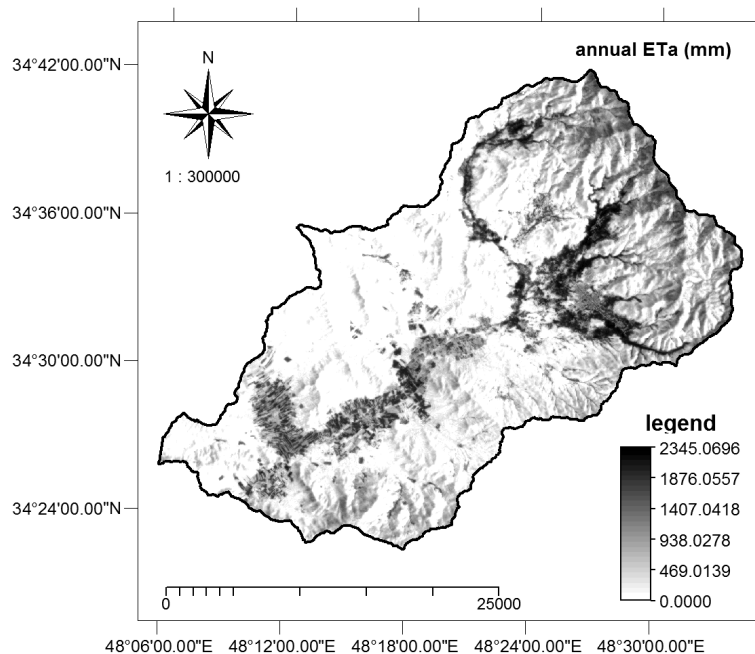


شکل ۸- نقشه تبخیر و تعرق واقعی فصلی حوزه آبخیز تويسرکان.

Figure 8. Seasonal Actual evapotranspiration map in tuyserkan basin.

درستی کم‌ترین میزان تبخیر و تعرق واقعی را برای این بخش‌ها تخمین زده است. بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق به درستی در بخش‌های کشاورزی و مرتعی حوزه آبخیز تخمین زده شده است. میانگین وزنی تبخیر و تعرق واقعی حوزه با توجه به راهنمای نقشه ۶۹۸/۶ میلی‌متر در سال می‌باشد.

در شکل ۹ نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تويسرکان در سال آبی ۸۷-۸۸ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نقشه مشخص می‌باشد الگوریتم سبال کوهستانی توانسته است مناطق صخره‌ای و سنگلاخی که ایجاد سایه‌اندازی و اختلال در برآورد تبخیر و تعرق می‌کند را به خوبی تشخیص داده و به



شکل ۹- نقشه تبخیر و تعرق واقعی حوزه تویسرکان در سال آبی ۸۸-۸۷.
Figure 9. Annual Actual evapotranspiration in tuyserkan basin.

حوزه آبخیز تویسرکان می‌توان به این نتیجه اولیه دست یافت که الگوریتم سبال در برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی، بیش برآورد دارد و در تخمین نیاز آبی گیاهان باغی دچار کم برآورد می‌شود. موضوع کم برآورد تخمین نیاز آبی در گیاهان باغی توسط الگوریتم سبال در مقایسه با سند ملی آبیاری در پژوهشی که توسط دستورانی و همکاران (2012) صورت گرفت نیز قابل مشاهده است. در این پژوهشات مقایسه نیاز آبی تخمین زده شده توسط الگوریتم توزان انرژی سبال در مقایسه با نیاز آبی ارائه شده توسط سند ملی آبیاری برای گیاه پسته، نشان داد که این الگوریتم حدود ۱۸ درصد کم برآورد داشته است و دقت الگوریتم سبال را ۸۲ درصد جهت تعیین تبخیر و تعرق واقعی در پسته‌زارهای اردکان تخمین زدند. همچنین در پژوهشی که رحیمیان (2013) انجام داد دقت الگوریتم توزان انرژی در برآورد تبخیر و تعرق درختان پسته را ۹۴٪ برآورد نمود.

ارزیابی الگوریتم سبال با استفاده از سند ملی آبیاری: در جدول ۳ مقایسه دقت برآورد الگوریتم توزان انرژی سبال با سند ملی آبیاری در مورد دو گیاه غالب زراعی و باغی در محدوده کشاورزی حوزه آبخیز تویسرکان نشان داده شده است. با توجه به نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصله از الگوریتم توزان انرژی برای دوره رشد گیاه گردو و نیاز آبی ارائه شده از سند ملی آبیاری، می‌توان به این نتیجه رسید که دقت الگوریتم توزان انرژی جهت تعیین نیاز آبی گیاه گردو ۸۷ درصد بوده و حدود ۱۳ درصد کم برآورد داشته است. در مقایسه نیاز آبی گیاه جو و تبخیر و تعرق واقعی حاصله از الگوریتم سبال، دقت ۸۴ درصد الگوریتم توزان انرژی در تعیین تبخیر و تعرق واقعی استنباط می‌شود در حالی که بر عکس گیاه گردو، الگوریتم سبال در تعیین نیاز آبی جو، حدود ۱۶ درصد بیش برآورد داشته است. به‌طورکلی با در نظر گرفتن دو گیاه غالب زراعی و باغی کشت شده در

جدول ۳- مقایسه برآوردهای تبخیر و تعرق توسط الگوریتم توازن انرژی سبال با سند ملی آبیاری.

Table 3. Compare evapotranspiration estimates by SEBAL with the National Irrigation document.

دقت پیش‌بینی	تبخیر و تعرق واقعی برآوردی از الگوریتم توازن انرژی	تبخیر و تعرق برآورد شده توسط سند ملی آبیاری	نام محصول
accuracy	actual evapotranspiration	National Irrigation document	Crop name
87%	725	868	گردو (Walnut)
84%	410	352	جو (Barley)

الگوریتم سبال جهت تخمین تبخیر و تعرق واقعی استفاده نمود. در مجموع می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم توازن انرژی سبال در تخمین تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبخیز تویسرکان با دقت ۸۲٪ کارایی مناسبی را داشته است. در نهایت پیشنهاد می‌شود که برای ارزیابی دقیق‌تر الگوریتم توازن انرژی نقشه دقیقی از تمام محصولات کشت شده در حوزه آبخیز تویسرکان تهیه و نیاز آبی تک‌تک گیاهان کشت‌شده در منطقه به همراه وسعت کشت آن‌ها بررسی شود تا بتوان کارایی الگوریتم توازن انرژی سبال را برای تمامی گیاهان کشت‌شده در منطقه برآورد نمود. در ارتباط با بیش برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط الگوریتم سبال برای گیاهان زراعی و کم‌برآورد برای گیاهان باغی نیز باید پژوهش‌های وسیع‌تر با سایت‌های پژوهش‌هایی مشخص از دو نوع گیاه باغی و زراعی و انواع گونه‌ها در نظر گرفت تا بتوان به نتیجه روشن‌تر و مطمئن‌تری دست یافت. نتیجه‌گیری نهایی آن‌که الگوریتم توازن انرژی سبال می‌تواند کارایی مناسبی در تخمین تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز به‌عنوان مهم‌ترین عامل هدررفت آب در حوزه داشته باشد بنابراین جهت مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز و تخمین بیلان آبی حوزه استفاده از این الگوریتم پیشنهاد می‌شود.

در مجموع با در نظر گرفتن دو گیاه غالب زراعی و باغی حوزه آبخیز تویسرکان، دقت پیش‌بینی الگوریتم توازن انرژی در این حوزه آبخیز حدود ۸۶ درصد بوده است. که با نتایج سایر پژوهشگران در این زمینه همخوانی دارد به‌طوری‌که باستین‌سن (2005) و آن و همکاران (2005) در پژوهش‌هایی گسترده دقت الگوریتم توازن انرژی سبال را حدوداً بین ۸۰ تا ۹۰ درصد تخمین زدند. همچنین پورمحمدی و همکاران (2010)، دستورانی و پورمحمدی (2012)، رحیمیان و پورمحمدی (2012) دقت الگوریتم سبال را حدود ۸۰ درصد تخمین زده‌اند. نتایج پژوهش حاضر به سه بخش کلی قابل تفکیک است: ۱) نسخه کوهستانی الگوریتم توازن انرژی سبال با دقت بسیار بالاتر و صحت بیشتری می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی حوزه‌های آبخیز را که اکثریت بخش‌های آن‌ها حالت کوهستانی دارند را نشان دهد. ۲) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست جهت ریزمقیاس نمایی نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال حاصله از تصاویر مودیس در افزایش دقت نقشه پیشنهادی و توزیع مناسب‌تر تبخیر و تعرق واقعی در حوزه مؤثر خواهد بود. ۳) در صورت در دسترس نبودن داده‌های لایسِمتری یا نمونه‌گیری‌های صحرائی می‌توان از نیاز آبی ارائه شده در سند ملی آبیاری برای گیاهان شاخص دشت‌های مختلف جهت ارزیابی نتایج

منابع

1. Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A.T., and Trezza, R. 2005. A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning, *J. Irrig. Drain. Syst.* 19: 3-4. 251-268.
2. Bastiaanssen, W.G., Noordman, M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., and Allen, R.G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions, *J. Irrig. Drain. Engin.* 131: 1. 85-93.
3. Borchardt, S., Martin, H., and Trauth, H. 2012. Remotely-sensed evapotranspiration estimates for an improved hydrological modeling of the early Holocene mega-lake Suguta, northern Kenya Rift, *J. Paleogeograph. Paleoclimatol. Paleoecol.* 61: 362. 14-20.
4. Cammalleri, C., Ciralo, G., Laloggia, G., and Maltese, A. 2012. Daily evapotranspiration assessment by means of residual surface energy balance modeling: A critical analysis under a wide range of water availability, *J. Hydrol.* 452: 453. 119-129.
5. Dastorani, M., Poormohammadi, S., and Rahimian, M.H. 2012. Evaluation and estimation pistachio orchard evapotranspiration in Ardakan using SEBAL and RS, *Water Res. Agric. J.* 3: 32-58. (In Persian)
6. Dastorani, M.T., and Poormohammadi, S. 2012. Evaluation of Water Balance in a Mountainous Upland Catchment Using SEBAL Approach, *ISI. J. Environ. Monitor. Assess.* DOI: 10.1007:s11269.
7. Koloskov, G., Mukhamejanove, Kh., and Tanton, T.W. 2006. Monin Obukhov Length as a Cornerstone of the SEBAL Calculations of Evapotranspiration. *J. Hydrol.* 335: 170-179.
8. Kongo, M.V., Jewitt, G.W.P., and Lorentz, S.A. 2011. Evaporative water use of different land uses in the upper-Thukela river basin assessed from satellite imagery. *J. Agric. Water Manage.* 98: 11. 1727-1739.
9. Poormohammadi, S., Dastorani, M.T., Mokhtari, M.H., and Rahimian, M.H. 2010. Determination and Mapping of Actual Evapotranspiration Using Remote Sensing Technique and SEBAL Approach (Case study: Manshad Catchment, Yazd Province), *Iran Water. Manage. Sci. Engin. J.* 10: 74-86. (In Persian)
10. Rahimian, M.H. 2013. Application of Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) for estimation of Pistachio evapotranspiration (Case Study: Ardakan), M.Sc. Thesis, Shahrekord University. 117p. (In Persian)
11. Rahimian, M.H., and Poormohammadi, S. 2012. Estimation of winter wheat actual evapotranspiration under stress condition by remote sensing data and energy balance algorithm (Case study: Azadegan plain, Khuzestan), *Water Res. Agric. J.* 4: 12-28. (In Persian)
12. Ramosa, J.G., Cratchley, C., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martinez-Cob, A., and Dominguez, Z. 2008. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E., Spain. *J. Agric. Water Manage.* AGWAT-2701: 15-26.
13. Sari, D.K., Ismullah, I.H., Sulasdi, W.N., and Harto, A.B. 2013. Estimation of Water Consumption of Lowland Rice in Tropical Area based on Heterogeneous Cropping Calendar Using Remote Sensing Technology, *J. Proscenia Environ. Sci.* 17: 298-307.
14. Tang, R., Zhao-Liang, L., Kun-Shan, C., Yuanyuan, J., Chuanrong, L., and Xiaomin, S. 2013. Spatial scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data., *J. Agric. For. Meteorol.* 174-175: 28-42.
15. Teixeira, A., Bastiaanssen, W.G., Ahmad, M., and Dand Bos, M.M.G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the low-middle São Francisco River basin, Brazil, Part A: calibration and validation, *J. Agric. For. Meteorol.* 149: 462-476.
16. Valentijn, R.N., Pauwels, A., Timmermans, W., and Loew, A. 2007. Comparison of the estimated water and energy budgets of a large winter wheat field during, *J. Agric. Water Manage.* 425: 120-135.

17. Yang, Y., Shang, S., and Jiang, L. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China, *J. Agric. For. Meteorol.* 164: 112-122.
18. Zhongping, S., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D., and Liu, Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China, *J. Mathematic. Com. Model.* 54: 3-4. 1086-1092.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(5), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Application of SEBAL-mountain and MODIS imagery for estimation of actual evapotranspiration in mountainous catchments (Case study: Tuyserkan, Iran)

***S. Poormohammadi¹, M.T. Dastorani², A.R. Masah Bavani³,
H. Jafari⁴ and M.H. Rahimian⁵**

¹Researcher, Cloud Seeding Research Center, Water Research Institute,

²Professor, Dept. of Natural Resources and Environmental, Ferdowsi University of Mashhad,

³Associate Prof., Dept. of Agricultural, University of Abureyhan,

⁴Assistant Prof., Dept. of Geoscience, University of Shahroud,

⁵Researcher, Salinity Research Center, Agriculture Institute

Received: 10/27/2013; Accepted: 11/19/2014

Abstract

Background and Objectives: Shortage of surface and ground water resources in different parts of Iran has caused environmental and ecological hazards in the catchments. It has affected not only agricultural and natural resource sectors, but also society and economic of the catchments. In such a condition appropriate water resources management programs seems vital and important. These programs would include proper spatial distribution of water in the catchment. Actual evapotranspiration (ET_a) is the main cause of water loss in the catchment.

Materials and Methods: This research has focused on evaluation and estimation of actual evapotranspiration in Tuyserkan mountainous catchment, with the aid of satellite remote sensing data and SEBAL-mountain approach. For this purpose 27 MODIS cloud free images were used to estimate daily ET_a . The maps then were downscaled by correlating their values with contemporary ET_a maps of Landsat images. The downscaled daily ET_a maps were then extrapolated to the whole cropping season by their Penman-Monteith ET_o ratios, to yield cumulative annual ET_a , then compared with recommended values of Iranian national document on crop water requirement.

Results: Results show that the mountain version of SEBAL algorithm is able to estimate actual evapotranspiration of Tuyserkan catchment with accuracy of 82% and seems to be more accurate for such a mountainous upland catchment, compared with its original version.

Conclusion: The results showed that the SEBAL algorithm can be efficiently used in evapotranspiration estimation in watersheds that it is the most important factor in water loss. Therefore, this algorithm is recommended to water resource management and water balance estimates in watershed.

Keywords: Mountain SEBAL, Actual evapotranspiration, Downscaling, MODIS, Tuyserkan

* Corresponding Author; Email: s.poormohammadi@yahoo.com

