

ارزیابی و برآورد اجزای بیلان آبی در حوزه‌های مناطق خشک با به‌کارگیری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد یزد

سمانه پورمحمدی^۱ محمدتقی دستورانی^۲ سید علیمحمد چراغی^۳
محمدحسین مختاری^۴ محمدحسن رحیمیان^۵

(دریافت ۸۹/۷/۱۵ پذیرش ۹۰/۳/۲۵)

چکیده

امروزه کمبود آب در جهان یکی از اساسی‌ترین مشکلاتی است که زندگی بشر را تحت‌الشعاع قرار داده است. این مشکل بیشتر از همه مناطق خشک و نیمه خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ایران با قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی بیش از بسیاری از کشورها با مسئله بحران آب رو برو است. تعیین اجزای بیلان آبی در حوزه‌های خشک یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کمبود آب است. لذا در تحقیق حاضر به برآورد بیلان آبی در حوزه خشک و کوهستانی منشاد واقع در استان یزد در سال آبی ۸۶-۸۵ پرداخته شد. به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق در سطح حوزه منشاد که یکی از مهم‌ترین اجزای بیلان آبی است، از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و از روش الگوریتم سبال استفاده شد و در نتیجه تبخیر و تعرق واقعی حوزه نیز به‌صورت روزانه و پیکسل به پیکسل در سال آبی ۸۶-۸۵ برآورد گردید. برای برآورد میزان بارش و رواناب حوزه با توجه به مجهز بودن منطقه به ایستگاههای هواشناسی و هیدرومتری از داده‌های ثبت شده در این ایستگاهها استفاده شد. در نهایت جزء مربوط به تغییرات ذخیره حوزه نیز به‌کمک اندازه‌گیری نفوذ سطحی با استفاده از استوانه‌های نفوذ برآورد شد. با برآورد اجزای بیلان آبی (به استثنای تبخیر و تعرق) و قرار دادن آنها در معادله، میزان تبخیر و تعرق واقعی حوزه محاسبه و با مقدار برآورد شده با الگوریتم سبال مقایسه گردید که نشان داد که بیشتر هدر رفت آب در این حوزه توسط تبخیر و تعرق صورت می‌گیرد (۵۴۰ میلی‌متر در سال). هدر رفت به‌وسیله رواناب و نفوذ، نزدیک به هم و به‌ترتیب ۱۱۷ و ۱۲۵ میلی‌متر در سال آبی ۸۶-۸۵ بود.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، حوزه کوهستانی و خشک، سبال، مودیس، منشاد

Evaluation and Estimation of Water Balance Components in Arid Zone Catchments Using RS and GIS Case Study: Manshad Catchment, Yazd Province

Samaneh Poormohammadi¹ Mohammad Taghi Dastorani² Seyyed Ali Mohammad Cheraghi³
Mohammad Hossein Mokhtari⁴ Mohammad Hassan Rahimian⁵

(Received Oct. 7, 2010 Accepted June. 15, 2011)

Abstract

Today, water scarcity is one of the main problems around the world, especially in arid and semi arid regions. Iran is a country that is now faced with water scarcity. One of the effective solutions for water management in arid catchments is determination and analysis of water balance components. So this study has focused on determination of water balance components in arid-mountainous catchment of Manshad in Yazd province, during 2006-2007 cropping season. To estimate actual daily evapotranspiration (ETa) of the region, time series of MODIS images were acquired and used via the surface energy balance algorithm for land (SEBAL)

1. Former Grad. Student of Desert Management, Dept. of Natural Resources, Yazd University, Yazd (Corresponding Author) (+98 351) 8335664 s.poormohammadi@yahoo.com
 2. Assoc. Prof., Dept. of Natural Resources, Yazd University, Yazd
 3. Assist Prof., National Salinity Research Center, Yazd
 4. M.Sc., Center of Dry and Arid Zones, Yazd University, Yazd
 5. Expert of Irrigation and Drainage, National Salinity Research Center, Yazd
- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد (نویسنده مسئول) ۸۳۳۵۶۶۴ (۰۳۵۱) s.poormohammadi@yahoo.com
- ۲- دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد
- ۳- استادیار پژوهشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، یزد
- ۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه یزد
- ۵- کارشناس آبیاری و زهکشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، یزد

methodology. Annual ETa then was calculated in the form of a pixel by pixel basis map. Also annual precipitation (P) and runoff (R) were calculated using rain gauge and hydrometric station records, respectively. In addition soil water storage of the catchment was estimated using double ring installation and infiltration rate measures. After determination of annual P and R, the ET component was calculated as the residual of water balance equation. Then the calculated ET was compared with the estimated ET of SEBAL methodology. Comparisons show the adequacy of SEBAL in estimation of actual ET at the studied condition. Finally, the results of the study show that a large portion of catchment available water wastes through evapotranspiration, nearly 540 mm. The runoff and soil storage amounts of the studied year are about 117 and 125 mm, respectively.

Keywords: Water Balance, Arid-mountainous Catchments, SEBAL, MODIS, Manshad.

حوزه است [۳]. در تحقیق دیگری که به طور همزمان بر روی دو حوزه رودخانه سنول و سانتناکاترینا انجام شد از مدل هایسی^۳ برای برآورد بیلان آبی و از چهار مدل پنمن^۴ اصلاح شده، تورنت-وایت^۵، بلانی کریدل^۶ و هامون^۷ برای محاسبه تبخیر و تعرق طی سالهای ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۴ میلادی استفاده گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل بیلان آبی نشان داد که ۵۶ درصد آب این مناطق به صورت رواناب و ۴۴ درصد بارش سالانه به صورت تبخیر و تعرق از حوزه های مذکور خارج می شود. همچنین نتایج حاصله نشان داد که در حوزه های مطالعاتی، هدر رفت آب از طریق رواناب همیشه بیش از مقدار تبخیر و تعرق است [۴]. در تحقیق دیگری که در حوزه رودخانه هاوول^۸ در آلمان انجام شد، بیلان آبی در مناطق مرطوبی که دارای دشت های سیلگیر هستند، مطالعه گردید. این تحقیق برای تعیین اجزای بیلان آبی از الگوریتم ایوان^۹ استفاده نموده و آن را مدلی بسیار مؤثر و کارا توصیف کرده است. در تحقیق دیگری که در حوزه ریبریو^{۱۰} در کلمبیا انجام شده از مدل ساده بیلان آب استفاده گردیده است. در این تحقیق مقدار تبخیر و تعرق واقعی به صورت جزء باقیمانده در معادله بیلان محاسبه و سپس با تبخیر و تعرق محاسباتی توسط فرمول پنمن مقایسه گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داد که به علت کارستی بودن منطقه و ورود سالانه ۵۵۴ میلی متر آب از حوزه های مجاور به صورت زیرزمینی، معادله بیلان آبی به صورت سالانه کارایی لازم را نداشته و برای مطالعه دقیق تر این موضوع در حوزه مذکور نیاز به مطالعه بیلان آبی در یک دوره طولانی تر و حداقل ده ساله است [۵].

در زمینه استفاده از تکنیک های جدید نظیر سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در تعیین اجزای مختلف بیلان آب و

۱- مقدمه

بیلان آبی^۱ یکی از مباحث اساسی در هیدرولوژی است که امکان برآورد کمی منابع آب و تغییرات آن تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله تغذیه توسط سدها، استحصال آب از طریق پمپاژ توسط چاهها، کاهش نزولات جوی و یا افزایش تبخیر از سطح حوزه آبخیز ناشی از تغییرات اقلیمی را فراهم می آورد [۱]. شکل عمومی و ساده شده معادله بیلان آب به صورت زیر است

$$\Delta S = P - ET - G - R \quad (1)$$

که در آن

ΔS میزان تغییرات ذخیره سطحی، G میزان جریان های زیرسطحی و عمقی (پیوستن به جریان های زیرزمینی)، R میزان روانابی که به صورت جریان سطحی از محدوده مورد نظر خارج می شود و P میزان بارندگی است که در یک بازه زمانی یکساله و یا بیشتر مورد بررسی قرار می گیرد. موضوع مطالعه بیلان آبی از جمله موضوعات پرتکرار تحقیقاتی در مناطق مختلف دنیا است که به منظور تعیین یک یا تمامی اجزای معادله بیلان آب در یک حوزه آبخیز یا محدوده وسیع تر صورت می گیرد. به عنوان مثال در تحقیقی که بر روی بیلان آبی حوزه مرطوب و ساحلی پارامو^۲ انجام شد، دو بخش مجزا شامل چمنزارهای طبیعی و زمین های کشاورزی شناسایی و مورد مطالعه قرار گرفت. برای محاسبه تبخیر و تعرق به عنوان یکی از اجزای بیلان آبی حوزه از تبخیر و تعرق مرجع و ضریب گیاهی (K_c) استفاده شد که این ضریب برای چمنزارهای طبیعی ۰/۴۲ و برای زمین های زراعی ۰/۹۵ منظور گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات سالانه ذخیره آب در بخش طبیعی ۲۵ میلی متر و در بخش زراعی ۱۵ میلی متر است [۲].

در تحقیق دیگری که در حوزه رودخانه می سی سی پی طی یک دوره ده ساله انجام شد، برای تعیین میزان آب ذخیره شده در حوزه از معادله بیلان آبی با سه مؤلفه بخار آب، بارندگی و رواناب خروجی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که هدررفت آب به صورت نفوذ و تبخیر از عوامل اصلی کاهش آب سطحی در این

³ HYCI

⁴ Penman

⁵ Thounthe-waite

⁶ Belancy Cridle

⁷ Haman

⁸ Howell

⁹ IWAN

¹⁰ Riberio

¹ Water Balance

² Paramo

خصوصاً تبخیر و تعرق، مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا صورت پذیرفته است. به عنوان مثال در کشور کامبریا با استفاده داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست^۱ و همچنین سنجنده مودیس^۲ و با محاسبه شاخصهای پوشش گیاهی^۳ و گرمای سطحی زمین، توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی منطقه مطالعاتی بررسی و تحلیل شده است [۶]. در منطقه‌ای در کشور اسلونی نیز مطالعه روی موضوع بیلان آبی به کمک تصاویر ماهواره‌ای و داده‌برداری‌های زمینی برای دو دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ و ۲۰۰۰-۱۹۷۱ انجام شده است که نتایج به دست آمده از روشهای زمینی و ماهواره‌ای، انطباق این دو روش بر یکدیگر را نشان می‌دهد. هر دو روش مذکور، بیلان آبی منطقه مطالعاتی را مثبت برآورد نموده‌اند [۷].

در تحقیق دیگری که در حوزه بیابانی و نیمه‌بیابانی روکسو^۴ در جنوب پرتغال انجام گرفته، اقدام به برآورد رواناب به عنوان یکی از اجزای بیلان آبی طی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ شده است. در این تحقیق دو روش شامل روش بیلان آبی "مخزن" و روش بیلان آبی "حوزه آبخیز" برای محاسبه رواناب استفاده گردیده است. در روش اول، میزان رواناب سالانه حوزه ۳۱/۷۲ میلیون متر مکعب برآورد شد. تبخیر نیز شامل حدود ۳۷ درصد از کل جریان ورودی به مخزن (از طریق بارندگی و رواناب) بود. اما در روش بیلان آبی حوزه، تبخیر و تعرق واقعی به عنوان مهم‌ترین و حساس‌ترین جزء بیلان آب معرفی شد و این جزء توسط الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (سبال^۵) و با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده‌های TM⁺ و ETM⁺) و تراس^۶ (سنجنده مودیس) برآورد گردید. روش اخیر میزان رواناب سالانه حوزه را ۳۰/۰۲ میلیون متر مکعب برآورد نمود که تقریباً معادل رواناب تخمینی به روش اول بود [۸]. در کشور ما نیز مطالعاتی چند در زمینه به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای در برآورد اجزای معادله بیلان آب صورت گرفته است. هر چند پتانسیلها و قابلیت‌های زیادی در مورد کاربرد تکنیک‌های سنجنش از دور در ابعاد مختلف تحقیقاتی و اجرایی منابع آب کشور وجود دارد، اما محدودیتها و چالش‌هایی نظیر عدم دسترسی به منابع گوناگون داده‌های سنجنش از دور، عدم دسترسی به داده‌های زمینی کافی و دقیق برای کالیبراسیون مدل‌ها و نیز کمبود دانش تخصصی در زمینه روشهای نوین سنجنش از دور باعث شده تا مطالعات مربوطه در کشور از تنوع و تعدد کافی برخوردار نباشند [۹]. از معدود تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقی که در

دشت‌های سلماس و تسوج واقع در شمال و شمال غرب دریچه ارومیه در استان‌های آذربایجان غربی و شرقی انجام شده اشاره نمود. در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سنجنش از دور، یک مدل بیلان آبی برای این مناطق ارائه و بر اساس آن اجزای مختلف معادله بیلان برآورد گردیده است [۱۰]. در تحقیق دیگری که در منطقه برخوار اصفهان انجام پذیرفته، از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سوآپ^۷ برای محاسبه تبخیر و تعرق به عنوان یکی از اجزای معادله بیلان آبی استفاده شده است. نتایج این تحقیق در زمینه محاسبه تبخیر و تعرق توسط تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با تبخیر تعرق محاسباتی توسط داده‌های هواشناسی منطقه رضایت‌بخش عنوان شده است [۱۱].

در تحقیق حاضر نیز که در حوزه خشک و کوهستانی منشاد واقع در استان یزد انجام شد، اجزای معادله بیلان آب شامل تبخیر و تعرق واقعی، بارش، نفوذ و رواناب محاسبه شد و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نکته قابل توجه در این تحقیق این است که مؤلفه تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای بیلان آب، به کمک یکی از معتبرترین و جدیدترین روشهای موجود در این زمینه برآورد گردید. این روش که الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (سبال) نام دارد، امروز در سطح دنیا مقبولیت فراوانی یافته و در اکثر مطالعات نوین در زمینه برآورد تبخیر و تعرق در سطوح وسیع و حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود. این در حالی است که در بسیاری از مطالعات مربوط به بیلان آب حوزه‌های آبخیز کشور، مؤلفه تبخیر و تعرق واقعی یا عملاً اندازه‌گیری نمی‌شود، یعنی از تبخیر و تعرق مرجع ایستگاههای هواشناسی به جای تبخیر و تعرق واقعی حوزه استفاده می‌شود، و یا به عنوان مجهول (جزء باقیمانده معادله بیلان) در محاسبات مربوطه در نظر گرفته می‌شود. لذا برآورد تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم بیلان آبی توسط تکنیک سنجنش از دور از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر به‌ویژه در ایران بود.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در تحقیق حاضر حوزه آبخیز منشاد یزد بود. این حوزه در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۹ دقیقه و ۵۶ ثانیه تا ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه و ۳۷ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۹ دقیقه و ۸ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه و ۲۴ ثانیه شمالی واقع شده است. این حوزه از نظر تقسیمات استانی جزو استان یزد و از حوزه‌های آبخیز میان‌کوه در منطقه شیرکوه است. مساحت این حوزه

⁷ SWAP

¹ Landsat

² MODIS

³ Vegetation Indices

⁴ Roxo

⁵ Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

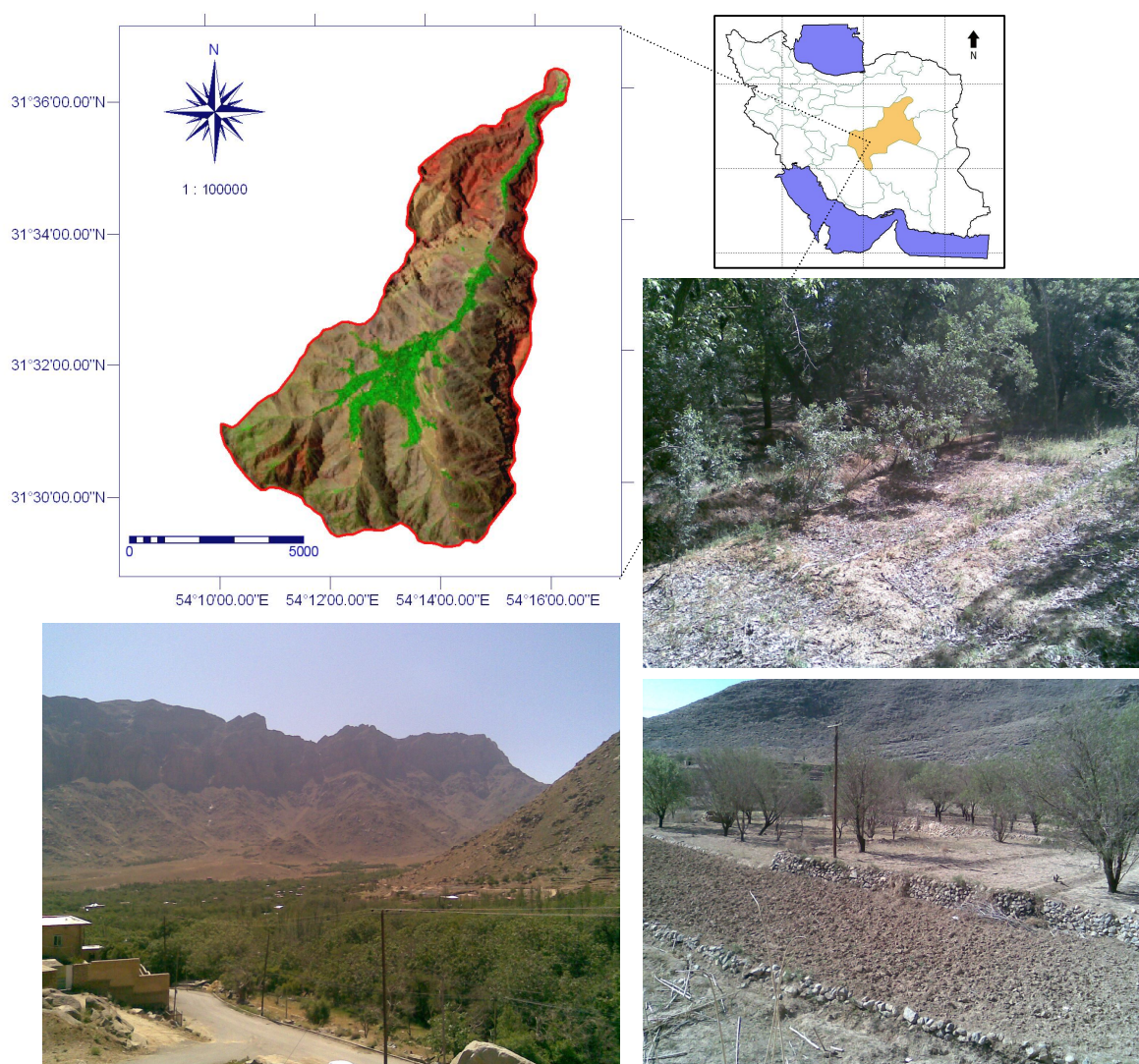
⁶ TERRA

۲-۲- روش تحقیق

در شکل ۲ مراحل مختلف انجام این تحقیق نشان داده شده است. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق مربوط به سنجنده مودیس است که به علت در دسترس بودن، ارزان بودن و از همه مهم تر قدرت تفکیک زمانی^۱ مناسب (با تواتر روزانه)، انتخاب گردید. نقشه‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز شامل نقشه خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بودند که همگی رقومی شدند. ابزارها و وسایلی که برای اندازه‌گیری‌های صحرایی و مشاهدات زمینی مورد استفاده قرار گرفتند شامل

۶۱۳۷ هکتار، حداقل ارتفاع آن ۱۷۸۸ و حداکثر ارتفاع آن ۳۵۱۸ متر از سطح دریا است. دمای متوسط سالانه در حوزه منشاد، ۱۱ درجه سلسیوس و بارش متوسط آن ۳۶۸/۳۵ میلی‌متر در سال است. گرم‌ترین ماه سال در این حوزه شهریورماه با میانگین دمای ۲۴/۵ درجه سلسیوس و سردترین آن بهمن ماه با میانگین دمای ۰/۵ درجه سلسیوس تعیین شده است. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی دوما رتن اصلاح شده، حوزه آبخیز منشاد جزو مناطق سرد و نیمه خشک محسوب می‌شود. در شکل ۱ نمایی کلی از منطقه مطالعاتی به همراه تصاویری از نقاط مختلف آن مشاهده می‌شود.

^۱ Temporal Resolution



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی به همراه نقشه ماهواره لندست و نیز تصاویری از نقاط مختلف این حوزه

مساحت حوزه، ارتفاع رواناب بر حسب میلی‌متر در این سال محاسبه گردید.

۲-۴- تعیین تبخیر و تعرق مرجع و واقعی

در تحقیق حاضر پس از تهیه اطلاعات روزانه از منطقه مطالعاتی، اقدام به تعیین تبخیر و تعرق مرجع در هر روز از سال آبی ۸۶-۸۵ شد. این کار به کمک معادله فائو-پنمن-مانیتث صورت پذیرفت و سپس با استفاده از ضرایب پیشنهادی فائو در هر ماه اصلاح گردید تا به شرایط طبیعی و کشاورزی منطقه نزدیک تر شود.

به منظور تعیین تبخیر و تعرق واقعی حوزه منشاد از الگوریتم سبال استفاده شد. برای اجرای این الگوریتم نیاز به تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات صحرایی و داده‌های اقلیمی بود. به این منظور، یک سری زمانی مشتمل بر پانزده تصویر ماهواره‌ای مودیس مربوط به سال آبی ۸۶-۸۵ حوزه منشاد تهیه شد و توسط سبال مورد استفاده قرار گرفت.

سبال مدلی مبتنی بر پردازش تصویر بوده که مشتمل بر بیست و پنج زیر مدل برای محاسبه تبخیر و تعرق (ET) به عنوان باقیمانده بیلان انرژی سطحی زمین است. این مدل توسط باستیانسسن^۶ در کشور هلند معرفی شده و برای منطقه کوهستانی آیداهو^۷ نیز با تکیه

استوانه‌های نفوذ مضاعف^۱، اگر نمونه برداری و سامانه موقعیت یاب جهانی^۲ بود. بخش عمده‌ای از عملیات تلفیق و پردازش اطلاعات در سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳ صورت گرفت و به همین منظور از دو نرم افزار ArcGIS و الویس^۴ استفاده بیشتری گردید. نرم افزار الویس از آن جهت حائز اهمیت است که به دلیل رستری^۵ بودن، امکان پردازش تصاویر ماهواره‌ای را به بهترین شکل فراهم می‌آورد. نرم افزارهای آماری و ریاضی، Excel، Erdas imagine (برای استخراج باندهای مناسب از مجموعه ۳۶ باندهای تصویر ماهواره‌ای مودیس)، HDF explorer برای تعیین ضرایب بازتابش باندهای انعکاسی تصاویر و تصحیح طیفی آنها و MRT swath برای زمین مرجع نمودن تصاویر نیز در مقطعی از تحقیق استفاده شدند. این ابزارها همگی با هدف برآورد اجزای مختلف معادله بیلان آبی در حوزه خشک و کوهستانی منشاد واقع در استان یزد فراهم و در مراحل مختلف تحقیق استفاده شدند.

۲-۳- تعیین میزان بارش و رواناب

با استفاده از آمار بارش سال آبی ۸۶-۸۵ از حوزه منشاد و سه ایستگاه مجاور با استفاده از گرادیان ارتفاع- بارش نقشه بارندگی حوزه تهیه گردید. برای تعیین ارتفاع رواناب سال آبی ۸۶-۸۵ از آمار دبی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری مستقر در حوزه منشاد استفاده شد. با استفاده از آمار دبی روزانه در این سال، ابتدا دبی در کل سال بر حسب متر مکعب به دست آمد، سپس با در نظر گرفتن

⁶ Bastiaanssen

⁷ Idaho

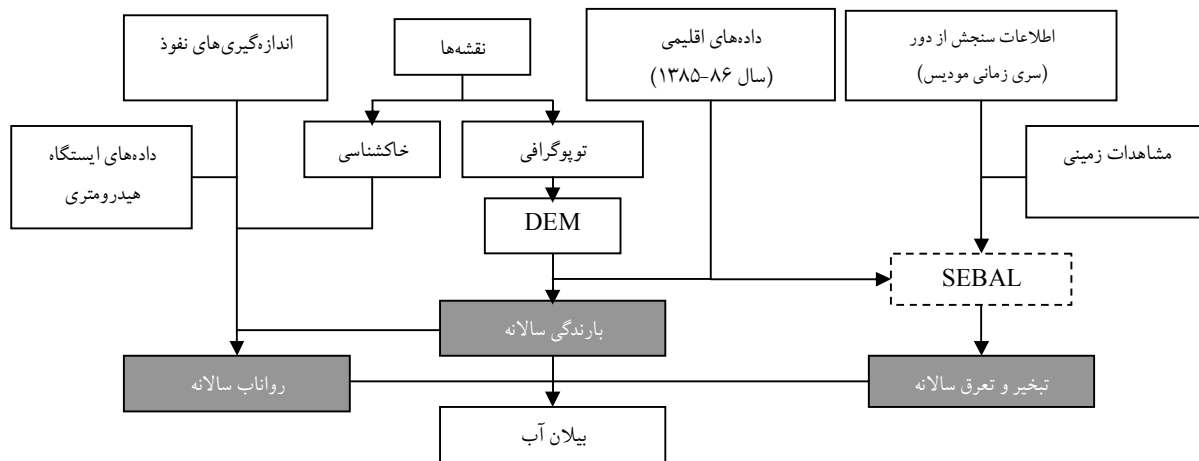
¹ Double Ring

² GPS

³ Geographic Information System (GIS)

⁴ The Integrated Land and Water Information System (ILWIS)

⁵ Raster Base



شکل ۲- نمودار مربوط به مراحل مختلف انجام تحقیق

بر مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در سطح زمین بسط و توسعه یافته است. معادله کلی مورد استفاده در روش توازن انرژی به صورت زیر است

$$LE = R_n - H - G \quad (2)$$

که در این رابطه

LE شار گرمای نهان بر حسب Wm^{-2} که به راحتی قابل تبدیل به ET است، R_n تابش خالص خورشیدی بر حسب Wm^{-2} ، H شار گرمای محسوس بر حسب Wm^{-2} و G شار گرمای زمین یا خاک بر حسب Wm^{-2} است. در واقع هدف نهایی سبیل، محاسبه شار گرمای نهان (LE) است که همان ET واقعی محسوب می‌گردد [۱۲ و ۱۳].

با استفاده از الگوریتم سبیل، تبخیر و تعرق واقعی روزانه تنها در روزهایی از سال که تصاویر ماهواره‌ای آنها موجود بود (۱۵ روز از سال) به دست آمد. هر یک از این تصاویر را باید متعلق به یک بازه زمانی حدوداً ۲۴ روزه دانست که برای ۱۲ روز قبل و ۱۲ روز بعد از زمان اخذ آن قابل استفاده است. به منظور تعمیم نتایج حاصل از مدل سبیل در هر یک از روزهای دارای تصویر (ET_{a-24h}) به بازه زمانی تحت پوشش هر تصویر $(ET_{a-period})$ و سپس تعیین تبخیر و تعرق واقعی تمامی روزهای سال آبی ۸۶-۸۵ $(ET_{a-season})$ ، از روابط زیر استفاده شد

$$(ET_{a-period})_i = \frac{(ET_{a-24h})_i}{(ET_r)_i} \sum_j^k (ET_r)_j \quad (3)$$

$$ET_{a-season} = \sum_{i=1}^{19} (ET_{a-period})_i \quad (4)$$

که در این روابط

ET_r تبخیر و تعرق مرجع روزانه مربوط به روزهای مختلف بازه زمانی (از j تا k) و ET_{a-24h} تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده برای روز وسط آن بازه زمانی (روز i ام) است. به این ترتیب نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی برای بازه‌های زمانی مختلف $(ET_{a-period})$ به دست آمد که جمع عددی این نقشه‌ها $(ET_{a-season})$ معرف تبخیر و تعرق واقعی حوزه در طول سال آبی ۸۶-۸۵ بود.

با توجه به اینکه مدل سبیل ابتدا برای مناطق مسطح پیشنهاد شده است، برای استفاده در مناطق مرتفع و کوهستانی نظیر حوزه مطالعاتی منشاء، نیاز به برخی تصحیحات دارد. برای این کار با توجه به نقشه جهت شیب حوزه، اقدام به جداسازی مناطق سایه‌انداز از سایر مناطق شد و سپس مقدار تبخیر و تعرق در این مناطق معادل با متوسط تبخیر و تعرق مناطق صخره‌ای مشابه در شیب‌های جنوبی حوزه (که عاری از خطای مشابه بودند) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقدار تبخیر و تعرق تخمینی این بخشها نیز در واقع متعلق به روزهای بارانی و چند روز بعد از آن است که آب در این مناطق موجود است. این مقدار در سایر روزهای سال در حد بسیار ناچیز می‌باشد.

۲-۵- ارزیابی و کنترل نتایج تبخیر و تعرق واقعی

کارایی مدل سبیل در تعیین تبخیر و تعرق واقعی در نقاط مختلف دنیا از جمله هلند، مصر، اسپانیا، کنیا، آمریکا، فرانسه، چین، نیجریه، ترکیه، زلاندنو، سریلانکا و مراکش به اثبات رسیده و نتایج آن از طریق ابزارها و تکنیک‌های تحقیقاتی و اندازه‌گیری دقیق از قبیل سنتیلومتر^۱، لایسیمترهای وزنی و زهکش‌دار، نسبت بوون^۲ و همبستگی ادی^۳ بارها مورد ارزیابی و کنترل قرار گرفته است. این ارزیابی‌ها خطای روش مذکور را به طور متوسط ۱۵ درصد و حداکثر تا ۳۰ درصد گزارش نموده‌اند [۱۴]. در این تحقیق نیز اقدام به ارزیابی نتایج شد. به دلیل در دسترس نبودن ابزارهای مذکور در منطقه مطالعاتی، برای ارزیابی نتایج حاصل از محاسبات تبخیر و تعرق واقعی سالانه، از یک روش مبتنی بر تعیین حد نهایی تبخیر و تعرق واقعی در سطح حوزه استفاده گردید. حدود نهایی تبخیر و تعرق سالانه با استفاده از باقیمانده بیلان حجمی آب در حوزه به دست می‌آیند و می‌تواند عدم پرت بودن نتایج را به خوبی نشان دهند. به این صورت که بالاترین مقدار تبخیر و تعرق مربوط به حالتی است که تمامی آب ورودی (بارندگی) یا از حوزه خارج شده (رواناب) و یا به مصرف تبخیر و تعرق برسند. یعنی جزء نگهداشت و نفوذ، ناچیز فرض شود. در چنین شرایطی مقدار تبخیر و تعرق حداکثر (ET_{max}) برابر خواهد شد با

$$ET_{max} = P - R \quad (5)$$

که در این رابطه

P مقدار بارندگی و R رواناب سالانه حوزه است. ET_{max} بالاترین حد تبخیر و تعرق واقعی سالانه است که در شرایط استثنایی می‌تواند اتفاق بیفتد. همچنین حد پایین تبخیر و تعرق مربوط به وقتی است که مقدار حداکثر ممکن از آب ورودی حوزه به صورت نفوذ عمقی (ΔS) در حوزه باقی بمانند. بنابراین مقدار حداقل تبخیر و تعرق (ET_{min}) برابر است با

$$ET_{min} = P - R - \Delta S \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در این حالت فرض بر این است که تمامی آبی که در اثر نفوذ سطحی وارد خاک می‌شود، در حوزه باقی مانده و از دسترس تبخیر و تعرق در امان می‌ماند که این حالت نیز می‌تواند در یک شرایط استثنایی به وقوع بپیوندد. برای تعیین سهم نفوذ در حوزه، ابتدا سرعت نفوذ در هر یک از گروه‌های مختلف هیدرولوژیکی در حوزه مطالعاتی تعیین گردید. این کار به کمک استوانه‌های مضاعف انجام شد. سپس از آمار لحظه‌ای تمامی

¹ Scintillometer

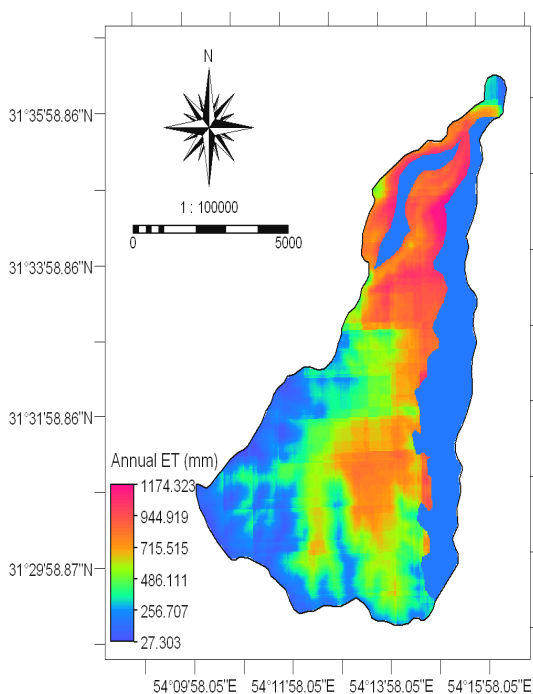
² Bowen Ratio

³ Eddy Correlation

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مراحل اولیه بارش، میزان نفوذ از بارش رگبار ۱ بیشتر است، اما با گذشت حدود ۲۲۰ دقیقه از شروع بارش، میزان بارش بیش از مقدار نفوذ شده و بنابراین از این زمان بعد انتظار می‌رود که این بارندگی بر روی خاک گروه هیدرولوژیک D حوزه ایجاد رواناب نماید. با انجام تحلیل‌های فوق بر روی سایر رگبارهای سال آبی ۸۶-۸۵، میزان نفوذ کل حوزه در سال مذکور محاسبه شد. با توجه به این محاسبات، میزان نفوذ کل حوزه در سال آبی ۸۶-۸۵ حدود ۱۲۵ میلی‌متر بوده است.

۳-۳- میزان تبخیر و تعرق در سال آبی ۸۶-۱۳۸۵

با اجرای الگوریتم سبال و انجام تصحیحات مربوط به خطای ناشی از کوهستانی بودن حوزه در برخی تصاویر، تبخیر و تعرق واقعی حوزه منشاد در پانزده روز از سال که دارای تصویر بود، به دست آمد. در ادامه پانزده نقشه مربوط به تبخیر و تعرق دوره‌های مختلف زمانی تهیه شد و با جمع‌همه آنها، نقشه تبخیر و تعرق سالانه حوزه به دست آمد. شکل ۴ میزان تبخیر و تعرق سالانه حوزه منشاد در سال آبی ۸۶-۸۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نقشه تبخیر و تعرق سالانه حوزه منشاد در سال آبی ۸۶-۸۵

همان‌طور که در نقشه تبخیر و تعرق سالانه مشاهده می‌شود، تبخیر و تعرق در قسمت‌هایی که پوشش گیاهی وجود دارد از

رگبارهای ثبت شده در سال آبی ۸۶-۸۵ استفاده و با توجه به سرعت نفوذ، مقدار نفوذی که در هر رگبار صورت می‌گیرد، محاسبه گردید. به این ترتیب کل نفوذ صورت گرفته در طول سال آبی مذکور (ΔS) تعیین شد. با به‌کار بردن روابط ۵ و ۶، مقادیر حداکثر و حداقل ممکن برای تبخیر و تعرق واقعی مشخص گردید و مابین این دو مقدار که می‌تواند دامنه تبخیر و تعرق واقعی بسته به شرایط حوزه باشد، تعیین گردید. بدیهی است مقدار تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از روش سبال باید یک مقدار مناسب و مابین این دو مقدار حداکثر و حداقل باشد.

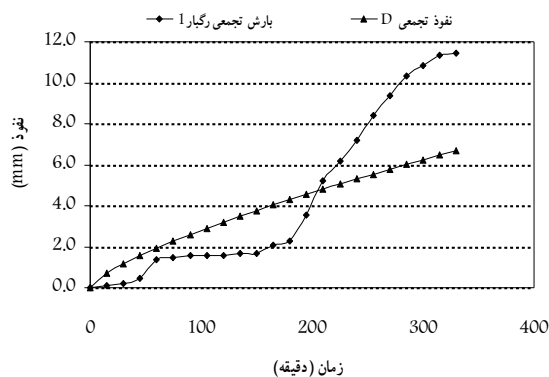
۳- نتایج و بحث

۳-۱- میزان بارش و رواناب در سال آبی ۸۶-۸۵

با توجه به هیستوگرام نقشه تهیه شده برای بارش منطقه، بارش میانگین حوزه مطالعاتی در سال مورد مطالعه بین ۲۳۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و میانگین وزنی بارش حوزه ۵۶۰ میلی‌متر برآورد شده است. همچنین ارتفاع رواناب بر اساس اندازه‌گیری حجم رواناب در محل خروجی حوزه (ایستگاه هیدرومتری) و تقسیم آن بر مساحت حوزه محاسبه شده است که معادل ۱۰۹ میلی‌متر است.

۳-۲- نفوذ

پس از تعیین سرعت نفوذ هر یک از محدوده‌های مربوط به گروه‌های هیدرولوژیک مختلف حوزه، اقدام به محاسبه نفوذ و سپس ارتفاع رواناب ایجاد شده توسط هر یک از بارندگی‌های سال آبی ۸۶-۸۵ شد. به‌عنوان نمونه در شکل ۳ نمودار نفوذ تجمعی ناشی از وقوع یک رگبار بر روی خاکهای گروه هیدرولوژیک D حوزه منشاد نمایش داده شده است.

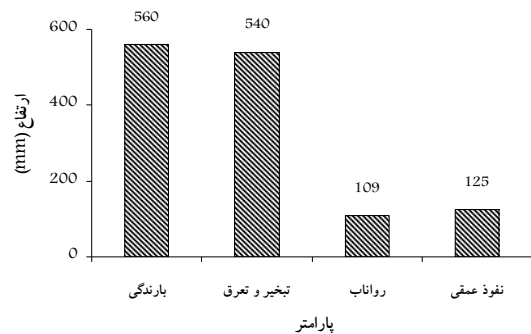


شکل ۳- نفوذ تجمعی ناشی از وقوع رگبار ۱ در خاکهای گروه هیدرولوژیک D حوزه منشاد

قسمت‌های صخره‌ای بیشتر است. در قسمت خروجی حوزه نیز تقریباً بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق مشاهده می‌شود که علت آن نه تنها دارا بودن پوشش گیاهی در این بخشها است (باغات و اراضی زراعی که به صورت مرتب آبیاری نیز می‌شود) بلکه به دلیل به هم پیوستن آب سایر بخشهای حوزه در این منطقه و قرارگیری شاخه اصلی رودخانه فصلی منشا که بخشی از سال، آب در آن جاری است نیز هست. این دو نکته باعث شده تا فراهمی آب در پایین دست بیشتر بوده و در نتیجه تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به سایر نقاط حوزه صورت پذیرد. با توجه به هیستوگرام نقشه تبخیر و تعرق واقعی سالانه منشا حد اکثر و حداقل تبخیر و تعرق سالانه حوزه منشا به ترتیب ۱۱۷۴ و ۲۷ میلی‌متر و میانگین تبخیر و تعرق حوزه مطالعاتی ۵۴۰ میلی‌متر در طول سال مذکور بود (شکل ۴).

در ادامه به کمک روابط بیان شده حدهای نهایی تبخیر و تعرق در حوزه مطالعاتی محاسبه گردیدند. بر این اساس پیش‌بینی شد که مقدار متوسط تبخیر و تعرق واقعی در حوزه عددی بین ۳۲۶ تا ۴۵۱ میلی‌متر باشد. به عبارتی دیگر بین ۵۸ تا ۸۰ درصد از بارش سالانه حوزه، صرف تبخیر و تعرق می‌گردد. این در حالی است که تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از الگوریتم سبال در حوزه منشا، ۵۴۰ میلی‌متر بوده است که حدود ۱۷ درصد از تبخیر و تعرق حد اکثر پیش‌بینی شده حوزه (ETa_{max}) بیشتر می‌باشد.

اگر چه الگوریتم سبال در مناطق کوهستانی با محدودیتهایی نیز همراه است، اما خطای ذکر شده در اینجا ناشی از خطا در پیش‌بینی حدهای نهایی تبخیر و تعرق نیز هست. بنابراین با کمی دید واقع بینانه می‌توان به نتایج حاصل از الگوریتم سبال برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در حوزه کوهستانی منشا نیز اعتماد نمود. با توجه به این تفاسیر سهم هر یک از اجزای معادله بیلان در حوزه مطالعاتی به شرح نمودار نشان داده شده در شکل ۵ خواهد بود.



شکل ۵- اجزای معادله بیلان آبی برآورد شده در حوزه منشا در سال آبی ۸۵-۸۶

با توجه به اینکه منطقه مطالعاتی در کویر مرکزی ایران واقع شده است، لذا دستیابی به بیلان منفی آب در برخی از سالها در سطح این حوزه آبخیز دور از انتظار نخواهد بود. همانطوری که مشاهده می‌شود، سهم تلفات حوزه (تبخیر و تعرق و رواناب) بیش از مقدار آب ورودی به آن از طریق بارندگی سالانه است که نشان‌دهنده هدر رفت ذخایر آب موجود در خاک و منابع زیرزمینی حوزه از طریق پدیده تبخیر و تعرق است. لازم به ذکر است که این آب تلف شده (مازاد بر بارندگی) از ذخایر سالهای قبل است که در قالب رطوبت خاک و آبهای زیر قشری برای سال مورد مطالعه باقی مانده است.

در زمینه تعیین بیلان آبی، اقدامات کثیری در سطح دنیا و نیز کشورمان انجام شده است که در بخش مرور منابع به بعضی از آنها اشاره شد. به طور کلی برآورد دقیق بیلان آبی در سطح حوزه به صورت مکانی کار مشکلی بوده و معمولاً با خطاهایی همراه است. همچنین در بسیاری از موارد، برآورد تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از ارکان اصلی بیلان آب در حوزه آبخیز بنا به دلایل مختلف مثل داشتن پوشش‌های مختلف کشاورزی، جنگلی و مرتعی و گاهاً پوشش‌های مخلوط و حاکم بودن انواع تنش‌های محیطی در نقاط مختلف حوزه‌های وسیع، کار غیرممکنی می‌نماید. در این شرایط برخی از محققان، جزء دیگر بیلان آبی یعنی تغییرات ذخیره رطوبت را اندازه‌گیری نموده و سپس تبخیر و تعرق واقعی را از طریق محاسبه با قرار دادن مقادیر اجزای دیگر در معادله بیلان آبی به دست می‌آورند. البته این امر نیز کار پیچیده و سختی است زیرا برای اندازه‌گیری جزء ذخیره رطوبتی در حوزه، نیاز به نمونه برداری‌های مستمر است و البته آنچه که در نهایت برای سطح یک حوزه به دست خواهد آمد، تخمینی بیش نخواهد بود. لذا به نظر می‌رسد که برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، کمک شایانی در رفع برخی از نگرانی‌ها در برآورد یکی از اجزای مهم معادله بیلان آبی در سطح حوزه آبخیز سیال به عنوان یکی از راههای برآورد تبخیر و تعرق واقعی با کمک فناوری سنجش از دور استفاده شد.

منشا حوزه‌ای کوهستانی همراه با شرایط توپوگرافی شدید است، در حالی که الگوریتم سبال ابتدا برای مناطقی با پستی و بلندی‌های کم^۱ و توپوگرافی ناچیز (مزارع) پیشنهاد شده است. استفاده از سبال در مناطق کوهستانی و مرتفع با خطاهایی همراه است که رفع آنها نیازمند تمهیدات خاصی است که قبلاً اشاره شده است. اما در هر صورت تمامی این خطاها به صورت صددرصد قابل

¹ Flat

رفع نخواهد بود. به منظور اجرای موفق سبال در یک منطقه، علاوه بر داشتن سری زمانی مناسب از تصاویر ماهواره‌ای، ابزارهای دیگری از جمله ترمومتر مادون قرمز^۱، اسپکترومتر^۲ و یا پیرانومتر^۳ نیز می‌توانند در تعیین و اندازه‌گیری صحرائی برخی از پارامترهای ضروری سبال از قبیل دمای سطح پوشش گیاهی و میزان تشعشع کوتاه ورودی به منطقه مورد استفاده قرار گیرند. همچنین توصیه می‌شود که تصویر مورد استفاده با توجه به هدف و مقیاس کاری انتخاب گردد. به عنوان مثال استفاده از تصاویری با قدرت تفکیک مکانی مناسب نظیر آستر^۴ و یا لندست منجر به نتایج بهتری خواهد شد.

علی‌رغم وجود برخی مشکلات و نگرانی‌ها در استفاده از الگوریتم سبال، مزایا و کارایی‌های بسیاری نیز برای آن ذکر شده است. از جمله اینکه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال منجر به برآورد تبخیر و تعرق واقعی به صورت مکانی و زمانی^۵ در مقیاسها و سطوح مختلف (مزرعه، دشت، حوزه آبخیز) می‌شود. این کار از طریق سایر روشها نظیر نمونه‌برداری‌های مستمر برای تعیین بیلان رطوبتی خاک، نصب لایسمترهای متعدد و یا سایر تجهیزات مربوطه، پرهزینه‌تر و وقت‌گیرتر از روش الگوریتم سبال است. همچنین با این روش می‌توان نیاز آبی انواع گوناگونی از گیاهان موجود در یک عرصه را برآورد کرد. اولین گام برای محاسبه تبخیر و تعرق از طریق روابط موجود، اطلاع از مقادیر ضریب گیاهی K_c و ضریب مربوط به تنش K_s گیاه در شرایط محیطی خاص است.

¹ Infrared Thermometer
² Spectroradiometer
³ Pyranometer
⁴ ASTER
⁵ Spatial and Temporal

ضریب گیاهی برای بسیاری از گیاهان مرتعی هنوز نامشخص است و نیز تحت شرایط و تنش‌های محیطی متعدد مانند خشکی، شوری و ماندابی، ضریب تنش متفاوت خواهد شد. این در حالی است که شرایط مدیریتی حوزه و تنش‌های محیطی حاکم بر آن همگی در تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده توسط سبال لحاظ گردیده و نیاز به تعیین و اعمال ضرایب مربوطه نیست. این از مهم‌ترین مزایای الگوریتم سبال برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای معادله بیلان آب است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که تبخیر و تعرق نقش مهمی در هدررفت آب از حوزه آبخیز منشاء واقع در کویر مرکزی ایران دارد به طوری که این میزان در هر سال به ۵۴ میلی‌متر می‌رسد. در حوزه آبخیز مطالعاتی، سهم تلفات حوزه شامل تبخیر و تعرق و رواناب بیش از مقدار آب ورودی به حوزه از طریق بارندگی‌های سالانه است که نشان‌دهنده هدررفت ذخایر آبی موجود در خاک و منابع زیرزمینی حوزه از طریق پدیده تبخیر و تعرق است. اهمیت این موضوع وقتی واضح‌تر خواهد شد که اجزای معادله بیلان آب در طی چند سال متوالی مورد بررسی قرار گیرند. در صورت تداوم همین رویه در سال‌های آینده، منابع آب سطحی و زیرزمینی حوزه با کاهش قابل توجهی مواجه خواهند شد. با توجه به مشاهدات و آمارهای موجود از بارندگی‌های اخیر در این حوزه، متأسفانه این موضوع بسیار به واقعیت نزدیک است و اقدامات جدی در راستای استفاده بهینه از منابع آب و جلوگیری از هدررفت آن از طریق تبخیر و تعرق ضروری به نظر می‌رسد.

۵- مراجع

- 1- Sokolov, A.A., and Chapman, T.G. (1974). *Methods for water balance computations*, UNESCO Reports in Hydrology, Paris.
- 2- Buytaert, W., Iniguez, V., Celleri, R., De Bievre, B., Wyseure, G., and Deckers, J. (2004). "Analysis of the water balance of small paramo catchments in south Ecuador." *J. of Earth and Environmental Science*, 63, 271-281.
- 3- Seneviratne, S. I., Viterbo, P., Luthi, D., and Har, C. (2002). "Water balance computations of seasonal changes in terrestrial water storage: Case study for the mississippi river basin and methodology validation against observations from illinois." *J. of Wetlands*, 318, 483-497.
- 4- Koloskov, G., Mukhamejanove, Kh., and Tanton, T.W. (2007). "Monin obukhov length as a cornerstone of the SEBAL calculations of evapotranspiration." *J. of Hydrology*, 335, 170-179.
- 5- Ramosa, J. G., Cratchley, C.R., Kay, J. A., Casterad, M.A., Martinez, A., and Domínguez, R. (2009). Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the flumen district into the Ebro Valley of N.E. Spain." *J. of Agricultural Water Management*, 96 (4), 638-652.

- 6- Wegehenkel, M., and Zhang, Y. (2007). "The use of remote sensing data for water balance modeling." *Geophysical Research Abstracts*, 9, 27.
- 7- Frantar, P., Dolinar, M., and Kurnik, B. (2006). "GIS based water balance of Slovenia, environmental agency of the republic of Slovenia." *Geophysical Research Abstracts*, 8, 13.
- 8- Mekonnen, S. C. (2005). "Assesment of cathment water balance using GIS and remote sensing. Roxo, Portugal." M.Sc. Thesis, unpublished, ITC, Enschede, The Netherland.
- 9- Poormohammadi, S., Rahimian, M. H., and Taghvaeian, S. (2010). "Applying remotely sensed energy balance methods in Iran, potentials and limitations." *Remote Sensing and Hydrology Symposium*, Jackson hole, Wyoming, USA.
- 10- Yarahmadi, J. (2003). *The integration of satellite image, GIS and CROPWAT model to investigation of water balance in irrigated area*, Report of Science Project, Enschedeh, The Netherlands.
- 11- Vazifiedoust, M. (2006). "Development of an agricultural drought assessment system, Integration of agrohydrological modeling." Ph.D. Thesis, Wageningen University, Netherlands.
- 12- Bastiaanssen, W.G. (2000). "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz basin.Turkey." *J. of Hydrology*, 229, 87-100.
- 13- Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R., and Holtslag, A. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL):1.formulation." *J. of Hydrology*, 212, 198-212.
- 14- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. 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. of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 85-93.