

کاربرد الگوریتم بیلان انرژی (SUTSEBAL) در تخمین میزان آب مصرفی در دشت ورامین

فاطمه خاکبازان فرد* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مسعود تجریشی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران: شریف
دوری ۲-۱۴۹، شماری ۱، ص. ۸۵-۹۴

در ایران با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک، مدیریت تأمین و مصرف آب نقش اساسی در تولید بهینه به عهده دارد. تبخیر و تعرق یکی از فرایندهای اساسی چرخه هیدرولوژیکی است که معادل مجموع آب خالص مصرفی گیاهان برای رشد و تبخیر از سطح زمین‌های کشاورزی است. الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)^۱، مدلی با پایه ترمودینامیک است که با کاربرد آن در حوزه‌های بزرگ می‌توان تبخیر و تعرق واقعی را تخمین زد. در این نوشتار، ضمن توسعه و به‌کارگیری یک مدل بیلان انرژی با عنوان الگوریتم SUTSEBAL، آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین تخمین زده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این الگوریتم قادر است با دقت بسیار مناسبی میزان آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی را با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و در بازه زمانی دلخواه تخمین بزند. هم چنین از نتایج به دست آمده می‌توان برای کالیبره کردن مدل‌های شبیه ساز هیدرولوژیکی مانند MODFLOW بهره گرفت.

واژگان کلیدی: الگوریتم SUTSEBAL، روش‌های سنجش از دور، تبخیر و تعرق واقعی، دشت ورامین.

faezehkhakbazan@yahoo.com
tajrishy@sharif.edu

۱. مقدمه

ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه خشک واقع شده است. متوسط بارندگی بلندمدت آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال است که تقریباً یک سوم متوسط بارندگی جهان است و در عین حال میزان تبخیر آن سه برابر متوسط دنیاست. از کل منابع آبی که هر سال در کشور استحصال می‌شود، حدود ۹۴٪ آن در بخش کشاورزی، ۵٪ در بخش شرب و بهداشت، و ۱٪ در بخش صنعت مصرف می‌شود.^[۱] در ایران با توجه به شرایط اقلیمی، محدودیت منابع آب و اراضی دارای پتانسیل تولید کشت دیم، مدیریت تأمین، و مصرف آب نقش اساسی در تولید محصولات کشاورزی و تأمین امنیت غذایی کشور به عهده دارند. بازده آب برداشت شده در بخش کشاورزی در مقایسه با میانگین بین‌المللی ناچیز است. به عقیده بیشتر صاحب‌نظران مدیریت آب، کشورهای مواجه با بحران آب در صورتی می‌توانند نسبت به آینده خود امیدوار باشند که در جهت افزایش کارایی و بهره‌وری آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، که مصرف‌کننده عمده آب است، تلاش کنند.^[۲] اولین گام در ارزیابی کارایی مصرف آب در وضعیت موجود، تخمین میزان آب مصرفی در هر بخش است. تبخیر و تعرق یکی از فرایندهای اساسی هیدرولوژیکی از منظر کشاورزی است و میزان آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی برابر تبخیر

و تعرق واقعی از سطح زمین‌های کشاورزی است. بنابراین، توجه به این پارامتر در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و توسعه آبیاری اهمیت بسیاری دارد و این مسئله مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک مثل ایران، جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند. محاسبه آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی نیاز به داده‌های میدانی زیادی دارد، که بعضاً در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نیستند و یا اینکه با گسترش و توسعه‌های ایجاد شده در حوزه سازگاری ندارند. علاوه بر این، جمع‌آوری برخی از این داده‌ها اغلب گران است و قابل تکرار نیست. تصاویر ماهواره‌ای ابزاری مناسب برای دستیابی به این‌گونه داده‌هاست و داده‌های مورد نیاز را به صورت قابل اطمینان و سازگار با توسعه حوزه با هزینه کم در اختیار کاربر قرار می‌دهد. این تصاویر با پایش تغییرات زمانی و مکانی مصرف آب و پوشش گیاهی و مقایسه‌ی این شرایط در زمین‌های تحت کشت دیم و آبی، نتایج قابل قبولی در اتخاذ تصمیمات مناسب جهت راهبری شرایط توسعه آبیاری فراهم می‌کنند.^[۳] از جمله شیوه‌های موجود برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین است که مدلی با پایه ترمودینامیک است و با کاربرد آن در مناطق مواجه با کمبود داده، می‌توان تبخیر و تعرق واقعی (ETA)^۲ را که یکی از اجزای مهم بیلان آب است، تخمین زد. هم چنین با توجه به اینکه SEBAL قادر به محاسبه میزان ماده خشک^۳ تولید شده در سطح زمین است، لذا ابزاری کارآمد برای ارزیابی بهره‌وری و کارایی آب در اختیار پژوهشگران است. در این مطالعه ضمن به‌کارگیری مدلی شبیه به

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۰/۶/۷، پذیرش ۱۳۹۰/۶/۸.

مدل SEBAL با عنوان الگوریتم SUTSEBAL، آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین محاسبه شده است. این الگوریتم با بومی کردن روابط تعریف شده در الگوریتم SEBAL در دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف توسعه داده شده است.^[۳]

الگوریتم SEBAL تاکنون در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا به کار رفته و صحت‌سنجی شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۸ برای تخمین تبخیر و تعرق گیاهی در مقیاس حوزه‌ی در حوزه‌ی نیل توسعه داده شده است.^[۵] در مطالعه‌ی (۲۰۰۷)، از این مدل برای محاسبه‌ی توزیع مکانی کارایی آب در سیستم آبیاری گندم استفاده شده است، که در آن برای تعیین تغییرات میزان محصول به دست آمده، ET، و کارایی آب از تصاویر ماهواره‌ی استفاده شده است. ET تخمینی برای مزارع آبیاری شده در Yaqui valley در کشور مکزیک اعتبارسنجی شده است و نتایج به دست آمده دقت بالای این تخمین را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که با نگرداشتن میزان محصول تولیدشده در مقدار فعلی، امکان کاهش ۱۴ درصدی در ET وجود دارد.^[۶]

در سال ۲۰۰۶ نیز با به کارگیری الگوریتم SEBAL و استفاده از تصاویر ماهواره‌ی، مصرف آب کشاورزی را در حوزه‌ی Potshini در جنوب آفریقا بررسی کرده‌اند. هدف در این مطالعه بررسی اثر استفاده از آب بر اکولوژی و هیدرولوژی منطقه‌ی موردنظر بوده است. برای این منظور از مدل‌سازی هیدرولوژیکی، شیوه‌ی سنجش از دور، و الگوریتم SEBAL برای تخمین توزیع مکانی تبخیر کل در ناحیه‌ی تحت پوشش استفاده شده است. نتایج به دست آمده می‌تواند در انتخاب استراتژی‌های مختلف مصرف آب برای افزایش تولید محصول و توازن هیدرولوژیکی - اکولوژیکی در ناحیه‌ی نیمه خشک Savannas در آفریقا استفاده شود.^[۷]

در سال ۲۰۰۶، برای بررسی عملکرد سیستم آبیاری حوزه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود در اصفهان از الگوریتم SEBAL استفاده شده است. تصاویر ماهواره‌ی با استفاده از الگوریتم SEBAL تحلیل شده‌اند و مقدار واقعی و پتانسیل ET و محصول تولیدشده به دست آمده است. ET محاسبه شده به منظور تخمین برداشت از آب‌های زیرزمینی و برداشت منظورنشده از رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است. عملکرد سیستم با استفاده از بهره‌وری آب، که به صورت محصول تولیدشده بر حسب کیلوگرم به ازای واحد آب تبخیرشده تعریف می‌شود، ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری سیستم‌های آبیاری شده از آب سطحی (0.72 kgm^{-2}) بیشتر از سیستم‌های دیگر است که این مسئله بیانگر تفاوت کیفیت آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی است.^[۸]

پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۰۶ در حوزه‌ی رودخانه‌ی Loess Plateau چین از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره‌ی برای تخمین ET استفاده کرده‌اند. در شمال شرقی چین میزان فرسایش از طریق باد و آب جدی است و از این طریق مقدار زیادی ذرات ماسه به رودخانه‌ی زرد وارد می‌شود. بنابراین لازم است سیستم مدیریت کاربری از منابع آب و خاک به نحوی برنامه‌ریزی شود که علاوه بر استفاده‌ی بهینه از زمین، از فرسایش خاک نیز جلوگیری شود. هدف در این مطالعه، محاسبه‌ی ET به منزله‌ی جزئی از بیلان آب در حوزه‌ی مذکور بوده است. برای تخمین این پارامتر، الگوریتم SEBAL به کار رفته و توزیع مکانی ET برای همه‌ی کاربری‌ها به دست آمده است.^[۹]

در سال ۲۰۰۶، از روش سنجش از دور (RS) برای تخمین ET در ناحیه‌ی نیمه خشک کوه‌های Taihang در شمال چین استفاده شده است. در این منطقه به دلیل تغییرات شدید در توپوگرافی، ET در زمان و مکان مرتب تغییر می‌کند و تخمین دقیق ET سالانه و فصلی را دشوار می‌سازد. در این مطالعه با اضافه کردن فاکتور اصلاح

دما، مدل موجود برای تعیین توزیع ET در منطقه یعنی مدل $rGIS - ETV_{1/2}$ را بهبود بخشیده‌اند. سپس با استفاده از مدل تغییرات ارتفاعی (DEM) و داده‌های هواشناسی، مقادیر روزانه‌ی ET در منطقه تخمین زده شده است. در مرحله‌ی بعد، این پژوهشگران ET محاسبه شده را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی و مدل $rGIS-ET_{V_{1/2}}$ را همراه با مدل SWAT به کار برده‌اند و ET روزانه را با دقت مکانی بالا محاسبه کرده‌اند. در نهایت با استفاده از ET روزانه به منزله‌ی ورودی مدل SWAT اجزای بیلان آب را در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ میلادی به دست آورده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ET سالانه در منطقه قابل توجه است.^[۱۰]

۲. روش انجام کار

۱.۲. الگوریتم SUTSEBAL

مقدار انرژی که در یک مکان، فصل، و زمان معینی از طرف خورشید به سطح معینی از زمین (مزرعه) می‌رسد، با استفاده از بیلان تشعشعات ورودی و خروجی طول موج‌های کوتاه و بلند در سطح زمین، مشخص و قابل محاسبه است. از طرفی مقدار آبی که با این مقدار انرژی می‌تواند تغییر حالت دهد، نیز مشخص است. بنابراین می‌توان مقدار آبی که از سطح زمین تحت کشت نباتی با استفاده از انرژی نهان، بخار و سپس وارد اتمسفر (میزان مصرف آب) شده است، را محاسبه کرد.^[۵]

تاکنون روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق (ET) گسترش داده و آزمون شده‌اند. این روش‌ها اغلب شامل استفاده از یک یا چند متغیر هواشناسی است، که ترکیب آن‌ها شرایط سطح زمین را توصیف می‌کند. مقدار واقعی تبخیر و تعرق یکی از مفیدترین شاخص‌ها برای این بررسی است که آیا آب به مصرف موردنظر رسیده است یا نه؟ با توجه به اینکه تبخیر و تعرق، تغییرات سریعی در زمان و مکان دارد؛ تخمین آن فقط با استفاده از داده‌های زمینی ممکن نیست.^[۱۱] از طرفی روش‌های موجود برای تخمین ET به داده‌های میدانی زیادی نیاز دارند که بعضاً در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نبوده‌اند و یا اینکه با گسترش و توسعه‌های ایجادشده در حوزه سازگاری ندارند. علاوه بر این جمع‌آوری داده‌های موردنیاز اغلب گران هستند و قابل تکرار نیستند.^[۵] بنابراین می‌توان گفت که اگر داده‌های موردنیاز به صورت قابل اطمینان و سازگار با توسعه‌ی حوزه با هزینه‌ی کم در دسترس باشند، می‌تواند گزینه‌ی بهتری برای مدیریت آب در یک حوزه باشد.

سنجش از دور (RS) و استفاده از تصاویر ماهواره‌ی یکی از گزینه‌هایی است که در دو-سه دهه‌ی اخیر روش‌های محاسبه‌ی تبخیر و تعرق بر پایه‌ی آن توسعه یافته‌اند. وجود ماهواره‌های مختلف با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت، پوشش زمانی و مکانی مناسبی را برای استخراج و تحلیل داده‌ها فراهم کرده است. البته طبق گفته‌ی پژوهشگران، بهینه‌ترین نوع مدل‌سازی تبخیر و تعرق به کمک سنجش از دور هنگامی صورت می‌پذیرد که این اطلاعات به منزله‌ی اطلاعات اولیه و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی به منزله‌ی اطلاعات ثانویه توماً به کار روند. چرا که اطلاعات حاصل از سنجش از دور، در مکان پیوسته و در زمان گسترده هستند، در حالی که اطلاعات زمینی - ایستگاهی در زمان پیوسته و در مکان دچار گسستگی‌اند. بر مبنای اطلاعات به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ی Bastiaanssen در سال ۱۹۹۵ الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین، SEBAL، را توسعه داد که این الگوریتم به صورت تجاری و یا با تغییر در بعضی از روابط و پارامترها و توسعه‌ی آن به صورت گسترده‌ی در کشورهای گوناگون استفاده و اعتبارسنجی شده است.^[۵]

را به وجود می آورد، رابطه‌ی به صورت رابطه‌ی ۲ خواهد داشت:

$$R_n = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow \quad (2)$$

که در آن، $R_s \downarrow$ تابش ورودی طول موج کوتاه، $R_s \uparrow$ تابش خروجی طول موج کوتاه، $R_L \downarrow$ تابش ورودی طول موج بلند، و $R_L \uparrow$ تابش خروجی طول موج بلند (همگی برحسب $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) هستند. [۲]

۲.۱.۲. شار گرمایی خاک (G)

در طول روز، بخشی از انرژی رسیده به سطح زمین باعث گرم شدن خاک، و جریان حرارتی در خاک با یک گرادیان حرارتی باعث گرم شدن لایه‌ی بالایی خاک می‌شود. این مقدار با توجه به میزان پوشش گیاهی تفاوت می‌کند، زیرا وجود پوشش گیاهی مانع رسیدن نور به سطح زمین می‌شود. همچنین شرایط رطوبت سطحی نیز بر میزان انتقال حرارت خاک مؤثر است. بنابراین معمولاً G را به R_n و رطوبت خاک ارتباط می‌دهند. روابط به دست آمده برای تعیین G تجربی هستند و از G در زمان‌های طولانی‌تر از یک سیکل خورشیدی می‌توان صرف نظر کرد. رابطه‌ی پیشنهادی Bastiaanssen (۱۹۹۵)، در الگوریتم SEBAL برای هر پیکسل بر روی زمین مطابق رابطه‌ی ۳ است که بعد از پردازش تصاویر و تولید نقشه‌های رقمی به صورت لایه‌های اطلاعاتی به دست می‌آید:

$$G = R_n \cdot \left\{ \frac{(T_s - 273)}{\alpha_s} \cdot [0.70032 \cdot (c_1 \cdot \alpha_s) + 0.70062 \cdot (c_1 \cdot \alpha_s)^2] (1 - 0.978 \cdot \text{NDVI}^2) \right\} \quad (3)$$

که در آن، R_n تابش خالص خورشیدی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، T_s دمای سطح زمین (کلوین)، α_s آلبدو باند وسیع در سطح زمین (بدون بعد)، NDVI شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (بدون بعد)، c_1 فاکتور تبدیل مقادیر لحظه‌ی آلبدو به میانگین روزانه است.

۳.۱.۲. شار حرارتی محسوس (H)

شار گرمای محسوس بخشی از تابش خالص خورشیدی است که صرف گرم کردن هوا می‌شود. انتقال حرارت از سطح به اتمسفر، روندی آیرودینامیک است. در تئوری آیرودینامیک، انتقال مومنتم، بخار آب، حرارت محسوس و... می‌تواند با روابطی مانند معادله‌های ۴ و ۵ تخمین زده شود.

$$\tau = \rho_a K_m \frac{\partial U}{\partial z} \quad (4)$$

$$H = \rho_a C_p K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5)$$

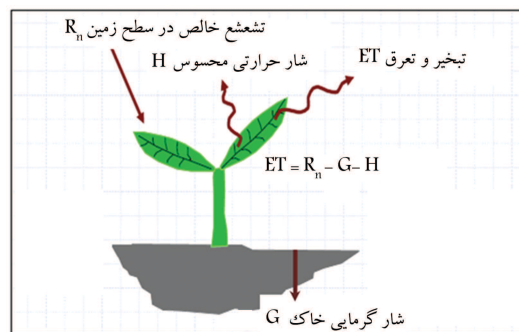
که در آن‌ها، K_h ضریب تبادل گردابی مومنتم، ρ_a چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه در فشار معین ($\text{KJ/kg/}^\circ\text{K}$)، $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ گرادیان عمودی دمای پتانسیل، و $\frac{\partial U}{\partial z}$ گرادیان عمودی سرعت باد است.

۴.۱.۲. تبخیر و تعرق ET

پس از تعیین R_n ، G و H مقدار گرمای نهان تبخیر به منزله‌ی باقیمانده‌ی معادله‌ی بیلان انرژی به دست می‌آید. با توجه به رابطه‌ی ۱، مقدار ET برحسب میلی‌متر در روز از رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

$$ET = (R_n - H - G) / (2501 - 2360 \times T_a) \times 1000 \quad (6)$$

توضیحات بیشتر در مورد الگوریتم SEBAL و الگوریتم SUTSEBAL توسط سایر محققان ارائه شده است. [۶، ۴۳]



شکل ۱. مؤلفه‌های بیلان انرژی در سطح زمین.

همان‌طور که گفته شد، در این مطالعه از الگوریتم تغییر داده شده با عنوان SUTSEBAL برای تخمین میزان تبخیر و تعرق استفاده شده است. انرژی خالص رسیده به سطح زمین علاوه بر گرم کردن زمین و هوای اطراف آن، صرف تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک و برگ گیاهان می‌شود. این فرایند فیزیکی که پایه‌ی الگوریتم SUTSEBAL را تشکیل می‌دهد، در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس تابش خالص خورشیدی، منبع انرژی و G ، H و ET مصرف کنندگان انرژی هستند.

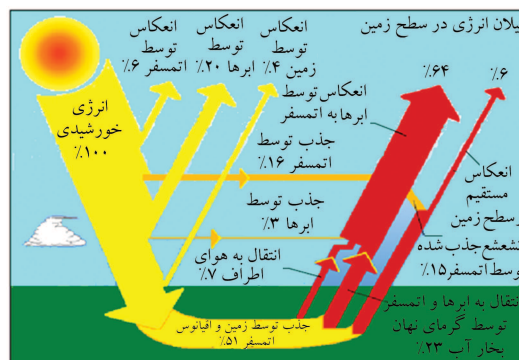
$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

در این رابطه، λET گرمای نهان تبخیر و تعرق (انرژی مورد استفاده جهت تبخیر و تعرق)، R_n تشعشع خالص در سطح زمین، G جریان گرمایی زمین، و H جریان گرمای محسوس هستند.

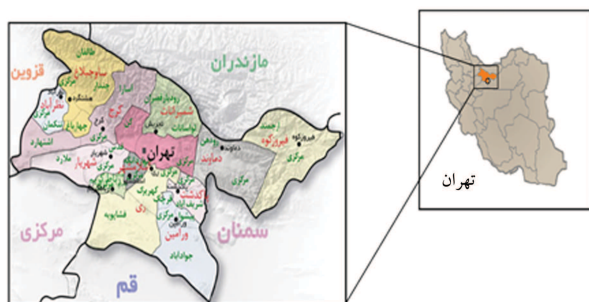
الگوریتم بیلان انرژی یک مدل پردازش تصویر است که طی گام‌های محاسباتی متعدد، تبخیر و تعرق واقعی (ETA) و سایر تبادلات انرژی را در سطح زمین با استفاده از داده‌های رقمی^۵ جمع‌آوری شده به وسیله‌ی سنجنده‌ی ماهواره تعیین می‌کند. در این روش ET به منزله‌ی یکی از مؤلفه‌های انرژی در هر پیکسل محاسبه می‌شود. اطلاعات ورودی کلیدی SUTSEBAL استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ی شامل تابش طیفی در گستره‌ی مرئی، نزدیک فروسرخ و مادون قرمز حرارتی است. [۳]

۱.۱.۲. تشعشع خالص در سطح زمین (Rn)

اصلی‌ترین منبع انرژی برای پدیده‌ی تبخیر از سطح آب، انرژی تابشی خورشید است؛ که نتیجه‌ی بیلان تشعشعات ورودی و خروجی طول موج‌های مثبت و منفی در سطح زمین است. مؤلفه‌های تابش‌های طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در شکل ۲ نشان داده شده است. تراز بین تابش‌های موج کوتاه و بلند که انرژی خالص



شکل ۲. مؤلفه‌های بیلان تابش‌های ورودی و خروجی.



شکل ۳. موقعیت دشت ورامین در کشور و استان تهران.

اخیر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و به‌کارنگرفتن اصول فنی و صحیح در آبیاری، افت سطح آب‌های تحت‌الارضی به‌خصوص در مناطقی که دشت استعداد تغذیه و جایگزینی آب‌های استخراجی را نداشته است؛ به‌طور قابل‌ملاحظه دیده می‌شود. [۱۳] شکل ۳ موقعیت دشت ورامین را در کشور و استان تهران نشان می‌دهد.

۲.۳. کشاورزی و الگوی کشت

مساحت اراضی قابل کشت و سطح زیرکشت خالص دشت ورامین به‌ترتیب برابر ۷۵۶۸۰ و ۴۸۷۹۰ هکتار گزارش شده است. گندم و جو به تنهایی تقریباً نیمی از سطح زیرکشت را تشکیل می‌دهند و دوره‌ی کشت آن‌ها معمولاً از اوایل مهر آغاز می‌شود و تا اواخر تیر و اوایل مرداد ادامه دارد. در دشت ورامین محصولات دیگری نیز مانند پنبه، صیفی‌جات، و غیره کشت می‌شود که دوره‌ی کشت آن‌ها تقریباً از اوایل اردیبهشت تا اواخر شهریور است. بنابراین می‌توان گفت که تقریباً در تمام طول سال در دشت ورامین محصول زراعی کشت می‌شود و این به معنای مصرف آب در طول این مدت است. [۱۴] پس انتظار می‌رود که تبخیر و تعرق از سطح زمین در تمام طول سال وجود داشته باشد. صحت این فرضیه در بخش‌های بعد بررسی می‌شود.

۴. محاسبه‌ی تبخیر و تعرق در دشت ورامین در سال آبی

۱۳۸۱-۸۲

به‌منظور بررسی دقت الگوریتم SUTSEBAL در برآورد تبخیر و تعرق در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد این الگوریتم در تخمین تبخیر و تعرق دشت ورامین در سال آبی ۱۳۸۱-۸۲ بررسی و سپس با نتایج نرم‌افزار CROPWAT مقایسه شده است.

در مرحله‌ی اول، برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق در هر دو روش مذکور، جمع‌آوری آمار هواشناسی موردنیاز است. پارامترهای هواشناسی موردنیاز شامل دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی، و رطوبت است و برای تولید نقشه‌ی توزیع این پارامترها در سطح دشت ورامین از آمار ایستگاه‌های هواشناسی اطراف دشت استفاده شده است. شکل‌های ۴ تا ۶ به‌ترتیب تغییرات میانگین ماهانه‌ی دما، سرعت باد، و ساعات آفتابی، بارش، و رطوبت را در سطح دشت ورامین در طی سال ۱۳۸۱-۸۲ نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۷، تغییرات تجمعی بارش سال آبی ۱۳۸۱-۸۲ و متوسط بارش ۴۰ ساله مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای هوا از مهرماه تا دی ماه کاهش و پس از آن به‌تدریج افزایش می‌یابد. تغییرات سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی نیز

۲.۲. محاسبه‌ی تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از نرم‌افزار

CROPWAT

به‌منظور مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم پلان انرژی، تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT نیز محاسبه شده است. این نرم‌افزار توسط سازمان خوار و بار سازمان ملل متحد (FAO) در دهه‌ی ۹۰ میلادی و با به‌کار بردن معادله‌ی پنمن-مانتیت برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق پتانسیل ارائه شده است. معادله‌ی پنمن-مانتیت به‌صورت رابطه‌ی ۷ تعریف شده است: [۱۲]

$$ET_p = \frac{0.48 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (7)$$

که در آن، ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل (mm/day)، R_n تابش خالص خورشیدی در سطح زمین ($MJ/m^2 day$)، G شار گرمایی خاک ($MJ/m^2 day$)، T میانگین درجه حرارت هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa/^{\circ}C$) و γ ثابت سایکرومتریک ($KPa/^{\circ}C$) است.

تبخیر و تعرق محاسبه‌شده از این روش، تبخیر و تعرق مرجع است و برای اینکه معادل تبخیر و تعرق واقعی باشد، باید در ضریب محصولات ضرب شود:

$$ET_c = ET_p \times K_c \quad (8)$$

در این رابطه، ET_c تبخیر و تعرق واقعی (mm/day)، ET_p تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، K_c ضریب محصولات (بدون واحد) است.

ضریب محصولات تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ارتفاع محصول، بخشی از سطح که با برگ پوشیده شده و مساحت سطح برگ گیاه است. بنابراین محصولات کشاورزی مختلف ضریب محصولات متفاوتی را خواهند داشت. [۱۲] در این مطالعه با استفاده از محصولات قالب و تقویم زراعی که در گزارش‌های سازمان جهاد کشاورزی و مطالعات جاماب در دسترس است، ضریب محصولات تخمین زده شد. [۱۵-۱۳]

۳. منطقه‌ی مورد مطالعه

۱.۳. موقعیت جغرافیایی

شهرستان ورامین در فاصله‌ی ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران و در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی بین طول‌های جغرافیایی ۳۸-۷۵ و ۳۹-۴۰ و عرض‌های جغرافیایی ۵۴ و ۵۹ واقع شده است. دشت ورامین از طرف شرق به دشت ایوانکی و از غرب به منطقه‌ی غار فشاوپوه و از سمت جنوب به تپه‌ی ماهورها محدود است. مساحت این دشت تقریباً ۱۲۰۰ کیلومتر مربع است که به‌علت بیرون‌زدگی و فرورفتگی موجود، دشت مورد مطالعه دارای ارتفاعات متغیر با متوسط ۹۵۰ متر نسبت به سطح دریاست. این ناحیه در زمستان، سرد و در تابستان، گرم و خشک با خصوصیات آب و هوای کویری است. میزان بارندگی متوسط چهل ساله‌ی (۱۳۴۶-۱۳۸۶) دشت در ایستگاه جوادآباد ورامین ۱۳۱/۴ میلی‌متر ثبت شده است. این شهرستان دارای قدمت کشاورزی است که به‌علت نزدیکی تهران می‌توان گفت یک بازوی تأمین‌کننده‌ی محصولات کشاورزی در طول سال‌ها نه فقط برای تهران، بلکه سایر نقاط کشور نیز بوده است. منطقه‌ی مورد بحث جلگه‌یی است که پتانسیل‌های آبی و خاکی بسیار خوب دارد و مستعد کشاورزی بوده و هست. لیکن در دو دهه‌ی

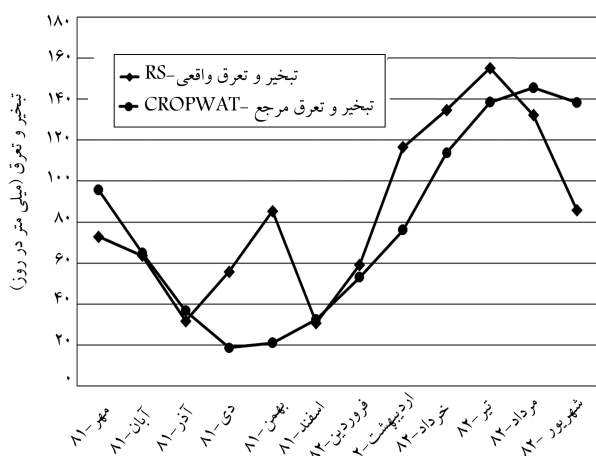
روندی تقریباً مشابه دمای هوا را دنبال می‌کنند. اما میزان رطوبت در سطح دشت روند تقریباً معکوسی داشته است و میزان بارش هم از روند خاصی تبعیت نمی‌کند. همچنین همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که سال آبی ۸۱-۸۲ سال خشکی از نظر بارش محسوب می‌شود و انتظار می‌رود نیاز مزارع و محصولات به آب بیشتر از طریق آبیاری تأمین شود.

پس از جمع‌آوری اطلاعات هواشناسی مورد نیاز لازم است که تصاویر ماهواره‌ای دشت ورامین در بازه‌ی زمانی مهرماه ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۸۲ تهیه شود. در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ی NOAA سنجنده‌ی AVHRR با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر استفاده شده است. تعداد تصاویر پردازش شده از منطقه در سال ۸۲-۱۳۸۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

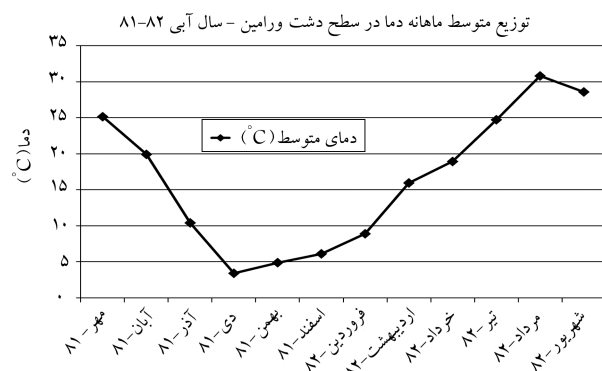
پس از پردازش این تصاویر با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL تبخیر و ترقی واقعی در سطح دشت برحسب میلی‌متر در روز به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی تبخیر و ترقی واقعی ماهانه با توجه به تعداد تصاویر پردازش شده در هر ماه، تعداد روزهای ماه به بازه‌های زمانی متناسب با تاریخ تصاویر تقسیم و با ضرب تعداد روزهای ماه در تبخیر و ترقی به دست آمده از هر تصویر و جمع نتایج تبخیر و ترقی واقعی ماهانه حاصل می‌شود.

تبخیر و ترقی پتانسیل (مرجع) نیز با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT و داده‌های هواشناسی مورد نیاز محاسبه شده است. شکل ۸، تغییرات میانگین ماهانه‌ی تبخیر و ترقی در سطح دشت به دست آمده از الگوریتم SUTSEBAL (واقعی) و نرم‌افزار CROPWAT (پتانسیل) را نشان می‌دهد.

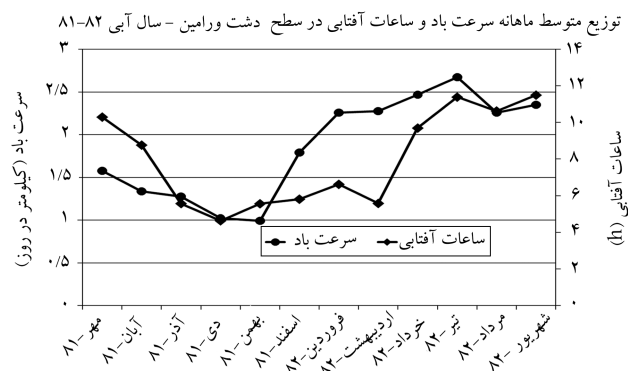
همان‌طور که مشاهده می‌شود، تبخیر و ترقی پتانسیل از مهرماه تا دی‌ماه کاهش داشته و پس از آن تا مردادماه روند افزایشی دنبال کرده و سپس در شهریورماه هم‌زمان با برداشت محصولات کاهش یافته است. روند تغییرات تبخیر و ترقی واقعی نیز به جز در فاصله‌ی ماه‌های دی تا اسفندماه مشابه تغییرات تبخیر و ترقی مرجع است. باید توجه داشت که کشاورزان در دشت ورامین در ابتدای فصل پاییز گندم و جو می‌کارند و در زمان کاشت ابتدا به صورت غرقابی مزرعه را آبیاری می‌کنند و پس از آن در فصل زمستان با توجه به میزان بارندگی، دمای هوا و نیاز محصولات، آبیاری انجام می‌شود. بنابراین با توجه به کمبود بارندگی در دی‌ماه و افزایش دما ممکن است با توجه به نیاز محصولات در دی و بهمن مزارع آبیاری



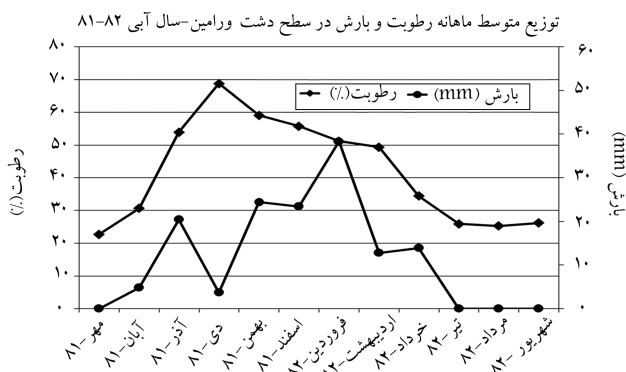
شکل ۸. نمودار تغییرات میانگین ماهانه‌ی تبخیر و ترقی واقعی و مرجع در دشت ورامین در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱.



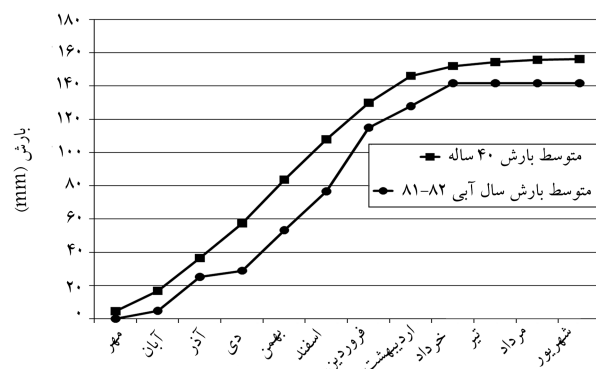
شکل ۴. تغییرات میانگین ماهانه‌ی دما در دشت ورامین.



شکل ۵. تغییرات میانگین ماهانه‌ی سرعت باد و ساعات آفتابی در دشت ورامین.



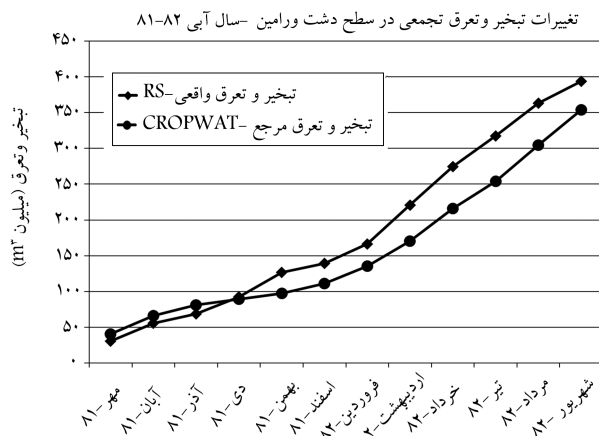
شکل ۶. تغییرات میانگین ماهانه‌ی بارش و رطوبت در دشت ورامین.



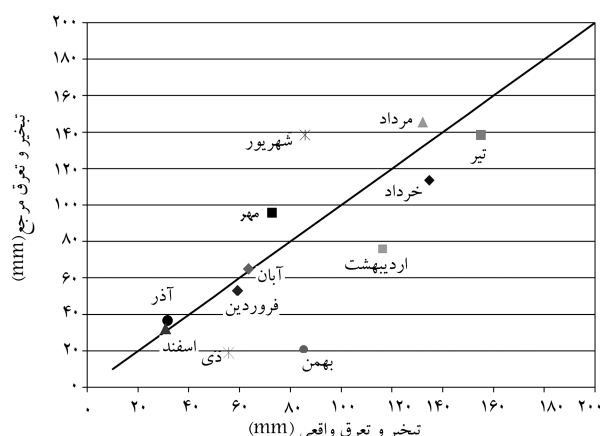
شکل ۷. تغییرات تجمعی بارش سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ در مقایسه با متوسط بارش ۴۰ ساله در دشت ورامین.

جدول ۱. تعداد تصاویر پردازش شده در هر ماه در این مطالعه.

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۸۱-۸۲	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳
۸۲-۸۳	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۳	۳
۸۳-۸۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۳	۳	۱



شکل ۱۰. نمودار تغییرات تجمعی تبخیر و تعرق واقعی و مرجع در دشت ورامین در سال آبی ۱۳۸۱-۸۲.



شکل ۹. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق مرجع نسبت به تبخیر و تعرق واقعی در سال آبی ۱۳۸۱-۸۲.

سال آبی کشاورزان بیش از نیاز پتانسیل محصولات، مزارع خود را آبیاری کرده‌اند. این مسئله نشان‌دهنده عدم مدیریت مناسب مصرف آب در این دشت است. در ادامه، تغییرات تبخیر و تعرق واقعی در سطح دشت در چند بازه زمانی مختلف بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی متوسط تبخیر فصلی در تابستان تقریباً دو برابر بیشینه‌ی متوسط تبخیر در فصل پاییز است. این تغییرات مطابق با دوره‌ی رشد گیاهان است، و هم‌زمان با رشد گیاهان تبخیر و تعرق نیز در سطح دشت افزایش یافته است. از طرف دیگر تغییرات تبخیر و تعرق در سطح دشت به گونه‌ی است که از یک مقدار کمینه افزایش یافته است و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه دوباره کاهش می‌یابد. این گونه تغییرات، نشان‌دهنده‌ی این است که در سطح دشت ورامین فقط کشت آبی وجود دارد.

۵. کاربرد الگوریتم SUTSEBAL در محاسبه‌ی آب

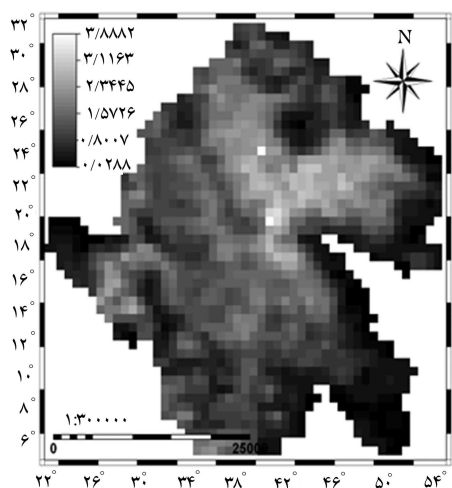
خالص مصرفی کشاورزی در دشت ورامین

همان‌طور که اشاره شد، آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی معادل با میزان تبخیر و تعرق واقعی در سطح زمین است و با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی و به کمک تصاویر ماهواره‌ی می‌توان میزان تبخیر و تعرق واقعی را در بازه‌های زمانی و مکانی مورد نظر و با دقت مناسب محاسبه کرد. برای این منظور تصاویر ماهواره‌ی دشت ورامین در سال‌های آبی ۸۱-۸۲ تا ۸۳-۸۴ از ماهواره‌ی NOAA سنجنده‌ی AVHRR با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر تهیه و از بین تصاویر سفارش داده‌شده، تصاویر بدون ابر برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق پردازش شده‌اند. تعداد تصاویر پردازش شده در هر ماه برای این سال‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

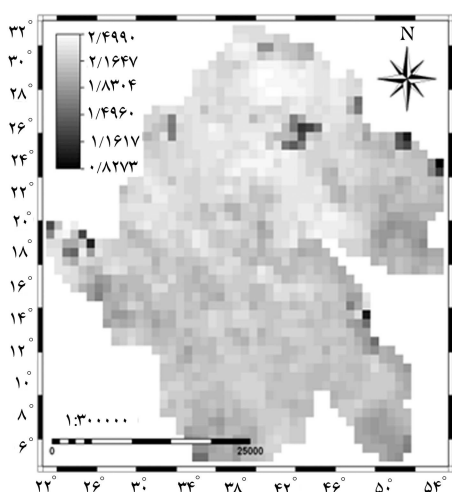
شوند و افزایش تبخیر و تعرق در فاصله‌ی دی و بهمن هم می‌تواند به همین دلیل باشد. علاوه بر این، در فاصله‌ی فروردین و اردیبهشت هم افزایش قابل ملاحظه‌ی در تبخیر و تعرق واقعی مشاهده می‌شود، که این مسئله می‌تواند به دلیل کاشت محصولاتی مانند پنبه، چغندر، و صیفی‌جات در اردیبهشت‌ماه و وقوع بارش باشد. هم‌چنین نقطه‌ی اوج نمودار تغییرات میانگین ماهانه‌ی تبخیر و تعرق در تیرماه اتفاق می‌افتد که هم‌زمان با برداشت گندم یعنی محصول کشاورزی عمده‌ی دشت ورامین است.

شکل ۹، نمودار تغییرات تبخیر و تعرق مرجع برحسب تبخیر و تعرق واقعی را نسبت به نیمساز ربع اول نشان می‌دهد. شیب نمودار تغییرات تبخیر و تعرق مرجع برحسب تبخیر و تعرق واقعی معادل معکوس ضریب محصولات خواهد بود. اما با توجه به اینکه در زمان‌های مختلف، در دشت ورامین محصولات متنوعی کشت می‌شود؛ لازم است ضریب محصولات معادل کلیه‌ی محصولات در دشت محاسبه شود. ضریب محصولات معادل، تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله محصولات کشت شده و شرایط رطوبت خاک در بازه‌ی زمانی مورد نظر است. برای به‌دست‌آوردن حجم تبخیر از سطح دشت لازم است که تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده در مساحت دشت ضرب شود. به همین منظور میزان تبخیر و تعرق هر پیکسل از تصویر در مساحت آن یعنی یک کیلومتر مربع ضرب شده است. بر این اساس حجم تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از این دوروش با هم مقایسه شده است. شکل ۱۰، تغییرات تجمعی حجم تبخیر و تعرق واقعی و مرجع را در سطح دشت برای سال آبی ۸۱-۸۲ نشان می‌دهد.

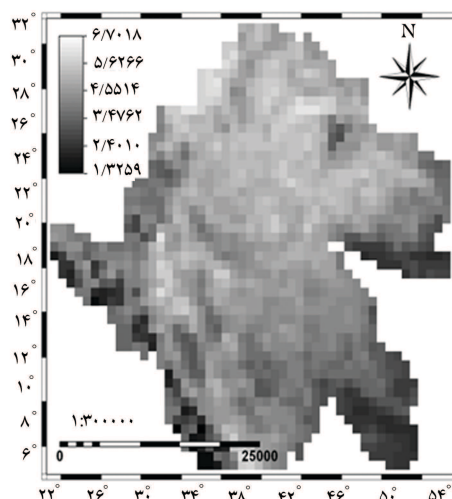
همان‌طور که مشاهده می‌شود، این دو نمودار روند مشابهی را دنبال می‌کنند؛ ولی تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL بیشتر از تبخیر و تعرق پتانسیل است. با توجه به اینکه نمودار تغییرات تجمعی تبخیر و تعرق واقعی بالای نمودار تبخیر و تعرق مرجع قرار گرفته است، می‌توان گفت که در این



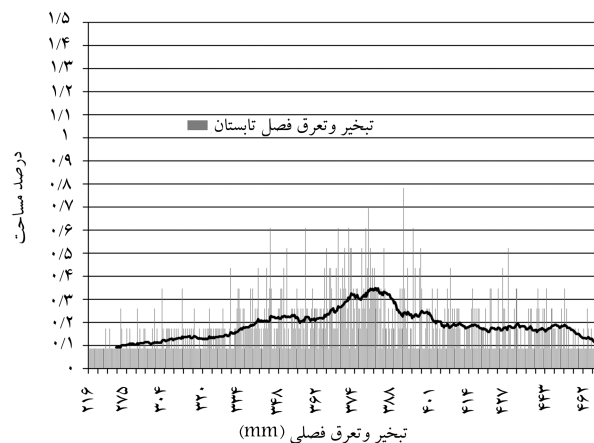
شکل ۱۴. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین در روز ۲۵ خرداد ۱۳۸۲ (میلی‌متر در روز با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL).



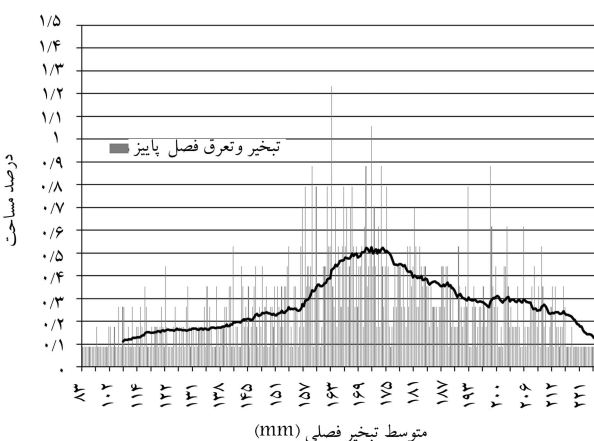
شکل ۱۵. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین در روز ۱۷ آذر ۱۳۸۲ (میلی‌متر در روز با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL).



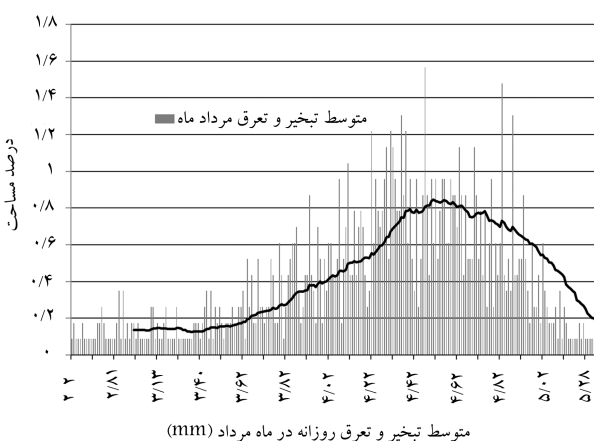
شکل ۱۶. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین در روز ۲۲ مرداد ۱۳۸۳ (میلی‌متر در روز با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL).



شکل ۱۱. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق فصل تابستان در سطح دشت ورامین.

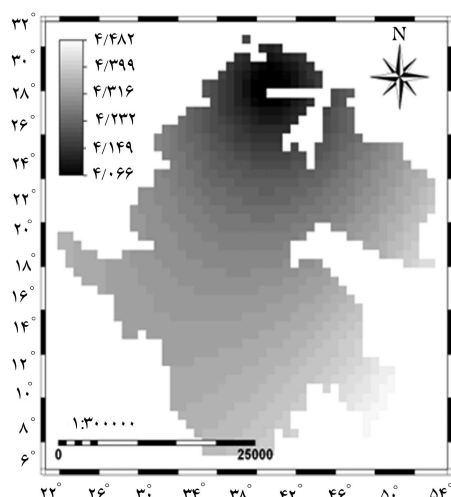


شکل ۱۲. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق فصل پاییز در سطح دشت ورامین.

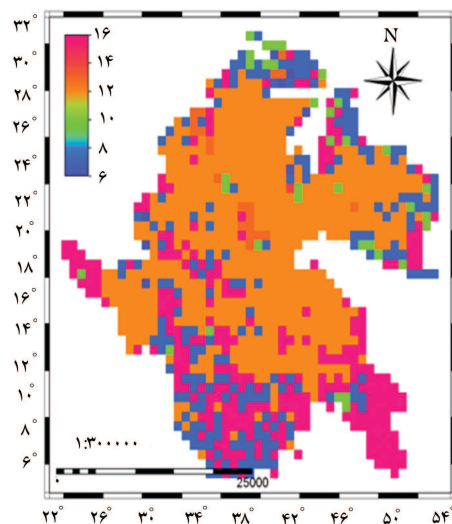


شکل ۱۳. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق روزانه در مردادماه در سطح دشت ورامین.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان تبخیر و تعرق واقعی در هر پیکسل از تصاویر در ماه‌های سرد بین ۳-۱۰ میلی‌متر در روز و در ماه‌های گرم بین ۱۰-۳ میلی‌متر در روز متغیر است. سپس با استفاده از این نقشه‌ها و مطابق با آنچه در بخش قبل به آن اشاره شد، نقشه‌ی تبخیر و تعرق ماهانه تولید شد. لازم به ذکر است که تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط این روش معادل تبخیر و تعرق کل پوشش گیاهی منطقه یعنی شامل مزارع و علفزارها نیز است (شکل‌های ۱۴ الی ۱۶). با توجه به



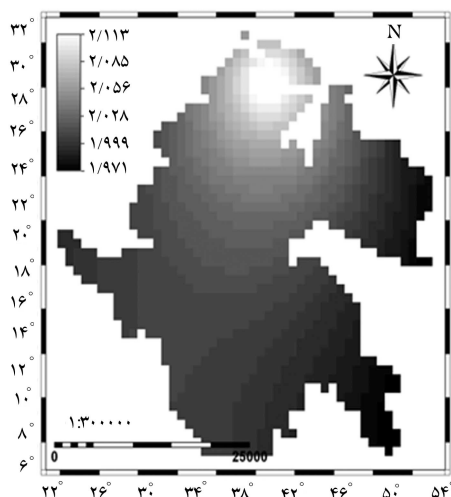
شکل ۱۸. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۲۵ خرداد ۱۳۸۲ (میلی متر در روز با استفاده از مدل CROPWAT).



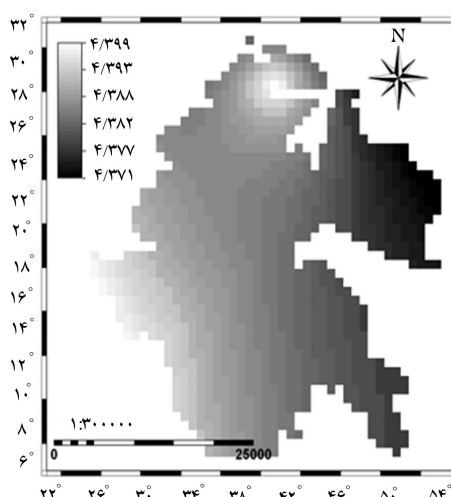
شکل ۱۷. نقشه‌ی پوشش گیاهی در دشت ورامین.

جدول ۲. دامنه‌ی تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده در سطح دشت (میلی متر در روز).

تاریخ تصویر	الگوریتم بیلان انرژی	معادله‌ی پنمن - مانیتیت
۲۷ آبان ۱۳۸۱	۱-۲	۱/۱-۱/۲
۲۵ خرداد ۱۳۸۲	۲/۵-۵/۵	۴-۴/۵
۱۷ آذر ۱۳۸۲	۲-۲/۵	۲-۲/۱
۲۲ مرداد ۱۳۸۳	۲/۵-۶/۵	۴/۳-۴/۴
۲۹ مهر ۱۳۸۳	۲-۵	۴/۲-۴/۴
۲۷ مرداد ۱۳۸۴	۲-۶	۳/۹-۴/۱



شکل ۱۹. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۱۷ آذر ۱۳۸۲ (میلی متر در روز با استفاده از مدل CROPWAT).



شکل ۲۰. نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۲۲ مرداد ۱۳۸۳ (میلی متر در روز با استفاده از مدل CROPWAT).

این شکل‌ها می‌توان گفت که تبخیر و تعرق در بخش‌های شمالی و مرکزی دشت نسبت به بخش‌های جنوبی بالاتر است. بالاتر بودن تبخیر و تعرق در این مناطق نشان‌دهنده‌ی دسترسی آسان‌تر به آب و تجمع اراضی کشاورزی است. نقشه‌ی پوشش گیاهی به‌دست‌آمده از سنجنده‌ی MODIS در شکل ۱۷ نیز مؤید وجود زمین‌های کشاورزی در مناطق مذکور است.

هم‌چنین همان‌طور که مشاهده می‌شود هم‌زمان با رشد گیاه و افزایش نیاز آن به آب، میزان تبخیر و تعرق نیز در سطح دشت افزایش یافته است.

نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد مدل CROPWAT در تولید نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ مشاهده می‌شود. جدول ۲، محدوده‌ی تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده از دو روش مذکور را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توزیع تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از روش پنمن - مانیتیت نسبت به توزیع تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL یک‌نواخت‌تر است. اما علی‌رغم اینکه دامنه‌ی تغییرات تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از دو روش مذکور با هم متفاوت است، میزان تبخیر و تعرق غالب در سطح دشت یکسان است.

در مرحله‌ی بعد با استفاده از نقشه‌ی توزیع تبخیر و تعرق ماهانه و در نظر گرفتن پوشش گیاهی در هر پیکسل تصویر، تبخیر و تعرق آن پیکسل و آب مصرفی در

جدول ۳. تخمین آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۱ (میلیون مترمکعب).

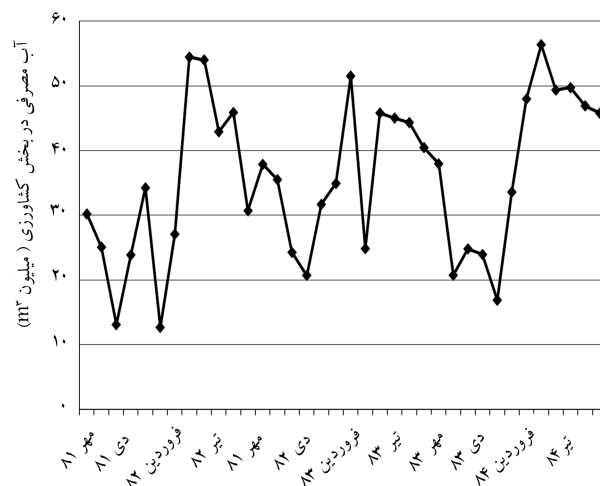
سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
۸۱-۸۲	۳۰٫۲	۲۵٫۱	۱۳٫۱	۲۳٫۹	۳۴٫۲	۱۲٫۷	۲۷٫۱	۵۴٫۴	۵۳٫۹	۴۲٫۹	۴۵٫۸	۳۰٫۷	۳۹۳٫۸
۸۲-۸۳	۳۷٫۸	۳۵٫۵	۲۴٫۲	۲۰٫۷	۳۱٫۷	۳۴٫۹	۵۱٫۵	۲۴٫۸	۴۵٫۸	۴۵	۴۴٫۳	۴۰٫۴	۴۳۶٫۵
۸۳-۸۴	۳۷٫۹	۲۰٫۷	۲۴٫۹	۲۳٫۹	۱۶٫۹	۳۳٫۶	۴۷٫۹	۵۶٫۳	۴۹٫۳	۴۹٫۷	۴۶٫۹	۴۵٫۷	۴۵۳٫۵

بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مدل تهیه‌شده قادر است تغییرات تراز آب زیرزمینی را با دقت بالایی تخمین بزند و تطابق خوبی با تراز پیژومتریک اندازه‌گیری‌شده در سطح دشت دارد. نتایج این شبیه‌سازی نیز می‌تواند به‌منزله دلیلی بر صحت و دقت نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه در نظر گرفته شود.^[۱۶]

۶. نتیجه‌گیری

آب مصرفی در بخش کشاورزی یکی از اجزای اصلی بیلان آب در دشت‌های کشاورزی است. ولی اطلاعات و داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی اغلب در مکان گسسته بوده است و خطاهای انسانی تأثیر زیادی در مقادیر اندازه‌گیری‌شده دارد. تاکنون روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق (ET) گسترش داده و آزمون شده‌اند. این روش‌ها اغلب شامل یک یا چند متغیر هواشناسی هستند، که ترکیب آن‌ها شرایط سطح زمین را توصیف می‌کند. متأسفانه هنوز تخمین ET تحت شرایط واقعی زمین در مقیاس‌های گسترده ممکن نیست. روش‌های موجود برای تخمین ET به داده‌های میدانی زیادی نیاز دارند که بعضاً در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نبوده‌اند و یا اینکه با گسترش و توسعه‌های ایجادشده در حوزه سازگاری ندارند. سنجش از دور (RS) و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یکی از گزینه‌هایی است که در دو دهه‌ی اخیر روش‌های محاسبه‌ی تبخیر و تعرق بر پایه‌ی آن توسعه یافته‌اند. در این روش‌ها داده‌های موردنیاز در مقیاس وسیع و با کمترین هزینه در دسترس قرار دارند. وجود ماهواره‌های مختلف با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت، پوشش زمانی و مکانی مناسبی را جهت استخراج و تحلیل داده‌ها فراهم کرده‌اند. الگوریتم SUTSEBAL یکی از شیوه‌های استفاده از سنجش از دور است که با بومی‌سازی الگوریتم SEBAL در دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف توسعه داده شده است. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد این الگوریتم در سطح دشت ورامین و مدل CROPWAT در سال آبی ۸۱-۸۲ نشان می‌دهد که الگوریتم SUTSEBAL قادر است تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس‌های بزرگ را با دقت مناسبی در مقیاس‌های مکانی و زمانی موردنظر در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. در صورت وجود داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ی زمینی در سطح دشت می‌توان با کالیبره‌کردن الگوریتم مذکور دقت این تخمین را افزایش داد. با به‌کاربردن الگوریتم SUTSEBAL، آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین در سال‌های آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ به‌ترتیب معادل ۳۹۴، ۴۷۶ و ۴۵۳ میلیون مترمکعب در هر سال برآورد شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که این الگوریتم قادر است توزیع آب خالص مصرفی در بخش کشاورزی را با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و در بازه‌ی زمانی دلخواه و با دقت مناسب در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب و سازمان‌های آب منطقه‌ای قرار دهد.

نمودار تغییرات آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین



شکل ۲۱. نمودار تغییرات ماهانه‌ی آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین در طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۱ (میلیون متر مکعب).

بخش کشاورزی در دشت (بدون در نظر گرفتن تلفات در مزرعه و راندمان آبیاری) تخمین زده شده است. بر این اساس آب مصرفی در بخش کشاورزی برای سال‌های ۸۱-۸۲، ۸۲-۸۳ و ۸۳-۸۴ به‌ترتیب برابر ۳۹۴، ۴۳۶، و ۴۵۳ میلیون مترمکعب به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر فوق شامل مجموع آب مصرفی توسط پوشش گیاهی منطقه و محصولات کشاورزی زیرکشت آبی است. جدول ۳ و شکل ۲۱ تغییرات ماهانه‌ی مصرف آب کشاورزی در سطح دشت را در این سال‌ها نشان می‌دهد.

گروه مهندسان مشاور یکم در مطالعات سامان‌دهی آب‌های سطحی جنوب تهران میزان برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت ورامین را ۶۹۴ میلیون مترمکعب گزارش کرده‌اند.^[۱۴] با در نظر گرفتن راندمان آبیاری که این گروه برای آب‌های زیرزمینی و سطحی اعلام کرده است، میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی حدود ۳۲۰ میلیون مترمکعب به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه در الگوریتم بیلان انرژی، در واقع آب مصرف‌شده در بخش کشاورزی به همراه پوشش گیاهی غیرزراعی و همچنین آب مصرفی در اثر تبخیر از سطح زمین را نیز تخمین می‌زنند، می‌توان گفت که نتایج به‌دست‌آمده از این الگوریتم با نتایج گزارش‌شده مطابقت خوبی دارد.

از آنجا که آب مصرفی در بخش کشاورزی یکی از عوامل عمده‌ی تخلیه‌ی آب زیرزمینی در دشت ورامین است، نتایج این مطالعه به‌منزله‌ی بخشی از بیلان آب زیرزمینی دشت ورامین در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی دشت ورامین با استفاده از مدل MODFLOW به‌کار برده شده و تغییرات تراز آب زیرزمینی در این دشت

پانوشتها

1. surface energy balance algorithm for land (SEBAL)
2. actual evapotranspiration (ETa)
3. biomass
4. remote sensing (RS)
5. digital

منابع (References)

1. Jafari, A.M. and Zarei, G. "Virtual water trade and its Role in water scarcity crisis", *Payaam Aab*, **28**, pp.31-35 (2007) (in Persian).
2. IWRM "Economic performance and adjustment of water cultivation pattern", Iran Water Resources Management Company, Planning Department, Water Economy Office, Report Code 113-09-82-D (2003) (in Persian).
3. Emadzadeh, M., *Application of Remote Sensing in Estimating Water Efficiency in a Basin: A Case Study in Ghareh Subbasin*, M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering of Sharif University (2008) (in Persian).
4. Ahmad, M.; Magagula, T.F.; Love, D.; Kongo, V.; Mul, M.L. and Kinoti, J. "Estimating actual evapotranspiration through remote sensing techniques to improve agricultural water management: A case study in the trans-boundary olifants catchment in the limpopo basin, South Africa", *Physics and Chemistry of the Earth*, **29**, pp. 1109-1118 (2004).
5. Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)", *Journal of Hydrology*, **212**, pp. 198-212 (1998).
6. Zwart, Sander J. and Bastiaanssen, W.G.M. "SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat system", *Agricultural Water Management*, **89**, pp. 287-296 (2007).
7. Kongo, V.M. and Jewitt, G.P.W. "Preliminary investigation of catchment hydrology in response to agricul-

tural water use innovation: A case study of the potshini catchment-South Africa", *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**(15-16), pp. 976-987 (2006).

8. Bastiaanssen, W.A.G.; Akbari, M. and Toomanian, N. "Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery", *Agricultural Water Management*, **88**(1-3), pp.99-109 (2007).
9. Kimura, R.; Bai, L.; Fan, J.; Takayama, N. and Hinokidani, O. "Evapotranspiration estimation over the river basin of loess plateau of China based on remote sensing", *Journal of Arid Environments*, **68**, pp.53-65 (2007).
10. Lei, Y.; Yunqiao, S.; Hongjun, L. and Zheng, L. "Integrated remote sensing and hydrological models for water balance in mountain watersheds", *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology V3*, Edited by Owe, Manfered, D'Urso, Guido, Neale, Christopher M, *Proceeding of the SPIE*, 6359, pp. 63590X (2006).
11. Compaore, H.; Hendrickx, J.M.H.; Hong, S.; Friesen, J.; van de Giesen, N.C.; Rodgers, C.; Szarzynski, J. and Vlek, P.L.G. "Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the white volta basin, upper east Ghana", *Physics and Chemistry of the Earth*, **33**(1-2), pp. 127-140 (2008).
12. Smith, M., *CROPWAT: Manual and guidelines*, FAO of UN, Rome, Italy (1991).
13. Tehran Regional Water Company, *Pizometric Well Report of Varamin Plain* (April 1996) (in Persian).
14. Jamab Consultat Company, *Shoor River Basin Report* (1993) (in Persian).
15. Yekom Consultant Engineering, *Organizing study of Surface Water in the South of Tehran*, (November 2009) (in Persian).
16. Khakbazan Fard, F., *Using Hydrological Model and Energy Balance in Estimating Groundwater Table, Case Study: Varamin Plain* M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering of Sharif University (2010) (in Persian).

APPLICATION OF THE ENERGY BALANCE ALGORITHM (SUTSEBAL) FOR ESTIMATING THE AMOUNT OF WATER USED IN THE VARAMIN PLAIN

F. Khakbazan. Fard
M. Tajrishy

Abstract:

Estimation of evapotranspiration (ET) is needed for many applications in diverse disciplines, such as meteorology, hydrology and agriculture. Quantifying ET from irrigated projects is important for water rights management, water resources planning, water regulation and irrigation system performance. A common way of describing irrigation system performance is by comparing water supply and demand. Estimation of water supply is a straightforward exercise in most cases. However, estimation of water demand has proved to be much more difficult. Data are required on irrigated areas, types of crop, cropping calendars and specific crop water demand. Given these data, it becomes possible to calculate the total crop water requirements for each system. However, estimation of water demand proves to be more difficult, due to the absence of data on irrigated areas and cropping patterns. Remote Sensing (RS) algorithms are currently used to spatially estimate surface energy fluxes, e.g., evapotranspiration. Many of these energy balance models use information derived from satellite imagery, such as MODIS, AVHRR, and Landsat, to estimate regional ET. The RS approach to estimate ET provides advantages over traditional methods. One of the most important advantages is that it can provide regional estimates of actual ET at low cost. Compared with traditional point measurement methods (e.g., lysimeters and weather station data), this approach captures the spatial variability between and within agricultural fields.

The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) is an image processing model for calculating ET as a residual of the surface energy balance, which was developed in the Netherlands by Bastiaanssen. In this paper, a new algorithm was developed to use synoptic weather station data in large areas faced with lack of data, into a surface energy balance, coupled with remote sensing satellite-based multispectral images, AVHRR, called, the Sharif University of Technology SUT-SEBAL, built on the same theoretical basis as its predecessor, SEBAL, to estimate spatial ET and actual water use in agriculture in the Varamin Plain (South of Tehran), from 2002-2005.

The results show that agricultural water use in this irrigation system is around 400 MCM annually. Their results were comparable with conventional methods, including CROPWAT. The results also can be used for accurately estimating ET for large populations of field and water users, and to quantify net ground-water pumpage in this area, since water extraction from underground is not measured. ET estimates that satellite images using SUT-SEBAL may ultimately replace current procedures used by the Tehran Water Company and other management entities that rely on field visits and simple ground measurements.

Keywords: SUTSEBAL, remote-sensing, energy balance, evapotranspiration, Varamin plain