

برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم (SEBAL) بر اساس تصاویر ماهواره

لندست ۸ (مطالعه موردی هندیکان)

فیض اله مرتضی زاده^۱، محمدحسین پورمحمدی^۱، صائب خوشنواز^{۱*}، ابراهیم نوحانی^۲، حسین اسلامی^۱

^۱ گروه علوم آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

^۲ مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

* نویسنده مسئول: Saeb.khosnavaz@iau.ac.ir

چکیده

مدیریت منابع آب در کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند دشت هندیکان در استان خوزستان، اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی بهینه آبیاری، تعیین نیاز آبی گیاهان و افزایش بهره‌وری، تبخیر و تعرق واقعی است. تخمین دقیق این پارامتر می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب نقش بسزایی ایفا کند. روش‌های سنتی اندازه‌گیری تبخیر و تعرق، نظیر استفاده از لایسیمترها، علاوه بر هزینه بالا و زمان‌بر بودن، اطلاعات محدودی در مقیاس نقطه‌ای ارائه می‌دهند؛ در مقابل، بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای مانند تصاویر Landsat 8 امکان برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای را فراهم می‌کند. در این پژوهش، با هدف ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی در دشت هندیکان و بهبود مدیریت منابع آب برای کشاورزی دیم، از الگوریتم SEBAL بر روی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. با بهره‌گیری از این الگوریتم، مؤلفه‌های توازن انرژی سطحی شامل شار تابش خالص (R_n)، شار گرمای خاک (G)، و شار گرمای محسوس (H) برآورد گردید و سپس تبخیر و تعرق با استفاده از معادله توازن انرژی محاسبه شد. نتایج نشان دادند که تبخیر و تعرق در این منطقه به عوامل متعددی از جمله توزیع پوشش گیاهی، نوع محصول، و زمان کشت وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که میزان تبخیر و تعرق ساعتی در دشت هندیکان بین ۰ تا ۱٫۱ میلی‌متر بر ساعت متغیر بوده، در حالی که مقدار روزانه این شاخص بین ۰ تا ۲۱ میلی‌متر در روز تغییر می‌کند. این یافته‌ها همچنین بیانگر تأثیرات مستقیم نوع کاربری زمین، ویژگی‌های پوشش گیاهی و شدت تابش خورشیدی بر میزان تبخیر و تعرق هستند.

کلمات کلیدی: سنجش از دور، تبخیر و تعرق، تصاویر ماهواره‌ای، دشت هندیکان، SEBAL، مدیریت آب

بخیر و تعرق فعال‌ترین فرآیند در چرخه هیدرولوژیکی است، این فرآیند ترکیبی از حذف آب از سطح خاک و آب (تبخیر) و از پوشش گیاهی (تعرق) است. تبخیر و تعرق واقعی برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و برای کاربردهای مختلف مانند پایش خشکسالی، مدیریت منابع آب، پایش آسیب‌پذیری آتش‌سوزی جنگل و پایش آبیاری کشاورزی مفید است. اندازه‌گیری میدانی (به عنوان مثال نسبت بوون، تشتک، لایسیمتر، همبستگی گردابی) تخمین دقیقی از تبخیر و تعرق ارائه می‌دهد، [۸] اما همچنین گران، زمان‌بر، محدود به داده‌های نقطه‌ای است و بنابراین نمی‌تواند تبخیر و تعرق تخمین زده شده در مناطق بزرگ را ارائه دهد. داده‌های سنجش از دور را می‌توان در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف برای نشان دادن توزیع مکانی و تغییرات تبخیر و تعرق برای انواع مختلف پوشش زمین استفاده کرد. مزیت دیگر استفاده از سنجش از دور برای تخمین تبخیر و تعرق این است که سایر فرآیندهای پویای هیدرولوژیکی نیازی به کمی‌سازی ندارند. بیشتر این روش‌ها برای تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش از دور مبتنی بر اصول تعادل انرژی هستند. روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق از طریق رویکرد تعادل انرژی وجود دارد، مانند الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین، سیستم تعادل انرژی سطحی، نقشه‌برداری تبخیر و تعرق با وضوح بالا و با کالیبراسیون مناسب (METRIC)، تعادل انرژی سطحی ساده‌شده (SSEBop)، تعادل انرژی دو منبعی (TSEB)، شاخص تعادل انرژی سطحی (SEBI)، شاخص تعادل انرژی سطحی ساده‌شده (S-SEBI) و مدل‌های دو منبعی (TSM). (SEBAL) دقت بهتری نسبت به METRIC دارد زیرا نتایج تخمین تبخیر و تعرق در تمام پوشش‌های زمینی به جز بدنه‌های آبی بیش از حد تخمین زده

می‌شود. سبال در مناطق مختلفی از جمله محیط‌های شهری، کشاورزی، رودخانه، دریاچه، حوضه و کوهستان مورد استفاده قرار گرفته است و از دقت بالایی برخوردار است. میانگین دقت سبال در ۳۰ کشور تحت شرایط آب و هوایی مختلف، در مقیاس میدانی برای یک روز ۸۵٪ و برای مقیاس فصلی ۹۵٪ و در حوزه‌های آبخیز بزرگتر ۹۶٪ بوده است. الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) یک روش تخمین مکانی تبخیر و تعرق مبتنی بر تعادل انرژی است که از الگوریتم‌های تحلیل تصویر مبتنی بر فیزیک تشکیل شده و به ورودی داده‌های هواشناسی بسیار کمی نیاز دارد [۴]. SEBAL از تصحیح داخلی خودکار و کالیبراسیون داخلی در هر تصویر تحلیل شده استفاده می‌کند [۷]. معایب اصلی این روش، مشخصات ذهنی داغ پیکسل نماینده و سرد برای محاسبه شار گرمای محسوس است [۱۴]. تفاوت در انتخاب پیکسل، اندازه دامنه و وضوح مکانی حسگرهای ماهواره‌ای بر H و ET حاصل از [SEBAL]، تأثیر می‌گذارد. الگوریتم SEBAL بر روی پارامترهای مختلف سطح زمین مانند آلودگی سطح، دمای سطح، قابلیت انتشار، شاخص پوشش گیاهی و پارامترهای تعادل انرژی، از وضوح‌های مکانی، طیفی و رادیومتری مختلف داده‌های ماهواره‌ای استفاده شد. بنابراین، دقت ET SEBAL باید آزمایش شود. تصاویر لندست ۸ یکی از داده‌های سنجش از دور است که می‌تواند برای تخمین پارامترهای مختلف سطح زمین استفاده شود. هرچه وضوح مکانی داده‌های سنجش از دور مانند MODIS کمتر باشد، مقدار تبخیر و تعرق تخمین زده شده کمتر از مقدار واقعی و مقدار خطا بیشتر است [۱۰]، لندست ۸ وضوح مکانی بالاتری دارد، بنابراین برای مناطقی که خیلی بزرگ نیستند و برای به حداقل رساندن مقدار خطاهای تخمین مناسب است. در هندوستان، اتکا به ایستگاه‌های هواشناسی در



شکل ۱- موقعیت مکانی محل مورد مطالعه

داده‌ها:

داده‌های سنجش از دور مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های لندست ۸ OLI/TIRS و SRTM بود. از لندست ۸ OLI برای به دست آوردن پارامترهای ورودی، یعنی پوشش زمین، قابلیت انتشار، آلبدو، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص سطح برگ (LAI) و زبری سطح استفاده شد. از لندست ۸ TIRS برای به دست آوردن دمای سطح استفاده شد. از SRTM به عنوان ورودی داده‌های ارتفاع استفاده شد. داده‌های ثانویه از ایستگاه‌های هواشناسی هندیجان است. از داده‌های هواشناسی برای محاسبه ET، ET SEBAL، ET Advection و Penman-Monteith و Dryity، یعنی دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی در روز و داده‌های تبخیر از تشت استفاده شد.

طبقه‌بندی پوشش زمین:

چندین کلاس کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه یافت شد. الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای به کار گرفته شد. برای به دست آوردن داده‌های پوشش زمین، طبقه‌بندی چندطیفی نظارت‌شده با استفاده از حداکثر احتمال اعمال شد. این روش مقدار احتمال را برای هر ورودی نمونه در نظر می‌گیرد، در حالی که روش دیگر فاصله را در نظر می‌گیرد طبقه‌بندی پوشش زمین به پوشش گیاهی با تاج بسته، پوشش گیاهی با تاج باز اشاره دارد.

جمع‌آوری داده‌های تبخیر و تعرق محدود است، زیرا تنها ۲ ایستگاه هواشناسی (برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود دارد. و تبخیر و تعرق توسط تشت تبخیر اندازه‌گیری می‌شود. منطقه مورد مطالعه از چهار حوزه آبخیز تشکیل شده است، بنابراین داشتن داده‌های مکانی تبخیر و تعرق برای برنامه‌ریزی مدیریت اکولوژیکی حوزه آبخیز مهم است. این مطالعه با هدف ارزیابی دقت ET تخمین زده شده بر اساس SEBAL با استفاده از تصاویر لندست ۸ انجام شد و تغییرات آن با توجه به پوشش‌های مختلف زمین در هندیجان تعیین شد. تبخیر و تعرق همچنین با استفاده از معادله پنمن-مونتیت تعیین شد و نتایج برای ارزیابی ET SEBAL مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شبکه آبیاری و زهکشی منطقه هندیجان به مساحت تقریبی ۵۰ هزار هکتار در فاصله ۱۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اهواز مرکز استان خوزستان است (شکل ۱-۳). ساحل راست محدوده در مختصات جغرافیایی طول شرقی ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۴۹ دقیقه و عرض شمالی ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده است. ساحل چپ محدوده در موقعیت ۱۵ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی و مابین ۴۰ درجه و ۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. زمین‌های کشاورزی نسبتاً مسطح در اطراف رودخانه هندیجان بوده که حداثه شهرهای امیدیه و هندیجان و در نزدیکی خلیج فارس قرار گرفته است.

مدل سبال:

سبال یک مدل مبتنی بر تصویر است که با استفاده از تصاویر سنجش از دور، تبخیر و تعرق (ET) سایر تبادلات انرژی در سطح زمین را محاسبه می‌کند [۱۴]. برای روش سبال برای تخمین تبخیر و تعرق، الزامات و آماده‌سازی داده‌های متعددی وجود دارد، از جمله تصاویر بدون ابر، سربرگ تصاویر، نقشه‌های کاربری اراضی و داده‌های هواشناسی و اقلیمی [۱۳]. تبخیر و تعرق یکی از فرآیندهای کلیدی این تعادل انرژی است، زیرا گرمای نهان (انرژی) برای تبخیر مورد نیاز است. تعادل انرژی، شار تابش خالص در سطح (Rn) روی سطح زمین است که شامل انرژی نهان تبخیر و تعرق واقعی (λE)، شار گرمای محسوس به هوا (H) و شار گرمای خاک (G) می‌شود [۶]

$$LE = Rn - G - H \quad (۱)$$

در طول مدل‌سازی فرآیند، ابتدا پارامترهای تعادل انرژی محاسبه شدند، از جمله آلبدو سطح روزانه، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده با خاک (SAVI)، شاخص سطح برگ (LAI) دمای سطح، ضریب انتشار، طول زبری مومنتوم (Zom) و غیره. عنصر اول انرژی خالص (Rn) است. این پارامتر به صورت زیر محاسبه شد:

$$(۲)$$

$$Rn = (1 - \alpha) \times R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon_0) \times R_L \downarrow$$

که در آن α آلبدوی سطح، $R_s \downarrow$ تابش موج کوتاه ورودی، $R_L \downarrow$ تابش موج بلند ورودی، $R_L \uparrow$ تابش موج بلند خروجی و ε_0 ضریب گسیلندگی پهن باند است. آلبدوی سطح با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

$$(۳)$$

$$\alpha_{TOA} = \frac{0,356\rho_2 + 0,130\rho_4 + 0,373\rho_5 + 0,085\rho_6 + 0,072\rho_6 - 0,0018}{0,356 + 0,130 + 0,373 + 0,085 + 0,072}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw2}} \quad (۴)$$

که در آن ρ باندهای ۲، ۴، ۵، ۶ هستند و مقادیر $\alpha_{path_radiance}$ ۰، ۳ استفاده می‌شود.

نسبت $\frac{G}{Rn}$ محاسبه و برای شرایط $NDVI < 0$ بررسی می‌شود؛ سپس نسبت $\frac{G}{Rn}$ برابر با ۰، ۵ تعیین می‌شود. تصویر حاصل با ضرب نسبت در Rn به شار گرمای خاک (G) به عنوان عنصر دوم تبدیل می‌شود.

$$(۵)$$

$\frac{G}{Rn} = \frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) \times (1 - 0,98 \times NDVI)$
پارامتر سوم H است. SEBAL از مقدار پیکسل‌های گرم و سرد در محاسبه dT برای تخمین H استفاده می‌کند. پیکسل «سرد» به عنوان یک سطح کشت مرطوب و به خوبی آبیاری شده با زمین کاملاً پوشیده از پوشش گیاهی انتخاب می‌شود. فرض می‌شود دمای سطح و دمای هوای نزدیک به سطح در این پیکسل مشابه باشند. پیکسل «گرم» به عنوان یک مزرعه کشاورزی خشک و لخت انتخاب می‌شود که در آن ET برابر با صفر فرض می‌شود. هر دوی این پیکسل‌ها باید در مناطق بزرگ و همگنی قرار گیرند که شامل بیش از یک پیکسل باند ۶ باشند.

$$[۱۱]$$

$$H = \rho \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (۶)$$

که در آن ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)، C_p گرمای ویژه هوا (۱۰۰۴ ژول بر کیلوگرم بر کلوین)، dT اختلاف دمای نزدیک سطح بر حسب کلوین (K)، مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما (lm/s) است.

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^n (ei - e)^2 / (N - 1)} \quad (۱۲)$$

که در آن ET مرجع (تبخیر از تشت، پنمن، AA) e تبخیر تعرق SEBAL، N تعداد نمونه است.

نتایج و بحث

طبقه‌بندی پوشش زمین

هر دو نقشه پوشش زمین توزیع مکانی یکسانی دارند. پوشش گیاهی در ضلع‌های غربی، مرکزی و جنوبی غالب بودند. نقشه‌برداری پوشش زمین با استفاده از روش حداکثر احتمال، نتایج نسبتاً دقیقی را با دقت کلی ۸۳٪ ارائه داد. کیفیت تصویر و دقت کاربر در گرفتن (ROI منطقه مورد نظر) به عنوان مناطق نمونه‌برداری، بر مقدار دقت طبقه‌بندی تأثیر داشت. برخی از ویژگی‌های پوشش زمین به دلیل پوشش ابر و سایه ابر که باعث خطا در نمونه‌برداری ROI و همچنین نتیجه دقت کلی می‌شد، نامشخص بودند. از آنجایی که داده‌های سنجش از دور مورد استفاده دارای تأخیر زمانی کوتاهی هستند، تغییر قابل توجهی در پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه رخ نداده است. و در ضلع جنوبی محدوده پوشش گیاهی غالب بود. از وسط تا جنوب آن پوشش گیاهی غالب بود. کارکردهای اصلی راضی کشاورزی می‌باشد، تأمین مقدار کافی و منظم آب، کاهش میزان حرکت خاک و تأمین منبع خوبی از آب آشامیدنی است جاری شدن سیل یا طغیان مداوم در بسیاری از مناطق اطراف کناره‌های حوزه آبخیز، نتیجه‌ی چیدمان نامناسب کاربری زمین است و یکی از دلایل آسیب به محیط زیست است [۶]. سیل در هندوستان ناشی از بارندگی زیاد است فاصله‌ی بالادست و پایین‌دست رودخانه نزدیک به هم است، به طوری که آب از بالادست به سرعت جریان می‌یابد. شکل ۲ نشان می‌دهد که بالادست تحت سلطه‌ی پوشش گیاهی است، منطقه‌ی ساخته‌شده ظرفیت جذب کمی دارد و پتانسیل سیل‌های ناگهانی را افزایش می‌دهد.

شار گرمای نهان، نرخ اتلاف گرمای نهان از سطح به دلیل تبخیر و تعرق است و سپس برای محاسبه کسر تبخیر لحظه‌ای Λ استفاده می‌شود. [۶]

$$(\lambda ET = Rn - G - H) \quad (۷)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{Rn - G} \quad (۸)$$

$$ET = \frac{86400 \times 10^3}{\lambda \rho_w} \times \Lambda R_n \quad (۹)$$

که در آن گرمای نهان تبخیر (۱۰۶×۲،۴۵ J/Kg) است.

نتایج الگوریتم‌های SEBS و SEBAL مقایسه ET SEBAL با داده‌های تبخیر از تشت، تبخیر و تعرق مرجع پتانسیل محصول با استفاده از معادله فائو پنمن مانتیس و ET با استفاده از معادله Advection Aridity اعتبارسنجی شدند. Penman-Monteith و Advection Aridity بر اساس داده‌های هواشناسی محاسبه شدند.

(۱۰)

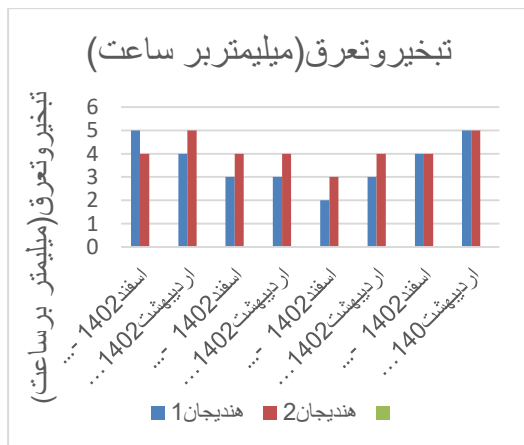
$$ET_{Penman} = \frac{0,408 \Delta Rn + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (۱۱)$$

$$ET_{AA} = (2a_e - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_{ne} - \frac{\gamma}{\Delta - \gamma} \times (f(\bar{u}_r)(e_s - e_a))$$

که در آن Rn تابش خالص خورشیدی بالای سطح گیاه (MJ/m²/hari)، T میانگین دمای روزانه هوا (°C)، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s) فشار بخار آب اشباع (kPa) فشار واقعی بخار آب (kPa/°C) شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما (kPa/°C)، γ ثابت روان‌سنجی (kPa/°C) نسبت Q_{ne} بین Rn و λ و $\bar{u}_r$ میانگین سرعت باد است.

برای ارزیابی SEBAL تبخیر و تعرق، جذر میانگین مربعات خطا RMSE برای تأیید مدل به شرح زیر احصا شدند. [۵]

نزدیک هستند، بنابراین مقادیر مرجع تبخیر و تعرق معمولاً مشابه هستند.



شکل ۳- مقایسه پارامترها در ایستگاه همجوار

داده‌های تصویری که قبلاً ذکر شد برای محاسبات RMSE استفاده شد. جدول ۱ نشان می‌دهد که مقدار RMSE ET SEBAL در هر ایستگاه به جز تبخیر SEBAL-تشت در ایستگاه هواشناسی ۲ کمتر از ۱ میلی‌متر در روز است. مقدار تبخیر از تشت در ایستگاه هواشناسی ۲ بسیار بالا بود زیرا موقعیت ایستگاه نزدیک به خلیج فارس است. سرعت باد و دمای بالاتر باعث شده است که مقدار تبخیر بیشتر از سایر ایستگاه‌ها باشد. مقدار دقت پارامترهای نتیجه ورودی برای پردازش SEBAL و داده‌های مرجع مورد استفاده بر مقدار RMSE تأثیر داشته است. هرچه دقت پارامترهای ورودی بیشتر باشد، دقت ET SEBAL نیز بیشتر است. از آن SEBAL-AA کمترین مقدار RMSE را دارد و پس از آن SEBAL-پنمن قرار دارد و آخرین مورد تبخیر SEBAL-تشت بود.



شکل ۲- پوشش منطقه

ارزیابی تبخیر و تعرق SEBAL با تبخیر از تشت، پنمن-ماتیت

نتایج محاسبه تبخیر و تعرق سیال برای تعیین دقت آن با استفاده از (تبخیر از تشت، پنمن و AA) مورد آزمایش قرار گرفت. هرچه مقدار RMSE داده‌های مقایسه‌ای کمتر باشد، خطای تخمین ET SEBAL کمتر است. آزمایش دقت با استفاده از داده‌های ایستگاه انجام شد. شکل ۳ نموداری از مقادیر تبخیر از تشت، پنمن، AA و SEBAL را در دو ایستگاه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تخمین ET SEBAL کمتر از مقادیر تبخیر از تشت و AA بود، اما بیشتر از پنمن بود. داده‌های تشت تبخیر، داده‌های تبخیر آب اندازه‌گیری شده در تشت تبخیر است، بنابراین نشان دهنده مقدار تبخیر در پوشش گیاهی نیست. تبخیر و تعرق با استفاده از لایسیمتر و شار برج اندازه‌گیری شد، با این حال، دسترسی به این ابزارها محدود است. از تشت تبخیر برای آزمایش دقت تخمین تبخیر و تعرق در مطالعات مختلف روش‌های تعادل انرژی با استفاده از داده‌های سنجش از دور استفاده شد زیرا می‌تواند مقدار تبخیر و تعرق را نشان دهد ایستگاه هواشناسی ۱ و ایستگاه هواشناسی ۲ به یکدیگر

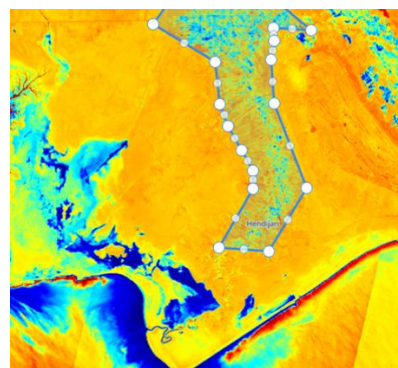
جدول ۱- محاسبه RMSE برای ایستگاهها براساس

روشهای مختلف

متوسط	ایستگاه ۲	ایستگاه ۱	Root Mean Square Error (RMSE)
۰,۶۰	۰,۴۵	۰,۷۵	SEBAL-Pan evaporation
۰,۴۹	۰,۲۷	۰,۷۱	SEBAL-Penman
۰,۶۵	۰,۷۵	۰,۵۵	SEBAL-AA

تغییرات مکانی تبخیر و تعرق واقعی SEBAL

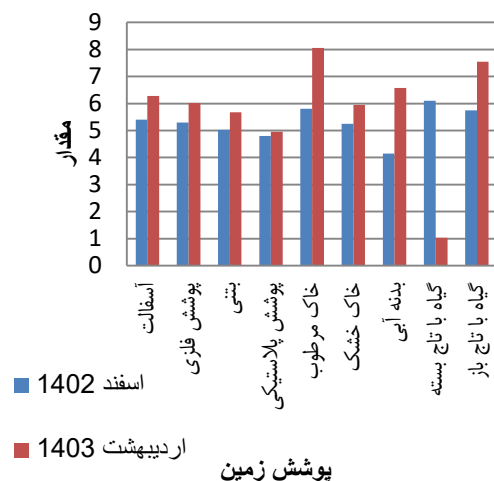
ET در ۲۰ اسفند مقدار کمتری معادل ۰-۶,۹ میلی‌متر در روز داشت، در حالی که در ۱۱ اردیبهشت این مقدار ۰-۱۴,۷ میلی‌متر در روز بود. شکل ۴ نشان می‌دهد که توزیع ET در هر دو تاریخ ثبت مشابه است، یعنی در سمت جنوبی مقدار ET بالاتر است زیرا پوشش گیاهی غالب است، در سمت شمالی مقدار ET پایین‌تر است زیرا مناطق بیابانی غالب هستند. از آنجایی که تابش کم بر مقدار RN تأثیر می‌گذارد و شار گرما را کاهش می‌دهد، مقدار ET SEBAL در ماه مرطوب (۲۰ اسفند) کمتر از ماه خشک (۱۱ اردیبهشت) بود. تفاوت در فصل و آب و هوا تأثیر قابل توجهی بر نتایج تخمین ET که از داده‌های هواشناسی در مدل‌سازی استفاده می‌کند، نداشت [۱۲]. مطالعه قبلی نشان داد که اگر مقادیر تابش، بارندگی و NDVI^۱ بالا باشند، مقدار ET در فصل بارانی بالا است [۳].



شکل ۴- نقشه تبخیر و تعرق سیبال منطقه مورد مطالعه

تبخیر و تعرق واقعی انواع پوشش زمین

شکل ۵ در زیر نموداری از میانگین مقدار ET SEBAL را در هر پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقدار ET SEBAL از بالاترین به پایین‌ترین به ترتیب پوشش گیاهی بسته - خاک مرطوب، پوشش گیاهی باز - خاک خشک - است. تاج بسته به دلیل تبخیر همزمان خاک و پوشش گیاهی، مقدار ET بالاتری نسبت به اجسام آبی دارد، در حالی که فقط تبخیر در اجسام آبی رخ می‌دهد [۱۳]، خاک مرطوب به دلیل جسم خاک مرطوب در مزرعه، مزارع برنج با پوشش گیاهی غرق در آب، مقدار ET بالاتری نسبت داشت، به طوری که تبخیر در خاک، پوشش گیاهی رخ می‌داد. هرچه پوشش گیاهی، آب و اجسام نفوذناپذیر بیشتر باشد، مقدار ET بیشتر است. آب‌های سطحی باید مقدار ET بالاتری نسبت به منطقه ساخته شده داشته باشند، اما تخمین ET SEBAL آب، مقدار ET کمتری نسبت به منطقه داشت. ET SEBAL آب مقدار کمی داشت زیرا نسبت G/RN برابر با ۰,۵ محاسبه شد که منجر به مقدار G بالا هنگام اندازه‌گیری با مقدار RN بالا می‌شود. مقدار G بالای آب باعث مقادیر LE و ET پایین‌تری نسبت به سایر پوشش‌های زمینی می‌شود.



■ اسفند ۱۴۰۲

■ اردیبهشت ۱۴۰۳

پوشش زمین

شکل ۵- مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق پوششهای موجود

¹ Normalized Difference Vegetation Index

نتیجه گیری

مدل SEBAL در تاریخ ۲۰ اسفند ۱۴۰۲ و ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۳ می تواند به خوبی در هنديجان و اطراف آن که با میانگین RMSE کمتر از ۲ میلی متر در روز با روش پنمن-مونتیث مشخص شده است، اعمال شود. تخمین ET SEBAL از ۲۰ اسفند ۱۴۰۲ مقدار ET کمتری نسبت به ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۳ دارد، اما توزیع آنها مشابه است. شهر هنديجان کمترین مقدار ET را داشت زیرا تحت سلطه مناطق ساخته شده، یعنی پشت بام فلزی، بتن، آسفالت، کاشی سقفی است. در حالی که ضلع جنوبی مقدار ET بالایی داشت زیرا تحت سلطه پوشش گیاهی است. هرچه پوشش گیاهی، آب و ضد آب بودن بیشتر باشد، مقدار ET بیشتر است.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان آب و برق خوزستان و ادارات جهاد کشاورزی و هواشناسی هنديجان کمال تشکر و قدردانی می نمایم.

منابع

- [4] Chang, F.J., Lai, J.S. and Koa, L.S. (2003). Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir, *Hydrological Processes*, 17 (8), 1623-1640.
- [5] Chang, L.C., and Chang, F.L. (2001). Intelligent control for modelling of real-time reservoir operation, *Hydrological processes*, 15(9), 1621-1634.
- [6] Chaturvedi, M.C. and Kheper, S.D. (1982). Optimum cropping and ground water management, *Water Resour. Bull.*, Vol. 18, PP: 655-660.
- [7] Chau, k. (2007). A Split-Step PSO Algorithm in Prediction of Water Quality. *Advances in Neural Networks – ISNN. Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3498/2005, 982, DOI: 10. 1007/11427469- 164.
- [8] Y. A. Liou and S. K. Kar, "Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review," *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 2821–2849, 2014, doi: 10.3390/en7052821.
- [9] S. H. Mahmoud and A. A. Alazba, "A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia," *J. Asian Earth Sci.*, vol. 124, pp. 269–283, 2016, doi: 10.1016/j.jseaes.2016.05.012.
- [10] Z. Sun, B. Wei, W. Su, W. Shen, C. Wang, and D. You, "Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China," *Math. Comput. Model.*, vol. 54, no. 3–4, pp. 1086–1092, 2011, doi: 10.1016/j.mcm.2010.11.039.
- [11] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-
- [۱] احمد الی، خ، حسینی پژوه، ن. گ، و لیاقت، ع. (۱۳۹۴). تعیین زمان بهینه کشت گندم دیم در استان کردستان. پژوهش های کاربردی زراعی (پژوهش و سازندگی)، (۱۰۹)، ۹-۱۸.
- [۲] آذر افزا، ه، رضایی، ح، بهمنش، ج. و بشارت، س. ۱۳۹۱. مقایسه نتایج به کارگیری الگوریتم های PSO، GA و SA در بهینه سازی سیستم های تک مخزن (مطالعه موردی: سد شهرچای، ارومیه). نشریه آب و خاک، ۲۶(۵): ۱۱۰۸-۱۱۰۱.
- [۳] اسفان، م، مطیع قادر، ح. و لطفی، ش. ۱۳۸۹. مروری بر برخی از روش های بهینه سازی هوشمند. دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر.

evapotranspiration,” *J. Imaging*, vol. 3, no. 3, 2017, doi: 10.3390 /jimaging 3030030.

- [15] F. D. D. Arraes, M. G. da Silva, E. G. C. Junior, J. B. Oliveira, and E. R. F. Lêdo, “Estimativa da evapotranspiração e umidade do solo usando dados de sensores orbitais em área irrigada,” *Congr. Norte*
- FAO Irrigation and drainage,” *Irrig. Drain.*, vol. 300, no. 56, p. 300, 1998, doi
- [12] R. . Smith, “The heat budget of the earth ’ s surface deduced from space,” *Terrain*, no. 0, pp. 1–10, 2010.
- [13] M. Van Noordwijk et al., “Agroforestry and watershed functions of tropical land use mosaics,” 2003.
- [14] G. Papadavid et al., “Using SEBAL to investigate how variations in climate impact on crop

Abstract

Water resources management in agriculture is of particular importance, especially in arid and semi-arid regions such as the Handijan Plain in Khuzestan Province. One of the most important hydrological indicators for optimal irrigation planning, determining plant water requirements, and increasing productivity is actual evapotranspiration (ET_a). Accurate estimation of this parameter can play a significant role in improving water resources management. Traditional methods of measuring evapotranspiration, such as using lysimeters, are expensive and time-consuming, and provide limited information at the point scale; in contrast, the use of satellite data such as Landsat 8 images allows for the estimation of evapotranspiration at the regional scale. In this study, the SEBAL algorithm was used on satellite images to assess actual evapotranspiration in the Handijan Plain and improve water resources management for rainfed agriculture. Using this algorithm, the surface energy balance components including net radiation flux (R_n), soil heat flux (G), and sensible heat flux (H) were estimated, and then evapotranspiration was calculated using the energy balance equation. The results showed that evapotranspiration in this region depends on several factors including vegetation distribution, crop type, and cultivation time. Studies have shown that the hourly evapotranspiration rate in the Handijan Plain varies between 0 and 1.1 mm/h, while the daily value of this index varies between 0 and 21 mm/day. These findings also indicate the direct effects of land use type, vegetation characteristics, and solar radiation intensity on evapotranspiration rate.

Keywords: Remote sensing, evapotranspiration, satellite imagery, Handijan Plain, SEBAL, water management