

صص ۳۷-۱۷

ارزیابی و مقایسه میزان برآورد تبخیر و تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال و روش پنمن - مانتیث در منطقه چاه نیمه‌های سیستان و بلوچستان

احمد رئیسی

کارشناس ارشد گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

غلامعلی مظفری*

استاد گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

حمیدرضا غفاریان مالمیری

دانشیار گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲

چکیده

برآورد میزان آب مصرفی گیاه یا تبخیر و تعرق برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی، توازن هیدرولوژیکی و همچنین تخمین تقریبی عملکرد محصول ضرورت دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین تبخیر و تعرق در مقیاس‌های کوچک با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی مانند لایسیمتر وجود دارد که از دقت بالایی برخوردار هستند، اما در این پژوهش از روش‌های مبتنی بر دورسنجی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. بنابراین در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست ۸ برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ استفاده شده و نتایج به دست آمده از روش مبتنی بر سنجش از دور (سبال) با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی زهک به منظور برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیث مقایسه شد. با استفاده از شاخص‌های آماری مانند خطای نسبی و ضریب تبیین به بررسی توانایی و عملکرد الگوریتم سبال پرداخته شد. مقایسه نتایج نشان داد تبخیر و تعرق به دست آمده به روش سبال دارای مطابقت قابل قبولی با تبخیر و تعرق برآورد شده از روش پنمن-مانتیث است و اختلاف معنی داری بین دو روش محاسبه شده وجود ندارد. بدین صورت که مقادیر شاخص‌های آماری در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ برای ضریب تبیین به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۹۵، برای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب دارای مقادیر ۲/۱۵ و ۱/۲۷ و همچنین میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب دارای مقادیر ۱/۴۹ و ۱/۱۱ و در نهایت متوسط خطای اریب (MBE) به ترتیب دارای مقادیر ۰/۲۷ و ۰/۰۹ است، نتایج حاکی از دقت قابل قبول الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد.

واژگان کلیدی: تبخیر و تعرق، الگوریتم سبال، پنمن-مانتیث، سنجش از دور

مقدمه

افزایش جمعیت و کمبود منابع آب در سال‌های اخیر، بخش کشاورزی را با چالش‌های عمده‌ای در جهت تأمین نیازهای غذایی مردم و نیل به خودکفایی روبرو ساخته است (امینی و همکاران، ۱۳۹۱؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق به منظور انجام محاسبات و برنامه‌ریزی‌های مربوط به نیاز آبی محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است (بیات ورکشی و همکاران، ۱۳۸۷؛ قمرنیا و همکاران، ۱۳۸۹). تبخیر-تعرق یکی از عوامل مهم بیلان آب در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین می‌باشد و برآورد آن در زمینه‌های مختلف علمی همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است. در اغلب روش‌هایی که تاکنون برای تخمین تبخیر-تعرق ارائه شده است از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای استفاده شده، لذا فقط مناسب مناطق محلی بوده و قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشد (Teixeira et al., 2009). سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر-تعرق واقعی را تخمین زده و حتی توزیع مکانی و زمانی آن را مورد بررسی قرار دهد (Franks and Beven., 1999). مدل‌های تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های سنجش از دور را می‌توان به عنوان روش رگرسیون تجربی ساده (Jackson et al., 1977) و روش باقیمانده تعادل انرژی سطح طبقه بندی کرد. علاوه بر این، روش باقیمانده تعادل انرژی سطحی را می‌توان به مدل‌های تک منبع و مدل‌های دو منبع تقسیم کرد (Li et al., 2009) که جزئیات بیشتر در مورد این مدل‌ها در مقاله مروری جامع در مورد روش‌های فعلی برای تخمین تبخیر و تعرق منطقه‌ای از داده‌های سنجش از دور توسط لی و همکاران (۲۰۰۹) در دسترس است. الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL) الگوریتمی است که در اکثر نقاط دنیا برای برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای گرمایی در سطح مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت بخشی داشته است. تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است که همه نشان‌دهنده کارایی الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای و حوزه‌های بزرگ می‌باشد (Bastiaanssen., 2000). در پژوهشی اسدی و کرمی (۱۳۹۷) به برآورد میزان تبخیر و تعرق در استان فارس با استفاده از شاخص‌های تجربی پرداختند. که در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک منطقه (آمار روزانه دما، رطوبت، بارش، سرعت باد، فشار، و تشعشع خورشیدی و ...) در سری زمانی ۲۰۱۵-۱۹۹۵ برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مراحل مختلف رشد با استفاده از روش‌های تورنت وایت، پنمن مانیتیت و هارگریوز-سامانی استفاده شد. نتایج به دست آمده از بررسی خروجی نشان داد که با کاهش عرض جغرافیایی بر میزان تبخیر و تعرق افزوده شده و مناطق جنوب و جنوب شرقی منطقه به همراه مرکز منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین میزان تبخیر و تعرق نسبت به ایستگاه‌های مجاور خود بودند. نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی کارایی تصاویر ماهواره‌ای مودیس در برآورد تبخیر و تعرق شالیزارهای شهرستان رشت پرداختند که در این پژوهش از الگوریتم سبال به منظور برآورد تبخیر و تعرق گیاه مورد استفاده قرار گرفت که در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مودیس با

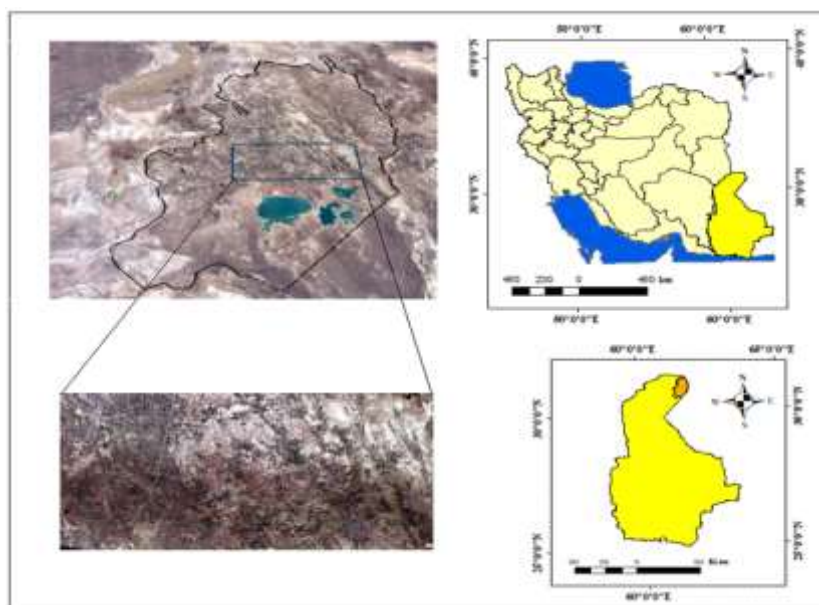
Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

دوره زمانی ۶ ماهه طول رشد گیاه برنج استفاده شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که سنجنده مودیس از دقت متوسطی برای برآورد تبخیر و تعرق برخوردار می‌باشد. اکبرزاده و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از تصاویر مودیس در منطقه سیستان و بلوچستان به برآورد میزان تبخیر پرداختند در نتیجه میزان تبخیر روزانه با تفکیک مکانی 250×250 متر با دقت قابل قبول به دست آمد. از روش تشتک تبخیر به عنوان روش مرجع استفاده شد. در مقایسه نقطه‌ای نتایج مدل SEBAL با روش تشتک، ضریب همبستگی مدل R، 0.74 و میانگین درصد خطای کل $14/5 \pm$ و RMSE مقادیر روزانه، بین ۱۵ تا ۲۵ درصد مقادیر کل می‌باشد. راوات و همکاران (۲۰۱۷)، به تخمین تبخیر-تعرق واقعی محصول گندم با استفاده از الگوریتم سبال و روش استاندارد شده پنمن-مانتیت، و مقایسه با نتایج لایسیمتر در منطقه بیوانی در هاریانا پرداختند. نتایج پژوهش حاکی از آن است که الگوریتم سبال پتانسیل خوبی برای برآورد تبخیر-تعرق منطقه مورد مطالعه دارد. همچنین، نتایج این آنالیز نشان داد مقدار بارش کافی و در دسترس بودن آب به تولید بیشتر گندم و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق منجر می‌شود (Rawat et al., 2017). زنگ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای ET روزانه سرار تایلد را به وسیله مشاهدات ماهواره‌ای و الگوریتم ET Monitor مورد ارزیابی قرار دادند، که این الگوریتم بیشتر برای سنجش از دور حرارتی بهبود یافته است. نتایج این پژوهش نشان داد که با ریشه خطای میانگین مربعات $1/0.8$ و $1/5.8$ ، مطابقت خوبی بین ET روزانه تخمین زده شده و ET مشاهداتی وجود دارد. و همچنین ET در تغییرات فصلی نوسان زیادی دارد که علت آن عمدتاً آب و هوای موسمی می‌باشد. نما و همکاران (۲۰۲۰) تخمین تبخیر و تعرق در هیمالیاهای کوچک با استفاده از سنجش از راه دور و الگوریتم تعادل انرژی را مورد بررسی قرار دادند که در این پژوهش از داده‌های هواشناسی و داده‌های ماهواره‌ای (داده‌های ارتفاعی و شاخص‌های NDVI, SAVI و درجه حرارت سطحی، گسیلمندی و آلبدو) استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد ET تخمین زده شده متریک را با ET تعیین شده به وسیله روش پنمن-مانتیت و ضرایب زراعی مورد قیاس قرار دادند که دارای میانگین خطای 0.95 میلی متر در روز است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، بدین ترتیب در منطقه سیستان و بلوچستان از روش تعادل انرژی تعادل سطح به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاه گندم و از روش پنمن-مانتیت برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع، دلیل انتخاب این روش آن است که برآوردی دقیق از تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مکان تحت بررسی ارائه داده، و همچنین مبنای فیزیکی داشته و عوامل فیزیولوژیک و آنرویدینامیک را، به طور صریح، با یکدیگر ترکیب می‌کند و به علاوه، روش‌هایی نیز برای برآورد پارامترهای غیر موجود هواشناسی ارائه داده است. از آنجایی که بیشتر این منطقه را زمین‌های کشاورزی تشکیل داده‌اند و تاکنون مطالعه‌ای با روش سبال صورت نگرفته، و روش‌های نقطه‌ای برآورد تبخیر و تعرق هزینه بر و زمان بر می‌باشند بنابراین در این پژوهش به برآورد تبخیر و تعرق به روش سنجش از دوری پرداخته شد.

داده‌ها و روش‌ها

نوع پژوهش کاربردی و روش آن توصیفی-تحلیلی است. پهنه جغرافیایی مورد مطالعه منطقه چاه نیمه‌ها ی شهرستان زهک در سیستان واقع در شمال استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. این شهرستان از شرق و جنوب شرق به کشور افغانستان، و از شمال و غرب با شهرستان زابل همجوار است. موقعیت جغرافیایی این شهرستان در نقشه ۳۰/۸۹۴۴ درجه شمالی و ۶۱/۷۰۶۷ درجه شرقی می‌باشد (شکل ۱).



مآخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان زهک

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش:

داده‌های هواشناسی:

از داده‌های هواشناسی (میانگین سرعت باد روزانه، دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، سرعت باد، آلوده، آخرین روز متوالی سال به صورت روزانه، دمای نقطه شبنم، رطوبت) ایستگاه هواشناسی زهک مربوط به سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع و نیاز آبی گندم به روش پنمن مانیتیت استفاده گردید.

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

برای انجام این پژوهش، از تصاویر ماهواره لندست ۸، سنجنده OLI_TIRS قابل دسترس در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ استفاده شد (جدول ۱). ۲۴ تصویر در سال‌های مدنظر دانلود شده است. از آن جهت که نشان دادن روند تبخیر و تعرق یک دوره زمانی از اهداف این پژوهش به شمار می‌رود، لذا تصاویر مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ که پراکنش مناسبی را از دید زمانی داشتند انتخاب و طبق الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل برآورد گردید. در نهایت نتایج تبخیر و تعرق حاصل از روش سنجش از دور (الگوریتم سبال) با نتایج تبخیر تعرق محاسبه شده توسط روش‌های معمول (پنمن مانتیث) با توجه به شاخص‌های آماری مقایسه گردید. مشخصات تصاویر استفاده شده در برآورد تبخیر تعرق شهرستان زهک در جدول (۱) آورده شده است.

تصاویر ماهواره‌ای اغلب به صورت خام به کاربران ارائه می‌شود و برای بکارگیری آن‌ها در مطالعات مختلف باید تصحیحات لازم (اتمسفیری و رادیومتریکی) بر روی آن‌ها صورت بگیرد. تصحیح اتمسفیری به علت اثر جو بر بازتاب حاصل از پدیده‌های سطح زمین و اثر آن بر نتیجه بدست آمده از شاخص‌های گیاهی، در مرحله پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای یکی از مراحل اساسی می‌باشد. این اصل در استفاده از تصاویر چند زمانه به علت تفاوت در شرایط جوی، تغییر در زاویه تابش خورشید در هنگام تصویر برداری برای پی بردن به تغییرات واقعی اهمیت بیشتری می‌یابد. به منظور کاهش اثر جو در تصاویر چند زمانه از الگوریتم‌های مختلف تصحیح اتمسفیری و نرمال سازی رادیومتریکی استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر از روش کوئیک اتمسفیری (QUAC) Atmospheric Quick Correction برای تصحیح تصاویر استفاده گردید. در این مطالعه به دلیل تعداد زیاد نقشه‌ها تنها خرداد ماه به عنوان نمونه برای نشان دادن پارامترهای ضروری برای محاسبه الگوریتم سبال انتخاب شد.

جدول ۱: مشخصات تصاویر استفاده شده جهت برآورد تبخیر و تعرق

ردیف	تاریخ تصویربرداری (شمسی)	تاریخ تصویربرداری (میلادی)	زمان تصویربرداری گرینویچ	زمان تصویربرداری محلی	نوع سنجنده
۱	۱۳۹۶/۰۱/۳۰	۲۰۱۷/۴/۳	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۲	۱۳۹۶/۰۲/۱۵	۲۰۱۷/۵/۵	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۳	۱۳۹۶/۰۳/۱۶	۲۰۱۷/۶/۶	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۴	۱۳۹۶/۰۴/۱۷	۲۰۱۷/۷/۸	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۵	۱۳۹۶/۰۵/۱۸	۲۰۱۷/۸/۹	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۶	۱۳۹۶/۰۶/۱۹	۲۰۱۷/۹/۱۰	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۷	۱۳۹۶/۰۷/۲۰	۲۰۱۷/۱۰/۱۲	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۸	۱۳۹۶/۰۸/۲۲	۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۹	۱۳۹۶/۰۹/۰۸	۲۰۱۷/۱۱/۲۹	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۰	۱۳۹۶/۱۰/۱۰	۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۱	۱۳۹۶/۱۱/۱۲	۲۰۱۸/۲/۱	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۱۲	۱۳۹۶/۱۲/۱۴	۲۰۱۸/۰۳/۱۵	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۱۳	۱۳۹۸/۱/۲۰	۲۰۱۹/۴/۹	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۱۴	۱۳۹۸/۲/۵	۲۰۱۹/۴/۲۵	۰۶:۲۵	۱۰	OLI_TIRS
۱۵	۱۳۹۸/۳/۶	۲۰۱۹/۵/۲۷	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۶	۱۳۹۸/۴/۲۳	۲۰۱۹/۷/۱۴	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۷	۱۳۹۸/۵/۸	۲۰۱۹/۷/۳۰	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۸	۱۳۹۸/۶/۹	۲۰۱۹/۸/۳۱	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۱۹	۱۳۹۸/۷/۲۶	۲۰۱۹/۱۰/۱۸	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۲۰	۱۳۹۸/۸/۱۲	۲۰۱۹/۱۱/۳	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۲۱	۱۳۹۸/۹/۱۴	۲۰۱۹/۵/۱۲	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۲۲	۱۳۹۸/۱۰/۱۶	۲۰۲۰/۱/۶	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۲۳	۱۳۹۸/۱۱/۱۸	۲۰۲۰/۲/۷	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS
۲۴	۱۳۹۸/۱۲/۲۰	۲۰۲۰/۳/۱۰	۰۶:۲۶	۱۰:۱	OLI_TIRS

مأخذ: نگارندگان

روش برآورد تبخیر و تعرق با داده‌های سنجش از دور

روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته است که هر یک دارای پیچیدگی خاص خود می‌باشند. الگوریتم روش‌های مبتنی بر توازن انرژی سطح (SBE) بر ترکیب مدل‌های تجربی و فیزیکی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده، استوار است. بنابراین بیشتر مدل‌های کاربری (از قبیل S-SEBI، SEBAL، METRIC، TSEB) با استفاده مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای میزان اختلاف دمای هوا و دمای زمین را محاسبه و به‌طور غیر مستقیم تبخیر- تعرق گیاه را محاسبه می‌نمایند. تخمین میزان تبخیر- تعرق مرجع (متناظر با گرمای نهان تبخیر LE) از طریق سنجش از دور، بر ارزیابی توازن انرژی خصوصیات سطوح مختلف از قبیل ضریب آلوده، شاخص سطح برگ، پوشش

¹Surface Energy Balance (SEB)

Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

گیاهی و دمای سطح (Ts) استوار می‌باشند. در واقع در این روش‌ها شار گرمای نهان که به مصرف تبخیر و تعرق می‌رسد، بر اساس مقدار باقیمانده انرژی از معادله (۱) به دست می‌آید.

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

در رابطه فوق، ET تبخیر-تعرق، λ گرمای نهان تبخیر، λET شار گرمای نهان، R_n تابش خالص خورشیدی، H شار گرمای محسوس و G شار گرمای خاک می‌باشد (فرامرزی، ۱۳۹۳).

الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL)

این الگوریتم را نخستین بار ویم باستیانس (۲۰۰۱) در کشور هلند ابداع کرد و آلن و همکاران (۲۰۰۲) آن را بازنگری کردند. در این روش تبخیر و تعرق واقعی از طریق تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی با استفاده از بیلان انرژی سطح محاسبه می‌شود. تعادل انرژی سطح با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آب و هوا طبق معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

در این معادله، λE = جریان گرمای نهان (w/m^2)، R_n = جریان تابش خالص در سطح (w/m^2)، G = جریان گرمای خاک (w/m^2) و H = جریان گرمای محسوس هوا (w/m^2) است.

شار تابش خاص خورشیدی

جریان تابش در سطح (R_n)، نشان‌دهنده انرژی تشعشع واقعی در دسترس روی سطح زمین می‌باشد. که در معادله (۲) بیلان انرژی تابش سطحی آورده شده است:

$$R_n = R_{L\downarrow} - (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\uparrow} - \epsilon_0 R_{L\downarrow} \quad (3)$$

در این رابطه، $R_{s\downarrow}$ = تابش ورودی با طول موج کوتاه (w/m^2)، α = آلبیدو سطحی (بدون بعد)، $R_{L\downarrow}$ = تابش ورودی با طول موج بلند (w/m^2)، $R_{L\uparrow}$ = تابش خروجی با طول موج بلند (w/m^2) و ϵ_0 = قابلیت انتشار گرمای سطحی (بدون بعد) است.

شار گرمای خاک

شار گرمای خاک نسبتی از ذخیره گرمایی درون خاک و پوشش گیاهی به علت هدایت الکتریکی می‌باشد. ابتدا در سیال نسبتاً G/R_n با استفاده از معادله‌های تجربی توسعه یافته به وسیله باستیانس (۲۰۰۰) محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده مقادیر نسبتاً متوسط می‌باشد.

$$G/R_n NDVI^4 0.98 - (1T_s/a(0.0038a + 0.0074a^2)) = \quad (4)$$

در این رابطه، T_s = دمای سطحی c ، a = آلبدوی سطحی، NDVI = شاخص تفاوت پوشش گیاهی استاندارد شده $G =$ با چند جمله‌ای G/R_n توسط مقادیری که در مدل F05 برای R_n محاسبه شده است، حساب می‌گردد.

شار گرمای محسوس

نسبتی از گرمای از دست رفته به هوا با انتقال گرما و هدایت هیدرولیکی می‌باشد که این عمل به علت تفاوت دما است. شار گرمای محسوس با استفاده از معادله (۵) برای انتقال گرما محاسبه می‌گردد.

$$H = (\rho \times c_p \times dT)/R_{ah} \quad (5)$$

در این رابطه، ρ = چگالی هوا kg/m^3 ، c_p = گرمای ویژه هوا (1004 J/Kg/k)، dT = اختلاف دما ($T_1 - T_2$) بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 و R_{ah} = مقاومت آئروودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. شار گرمای محسوس (H) تابعی از شیب دما، زبری سطح و سرعت باد می‌باشد.

شار گرمای نهان

شار گرمای نهان، نرخ از دست رفتن گرمای نهان برای سطح آب علت تبخیر و تعرق می‌باشد. برای هر پیکسل با استفاده از رابطه (۶) می‌توان محاسبه کرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (6)$$

λET : نشان دهنده مقدار لحظه‌ای برای زمان گذر ماهواره (m/m^2) می‌باشد.

شار گرمای نهان و تبخیر-تعرق لحظه‌ای

شار گرمای نهان، میزان هدر رفت گرما از سطح به علت فرآیند تبخیر و تعرق می‌باشد که با استفاده از معادله (۲-۴۹) بدست می‌آید. از آنجا که مقادیر شار تابش خالص (R_n)، شار گرمای محسوس (H) و شار گرمای خاک (G) که تاکنون به دست آمده مقادیر لحظه‌ای و برای زمان گذر ماهواره می‌باشند، مقدار شار گرمای نهان (λET) نیز به صورت لحظه‌ای است. λET مقداری است که توسط تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید. بنابراین مقدار عددی λ باید محاسبه شود تا با تقسیم عدد مربوط در هر پیکسل، مقدار ET به دست آید. با استفاده از شار گرمای نهان لحظه‌ای، مقدار ET لحظه‌ای به صورت زیر به دست می‌آید.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (7)$$

Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

که ET_{inst} مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان تبخیر (J/Kg) و عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل زمان از ثانیه به ساعت می‌باشد. مقدار λ از معادله (۸) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 237.15)] \times 10^6 \text{ (۸)}$$

کسر تبخیر - تعرق مرجع ($ET_r F$)

کسر تبخیر-تعرق مرجع به صورت تبخیر-تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) محاسبه شده برای هر پیکسل (mm/hr) به تبخیر-تعرق مرجع (ET_r) محاسبه شده از داده‌های هواشناسی برای زمان تصویر (mm/hr) تعریف می‌شود.

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (۹)$$

$ET_r F$ مشابه ضریب گیاهی (K_c) بوده و برای برون یابی ET از زمان تصویر به دوره ۲۴ ساعته یا طولانی‌تر استفاده می‌شود. مقدار $ET_r F$ عموماً بین ۰ و ۱ متغیر است، به طوری که در پیکسل کاملاً خشک مقدار $ET=0$ و $ET_r F = 0$ در پیکسل سرد در صورتی که در مزرعه یونجه یا ذرت واقع شده باشد ET آن تا اندازه‌ای بیشتر از ET_r است و بنابراین $ET_r F > 1$ (بنابراین احتمالاً ۱/۱) می‌باشد. مقادیر منفی برای $ET_r F$ به علت خطاهای سیستماتیک که توسط فرضیات مختلف در سبال وارد می‌شوند، رخ می‌دهد.

تبخیر - تعرق ۲۴ ساعته

غالباً مقادیر روزانه تبخیر-تعرق (ET_{24}) کاربرد بیشتری نسبت به مقادیر لحظه‌ای دارند. سبال مقدار ET_{24} را با فرض اینکه $ET_r F$ لحظه‌ای، مشابه با میانگین $ET_r F$ در طول ۲۴ ساعت است، محاسبه می‌کند. مقدار ET_{24} (mm/day) به صورت معادله (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_r \text{ (۱۰)}$$

که $ET_{r,24}$ مجموع ET_r در طی ۲۴ ساعت برای همان روز تصویر می‌باشد که با جمع کردن مقادیر ساعتی ET_r با یکدیگر در روز گذر ماهواره به دست می‌آید.

انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم

فرآیند اجرای الگوریتم سبال از دو پیکسل مرجع سرد و گرم در سطح مورد نظر، برای ایجاد شرایط مرزی برای بیلان انرژی استفاده می‌کند. پیکسل‌های سرد به عنوان رطوبت در سطحی از پوشش گیاهی که به طور کاملی زمین را پوشانده و آبیاری

شده است، انتخاب می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که دمای نزدیک به سطح و دمای سطح در یک پیکسل مشابه می‌باشند. پیکسل گرم به عنوان زمین‌های خشک و برهنه که ET صفر فرض می‌شود، انتخاب می‌گردد. هر دو این پیکسل‌های مرجع باید در نواحی بزرگ و همگن در نظر گرفته شوند.

روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع (روش فائو- پنمن - مانتیث)

رابطه (-۱۰) در روش فائو برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به کار می‌رود. گیاه مرجع چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی-متر و آلودگی ۲۳ درصد و مقاومت روزانه‌ای ۷۰ ثانیه بر متر می‌باشد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{T + 273} \right] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (11)$$

ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن (میلی متر بر روز)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتی‌گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، $e_a - e_d$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و G شار گرمایی به داخل خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز) می‌باشد (علیزاده، ۱۳۹۱).

مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روش پنمن مانتیث با استفاده از نرم‌افزار EXCEL برآورد شد. روش پنمن مانتیث (فائو ۵۶) تبخیر تعرق مرجع را با استفاده از اطلاعات یک ایستگاه هواشناسی که در یک مکان مشخص واقع شده ارائه می‌دهد که در آن یک گیاه مرجع بدون تنش رشد کرده باشد. این روش توسط سازمان فائو برای برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع به عنوان روش استاندارد برگزیده شده است (امینی بازبانی، ۱۳۹۱).

شاخص‌های ارزیابی

جهت مقایسه تبخیر و تعرق بدست آمده از پنمن مانتیث و تبخیر تعرق برآورده شده از الگوریتم سبال از شاخص‌های ارزیابی استفاده گردید. از جمله شاخص‌های که در این مطالعه استفاده می‌شود شامل ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) و متوسط خطای اریب (MBE) می‌باشد (Singh and Pauer., 2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (14)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (15)$$

بحث و یافته‌ها

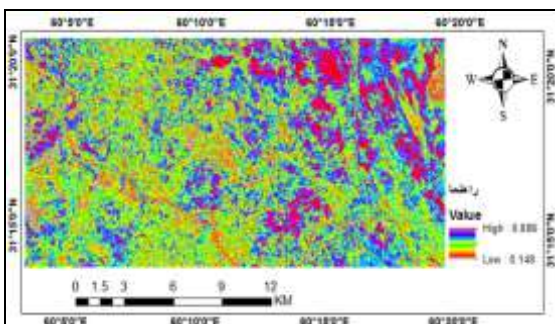
الگوریتم سبال از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. در طی این فرایند، پارامترهای متعددی از جمله شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی، گسیلمندی، دمای سطحی و آلبیدوی سطحی با استفاده از اطلاعات تصاویر محاسبه می‌شود. در این مطالعه برای همه تصاویر شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی محاسبه شد. محاسبه شاخص NDVI نشان‌دهنده این می‌باشد که اراضی متراکم از شاخص گیاهی بالاتری برخوردار می‌باشند اما سطح قابل ملاحظه‌ای از شهرستان به دلیل کمبود آب قابل دسترس دارای پوشش گیاهی متوسط و ضعیف می‌باشد. از شاخص NDVI برای برآورد پارامترهای مانند گسیلمندی سطحی و شارگرمای خاک استفاده می‌شود. در نقشه تولید شده شاخص NDVI در شهرستان زهک مقادیر اعداد مثبت برای اراضی زراعی که کاملاً متراکم و پوشیده از گیاه می‌باشند و مقادیر منفی نشان‌دهنده رودخانه هامون می‌باشد. بدین صورت که اراضی متراکم از پوشش گیاهی در این منطقه مقدار NDVI، $0/6$ به بالا را به خود اختصاص داده‌اند و اراضی بایر مانند جاده‌ها مقدار منفی چرا که از آسفالت ($-0/2$) تشکیل شده‌اند و اراضی کویری بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش تنک مقادیر پایین‌تر از $0/3$ را به خود اختصاص داده‌اند. در برآورد تبخیر - تعرق، دمای سطح زمین از جمله پارامترهای مهم به شمار می‌رود که برای برآورد آن معادلات متفاوتی ارائه شده است که در این مطالعه دمای سطح زمین برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ برآورده شده است. در این پهنه‌بندی دمایی، سردترین پیکسل‌ها متعلق به مناطق آبی بوده چرا که آب دارای ظرفیت گرمایی بالا می‌باشد به همین دلیل این مناطق از حداقل دما برخوردار هستند و همچنین اراضی زراعی با پوشش گیاهی متراکم و آبیاری شده نیز از حداقل دما برخوردارند و به پیکسل‌های سرد تعلق دارند. پیکسل‌های گرم به مناطق بایر، زمین‌های زراعی که برداشت شده‌اند در ماه خرداد و فاقد پوشش گیاهی هستند، زمین‌های آیش کشاورزی تعلق دارند. میانگین دمای سطحی بدست آمده برای شهرستان زهک ۳۱۲ درجه کلوین در سال ۱۳۹۶ و ۳۱۴/۹۸ درجه کلوین در سال ۱۳۹۸ است. به دلیل افزایش مناطق مسکونی، ترافیک شهرها، کارخانه‌جات و به طور کلی افزایش صنعتی شدن و از بین بردن منابع طبیعی و جاگزینی مناطق طبیعی با پوشش‌های نفوذناپذیر (اسفالت و ..) باعث افزایش دما از سال ۱۳۹۶ به ۱۳۹۸ شده است. برای صحت سنجی دمای به دست آمده از روش‌های سنجش از دوری از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود در شهرستان زهک استفاده شد. که جدول (۲) دمای ثبت شده در تصاویر ماهواره‌ای برای ماه خرداد سال ۱۳۹۶ و سال ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. که نتایج صحت سنجی با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی، نشان داد مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر $23/8$ و $2/51$ می‌باشد.

جدول ۲: ارزیابی دقت دمای بدست آمده با روش سنجش از دور و داده زمینی

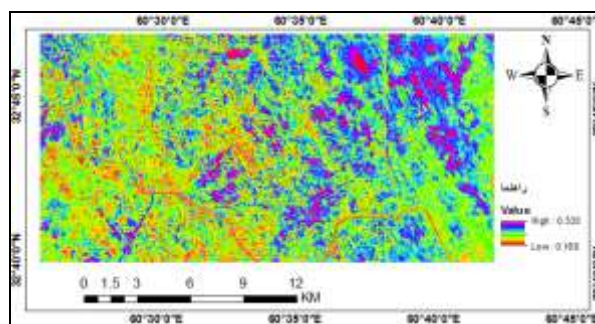
سال	دمای ایستگاه	دمای سنجش از دور	RMSE
۱۳۹۶	۳۱/۹	۳۸/۸	۲۳/۸
۱۳۹۸	۲۹/۴	۳۱/۹۱	۲/۵۱

مأخذ: نگارندگان

میزان آلبیدوی سطحی جهت برآورد درست مقادیر آلبیدو در روند اجرای الگوریتم سبال از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد که مقدار بین بازه (۰-۱) صفر و یک است. مقادیر آلبیدو در اقیانوس و جنگل مقدار پایین و در خاک‌های بیابانی مقادیر بالایی دارد. در شکل‌های (۲) و (۳) نمونه‌ای از تصاویر آلبیدو برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ آورده شده است.

شکل ۳: نقشه آلبیدوی سطحی بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد

۱۳۹



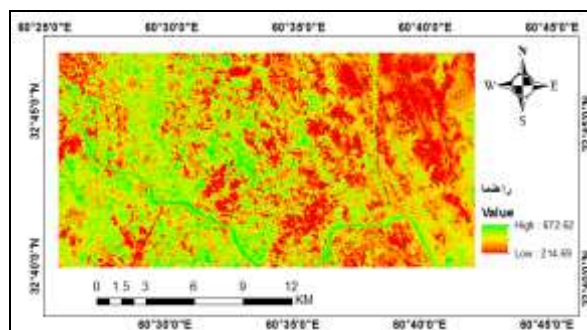
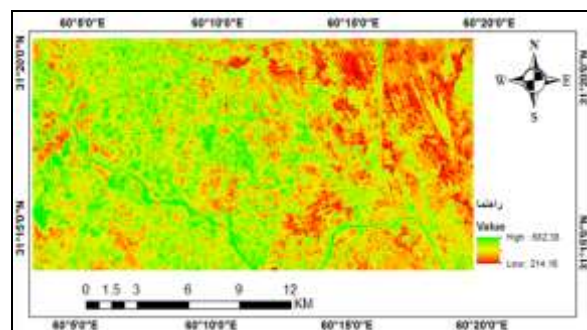
مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: نقشه آلبیدوی سطحی بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۶

تابش سطحی خالص (Rn)

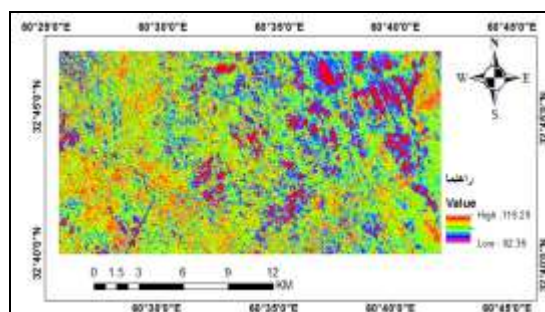
تابش خالص خورشیدی در واقع معیاری برای تعیین مقدار انرژی خورشیدی موجود در سطح زمین است، که براساس نسبت مقدار انرژی فرودی از خورشید به مقدار انرژی بازتابیده از سطح زمین محاسبه می‌گردد که برای برآورد آن نیاز به محاسبه‌ی شارهای تابش کوتاه و بلند ورودی و نیز شارهای تابش کوتاه و بلند خروجی از سطح زمین می‌باشد. شار تابش خالص در سطح زمین با استفاده از تمامی شارهای ورودی و خروجی از سطح به دست می‌آید. با توجه به نتایج بدست آمده پیکسل‌های سرد که همان مناطق دارای پوشش و اراضی زراعی می‌باشند به دلیل اینکه پوشش گیاهی می‌تواند انرژی تابشی را ذخیره نماید و تلفات کمتری داشته باشد بیشترین مقدار تابش خالص و کمترین مقدار آن مربوط به پیکسل‌های اراضی خاک خشک و عاری از پوشش گیاهی می‌باشد.

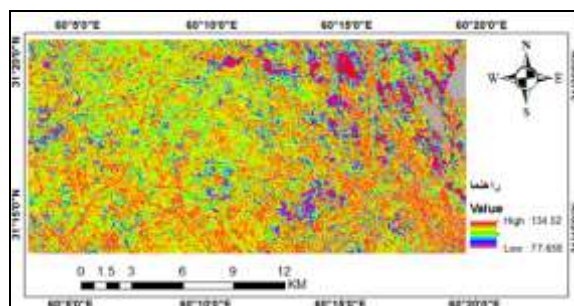
Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

شکل ۴: برآورد شار تابش خالص بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۶شکل ۵: برآورد شار تابش خالص بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۸

شار گرمای خاک (G)

در بیشتر مطالعات صورت به دلیل کوچک بودن مقدار شار گرمای خاک در مقابل دیگر اجزای معادله بیلان انرژی از محاسبه آن صرف نظر می‌کنند. ولی در الگوریتم سبال این جزء از معادله نیز محاسبه می‌شود. در نقشه بدست آمده (شکل ۶) مقدار شار گرمای خاک در پیکسل‌های گرم که خاک لخت و خشک هستند بیشتر از پیکسل‌های سرد هست و دلیل آن افزایش دمای سطح خاک می‌باشد که موجب تفاوت بیشتر بین دمای خاک سطحی و زیر سطحی می‌شود و باعث افزایش شار گرمای خاک در این پیکسل‌ها می‌گردد. شار گرمای خاک در پیکسل‌های سرد دارای کمترین مقدار می‌باشند و این به دلیل وجود پوشش گیاهی که مانع از هدر رفت انرژی از سطح خاک می‌شود.

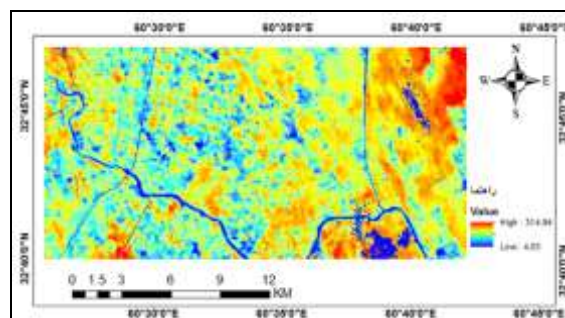
شکل ۶: برآورد شار گرمای خاک بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۶



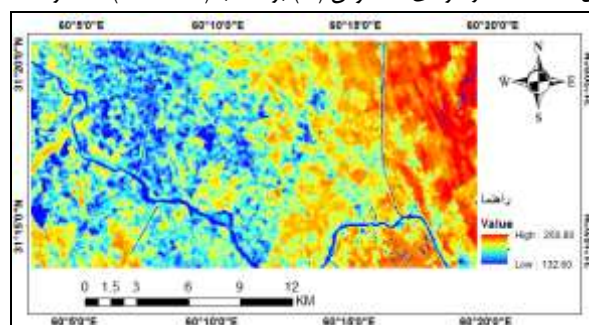
شکل ۷: برآورد شار گرمای خاک بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۸

برآورد شار گرمای محسوس (H)

شار گرمای محسوس میزان انرژی می‌باشد که به وسیله همرفت و هدایت مولکولی و به علت اختلاف دمای سطح زمین و هوای اطراف صرف گرم کردن هوا می‌شود. شار گرمای محسوس یکی از پارامترهای مهم مورد استفاده در معادله توازن انرژی و در عین حال مشکل‌ترین پارامتر برای محاسبه می‌باشد. در الگوریتم سبال شار گرمای محسوس ابتدا برای دو سطح زمین خاص برآورد می‌شود. نخستین برای سطحی خشک با دمای سطحی بالا که در آن شار گرمای نهان بسیار جزئی می‌باشد و پیکسل گرم نامیده می‌شود. دیگری برای یک سطح مرطوب با دمای سطحی پایین که در آن شار گرمای نهان بالا بوده و پیکسل سرد نامیده می‌شود. نمونه‌های شار گرمای محسوس برآورد شده برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است.



شکل ۸: نقشه شار گرمای محسوس (H) بر حسب $(W.m^{-2})$ ماه خرداد ۱۳۹۶



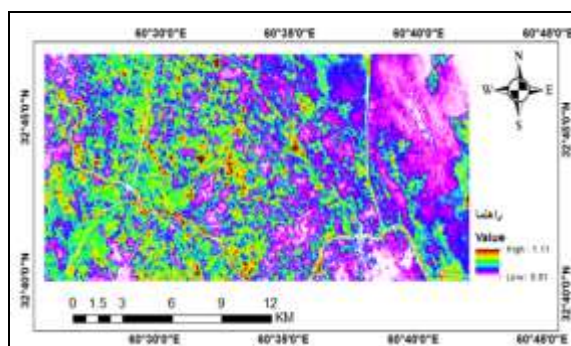
شکل ۹: نقشه شار گرمای محسوس (H) بر حسب $(W.m^{-2})$ در ماه خرداد ۱۳۹۸

Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

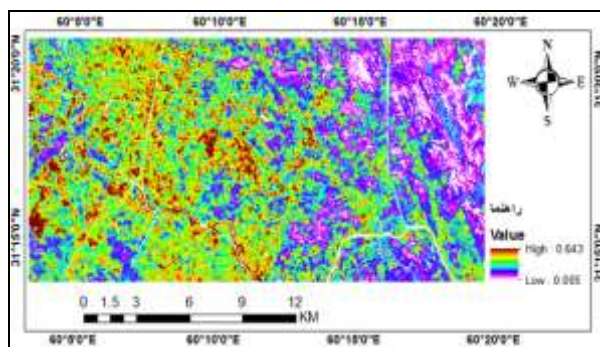
نتایج بدست آمده از نقشه شار محسوس هوا نشان داد که کمترین مقدار در پیکسل‌های سرد که زمین‌های کشاورزی با پوشش کامل و آبیاری شده می‌باشد. در پیکسل‌های خاک خشک و عاری از پوشش گیاهی به دلیل وجود اختلاف بین دمای سطحی زمین با دمای هوای بالاتر از سطح موجب می‌شود که شار محسوس بالاتری داشته باشند.

برآورد مقادیر تبخیر - تعرق واقعی

پس از محاسبه مقادیر شار تابش خالص (R_n)، شار تابش محسوس (H) و شار گرمای خاک (G)، مقدار شار گرمای نهان تبخیر لحظه‌ای محاسبه می‌شود و مقدار تبخیر و تعرق واقعی لحظه‌ای (ET_{inst}) براساس معادله‌ی (۶) محاسبه گردید.



شکل ۱۰: برآورد تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب میلی‌متر بر ثانیه در ماه خرداد ۱۳۹۶

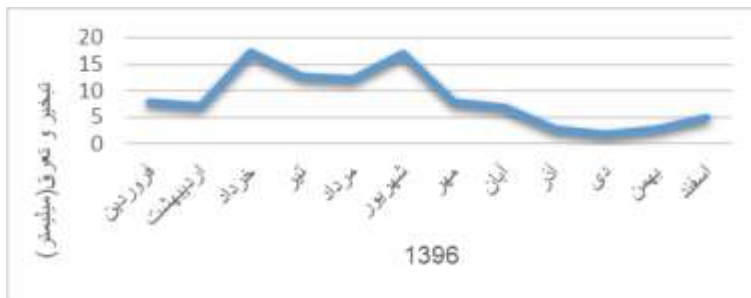


شکل ۱۱: برآورد تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر حسب میلی‌متر بر ثانیه در ماه خرداد ۱۳۹۸

برآورد تبخیر و تعرق مرجع در منطقه چاه نیمه‌های سیستان و بلوچستان

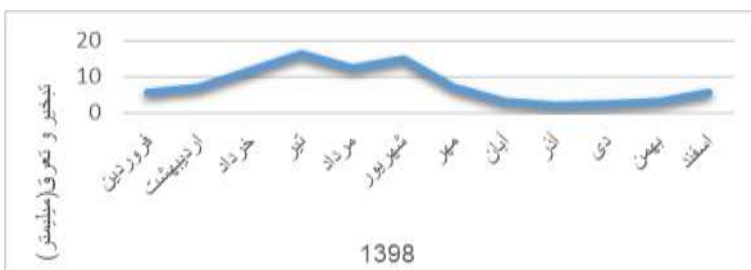
به منظور پیشبرد اهداف پژوهش، داده‌های اقلیمی برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ از فروردین تا اسفند ماه، شامل دمای حداکثر، دمای حداقل، میانگین دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و دمای نقطه شبنم به صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک زهک واقع در استان سیستان که در داخل حوزه مورد مطالعه قرار دارد اخذ و سپس مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه چاه

نیمه‌های سیستان، توسط رابطه (۱۱) با استفاده از نرم‌افزار EXCEL محاسبه گردید که شکل تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع روزانه‌ی آن به صورت نمودار زیر می‌باشد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۲: تغییرات تبخیر و تعرق مرجع روزانه در سال ۱۳۹۶



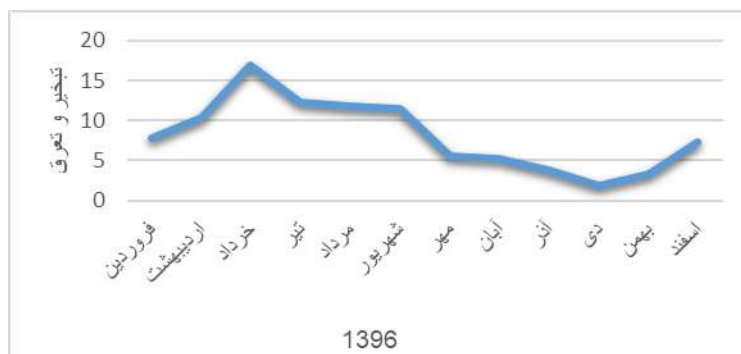
مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۳: تغییرات تبخیر و تعرق مرجع روزانه در سال ۱۳۹۸

با توجه به شکل (۱۲)، تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه در سال ۱۳۹۶ در تابستان (در ماه شهریور) با $16/69$ میلی‌متر، بالاترین و در زمستان با مقدار $1/79$ میلی‌متر، پایین‌ترین مقادیر این نمودار می‌باشند. تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه در سال ۱۳۹۸ در تابستان با $16/36$ میلی‌متر، بالاترین و در زمستان با مقدار $2/51$ میلی‌متر، پایین‌ترین مقادیر این نمودار می‌باشند (شکل ۱۳). با توجه به شکل (۱۲)(۱۳) در ماه تیر و مرداد تبخیر و تعرق کاهش یافته که علت آن برداشت محصولات در ماه تیر و مرداد است که در نتیجه آن، زمین فاقد پوشش گیاهی و آب آبیاری بوده، تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد. و در ماه شهریور به دلیل این که کاشت زمستانه آغاز می‌گردد و مجدداً زمین برای شخم مجدد آبیاری می‌شود در نتیجه تبخیر و تعرق در این ماه افزایش می‌یابد. با توجه به روندیابی انجام شده، بیشترین میزان تبخیر و تعرق در فصل تابستان می‌باشد که فصل رشد و آبیاری بسیاری از گیاهان زراعی می‌باشد. لذا اعمال مدیریت مناسب و کارآمد در زمینه آبیاری و استعمال شیوه‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای باعث کاهش هدر رفت و تبخیر آب می‌شود که امری بسیار مهم در زمینه کشاورزی و منابع طبیعی در کشور ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک می‌باشد.

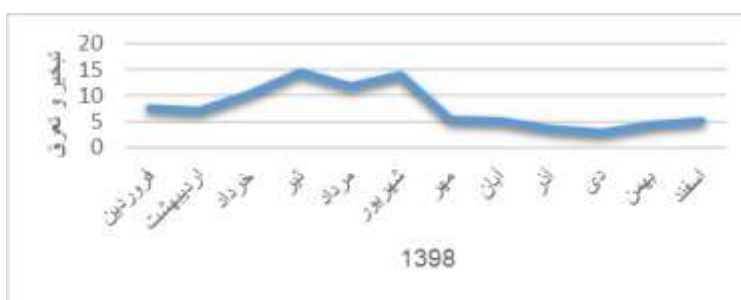
برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در منطقه چاه نیمه‌های سیستان با استفاده از الگوریتم سبال

مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه (برحسب میلی‌متر در روز) با استفاده از الگوریتم سبال در روزهایی که تصاویر آن‌ها گرفته شده بود بدست آمد. و نمودار مربوط به آن‌ها در شکل (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۴: تغییرات تبخیر و تعرق واقعی روزانه در سال ۱۳۹۶



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱۵: تغییرات تبخیر و تعرق واقعی روزانه در سال ۱۳۹۸

ارزیابی نتایج تبخیر و تعرق سبال و پنمن مانیتث

تحلیل‌ها آماری بین مقادیر تبخیر و تعرق به دست آمده از الگوریتم سبال و پنمن مانیتث نشان داد که مقادیر ضریب تعیین (R^2) برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۹۵ ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در طی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر ۱/۴۹ و ۱/۱۱، میانگین خطای مطلق (MAE) در سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر با ۱/۴۹ و ۱/۱۱ و متوسط خطای اریب (MBE) نیز برابر با ۰/۲۷ و ۰/۰۹ می‌باشد که این بیانگر این است که الگوریتم سبال از دقت کافی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی برخوردار می‌باشد. (جدول ۳)

جدول ۳: نتایج شاخص‌های ارزیابی دقت تبخیر و تعرق برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای با تبخیر تعرق پنمن مانیتث

سال	R^2	RMSE	MAE	MBE
۱۳۹۶	۰/۸۲	۲/۱۵	۱/۴۹	۰/۲۷
۱۳۹۸	۰/۹۵	۱/۲۷	۱/۱۱	۰/۹۰

مآخذ: نگارندگان

ضریب تعیین بالا بین مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل برآورد شده از سنجش از دور و روش پنمن مانیتث بیانگر این مطلب می‌باشد که الگوریتم سبال از دقت بالایی برای برآورد مقادیر تبخیر تعرق واقعی برخوردار می‌باشد. از دلایل پایین بودن مقادیر تبخیر تعرق واقعی در الگوریتم سبال می‌توان به در نظر گرفتن تنش‌های محیطی در این الگوریتم اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

الگوریتم سبال از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. در طی این فرایند، پارامترهای متعددی از جمله آلبیدوی سطحی، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین با استفاده از اطلاعات تصاویر محاسبه شد. از مقایسه مقادیر آلبیدوی سطحی و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی می‌توان به این نتیجه رسید که بین این شاخص و آلبیدوی رابطه معکوس وجود دارد. از طرفی مقادیر آلبیدوی در نواحی دارای پوشش گاهی کمتر از نواحی فاقد پوشش گیاهی است که نتایج حاصل از محاسبه این پارامترها در این مطالعه تایید می‌کند. همچنین از مقایسه سه پارامتر آلبیدوی سطحی، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین، می‌توان به این نتیجه رسید که مناطق دارای پوشش گیاهی کم، دمای سطحی و آلبیدوی سطحی بیشتری نسبت به مناطقی دارای پوشش گیاهی زیادند دارند که ناشی از تبخیر و تعرقی است که گیاهان انجام داده‌اند و گرمای کمتری از طریق روزه‌ها دفع می‌شود و به جو بازمی‌گردد. نتایج بدست آمده از تبخیر و تعرق مرجع روزانه و سبال نشان داد که در طی سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ بیشترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به تابستان که فصل رشد و آبیاری بسیاری از گیاهان زراعی می‌باشد است و کمترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به زمستان می‌باشد بدین صورت که با توجه به شکل (۱۱) و (۱۲) بدست آمده از روش پنمن مانیتث در سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ حداکثر اوج گراف یا به عبارتی قله گراف مربوط به ماه خرداد در هر دو سال می‌باشد که در سال ۱۳۹۶ دارای مقدار ۱۷,۳۸ و در سال ۱۳۹۸ مقدار ۱۱/۰۹۶ را به خود اختصاص داده است قابل ذکر است که نمودار گراف (۱۳) و (۱۴) روش سنجش از دور نیز حاکی از حداکثر میزان تبخیر و تعرق در ماه خرداد می‌باشد که در سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب دارای مقادیر ۲ و ۱۰/۳۲ است. نتایج این پژوهش با پژوهش محققانی چون (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵) و (آلازبا، شریفی، ۲۰۱۶) مبنی بر اینکه بیشترین میزان تبخیر و تعرق متعلق به اراضی متراکم از پوشش گیاهی و آبیاری شده در فصل تابستان و در میان سال‌ها مربوط به سال خشک است، مطابقت دارد. و همچنین تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از الگوریتم سبال با مقادیر محاسبه شده با روش مرجع (پنمن - مانیتث - فائو)

Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

مقایسه گردید نتایج حاصل از مقایسه تبخیر و تعرق برآورده شده از الگوریتم سبال با تبخیر و تعرق برآورده شده از روش پنمن مانیتث نشان داد ضریب همبستگی بالای بین برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال و روش مرجع وجود دارد بدین صورت که با توجه به جدول (۲) مقادیر ضریب تعیین (R2) برای سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۹۵ ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در طی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر ۱/۴۹ و ۱/۱۱، میانگین خطای مطلق (MAE) در سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ به ترتیب برابر با ۱/۴۹ و ۱/۱۱ و متوسط خطای اریب (MBE) نیز برابر با ۰/۲۷ و ۰/۰۹ می-باشد که این بیانگر این است که الگوریتم سبال از دقت کافی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی برخوردار می‌باشد. همچنین مقایسه تبخیر و تعرق برآورده شده واقعی بین سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ نشان دهنده آن است، در سالی که بارش متوسط است نتایج روش پنمن مانیتث و سبال از هماهنگی و تطابق بیشتری برخوردار است با توجه به جدول (۲). تحقیقات مشابه زیادی همچون (مشتاق و همکاران، ۱۳۹۴)، (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۲)، (سهیلی فرو همکاران، ۱۳۹۲) و (نما و همکاران، ۲۰۲۰) مبنی بر تطابق روش سبال با پنمن-مانیتث صورت گرفته است که نتایج تحقیقات صورت گرفته نیز حاکی از همبستگی بالای نتایج پنمن-مانیتث و الگوریتم سبال می‌باشد.

منابع

- ۱- اکبرزاده مقدم سه قلعه، هادی، حقیقت جو، پرویز، باقری، محمدحسین. (۱۳۹۴): برآورد تبخیر از سطح پیکره‌های آبی با الگوریتم SEBAL با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی مخازن آب شیرین چاه نیمه سیستان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۳، جلد ۹، صص ۵۲۱-۵۱۰.
- ۲- امینی، بازیانی، سمیرا. (۱۳۹۱): برآورد تبخیر تعرق واقعی و پتانسیل در دشت همدان- بهار با استفاده از تکنیک سنجش از دور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی. دانشگاه بو علی سینا.
- ۳- امینی بازیانی، سمیرا و اکبری، مهدی و زارع ایبانه، حمید. (۱۳۹۱): برآورد تبخیر تعرق با استفاده از الگوریتم سبال مطالعه موردی: دشت همدان بهار. اولین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی محیط زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان. ۳ اسفند ماه.
- ۴- اسدی، مهدی، کرمی، مختار (۱۳۹۷): برآورد میزان تبخیر و تعرق در استان فارس با استفاده از شاخص‌های تجربی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۲۰، شماره ۵۶، صص ۱۷۵-۱۵۹.
- ۵- بیات ورکشی، مریم و معروفی، صفر و زارع ایبانه، حمید و قاسمی، عادل. (۱۳۸۷): ارزیابی روش‌های مختلف تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن - مانیتث - فاقو ۵۶. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۱ بهمن ماه.
- ۶- سهیلی فرو، زهرا، میرلطیفی، سید مجید، ناصری، عبدعلی، عساری، مصطفی. (۱۳۹۲): برآورد تبخیر - تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنجش از دور در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان. دانش آب و خاک. شماره ۱. دوره ۲۳. صص ۱۶۳-۱۵۱.

- ۷- علیزاده، ا (۱۳۹۱): اصول هیدرولوژی کاربردی. ویرایش ششم، چاپ سی و چهارم، انتشارات دانشگاه امام رضا مشهد.
- ۸- فرامرزی، محمد (۱۳۹۳): تعیین و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- ۹- قمرنیا، هوشنگ و رضوانی، سیدوحیدالدین و مهدی ابادی، گلاره و غلامیان، سیدمحسن. (۱۳۸۹): محاسبه تبخیر و تعرق گیاه با استفاده از روش سبال در دشت بیلوار کرمانشاه. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۱ الی ۲ اسفند ماه.
- ۱۰- کریمی، علیرضا، بهمن. فرهادی بانسوله و همایون، حسادی. (۱۳۹۱): برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۴۶(۴). ۳۶۴-۳۵۳.
- ۱۱- مشتاق، ناهید، جعفری، رضا، سلطانی، سعید، و رضانی، نفیسه (۱۳۹۴): کاربرد مدل توازن انرژی و داده‌های ماهواره لندست سنجنده TM در تخمین تبخیر و تعرق، نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۱۹، شماره ۷۳، صص ۲۱۷-۲۰۶.
- ۱۲- میر یعقوب زاده، میر حسن، سلیمانی، کریم، حبیب نژاد روشن، محمود، شاهدی، کاکا، عباسپور، کریم، و اخوان، سمیرا (۱۳۹۲): تعیین و ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور؛ مطالعه موردی حوزه آبخیز تهر، گلستان، فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۴، شماره ۱۵، صص ۱۰۲-۸۹.
- ۱۳- محمدی، حسین، عزیزی، قاسم، خوش اخلاق، فرامرزی، و خزایی، مهدی (۱۳۹۵): برآورد میزان تبخیر و تعرق تابستانه گیاه نیشکر در استان خوزستان با استفاده از داده‌های اقلیمی، فصل‌نامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۵، شماره ۹۹، صص ۱۵۳-۱۴۱.
- ۱۴- نوروزی، خیراله، خیرخواه زرکش، میرمسعود، نوروزی، علی اکبر، (۱۳۹۵): بررسی کارایی تصاویر ماهواره‌ای لندست در برآورد تبخیر و تعرق شالیزارهای شهرستان رشت. پنجمین همایش سامانه‌های سطوح آبخیز باران. دوره پنجمین.

- 15- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W. (2002): Sebal (Surface Energy Balance Algorithms For Land). Advance Training And User's Manual-Idaho Implementation, Version, Aug, 1:97.
- 16- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998): A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm For Land (SEBAL). 1. Formulation. Journal Of Hydrology, 212, 198-212.
- 17- Franks, S. W And Beven, K. (1999:) Conditioning A Multiple Patch SVAT Model Using Uncertain Time-Space Estimates Of Latent Heat Flux As Inferred From Remotely Sensed Data. Journa
- 18- Jackson, R.D.; Reginato, R.J.; Idso, S.B., (1977:) Wheat Canopy Temperature: A Practical Tool For Evaluating Water Requirements. Water Resour. Res. 13: 651-656.
- 19- Li Z.L., Tang R., Wan Z., Bi Y., Zhou C., Tang B., Yan G., Zhang X., (2009:) A Review Of Current Methodologies For Regional Evapotranspiration Estimation From Remotely Sensed Data. Sensors. 9:3801-3853; Doi:10.3390/S90503801
- 20- Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2016): Surface Energy Balance Algorithm For Land-Based Consumption Water Use Of Different Land Use-Cover Types In Arid-Semiarid Regions. Water Science And Technology: Water Supply, 16(6), 1497-1513.
- 21- Nema, M. K., Thakur, H. P., Upreti, H., Jain, S. K., Mishra, P. K., Thayyen, R. J., ... & Jain, S. K. (2020): Estimation Of Evapotranspiration In Lesser Himalayas Using Remote Sensing Based Surface Energy Balance Algorithm. Go-Cart International, 1-19.

Dor: 20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0

- 22- Rawat, K.S., Bala, A., Singh, S.K. And Pal, R.K., (2017:) Quantification Of Wheat Crop Evapotranspiration And Mapping: A Case Study From Bhiwani District Of Haryana, India. Agricultural Water Management, 187, Pp.200-209.16- Iran Second National Communication To UNFCCC, December. 2010. Climate Change Office. Department Of Environment.
- 23- Singh, K. R., Pauer, P.S.(2011): Comparative Study Of Reference Crop Evapotranspiration (Eto) By Different Energy Based Method With FAO56 Penman-Monteith Method At New Delhi, India, International Journal Of Engineering Science And Technology, Vol. 3, No.10, 7861-7868.
- 24- Teixeira, A.H., Bastiaanssen, W.G. M., Ahmad, M. D And Bos, M. G. (2009:) Reviewing SEBAL Input Parameters For Assessing Evapotranspiration And Water Productivity For The Low-Middle Sao Francisco River Basin, Brazil, Part A: Calibration And Validation. Journal Of Agriculture And Forest Meteorology.149: 462-476.
- 25- Zheng, C., Jia, L., Hu, G., & Lu, J. (2019): Earth Observations-Based Evapotranspiration In Northeastern Thailand. Remote Sensing, 11(2), 138.