

بررسی نتایج تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از مدل‌های متریک و سبال در دشت قزوین

رستا نظری^{۱*}، عباس کاویانی

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

Nazarirasta@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

Abbasskaviani@gmail.com

چکیده

افزایش تولید محصول به تأمین نیاز آبی گیاه وابسته است، لذا تخمین صحیح نیاز آبی گیاه نه‌تنها به تولید محصول کمک می‌کند، بلکه در مدیریت منابع آب نیز مؤثر است. بر همین اساس، هدف از پژوهش حاضر، بررسی نتایج تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن حاصل از اجرای مدل‌های متریک و سبال با تصاویر ماهواره‌های لندست هفت و هشت و ترا در دشت قزوین است. ابتدا برآوردهای مدل‌های متریک و سبال با مجموع ۱۰ تصویر از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره ترا و سنجنده ETM+ ماهواره لندست هفت با داده‌برداری‌های لایسیمیتری گیاه مرجع چمن در سال ۱۳۸۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. سنجنده MODIS با $R = 0.88$ ، $RMSE = 1/91$ و $SE = 0.85$ میلی‌متر بر روز و سنجنده ETM+ با $R = 1/00$ ، $RMSE = 0.91$ و $SE = 0.09$ انحراف از معیار 0.59 میلی‌متر بر روز در مدل متریک در مقایسه با مدل سبال در سطح معنی‌دار ۹۵ درصد برآورد دقیق‌تری را نسبت به داده‌برداری‌های صورت گرفته توسط لایسیمتر نشان داده‌اند. سپس، نتایج مدل‌های متریک و سبال حاصل از تصاویر سنجنده OLI & TIRS ماهواره لندست هشت (به دلیل عدم وجود داده‌برداری لایسیمتری در زمان بررسی) با نتایج حاصل از اجرای مدل متریک بر روی سنجنده ETM+ ارزیابی شد. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از آن است که مدل متریک با $R = 0.96$ ، $RMSE = 0.28$ و $SE = 0.29$ انحراف از معیار 0.61 میلی‌متر بر روز نسبت به مدل سبال در سطح معنی‌دار ۹۰ درصد، به‌عنوان مدل برتر برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه دشت قزوین قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: سنجنده MODIS، سنجنده ETM+، سنجنده OLI & TIRS، لایسیمتر، نیاز آبی.

۱- آدرس نویسنده مسئول: قزوین، گروه مهندسی آب دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

*- دریافت: بهمن ۱۳۹۴ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۵

مقدمه

کشور ایران با مساحتی معادل ۱۶۵ میلیون هکتار در محدوده ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه طول شرقی واقع شده است. اقلیم خشک و نیمه-خشک سطح وسیعی از اراضی کشور را تحت پوشش قرار می‌دهد و طبعاً از نظر تأمین منابع آبی لازم با محدودیت‌های زیادی مواجه است. لذا با توجه به کاهش شدید منابع آب به دلیل کاهش نزولات جوی در ایران و افزایش تقاضا در بخش کشاورزی که افزایش سطح زیر کشت اراضی فاریاب را در پی دارد، برآورد و تعیین نیاز آبی گیاهان به‌عنوان شاخصی مهم در مدیریت منابع آب-های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی و طراحی سامانه‌های آبیاری مزرعه نقش ایفا می‌کند. تعیین دقیق این پارامتر نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. بنابراین، استفاده از روش‌های جدید و کم‌هزینه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان در سطح منطقه‌ای و گسترده ضروری به نظر می‌رسد.

سنجش‌ازدور^۱ با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی و مدل‌های متعدد، تخمین نسبتاً دقیقی از میزان تبخیر و تعرق در سطوح گسترده ارائه می‌دهد. مدل بیلان انرژی سطحی بر روی زمین^۲ یا سبال (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸) و مدل پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی^۳ یا متریک (آلن و همکاران، ۲۰۰۷) جزء پرکاربردترین مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور است. مدل بیلان انرژی سطحی بر روی زمین (SEBAL) که توسط باستیانسن و همکاران در سال ۱۹۹۸ ایجاد شد و بعدها توسط تاسومی و همکاران (۲۰۰۳) اصلاح شد، از مدل-های مبتنی بر سنجش از دور سطح زمین است و به‌منظور تعیین شار انرژی که به‌راحتی قابل تبدیل به شار رطوبت است، ایجاد شده و می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی در زمان

عبور ماهواره را تخمین بزند. این مدل در تعدادی از پروژه‌ها و مطالعات مورد استفاده قرار گرفته و با آزمایش‌های میدانی زیادی در اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، هند، سریلانکا، نیجریه و چین صحت‌سنجی شده که نتایج صحت‌سنجی قابلیت‌های این مدل را خوب و قابل قبول ارزیابی کرده‌اند (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸). مدل پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی (متریک) مزایای عمده‌ای نسبت به روش‌های قدیمی باقیمانده بیلان انرژی ($\lambda E = R_n - G - H$) مبتنی بر تصاویر ماهواره-ای دارد. مدل متریک به‌منظور فراهم کردن برآوردهای نسبتاً دقیق‌تر تبخیر و تعرق با قدرت تفکیک مکانی بالا (تقریباً ۳۰ متر) و اعمال اثرات حرکت افقی هوا در محاسبه تبخیر و تعرق ایجاد شده است. آلن و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی با به‌کارگیری از مدل متریک و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتری، میزان خطا در برآورد تبخیر و تعرق چمن و چغندر قند را به ترتیب چهار و یک درصد در فصل رشد گزارش کردند. در بررسی دیگری که توسط تاسومی و همکاران (۲۰۰۵) در آیداهو^۴ انجام شد دو مدل توازن انرژی سبال قدیمی (۱۹۹۸) و متریک با هم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو مدل توازن انرژی با نتایج حاصل از لایسیمتر تطابق خوبی دارند و استفاده از آن دو مدل توازن انرژی را برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی پیشنهاد نمودند.

چاوز و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر لندست و به‌کارگیری مدل متریک به ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق روزانه با داده‌های لایسیمتری پرداخته که میزان خطا در آن کمتر از دو درصد به دست آمد. امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) به برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده استر^۵ و مدل متریک در استان خراسان رضوی پرداختند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، حداکثر میزان تبخیر و تعرق واقعی را برای سه محدوده

¹ Remote Sensing² Surface Energy Balance Algorithms for Land, SEBAL³ Mapping EvapoTranspiration with Internalized Calibration, METRIC⁴ Idaho⁵ ASTER

کشاورزی گل‌مکان، مشهد و قوچان به ترتیب برابر با ۹/۱۳، ۷/۲۹ و ۲/۳۷ میلی‌متر در روز گزارش نمودند. همچنین، نتایج نشان داد که مدل توازن انرژی متریک از مدل‌های مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس محلی است.

سیمایی و همکاران (۱۳۹۲) به کمک مدل سبال و تصاویر لندست و MODIS، به برآورد تبخیر و تعرق واقعی در بخشی از حوزه آبخیز زنجان‌رود واقع در استان زنجان پرداختند. نتایج نشان داد دقت سنجنده TM^۱ دو و نیم برابر بیشتر از تصاویر سنجنده MODIS است و گزارش نمودند که سنجنده TM مستقر بر ماهواره لندست پنج می‌تواند با دقتی بیشتر نسبت به سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره ترا^۲ مقدار تبخیر و تعرق واقعی را برای منطقه مورد مطالعه برآورد کند.

هدف از پژوهش حاضر بررسی امکان استفاده از فن سنجنش از دور برای تولید نقشه‌های تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های متریک و سبال است که در مکان پیوسته هستند (سلول‌های تصویر در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک سطح به هم پیوسته از داده‌های تبخیر و تعرق را تولید می‌نماید) و با فاصله زمانی کوتاه (که منظور فاصله زمانی کوتاه بین برداشت دو تصویر متوالی از یک نقطه است) در اختیار می‌باشند. در نهایت، مقایسه آماری نتایج تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از این مدل‌ها با داده‌برداری لایسیمتر، مدل برتر برای استفاده در سطح دشت قزوین را معرفی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه اراضی پایین‌دست شبکه آبیاری دشت قزوین است که در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب تهران و بین عرض‌های جغرافیایی "۰۰' ۰۰" تا "۰۰' ۳۶" شمالی و طول‌های جغرافیایی "۰۰' ۴۹" تا "۰۰' ۴۹"

تا "۰۰' ۳۵' ۵۰" شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت دشت قزوین حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار است که شهرهای آبیک، قزوین، تاکستان و بوئین‌زهرا در حاشیه شمالی و جنوبی آن قرار دارند. این استان از دو حوضه اصلی آبریز شور و سفیدرود تشکیل شده است. حوزه آبریز شور وسیع‌ترین حوضه استان به شمار می‌آید و ۷۲/۴ درصد از وسعت سرزمینی که به دشت قزوین مشهور است را شامل می‌شود. بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن، اقلیم منطقه نیمه-خشک محسوب می‌شود.

داده‌های هواشناسی و لایسیمتری

در این پژوهش از داده‌های هواشناسی مورد نیاز دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، دمای سطح خاک، تابش خورشیدی ایستگاه هواشناسی قزوین با موقعیت جغرافیایی عرض ۱۵' ۳۶ درجه شمالی و طول ۰۳' ۵۰ درجه شرقی و ارتفاع ۱۲۷۹ متری از سطح دریا در بازه زمانی روزانه و ماهانه طی سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ به منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم متریک و سبال استفاده شد. داده‌های مزرعه‌ای از لایسیمتری به مساحت ۱×۲ مترمربع و به عمق ۱/۵ متر، واقع در مرکز تحقیقات آب و خاک اسماعیل‌آباد قزوین با مختصات جغرافیایی "۰۰' ۲۴' ۳۶" درجه شمالی و "۰۰' ۵۴' ۴۹" شرقی استفاده شد. لایسیمتر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن را اندازه‌گیری می‌کند. ارتفاع چمن در زمان پژوهش بین پنج تا ۱۵ سانتی‌متر نگهداری می‌شد. به منظور تأثیر یکنواختی میکروکلیم^۳ در راستای حذف اثرات حرکت افقی گرما، لایسیمتر در مرکز یک قطعه زمین به ابعاد ۴۰×۵۰ متر مربع واقع شد و مساحتی حدود دو مترمربع را می‌پوشاند. داده‌برداری‌های لایسیمتری از تاریخ پنجم فروردین ماه سال ۱۳۸۰ (۲۵ مارس سال ۲۰۰۱) آغاز و به صورت روزانه و هفتگی تا تاریخ ۲۶ ام اسفندماه همان سال (۱۷ مارس ۲۰۰۲) ادامه یافت (ابراهیمی‌پاک، ۱۳۸۰).

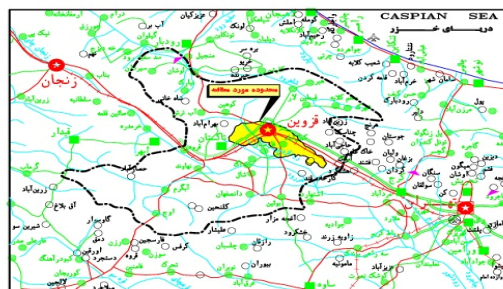
^۱ Thematic Mapper, TM

^۲ Terra

^۳ Climate micro

در این پژوهش از نتایج گزارش‌های آخرین داده‌برداری

لایسیمتری موجود در منطقه استفاده شد.



نقشه موقعیت طرح در استان



نقشه موقعیت طرح در ایران

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان قزوین و محدوده مورد مطالعه

نقص فنی (در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ میلادی) استفاده شد.

ماهواره لندست هشت از دو حسگر عملیاتی تصویرساز سرزمین (OLI: Operational Land Imager) و مادون‌قرمز حرارتی (TIRS: Thermal InfraRed Sensor) استفاده می‌کند. این دو حسگر به ترتیب اطلاعات تصویر برای نه باند با طول موج کوتاه و دو باند طول موج حرارتی را جمع‌آوری می‌کنند که تفکیک‌پذیری مکانی تصاویر لندست هشت، ۳۰ متر (باند-های یک تا هفت و نه)، ۱۵ متر (باند هشت) و ۱۰۰ متر (باندهای ۱۰ و ۱۱) است. از آنجایی که ماهواره لندست هشت در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ راه‌اندازی شده و از آن تاریخ به بعد تصاویر در اختیار کارشناسان قرار گرفته است، لذا امکان استفاده از داده‌های لایسیمتری برای بررسی نتایج مدل سبال و متریک با آن در تصاویر لندست هشت وجود ندارد. برای رفع این مشکل ابتدا سنجنده‌های ETM+ و MODIS که در زمان داده‌برداری لایسیمتری وجود دارند مورد ارزیابی قرار گرفته و از میان این دو سنجنده و دو مدل متریک و سبال، سنجنده و مدلی که بیشترین انطباق را با تبخیر و تعرق گیاه مرجع در لایسیمتری حاصل از اعمال مدل‌های متریک و سبال بر روی سنجنده OLI&TIRS بکار برده شد.

عملیات مربوط به پیش‌پردازش، پردازش، انجام تصحیحات و محاسبات باندهای تصاویر هریک از

تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره ترا و سنجنده ETM+ ماهواره لندست هفت و سنجنده OLI & TIRS ماهواره لندست هشت برای ارزیابی هر سه سنجنده یادشده با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت در برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد. سنجنده MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) تصاویری جامع در ۳۶ باند طیفی از سطح زمین و در چندین تفکیک‌پذیری مکانی (۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و یک کیلومتر بسته به طول-موج) فراهم می‌کند.

ماهواره لندست هفت با سنجنده ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) که متشکل از هشت باند است از تفکیک‌پذیری مکانی ۳۰ متر (باندهای یک تا پنج و هفت)، ۶۰ متر (باند شش) و ۱۵۰ متر (باند هشت) برخوردار است. در تاریخ ۳۱ مه سال ۲۰۰۳ میلادی، سامانه تصحیح‌گر خط پویس^۱ (Scan Line Corrector) ماهواره لندست هفت که مسئول ایجاد تعادل و تصحیح در راستای حرکت این ماهواره است، دچار نقص فنی شد و گزارش‌ها حاکی از آن است که این نقص فنی ماندگار بوده و قابلیت تعمیر ندارد. از این‌رو در پژوهش حاضر از تصاویر موجود در تاریخ‌های قبل از

^۱ سامانه تصحیح‌گر خط پویس (SLC) یک دستگاه الکترونیکی است که اجازه می‌دهد آینه اسکن کننده ETM+ به صورت پیاپی به جلو و عقب صحنه را اسکن کرده و در نتیجه باعث تولید نوارهای اسکن شده موازی از صحنه می‌شود.

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

که در آن:

λE : شار گرمای نهان ($R_n, W/m^2$): شار تابش خالص (مجموع تمام تابش موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در سطح زمین) ($G, W/m^2$): شار گرمای خاک (W/m^2) و H : شار گرمای محسوس (W/m^2) است. در ادامه روابط هریک از اجزای بیلان انرژی ذکر شده و تفاوت‌های اساسی بین دو مدل متریک و سبال (۱۹۹۸) در هر مورد توضیح داده شده است.

تابش خالص R_n

شار تابش خالص با استفاده از موازنه شارهای

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن:

$R_{s\downarrow}$: تابش طول موج کوتاه ورودی (W/m^2), α : آلبیدوی سطحی (-), $R_{L\uparrow}$: تابش طول موج بلند خروجی (W/m^2), $R_{L\downarrow}$: تابش طول موج بلند ورودی (W/m^2) و ϵ_0 : گسیلمندی حرارتی سطحی باند پهن (-) است.

تابش طول موج کوتاه ورودی که عبارت است از تابش-هایی مستقیم و پراکنده که به زمین می‌رسند و مقدار آن‌ها در شرایط آسمان صاف و بدون ابر و در زمان تصویر-برداری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (3)$$

که در آن:

G_{sc} : ثابت خورشیدی برابر با $1367 (W/m^2)$, θ : زاویه تابش خورشید (رادیان), d_r : معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید (m) و τ_{sw} : ضریب شفافیت اتمسفر (-) است. مقادیر تابش طول موج کوتاه ورودی برای دو مدل متریک و سبال به دلیل متفاوت بودن رابطه محاسبه پارامتر ضریب شفافیت اتمسفر در دو مدل یکسان نیست. زیرا در محاسبه پارامتر ضریب شفافیت اتمسفر در مدل

سنجنده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ENVI^۱ نسخه ۴.۲ که نرم‌افزاری برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود، صورت گرفت. از جمله تصحیحات انجام گرفته بر روی تصاویر قبل از بررسی می‌توان به زمین مرجع نمودن (Georeferencing) تصاویر سنجنده MODIS، تصحیحات رادیومتریک تصاویر لندست برای تبدیل ارزش‌های رقومی (DN) ثبت‌شده از پیکسل‌ها به تابش^۲ و بازتاب^۳ طیفی و تصحیحات اتمسفری اشاره نمود. بقیه محاسبات و برنامه‌نویسی مربوط به روند یافتن شار گرمای محسوس با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل در میکروسافت آفیس و متلب (Matlab) انجام شد. در بررسی تصاویر هر سه سنجنده تا حد ممکن از تصاویر روزانه در شرایط آسمان بدون ابر استفاده شد. از این رو تعداد تصاویر مورد ارزیابی بسته به شرایط آب و هوایی زمان برداشت و تاریخ گذر ماهواره از منطقه مورد نظر با-هم برابر نیست. تاریخ‌های مورد بررسی تصاویر هر سه سنجنده در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- تاریخ‌های مورد بررسی سه سنجنده

MODIS	ETM+	OLI & TIRS
۱۳۸۰/۰۱/۲۳	۱۳۸۰/۰۲/۰۳	۱۳۹۲/۰۱/۲۷
۱۳۸۰/۰۲/۲۳	۱۳۸۰/۰۳/۱۹	۱۳۹۲/۰۳/۲۹
۱۳۸۰/۰۲/۳۰	۱۳۸۰/۰۵/۲۲	۱۳۹۲/۰۶/۱۵
۱۳۸۰/۰۳/۰۷		۱۳۹۳/۰۲/۱۵
۱۳۸۰/۰۴/۲۸		۱۳۹۳/۰۳/۱۶
۱۳۸۰/۰۵/۰۴		۱۳۹۳/۰۵/۱۸
۱۳۸۰/۰۶/۱۵		۱۳۹۳/۰۶/۱۹

اجزای معادله بیلان انرژی در مدل‌های متریک و سبال

به طور کلی در مدل‌های متریک و سبال، تیخیر و تعرق در تصاویر ماهواره‌ای با به‌کارگیری بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود. جایی که انرژی مصرف شده توسط ET^۴ به‌عنوان باقی‌مانده معادله شار انرژی جریان سطحی محاسبه می‌شود:

^۱ The Environment for Visualizing Images
^۲ Radiance
^۳ Reflectance
^۴ Evapotranspiration

ρ_{NIR} : بازتابندگی باند مادون قرمز نزدیک و ρ_R : بازتابندگی باند قرمز طیف مرئی.

شار گرمای محسوس H

شار گرمای محسوس که عبارت از جریان انتقال گرما از سطح زمین به جو است از یک تابع آئرو دینامیک تخمین زده می‌شود:

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (۸)$$

که در آن:

ρ : چگالی هوا (Kg/m^3), C_p : گرمای ویژه هوا (1004J/Kg/K), dT : اختلاف دما ($T_1 - T_2$) میان دو ارتفاع Z_1 و Z_2 , r_{ah} : مقاومت آئرو دینامیکی به انتقال گرما (S/m) است.

در تخمین شار گرمای محسوس پارامترهایی همچون اختلاف دما و مقاومت آئرو دینامیکی به انتقال گرما نامعلوم می‌باشند. برای پیدا کردن مجهولات، مدل متریک و سبال از دو پیکسل شاخص تحت عنوان پیکسل‌های سرد و گرم برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی استفاده می‌کند. پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می‌شوند. در حالی که پیکسل گرم از اراضی زراعی بدون پوشش گیاهی و خشک برگزیده می‌شود.

با وجودی که روند کلی محاسبات دو مدل متریک (۲۰۰۷) و سبال (۱۹۹۸) در بسیاری از موارد مشابه می‌باشند اما به‌طور کلی الگوریتم متریک با انجام یک سری کالیبراسیون داخلی در تخمین H برآورد متفاوتی از شار گرمای نهان نسبت به مدل سبال (۱۹۹۸) به دست می‌دهد. از جمله تفاوت‌های عمده میان دو مدل، می‌توان به کالیبراسیون مدل متریک با استفاده از ET مرجع نسبت به جز تبخیر و استفاده از ET مرجع برای برون‌یابی ET لحظه‌ای در دوره‌های ۲۴ ساعته اشاره نمود. این در حالی است که مدل سبال (۱۹۹۸) از جز تبخیر که به‌صورت نسبت شار گرمای نهان به اختلاف شار تابش خالص از شار گرمای خاک ($H/(R_n-G)$) تعریف می‌شود،

سبال تنها به پارامتر ارتفاع از سطح دریا (Z) نیاز است که رابطه آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (۴)$$

حال آنکه محاسبه پارامتر ضریب شفافیت اتمسفر در مدل متریک به فشار اتمسفر، مقدار آب اتمسفر، زاویه فرودی خورشید در یک سطح افقی و ضریب واحد مه آلودگی نیاز دارد و به کمک رابطه کلی (ASCE-EWRI، ۲۰۰۵) زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \exp \left[\frac{-0.00146P}{K_t \cos \theta_{hor}} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right) \right] \quad (۵)$$

که در آن:

P : فشار اتمسفر (kpa), W : مقدار آب اتمسفر (mm), θ_{hor} : زاویه فرودی خورشید در یک سطح افقی، K_t : ضریب واحد مه آلودگی که $0 < K_t \leq 1$ برای آسمان بدون ابر $K_t = 1$ و برای شرایط مه‌آلودی و گردوغباری یا هوای آلوده $K_t = 0.5$ است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

شار گرمای خاک G

شار گرمای خاک مقدار گرمایی است که باعث گرم شدن خاک می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s - 273.15)}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (۶)$$

که در آن:

T_s : دمای سطح زمین (K) و NDVI: شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی است که از اختلاف بین بازتابندگی باند مادون قرمز نزدیک از باند قرمز طیف مرئی به دست می‌آید که رابطه آن به‌صورت زیر است:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (۷)$$

که در آن:

¹The ASCE standardized reference evapotranspiration equation

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (10)$$

که در آن:

ET_r : تبخیر و تعرق ساعتی گیاه مرجع (میلی متر بر روز) به روش پنمن مانیتث استاندارد شده که مؤلفه‌های آن با استفاده از روابط ارائه شده در ASCE-EWRI (۲۰۰۵) و داده‌های هواشناسی موجود در ایستگاه هواشناسی مورد-نظر تعیین شد.

تبخیر و تعرق روزانه

در مرحله آخر تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (11)$$

که در آن:

ET_{r-24} : تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع (میلی متر بر روز).

معیارهای ارزیابی

برای بررسی دقت تخمین تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده با استفاده از مدل‌های متریک و سبال، نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها با داده‌های لایسیمتر به کمک شش آماره خطاسنجی که در زیر به آن‌ها اشاره شده، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{method} - ET_L)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{ET_L} \times 100 \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{method} - ET_L|}{n} \quad (14)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{method} - ET_L)}{n} \quad (15)$$

$$r = \frac{\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{method} - \overline{ET_{method}})}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2 \sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})^2}} \quad (16)$$

استفاده می‌کند. همین‌طور طبق پژوهش‌های انجام گرفته بر روی مدل متریک در منطقه آیداهو برای برآورد تبخیر و تعرق در پیکسل سرد که از مزارعی با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب شده از حاصل ضرب ضریب ۱/۰۵ در تبخیر و تعرق مرجع ($-ET = 1.05 * ET_r$) استفاده می‌شود، زیرا تبخیر و تعرق واقعی گیاه مرجع در آیداهو حدوداً پنج درصد بیشتر از تبخیر و تعرق مرجع بدست آمد (آلن و همکاران، ۲۰۰۷). در صورتی که در مدل سبال (۱۹۹۸) از آنجایی که پیکسل سرد سطح آزاد آب در نظر گرفته می‌شود، مقدار تبخیر و تعرق در پیکسل سرد از اختلاف شار تابش خالص از شار گرمای خاک محاسبه می‌شود ($ET = R_n - G$).

تبخیر و تعرق لحظه‌ای^۱

در نهایت، با داشتن مقادیر پارامترهای تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس مقدار شار گرمای نهان (λE) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و تبخیر و تعرق لحظه‌ای با توجه به مقدار شار گرمای نهان و گرمای نهان بخار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda E}{\lambda} \quad (9)$$

که در آن:

ET_{inst} : تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ : گرمای نهان تبخیر (J/kg).

کسر تبخیر و تعرق مرجع^۲

کسر تبخیر و تعرق مرجع ($ET_r F$) در مدل متریک برخلاف مدل سبال همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، به صورت نسبت تبخیر و تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) محاسبه شده از هر پیکسل به تبخیر و تعرق (ET_r) محاسبه شده از اطلاعات هواشناسی به دست می‌آید:

¹ instantaneous ET

² The reference ET fraction

$$SE = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[\sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})^2 - \frac{\left[\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{method} - \overline{ET_{method}}) \right]^2}{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2} \right]} \quad (17)$$

و تعرق اندازه‌گیری شده با روش مورد نظر (mm/day) و n : تعداد داده‌ها است.

که در آن‌ها:

$RMSE$: ریشه میانگین مربعات خطا (mm/day).
 $NRMSE$: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (%).
 MAE : میانگین خطای مطلق (mm/day).
 r : ضریب همبستگی خطای اریب میانگین (mm/day).
 SE : خطای استاندارد (mm/day).
 ET_L : تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر (mm/day).
 $\overline{ET_L}$: میانگین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر (mm/day).
 $\overline{ET_{method}}$: میانگین تبخیر

نتایج و بحث

تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از اعمال مدل‌های سبال و متریک به‌طور جداگانه بر روی تصاویر سنجنده‌های MODIS و ETM+ بدست آمد و نتیجه ارزیابی آماری داده‌های حاصل از اعمال این دو مدل بر روی دو سنجنده یادشده با داده‌های حاصل از لایسیمتر در قالب جدول (۲) ارائه شد.

جدول ۲- نتایج ارزیابی آماری مدل‌های سبال و متریک حاصل از سنجنده‌های MODIS، ETM+ و OLI & TIRS با مقادیر شاهد

سنجنده	روش	SE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	NRMSE (%)	RMSE (mm/day)
MODIS	مدل سبال	۱/۳۹	۰/۶۷	-۲/۳۴	۰/۳۴	۴۶	۲/۵۹
	مدل متریک	۰/۸۵	۰/۸۸	-۱/۶۸	۰/۲۹	۳۴	۱/۹۱
ETM+	مدل سبال	۰/۲۰	۱/۰۰	-۰/۷۰	۰/۲۴	۲۱	۱/۱۴
	مدل متریک	۰/۰۹	۱/۰۰	-۰/۵۱	۰/۱۰	۱۷	۰/۹۱
OLI & TIRS	مدل سبال	۰/۳۶	۰/۵۸	-۰/۱۳	۰/۰۲	۱۱	۰/۳۴
	مدل متریک	۰/۲۹	۰/۹۶	-۰/۱۳	۰/۰۳	۹	۰/۲۸

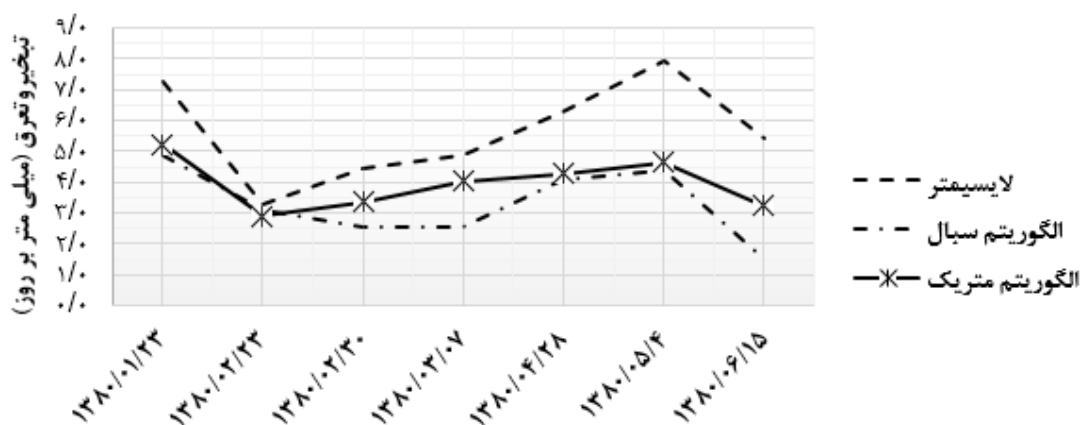
و مقدار میانگین خطای مطلق و مقدار خطای استاندارد و مقدار خطای اریب میانگین (به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۳۷ میلی‌متر بر روز و ۱/۳۹ میلی‌متر بر روز و ۲/۳۴ میلی‌متر بر روز) نسبت به مقادیر همین معیارها در مدل متریک (به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۲۹ میلی‌متر بر روز و ۰/۸۵ میلی‌متر بر روز و ۱/۶۸- میلی‌متر بر روز) با بیش برآورد نسبت به داده‌های مدل متریک خطای بیشتری همراه است. این بدان معنی است که مدل سبال مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع و به دنبال آن مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاهان زراعی را بیش از میزان واقعی برآورد می‌نماید. لذا ضمن اتلاف مقداری از آب در قالب تلفات نفوذ عمقی، رواناب و یا تبخیر از سطح خاک خیس، احتمال افزایش ابعاد کانال‌ها و لوله‌های انتقال آب به مزرعه، افزایش حجم مخزن ذخیره و در نهایت اتلاف منابع مالی و انسانی را نیز به دنبال خواهد داشت. همین‌طور، مدل سبال حاصل از تصاویر سنجنده ETM+ در مجموع با کم برآورد و

نتایج شاخص‌های آماری در جدول (۲) نشانگر این است که مدل سبال حاصل از تصاویر سنجنده MODIS با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (۲/۵۹ میلی‌متر بر روز) بیشتر نسبت به مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در مدل متریک (۱/۹۱ میلی‌متر بر روز) از نظر این معیار نسبت به داده‌برداری لایسیمتر با ضعف روبرو است. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (۴۶ درصد) نیز در مدل سبال در مقایسه با مقدار همین پارامتر در مدل متریک (۳۴ درصد)، بالاتر برآورد شده است. قدرت برآورد مدل زمانی که مقدار این معیار (NRMSE) کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و در صورتی - که بالاتر از ۳۰ درصد باشد ضعیف تخمین زده می‌شود (شیردلی و توسلی، ۱۳۹۴). لذا می‌توان مطرح نمود که در اینجا برآورد سبال از دقت پایین‌تری برخوردار است. از نظر سایر معیارهای واسنجی همچون ضریب همبستگی

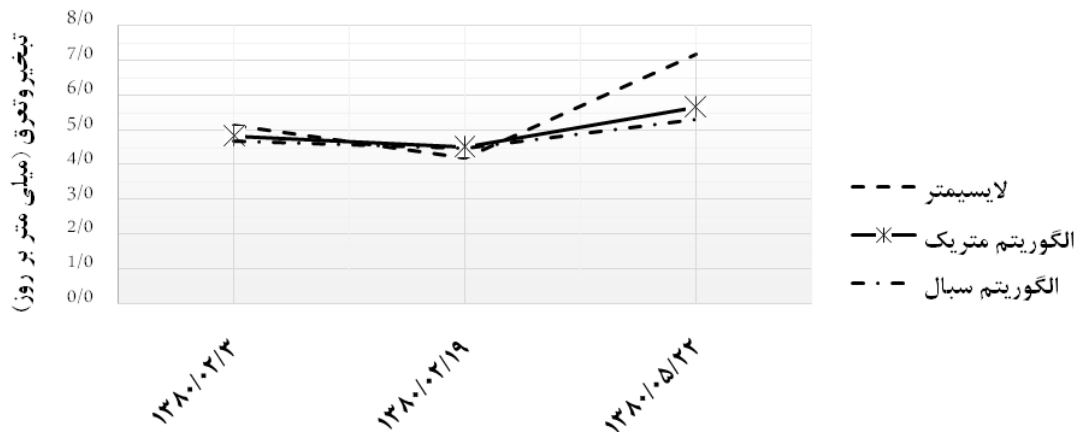
تمامی سنجنده‌ها دقت بالایی در تخمین تبخیر و تعرق دارند ولی به‌طور کلی با بررسی نتایج شاخص آماری، مدل متریک با دقت بیشتری نسبت به مدل سبال می‌تواند برای برآورد تبخیر و تعرق به کار رود. در این ارتباط نتایج امیدوار و همکاران (۱۳۹۲) که به مقایسه نتایج برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو مدل سبال و متریک و تصاویر سنجنده استر پرداخته بودند، نشان داد که مدل سبال نسبت به مدل متریک دارای ۹۳٪ درصد کمی برآورد در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی روزانه در اراضی کشت‌شده است. همچنین، نتایج پژوهش ترزا (۲۰۰۶) طی یک بررسی مقایسه‌ای بین دو الگوریتم متریک و سبال در ونزوئلا، نشان داد که هر دو الگوریتم قادرند مقادیر تبخیر و تعرق را در محدوده قابل قبولی برآورد نمایند و روش متریک هفت درصد نسبت به روش سبال بیش برآورد داشت. در شکل‌های (۲) تا (۴) روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده‌شده با مدل‌های سبال و متریک در سنجنده‌های مختلف نسبت به تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر آمده است.

در ادامه نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی دو مدل متریک و سبال با تصاویر سه سنجنده در شکل‌های (۵) تا (۷) آمده است. آمار نشان داده‌شده در کنار هر تصویر بازه تغییرات نرخ تبخیر و تعرق واقعی در محدوده دشت را نشان می‌دهد.

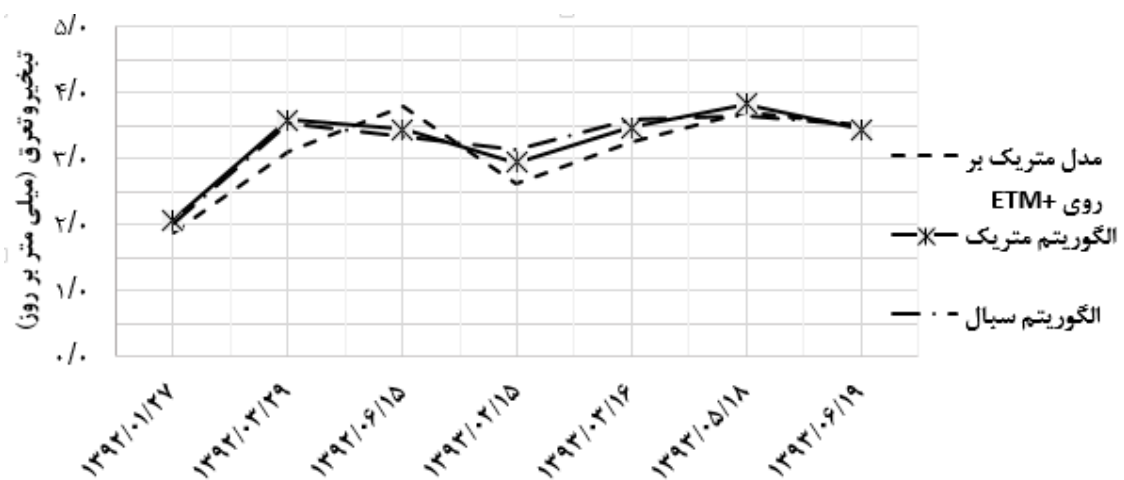
نزدیک بودن داده‌ها نسبت به مدل متریک دارای کمی خطا است، گرچه که مقدار ضریب همبستگی در هر دو مدل (۱/۰۰) یکسان است، اما مقدار این پارامتر به دلیل کم بودن تعداد تصاویر مورد مقایسه چندان دقیق نیست و با بررسی مقادیر سایر شاخص‌های آماری، می‌تواند مقداری نزدیک به یک داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که مدل متریک حاصل از اعمال مدل متریک بر روی تصاویر سنجنده ETM+ با داده‌های لایسیمتری انطباق بیشتری دارد. از سوی دیگر، از آنجایی که تصاویر سنجنده لندست هشت از سال ۲۰۱۳ به بعد در اختیار هستند که داده‌های لایسیمتری وجود ندارد، لذا نتایج حاصل از اجرای مدل متریک بر روی ETM+ به‌عنوان معیار ارزیابی نتایج اجرای مدل‌های سبال و متریک بر روی سنجنده OLI & TIRS در نظر گرفته می‌شود (جدول ۲). در ارتباط با تصاویر سنجنده OLI & TIRS مدل سبال تقریباً در تمامی نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های آماری نسبت به مدل متریک با خطا همراه است. به‌جز مقدار دو معیار خطای اریب میانگین و میانگین خطای مطلق (به ترتیب ۰/۱۳ میلی‌متر بر روز و ۰/۰۲ میلی‌متر بر روز) که در هر دو مدل یکسان است. با توجه به مثبت بودن مقدار خطای میانگین مطلق و یکسان بودن مقدار آن در هر دو مدل، می‌توان نتیجه گرفت که هر دو مدل از روندی با بیش-برآورد به یک میزان نسبت به نتایج مدل متریک بر روی سنجنده ETM+ برخوردارند. به‌طور کلی، هر دو مدل در



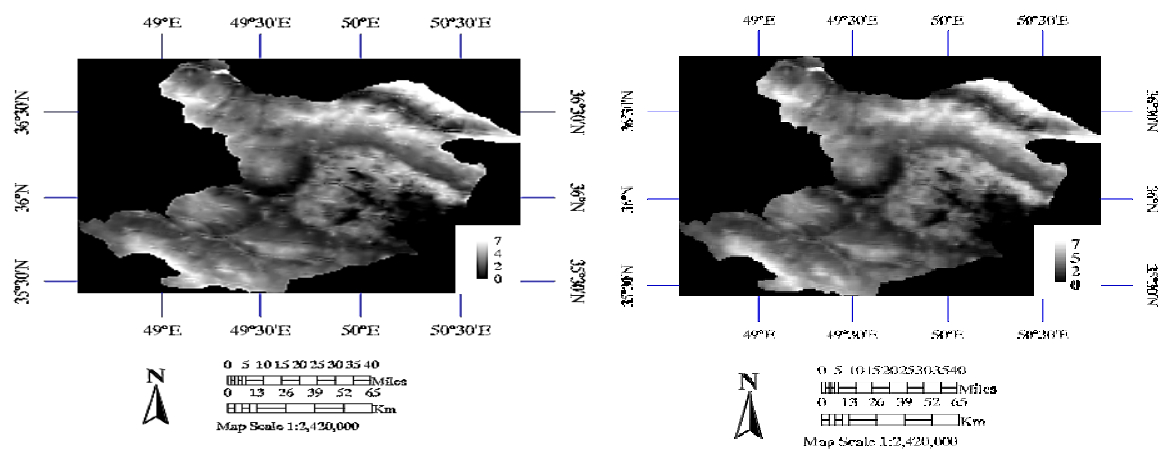
شکل ۲- روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده‌شده با مدل‌های سبال و متریک در سنجنده MODIS



شکل ۳- روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده با مدل‌های سبال و متریک در سنجنده ETM+



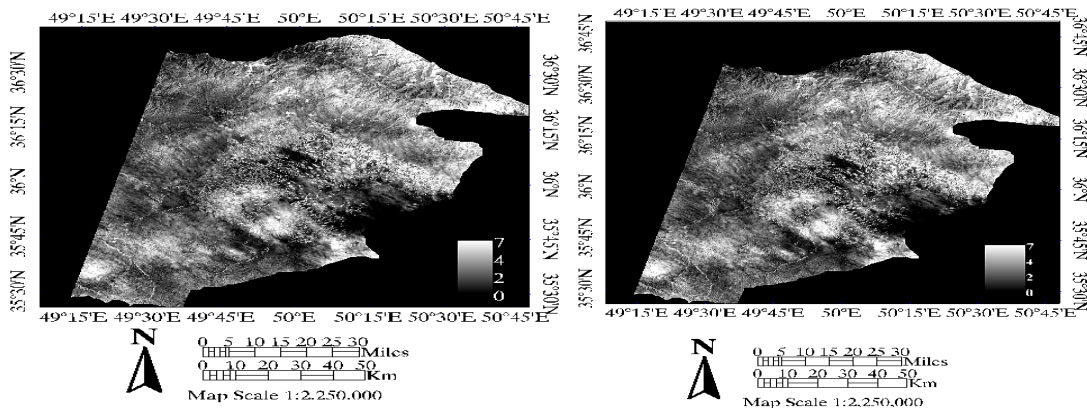
شکل ۴- روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده با مدل‌های سبال و متریک در سنجنده OLI & TIRS نسبت به نتایج مدل متریک در سنجنده ETM+



(۱-۵)

(۲-۵)

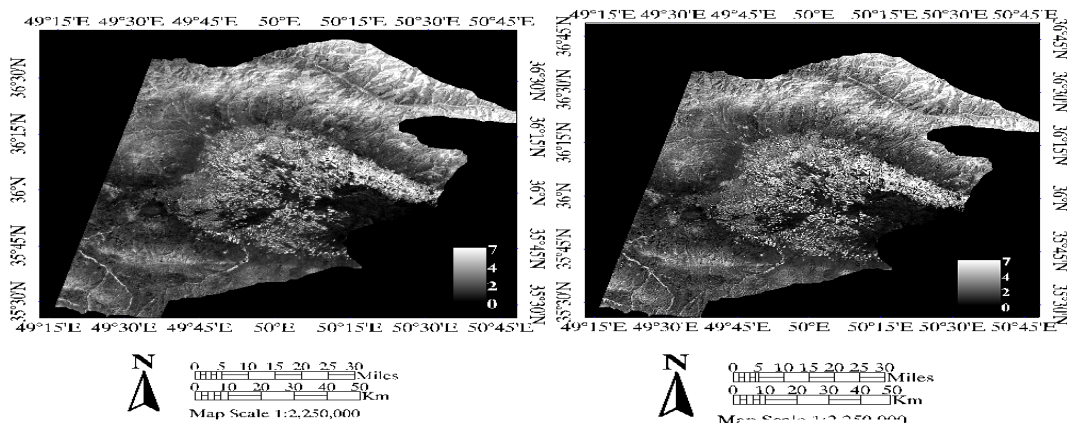
شکل ۵- نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی مدل متریک (۱-۵) و مدل سبال (۲-۵) سنجنده MODIS در تاریخ ۸۰/۰۲/۲۳



(۱-۶)

(۲-۶)

شکل ۶- نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی مدل متریک (۱-۶) و مدل سببال (۲-۶) سنجنده ETM+ در تاریخ ۸۰/۰۲/۱۵



(۱-۷)

(۲-۷)

شکل ۷- نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی مدل متریک (۱-۷) و مدل سببال (۲-۷) سنجنده OLI & TIRS در تاریخ ۹۳/۰۲/۱۹

همکاران، ۲۰۱۳ و جیانگ و همکاران، ۲۰۱۵) نشان داد که استفاده از مدل متریک در تصاویر OLI & TIRS امکان برآورد مناسب تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با توان تفکیک زمینی بالا فراهم می‌آورد و با تخمین صحیح مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در واقع به تخمین دقیق‌تر تبخیر و تعرق گیاهان زراعی و باغی نزدیک‌تر خواهیم شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سعی شده است تا با توجه به شرایط بحرانی و کم‌آبی که در دشت قزوین ایجاد شده است، با تخمین نیاز آبی که یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای مدیریت بهینه آب تلقی می‌شود به برآورد هر چه دقیق‌تر این عامل مهم پرداخته شود. به‌طورکلی، نتایج مدل‌های متریک و سببال حاصل از تصاویر سنجنده

دقت در اشکال (۵) تا (۷) روند بهبود وضوح نقشه‌های تبخیر و تعرق را کاملاً بروز می‌دهد و طبیعی است که با افزایش قدرت تفکیک مکانی از سنجنده MODIS ماهواره ترا به سنجنده OLI & TIRS ماهواره لندست هشت، کاربرد لندست هشت بیشتر توصیه خواهد شد. البته نباید از نظر دور داشت که تصاویر ماهواره لندست هشت توان تفکیک زمانی پایینی داشته و نیاز به تصحیح دارند. علاوه بر این، موارد دارا بودن تعداد سلول‌های بیشتر باعث می‌شود که مدت زمان اجرای عملیات در کامپیوترها طولانی‌تر شده و در پاره‌ای موارد برخی از نرم‌افزارهای سنجنش از دوری توانایی اجرای الگوریتم بر روی این‌گونه تصاویر را ندارند. نتایج این تحقیق در دشت قزوین همچون نتایج حاصل از تحقیقات مشابه (سیمایی و همکاران؛ امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲، جورج و

نتایج سایر سنجنده‌ها برخوردار بود، اما از آنجایی که امکان استفاده از تصاویر ETM+ به دلیل بروز مشکل در تصاویر از سال ۲۰۰۳ میلادی به بعد، تنها تا حدودی با الگوریتم‌های اصلاح خط وجود دارد، لذا پیشنهاد می‌شود از تصاویر ماهواره لندست هشت که از قابلیت توان تفکیک مکانی و طیفی بالاتر و توان تفکیک زمانی برابر با سنجنده ETM+ برخوردار است، استفاده شود. همین‌طور مدل متریک نیز در ارزیابی نتایج هر سه سنجنده مورد بررسی در این پژوهش به‌عنوان مدل برتر برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در سطح دشت قزوین توصیه می‌شود.

MODIS ماهواره ترا و سنجنده ETM+ ماهواره لندست هفت و سنجنده OLI & TIRS ماهواره لندست هشت با داده‌برداری لایسیمیتری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی شاخص‌های آماری نشان داد، مدل متریک برای هر سه سنجنده با مقادیر بالای ضریب همبستگی در سطوح ۹۰ تا ۹۵ درصد و مقادیر پایین درصد خطاها توانست نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به برآورد لایسیمیتر به دست دهد. همین‌طور، از میان نتایج تمامی ماهواره‌های مورد بررسی، نتایج الگوریتم متریک حاصل از سنجنده ETM+ ماهواره لندست هفت با قدرت تفکیک مکانی بالا و کمی برآورد داده‌های تبخیر و تعرق نسبت به داده‌برداری لایسیمیتر از یک روند مناسب و یکنواخت در مقایسه با

فهرست منابع

۱. امیدوار ج.، نوری س.، داوری ک. و فرید حسینی ع. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو مدل سبال و متریک. مهندسی آبیاری و آب. ۳ (۱۲): ۱۱-۲۲.
۲. امیدوار ج.، داوری ک.، ارشد ص.، موسوی بایگی م.، اکبریم. و فرید حسینی ع. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده استر و مدل متریک. مهندسی آبیاری و آب. ۳ (۹): ۳۸-۴۹.
۳. سیمایی ا.، همایی م. و نوروزی ع. ا. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات سنجنده‌های TM و MODIS. حفاظت منابع آب و خاک. ۲ (۴): ۴۰-۲۹.
۴. شیردلی ع. و توسلی ا. ۱۳۹۴. پیش‌بینی عملکرد و کارایی مصرف آب زعفران با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بر مبنای فاکتورهای اقلیمی و آب. زراعت و فناوری زعفران. ۳ (۲): ۱۳۱-۱۲۱.
۵. کوچک‌زاده، م. و نیکبخت، ج. ۱۳۸۳. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران با روش استاندارد فائو پنمن مانتیث. نشریه علوم کشاورزی، ۱۰ (۳): ۴۳-۵۷.
۶. نظری، ر. ۱۳۹۴. تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاهان زراعی و باغی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم METRIC. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد. دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، ۱۳۲ ص.
7. Allen, R.G., M. Tasumi, and R. Trezza. 2007. Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) Model. Irrigation and Drainage Engineering, 133:380-394.
8. Allen, R.G., M. Tasumi, and A. Morse. 2005. Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop, Feb 8-10, Ft. Collins.
9. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome, Italy (FAO Irrigation and Drainage Paper, (56): 300 p).

10. ASCE-EWRI. 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
11. Bastiaanssen, W. 1998. A Remote Sensing Surface Energy Balance algorithm for landformulation. *Hydrology*. 212-229.
12. Chavez, J.L., P.H. Gowda, S.R. Evett, P.D. Colaizzi, T.A. Howell and T. Marek. 2007. An application of METRIC for ET mapping in the Texas high plains. December 9– 11, 2007, Irrigation Association CD-ROM, San Diego, 268–283.
13. George P., P. H. Gowda, P.V.V. Prasad, T.A. Howell, S.A. Staggenborg and C.M.U. Neale. 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BERAEX08. *Advances in water resources*, Vol. 59: 157-168.
14. Jiang-Ying, Y., M. Xu-rong, H. Zhi-guo, Y. Chang-rong, J. Hui, Z. Feng-hua and L. Qin. 2015. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai plain, China. *Journal of integrative agriculture*, Vol. 14 (10): 2065-2076.
15. Tasumi, M., Allen, R.G., and Trezza, R. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 355–376.
16. Tasumi, M., R. Trezza, R.G. Allen, and J.L. Wright. 2003. U.S. validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for large Regions*, 17 Sept.
17. Trezza, R. 2006. Estimation of evapotranspiration from satellite-based surface energy balance models for water management in the Rio Guarico Irrigation System, Venezuela. Universidad de los Andes, NURR-CIDIAT