



بخش از دور

GIS ایران

سال نهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶
Vol.9, No. 1, Spring 2017

سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

۶۳-۷۴



مقایسه نتایج تخمین تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل‌های متریک و سبال، با استفاده از تصاویر سنجنده‌های مودیس و ETM+

رستا نظری^{۱*} و عباس کاویانی^۲

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۳/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۴/۲

چکیده

افزایش محصول به تأمین نیاز آبی گیاه وابسته است؛ در نتیجه، تخمین درست نیاز آبی گیاه هم به تولید محصول کمک می‌کند و هم در مدیریت منابع آب تأثیر دارد. الگوریتم‌های سبال و متریک از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های باقی‌ماندهٔ بیلان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور محسوب می‌شوند. بر همین اساس، هدف از تحقیق حاضر بررسی نتایج تبخیر و تعرق واقعی با اجرای مدل‌های متریک و سبال در دشت قزوین است. به منظور ارزیابی نتایج برآورد تبخیر و تعرق واقعی، از دو سنجنده با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت (تصاویر سنجندهٔ مودیس^۱ ماهوارهٔ ترا و سنجندهٔ ETM+ ماهوارهٔ لندست ۷) استفاده شد. در این زمینه، داده‌های ایستگاه هواشناسی قزوین و نیز داده‌برداری لایسیمتری، به منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم متریک و سبال، به کار رفت. نتایج مدل‌های متریک و سبال با مجموع ده تصویر از تصاویر سنجندهٔ مودیس ماهوارهٔ ترا و سنجندهٔ ETM+ ماهوارهٔ لندست ۷، با داده‌برداری‌های لایسیمتری گیاه مرجع چمن در سال ۱۳۸۰ ارزیابی شدند. سنجندهٔ مودیس با $r = 0/88$ ، $RMSE = 1/91$ و $SE = 0/85$ میلی‌متر بر روز و سنجندهٔ ETM+ با $r = 1/00$ ، $RMSE = 0/91$ و $SE = 0/09$ میلی‌متر بر روز در مدل متریک، در مقایسه با مدل سبال، برآوردی دقیق‌تر از داده‌برداری لایسیمتر دارند و در این تحقیق، مدل متریک به‌منزلهٔ مدل برتر برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقهٔ دشت قزوین توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نیاز آبی، لایسیمتر، سنجندهٔ مودیس، سنجندهٔ ETM+.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: قزوین، گروه مهندسی آب دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۱- مقدمه

ماهواره‌ای، مزایای عمده‌ای دارد. مدل متریک به‌منظور فراهم کردن برآوردهای نسبتاً دقیق‌تر تبخیر و تعرق با قدرت تفکیک مکانی بالا (تقریباً سی متر) و اعمال آثار حرکت افقی هوا در محاسبه تبخیر و تعرق ایجاد شده است. آلن و همکاران^۵ (2005) با به‌کاربردن الگوریتم متریک و مقایسه با مقادیر لایسیمتری، میزان خطا در برآورد تبخیر و تعرق چمن و چغندرقد را به ترتیب چهار و یک درصد برای فصل رشد به دست آوردند. در بررسی دیگری که در آیداهو^۶ انجام شد، دو مدل توازن انرژی سبال قدیمی (1998) و متریک با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد هر دو مدل توازن انرژی با نتایج حاصل از لایسیمتر تطابق خوبی دارند و استفاده از آن دو مدل توازن انرژی برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی پیشنهاد شد (Tasumi et al., 2005). کاسا و همکاران^۷ (2008) تحقیقاتی در زمینه ارزیابی و برآورد نیاز آبی، با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، با توسعه الگوریتم سبال، در منطقه پونتینا- پلین^۸ ایتالیا انجام دادند. در این تحقیق با استفاده از طبقه بندی تصاویر لندست و مودیس، نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ET_c) و گیاه مرجع (ET_o)، به‌صورت سالیانه، در سامانه اطلاعات جغرافیایی حاصل شد و در نهایت، نیاز آبی برای کل سطح منطقه به‌دست آمد. هنگ و همکاران^۹ (2009) تبخیر و تعرق روزانه را با استفاده از الگوریتم سبال، برای دو تصویر لندست و مودیس در نیومکزیکو به دست آوردند. هدف این مطالعه آزمودن پایداری الگوریتم سبال برای سنجنده‌های گوناگون ماهواره لندست و مودیس بود. نتایج نشان داد

نقش مهم و حیاتی آب در توسعه اقتصادی و اجتماعی ایجاب می‌کند راهکارهای خاصی در گسترش و مدیریت مؤثر این منابع به‌کار گرفته شود. برآورد و تعیین نیاز آبی گیاهان شاخصی مهم در مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی و طراحی سیستم‌های آبیاری مزرعه شمرده می‌شود. تعیین دقیق این عامل نیازمند صرف زمان و هزینه بسیار است؛ بنابراین، استفاده از روش‌های جدید و کم‌هزینه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان در سطح منطقه‌ای و گسترده ضروری به‌نظر می‌رسد.

سنجنش از دور^۱، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و کمینه داده‌های زمینی و مدل‌های متعدد، تخمین نسبتاً دقیقی از میزان تبخیر و تعرق در سطوح گسترده عرضه می‌کند. مدل بیلان انرژی سطحی برای زمین^۲ یا سبال (Bastiaanssen et al., 1998) و مدل پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی^۳ یا متریک (Allen et al., 2007) جزء پرکاربردترین مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور محسوب می‌شوند. مدل سبال که بعدها تاسومی و همکاران^۴ (۲۰۰۳) آن را اصلاح کردند، از مدل‌های مبتنی بر سنجنش از دور سطح زمین است و به‌منظور تعیین شار انرژی که به‌راحتی به شار رطوبت تبدیل می‌شود، ایجاد شده و می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی در زمان عبور ماهواره را تخمین بزند. این مدل در تعدادی از پروژه‌ها و مطالعه‌ها استفاده شده و با آزمایش‌های میدانی بسیاری در اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، هند، سریلانکا، نیجریه و چین صحت‌سنجی شده که نتایج صحت‌سنجی قابلیت‌های این مدل را خوب و مطلوب ارزیابی کرده‌اند (Bastiaanssen et al., 1998).

مدل پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی (متریک)، در قیاس با روش‌های قدیمی باقی‌مانده بیلان انرژی ($\lambda E = R_n - G - H$) مبتنی بر تصاویر

1. Remote Sensing
2. Surface Energy Balance Algorithms for Land, SEBAL
3. Mapping EvapoTranspiration with Internalized Calibration, METRIC
4. Tasumi et al.
5. Allen et al.
6. Idaho
7. Casa et al.
8. Pontina Plain
9. Hong et al.

انرژی متریک از مدل‌های مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس محلی محسوب می‌شود. تحقیق حاضر امکان استفاده از تکنیک سنجش از دور را، برای تولید نقشه‌های تبخیر و تعرق، با استفاده از مدل‌های متریک و سبال که در مکان پیوسته‌اند (سطح به هم پیوسته داده‌های تبخیر و تعرق، با قرارگیری سلول‌های تصویر در کنار یکدیگر) و با فاصله زمانی کوتاه (زمان اندک بین برداشت دو تصویر متوالی از یک نقطه) در اختیارند، ارزیابی می‌کند. در نهایت، مقایسه آماری نتایج تبخیر و تعرق محاسبه شده با این مدل‌ها، با داده برداری لایسیمتر، مدل برتر برای استفاده در سطح دشت قزوین را معرفی خواهد کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه اراضی پایین دست شبکه آبیاری دشت قزوین است که در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب پایتخت و بین عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}00'00''$ تا $36^{\circ}00'20''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $49^{\circ}35'35''$ تا $49^{\circ}35'50''$ شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت دشت قزوین حدود ۴۵۰ هزار هکتار است که شهرهای آبیک، قزوین، تاکستان و بوئین زهرا در حاشیه شمالی و جنوبی آن قرار دارند. این استان از دو حوضه

تبخیر و تعرق روزانه حاصل از تصویر لندست انحراف معیاری بالاتر از تصاویر مودیس دارد اما میانگین مقادیر تبخیر و تعرق روزانه برای دو تصویر بسیار مشابهت دارد که تفاوت این دو مقدار در قدرت تفکیک مکانی، هندسی و رادیومتریک این دو تصویر است. مباحثی و خاوریان نهزک (۱۳۸۵)، با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم سبال، مقدار تبخیر و تعرق واقعی برای ناحیه مزرعه نمونه ارتش واقع در استان گلستان را، در دو تاریخ مشخص در سال ۱۳۸۲، برآورد کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از باندهای ۱ تا ۵ و ۷ تصویر مودیس، در مقابل فقط استفاده از باندهای ۱ و ۲، برآورد دقیق تری از آلبیدوی سطحی به دست می‌آید و در الگوریتم سبال، به علت استفاده از پیکسل‌های سرد و گرم برای تعیین مقدار تبخیر و تعرق دیگر پیکسل‌ها، محدوده مقادیر حاصل به طور نسبی منطقی است؛ هرچند امکان دارد با مقادیر حقیقی تفاوت داشته باشند. امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از تصاویر سنجنده استر^۱ و مدل متریک، در استان خراسان رضوی برآورد کردند. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشینه میزان تبخیر و تعرق واقعی را برای سه محدوده کشاورزی گل‌مکان، مشهد و قوچان به ترتیب برابر با ۹/۱۳، ۷/۲۹ و ۲/۳۷ میلی متر در روز گزارش دادند. همچنین، نتایج نشان داد که مدل توازن



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان قزوین و محدوده مورد مطالعه

1. ASTER

۱۳۸۰). شایان ذکر است که در این تحقیق، از نتایج گزارش‌های آخرین داده‌برداری لایسیمتری موجود در منطقه استفاده شد.

۲-۳- تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق، از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا و سنجنده ETM+^۴ ماهواره لندست ۷، برای ارزیابی هر دو سنجنده یادشده، با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت در برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد. سنجنده مودیس تصاویری جامع در ۳۶ باند طیفی از سطح زمین و در چندین تفکیک‌پذیری مکانی (۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و یک کیلومتر، با توجه به طول موج) فراهم می‌کند.

ماهواره لندست ۷ با سنجنده ETM+، متشکل از هشت باند، دارای تفکیک‌پذیری مکانی ۳۰ متر (باندهای ۱ تا ۵ و ۷)، ۶۰ متر (باند ۶) و ۱۵ متر (باند ۸) است. در ۳۱ مه سال ۲۰۰۳، سامانه تصحیح‌کننده خط پویس^۵ ماهواره لندست ۷ که مسئول ایجاد تعادل و تصحیح در جهت حرکت این ماهواره است دچار نقص فنی شد و گزارش‌ها بیان می‌کنند که این نقص فنی ماندگار است و قابلیت تعمیر ندارد. از این رو در تحقیق حاضر، از تصاویر موجود در تاریخ‌های پیش از نقص فنی (در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) و متناسب با زمان داده‌برداری لایسیمتر استفاده شد.

اصلی آبریز شور و سفیدرود تشکیل شده است. حوضه آبریز شور وسیع‌ترین حوضه آبریز استان به‌شمار می‌آید و ۷۲/۴٪ از وسعت سرزمینی را که به دشت قزوین مشهور است دربر می‌گیرد. براساس اقلیم‌نمای دومارتن^۱، اقلیم منطقه نیمه‌خشک ارزیابی شد. الگوی کلی کشت در محدوده مورد مطالعه به صورت ۵۰٪ کشت پاییزه است که بیشتر گندم و جو را شامل می‌شود. افزون بر گندم و جو که بیشتر به صورت پاییزه کشت می‌شوند، باغ‌های میوه، ذرت علوفه‌ای و دانه‌ای، گیاهان علوفه‌ای و دانه‌های روغنی از جمله کشت‌های غالب محدوده مورد مطالعه‌اند.

۲-۲- داده‌های هواشناسی و لایسیمتری

در این تحقیق^۲ 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 ۳' ۵۰ درجه شرقی و ارتفاع ۱۲۷۹ متری از سطح دریا، در بازه زمانی روزانه و ماهیانه، طی سال‌های ۱۳۸۰، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ به‌منظور 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 ۲۴" ۱۵' ۳۶ درجه شمالی و ۳۵" ۴۹' ۵۴ شرقی به کار رفت. لایسیمتر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن را اندازه می‌گرفت. ارتفاع چمن در زمان تحقیق بین پنج تا پانزده سانتی‌متر نگهداری می‌شد. به منظور تأثیر یکنواختی میکروکلیم^۳ در جهت حذف آثار حرکت افقی گرما، لایسیمتر در مرکز قطعه‌ای زمین به ابعاد ۴۰×۵۰ مترمربع قرار گرفت و مساحتی حدود دو مترمربع را می‌پوشاند. داده‌برداری‌های لایسیمتری از تاریخ پنجم فروردین‌ماه سال ۱۳۸۰ (۲۵ مارس سال ۲۰۰۱) آغاز و به صورت روزانه و هفتگی تا تاریخ ۲۶ اسفندماه همان سال (۱۷ مارس ۲۰۰۲) ادامه یافت (ابراهیمی پاک،

1. Demartonne

۲. تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاهان زراعی و باغی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم METRIC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

3. climate micro

4. Enhanced Thematic Mapper Plus

۵. Scan Line Corrector: سامانه تصحیح‌کننده خط پویس (SLC) دستگاهی الکترونیکی است که اجازه می‌دهد آینه اسکن‌کننده ETM+ به صورت پیاپی به جلو و عقب، صحنه را اسکن کند و در نتیجه، باعث تولید نوارهای اسکن‌شده موازی از صحنه می‌شود.

جریان سطحی محاسبه می‌شود:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (1) \text{ رابطه}$$

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

۲-۴-۱- تابش خالص R_n

شار تابش خالص با استفاده از موازنه شارهای تابشی خروجی و ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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 عبارت است از تابش‌هایی مستقیم و پراکنده که به زمین می‌رسند و مقدار آن‌ها در شرایط آسمان صاف و بدون ابر و در زمان تصویربرداری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن G_{sc} ثابت خورشیدی برابر با (W/m^2) ۱۳۶۷، 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

عملیات مربوط به پیش‌پردازش، پردازش، انجام دادن تصحیح‌ها و محاسبه‌های باندهای تصاویر هریک از سنجنده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ENVI^۱ نسخه ۴.۲، که نرم‌افزاری برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای است، صورت گرفت. از جمله تصحیح‌های انجام گرفته روی تصاویر پیش از بررسی، می‌توان به زمین مرجع کردن^۲ تصاویر سنجنده مودیس تصحیح‌های رادیومتریک تصاویر لندست برای تبدیل ارزش‌های رقومی (DN) ثبت‌شده از پیکسل‌ها به تابش^۳ و بازتابش^۴ طیفی و تصحیح‌های اتمسفری اشاره کرد. باقی محاسبه‌ها و برنامه‌نویسی مربوط به روند یافتن شار گرمای محسوس، با استفاده از نرم‌افزارهای اکسل، در مایکروسافت آفیس و متلب^۵ انجام گرفت. در بررسی تصاویر هر دو سنجنده، تا حد ممکن از تصاویر روزانه در شرایط آسمان بدون ابر استفاده شد؛ از این رو، تعداد تصاویر مورد ارزیابی، با توجه به شرایط آب‌وهوایی زمان برداشت و تاریخ گذر ماهواره از منطقه مورد نظر، با هم برابر نیستند. تاریخ‌های مورد بررسی تصاویر هر دو سنجنده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. تاریخ‌های مورد بررسی دو سنجنده

MODIS	ETM+
۱۳۸۰/۰۱/۲۳	۱۳۸۰/۰۲/۰۳
۱۳۸۰/۰۲/۲۳	۱۳۸۰/۰۳/۱۹
۱۳۸۰/۰۲/۳۰	۱۳۸۰/۰۵/۲۲
۱۳۸۰/۰۳/۰۷	
۱۳۸۰/۰۴/۲۸	
۱۳۸۰/۰۵/۰۴	
۱۳۸۰/۰۶/۱۵	

۲-۴-۲- اجزای معادله بیلان انرژی در مدل‌های

متریک و سبال

به‌طور کلی در مدل‌های متریک و سبال، تبخیر و تعرق در تصاویر ماهواره‌ای با به‌کارگیری بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود؛ جایی که انرژی مصرف‌شده از طریق ET^۶ به‌منزله باقی‌مانده معادله شار انرژی

1. The Environment for Visualizing Images
2. georeferencing
3. radiance
4. reflectance
5. Matlab
6. evapotranspiration

۲-۴-۳- شار گرمای محسوس H

عبارت از جریان انتقال گرما از سطح زمین به جو است و از تابعی آیرودینامیک تخمین زده می‌شود:

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

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 (K)، r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما (S/m) است.

در تخمین شار گرمای محسوس پارامترهایی همچون اختلاف دما و مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما نامعلوم‌اند. برای پیدا کردن مجهولات، مدل متریک و سبال از دو پیکسل شاخص با 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؛ درحالی‌که پیکسل گرم از اراضی زراعی بدون پوشش گیاهی و خشک گزینش می‌شود.

با وجودی که روند کلی محاسبات دو مدل متریک (۲۰۰۷) و سبال (۱۹۹۸) در بسیاری از موارد مشابه‌اند، به‌طور کلی الگوریتم متریک با انجام دادن مجموعه‌ای کالیبراسیون داخلی، در تخمین H، برآورد متفاوتی از شار گرمای نهان به نسبت مدل سبال (۱۹۹۸) به دست می‌دهد. از تفاوت‌های مهم میان دو مدل، می‌توان به کالیبراسیون مدل متریک، با استفاده از ET مرجع نسبت به جزء تبخیر و استفاده از ET مرجع برای برون یابی ET لحظه‌ای در دوره‌های ۲۴ ساعته اشاره کرد. این درحالی است که مدل سبال (۱۹۹۸) از جزء تبخیر که به صورت نسبت شار گرمای نهان به اختلاف شار تابش خالص از شار گرمای خاک ($\lambda/(R_n-G)$) تعریف می‌شود، استفاده می‌کند. همین‌طور طبق تحقیقات انجام گرفته روی مدل متریک در منطقه

1. the ASCE standardized reference evapotranspiration equation

آیداهو جهت برآورد تبخیر و تعرق در پیکسل سرد که

متفاوت بودن رابطه محاسبه پارامتر ضریب شفافیت اتمسفر در دو مدل، یکسان نیست زیرا در محاسبه پارامتر ضریب شفافیت اتمسفر در مدل سبال، فقط به پارامتر ارتفاع از سطح دریا (Z) نیاز است که رابطه آن بدین صورت محاسبه می‌شود:

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

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 مه‌آلودگی نیاز دارد و به کمک رابطه کلی ASCE-EWRI¹ (2005) زیر به دست می‌آید:

رابطه (۵)

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

P فشار هوا (kpa)، W کل آب قابل بارش (mm)، θ_{hor} زاویه فرودی خورشید با سطحی افقی، K_f ضریب واحد مه‌آلودگی که $0 < K_f \leq 1$ ، برای آسمان بدون ابر $K_f=1$ و برای شرایط مه‌آلودگی و گردوغباری یا هوای آلوده $K_f=0.5$ است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

۲-۴-۲- شار گرمای خاک G

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

رابطه (۶)

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s - 273.15)}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98 N D V I^4)$$

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

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

ρ_{NIR} بازتابندگی باند فرورسرخ نزدیک و

ρ_R بازتابندگی باند قرمز طیف مرئی است.

۲-۴-۶- 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 (میلی‌متر بر روز) است.

۲-۵- معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطاسنجی)

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 کرده‌ایم، ارزیابی شدند.

رابطه (۱۲)

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

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

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

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

رابطه (۱۶)

$$r = \frac{\sum (ET_L - \overline{ET}_L)(ET_{method} - \overline{ET}_{method})}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET}_L)^2 \sum (ET_{method} - \overline{ET}_{method})^2}}$$

از مزارعی با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب شده، از حاصل ضرب ضریب $1/0.5$ در تبخیر و تعرق مرجع ($ET = 1.05 * ET_r$) استفاده می‌شود زیرا تبخیر و تعرق واقعی گیاه مرجع در آینده حدوداً 5% بیشتر از تبخیر و تعرق مرجع به دست آمد (آلن و همکاران، ۲۰۰۷). در صورتی که چون در مدل سبال (۱۹۹۸) 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 ($ET = R_n - G$).

۲-۴-۴- 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 رابطه (۱) محاسبه می‌شود و تبخیر و تعرق لحظه‌ای، با توجه به مقدار شار گرمای نهان و گرمای نهان بخار، به صورت زیر به دست می‌آید:

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

که در آن ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr) و λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) است.

۲-۴-۵- کسر تبخیر و تعرق مرجع^۲

کسر تبخیر و تعرق مرجع ($ET_r F$) در مدل متریک، برخلاف مدل سبال همان‌گونه که پیش‌تر 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:

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

که در آن ET_r تبخیر و تعرق ساعتی گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز) به روش پنمن-مانتیت استاندارد شده که مؤلفه‌های آن با استفاده از روابط مطرح شده در ASCE-EWRI (2005) و داده‌های هواشناسی موجود در ایستگاه هواشناسی مورد نظر تعیین شد.

1. instantaneous ET
2. the reference ET fraction

رابطه (۱۷)

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

سنجنده‌ها، تعیین شد. نتایج نشان داد که به‌ازای مقدار L های کوچک‌تر، انحراف معیار بزرگ‌تر خواهد بود و در مقدار L های بزرگ‌تر، به مقادیر ثابتی میل می‌کند. با در نظر گرفتن مقدار $L=0/5$ ، با توجه به اقلیم سرد و نیمه‌خشک منطقه، انحراف از معیار نیز کمتر است و به مقدار ثابتی میل می‌کند؛ در حالی که باستانسن و همکاران^۵ در سال (۲۰۰۲) برای الگوریتم سبال مقدار L را در منطقه آیداهو ۰/۱ فرض کردند. آلن و همکاران (۲۰۰۷) نیز در روند الگوریتم متریک، همین مقدار را برای منطقه آیداهو به کار بردند. در این تحقیق در روند محاسبات هر دو الگوریتم، از مقدار $L=0/5$ استفاده شد و کاربرد این مقدار در منطقه مورد نظر توصیه می‌شود. در ادامه، نتایج ارزیابی آماری مقایسه تبخیر و تعرق تخمین زده شده، با استفاده از مدل‌های سبال و متریک حاصل از سنجنده‌های مودیس و ETM+، در مقایسه با داده‌های لایسیمتر برای سال ۱۳۸۰ در جدول ۲ آمده است.

نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۲ نشان‌دهنده این مفاهیم است که مدل سبال حاصل از تصاویر سنجنده مودیس با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (۲/۵۹ میلی‌متر بر روز) به نسبت مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در مدل متریک (۱/۹۱ میلی‌متر بر روز)، از نظر این معیار به نسبت داده‌برداری لایسیمتر، با ضعف بیشتری روبه‌روست. مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۰/۴۶) نیز در مدل سبال، در مقایسه با مقدار همین پارامتر در مدل متریک (۰/۳۴)، بالاتر برآورد شده است. قدرت پیش‌بینی مدل زمانی که مقدار

که در آن‌ها $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا $NRMSE$ (mm/day) ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده MAE (%) میانگین خطای مطلق MBE (mm/day) خطای اریب میانگین r ضریب همبستگی (-)، SE خطای استاندارد (mm/day)، ET_L تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر ET_{method} (mm/day) تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با روش مورد نظر $\overline{ET_L}$ (mm/day) میانگین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر $\overline{ET_{method}}$ (mm/day) میانگین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با روش مورد نظر n (mm/day) تعداد داده‌هاست.

۳- نتایج و بحث

پیش از تحلیل نتایج ارزیابی‌های آماری جهت برآورد صحیح مقدار تبخیر و تعرق و کالیبراسیون الگوریتم‌ها در منطقه، در این زمینه توضیحاتی می‌دهیم. در روند محاسبات هر دو الگوریتم، از شاخصی با عنوان شاخص SAVI (شاخص گیاهی اصلاح شده خاک) طبق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{NIR} - \rho_R)}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} \quad (18)$$

که در این رابطه، مقدار پارامتر L ثابت است و چون پارامتر L با توجه به مقدار رطوبت خاک متغیر است، می‌توان از این پارامتر در برآورد صحیح تبخیر و تعرق واقعی و کالیبراسیون الگوریتم‌ها در منطقه استفاده کرد. مقادیر L در دامنه صفر در مناطق مرطوب تا یک در مناطق خشک متغیرند (لیانگ، ۲۰۰۴). مقدار L با توجه به شرایط آب‌وهوایی و اقلیم منطقه مورد نظر، با بررسی مقادیر به‌دست‌آمده SAVI از تصاویر

1. Root-Mean-Square Error
2. Normalized Root-Mean-Square Error
3. Mean Absolute Error
4. Mean Bias Error
5. Bastiaanssen et al.

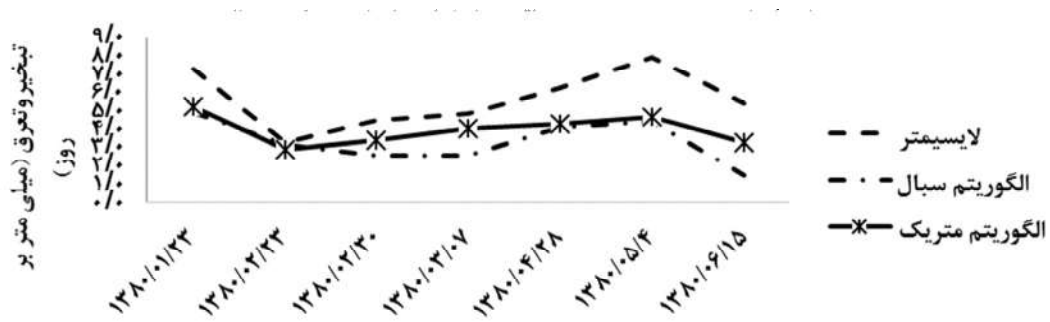
جدول ۲. نتایج ارزیابی آماری مقایسه تبخیر و تعرق تخمین زده شده با استفاده از مدل های سبال و متریک حاصل از سنجنده های مودیس و ETM+ در مقایسه با داده های لایسیمتر در سال ۱۳۸۰

سنجنده	روش	SE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	NRMSE (%)	RMSE (mm/day)
مودیس	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

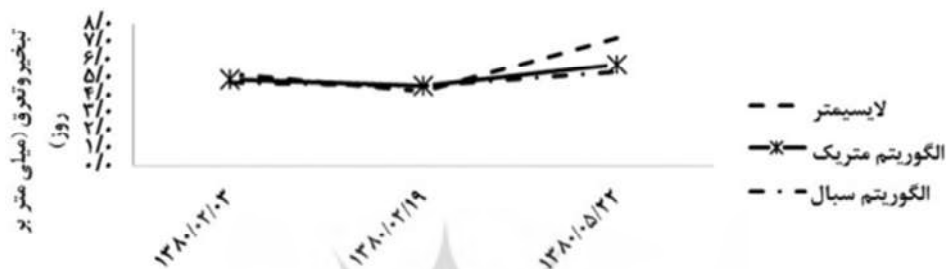
(۱۳۹۲) که نتایج برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره ای را با استفاده از دو مدل سبال و متریک و تصاویر سنجنده استر مقایسه کرده بودند، نشان داد که مدل سبال در قیاس با مدل متریک دارای ۸/۹۳٪ کم برآورد در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی روزانه در اراضی کشت شده است. همچنین نتایج پژوهش ترزا^۱ (2006)، طی بررسی مقایسه ای بین دو الگوریتم متریک و سبال در ونزوئلا، نشان داد که هر دو الگوریتم قادرند مقادیر تبخیر و تعرق را در محدوده مطلوبی برآورد کنند و روش متریک، به نسبت روش سبال، 7٪ بیش برآورد داشت. در شکل های ۲ و ۳ روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده با مدل های سبال و متریک در دو سنجنده مورد نظر، در مقایسه با تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر، آمده است. با توجه به تصویر شکل های ۲ و ۳، به صورت کلی در تمامی تاریخ های مورد بررسی، هر دو مدل سبال و متریک مقدار تبخیر و تعرق را کمتر از لایسیمتر تخمین می زنند. اما در ارتباط با تفاوت بیشتر میان داده های لایسیمتر و دو الگوریتم سبال و متریک در تاریخ ۱۳۸۰/۵/۴ در تصاویر مودیس و در تاریخ ۱۳۸۰/۵/۲۲ در تصاویر ETM+، می توان برداشت کرد به این دلیل که برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی به مقدار آب در دسترس و پوشش گیاهی ارتباط دارد؛ در این روزهای فصل تابستان به دلیل افزایش دما و کاهش رطوبت زمین و ناهماهنگی زمان و مقدار آبیاری در مزارع مجاور با شرایط مطلوب در لایسیمتر، مقدار

این معیار (NRMSE) کمتر از ۱۰٪ باشد عالی، بین ۱۰ تا ۲۰٪ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰٪ متوسط و در صورتی که بالاتر از ۳۰٪ باشد ضعیف تخمین زده می شود (شیردلی و توسلی، ۱۳۹۴). بنابراین، می توان گفت که در اینجا برآورد سبال دقت کمتری دارد. از نظر دیگر معیارهای واسنجی همچون ضریب همبستگی، مقدار میانگین خطای مطلق و مقدار خطای استاندارد و مقدار خطای اریب میانگین (به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۳۴ میلی متر بر روز، ۱/۳۹ میلی متر بر روز، ۲/۳۴ میلی متر بر روز)، در مقایسه با مقادیر همین معیارها در مدل متریک (به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۲۹ میلی متر بر روز، ۰/۸۵ میلی متر بر روز و ۱/۶۸ میلی متر بر روز) با خطای بیشتری همراه است. همین طور مدل سبال حاصل از تصاویر سنجنده ETM+ در مجموع، با کم برآورد و نزدیک بودن داده ها در مقایسه با مدل متریک، دارای اندکی خطاست. گرچه مقدار ضریب همبستگی در هر دو مدل (۱/۰۰) یکسان است؛ مقدار این پارامتر، به دلیل کم بودن تعداد تصاویر مورد مقایسه، چندان دقیق نیست و با بررسی مقادیر دیگر شاخص های آماری، می تواند مقداری نزدیک به یک داشته باشد. در مجموع، سنجنده مودیس با $r = 0/88$ ، $RMSE = 1/91$ و $SE = 0/85$ میلی متر بر روز و سنجنده ETM+ با $r = 1/00$ ، $RMSE = 0/91$ و $SE = 0/09$ میلی متر بر روز در مدل متریک، در مقایسه با مدل سبال، برآوردی دقیق تر از داده برداری لایسیمتر دارند. همچنین در این ارتباط، نتایج امیدوار و همکاران

1. Trezza



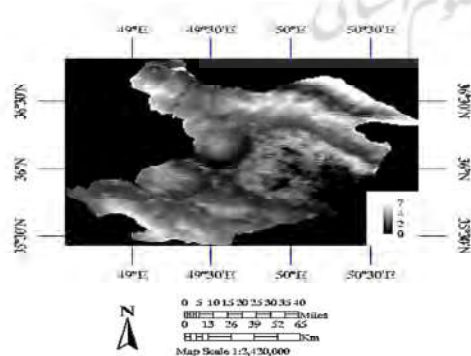
شکل ۲. روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده با مدل های سبال و متریک در سنجنده مودیس



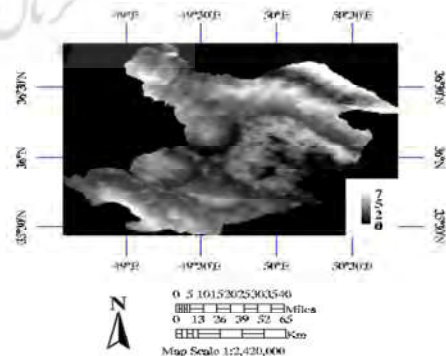
شکل ۳. روند تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق تخمین زده شده با مدل های سبال و متریک در سنجنده ETM+

تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر و تعرق موجود در لایسیمتر کمتر است. در ادامه، نقشه های تبخیر و تعرق واقعی دو مدل متریک و سبال با تصاویر هریک از سنجنده ها در شکل های ۴ و ۵ آمده است. آمار درج شده کنار هر تصویر بازه تغییرات میزان تبخیر و تعرق واقعی در محدوده دشت را نشان می دهد.

دقت در شکل های ۴ و ۵ روند بهبود وضوح نقشه های تبخیر و تعرق را کاملاً بروز می دهد و طبیعی است که با افزایش قدرت تفکیک مکانی از سنجنده مودیس ماهواره ترا به سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷، کاربرد لندست ۷ بیشتر توصیه خواهد شد. البته نباید از نظر دور داشت که تصاویر ماهواره لندست ۷ توان تفکیک زمانی کمی دارند و باید آنها را تصحیح کرد.

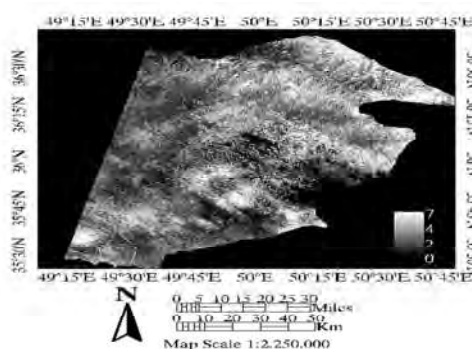


(۱.۴)

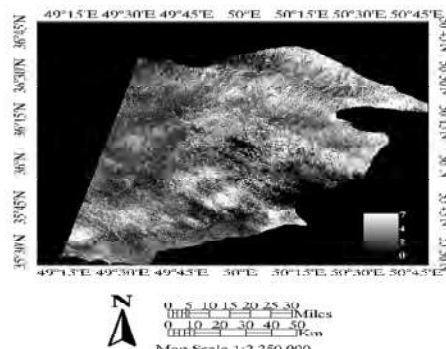


(۲.۴)

شکل ۴. نقشه های تبخیر و تعرق واقعی مدل متریک (۱.۴) و مدل سبال (۲.۴) سنجنده مودیس در تاریخ ۸۰/۰۲/۲۳



(۱.۵)



(۲.۵)

شکل ۵. نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی مدل متریک (۱.۵) و مدل سبال (۲.۵) سنجنده ETM+ در تاریخ ۸۰/۰۲/۱۵

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی شده است با توجه به شرایط بحرانی و کم آبی در دشت قزوین، با تخمین نیاز آبی که یکی از مهم‌ترین عوامل برای مدیریت بهینه آب به‌شمار می‌رود، این عامل مهم هرچه دقیق‌تر برآورد شود. به‌طور کلی، نتایج مدل‌های متریک و سبال حاصل از تصاویر سنجنده مودیس ماهواره ترا و سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ با داده‌برداری لایسیمیتری ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی شاخص‌های آماری نشان داد مدل متریک، برای هر دو سنجنده، توانست نتایجی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به برآورد لایسیمتر به‌دست دهد. همچنین از میان نتایج دو ماهواره‌های مورد بررسی، نتایج الگوریتم متریک حاصل از سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ با قدرت تفکیک مکانی بالا و کمی برآورد داده‌های تبخیر و تعرق، در مقایسه با داده‌برداری لایسیمتر، روندی مناسب و یکنواخت‌تر از نتایج سنجنده مودیس داشت. همین‌طور مدل متریک نیز، در ارزیابی نتایج هر دو سنجنده مورد بررسی در این پژوهش، به‌منزله مدل برتر برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان زراعی و باغی در سطح دشت قزوین توصیه می‌شود.

۵- منابع

ابراهیمی پاک، ن.ع.، ۱۳۸۰، تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از لایسیمتر و مقایسه با روش‌های تجربی، گزارش پژوهشی سالیانه، وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی قزوین، بخش تحقیقات آب و خاک.

امیدوار، ج.، داوری، ک.، ارشد، ص.، موسوی بایگی، م.، اکبری، م.، فرید حسینی، ع.، ۱۳۹۱، برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده استر و مدل متریک، مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، ش. ۹، صص. ۳۸-۴۹.

امیدوار، ج.، نوری، س.، داوری، ک.، 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، سال سوم، ش. ۱۲، صص. ۱۱-۲۲.

شیردلی، ع.، توسلی، ا.، ۱۳۹۴، پیش‌بینی عملکرد و کارآیی مصرف آب زعفران با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بر مبنای

- of Reference Evapotranspiration, ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 PP.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1998, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for landformulation**, Hydrology, PP. 212-229.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, J.F., Moreno, G.J. & Vanderwal, T., 2002, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Validation**, Journal of Hydrology, (212-213), PP. 213-229.
- Casa, R., Rossi, M., Sappa, G. & Trotta, A., 2008, **Assessing Crop Water Demand by Remote Sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy**, Springer Science + Business Media BV 23, PP. 1685-1712.
- Hong, S.H., Hendrickx, J. & Borchers, B., 2009, **Up-Scaling of SEBAL Derived Evapotranspirationmaps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) Scale**, J of Hydrol, 370, PP. 122-138.
- Liang, S., 2004, **Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces**, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA. ISBN 0 471 28166 2.
- Tasumi, M., Allen, R.G. & 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, PP. 355-376.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. & Wright, J.L., 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.
- 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.
- فاکتورهای اقلیمی و آب، زراعت و فناوری زعفران، سال سوم، ش. ۲، صص. ۱۳۱-۱۲۱.
- کوچک‌زاده، م.، نیکبخت، ج.، ۱۳۸۳، **مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم های مختلف ایران با روش استاندارد فائو پنمن-مانتیت**، نشریه علوم کشاورزی، سال دهم، ش. ۳، صص. ۴۳-۵۷.
- مباشری، م.، خاوریان نهزک، ح.، ۱۳۸۵، **تجزیه و تحلیل روش های استفاده از ماهواره در تعیین میزان تبخیر-تعرق**، مجله علوم جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم تهران. جلد سوم، ش. ۳، صص. ۸۵-۹۵.
- نظری، ر.، کاویانی، ع.، ۱۳۹۳، **ارزیابی روش‌های مختلف تجربی تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت قزوین**، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و گردشگری، تبریز.
- Allen, R.G., Tasumi, M. & Trezza, R., 2007, **Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) Model**, Irrigation and Drainage Engineering, 133, PP. 380-394.
- Allen, R.G., Tasumi, M. & Morse, A., 2005, **Satellite-Based Evapotranspiration by METRIC and Landsat for Western States Water Management**, US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop, Feb 8-10, Ft. Collins.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration**, Guide-lines for Computing Crop Water Requirements, FAO, Rome, Italy (FAO Irrigation and Drainage Paper, (56): 300 PP.).
- 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