

برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک

جواد امیدوار^{۱*}، سمیرا نوری^۲، کامران داوری^۳، علیرضا فرید حسینی^۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۱۲

چکیده

برآورد تبخیر و تعرق به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب و کشاورزی بسیار ضروری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که به فراخور دقت مورد نیاز و نوع کاربرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً روش‌های مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه پژوهشگران می‌باشد که گمان می‌رود دقت بیشتری برای مطالعه این عامل در حوزه‌های آبخیز داشته باشند. بنابراین، امکان برآورد تبخیر و تعرق در دامنه متفاوتی از مقیاس‌های زمانی و مکانی بیش از پیش احساس می‌شود. در این بررسی، امکان استفاده از دو مدل مبتنی بر سنجش از دور سبال و متریک و نیز تفاوت‌های آن‌ها با یکدیگر در منطقه مشهد مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این مدل‌ها، شارهای سطحی برای هر پیکسل تصویر ماهواره‌ای سنجنده استر محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق واقعی به صورت باقی مانده معادله توازن انرژی در سطح برآورد شد. نتایج نشان داد الگوریتم سبال نسبت به الگوریتم متریک دارای ۸/۹۳ درصد کم برآورد در محاسبه تبخیر و تعرق واقعی روزانه در اراضی کشت شده دارد. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، هر دو مدل می‌توانند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع مکانی منطبق با شرایط توپوگرافیکی و پوشش گیاهی حوضه برآورد نمایند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق روزانه، توازن انرژی، سنجش از دور، سنجنده استر.

۱. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، omidvar.ja@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد noori.samira@gmail.com

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، k.davary@gmail.com

۴. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، afaridh@yahoo.com

مقدمه

تبخیر و تعرق واقعی (ET_{act})^۴ یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می باشد و برآورد آن در زمینه های مختلف علمی همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است. سنجش از دور از جمله تکنیک های جدیدی است که می توان با استفاده از آن، تبخیر و تعرق را در یک منطقه بدون نیاز به دانستن پیشینه ای در رابطه با شرایط خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه برآورد نمود (Bastiaanssen et al, 2005). تاکنون روش ها و سنجنده های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه ای و حتی جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. انتخاب روش و نوع سنجنده بسته به میزان دسترسی به داده های مورد نیاز، دسترسی به تصاویر سنجنده ها، وسعت منطقه مورد مطالعه و اهداف پژوهش دارد.

روش های توازن انرژی بر اساس محاسبه تبخیر و تعرق به عنوان یکی از اجزای معادله توازن انرژی می باشد. الگوریتم های سبال (توازن انرژی سطح زمین) و متریک (به دست آوردن تبخیر و تعرق در قدرت تفکیک مکانی بالا با کالیبراسیون داخلی) از مهم ترین و پرکاربردترین روش های باقیمانده بیان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده های سنجش از دور می باشد. الگوریتم سبال روشی است که بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با حداقل داده های زمینی برآورد می کند و الگوریتم آن اولین بار توسط Bastiaanssen و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط Allen و همکاران اصلاح شد به طوری که الگوریتم اصلاح شده جدید با الگوریتم توازن انرژی متریک که توسط Allen و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده، شباهت های بسیاری دارد.

الگوریتم متریک به منظور فراهم کردن برآوردهای نسبتاً دقیق تر ET با قدرت تفکیک مکانی بالا (۳۰m) در مقایسه با مدل های کلی تر و اعمال اثرات حرکت افقی هوا در محاسبه ET ایجاد شده است. تفاوت مدل متریک با مدل

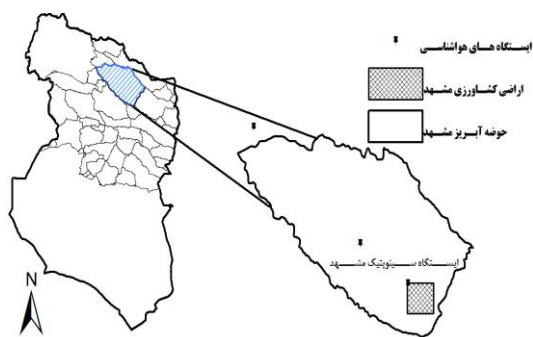
سبال (Bastiaanssen et al, 1998) در استفاده از ET مرجع مبتنی بر داده های هواشناسی برای ایجاد شرایط توازن انرژی در یک پیکسل (پیکسل سرد) و برون یابی زمانی تبخیر و تعرق لحظه ای به روزانه می باشد. در الگوریتم سبال اصلاح شده توسط Allen و همکاران (۲۰۰۲) این تفاوت ها نیز رفع شده و تنها در برخی روابط جزئی، اختلاف دارند.

دقت ET برآورد شده در روش سبال برای یک روز و در مقیاس ۱۰۰ هکتار ۸۵ درصد می باشد که این دقت برای یک فصل تا ۹۵ درصد افزایش می یابد. دقت ET سالانه برای حوضه های بزرگ با استفاده از این روش به طور میانگین ۹۶ درصد می باشد. به طور کلی، استفاده از این روش برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس های بزرگ و دوره های بلند مدت نتایج بهتری می دهد (Bastiaanssen et al, 2005).

تاکنون مطالعات زیادی انجام شده که همه نشان دهنده کارایی روش سبال در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه ای و حوضه های بزرگ می باشد (Almhab et al., 2008; Bastiaanssen et al., 2005; Hafeez et al, 2002; Jacob et al., 2002; Shu et al., 2006; Wang et al., 2005). طی مطالعه ای که توسط نوری (۲۰۰۹) انجام شد، امکان استفاده از الگوریتم سبال برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در زیر حوضه آبریز مشهد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تصاویر سنجنده مودیس و الگوریتم سبال قادر هستند مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در منطقه مشهد به خوبی برآورد نمایند.

Folhes و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل توازن انرژی متریک مقادیر تبخیر و تعرق را در برزیل محاسبه نمودند. نتایج نشان داد مدل متریک می تواند به منظور برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه خشک و تحت آبیاری شمال شرق برزیل به کار رود. Allen و همکاران (۲۰۰۵) با به کار بردن الگوریتم متریک و مقایسه با مقادیر لایسیمتری، میزان خطا در برآورد تبخیر و تعرق چمن و چغندر قند به ترتیب چهار و یک درصد، برای فصل رشد، به دست آمد. Chavez و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر لندست و به کارگیری مدل متریک به ارزیابی مقادیر ET روزانه با داده های

⁴ Actual Evapotranspiration



شکل (۱): محدوده منطقه مورد مطالعه

الگوریتم توازن انرژی سبال و متریک

اساس تئوری و چگونگی روند محاسبات برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش سبال و متریک به تفصیل در منابع مختلف ارائه شده است (Allen et al., 2007; Allen et al., 2002). در هر دو مدل، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بر اساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌شود. از آنجا که تصاویر ماهواره‌ای تنها می‌توانند اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهند، لذا مدل‌های یادشده امکان برآورد مقدار شار گرمای نهان لحظه‌ای را در زمان تصویر میسر می‌سازند. شار گرمای نهان برای هر پیکسل تصویر و به صورت باقیمانده معادله توازن انرژی سطح محاسبه می‌شود:

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

که در آن: λE شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار گرمای خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد. همانطور که در معادله (۱) مشاهده می‌شود، دقت برآورد شار گرمای نهان به روند محاسبات و دقت برآورد پارامترهای R_n ، G و H بستگی دارد. الگوریتم‌های سبال (Allen et al., 2002) و متریک در اکثر بخش‌های محاسباتی مشابه هم می‌باشد و تنها در برخی از روابط با هم متفاوت می‌باشند. مقدار تابش خالص

لایسیمیتری پرداخته که میزان خطا در آن کمتر از ۱۵ درصد به دست آمد.

در بررسی دیگری که توسط Tasumi و همکاران (۲۰۰۵) در آیداهو انجام شد، دو مدل توازن انرژی سبال قدیمی و متریک با هم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد هر دو مدل توازن انرژی با نتایج حاصل از لایسیمیتر تطابق خوبی دارد و استفاده از مدل‌های توازن انرژی را برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی پیشنهاد نمودند. Trezza (۲۰۰۶) نیز طی یک بررسی مقایسه‌ای بین دو مدل متریک و سبال در ونزوئلا، دریافت که هر دو مدل قادرند مقادیر ET را در محدوده‌ی قابل قبولی برآورد نمایند. بر اساس نتایج به دست آمده، روش متریک هفت درصد نسبت به روش سبال بیش برآورد داشت.

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف که پیش از این ذکر گردید، از آنجا که دو الگوریتم سبال و متریک از دقت مناسبی به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی برخوردارند و هر دو الگوریتم برای محاسبه این متغیر مهم معادله بیلان آب توصیه شده‌اند، در این مقاله سعی شده استاز مدل‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مشهد استفاده شود تا نحوه عملکرد دو مدل و تفاوت در نتایج شان مورد بررسی قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی اطراف ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مشهد بوده که واقع در $36^{\circ} 16'$ عرض شمالی، $38^{\circ} 59'$ طول شرقی می‌باشد. در این پژوهش، از تصویر سنجنده استر مستقر بر روی ماهواره ترا مربوط به تاریخ ۱۳۸۰/۴/۲ (ساعت ۱۰:۵۷ صبح) که از سازمان منابع طبیعی استان خراسان رضوی تهیه شده، استفاده شد. داده‌های زمینی مورد استفاده در الگوریتم سبال و متریک نیز از مجموعه داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد می‌باشد.

تاسومی (۲۰۰۳) به منظور محاسبه شار گرمای خاک در مدل متریک معادلات ذیل را پیشنهاد نمود:

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.52LAI} \quad \begin{matrix} LAI \geq 0.5 \\ LAI < 0.5 \end{matrix} \quad (6a)$$

$$\frac{G}{R_n} = 1.8 \times (T_s - 273.15) / (R_n + 0.084) \quad (6b)$$

که در آن‌ها: T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$)، α آلبیدوی سطحی، $NDVI^5$ شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و LAI^6 شاخص سطح برگ می‌باشد. مقادیر $NDVI$ و LAI از طریق روابط (۷) و (۸) به دست می‌آید:

$$NDVI = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (7)$$

که در آن: ρ_2 انعکاس طیفی باند ۲ استر (باند مادون قرمز نزدیک) و ρ_3 انعکاس طیفی باند ۳ استر (باند قرمز) می‌باشد. $NDVI$ شاخصی است که مقدار و شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر آن بین -۱ و +۱ تغییر می‌کند، به طوری که مقدار آن برای سطح خاک عریان صفر، برای سطوح کاملاً پوشیده از گیاه یک است و برای سطوح آبی و ابرها مقدار آن معمولاً کمتر از صفر است.

$$LAI = -\frac{\left(\ln \left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59} \right) \right)}{0.91} \quad (8)$$

$SAVI$ شاخصی است که اثرات خاک را روی $NDVI$ کم می‌کند. این شاخص اثرات رطوبت خاک را در $NDVI$ تعدیل می‌کند. شاخص $SAVI$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_3 - \rho_2)}{(\rho_3 + \rho_2 + L)} \quad (9)$$

R_n از توازن چهار شار تابشی در سطح زمین به دست می‌آید:

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

که در آن: $R_{s\downarrow}$ تابش طول موج کوتاه ورودی (Wm^{-2})، که بخشی از این انرژی تابشی توسط سطوح مختلف منعکس می‌شود ($R_{s\uparrow}$)، تابش طول موج بلند خروجی (Wm^{-2})، تابش طول موج بلند ورودی (Wm^{-2})، کلیه پارامترهای فوق در هر دو روش مانند هم محاسبه می‌شوند. تنها، وجود تفاوت در معادله برآورد مقدار ضریب شفافیت اتمسفر (τ_{sw}) است که سبب ایجاد اختلاف در مقادیر خروجی تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{s\downarrow}$)، تابش طول موج بلند ورودی از اتمسفر ($R_{L\downarrow}$) و در نتیجه مقادیر تابش خالص (R_n) می‌شود.

از معادلات (۳) و (۴) به ترتیب به منظور محاسبه τ_{sw} در الگوریتم سبال و متریک استفاده می‌شود (Allen et al, 2007; Allen et al, 2002).

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (3)$$

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \times \exp \left[\frac{-0.00146p}{k_t \cos \theta_{hor}} - 0.75 \left(\frac{w}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0.4} \right] \quad (4)$$

که در آن: z ارتفاع از سطح دریا (m)، P فشار اتمسفر (kpa)، W آب موجود در اتمسفر (mm)، θ_{hor} زاویه زینت خورشیدی و k_t ضریب مه آلودگی می‌باشد.

شار گرمای خاک (G)، میزان ذخیره گرما در خاک و پوشش گیاهی به علت رسانش است. در الگوریتم سبال مقدار G با استفاده از یک معادله تجربی توسط باستیانس (۲۰۰۰) و به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha) \times (1 - 0.98NDVI^4) \quad (5)$$

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

⁵ - Normalized Difference Vegetation Index

⁶ - Leaf Area Index

محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از معادله (۱۱) مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق واقعی (ET_{inst}) برآورد می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (11)$$

که در آن: λ در معادله فوق گرمای نهان تبخیر (J/kg) می‌باشد.

از آنجا که مقادیر ET روزانه نسبت به مقادیر لحظه‌ای کاربردی‌تر است، نیاز است مقادیر لحظه‌ای به دست آمده با استفاده از ماهواره در زمان گذر، به مقادیر روزانه تبدیل شود. در روش سبال قدیمی از کسر تبخیر که به صورت نسبت شار گرمای نهان به ($R_n - G$) تعریف می‌شود برای برون‌یابی تبخیر و تعرق لحظه‌ای به روزانه استفاده می‌شود. اما در روش سبال (Allen et al, 2002) مانند روش متریک به منظور محاسبه مقدار ET ۲۴ ساعته، از کسر تبخیر و تعرق مرجع ($ET_r F$) و تبخیر و تعرق مرجع (ET_r) محاسبه می‌شود. مقدار ET_r در زمان تصویر بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی و با استفاده از روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶ محاسبه شد.

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (12)$$

برای تبدیل مقادیر لحظه‌ای ET به مقادیر روزانه فرض می‌شود مقدار $ET_r F$ لحظه‌ای محاسبه شده از طریق معادله (۱۲) در طول ۲۴ ساعت شبانه روز تقریباً ثابت است. بنابراین، می‌توان مقدار روزانه ET واقعی را با استفاده از $ET_r F$ و تبخیر و تعرق مرجع ۲۴ ساعته در روز تصویر (ET_r-24) محاسبه نمود:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_r-24 \quad (13)$$

که در آن: L ثابت SAVI می‌باشد. اگر L برابر صفر باشد SAVI معادل NDVI است. مقدار ۰/۵ برای L در مقالات پیشنهاد شده است (Allen et al., 2002).

یکی از تفاوت‌های اصلی روش سبال قدیمی و متریک در نحوه محاسبه مقدار شار گرمای محسوس می‌باشد که در مدل سبال (Allen et al, 2002) این اختلاف وجود ندارد. مقدار این مؤلفه از معادله بیلان انرژی به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (10)$$

که در آن: ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 J/kg/K)، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح زمین (K) و r_{ah} مقاومت آئروودینامیک برای انتقال گرماست (S/m). برای برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شود. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و خوب آبیاری شده است، دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق مرجع دارد. پیکسل دوم که پیکسل گرم نام دارد، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد. بنابراین، مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این پیکسل صفر فرض می‌شود. در روش سبال طبق معادله (۱) و بر اساس مقادیر تبخیر و تعرق دو پیکسل یادشده، شار گرمای محسوس در این دو پیکسل محاسبه شده و سپس مقدار شار گرمای محسوس سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود. با وجود یکسان بودن روش محاسبه H در هر دو مدل سبال و متریک، به علت استفاده از مقادیر R_n و G در روند محاسبات H، نتایج خروجی مقدار H نیز برای دو روش متفاوت خواهد بود. پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با فرمول (۱) برای هر پیکسل

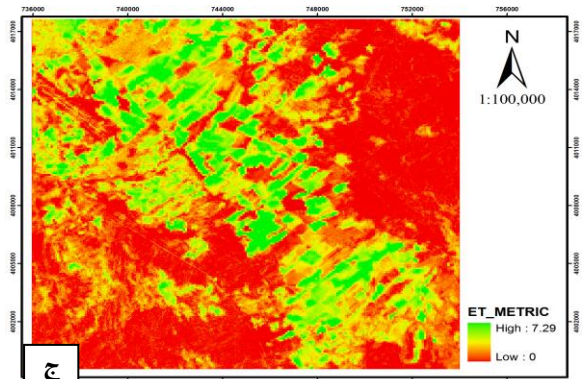
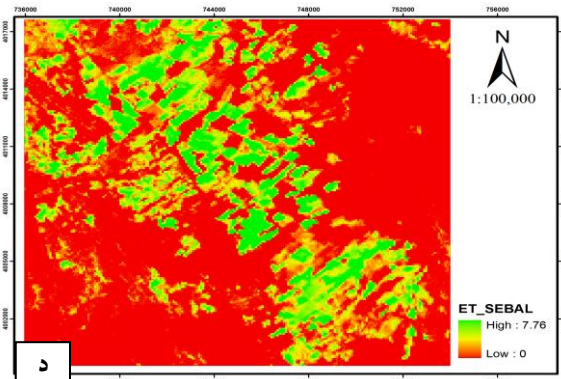
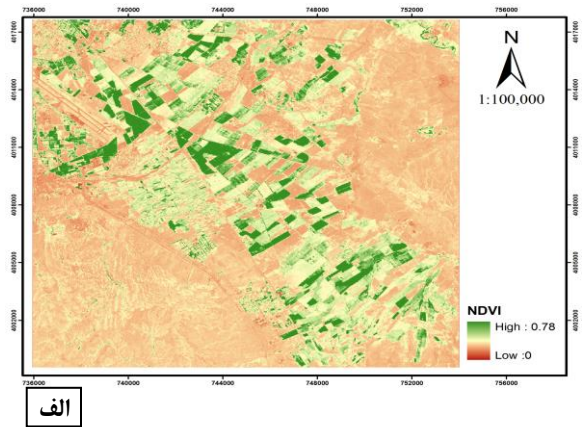
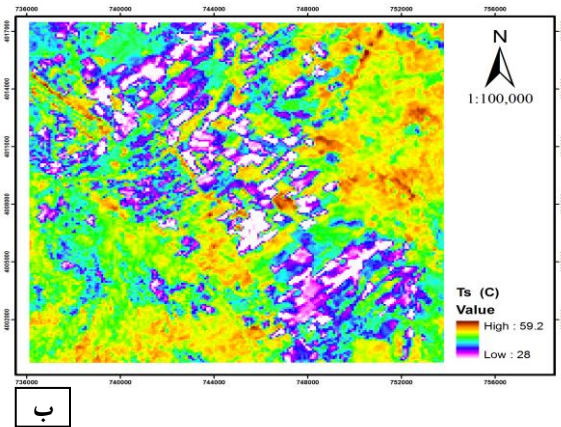
نتایج و بحث

می باشد (شکل ۲). با توجه به شکل (۲) و همین طور نتایج موجود در جدول (۱)، الگوریتم سبال با میانگین تبخیر و تعرق معادل ۲/۰۴ میلی‌متر در روز نسبت به الگوریتم متریک با مقدار میانگین تبخیر و تعرق معادل ۲/۲۴ میلی‌متر در روز دارای ۸/۹۳ درصد کم برآورد در محاسبه میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه در اراضی کشت شده دارد.

در این پژوهش، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از دو الگوریتم توازن انرژی سبال اصلاح شده (Allen et al, 2002) و متریک، در منطقه مشهد محاسبه شد. نتایج حاصل از برآورد تبخیر و تعرق روزانه به دو روش یادشده نشان داد در مکان‌های دارای پوشش گیاهی بیشتر به دلیل تبخیر و تعرق بیشتر دمای کمتری مشاهده می‌شود و در نواحی با پوشش گیاهی تنک و خاک عریان، دمای سطح زمین به دلیل نبود منبعی برای تبخیر و تعرق، زیاد

جدول (۱): مقایسه آماره های دو الگوریتم سبال و متریک در اراضی کشت شده

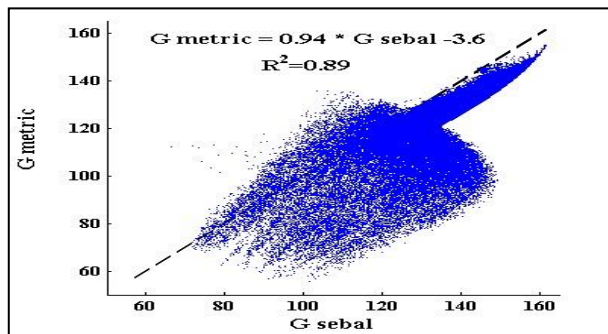
مدل	ماکزیمم تبخیر و تعرق (mm/day)	میانگین تبخیر و تعرق (mm/day)	انحراف معیار تبخیر و تعرق	مساحت (ha)	تبخیر و تعرق کل ($10^6 \times \text{lit/day}$)
سبال	۷/۷۶	۲/۰۴	۱/۶۶	۵۳۷۵	۱۰۹/۶۵
متریک	۷/۲۹	۲/۲۴	۱/۲۷	۵۳۷۵	۱۲۰/۴
			تفاوت(درصد)		۸/۹۳٪



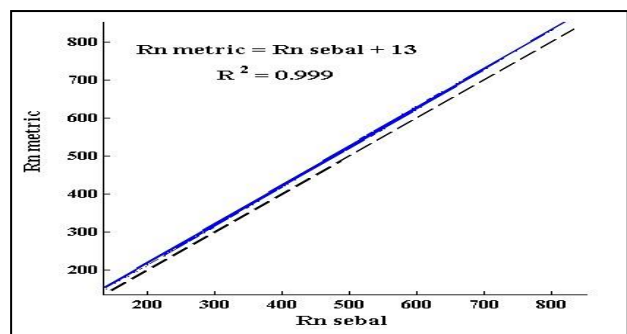
شکل (۲): (الف) نقشه توزیع مکانی شاخص پوشش گیاهی NDVI، (ب) نقشه توزیع مکانی دمای سطح زمین، (ج) نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق روزانه (mm/day) با استفاده از الگوریتم متریک (د) نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق روزانه (mm/day) با استفاده از الگوریتم سبال،

داد. به ویژه آن که با توجه به معادلات (۳) و (۴)، مقدار τ_{sw} در روش سبال برای تمام فصول سال ثابت است، چون فقط به ارتفاع منطقه بستگی دارد، اما در روش متریک پارامترهایی همچون مقدار بخار اتمسفر، فشار هوا و زاویه زنیت خورشیدی نیز دخیل می باشند که این پارامترها نیز مطابق با زمان تغییر می کنند. بنابراین، به نظر می رسد نمودار مقدار برآورد R_n حاصل از این دو روش، در تمام زمانها رفتار ثابتی از خود نشان ندهد. به منظور بررسی این مسئله لازم است با استفاده از تصاویر ماههای مختلف مقادیر R_n با استفاده از دو روش τ_{sw} برآورد شود تا بتوان چگونگی رفتار R_n را در سایر فصول، بهتر مورد بررسی قرار داد. شار گرمای خاک (G)، با استفاده از معادلات (۵) و (۶) محاسبه شد و مقادیر بدست آمده از این معادلات در شکل (۴) در مقابل یکدیگر رسم شدند.

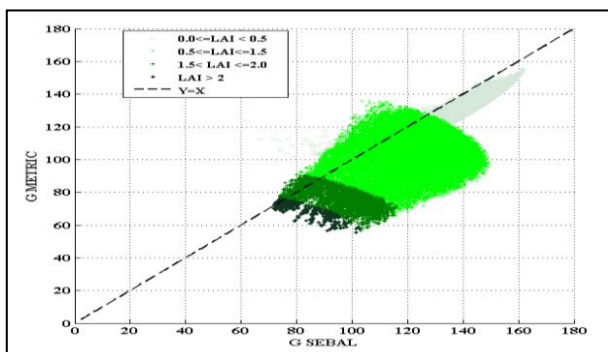
به منظور بررسی علل وجود تفاوت در مقادیر برآورد شده تبخیر و تعرق به دو روش سبال (Allen et al., 2002) و متریک، نتایج مربوط به مؤلفه های اصلی معادله بیلان انرژی (H و G، R_n)، به دست آمده از دو الگوریتم یادشده، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از محاسبه شار تابش خالص (R_n) در شکل (۳) قابل مشاهده است. همان طور که در این شکل پیداست، نتایج حاصل از برآورد R_n با استفاده از مدل های سبال و متریک از همبستگی بسیار بالایی برخوردارند و اختلاف جزئی به وجود آمده در نتایج به دلیل تفاوت این دو الگوریتم در چگونگی محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری τ_{sw} می باشد. با توجه به آنچه که در این شکل مشاهده می شود، مقدار R_n به دست آمده با استفاده از روش متریک نسبت به روش سبال اندکی بیش برآورد بیشتر برآورد دارد. لازم به ذکر است که نتایج شکل (۳)، مربوط به تصویر تیر ماه می باشد و نمی توان این فرابراورد را به طور کلی به تمامی ماهها و فصول سال تعمیم



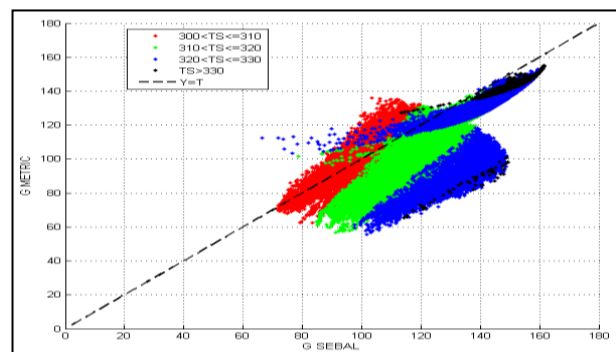
شکل (۴): مقادیر شار گرمای خاک به دست آمده با استفاده از دو مدل سبال و متریک (Wm^{-2})



شکل (۳): مقادیر شار تابش خالص به دست آمده با استفاده از دو مدل سبال و متریک (Wm^{-2})



شکل (۶): مقادیر شار گرمای خاک حاصل از دو مدل سبال و متریک بر اساس LAI



شکل (۵): مقادیر شار گرمای خاک حاصل از دو مدل سبال و متریک بر اساس Ts

می‌توان در تجربی بودن ضرایب مورد استفاده در محاسبه LAI و در نتیجه مناسب نبودن استفاده از این شاخص در مکان‌های با تراکم پوشش گیاهی زیاد در منطقه مورد مطالعه مطرح کرد.

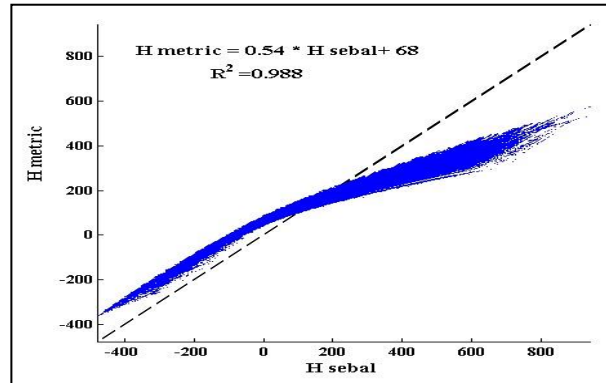
در روش سبال (Allen et al, 2002) و متریک، تفاوتی در چگونگی انتخاب پیکسل‌های آستانه و روند محاسبه شار گرمای محسوس وجود ندارد، اما به دلیل آنکه در چرخه محاسبه H از مقادیر R_n و G استفاده می‌شود، اختلاف موجود در نتایج این دو مؤلفه بر روی مقادیر نهایی H نیز اثر گذار می‌باشد.

نتایج حاصل از محاسبه H با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل (۷)، در مقادیر شار گرمای محسوس ۲۰۰ وات بر مترمربع و بیشتر که مربوط به دماهای بالا می‌باشد، فرابراورد در مقادیر شار گرمای محسوس به دست آمده از روش سبال مشاهده می‌شود، در حالی‌که در محدوده ۰ تا ۲۰۰ وات بر مترمربع مقادیر H حاصل از دو مدل، از همبستگی خوبی با هم برخوردارند. در مقادیر H کمتر از صفر که متناظر با دماهای پایین در منطقه است، مدل متریک دارای فرابراورد می‌باشد. وجود اختلاف در مقادیر H در محدوده دماهای بالا و پایین می‌تواند مربوط به خطا در محاسبه مقادیر دما در منطقه باشد. از سویی، چگونگی انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم نیز بر مقادیر H به دست آمده به شدت اثر گذار می‌باشد. اما چون دو پیکسل سرد و گرم در هر دو روش ثابت بودند فقط، خطا در دامنه مقادیر H را می‌توان به چگونگی انتخاب پیکسل‌های آستانه مربوط دانست و اختلاف شیب موجود در نمودار شکل (۷)، به چگونگی انتخاب دو پیکسل مربوط نمی‌شود. علت این اختلاف را می‌توان به برآوردهای نامناسب G و احتمالاً Ts در منطقه مرتبط دانست.

در شکل (۴) دو ناحیه مجزا از هم قابل تشخیص است. در ناحیه فوقانی سمت راست که در آن یک رابطه خطی بین مقادیر حاصل از دو روش سبال و متریک مشاهده می‌شود. در ناحیه میانی تا پائین سمت چپ که در آن پراکندگی نقاط نشانگر عدم وجود رابطه مشخصی بین دو روش یادشده است. از آنجا که در محاسبه مقدار G از پارامترهای NDVI، LAI، آلبدو (α) و دمای سطح زمین (Ts) استفاده می‌شود، به منظور بررسی علت وجود این عدم همبستگی در ناحیه دوم، مقادیر G بر اساس مقادیر هر یک از چهار پارامتر فوق رسم شد.

در میان پارامترهای یادشده، تنها دو پارامتر LAI و Ts با مقادیر G برآورد شده با دو الگوریتم سبال و متریک وابستگی نشان دادند که در شکل‌های (۵) و (۶) بصورت تفکیک رنگ‌ها نمایش داده شده است. با توجه به معادلات (۵) و (۶) و همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقادیر G محاسبه شده از دو الگوریتم سبال و متریک در مقادیر بالای Ts (حدود ۳۲۰ درجه کلون) بیشترین عدم هماهنگی را از خود نشان می‌دهند و در مقادیر بالای دمای سطحی، مدل سبال دارای فرابراورد در مقدار G می‌باشد. این واقعیت نشان می‌دهد که روش‌های مورد استفاده به منظور محاسبه G با توجه به دامنه دمایی منطقه ($30.1/5^{\circ}\text{K} - 33.2/8^{\circ}\text{K}$)، نیاز به بازنگری و صحت سنجی دارند تا در صورت نیاز، کالیبره شده و یا مدل‌های جدید متناسب با شرایط منطقه تولید شوند.

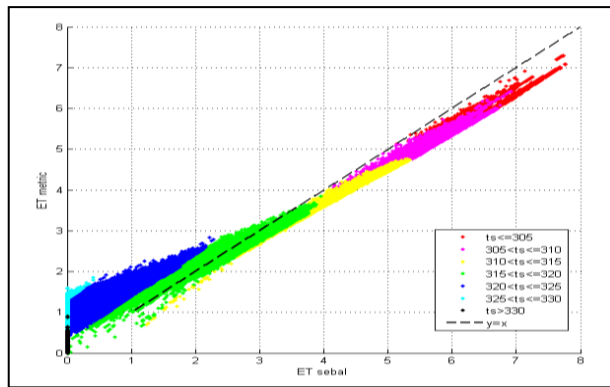
از سویی، به منظور به دست آوردن نتایج بهتر، مقادیر Ts در منطقه نیز باید مورد بررسی قرار گیرند تا وجود دماهای سطحی با مقداری حدود ۳۲۰ درجه کلون در تیر ماه تأیید شود. همچنین، با توجه به آنچه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود و بر اساس معادله (۶)، در مقادیر LAI بزرگتر از ۰/۵، مقدار G به دست آمده از این دو روش از همبستگی خوبی برخوردار نیستند. علت این موضوع را



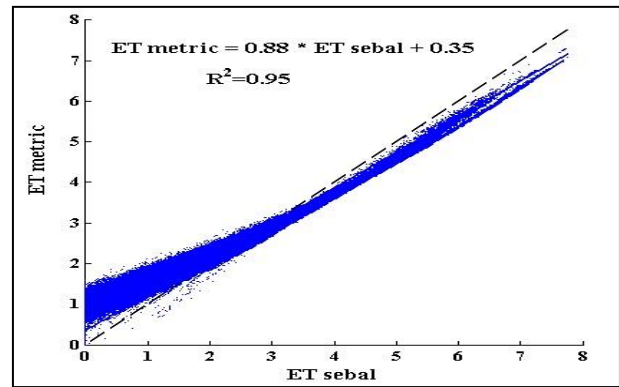
شکل (۷): مقادیر شار گرمای محسوس به دست آمده با استفاده از دو مدل سبال و متریک (W/m^2)

برآورد شده H و G جستجو کرد. از آنجا که در دماهای بالا مقادیر H و G در مدل سبال دارای فرابآورد می‌باشد، و با توجه به معادله (۱) انتظار است مقدار ET به دست آمده از مدل سبال در دماهای زیاد کمتر از مقدار ET به دست آمده از مدل متریک باشد و با همین توضیح، در دماهای کم مقدار ET به دست آمده از مدل سبال از خود فرابآورد نشان دهد که این مسئله در شکل (۹) به خوبی مشهود است.

براساس آنچه که از ابتدا تاکنون پیرامون علل وجود اختلاف بین برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از دو الگوریتم سبال (Allen et al., 2002) و متریک مطرح شد و همان طور که در شکل (۸) نیز قابل مشاهده است، الگوریتم سبال در مقادیر زیاد ET دارای فرابآورد می‌باشد، در حالی که در مقادیر کم، الگوریتم متریک این فرابآورد را از خود نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان در مقادیر



شکل (۹): مقادیر تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از دو مدل سبال و متریک (mm/day) و بر اساس دمای سطحی



شکل (۸): مقادیر تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از دو مدل سبال و متریک (mm/day)

است، اما هنوز راه زیادی تا تکامل در پیش رو دارد. بنابراین، ضروری است تا روش‌های موجود به دقت مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های جدیدتر همراه با دقت برآورد بهتری ارائه شوند. پژوهش حاضر با تمرکز بر بررسی اختلافات موجود در برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی روزانه حاصل از دو الگوریتم

نتیجه‌گیری
وجود الگوریتم‌ها و روش‌های متعدد و متفاوت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و از سویی تولید روش‌های جدید که برخی دارای تفاوت‌های بسیار با الگوریتم‌های پیشین می‌باشند، نشان می‌دهد تکنولوژی سنسجش از دور گرچه با سرعت زیادی در حال پیشرفت

شار گرمای خاک است که بخش عمده این تفاوت‌ها به دلیل اختلاف زیاد در مقادیر شار گرمای خاک محاسبه شده با دو روش می‌باشد. براساس مطالعه انجام شده، مقادیر T_s و LAI بیشترین تأثیر را در ایجاد این اختلاف داشتند. بنابراین، لازم است در زمینه برآورد T_s و شاخص‌های پوشش گیاهی و همچنین شار گرمای خاک مطالعات بیشتری انجام شود.

سبال (Allen et al, 2002) و متریک سعی در بررسی و توجیه علل ایجاد این اختلافات داشت. براساس نتایج به دست آمده، با وجود تفاوت‌های اندک در دو مورد استفاده، روش متریک مقدار ۸/۹۳ درصد نسبت به روش سبال در برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در اراضی کشت شده بیش برآورد داشت. علت اصلی این اختلاف، استفاده از معادلات متفاوت در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و

منابع

- ۱- امیدوار، ج. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم متریک با استفاده از تصاویر استر. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۱۰.
- ۲- نوری، س. ۱۳۸۹. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس در زیر حوضه آبریز مشهد. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۰۶.
- 3- Allen, R.G., R. Waters, M. Tasumi, R. Trezza and W. Bastiaanssen. 2002. "SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation". Advanced Training and Users Manual, version 1.0.
- 4- 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, 2005, Ft. Collins
- 5- Allen, R.G., M. Tasumi R. and Trezza. 2007. "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) Model." J. Irrig. Drain. Eng., 133- 4- 380–394.
- 6- Almhab, A. and I. Busu. 2008. "Estimation of evapotranspiration with modified SEBAL model using Landsat-TM and NOAA-AVHRR images in aride mountains area". Proceedings of second Asia International Conference on Modelling & Simulation, 13-15 may, Kuala Lumpur, 350-355.
- 7- Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M Holtslag. 1998. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation." J. Hydrol., 212–213, 198–212.
- 8- Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson and R.G. Allen. 2005. "SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field condition". J. Irrig. Drain. Eng., 131(1):85-93.
- 9- Bastiaanssen, W.G.M. 2000. "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey." J. Hydrol., 229, 87– 100.
- 10- 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, pp 268–283
- 11- Folhes, M.T., C.D. Renno and J.V. Soares. 2009. "Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil". Agricultural Water Management 96 (2009) 1398– 1408.
- 12- Hafeez, M.M., Y. Chemin, N. Van De Giesen and B.A.M. Bouman. 2002. "Field evapotranspiration estimation in Central Luzon, Philippine, using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra MODIS and Aster". Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application. Ottawa, Canada
- 13- Jacob, F., Olioso, A. Hanocq, J.F. Hautecoeur, and M. Leroy. 2002. "Mapping surface fluxes using visible-near infrared and thermal infrared data with the SEBAL algorithm". J. Agr, 22: 669-680.
- 14- Shu., Y., Y. Lei, L. Zheng and H. Li. 2006. "An evapotranspiration (ET) model based GIS using LANDSAT data and MODIS data with improved resolution". Journal of Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Application, and Geology VI, 6366.
- 15- 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.
- 16- Tasumi, M., R.G. Allen and R. Trezza. 2005. "Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S". Irrigation and Drainage Systems (2005) 19:355–376.

- 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.
- 18- Wang, J., R. Kimura and W. Bastiaanssen. 2005. "Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale". The 11th CEReS International Symposium on Remote Sensing Japan.

Estimation of actual evapotranspiration based on satellite images using two algorithms Sebal and Metric

J. Omidvar, S. Noori, K. Davary, H. Sanaei-Nejad, A. Farid hosseini

Abstract

There are different methods for evaporation estimation that are applied according to the type of application and the required accuracy. Different remote sensing methods have been in the concern of many researchers recently. It is believed that these methods could provide more accurate results in watershed studies. On the other hand, there is an increasing demand for spatial and temporal evapotranspiration estimation. We used SEBAL and METRIC models to investigate the feasibility of their application for Mashhad watershed and also compared the results obtained from these two models. Surface flux was calculated for each pixel by applying these two models and ASTER images, then actual evapotranspiration was calculated as a residual of the energy balance equation. The results showed that SEBAL algorithm underestimates actual daily evapotranspiration in the order of % $8/93$ in relation to METRIC model. It was also concluded that both of the models are capable to estimate actual evapotranspiration by considering spatial and topographic conditions and also vegetation cover of the catchment.

Keywords: Daily Evapotranspiration, Energy balance, Remote sensing and Sensors Aster