

محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از سنجش از دور و کمترین داده زمینی (مطالعه موردی دشت قزوین)

مازیار بهرامی^{۱*}، علی مختاری^۲، مهدی بهرامی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین اجزای بیلان آبی در یک حوضه و یا در یک دشت تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_p) می‌باشد. اندازه‌گیری این پارامتر به صورت میدانی کاری بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. بنابراین سنجش از دور با امکاناتی که فراهم آورده است ما را قادر ساخته تا با در نظر گرفتن بیلان انرژی در یک محدوده بتوانیم مقدار انرژی رسیده به زمین را که صرف تبخیر - تعرق (ET) می‌شود محاسبه کنیم. از این رو، در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ و معادله پرستلی - تیلور (معادله محاسبه ET_p بر پایه تابش) میزان ET_p گیاه محاسبه شد. الگوریتم محاسبه ET_p ماهواره‌ای با به کارگیری چهار معادله محاسبه ET_p بر اساس تابش (پرستلی - تیلور)، آیرودینامیک، ترکیبی (پنمن) و اختلاف دمای روزانه (هارگریوز) مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های هواشناسی از هفت ایستگاه مختلف در دشت قزوین دریافت شد. نتایج نشان داد که الگوریتم ارایه شده به خوبی قادر به تخمین ET_p در ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشد. این الگوریتم بیش‌ترین همبستگی را با R^2 برابر با ۰/۹۵ و $RMSE$ برابر با ۰/۶ با معادله پرستلی - تیلور به دست آمده از داده‌های هواشناسی داشت. همچنین با ارزیابی این الگوریتم در سطح پوشش گیاهی گندم در دشت قزوین، مشخص شد که این الگوریتم به خوبی قادر به تشخیص گیاه در سطح زمین است و مقادیر ET_p را با توجه به تغییرات در روند رشد گیاه به صورت دقیق‌تر نسبت به ET_p های به دست آمده از داده‌های هواشناسی برآورد می‌کند. بنابراین، این الگوریتم با در نظر گرفتن سطح پوشش گیاهی می‌تواند مقادیر بهتر و دقیق‌تری را از ET_p ارایه نماید.

واژه‌های کلیدی: پرستلی - تیلور، تبخیر - تعرق پتانسیل، تصاویر لندست، سنجش از دور

مقدمه

وسیع استفاده کرد. از این رو، معادلات بسیاری با روش‌های مختلف، جهت برآورد این پارامتر ارایه شده‌اند. این معادلات براساس بیلان آبی (Priestly and Guitjens., 1982)، بیلان تابش سطح زمین (Penman., 1974 Taylor.)، ترکیب بیلان انرژی و آیرودینامیک (Blaney and Criddle., 1948 Hargreaves and)، دما (Samani., 1985) و جابه‌جایی حجم (Harbeck., 1962) بسط داده شده‌اند. محاسبه دقیق ET_p با استفاده از این معادلات نیازمند داده‌های هواشناسی نسبتاً دقیق است. اما کمبود داده‌های هواشناسی در نقاط مختلف کشور مدل‌سازی هیدرولوژیکی را محدود نموده است. از طرفی، تنها به کارگیری داده‌های هواشناسی در محاسبه ET_p این پارامتر را به صورت نقطه‌ای در اختیار ما می‌گذارد.

سنجش از دور پتانسیل بالایی در بهبود مدیریت آبیاری و سیاست‌گذاری‌های کلان آبی با تولید نقشه‌های ET_p در اراضی کشاورزی بزرگ در مقیاس یک دشت و در حوضه‌های آبریز با کم-ترین داده‌های زمینی دارد (Allen et al., 2002). باستیانسن و همکاران در الگوریتم سبال روشی مبتنی بر سنجش از دور (استفاده از

تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_p) یکی از کلیدی‌ترین پارامترها در محاسبات آگروهیدرولوژیکی است. ET_p در محاسبات نیاز آبی خالص و ناخالص به عنوان اصلی‌ترین پارامتر محسوب می‌شود. محاسبه دقیق آن در سطوح وسیع سیاست‌گذاران را در مدیریت بهتر آب‌های سطحی و زیرزمینی در یک حوضه و نیز برنامه‌ریزی آبیاری در مزارع یاری می‌نماید. اندازه‌گیری آن توسط لایسیمتر کاری بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است که نیاز به نیروی ماهر جهت نمونه‌برداری و اجرای آن دارد و این واقعیت وجود دارد که این روش ET_p را به صورت نقطه‌ای در اختیار ما می‌گذارد و نمی‌توان از آن، با اطمینان برای یک منطقه

۱- مربی گروه عمران موسسه آموزش عالی اسرار، مشهد، ایران

۲- کارشناس بخش پایش ماهواره‌ای زمین، سازمانی فضایی ایران، مرکز ماهدشت

۳- دانشجوی ارشد رشته منابع آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران،

* - نویسنده مسئول: (Email: bahrami6152@yahoo.com)

هدف از انجام این تحقیق، ارایه الگوریتم محاسبه ET_p پرستلی-تیلور بر روی پوشش گیاهی با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ بود. سپس ET_p به دست آمده از این روش با استفاده از روش‌های تایید شده با دقت بالا مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این دشت در شمال غرب تهران واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریا به طور میانگین حدود ۱۸۰۰ متر با وسعت ۹۵/۵ هزار هکتار می‌باشد. به دلیل قرارگیری آن در جنوب کوه‌های البرز، اقلیم منطقه سرد و خشک است که به صورت میانگین حدود ۹۶ روز از سال بارندگی دارد. داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه‌های قزوین، مگسال، نیروگاه، آبیک، بوین زهرا، تاکستان و کوهین مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). از این ایستگاه‌ها داده‌های حداقل و حداکثر دمای روزانه، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی روزانه، میانگین سرعت باد در طول روز و میزان بارندگی روزانه دریافت شد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

تصاویر ماهواره‌ای لندست برای محاسبه تبخیر - تعرق (ET) ارایه نموده است (Baastianssen et al., 1998a). محققین بسیاری با استفاده از این روش، میزان ET را در مزارع بزرگ محاسبه نموده و نتایج قابل قبولی را به دست آوردند (Baastianssen et al., 1998b; Awan et al., 2014; Singh and Senay., 2015; Jaber et al., 2016).

معادله پرستلی تیلور بخش شار انرژی معادله پنمن است. یعنی تنها با محاسبه بیلان انرژی بر روی پوشش گیاهی می‌توان میزان ET_p گیاه را به دست آورد. تصاویر ماهواره‌ای این قابلیت را دارند که با استفاده از آن‌ها بتوان بیلان انرژی را در هر پیکسل با دقت بسیار بالا به دست آورد. پارودی و گابریل بر پایه روش سبال، دستورعمل محاسبه ET_p را با استفاده از معادله پرستلی - تیلور و به‌کارگیری سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست معرفی کرده است (Parodi and Gabriel., 2002). این دستورالعمل بدون استفاده از باندهای حرارتی تصاویر لندست و تنها با استفاده از داده‌های هواشناسی میزان تابش طول موج بلند خالص روزانه (R_L) سطح زمین را محاسبه می‌نماید. درحالی‌که استفاده از این روش مقادیر R_L سطح پوشش گیاهی را منتج نمی‌شود و در نتیجه ET_p به دست آمده دارای عدم قطعیت‌هایی خواهد بود.

جدول ۱ - مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی دشت قزوین، مورد استفاده در این تحقیق.

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
قزوین	۳۶/۲۵	۵۰/۰۵	۱۲۷۹/۱
بوین زهرا	۳۵/۷۷	۵۰/۰۷	۱۲۸۲
کوهین	۳۶/۳۷	۴۹/۶۴	۱۵۴۹
تاکستان	۳۶/۰۵	۴۹/۶۸	۱۲۸۳/۴
آبیک	۳۶/۰۲	۵۰/۵۴	۱۲۲۶
مگسال	۳۶/۱۵	۵۰/۱۷	۱۲۶۵
نیروگاه	۳۶/۱۳	۵۰/۳	۱۳۱۸

مجموعه داده‌ها

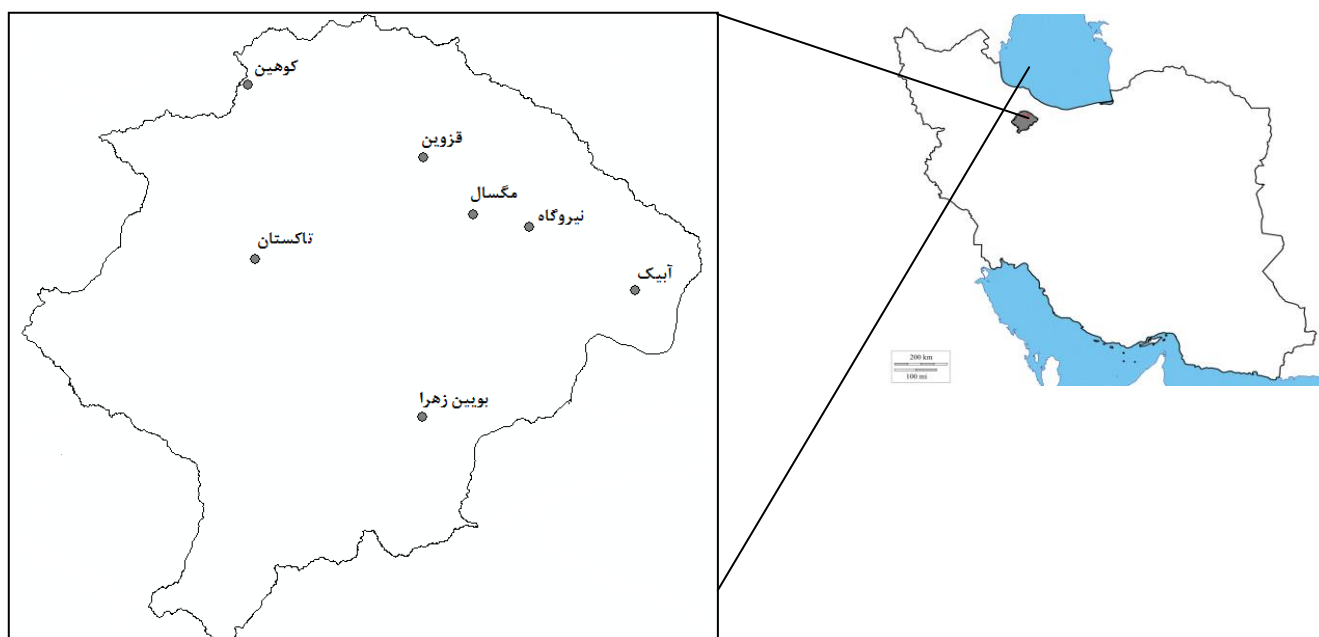
در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ به علاوه مدل رقومی ارتفاعی جهت اجرای الگوریتم برآورد ET_p استفاده شد (جدول ۲). تصاویر بازتابش سطح زمین لندست ۷ و ۸ از سایت ناسا دریافت شد. در این تصاویر تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری قبلاً انجام شده است و نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی ندارند. تصاویر لندست اپتیکی هستند و در طیف‌های مادون قرمز و مرئی اطلاعات را در اختیار ما می‌گذارند. این طیف‌ها قابلیت عبور از ابرهای ضخیم را ندارند و اصولاً زمانی که ابرناکی رخ می‌دهد داده زیر ابر به طور کلی از بین رفته. بنابراین در این تحقیق، تصاویری که در آن ابر باعث از بین رفتن اطلاعات شده است به طور کلی حذف شدند.

محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از داده‌های هواشناسی

ET_p بیانگر ترکیبی از جدا شدن آب از سطح خاک خیس و سطوح گیاهی تحت شرایط نامحدود آب می‌باشد. به‌خصوص در برنامه‌ریزی‌های آبیاری از این پارامتر استفاده می‌گردد (Weib and Menzel., 2008). مقدار آن برای یک سطح فرضی چمن به عنوان تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) تعریف شده است (Allen et al., 1998a). در این تحقیق ET_p به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از شناخته شده‌ترین فرمول‌های مبتنی بر تابش، آیرودینامیک، ترکیبی و دما مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲ - مشخصات تصاویر رستری مورد استفاده در این تحقیق.

نام	منبع	نام محصول	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی (روز)	تاریخ تصاویر
مدل رقمی ارتفاعی	earthexplorer.usgs.gov	DEM	۳۰	-	-
لندست ۷	earthexplorer.usgs.gov	بازتابش سطح زمین / باندهای حرارتی	۳۰	۱۶	۹۳/۶/۲۷ تا ۹۴/۳/۲۷
لندست ۸	earthexplorer.usgs.gov	بازتابش سطح زمین / باندهای حرارتی	۳۰	۱۶	۹۳/۶/۲۷ تا ۹۴/۳/۲۷



شکل ۱ - محدوده مطالعاتی تحقیق

فرمول‌های آیرودینامیکی حاصل یک تابع باد و همچنین کمبود فشار بخار در اتمسفر هستند که شناخته شده‌ترین آن‌ها روش دالتون (Guitjens, 1982) است. تمام این روش‌ها در ادامه به تفصیل بیان شده‌اند.

فرمول مبتنی بر تابش

معادله پرستلی - تیلور با احتساب بیلان انرژی سطح زمین و شیب فشار بخار از رابطه ۱ مقدار ET_p را محاسبه می‌کند:

$$ET_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{n \text{ daily}} / \lambda \quad (1)$$

در این رابطه $R_{n \text{ daily}}$ = تابش خالص ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); γ = ثابت سایکرومتری ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$) و λ = گرمای نهان تبخیر ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) هستند.

مقدار گرمایی که برای انجام فرآیند تبخیر - تعرق در اختیار گیاه قرار می‌گیرد توسط تابش خورشید و تبادل نهان گرما با اتمسفر تامین می‌گردد (McMahon et al., 2013). در سال ۱۹۴۸، پنمن اولین نفری بود که با ترکیب پارامترهای آیرودینامیکی و تابشی فرمولی را جهت برآورد ET_p ارائه نمود (Penman., 1948; Penman., 1956). میزان قابل توجهی از ET_p متشکل از تابش خالص جذب شده توسط گیاه است، بر همین اساس پرستلی و تیلور (Priestly and Taylor., 1972) در شرایط پتانسیل تنها با در نظر گرفتن بیلان انرژی سطح زمین فرمول محاسبه ET_p را ارائه کرده‌اند. دمای هوای اطراف پوشش گیاهی به طور غیرمستقیم نشان دهنده میزان انرژی است که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. از این رو هارگریوز (Hargreaves and Samani., 1982) فرمولی را مبتنی بر محاسبه اختلاف دمای روزانه جهت تخمین ET_p با دقت بسیار مناسبی ارائه نمودند. همچنین

بخار اشباع (kPa) هستند.

فرمول ترکیبی

پنمن به عنوان اولین نفر، روش آیرودینامیک را برای تخمین ET_p با فرمول شار انرژی ترکیب نمود. پنمن رابطه ۷ را جهت تخمین ET_p ارائه کرد (Penman., 1948):

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n \text{ daily} / \lambda + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (7)$$

در این رابطه E_a تابع سرعت باد در طول روز است. این تابع از رابطه ۸ محاسبه گردید.

$$E_a = (a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (8)$$

دو ضریب a و b به ترتیب برابر با $1/3.13$ و $1/3.81$ در نظر گرفته شدند (Penman., 1956).

در آخر معادلات آیرودینامیک، تابش و ترکیبی با به کارگیری داده‌های هواشناسی در هفت ایستگاه معرفی شده (مربوط به روز) تصاویر لندست محاسبه شد و جهت ارزیابی الگوریتم ارائه شده استفاده شدند.

فرمول مبتنی بر دما

معادله هارگریوز بر اساس اختلاف دمای حداکثر و حداقل روزانه بسط داده شده است. فرم معادله‌ای که در این تحقیق استفاده می‌شود بر اساس هارگریوز می‌باشد (Hargreaves and Samani., 1982):

$$ET_p = 0.0023.R_a (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_a + 17.8) / \lambda \quad (9)$$

تمام روابط در این معادله قبلاً تعریف شده‌اند.

هارگریوز و آن این رابطه را با استفاده از معادله پنمن - مانیتش و داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که از دقت بسیار مناسبی برخوردار است (Hargreaves and Allen, 2003).

تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از سنجش از دور

اساس این روش استفاده از معادله مبتنی بر تابش (پرستلی - تیلور) است، بدون نیاز به دست آوردن پیکسل‌های سرد و گرم. به این صورت که ET_p برای هر پیکسل به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. تابش خالص به دست آمده از تصاویر لندست مربوط به لحظه تصویربرداری هستند. یکی از اهداف این الگوریتم کاهش عدم قطعیت‌های به وجود آمده در تبدیل تبخیر - تعرق لحظه‌ای به تبخیر - تعرق روزانه است. بنابراین، جهت محاسبه ET_p به صورت روزانه و بدون استفاده از داده‌های هواشناسی ساعتی، پارامتر R_n با استفاده از روش ارائه شده در سامانی و همکاران به روزانه تبدیل شد (Samani et al., 2007):

پارامترهای Δ و γ از روش ارائه شده در آلن و همکاران محاسبه شدند (Allen et al., 1998) و λ برابر است با $2/47 \text{ MJ.kg}^{-1}$. $R_n \text{ daily}$ از موازنه تابش‌های ورودی و خروجی در سطح زمین طبق رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$R_n \text{ daily} = (1 - \alpha)R_s + R_L \quad (2)$$

در این رابطه α = ضریب آلبیدوی سطحی (بدون واحد)؛ R_s = تابش خورشیدی سطح زمین ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)؛ RL = تابش خالص با طول موج بلند ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)؛ ϵ_0 = ضریب گسیلندگی سطحی (بدون واحد). در این جا R_s با استفاده از معادله هارگریوز - سامانی محاسبه شد (رابطه ۳) (Hargreaves and Samani., 1982).

$$R_s = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (3)$$

در این معادله R_a = تابش خورشیدی فرازمینی ($\text{Watt.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)؛ T_{max} و T_{min} = حداکثر و حداقل دمای روزانه ($^{\circ}\text{C}$)؛ K_r به پیشنهاد آلن از رابطه ۴ قابل محاسبه است (Allen, 1995).

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5} \quad (4)$$

در این رابطه P و P_0 = میانگین فشار جو در منطقه مورد مطالعه (kPa) و میانگین فشار جو در سطح دریا (kPa)؛ K_{ra} = ضریب تجربی است که برابر با 0.17 در نظر گرفته شد. مقدار P با توجه به رابطه آن با ارتفاع از سطح دریا محاسبه گردید (Allen et al., 1998). مقدار R_L نیز از روش ارائه شده در فائو ۵۶ با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه شد (رابطه ۵):

$$R_L = -11.574 [\sigma f_{cd} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(\frac{(T_{max} + 273.15)^4 + (T_{min} + 273.15)^4}{2} \right)] \quad (5)$$

در این رابطه σ = ثابت استفان - بولتزمن برابر با $5.67 \times 10^{-8} \text{ MJ.K}^{-4}.\text{m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$)؛ f_{cd} = تابع ابرناکی (بدون واحد)؛ e_a = فشار بخار واقعی (kPa) هستند.

فرمول مبتنی بر آیرودینامیک

فرمول آیرودینامیک بر اساس روش دالتون پایه‌گذاری شده است (Guitjens., 1982). در این روش، ET_p تابعی از باد و کمبود فشار بخار میان سطحی که تبخیر از آن صورت می‌گیرد و لایه جو بالای آن می‌باشد. طی مطالعه صورت گرفته توسط مک‌جانت و همکاران در ۱۹ تحقیق مختلف در این زمینه، معادله تجربی ۶ ارائه شد (McJannet et al., 2012):

$$ET_p = (2.36 + 1.67u_2) A^{-0.05} (e_s - e_a) \quad (6)$$

در این رابطه u_2 = میانگین سرعت باد در طول روز (m.s^{-1})؛ A = سطحی که تبخیر - تعرق از آن صورت می‌گیرد (m^2)؛ e_s = فشار

نتایج و بحث

ارزیابی تبخیر - تعرق پتانسیل به دست آمده سنجش از دور
مقادیر ET_p از تصاویر لندست ۷ و ۸ در پیکسل‌های مربوط ایستگاه‌های هواشناسی معرفی شده شده در جدول ۱ محاسبه شد. ET_p با استفاده از چهار روش تابش، آبرودینامیک، دما و ترکیبی در روز تصویر برداری تصاویر لندست با استفاده از داده‌های هواشناسی هفت ایستگاه (جدول ۱) نیز محاسبه شد و به عنوان مرجع در مقابل ET_p های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای قرار گرفتند. شکل ۲ میزان پراکنش ET_p های به دست آمده از داده‌های هواشناسی در مقابل ET_p محاسبه شده از الگوریتم ارایه شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲ و جدول ۳ نشان می‌دهد که روند تغییرات ET_p به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با تمام معادلات به جز معادله آبرودینامیکی همبستگی بسیار زیادی دارد. معادلات پرستلی - تیلور و پنمن که به ترتیب بر پایه تابش و ترکیبی (تابش و آبرودینامیک) می‌باشند به دلیل استفاده از موازنه تابش‌های خروجی و ورودی در محاسبه تابش خالص روزانه، که در ET_p ماهواره‌ای نیز از آن استفاده شده است همبستگی بالایی با آن داشتند. اختلاف دمای روزانه به طور غیرمستقیم بیان کننده میزان تابش رسیده به سطح زمین می‌باشد، از این رو معادله هارگریوز نیز همبستگی زیادی با ET_p ماهواره‌ای داشت ($R^2=0/93$ و $RMSE=0/44$). از آنجا که اساس الگوریتم محاسبه ET_p ماهواره‌ای معادله پرستلی - تیلور بود، بیشترین همبستگی را با $R^2=0/95$ و $RMSE=0/6$ با این معادله نشان داد (جدول ۳) که البته ET_p ماهواره‌ای به مقدار کمی نسبت به ET_p پرستلی - تیلور به دست آمده از داده‌های هواشناسی بیش‌برآورد داشت.

معادله آبرودینامیکی به دلیل در نظر نگرفتن بخش تابش، که عامل اصلی تبخیر می‌باشد، کمترین همبستگی را با ET_p ماهواره‌ای داشت.

جدول ۳ - شاخص‌های ارزیابی ET_p ماهواره‌ای.

نام معادله	R^2	RMSE
پنمن	۰/۸۳	۰/۵۲
پرستلی - تیلور	۰/۹۵	۰/۶
آبرودینامیک	۰/۵۱	۱/۲۱
هارگریوز	۰/۹۳	۰/۴۴

خلاصه آماری روش‌های مختلف در برآورد ET_p در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

$$R_{n \text{ daily}} = R_{ni} \left(\frac{R_s}{R_{si}} \right) \left(\frac{T_a}{T_{ai}} \right)^4 \quad (10)$$

در این رابطه R_{ni} = تابش خالص سطح زمین لحظه‌ای $(MJ.m^{-2})$ ؛ T_a و T_{ai} = میانگین دمای هوا و دمای هوای لحظه تصویربرداری (K) که T_{ai} برابر با دمای سطح زمین بر روی پوشش گیاهی متراکم است و R_{si} = تابش سطحی با طول موج کوتاه لحظه‌ای $(MJ.m^{-2})$ هستند. R_{ni} از موازنه تابش‌های ورودی و خروجی در سطح زمین طبق رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$R_{ni} = (1 - \alpha)R_{si} + R_{Li} \downarrow - R_{Li} \uparrow - (1 - \epsilon_0)R_{Li} \downarrow \quad (11)$$

در این رابطه $R_{Li} \downarrow$ و $R_{Li} \uparrow$ به ترتیب تابش طول موج بلند ورودی و خروجی در لحظه تصویربرداری هستند که از تصاویر حرارتی ماهواره‌های لندست محاسبه شد و آلبیدو نیز از باندهای اپتیکی به دست آمد (Waters et al., 2002).

پارامترهای R_{Li} با استفاده از رابطه توان چهار دمای شی طبق قانون استفان بولتزمن محاسبه شد (رابطه ۱۱ و ۱۲):

$$R_{Li} \uparrow = \epsilon_0 \sigma LST^4 \quad (12)$$

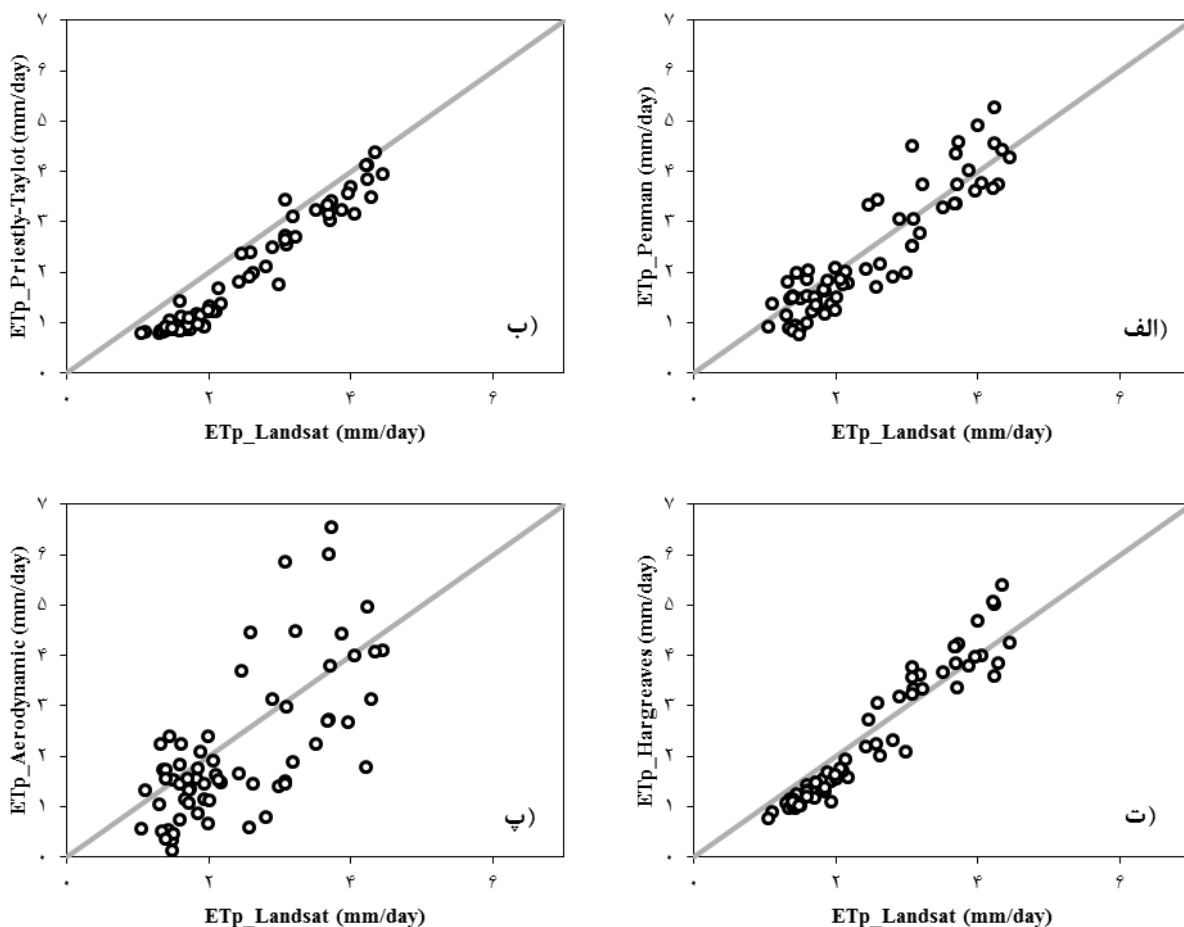
$$R_{Li} \downarrow = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (13)$$

در این روابط LST = دمای سطح زمین (K) و ϵ_a = ضریب گسیلمندی اتمسفر (بدون واحد) هستند. LST با استفاده از الگوریتم تک پنجره‌ای مربوط به باندهای حرارتی ماهواره‌های لندست محاسبه شد (Jimenes-Munos., 2009 and 2014).

مقادیر ET_p با استفاده از تصاویر لندست طبق دستورعمل ارایه شده برای پیکسلی که ایستگاه‌های هواشناسی در آن قرار داشتند به دست آمد و دقت آن‌ها با استفاده از چهار روش فوق، از داده‌های هواشناسی به دست آمده‌اند، مورد ارزیابی قرار گرفت.

ارزیابی تبخیر - تعرق پتانسیل بر روی پوشش گیاهی

از اهداف ارایه این الگوریتم محاسبه بیلان انرژی بر روی پوشش گیاهی است تا مقادیر واقعی تری از ET_p برای گیاه مورد نظر حاصل شود. با به کارگیری پیکسل‌های تصاویر حرارتی و نیز اپتیکی لندست که بر روی پوشش گیاهی قرار دارند می‌توان به این مهم دست یافت. بنابراین، جهت کارایی الگوریتم محاسبه ET_p در سطوح پوشش گیاهی، یک مزرعه گندم زمستانه در دشت قزوین در کشت و صنعت هزارجلفا انتخاب گردید. تاریخ کاشت آن از ابتدای مهر (۱۸ سپتامبر) تا اواخر خرداد (۱۷ جون) ادامه داشت. نمودار تغییرات ET_p به دست آمده از الگوریتم ارایه شده با ET_p به دست آمده در ایستگاه هواشناسی قزوین مورد مقایسه قرار گرفت و با استفاده از نمودار NDVI تغییرات سطح پوشش گیاهی در این مزرعه به نمایش گذاشته شد.



شکل ۲ - ارزیابی ET_p محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌ای در مقابل ET_p های به دست آمده از چهار روش (الف) پنمن (ب) پرستلی - تیلور (پ) آیرودینامیک (ت) هارگریوز.

ارزیابی تبخیر - تعرق پتانسیل بر روی پوشش گیاهی

پوشش گیاهی در سطح زمین ویژگی سرد کنندگی سطح را دارند، یعنی اینکه هرچه تراکم پوشش گیاهی بیشتر باشد میزان دمای سطح کم تر می شود و خروج انرژی از سطح کاهش می یابد، از این رو، این الگوریتم با در نظر گرفتن باند حرارتی ماهواره لندست جهت برآورد دمای سطح زمین، قادر است ET_p را در سطح پوشش گیاهی محاسبه نماید و همچنین محاسبه آلبیدوی سطح پوشش گیاهی نیز مقدار ET_p را واقعی تر می نماید.

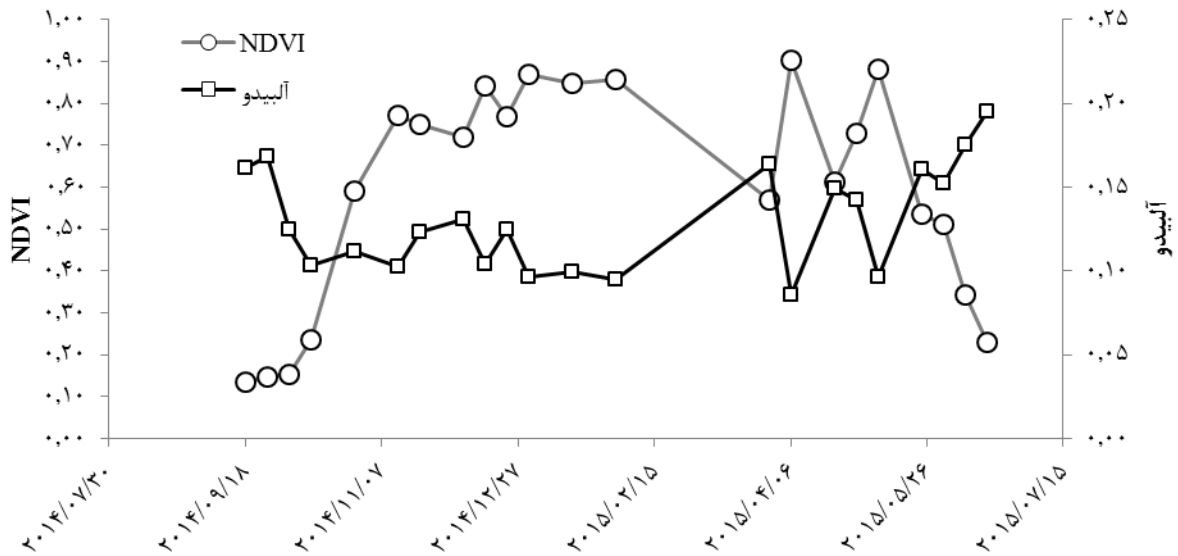
سان و کافاتوس در تحقیق خود نشان دادند که مقادیر روزانه LST همبستگی بالایی با مقادیر NDVI دارد (Sun and Kafatos., 2010). آن ها بیان نمودند که با بالا رفتن مقدار NDVI میزان LST کاهش می یابد. کاهش LST باعث کم شدن مقدار رادیانس خروجی از سطح زمین می گردد (کاهش R_{Li} ↑). از این رو، مقدار نهایی ET_p افزایش پیدا می کند همچنین، شکل ۳ نشان می دهد که مقادیر واقعی آلبیدو مستخرج از تصاویر لندست، با افزایش پوشش گیاهی

جدول ۴ - خلاصه آماری روش های مورد استفاده در این تحقیق.

نام معادله	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
پنمن	۰/۷۷	۵/۲۹	۲/۳۴	۱/۲۳
پرستلی - تیلور	۰/۸۰	۴/۳۷	۱/۹۲	۱/۱۳
آیرودینامیک	۰/۱۴	۷/۳۸	۲/۲۷	۱/۶۹
هارگریوز	۰/۷۶	۵/۴۰	۲/۳۳	۱/۳۱
ماهواره ای	۱/۰۴	۴/۴۶	۲/۴۶	۱/۰۲

مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین دو روش ماهواره ای و پرستلی - تیلور بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. طبق این جدول روش ماهواره ای نسبت به تمام روش ها بیش برآورد داشته است. نتایج این ارزیابی ها حاکی از همبستگی بالای ET_p به دست آمده از تصاویر اپتیکی و حرارتی لندست با ET_p محاسبه شده از داده های هواشناسی است. بنابراین ET_p ماهواره ای که تا حد امکان استفاده از داده های هواشناسی را کاهش داد می تواند جایگزین مناسبی برای معادلات مذکور باشد.

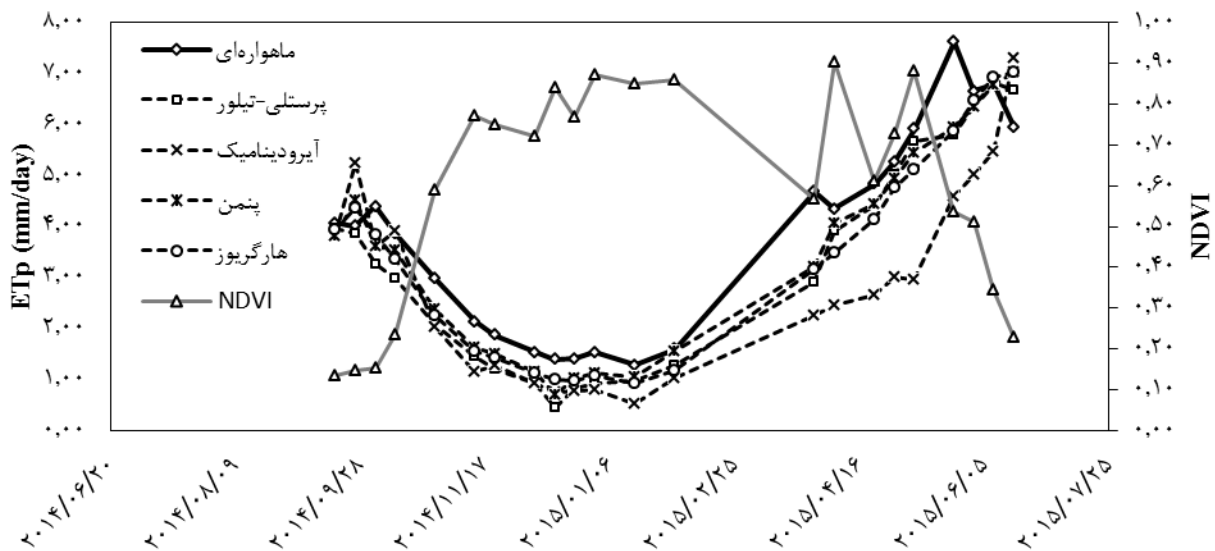
کاهش می‌یابند. این کاهش سبب جذب بیش‌تر نور خورشید (R_{si}) توسط گیاه می‌گردد در نتیجه باعث تشدید در افزایش ET_p می‌شود.



شکل ۳ - رابطه میان تغییرات آبییدو و NDVI در مزرعه گندم کشت و صنعت هزارجلفا.

آورده شد و با مقادیر محاسبه شده از معادلات مذکور با داده‌های هواشناسی ارایه شده در شکل ۴ مورد مقایسه قرار گرفت.

جهت بررسی کارایی الگوریتم ارایه شده در این تحقیق، مقادیر ET_p ماهواره‌ای مربوط به گیاه گندم در طول دوره رشد آن به دست



شکل ۴ - مقادیر ET_p به دست آمده از معادلات پنمن، پرستلی - تیلور، آبرودینامیک، هارگریوز و تصاویر ماهواره‌ای در مقابل تغییرات NDVI.

یعنی اواسط ماه آذر ET_p ماهواره‌ای به وضوح بالاتر از مقادیر ET_p های به دست آمده از داده‌های هواشناسی شده است. این مسئله حاکی از این است که این الگوریتم وجود گیاه را در سطح زمین تشخیص داده است.

با توجه به شکل ۴، ET_p به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای، در دوره‌ای از رشد که مقادیر NDVI افزایش یافته است (افزایش پوشش گیاهی)، مقدار شیب تغییرات آن نسبت به ET_p های به دست آمده از داده‌های هواشناسی کاهش یافته است و در دوره میانی رشد گیاه،

- remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of hydrology*. 212: 213-229.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D. 1950. Determining water needs from climatological data. USDA Soil Conservation Service. SOS-TP, USA, 8-9.
- Dingman, S.L. 2015. *Physical hydrology*. Waveland press.
- Garatuza-Payan, J., Watts, C.J. 2005. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*. 19.3-4: 301.
- Guitjens, J.C. 1982. Models of Alfalfa Yield and Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 108: 212-222.
- Harbeck, J. 1962. A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-transfer Theory, US Geological Survey. Paper 272-E: 101-105.
- Hargreaves, G.H., Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129.1: 53-63.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*. 1.2: 96-99.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrigation and Drainage Engineering*. 108.3: 225-230.
- Jaber, H.S., Mansor, S., Pradhan, B., Ahmad, N. 2016. Evaluation of SEBAL model for Evapotranspiration mapping in Iraq using remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Engineering Research*. 11.6: 3950-3955.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Sobrino, J.A., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X. 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 47.1: 339-349.
- Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., Skokovi, D., Mattar, C., Cristóbal, J. 2014. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 11.10: 1840-1843.
- Lian, J., Huang, M. 2016. Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region. *Agricultural Water Management*. 165: 153-162.
- Mateos, L., Gonzalez-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived
- در اواخر دوره رشد که NDVI از نقطه حداکثر کاهش می‌یابد، یعنی سطح سبز و فتوسنتز کننده گیاه کم می‌گردد، به تبع در مقادیر ET_p نیز کاهش مشاهده می‌شود. این مسئله در ET_p به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای به خوبی نشان داده شده است، ولی ET_p های محاسبه شده از داده‌های هواشناسی تنها با توجه به گرم شدن هوا، به روند افزایشی در ET_p ادامه می‌دهند. بنابراین، الگوریتم ارائه شده می‌تواند با تشخیص پوشش گیاهی در سطح یک حوضه و یا یک دشت، که عامل اصلی در تغییرات ET هستند، مقادیر واقعی تری از ET_p ارائه نماید.
- روش مبتنی بر سنجش از دور در این تحقیق علاوه بر سهولت اجرا از دقت مناسبی نیز برخوردار بود. گاراتوزا-پایان و همکاران، لیان و هوانگ، ماتئوس و همکاران نیز در تحقیقات خود نشان دادند که محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بدون محاسبه پیکسل‌های سرد و گرم از دقت و سرعت بالایی برخوردارند (Garatuza-Payan et al., 2005; Mateos et al., 2013; Lian) (and Huang, 2016).

نتیجه گیری

نتایج ارزیابی این الگوریتم در پیکسل‌های مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی نشان داد که از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین این الگوریتم به خوبی می‌تواند وجود گیاه را در سطح زمین تشخیص دهد و مقادیر ET_p را بر اساس وجود و یا عدم وجود گیاه با دقت بیشتری برآورد نماید.

منابع

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome. 300.9: D05109.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual Idaho Implementation, version. 1. 97.
- Awan, U.K., Ismaeel, A. 2014. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. *Journal of Hydrology*. 519:1368-1382.
- Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*. 212: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., Van der Wal, T. 1998b. A

- scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81-92.
- Samani, Z., Bawazir, A.S., Bleiweiss, M., Skaggs, R., Tran, V.D. 2007. Estimating daily net radiation over vegetation canopy through remote sensing and climatic data. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 133.4: 291-297.
- Singh, R.K., Senay, G.B. 2015. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*. 8.1: 9-20.
- Sun, D., Kafatos, M. 2007. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters*. 34.24: 1-4.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W.G.M. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): advanced training and user's manual. Department of Water Resources, University of Idaho, Kimberly. 98p.
- Weiß, M., Menzel, L. 2008. A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modelling in semi-arid environments. *Advances in Geosciences*. 18: 15-23.
- from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural water management*. 125: 81-91.
- McJannet, D.L., Webster, I.T., Cook, F.J. 2012. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data. *Environmental modelling and software*, 31: 76-83.
- McMahon, T.A., Peel, M.C., Lowe, L., Srikanthan, R., McVicar, T.R. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17.4: 1331.
- Parodi, N., Gabriel, I. 2002. AHVRR Hydrological Analysis System Algorithms and theory - Version 1.3. John Wiley and Sons, New York.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 193. 1032: 120-145. The Royal Society.
- Penman, H.L. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4.1: 9-29.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-

Potential Evapotranspiration Calculation Using Remote Sensing With Minimal Amount of Ground Data

M. Bahrami^{1*}, A. Mokhtari², M. Bahrami³
Received: Oct.08, 2017 Accepted: Des.11, 2017

Abstract

Potential evapotranspiration is one of the most important components in water balance equation in a watershed or a plain. ET_p measurement is a costly and time-consuming process. Therefore, remote sensing allowed us to estimate the surface energy considering the energy balance in a small area in order to calculate evapotranspiration (ET). Thus in this study, the Priestly-Taylor equation associated with Landsat 7 and 8 were taken into account for crop ET_p calculation. The remotely sensed ET_p algorithm was evaluated against four different ET_p calculation approaches including radiation approach (Priestly-Taylor), aerodynamic approach, combination approach (Penman), and temperature approach (Hargreaves). These approaches were conducted using meteorological data obtained from seven stations around the Qazvin plain. Results showed that this algorithm could properly estimate ET_p , and had the best relationship with ET_p calculated from the Priestly-Taylor equation with R^2 of 0.95 and RMSE of 0.6. Also, this algorithm could detect the crop on the ground and presented more actual values of ET_p compared with ET_p s calculated from meteorological data. Therefore, this algorithm could estimate ET_p more accurately by distinguishing the dense of vegetation on the ground.

Key Words: Landsat imagery, Potential evapotranspiration, Priestly-Taylor, Remote sensing

1- Assistant professor in civil engineering department of Asrar University, Mashhad, Iran

2- Engineer at Iranian space agency, the national earth observation center, Mahdasht, Alborz

3- Water resources management student of irrigation and reclamation engineering department, University of Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: bahrami6152@yahoo.com)