

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای به کمک داده‌های سنجش از دور در دشت شهرکرد الف- مقایسه نتایج مدل‌های SEBAL و METRIC نسبت به اندازه‌گیری‌های لایسمتری

علی مرشدی<sup>۱\*</sup>، مهدی نادری<sup>۲</sup>، سیدحسن طباطبایی<sup>۳</sup> و جهانگرد محمدی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱۰)

### چکیده

روش‌های متداول برآورد تبخیر و تعرق ناشی از داده‌های نقطه‌ای هستند که کاربرد آنها محدود و قابل تعمیم به مناطق و حوضه‌های آبخیز وسیع نمی‌باشند. فناوری سنجش از دور این قابلیت را دارد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و برخی داده‌های هواشناسی مقدار تبخیر و تعرق را در منطقه‌ای وسیع برآورد نماید. در این پژوهش به مقایسه برآوردهای تبخیر و تعرق به کمک مدل‌های SEBAL و METRIC براساس داده‌های سنجنده ETM+ از ماهواره لندست ۷ نسبت به تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده از لایسمتر در هفت تاریخ گذر ماهواره در محدوده دشت شهرکرد واقع در حوضه آبخیز رودخانه کارون پرداخته شد. نتایج نشان داد مدل SEBAL دارای کمترین مقادیر شاخص‌های MAE، NRMSE و MBE (به ترتیب برابر با ۰/۳۱۷، ۱/۵۰۳ میلی‌متر بر روز و ۰/۹۷۳- میلی‌متر بر روز) و بیشترین مقدار شاخص d (۰/۷۶۸) بوده است. شاخص‌های آماری مذکور برای مدل METRIC به ترتیب برابر با ۰/۴۲۰، ۲/۱۲۰، ۲/۰۲۳ و ۰/۶۴۶ بوده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد مدل SEBAL از دقت بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق نسبت به مدل METRIC تحت شرایط حاکم بر دشت شهرکرد برخوردار بوده است. تا زمانی که امکان تأمین آمار کامل هواشناسی به‌صورت ساعتی فراهم آید و یا برخی اصلاحات بر مدل METRIC انجام شود، نتایج مدل SEBAL به واقعیت نزدیک‌تر بوده و لذا مدل SEBAL توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تصویر ماهواره، لندست، توازن انرژی سطح، یونجه

۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد

۲. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.morshedi@areeo.ac.ir

## مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق (ET) از طریق سنجش از دور مانند مدل‌های سبال (۸، ۱۵، ۱۶ و ۱۷) و متریک (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) مزایای فراوانی دارند، از جمله اینکه در زمان اندکی به پوشش مکانی گسترده و پیوسته ET دست می‌یابد، ET واقعی را به جای ET پتانسیل محاسبه نموده و به اطلاعاتی از قبیل نوع گیاه نیاز ندارند، برای تهیه اطلاعات مکانی (فضایی) نیاز به هزینه اندکی دارند، برآورد ET در مناطقی که نصب و استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی و یا سایر ابزارها مشکل یا غیرممکن است، امکان‌پذیر بوده و در نهایت بر پایه‌های محکم و استوار فیزیکی بنا شده‌اند (۳۰).

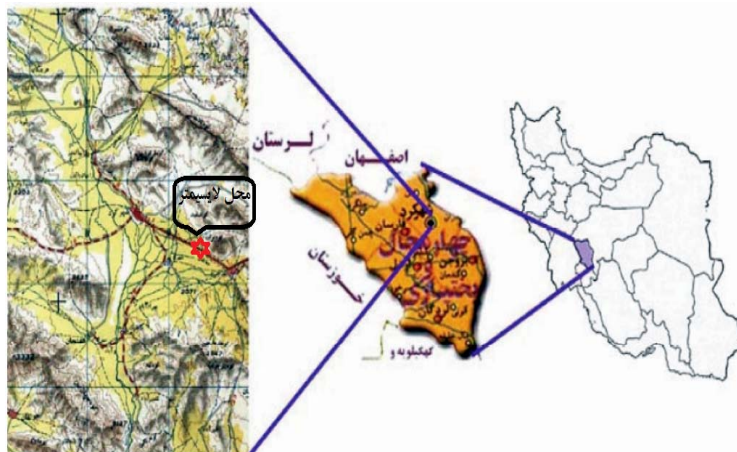
مدل سبال (SEBAL) برای برآورد ET با استفاده از حداقل اندازه‌گیری توسط ادوات زمینی ارایه شده است. این مدل برای برآورد ET در بیش از ۳۰ کشور جهان با دقت حدود ۸۵ درصد در مقیاس مزرعه‌ای و ۹۵ درصد در مقیاس روزانه و فصلی آزمون شده است (۹ و ۱۵). آلن و همکاران با توجه به محدودیت‌های مدل سبال در برآورد ET در مناطق کوهستانی (به دلیل توپوگرافی متنوع) مدل سبال را بهبود داده و آن را مدل متریک (METRIC) نامیدند (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). مدل‌های مزبور مقدار ET را براساس داده‌های طیفی در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی و برخی پارامترهای هواشناسی نظیر سرعت باد، دمای هوا، دمای نقطه شبنم و ساعات آفتابی تخمین می‌زنند.

این مدل‌ها در ایران توسط مختاری (۲۶) در حوضه آبریز برخوار (شرق اصفهان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌های مادیس (MODIS) و آستر (ASTER) برای مقایسه مدل سبال با مدل پنمن-مانیت انجام پذیرفت و نتیجه گرفت تبخیر و تعرق کل برآوردشده از مدل سبال برای محصول چغندر قند حدود ۲۰ درصد کمتر و برای محصول ذرت حدود ۱۵ درصد بیشتر از مدل پنمن-مانیت به دست آمده است. مختاری این تفاوت‌ها را ناشی از تعداد محدود تصاویر ماهواره‌ای برای برون‌یابی ET به کل دوره رشد و فاصله ۲۴ کیلومتری ایستگاه هواشناسی برای

استفاده از داده‌های آن ایستگاه می‌داند (۲۶). اکبری و همکاران (۷) با بررسی شبکه‌های مختلف آبیاری در حوضه زاینده‌رود با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ اقدام به افزایش دقت مکانی یک سری از اطلاعات از ماهواره نوآ (NOAA) کردند و با پیش‌پردازش داده‌های مذکور و استفاده از مدل سبال، اجزای بیلان انرژی را تعیین و تبخیر و تعرق واقعی را به دست آوردند.

محسنی ساروی و همکاران با کاربرد مدل سبال در برآورد تبخیر و تعرق در حوضه آبریز طالقان با استفاده از تصاویر مادیس نتیجه گرفتند که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده به کمک لایسیمتر دارای همبستگی بالایی بوده‌اند (۴). نوری و همکاران (۶) و ثنایی‌نژاد و همکاران (۱) با استفاده از تصاویر مادیس نتیجه گرفتند که مدل سبال جهت برآورد تبخیر و تعرق در سطح منطقه (حوضه آبریز مشهد) مناسب می‌باشد. مباحثی و همکاران (۳ و ۴) با استفاده از مدل سبال و تصاویر ماهواره لندست ۵ در دشت خوزستان تبخیر و تعرق واقعی را برآورد نموده و مدل سبال را مناسب ارزیابی کردند. در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در ایران و به دلایل مختلف از سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین مانند AVHRR و NOAA استفاده شده است. در حالی که استفاده از داده‌های سنجنده با قدرت تفکیک متوسط لندست ۷ یعنی ETM+ ضروری است تا داده‌های این سنجنده برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر و تعرق استفاده ارزیابی شوند. همچنین با توجه به اینکه مزارع کشاورزی در اغلب دشت‌های ایران دارای سطوح کوچک هستند، استفاده از تصاویر سنجنده‌های با قدرت تفکیک متوسط بسیار با اهمیت می‌باشد.

هدف این تحقیق، با توجه به فقدان مقادیر تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای برای محدوده مورد مطالعه، مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های سنجش از دور در هفت تاریخ گذر ماهواره لندست ۷ و مقایسه نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق در لایسیمتر می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و محل نصب لایسیمترها

## مواد و روش‌ها

مدل‌های سبال و متریک از معادله موازنه انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده می‌نمایند، بنابر این بایستی کل شارهای انرژی در نظر گرفته شوند. معادله (۱) توازن انرژی برای یک سطح تبخیر را نشان می‌دهد:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [1]$$

در این معادله  $R_n$  شار تابش ورودی خالص به سطح مورد نظر ( $W/m^2$ )،  $H$  شار گرمای محسوس ( $W/m^2$ )،  $G$  شار گرمای خاک ( $W/m^2$ ) و  $\lambda ET$  شار گرمای نهان تبخیر ( $W/m^2$ ) می‌باشند. در معادله (۱) تنها شار قایم در نظر گرفته و از شارهای افقی انرژی صرف‌نظر شده است. معادله فوق باید برای سطوح گسترده و دارای پوشش گیاهی کامل و یکنواخت استفاده شود (۱۰). به این ترتیب، شار گرمای نهان تبخیر ( $\lambda ET$ ) که نمایانگر جزء تبخیر و تعرق می‌باشد، می‌تواند در صورت معلوم بودن سایر اجزاء از معادله موازنه انرژی تعیین شود.

محدوده مطالعاتی دشت شهرکرد واقع در حوضه آبخیز کارون از توابع شهرستان شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری بین طول‌های ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این دشت از شمال و شمال غرب به ارتفاعات کلاه‌قازی، قراول‌خانه، چهل دختران و از نواحی جنوب به

ارتفاعات جهان‌بین و تفه، از شرق به ارتفاعات کوه سینه و برات و از غرب به ارتفاعات کوه قلنگان و ارتفاعات مشرف به جاده فارسان منتهی می‌شود. درجه حرارت متوسط سالانه محدوده مطالعاتی ۱۲/۰۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، همچنین متوسط بارندگی سالانه در کل حوضه آبریز ۴۰۰ میلی‌متر و اقلیم منطقه مطالعاتی به روش کوپن نیمه مرطوب معتدل سرد است. از وسعت ۱۲۶۲ کیلومتر مربع این دشت، حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع آن را پهنه آبرفتی و بقیه را مناطق شهری و صنعتی تشکیل داده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط منطقه ۲۰۱۲ متر از سطح دریا می‌باشد. کاربری اراضی به‌طور عمده کشاورزی و بخش‌هایی نیز به مرتع، اراضی بایر و مناطق مسکونی اختصاص یافته است.

در این مطالعه از داده‌های دو لایسیمتر زهکش‌دار به عمق خاک ۲/۵ متر و قطر ۳ متر (مساحت ۷/۰۶ متر مربع) کشت شده با یونجه مستقر در ایستگاه تحقیقات کشاورزی چهارتخته (به وسعت ۲۷ هکتار) متعلق به مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری (شهرکرد) استفاده شد. لایسیمتر اول (LYS\_REF) در وسط قطعه زمینی به ابعاد ۲۵ × ۴۰ متر (یونجه یک ساله) و لایسیمتر دوم (LYS\_RS) در وسط قطعه زمینی به ابعاد ۱۲۰ × ۸۰ متر (یونجه چهار ساله) قرار گرفته بودند که با پوششی از گیاهان مختلف زراعی در اراضی مجاور احاطه شده بودند. از لایسیمتر

داده‌های هواشناسی مورد نیاز (جدول ۱) شامل رطوبت نسبی هوا (RH)، دمای لحظه‌ای تر و خشک هوا ( $T_{dry\_inst}$  و  $T_{wet\_inst}$ )، سرعت باد ( $U_2$ )، دمای روزانه بیشینه و کمینه هوا ( $T_{max}$  و  $T_{min}$ )، ساعات آفتابی و فشار هوا از ایستگاه هواشناسی مجاور لایسیترها به صورت شش ساعته تهیه و برای لحظه گذر ماهواره میان‌یابی شد (۹). با توجه به اینکه دقت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_{ref}$ ) تحت تأثیر کیفیت داده‌های هواشناسی می‌باشد (۸، ۱۰ و ۲۴)، کیفیت داده‌های هواشناسی (شامل  $T_{max}$ ،  $T_{min}$ ،  $RH_{max}$ ،  $RH_{min}$  و  $R_s$ ) برای محاسبه  $ET_{ref}$  براساس توصیه منابع (۱۰، ۲۵ و ۲۷) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی برآورد  $ET_{ref}$  از معیارهای متداول آماری شامل ضریب تعیین ( $R^2$ , Coefficient of Determination)، خطای مطلق میانگین (Mean Absolute Error, MAE)، خطای اریب میانگین (Mean Bias Error, MBE) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) و شاخص توافق ( $d$ , Index of degree) استفاده شد (۲۷).

در این تحقیق از آمار هواشناسی و هفت تصویر ماهواره لندست ۷ در تاریخ‌های گذر ۱۲ آوریل، ۲۸ آوریل، ۲ اگوست، ۱۸ اگوست، ۳ سپتامبر، ۱۹ سپتامبر و ۲۱ اکتبر ۲۰۱۱ (برابر با ۲۳ فروردین، ۸ اردیبهشت، ۱۱ مرداد، ۲۷ مرداد، ۱۲ شهریور، ۲۸ شهریور و ۲۹ مهر ۱۳۹۰) که در طول دوره رشد محصول وجود داشت، استفاده شد (جدول ۲). این تصاویر به صورت زمین-مرجع و اصلاح شده از نظر اتمسفری و هندسی با استفاده از نرم‌افزار (Landsat Ground Processing System) توسط سازمان فضایی ایالات متحده در اختیار قرار گرفت. این تصاویر شامل ۸ بانده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی مربوط به ردیف ۱۶۴ و مسیر ۳۸ (در سیستم مرجع جهانی) و در قالب تصویری GeoTIF بود. از نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 2010 برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزار SPSS 24.0 برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها استفاده شد (۲۲ و ۲۳).

اول (LYS\_REF) برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق مرجع یونجه استفاده شد. از پایش بیلان رطوبتی لایسیترا دوم (LYS\_RS) که نماینده وضعیت رطوبتی یونجه‌های کشت شده در اطراف این لایسیترا بود برای مشاهده پیکسل‌های گسترده و قابل تفکیک در تصاویر ماهواره‌ای اراضی یونجه اطراف این لایسیترا استفاده گردید. تأمین آب مورد نیاز آبیاری این لایسیترا و یونجه‌های اطراف آن به صورت بارانی بود که در پاره‌ای موارد (به علت خرابی سامانه آبیاری بارانی) به صورت کامل انجام نمی‌گرفت لذا اراضی یونجه مربوط به این لایسیترا همواره در شرایط آبی پتانسیل قرار نداشت.

در لایسیترا اول (LYS\_REF) زمان آبیاری براساس خروج حدود ۵۰ درصد آب سهل‌الوصول و مقدار آن بر پایه اندازه‌گیری منظم میزان رطوبت خاک تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متر بود. در این حالت با اندازه‌گیری رطوبت خاک لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متر به وسیله نوترومتر (مدل CPN503-DR) و جبران کاهش رطوبت نسبت به ظرفیت زراعی با استفاده از معادله (۲)، مقدار آب لازم با در نظر گرفتن عمق تمام لایه‌ها، آب مورد نیاز (حجم کل آب) از طریق کتور به‌داخل لایسیترا افزوده شد.

$$d_n = \sum_{i=1}^n (FC - \theta_i) \cdot D \cdot \rho_b \quad [2]$$

در این معادله  $d_n$  مقدار آب مورد نیاز گیاه برحسب میلی‌متر، FC ظرفیت زراعی مزرعه برحسب درصد،  $\theta_i$  رطوبت لایه خاک قبل از آبیاری (درصد)، D عمق خاک (عمق هر لایه) برحسب میلی‌متر،  $\rho_b$  وزن مخصوص ظاهری خاک برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و n تعداد لایه‌های خاک می‌باشد. مقدار تبخیر و تعرق از لایسیترا با استفاده از معادله (۳) تعیین شد. در این معادله ET تبخیر و تعرق واقعی گیاه، I مقدار آب آبیاری، P میزان بارش، D مقدار آب زهکش،  $PW_1$  رطوبت خاک قبل از آبیاری و  $PW_2$  رطوبت خاک بعد از آبیاری بوده که با نوترومتر به دست آمدند (همه پارامترها برحسب میلی‌متر هستند).

$$ET = I + P - D \pm \sum_{i=1}^n (PW_2 - PW_1) \quad [3]$$

جدول ۱. آمار هواشناسی مربوط به تاریخ گذر ماهواره لندست ۷

n/N	T <sub>min_daily</sub>	T <sub>max_Daily</sub>	Air Pres.	RH	U <sub>2</sub>	T <sub>wet_inst</sub>	T <sub>dry_inst</sub>	ساعت	روز ژولیوسی	تاریخ گذر
	°C	°C	mbar	%	m/s	°C	°C			
۰/۸۵۱	۶/۴	۱۹/۰	۷۹۰/۶	۴۷ ۲۹	۶/۰ ۵/۰	۴/۲ ۷/۲	۸/۸ ۱۵/۴	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۱۰۲	۱۲ آوریل
۰/۷۳۷	۱/۸	۲۲/۴	۷۹۰/۶	۷۳ ۳۳	۰/۰ ۰/۰	۰/۶ ۹/۸	۲/۰ ۱۸/۲	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۱۱۸	۲۸ آوریل
۰/۸۷۵	۱۲/۴	۳۱/۸	۷۹۳/۷	۳۸ ۱۴	۷/۰ ۰/۰	۶/۶ ۱۴/۰	۱۳/۰ ۲۹/۸	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۲۱۴	۰۲ آگوست
۰/۴۸۳	۱۶/۰	۳۳/۸	۷۸۹/۴	۴۷ ۲۱	۳/۰ ۰/۰	۱۰/۶ ۱۷/۴	۱۶/۸ ۳۲/۸	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۲۳۰	۱۸ آگوست
۰/۸۷۵	۷/۲	۳۰/۲	۷۹۱/۶	۵۲ ۱۷	۲/۰ ۰/۰	۳/۶ ۱۳/۲	۷/۶ ۲۷/۶	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۲۴۶	۳ سپتامبر
۰/۸۸۰	۹/۲	۲۹/۲	۷۹۴/۸	۵۵ ۲۴	۰/۰ ۲/۰	۵/۴ ۱۳/۶	۹/۴ ۲۵/۶	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۲۶۲	۱۹ سپتامبر
۰/۹۵۲	۲/۸	۲۱/۲	۷۹۱/۰	۲۵ ۲۲	۰/۰ ۴/۰	۰/۰ ۹/۶	۶/۰ ۲۰/۴	۰۶:۳۰ ۱۲:۳۰	۲۹۴	۲۱ اکتبر

بوده است. به‌طور مثال مقدار NRMSE برای مدل سبال برابر با ۰/۳۱۷ و برای مدل متریک برابر با ۰/۴۲۰ به‌دست آمده است.

همچنین کمترین (بهترین) مقادیر برای شاخص‌های MAE و MBE (۱/۵۰۳ و ۰/۹۷۳- میلی‌متر بر روز) برای مدل سبال نسبت به مقادیر ۲/۱۲۰ و ۲/۰۲۳ میلی‌متر بر روز در مدل متریک به‌دست آمده است (جدول ۲). برای شاخص d بیشترین (بهترین) مقادیر برای مدل سبال به میزان ۰/۷۶۸ و برای مدل متریک برابر با ۰/۶۴۶ به‌دست آمده است. به‌طور کلی مناسب‌ترین مدل از نظر شاخص‌های NRMSE، MAE، MBE و d ابتدا سبال و سپس متریک شناخته شد.

در شکل (۲) مقادیر ET روزانه مربوط به سه روش در شرایط رطوبتی استاندارد لایسیمتر اول و در روزهای گذر ماهواره نمایش داده است. مشهود است که مقادیر ET محاسبه شده در مدل سبال از مقادیر مربوط به مدل متریک کمتر است. لذا برآوردهای ET در مدل سبال به تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده از لایسیمتر اول نزدیک‌تر بود، بنابر این مدل سبال دقت عمل و عملکرد بهتری نسبت به مدل متریک نشان داد. اما،

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های برآورد تبخیر و تعرق روزانه به روش‌های SEBAL و METRIC نسبت به نتایج لایسیمتر

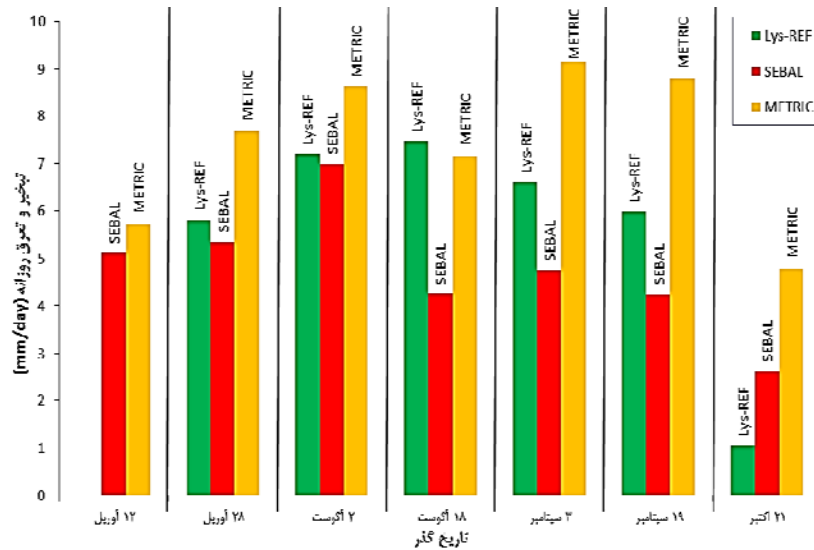
شاخص	مدل	
	METRIC	SEBAL
NRMSE*	۰/۴۲۰	۰/۳۱۷
MAE	۲/۱۲۰	۱/۵۰۳
MBE	۲/۰۲۳	-۰/۹۷۳
d	۰/۶۴۶	۰/۷۶۸

\* مقادیر MAE و MBE برحسب میلی‌متر بر روز و NRMSE و d بدون واحد

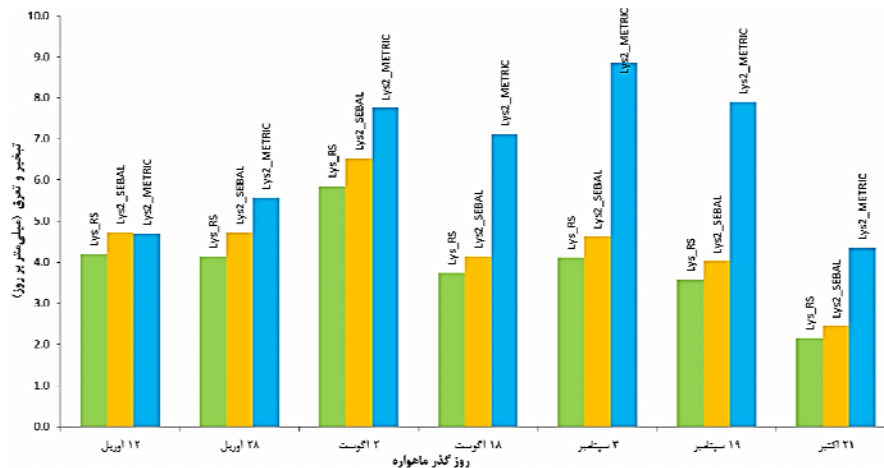
## نتایج و بحث

شاخص‌های آماری از مقایسه بین برآوردهای ET در پیکسل‌های معیار (Anchor pixels) به هر دو روش سبال و متریک نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق مرجع (یونجه) در لایسیمتر اول (LYS\_REF) در جدول (۲) ارائه شده است.

براساس نتایج این جدول، مدل سبال از شاخص‌های مناسب‌تری برای برآورد ET نسبت به مدل متریک برخوردار



شکل ۲. مقایسه تبخیر و تعرق در مدل‌های SEBAL و METRIC نسبت به لایسیمتر مرجع



شکل ۳. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق در لایسیمتر دوم (Lys\_RS) نسبت به برآورد مدل‌های SEBAL و METRIC

دوم (Lys<sub>2</sub>\_METRIC) در شکل (۳) ارایه شده است. با توجه به شکل (۳) در لایسیمتر اول به‌عنوان لایسیمتر مرجع، کمبود رطوبت وجود نداشته و مقادیر ET حاصل از آن در تمامی روزهای گذر (به جز آخرین روز که به دلیل چین‌برداری کاهش نشان می‌دهد) در بالاترین مقدار بود، مقادیر اندازه‌گیری شده ET در لایسیمتر دوم به دلیل عدم برقراری شرایط استاندارد تأمین آب، به میزان کمتری بوده و برآورد تبخیر و تعرق با مدل سبال در این لایسیمتر (Lys<sub>2</sub>\_SEBAL) و اراضی اطراف آن نشان داد که مدل سبال دارای اندکی فراب‌آورد (به‌طور متوسط ۱۲/۵۳

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در لایسیمتر دوم توانست اطلاعات بیشتری ارایه نماید، پایش تغییرات رطوبتی در لایسیمتر دوم منعکس‌کننده شرایط رطوبتی و مقدار تبخیر و تعرق در اراضی وسیع و گسترده یونجه‌زار اطراف لایسیمتر دوم بود که به خوبی در تصاویر ماهواره‌ای قابل تفکیک است. مقایسه بین ET اندازه‌گیری شده در لایسیمتر اول (Lys\_REF)، ET برآورد شده با مدل سبال از اراضی اطراف لایسیمتر دوم (Lys<sub>2</sub>\_SEBAL) و ET برآورد شده با مدل متریک از اراضی اطراف لایسیمتر

استاندارد برای رشد و تبخیر و تعرق برخوردار نبود، بنابراین با توجه به محاسبات ET در مدل متریک خطای بیشتر در برآورد ET دور از انتظار نبود و نتایج نیز حاکی از آن است.

در پژوهش گودا و همکاران (۲۱) هم مدل‌های سبال و متریک مورد مقایسه قرار گرفت و اشاره کردند در صورتی که آمار هواشناسی ساعتی موجود باشد و شرایط استاندارد رشد و آبیاری کامل برقرار باشد مدل متریک می‌تواند نتایج مشابه با مدل سبال ارائه دهد. فرنچ و همکاران نیز مدل سبال را بررسی و گزارش نمودند مدل سبال در نواحی با کشت غیر متراکم و غیر استاندارد از دقت بالایی برخوردار است (۲۰). با توجه به نتایج دو مطالعه اخیر، شرایط مشابهی در پژوهش حاضر وجود داشت و به‌طور مشابه نتایج یکسانی نیز به‌دست آمد. وانگ و همکاران نیز گزارش مشابهی ارائه داده و متذکر شدند برای مدل سبال در شرایطی که محصول کشت شده دارای شرایط استاندارد از نظر تراکم و آبیاری نباشد دارای خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌ها خواهد بود (۲۹). براساس نتایج کاملاری و همکاران این فرابرابر به‌طور عمده ناشی از چشم‌پوشی از شار گرمای خاک روزانه (۲۴ ساعته) در محاسبات انرژی است (۱۸).

تفاوت در مقادیر برآورد ET مربوط به مدل‌های سبال و متریک در پژوهش ترزا به‌دلیل تفاوت در نحوه برآورد ET روزانه بین دو مدل و نیاز مدل متریک به آمار کامل (ساعتی) هواشناسی و دو پارامتر بیان شد (۲۸). به عبارت بهتر مدل متریک نیاز به دو پارامتر یعنی  $ET_{ref}$  و  $ET_{rF}$  ولی مدل سبال نیاز به یک پارامتر EF دارد. از سوی دیگر مدل سبال فقط به سرعت باد در لحظه گذر ماهواره نیاز دارد، اما، افزون بر آن، مدل متریک برای برآورد تبخیر و تعرق، به ET مرجع در لحظه گذر ماهواره نیز نیاز دارد که با استفاده از مدل ترکیبی پنمن-مانتیث و داده‌های آماری مورد نیاز (جدول ۱) به‌دست آمد. البته، نتایج پژوهش مرشدی (۵) نشان داد که از بین مدل‌های ریاضی موجود، مدل ترکیبی پنمن-مانتیث مناسب‌ترین مدل برای دشت شهرکرد نبود و برای بازه زمانی روزانه دارای خطا

درصد) در تخمین ET است. از طرفی تبخیر و تعرق در مدل متریک ( $Lys_2\_METRIC$ ) فرابرابر بیشتری (به‌طور متوسط ۲۷/۲۰ درصد) نشان داد. به‌طور کلی مقایسه بین برآوردهای تبخیر و تعرق توسط مدل‌های سبال و متریک نسبت به مقادیر واقعی ET در لایسیمتر دوم نشان داد که مدل سبال از دقت بالاتری در برآورد ET برخوردار است (شکل ۳).

در این پژوهش، فرابرابر متوسط به میزان ۱۲/۵۳ درصد در مدل سبال نسبت به لایسیمتر یونجه به‌دست آمد، اما ژانگ‌پینگ و همکاران حدود ۱۰/۸ درصد نسبت به تشتک تبخیر و لایسیمتر چمن گزارش کردند، تفاوت مذکور احتمالاً می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع گیاه مرجع باشد (۳۱). ژانگ‌پینگ و همکاران مدل سبال را برای برآورد ET در منطقه مورد مطالعه مفید ارزیابی کردند (۳۱). در تحقیق حاضر مدل متریک برآوردهای بالاتری را نسبت به مدل سبال ارائه داد. البته، چاوز و همکاران در پژوهشی در دشت‌های مرتفع تگزاس گزارش کردند که برآورد ET روزانه به کمک مدل متریک نسبت به ET روزانه از گیاه یونجه بین ۴۰ تا ۵۹ درصد دارای فرورآورد است (۱۹). چاوز و همکاران دلیل این امر را در این مطلب دانستند که برای پیکسل‌های سرد این شرط باید برقرار باشد که ET مرجع ( $ET_{ref}$ ) در مدل متریک باید برابر با  $1.05 * ET_{ref}$  فرض شود و این فقط در شرایطی ممکن است که گیاه مورد نظر در لحظه گذر ماهواره از ضریب  $K_c$  بزرگ‌تر از یک برخوردار باشد، در غیراینصورت فرابرابر رخ می‌دهد (۱۹). آنها گزارش کردند که تبخیر و تعرق روزانه از مدل متریک نسبت به نتایج لایسیمتری ذرت تفاوت بارزی را نشان داد یعنی تبخیر و تعرق روزانه ( $ET_{24}$ ) مدل متریک دارای فرابرابردی حدود ۱۵ درصد نسبت به نتایج لایسیمتری داشت و درنهایت گزارش کردند که خطای برآورد مدل متریک برای گیاهان خوب آبیاری شده با بیوماس زیاد کمتر از ۱۵ درصد است. آلن و همکاران در مورد مدل متریک خطا در برآورد  $ET_{ref}$  را عامل تعیین‌کننده دانستند (۱۴). در پژوهش حاضر، اراضی زیر کشت یونجه (لایسیمتر دوم) از وضعیت رطوبتی

در نظر گرفته می شود بنابراین این حداکثر مقدار جز تبخیر EF در مدل SEBAL برابر با یک خواهد شد. اما برای مدل METRIC مقادیر ET<sub>rF</sub> به صورت معادله (۵) محاسبه می شود:

$$\lambda ET = R_n - G_o - H \Rightarrow 3600 \left( \frac{\lambda ET}{\lambda} \right) = \quad [5]$$

$$ET_{inst} \Rightarrow ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r}$$

برای مدل متریک پارامتر ET<sub>ref</sub> در فرایند محاسبه H دخیل بوده و برآورد ناصحیح آن به دلیل در دست نبودن آمار کامل هواشناسی (ساعتی) به برآورد ناصحیح باقیمانده انرژی در سطح تبخیر (λET) و لاجرم به برآورد ناصحیح تبخیر و تعرق لحظه ای (ET<sub>inst</sub>) منجر خواهد شد و در نهایت به دلیل مقادیر غیر معتبر برای ET<sub>inst</sub> و ET<sub>ref</sub> به برآورد نامعتبر ET<sub>rF</sub> ختم و به همین دلیل به برآوردهای غیر واقعی در تبخیر و تعرق (فرایرآورد ET) در مدل متریک منجر شد.

### نتیجه گیری

نتایج نشان داد مدل سبال از کمترین مقادیر شاخص های NRMSE، MAE و MBE (به ترتیب برابر با ۰/۳۱۷، ۰/۵۰۳ و ۱/۵۰۳ میلی متر بر روز و ۰/۹۷۳- میلی متر بر روز) و بیشترین مقدار شاخص d (۰/۷۶۸) برخوردار بود. شاخص های آماری مذکور برای مدل متریک به ترتیب برابر با ۰/۴۲۰، ۲/۱۲۰، ۲/۰۲۳ و ۰/۶۴۶ بود. به طور کلی نتایج نشان داد مدل سبال از دقت بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق نسبت به مدل متریک تحت شرایط حاکم بر دشت شهرکرد برخوردار بود. تا زمانی که امکان تأمین آمار کامل هواشناسی به صورت ساعتی فراهم آید و یا برخی اصلاحات بر مدل متریک انجام شود، نتایج مدل سبال به واقعیت نزدیک تر بوده و لذا مدل سبال توصیه می شود.

است، بنابراین برآوردهای مدل متریک می تواند همراه با خطای بیشتری نسبت به مدل سبال انجام گرفته باشد.

انتخاب پیکسل مرجع سرد بایستی در اراضی با شاخص سطح برگ بیشتر از ۴ (LAI > ۴)، با پوشش گیاهی فشرده و آبیاری کامل (بدون تنش آبی) باشد، اما در زمان انجام پژوهش حاضر چنین شرایطی حاکم نبود. به بیان دقیق تر، در اوایل فصل رشد و یا فصول غیر رشد که شرایط استاندارد برای پوشش گیاهی (برای انتخاب به عنوان پیکسل سرد) برقرار نباشد و همینطور ارتفاع گیاه به ۵/۰ متر (ارتفاع گیاه مرجع) نرسیده باشد، خطای برآورد ET تا ۲۰ درصد محتمل است. در پژوهش آلن و همکاران نتیجه گیری شد که مدل متریک یک مدل کامل نبوده و ایرادهایی بر آن وارد دانستند (۱۴).

بر اساس آنچه پیشتر بیان گردید، مشاهدات محلی در دشت شهرکرد حاکی از آن بود که پوشش گیاهی یونجه مورد بررسی فاقد پوشش کامل بود و به دلیل عدم برقراری شرایط رشد استاندارد (پوشش کامل و تأمین کامل آب مورد نیاز) خطای بیشتری در برآوردهای تبخیر و تعرق از مدل متریک مشاهده شد.

تفاوت قابل بررسی دیگر در مقدار جزء تبخیر است، در مدل سبال جزء تبخیر EF و در مدل متریک جزء تبخیر ET<sub>rF</sub> باید در دامنه ای بین صفر تا یک (حداکثر ۱/۱) قرار داشته باشد (۱۱ و ۱۵). در پژوهش حاضر بررسی مقادیر EF برای مدل سبال نشان داد این فرض برقرار بود. دلیل این امر آن است که جزء تبخیر EF طبق تعریف به صورت زیر محاسبه می شود:

$$EF_{cold} = \frac{R_n - G_o - H}{R_n - G_o} \Rightarrow \text{If } H = 0 \Rightarrow \text{Then :} \quad [4]$$

$$EF_{cold} = \frac{R_n - G_o - 0}{R_n - G_o} = \frac{R_n - G_o}{R_n - G_o} = 1 \Rightarrow 0 < EF < 1$$

و چون شار گرمای محسوس در پیکسل های سرد برابر با صفر



## منابع مورد استفاده

۱. ثنائی‌نژاد، س. ح.، نوری، و س. م. هاشمی‌نیا. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵(۳): ۵۴۷-۵۴۰.
۲. مباشری، م. ح. خاوریان، پ. ضیاییان، غ. ع. کمالی. ۱۳۸۴. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر MODIS و الگوریتم SEBAL. همایش ژئوماتیک. ۱ اردیبهشت تا ۲ اردیبهشت ۱۳۸۴.
۳. مباشری، م. ر. ح. خاوریان، و س. ح. موسوی. ۱۳۸۵. بررسی خطا در برآورد ET ناشی از شار گرمای محسوس در مدل SEBAL. اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. اهواز. ۱۲ اردیبهشت تا ۱۴ اردیبهشت ۱۳۸۵.
۴. محسنی ساروی، م. ح. احمدی و ک. نصرتی. ۱۳۸۹. کاربرد مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق در حوضه آبخیز طالقان. اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا. مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی. دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۲۳ آبان تا ۲۴ آبان ۱۳۸۹.
۵. مرشدی، ع. ۱۳۹۱. تخمین و پهنه بندی میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در دشت شهرکرد. پایان‌نامه دکتری رشته خاک شناسی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ۲۰۱ ص.
۶. نوری، س. ح. ثنائی‌نژاد و م. هاشمی‌نیا. ۱۳۸۹. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر مودیس. اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا. مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی. دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۲۳ آبان تا ۲۴ آبان ۱۳۸۹.
7. Akbari, M., N. Toomanian, P. Droogers, W. Bastiaanssen and A. Gieske. 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agric. Water. Man.* 88: 99-109.
8. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage pp: 5627-65.
9. Allen, R. G., M. Tasumi and R. Trezza. 2005a. METRIC: mapping evapotranspiration at high resolution – applications manual for Landsat satellite imagery. University of Idaho: Kimberly.
10. Allen, R. G., M. Tasumi, A. Morse and R. Trezza. 2005b. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irri. Drain. Sys.* 19: 251-268.
11. Allen, R. G., M. Tasumi and A. Morse. 2005c. A. Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. Presented at the US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop, Ft. Collins, CO, USA.
12. Allen, R. G., M. Tasumi and R. Trezza. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 380-394.
13. Allen, R. G., Morse, A., Tasumi, M., Bastiaanssen, W., Kramber, W. and Anderson, H. 2001. Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for water rights management and compliance with multi-state water compacts. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, 830-833.
14. Allen, R. G., A. Irmak, R. Trezza, J. M. H. Hendricks, W. Bastiaanssen and J. Kjaersgaard. 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrol. Process.* 25: 4011-4027.
15. Bastiaanssen, W. G. M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University: Wageningen. The Netherlands.
16. Bastiaanssen, W. G. M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. F. Moreno, G. J. Roerink and W. T. van der. 1998a. A Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 validation. *J. Hydrol.* 212-213: 213-229.
17. Bastiaanssen, W. G. M., M. Menenti, R. A. Feddes and A. A. M. Holtslag. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212-213: 198-212.
18. Cammalleri, C., G. Ciraolo, G. La Loggia and A. Maltes. 2012. Daily evapotranspiration assessment by means of residual surface energy balance modeling: A critical analysis under a wide range of water availability. *J. Hydrol.* 452-453: 119-129.

19. Chavez, J. L., P. H. Gowda, T. A. Howell, T. H. Marek and L. L. New. 2007. Evapotranspiration mapping using METRIC for a region with highly advective conditions. In proceedings of the 2007 Annual International ASABE Meeting, Centennial Celebration. Paper No. 072146. June 17-20, 2007. Minneapolis, MN.
20. French, A. N., F. Jacob, M.C. Anderson, W.P. Kustas, W. Timmermans, A. Gieske, Z. Su, H. Su, M.F. McCabe, F. Li, J. Prueger, N. Brunsell. 2005. Surface energy balance fluxes with the Advanced Spaceborn Thermal Emmission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). Remote sensing Environ. 99(1-2): 55-65.
21. Gowda, P. H., Chavez, J. L. Colaizzi, P. D. Evett, S. R. Howell, T. A. and J. A. Tolk. 2008. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. Irrig. Sci. 26(3): 223-237.
22. Hexagon Geospatial. ERDAS Imagine, Version 2010. 5051 Peachtree Corners Circle. Norcross, GA 30092-2500. USA.
23. IBM Corp. Released 2015. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0. Armonk, NY: IBM Corp. USA.
24. Itenfisu, D., R.L. Elliot, R.G. Allen and I.A. Walter. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the American Society of Civil Engineers standardization effort. J. Irrig. Drain. Eng., 129(6):440-448.
25. Jensen, M. E., R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, American Society of Civil Engineers, New York.
26. Mokhtari, M. H. 2005. Agricultural drought impact using remote sensing. Ms. C. Diss., ITC. The Netherlands.
27. Temesgen, B., R. G. Allen and D.T. Jensen. 1999. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. J. Irrig. Drain. Eng. 125(1): 26-33.
28. Trezza, R. 2006. Estimation of evapotranspiration from satellite-based surface energy balance models for water management in the Rio Guarico irrigation system, Venezuela. Earth observation for vegetation monitoring and water management. The American Institute of Physics Conference Proceeding. 852 (1): 162-169.
29. Wang, J., T. W. Sammis, V. P. Gutschick, M. Gebremichael and D. R. Miller. 2009. Sensitivity analysis of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Am. Soc. Agric. Biol. Eng. 52 (3):801-811.
30. Zhao-Liang, L., T. Ronglin, W. Zhengming, B. Yuyun, Z. Chenghu, T. Bohui, Y. Guangjian and Z. Xiaoyu. 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. Sensors 9: 3801-3853.
31. Zhongping, S., B. Wei, W. Su, W. Shen, C. Wang, D. You and, Z. Liu. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. Math. Comp. Model. 54: 1086-1092.

## Estimation of Reference Evapotranspiration at Regional Scale using Remote Sensing Data in Shahrekord Plain I- Comparing the Results of SEBAL and METRIC Models to Lysimetric Measurements

A. Morshedi<sup>\*1</sup>, M. Naderi<sup>2</sup>, S.H. Tabatabaei<sup>3</sup> and J. Mohammadi<sup>2</sup>

(Received: Sept. 06-2014; Accepted: Aug. 03-2016)

### Abstract

Conventional methods for estimating evapotranspiration are based on point measurement and suitable for local areas, therefore, cannot be generalized for larger areas or watershed basins. The remote sensing technology is capable of using satellite images and meteorological data to estimate evapotranspiration in a wider area. In this study, estimates of evapotranspiration (ET) by SEBAL and METRIC models based on Landsat 7 ETM+ sensor were compared against ET measured by lysimeter on seven satellites passing time over Shahrekord plain located in Karun basin. The results showed that the lowest indices of NRMSE, MAE and MBE (respectively, 0.317, 1.503 and -0.973 mm per day) and the maximum of d index (0.768) belonged to SEBAL. These indices were 0.420, 2.120, 2.023 and 0.646 for METRIC, respectively. The results showed that the SEBAL was more accurate than METRIC model for estimating ET under Shahrekord plain conditions. As long as the possibility of getting complete hourly meteorological data be provided, or some modifications on METRIC model were done, SEBAL show closer results to reality, and therefore is recommended.

**Keywords:** Satellite imagery, Landsat, Surface energy balance, Alfalfa.

---

1. Dept. of Soil and Water Res., Chaharmahal and Bakhtiari Agric. and Natural Resour. Res. Center, AREEO, Shahrekord, Iran.

2. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

3. Dept. of Water Eng., College of Agric., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: a.morshedi@areeo.ac.ir