



"مقاله پژوهشی"

تحلیل حساسیت الگوریتم SEBAL در برآورد نیاز آبی محصولات زراعی

الهام محمودزاده^۱ و صدیقه انوری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مدیریت مهندسی منابع آب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
۲- استادیار گروه اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
(نویسنده مسوول: anvari.t@gmail.com)
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۱۴ صفحه: ۲۱۷ تا ۲۲۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: تخمین دقیق تبخیر و تعرق واقعی (ETA) یا به عبارتی نیاز آبی یک محصول طی دوره رشد، از جمله موضوعات مهم در مدیریت تخصیص آب در مزرعه و بهبود راندمان آب مصرفی در هر منطقه می‌باشد. در تحقیق حاضر ETA برای محصول سورگوم با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL) و به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای Landsat8، آمار هواشناسی و نقشه DEM منطقه محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر مقایسه گردیده است.

مواد و روش‌ها: به منظور آنالیز حساسیت، پارامترهای ورودی کلیدی الگوریتم SEBAL در دامنه ± 10 ، ± 20 ، ± 30 ، ± 40 و ± 50 تغییر یافته و میزان تغییرات ETA با توجه به کاهش و افزایش هر کدام از این پارامترها بررسی گردید. این تغییرات برای روزهای ۲۰۶، ۲۲۸ و ۲۵۴ جولایی در هشت نقطه با تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مقادیر ETA محاسبه شده با الگوریتم SEBAL در قیاس با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری، در سطح اطمینان ۹۵٪ قابل قبول می‌باشند. همچنین نتایج آنالیز حساسیت حاکی از آن بود که در الگوریتم SEBAL پارامترهای دمای سطحی و تابش طول موج کوتاه ورودی دارای حساسیت بالا به خصوص در مناطق با ET پایین می‌باشد. همچنین پارامترهای آلبیدو و سرعت باد دارای حساسیت متوسط تا زیاد بوده به نحوی که پارامتر آلبیدو در $ET > 10$ حساسیت متوسط و در $ET < 10$ حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: در مجموع الگوریتم SEBAL علاوه بر صرفه اقتصادی بالا نسبت به سایر روشهای متداول، کارایی خوبی در برآورد ET داشته است. همچنین انجام آنالیز حساسیت و تعیین پارامترهای کلیدی، ضمن افزایش دقت در اندازه‌گیری آن پارامترها، می‌تواند نتایج مدل‌سازی را تا حد زیادی بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، تابش طول موج کوتاه، تبخیر و تعرق، دمای سطحی، سیال، لایسیمتر، لندست ۸

مقدمه

حدود ۶۴ درصد از بارش‌هایی که در روی کره زمین اتفاق می‌افتد توسط پدیده تبخیر و تعرق (ET) به جو زمین باز می‌گردد. لذا مطالعه و بررسی پدیده ET، به عنوان جزء لاینفک سیکل هیدرولوژی و نیز عامل کلیدی ارتباط‌دهنده بین کره زمین، هیدروسفر و اتمسفر از اهمیت زیادی برخوردار است (۲۴).

نظر به اهمیت مسأله ET در مدیریت آبیاری، موتیگا و همکاران (۲۰) روش‌های برآورد آن را به دو گروه عمده تقسیم‌بندی نمودند: گروه اول شامل روش‌هایی است که ET را بر اساس روابط تجربی FAO-24 و FAO-56 و با استفاده از متغیرهای هواشناسی برآورد می‌نمایند. مهمترین این روابط عبارتند از روش بلانی-کریدل، تورنت-وایت، فائو- پنمن-مانیتش، هارگریوز و تشتک تبخیر (۲،۳،۴،۵،۸). در این راستا دستورانی و همکاران (۱۳) با استفاده از روش‌های تورنت-وایت و هارگریوز ET مرجع ایستگاه یزد را برآورد کرده و سپس تاثیر عدم قطعیت این روش‌ها را در شرایط تغییر اقلیم بررسی نمودند. نتایج نشان داد که روش تورنت-وایت تحت شرایط اقلیم افزایش ۰/۴ میلی‌متری در روز را برای ET به همراه داشته است. صمدیان فرد و پناهی (۲۲) ET مرجع را با روش‌های درخت تصمیم و رگرسیون بردار پشتیبان برآورد نمودند. نتایج حاکی از آن بود که این روش‌ها در قیاس با روش‌های تجربی تورنت-وایت و هارگریوز، در برآورد ET نتایج بهتری داشتند. امیری و قاسمی (۶)، روش‌های مختلف ET پتانسیل شامل تورنت-وایت، بلانی-کریدل و هارگریوز-

سامانی را در حوزه آبخیز مهارلو محاسبه و تغییرات زمانی- مکانی آن را در GIS بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در مجموع روش بلانی-کریدل بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها داشته است.

گروه دوم شامل روش‌هایی می‌باشد که بر پایه اطلاعات ماهواره‌ای استوار بوده و مابقی عمده‌شان معادلات توازن انرژی در سطح زمین و مکانیزم‌های جذب آن می‌باشد (۲۰). استفاده از این روش‌ها و به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای اغلب موجب کاهش هزینه، صرفه‌جویی در وقت و افزایش دقت نتایج می‌گردد. از بین روش‌های نامبرده، روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی همانند الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)^۲ برای محاسبه ET واقعی، بیشترین کاربرد را داشته است (۱۰،۱۱،۹). مدل SEBAL تحت شرایط متنوعی در مناطق مختلف جهان شامل اسپانیا، ایتالیا، ترکیه، پاکستان، هند، سریلانکا، مصر، نیجریه، چین و ایالات متحده برای تخمین مقادیر ETA مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفته است که نتایج، حاکی از توانمندی مدل SEBAL بوده است (۱۱،۱۲).

از طرف دیگر، حساسیت‌سنجی یک مدل نسبت به تغییر متغیرها و پارامترهای ورودی، از موارد مهمی است که قبل از مدل‌سازی بایستی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج آنالیز حساسیت مشخص می‌کند که اندازه‌گیری چه پارامترهایی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و لذا این امر بر دقت و هزینه اندازه‌گیری آن پارامترها تاثیرگذار می‌باشد. به‌عنوان مثال، خروجی‌های آنالیز حساسیت مدلی همانند SEBAL، بر کیفیت

1- Evapotranspiration (ET)

2- Surface Energy Balance Algorithm for Land

انجام آنالیز حساسیت، نقش پارامترهایی چون دمای سطحی، شاخص سطح برگ، تابش طول موج کوتاه، آلیبدوی سطحی و ... بر نتایج این الگوریتم بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مطالعاتی

استان کرمان با دارا بودن بیش از ۱۱ درصد وسعت کشور، پهناورترین استان ایران و دارای طیف گسترده اقلیمی است. در بخش‌های شمالی، شمال غربی و مرکزی استان، اقلیم خشک و نیمه خشک، در حالیکه در مناطق جنوب و جنوب شرقی، اقلیم خشک و تا حدی مرطوب حاکم است. مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان در این استان و در شهر ماهان واقع شده است. این منطقه دارای آب و هوای نیمه معتدل و خشک بوده، به‌طوری‌که حداقل و حداکثر دما در آن به ترتیب ۷- و ۳۹/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ارتفاع از سطح دریا در این منطقه ۱۹۱۰ متر بوده و از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی، این شهر جز مناطق خشک محسوب می‌شود (۱۴).

داده‌های مورد استفاده

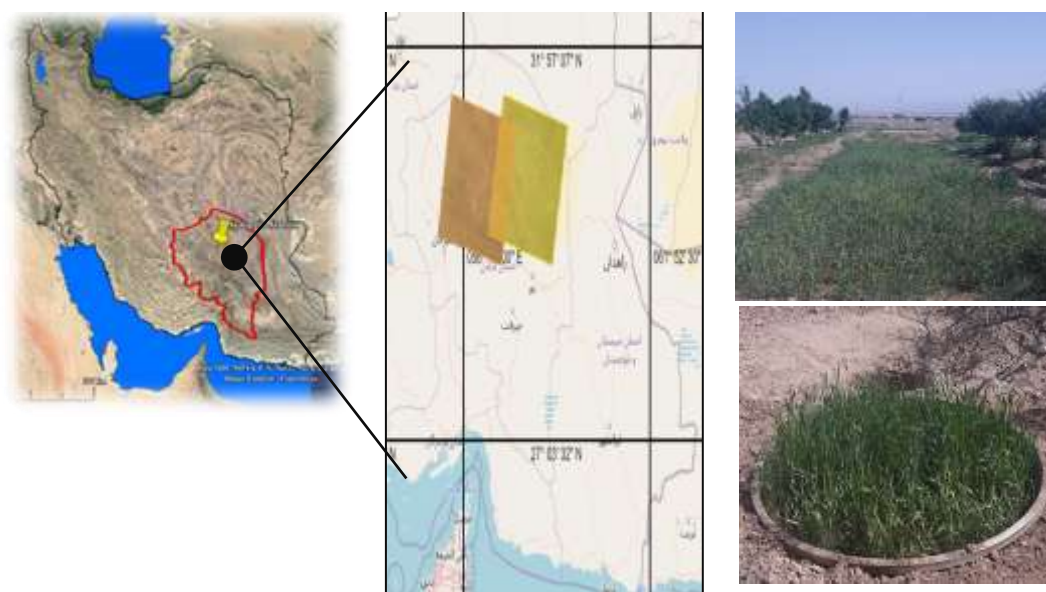
الف) داده‌ها و اطلاعات دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره لندست ۸، محصول همکاری ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده می‌باشد که در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ در مدار زمین قرار گرفته است. سنجنده‌های عملیاتی تصویرساز زمین (OLI) و حرارتی مادون قرمز (TIRS) دو سنجنده این ماهواره هستند که به ترتیب، اطلاعات تصویر را برای ۹ باند موج کوتاه و ۲ باند حرارتی جمع‌آوری کرده و جمعا ۱۱ باند تصویر را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ با قابلیت تفکیک مکانی ۳۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روز استفاده شده است. مطابق شکل ۱ با توجه به موقعیت مزرعه تحقیقاتی دانشگاه در محل قرارگیری همپوشانی تصاویر، این زمان به نصف کاهش یافته است و هر ۸ روز یک تصویر برای منطقه مطالعاتی موجود می‌باشد.

جمع‌آوری و پردازش داده‌های ورودی حساس‌تر بر مقادیر ET، موثر می‌باشد (۱۱).

در زمینه انجام آنالیز حساسیت الگوریتم SEBAL تحقیقات مختلفی انجام شده در این راستا ملکی‌نژاد و پورمحمدی (۱۸) پارامترهای اقلیمی موثر بر ET را برای فلات مرکزی ایران به روش تجزیه عاملی بررسی و مشخص گردید نقش دما، سرعت باد و میزان ابرناکی از بقیه مشهودتر بوده است. ژانگ و همکاران (۲۶) مقادیر ET مرجع (ET_o) را در ۲۲ ایستگاه شمال غرب چین با روش فائو-پنمن-مونتیت محاسبه و در ادامه حساسیت مقادیر ET_o ماهانه را نسبت به متغیرهای هواشناسی در چهار ایستگاه بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در ماه‌های سرد سال و در بخش‌های کوهستانی منطقه، کمبود فشار بخار اشباع، حساس‌ترین پارامتر در تخمین ET_o می‌باشد. لانگ و همکاران (۱۷) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS به آنالیز حساسیت پارامتر شار حرارتی محسوس (H) در الگوریتم SEBAL پرداختند. نتایج نشان داد تعداد و نحوه انتخاب پیکسل سرد و گرم از طریق تأثیر گذاشتن روی پارامترهای همبستگی a و b تأثیر بسزایی در تخمین پارامتر H دارد. سیما و تجریشی (۲۳) به‌منظور تعیین حساسیت نسبی مدل SDDE به متغیرهای ورودی از روش تحلیل اثر یک عامل در یک زمان روی متغیر خروجی استفاده کردند. نتایج نشان داد متغیرهای چگالی، ساعت آفتابی، دمای سطح آب و دمای هوا بیشترین حساسیت و متغیرهای فشار هوا و آب قابل بارش از حساسیت کمتری برخوردار هستند.

با توجه به اهمیت تخمین ETA در مدیریت منابع آب به خصوص برای اراضی کشاورزی مناطق گرم و خشک، در پژوهش حاضر سعی بر آنست تا با بکارگیری تصاویر ماهواره Landsat8 میزان ETA با استفاده از الگوریتم SEBAL برای محصول سورگوم کشت شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان محاسبه و در نهایت با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر، مقایسه شود. همچنین با توجه به طیف گسترده پارامترهایی که بر عملکرد الگوریتم SEBAL در تخمین ETA موثرند در ادامه سعی شده که با



شکل ۱- موقعیت مکانی مزرعه تحقیقاتی و همپوشانی تصاویر لندست ۸ برای این محدوده
Figure 1. The location of research field and Landsat images overlap of for this area

سینوپتیک پارامترهای جوی شامل حداقل دما (Tmin)، حداکثر دما (Tmax)، سرعت باد (WS) و جهت آن، فشار هوا (P)، بارندگی (R)، تبخیر (E)، تابش خورشیدی (Rad)، دید افقی، میزان ابرناکی و نوع ابرها به صورت ساعتی ثبت و گزارش می‌شود. مقادیر برخی از این متغیرها، برای روزهای اخذ تصاویر ماهواره مطابق جدول ۲ می‌باشد.

ب) آمار و اطلاعات زمینی

در تحقیق حاضر بمنظور برآورد ET با استفاده از الگوریتم SEBAL از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه کرمان که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مطالعاتی می‌باشد، استفاده شده است. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه در جدول ۱ ارائه شده است. به طور معمول در ایستگاه‌های

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه کرمان (۱۴)

Table 1. Geographic and climatic information at synoptic station of Kerman airport (14)

کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین درجه حرارت سالانه (°C)	اقلیم
۴۰۸۴۱	۵۶/۵۷	۳۰/۱۵	۱۷۵۷/۷	۱۳۱	۱۶	نیمه خشک

جدول ۲- مقادیر برخی از متغیرهای ایستگاه سینوپتیک کرمان در زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای (۱۴)

Table 2. Values of some variables of Kerman synoptic station at the time of taking satellite images (14)

تاریخ تصویر	متوسط سرعت باد (m/s)	متوسط دما (°C)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)
۱۳۹۷/۰۵/۰۳	۴/۳۷	۲۵/۶۵	۳۳/۹	۱۷/۴
۱۳۹۷/۰۵/۱۰	۳/۲۵	۲۶/۰۰	۳۶/۵	۱۵/۵
۱۳۹۷/۰۵/۱۹	۳/۳۷	۲۵/۶۵	۳۶/۷	۱۴/۶
۱۳۹۷/۰۵/۲۶	۳/۷۳	۲۵/۳۰	۳۵	۱۵/۶
۱۳۹۷/۰۶/۰۴	۴/۴۰	۳۰/۱۸۰	۳۸/۹	۲۲/۷
۱۳۹۷/۰۶/۱۳	۳/۵۰	۲۱/۶۰	۳۲/۶	۱۰/۶
۱۳۹۷/۰۶/۲۰	۲/۷۵	۲۵/۲۵	۳۷	۱۳/۵

نهایت با توجه به رابطه بیلان رطوبت خاک (۷) حجم آبی که در سطح لایسیمتر صرف ETA شده است محاسبه گردید.

ساختار مدل SEBAL و معادلات حاکم

الگوریتم SEBAL یکی از روش‌های کارآمد سنجش از دوری برای محاسبه ETA می‌باشد، که بر اساس معادلات بیلان انرژی در سطح زمین، روابط تجربی و فیزیکی و استفاده از حداقل داده زمینی کار می‌کند. مهمترین روابط حاکم بر الگوریتم SEBAL برای محاسبه ETA در جدول ۳ لیست شده است (۹، ۱۰، ۱۲). مطابق این جدول رابطه (۱) شار

در تحقیق حاضر به منظور برآورد ETA، گیاه سورگوم در لایسیمترهای نصب شده در مزرعه تحقیقاتی و زمین‌های مجاور آن مطابق شکل (۱) کاشته شد. شعاع هر لایسیمتر ۸۰ سانتیمتر، ارتفاع آن ۲ متر و در کنار هر لایسیمتر یک حلقه چاه جهت اندازه‌گیری مقدار زه‌آب حفر گردید. بعد از نصب دو لایسیمتر و کشت گیاه نامبرده، با توجه به دوره رشد محصول (از ۲۰۱۸/۰۷/۲۵ تا ۲۰۱۸/۰۹/۱۴) آبیاری لایسیمترها و مزرعه انجام و در ادامه برای هر دوره آبیاری، مقادیر رطوبت خاک و آب زهکشی شده، اندازه‌گیری شد. در

گرمای نهانی را بر اساس مقدار باقیمانده انرژی، محاسبه می‌نماید. در این رابطه λET شار گرمای نهان، R_n تشعشع خالص در سطح، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس به هوا برحسب w/m^2 است.

جدول ۳- لیست معادلات حاکم بر الگوریتم بیان انرژی در سطح زمین (۹،۱۰)

Table 2. The list of equations governing at Surface Energy Balance Algorithm for Land (9, 10)

فرمول	شماره	نام رابطه
$\lambda ET = R_n - G - H$	(۱)	شار گرمای نهان λET
$R_n = (1 - \alpha) \times R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \epsilon_o) \times R_L \downarrow$	(۲)	تابش خالص خورشیدی (R_n)
$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4)$	(۳)	شار گرمای خاک (G)
$H = \frac{\rho C_p dt}{r_{ah}}$	(۴)	شار گرمای محسوس (H)
$dt = aTs + b$	(۵)	اختلاف دما (dt) بین دو ارتفاع z_2 و z_1
$ET_{inst} = 3600 * \frac{\lambda ET}{\lambda \rho W}$	(۶)	تبخیر-تعرق لحظه‌ای (ET_{inst})
$ET_{24} = ET_{TrF} \times ET_r - 24$	(۷)	تبخیر-تعرق روزانه

آنالیز حساسیت الگوریتم SEBAL

آنالیز حساسیت عملی است که به ازای آن میزان و نحوه توزیع داده‌های ورودی با بیشترین تاثیر بر روی خروجی مدل مشخص شود. در واقع تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی و درک اهمیت نسبی متغیرهای مختلف موثر بر یک پدیده، سبب کاهش مراحل سعی و خطا و شناخت مهمترین پارامترهای موثر بر پدیده مورد نظر می‌گردد. نتایج آنالیز حساسیت در شناسایی پارامترهای مهم مدل، دقت و هزینه اندازه‌گیری و کیفیت جمع‌آوری و پردازش آنها کمک شایانی می‌کند.

کیفیت جمع‌آوری و پردازش متغیرهای ورودی الگوریتم SEBAL نقش مهمی در دقت نهایی ETA برآورد شده و در نتیجه مدیریت بهتر منابع آب کشاورزی در مزرعه می‌باشد. در این خصوص لازمست قبل از شروع مطالعه، ورودی‌های یک مدل با دقت خوبی بررسی و تحلیل شده و حسب اثرگذاری هر داده در نتایج خروجی آن مدل، هزینه و زمان لازم جهت آماده‌سازی اختصاص یابد (۲۱). روش تجزیه‌عاملی از جمله روشهایی است که توسط برخی از محققین، در زمینه بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف اقلیمی بر مقادیر ET استفاده شده است. این روش بیانگر ارتباط مشاهده شده بین چندین متغیر به صورت روابط نسبتاً ساده است و همچنین از روی ساختار حاکم بر متغیرهای مورد نظر، ایده‌ای مبنی بر اهمیت نسبی فاکتورهای مختلف تأثیرگذار بر روی پدیده مورد مطالعه ارائه می‌دهد. برخی از تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که روش تجزیه‌عاملی، می‌تواند به منظور بررسی پدیده‌های هیدرولوژیکی، هیدرواقلمی و هیدروشیمیایی مورد استفاده قرار گیرد (۱۹).

در تحقیق حاضر، جهت بررسی میزان حساسیت خروجی‌های الگوریتم SEBAL در اثر تغییرات پارامترهای ورودی آن، ETA محاسبه شده در روزهای ۲۰۶، ۲۳۸ و ۲۵۴ جولایی (به ترتیب نماینده روزهای اولی، میانی و اواسط دوره رشد سورگوم) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا

تابش خالص خورشیدی (R_n) بیان‌کننده میزان واقعی انرژی تابشی موجود در سطح زمین است. در رابطه (۲)، α آلبیدوی سطحی، $R_s \downarrow$ تابش موج کوتاه، $R_L \downarrow$ تابش موج بلند ورودی، $R_L \uparrow$ تابش موج بلند خروجی (همگی بر حسب وات بر متر مربع) و ϵ_o گسیلمندی سطحی است. شار گرمای خاک (G) میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی را نشان می‌دهد. در رابطه (۳)، T_s دمای سطحی (درجه سانتی‌گراد) و $NDVI$ شاخص پوشش گیاهی می‌باشد. شار گرمای محسوس (H) هدایت مولکولی در اثر اختلاف دماست. برای به‌دست آوردن این پارامتر دو پیکسل آستانه سرد و گرم مورد نیاز است. در الگوریتم SEBAL مقادیر H مطابق رابطه (۴)، برای پیکسل سرد و گرم محاسبه و سپس برای سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شوند. پارامترهای این رابطه عبارتند از ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($1004 J/kg/K$)، dt اختلاف دما ($T_1 - T_2$) بین دو ارتفاع z_2 و z_1 (درجه کلوین)، r_{ah} مقاومت آئرودینامیک برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. در الگوریتم SEBAL برای برآورد dt از فرایند تکراری استفاده می‌شود که در آن dt در دو پیکسل شاخص با استفاده از رابطه رگرسیونی (۵) برآورد و سپس این رابطه به تمامی پیکسل‌های تصویر اعمال می‌شود. در این رابطه، T_s دمای سطح زمین، dt اختلاف دما، a و b ضرایب همبستگی می‌باشند. پس از محاسبه مقادیر R_n ، G و H ، مقدار شار گرمای نهان تبخیر لحظه‌ای و در نهایت مقدار ET لحظه‌ای (ET_{inst}) مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. از آنجا که مقدار روزانه ET کاربردی‌تر از مقادیر لحظه‌ای می‌باشد، مقدار ET لحظه‌ای با استفاده از کسر ET مرجع (ET_{TrF}) به مقدار روزانه تبدیل می‌شود. رابطه (۷) مقدار ET روزانه را با فرض اینکه ET_{TrF} لحظه‌ای مشابه با میانگین ET_{TrF} در طول ۲۴ ساعت است محاسبه می‌کند، که در آن λ گرمای نهان بخار آب (J/kg) و ρ_w چگالی آب (معادل $1000 Kg/m^3$) می‌باشد. ET_{Tr-24} مقدار تجمعی ET_r در طول ۲۴ ساعت روز تصاویر است (۹،۱۰،۱۲).

تصویر با تغییر ۵۰ درصدی پارامترهای حساس محاسبه شد. به منظور مقایسه نتایج، قدر مطلق درصد اختلاف مقادیر هریک از پارامترهای خروجی در دو حالت جدید نسبت به مقدار همان مولفه در شرایط مبنا با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (۱،۲۱).

$$D = \left| \frac{(M-L)}{L} \right| \times 100 \quad (۸)$$

در این رابطه D: قدرمطلق اختلاف مقادیر هریک از پارامترهای خروجی نسبت به مقدار همان مولفه در شرایط مبنا، M: مقدار بدست آمده پس از تغییر پارامتر موردنظر و L: مقدار بدست آمده در شرایط مبنا. در نهایت، مطابق جدول ۴ طبقه‌بندی حساسیت پارامترهای ورودی انجام گرفت (۱۵).

الگوریتم با استفاده از داده‌های ورودی اجرا و در ادامه خروجی‌های مدل‌سازی، بعنوان نتایج مبنا قرار گرفته شد. در مرحله بعد، هر کدام از پارامترهای کلیدی ورودی الگوریتم SEBAL، بطور جداگانه، تغییر یافته و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند و الگوریتم با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. در این راستا پارامترهای نامبرده در دامنه ± 10 ، ± 20 ، ± 30 ، ± 40 و ± 50 تغییر داده شده و میزان تغییرات ETA با توجه به کاهش و افزایش هر کدام از پارامترهای کلیدی بررسی شد. نتایج این تغییرات با نتایج حالت مبنا با توجه به شیب خط ترسیمی با هم مقایسه شدند. در نهایت با مشخص شدن پارامترهای حساس الگوریتم، میزان ET در نقاط مختلف

جدول ۴- طبقه‌بندی حساسیت پارامترهای ورودی

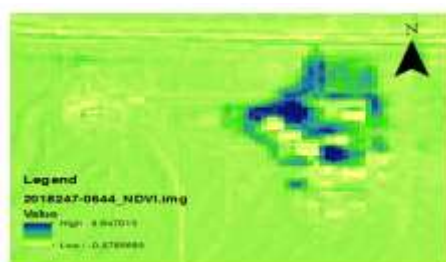
مقدار D	طبقه‌بندی حساسیت
D=0	حساسیت ندارد
0<D<5	حساسیت کم
5<D<25	حساسیت متوسط
D>25	حساسیت زیاد

ابری بودن تصاویر و داشتن خطا کم و تصاویر لندست مورد استفاده قابل اطمینان است. نتایج الگوریتم SEBAL یعنی ETA روزانه محصول سورگوم (بر حسب میلی‌متر در روز) برای اوایل مرداد تا اواخر شهریور ۱۳۹۷ در ادامه ارائه شده است، این نتایج در برگزیده مهمترین خروجی‌های مدل SEBAL شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و ET واقعی اشاره شده است.

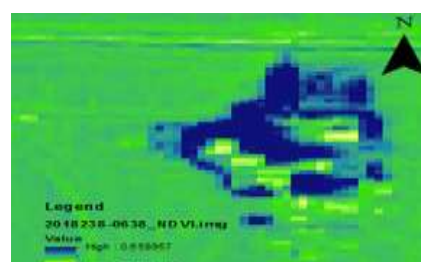
الف) شاخص پوشش گیاهی (NDVI): این شاخص برای نمایش پوشش گیاهی، تولیدات گیاهی و تفکیک پوشش گیاهی بسیار مناسب بوده و از نسبت تفریق باند مادون قرمز نزدیک از باند قرمز به مجموع آن‌ها بدست می‌آید. مقادیر NDVI در سطح دانشگاه به صورت نقشه شاخص پوشش گیاهی در شکل ۲ ارائه شده است. مقدار میانگین NDVI در تاریخ ۴ شهریور برابر ۰/۱۰۶ بوده که نسبت به تاریخ‌های دیگر بیشتر است و دلیل آن وجود همزمان پوشش گیاهی تابستانه و بهاره در منطقه و نیز واقع شدن در دوره‌ی میانی رشد محصول سورگوم می‌باشد. در تاریخ ۲۰ شهریور به دلیل اینکه محصول سورگوم در دوره‌ی انتهایی رشد خود می‌باشد میزان NDVI کاهش یافته است.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به ارائه نتایج ETA محاسبه شده با الگوریتم SEBAL و مقایسه عملکرد آن با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر پرداخته می‌شود. از آنجا که پارامترهای مختلفی در میزان دقت ETA موثرند در نهایت، نتایج آنالیز حساسیت مولفه‌های کلیدی الگوریتم نامبرده و نقش آنها در برآورد ETA ارائه خواهد شد. بدین منظور الگوریتم SEBAL برای دوره رشد سورگوم، از تاریخ ۲۰۱۸/۷/۲۵ تا ۲۰۱۸/۹/۱۴ (روزهای ۲۰۶ تا ۲۵۴ جولایی) اجرا گردید. در این راستا از تصاویر ماهواره Landsat8 (سنجنده‌ی OLI و TIRS) برای سال ۲۰۱۸، داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه کرمان و نقشه DEM منطقه استفاده شده است. در ادامه بدلیل وجود اثرات اتمسفری و در نتیجه غیر واقعی بودن انعکاس سطحی، با استفاده از الگوریتم FLAASH، تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنجنده OLI صورت گرفت. همانطوری که قبلاً اشاره شد، در طول فصل رشد محصول سورگوم برای منطقه مطالعاتی، هفت تصویر که از منظر هواشناسی و ابری نبودن، شرایط مناسبی داشت دانلود گردید. تعداد ساعات آفتابی روزانه در طول دوره کشت این محصول به ندرت از ۸ ساعت کمتر می‌باشد که بیانگر آنست امکان



(ب) تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۳

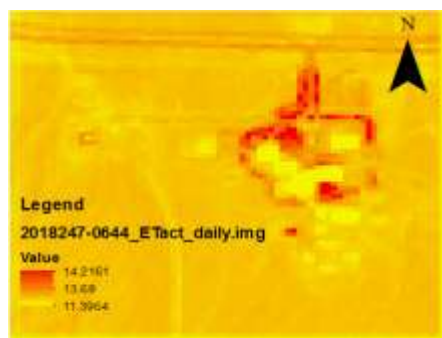


(الف) تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

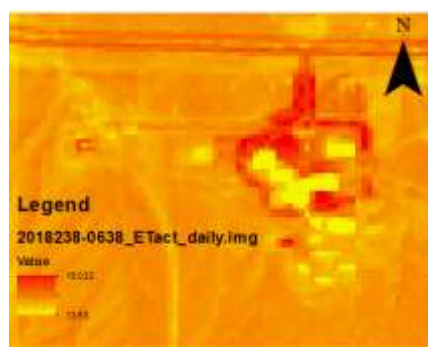
شکل ۲- تغییرات مکانی شاخص پوشش گیاهی
Figure 2. Spatial variation of NDVI Index

و بعد از آن با کاهش روبرو بوده است که این روند مطابق با روند مشاهداتی داده‌های دما، تراکم گیاهی و سرعت باد به عنوان مولفه‌های اصلی ET است.

(ب) تبخیر و تعرق لحظه‌ای: نقشه پهنه‌بندی ET لحظه‌ای برای محصول سورگوم در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط ET روزانه طی دوره زمانی ۱۳۹۷/۰۵/۰۳ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۰ روند کم و بیش افزایشی داشته



(ب) تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۳



(الف) تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

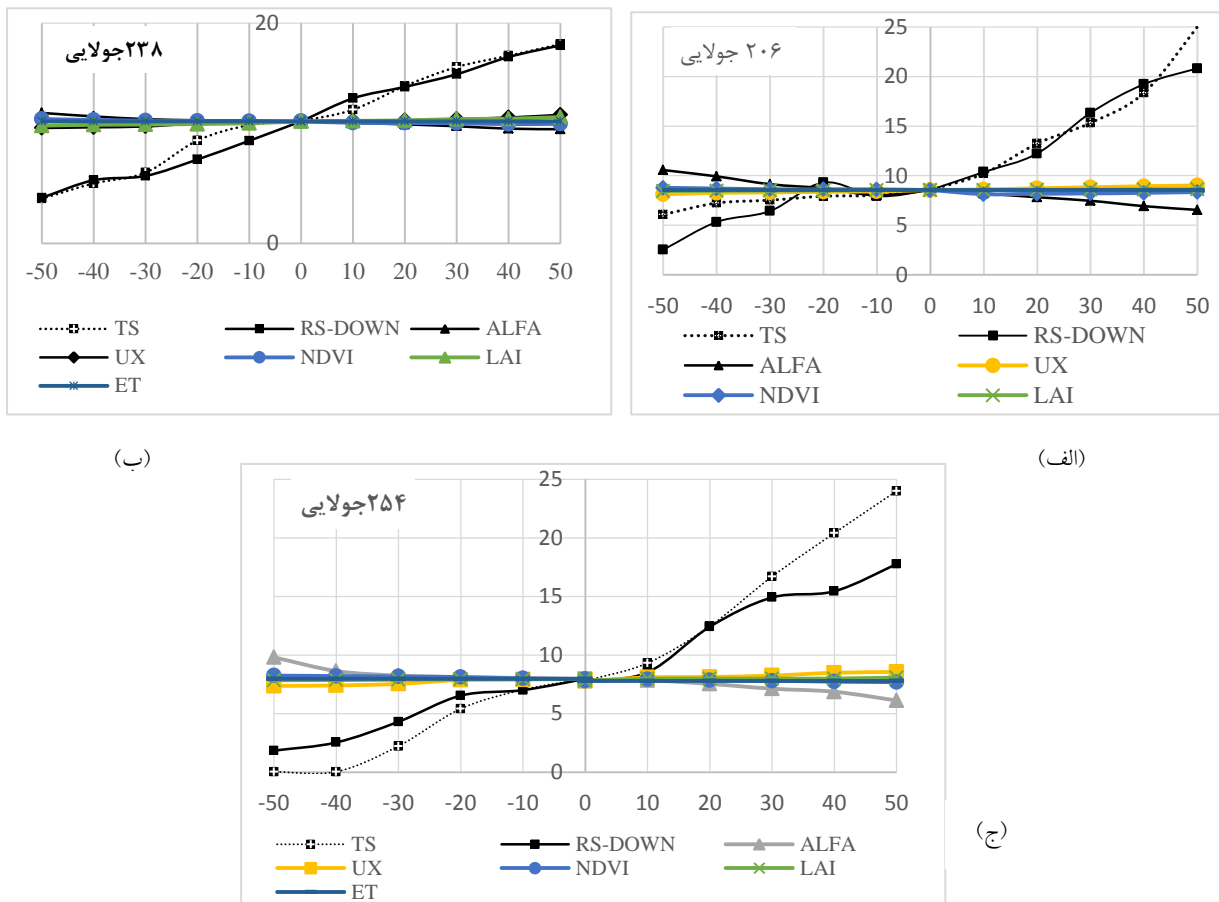
شکل ۳- تغییرات مکانی ET واقعی در منطقه مطالعاتی
Figure 3. Spatial variation of Actual ET in the case study

محاسباتی با SEBAL است. در گام بعدی، هر یک از پارامترهای ذکر شده (با ثابت ماندن سایر پارامترها) به صورت درصدی تغییر یافته و مقدار ET با توجه به تغییر پارامتر به دست آمده محاسبه گردید. سپس با ترسیم منحنی‌های حساسیت متغیرها و محاسبه شیب منحنی، حساسیت پارامترهای الگوریتم SEBAL ارزیابی شد.

همانطور در شکل ۴ مشاهده می‌کنید پارامترهای R_s و T_s دارای بیشترین شیب نسبت به ET مبنای برای محصول سورگوم می‌باشند به همین دلیل این دو پارامتر بیشترین حساسیت را بر روی ET به دست آمده از الگوریتم SEBAL دارند. در همین راستا پارامترهای ذکر شده باید با دقت بالایی محاسبه شوند و تاثیر پارامترهای α و U_x در تخمین ET در مرتبه دوم قرار دارد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پارامترهای $NDVI$ ، LAI کمترین حساسیت را در تخمین ET دارند. این نشان می‌دهد در صورتی که اندازه‌گیری دقیق LAI و $NDVI$ موجود نباشد می‌توان از روابط تجربی برای محاسبه‌ی این متغیر استفاده نمود.

پس از برآورد المان‌هایی چون شار تابش خالص، گرمای خاک، گرمای محسوس و گرمای نهان، میزان ET روزانه محاسبه و سپس با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر مقایسه گردید. مقایسه نتایج نشان داد که ضریب R^2 و $RMSE$ بین مدل SEBAL و لایسیمتر به ترتیب ۰/۷۶ و ۴/۲ از عملکرد مناسب SEBAL در تخمین میزان ET اطمینان حاصل کرد.

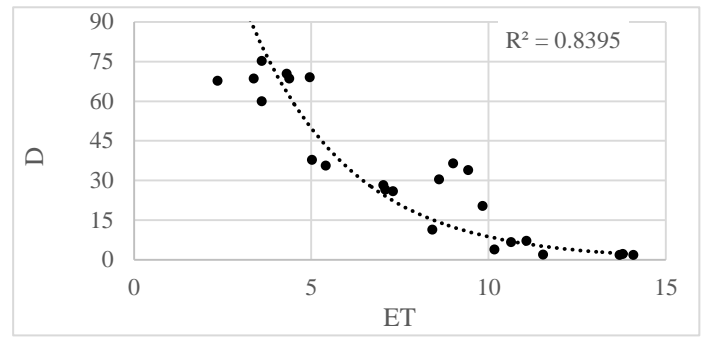
به منظور تحلیل حساسیت، ابتدا ET منطقه مطالعاتی برای روزهای ۲۰۶، ۲۳۸ و ۲۵۴ جولایی با استفاده از الگوریتم SEBAL محاسبه شد. سپس به تغییر پارامترهای ورودی نظیر شاخص سطح برگ (LAI)، سرعت باد (U_x)، آلبیدوی سطحی (α)، تابش موج کوتاه خورشیدی (R_s)، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی ($NDVI$) و دمای سطحی (T_s) مدل پرداخته شد. این تغییرات شامل افزایش و کاهش ± 10 ، ± 20 ، ± 30 ، ± 40 ، ± 50 درصد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. در شکل ۴ (نمودارهای الف تا ج) تغییرات ET با توجه به کاهش و افزایش هر کدام از پارامترهای مذکور نمایش داده شده که در آنها خط افقی نشان‌دهنده ET



شکل ۴- میزان تغییرات ET با تغییرات پارامترهای شاخص سطح برگ (LAI)، سرعت باد (Ux)، آلبیدوی سطحی (α)، تابش موج کوتاه خورشیدی (Rs)، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطحی (Ts): (الف) روز ۲۰۶ جولایی، (ب) روز ۲۳۸ جولایی، (ج) روز ۲۵۴ جولایی
 Figure 4. The rate of ET changes corresponding to variation of leaf area index (LAI), wind speed (Ux), surface albedo (α), shortwave radiation (Rs), normalized difference vegetation index (NDVI) and surface temperature (Ts) on a) 206 206 Julian Da, b) 238 206 Julian Day and c) 254 206 Julian Day

سطحی (Ts) در ET های مختلف، افزایش ۵۰ درصدی پارامترهای نامبرده مد نظر قرار گرفت. در شکل ۵ میزان حساسیت ET نسبت به تغییر ۵۰ درصدی متغیر آلبیدوی سطحی (α) نشان داده شده است.

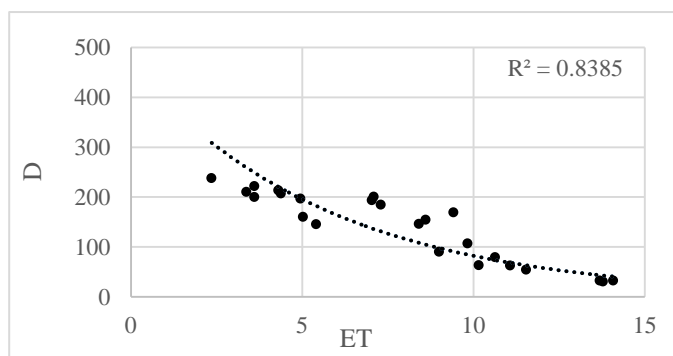
با مشخص شدن پارامترهای حساس مدل، در هر تصویر ۸ نقطه‌ی دیگر در مناطقی با تراکم‌های گوناگون پوشش گیاهی و ET های متفاوت جانمایی گردید. در نهایت به منظور مشخص شدن آستانه حساسیت پارامترهای کلیدی نظیر آلبیدوی سطحی (α)، تابش موج کوتاه خورشیدی (Rs)، دمای



شکل ۵- حساسیت ET نسبت به ۵۰ درصد افزایش در برآورد α
 Figure 5. Sensitivity analysis of ET for 50% Increase of α

تابش خورشیدی در شکل ۶ ارائه شده است این نمودار نشان می‌دهد که ET حساسیت بالایی را نسبت به تابش موج کوتاه خورشیدی (Rs-down) بخصوص در نواحی با ET پایین دارد.

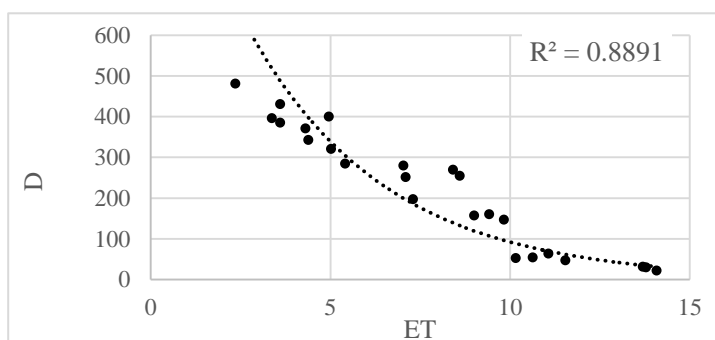
با توجه به شکل بالا در ET‌های پایین الگوریتم SEBAL نسبت به پارامتر α حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهد و در ET بالا مدل نسبت به این متغیر دارای حساسیت متوسطی می‌باشد. لذا در الگوریتم SEBAL آلبیدوی سطحی باید با دقت بالایی محاسبه شود. نمودار تحلیل حساسیت نسبت به



شکل ۶- حساسیت ET نسبت به ۵۰ درصد افزایش در برآورد Rs_down
Figure 6. Sensitivity analysis of ET for 50% increase of Rs_down

جدول ۵ آنالیز حساسیت پارامترهای کلیدی الگوریتم SEBAL در ET‌های مختلف با توجه به افزایش ۵۰ درصدی هر یک از پارامترها ارائه گردیده است.

در شکل ۷، ET حساسیت بالایی را نسبت به دمای سطحی (Ts) بخصوص در نواحی با ET پایین دارد و این نشان می‌دهد دمای سطحی باید با دقت بالایی محاسبه شود. در



شکل ۷- حساسیت ET نسبت به ۵۰ درصد افزایش در برآورد Ts
Figure 7. Sensitivity analysis of ET for 50% increase of Ts

پارامترهای رطوبت نسبی و آلبیدوی سطحی دارای حساسیت متوسط تا زیاد و پارامتر باد و شاخص سطح برگ دارای حساسیت کم تا متوسط می‌باشند. همچنین پارامترهای دمای سطحی، دمای هوا، تابش طول موج کوتاه ورودی و ساعات آفتابی بیشترین حساسیت را در محاسبه ET از خود نشان داده که نتایج تحقیق حاضر نیز تا حدی زیادی با نتایج بررسی‌های ایشان مطابقت دارد.

همانگونه که از جدول ۵ مشاهده می‌شود مقادیر آلبیدوی سطحی در ET‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر دارای حساسیت بالا و هرچه ET از مقدار ۱۰ میلی‌متر بیشتر می‌شود حساسیت الگوریتم نسبت به این پارامتر متوسط می‌شود. همچنین پارامترهای RS و TS دارای حساسیت بالا بخصوص در ET پایین می‌باشند. در مطالعه تحلیل حساسیت الگوریتم SEBAL، رمضانی خوچین و همکاران (۲۱) نشان دادند که

جدول ۵- حساسیت ET محاسبه شده به افزایش ۵۰ درصدی هر یک از پارامترهای کلیدی SEBAL
Table 5. The Sensitivity of calculated ET for 50% increase in key paramters of SEBAL

حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	حساسیت ندارد	پارامتر
ET < 10	ET > 10			آلبیدو سطحی
*				تابش موج کوتاه خورشیدی
*				دمای سطح زمین
*: حساسیت بالا بخصوص در ET پایین				

نتیجه‌گیری کلی

می‌توان دریافت که با استفاده از الگوریتم SEBAL و آمار ماهواره Landsat 8 با قدرت تفکیک ۳۰ متر می‌توان میزان ET واقعی گیاهان را محاسبه و نقشه‌ی توزیع مکانی ETA را ارائه نمود. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که در مدل SEBAL پارامترهای دمای سطحی و تابش طول موج کوتاه ورودی دارای حساسیت بالا به خصوص در مناطق با ET پایین و آلبیدو و سرعت باد دارای حساسیت متوسط تا زیاد می‌باشند و شاخص سطح برگ و شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی دارای حساسیت کم و متوسط می‌باشند در نتیجه داده‌های دارای حساسیت بالا باید با دقت بیشتری محاسبه گردد.

محاسبه مقادیر ETA به‌منظور برنامه‌ریزی نیاز آبی محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های مرسوم برآورد ETA عمدتاً اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای را به دست می‌دهد و برای مقیاس‌های بزرگ مکانی، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشند. در پژوهش حاضر ETA با استفاده از الگوریتم SEBAL برآورد و با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسمتر حجمی واقع در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان مقایسه شده است. براساس نتایج پژوهش حاضر، میزان ETA برای مزرعه سورگوم دارای تطابق معناداری با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسمتر بوده است. لذا با توجه به نتایج این پژوهش

منابع

1. Akbari, M. 2004. Improvement of irrigation water management by combining satellite and field data and using SWAP simulation model. Ph.D Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).
2. Alizadeh, A. 2003. Principles of applied hydrology, Imam Reza University Press, 735 pp (In Persian).
3. Allen, R., R. Waters, M. Tasumi, R. Trezza W. Bastiaanssen. 2002. SEBAL, Surface energybalance algorithms for land, Idaho Implementation. Advanced Training and User's manual, version 1.0.
4. Allen, R.G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coecient method over an irrigated region as part 5of an evapotranspiration intercomparison study, Journal of Hydrology, 229: 27-41, doi:10.1016/s0022-1694(99): 194-8.
5. Allen, R.G. and W.O. Pruitt. 1991. FAO-24 reference Evapotranspiration factors. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 117(5): 758-773.
6. Amiri, M. and H.R. Pourghasemi. 2019. Comparing different methods of potential evapotranspiration and studying temporal and spatial changes in the Mahrlou watershed using GIS. Journal of Watershed Management Research, 10(19): 22-35.
7. Anvari S., S.J. Mousavi, S. Morid. 2017. Stochastic Dynamic Programming-Based Approach for Optimal Irrigation Scheduling under Restricted Water Availability Conditions. Journal of Irrigation and Drainage, 66(4): 492-500.
8. Babamiri. O. and Y. Dinpashoh. 2014. Comparison of Four Temperature Based Reference Crop Evapotranspiration Estimation Method at Urmia Lake Basin. Journal of Irrigation Science and Engineering, 37(1): 43-54.
9. Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes, A.A.M. Holtslag, 1998a. A remotesensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Part 1: formulation. Journal of Hydrology, 212-213: 198-212.
10. Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. Moreno, G.J. Roerink, W. Vander. 1998b. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Part 2: validation. Journal of Hydrology, 212: 213-229.
11. Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology, 229(1-2): 87-100.
12. 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 conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1): 85-93 [Doi: 10.1061/(ASCE) 0733-, 131:1(85)].
13. Dastorani, M.T., S. Poormohammadi, A.R. Massah Bavani and M.H. Rahimian. 2010. Evapotranspiration Condition in Yazd Station under Uncertainties of Different GHG Emission Scenarios and ET Estimation Models, Journal of Watershed Management Research, 1(2): 1-20 (In Persian).
14. Kerman Meteorological Organization, (<http://www.irimo.ir>).
15. Khavarian Nahzak, H. 2004. Estimation of evaporation using remote sensing, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).
16. Kite, G. and P. Droogers. 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data, Journal of Hydrology, 229(1-2): 1-2.
17. Long, D., V.P. Singh and Z.L. Li. 2011. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D21).
18. Malekinejad, H. and S. Poormohammadi. 2008. Study the Role of Climatic Parameters in Evaporation Phenomenon at Heterogeneous Zones of Arid and Semi-Arid Regions of Iran. Water Resource Conference, Tabriz. 185 pp (In Persian).

19. Matalas, D. and J. Feyen. 1990. Defining homogenous precipitation regions means of principal component analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 29(9): 892-901.
20. Mutiga, J., Z. Su and T. Woldai. 2010. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(S1): s100-s108.
21. Ramezani Khojeen, A., M.M. Kheirkhah Zarkesh, P. Daneshkar Arasteh, A. Moridi and R. Alimohammadi. 2016. Sensitivity Analysis of Calculated Evapotranspiration using Daily Energy Balance Model and comparing it with SEBAL Model. *Iran-Water Resources Research*, 185(1): 18-28 (In Persian).
22. Samadianfard, S. and S. Panahi. 2019. Estimating daily reference evapotranspiration using data mining methods of support vector regression and m5 model tree, *Journal of Watershed Management Research*, 9(18): 157-167 (In Persian).
23. Sima, S. and M. Tajrishi. 2015. Estimation of Urmia Lake Evaporation Using Remote Sensing Data. *Iran-Water Resources Research*, 109(1): 32-48.
24. Su, H., E.F. Wood, R. Wojcik and M. McCabe. 2006. Sensitivity Analysis of Regional Scale Evapotranspiration Predictions to the Forcing Data, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*, abstract.
25. Yang, Y., S. Shang and L. Jiang. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: (112-122).
26. Zhang, X., S. Kang, L. Zhang and J. Lu. 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. *Agriculture Water Management* 97: 1506-1516.

Sensitivity Analysis of SEBAL Algorithm for Estimating Agricultural Irrigation Requirements

Elham Mahmoudzadeh¹ and Sedigheh Anvari²

1- M.Sc. Student, Department of Water Resources Management, University of Industrial and Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Advanced Science and Technology and Environmental Sciences, University of Industrial and Advanced Technology, Kerman, Iran,
(Corresponding Author: anvari.t@gmail.com)

Received: 20 July, 2020

Accepted: 5 October, 2020

Extended Abstract

Introduction and Objective: The accurate estimation of actual evapotranspiration (ETA), i.e. crop water requirements, is an important issue for irrigation water allocation at fields and improving water efficiency. In the present study, ETA for Sorghum crop was estimated using surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and by employing Landsat8 satellite images; meteorological data and DEM map and then compared with the measured values of lysimeter.

Material and Methods: For carrying out the sensitivity analysis, the key parameters of SEBAL algorithm was altered at the range of ± 10 , ± 20 , ± 30 , ± 40 , ± 50 and resultantly the variation of ETA corresponding to decrease and increase of these parameters was investigated. The changes of key parameters on the days of 206, 238 and 254, based on Julian days calendar, were evaluated at eight points with different vegetation densities. Albedo parameters have moderate to high sensitivity, so that the albedo parameter has medium and high sensitivity in the areas with $ET > 10$ and $ET < 10$, respectively.

Results: The results of SEBAL showed the value of accuracy indices were acceptable at a significant level of 95%, while compared with those of lysimeter measurements. The results of the sensitivity analysis also showed the surface temperature and input shortwave radiation are more sensitive especially at the areas having low ETA values. The wind speed and

Conclusion: In general, in addition to high economic efficiency compared to other conventional methods, the SEBAL algorithm has a good efficiency in estimating ET. Also, performing sensitivity analysis and determining the key input parameters, while increasing the accuracy of measuring those parameters, can greatly improve the modeling results.

Keywords: Evapotranspiration, Input Shortwave Radiation, Landsat 8, Lysimeter, SEBAL, Sensitivity Analysis, Surface temperature