

ارائه یک معادله ساده برای تعیین تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های ماهواره نوا

سید عبدالله علوی^۱، علی رحیمی خوب^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

۲. استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۷/۲۰)

چکیده

تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) برای تعیین آب مورد نیاز گیاهان و برنامه‌ریزی آبیاری لازم می‌باشد. معادلات زیادی برای تعیین ET_0 با استفاده از داده‌های هواشناسی ارائه شده است ولی اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران در اراضی بایر و دور از مناطق کشاورزی قرار گرفته و داده‌های آن از اعتبار لازم برای برآورد ET_0 برخوردار نیست. تصاویر ماهواره‌ای با برخورداری از پوشش وسیع، اطلاعات مناطق کشاورزی را اخذ می‌کنند. در این پژوهش معادله پنمن مانیتیت فائو ۵۶ به یک معادله ساده خطی با سه مؤلفه تبدیل شد و برای هر یک از این مؤلفه‌ها، سه معادله رگرسیون خطی با ورودی‌های باندهای ماهواره نوا بنیان شد. منطقه مورد مطالعه این تحقیق شبکه آبیاری امیرکبیر در استان خوزستان بود. برای بنیان مدل‌های رگرسیون و صحت آنها، ۲۹۷ تصویر ماهواره نوا به مدت ۱۰ سال (۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل ساده‌شده با ضریب تعیین ۰/۹۲ و درصد خطای حدود ۸ درصد تبخیر و تعرق مرجع را برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شبکه آبیاری امیرکبیر، معادله پنمن مانیتیت فائو، مدل رگرسیون، نرم‌افزار SAS

مقدمه

تبخیر و تعرق، برآیند تمام فرآیندهایی است که به‌وسیله آن، آب موجود در سطح به بخار آب تبدیل می‌گردد. تبخیر و تعرق مجموع تلفات آب به‌وسیله دو فرآیند تبخیر از سطح خاک و آب‌های آزاد و تعرق از گیاه می‌باشد. بسته به موقعیت جغرافیایی، درصد زیادی از بارندگی سالانه به‌وسیله تبخیر و تعرق تلف می‌شود. تقریباً ۶۲٪ از کل بارندگی‌های سطح کره زمین به‌وسیله تبخیر و تعرق به اتمسفر باز می‌گردد (Fisher *et al*, 2005). تبخیر و تعرق به دلیل ارتباط نزدیک با فرآیندهای انتقال انرژی، تأثیر مهمی روی دینامیک و پویایی آب و هوا و حاصلخیزی اکوسیستم جهانی دارد (Nishida, *et al*, 2003). لذا تعیین دقیق تبخیر و تعرق برای مطالعات منابع آب و پایش خشکسالی حائز اهمیت است. همچنین به منظور مدیریت مصرف آب در مزارع کشاورزی و جلوگیری از وارد آمدن تنش به گیاه، تخمین دقیق میزان آب مصرفی گیاهان ضروری است. مدل‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در ۶۰ سال اخیر ارائه شده است. برخی از مدل‌ها به‌صورت تجربی بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای بدست آمده که فقط برای

محدوده خاصی که آزمایش‌ها در آن انجام یافته معتبر می‌باشد، مثل مدل‌های تورنت‌وایت (Thorntwaite, 1948) و بلینی و کریدل (Blaney and Criddle, 1950). مدل‌های دیگری مثل پنمن (Penman, 1948) بر پایه مبانی تئوری مسئله که شامل ترکیب معادله بیلان انرژی و معادله انتقال جرم می‌باشد، توسعه یافته است. مدل‌های تعیین تبخیر و تعرق را می‌توان به سه گروه دمایی، تشعشعی و ترکیبی تقسیم نمود. مدل‌های دمایی، مثل مدل‌های تورنت‌وایت (Thorntwaite, 1948) و هارگریوز (Hargreaves, 1974) معادلاتی تجربی هستند که از دمای هوا به‌عنوان متغیر تأثیرگذار در فرآیند تبخیر و تعرق، استفاده می‌کنند. اعتبار این مدل‌ها منوط به واسنجی محلی است. مدل‌های ترکیبی مثل پنمن از هر دو مکانیسم آئروپنمیک و انرژی برای تعیین تبخیر و تعرق استفاده می‌کند. معادله پنمن مانیتیت یکی از روش‌های ترکیبی است که به‌وسیله داده‌های لایسیمیتری با دیگر معادلات تبخیر و تعرق از نقاط مختلف دنیا مورد مقایسه قرار گرفت و بهترین دقت را داشت و لذا توسط سازمان فائو برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌عنوان روش استاندارد برگزیده شده است. به دلیل پیچیدگی‌های معادله پنمن مانیتیت کارشناسان سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO)، اجزای معادله پنمن مانیتیت را محاسبه و نسخه جدیدی از آن را تحت عنوان پنمن مانیتیت فائو در نشریه FAO-56 ارائه دادند و

* نویسنده مسئول: akhob@ut.ac.ir

تخمین تبخیر و تعرق با اطلاعات متداوم مکانی و زمانی ارائه می‌دهد. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای تعیین ET_0 با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است. اطلاعات حاصله از باندهای ماهواره در محدوده مرئی و مادون‌قرمز برای تعیین وضعیت پوشش گیاهی و در محدوده حرارتی برای تعیین دمای سطح زمین کاربرد دارد. برخی از پارامترهای مورد نیاز مدل‌های تبخیر و تعرق مثل دمای هوا، دمای سطح زمین، تابش خالص رسیده به زمین و ضریب تابش سطح، امروزه به‌وسیله داده‌های ماهواره‌ای تعیین می‌شود. تحقیقات اخیر نشان داده، دمای سطح زمین برای دوره‌های ماهانه و سالانه تا دقت ۰/۷ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و برای دوره‌های روزانه تا دقت ۲/۱ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود (Sheng *et al.*, 2009).

مزیت داده‌های ماهواره‌ای در تعیین تبخیر و تعرق آن است که از یکسو سطح وسیعی را پوشش می‌دهند که برای مطالعات و تحقیقات منطقه‌ای کاربرد خوبی دارند و از سوی دیگر با استفاده از ماهواره‌هایی مثل نوا و مودیس که دوره بازگشت آنها روزانه است، تبخیر و تعرق را می‌توان به‌طور روزانه مورد بررسی قرار داد. با استفاده از داده‌های سنجنده این ماهواره‌ها می‌توان متغیرهایی مثل دمای سطح زمین، شاخص پوشش گیاهی و ضریب تابش سطح را تعیین کرد. این متغیرها در روابط مختلف تبخیر و تعرق مستقیماً کاربردی ندارد ولی با استفاده از آنها می‌توان داده‌های مورد نیاز روابط فوق از قبیل دما و رطوبت نسبی را به‌وسیله مدل‌های همبستگی برآورد نمود. از این رو بررسی مدل‌ها و روش‌هایی که با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره بتواند تبخیر و تعرق پتانسیل را با دقت مناسب برآورد نماید، ضروری است. در این تحقیق معادله ساده‌ای بر مبنای ساده‌سازی معادله پنمن مانیتث فائو ارائه شده تا ET_0 با استفاده از مشخصات باندهای ماهواره نوا برآورد شود.

مواد و روش‌ها

ساده‌سازی معادله فائو پنمن مانیتث

سازمان خوار و بار کشاورزی رابطه زیر را در نشریه FAO-56 جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه داده است (Allen *et al.*, 1998)

(رابطه ۱)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm\ d^{-1}$).

پیشنهاد کردند که برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از این روش استفاده گردد (Allen *et al.*, 1998). مطابق با تعریف ارائه شده در نشریه فوق، تبخیر و تعرق گیاه مرجع عبارت است از تبخیر و تعرق یک گیاه فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، ضریب مقاومت روزنه‌ای ۷۰ ثانیه بر متر، ضریب بازتاب ۰.۲۳ که معادل است با میزان تبخیر و تعرق یک سطح پوشیده از چمن سبز با ارتفاع یکنواخت (۸ تا ۱۵ سانتی‌متر) با رشد فعال و سایه‌اندازی کامل که سطح وسیعی را پوشش داده و تبخیر و تعرق بدون محدودیت از آن صورت می‌گیرد. از آنجائی که به دست آوردن تبخیر و تعرق برای هر نوع زراعت یا پوشش گیاهی بسیار مشکل است، در عمل برای تعیین تبخیر و تعرق هر گیاهی، ابتدا تبخیر و تعرق پتانسیل یا گیاه مرجع (ET_0) برآورد می‌گردد و سپس با اعمال ضریب گیاهی مناسب (K_c)، تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ET_a)، تعیین می‌گردد (Allen *et al.*, 1998).

داده‌های مورد نیاز مدل‌های تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود که با توجه به تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای جوی مؤثر در فرایند تبخیر و تعرق نتایج حاصله از مدل‌ها فقط برای سطح محدودی که نزدیک ایستگاه‌های هواشناسی واقع شده است کاربرد عملی دارد (Moran and Jackson, 1991). برای تعیین تبخیر و تعرق مناطق در مقیاس وسیع، باید تراکم ایستگاه‌های فوق در حد استاندارد باشد که بتوان از مدل‌های میان‌یابی استفاده نمود (Bussieres *et al.*, 1997). به علت ناهمگنی مناطق و تنوع زیاد در فرایند انتقال انرژی، تأسیس و راه‌اندازی ایستگاه‌های هواشناسی با پوشش و تراکم مناسب ضرورت دارد که خود امری پرهزینه و زمان‌بر است و از نظر عملی مقرون به‌صرفه نمی‌باشد (Nishida, *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006). اغلب ایستگاه‌های هواشناسی در دنیا و ایران در مناطق غیر کشاورزی دارای هوای خشک، زمین بایر و یا حتی در مجاورت سطح آسفالت احداث شده‌اند؛ که نسبت به اراضی کشاورزی خطای زیادی را در محاسبه تبخیر و تعرق به دلیل بالا بودن دمای هوا و پائین بودن رطوبت ثبت‌شده باعث می‌گردد (Temesgen *et al.*, 1999). تراکم ایستگاه‌های هواشناسی در اکثر مناطق ایران برای تعیین توزیع مکانی پارامترهای جوی در یک منطقه کافی نیست و فقط ایستگاه‌های سینوپتیک داده‌های هواشناسی را به‌صورت روزانه ارائه می‌دهد، این در حالی است که ایستگاه‌های کلیماتولوژی که تعداد آن خیلی بیشتر است داده‌های اندازه‌گیری شده را به‌صورت ماهانه گزارش می‌نمایند که برای بسیاری از کاربردهای عملی مناسب نیست.

سنجش از دور ماهواره‌ای تکنیک‌های نویدبخشی برای

هواشناسی یکی از شبکه‌های آبیاری در استان خوزستان برآورد و نتایج آن به‌عنوان داده‌های مبنا برای ساخت توابع با ورودی-های باندهای ماهواره نوا استفاده شدند. برای تعیین تابش خالص رسیده به زمین (R_n)، Δ و γ از روابط ارائه شده *Allen et al.* (1998) استفاده شد.

محدوده مورد مطالعه

شبکه آبیاری کشت و صنعت امیرکبیر به وسعت ۱۴۰۰۰ هکتار برای محدوده مورد مطالعه این تحقیق انتخاب شد. این شبکه در ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز و در ساحل راست رودخانه کارون و در محدوده طول شرقی $48^{\circ}12'$ تا $48^{\circ}20'$ و عرض شمالی $30^{\circ}57'$ تا $31^{\circ}05'$ واقع شده و به کشت نیشکر اختصاص یافته است. در این تحقیق از مجموعه پیکسل‌های هر تصویر ماهواره نوا که در محدوده این شبکه قرار گرفته، پیکسلی که معرف تبخیر و تعرق حداکثر باشد، انتخاب شده و از مشخصات باندهای آن برای تعیین مؤلفه‌های A ، R_n و B استفاده خواهد شد. شکل (۱) موقعیت کلی شبکه آبیاری امیرکبیر بر روی تصاویر ماهواره نوا را نشان می‌دهد.

R_n تابش خالص خورشید در سطح زمین ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$)، T_a دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) و U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار آب (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (kPa.C^{-1}) و γ ثابت سایکرومتر (kPa.C^{-1}) می‌باشد. برای دوره‌های روزانه مقدار پارامتر G را صفر در نظر می‌گیرند (*Allen et al.*, 1998). رابطه (۱) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

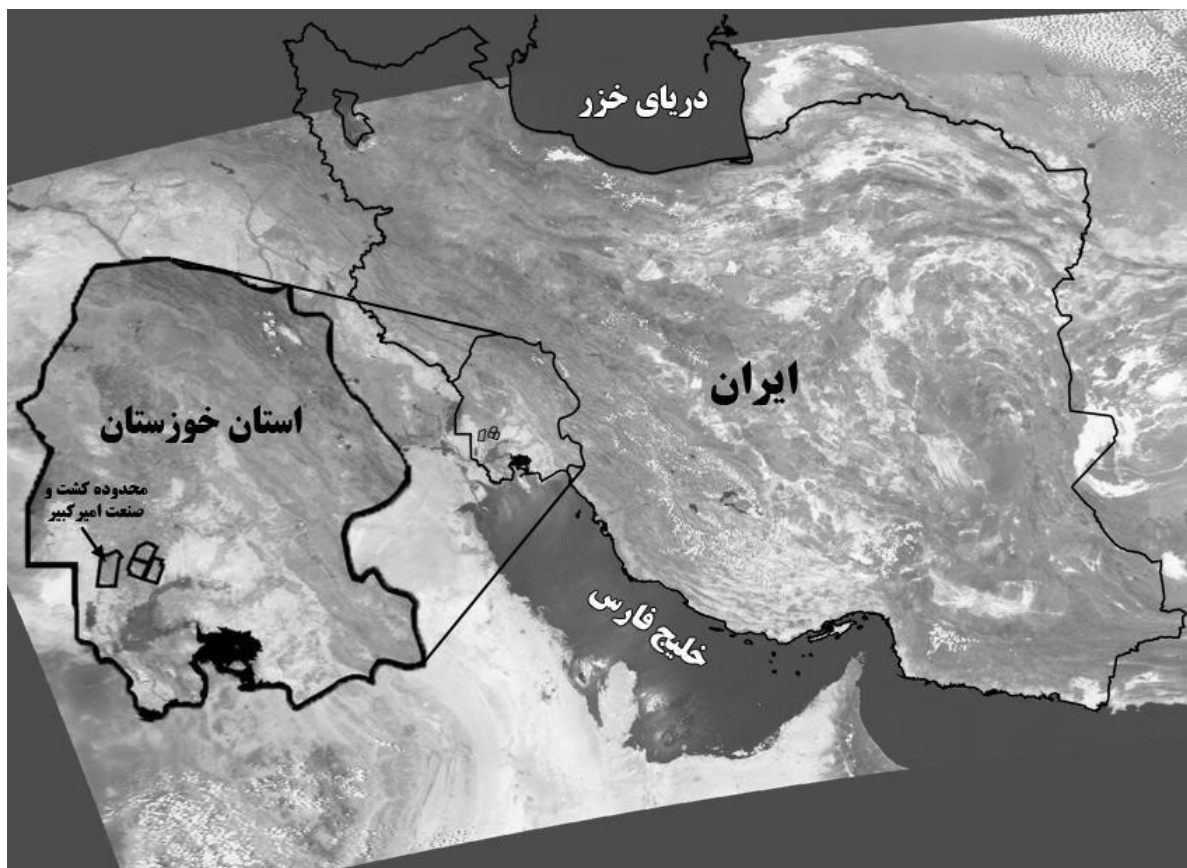
$$ET_0 = A R_n + B \quad (\text{رابطه } ۲)$$

مؤلفه‌های A و B عبارت خواهند بود:

$$A = \frac{0.408\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{رابطه } ۳)$$

$$B = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (\text{رابطه } ۴)$$

در این تحقیق فرض بر این بود که هر یک از مؤلفه‌های A ، R_n و B تابعی از باندهای یک تا پنج ماهواره نوا هستند. برای ساخت این توابع، مؤلفه‌های فوق با استفاده از داده‌های



شکل ۱- موقعیت شبکه آبیاری کشت و صنعت امیرکبیر بر روی یک تصویر ماهواره نوا

داده‌های هواشناسی

A, B و R_n معادله ۲ استفاده شدند. این داده‌ها شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بودند و متوسط سالانه آنها طی سال‌های جمع‌آوری شده فوق در جدول (۱) ارائه شده است.

ایستگاه هواشناسی امیرکبیر در داخل محدوده شبکه آبیاری واقع شده و پارامترهای هواشناسی را به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های روزانه این ایستگاه به مدت ۱۰ سال از سال-های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷ جمع‌آوری و برای برآورد ET_0 و مؤلفه‌های

جدول ۱- متوسط سالانه پارامترهای ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت امیرکبیر

دوره آماری	دمای هوا (سانتی‌گراد)		رطوبت نسبی (%)			ساعات آفتابی		سرعت باد	
	حداکثر	حداقل	متوسط	حداکثر	حداقل	متوسط	حداقل	بارندگی	
۱۳۷۸-۸۷	۴۹/۷	-۰/۴	۲۴/۹	۹۹/۸	۲/۴	۴۴/۴	۸/۵	۳/۳	۱۶۷/۷

داده‌های ماهواره نوا

سنجنده AVHRR ماهواره نوا، تابش منعکس شده و حرارت ساطع شده از سطح زمین را در ۵ باند اندازه‌گیری می‌کند. باندهای مرئی (۰/۵۸-۰/۶۸ میکرومتر)، مادون قرمز نزدیک (۰/۷۲۵-۱/۱۰ میکرومتر)، مادون قرمز میانی (۳/۵۵-۳/۹۸ میکرومتر) و دو باند مادون قرمز حرارتی (۱۰/۳-۱۱/۳ میکرومتر و ۱۱/۵-۱۲/۵ میکرومتر) ۵ باند سنجنده AVHRR را تشکیل می‌دهند. ابعاد پیکسل‌های تصویر ماهواره نوا حدود ۱/۲۱ کیلومتر مربع در نقطه نادیر (Nadir) برای تمام باندها است. این ماهواره یک منطقه معین را ۲ بار در هر شبانه‌روز (یک بار در روز و یک بار در شب) تصویربرداری می‌کند.

در این تحقیق ۲۹۷ تصویر روز و بدون پوشش ابر ماهواره نوا به مدت ۱۰ سال (۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷) از پایگاه اینترنتی www.class.ncdc.noaa.gov اخذ گردید. زمان گذر تصاویر فوق بین ۱۲ تا ۳ بعد از ظهر به وقت ایران است. هر فایل تصویر ماهواره نوا، شامل اعداد رقومی پیکسل‌ها، ضرایب واسنجی و یک سری مختصات نقاط کنترل زمینی و مداری ماهواره‌اند. ضرایب واسنجی برای تبدیل اعداد رقومی باندهای مرئی ۱ و ۲ به آلبدو (برحسب درصد) و باندهای ۳، ۴ و ۵ به دما (برحسب درجه کلونین) استفاده می‌شوند. مختصات نقاط کنترل زمینی برای تصحیح‌های هندسی تصاویر بکار می‌رود. مقدار پارامتر آلبدو بستگی به زاویه تابش خورشید داشته و این زاویه در ساعات و روزهای مختلف سال تغییر می‌کند و برای اینکه این پارامتر معرف بازتاب پوشش سطح زمین باشد، نسبت به زاویه سمت‌الرأس خورشید (solar zenith angle) نرمال می‌شود. در این تحقیق تمام عملیات ذکر شده بالا از قبیل واسنجی اعداد رقومی، تصحیح هندسی تصاویر و نرمال‌سازی آلبدو باندهای ۱ و ۲ با استفاده از نرم‌افزار ENVI نسخه ۴/۲ انجام شد.

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (Normalized difference of vegetation index)

یکی از رایج‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی که با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای برآورد می‌شود، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که ارتباط نزدیکی با درصد پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ (LAI) دارد (John *et al.*, 1998). این شاخص به دلیل نرمال شدن تفاضل دو باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز، کمترین اثرات اتمسفر را دارد و کارآمدی آن برای پایش رشد گیاه و تغییرات آن ثابت شده است (Julien *et al.*, 2006). شاخص NDVI بر اساس این واقعیت است که پوشش گیاهی سالم در محدوده مرئی امواج الکترومغناطیس (۰/۴ تا ۰/۷ میکرومتر) به دلیل جذب کلروفیل و سایر رنگ‌دانه‌ها بازتاب کمی داشته ولی بازتاب زیادی در محدوده مادون قرمز (۰/۷ تا ۱/۰۵ میکرومتر) به علت بافت اسفنجی مزوفیل سطح برگ دارد (Cambell, 1987). رابطه زیر برای تعیین شاخص NDVI استفاده می‌شود:

$$NDVI = \frac{ch2 - ch1}{ch2 + ch1} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه بالا، $ch1$ و $ch2$ به ترتیب مقادیر واسنجی شده بازتاب مرئی و مادون قرمز باندهای یک و دو سنجنده AVHRR ماهواره نوا هستند. از نظر تئوری حدود شاخص NDVI بین ۱- تا ۱+ است و NDVI اراضی دارای پوشش گیاهی بین ۰/۱ و ۱ است و هر قدر گیاهان در یک پیکسل سبزتر و یا به عبارتی با تنش کمتری مواجه باشند و همچنین تراکم بیشتری داشته باشند، مقدار NDVI بیشتر می‌شود. بر عکس در اراضی بدون گیاه مثل سطوح آبی به علت جذب بالای تابش امواج الکترومغناطیس توسط آب، مقدار NDVI منفی است. مقدار شاخص NDVI در اراضی بایر کمتر از ۰/۲ بوده و در اراضی

مدل‌های رگرسیونی و معنی‌دار بودن ضرایب آن از نرم‌افزار SAS استفاده شد. معادله پنمن مانیتث فائو به‌عنوان مبنای تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع انتخاب و دقت معادله ۲ با این مدل ارزیابی شد. داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه بین سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۵ به‌منظور ساخت مدل‌های رگرسیونی و از داده‌های دو سال پایانی ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ جهت صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده گردید.

شاخص‌های آماری

در این تحقیق نتایج توابع R_n ، A ، B و ET_0 حاصل از داده‌های هواشناسی ایستگاه امیرکبیر مبنا قرار گرفت و به‌عنوان مقادیر مشاهده شده (O_i) و نتایج این توابع حاصل از داده‌های ماهواره نوا به‌عنوان مقادیر پیش‌بینی شده (P_i) استفاده شدند. به‌منظور ارزیابی معادلات رگرسیون علاوه بر ترسیم نمودارهای مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطای اریب (MBE) و درصد خطای نسبی ($RELEMSE$) استفاده شده است. معادلات آنها به شرح زیر است:

$$R^2 = \frac{\left[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RelRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

ضریب تعیین نشان می‌دهد، چه بخشی از داده‌ها بر روی بهترین خط برازش شده بین نتایج مدل و نتایج مشاهداتی قرار گرفته‌اند. این ضریب بین صفر و یک است و هر چه به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نزدیکی و انطباق بهتری بین داده‌ها و خط برازش شده برقرار خواهد بود (McDonald, 2008). ریشه میانگین مربعات خطا یکی از شاخص‌های آماری است که میزان خطا بین مقادیر برآورد شده از مدل و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. درصد خطای نسبی، همان ریشه میانگین مربعات خطا است که به‌صورت نرمال درآمده و برحسب درصد نشان داده می‌شود. بدیهی است که هر چه قدر این شاخص نزدیک به صفر باشد، خطای برآورد مدل کمتر خواهد بود. میانگین خطای اریب از دیگر شاخص‌های اندازه‌گیری خطاست که میزان خطا را با بیش برآورد و کم برآورد نشان می‌دهد. در صورتی این شاخص

مخلوطی از بایر و پوشش گیاهی بین ۰/۲ تا ۰/۵ و در اراضی با پوشش گیاهی کامل و متراکم بیشتر از ۰/۵ می‌باشد (Julien et al., 2006).

انتخاب پیکسل معرف گیاه مرجع

با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق، تعیین تبخیر تعرق مرجع در شبکه‌های آبیاری با استفاده از داده‌های ماهواره نوا است، لذا مؤلفه‌های معادله ۲ باید برآمده از یک سطح پوشش گیاهی بدون تنش برای برآورد ET_0 باشد. ولی از آنجا که به علت کمبود آب، بعضی از مزارع شبکه آبیاری نمی‌شوند و آیش می‌مانند و همچنین به جز مزارع تازه آبیاری شده در زمان تصویربرداری ماهواره، بقیه مزارع در شرایط حداکثر تبخیر تعرق نیستند لذا مقادیر باندهای نوا در پیکسل‌های شبکه آبیاری متفاوت‌اند. در این تحقیق برای هر تصویر ماهواره‌ای، یکی از پیکسل‌های شبکه آبیاری کشت و صنعت امیرکبیر که بیشترین پوشش گیاهی را داشته باشد، به‌عنوان پیکسل تر انتخاب و مشخصات باندهای آن به‌عنوان مقادیر ورودی توابع مؤلفه‌های A ، B و R_n استفاده شدند. لذا فرض شد در هر تصویر یکی از پیکسل‌های داخل محدوده شبکه که دارای بیشترین $NDVI$ و مقدار آن نیز بیش از ۰/۴ باشد، معرف پیکسل تر باشد. در این تحقیق برای تعیین این پیکسل برای هر تصویر، با استفاده از گزینه Pixel to Table منوی Utility نرم‌افزار ERDAS IMAGINE، اطلاعات تمام پیکسل‌های داخل شبکه آبیاری امیرکبیر به یک فایل متنی منتقل شدند. سپس شاخص $NDVI$ برای تمام پیکسل‌ها با استفاده از باندهای ۱ و ۲ در محیط Excel برآورد و پیکسل دارای بیشترین مقدار $NDVI$ برای هر تصویر معلوم شد. این پیکسل به‌عنوان مرجع برای تعیین ET_0 انتخاب و اطلاعات مربوط به باندهای آن استخراج شدند.

مدل رگرسیون

با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون گام به گام، برای هر یک از مؤلفه‌های رابطه ۲ (R_n ، A و B) توابعی با متغیرهای مستقل مشتمل بر پنج باند پیکسل مرجع (B1 تا B5) و یک متغیر هم‌روزشمار سال (DOY) بنیان شدند. لحاظ شدن اثر تغییرات فصلی بر روی تبخیر و تعرق، علت استفاده از متغیر روزشمار سال بود. در روش گام به گام، مؤثرترین متغیر مستقل انتخاب و مابقی حذف می‌شوند. برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع (رابطه ۲) تنها لازم است که متغیرهای وابسته R_n ، A و B با استفاده از مدل رگرسیونی بدست آیند. معیار انتخاب مدل رگرسیونی، سادگی، دقت قابل قبول و معنی‌داری ضرایب مدل در تخمین پارامترها در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای تعیین

مثبت باشد نشان می‌دهد که در مجموع نتایج مدل کمتر از مقادیر واقعی است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس برای برآورد مؤلفه‌های R_n ، A و B با استفاده از نرم‌افزار SAS در جدول (۲) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از بین ۶ متغیر مستقل در نظر گرفته شده، فقط روزشمار سال (DOY) تأثیر معنی‌داری بر روی برآورد تابش خالص رسیده به زمین (R_n) دارد و بقیه متغیرها تأثیری نداشته و در فرآیند مدل‌سازی حذف شدند. ضریب تعیین متغیر مستقل بدست آمده برای برآورد R_n برابر با ۰/۹۳ تعیین شده است. میانگین مربعات خطای برآورد شده در سطح معنی‌داری با احتمال یک درصد قرار دارد. همچنین عامل تورم واریانس برابر یک برآورد شده است. این عامل ارتباط هم خطی بودن بین متغیرهای مستقل مدل را نشان می‌دهد و در صورتی مقدار این عامل برای متغیری کمتر از ۰/۰۰۱ باشد داخل مدل قرار داده

نمی‌شود. همچنین برای برآورد مؤلفه A، متغیرهای باند ۳ ماهواره نوا (B3) و روزشمار سال و برای برآورد مؤلفه B، متغیرهای باندهای ۲، ۳ و ۵ ماهواره نوا (B2، B3 و B5) وارد مدل همبستگی شدند. با توجه به نتایج تجزیه واریانس از آنجائی که در روند تعیین مدل‌های رگرسیونی عامل‌های مؤثر به ترتیب شماره گام وارد مدل می‌شوند، مؤثرترین عامل در تبیین مدل‌های پیش‌بینی کننده مؤلفه‌های A و B، باند ۳ ماهواره نوا (B3) می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود تفاوت واریانس متغیرهای مستقل وارد شده به مدل با استفاده از آزمون F همگی در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار است. معادلات رگرسیون مؤلفه‌های R_n ، A و B به صورت زیر می‌باشند:

$$R_n = 14.668 - 0.00041(DOY - 175)^2 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$A = -1.288 + 0.0049 B3 + 0.00015 DOY \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$B = -73.659 + 0.032 B2 + 0.15 B3 + 0.103 B5 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

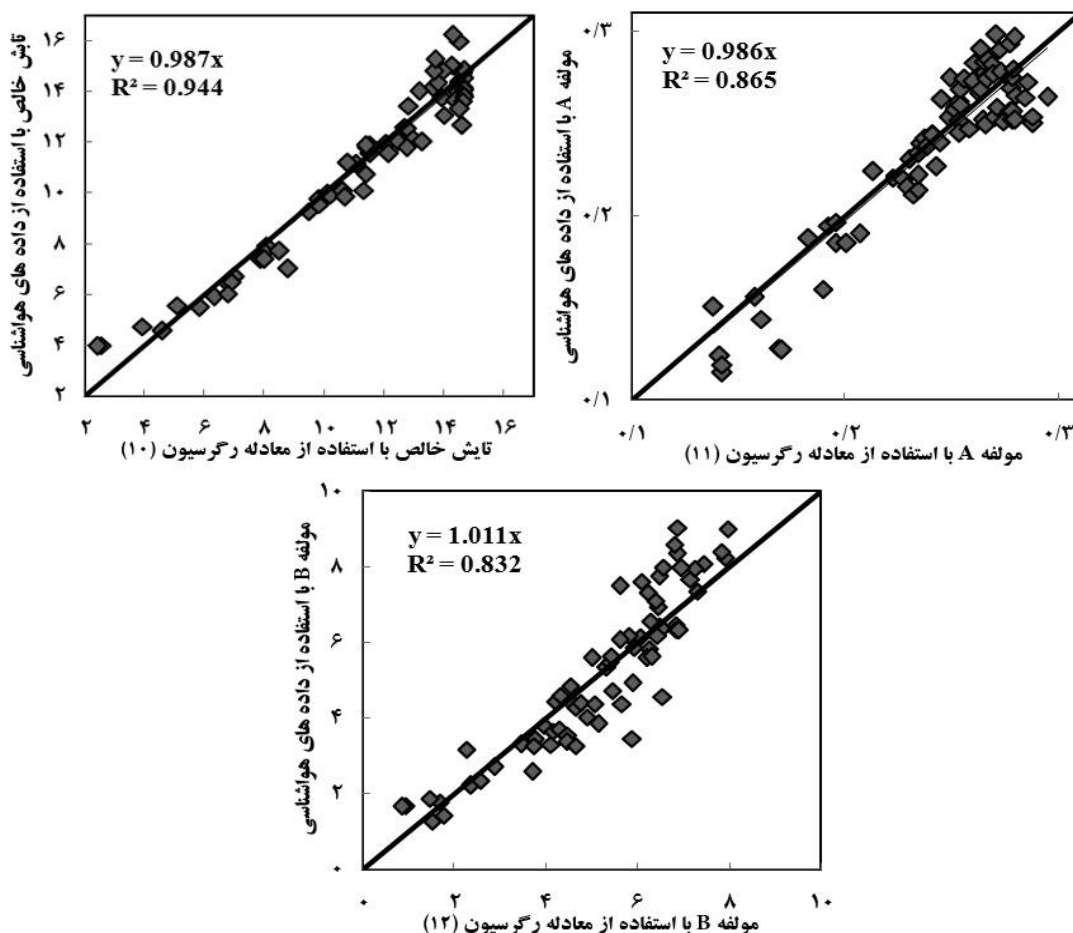
جدول ۲- جدول تجزیه واریانس پارامترهای برآورد کننده

پارامتر	گام	متغیر	تخمین متغیر	منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ضریب تبیین	عامل تورم واریانس
R_n	۱	$(DOY-175)^2$	۱۴/۶۶۸	مدل	۱	۲۱۰۲/۸۱	۲۱۰۲/۸۱	۰/۷۷	۰/۹۳
			-۰/۰۰۰۴۱	خطا	۱۹۳	۱۴۸/۶۲	۱۴۸/۶۲	۰/۰۰۰۴۱	۱
				کل	۱۹۴	۲۲۵۱/۴۲	۲۲۵۱/۴۲	۰/۰۰۰۴۱	
A	۱	B3	b_0	مدل	۱	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۰۰	۱/۰۰
			-۱/۲۸۸۱	خطا	۲۰۷	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۷۱
				کل	۲۰۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۰۰	
A	۲	DOY	b_0	مدل	۲	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۰۰	۱/۰۰
			-۰/۰۰۰۱۴۹	خطا	۲۰۶	۱/۱۱	۱/۱۱	۰/۰۰	۰/۷۹
				کل	۲۰۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۰۰	
B	۱	B3	b_0	مدل	۱	۸۲۴/۲۷	۸۲۴/۲۷	۱/۴۱	۰/۷۵
			-۷۳/۶۵۹	خطا	۱۹۲	۲۷۱/۰۳	۲۷۱/۰۳	۱/۴۱	۰/۷۵
				کل	۱۹۳	۱۰۹۵/۳۰	۱۰۹۵/۳۰	۱/۴۱	
B	۲	B5	b_0	مدل	۲	۸۴۰/۳۴	۸۴۰/۳۴	۱/۳۳	۰/۷۷
			-۰/۱۰۳	خطا	۱۹۱	۲۵۴/۹۶	۲۵۴/۹۶	۱/۳۳	۰/۷۷
				کل	۱۹۳	۱۰۹۵/۳۰	۱۰۹۵/۳۰	۱/۳۳	
B	۳	B2	b_0	مدل	۳	۸۵۳/۵۷	۸۵۳/۵۷	۱/۲۷	۰/۷۸
			-۰/۰۳۲	خطا	۱۹۰	۲۴۱/۷۳	۲۴۱/۷۳	۱/۲۷	۰/۷۸
				کل	۱۹۳	۱۰۹۵/۳۰	۱۰۹۵/۳۰	۱/۲۷	

** و * به ترتیب به مفهوم معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪ می‌باشد.

های رگرسیون بنیان شده برقرار است. ولی به این نکته هم باید توجه شود که پراکنش داده‌ها در مقادیر بالای مؤلفه‌های فوق، نسبت به خط ۱:۱ زیاد می‌باشد و به عبارتی دقت مدل‌های رگرسیونی در مقادیر کم زیادت می‌باشد. خلاصه نتایج آماری برآورد مؤلفه‌های معادله ساده‌شده پنمن مانیت فائو در جدول (۳) ارائه شده است.

معادلات ۱۰ تا ۱۲ برای داده‌های صحت سنجی (سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) اجرا شد و پراکنش نتایج آنها با مقادیر مبنا (نتایج مؤلفه‌های R_n ، A و B حاصل از داده‌های هواشناسی) در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب زاویه خطی هر سه معادله رگرسیون نزدیک به عدد ۱ بوده که نشان می‌دهد، تناسب خوبی بین مؤلفه‌های R_n ، A و B با مدل-



شکل ۲- پراکنش نتایج مؤلفه‌های R_n ، A و B حاصل از داده‌های هواشناسی و معادلات رگرسیونی

جدول ۳- شاخص‌های آماری جهت صحت سنجی مدل‌های رگرسیونی

پارامتر	ضریب تبیین مدل (R^2)	ریشه میانگین مربعات خطا	میانگین انحراف خطا	درصد خطای نسبی (%)
R_n	۰/۹۴	۰/۸۰	۰/۰۱	۷/۱۲
A	۰/۸۷	۰/۰۲	۰/۰	۷/۱۳
B	۰/۸۳	۰/۸۶	-۰/۰۱	۱۶/۷۱

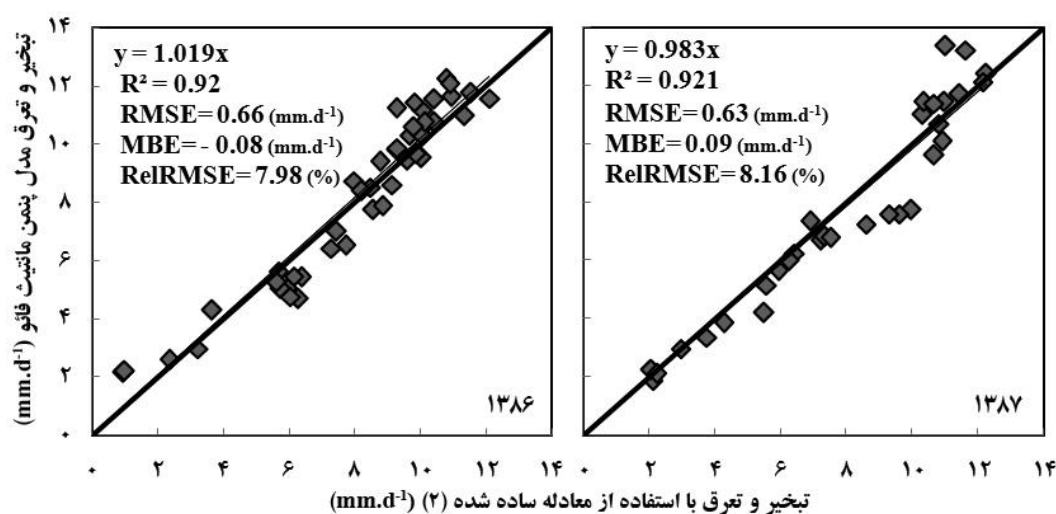
و درصد خطای نسبی ۱۶/۷۱ کمترین دقت را دارا می‌باشد. میانگین انحراف خطای ۰/۰۱ در مدل تایش خالص حاکی از برآورد مقادیر، اندکی بیش از واقعیت و مقدار -۰/۰۱ در مدل B

در بین مدل‌های برآورد کننده، مدل رگرسیونی تایش خالص (R_n) با ضریب تبیین ۰/۹۴ و درصد خطای نسبی ۷/۱۲ بیشترین دقت و مدل رگرسیونی مؤلفه B با ضریب تبیین ۰/۸۳

می‌دهد که مدل ساده شده پنمن مانیتیت خاصیت بیش‌برآورد و یا کم برآورد ندارد. ضریب تعیین در هر دو سال داده‌های صحت سنجی حدود ۰/۹۲ برآورد شده و به این معنی است که تغییرات تبخیر و تعرق مرجع معادله پنمن مانیتیت فائو با ورودی‌های داده‌های هواشناسی تا حدود ۹۲ درصد با معادله ساده‌ای با ورودی‌های داده‌های ماهواره نوا سازگاری دارد. متوسط مقدار خطای معادله ساده شده حدود ۰/۶ میلی‌متر در روز است که نرمال شده آن حدود ۸ درصد می‌باشد که خطای به نسبت کمی است.

بیانگر تخمین اندکی کمتر از واقعیت مقادیر با استفاده از این مدل‌هاست.

تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از معادله ۲ و روابط ۱۰ تا ۱۲ برای داده‌های صحت سنجی محاسبه شد و پراکنش نتایج آن با نتایج تبخیر و تعرق مرجع پنمن مانیتیت فائو برای دو سال داده‌های صحت سنجی در شکل (۳) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، نتایج شاخص‌های آماری برای هر دو سال تقریباً یکسان هستند و نقاط تقریباً در دو طرف بهترین خط انطباق (خط ۱:۱) توزیع شدند و مقادیر کم شاخص MBE نیز نشان



شکل ۳- پراکنش نتایج تبخیر و تعرق پنمن مانیتیت فائو و معادله ساده‌شده (۲) با استفاده از داده‌های صحت سنجی (سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷)

ضمنی وارد شده است. معادله رگرسیون مؤلفه دوم تابع باند سوم ماهواره نوا و روزشمار سال بود که ضریب تعیین آن ۰/۸۷ برآورد شد. معادله رگرسیون مؤلفه سوم تابع باندهای دو تا سه ماهواره نوا با ضریب تعیین ۰/۸۳ بدست آمد. در مجموع تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از توابع رگرسیون که تابع روزشمار شال و باندهای ماهواره نوا هستند، با دقت قابل مناسبی برای شبکه آبیاری امیرکبیر بدست آمد. با توجه به اینکه معادله ساده‌شده در این تحقیق با استفاده از توابع رگرسیون تبخیر و تعرق را برآورد می‌کند، لذا این توابع فقط برای شبکه آبیاری امیرکبیر کاربرد داشته و برای سایر شبکه‌های آبیاری لازم است مدل‌های رگرسیون واسنجی شوند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش معادله پنمن مانیتیت فائو به سه مؤلفه تفکیک شد و برای هر مؤلفه، سه مدل رگرسیون خطی با داده‌های ورودی ماهواره نوا و روزشمار سال معرفی شدند. نتایج رگرسیون گام به گام برای حذف ورودی‌های غیر مؤثر و ملحوظ شدن پارامترهای مؤثر نشان داد، روزشمار سال تنها پارامتر مؤثر برای تعیین تغییرات تابش خالص است که ضریب تعیین آن حدود ۰/۹۴ بدست آمد. با توجه به اینکه تابش خالص رسیده به زمین در هر منطقه تا حدود زیادی به شرایط جوی آن به خصوص ابرناکی و میزان رطوبت هوا بستگی دارد، لذا مدل رگرسیون بدست آمده در این تحقیق، فقط برای محدوده مورد مطالعه این پژوهش کارایی دارد که شرایط جوی آن در ضریب مدل به‌طور

REFERENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Blaney, H. F. and Criddle W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil Conservation Service Technical Paper 96. 44 pp.
- Bussieres, N., Granger, R. J. and Strong, G. S. (1997). Estimates of regional evapotranspiration using GOES-7 satellite data: Saskatchewan case study, Canadian Journal of remote sensing, 23(1): 3-14.
- Cambell, J.B. 1987. Introduction to Remote Sensing.

The Guilford Press, New York.

Fisher, J. B., DeBiase, T., Qi, Y., Xu, M., and Goldstein, A. H. (2005). Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modeling and Software*, 20: 783–796.

John G., Yuan D., Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D. (1998). A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(2), 143-150.

Julien, Y., J.A. Sobrino and W. Verhoef. 2006. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. *Remote Sens. Environ.* 103(1): 43-55.

Hargreaves, G. H. (1974). Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 17(4): 701-704.

McDonald J.H. (2008). *Handbook of Biological Statistics*. Sparky House Publishing, Baltimore, Maryland, 287 pp.

Moran, M. S. and Jackson, R. D. (1991). Assessing the spatial distribution of evapotranspiration remotely sensed inputs. *Journal of Environmental Quality*, 20: 725-737.

Nishida, K., Nemani, R. R., Glassy, J. M., and Running, S. W. (2003). Development of an

evapotranspiration Index Aqua/MODIS for Monitoring Surface Moisture Status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 493–501.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, A193: 120-146.

Sheng, J., Wilson, J.P. and Lee, S. (2009). Comparison of land surface temperature (LST) modeled with a spatially distributed solar radiation model (SRAD) and remote sensing data. *Environmental Modelling & software*, 24, 436-433.

Temesgen, B., Allen, R.G. and Jensen, D.T (1999). Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. *J. Irrig. ASCE*, 125(1), 26-33.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55-94.

Wang, K., Li, Z., & Cribb, M. (2006). Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperature and NDVI: A new method to determine the Priestly–Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment*, 102, 293–305