



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۸
Vol.11, No. 4, Winter 2020 Iranian Remote Sensing & GIS

۱۱-۲۸

برآورد ضریب محصولات کشاورزی کشت و صنعت مغان و مطالعه رابطه تبخیر-تعرق با راندمان تولید محصولات

ایوب مرادی^{۱*}، حدیثه بابایی^۱، عباس علیمحمدی^۲، سهیل رادیوم^۱

۱. مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

۲. دانشیار گروه GIS، دانشکده نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱

چکیده

کمبود روزافزون منابع آب تجدیدپذیر در کشور، برآورد نیاز آبی مزارع را به یکی از اولویتهای مهم مدیریت آب در کشاورزی تبدیل نموده است. نیاز آبی مزارع توسط مولفه های اقلیمی منطقه کنترل می شود و برابر است با تبخیر-تعرق مرجع که با یک ضریب ویژه (بسته به نوع محصول و منطقه جغرافیایی کاشت) اصلاح می گردد. در تحقیق حاضر، با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸، ضریب محصولات عمده کشاورزی منطقه کشت و صنعت مغان از دو روش برآورد و مقایسه شده است. روش نخست بر مبنای اندازه گیری تبخیر-تعرق مزارع و روش دوم بر مبنای اندازه گیری شاخص گیاهی NDVI است. مقایسه این دو روش برای پنج محصول عمده منطقه نشان داد که مقدار خطای جذر میانگین مربعات قابل قبول (کمتر از ۰/۲۸) است. در ادامه، برای برآورد نیاز آبی محصولات، از ضریب محصول تولید شده بر مبنای تبخیر-تعرق استفاده شد. نیاز آبی محصولات با شش متد برآورد شد: ترکیب دو روش برآورد تبخیر-تعرق واقعی و سه روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع. از میان آنها، متد متریک- پنمن مونتیثت برای برآورد نیاز آبیاری بکار گرفته شد. تخمین نیاز آبیاری مستلزم کسر کردن بارش موثر از نیاز آبی است. برای برآورد بارش موثر، پس از بررسی چهار روش متداول، روش فائو برای شیب های کم ترجیح داده شد. نیاز آبیاری محصولات منطقه کشت و صنعت مغان بر از حداقل ۲۷۰ میلی متر (برای جو دیم) تا حداکثر ۱۵۰۰ میلی متر (برای باغ زیتون) برآورد شده است. بررسی آماری اندازه گیری ها سه ساله وجود یک همبستگی را بین میزان عملکرد محصول و میزان تبخیر-تعرق مزارع آشکار کرد. همچنین مشخص شد که عملکرد محصولات با شاخص های طیفی گیاه نیز دارای رابطه معنی دار است. هدف نخست تحقیق حاضر، برآورد ضرایب محلی محصولات کشاورزی منطقه مغان است؛ هدف دوم، بررسی رابطه مندی ضریب محصولات کشاورزی و شاخص های طیفی آنها به منظور تخمین ضریب محصولات بصورت مستقیم از این شاخص هاست.

کلید واژه ها: تبخیر-تعرق، ضریب محصول، نیاز آبی، کشت و صنعت مغان.

*نویسنده عهده دار مکاتبات: تهران، پژوهشگاه فضایی ایران، مرکز تحقیقات فضایی، بخش مطالعات سنجش از دور

۱- مقدمه

تفکیک زمانی ۱۶ روز هستند، می‌توان در مطالعات کشاورزی نتایج بدست آمده را با استفاده از درون‌یابی از نظر زمانی تعمیم داد. برای این کار، هرچه توزیع زمانی تصاویر مناسب‌تر باشد، نتایج قابل اطمینان‌تر خواهد بود. البته این امر با این پیش‌فرض صورت می‌گیرد که شرایط جوی نیز در گام‌های زمانی مطابق با تصاویر روند طبیعی و قابل درون‌یابی داشته باشد.

برای برآورد ET با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از جمله الگوریتم‌هایی که مورد توجه بسیار قرار گرفته است، الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (سبال^۱) (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b; Bastiaanssen,) (2000) است. باستانسین و همکاران در سال ۱۹۹۸ یک مدل چند مرحله‌ای مبتنی بر فیزیک، با استفاده از معادله بیلان انرژی سطح و توزیع مکانی انرژی را ارائه کردند. این الگوریتم از دمای سطحی، انعکاس سطحی و شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI^۲) و روابط دورنی آن‌ها جهت برآورد شارهای سطحی برای پوشش‌های سطح زمین استفاده می‌کند. ارتباط بین انرژی طیف مرئی و طیف مادون قرمز حرارتی در نواحی با تباین هیدرولوژیکی زیاد، اساس رابطه‌بندی مدل سبال را تشکیل می‌دهد. مدل سبال از سال ۱۹۹۸ تا به امروز در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعات حاکی از تطابق بالای نتایج مدل سبال با میزان واقعی ET بوده است (Ruhoff et al., 2012). Bastiaanssen et al., 2005, Teixeira et al., 2009, Paiva et al., 2011, Bhattarai et al., 2012, مدل "نقشه کردن تبخیر-تعرق با تفکیک بالا و کالیبراسیون داخلی" که به اختصار روش متریک^۴ نامیده می‌شود بر اساس مدل سبال و توسط دانشگاه آیداهو توسعه داده شده است (Allen et al., 2005, 2007, Tasumi et al.,) (2005a, Tasumi et al., 2005b).

1. Evapotranspiration
2. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)
3. Normalized difference vegetation index
4. Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC)

ایران، کشوری با اقلیم عمدتاً گرم و خشک است که میزان سرانه آب تجدیدپذیر آن در نیم سده اخیر کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است (ببران و هنربخش، ۱۳۸۶). در سال ۱۳۸۶، از ۱۳۰ میلیارد متر مکعب منابع تجدیدشونده آب کشور، حدود ۸۹ میلیارد مترمکعب آن برای مصارف کشاورزی، صنعت و معدن و خانگی برداشت شده است. که حدود ۹۳ درصد از این مقدار به تنهایی به بخش کشاورزی اختصاص داشته است (احسانی و همکاران، ۱۳۸۲). این درحالیست که تنها ۱۵ درصد مساحت ایران زیر کشت می‌رود. استفاده بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای آبیاری اهمیت بالای مدیریت آبیاری را نمایان می‌کند. نیاز محصولات به آبیاری، بستگی مستقیم به میزان تبخیر-تعرق آن‌ها دارد. تبخیر-تعرق (ET)^۱ یکی از مولفه‌های کلیدی و پیچیده بیلان انرژی و بیلان آب بوده و نقش آن در درک فرایندهای عمده سیستم زمین حیاتی است. تعداد زیادی فاکتور محیطی (همانند رطوبت خاک، فنولوژی گیاه، انواع پوشش و خصوصیات خاک) و فاکتور اقلیمی (همانند تابش، دمای هوا، رطوبت، سرعت باد) به شیوهای پیچیده بر روند ET گیاهان تاثیر می‌گذارند. روش‌های مستقیم اندازه‌گیری تبخیر-تعرق (همانند تشت تبخیر و لایسیمتر) پرزحمت، زمان‌بر و هزینه‌بر بوده و در مقیاس منطقه‌ای محدودیت دارند (Droogers, 2000). امروزه داده‌های ماهواره‌ای امکان برآورد تبخیر-تعرق در سطح وسیع بدون نیاز به محاسبه فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده را فراهم کرده است. در دو دهه اخیر روش‌های تخمین ET بر پایه سنجنش از دور، به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های میدانی تکامل یافته‌اند (Allen et al., 1998a; Allen et al., 2011). به دلیل قدرت تفکیک مکانی و طیفی مطلوب، از تصاویر ماهواره لندست ۸ برای محاسبه تبخیر-تعرق در سطح مزارع بوفور استفاده می‌شود. از آنجایی که این تصاویر دارای قدرت

مقدمه حاضر، بخش دوم به معرفی منطقه مطالعه و داده‌ها و روش‌های مورد استفاده می‌پردازد. در این بخش، تبخیر-تعرق، نیاز آبی و نیاز آبیاری محصولات و روش استخراج آن‌ها بیان شده است. رابطه ضریب محصولات با شاخص‌های گیاهی در بخش سوم آمده است. بخش چهارم به رابطه نیاز آبی محصولات و شاخص‌های طیفی با عملکرد محصولات می‌پردازد. بخش پنجم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است و لیست منابع مورد استفاده در بخش ششم آمده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعه و داده‌های مورد استفاده

شرکت کشت و صنعت مغان یکی از بزرگترین و پیشرفته‌ترین شرکت‌های کشت و صنعت ایران در منتها الیه شمال استان اردبیل (عرض: ۳۹/۴۳۱ درجه شمالی و طول ۴۷/۷۵۵ شرقی) واقع شده است. زمین‌های کشاورزی این شرکت حدود ۲۰ هزار هکتار مساحت دارد که بیش از ۹۰٪ آن‌ها بصورت آبی و با شبکه آبیاری مجهز کشت می‌شود. محصولات عمده کشت و صنعت مغان شامل گندم، جو، یونجه، کلزا، پنبه، ذرت، چغندر قند و آفتابگردان است (شکل ۱- سمت راست). تقویم زارعی این محصولات بجز پنبه، ذرت پاییزه و آفتابگردان، مشابه است. تصاویر مورد استفاده در این تحقیق، شامل ۴۸ تصویر ماهواره لندست ۸ است که در بازه زمانی سال‌های زراعی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ برداشت شده است. این تصاویر در سطح پردازش (۱) که با کیفیت‌ترین نوع داده بوده و برای تحلیل سری‌های زمانی مناسب است، فراهم شده است. این سطح از داده‌ها با دقت بالا زمین‌مرجع شده است (Landsat Collections, 2016). زمان گذر ماهواره از روی منطقه مغان بسته به موقعیت مرکز سین (شکل ۱- سمت چپ) حدود ساعت ۷:۲۵ تا ۷:۳۱ صبح، بوقت محلی (ساعت رسمی کشور) است. از میان تصاویر قابل دسترس، این ۴۸ تصویر طوری انتخاب شده‌اند که تا جایی که پوشش ابری اجازه داده است، دارای توزیع

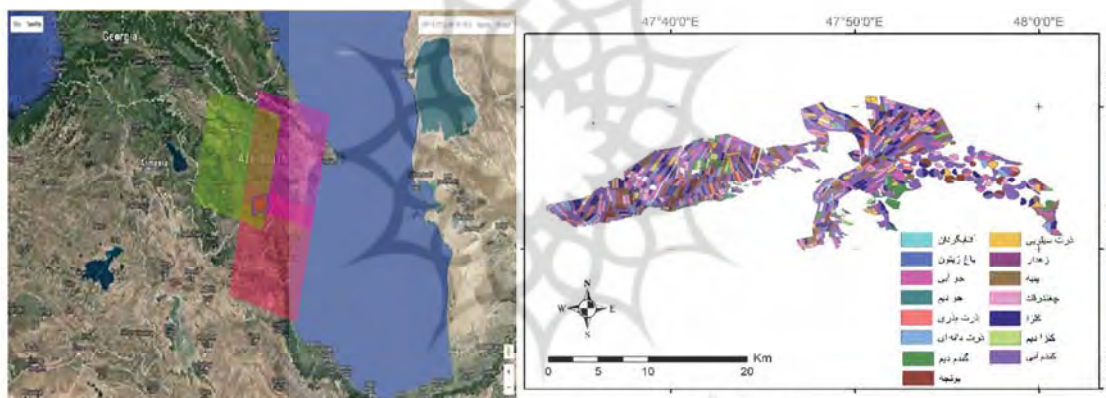
نقشه ET از محصولات کشاورزی با توان تفکیک‌های مکانی متفاوت مورد استفاده بوده است: از جمله اعمال بر روی تصاویر لندست ۳۰ متری (Allen et al., 2011), بر روی تصاویر ET بر روی تصویر مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر (Tasumi et al., 2006). در مدل متریک تاثیرات شیب و جهت شیب مزرعه در محاسبه بیلان انرژی در نظر گرفته می‌شود (Allen et al., 2008).

مزیت بارز استفاده از مدل‌های سبال و متریک این است که این مدل‌ها مستقل از نوع محصول هستند؛ به عبارت دیگر با استفاده از این مدل‌ها، برای برآورد تبخیر-تعرق نیازی به دانستن نوع محصول و دانستن مقادیر ضریب محصول نمی‌باشد. محققان مدل‌های سبال و متریک را در طیف وسیعی از کاربردها مانند مدیریت حقایبه‌ها، تخصیص منابع آب، برآورد تخلیه آب‌های زیرزمینی غیر پایدار، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و برآورد عملکرد آبدی دائمی بکار برده‌اند (Bastiaanssen & Chandrapala, 2003; Allen et al., 2007; Allen et al., 2011; Santos et al., 2012; Roy et al., 2014). اگرچه الگوریتم سبال برای محاسبه بیلان انرژی در مقیاس منطقه‌ای با دخالت کمترین داده زمینی طراحی شده است، اما برآورد محلی پارامترهای بکاررفته در آن می‌تواند دقت مدل را بهبود بخشد (Duchemin et al., 2006). مدل سبال بهترین الگوریتمی تخمین ET است که به کمترین داده ورودی از متغیرهای زمینی نیاز دارد (Bashir et al., 2006). استفاده از مدل سبال و متریک در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک حاکم بر بخش اعظم ایران، که چالش عمده آن کمبود منابع آب و اتلاف زیاد آن در اثر پدیده تبخیر-تعرق است، می‌تواند محققان کشور را در برآورد مقدار تبخیر-تعرق و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در ابعاد وسیع یاری کند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان مقدار نیاز آبی محصولات کشاورزی را تعیین کرده و در راستای مدیریت موثر منابع آب اقدام کرد. این مقاله در شش بخش ارائه می‌شود: به دنبال

پیکسل‌ها جایگزین شده‌اند. پیکسل‌های پرت در محاسبه دمای سطح زمین و همچنین در محاسبه پیکسل‌های گرم و سرد ایجاد اختلال می‌کنند. از آنجایی که دما و بازتاب سطح فوقانی ابر ممکن است متفاوت از مشخصات سطح مزرعه باشد، حذف ابرها در برآورد دقیق تر تبخیر-تعرق بسیار مهم است. مناطق سایه ابر و پوشش برفی نیز امکان دارد به‌ویژه از نظر حرارتی و انعکاسی به نتایج غیرواقعی بیانجامند. در این تحقیق برای شناسایی و حذف پوشش ابر، سایه ابر و پوشش برف از ابزار fmask (Zhu and Curtis, 2011) استفاده شده است. داده‌های به‌کار رفته در این تحقیق، در جدول (۱) خلاصه شده است.

زمانی مناسبی باشند. قدرت تفکیک مکانی این تصاویر برای باندهای طیف مرئی ۳۰ متر است و برای باندهای حرارتی ۱۰۰ متر بوده که به ۳۰ متر نمونه برداری مجدد (resample) شده است.

مقایسه نتایج بین تاریخ‌های متوالی در این تحقیق، پیکسل به پیکسل نبوده و بر اساس میانگین مزارع است؛ لذا انطباق هندسی تصاویر با دقت بالا، تاثیر قابل توجهی در نتایج ندارد. لذا برای جلوگیری از تغییر و ادغام شدن (smoothing) مقادیر پیکسل‌ها، تصحیح هندسی و رادیومتریکی بر روی تصاویر اعمال نشد. با این‌حال باندهای حرارتی تصاویر، برای وجود پیکسل‌های پرت احتمالی (outliers) چک شده و این



شکل ۱. موقعیت مزارع کشت و صنعت مغان (سمت راست) و سه سین لندست پوشش دهنده منطقه مغان (سمت چپ)، منطقه مغان در چهار ضلعی آبی رنگ واقع شده است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده

| منبع | تعداد | توضیح | مولفه |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| USGC | ۴۸ | تصویر لندست ۸ | تصویر ماهواره‌ای |
| Earth Explorer | ۱ | SRTM 1 Arc- second | مدل رقومی ارتفاع |
| USGC | ۱ | Global Land Cover | نقشه پوشش زمین |
| ایستگاه پارس‌آباد | زمان اخذ تصاویر و متوسط ماهیانه | دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و فشار هوا | داده‌های هواشناسی |
| کشت و صنعت مغان | ۳ سال | میزان عملکرد محصولات (تولید بر هکتار) | آمار محصولات |

۲-۲- تبخیر-تعرق

برای محاسبه تبخیر-تعرق با روش‌های سبال و متریک که مبتنی بر بیلان انرژی سطح زمین هستند، لازم است سه مولفه اصلی تابش خالص رسیده به سطح زمین (R_n)، شار گرمای خاک (G) و شار گرمای محسوس (H) محاسبه شوند. با استفاده از سه پارامتر مذکور شار گرمای نهان (λET) محاسبه می‌شود (معادله ۱). از آنجایی که گرمای نهان یک واحد آب ثابت فرض می‌شود (هر ۲/۵۴ مگاژول انرژی توان تبخیر یک میلی‌متر آب را دارد) می‌توان گرمای نهان را به واحد معادل آب قابل تبخیر تبدیل کرد.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad \text{رابطه (۱)}$$

شار تابش خالص رسیده به سطح زمین حاصل موازنه شار تابشی ورودی و خروجی است:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا، تابش طول موج کوتاه ورودی ($R_{S\downarrow}$) از رابطه (۳)، تابش طول موج بلند ورودی ($R_{L\downarrow}$) از رابطه (۴)، تابش طول موج بلند خروجی ($R_{L\uparrow}$) از رابطه (۵) بدست می‌آید. ϵ_0 درصد گسیل‌مندی حرارتی سطح زمین است و آلبیدوی سطحی (α) با قابلیت انتقال اتمسفری رابطه دارد (جدول ۲).

$$R_{S\downarrow} = G_{sc} \times \tau_{sw} \times \cos \theta \times dr \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_o \times \sigma \times T_s^4 \quad \text{رابطه (۵)}$$

شار گرمای خاک (G) تابعی است از شار تابش خالص (R_n)؛ اما آلبیدو و دمای خاک (T_s) نیز در کنترل آن نقش ایفا می‌کنند:

$$G = T_s / \alpha (0.0038 \alpha + 0.0074 \alpha^2) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) * / R_n \quad \text{رابطه (۶)}$$

شار گرمای محسوس تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است (رابطه ۷). برای محاسبه اختلاف دمایی بین دو ارتفاع (dT) می‌بایست در محدوده مورد مطالعه، دمای حداقل و دمای حداکثر بر روی تصویر تعیین شوند. این کار می‌تواند به صورت میدانی توسط

کارشناسان انجام شود و یا با استفاده از آستانه‌گذاری شاخص گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) از راه دور صورت گیرد (Olmedo Bastiaanssen 1998, 2016). در صورت انتخاب میدانی پیکسل‌های گرم و سرد، این انتخاب بایستی همزمان با اخذ تصاویر ماهواره‌ای انجام پذیرد، که این امر عملاً باعث غیر قابل اعمال کردن این روش بویژه برای مناطق دوردست می‌کند. در پروژه حاضر، انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، به صورت اتوماتیک انجام گرفت. ثابت‌های a و b در رابطه (۸) با استفاده از پیکسل‌های سرد و گرم به دست می‌آیند. معرفی و نحوه محاسبه پارامترهای به کاررفته در روابط ۲ تا ۸ در جدول (۲) آمده است.

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / r_{ah} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$dT = b + a * T_{S \text{ datum}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

۲-۳- تبخیر-تعرق مرجع

شرایط اقلیمی منطقه بر نیاز آبی محصول تاثیر دارد. یک محصول در طول رشد در شرایط اقلیمی گرم و آفتابی نسبت به همان محصول در شرایط آب و هوایی ابری و سرد آب بیشتری در طول روز نیاز دارد. علاوه بر نور خورشید و دما، رطوبت هوا و سرعت باد نیز بر نیاز آبی محصول تأثیر می‌گذارد. بالاترین نیاز آبی گیاهان در مناطق گرم، خشک، بادی و آفتابی؛ و کمترین آن در مناطق سرد، مرطوب و ابری و کم‌باد رخ می‌دهد. بنابراین یک محصول کشاورزی مشخص در زون‌های اقلیمی مختلف، نیاز آبی متفاوتی خواهد داشت. این مسئله، لزوم تعیین یک محصول استاندارد یا مرجع و تعیین نیاز آبی آن در مناطق اقلیمی مختلف را نشان می‌دهد. تأثیر اقلیم بر نیاز آبی محصول توسط تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) قابل بیان است. روش‌های تجربی اندازه‌گیری تبخیر-تعرق همانند تشت تبخیر یا لایسیمتر زمان‌بر بوده و به دلیل هزینه‌های احداث، ساخت و نگهداری، راه‌اندازی آن‌ها در مقیاس وسیع امکان‌پذیر نیست. در مناطق وسیع از روش‌های نظری برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع استفاده می‌شود (خسروشاهی، ۱۳۹۲). روش‌های نظری از پارامترهای

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده برای محاسبه تبخیر-تعرق

| مؤلفه | معرفی | مقدار |
|-----------------|-------------------------------------|---|
| G_{sc} | ثابت خورشیدی | ۱۳۶۷ وات بر مترمربع |
| τ_{sw} | قابلیت انتقال اتمسفری | $\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z$ |
| Z | ارتفاع از سطح دریا | DEM |
| θ | زاویه برخورد نور خورشید به سطح زمین | زاویه زنیث خورشید = در مدل سیال تابعی از شیب و جهت زمین = در مدل متریک |
| dr | معکوس مربع فاصله نسبی زمین و خورشید | $1 + 0.033 \times \cos(DOY \times 2\pi / 365)$ |
| DOY | عدد ژولوسوی روز در سال مربوطه | ۱ - ۳۶۵ |
| ε_a | گسیلمندی اتمسفری | $0.85 \times (-\ln(\tau_{sw}))^{0.09}$ |
| σ | ثابت استفان بولتزمن | 5.67 E-8 |
| ε_0 | گسیلمندی سطحی | $1.009 + 0.047 \times \ln(NDVI)$ |
| NDVI | شاخص تفاضلی نرمال شده | $B5 - B4 / B5 + B4$ |
| T_a | دمای هوا | ایستگاه هواشناسی |
| T_s | دمای سطح خاک | LST |
| α | آلبدوی سطح | $\frac{\alpha_{top} - \alpha_{min}}{\tau_{sw}^2}$ |
| α_{top} | آلبدوی در بالای اتمسفر | $r_7 p_7 \times + p_6 \times r_6 + r_5 \times p_5 + r_4 p_4 \times + r_3 p_3 \times + r_2 \times p_2$ |
| α_{min} | کمترین مقدار آلبدوی در بالای اتمسفر | Min (α_{top}) |
| rn | انعکاس باند (n) | $(Add_{refb} + Mult_{refb} \cdot DN_b) / \sin(SUNe)$ |
| pn | وزن باند (n) | در منابع مربوطه (از جمله Akdim et al, 2014) |
| Add_{refb} | مقادیر افزایشی باند (n) | از فایل مرجع تصویر |
| $Mult_{refb}$ | مقدار ضربی باند (n) | از فایل مرجع تصویر |
| DN_b | مقدار پیکسل (n) | باند تصویر |
| $SUNe$ | زاویه ارتفاع خورشید زمان اخذ تصویر | از فایل مرجع تصویر |
| ρ | تراکم هوا | $(1000 \cdot AirPressure) / (1.01 \cdot (LST) \cdot 287)$ |
| C_p | گرمای ویژه هوا | ۱۰۰۴ ژول بر کیلوگرم بر کلوین |

- روش هارگریوز و سمانی (Hargreaves and Samani, 1985)
رابطه (۹)

$$ET_0 = 0.0023 * Ra * (T_{mean} + 17.8) * \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

- روش پنمن-مونتیث (Penman-Monteith, 2005)

$$ET_0 = \frac{0.408 * (R_n - G) + Y * \frac{900}{T + 273} * U * (e_s - e_a)}{\Delta + Y * (1 + 0.34 * U)} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

- روش برتی و همکاران (Berti et al., 2014)

رابطه (۱۱)

$$ET_0 = 0.00193 * Ra * (T_{mean} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.517}$$

اقليمی استفاده می‌کنند. در تحقیق حاضر، سه تا از متداول‌ترین روش‌های نظری برآورد تبخیر-تعرق مرجع، شامل روش پنمن-مونتیث (۲۰۰۵)، روش هارگریوز و سمانی (۱۹۸۵) و روش جدیدتر برتی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است. نحوه محاسبه این روش‌ها در رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) و معرفی مؤلفه‌های به‌کار رفته در آنها، در جدول (۳) آمده است. توضیح بیشتر این روش‌ها در منابع متعدد از جمله Allen et al., 1998, 2007, 2008, 2011; Bastiaanssen, 1998 و همچنین در وبسایت سازمان FAO آمده است.

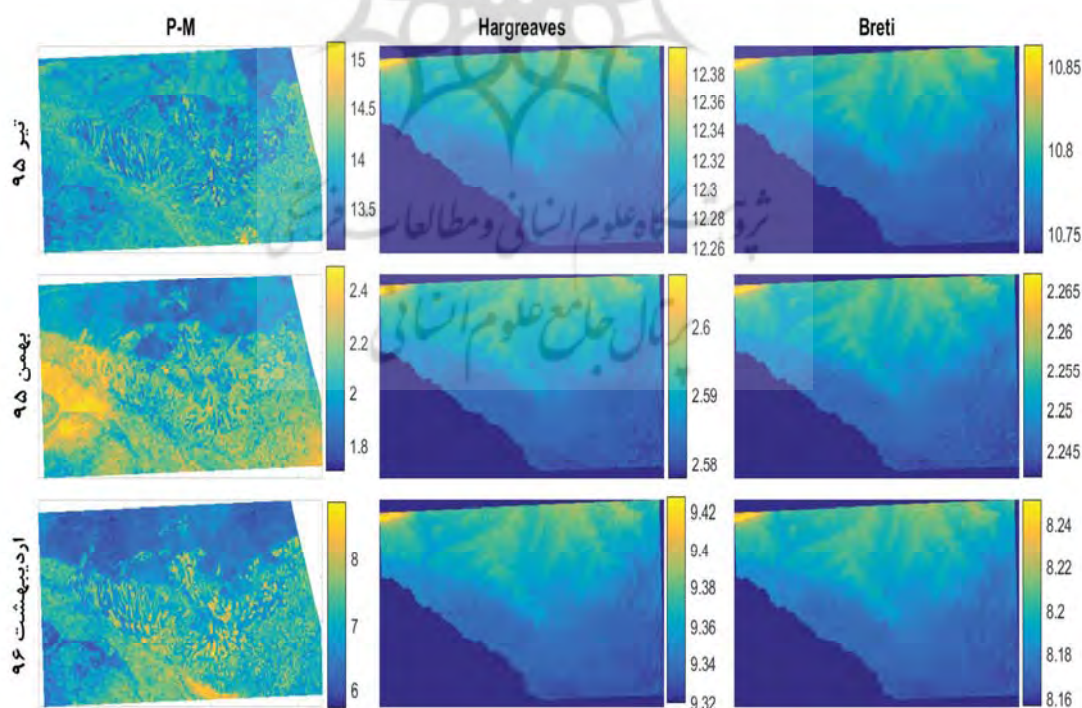
جدول ۳. پارامترهای استفاده شده برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع

| معرفی | مؤلفه | معرفی | مؤلفه | معرفی | مؤلفه |
|-----------------|------------|---------------------------|-------|----------------------|-----------|
| متوسط دمای هوا | T_{mean} | تابش فرازمینی روزانه | Ra | تبخیر-تعرق مرجع | ET_0 |
| حداقل دمای هوا | T_{min} | شار گرمایی خاک | G | شیب منحنی اشباع بخار | Δ |
| حداکثر دمای هوا | T_{max} | فشار بخار اشباع | e_s | ثابت سایکومتریک | γ |
| ارتفاع زمین | Z | فشار بخار لحظه‌ای | e_a | گرمای نهان تبخیر | λ |
| | | سرعت باد در ارتفاع ۲ متری | U | تابش خالص کل | R_n |
| | | دمای هوای | T | تابش خالص موج کوتاه | R_s |

۲-۴- نیاز آبی

آب مورد نیاز برای جبران تلفات تبخیر-تعرق گیاهان مزرعه، نیاز آبی نامیده می‌شود. مقادیر تبخیر-تعرق گیاه و نیاز آبی گیاه تقریباً یکسان است. تحقیقات مختلف نشان داده بیش از ۹۹ درصد آب جذب شده توسط گیاه، صرف عمل تبخیر-تعرق شده و کمتر از یک درصد آن در فعالیت‌های سوخت و ساز گیاه مصرف می‌شود.

با استفاده از سه روش معرفی شده، متوسط ماهیانه تبخیر-تعرق مرجع برای سال زراعی ۱۳۹۶ محاسبه شد (شکل ۲). نتایج روش‌های هارگریوز-سمانی و برتی-همکاران با روش پنمن مونتیتش، حدود هشت درصد با همدیگر تفاوت دارند. اما تفاوت بین دو روش ساده‌تر هارگریوز-سمانی و برتی-همکاران از چهار درصد فراتر نمی‌رود.



شکل ۲. نقشه تبخیر-تعرق مرجع در منطقه مغان (میلیمتر بر روز)، تولید شده با استفاده از سه روش پنمن مونتیتش، هارگریوز-سمانی، و برتی-همکاران

پامترهای بررسی شده، ضریب گیاهی در اشکال متفاوت ارائه شده است (Allen et al., 1998)؛ در تحقیق حاضر، از ضریب ترکیبی محصول، که تبخیر و تعرق را به صورت همزمان و تفکیک نشده برآورد می‌کند، استفاده شده است. این نوع ضریب محصول، رایج‌ترین و کاربردی‌ترین نوع آن برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی آبیاری، اهداف مدیریتی و همچنین برای مطالعات بیلان هیدرولوژیکی بوده و استفاده از آن مناسب‌تر و راحت‌تر از ضرایب محصول دوگانه است (Allen et al., 1998). تبخیر-تعرق محصول می‌تواند با استفاده از ضریب گیاهی محاسبه شود (Allen et al., 1998; Allen et al., 2005). برآورد تبخیر-تعرق محصول مبتنی بر ضریب گیاهی یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده برای مدیریت آب آبیاری در مقیاس مزرعه است. ضریب محصول با نسبت‌گیری تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و تبخیر-تعرق واقعی (ET_c) بدست می‌آید:

$$K_c = ET_c / ET_0 \quad (13)$$

ضریب محصول در طول دوره رشد گیاه متغیر است، اما در مطالعات معمولاً سه ضریب محصول، بترتیب برای ابتدای رشد ($K_{c_{ini}}$)، اوج رشد ($K_{c_{mid}}$) و زمان قبل از برداشت محصول ($K_{c_{end}}$) ارائه می‌شود و برای زمان‌های بینابینی، این مقادیر معمولاً درون‌یابی می‌شود. با استفاده از تصاویر، ضرایب محصول محاسبه شده برحسب ماه‌های رشد محصول در سه مقطع رشد، میانگین گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۴. میانگین ضریب محصول برای سه مقطع رشد محصولات عمده زراعی کشت و صنعت مغان

| نوع محصول | ابتدای رشد | اوج رشد | انتهای رشد |
|-------------|------------|---------|------------|
| جو | 0.079 | 0.807 | 0.404 |
| چغندر قند | 0.109 | 0.731 | 0.386 |
| ذرت بذری | 0.188 | 0.996 | 0.59 |
| ذرت دانه ای | 0.172 | 1.21 | 0.666 |
| ذرت سیلویی | 0.221 | 1.01 | 0.554 |
| گندم | 0.065 | 0.846 | 0.3929 |
| یونجه | 0.156 | 1.03 | 0.535 |

بنابراین در عمل، تبخیر-تعرق گیاه برابر نیاز آبی گیاه در نظر گرفته می‌شود (Pescod, 1992). نیاز آبی یک محصول به نوع محصول، شرایط آب و هوایی و مرحله رشد محصول بستگی دارد.

برای هر تصویر مورد مطالعه، تبخیر-تعرق محاسبه شده برابر است با نیاز آبی گیاه در همان زمان تصویر؛ اما برای تخمین نیاز آبی تجمعی یک منطقه در طول دوره کشت، لازم است یا تصویر ماهواره‌ای برای تمام دوره کشت پردازش شود، یا اینکه از پارامتر ضریب محصول و تغییرات آن در طول دوره رشد استفاده شود. روش اول اگر غیرممکن نباشد به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌بر و زمان‌بر است. اما روش دوم کاربردی بوده و یکی از اهداف این تحقیق است. برای نیل به این هدف، لازم است ضرایب محصول مخصوص مقاطع مختلف دوره رشد هر محصول برآورد شود. نیاز آبی هر ماه یک محصول (ET_{c_month}) برابر است با تبخیر و تعرق مرجع آن ماه (ET_{0_month}) که توسط ضریب گیاهی همان ماه (K_{c_month}) اصلاح شده باشد:

$$ET_{c_month} = ET_{0_month} * K_{c_month} \quad (12)$$

۲-۵- ضریب گیاهی

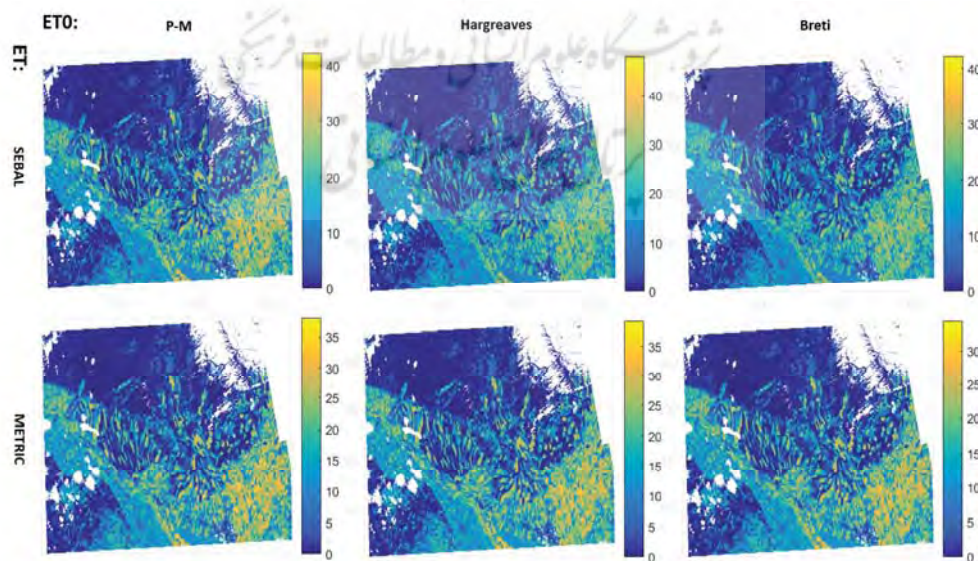
ضریب گیاهی، نسبت بین تبخیر-تعرق هر محصول به تبخیر-تعرق مرجع است. برای محاسبه ضریب گیاهی یک محصول در یک زمان خاص، لازم است تبخیر-تعرق آن محصول و تبخیر-تعرق مرجع مربوط به همان زمان برآورد شود. ضریب محصول از عواملی مانند شرایط اقلیمی (همانند دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی)، خصوصیات بیوفیزیکی محصول، زمان کشت، تاریخ جوانه‌زنی، طول فصل رشد، میزان رطوبت خاک، تراکم محصول و سلامت پوشش گیاهی تأثیر می‌پذیرد (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen et al., 1998; Kamble et al., 2013). این ضریب همچنین به دینامیک و زبری تاج‌پوشش گیاه بستگی دارد (Justice et al., 2002).

در مطالعات مربوطه، بسته به اهداف مطالعه و

۲-۶- نیاز آبیاری

نیاز آبی گیاه به وسیله باران، آبیاری یا ترکیبی از این دو تأمین می‌شود. در اکثر موارد، بخش قابل توجهی از بارندگی به صورت رواناب از محل خارج می‌شود. قسمتی از بارندگی که در خاک نفوذ کرده و صرف رشد گیاهان و تبخیر- تعرق می‌شود، بارش مؤثر نام دارد. بنابراین باران مؤثر، قسمت مفید کل باران دریافتی است (Dastane, 1978). برای محاسبه دقیق بارش مؤثر، بایستی مقادیر رطوبت قبل و بعد از هر بارندگی در دسترس باشد. برای تخمین قابل قبول بارش مؤثر روش‌هایی وجود دارد که معمولاً کسری از باران ماهانه را به‌عنوان باران مؤثر تخمین می‌زنند. برخی از این روش‌ها، برای نواحی خاصی طراحی شده‌اند، برای نواحی که هنوز روش‌های محلی توسعه داده نشده‌اند از روش‌های عمومی استفاده می‌شود. از جمله؛ روش سازمان FAO، روش اداره خدمات حفاظت خاک سازمان کشاورزی ایالات متحده (USDA) و روش روگومایو و همکاران (۲۰۰۳). علاوه بر یک روش عمومی، سازمان FAO برای مناطق با شیب کمتر از ۵٪ نیز یک رابطه ارائه کرده است (رابطه ۱۴). از آنجایی که شیب زمین‌های کشت و صنعت مغان،

با در دست داشتن ضرایب ماهانه محصول و تبخیر- تعرق ماهانه، نیاز آبی برای ماه‌های سال زراعی ۱۳۹۶ محاسبه شد. همان‌طور که در بخش قبل بیان شده، تبخیر-تعرق واقعی از دو روش سبال و متریک برآورد شده است؛ برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع نیز سه روش پنمن مونتیت، هارگریوز-سمانی و برتی-همکاران بکار گرفته شده است. لذا با توجه به اعمال هر یک از این روشها، نیاز آبی ماهیانه با شش متد محاسبه شده است (شکل ۳). بیشترین میزان نیاز آبی ماهیانه توسط متد سبال-هارگریوز و کمترین میزان آن توسط متد متریک-برتی برآورد شده است. تفاوت میان تخمین‌های این شش متد حداکثر به ۱۷ درصد می‌رسد. در میان آن‌ها، متد متریک-پنمن مونتیت دارای اعتبار بیشتری است، از این رو، در تحقیق حاضر بر این متد تاکید شده و برای برآورد نیاز آبیاری مورد استفاده قرار گرفته است. روش پنمن-مونتیت به دلیل استفاده از پارامترهای متنوع هواشناسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در زمینه مطالعات توارن انرژی مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. سازمان فائو روش پنمن-مانتیت را به‌عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع معرفی نمود. (فائو، نشریه ۵۶).



شکل ۳. نقشه نیاز آبی ماهیانه منطقه کشت و صنعت مغان (تیرماه ۱۳۹۵) با استفاده از شش متد. سطرها نشانگر روش تولید تبخیر-تعرق و ستون‌ها نشانگر روش تولید تبخیر-تعرق مرجع است.

آب مورد نیاز برای آبیاری ($IrrNeed_{month}$) در هر ماه برابر است با تفاوت بین نیاز ماهیانه آبی گیاه (ET_{c_month}) و بارندگی مؤثر (ER_{month}) همان ماه (خسروشاهی، ۱۳۹۲، علیزاده، ۱۳۸۵). بنابراین، نیاز آبیاری در طول دوره کشت محصول ($IrrNeed$) عبارت است از جمع نیاز آبی ماه‌های کاشت (i) تا برداشت (j) محصول (روابط ۱۵ و ۱۶). نیاز آبیاری مزارع بر حسب نوع محصول از ۲۷۰ الی ۱۵۰۰ میلی‌متر متغیر است (جدول ۵).

$$IrrNeed_{month} = ET_{c_month} - ER_{month} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$IrrNeed = \sum_i^j IrrNeed_{month} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

کمتر از این مقدار است (میانگین ۴/۴ درصد) در این پروژه این روش ترجیح داده شد. بارش مؤثر ماهانه ایستگاه پارس‌آباد مغان بر اساس روش‌های معرفی شده، در شکل (۴) آمده است.

رابطه (۱۴)

$$ER = (0.6 * R) + 10 \quad \text{for: } R < 75 \text{ mm}$$

$$ER = (0.8 * R) + 25 \quad \text{for: } R > 75 \text{ mm}$$

در رابطه بالا R و ER به ترتیب بارش ماهانه و بارش مؤثر ماهانه هستند.



شکل ۴. بارش ماهانه و بارش مؤثر ماهانه منطقه مغان بر اساس چهار روش

جدول ۵. نیاز آبیاری کشت و صنعت مغان به تفکیک محصول (سال زراعی ۱۳۹۶)

| محصول | نیاز آبیاری (mm) |
|-------------|------------------|
| آفتابگردان | 465.8 |
| باغ زیتون | 1539.7 |
| پنبه | 904.7 |
| جو دیم | 272.5 |
| چغندر قند | 922.8 |
| ذرت بذری | 952.0 |
| ذرت دانه‌ای | 818.9 |
| ذرت سیلویی | 719.5 |
| کلزا دیم | 622.6 |
| گندم دیم | 346.9 |
| یونجه | 1083.5 |

شاخص‌های گیاهی چند طیفی، برای برآورد مقادیر Kc در مقیاس مزرعه برای ذرت (Hunsaker et al., 2005; Bastiaanssen et al., 2000; Irmak et al., 2010; Jensen et al., 1990; Bausch et al., 1989) گندم، کتان (Hunsaker et al., 2005) و لوبیا (Irmak et al., 1990; Jensen et al., 2010) استفاده کرده‌اند. بوش و نیل (۱۹۸۹)، کاربرد داده‌های سنجنش از دوری را از لحاظ برقراری ارتباط میان NDVI فصلی و Kc اثبات کردند (Jayanthi et al., 1989; Bausch et al., 2011; Irmak et al., 2000). کمبل و همکاران (۲۰۱۳) یک رابطه قوی میان NDVI و ضریب محصول را برای محصولات مورد مطالعه‌شان مشاهده کردند. جانسون و تروت (۲۰۱۲) با استفاده از مشاهدات زمینی روی ۴۹ مزرعه کاشت‌شده با ۱۸ محصول مختلف، یک رابطه خطی میان ضریب گیاهی و شاخص NDVI یافتند. هونساکر و همکاران (۲۰۰۵) یک رابطه میان ضریب پایه محصول گندم و شاخص NDVI برقرار کردند که دارای همبستگی بالایی در منطقه مورد مطالعه‌شان بود. در مطالعات متعدد از تخمین Kc مبتنی بر شاخص گیاهی برای برآورد نیاز آبیاری استفاده و پیشنهاد شده است (Allen et al., 2011; Calera et al., 2016).

در جدول (۶)، نیاز آبیاری محاسبه‌شده در تحقیق حاضر با نتایج کار تحقیقی ترامشلو (۱۳۹۱) برای تعدادی از محصولات مقایسه شده است. درصد تفاوت برای تعدادی از محصولات پایین است. باید توجه کرد که نیاز آبیاری یک محصول مستقیماً به اقلیم منطقه وابسته است. به‌عنوان مثال، نیاز آبیاری زیتون در استان کرمانشاه (میرموسوی و همکاران ۱۳۹۱) کمتر از نیاز آبیاری این محصول در منطقه مغان است؛ این تفاوت به دلیل میزان تبخیر-تعرق کمتر و بارش بیشتر استان کرمانشاه نسبت به منطقه مغان می‌باشد.

۳- برآورد ضریب محصولات با استفاده از شاخص‌های گیاهی

معمولاً بین شاخص‌های طیفی مبتنی بر سنجنش از دور و ضرایب محصول، یک رابطه معنی‌دار مشاهده شده است. روش‌های تجربی و تئوری نیز این مسأله را که ضرایب محصول با تراکم تاج پوشش گیاهی نسبت دارند، تأیید می‌کنند. از جمله شاخص‌های مورد استفاده برای پایش گیاهان، ارزیابی عملکرد محصول و بررسی و سلامت گیاه، شاخص NDVI است (Justice Kamble et al., et al., 2002; Kamble et al., 2012; Sellers et al., 1985; 2008). عده‌ای از محققان از

جدول ۶. مقایسه نیاز آبی تعدادی از محصولات شاخص، طبق نتایج تحقیق حاضر و تحقیق ترامشلو (۱۳۹۱)

| درصد تفاوت | نیاز آبیاری | | محصول |
|------------|---------------|------------|-----------------------|
| | تحقیق ترامشلو | تحقیق حاضر | |
| ۱۴ | ۳۹۷ | ۴۶۶ | گندم |
| -۴۳ | ۳۸۹ | ۲۷۳ | جو |
| ۴۲ | ۵۴۸ | ۹۵۲ | ذرت بذری ^۱ |
| ۳۳ | ۵۴۸ | ۸۱۸ | ذرت دانه‌ای |
| ۲۴ | ۵۴۸ | ۷۱۹ | ذرت سیلویی |
| -۱۵ | ۱۲۴۸ | ۱۰۸۳ | یونجه |
| -۲ | ۹۲۴ | ۹۰۵ | پنبه |
| -۹۴ | ۹۰۶ | ۴۶۶ | آفتابگردان |
| ۱۱۳ | ۷۲۰ - ۹۲۰ | ۱۵۳۹ | زیتون ^۲ |

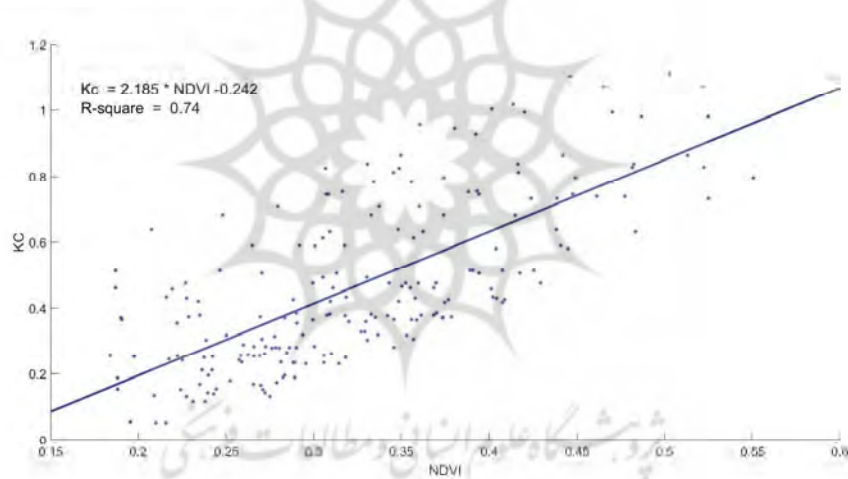
۱- در تحقیق ترامشلو نوع ذرت تفکیک نشده است

۲- بر اساس مقاله سید حسین میرموسوی و همکاران (۱۳۹۱)

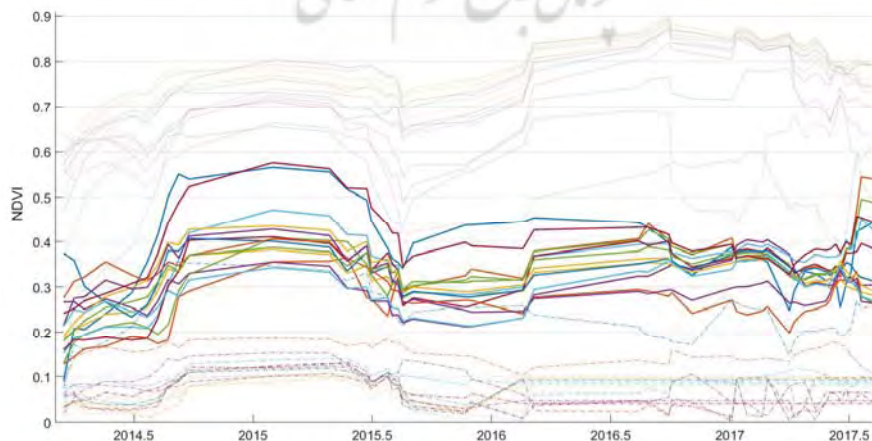
در ادامه، روابط میان شاخص NDVI مزارع و ضرایب محصولات در منطقه کشت و صنعت مغان بررسی شد. از نظر سیکل زمانی این رابطه در طول سال متغیر است. بطوریکه در ماه‌های ابتدای رشد (اواخر زمستان و اوایل بهار) که به دلیل خنکی هوا میزان تبخیر-تعرق عموماً پایین است رابطه میان شاخص NDVI و ضرایب محصول رابطه قوی بوده و هرکجا NDVI بالاتر است، تبخیر-تعرق و ضرایب محصول به همان نسبت بالاتر است. اما در فصل گرم، به دلیل بالا بودن نسبی میزان تبخیر-تعرق، این رابطه ضعیف‌تر می‌نماید. رابطه شاخص‌های طیفی و ضریب محصول به مقدار خود NDVI نیز وابسته است. درحالی‌که برای مقادیر بالای NDVI رابطه قویتری وجود دارد، برای NDVI‌های پایین، این رابطه ضعیف است. برای مقادیر NDVI زیر

صفر رابطه معکوس ضعیفی مشاهده می‌شود. رابطه NDVI متوسط و ضریب محصولات منطقه مغان در شکل (۵) آمده است.

با استفاده از رابطه خطی نشان داده شده در شکل ۵ برای هر سه مرحله رشد، مقدار ضریب محصولات برحسب مقادیر NDVI آنها برآورد شد (جدول ۷)؛ مقادیر سه‌گانه NDVI محصولات از منحنی سری‌های زمانی NDVI استخراج شد (شکل ۶). مقادیر KC به‌دست آمده از NDVI با مقادیر KC که با استفاده از تبخیر-تعرق واقعی، حاصل از تصاویر و تبخیر-تعرق مرجع به‌دست آمده (جدول ۴) قابل مقایسه است (شکل ۷). میزان RMS بین دو KC در جدول (۸) دیده می‌شود.



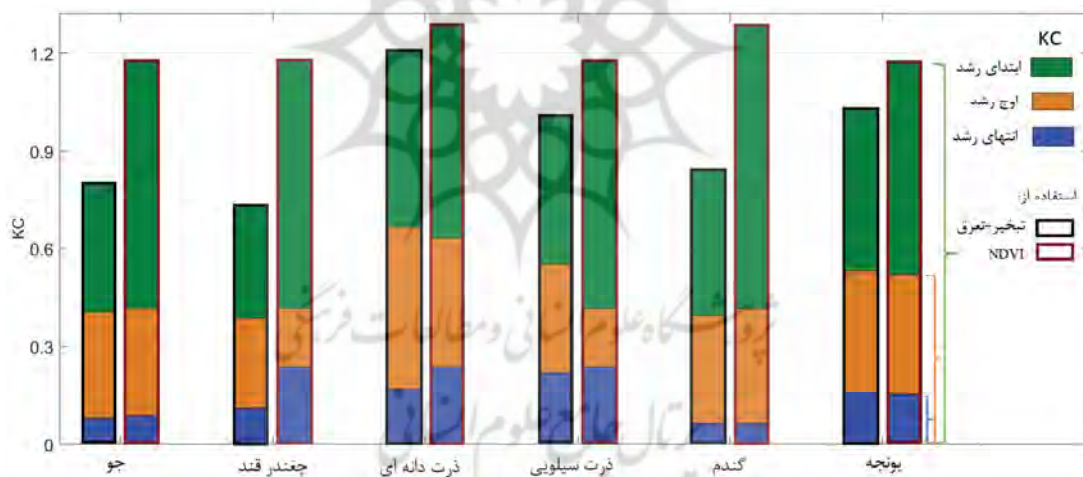
شکل ۵. رابطه NDVI میانگین و ضریب محصولات منطقه مغان



شکل ۶. سری‌های زمانی NDVI محصولات کشاورزی منطقه مغان

جدول ۷. مقدار ضریب محصول برآورد شده برحسب NDVI برای سه مقطع رشد

| محصول | ابتدای رشد | | اوج رشد | | انتهای رشد | |
|-------------|------------|--------|---------|--------|------------|--------|
| | NDVI | KC | NDVI | KC | NDVI | KC |
| آفتابگردان | 0.22 | 0.2387 | 0.65 | 1.1783 | 0.45 | 0.7413 |
| باغ زیتون | 0.15 | 0.0858 | 0.7 | 1.2875 | 0.35 | 0.5228 |
| پنبه | 0.15 | 0.0858 | 0.65 | 1.1783 | 0.35 | 0.5228 |
| جو | 0.15 | 0.0858 | 0.65 | 1.1783 | 0.3 | 0.4135 |
| چغندر قند | 0.22 | 0.2387 | 0.65 | 1.1783 | 0.3 | 0.4135 |
| ذرت سیلویی | 0.2 | 0.195 | 0.65 | 1.1783 | 0.35 | 0.5228 |
| ذرت دانه‌ای | 0.22 | 0.2387 | 0.7 | 1.2875 | 0.4 | 0.632 |
| کلزا | 0.15 | 0.0858 | 0.65 | 1.1783 | 0.35 | 0.5228 |
| گندم | 0.14 | 0.0639 | 0.70 | 1.2875 | 0.3 | 0.4135 |
| یونجه | 0.18 | 0.1513 | 0.65 | 1.1783 | 0.35 | 0.5228 |



شکل ۷. مقادیر سه گانه ضریب محصول برای پنج محصول عمده منطقه مغان، به دست آمده از دو روش: ۱- محاسبه تبخیر-تعرق، ۲- برحسب NDVI (مقادیر از ابتدای محور Y در نظر گرفته می شود)

جدول ۸. خطای جذر میانگین مربعات برای مقادیر KC بدست آمده از دو روش: ۱- محاسبه تبخیر-تعرق، ۲- برحسب NDVI

| محصول: | جو | چغندر قند | ذرت دانه‌ای | ذرت سیلویی | گندم | یونجه |
|--------|------|-----------|-------------|------------|------|-------|
| :RMSE | 0.21 | 0.27 | 0.06 | 0.13 | 0.26 | 0.08 |

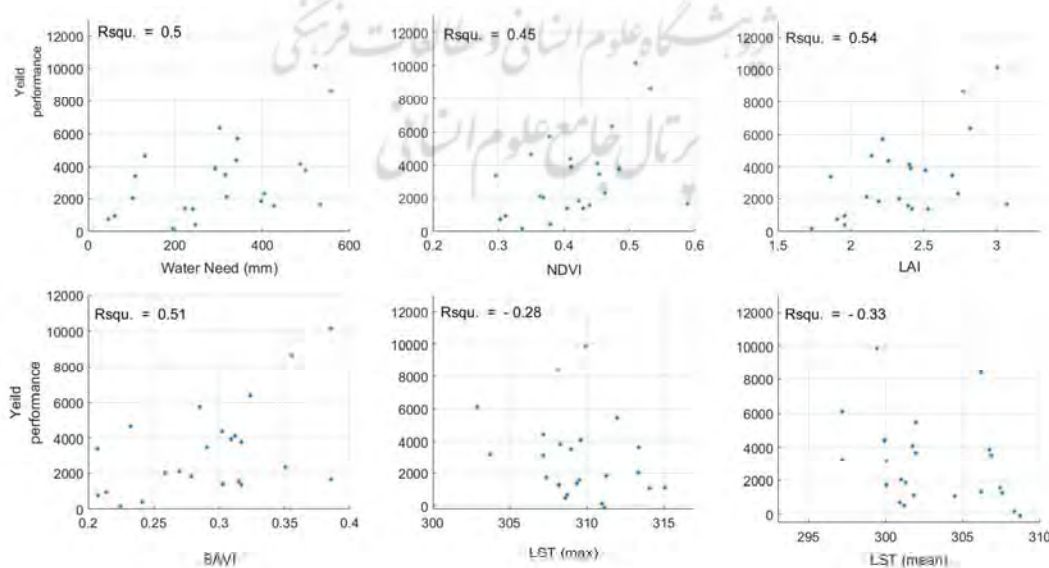
تبخیر-تعرق به طور کلی بدون تفکیک نوع محصول، ۰/۵۱ و بدون احتساب پنبه، چغندر قند و کلزا این ضریب به ۰/۷ می‌رسد. عملکرد تولید همچنین با مقادیر NDVI، LAI و SAVI دارای رابطه بوده اما با دمای سطح زمین رابطه‌ای نشان نمی‌دهد (شکل ۸). شاخص‌های طیفی نیز با همدیگر دارای رابطه قوی هستند، اما این شاخص‌ها با دمای سطح زمین (خواه دمای حداکثر یا دمای میانگین) رابطه‌ای نشان نمی‌دهند (شکل ۹).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

از میان مدل‌های بیلان انرژی سطح زمین که از داده‌های سنجش از دور استفاده می‌کنند، دو سبال و متریک به خوبی شناخته شده و کاربردی هستند. این دو مدل به طور مشابه، مولفه‌های تاثیرگذار روی دریافت و تخلیه انرژی را محاسبه می‌کنند. روش متریک که توسعه داده شده مدل سبال است، اثر توپوگرافی زمین بر روی بیلان انرژی را نیز مدل می‌کند. برخلاف نواحی کوهستانی، در نواحی هموار و کم‌شیب مانند جلگه‌ها، نتایج این دو مدل، تفاوت ملموسی با هم ندارند.

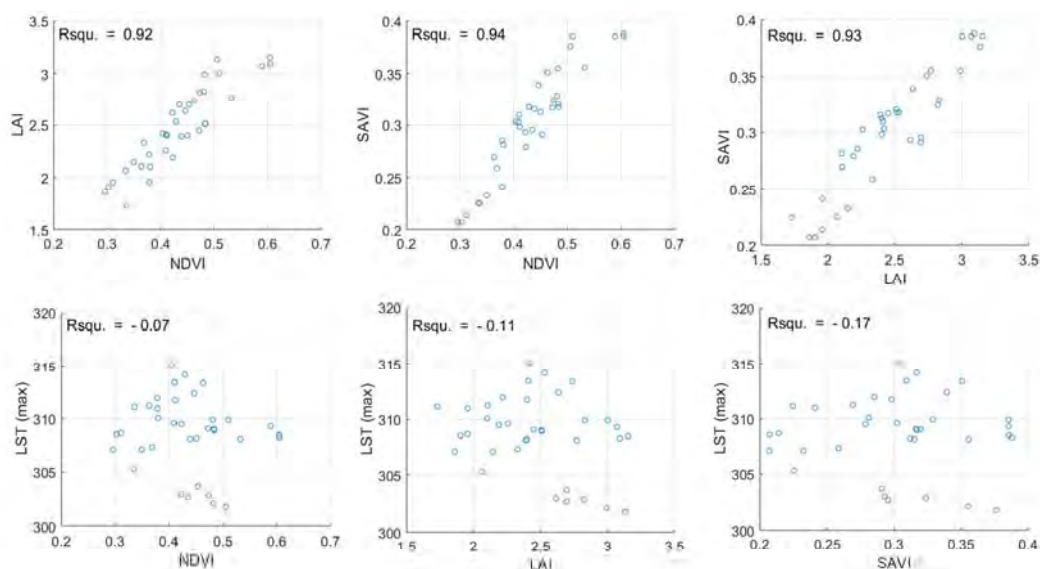
۴- رابطه نیازآبی محصولات و شاخص‌های طیفی آنها با عملکرد محصولات

داده‌های عملکرد محصولات (میزان تولید بر واحد سطح)، مقدار تبخیر-تعرق و مقادیر شاخص‌های طیفی، در طول سال‌های زراعی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ برای آشکار نمودن هرگونه همبستگی و رابطه آماری بین آنها مورد مطالعه قرار گرفت. تعداد کل مزارعی که آمار آن‌ها دریافت شده ۱۰۰۴ مزرعه می‌باشد که مساحت آن‌ها از ۴ تا ۲۵ هکتار متغییر است. برای هر مزرعه بسته به نوع کاشت آن در هر سال، یک عملکرد محصول ثبت شده است. برای حذف مقادیر پرت و کاهش اشتباهات احتمالی در اندازه‌گیری‌ها، از مزارع مشابه میانگین‌گیری شد، بدین صورت، برای هر نوع محصول، یک شاخص عملکرد استخراج شد. همچنین، در مزارع یکسان از لحاظ نوع کشت، مقادیر تبخیر-تعرق، شاخص‌های NDVI، LAI، SAVI، و دمای سطح زمین (LST) نیز میانگین‌گیری به عمل آمد. مقایسه سه‌ساله تغییرات این شاخص‌ها نشان می‌دهد که عملکرد تولید محصولات با میزان تبخیر-تعرق آن‌ها دارای رابطه است: ضریب همبستگی عملکرد محصول و میزان



شکل ۸. رابطه میان عملکرد محصول با تبخیر-تعرق، شاخص‌های طیفی و دمای سطح زمین

برآورد ضریب محصولات کشاورزی کشت و صنعت مغان ...



شکل ۹. رابطه میان شاخص‌های طیفی و دمای سطح زمین

قابل درون‌یابی است. مقایسه ضرایب گیاهی به‌دست آمده برای محصولات عمده زراعی، با برآوردهای مشابه توسط دیگران، نشان‌دهنده نزدیکی نتایج است. برای برآورد تبخیر-تعرق از روش پنمن مونتیث، که طبق مستندات فائو، معتبرترین روش در این زمینه است، استفاده شد. اما همزمان دو روش هارگریوز و برتی نیز بکار رفته است. این کار برای این است که نتایج روش پنمن مونتیث، مورد ارزیابی قرار گیرد؛ چرا که روش پنمن مونتیث، براساس باندهای تصویر، عمل می‌کند، اما دو روش دیگر، تنها براساس پارامترهای اقلیمی و بدون استفاده از تصویر ماهواره‌ای عمل می‌کنند. مقایسه روش‌ها حاکی از نزدیکی نتایج آن‌هاست. با توجه به شیب کم منطقه، مناسب‌ترین روش برای برآورد بارش موثر، روش فائو برای شیب‌های کمتر از پنج درصد است. از آنجایی که زمین‌های کشاورزی غالباً دارای شیب کمی هستند، احتمالاً این روش، برای دیگر مناطق جلگه‌ای کشور نیز مناسب است. از میان برآوردهای صورت‌گرفته برای نیاز آبی محصولات کشت و صنعت مغان در سال زراعی ۱۳۹۶، کمترین نیاز آبی به جو دیم اختصاص دارد (۲۷۲ میلی‌متر) و بیشترین نیاز آبی به باغ زیتون (۱۵۳۹ میلی‌متر) و مزرعه یونجه (۱۰۸۳ میلی‌متر) مربوط می‌شود.

در صورت در دسترس نبودن سری‌های زمانی داده‌های ماهواره‌ای، و به‌ویژه برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌توان از منحنی ضریب محصول برای برآورد تبخیر-تعرق مزارع و در نتیجه میزان نیاز آبی آنها استفاده کرد. برای این امر برآورد ضریب محصول در مقاطع اصلی دوره رشد لازم است. نکته حائز اهمیت اینجاست که ضریب محصول بسته به نوع محصول و منطقه جغرافیایی کشت، متفاوت است. برآورد ضریب محلی محصولات کشاورزی منطقه کشت و صنعت مغان از مهمترین نتایج این تحقیق است. هرچه فواصل بین اندازه‌گیری‌ها از لحاظ زمانی کمتر باشد برآورد کلی ضریب محصول و در نتیجه نیاز آبی مزارع به واقعیت نزدیکتر خواهد بود. در حالت بهینه لازم است که اندازه‌گیری‌ها، تغییرات رشد محصول و تغییرات آب و هوایی را به صورت حداکثری پوشش دهد، چراکه نیاز آبی محصول توسط این دو عامل کنترل می‌شود. در این تحقیق، برای تخمین ضرایب محصولات منطقه کشت و صنعت مغان، از تصاویر ماهواره‌ای با فاصله زمانی میانگین ۱۳ روز استفاده شده است که می‌تواند توزیع زمانی قابل قبولی باشد؛ چراکه تغییرات رشد گیاه و تغییرات آب و هوایی در این بازه به‌طور معمول زیاد نبوده و با خطای کم

با توجه به کافی نبودن منابع آب سطحی کشور، وضعیت نامناسب سفره‌های آب زیرزمینی و خشکسالی‌های متوالی در کشور، مناسب‌ترین راه برای برآورد نیاز آبی زمین‌های کشاورزی و مدیریت آب، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور است. با بهره‌گیری از این روش‌ها می‌توان در جهت صرفه جویی و استفاده بهینه‌تر از آب، در حوزه کشاورزی قدم برداشت.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از پژوهشگاه فضایی ایران که تسهیلات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری لازم برای انجام این تحقیق را در اختیار گذاشت، تشکر می‌کند. از کارشناسان کشت و صنعت مغان، به خاطر همکاری و ارائه آمار عملکرد محصولات قردانی می‌شود. همچنین از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) نیز، جهت تامین تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع قردانی می‌شود.

۷- منابع

احسانی، م. و خالدی، ه.، ۱۳۸۲، شناخت و ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی به منظور تأمین امنیت آبی و غذایی کشور، یازدهمین همایش ملی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

بیران، ص. و هنربخش، ن. ۱۳۸۶: بحران وضعیت آب در ایران و جهان، پژوهش‌نامه مطالعات توسعه پایدار و محیط زیست، شماره اول، تهران، اندیشه برتر پویا.

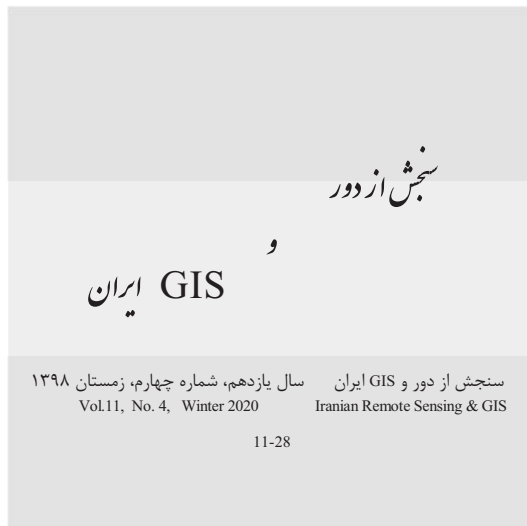
میرموسوی، س. ح.، پناهی، ح.، اکبری، ح. و اکبرزاده، ی.، ۱۳۹۱، واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET₀) و محاسبه نیاز آبی (ET_c) گیاه زیتون در استان کرمانشاه، جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۳، صفحه ۴۵ تا ۶۴.

بررسی‌ها نشان داد که بین ضرایب محصول و شاخص‌های طیفی گیاه، همبستگی وجود دارد. این همبستگی بسته به نوع محصول در طول دوره رشد نوسان نشان می‌دهد. از رابطه بین شاخص‌های طیفی گیاه و ضرایب گیاهی (بدون نیاز به محاسبه تبخیر-تعرق)، می‌توان مستقیماً برای تخمین ضریب محصول و نیاز آبی محصولات استفاده کرد. طبق نتایج، بین میزان تبخیر-تعرق و عملکرد محصول، رابطه وجود دارد. تحت تاثیر میزان دریافت انرژی و فعالیت ساختمان گیاهان هرچه میزان تبخیر-تعرق محصول بالاتر باشد، میزان تولید بر واحد سطح بالاتر است. بررسی اندازه‌گیری‌های سه ساله نشان می‌دهد که ضریب همبستگی میزان تبخیر-تعرق و عملکرد محصول برای محصولات گندم، جو و یونجه حدود ۰/۷ است. این همبستگی برای مزارع پنبه، چغندر قند و کلزا پایین‌تر است. قابل ذکر است که محصول اصلی چغندر قند در زیر سطح خاک بوده و لذا طبیعی است که شاخص‌های طیفی اندازه‌گیری شده ممکن است دارای رابطه قوی با عملکرد محصول نباشند. ضعیف بودن روابط بین شاخص‌های طیفی و عملکرد محصول برای محصول کلزا مستلزم مطالعه بیشتر است؛ اما به نظر می‌رسد میزان عملکرد بالایی این محصول (نسبت به محصولاتی همچون گندم، جو و یونجه)، از قوی بودن رابطه‌ها کاسته است.

عملکرد تولید همچنین با مقادیر شاخص‌های طیفی NDVI، LAI و SAVI رابطه نشان می‌دهد. خود شاخص‌های طیفی نیز با هم‌دیگر دارای رابطه قوی هستند. شاخص‌های LAI، NDVI و SAVI کمابیش بازخوردهایی از خصوصیات فیزیکی سطح مزرعه بوده و از این‌رو بطور نسبی همبسته هستند. اما هیچکدام از عملکرد تولید و یا شاخص‌های طیفی با دمای سطح زمین رابطه‌ای نشان نمی‌دهد. شاخص دمای سطح، علاوه بر خصوصیات فیزیکی، تحت تاثیر ساختمان و بیوشیمی گیاهان نیز بوده و به همین دلیل لزوماً با سایر شاخص‌ها همبسته نمی‌باشد.

- Allen, R. G., Tasumi, M. & Trezza, R., 2002, **Surface energy Balance Algorithm for Land**, Advanced training and user's manual, Idaho Implementation, Version 1.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L. & Bastiaanssen, W., et al., 2007, **Satellite-based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133, 395-406.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Robison, C.W., Garcia, M., Toll, D., Arsenault, K., Hendrickx, J.M.H. & Kjaersgaard, J., 2008, **Comparison of Evapotranspiration Images Derived from MODIS and Landsat along the Middle Rio Grande**, American Geophysical Union, Fall Meeting 2008, abstract id. H43G-1094.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. & Jensen, M.E., 2011, **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy**, Agric. Water Manag.
- Bashir, M., Hata, T., Abdelhadi, A., Tanakamaru, H., & Tada, A., 2006, **Satellite-Based Evapotranspiration and Crop Coefficient for Irrigated Sorghum in the Gezira Scheme, Sudan**, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 793-817.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. & Holtslag, A.A.M.A., 1998, **Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation**, Journal of Hydrology, 212-213, 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., et al., 1998, **A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 2. Validation**, Journal of Hydrology, 212-213, 213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000, **SEBAL-based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey**, Journal of Hydrology, 229, 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M. & Chandrapala, L., 2003, **Water Balance Variability across Sri Lanka for Assessing Agricultural and Environmental Water Use**, Agricultural Water Management, 58, 171-192.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., & Allen, R.G., 2005, **SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water Resources Management under Actual Field Conditions**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131, 85-93.
- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., Borin, M., 2014, **Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy**, Agric. Water Manage. 140, 20-25.
- Bhattarai, N., Dougherty, M., Marzen, L.J., & Kalin, L., 2012, **Validation of Evaporation Estimates from a Modified Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) Model in the South-Eastern United States**, Remote Sensing Letters, 511-519.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W., 1977, **Guideline for predicting Crop water requirements**, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Dastane, N.G., 2013, **Effective rainfall**, Irrigation and drainage paper 25, FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/X5560E/X5560E00.htm>.
- Duchemin, J., Hadria, R., Er-Raki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J., Karroui, H., Khabba, S., Mougenot, B., Olioso, A., Rodriguez, J.-C. & Simonneau, V., 2006, **Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices**, Agric. Water Manage., 79, 1-27.
- Droogers, P., 2000, **Estimating Actual Evapotranspiration using a Detailed Agro-Hydrological Model**, Journal of Hydrology, 229, 50-58.

- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masouka, E., Wolfe, R.E., Saleous, S., Roy, D.P. & Morisette, J.T., 2002, **An overview of MODIS Land data processing and product status**, Remote Sensing of Environment 83, 3e15.
- Kamble, B., Kilic, A., Hubbard, K., 2013, **Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index**, Remote Sensing, 5(4), 1588-1602.
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, 2016, Department of the Interior U.S. Geological Survey, USGS, Version 2.
- Landsat Collections, 2016, **United States Geological Survey (USGS)**. <http://landsat.usgs.gov/landsatcollections.php>.
- Olmedo, G.F., Ortega-Farias, S., Fuente-Saize, D., Fonseca-Luego, D. & Fuentes-Penailillo, F., 2016, **water: Tools and Functions to Estimate Actual Evapotranspiration Using Land Surface Energy Balance Models in R**, The R Journal, 8:2, pages 352-369.
- Paiva, C.M., Franca, G.B., Liu, W.T.H. & Rotunno Filho, O.C., 2011, **A Comparison of Experimental Energy Balance Components Data and SEBAL Model Results in Dourados, Brazil**, International Journal of Remote Sensing, 32, 1731-1745.
- Penman, L.H., 1963, **Vegetation and Hydrology**, Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.,125.
- Pescod, M. B., 1992, **Water treatment and use in agriculture**, Fao Irrigation and drainage; Paper NO. 55.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., et al., 2014, **Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research**, Remote Sensing of Environment, 145, 154-172.
- Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Collischonn, W., Aragao, L. E., Rocha, H. R., & Malhi, Y. S. A, 2012, **MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas**, Remote Sensing, 4: 703-25.
- Santos, C., Lorite, I.J., Allen, R.G., & Tasumi, M., 2012, **Aerodynamic Parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) Model for ET Estimation in Rain fed Olive Orchards of Andalusia, Spain**, Water Resources Management, 26, 3267-3283.
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. & Wright, J. L., 2005a, **Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves**, J. Irrig. and Drain. Engrg, ASCE 131(1):94-109.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. & Wright, J. L., 2005b, **Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S**, J. Irrigation and Drainage Systems, 19:355-376.
- Tasumi, M., Trezza, R. & Allen, R.G., 2006, **METRIC Manual for MODIS Image Processing** Version 1.0. University of Idaho R&E Center, Kimberly, Idaho. 67 p.
- Teixeira, A.H.d.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. & Bos, M.G., 2009, **Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: part A: calibration and validation**, Agricultural and Forest Meteorology, 149 (3-4), 462-476.
- Zhe Zhu, Curtis E. Woodcock, 2011, **Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery**, Remote Sensing of Environment 118 (2012) 83-94. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/256850150>.



Estimation of Crop Coefficients in the Moghan Cultivation Industry and the Study of Relationship between Evapotranspiration and Yield Performance

Moradi, A.^{1*}, Babaei, H.¹, Alimohammadi, A.², Radiom, S.¹

1. Space Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
2. Associate professor at K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The increasing shortage of the renewable water resources in the country has made the farm water needs estimation to become as one of the important priorities in agricultural water management. Farm water needs are normally controlled by climatologic factors. It equals to the reference evapotranspiration which is corrected by a scaling factor associated to the crop kind and to local characteristics. In this research, using Landsat satellite imagery, we estimated and compared the crop coefficients for main agricultural crops in the Moghan cultivation industry, from two procedures: the first based on evapotranspiration measuring, and the second based on NDVI measuring. The comparisons in the case of the five main crops showed that the Root Mean Square Errors are within an acceptable range, less than 0.28. In the following, the evapotranspiration based crop coefficient has been used in order to estimate farm water needs. Farm's water needs are indeed estimated by six methods: a combination of two actual evapotranspiration and three reference evapotranspiration ways. Among the six methods, the Metric/PenmanMonteith method was selected for final step, i.e. farm irrigation needs. The farm irrigation needs is equivalent to farm water need minus effective rain. We compared four different ways for estimating the effective rains but preferred the FAO method assigned for low slopes. Based on our results, farm irrigation needs in the Moghan cultivation industry range from 270 mm (for rainfed barley) to 1500 mm (olive groves). Statistical investigation in three years data revealed a dependency between yield performance and evapotranspiration rate. In addition, it showed that yield performance is correlated with crop spectral indices such as NDVI, LAI and SAVI. The primary goal of this research is to estimate local agricultural crop coefficient in the Moghan cultivation industry. The second goal is to investigate of relationships between crop coefficient and crop spectral indices in order to make the crop coefficient estimable directly from spectral indices.

Keywords: Evapotranspiration, Crop Coefficient, Water Need, Moghan Cultivation Industry.