

تخمین تبخیر - تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان

به کمک سنجش از دور

محمد تقی دستورانی^{۱*}، سمانه پورمحمدی و محمدحسن رحیمیان

دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد؛

mdastorani@yazduni.ac.ir

کارشناس ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه یزد؛

s.poormohammadi@yahoo.com

کارشناس آبیاری و زهکشی، مرکز ملی تحقیقات شوری؛

mbrahimian@gmail.com

چکیده

برآورد دقیق میزان تبخیر - تعرق واقعی محصولات زراعی و باغی اهمیت ویژه ای در برنامه ریزی و بهینه سازی آب خصوصاً در مناطق خشک و کم آب دارد. در این تحقیق، ارزیابی الگوریتم سبال (توازن انرژی سطحی زمین) در برآورد تبخیر - تعرق واقعی به تخمین تبخیر - تعرق واقعی گیاه پسته منطقه اردکان در استان یزد انجام شد. برای این کار از یک سری زمانی تصاویر ماهواره ای مودیس مشتمل بر ۱۲ تصویر در طول دوره رشد پسته استفاده و نقشه تبخیر - تعرق درختان پسته در منطقه مطالعاتی تهیه شد. نتایج تحقیق نشان داد که متوسط تبخیر - تعرق واقعی پسته در سال مورد نظر و در طول یک فصل کامل رشد در منطقه مطالعاتی ۱۱۳۳ میلی متر است که در مقایسه با مقدار آب مصرفی در منطقه مطالعاتی بسیار کمتر است. نتایج حاکی از ضرورت برنامه ریزی به منظور تدوین تقویم مناسب آبیاری، و نیز توصیه دور و عمق مناسب برای آبیاری باغات پسته اردکان است. با این اقدامات، ضمن افزایش بهره‌وری، از هدر رفت مقادیر قابل توجه آب به دلیل آبیاری بیش از حد نیز جلوگیری خواهد شد.

کلمات کلیدی: تصاویر ماهواره ای مودیس، آگوریتم سبال، مودیس، اردکان

مقدمه

- تعرق محسوب می‌شود (۱۰). در گیاهان درختچه‌ای^۳ یا گیاهان چند ساله و علوفه ای‌ها روش بیلان آب خاک یک روش استاندارد و متداول محسوب می‌شود. اما، در مورد درختان و باغات میوه و تاکستان‌ها این روش با برخی مشکلات همراه است. یکی از مشکلات آن استفاده از انواع روش‌های آبیاری در

به طور کلی، دو راه اصلی برای تخمین تبخیر - تعرق گیاه در شرایط مزرعه‌ای وجود دارد. روش اول استفاده از معادله بیلان آب خاک^۲ در مزرعه است. در این روش تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های آب کنترل و اندازه گیری می‌شود و جزء باقیمانده به عنوان مقدار تبخیر

۱. یزد - دانشگاه یزد - دانشکده منابع طبیعی - کدپستی: ۸۹۱۵۸۱۶۴۳۳

* دریافت: آبان، ۱۳۹۰ و پذیرش: اسفند، ۱۳۹۰

^۲ -Soil water balance

^۳ -Herbaceous crops

به هر حال این روشها هزینه و نیروی متخصص زیادی را خصوصاً برای سطوح وسیع صرف می‌کنند. از این رو استفاده از روشهای کم‌هزینه‌تر نظیر تکنیکهای سنجش از دور^۴ از جمله گرایشهای اخیر محققین در این زمینه بود و آنها این روش را به عنوان سومین و جدیدترین راه حل برای محاسبه ET واقعی در مزرعه دانسته‌اند (۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵).

آلگوریتمهایی که با استفاده از اطلاعات سنجش از دور اقدام به محاسبه اجزای معادله بیلان انرژی^۵ کرده و سپس تبخیر - تعرق واقعی گیاهان را محاسبه می‌کنند متعدد هستند.

در ایران نیز از این روشها در چندین نقطه کشور استفاده و نتایج نسبتاً مناسبی بدست آمده است (۱، ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۲۶ و ۲۹).

این روشها نیازمند حل معادله بیلان انرژی در سطح زمین است که در آن تبخیر - تعرق واقعی (یا همان شار گرمای نهان LE) بعنوان جزء باقیمانده اختلافات بین تشعشع خالص ورودی به سطح (R_n) و شار گرمای محسوس خارج شده از سطح (انرژی مورد استفاده برای گرم نمودن هوای مجاور H) و نیز شار گرمایی ورودی به زمین (انرژی ذخیره شده در خاک و پوشش گیاهی G) قابل محاسبه می‌باشد:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

تخمین هر یک از اجزای این معادله نیازمند مجموعه‌ای از داده‌هاست که ضمن دارا بودن کیفیت و دقت زمانی مناسب بتواند تغییرات مکانی هر یک از این آنها را نیز به خوبی نمایش دهد. مقدار R_n تفاضل بین شارهای تشعشعی خروجی (\uparrow) و ورودی (\downarrow) است که به صورت طول موجهای بلند (L) و کوتاه (S) به محدوده مجاور سطح زمین وارد و خارج شده و تابعی از مقادیر آلیدوی^۶ سطحی (α_0) و ضریب گسیلندگی^۷ سطحی (ε_0) است.

این نوع از پوششهای گیاهی است. چنانچه از سیستم آبیاری میکرو استفاده شود، الگوی کاربرد آب در باغات از نظر مکانی متغیر است و لذا امکان نمونه برداری از خاک برای دستیابی به میزان دقیق آب خاک بسیار مشکل می‌گردد. دلیل دیگر برای این امر نیز به توزیع سیستم ریشه درختان برمی‌گردد.

توزیع متفاوت سیستم ریشه در نقاط مختلف یک باغ سبب می‌شود تا الگوی جذب آب توسط گیاه نیز متفاوت شود و نتوان با تعداد معدودی از نمونه برداری به اجزای معادله بیلان آبی رسید. همچنین نفوذ عمقی آب و یا جذب آب از اعماق پایینی ریشه توسط درخت میتواند باعث ایجاد خطا در روش بیلان آب خاک گردد (۱۰).

روش دوم برای اندازه گیری ET در مزرعه به صورت مقدار واقعی^۱ از طریق نصب لایسیمتر اندازه گیری می‌شود. این روش با تمامی نقاط ضعف و قوت تا کنون به عنوان تنها روش اندازه گیری ET واقعی در مزرعه مطرح است. البته پیشرفتهایی نیز اخیراً در این زمینه صورت گرفته که اقدام به اندازه گیری مستقیم شار بخار آب خارج شده از باغات توسط ابزاری به نام ادی کواریانس^۲ می‌نماید (۳۳). یکی از محدودیتهای روش اخیر این است که نیاز به باغاتی با پوشش گیاهی یکنواخت و نسبتاً بزرگ (حداقل ۲ یا ۳ هکتار) می‌باشد.

یکی از تکنیک‌هایی که در مورد درختان بکار رفته است اندازه گیری جریان شیره گیاهی با استفاده از روش بیلان حرارتی (۲۸) یا سنسورهای ایجاد پالسهای حرارتی (۱۷ و ۱۸) است که در سالیان اخیر استفاده شده و به صورت مستقیم میزان تعرق صورت گرفته از درخت را تخمین زده اند. استفاده از تکنیکهایی نظیر ادی کواریانس یا نسبت بوون^۳ امکان تخمین تبخیر - تعرق واقعی باغات را به صورت مستقیم فراهم می‌آورند (۳۱).

^۴ -Remote sensing

^۵ -Energy balance

^۶ -Albedo

^۷ -Emissivity

^۱ -Actual ET

^۲ -Eddy covariance

^۳ -Bowen ratio

از سطح زمین (Z_2) که وابسته به ارتفاع گیاهان و پوششهای سطحی است) محاسبه می‌نمایند.

روابط آیرودینامیکی موجود بیانگر ارتباط شار گرمای محسوس (H) با اختلاف دمای dT است که به صورت زیر قابل تخمین است:

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (5)$$

که ρ_{air} چگالی هوا، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 است که توسط یک سری روابط رفت و برگشتی و تا زمان ثابت شدن یک عامل به نام طول مونین-ابوخوف^۴ تعیین می‌گردد.

علت اصلی استفاده از dT به جای T_0 (دمای سطح زمین) در فرمول بالا به مشکلات موجود در تعیین دقیق دمای سطح زمین توسط ماهواره بدلیل وجود عدم قطعیتها در مورد غلیظ یا رقیق بودن جو و نیز تصحیحات اتمسفری سنجنده بر می‌گردد (۱۱).

T_0 محاسبه شده توسط ماهواره (به صورت دمای رادیومتریکی و یا جنبشی) ممکن است که متفاوت از دمای آیرودینامیکی باشد که قادر به عقب راندن فرایند انتقال گرما در حد چندین درجه است (۲۲، ۲۵ و ۲۷).

با این توضیحات مشخص می‌گردد که بین خصوصیات سطحی زمین و هوای مجاور سطح تفاوت‌هایی وجود دارد که از روی این تغییرات و تفاوتها پارامترهای مورد نیاز برای حل و محاسبه مقدار باقیمانده در معادله بیلان انرژی استفاده می‌شود. لذا در این شرایط ضریب آلیدو به آلیدوی سیاره‌ای (α_p) و آلیدوی سطحی (α_0) و همچنین ضریب گسیلندگی به گسیلندگی هوا (ϵ_a) و گسیلندگی سطحی زمین (ϵ_0) تفکیک شده است که هر یک تابعی از عوامل مختلفی خواهند بود. روابط ساده زیر نحوه محاسبه هر یک را نشان می‌دهند.

(۲)

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha_0 R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow}$$

مقدار G نیز که معرف شار گرمایی خاک در اواسط روز می‌باشد توسط رابطه تجربی باستانسن (۱۴) به صورت تابعی از دمای سطحی زمین (T_0)، آلیدوی سطحی زمین و شاخص معروف NDVI قابل محاسبه است:

(۳)

$$\frac{G}{R_n} = (T_0 - 27315)(0.0038 + 0.0074\epsilon_0)(1 - 0.98NDVI)$$

یکی دیگر از اجزای معادله بیلان انرژی شار گرمای محسوس (H) است، راه‌حلهای متعددی برای محاسبه این جزء از معادله انرژی وجود دارد که سبال^۱ (۱۳) از معتبرترین و پرکاربردترین آلوگوریتم‌ها برای محاسبه H در سطح دنیا است. فرض بکار رفته در هر دوی این روشها این است که اختلاف دمای بین سطح زمین و هوای مجاور چسبیده به سطح (dT)، به دمای سطح زمین (T_0) وابسته بوده که به صورت خطی تغییر می‌کند. فرمول زیر بیانگر این رابطه خطی است (۱۲):

$$dT = a + bT_0 \quad (4)$$

مقادیر a و b در این فرمول توسط دو پیکسل انتخابی بر روی هر تصویر ماهواره‌ای به نام پیکسل‌های حد نهایی^۲ یا همان پیکسل‌های گرم و سرد^۳ و به صورت تجربی تعیین می‌شوند. فرض بکار رفته در مورد پیکسل گرم این است که این پیکسل هیچ گرمای نهانی را منتشر نمی‌کند. به عبارتی دیگر مقدار تبخیر - تعرق آن نزدیک به صفر است ($ET \approx 0$) در حالی که پیکسل سرد حداکثر تبخیر - تعرق را خواهد داشت (۱۱). در واقع dT همان اختلاف دمای بین دو نقطه نزدیک زمین با فاصله ناچیز از هم (Z_1 و Z_2) است. عموماً دمای سطح زمین را در ارتفاع ۰/۱ متری از زمین (Z_1) و دمای هوای مجاور را در ارتفاع ۲ تا ۱۰ متری

¹ -SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)

² -Extreme pixels

³ -Hot and Cold pixels

⁴ -Monin-Obukhov length

۴۰ تا ۶۶ روز متفاوت بوده و در هر نوبت آبیاری بین ۲۰ تا ۶۶ سانتی متر آب به خاک اضافه شد (۳).

اکثر آب مورد نیاز آبیاری توسط چاههای عمیق و نیمه عمیق تامین شده، که هدایت الکتریکی آنها بین ۱۰ الی ۲۳ دسی زیمنس بر متر متغیر بود. نتایج تجزیه خاک منطقه حاکی از شوری خاک منطقه بین ۱/۹ تا ۵۳/۴ دسی زیمنس بر متر بود (۵).

- محاسبه تبخیر - تفرق پتانسیل (ET_p)

با بررسی فیزیولوژیکی نشان داد که گیاه پسته سه مرحله رشدی بارز در این گیاه دارد (۲۱). مرحله اول از موقع گرده افشانی تا زمانی است که پوست پسته (اندوکارپ) بزرگ شده اما هنوز نرم بوده و استخوانی نشده است. رشد اندامهای هوایی گیاه در مرحله دوم اتفاق می افتد. همچنین در این مرحله پوست پسته ضخیم و سفت (استخوانی) می شود.

در مرحله سوم دانه پسته شروع به پر شدن توسط مغز می کند. سپس دانه می رسد و پوست آن می ترکد (با اصطلاحاً خندان می شود). در این مرحله پوست نازک بیرونی آن نیز از بین می رود.

مراحل مذکور از این منظر حائز اهمیت است که با تشخیص زمان وقوع آنها در منطقه مطالعاتی، امکان تخصیص ضریب گیاهی (K_c) به هر یک از دوره های رشد پسته فراهم و بدینوسیله نیاز آبی استاندارد گیاه (ET_c) از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad \text{معادله ۸}$$

در منطقه مطالعاتی، شروع مرحله اول از دوره رشد پسته نیمه فروردین و پایان دوره سوم انتهای شهریورماه بود ولی تامین نیاز آبی گیاه پسته به همین دوره محدود نمی شود. بلکه این گیاه در دوره برداشت محصول و همچنین دوره

$$\alpha_p = f(NIR, R) \quad \alpha_0 = f\left(\alpha_p, \frac{n}{N}\right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_a = f\left(\frac{n}{N}\right) \quad \varepsilon_0 = f(NDVI) \quad (7)$$

همانطور که ملاحظه می شود در این معادلات آلیدوی سیاره ای از باندهای قرمز (R) و نزدیک مادون قرمز (NIR) تصاویر ماهواره ای محاسبه می شود و آلیدوی سطح نیز تابعی از آلیدوی سیاره ای و نسبت ساعات واقعی آفتابی (n) به حداکثر ساعات آفتابی ممکن (N) در آن روز است.

گسیلندگی هوا نیز تابعی از n/N بوده در حالی که گسیلندگی سطحی زمین تابعی از NDVI است که از طریق باندهای R و NIR ماهواره ای قابل تعیین است. به همین ترتیب مقادیر دما نیز به دمای هوای مجاور سطح زمین (T_a) و دمای سطح زمین (T₀) تفکیک خواهد شد که اولی از طریق آمار هواشناسی و دومی از طریق باندهای حرارتی^۱ تصاویر ماهواره ای قابل تعیین است. لذا هدف اصلی این تحقیق ارزیابی کارایی تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سبال در برآورد میزان تبخیر - تفرق واقعی باغات پسته در منطقه خشک اردکان در استان یزد بود.

مواد و روشها

- معرفی منطقه مطالعاتی

محل اجرای این طرح باغات پسته شمال اردکان در استان یزد بود. مساحت کلی این محدوده ۱۱۰۰۰ هکتار است که البته وسعت خالص باغات تحت کشت پسته کمتر از این مقدار و حدود ۳۷۵۰ هکتار بود. این منطقه در طول جغرافیایی ۵۵° ۵۳' تا ۵۴° ۰۵' شرقی و عرض جغرافیایی ۱۷° ۳۲' تا ۱۷° ۲۴' ۳۲' درجه شمالی واقع بود. متوسط بارندگی سالانه این منطقه ۶۴ میلی متر و متوسط درجه حرارت آن ۱۹ درجه سانتیگراد بود. بافت خاک در اکثر باغ های این منطقه لوم و سیلتی لوم است. بر اساس گزارشات موجود، مجموع عمق آب آبیاری اعمال شده در این باغ ها بین ۱۶۰۰ تا ۳۶۰۰ میلی متر در سال متغیر بود. فاصله بین آبیاری ها از

² -Hall

¹ -Thermal bands

اصلاح و سپس بر اساس تقویم فنولوژی رشد پسته در منطقه مطالعاتی، به تمامی روزهای دوره رشد آن تعمیم داده شده است.

– تخمین تبخیر - تفرق واقعی (ET_a) با تکنیک سنجش از دور و الگوریتم سال

تخمین تبخیر - تفرق واقعی پسته از یک سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس مشتمل بر ۱۲ تصویر مختلف در طول دوره رشد پسته استفاده شد (جدول ۱). همچنین اطلاعات اقلیمی مربوط به ایستگاه هواشناسی اردکان و نیز برخی اطلاعات محلی و بازدیدهای صحرائی در این کار استفاده شدند.

پس از برداشت^۱ نیز به آبیاری مداوم نیاز دارد. بدین ترتیب انتهای آبانماه هر سال به منزله انتهای دوره رشد این گیاه محسوب خواهد شد.

روش محاسبه تبخیر - تفرق مرجع (ET_0) در این تحقیق فائو-پنمن-مانتیش است. امروزه این روش در سطح دنیا مقبولیت فراوانی دارد (۱۰). همچنین برای ضریب گیاهی (K_c) پسته از مقادیر توصیه شده توسط فائو (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) استفاده شد. این ضریب برای مراحل مختلف رشد پسته (ابتدایی - میانی - انتهایی) تعریف شده که با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی (رطوبت و سرعت باد) و شرایط فیزیکی گیاه (ارتفاع درخت) در منطقه مطالعاتی

جدول ۱ - تاریخ اخذ تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای محاسبه تبخیر - تفرق واقعی پسته در منطقه مطالعاتی

ردیف/شماره تصویر	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی
۱	۱ آپریل ۲۰۰۷	۱۲ فروردین ۱۳۸۶
۲	۱۷ آپریل ۲۰۰۷	۲۸ فروردین ۱۳۸۶
۳	۱۵ می ۲۰۰۷	۲۵ اردیبهشت ۱۳۸۶
۴	۷ ژوئن ۲۰۰۷	۱۷ خرداد ۱۳۸۶
۵	۲۳ ژوئن ۲۰۰۷	۲ تیر ۱۳۸۶
۶	۲۶ ژولای ۲۰۰۷	۴ مرداد ۱۳۸۶
۷	۱۱ آگوست ۲۰۰۷	۲۰ مرداد ۱۳۸۶
۸	۲۶ آگوست ۲۰۰۷	۴ شهریور ۱۳۸۶
۹	۱۱ سپتامبر ۲۰۰۷	۲۰ شهریور ۱۳۸۶
۱۰	۲۷ سپتامبر ۲۰۰۷	۵ مهر ۱۳۸۶
۱۱	۲۹ اکتبر ۲۰۰۷	۷ آبان ۱۳۸۶
۱۲	۱۴ نوامبر ۲۰۰۷	۲۳ آبان ۱۳۸۶

^۱ - Post harvest

بنابراین امکان محاسبه تبخیر - تفرق واقعی روزانه در روزهای میانی هر یک از این بازه‌های زمانی فراهم شد (تبخیر-تفرق واقعی در روزهای دارای تصویر یا ET_{a-day}). برای محاسبه تبخیر - تفرق واقعی تجمعی پسته در طول یک فصل کامل رشد، ابتدا مقادیر ET_{a-day} به مقادیر تبخیر-تفرق تجمعی در هر بازه زمانی ($ET_{a-period}$) تبدیل شد:

$$(ET_{a-period})_i = \frac{(ET_{a-day})_i}{(ET_o)_i} \sum_{n=1}^n (ET_o)_n \quad (12)$$

و سپس با تجمیع آنها، مقدار تبخیر - تفرق واقعی پسته در طول یک فصل کامل رشد ($ET_{a-season}$) محاسبه شد:

$$ET_{a-season} = \sum_{i=1}^{12} (ET_{a-period})_i \quad (13)$$

که در آن‌ها: روابط i شمارنده بازه‌های زمانی مورد نظر (از ۱ تا ۱۲)، n شمارنده روزهای واقع در درون هر یک از این بازه‌های زمانی (بین ۱۵ تا ۳۰ روز)، ET_o تبخیر - تفرق مرجع روزانه، $(ET_o)_i$ تبخیر-تفرق مرجع مربوط به روزی از بازه i که دارای تصویر است، $(ET_{a-day})_i$ تبخیر-تفرق واقعی مربوط به روزی از بازه i که دارای تصویر است می‌باشد.

با انجام این مراحل نقشه تبخیر - تفرق واقعی یک فصل رشد پسته در سطح کل باغات منطقه مطالعاتی تهیه شد. برای حذف اراضی بایر و مناطق مسکونی از فضای بین باغات، از نقشه ترکیب رنگی تصویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۰۶ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر کمک گرفته شد و مناطق بایر و مسکونی از روی آن مشخص و از نقشه تبخیر و تفرق واقعی حذف شدند. به دلیل این که نقشه تبخیر-تفرق رقمی^۴ نیز هست، لذا امکان استخراج ET_a هر نقطه از منطقه مطالعاتی، تجزیه و تحلیل هیستوگرام آن و نیز سایر محاسبات وجود داشته که در نتایج به آنها اشاره شده است.

تبخیر - تفرق واقعی پسته در این تحقیق از طریق الگوریتم توازن انرژی سبال (۱۳) تخمین زده شد. همانطوری که قبلاً نیز عنوان شد این الگوریتم امروزه مقبولیت فراوانی دارد و ارزیابی آن برای کاربردهای مختلف شروع شده است. اجزای بیلان انرژی محاسبه شده در این روش به صورت لحظه‌ای^۱ و مربوط به زمان گذر ماهواره بوده و لذا برای تعمیم آن به طول روز (به منظور محاسبه تبخیر - تفرق روزانه)، از پارامتر جزء تبخیری^۲ (EF) استفاده گردیده (۱۴) که روش محاسبه آن به صورت زیر بود.

$$EF = \frac{LE}{LE + H} \quad (10)$$

عوامل معادله فوق در قسمت مقدمه معرفی شد.

فرضیه استفاده شده در این روش ثابت بودن جزء تبخیری در طول روز و یا به عبارتی دیگر برابری جزء تبخیری لحظه‌ای و روزانه می‌باشد (۳۰ و ۱۶).

بسیاری از محققان دیگر نیز از همین فرضیه برای تعمیم نتایج لحظه‌ای به مقادیر روزانه استفاده نموده‌اند. با بدست آمدن جزء تبخیری برای هر یک از روزهای دارای تصویر، تبخیر - تفرق واقعی ۲۴ ساعته (روزانه) توسط رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_{a-24h} = \frac{EF * R_{n-24h}}{28.588} \quad (11)$$

که در آن: مقدار R_{n-24h} تشعشع خالص روزانه است که تابعی از آلیدوی سطح، قابلیت انتقال^۳ و طول موج کوتاه ورودی در ناحیه بالایی اتمسفر است.

در این تحقیق برای هر بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ روز، یک تصویر ماهواره‌ای اخذ شد (جمعاً ۱۲ تصویر که مشخصات آنها در جدول شماره (۱) ارائه شد. بنابراین طول فصل رشد پسته به ۱۲ بازه زمانی متناوب تقسیم و در وسط هر کدام از این بازه‌ها، یک تصویر ماهواره‌ای اختیار شد.

¹ -Instantaneous

² -Evaporative fraction

³ -Transmissivity

⁴ -Digital

نتایج و بحث

حدود ۲۳۰ روز است که از نیمه فروردین شروع و تا انتهای آبان ماه ادامه داشت. این دوره به صورت کلی قابل تقسیم به ۱۵ مرحله پانزده روزه است.

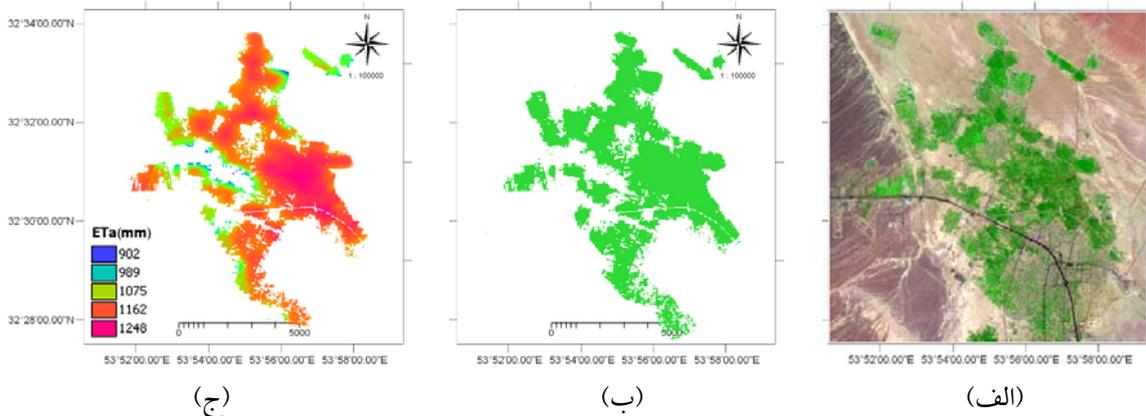
جدول شماره (۲) نشان دهنده مراحل مختلف رشد پسته در منطقه مطالعاتی و همچنین ضریب گیاهی، تبخیر- تعرق مرجع و استاندارد محاسبه شده مربوط به سال ۱۳۸۶ است. همانطوری که ملاحظه شد دوره رشد پسته در منطقه اردکان

جدول ۲- ضریب گیاهی، تبخیر- تعرق مرجع و استاندارد محاسبه شده در هر یک از مراحل مختلف رشد پسته در منطقه اردکان

نام مرحله	فولوزی پسته	دوره وقوع	ET _o (mm)	ضریب گیاهی	ET _c (mm)
مرحله ۱	گلدهی (Bloom) ظهور برگها (Leaf out)	۱۵ تا ۳۱ فروردین ۱ تا ۱۵ اردیبهشت	۹۳/۵ ۹۵/۰	۰/۰۷ ۰/۴۳	۶/۵ ۴۰/۸
مرحله ۲	حجیم شدن پوست (Shell Expansion) استخوانی شدن پوست (Shell Hardening)	۱۶ تا ۳۱ اردیبهشت ۱ تا ۱۵ خرداد	۱۱۲/۸ ۱۰۸/۱	۰/۶۸ ۰/۹۳	۷۶/۷ ۱۰۰/۵
مرحله ۳	استخوانی شدن پوست (Shell Hardening) استخوانی شدن پوست (Shell Hardening)	۱۶ تا ۳۱ خرداد ۱ تا ۱۵ تیر	۱۴۴/۵ ۱۳۴/۷	۱/۰۹ ۱/۱۷	۱۵۷/۶ ۱۵۷/۶
مرحله ۴	پر شدن دانه (Nut Filling) پر شدن دانه (Nut Filling) پر شدن / خندان شدن دانه (Nut Fill/Shell Split) خندان شدن (Shell Splitting) ترکیدن پوست نازک بیرونی (Hull Split)	۱۶ تا ۳۱ تیر ۱ تا ۱۵ مرداد ۱۶ تا ۳۱ مرداد ۱ تا ۱۵ شهریور ۱۶ تا ۳۱ شهریور	۱۴۵/۸ ۱۲۳/۰ ۱۲۳/۹ ۱۱۶/۹ ۹۸/۶	۱/۱۹ ۱/۱۹ ۱/۱۹ ۱/۱۲ ۰/۹۹	۱۷۳/۵ ۱۴۶/۳ ۱۴۷/۴ ۱۳۰/۹ ۹۷/۵
برداشت	برداشت (Harvest)	۱ تا ۱۵ مهر	۷۱/۵	۰/۸۷	۶۲/۱
پس از برداشت	پس از برداشت (Post harvest)	۱۶ تا ۳۰ مهر	۵۹/۰	۰/۶۷	۳۹/۵
برداشت	پس از برداشت (Post harvest)	۱ تا ۱۵ آبان	۴۴/۶	۰/۵۰	۲۲/۳
پس از برداشت	پس از برداشت (Post harvest)	۱۶ تا ۳۰ آبان	۴۳/۵	۰/۳۵	۱۵/۲
جمع کل			۱۵۱۵		۱۳۷۵

تنش‌های مختلف محیطی و از همه مهمتر شوری و خشکی بر این منطقه حاکم باشد. لذا، در عمل تبخیر- تعرق صورت گرفته به وسیله گیاه پسته (تبخیر- تعرق واقعی) کمتر از این مقدار خواهد بود. شکل شماره (۱)-ج نشان دهنده نقشه تبخیر- تعرق واقعی صورت گرفته از باغات پسته منطقه اردکان است. در این شکل، تصویر ماهواره‌ای محدوده مطالعاتی (۱-الف) و نیز نقشه باغات پسته مستخرج از آن (۱-ب) برای مقایسه و تطبیق با نقشه تبخیر- تعرق ارائه شده است. مقایسه این نقشه‌ها حکایت از این دارد که حداکثر تبخیر- تعرق در محدوده شرقی پسته زارها و عمدتاً درون پوشش‌های انبوه پسته وجود دارد.

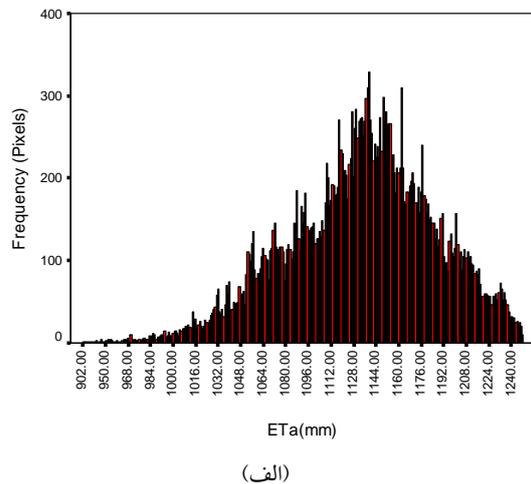
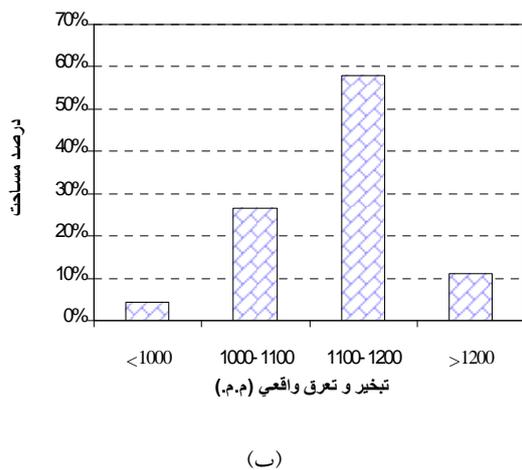
بر اساس محاسبات انجام شده، تبخیر- تعرق استاندارد پسته (ET_c) در منطقه اردکان در سال مذکور ۱۳۷۵ میلی‌متر است. آمار درازمدت و توصیه‌های موجود برای نیاز آبی پسته در منطقه مطالعاتی نیز تبخیر- تعرق پسته را حدود ۱۳۰۰ میلی-متر برآورد کرده‌اند که با مقدار محاسبه شده در سال ۱۳۸۶ تطابق نسبی دارد. نکته حائز اهمیت در این مورد این است که عدد محاسبه شده برای تبخیر- تعرق استاندارد مربوط به شرایطی است که گیاه تحت تنش‌های محیطی از قبیل خشکی، شوری و امراض مختلف نباشد. اما واقعیت امر چنین نیست. با توجه به معضل کمبود آب در منطقه و همچنین کیفیت منابع آب و خاک باغات پسته در منطقه اردکان، به نظر می‌رسد که



شکل ۱- الف) تصویر ماهواره‌ای لندست از منطقه اردکان، ب) نقشه باغات پسته، ج) نقشه تبخیر- تعرق واقعی باغات پسته در سال ۱۳۸۶

متغیر است. در شکل شماره ۲-ب نیز مساحت‌های اختصاص یافته به گروه‌های مختلف تبخیر- تعرق واقعی مشاهده می‌شود. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، بیش از ۵۵ درصد از مساحت باغات پسته منطقه مطالعاتی دارای تبخیر- تعرق بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر (متوسط ۱۱۵۰ م.م) در یک دوره کامل رشد هستند.

همچنین، به منظور بررسی تغییرات تبخیر- تعرق در منطقه مطالعاتی، نمودار فراوانی مقادیر عددی این نقشه (هیستوگرام) تهیه شد که در شکل ۲-الف ارائه شده است. بر این اساس، متوسط تبخیر- تعرق واقعی منطقه مطالعاتی در طول یک فصل کامل رشد پسته ۱۱۳۳ میلی‌متر است که این مقدار از ۹۰۲ تا ۱۲۴۸ میلی‌متر در نقاط مختلف آن



شکل ۲- الف) نمودار فراوانی پیکسل‌های نقشه تبخیر- تعرق، ب) درصد مساحت اختصاص یافته به کلاسهای مختلف تبخیر- تعرق باغات پسته اردکان در سال ۱۳۸۶

تحقیقات آب مصر^۳ (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸) اشاره نمود. وجه مشترک این منابع روش محاسبه تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) است که در تمامی آنها از روش فائو-پنمن - مانیتث استفاده شده است. در جدول شماره (۳) نتایج کسب شده از این روش‌ها برای محاسبه نیاز آبی پسته در منطقه مطالعاتی ارائه شده است. مقایسه این نتایج نشان دهنده اختلاف بین روش‌های مختلف محاسباتی است که در مورد کتاب برآورد نیاز آبی و همچنین مدل Optiwat این اختلافات به حداکثر خود می‌رسد. یکی از دلایل عمده این اختلافات به ارقام استفاده شده در آنها از جمله ضریب گیاهی (K_c) برمی‌گردد. به عنوان مثال، حداکثر ضریب گیاهی استفاده شده در کتاب نیاز آبی گیاهان ۰/۶ است (۶). به همین دلیل نیاز آبی کمتری نسبت به سایر روش‌ها بدست می‌دهد. این در حالی است که ضریب گیاهی توصیه شده به وسیله فائو در دوره میانی رشد پسته به ۱/۱۹ نیز می‌رسد (۱۰).

همانطوری که قبلاً نیز اشاره شد، به دلیل احتمال وجود تنش‌های مختلف محیطی در منطقه (خشکی، شوری، آفات و امراض و ...) امکان حصول حداکثر تبخیر - تعرق یا همان تبخیر - تعرق استاندارد پسته (ET_c) وجود نخواهد داشت. مقادیر تبخیر - تعرق واقعی (شکل ۱-ج و شکل ۲-الف) نیز موید همین مطلب است، به طوریکه بیشترین مقدار تبخیر - تعرق واقعی در منطقه مطالعاتی (۱۱۳۳ م.م) از تبخیر - تعرق استاندارد بدست آمده برای این منطقه (۱۳۷۵ م.م) کمتر است.

منابع معتبری که تا کنون اقدام به انتشار نیاز آبی پسته در کشور نموده‌اند، متعدد هستند که از جمله آنها می‌توان به کتاب برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶)، مدل نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران^۱ (سازمان هواشناسی و وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۱)، مدل بهینه سازی و برنامه ریزی مصرف آب کشاورزی^۲ (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۲) و همچنین مدل معروف ارائه شده به وسیله موسسه فائو، دانشگاه ساوسمپتون انگلیس و مرکز ملی

جدول ۳- مقایسه نتایج استخراج شده از مدل‌ها و مراجع موجود برای محاسبه نیاز آبی پسته (میلی‌متر) در منطقه اردکان - یزد

کتاب (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶)	FAO Cropwat	مدل Netwat	مدل Optiwat	آلگوریتم سبال (این تحقیق)
۷۷۱	۱۳۷۵	۱۲۷۴	۲۵۴۰	۱۱۳۳

مقدار قابل قبول و منطقی را برای تبخیر - تعرق پسته ارائه داده است. کاهش ۱۸ درصدی تبخیر - تعرق واقعی نسبت به مقدار استاندارد آن در سال مورد مطالعه حاکی از ایده آل بودن شرایط محیطی و مدیریتی در باغات پسته اردکان است که امری واقعی به نظر می‌رسد. گواه این امر نیز کمتر بودن عملکرد پسته نسبت به مقدار پتانسیل تولید

با توجه به تفاوت‌های موجود و همچنین در نظر گرفتن جمیع شرایط از قبیل تفاوت در روش محاسباتی و ضرایب گیاهی استفاده شده در هر روش، می‌توان گفت که تبخیر - تعرق محاسبه شده از طریق آلگوریتم سبال که شرایط واقعی حاکم بر منطقه مطالعاتی از قبیل تنش‌های محیطی و تغییرات مکانی مدیریت آبیاری را نیز در نظر گرفته است،

^۱ -Netwat

^۲ -Optiwat

^۳ -Cropwat

این محصول در این منطقه است.

حدودی می‌تواند به سوالات مربوط در زمینه تعیین دقیق تبخیر - تفرق پسته در شرایط کشور پاسخ دهد.

یکی از نکات حائز اهمیت در این زمینه توجه به تفاوت عددی بین تبخیر - تفرق پسته^۱ (ET) با عمق آب لازم برای آبیاری^۲ (CWR) است. آنچه که در این تحقیق بدست آمده، مقدار ET پسته است. در حالی که در تعیین CWR عواملی همچون راندمان و عمق آب لازم برای آبیاری منطقه توسعه ریشه نیز باید مد نظر قرار گیرد.

بر اساس شواهد موجود عمق آب آبیاری در یک دوره کامل رشد پسته در منطقه مطالعاتی بین ۱۶۰۰ تا ۳۶۰۰ میلی‌متر در سال متغیر است (چراغی و کریمی، ۱۳۸۶). مقایسه این اعداد با مقدار تبخیر - تفرق واقعی پسته (۱۱۳۳ میلی‌متر) نشان از تفاوت معنی‌دار بین میزان آب مورد نیاز و عمق آب آبیاری پسته در منطقه اردکان دارد. این حجم آبیاری بیش از حد که به دلیل عدم رعایت تقویم مناسب آبیاری و انتخاب دوره‌های طولانی آبیاری (۴۰ تا ۶۶ روز) به دلیل محدودیت‌های مدیریتی است، نه تنها باعث بروز تنش‌های خشکی در فواصل بین آبیاری‌ها می‌گردد، بلکه باعث اضافه شدن مقادیر قابل توجهی نمک از طریق آب آبیاری نسبتاً شور نیز می‌گردد. این مساله به تدریج به زوال منابع آب و خاک در منطقه منجر خواهد شد. بنابراین، توصیه می‌شود که برنامه ریزیها برای تعیین عمق، دور و زمان آبیاری با توجه به مقادیر تبخیر - تفرق واقعی پسته در منطقه مطالعاتی صورت گیرد.

نتیجه‌گیری

تا کنون برآوردهای متعددی در زمینه نیاز آبی پسته در کشور ارائه شده است. مبنای برخی از این توصیه‌ها محاسباتی بوده و برخی دیگر نیز از طریق اندازه‌گیری عمق آب آبیاری اعمال شده در دوره‌های مختلف آبیاری بوده است. همان‌طوری که در نتایج این تحقیق نیز آمده است روشهای محاسباتی موجود، نیاز آبی مختلفی را برای گیاه پسته ارائه می‌دهند. این اختلافات بیشتر ناشی از تفاوت در ضرایب گیاهی (K_c) استفاده شده در آنهاست. به عنوان مثال، ضرایب گیاهی توصیه شده به وسیله فائو به حدود دو برابر مقادیر استفاده شده در برخی منابع داخلی نیز می‌رسد. البته در این زمینه باید گفت که علاوه بر شرایط اقلیمی حاکم بر هر منطقه، عوامل دیگر نظیر سن درختان، نحوه آرایش آنها، مدیریت باغات و برنامه آبیاری آنها نیز از عوامل موثر بر تغییر ضریب گیاهی در هر منطقه محسوب شود که باید در این تفاوتها منظور شود.

بررسی این تفاوتها نیز مستلزم انجام مطالعات پایه و دقیق لایسیمتری است. این در حالی است که تحقیقات کمتری در زمینه تعیین نیاز آبی واقعی پسته از طریق روش‌های مستقیم (مطالعات لایسیمتری) و یا سایر روشها (توازن انرژی) در کشور مشاهده می‌شود. منابع خارجی نیز تبخیر - تفرق پسته را متفاوت ذکر کرده‌اند. به عنوان مثال کانبر در سال ۱۹۹۳، بیلگل و همکاران در سال ۱۹۹۹ و گلدنمیر و همکارانش در سال ۱۹۸۵ میلادی میزان تبخیر - تفرق پسته را به ترتیب معادل ۸۰۳، ۶۰۰ و ۱۰۱۸ میلیمتر گزارش کرده‌اند (اولنا و همکاران، ۲۰۰۵). البته با توجه به وجود تفاوت بین شرایط حاکم بر تحقیقات مذکور با شرایط اقلیمی و مدیریتی باغات پسته کشور، نمی‌توان عیناً از این اعداد و ارقام استفاده کرد.

تحقیق حاضر که حاصل استفاده از روش توازن انرژی در محاسبه نیاز آبی واقعی پسته در منطقه اردکان است تا

^۱ -Evapotranspiration

^۲ -Crop water requirement

فهرست منابع

۱. اصغر زاده ح.ع. و ح. ثنایی نژاد. ۱۳۸۵. تخمین تبخیر و تعرق گیاهان با استفاده از داده های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز تنگ کنشت کرمانشاه، همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی.
۲. پورمحمدی س. ۱۳۸۸. ارزیابی و برآورد اجزاء بیلان آبی در حوزه های مناطق خشک با بکارگیری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز منشاد یزد)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
۳. چراغی ع. م. و م. کریمی، ۱۳۸۶. ارزیابی مدیریت های بهره برداری از منابع آب و خاک شور باغات پسته شمال اردکان، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز ملی تحقیقات شوری.
۴. خاوریان نهزک ح. ۱۳۸۳. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای (مطالعه موردی: مزرعه نمونه ارتش استان گلستان) پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۵. دهقانی ف. و م. گلشن ۱۳۸۰. مدیریت منابع آب و خاک شور باغات پسته شمال اردکان (ارزیابی وضع موجود). گلشن، م. و م. میراب زاده (ویراستار). مجموعه مقالات جشنواره پسته. (صفحه ۳۲ - ۴۸). اردکان، ایران.
۶. فرشعی ع. ا.، م. ر. شریعتی، ر. جاراللهی، م. ر. قائمی، م. شهابی فر، م. ح. تولایی، ۱۳۷۶. برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور، حلد دوم: گیاهان باغی، وزارت جهاد کشاورزی، نشر آموزش کشاورزی.
۷. موذن پور، م. ۱۳۷۴. بررسی میزان مقاومت درختان پسته به خشکی و تعیین مناسبترین دور و عمق آبیاری، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات پسته رفسنجان.
۸. یعقوبی فشکی م.، ر.، قبادیان و ر.، عقیقی. ۱۳۸۸. کاربرد روش سبال در محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره ای، دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه کرمان.
9. Akbari M., N. Toomanian, P. Droogers, W. Bastiaanssen, and A. Gieske. 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 88: 99-109.
10. Allen, R.G., L.S., Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy: 300 pp.
11. Allen, R.G., M. Tasumi, A.T. Morse, and R. Trezza. 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in western US water rights regulation and planning. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 2005, 19 (3-4): 251-268.
12. Bastiaanssen, W. G. M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates." Ph.D. Dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands.
13. Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes, and A. A. M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1) Formulation. *Journal of Hydrology*, 212 (213):213-229.
14. Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229:87-100.
15. Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson and R.G. Allen. 2005. SEBALmodel with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (1):85-93.
16. Brutsaert, W., and Chen, D. 1996. Diurnal variation of surface fluxes during thorough drying (or severe drought) of natural prairie. *Water Resour. Res.* 32 (7): 2013-2019.

17. Cohen, Y., Fuchs, M., and Green, G.C. 1981. Improvement of the heat pulse method for measuring sap flow in the stem of trees and herbaceous plants. *Agronomie* 9:321-325.
18. Cohen, M., Goldhamer, D.A., Fereres, E, Girona, J. and M. Mata. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *J. Hort. Sci. and Biotech.* 76(1):55-60.
19. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 pp.
20. Doorenbos, J., A. H., Kassam, C.L.M., Bentvelsen, V., Branscheid, J.M.G.A., Plusje. 1979. Yield response to water, In: FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), no. 33 / FAO, Rome (Italy). Land and Water Development Div., 200 p.
21. Goldhamer, D.A. and R. Beede. 1993. Results of four years of regulated deficit irrigation on deep rooted pistachio trees. Annual Report of the California Pistachio Industry; Crop Year 1992-93. California Pistachio Commission. Fresno, CA 107-110
22. Kustas, W. P., et al. 1994. Surface energy balance estimates at local and regional scales using optical remote sensing from an aircraft platform and atmospheric data collected over semiarid rangelands." *Water Resour. Res.*, 30_5_, 1241-1259.
23. Mokhtari. M.H. 2005. agricultural drought impact assessment using remote sensing, Msc Thesis, ITC, The Netherland.
24. Mekonnen, G. G.M. Michael & Wim, Bastiaansen. 2000. A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya, *Irrigation and Drainage Systems* 14: 237-256.
25. Norman, J. M., W. P., Kustas, and , K. S. Humes.1995. "Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature." *Agric. Forest Meteorol.*, 77: 263-293.
26. Poormohammadi S., and M.H., Rahimian. 2009. Determination of groundwater evaporation using SEBAL algorithm (Case study: Azadegan plain, Khuzestan), national water resource conference with regional aspects, Shahroud Technical University, Iran
27. Qualls, R., and W. Brutsaert. 1996. Effect of vegetation density on the parameterization of scalar roughness to estimate spatially distributed sensible heat fluxes." *Water Resour. Res.*, 32(3): 645-652.
28. Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flow in the stem of intact plant. *J. Agric. Meteorol.* 37:9-17.
29. Sharifi M.A., W.G.M. Bastiaansen, and S.J. Zwart. 2008. DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR NATURAL DAMAGE ASSESSMENT BASED ON REMOTE SENSING AND BIO-PHYSICAL MODELS, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B2.
30. Shuttleworth, W.J., R.J., Gurney, A.Y., Hsu, J.P., and Ormsby. 1989. FIFE: the variation in energy partitioning at surface flux sites, remote sensing and large-scale global processes. In: Proc. Baltimore Symp., IAHS Red Book Series, 186:67-74.
31. Testi L, F.J. Villalobos, and F. Orgaz. 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agric For Meteorol* 121(1-2): 1-18.
32. Ulna, M., R., Kanber, P., Steduto, Y., Aydin, and K. Diker. 2005. Effects of different water and nitrogen levels on the yield and periodicity of Pistachio. *Turk J. Agric.*, 29: 39-49.
33. Villalobos, F.J., F. Orgaz, L. Testi and E. Fereres. 2000. Measurement and modelling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Europ. J. Agron.* 13:155-163.
34. Wright, J.L. 1982. new evapotranspiration crop coefficients. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 108: 57-74.