

مقاله پژوهشی

برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه پسته با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مطالعه موردی: حاشیه کویر ابرکوه در استان یزد)

حمیدرضا غفاریان مالگیری^۱، استادیار گروه جغرافیا دانشگاه یزد، یزد، ایران
هادی زارع خورمیزی، دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
مراد مرتاض، دانش آموخته کارشناسی ارشد باغبانی و زراعت، دانشکده علوم گیاهی، دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، کالیفرنیا

چکیده

تبخیر و تعرق که شامل تبخیر آب از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی می‌باشد، یک پارامتر فیزیکی اساسی برای مدیریت منابع آب و نیاز آبی در بخش کشاورزی می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، تعیین تبخیر و تعرق واقعی از سطح باغات پسته حاشیه کویر ابرکوه استان یزد به منظور استفاده بهینه از منابع آبی این منطقه می‌باشد. بدین منظور از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با ۱۶ تصویر در طول دوره رشد پسته در سال ۱۳۹۴ استفاده شد و سپس با استفاده از الگوریتم سبال نقشه‌های تبخیر و تعرق باغات پسته در دوره‌های ۱۵ روزه مربوط به ۴ مرحله اصلی فنولوژی گیاه پسته بدست آورده شد. مقایسه تبخیر روزانه بدست آمده از طریق الگوریتم سبال با تبخیر و تعرق بدست آمده از طریق روش فائو ۵۶ نشان داد نتایج دو مدل مطابقت خوبی با هم دارند؛ به طوری که، میانگین میزان همبستگی در شش نقطه در طول فصل رشد بین دو روش سبال و فائو، ۵۶، ۰/۷۷ و خطای RMSE بین این دو روش، ۱/۲۴ میلی‌متر در روز بدست آمد. بر اساس نتایج، میانگین میزان تبخیر و تعرق پسته در سطح منطقه مطالعاتی در سال ۱۳۹۴، ۱۰۱۵ میلی‌متر و در ۸۳ درصد سطح باغات میزان تبخیر و تعرق واقعی در یک فصل رشد یک‌ساله، ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در ماه‌های خرداد و تیر حداکثر میزان تبخیر و تعرق مشاهده شد. به طوری که، در ماه‌های نامبرده، میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های ۱۵ روزه بین ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است. همچنین، بر اساس نتایج، ۵۰ درصد میزان تبخیر و تعرق در بازه زمانی ۱ خرداد تا ۳۱ مرداد صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی: سبال، مدیریت آبیاری، پسته، تبخیر و تعرق، ابرکوه.

مقدمه

ایران به همراه کشورهای حوزه دریای مدیترانه به عنوان یکی از زیستگاه‌های اصلی پسته^۱ در دنیا شناخته شده‌اند (شرافتی و همکاران، ۱۳۹۲). این گیاه نقش مهمی در اقتصاد کشورهای خشک و نیمه خشک همچون ایران، ترکیه و سوریه دارد. ایران بزرگترین تولیدکننده پسته جهان با مساحت برداشت ۳۱۶۷۸۰ هکتار در سال ۲۰۱۴ می‌باشد (فائو، ۲۰۱۷). محصول پسته هر چند به علت تحمل خشکی با میزان آب کم دارای تولید با بازده متوسط است (بل‌ورت^۲ و همکاران، ۲۰۱۸)؛ با این حال، مدیریت آبیاری در تولید محصول باکیفیت بسیار مهم است (بل‌ورت و همکاران، ۲۰۱۸).

تبخیر و تعرق که شامل تبخیر آب از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی می‌باشد، نشان‌دهنده یک روند اساسی از چرخه هیدرولوژیکی و یک عنصر کلیدی مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی است (گائو^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). تعیین میزان تبخیر و تعرق دارای کاربردهای مهمی از جمله؛ ارزیابی اثرات ناشی از تغییرات آب و هوایی، مدیریت آب مصرفی، مدل سازی هیدرولوژیکی، میزان ورودی به آب‌های زیرزمینی، عملکرد محصول و نوع کاربری سرزمین است (بلا^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). نظارت بر تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی برای مدیریت آبیاری و نیاز آبی به ویژه در مناطق کم‌آب بسیار مهم است (بوئر^۵ و همکاران، ۲۰۰۸؛ کامبل^۶ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بزرا^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات نشان داده‌اند که الگوهای زمانی و مکانی تبخیر و تعرق به عوامل زیادی از جمله؛ نوع گیاهان، نوع خاک، توپوگرافی، شرایط هواشناسی و تغییرات مکانی و زمانی محتوای رطوبت خاک وابسته است (آلن^۸ و همکاران، ۱۹۹۸؛ آلن و همکاران، ۲۰۱۱؛ بزرا و همکاران، ۲۰۱۳). تبخیر و تعرق بر روی یک سطح همگن را با استفاده از تکنیک

^۱ *Pistacia vera* L.

^۲ Bellvert

^۳ Gao

^۴ Bala

^۵ Bouwer

^۶ Kamble

^۷ Bezerra

^۸ Allen

های معمول مانند نسبت باون^۱، کوواریانس ادی^۲، بیلان آب و در سطح مزرعه با استفاده از سیستم لایسیمتر می توان اندازه گیری نمود (بلا و همکاران، ۲۰۱۶). این روش ها معمولاً پرهزینه و وقت گیر می باشد و همچنین، قابلیت تعمیم به یک سطح وسیع ناهمگن را ندارند (گائو و همکاران، ۲۰۰۸). در نتیجه استفاده از روش های مبتنی بر سنجش از دور که این ناهمگنی و تغییرات را در نظر می گیرند، مطلوب تر است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱). جهت تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره ای می توان به الگوریتم های متعددی همچون سیستم بیلان انرژی SEBS^۳ (سو، ۲۰۰۲)، بیلان انرژی در سطح زمین SEBAL^۴ (باستینسن^۵ و همکاران، ۱۹۹۸)، SEBI^۶ (منتی و چودوری^۷، ۱۹۹۳) و Metric^۹ (آلن و همکاران، ۲۰۰۷) اشاره کرد. در این زمینه، الگوریتم سبال یکی از پرکاربردترین روش های تعیین تبخیر و تعرق واقعی به کمک سنجش از دور است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۷). سبال یک الگوریتم سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه ای را برای هر پیکسل از تصویر ماهواره ای انجام می دهد (باستینسن، ۲۰۰۰). این الگوریتم اولین بار توسط باستینسن^{۱۰} و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. باستینسن و همکاران ادعا نمودند که الگوریتم سبال توانسته است میزان تبخیر تعرق را در ۴۰ مطالعه انجام شده در ۲۵ کشور جهان را با دقت ۸۵ درصد در مقیاس روزانه و دقت ۹۵ درصد در مقیاس فصلی تخمین بزند (باستینسن و همکاران، ۲۰۰۵). در محاسبه و پهنه بندی تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال در غرب ایران نتایج نشان داد، مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از الگوریتم سبال با مقادیر بدست آمده با روش فائو ۵۶ از همبستگی

¹ Bowen ratio (BR)

² Eddy covariance (EC)

³ Surface Energy Balance System

⁴ Su

⁵ Surface Energy Balance Algorithm for Land

⁶ Bastiaanssen

⁷ Surface Energy Balance Index

⁸ Menenti & Choudhury

⁹ Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration

¹⁰ Bastiaanssen

بالایی ($R^2 = ۸۴\%$) برخوردار است (قمرنیا و رضوانی، ۱۳۹۳). در برآورد تبخیر و تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال نیز نتایج نشان داد بین مقادیر تبخیر و تعرق از الگوریتم سبال با داده‌های لایسیمتر، ضریب تبیین ۸۳٪ و میانگین تفاضل مطلق ۰/۷ میلی متر در روز وجود دارد (زمانی‌ثانی و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی دیگر، صحت برآورد تبخیر و تعرق از مدل‌های سبال و هارگریوز-سامانی با استفاده از داده‌های لایسیمتر تعیین شد. نتایج حاکی از کارایی مدل سبال و تکرارپذیری آن با پردازش باندهای تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد (مرشدی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه‌ای از الگوریتم سبال با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و دستورالعمل فائو ۵۶ برای تعیین نیاز آبی گیاهان ذرت و یونجه استفاده شد. بر اساس نتایج، دو مدل مطابقت نسبتاً خوبی با هم دارند. به طوری که، مقدار خطای جذر میانگین مربعات در برآورد تبخیر تعرق واقعی برای گیاهان ذرت و یونجه ۰/۹۲ و ۱/۲۵ و مقدار ضریب تبیین ۸۹٪ و ۸۳٪ به دست آمد (کرباسی و همکاران، ۱۳۹۵). راوات^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، به تخمین تبخیر و تعرق واقعی محصول گندم با استفاده از الگوریتم سبال و روش استاندارد پنمن-مانتیت و مقایسه با نتایج لایسیمتر در منطقه بیوانی در هاریانا پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که، الگوریتم سبال پتانسیل خوبی برای برآورد تبخیر تعرق در منطقه مورد مطالعه دارد (راوات و همکاران، ۲۰۱۷). واگل^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی عملکرد پنج مدل توازن انرژی سطح زمین برای برآورد تبخیر تعرق روزانه زیست توده سورگوم پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که، الگوریتم‌های سبال و S-SEBI^۳ برای برآورد تبخیر تعرق زیست توده سورگوم بهترین عملکرد را داشتند؛ در حالی که، الگوریتم‌های متریک و SSEBop^۴ عملکرد ضعیفی داشتند (واگل و همکاران، ۲۰۱۷). تبخیر و تعرق محصول پسته با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ Rawat

^۲ Wagle

^۳ Simplified Surface Energy Balance Index

^۴ Operational Simplified Surface Energy Balance

ارزیابی نتایج الگوریتم سبال با نتایج تبخیر تعرق در شرایط استاندارد برآورد شده توسط ابزار هوشمند هواشناسی^۱ نشان داد ضریب تبیین و ریشه مربع خطا (RMSE) برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه پسته به ترتیب ۰/۸۰٪ و ۲/۵ میلی متر است. نتایج این پژوهش، بازده خوب سبال را در برآورد تبخیر و تعرق پسته نشان داد (رحیم‌زادگان و جنانی، ۲۰۱۹).

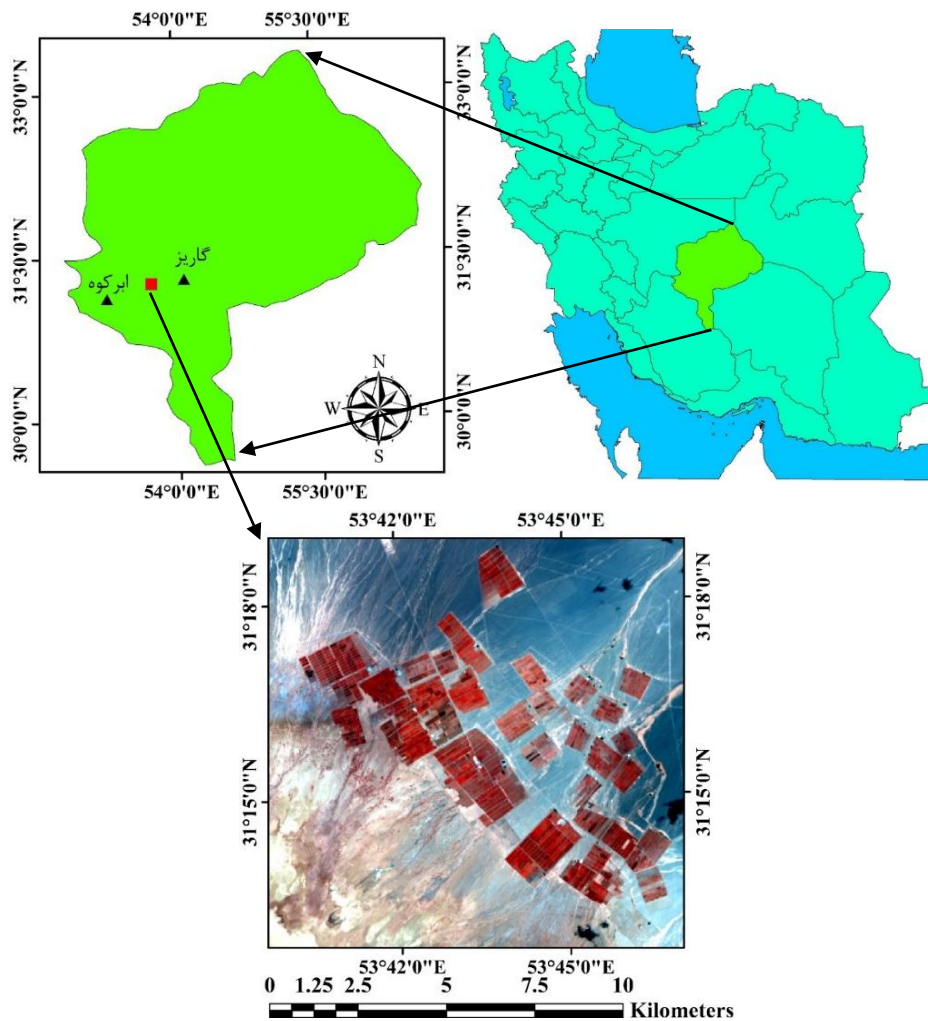
هدف از پژوهش حاضر، تعیین مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال در طول دوره‌های مختلف فنولوژی و همچنین، یک فصل رشد پسته می‌باشد. همچنین، در این پژوهش، به جای استفاده از یک تصویر، از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق در دوره‌های مختلف رشد به منظور تعیین دوره‌های حساس به کم‌آبی استفاده شد که در مطالعات قبلی مورد استفاده قرار نگرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت آب و آبیاری و جلوگیری از تنش خشکی در اراضی پسته موثر باشد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مطالعاتی در پژوهش حاضر، در استان یزد و در ۲۰ کیلومتری جنوب دهستان دهشیر واقع شده است. این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۲ دقیقه و ۴۷ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۹ ثانیه و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۷ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۴۷ ثانیه و ۱۵ ثانیه از نصف‌النهار مبدا قرار گرفته است. وسعت کل منطقه مورد مطالعه ۱۳۹۷۱ هکتار می‌باشد که تقریباً ۳۱۶۰ هکتار آن از باغات پسته پوشیده شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در سطح ایران و استان یزد، به همراه موقعیت دو ایستگاه هواشناسی گاریز و ابرکوه نشان می‌دهد. میانگین بارندگی سالانه ایستگاه گاریز و ابرکوه بر اساس آمار ۲۰ ساله (۱۳۷۳ تا ۱۳۹۳) به ترتیب ۱۰۹ و ۶۷ میلی‌متر می‌باشد. متوسط حداقل و حداکثر دمای ماهانه در ماه‌های سرد و گرم سال به

^۱ IMetos-Pessl

ترتیب در ایستگاه گاریز، $۳۳/۹$ - $۴/۳$ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه ابرکوه ۱ - $۳۸/۹$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به طور کلی، منطقه مورد مطالعه، دارای اقلیم گرم و خشک است و این میزان اندک بارندگی نیز در فصل زمستان که نیاز آبی حداقل است، صورت می‌گیرد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در سطح ایران و استان یزد به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی گاریز و ابرکوه

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

در پژوهش حاضر، در ابتدا، از ۲۳ تصویر ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ میلادی (۱۳۹۳-۱۳۹۴ شمسی)، به منظور ایجاد یک سری زمانی یک‌ساله استفاده شد. سپس، داده‌های دور افتاده^۱ و از دست رفته^۲ توسط پوشش ابر در سری زمانی شاخص گیاهی NDVI و دمای سطح زمین (LST) به ترتیب با استفاده از الگوریتم‌های HANTS^۳ و SSA^۴ بازسازی شد. با توجه به طولانی بودن بحث مربوط به بازسازی داده‌های از دست رفته، می‌توان برای به دست آوردن اطلاعات بیشتر به پژوهش‌ها در این زمینه مراجعه شود (غفاریان‌مالمیری و همکاران، ۲۰۱۸؛ زارع خورمیزی و همکاران، ۱۳۹۶؛ غفاریان‌مالمیری و زارع خورمیزی، ۱۳۹۶). پس از رفع خطاها و داده‌های از دست رفته، از ۱۶ تصویر ماهواره لندست ۸ با دوره‌های ۱۶ روزه از تاریخ‌های ۱۳۹۳/۱۲/۲۵ تا ۱۳۹۴/۰۸/۲۰ استفاده شد. بازه زمانی ذکر شده مربوط به دوره رشد فعال پسته می‌باشد.

الگوریتم سبال

اساس الگوریتم سبال استفاده از معادله توازن انرژی^۵ (رابطه ۱) و محاسبه مقدار شار لحظه‌ای گرمای نهان تبخیر^۶ به عنوان باقی‌مانده این معادله برای هر پیکسل می‌باشد (باستینسن و همکاران، ۱۹۹۸، a, b) در ادامه این الگوریتم، به طور خلاصه، توضیح داده می‌شود و برای بدست آوردن اطلاعات بیشتر می‌توان به راهنمای این الگوریتم مراجعه نمود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \quad (1)$$

¹ Outliers

² Missing or gappy data

³ Harmonic Analysis of Time Series

⁴ Singular Spectrum Analysis

⁵ Surface Energy Balance

⁶ Latent Heat Flux

در این رابطه، λET_{inst} شار گرمای نهان تبخیر (w/m^2)، R_n ^۱ میزان تابش خالص خورشیدی (w/m^2)، G ^۲ شار گرمای خاک (w/m^2) و H ^۳ شار گرمای محسوس (w/m^2) می‌باشد. در ادامه، به بیان هر یک از اجزای معادله بیلان انرژی پرداخته می‌شود.

شار گرمای خاک (G)

شار گرمای خاک میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی بر اثر هدایت ملکولی است. محاسبه مستقیم شار گرمای خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دشوار است. اما مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که بین مقدار G/R_n و پارامترهایی چون $NDVI$ ^۴ و دمای سطح (T_s) ^۵ و آلبیدو رابطه وجود دارد. در روش سبال، ابتدا نسبت G/R_n در نیم‌روز با استفاده از معادله تجربی ارائه شده توسط باستیانس (رابطه ۲) به صورت زیر محاسبه می‌شود (باستیانس، ۲۰۰۰؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (2)$$

در رابطه فوق، T_s دمای سطحی بر حسب درجه سانتی‌گراد، \square آلبیدوی سطحی و $NDVI$ شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی می‌باشد. مقدار G با ضرب کردن نسبت فوق در R_n بدست می‌آید.

شار گرمای محسوس (H)

در روش سبال، جهت برآورد شار گرمای محسوس، ابتدا دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و آبیاری شده است، دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر و تعرقی معادل تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارد. پیکسل دوم که پیکسل

¹ Net Radiation

² Soil Heat Flux

³ Sensible Heat Flux

⁴ Normalized Difference Vegetation Index

⁵ Surface Temperature

گرم نام دارد، معمولا در زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک انتخاب می‌شود. بنابراین، مقدار شار گرمای نهان تبخیر در این پیکسل تقریبا صفر فرض می‌شود. در روش سبال، طبق رابطه ۱ و بر اساس مقادیر تبخیر و تعرق دو پیکسل مذکور، شار گرمای محسوس در این دو پیکسل محاسبه شده و سپس مقدار شار گرمای محسوس سایر پیکسل‌ها تخمین زده می‌شود. مقدار شار گرمای محسوس با رابطه ۳ برآورد می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{R_{ah}} \quad (3)$$

در این رابطه، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (1004 J/kg/k)، dT اختلاف دمای هوای نزدیک سطح به کلونین (k) و R_{ah} مقاومت آئرو دینامیک برای انتقال گرما است (s/m).

محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای

پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح گردید، مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر بر حسب وات بر متر مربع (w/m^2) مطابق با فرمول ۱ برای هر پیکسل محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از رابطه ۴، مقدار لحظه‌ای تبخیر و تعرق (ET_{inst}) محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (4)$$

در این رابطه، ET_{ins} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، λ گرمای نهان تبخیر (J/kg) و عدد ۳۶۰۰ ضریب تبدیل زمان از ثانیه به ساعت است.

تبخیر و تعرق روزانه

تبخیر و تعرق محاسبه شده در رابطه ۴، بر اساس معادله بیلان انرژی در لحظه گذر ماهواره می‌باشد. این مقدار بایستی به تبخیر و تعرق روزانه تبدیل گردد. برای این منظور،

ضریب $ETrF$ برای هر پیکسل تصویر با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ETrF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (5)$$

در این رابطه، ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr) و ET_r تبخیر و تعرق گیاه مرجع در لحظه تصویربرداری ماهواره (mm/hr) است. در مرحله بعد، تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$ET_{24} = ETrF \times ET_{r-24} \quad (6)$$

در این رابطه، ET_{r-24} مجموع تبخیر و تعرق گیاه مرجع در روز تصویربرداری ماهواره است.

برآورد تبخیر و تعرق در دوره‌های مختلف فنولوژی

برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی پسته در بازه‌های زمانی مختلف از رابطه ۷ استفاده شد، در این رابطه، ET_{a-day} تبخیر و تعرق واقعی در روز گذر ماهواره، $(ET_o)_i$ تبخیر و تعرق گیاه مرجع در روز i و n تعداد روز دوره زمانی مورد نظر است (آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$(ET_{a-period})_i = \frac{ET_{a-day}}{(ET_o)_i} \sum_{n=1}^n (ET_o)_n \quad (7)$$

با تجمع تبخیر و تعرق در دوره‌های مختلف فنولوژی پسته، مقدار تبخیر و تعرق واقعی پسته در یک دوره رشد کامل با توجه به رابطه ۸ محاسبه شد.

$$ET_{a-season} = \sum_{n=1}^n (ET_{a-period})_i \quad (8)$$

ارزیابی نتایج

پس از محاسبه تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم سبال در روزهای گذر ماهواره، مقدار تبخیر و تعرق پسته با استفاده دستورالعمل فائو ۵۶ نیز در روزهای گذر ماهواره

اندازه‌گیری شد و مقادیر تبخیر و تعرق با روش فائو ۵۶ در ۶ نقطه مختلف در طول فصل رشد با روش سبال مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بر اساس دستورالعمل فائو، ۵۶ تبخیر و تعرق محصول با استفاده از رابطه ۹ اندازه‌گیری شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (۹)$$

در این رابطه، ET_c تبخیر و تعرق محصول پسته، K_c ضریب گیاهی پسته و ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع می‌باشد که با استفاده از معادله پنمن ماتنیث محاسبه می‌شود (رابطه ۱۰).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، ET_o تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح گیاه ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)، G شار گرمای خاک ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری بر حسب درجه سانتی‌گراد، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (kpa) و e_a فشار بخار واقعی (kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($\text{kpa}/^\circ\text{C}$)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($\text{kpa}/^\circ\text{C}$)، C_n و C_d ضرایب ثابتی که با توجه به نوع گیاه مرجع و دوره محاسباتی تعیین می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

ضریب گیاهی (K_c) با توجه به نوع گونه گیاهی و دوره رشد آن تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر، ضرایب گیاهی در دوره‌های مختلف فنولوژی پسته با توجه به ضرایب پیشنهاد شده توسط فرشی و همکاران (۱۳۷۶)، در نظر گرفته شد.

به منظور ارزیابی نتایج، از ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات^۱ ($RMSE$) بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم سبال و روش فائو ۵۶ استفاده شد. ضریب تبیین با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شد.

^۱ -Root Mean Square Error

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \quad (11)$$

در این رابطه، SS_{err} و SS_{tot} با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$SS_{err} = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (12)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

$RMSE$ نیز با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه شد. در این روابط، x_i و y_i به ترتیب داده‌های تبخیر و تعرق واقعی سبال و داده‌های تبخیر و تعرق از طریق روش فائو ۵۶ می‌باشند.

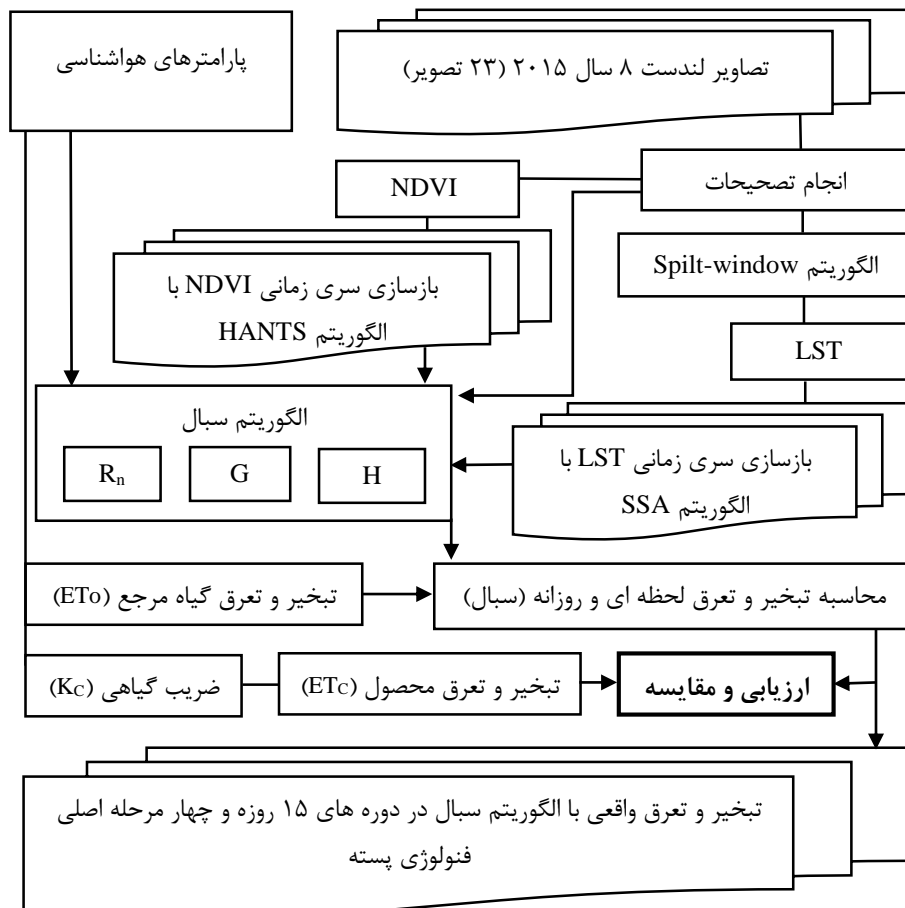
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (14)$$

داده‌ها و روش‌ها

روند نمای کلی مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ در ابتدا، تصحیحات اتمسفری، هندسی و رادیومتریک تصاویر لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ انجام شد. با توجه به اینکه، در پژوهش حاضر، هدف، تعیین تبخیر و تعرق واقعی در طول یک دوره رشد یک‌ساله پسته می‌باشد، لازم است در ابتدا، داده‌های از دست رفته تصاویر ماهواره‌ای توسط پوشش ابر بازسازی شوند. دو ورودی مهم در محاسبه تبخیر و تعرق با الگوریتم سبال، دمای سطح زمین (LST)^۱ و شاخص NDVI می‌باشد. سری‌های زمانی ایجاد شده این دو پارامتر توسط الگوریتم‌های SSA و HANTS بازسازی شد. در مرحله بعد، پارامترهای ورودی الگوریتم سبال تهیه شد و میزان تبخیر و تعرق واقعی روزانه در تاریخ‌های گذر ماهواره لندست ۸ محاسبه شد. همچنین، تبخیر و تعرق روزانه درختان پسته در روزهای گذر ماهواره با توجه دستورالعمل فائو ۵۶ در شش نقطه مختلف در اراضی پسته بدست آمد و سپس مقادیر تبخیر و تعرق روزانه بدست آمده از طریق الگوریتم سبال با مقادیر تبخیر و تعرق روزانه بدست آمده از طریق

¹ Land Surface Temperature

روش فائو ۵۶ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در نهایت، تبخیر واقعی از طریق الگوریتم سبیل در دوره‌های زمانی ۱۵ روزه فنولوژی پسته براساس جدول ۱ بدست آمد. جدول ۱، چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته به همراه دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته و تاریخ وقوع آنها را با توجه به مطالعات و پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ گلدامر و بید^۱، ۱۹۹۳).



شکل ۲- روند نمای کلی از مراحل پژوهش

¹ Goldhamer and Beede

جدول ۱- چهار مرحله اصلی فنولوژی پسته و دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی به همراه تاریخ وقوع آنها (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱)

مرحله	فنولوژی	دوره وقوع
مرحله ۱	۱ شروع رشد	۱ تا ۱۵ فروردین
	۲ گلدهی	۱۶ تا ۳۱ فروردین
	۳ حضور برگ	۱ تا ۱۵ اردیبهشت
	۴ حجیم شدن پوست	۱۶ تا ۳۱ اردیبهشت
مرحله ۲	۵ استخوانی شدن پوست ۱	۱ تا ۱۵ خرداد
	۶ استخوانی شدن پوست ۲	۱۶ تا ۳۱ خرداد
	۷ استخوانی شدن پوست ۳	۱ تا ۱۵ تیر
مرحله ۳	۸ پر شدن دانه ۱	۱۶ تا ۳۱ تیر
	۹ پر شدن دانه ۲	۱ تا ۱۵ مرداد
	۱۰ پر شدن و خندان شدن دانه	۱۶ تا ۳۱ مرداد
	۱۱ خندان شدن دانه	۱ تا ۱۵ شهریور
	۱۲ ترکیدن پوست نازک بیرونی	۱۶ تا ۳۱ شهریور
مرحله ۴	۱۳ برداشت	۱ تا ۱۵ مهر
	۱۴ پس از برداشت ۱	۱۶ تا ۳۰ مهر
	۱۵ پس از برداشت ۲	۱ تا ۱۵ آبان
	۱۶ پس از برداشت ۳	۱۶ تا ۳۰ آبان

بحث اصلی

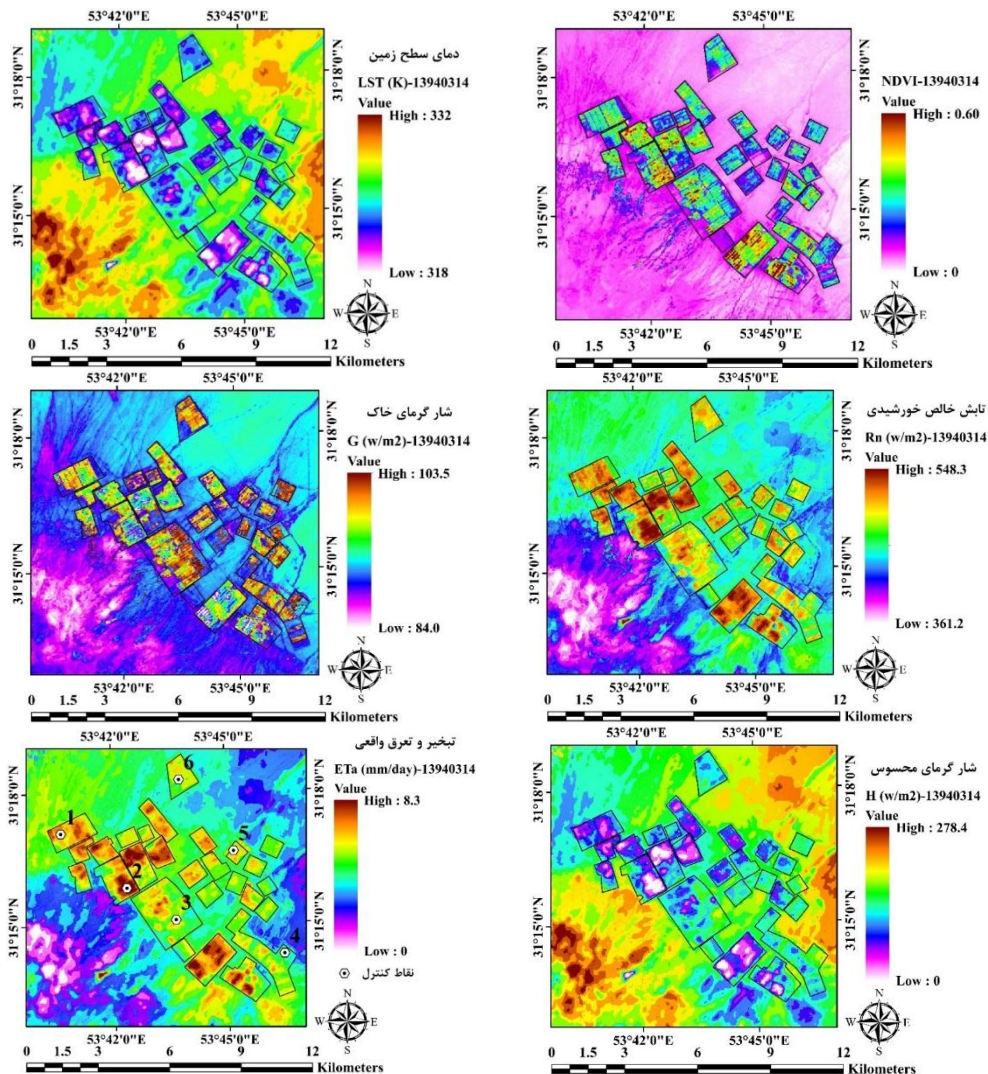
با توجه به اینکه، در پژوهش حاضر، تبخیر و تعرق برای یک دوره رشد سالانه پسته اندازه‌گیری شده است؛ نمایش کامل تصاویر و جزئیات و همچنین، مراحل، در این پژوهش نمی‌گنجد؛ بنابراین، در ابتدا به توضیح مختصر چند پارامتر ورودی این الگوریتم در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ پرداخته می‌شود. یک نمونه تصویر شاخص گیاهی NDVI در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ در شکل ۳ نشان داده شده است. زمین‌های دارای پوشش گیاهی مقدار ۰/۲ تا ۰/۸ از این شاخص را نشان می‌دهند. این شاخص تقریباً در ماه خرداد به حداکثر میزان خود در منطقه می‌رسد. تصویر دمای سطح زمین در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴

نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. به طور کلی، در منطقه مورد مطالعه حداقل دمای سطح زمین در ماه‌های گرم سال با توجه به تبخیر و تعرق صورت گرفته، در اراضی و باغات پسته مشاهده شد.

پارامترهای تابش خالص خورشیدی (R_n)، شار گرمای خاک (G) و شار گرمای محسوس (H) سه جز اصلی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال می‌باشد. به عنوان نمونه، مقدار تابش خالص خورشیدی برای تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مناطق با پوشش گیاهی بالایی پسته دارای مقادیر نسبتاً کمتر دمای سطح زمین می‌باشند و شار تابش خالص در این مناطق مقدار قابل توجهی دارد. این امر نشان می‌دهد، بخش اعظم انرژی در دسترس در این مناطق صرف فرآیند تبخیر و تعرق گردیده است و در نتیجه، کاهش دما را در این نواحی شاهد هستیم.

شار گرمای خاک میزان انتقال گرما در داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت ملکولی است. میزان حداقل شار گرمای خاک در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴، ۸۴ و حداکثر آن ۱۰۳/۵ وات بر مترمربع می‌باشد (شکل ۳). نقشه به دست آمده از شار محسوس هوا نشان می‌دهد که کمترین مقدار شار گرمای محسوس را پیکسل‌های سرد دارند که زمین‌های با پوشش گیاهی پسته و آبیاری شده است؛ در پیکسل‌های خاک خشک و عاری از پوشش گیاهی اختلاف بین دمای سطحی زمین با دمای هوای بالاتر از سطح موجب می‌شود که شار محسوس بالاتری داشته باشند (شکل ۳).

در شکل ۳، یک نمونه تصویر میزان تبخیر و تعرق روزانه بدست آمده از طریق معادله توازن انرژی در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴ نشان داده شده است. حداکثر میزان تبخیر و تعرق روزانه در این تاریخ مربوط به مناطق با پوشش گیاهی انبوه پسته و به میزان ۸/۳ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۳- یک نمونه تصویر NDVI، دمای سطح زمین، تابش خالص خورشیدی، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و تبخیر و تعرق واقعی روزانه در تاریخ ۱۳۹۴/۰۳/۱۴

شکل ۴، روند تغییرات تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ET_a)، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) به همراه تبخیر و تعرق محصول (ET_c) با استفاده از روش فائو ۵۶ را در ۱۶ تاریخ مربوط به دوره رشد سالانه پسته در ۶ نقطه نشان می‌دهد. موقعیت نقاط در سطح

منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، حداکثر میزان تبخیر و تعرق در ماه‌های خرداد و تیر رخ می‌دهد. حداکثر میزان تبخیر و تعرق در این ماه‌ها تقریباً ۸ میلی‌متر در روز می‌باشد. روند تغییرات تبخیر و تعرق محصول (فائو ۵۶) با تبخیر و تعرق واقعی (سبال) با هم مطابقت خوبی دارند. جدول ۲ میزان ضریب همبستگی و خطای RMSE بین تبخیر و تعرق واقعی با تبخیر و تعرق محصول در ۶ نقطه در طول فصل رشد را نشان می‌دهد. میانگین میزان ضریب همبستگی بین تبخیر و تعرق محصول با تبخیر و تعرق واقعی در شش نقطه، ۰/۷۷ و خطای RMSE بین این دو روش ۱/۲۴ میلی‌متر در روز می‌باشد.

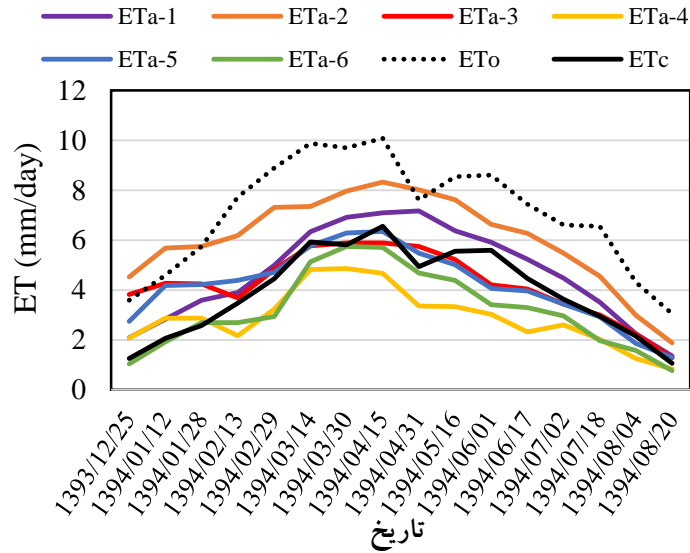
با توجه به شکل ۴ و جدول ۲، الگوریتم سبال دارای قابلیت مناسبی برای تخمین میزان تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. استفاده از الگوریتم سبال در غرب ایران نیز نشان داد مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از الگوریتم سبال با مقادیر بدست آمده با روش فائو ۵۶ از همبستگی بالایی (۰/۸۴) برخوردار است (قمرنیا و رضوانی، ۱۳۹۳). ارزیابی الگوریتم سبال با داده‌های لایسیمتر، ضریب تبیین ۰/۸۳ و میانگین تفاضل مطلق ۰/۷ میلی‌متر در در برآورد تبخیر و تعرق گیاه گندم را نشان داد (زمانی‌ثانی و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه‌ای دیگر، خطای جذر میانگین مربعات در برآورد تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سبال و دستورالعمل فائو ۵۶، برای گیاهان ذرت و یونجه ۰/۹۲ و ۱/۲۵ و مقدار ضریب تبیین ۰/۸۹ و ۰/۸۳ به دست آمد (کرباسی و همکاران، ۱۳۹۵).

با توجه به مطابقت خوب این دو روش، مقدار تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته از تاریخ ۱۳۹۴/۰۱/۰۱ تا ۱۳۹۴/۰۸/۳۰ در شکل ۵ نشان داده شده است.

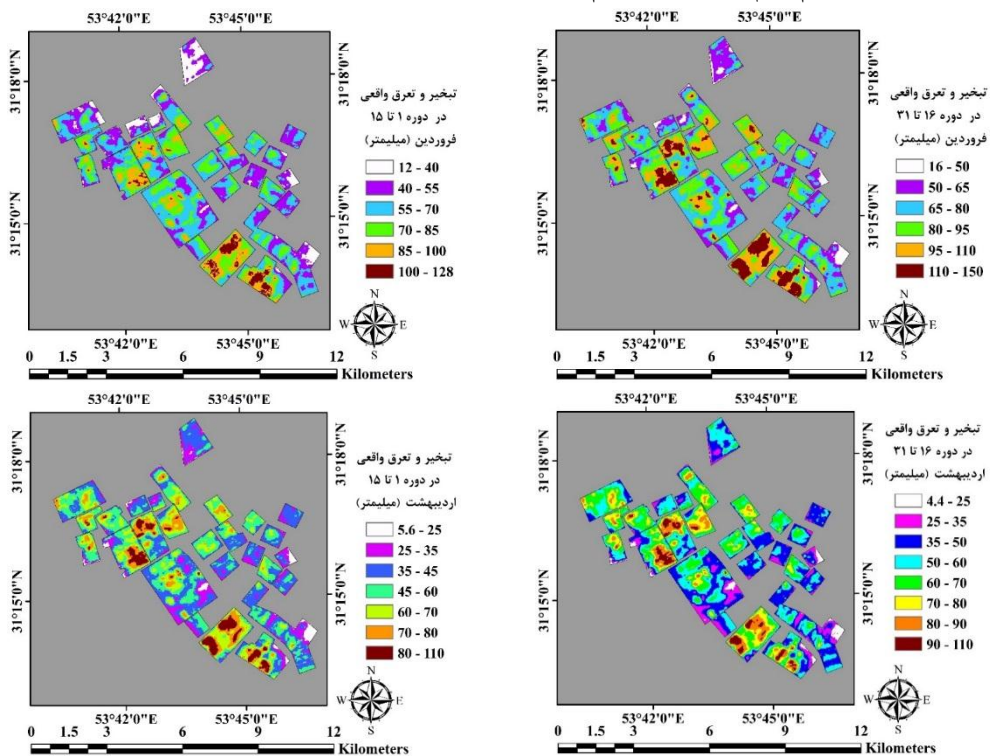
جدول ۲- میزان همبستگی و خطای RMSE بین تبخیر و تعرق واقعی (ETa) در شش

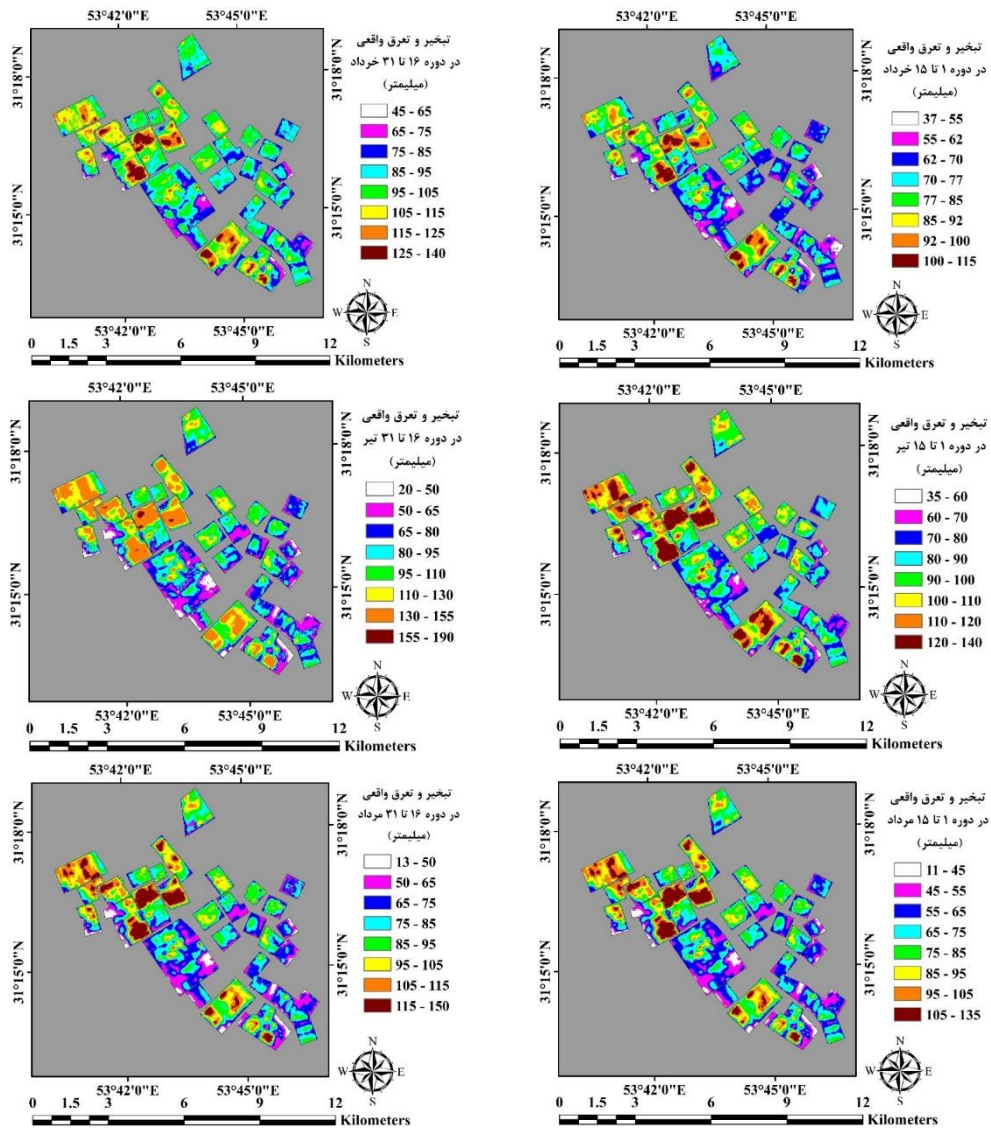
نقطه با تبخیر و تعرق محصول (ETc)

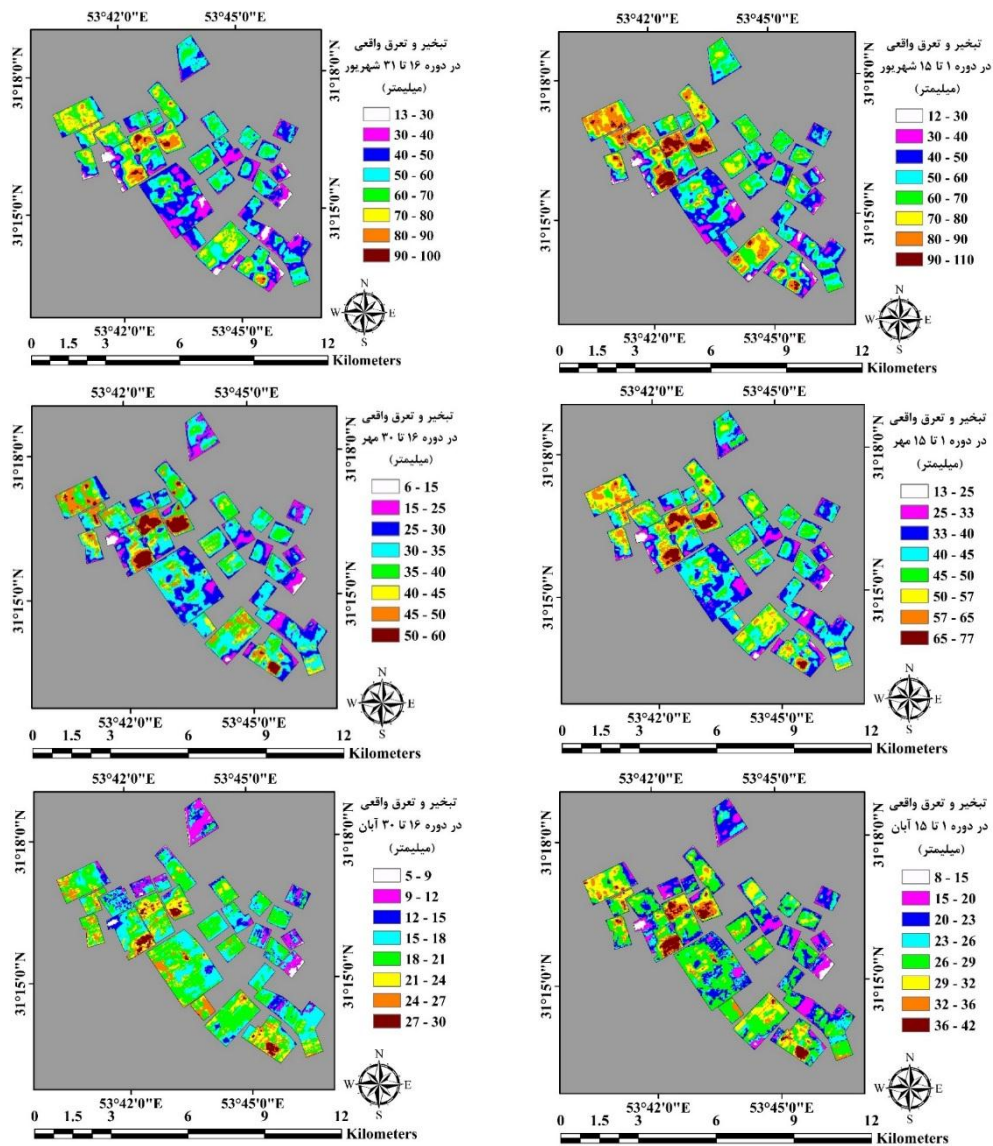
نقاط		ETa-1	ETa-2	ETa-3	ETa-4	ETa-5	ETa-6	میانگین
ETc	R ²	۰/۹۳	۰/۷۷	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۸۸	۰/۷۷
	RMSE	۰/۸۶	۲/۲۹	۱/۰۵	۱/۴۰	۰/۹۳	۰/۹۲	۱/۲۴



شکل ۴- تغییرات میزان تبخیر و تعرق واقعی شش نقطه در ۱۶ تاریخ مختلف، دو رقم اول روز، دو رقم دوم ماه و چهار رقم آخر سال را نشان می‌دهند (موقعیت نقاط در شکل ۳)



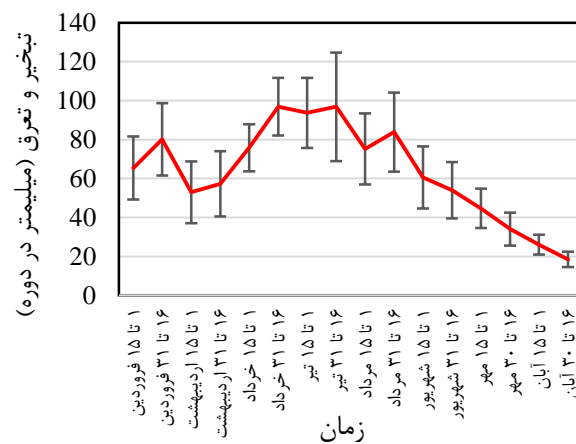




شکل ۵- میزان تبخیر و تعرق واقعی در دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی پسته

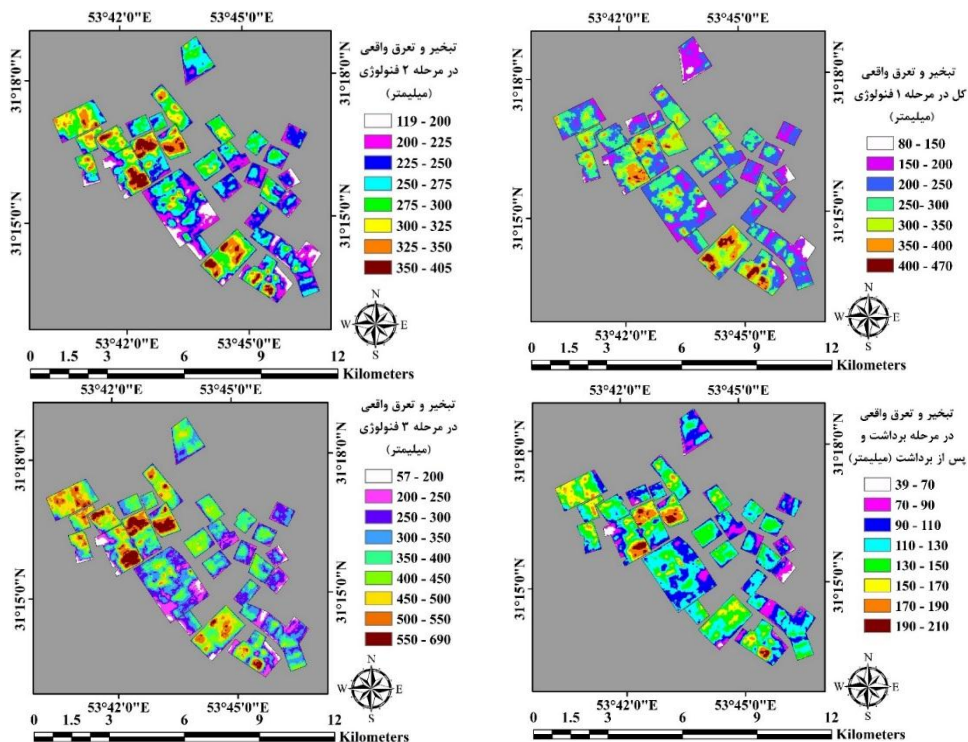
شکل ۶، میانگین میزان تبخیر و تعرق را در دوره‌های ۱۵ روزه در سطح کل مزارع نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، در ماه‌های خرداد و تیر حداکثر میزان تبخیر و تعرق

مشاهده می‌شود. به طوری که، در ماه‌های ذکر شده، میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های ۱۵ روزه بین ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است. کمترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به مرحله برداشت و پس از برداشت است که از تاریخ ۱ مهر تا ۳۰ آبان را شامل می‌شود. در این زمان، میزان تبخیر تعرق به کمتر از ۴۰ میلی‌متر در دوره‌های ۱۵ روزه می‌رسد. ۵۰ درصد میزان تبخیر و تعرق در بازه زمانی ۱ خرداد تا ۳۱ مرداد صورت می‌گیرد. با توجه به حساسیت این بازه زمانی در تولید دانه‌های باکیفیت، مدیریت آبیاری در این بازه زمانی امری حیاتی است.

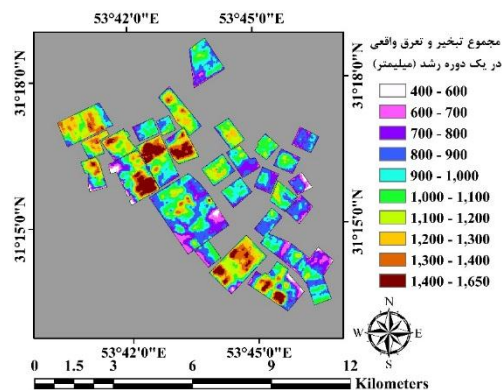


شکل ۶- میانگین میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های ۱۵ روزه فنولوژی در سطح کل باغات پسته

شکل ۷، مجموع تبخیر و تعرق واقعی را در هر کدام از ۴ مرحله اصلی فنولوژی پسته نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۸، مجموع میزان تبخیر و تعرق واقعی در یک فصل رشد کامل که از تاریخ ۱ فروردین تا ۳۰ آبان سال ۱۳۹۴ را شامل می‌شود، نشان داده شده است. حداکثر میزان تبخیر و تعرق واقعی که به وسیله الگوریتم سبال در یک فصل رشد تخمین زده شده است ۱۶۵۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۷- میزان تبخیر و تعرق در دوره ۱ فروردین تا ۳۱ اردیبهشت (مرحله ۱ فنولوژی)، ۱ خرداد تا ۱۵ تیر (مرحله دو فنولوژی)، ۱۶ تیر تا ۳۱ شهریور (مرحله ۳ فنولوژی) و ۱ مهر تا ۳۰ آبان (مرحله برداشت و پس از برداشت)



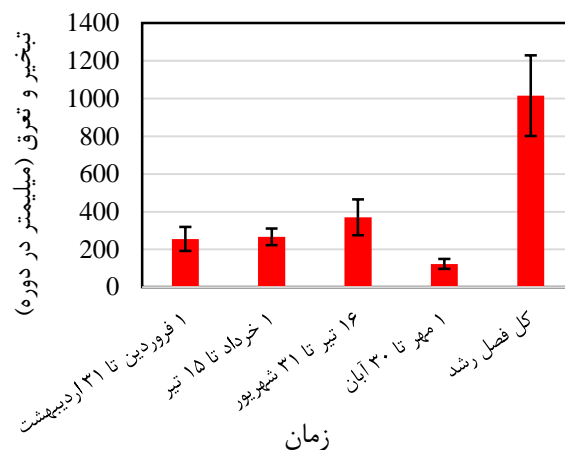
شکل ۸- میزان تبخیر و تعرق واقعی در یک دوره رشد سالانه پسته از تاریخ ۱ فروردین تا ۳۰ آبان

جدول ۳، میزان و درصد مساحت هر کدام از کلاس‌های طبقه‌بندی نقشه تبخیر و تعرق در یک فصل رشد یک‌ساله را نشان می‌دهد (شکل ۸). در ۵۲ درصد از سطح باغات پسته میزان تبخیر و تعرق سالانه بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ میلیمتر می‌باشد و در ۸۳ درصد سطح منطقه میزان تبخیر و تعرق واقعی در یک فصل رشد یک‌ساله، ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۹، میانگین میزان تبخیر و تعرق در سطح کل اراضی پسته در ۴ مرحله اصلی فنولوژی پسته و در کل یک فصل رشد را نشان می‌دهد. بالاترین میزان تبخیر و تعرق در دوره ۱۶ تا ۳۱ تیر با مقدار میانگین ۳۷۰ میلی‌متر مشاهده شد. میانگین میزان تبخیر و تعرق در یک فصل رشد یک‌ساله در سطح کل باغات نیز ۱۰۱۵ میلی‌متر بدست آمد.

جدول ۳- مساحت و درصد مساحت هر کدام از کلاس‌های تبخیر و تعرق واقعی در

یک دوره رشد سالانه پسته

کلاس	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
۴۰۰-۶۰۰	۳۷/۴	۱/۲
۶۰۰-۷۰۰	۱۲۶/۸	۴/۰
۷۰۰-۸۰۰	۳۰۴/۵	۹/۷
۸۰۰-۹۰۰	۵۵۴/۳	۱۷/۶
۹۰۰-۱۰۰۰	۵۵۷/۶	۱۷/۷
۱۰۰۰-۱۱۰۰	۵۳۵/۲	۱۷/۰
۱۱۰۰-۱۲۰۰	۴۰۴/۹	۱۲/۹
۱۲۰۰-۱۳۰۰	۲۸۳/۳	۹/۰
۱۳۰۰-۱۴۰۰	۱۷۹/۰	۵/۷
۱۴۰۰-۱۶۵۰	۱۶۴/۴	۵/۲



شکل ۹ - مجموع تبخیر و تعرق واقعی سبال در چهار دوره اصلی فنولوژی پسته و کل فصل رشد

بر اساس نتایج، میانگین و حداکثر میزان تبخیر و تعرق در یک فصل رشد کامل در سال ۱۳۹۴ به ترتیب ۱۰۱۵ و ۱۶۵۰ میلی‌متر بدست آمد. در مطالعه‌ای در منطقه اردکان یزد میزان تبخیر و تعرق استاندارد و واقعی را با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس به ترتیب ۱۳۷۵ و ۱۱۳۳ میلی‌متر بدست آوردند (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). در منابع مختلف میزان تبخیر و تعرق پسته با توجه به شرایط اقلیمی و مدیریت آبی مزرعه، متفاوت ذکر شده است (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). مقادیر ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۱۸ میلی‌متر در برخی پژوهش‌های خارج از ایران اشاره شده است (اولنا^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). در مطالعه‌ای دیگر، در منطقه باغات پسته اردکان، تبخیر و تعرق پسته ۱۲۷۵ میلی‌متر در فصل رشد سال ۲۰۱۲ بوسیله الگوریتم سبال تخمین زده شد که به طور قابل توجهی، بزرگتر از برآورد به دست آمده با استفاده از تجزیه و تحلیل تعادل آب خاک (۷۵۹ میلی‌متر) بود. این تفاوت را پژوهشگران به این واقعیت نسبت دادند که تجزیه و تحلیل تعادل آب خاک برای ۱/۲ متر بالای خاک انجام شده، در حالی که، ریشه‌های درختان

¹ Ulna

پسته از آب لایه پایین نیز استفاده می‌کنند (رحیمیان و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهشی دیگر، در استان یزد نشان داده شد، بیش از ۶۰ درصد باغ‌های پسته مروست دارای مصرف آب فصلی ۴۱۰ تا ۶۸۰ میلیمتر (با میانگین ۵۹۴ میلیمتر) هستند؛ در حالی‌که، تبخیر و تعرق تجمعی گیاه مرجع و تبخیر و تعرق استاندارد پسته در مدت مشابه به ترتیب ۱۵۵۸ و ۹۲۰ میلی‌متر بود. به عبارت دیگر، درختان پسته این منطقه تحت تنش خشکی قرار دارند که باعث کاهش عملکرد محصول خواهد شد (رحیمیان و همکاران، ۲۰۱۹).

نتیجه‌گیری

هر چند در منطقه مورد مطالعه، داده‌های معتبر زمینی تبخیر و تعرق مانند داده‌های لایسیمتری برای مقایسه با نتایج الگوریتم سبال موجود نبود، اما، مقایسه این نتایج با پژوهش‌های دیگر در این زمینه نشان می‌دهد که نتایج پژوهش حاضر، دارای دقت قابل-قبول است و با نتایج پژوهش‌های انجام شده قبلی (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱؛ رحیمیان و همکاران، ۲۰۱۴؛ رحیمیان و همکاران، ۲۰۱۹)، مطابقت دارد. همچنین، مقایسه تبخیر روزانه بدست آمده از طریق الگوریتم سبال با تبخیر و تعرق بدست آمده از طریق روش فائو ۵۶ نشان داد نتایج دو مدل مطابقت خوبی با هم دارند. به طوری‌که، میانگین میزان همبستگی در شش نقطه در طول فصل رشد بین دو روش سبال و فائو ۵۶، ۰/۷۷ و خطای RMSE بین این دو روش، ۱/۲۴ میلی‌متر در روز بدست آمد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، حداکثر و میانگین میزان تبخیر و تعرق در طول فصل رشد در سال ۱۳۹۴ در سطح اراضی پسته در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۶۵۰ و ۱۰۱۵ میلی‌متر می‌باشد.

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر قابلیت بسیار بالای تکنیک‌های سنجش از دور را در مدیریت آبیاری نشان می‌دهد.

منابع

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration Information Reporting: I. Factors Governing Measurement Accuracy. *Agricultural Water Management*, 98, 899-920.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy: 300 pp.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394.
- Allen, R. G., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). "SEBAL, Surface energy balance algorithms for land, Idaho Implementation". *Advanced Training and Users Manual*, version 1.0.
- Bala, A., Rawat, K. S., Misra, A. K., & Srivastava, A. (2016). Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm, India. *Geocarto International*, 31(7), 739-764.
- 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., Molden, D. J. & Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agric. Water Manage.* 46(2), 137-155.
- 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(1), 85-93.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998) a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & Van der Wal, T. (1998) b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of hydrology*, 212, 213-229.
- Bellvert, J., Adeline, K., Baram, S., Pierce, L., Sanden, B., & Smart, D. (2018). Monitoring crop evapotranspiration and crop coefficients over an almond and pistachio orchard throughout remote sensing. *Remote Sensing*, 10(12), 2001.
- Bezerra, B. G., Silva, B. B., Santos, C. A. C. D., & Bezerra, J. (2015). Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches. *Advances in Remote Sensing*, 4(3), 234-247.

- Bezerra, B.G., Santos, C.A.C., Silva, B.B., Perez-Marin, A.M., Bezerra, M.V.C., Bezerra, J.R.C., & Ramana Rao, T.V. (2013) Estimation of Soil Moisture in the Root-Zone from Remote Sensing Data. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 595-603.
- Bouwer, L. M., Biggs, T. W., & Aerts, C. J. H. (2008) Estimates of Spatial Variation in Evaporation Using Satellite-Derived Surface Temperature and a Water Balance Model. *Hydrological Processes*, 22, 670-682.
- Dastoorani, M., Poormohammadi, S., & Rahimian, M. (2012). Estimation of Actual Evapotranspiration in Ardakan Pistachio Orchards Using Remote Sensing. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26.1(1), 1-13. (in Farsi)
- FAO. (2017). FAO statistics database. <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>. Accessed 20 Jan 2017.
- Farhadi Bansouleh, B., Karimi, A., & Hesadi, H. (2016). Estimation of Actual Evapotranspiration in Mahidasht using SEBS Algorithm and LANDSAT Images. *Journal of Water and Soil*, 30(3), 706-716. (in Farsi)
- Farshi, A. A., Shariati, M.R., Jaroelahi, R., Ghaemi, M. R., Shahabifar, M., & Tavallaei, M. M. (1997). An Estimate of Water Requirement of Main Field Crops and Orchards in Iran. Ministry of Agriculture, Agricultural and Natural Resource Organization, Water and Soil Research Institute Press, Karaj, Iran. 630pp. (in Farsi)
- Gao Y., Long D., & Li, Z. L. (2008). Estimation of daily actual evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in North China. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (11): 3295-3315.
- Ghafarian Malamiri, H., & Zare Khormizie, H. (2017). Reconstruction of cloud-free time series satellite observations of land surface temperature (LST) using harmonic analysis of time series algorithm (HANTS). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(3), 37-55. (in Farsi)
- Ghafarian Malamiri, H., Rousta, I., Olafsson, H., Zare, H., & Zhang, H. (2018). Gap-Filling of MODIS Time Series Land Surface Temperature (LST) Products Using Singular Spectrum Analysis (SSA). *Atmosphere*, 9 (9), 334.
- Ghamarnia, H., & rezvani, S. V. (2014). Calculation and Zoning of Evapotranspiration using SEBAL method In the West of Iran (Miandarband Plain). *Journal of Water and Soil*, 28(1), 72-81. (in Farsi)
- Goldhamer, D. A., & Beede, R. (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.

- Kamble, B., Irmak, A., Hubbarb, K., & Gowda, P. (2013) Irrigation Scheduling Using Remote Sensing Data Assimilation Approach. *Advances in Remote Sensing*, 2, 258-268.
- Karbasi, M., Moghadam, M., Nikbakht, J., & kaviani, A. (2016). Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province). *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(3), 427-437. (in Farsi)
- Menenti, M., & Choudhury, B. J. (1993). Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*, 212, 561-568.
- Mirzaee, F., Keshavarz, M., & Vazifedoust, M. (2018). Development of a new algorithm (SM-SEBAL) to evaluate Evapotranspiration based on remote sensing data. *Water Engineering*, 11(38), 107-128. (in Farsi)
- Morshedi, A., Tabatabaei, S. H., & Naderi, M. (2015). Verification SEBAL and Hargreaves –Samani Models to Estimate Evapotranspiration by Lysimeter Data. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 367-376. (in Farsi)
- Rahimian, M. H., Shayannejad, M., Eslamian, S., Gheysari, M., & Jafari, R. (2019). Daily and Seasonal Pistachio Evapotranspiration in Saline Condition: Comparison of Satellite-Based and Ground-Based Results. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(5), 777-787.
- Rahimian, M. H., Taghvaeian, S., Nouri, M. R., Tabatabaei, S. H., Mokhtari, M. H., Hasheminejad, Y., & Neshat, E. (2014). Estimating Pistachio Evapotranspiration using MODIS Imagery: A Case Study from Ardakan, Iran. In *World Environmental and Water Resources Congress 2014* (pp. 1784-1794).
- Rahimzadegan, M., & Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 217, 383-390.
- Rawat, K. S., Bala, A., Singh, S. K., & Pal, R. K. (2017). Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural water management*, 187, 200-209.
- Sharafati, A., Arzani, K., & Ramezani Moghaddam, M. R. (2013). Assessment of Flowering and Bearing of Twelve Pistachio (*Pistacia vera* L.) Cultivars Under Khorasan Environmental Conditions. *Seed and plant improvement journal*, 29-1(2), 243-256. (in Farsi)
- Su, z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6 (1): 85-100.
- Ulna, M., Kanber, R., Steduto, P., Aydin, Y., & Dlker, K. (2005). Effects of different water and nitrogen levels on the yield and periodicity of Pistachio. *Turk J. Agric.*, 29: 39-49.

- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. & Kakani, V. (2017). Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128: 192-203.
- Zamansani, E., khoodani, A., Sadeghi-e-lari, A., & Sadidi, J. (2017). Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research Quarterly*, 49(4), 667-681. (in Farsi)
- Zare khormizie, H., Hosseini, S. Z., Mokhtari, M. H., & Ghafarian Malamiri, H, R. (2017). Reconstruction of MODIS NDVI Time Series using Harmonic ANalysis of Time Series algorithm (HANTS). *MJSP*. 21(3), 221-255. (in Farsi)

**Estimation of actual evapotranspiration of pistachio plants using
the SEBAL algorithm and Landsat 8 images: A case study of
Abarkooh desert margin in Yazd Province**

Hamid Reza Ghafarian Malamiri¹, Assistant Professor Department of
Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Hadi Zare Khormizi, PhD Student of Range Management, Faculty of
Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Morad Mortaz, Master' Degree, Horticulture and Agronomy, University of
California, Plant Science Department, Davis, California

Received: 29-10-2019

Accepted: 29-10-2020

Introduction: Iran, along with the Mediterranean countries, is known as one of the main habitats of pistachio (*Pistacia vera* L.) in the world. This plant plays an important role in the economies of arid and semi-arid countries such as Iran, Turkey and Syria. Although pistachio crop can produce a medium-quality yield with low water consumption, proper irrigation management can help to increase yield with higher quality. Evapotranspiration, which involves the evaporation of water from the soil surface and transpiration from vegetation, represents the fundamental process of a hydrological cycle. Monitoring the spatial and temporal changes of evapotranspiration is very important for irrigation and water management, especially in arid areas. Evapotranspiration on a homogeneous surface can be measured using conventional techniques such as Bowen ratio, Eddie covariance, water balance, and on field surfaces using a lysimeter system. These methods are usually costly and time-consuming and also do not have the ability to be generalized at a large heterogeneous level. As a result, it is more desirable to use remote sensing methods that take these heterogeneities and changes into account. Several algorithms have been developed to determine evapotranspiration using satellite imagery. In this regard, the SEBAL algorithm is one of the most widely used methods to determine the actual evapotranspiration by remote sensing. The aim of the present study was to determine the actual evapotranspiration using the SEBAL algorithm during different phenological periods and the growing season in pistachio orchards on the edge of Abarkooh desert in Yazd Province. The results of this study can be used to effectively manage the water consumption and prevention of drought stress in pistachio gardens.

¹ Corresponding Author Email: hrghafarian@yazd.ac.ir

Methodology: The study area is located in Yazd Province, 20 km south of Dehshir district. The total study area is 13971 hectares, of which approximately 3160 hectares are covered with pistachio gardens. In the present study, 16 images of Landsat 8 with 16-day periods from 03/16/2015 to 11/11/2015 were used after the atmospheric, geometric and radiometric errors were corrected. The reason for choosing the mentioned time period is that this is the active growing season of pistachios. In the next step, the input parameters of the SEBAL algorithm were prepared, and the actual daily evapotranspiration rates at the transit dates of the Landsat 8 were calculated. Then, the rates of evapotranspiration were obtained in 15-day phenological periods, including the four main stages of phenology and the entire one-year growth period of pistachios. Also, in order to evaluate the results, the daily evapotranspiration of pistachio trees in the passing days of the satellite was calculated according to FAO 56 guidelines and at six different points on pistachio lands. In the next step, the correlation coefficient and the RMSE of daily evapotranspiration were obtained by the SEBAL algorithm and the FAO 56 instructions.

Results and Discussion: A comparison of the daily rates of evapotranspiration obtained by SEBAL algorithm and the FAO 56 showed that the two models are well matched; the average correlation and RMSE at six points were 0.77 and 1.24 mm / day respectively. Based on the results, the average and maximum evapotranspiration of pistachios in a one-year growth period in 2015 in the study area were 1015 and 1650 mm respectively. Also, in 83% of the study area, the actual evapotranspiration rate in a one-year growing season was 700 to 1300 mm. The maximum rate of evapotranspiration was observed in June and July with a rate change between 80 to 100 mm during 15-day phenological stages. According to the results, 50% of evapotranspiration occurs in the period from June 1st to August 31st. The rates of pistachio evapotranspiration are different according to the climatic conditions, the water management system and the area. In some studies done outside Iran, the yearly rate of pistachio evapotranspiration have been found to be 800, 600 and 1018 mm. In two different studies in Ardakan region of Yazd, the actual evapotranspiration of pistachio trees was estimated 1133 and 1275 mm using the SEBAL algorithm. Another study in Yazd Province showed that more than 60% of Marvast pistachio gardens have a seasonal water consumption of 410 to 680 mm, while the cumulative evapotranspiration of the reference plant and the standard evapotranspiration and transpiration of pistachios in the same period were 1558 and 920 mm respectively. In other words, the pistachio trees in this area are under drought stress, which will reduce the crop yield.

Conclusion: Although valid terrestrial evapotranspiration data such as lysimetric data were not available in the study area to compare with the results

The Journal of Geographical Research on Desert Areas
8th Year – No. 2- Autumn and Winter 2020

of the Sebal algorithm, comparing these results with those of other studies in this field shows that the findings of the present study are accurate and dependable. Also, the comparison of the rates of daily evaporation obtained through the SEBAL algorithm and the FAO 56 method showed that the results of the two models were well matched. In general, the results of the present study suggest the capability of remote sensing techniques to calculate evapotranspiration and their usefulness in crop irrigation management.

Keywords: SEBAL, Irrigation management, Pistachio, Evapotranspiration, Abarkuh.