



## برآورد تبخیر تعرق واقعی در باغات پسته با استفاده از الگوریتم سبال و مقایسه آن در سه سیستم آبیاری مختلف

سهیل رادیوم

دریافت: ۱۳ مهر ۱۳۹۹ / پذیرش: ۱ بهمن ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۳۰ تیر ۱۴۰۰

### چکیده

در مقابل، روش‌های مبتنی بر سنجش از دور ایجاد شده است که راه‌حل مناسبی برای برآورد تبخیر تعرق واقعی در سطح پوشش گیاهی می‌باشند. تصاویر ماهواره‌ای با قابلیت پوشش سراسری و دید تکراری، امکان پایش تبخیر تعرق را در سطح مزارع و در طول دوره رویش گیاه فراهم آورده‌اند. تحقیقات مختلفی در داخل و خارج از کشور در زمینه برآورد تبخیر تعرق واقعی اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است، که حاکی از دقت قابل قبول این روش بوده است. اما عمده این تحقیقات در مربوط به مزارع کشاورزی است و تحقیقات قابل توجهی در زمینه برآورد تبخیر تعرق در سطح باغ انجام نشده است. پوشش گیاهی در سطح مزارع در مقایسه با باغات یکدست و همگن است، بنابراین برآورد شاخص پوشش گیاهی که از ورودی‌های مدل سبال است در مزارع کشاورزی ساده‌تر از باغات انجام می‌گیرد که می‌تواند بر دقت نهایی تأثیرگذار باشد. بنابراین هدف اصلی این تحقیق برآورد مقدار تبخیر تعرق در سطح باغات با استفاده از الگوریتم سبال و ارزیابی دقت برآورد است. علاوه بر این در این تحقیق، از اندازه‌گیری روش مستقیم بیلان آبی با استفاده از داده‌های سنسورهای رطوبت خاک موجود در قسمت‌های مختلف باغ، برای ارزیابی دقت استفاده شده است. استفاده از این روش قابلیت اطمینان به نتایج و ارزیابی دقت انجام شده را افزایش می‌دهد.

مواد و روش‌ها تحقیق حاضر در باغات پسته شهرستان زرننده

پیشینه و هدف طی صدسال گذشته، حدود ۹۰ درصد از سرانه آب تجدید پذیر کشور کاهش یافته است. از منابع آب تجدیدشونده کشور حدود ۹۰ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص دارد. با افزایش سطح زیر کشت باغات پسته و افزایش تقاضا برای آب از یک طرف و محدودتر شدن منابع آبی در منطقه، عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب به شدت در حال افزایش است. در این راستا، مهم‌ترین گام پیشگیری از هدر رفت آب، توزیع یکنواخت آب در سطح مزرعه، آبیاری بهینه و متناسب با نیاز آبی گیاه در هر مرحله از رشد است. حدود ۹۹ درصد آب جذب شده توسط گیاه صرف پدیده تبخیر و تعرق می‌گردد. لذا، شناخت این پدیده و برآورد دقیق آن می‌تواند در تعیین نیاز آبی گیاهان نقش بسزایی داشته باشد. اندازه‌گیری تبخیر تعرق واقعی پوشش گیاهی، خارج از شرایط آزمایشگاهی دشوار است. روش‌های تجربی زیادی برای برآورد تبخیر تعرق واقعی و پتانسیل با استفاده از داده‌های هواشناسی و اقلیمی به وجود آمده است. اما اکثر این روش‌ها تنها قادر به برآورد تبخیر تعرق پتانسیل می‌باشند و مقدار واقعی تبخیر تعرق را برآورد نمی‌نمایند.

سهیل رادیوم (✉)

۱. استادیار مرکز تحقیقات فضای، پژوهشگاه فضای، تهران، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: [soheil.radiom@ieec.org](mailto:soheil.radiom@ieec.org)

<http://dor1.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.2.5.8>

به‌عنوان نمونه در باغ با روش آبیاری غرقابی، بخش‌هایی از باغ تبخیر تعرق پایینی نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از عدم تسطیح سطح باغ و عدم دریافت رطوبت مناسب در این نواحی باشد. بدیهی است همین مقدار رطوبت در سایر بخش‌های باغ تجمع نموده و از طریق نفوذ عمقی از دسترس خارج می‌گردد. این توزیع غیریکنواخت در باغ با روش آبیاری رو سطحی نیز مشاهده می‌شود. به‌عنوان نمونه بخش میانی باغ دارای آبیاری رو سطحی همواره مقدار تبخیر تعرق بالاتری را نشان می‌دهد که می‌تواند نشان‌دهنده هدر رفت آب در این بخش از باغ، ناشی از عملکرد بیش از نیاز نازل‌های رطوبت باشد. برای ارزیابی بهتر اختلاف تبخیر تعرق در روش‌های مختلف آبیاری، مقدار متوسط، حداقل، حداکثر و انحراف معیار مقادیر تبخیر تعرق در باغ‌های مربوط به سه سیستم آبیاری مختلف محاسبه شده است. نتایج نشان داد در تمام تاریخ‌ها مقادیر دامنه تغییرات و انحراف معیار تبخیر تعرق در سیستم آبیاری غرقابی بیشتر از سایر روش‌ها بوده است که به‌خوبی نشان‌دهنده عدم آبیاری یکنواخت در سطح باغ است.

**نتیجه‌گیری** نتایج تحقیق حاکی از دقت مناسب الگوریتم سبال در برآورد تبخیر تعرق واقعی باغات بوده است. به‌طوری‌که در مقایسه با روش بیلان آبی همبستگی  $0/82$  و خطای  $0/57$  داشته است. علاوه بر این، مقایسه وضعیت رطوبت در قسمت‌های مختلف باغ و نیز باغ‌های دارای سیستم آبیاری مختلف نشان داده است که با استفاده از برآورد تبخیر و تعرق به کمک تصاویر ماهواره‌ای می‌توان اطلاعات مناسبی از نحوه توزیع رطوبت در سطح باغ دست‌یافت. این داده‌ها، اطلاعات ارزشمندی در خصوص مدیریت بهینه منابع آب و افزایش کارایی آبیاری فراهم می‌نماید. با استفاده از روش‌های آبیاری زیرسطحی می‌توان به‌صورت مؤثری هدر رفت آب آبیاری ناشی از تبخیر از سطح خاک را کاهش داد. نتایج تحقیق نشان داده است که در مناطقی که دسترسی به اطلاعات سنسورهای رطوبت خاک و یا روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق وجود ندارد، استفاده از الگوریتم سبال و روش‌های سنجش‌ازدور می‌تواند اطلاعات مناسبی را جهت مدیریت بهینه منابع آبی فراهم نماید.

**واژه‌های کلیدی:** پسته، تبخیر تعرق، سنجش‌ازدور، سنسور خاک، کشاورزی دقیق

استان مرکزی انجام شده است. باغ‌ها دارای سیستم‌های آبیاری غرقابی، قطره‌ای رو سطحی و قطره‌ای زیرسطحی بوده‌اند. تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از دو روش بیلان آبی و الگوریتم سبال برآورد شده است. از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه امام او تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای برآورد تبخیر تعرق به کمک الگوریتم سبال استفاده شده است. تبخیر و تعرق واقعی در زمان‌های گذر ماهواره در طول فصل رشد برآورد شده است. برای انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم در الگوریتم سبال، از روش نیمه اتوماتیک پیشنهاد شده توسط اولمدو استفاده شد که استفاده از نظر کاربر را در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به حداقل می‌رساند. برای ارزیابی دقت نتایج برآورد تبخیر و تعرق، از اطلاعات سنسورهای رطوبت خاک موجود در سطح باغ استفاده شده است. تعداد ۲۸ سنسور رطوبت خاک را در بخش‌های مختلف باغ اندازه‌گیری می‌نمایند. با استفاده از مقادیر رطوبت خاک سنسورها، مقدار تبخیر تعرق واقعی با استفاده از روش بیلان آبی برآورد شد و به‌عنوان مقدار مرجع مورد استفاده قرار گرفت.

**نتایج و بحث** مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم سبال و روش بیلان آبی نشان داد که الگوریتم سبال توانسته است با خطای  $RMS 0/57$  مقدار تبخیر تعرق واقعی را در قسمت‌های مختلف باغ برآورد نماید. علاوه بر این همبستگی بین مقادیر برآورد شده توسط دو روش برابر  $0/82$  بوده است که نشان‌دهنده قابلیت مناسب الگوریتم سبال در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق است. همبستگی بین مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده از مدل سبال و تبخیر و تعرق مرجع برابر  $0/76$  به‌دست آمده است. تغییرات مقدار تبخیر و تعرق در قسمت‌های مختلف باغ و نیز باغ‌های دارای سیستم‌های آبیاری مختلف غرقابی، قطره‌ای رو سطحی و قطره‌ای زیرسطحی بررسی شده است. نتایج نشان داده است، باغ دارای آبیاری زیرسطحی به‌طور متوسط کمترین میزان تبخیر تعرق را در تاریخ‌های مختلف از خود نشان داده است. با توجه به آنکه تبخیر تعرق معادل مجموع مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه است می‌توان، این مقدار کاهش را به کاهش تبخیر از سطح خاک نسبت داد. علاوه بر این، در همه تاریخ‌ها ناهمسانی تبخیر تعرق در قسمت‌های مختلف باغ‌های دارای سیستم آبیاری یکسان قابل مشاهده است.

## مقدمه

طی صدسال گذشته، حدود ۹۰ درصد از سرانه آب تجدید پذیر کشور کاهش یافته است (۵). از منابع آب تجدیدشونده کشور حدود ۹۰ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص دارد (۱۱). محصولات کشاورزی ایران سهم عمده‌ای از صادرات غیرنفتی را به خود اختصاص داده است. پسته از جمله مهم‌ترین اقلام صادراتی کشاورزی کشور است و طی سال (۱۳۶۰ تا ۱۳۸۴) سطح زیر کشت آن حدود سه برابر شده است (۱۵ و ۱۹). کشت پسته در ایران عمدتاً در مناطق خشک کشور انجام می‌شود. در این مناطق بارندگی بسیار ناچیز بوده و عمدتاً فاقد منابع آب سطحی هستند و تولیدات کشاورزی بیشتر متکی به آب‌های زیرزمینی است. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در مناطق پسته‌کاری، موجب کاهش کیفی و کمی این منابع شده است (۶). میزان افت سالانه آب در شهرستان رفسنجان به‌عنوان یکی از مناطق عمده تولید پسته در کشور حدود ۰/۷۵ متر و بیلان منفی سالانه سفره آب زیرزمینی ۲۴۹ میلیون مترمکعب بوده است. علاوه بر این کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز افت داشته و حداکثر شوری در برخی موارد تا ۲۰ هزار میکروموس بر سانتی‌متر گزارش شده است (۱).

با افزایش سطح زیر کشت باغات پسته و افزایش تقاضا برای آب از یک طرف و محدودتر شدن منابع آبی در منطقه، عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب به‌شدت در حال افزایش است (۱۹). بنابراین، جهت تداوم زراعت در این مناطق، حفظ منابع آب و بهره‌برداری اقتصادی کشاورزی، افزایش بهره‌وری استفاده از منابع آب ضروری خواهد بود. در این راستا، مهم‌ترین گام پیشگیری از هدر رفت آب، توزیع یکنواخت آب در سطح مزرعه، آبیاری بهینه و متناسب با نیاز آبی گیاه در هر مرحله از رشد است. حدود ۹۹ درصد آب جذب‌شده توسط گیاه صرف پدیده تبخیر و تعرق می‌گردد. لذا، شناخت این پدیده و برآورد دقیق آن می‌تواند در تعیین نیاز آبی گیاهان نقش بسزایی داشته باشد (۳ و ۲۴). بنابراین با اندازه‌گیری مقدار تبخیر و تعرق گیاه در هر مرحله و همچنین تغییرات آن

در سطح مزرعه، می‌توان نسبت به مدیریت بهینه زمانی و مکانی آبیاری در سطح مزرعه اقدام نمود و به‌این ترتیب راندمان آبیاری را به‌صورت مؤثری افزایش داد.

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی پوشش گیاهی، خارج از شرایط آزمایشگاهی دشوار است. روش‌های تجربی زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل با استفاده از داده‌های هواشناسی و اقلیمی به وجود آمده است. اما اکثر این روش‌ها تنها قادر به برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشند و مقدار واقعی تبخیر و تعرق را برآورد نمی‌نمایند. همچنین، برآورد همه این روش‌ها در مناطق همگن اطراف ایستگاه هواشناسی، قابل استفاده است و تعمیم آن به سایر مناطق از دقت بالایی برخوردار نیست. در مقابل، روش‌های مبتنی بر سنجش‌از‌دور ایجاد شده است که راه‌حل مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در سطح پوشش گیاهی می‌باشند (۲۲، ۲۶، ۲۸ و ۲۹). تصاویر ماهواره‌ای با قابلیت پوشش سراسری و دید تکراری، امکان پایش تبخیر و تعرق را در سطح مزارع و در طول دوره رویش گیاه فراهم آورده‌اند.

تحقیقات مختلفی در زمینه برآورد تبخیر و تعرق واقعی مناطق کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. راوات و همکاران (۲۰) تبخیر و تعرق واقعی محصول گندم را با استفاده از روش سبال (Surface Energy Balance Algorithm for Land)، لایسی‌متر و پنمن مونیتث (Penman-Monteith) برآورد کردند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که الگوریتم سبال پتانسیل خوبی برای برآورد تبخیر و تعرق منطقه داشته است. در تحقیق دیگری واگل و همکاران (۲۵) پنج مدل مختلف بیلان انرژی سطح زمین را برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه سورگم مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم‌های سبال و Balance Simplified Surface Energy بهترین عملکرد را برای برآورد تبخیر و تعرق سورگم داشته‌اند و روش‌های متریک (Index Mapping) بهترین عملکرد ضعیفی نشان دادند. همچنین دوو و همکاران (EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Operational simplified surface energy) و Calibration balance عملکرد ضعیفی نشان دادند. همچنین دوو و همکاران

یعقوب زاده و همکاران (۱۶) با استفاده از تصاویر مودیس مقدار تبخیر و تعرق را در حوزه آبخیز تمر استان گلستان برآورد کرده‌اند و نتایج حاصل از مدل سبال را با روش استاندارد فائو مقایسه کردند که نشان داد روش سبال میزان تبخیر و تعرق واقعی را در سطح وسیع برآورد می‌نماید. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که روش سبال میزان تبخیر و تعرق واقعی را بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر در روز، کمتر از روش پنمن مونیتث برآورد کرده است. همچنین در پژوهشی دیگر، کریمی و همکاران (۱۴) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۵ تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت را در دشت ماهیدشت کرمانشاه برآورد نمودند. حداکثر خطای روش سبال در مقایسه با داده‌های لایسی‌متر، کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد که حاکی از دقت قابل قبول این روش بوده است. در مجموع مقادیر تبخیر و تعرق واقعی سبال و تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن مونیتث خطای میانگین مطلق ۰/۶۳ میلی‌متر در روز داشتند که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول دو روش بوده است. همچنین، ثنایی نژاد و همکاران (۲۱) مقدار تبخیر و تعرق را با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برای سه روز از سال و در منطقه‌ای در مشهد برآورد نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که الگوریتم سبال توانایی خوبی در برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس روزانه دارند. تحقیقات مختلفی در داخل و خارج از کشور در زمینه برآورد تبخیر و تعرق واقعی اراضی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است، که حاکی از دقت قابل قبول این روش بوده است. اما عمده این تحقیقات در مربوط به مزارع کشاورزی است و تحقیقات قابل توجهی در زمینه برآورد تبخیر و تعرق در سطح باغ انجام نشده است. پوشش گیاهی در سطح مزارع در مقایسه با باغات یکدست و همگن است، بنابراین برآورد شاخص پوشش گیاهی که از ورودی‌های مدل سبال است در مزارع کشاورزی ساده‌تر از باغات انجام می‌گیرد که می‌تواند بر دقت نهایی تأثیرگذار باشد. بنابراین هدف اصلی این تحقیق برآورد مقدار تبخیر و تعرق در سطح باغات با استفاده از الگوریتم سبال و ارزیابی دقت برآورد است.

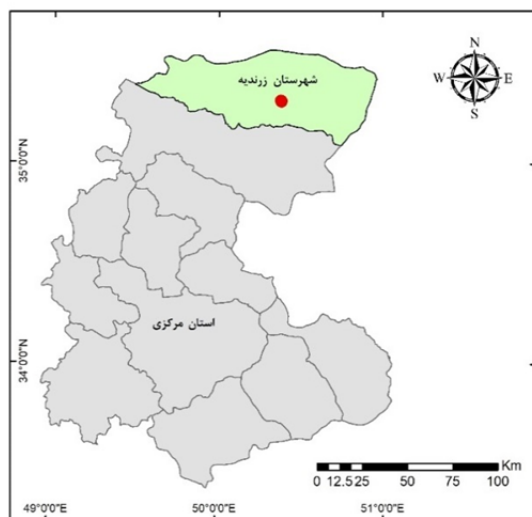
(۱۰) در تحقیقی مقدار روزانه و سالیانه را با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس ( Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) در دلتای رودخانه زرد چین تخمین زدند. این مطالعه نشان داد که در این منطقه نوسانات معنی‌دار تبخیر و تعرق در یک زمان معین و برای گونه‌های مختلف گیاهی در فصول مختلف وجود دارد. فولهس و همکاران (۱۲) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل توازن انرژی متریک مقادیر تبخیر و تعرق را در مناطق کشاورزی برزیل محاسبه نمودند. نتایج نشان داد مدل متریک می‌تواند به‌منظور برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک و تحت آبیاری شمال شرق برزیل به کار رود. علاوه بر این، چاوز و همکاران (۹) با استفاده از تصاویر لندست و به‌کارگیری مدل متریک به ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق روزانه با داده‌های لایسی‌متری پرداخته که میزان خطا در آن کمتر از ۱۵ درصد به دست آمد. باستیانسن و همکاران (۸) به بررسی دقت روش سبال در شرایط مختلف آب و هوایی و در مقیاس مزرعه‌ای و حوزه‌ای پرداختند. برای شرایط رطوبت خاک و گیاه رایج در منطقه، صحت برآورد در مقیاس مزرعه‌ای ۸۵ درصد برای دوره یک‌روزه و تا ۹۵ درصد برای دوره فصلی گزارش شده است. دقت تعیین تبخیر و تعرق سالیانه نیز در حوزه‌های بزرگ به‌طور متوسط ۹۶ درصد بیان شده است. در تحقیق دیگر، تاسومی و همکاران (۲۳) در آیداهو، دو مدل توازن انرژی سبال و متریک را مقایسه کردند. نتایج نشان داد هر دو مدل توازن انرژی با نتایج حاصل از لایسی‌متر تطابق خوبی دارد و استفاده از مدل‌های توازن انرژی را برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق واقعی پیشنهاد نمودند. در ایران نیز تحقیقات مختلفی به برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی پرداخته‌اند، از جمله، امیدوار و همکاران (۱۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و الگوریتم‌های سبال و متریک تبخیر و تعرق واقعی را در محدوده مشهد برآورد نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل مقدار تبخیر و تعرق واقع را متناسب با توزیع مکانی منطبق یا شرایط پستی‌وبلندی و پوشش گیاهی حوضه برآورد می‌کنند. علاوه بر این، میر

## روش تحقیق

### معرفی منطقه مورد مطالعه

واحد کشاورزی مورد مطالعه با مساحت ۸۰۰ هکتار در منطقه زرنديه استان مرکزی قرار دارد. آب مورد نیاز اراضی این واحد از شش حلقه چاه عمیق مجموعاً با آبدهی ۶۳ لیتر در ثانیه تأمین می‌شود. این واحد دارای ۱۸۰ هکتار باغ پسته با ارقام کله قوچی و فندقي است. سه مجموعه باغ با سیستم‌های آبیاری متفاوت غرقابی، قطره‌ای رو سطحی و قطره‌ای زیر سطحی به عنوان منطقه پایلوت این تحقیق انتخاب شده‌اند. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه و باغ‌های پایلوت را نشان می‌دهد. مساحت کل منطقه پایلوت معادل ۲۰ هکتار بوده و شامل ارقام فندقي و کله قوچی است. سن درختان در آبیاری غرقابی حدود ۴۷-۴۰ سال و در بخش آبیاری قطره‌ای حدود ۲۵-۲۲ سال بوده است.

علاوه بر این، در تحقیقات مختلف، عمدتاً داده‌های لایسی متر به عنوان داده مرجع برای ارزیابی برآور مقدار تبخیر و تعرق واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دسترسی به این داده‌ها محدود بوده و تنها به صورت نقطه‌ای در اختیار است. همچنین، به کارگیری لایسی متر در باغ نیازمند به کارگیری تقریب‌های متعددی است که می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیرگذار باشد. بنابراین در این تحقیق، از اندازه‌گیری روش مستقیم بیلان آبی با استفاده از داده‌های سنسورهای رطوبت خاک موجود در قسمت‌های مختلف باغ، برای ارزیابی دقت استفاده شده است. استفاده از این روش قابلیت اطمینان به نتایج ارزیابی دقت انجام شده را افزایش می‌دهد. همچنین این تحقیق برای نخستین بار، در اراضی کشاورزی با سه سیستم آبیاری مختلف اجرا شده است و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و باغ‌های پایلوت

Fig. 1. The location of study area

### داده‌های مورد استفاده

به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی منطقه مطالعه از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. علاوه بر این از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه امام که نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه مطالعه بوده است، در زمان گذر ماهواره استفاده شده است. به منظور ارزیابی دقت نتایج از داده‌های سنسورهای رطوبت خاک نصب شده در سطح باغ استفاده شده است و همبستگی برآوردهای تبخیر و تعرق با این داده‌ها ارزیابی شده است. در این بخش داده‌های مورد استفاده در تحقیق معرفی شده‌اند.

### تصاویر ماهواره لندست ۸

نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ تهیه شده است. ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ در مدار قرار گرفته است و دوره بازدید مجدد آن ۱۶ روز است. ماهواره لندست ۸، دو سنجنده TIRS (Thermal Infrared Sensor) و OLI (Operational Land Imager) دارد. قدرت تفکیک مکانی تصاویر سنجنده TIRS ۱۰۰ متر و تصاویر OLI ۳۰ و ۱۵ متر (باند پانکروماتیک) است. جدول ۱ مشخصات داده‌های دو سنجنده مرئی و حرارتی ماهواره لندست ۸ را نشان می‌دهد و جدول ۲ تاریخ تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات باندهای تصاویر لندست ۸

Table 1. LandSat 8 Bands Properties

شماره باند	توان تفکیک مکانی (متر)	محدوده طول موج (نانومتر)
۱	۳۰	۴۳۵ - ۴۵۱
۲	۳۰	۴۵۲ - ۵۱۲
۳	۳۰	۵۳۳ - ۵۹۰
۴	۳۰	۶۳۶ - ۶۷۳
۵	۳۰	۸۵۱ - ۸۷۹
۶	۳۰	۱۵۶۶ - ۱۶۵۱
۱۰	۱۰۰	۱۰۶۰۰ - ۱۱۱۹۰
۱۱	۱۰۰	۱۱۵۰۰ - ۱۲۵۱۰
۷	۳۰	۲۱۰۷ - ۲۲۹۴
۸	۱۵	۵۰۳ - ۶۷۶
۹	۳۰	۱۳۶۳ - ۱۳۸۴

جدول ۲. تاریخ تصاویر ماهواره‌ای

Table 2. Date of satellite images

شماره تصویر	تاریخ تصویربرداری	تاریخ شمسی
۱	۲۰۱۹/۰۴/۱۷	۱۳۹۸/۰۱/۲۸
۲	۲۰۱۹/۰۵/۱۹	۱۳۹۸/۰۲/۲۹
۳	۲۰۱۹/۰۶/۰۴	۱۳۹۸/۰۳/۱۳
۴	۲۰۱۹/۰۶/۲۰	۱۳۹۸/۰۳/۳۰
۵	۲۰۱۹/۰۷/۰۶	۱۳۹۸/۰۴/۱۵
۶	۲۰۱۹/۰۷/۲۲	۱۳۹۸/۰۴/۳۱

### داده‌های هواشناسی

از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه مطالعاتی (ایستگاه فرودگاه امام خمینی) تهیه شد. جدول ۳ نمونه‌ای از اطلاعات بکار برده شده را نشان می‌دهد.

برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی نیاز به اطلاعات هواشناسی در زمان گذر ماهواره است. این اطلاعات با استفاده

جدول ۳. نمونه‌ای از اطلاعات هواشناسی بکار برده شده

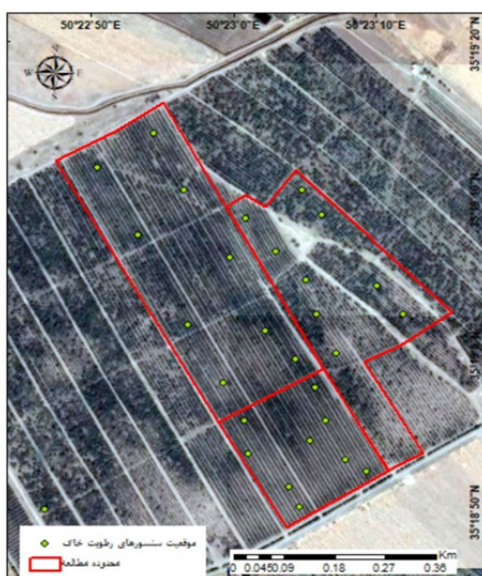
Table 3. A sample of used meteorological information

تعداد ساعات آفتابی	سرعت باد روزانه (متر بر ثانیه)	سرعت باد لحظه گذر	رطوبت نسبی روزانه (%)	رطوبت نسبی لحظه گذر (%)	میانگین دمای روزانه	میانگین دمای لحظه گذر	تاریخ
۶/۲	۳/۵	۶	۳۴	۲۱	۲۰/۴	۲۵/۴	۲۰۱۹/۰۴/۲۳
۱۱/۶	۶/۶۲۵	۹	۱۸/۶۲۵	۱۲	۳۲/۸	۳۸	۲۰۱۹/۰۷/۲۶

### سنسورهای رطوبت خاک

در دسترس ریشه است، ثبت نمایند. این سنسورها از طریق ارتباطات رادیویی، اطلاعات اخذشده را به سیستم پردازش مرکزی انتقال می‌دهند. شکل ۲ موقعیت این سنسورها را نشان داده است.

تعداد ۲۸ سنسور اندازه‌گیری رطوبت خاک در قسمت‌های مختلف باغ نصب شده است. این سنسورها قادر هستند رطوبت خاک را در عمق‌های مختلف خاک که رطوبت



شکل ۲. موقعیت سنسورهای رطوبت خاک در سطح باغات

Fig. 2. The location of soil moisture sensors

تیرماه ۱۳۹۸ در ساعت ۱۰:۳۰ صبح نشان می‌دهد.

جدول ۴ به صورت نمونه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط تعدادی از سنسورها را در تاریخ ۱۵

جدول ۴. نمونه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای رطوبت خاک

Table 4. A sample of data measured by soil moisture sensors

رطوبت خاک	موقعیت مکانی سنسور		شماره سنسور
	x	y	
۱۱/۳۰	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۱
۳۳/۵۱	۵۰/۳۹	۳۵/۳۲	۲
۲۴/۱۲	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۳
۳۱/۱۳	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۴
۲۷/۳۹	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۵
۳۴/۵۸	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۶
۵۶/۱۴	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۷
۲۲/۲۱	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۸
۱۶/۷۷	۵۰/۳۸	۳۵/۳۱	۹
۹/۲۰	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۱۰
۱۱/۲۶	۵۰/۳۹	۳۵/۳۱	۱۱
۵/۸۵	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۱۲
۳۰/۶۰	۵۰/۳۸	۳۵/۳۱	۱۳
۶۶/۹۲	۵۰/۳۸	۳۵/۳۲	۱۴
۳۱/۷۱	۵۰/۳۹	۳۵/۳۲	۱۵

### الگوریتم سبال

تبخیر و تعرق واقعی منطقه با استفاده از الگوریتم سبال و داده‌های ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی در زمان گذر ماهواره محاسبه شده است. الگوریتم سبال توسط باستانسن در سال ۲۰۰۰ ارائه شد (۷). در این روش تبخیر و تعرق به‌عنوان باقیمانده از معادله بیلان انرژی سطح زمین (رابطه ۲) محاسبه می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [2]$$

در این رابطه،  $\lambda ET$  شار گرمای نهان تبخیر (وات بر مترمربع)،  $R_n$  شار تابش خالص (بیلان تابش موج کوتاه و موج بلند ورودی و خروجی به سطح زمین)،  $G$  شار گرمای خاک (وات بر مترمربع) و  $H$  شار گرمای محسوس (وات بر مترمربع) است. از آنجایی که گرمای نهان یک واحد آب ثابت است می‌توان گرمای نهان را به واحد معادل آب تبدیل کرده و مقدار تبخیر و تعرق را به دست آورد. شار تابش خالص رسیده

### برآورد تبخیر و تعرق

برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه پسته در مراحل مختلف رشد از دو روش مستقیم و غیرمستقیم برآورد تبخیر و تعرق استفاده شده است. در روش مستقیم از روش بیلان رطوبت و در روش غیرمستقیم از الگوریتم سبال استفاده شده است.

### روش بیلان رطوبت

در روش مستقیم برآورد تبخیر و تعرق از روش اندازه‌گیری بیلان رطوبت در ناحیه ریشه درخت استفاده شد. رابطه ۱ اجزای بیلان رطوبت و روابط حاکم بین آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$ET_C = I + P - D - \Delta M \quad [1]$$

در این رابطه؛  $I$  حجم آب آبیاری،  $P$  بارندگی،  $D$  نفوذ عمقی،  $\Delta M$  تغییرات رطوبت خاک در دو آبیاری متوالی و  $ET_C$  تبخیر و تعرق واقعی گیاه برحسب میلی‌متر است.



آثرویدینامیکی به انتقال گرما (s/m) است. برای حل این معادله از دو پیکسل سرد و گرم برای برآورد  $dT$  استفاده می‌شود. این رابطه دارای حل صریح نیست و به صورت تکراری جواب بهینه‌سازی می‌گردد.

با در دست داشتن شار گرمایی خاک (G)، شار گرمای محسوس (H) و شار تابش خالص (Rn)، شار گرمای نهان ( $\lambda ET$ ) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. گیاه برای دفع گرمای نهان و جلوگیری از خشکیدگی، معادل گرمای نهان، تبخیر و تعرق انجام می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از تصویر ماهواره‌ای، تبخیر و تعرق لحظه عبور ماهواره را اندازه‌گیری می‌کنند. تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad [6]$$

در این رابطه،  $ET_{inst}$  مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای (میلی‌متر بر ساعت)،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر آب (ژول بر کیلوگرم) است. مقدار روزانه تبخیر و تعرق از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$ET_{24} = ET_{rF} * ET_{r-24} \quad [7]$$

در این رابطه؛  $ET_{24}$  مقدار تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته است. برای محاسبه تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته فرض می‌شود، مقدار کسر تبخیر و تعرق لحظه‌ای ( $ET_{rF}$ ) در طول ۲۴ ساعت ثابت است. مقدار  $ET_{rF}$  از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_{rinst}} \quad [8]$$

در این رابطه  $ET_r$  معادل تبخیر و تعرق مرجع است.

#### انتخاب پیکسل سرد و گرم

برای انتخاب پیکسل سرد و گرم از روش پیشنهاد شده توسط اولمدو (۱۷)، استفاده شده است. در این روش مجموعه‌ای از پیکسل‌های سرد و گرم به صورت اتوماتیک و با

به سطح زمین ( $R_n$ ) حاصل موازنه شار تابشی ورودی و خروجی است و بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود (۲).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{SI} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad [3]$$

که در آن  $R_{SI}$  تابش طول‌موج کوتاه ورودی  $\alpha$  آلبدوی سطحی  $R_{L\uparrow}$  تابش طول‌موج بلند خروجی،  $R_{L\downarrow}$  تابش طول‌موج بلند ورودی و  $\epsilon_0$  درصد گسیلمندی حرارتی سطح زمین است. عبارت  $(1 - \epsilon_0)$  معرف کسری از تابش طول‌موج بلند ورودی است که از سطح منعکس می‌شود. این مقادیر با استفاده از اطلاعات باندهای مختلف لندست محاسبه شد.

شار گرمای خاک (G)، میزان ذخیره گرما در خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است. این پارامتر تابعی از پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ است. مقدار آن از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$G/R_n = T_s / \alpha (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) \times (1 - 0.98 * NDVI^4) \quad [4]$$

در این رابطه  $T_s$  دمای سطح زمین (درجه سانتی‌گراد)،  $\alpha$  آلبدوی سطح خاک و  $NDVI$  شاخص تفاضلی پوشش گیاهی،  $R_n$  شار تابش خالص (وات بر مترمربع) و  $G$  شار گرمای خاک (وات بر مترمربع) است (۴). شاخص تفاضلی پوشش گیاهی با استفاده از مقادیر باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک تصویر در هر تاریخ محاسبه شد. مقدار دمای سطح زمین با استفاده از باندهای حرارتی تصویر محاسبه شد.

شار گرمای محسوس نرخ از دست دادن گرما از خاک به وسیله همرفت و انتقال است که به دلیل اختلاف درجه حرارت رخ می‌دهد. شار گرمای محسوس تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است و به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود (۷).

$$H = (\rho \times C_p \times dT) / rah \quad [5]$$

در این رابطه،  $\rho$  چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $C_p$  گرمای ویژه هوا (۱۰۰۴ ژول بر کیلوگرم بر کلوین)،  $dT$  اختلاف دمایی بین دو ارتفاع برحسب کلوین و  $rah$  مقاومت

تحقیق، از روش پنمن مونتیت طبق رابطه ۹ برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع استفاده شده است (۸).

$$ET_r = \frac{0.408 * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * U * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U)} \quad [9]$$

در معادله بالا  $R_n$  تابش خالص در سطح پوشش گیاهی،  $T$  میانگین دمای هوا،  $U$  سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار،  $\gamma$  ضریب رطوبتی و  $G$  شار گرما به داخل خاک است (۸). این اطلاعات به کمک داده‌های ایستگاه هواشناسی تهیه می‌شود.

## نتایج

### الگوریتم سبال

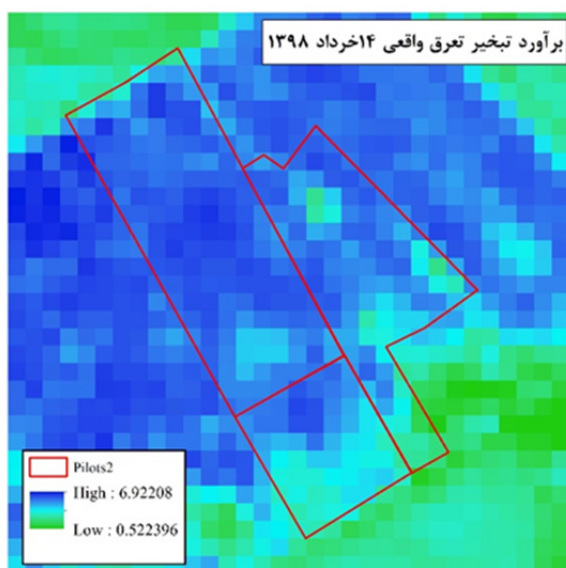
الگوریتم سبال بر روی شش تصویر ماهواره لندست ۸ منطقه مطالعه اجرا شد. پیکسل‌های سرد و گرم با استفاده از روش پیشنهاد شده توسط اولمدو (۱۷) که در بخش مبانی نظری توضیح داده شد، برای هر یک از تاریخ‌های مطالعه انتخاب شدند. پیکسل سرد در مزارع یونجه شاداب، متراکم و آبیاری شده و پیکسل گرم نیز در یک زمین آیش انتخاب شد. در نهایت مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از رابطه‌ها ۲ تا ۸ محاسبه شد. شکل‌های ۳ تا ۶ نقشه‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی منطقه مطالعه را در تاریخ‌های مختلف نشان می‌دهد. جدول ۵ مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم سبال را نشان می‌دهد.

استفاده از برقراری این شرایط انتخاب شد؛ (۱) پیکسل در یک منطقه همگن قرار داشته باشد. (۲) مقدار دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و آلبدو آن با پیکسل‌های مجاور اختلاف فاحشی نداشته باشد. (۳) با پیکسل‌های مجاور بیش از ۱/۵ درجه اختلاف دما نداشته باشد و (۴) پوشش برف، ابر و سایه ابر نداشته باشد.

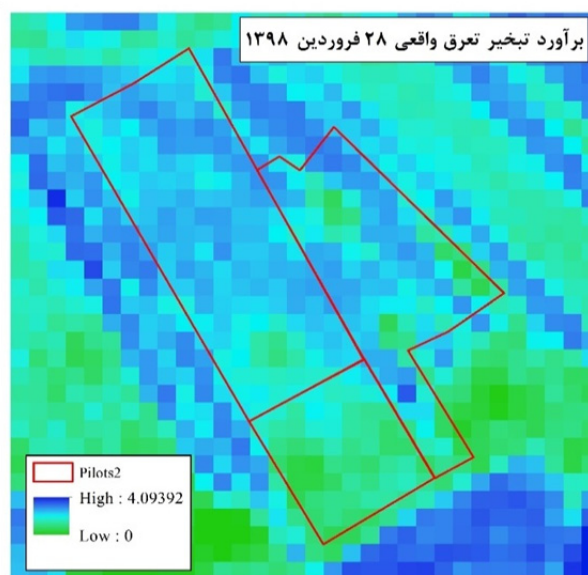
این روش به صورت تکراری پیکسل‌های دارای شرایط فوق را شناسایی می‌کند. پیکسل‌های سرد و گرم به کمک هیستوگرام دمای سطح زمین و مقدار شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی ( Normalized Difference Vegetation Index ) شناسایی می‌شوند. پیکسل‌های سرد دمای پایین و شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی بالا دارند و پیکسل‌های گرم دارای دمای بالا و پوشش گیاهی پایین می‌باشند. پیکسل‌های انتخاب شده به تدریج بهبود داده می‌شوند تا در نهایت ده پیکسل منتخب باقی بماند. آخرین مرحله انتخاب پیکسل‌ها بر اساس شرط فاصله از ایستگاه هواشناسی و منطقه مورد مطالعه خواهد بود و نزدیک‌ترین پیکسل‌ها به عنوان پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب می‌شوند.

### تبخیر و تعرق مرجع

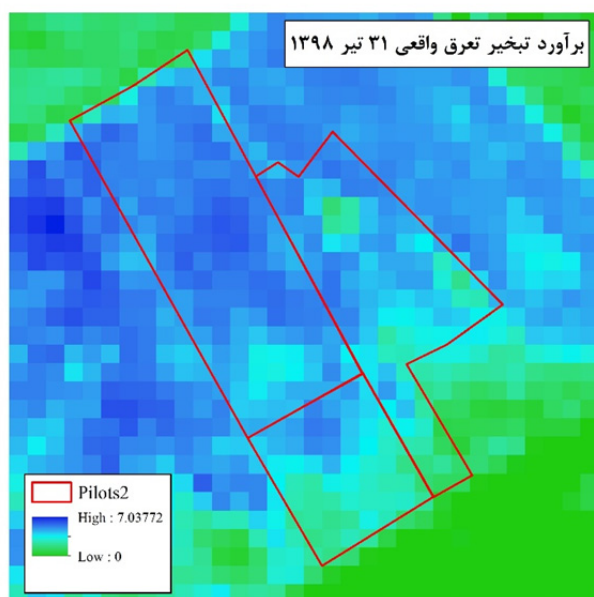
تبخیر و تعرق یک سطح بدون کمبود آب، تبخیر و تعرق مرجع نامیده شده و با  $ET_r$  نشان داده می‌شود. سطح مرجع، یک گیاه مرجع چمن یا یونجه با ویژگی‌های مشخص است. سازمان فائو (نشریه ۵۶)، روش پنمن مونتیت را به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع معرفی نمود. در این



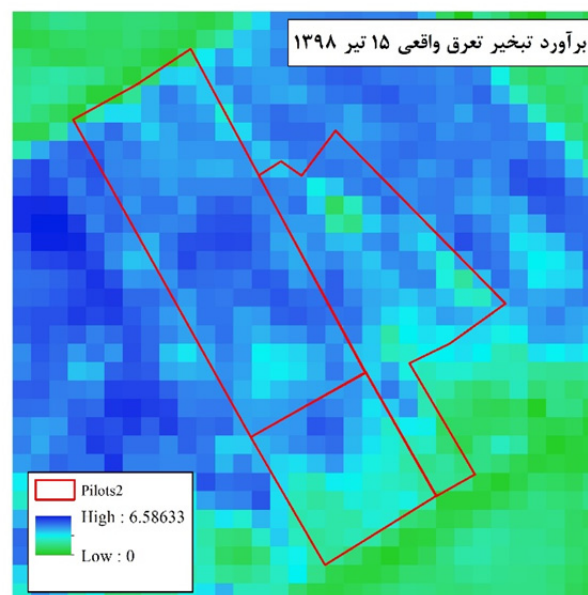
شکل ۴. برآورد تبخیر و تعرق واقعی باغ (۱۴ خرداد ۱۳۹۸)  
Fig. 4. Estimated actual evapotranspiration (2019/06/04)



شکل ۳. برآورد تبخیر و تعرق منطقه (۲۸ فروردین ۱۳۹۸)  
Fig. 3. Estimated actual evapotranspiration (2019/04/17)



شکل ۶. برآورد تبخیر و تعرق منطقه (۳۰ تیر ۱۳۹۸)  
Fig 6. Estimated actual evapotranspiration (2019/07/22)



شکل ۵. برآورد تبخیر و تعرق منطقه (۱۵ تیر ۱۳۹۸)  
Fig 5. Estimated actual evapotranspiration (2019/07/06)

باغ اندازه‌گیری شد. این سنسورها در دو جهت ردیف کاشت درختان در عمق‌های مختلف نصب شد. در هر بازه زمانی با اندازه‌گیری اجزای بیلان آبی در ناحیه ریشه درخت، میزان

### روش بیلان آبی

برای برآورد تبخیر و تعرق به روش بیلان آبی، اجزای بیلان آب با استفاده از سنسورهای رطوبت خاک نصب شده در

گرفته شد. جدول ۵ مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده به روش بیلان آبی را نشان می‌دهد.

### تبخیر و تعرق مرجع

بسیاری از تحقیقات انجام شده، مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط الگوریتم سبال را به کمک مقادیر تبخیر و تعرق مرجع ارزیابی می‌کنند. بنابراین، در این تحقیق برای اینکه امکان مقایسه نتایج با سایر تحقیقات فراهم باشد، مقدار تبخیر و تعرق مرجع نیز محاسبه شده است. مقدار تبخیر و تعرق مرجع با روش پنمن مونتیت مطابق رابطه ۹ برآورد شد. جدول ۵ مقادیر تبخیر و تعرق واقعی و مرجع را در تاریخ‌های گذر ماهواره نشان می‌دهد.

تبخیر و تعرق واقعی درخت با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید. عمق توسعه ریشه درختان در محدوده مورد مطالعه حدود ۸۰ سانتی‌متر تخمین زده شد. با استفاده از سنسورهای نصب شده در خاک و همچنین حفر پروفیل کوچک در اطراف درخت، توسعه جبهه پیاز رطوبتی تا فاصله ۱/۵ متری از ساقه درخت و ۲۰ سانتی‌متر پایین‌تر از عمق توسعه ریشه (یک متر) مشاهده شد. تغییرات رطوبت خاک با تعیین درصد رطوبت از دو نمونه خاک، قبل از آبیاری متوالی که در بازه زمانی بین آن‌ها تصویر ماهواره‌ای برداشت شد، تعیین گردید و همچنین مقدار نفوذ عمقی از طریق سنسورهای رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. با در اختیار داشتن داده‌های مورد نیاز، مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از رابطه ۱ در روز عبور ماهواره به دست آمد و به‌عنوان معیار برای ارزیابی روش سبال بکار

جدول ۵. تبخیر و تعرق مرجع و واقعی برآورد شده به میلی‌متر بر روز

Table 5. Reference and Actual evapotranspiration Estimated in millimeters per day

تاریخ	روش پنمن مونتیت (تبخیر و تعرق مرجع)	الگوریتم سبال (تبخیر و تعرق واقعی)	روش بیلان آبی (تبخیر و تعرق واقعی)
۲۰۱۹/۰۴/۱۷	۳/۴۶۹	۱/۷۵۴	۲/۸۴۰
۲۰۱۹/۰۵/۱۹	۵/۶۰۴	۴/۸۶۷	۴/۳۷۳
۲۰۱۹/۰۶/۰۴	۶/۴۲۱	۵/۱۰۷	۵/۳۲۳
۲۰۱۹/۰۶/۲۰	۷/۱۵۵	۴/۶۲۵	۵/۶۱۵
۲۰۱۹/۰۷/۰۶	۶/۷۲۵	۳/۷۴۴	۴/۹۰۱
۲۰۱۹/۰۷/۲۲	۵/۰۲۰	۴/۰۸۳	۴/۰۲۹

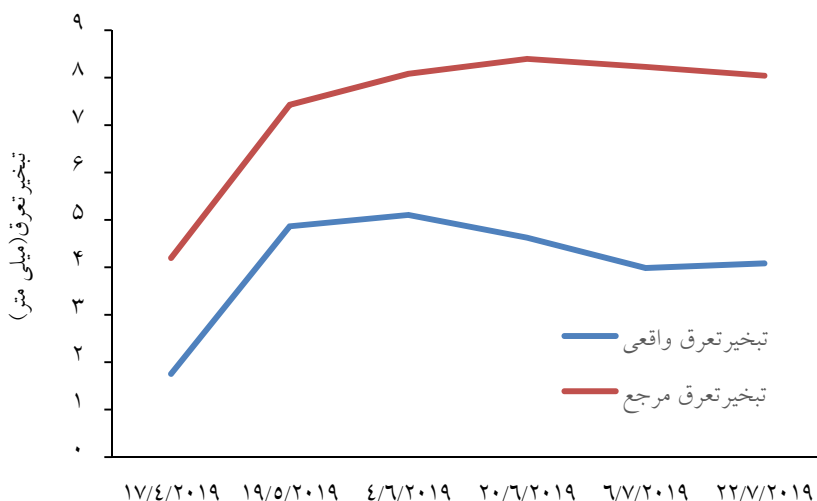
### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از دو روش بیلان آبی و الگوریتم سبال برآورد شده است. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه لایسی متر موجود نیست و اینکه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسی متر متعلق به یک نقطه است، در این تحقیق برای ارزیابی و مقایسه نتایج مقدار تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش بیلان آبی نیز محاسبه شد. همچنین، مقدار تبخیر و تعرق مرجع به روش محاسبه شد و با نتایج حاصل از الگوریتم سبال مقایسه شده است. علاوه بر

این در تحقیق، تغییرات مقدار تبخیر و تعرق در قسمت‌های مختلف باغ و نیز باغ‌های دارای سیستم‌های آبیاری مختلف غرقابی، قطره‌ای رو سطحی و قطره‌ای زیرسطحی بررسی شده است. نتایج برآورد تبخیر و تعرق به روش‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم سبال و روش بیلان آبی نشان داد که الگوریتم سبال توانسته است با خطای RMS ۰/۵۷ مقدار تبخیر و تعرق واقعی را در قسمت‌های مختلف باغ برآورد نماید. علاوه بر این همبستگی بین مقادیر برآورد شده توسط دو روش برابر ۰/۸۲ بوده است

سبال قابل قبول بوده است. همچنین، همبستگی بین مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده از مدل سبال و تبخیر و تعرق مرجع برابر  $0/76$  به دست آمده است. نمودار شکل ۷، مقدار تبخیر و تعرق واقعی و مرجع را در تاریخ‌های مختلف نشان می‌دهد.

که نشان‌دهنده قابلیت مناسب الگوریتم سبال در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق است. جعفری و همکاران (۱۳)، ضریب همبستگی  $0/95$  بین مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم سبال و روش بیلان آبی را در باغ زیتون در منطقه طارم به دست آوردند و نتیجه گرفتند که دقت برآورد الگوریتم



شکل ۷. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق مرجع و واقعی در زمان‌های گذر ماهواره در دوره رشد

Fig. 7. Actual and reference evapotranspiration changes in growth season

نیز باغ‌های دارای سیستم‌های آبیاری مختلف غرقابی، قطره‌ای رو سطحی و قطره‌ای زیرسطحی بررسی شده است. شکل‌های ۳ تا ۶ مقدار تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با الگوریتم سبال را در قسمت‌های مختلف باغ‌ها با سیستم‌های آبیاری متفاوت نشان می‌دهند. از این شکل‌ها مشهود است، باغ دارای آبیاری زیرسطحی به‌طور متوسط کمترین میزان تبخیر و تعرق را در تاریخ‌های مختلف از خود نشان داده است. با توجه به آنکه تبخیر و تعرق معادل مجموع مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه است می‌توان، این مقدار کاهش را به کاهش تبخیر از سطح خاک نسبت داد. علاوه بر این، در همه تاریخ‌ها ناهمسانی تبخیر و تعرق در قسمت‌های مختلف باغ‌های دارای سیستم آبیاری یکسان قابل مشاهده است. به‌عنوان نمونه در باغ با روش آبیاری غرقابی، بخش‌هایی از باغ تبخیر و تعرق پایینی نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از عدم تسطیح سطح باغ و عدم دریافت رطوبت مناسب در این نواحی باشد.

همان‌طور که از شکل ۷ دیده می‌شود، برآورد تبخیر و تعرق با الگوریتم سبال و تبخیر و تعرق مرجع همخوانی مناسبی با یکدیگر داشتند. لازم به ذکر است که در تمام تاریخ‌ها، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی همواره کمتر از تبخیر و تعرق مرجع هستند که این یافته با نتایج اکبری و همکاران (۲) نیز مطابقت دارد. از آنجایی که میزان تبخیر و تعرق مرجع، حداکثر ظرفیت تبخیر و تعرق را نشان می‌دهد، نتایج به‌دست آمده در بسیاری از منابع علمی نیز تأیید شده است. علاوه بر این، زند پارسا و همکاران (۲۷)، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه ذرت را به دو روش بیلان آبی و پنمن مونتیت ارزیابی نمودند و نتیجه گرفتند که روش بیلان آبی برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق مزرعه مناسب‌تر است. در این تحقیق نیز همبستگی میان مقادیر الگوریتم سبال با روش بیلان آبی بیشتر از روش تبخیر و تعرق مرجع بوده است. همان‌طور که اشاره شد، تغییرات مقدار تبخیر و تعرق در قسمت‌های مختلف باغ و

باغ، ناشی از عملکرد بیش از نیاز نازل‌های رطوبت باشد. برای ارزیابی بهتر اختلاف تبخیر و تعرق در روش‌های مختلف آبیاری، مقدار متوسط، حداقل، حداکثر و انحراف معیار مقادیر تبخیر و تعرق در باغ‌های مربوط به سه سیستم آبیاری مختلف محاسبه شده و در جدول ۶ نمایش داده شده است.

بدیهی است همین مقدار رطوبت در سایر بخش‌های باغ تجمع نموده و از طریق نفوذ عمقی از دسترس خارج می‌گردد. این توزیع غیریکنواخت در باغ با روش آبیاری رو سطحی نیز مشاهده می‌شود. به‌عنوان نمونه بخش میانی باغ دارای آبیاری رو سطحی همواره مقدار تبخیر و تعرق بالاتری را نشان می‌دهد که می‌تواند نشان‌دهنده هدر رفت آب در این بخش از

جدول ۶. مقادیر متوسط، حداقل، حداکثر و انحراف معیار تبخیر و تعرق واقعی سه سیستم آبیاری در تاریخ‌های مختلف

Table 6. Mean, Max, Min and standard deviation of actual evapotranspiration in different irrigation systems

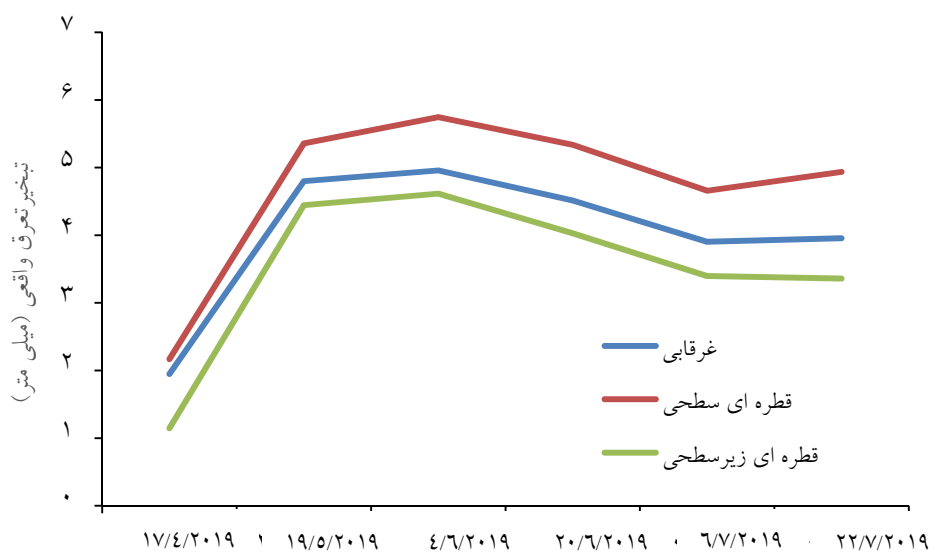
تاریخ	سیستم آبیاری	حداقل	حداکثر	دامنه تغییرات	میانگین	انحراف معیار
	غرقابی	۰/۴۳	۳/۲۶	۲/۸۳	۱/۹۵	۰/۶۴
۲۰۱۹/۰۴/۱۷	قطره‌ای سطحی	۰/۹۵	۲/۸۴	۱/۸۹	۲/۱۷	۰/۳۶
	قطره‌ای زیرسطحی	۰/۳۵	۲/۱۷	۱/۸۲	۱/۱۵	۰/۴۱
	غرقابی	۲/۶۰	۶/۲۸	۳/۶۸	۴/۸۰	۰/۸۹
۲۰۱۹/۰۵/۱۹	قطره‌ای سطحی	۳/۲۶	۶/۳۱	۳/۰۵	۵/۳۶	۰/۵۵
	قطره‌ای زیرسطحی	۳/۳۲	۶/۱۰	۲/۷۸	۴/۴۴	۰/۷۷
	غرقابی	۱/۷۶	۶/۲۹	۴/۵۳	۴/۹۶	۱/۰۴
۲۰۱۹/۰۶/۰۴	قطره‌ای سطحی	۲/۸۹	۶/۶۴	۳/۷۵	۵/۷۵	۰/۶۱
	قطره‌ای زیرسطحی	۲/۹۷	۶/۳۷	۳/۴۰	۴/۶۲	۰/۹۱
	غرقابی	۱/۰۵	۵/۸۱	۴/۷۶	۴/۵۱	۱/۱۶
۲۰۱۹/۰۶/۲۰	قطره‌ای سطحی	۲/۱۲	۶/۱۲	۴/۰۰	۵/۳۴	۰/۶۲
	قطره‌ای زیرسطحی	۲/۲۶	۵/۹۸	۳/۷۲	۴/۰۳	۱/۰۱
	غرقابی	۱/۱۸	۵/۵۵	۴/۳۷	۳/۹۰	۱/۰۵
۲۰۱۹/۰۷/۰۶	قطره‌ای سطحی	۱/۳۶	۵/۹۷	۴/۶۰	۴/۶۶	۰/۷۷
	قطره‌ای زیرسطحی	۱/۹۶	۵/۶۷	۳/۷۲	۳/۴۰	۱/۰۴
	غرقابی	۰/۸۵	۵/۵۴	۴/۶۹	۳/۹۵	۱/۱۳
۲۰۱۹/۰۷/۲۲	قطره‌ای سطحی	۱/۵۷	۶/۰۵	۴/۴۸	۴/۹۴	۰/۷۴
	قطره‌ای زیرسطحی	۱/۵۲	۵/۴۶	۳/۹۴	۳/۳۶	۱/۰۳

تمام تاریخ‌ها، مقدار متوسط تبخیر و تعرق در باغ دارای سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی بیشتر از سیستم آبیاری غرقابی بوده است. باغ‌های دارای سیستم آبیاری قطره‌ای (زیر و رو سطحی) از دو جهت با باغ دارای سیستم غرقابی تفاوت دارند. نخست آنکه پوشش گیاهی در باغ‌های دارای سیستم آبیاری قطره‌ای متراکم‌تر است و دیگر آنکه سن درختان در باغ دارای سیستم

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود در تمام تاریخ‌ها مقادیر دامنه تغییرات و انحراف معیار تبخیر و تعرق در سیستم آبیاری غرقابی بیشتر از سایر روش‌ها بوده است که به‌خوبی نشان‌دهنده عدم آبیاری یکنواخت در سطح باغ است. این امر امکان مدیریت مناسب و افزایش بهره‌وری منابع آبی را دشوار می‌کند. همچنین از این جدول مشاهده می‌شود که در

زیرسطحی بوده است. با توجه به مشابهت وضعیت پوشش گیاهی در این دو باغ، کاهش مقدار تبخیر و تعرق در سیستم آبیاری زیرسطحی را می‌توان با عملکرد مناسب‌تر این سیستم آبیاری و افزایش بهره‌وری آبیاری مربوط دانست. نمودار شکل ۸ مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده در باغ‌های دارای سه سیستم آبیاری مختلف را در تاریخ‌های متفاوت فصل رویش نشان می‌دهد.

آبیاری غرقابی بیشتر از سیستم آبیاری قطره‌ای است. بنابراین، بخشی از اختلاف برآورد شده در تبخیر و تعرق این دو سیستم آبیاری را می‌توان ناشی از این موارد دانست که می‌تواند در تحقیقات بعدی با تمرکز بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر این، از این جدول مشاهده می‌شود که مقدار متوسط تبخیر و تعرق در باغ دارای سیستم آبیاری قطره‌ای رو سطحی، در تمام تاریخ‌ها بیشتر از باغ با سیستم آبیاری قطره‌ای



شکل ۸. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده در باغ‌های دارای سه سیستم آبیاری مختلف

Fig. 8. Actual evapotranspiration changes in different Irrigation systems

تعرق واقعی باغات بوده است. به طوری که در مقایسه با روش بیلان آبی ضریب همبستگی ۰/۸۲ و خطای ۰/۵۷ داشته است. علاوه بر این، مقایسه وضعیت رطوبت در قسمت‌های مختلف باغ و نیز باغ‌های دارای سیستم آبیاری مختلف نشان داده است که با استفاده از برآورد تبخیر و تعرق به کمک تصاویر ماهواره‌ای می‌توان اطلاعات مناسبی از نحوه توزیع رطوبت در سطح باغ دست‌یافت. این داده‌ها، اطلاعات ارزشمندی در خصوص مدیریت بهینه منابع آب و افزایش کارایی آبیاری فراهم می‌نماید. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به تفاوت قابل توجه روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی اشاره نمود. نتایج تحقیق نشان داده است که با استفاده از روش‌های آبیاری زیرسطحی می‌توان به صورت مؤثری هدر رفت آب آبیاری ناشی از تبخیر از سطح خاک را کاهش داد.

در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که در تمام تاریخ‌ها، مقدار تبخیر و تعرق در باغ دارای سیستم آبیاری زیرسطحی کمتر از آبیاری قطره‌ای سطحی بوده است. با توجه به برنامه آبیاری یکسان در این دو سیستم آبیاری، این امر نشان‌دهنده مزیت سیستم آبیاری زیرسطحی در کاهش هدر رفت منابع آب و بهره‌وری مناسب این سیستم در افزایش راندمان آبیاری بوده است. همچنین کمتر بودن مقدار تبخیر و تعرق در سیستم آبیاری غرقابی در مقایسه با سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی، به دلیل تراکم پوشش گیاهی کمتر در سیستم آبیاری غرقابی و همچنین برنامه آبیاری متفاوت این سیستم دانست.

در این تحقیق تبخیر و تعرق واقعی باغات پسته با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال برآورد شده است. نتایج تحقیق حاکی از دقت مناسب الگوریتم سبال در برآورد تبخیر و

10. Du J, Song K, Wang Z, Zhang B, Liu D. 2013. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 23(1): 73-91. doi:<https://doi.org/10.1007/s11769-013-0587-8>.
  11. Ehsani M, Khaledi H. 2003. Water productivity in agriculture. Iranian National Committee on Irrigation And Drainage, Ministry of Energy. (In Persian).
  12. Folhes MT, Rennó CD, Soares JV. 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, 96(10): 1398-1408. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.021>.
  13. Jafari H, Afrasiabi P, Delbari M, Taheri M. 2017. Determination of evapotranspiration and crop coefficient of olive in different growth stages using remote sensing techniques and moisture balance in Tarom Zanjan. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 7(3): 120-134. [http://www.waterjournal.ir/article\\_74067.html?lang=en](http://www.waterjournal.ir/article_74067.html?lang=en). (In Persian).
  14. Karimi A, Farhadi Bansouleh B, Hesadi H. 2012. Estimation of Regional Evapotranspiration Using LANDSAT TM Images and SEBAL Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 6(4): 353-364. (In Persian).
  15. Mahmoodi A, Jalali S. 2016. Iranian pistachio export competitiveness in world markets. *Journal of Economic Research (Tahghighat- E- Eghtesadi)*, 51(4): 951-976. doi:<https://doi.org/10.22059/JTE.2016.59464>. (In Persian).
  16. Miryaghoubzadeh M, Solaimani K, Habib Nejad Roshan M, Shahedi K, Karim, Akhvan S. 2014. Estimation and assessment of actual evapotranspiration using remote sensing data (Case study: Tamar basin, Golestan province, Iran). *Irrigation and Water Engineering*, 4(3): 89-102. [http://www.waterjournal.ir/index.php/component/content/category/article\\_70896.html?lang=en](http://www.waterjournal.ir/index.php/component/content/category/article_70896.html?lang=en). (In Persian).
  17. Olmedo GF, Ortega Farias S, Fonseca Luengo D, Fuentes Peñailillo F. 2016. Water: tools and functions to estimate actual evapotranspiration using Land Surface Energy Balance Models in R. *The R Journal*, 8(2): 352-369. <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-2051/RJ-2016-2051.pdf>.
  18. Omidvar J, Noori S, Davari K, Farid Hosseini A. 2013. Estimation of actual evapotranspiration based on satellite images using two algorithms Sebal and Metric. *Irrigation and Water Engineering*, 3(4): 11-22.
- نتایج تحقیق نشان داده است که در مناطقی که دسترسی به اطلاعات سنسورهای رطوبت خاک و یا روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق وجود ندارد، استفاده از الگوریتم سبال و روش‌های سنجش‌ازدور می‌تواند اطلاعات مناسبی را جهت مدیریت بهینه منابع آبی فراهم نماید.

## References

1. Abdelahi Ezatabadi M, AA J. 2007. Economic investigation of the possibility of using new methods for water supply and demand in agriculture: A case study of pistachio producers in Rafsanjan. *Pajouhesh-Va-Sazandegi*, 20(2): 113-126. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=105307>. (In Persian).
2. Akbari M, Seif Z, Zare Abyane H. 2011. Estimation of evapotranspiration by remote sensing technique under different climate condition. *Journal of Water and Soil*, 25(4): 835-844. [https://jsw.um.ac.ir/article/view/42562/article\\_35105.html](https://jsw.um.ac.ir/article/view/42562/article_35105.html). (In Persian).
3. Alizadeh A, Kamali G. 2007. Water Use of Plant in Iran. Astan Qods Publication, Mashhad, First Edition, 340 p.
4. Allen GR, Luis SP, Terry AH, Marvin EJ. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6): 899-920. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.
5. Babran S, Honarbakhsh N. 2008. Water Crisis in Iran and the World. *Rahbord*, 16(48): 193-212. (In Persian).
6. Bagheri M, Moazzezi F. 2014. Investigation of externalities of groundwater overexploitation on pistachio market of Iran. *Journal of Agricultural Economics Research*, 5(4): 145-166. (In Persian).
7. Bastiaanssen W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1-2): 87-100. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4).
8. Bastiaanssen W, Noordman E, Pelgrum H, Davids G, Thoreson B, Allen R. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 85-93. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)).
9. Chavez J, Gowda P, Evett S, Colaizzi P, Howell T, Marek T. 2007. An application of METRIC for ET mapping in the Texas high plains. *Trans ASABE*, 1(1): 1-15.



- [http://www.waterjournal.ir/index.php/journal/article\\_73522.html?lang=en](http://www.waterjournal.ir/index.php/journal/article_73522.html?lang=en). (In Persian).
19. Pakrava M, Mehrabi Boshrabadi H, Gilanpour O. 2010. Studying Iranian pistachio export position: Comparative advantage and trading map approach. *Journal of Agricultural economics and Development*, 19(76): 1-26. (In Persian).
  20. Rawat KS, Bala A, Singh SK, Pal RK. 2017. Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, 187: 200-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.015>.
  21. Sanaeinejad S, Noori S, Hasheminia S. 2011. Estimation of evapotranspiration using satellite image data in Mashhad area. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 25(3): 540-547. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=210065>. (In Persian).
  22. Santos CACd, Bezerra BG, Silva BBd, Rao TVR. 2010. Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(3): 383-392. doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000300010>.
  23. Tasumi M, Trezza R, Allen RG, Wright JL. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3-4): 355-376. doi:<https://doi.org/10.1007/s10795-005-8138-9>.
  24. Tsouni A, Kontoes C, Koutsoyiannis D, Elias P, Mamassis N. 2008. Estimation of actual evapotranspiration by remote sensing: Application in Thessaly Plain, Greece. *Sensors*, 8(6): 3586-3600. doi:<https://doi.org/10.3390/s8063586>.
  25. Wagle P, Bhattarai N, Gowda PH, Kakani VG. 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>.
  26. Wagle P, Gowda PH, Northup BK. 2019. Dynamics of evapotranspiration over a non-irrigated alfalfa field in the Southern Great Plains of the United States. *Agricultural Water Management*, 223: 105727. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105727>.
  27. Zand-Parsa S, Shoostari MM, Majnooni-Heris A. 2016. Measurements of standard Maize evapotranspiration using water balance method and variable root depth in an arid and semi-arid region. *Water and Soil Science*, 25(1-4): 169-180. (In Persian).
  28. Zhang K, Kimball JS, Running SW. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6): 834-853. doi:<https://doi.org/10.1002/wat2.1168>.
  29. Zhang Y, Kong D, Gan R, Chiew FH, McVicar TR, Zhang Q, Yang Y. 2019. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. *Remote Sensing of Environment*, 222: 165-182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031>.



## Estimation of actual evapotranspiration in pistachio orchards using SEBAL algorithm in three irrigation system

Soheil Radiom

Received: 1 April 2020 / Accepted: 20 January 2021

Available online 21 July 2021

### Abstract

**Background and Objective** Over the past 100 years, the country has lost about 90 percent of its per capita renewable water. About 90% of the country's renewable water resources are allocated to the agricultural sector. With the increase in the area of pistachio orchards and the increase in demand for water on the one hand and the limited water resources in the region, on the other hand, the imbalance between supply and demand for water is sharply increasing. In this regard, the most important step to prevent water loss is the uniform distribution of water on the field, optimal at each stage of growth. About 99% of the water absorbed by the plant is used for evapotranspiration. Therefore, studying this phenomenon can play an important role in determining the water needs of plants. It is difficult to measure the actual evapotranspiration outside the laboratory. Many experimental methods have been developed to estimate actual and potential evapotranspiration using meteorological and climatic data. But most of these methods are only able to estimate potential evapotranspiration and do not estimate the actual amount of it.

In contrast, remote sensing methods have been developed that are a good solution for estimating the actual evapotranspiration. Satellite imagery with global coverage and repetitive Acquisition has made it possible to monitor evapotranspiration at the field level and during plant growth. Various studies have been conducted to estimate the actual evapotranspiration of agricultural areas using satellite images, which indicate the acceptable accuracy of these methods. However, most of this research is related to agricultural fields and no significant research has been done to estimate evapotranspiration at the orchards. Vegetation at the farms is uniform and homogeneous compared to orchards, so the estimation of vegetation index, which is one of the inputs of the SEBAL model in orchards is more difficult than agricultural fields, which can affect the final accuracy. Therefore, the main purpose of this study is to estimate the amount of evapotranspiration in the pistachio orchard using the SEBAL algorithm and evaluate the accuracy of estimation. Also, this research has been

**Materials and Methods** The present research has been carried out in pistachio orchards in Zarandieh city of Markazi province. The gardens had three different irrigation systems including flood irrigation systems, surface, and subsurface drip irrigation systems. Actual evapotranspiration is estimated using water balance and SEBAL algorithm. Meteorological data from Imam Airport Synoptic Station and Landsat8 satellite imagery has been used to estimate evapotranspiration using the SEBAL algorithm. Actual evapotranspiration is estimated at satellite overpass times during the growing season. To select

---

S. Radiom (✉)<sup>1</sup>

1. Assistant Professor, Iranian Space research center, Tehran, Iran

e-mail: [soheil.radiom@ieec.org](mailto:soheil.radiom@ieec.org)

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.2.5.8>

hot and cold pixels in the SEBAL algorithm, the semi-automatic method proposed by Oldmo is used, which minimizes user participation in the selection of hot and cold pixels. To evaluate the accuracy of evapotranspiration estimation, the information of soil moisture sensors in the orchard has been used. 28 sensors measure soil moisture in different parts of the orchard. Using the soil moisture values, the actual evapotranspiration was estimated using the water balance method and used as a reference value.

**Results and Discussion** A comparison of the results of the SEBAL algorithm and water balance method showed that the SEBAL algorithm was able to estimate the actual evapotranspiration in different parts of the orchard with an RMS error of 0.57. In addition, the correlation between the values estimated by the two methods was equal to 0.82, which indicates the appropriate capability of the SEBAL algorithm in estimating evapotranspiration values. The correlation between the actual evapotranspiration estimated from the SEBAL model and the reference evapotranspiration is 0.76. In addition, in the research, changes in the evapotranspiration in different parts of the garden and also gardens with different irrigation systems including flood, surface, and subsurface drips have been investigated. The results show that the orchard with subsurface irrigation had the lowest average of evapotranspiration on different dates. Considering that evapotranspiration is equal to the sum of evaporation from the soil surface and transpiration from the plant, this decrease can be attributed to the decrease in evaporation from the soil surface. In addition, evapotranspiration heterogeneity can be observed in all parts of orchards with the same irrigation system on all dates. For example, in the orchard with a flood irrigation system, parts of the garden show low evapotranspiration, which can be due to the lack of smoothing of the surface and lack of proper moisture in these areas. Obviously, the same amount of moisture accumulates in other parts of the garden and is inaccessible through deep percolation. This uneven distribution is also observed in the garden with a surface drip irrigation system. For example, the middle part of the garden with surface drip irrigation always shows a higher amount of evapotranspiration, which can indicate the loss of water in this part, due to

the miss-operation of the dripper. To evaluate the difference in evapotranspiration in different irrigation systems, the average, minimum, maximum, and standard deviation values of evapotranspiration in orchards related to three different irrigation systems have been calculated. The results showed that in all dates, the ranges and standard deviation of evapotranspiration in the flood irrigation system were higher than in other systems, which indicates the lack of uniform irrigation in the orchard. Also, on all dates, the average amount of evapotranspiration in the orchard with a surface drip irrigation system has been more than flood irrigation system. Vegetation in orchards with drip irrigation systems (surface and subsurface) was denser compared to the flood irrigation systems.

**Conclusion** In this study, the actual evapotranspiration of pistachio orchards has been estimated using satellite imagery and the SEBAL algorithm. The results of the study indicate the appropriate accuracy of the SEBAL algorithm in estimating the actual evapotranspiration of the orchards. Compared with the water balance method, the correlation coefficient was 0.82 and the root means the square error was 0.57. In addition, comparing the moisture situation in different parts of the orchard and in orchards with different irrigation systems has shown that by estimating the actual evapotranspiration using satellite imagery, appropriate information can be obtained on how to distribute moisture in the garden. This information provides valuable information on the optimal management of water resources and increases irrigation efficiency. Other results of this research include the significant difference between surface and subsurface drip irrigation methods. The results show that using subsurface irrigation methods can effectively reduce irrigation water loss due to evaporation from the soil surface. The results show that in areas where there is no access to information from soil moisture sensors or direct measurements of evapotranspiration, the use of the SEBAL algorithm and remote sensing methods can provide appropriate information for optimal water management.

**Keywords:** Pistachio, Evapotranspiration, Remote sensing, Soil moisture sensor, Precision agriculture