

بررسی سطوح مختلف تأمین آب در باغات پسته با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی دشت سیرجان)

علیرضا بادیه‌نشین^۱، مسعود پارسی‌نژاد^۲، و حمیده نوری^{۳*}

- (۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(۲) دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(۳) استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات: hnoory@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

چکیده

با توجه به روند توسعه باغات پسته در بسیاری از استان‌های کشور و با توجه به کمبود شدید منابع آب در این مناطق، امکان تأمین آب مورد نیاز درختان پسته در بسیاری از مواقع فراهم نیست. برای مدیریت مطلوب در شرایط کمبود آب، بررسی سطوح مختلف تأمین آب در مراحل رشد پسته ضروری است. هدف از این مطالعه، تعیین وضعیت تأمین آب در مراحل مختلف رشد پسته با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال در دشت سیرجان است. تبخیر - تعرق واقعی پسته با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۸ برآورد گردید و با استفاده از تصاویر لندست ۷ صحت‌سنجی شد. این مدل قادر بود با درصد خطای حدود ۲۰ درصد (۰/۶ میلی‌متر بر روز) و مشابه با سایر تحقیقات، تبخیر- تعرق واقعی پسته را برآورد کند. نتایج بررسی نشان داد در دشت سیرجان در مرحله سوم رشد (انتهای تیر تا انتهای شهریور) به دلیل افزایش نیاز آبی پسته، تأمین آب ناکافی منجر به کم‌آبایی ۳۰ درصدی شده است. برای مدیریت بهتر کم‌آبایی، میتوان با کاهش آبیاری در مرحله دوم و افزایش آبیاری در مرحله سوم کاهش عملکرد را تعدیل کرد. در دشت سیرجان، در مجموع متوسط کم‌آبایی برابر ۱۷ درصد و در حد آستانه قابل تحمل برای گیاه بوده است. نتایج بدست آمده نشان داد، درخت پسته در سطوح کم شوری آب، به کم‌آبایی (تا ۲۶ درصد) مقاوم است. در شوری آب بالای ۴۰۰۰ ($\mu\text{mho/cm}$) تأثیر توانمند کم‌آبایی و شوری تشدید شده و عملکرد محصول در اثر کم‌آبایی با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: پسته؛ تبخیر - تعرق واقعی؛ شوری؛ کم‌آبایی

مقدمه

هکتار) بسیار کمتر در مقایسه با سطح بارور پسته در ایران (۳۵۹ هزار هکتار) دارای تولید پسته برابر تولید ایران (۳۰۴ هزار تن) است. بگونه‌ای که میزان تولید به ازای سطح زیر کشت در کالیفرنیا برابر ۳۱۳۰ کیلوگرم بر هکتار بوده و در ایران برابر ۸۴۷ کیلوگرم بر هکتار است (USDA, 2017؛ آمارنامه کشاورزی ایران، ۱۳۹۶). همانگونه که در آمار مشاهده می‌شود امکان افزایش

در بخش کشاورزی ایران، پسته یکی از مهمترین محصولات باغی و از عمده‌ترین صادرات غیر نفتی کشور محسوب می‌شود. با توجه به روند توسعه باغات پسته در استان‌های کشور و به‌ویژه در مناطق جدید، مصرف بهینه‌ی آب برای این گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کالیفرنیا با دارا بودن سطح بارور پسته (۹۷ هزار

محصول دارد. برای این منظور باید در انتهای مرحله دوم، آبیاری کامل شروع شود و در مرحله سوم آبیاری به اندازه کافی انجام شود تا بازیابی استرس انجام شود (Gijón *et al.*, 2011; Memmi *et al.*, 2016).

در نتیجه واکنش به سطوح مختلف تأمین آب در مراحل مختلف رشد پسته متفاوت است. یکی از اقدامات لازم در مناطق تحت کشت پسته، بررسی وضعیت تأمین آب در مراحل مختلف رشد پسته در شرایط فعلی و پیشنهاد کم آبیاری براساس آن است.

عبداللهی عزت آبادی و محمدی محمدآبادی (۱۳۹۳) به منظور تعیین وضع آبیاری در ۲۰۰ باغ پسته در شهرستان‌های انار و رفسنجان میزان آب مصرفی برای این گیاه را تعیین کردند. این تحقیق نشان داد که میزان آب مصرفی این باغ‌ها در یک سال دارای دامنه وسیعی از ۹۷۳ تا ۲۷۰۰۰ مترمکعب در هکتار بوده است و متوسط این مقدار ۹۷۳۱ مترمکعب تعیین شده است. کوهی (۱۳۹۵) در تحقیقی به ارزیابی سامانه‌های زیرسطحی اجرا شده در باغات پسته شهرستان سیرجان پرداخت. در مزارع مورد بررسی میزان آب آبیاری طیف وسیعی از ۴۶۷۰ تا ۱۰۵۶۰ مترمکعب در هکتار برای یک سال داشته است. این تحقیق‌ها نشان می‌دهد مقدار آب مصرفی برای باغات پسته در مناطق مختلف و مدیریت‌های مختلف تفاوت خواهد داشت. تعیین مقدار آبیاری در هر مرحله از رشد پسته و در سطح یک دشت با اندازه‌گیری مزرعه‌ای وقت‌گیر و دشوار است. تکنیک‌های سنجش از دور با توجه به پوشش کل منطقه و امکان سنجش در مراحل مختلف رشد، بهترین گزینه برای پایش منطقه هستند. برای استفاده از سنجش از دور نیاز به شاخصی است که بتوان به واسطه‌ی آن مقدار آب مصرفی توسط گیاه در شرایط واقعی را برآورد کرد. در تحقیقات مشابه، برای

عملکرد پسته با استفاده از راهکارهای مناسب وجود دارد. از طرفی در بسیاری از مناطق تحت کشت این محصول، به سبب برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، مشکلاتی از قبیل افت شدید آبخوان‌ها و آثار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده حاصل از آن رخ داده است. به طور مثال، که در استان کرمان به عنوان قطب اصلی کشت پسته، بازده پایین آبیاری و تلاش برای تولید بیشتر محصول باعث برداشت بی‌رویه آب و افت زیاد سطح آب زیرزمینی شده است (محمدی محمد آبادی و همکاران، ۱۳۸۷). با توجه به کمبود شدید منابع آب، آبیاری کامل برای درختان پسته قابل توصیه نبوده و در این شرایط برای کسب حداکثر بازده، بایستی آبیاری کمتر از نیاز پتانسیل گیاه و به صورت کم آبیاری انجام شود (علی‌اکبری و زند پارسا، ۱۳۹۶). کم آبیاری گزینه مناسبی برای کشت پسته در مناطق با کمبود آب است و کاهش عملکرد درخت پسته به مرحله‌ی اعمال کم‌آبیاری بستگی دارد (Goldhamer *et al.*, 1986). Goldhamer (۱۹۹۵) دوره رشد درخت پسته را به چهار مرحله شامل گلدهی (مرحله اول)، سخت شدن پوسته پسته (مرحله دوم)، مغز بستن پسته (مرحله سوم) و مرحله پس از برداشت (مرحله چهارم) تقسیم کرد. او بیان کرد که مرحله دوم و مرحله چهارم بیشترین مقاومت به تنش آبی را دارند. کم آبیاری در مرحله اول رشد باعث افت کمیت و کیفیت محصول می‌شود (Goldhamer & Beede, 2004). Goldhamer و همکاران (۲۰۰۵) کم آبیاری ۵۰ درصدی در مرحله دوم رشد و کم آبیاری ۷۵ درصدی در مرحله چهارم را پیشنهاد دادند. محققین زیادی نشان دادند که ایجاد کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد در مرحله دوم رشد گیاه پسته می‌تواند بدون کاهش عملکرد منجر به صرفه‌جویی آب آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک گردد (Iniesta *et al.*, 2008; Gijón *et al.*, 2011; Carbonell-Barrachina *et al.*, 2015; Memmi *et al.*, 2016). برخلاف مرحله دوم، مرحله سوم رشد (مرحله مغز بستن پسته) به کم آبیاری حساس بوده و تأثیر زیادی بر عملکرد

بررسی وضعیت مصرف آب و پایش رشد از تبخیر -
تعرق واقعی (AET) استفاده شده است.

Akbari و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نسبت آب مصرفی به مقدار تبخیر - تعرق واقعی را برآورد کردند و با استفاده از آن وضعیت مصرف آب در سطح حوضه زاینده‌رود را مشخص کردند. Ahmad و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای وضعیت مصرف آب سطحی و زیرزمینی در کشور پاکستان را تعیین کردند. آن‌ها با تعیین تبخیر - تعرق واقعی، مناطق دارای شاخص بهره‌وری کمتر از مقدار پتانسیل را مشخص کردند. دستورانی و همکاران (۱۳۹۱) به برآورد میزان تبخیر - تعرق واقعی پسته با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور (الگوریتم SEBAL^۲) و با استفاده از تصویر سنجنده مودیس در منطقه اردکان استان یزد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌دار ۱۸ درصدی بین میزان آب مورد نیاز و تبخیر - تعرق واقعی پسته در منطقه اردکان وجود دارد. Usman و همکاران (۲۰۱۴) در کشور پاکستان در کشت برنج و گندم با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای مقدار تبخیر - تعرق واقعی و مقدار شاخص بهره‌وری را تعیین کردند. Zhang و همکاران (۲۰۱۶) در کشور چین در طی ده سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ با استفاده از تبخیر - تعرق واقعی، الگوی مصرف آب را مشخص کردند. در طی این دوره، آن‌ها در مناطق مختلف وضعیت مصرف آب و بهره‌وری آن را مشخص کردند. Y. Jin و همکاران (۲۰۱۸) در دره سان جواکوئین کالیفرنیا در سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ مقدار تبخیر تعرق واقعی پسته را با استفاده از تصاویر لندست ۸ برآورد کردند. آن‌ها کاهش ۳۵ درصدی در تبخیر - تعرق واقعی درختان پسته را در اثر شوری بدست آوردند. N. Jin و همکاران (۲۰۱۸) در کشور چین در طی سال ۲۰۱۱-۲۰۱۰ با استفاده از اطلاعات

ماهواره‌ای مقادیر تبخیر - تعرق واقعی و وضعیت مصرف آب را استخراج کردند. آن‌ها در هر منطقه، مقدار استرس آبی را براساس تفاوت آب مصرفی در حالت موجود با حداکثر آب مصرفی مشخص کردند. در نتیجه یکی از اقدامات مؤثر در زمینه تعیین وضعیت تأمین آب، بررسی تفاوت آب مصرفی در حالت موجود با حداکثر آب مصرفی ممکن است.

برای تعیین حداکثر آب مصرفی از مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل استفاده می‌شود که برای تعیین آن به مقدار ضریب گیاهی K_e نیاز است. Kanber و همکاران (۱۹۹۳) در کشور ترکیه مقدار ضریب گیاهی پسته را ۰/۴ تا ۰/۸ محاسبه کردند. Goldhamer (۱۹۹۵) ضرایب گیاهی پسته را در دره سان جواکوئین کالیفرنیا تعیین کرد که دارای دامنه ۰/۰۷ تا ۱/۱۹ بود و این ضرایب به عنوان ضرایب گیاه پسته در مجلات سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) ارائه شد. البته این نکته قابل ذکر است که برای استفاده از این نتایج در سایر کشورها، ابتدا باید با استفاده از تحقیقات لایسمتری این مقادیر را ارزیابی کرد. در ایران نیز تحقیقات لایسمتری جهت تعیین مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل پسته انجام شده است. فرش و همکاران (۱۳۷۶) مقدار ضریب گیاهی پسته بارور را از ۰/۴ تا ۰/۶ بیان کردند. موذن‌پور کرمانی و همکاران (۱۳۸۶) تبخیر - تعرق پسته غیر بارور را از سن چهار تا نه سالگی اندازه‌گیری کردند که به طور متوسط دارای محدوده ۰/۱۷ تا ۰/۲۵ بوده است. از این‌رو بهتر است برای تعیین تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه پسته در ایران، با توجه به سن درخت از دو تحقیق فوق استفاده کرد.

همانطور که بیان گردید، برای تعیین وضعیت مصرف آب در حالت موجود از تبخیر - تعرق واقعی استفاده شده است. در تحقیق‌های فوق، برای تعیین وضعیت مصرف آب در حالت موجود در سطح وسیع، اغلب از تبخیر - تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال استفاده شده است.

^۱ Actual Evapotranspiration

^۲ Surface Energy Balance Algorithm for Land

تبخیر - تعرق واقعی می‌توان وضعیت تأمین آب در هر مرحله از رشد را بدست آورد. اهداف این تحقیق، تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در سطح حوضه با استفاده از الگوریتم سبال و تعیین وضعیت تأمین آب در مراحل مختلف رشد پسته در سطح دشت سیرجان بوده است.

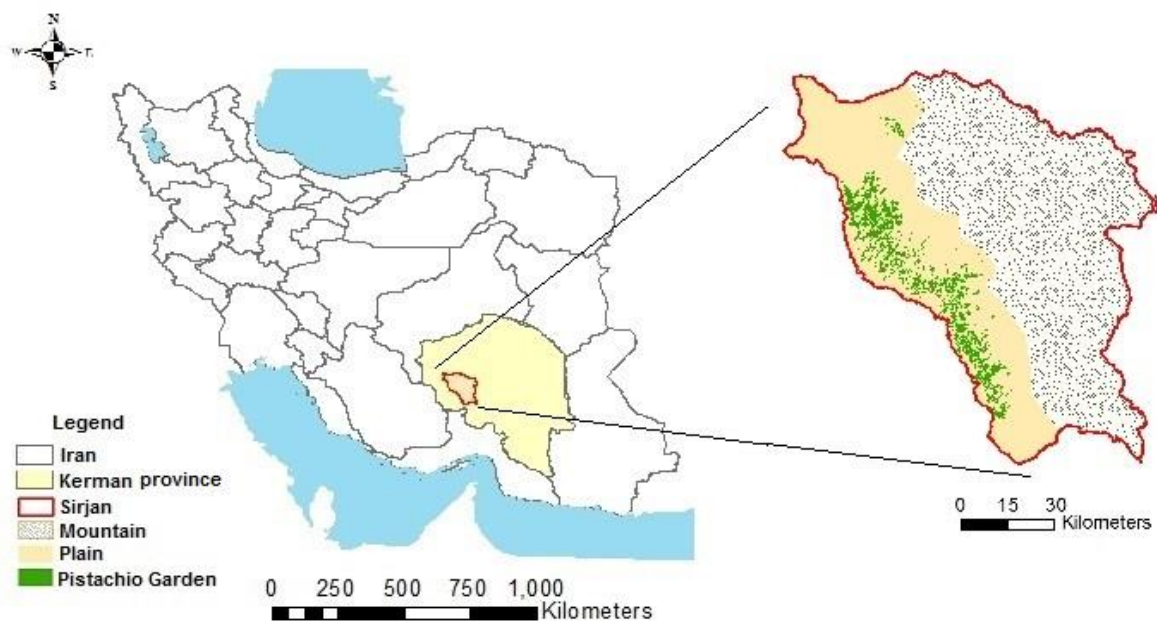
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان سیرجان با دارا بودن حدود ۴۲ هزار هکتار باغ پسته، بعد از شهرستان رفسنجان دومین منطقه پسته‌کاری ایران محسوب می‌شود. در دشت سیرجان مصرف اصلی آب برای کشاورزی و کشت محصول پسته است و به همین دلیل تعیین وضعیت مصرف آب در باغات پسته اهمیت بسیاری دارد. محدوده مطالعاتی سیرجان بخشی از حوضه آبریز درجه دو (۳۰ گانه) ابرقو - سیرجان و حوضه آبریز درجه یک (۶ گانه) فلات مرکزی ایران است. این محدوده مطالعاتی با وسعت ۷۹۲۱ کیلومتر مربع بین طول‌های ۵۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی و عرض‌های ۲۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی قرار دارد. محدوده مطالعاتی سیرجان به دو منطقه ارتفاعات و دشت تقسیم شده است که میانگین سالانه دمای آن‌ها به ترتیب ۱۳/۹ و ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد است. میانگین باران کل حوضه ۱۸۸ میلیمتر و میانگین سالانه باران مناطق ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر ۲۲۲/۵ و ۱۵۰/۰ میلیمتر است. موقعیت محدوده مطالعاتی دشت سیرجان در شکل (۱) آورده شده است.

الگوریتم توازن انرژی سطح (*SEBAL*) یکی از روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی است که اولین بار در سال ۱۹۹۸ ارائه و در سال ۲۰۰۰ مجدداً به روز گردید (*Bastiaanssen et al., 2000*). *Bastiaanssen* و همکاران (۲۰۰۵) دقت الگوریتم سبال را در ۲۶ تحقیق در ۳۰ کشور بررسی کردند. دقت برآورد این الگوریتم در مقیاس مزرعه و روزانه برابر ۸۵ درصد و در مقیاس فصلی ۹۵ درصد و دقت در مقیاس بزرگ حوضه‌ای و سالانه برابر ۹۶ درصد بوده است. محققین زیادی در مناطق مختلف جهان از قبیل آیداهو آمریکا (*Tasumi et al., 2003*), برزیل (*Teixeira et al., 2009; Costa et al., 2019*), چین (*Sun et al., 2011; Jia et al., 2012*), شرق افریقا (*Kiptala et al., 2013*) و عربستان (*Mahmoud* و *Alazba, 2016*) از روش الگوریتم سبال برای تعیین تبخیر - تعرق واقعی (ET_a) در سطوح وسیع استفاده کرده‌اند. در کشور ایران نیز در مشهد (ثنایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰)، در شرق حوضه دریاچه ارومیه (باقری هارونی و همکاران، ۱۳۹۱)، در دشت کرمان (دلگرم و همکاران، ۱۳۹۴) و در دشت ناز ساری (رائینی سرجاز و همکاران، ۱۳۹۷) از الگوریتم سبال در برآورد تبخیر - تعرق واقعی در سطوح وسیع استفاده شده است. در تمام تحقیق‌های فوق، روش الگوریتم سبال به عنوان یک روش مناسب و دقیق برای تعیین تبخیر - تعرق واقعی (AET) در سطوح وسیع معرفی شده است.

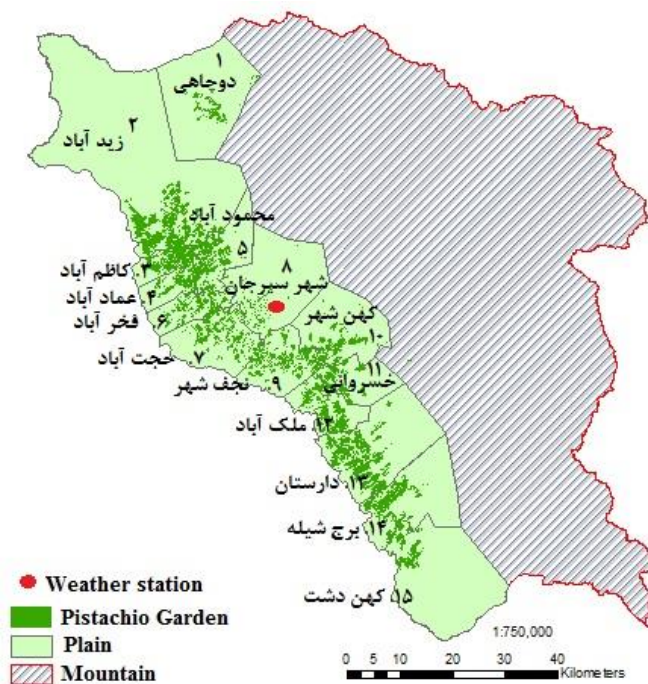
در نتیجه می‌توان وضعیت تأمین آب را براساس تفاوت آب مصرفی در حالت فعلی با حداکثر آب مصرفی مشخص کرد. برای این منظور، پس از تعیین تبخیر - تعرق پتانسیل در باغات پسته، با بررسی تفاوت آن با



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی دشت سیرجان

این تقسیم‌بندی کوچکترین سطح اطلاعات موجود بوده و اغلب مناطق به دلیل نزدیکی جغرافیایی دارای شرایط فرهنگی و مدیریت آبیاری یکسان هستند. لذا از این تقسیم‌بندی استفاده و دشت سیرجان به ۱۵ منطقه مطالعاتی شامل کشت پسته تقسیم گردید (شکل ۲).

با توجه به موقعیت و تمرکز آبادی‌ها در نقاط مختلف دشت سیرجان، اتحادیه‌های تعاونی روستایی در نقاط مختلف دشت ایجاد شده است. این اتحادیه‌ها دارای اطلاعاتی از قبیل افراد تحت مجموعه، سطح باغات پسته، میزان عملکرد محصول و... هستند. لازم به ذکر است که



شکل ۲. تقسیم‌بندی مناطق مورد مطالعه در دشت سیرجان

تعیین تبخیر - تعرق پتانسیل پسته

تبخیر - تعرق پتانسیل هر گیاه (ET_c) نشان‌دهنده‌ی حداکثر تبخیر - تعرق گیاه در شرایط استاندارد است. برای این منظور تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه در لایسومتر و پس از رسیدن به تعادل آبی تعیین می‌گردد. پس از مقایسه این مقدار با تبخیر - تعرق مرجع (اغلب چمن) (ET_o) می‌توان نسبت ET_c به ET_o را که ضریب گیاهی (K_c) نامیده می‌شود بدست آورد. سپس در زمان مورد نیاز با تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع و ضرب آن در مقدار ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه مورد نظر محاسبه گردد. تبخیر - تعرق پتانسیل با علامت ET_c نشان‌دهنده می‌شود و برای محاسبه آن از رابطه (۱) استفاده می‌گردد.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

ضریب گیاهی K_c یک مقدار ثابت نبوده و با توجه به نوع گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی در طول دوره رشد تغییر می‌نماید. در این زمینه شرایط اقلیمی حاکم بر هر منطقه، عواملی نظیر سن درختان، نحوه آرایش آن‌ها، مدیریت باغات و برنامه آبیاری در مقدار این ضریب مؤثر است (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). همانگونه که بیان شد، در ایران می‌توان برای برآورد دقیق تبخیر - تعرق و آب مورد نیاز درخت پسته در سنین زیر ۱۰ سال (غیر بارور) از تحقیق موذن‌پور کرمانی و همکاران (۱۳۸۶) و برای سنین بیش از ۱۰ سال (بارور) از تحقیق فرشی و همکاران (۱۳۷۶) که در دشت رفسنجان (مجاور دشت سیرجان) انجام شده‌اند، استفاده کرد. طبق اطلاعات اداره جهاد کشاورزی وسعت باغات بارور سیرجان حدود ۴۲۰۰۰ هکتار و باغات غیر بارور (زیر ۱۰ سال) ۹۵۵ هکتار است که نشان می‌دهد باغات غیر بارور نسبت به بارور وسعت بسیار کمی را شامل می‌شوند. به دلیل

دشواری مکان‌یابی باغات جوان و با توجه به نسبت بسیار کم آن‌ها از محاسبه تبخیر - تعرق جداگانه برای این باغات صرف نظر شده و تمام باغات با استفاده از ضرایب تحقیق فرشی و همکاران (۱۳۷۶) محاسبه شده است.

تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته

با توجه به وسعت دشت سیرجان، امکان تعیین دقیق آب مصرفی باغات به صورت مزرعه‌ای وجود ندارد و به همین دلیل از مقدار تبخیر - تعرق واقعی (AET) به عنوان نمایانگر مقدار آب مصرفی توسط باغات پسته استفاده گردید. بدین منظور در دوره رشد پسته (ابتدای فروردین ماه تا انتهای آبان ماه) تصاویر ماهواره‌ای در محدوده دشت سیرجان تهیه و الگوریتم سبال بر روی آن‌ها اجرا گردید.

مرحله پیش پردازش در واقع تصحیح و بهینه‌سازی تصاویر ماهواره‌ای است. در این مرحله سعی می‌شود، خطاهای سیستماتیک و غیر سیستماتیک موجود در تصاویر تصحیح شوند. عمده‌ترین پیش‌پردازش‌ها برای تصاویر شامل: تصحیح رادیومتریک، تصحیح هندسی و تفکیک باندها است. تمام تصحیحات اتمسفری و هندسی قبل از انجام الگوریتم سبال انجام می‌گردد که در این تحقیق کلیه مراحل پیش‌پردازش و پردازش تصاویر لندست در نرم افزار $ENVI 5.3$ انجام شده است.

اطلاعات موجود در منطقه مربوط به سال زراعی ۹۲-۱۳۹۱ بوده است، ازین‌رو تبخیر - تعرق واقعی نیز همزمان با آن در سال (۲۰۱۳ میلادی) تعیین گردید. بنابراین، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ ($Landsat 8- OLI$) با دقت مکانی ۳۰ متر و دقت زمانی ۱۶ روز در سال ۲۰۱۳ تهیه و استفاده گردید.

در برآورد تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال، وجود بارش و ابر در زمان تصویربرداری در تصاویر انتخابی ایجاد خطا می‌کند. به همین دلیل دو تصویر از ۱۳ تصویر موجود در بازه زمانی رشد پسته (ابتدا فروردین تا انتهای آبان) حذف گردید.

¹ Crop coefficient

در سال ۲۰۱۳ از بین تصاویر موجود ۱۱ تصویر دارای دقت و شرایط مطلوب بوده است که تاریخ تصویربرداری

جدول ۱. تاریخ تصاویر لندست ۸ مورد استفاده در الگوریتم سبال

تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	شماره روز جولایی	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	شماره روز جولایی
۲۰۱۳/۳/۲۴	۱۳۹۲/۱/۴	۸۳	۲۰۱۳/۷/۱۸	۱۳۹۲/۴/۲۷	۱۹۹
۲۰۱۳/۴/۱۳	۱۳۹۲/۱/۲۴	۱۰۳	۲۰۱۳/۸/۱۹	۱۳۹۲/۵/۲۸	۲۳۱
۲۰۱۳/۵/۱۵	۱۳۹۲/۲/۲۵	۱۳۵	۲۰۱۳/۹/۴	۱۳۹۲/۶/۱۳	۲۴۷
۲۰۱۳/۵/۳۱	۱۳۹۲/۳/۱۰	۱۵۱	۲۰۱۳/۱۰/۶	۱۳۹۲/۷/۴	۲۷۹
۲۰۱۳/۶/۱۶	۱۳۹۲/۳/۲۶	۱۶۷	۲۰۱۳/۱۱/۷	۱۳۹۲/۸/۱۶	۳۱۱
۲۰۱۳/۷/۲	۱۳۹۲/۴/۱۱	۱۸۳			

بر اساس مقدار باقیمانده انرژی از رابطه (۲) تعیین می‌نماید (Bastiaanssen et al., 2000).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

در رابطه فوق، λET شار گرمای نهان، R_n شار تابش خالص خورشید، H شار گرمای محسوس و G شار گرمای خاک است (تمامی اجزای معادله فوق بر حسب وات بر مترمربع یا W/m^2 هستند) و فرآیند محاسباتی آن‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

شار تابش خالص خورشید R_n بر اساس اختلاف بین جریان تابش‌های ورودی و خروجی محاسبه می‌شود و معیاری از مقدار انرژی موجود در سطح زمین است (رابطه ۳).

$$R_n = (1 - \alpha) R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \epsilon_o) R_L \downarrow \quad (3)$$

در رابطه فوق، $R_s \downarrow$ تابش موج کوتاه (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) ورودی (W/m^2)، $R_L \downarrow$ تابش موج بلند (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) ورودی (W/m^2) و $R_L \uparrow$ تابش موج بلند خروجی (W/m^2) است که برای تعیین آن‌ها از دمای سطح زمین (LST) و نقشه dem (Digital Elevation Model) استفاده می‌گردد. α آلبیدوی سطحی از تصویر بازتابش سطح و ϵ_o گسیلمندی سطحی از شاخص $NDVI$ استخراج می‌شود.

در اجرای الگوریتم سبال نیاز به محاسبه تبخیر - تعرق مرجع در دو حالت روزانه و ساعتی است، بدین منظور اطلاعات لازم شامل دمای کمینه و بیشینه، نقطه شبنم، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات روشنایی از ایستگاه سینوپتیک سیرجان برای سال ۲۰۱۳ تهیه گردید. طبق توصیه دستورالعمل الگوریتم سبال، از مدل $Ref-ET$ و با استفاده از روش فائو پنمن مانتیث، تبخیر - تعرق مرجع به صورت روزانه و ساعتی (در روز و ساعت گذر ماهواره) تعیین گردید. قابل ذکر است که سنجنده لندست ۸ معمولاً بین ساعات ۱۰ تا ۱۱ صبح به وقت محلی از ایران عبور می‌کند.

الگوریتم SEBAL

در الگوریتم سبال از باندهای ۱ تا ۷ تصاویر لندست برای تولید تصویر بازتابش سطح ($Reflectance$) استفاده می‌شود که برای تولید شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال شده ($NDVI$)، شاخص سطح برگ (LAI) و شاخص ضریب بازتابندگی ($Albedo$) کاربرد دارند و از باند ۱۰ و ۱۱ برای تعیین دمای سطح زمین (LST) استفاده می‌گردد.

الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین ($SEBAL$) در واقع شار گرمای نهان که به مصرف تبخیر - تعرق می‌رسد را

پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی متراکم دارای بیشترین مقدار $NDVI$ و کمترین دمای سطح مشابه با کشت یونجه متراکم و پیکسل گرم به عنون پیکسل دارای بیشترین دما از مزارع بدون پوشش گیاهی دارای $NDVI$ کم و دمای سطح زیاد مشابه با مزارع آیش ولی غیر بیابانی انتخاب می‌شود. در اجرای الگوریتم سبال تبخیر - تعرق در پیکسل گرم برابر صفر و در پیکسل سرد برابر با تبخیر - تعرق یونجه فرض می‌شود.

شار گرمای نهان (λET)، برای هر پیکسل با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید که λET مقدار لحظه‌ای (مدت یک ثانیه) برای زمان گذر ماهواره است. میزان ساعتی تبخیر - تعرق واقعی در ساعت گذر ماهواره (AET_h) به صورت عمق تبخیر آب (میلیمتر) با استفاده از گرمای نهان تبخیر آب (λ)، از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$AET_h = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (7)$$

جهت برآورد تبخیر - تعرق روزانه از تبخیر - تعرق ساعتی، از نسبت تبخیر - تعرق گیاه مرجع در حالت روزانه (ET_{o-24}) به تبخیر - تعرق گیاه مرجع در حالت ساعتی (ET_{o-h}) استفاده می‌شود. با ضرب این نسبت در مقدار تبخیر - تعرق واقعی ساعتی (AET_h) مقدار تبخیر - تعرق واقعی روزانه (AET_{24}) بدست خواهد آمد (Allen et al., 2002).

$$AET_{24} = AET_h \times \frac{ET_{o-24}}{ET_{o-h}} \quad (8)$$

کلیه مراحل فوق در محیط نرم‌افزاری ENVI 5.3 به انجام رسید که به صورت شماتیک در شکل (۳) آورده شده است.

شار گرمای خاک (G) میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است که مطابق رابطه (۴) و براساس ضرایب پیشنهادی راهنمای الگوریتم سبال (Allen et al., 2002) برآورد می‌گردد.

$$G = R_n \times \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2] \times [1 - 0.978 \times NDVI^4] \quad (4)$$

در رابطه فوق، T_s دمای سطح زمین و $NDVI$ شاخص گیاهی اختلاف نرمال شده است.

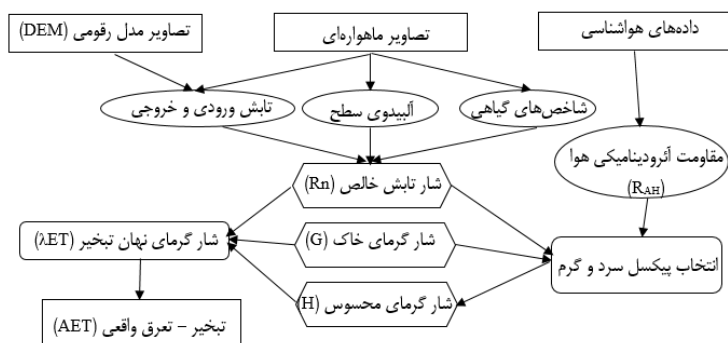
شار گرمای محسوس (H) میزان هدررفت انرژی (یا گرما) است که در اثر اختلاف دما به هوا منتقل می‌شود (رابطه ۵).

$$H = \rho_{air} \times C_p \times \frac{T_o - T_{air}}{R_{AH}} \quad (5)$$

در رابطه فوق، T_o دمای آیرودینامیک هوا، T_{air} دمای هوا (کلوین)، ρ_{air} چگالی هوا (Kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا (J/Kg/K) و R_{AH} مقاومت آیرودینامیکی هوا (s/m) است.

اندازه‌گیری یا برآورد دمای آیرودینامیک، عملاً غیر ممکن و پیچیده بوده و لذا مدل‌های مختلف، الگوریتم‌های متفاوتی را برای برآورد اختلاف دمای هوا و آیرودینامیک (dT) بکار می‌برند. در الگوریتم سبال، به منظور برآورد dT از یک فرآیند تکرارشونده استفاده می‌شود. در این فرآیند یک رابطه رگرسیونی مطابق رابطه (۶) برای دمای سطح زمین (T_s) و dT در دو پیکسل شاخص (سرد و گرم) برآورد شده و سپس این رابطه به تمامی پیکسل‌های تصویر اعمال می‌گردد (Allen et al., 2002).

$$dT = a \times T_s + b \quad (6)$$



شکل ۳. طرح شماتیک از الگوریتم سبال

پیکسل بدست می‌آید. مقادیر K_A برای روزهای بدون تصویر ماهواره‌ای، با میانبایی در روزهای دارای تصویر ماهواره‌ای بدست می‌آید. مقدار تبخیر - تعرق واقعی روزانه در روزهای بدون تصویر با ضرب K_A در تبخیر - تعرق مرجع همان روز بدست آمده است.

صحت‌سنجی الگوریتم سبال

اگر چه الگوریتم سبال، بالانس انرژی را در مقیاس منطقه با کمترین نیاز به داده‌های زمینی تعیین می‌کند (Duchemin et al., 2006) ولی صحت‌سنجی دقت الگوریتم در مقیاس منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در صحت‌سنجی نتایج استخراج شده از الگوریتم سبال با داده‌های زمینی مقایسه می‌شود.

برای این منظور در منطقه مورد مطالعه از نتایج تحقیق لایسمتری موذن‌پور کرمانی و همکاران (۱۳۸۶) که با هدف تعیین ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق واقعی پسته در دشت رفسنجان (مجاور دشت سیرجان) انجام شده است، استفاده گردید. لایسمتر پسته در موقعیت ۵۵ درجه و ۵۶ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی و ۳۰ درجه و ۲۳ دقیقه و ۲۷ ثانیه شمالی و داخل مزرعه‌ی یک هکتاری با شرایط مشابه قرار دارد. در تحقیق فوق مقدار ضریب گیاهی پسته در سنین ۸ و ۹ سال در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ در طول رشد پسته (ابتدای فروردین تا انتهای آبان) تعیین شده است.

مناطق با پوشش گیاهی نسبت به مناطق بدون پوشش گیاهی دارای شاخص LST و $Albedo$ پایین‌تر و شاخص LAI و $NDVI$ بالاتر هستند. فلذا در نرم افزار $ENVI$ سطح زیرکشت باغات پسته در هر منطقه از دشت سیرجان با اجرای فرمان $Decision Tree$ و با استفاده از مقادیر شاخص‌های فوق تعیین گردید. طبق اطلاعات اتحادیه تعاونی روستایی و جهاد کشاورزی سیرجان در دوره رشد پسته (فرورین تا آبان) در مناطق مورد مطالعه در سطح دشت سیرجان، سطح کشت گیاهان غیر از پسته بسیار کم و زیر یک درصد است. فلذا در مناطق مورد بررسی از تفکیک کشت پسته با دیگر محصولات صرف نظر شده است.

در هر پیکسل ۳۰ متری از تصویر لندست پس از انجام الگوریتم سبال، مقدار تبخیر - تعرق واقعی روزانه بدست آمده است و با جمع پیکسل‌های دارای پوشش گیاهی در هر منطقه، مقدار تبخیر - تعرق واقعی روزانه در هر منطقه بدست می‌آید. تبخیر - تعرق واقعی به صورت رابطه (۹) و با استفاده از ضریب گیاهی در شرایط واقعی (K_A) بیان می‌شود.

$$AET_{24} = K_A \times ET_o = (K_s \times K_c) \times ET_o \quad (9)$$

در رابطه فوق K_s ضریب استرس آبی در شرایط غیر استاندارد و واقعی است که با ضرب آن در ضریب گیاهی (K_c) به (K_A) تبدیل می‌شود. در نتیجه با داشتن تبخیر - تعرق مرجع در روز تصویربرداری مقدار K_A برای هر

۷ که در جدول (۲) آمده است استفاده گردید. با استفاده از این تصاویر در دشت رفسنجان الگوریتم سبال اجرا و مقدار ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق واقعی پسته تعیین گردید.

در زمان تحقیق فوق (۱۳۷۹ و ۱۳۸۰) فقط تصاویر لندست ۷ وجود داشته است، از اینرو در مرحله صحت‌سنجی از تصاویر لندست ۷ به جای لندست ۸ استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر - تعرق واقعی گیاه پسته از تصاویر لندست

جدول ۲. تاریخ تصاویر لندست ۷ مورد استفاده برای مرحله صحت‌سنجی

تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	شماره روز جولایی	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	شماره روز جولایی
۲۰۰۰/۵/۱۹	۱۳۷۹/۲/۳۰	۱۴۰	۲۰۰۱/۴/۴	۱۳۸۰/۱/۱۵	۹۴
۲۰۰۰/۵/۲۶	۱۳۷۹/۳/۶	۱۴۷	۲۰۰۱/۴/۲۰	۱۳۸۰/۱/۳۱	۱۱۰
۲۰۰۰/۷/۲۲	۱۳۷۹/۵/۱	۲۰۴	۲۰۰۱/۵/۲۹	۱۳۸۰/۳/۸	۱۴۹
۲۰۰۰/۸/۷	۱۳۷۹/۵/۱۷	۲۲۰	۲۰۰۱/۶/۲۳	۱۳۸۰/۴/۲	۱۷۴
۲۰۰۰/۸/۱۴	۱۳۷۹/۵/۲۴	۲۲۷	۲۰۰۱/۸/۱۷	۱۳۸۰/۵/۲۶	۲۲۹
۲۰۰۰/۱۰/۲۶	۱۳۷۹/۷/۵	۳۰۰	۲۰۰۱/۸/۲۶	۱۳۸۰/۶/۴	۲۳۸
۲۰۰۱/۳/۳	۱۳۷۹/۱۲/۱۳	۶۲	۲۰۰۱/۱۰/۱۳	۱۳۸۰/۷/۲۱	۲۸۶
			۲۰۰۱/۱۱/۵	۱۳۸۰/۸/۱۴	۳۰۹

تعیین سطوح تأمین آب در هر مرحله از رشد

در هر مرحله از رشد پسته، تفاوت تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_C) و واقعی (AET) نشان‌دهنده کمبود آبیاری در حالت فعلی نسبت به حالت استاندارد است. در این تحقیق سطوح تأمین آب در هر مرحله از رشد پسته، براساس کمبود آبیاری نسبت به تبخیر - تعرق پتانسیل (Goldhamer, 2005) و به صورت درصد کم آبیاری (P_S) طبق رابطه (۱۴) محاسبه شده است.

$$P_S = \left(1 - \frac{AET}{ET_C}\right) \times 100 \quad (14)$$

نتایج بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده میزان و زمانبندی کم آبیاری در مناطق مختلف دشت سیرجان است. در این راستا مقدار واقعی کم آبیاری در هر مرحله از رشد پسته با سطوح کم آبیاری پیشنهادی در مطالعات دیگر مورد بررسی قرار گرفت و بطور متناسب الگوهای بهبود تأمین آب در هر منطقه از دشت سیرجان مشخص شده است.

سطوح مختلف کم آبیاری در مناطق مختلف دشت سیرجان بر عملکرد محصول تأثیر داشته و در عین حال تنش شوری حاصل از کیفیت متفاوت آب آبیاری نیز بر

در تحقیق لایسیمیتری مذکور مقادیر تبخیر - تعرق واقعی در دوره‌های ۲۰ روزه ارائه شده است، ازینرو نتایج تبخیر - تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال به دوره‌های ۲۰ روزه تبدیل و با نتایج تحقیق مذکور مقایسه شد.

در صحت‌سنجی، به منظور ارزیابی نتایج الگوریتم سبال از پارامتر مقدار خطا (E)، میانگین مطلق خطا (MAE^1)، درصد خطا (PE^2) و مجذور میانگین مربع خطاها ($RMSE^3$) استفاده شد که رابطه‌ی (۱۰) تا (۱۳) نحوه محاسبه آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$E = S_j - O_j \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |S_j - O_j| \quad (11)$$

$$PE = \frac{(S_j - O_j)}{O_j} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (S_j - O_j)^2} \quad (13)$$

که در آن S_j مقدار تبخیر - تعرق بدست آمده از الگوریتم سبال و O_j داده‌ی مشاهداتی تبخیر - تعرق لایسیمیتری بدست آمده از اطلاعات زمینی است.

¹ Mean Absolute Error

² Present Error

³ Root Mean Square Error

میزان شوری آب به عنوان متغیرهای مستقل (X1) و (X2) و عملکرد متوسط در هر منطقه به عنوان متغیر وابسته (Y) به این دو متغیر در نظر گرفته شده است. از طرفی تأثیر کم آبیاری به عملکرد در بازه‌های مختلف شوری متفاوت است. از این رو، با استفاده از تجزیه واریانس همبستگی عملکرد به کم آبیاری در بازه‌های مختلف شوری تعیین و بازه شوری با بیشترین همبستگی عملکرد به کم آبیاری مشخص شده است.

نتایج و بحث

تبخیر - تعرق پتانسیل پسته

با استفاده از ضرایب گیاهی پسته مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه پسته در مراحل مختلف رشد پسته برای سال زراعی ۹۲ - ۱۳۹۱ در دشت سیرجان تعیین و در جدول (۳) آورده شده است.

عملکرد تأثیری گذار است. برای تعیین همبستگی عملکرد هر منطقه به مقدار کم آبیاری و شوری آب از تجزیه واریانس استفاده شده است. عملکرد محصول پسته در مناطق مختلف دشت از اطلاعات اتحادیه تعاونی روستایی در مناطق مشابه با مناطق این تحقیق در سال ۹۲ - ۱۳۹۱ استفاده شده است. میزان شوری آب آبیاری توسط اداره آب منطقه‌ای کرمان با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) در ۱۰۸۷ چاه کشاورزی در سطح دشت سیرجان در سال ۹۲ - ۱۳۹۱ مشخص شده است (خلاصه وضعیت آب‌های زیرزمینی، ۱۳۹۲). میانگین EC در هر منطقه با میانگین‌گیری از چاه‌های موجود در آن منطقه مشخص شده است. عملیات تجزیه واریانس در محیط نرم‌افزار SAS با استفاده از مدل رگرسیون خطی انجام شده است و برای این منظور میزان کم آبیاری (برآورد شده در این تحقیق) و

جدول ۳. مقدار تبخیر - تعرق گیاه مرجع و پتانسیل پسته به همراه مقادیر ضرایب گیاهی پسته در مراحل رشد در سیرجان

مرحله رشد	تاریخ شمسی معادل دوره	ضرایب گیاهی	تبخیر - تعرق مرجع روزانه ET _O	تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه ET _C
مرحله اول رشد	۱۲ تا ۲۶ فروردین	۰/۴	۴/۷	۱/۹
	۲۷ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت	۰/۴	۶/۴	۲/۵
	۱۱ تا ۲۵ اردیبهشت	۰/۴	۶/۴	۲/۶
مرحله دوم رشد	۲۶ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۰/۴۴	۸/۲	۳/۶
	۱۱ تا ۲۵ خرداد	۰/۵	۸/۵	۴/۳
	۲۶ خرداد تا ۹ تیر	۰/۵۴	۹/۲	۵/۰
مرحله سوم رشد	۱۰ تا ۲۴ تیر	۰/۶	۹/۸	۵/۸
	۲۵ تیر تا ۹ مرداد	۰/۶	۹/۷	۵/۸
	۱۰ تا ۲۴ مرداد	۰/۶	۸/۵	۵/۱
	۲۵ مرداد تا ۹ شهریور	۰/۶	۹/۱	۵/۴
برداشت	۱۰ تا ۲۴ شهریور	۰/۶	۸/۰	۴/۸
	۲۴ تا ۸ مهر	۰/۶	۶/۸	۴/۰
	۹ تا ۲۳ مهر	۰/۵۴	۵/۷	۳/۱
مرحله چهارم رشد	۲۳ مهر تا ۹ آبان	۰/۵	۴/۵	۲/۳
	۱۰ تا ۱۶ آبان	۰/۴۶	۳/۲	۱/۵
مجموع کل دوره (میلیمتر)			۱۶۳۴	۸۷۰

برآورد شده است. تبخیر - تعرق پتانسیل برابر با حداکثر آب مصرفی پسته در شرایط استاندارد است که با مقدار آن در شرایط واقعی تفاوت دارد. از این رو برای بررسی وضعیت فعلی، تبخیر - تعرق واقعی محاسبه گردید.

تبخیر - تعرق واقعی

در دشت سیرجان، تصاویر مورد استفاده در بازه زمانی ۲۴ مارس (۴ فروردین) تا ۷ نوامبر (۱۶ آبان) بوده است. کمترین مقدار تبخیر - تعرق باغات پسته مربوط به دوره ۲۴ مارس (۴ فروردین) با متوسط ۱/۷ میلیمتر در روز و بیشترین مقدار مربوط به ۱۸ جولای (۲۷ تیر) با متوسط ۴/۵ میلیمتر در روز بوده است. صحت‌سنجی نتایج تبخیر - تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال به همراه پارامترهای خطا در هر دوره ۲۰ روزه برای سال ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ در جدول (۴) آورده شده است.

در دوره رشد ضریب گیاهی پسته تغییر چشم‌گیری نداشته ولی به دلیل تغییر زیاد تبخیر - تعرق مرجع (۵ میلیمتر در روز تغییر) به دلیل گرم شدن هوا، مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل پسته نیز تغییر زیاد (۴ میلیمتر در روز تغییر) داشته است. بیشترین مقدار آب مورد نیاز در مرحله سوم رشد رخ داده که همزمان با پر شدن مغز پسته است و نشان‌دهنده‌ی نیاز بالای کشت به آبیاری در این مرحله است. طبق نظر محققین، مرحله سوم رشد به کم آبیاری حساس بوده و باید به اندازه کافی انجام شود تا کاهش عملکرد رخ ندهد (Memmi et al., Gijón et al., 2011). بنابراین مهم‌ترین و بیشترین آب مورد نیاز پسته در مرحله سوم است که باید در آبیاری در منطقه لحاظ شود تا عملکرد مطلوب بدست آید.

مجموع تبخیر - تعرق پتانسیل در دوره ۲۲۱ روزه رشد گیاه پسته برابر ۸۷۰ میلیمتر یا ۸۷۰۰ مترمکعب بر هکتار

جدول ۴. تبخیر - تعرق واقعی روزانه حاصل از الگوریتم سبال و لایسیمتر به همراه پارامترهای خطا

شماره دوره ۲۰ روزه	سال ۱۳۷۹				سال ۱۳۸۰			
	ET سبال mm/day	ET لایسیمتری mm/day	مقدار خطا E mm/day	درصد خطا PE (%)	ET سبال mm/day	ET لایسیمتری mm/day	مقدار خطا E mm/day	درصد خطا PE (%)
۱	۰/۸۷	۱/۸۳	-۰/۹۶	-۵۲/۵	۱/۰۴	۲/۵۶	-۱/۵۲	-۵۹/۶
۲	۱/۷۰	۲/۳۲	-۰/۶۲	-۲۶/۸	۱/۸۶	۳/۰۱	-۱/۱۵	-۳۸/۳
۳	۲/۵۰	۲/۷۴	-۰/۲۴	-۸/۷	۲/۵۲	۳/۴۰	-۰/۸۸	-۲۵/۸
۴	۳/۳۲	۲/۸۶	۰/۴۵	۱۵/۹	۳/۲۷	۳/۵۰	-۰/۲۳	-۶/۵
۵	۳/۴۹	۲/۵۹	۰/۹۰	۳۴/۶	۳/۱۳	۲/۹۳	۰/۲۰	۶/۸
۶	۳/۴۸	۳/۸۸	-۰/۴۱	-۱۰/۵	۳/۴۸	۴/۵۹	-۱/۱۱	-۲۴/۳
۷	۳/۱۲	۲/۲۳	-۰/۱۱	-۳/۳	۳/۲۰	۳/۹۸	-۰/۷۷	-۱۹/۵
۸	۳/۱۹	۳/۱۶	۰/۰۳	۱/۱	۳/۱۳	۳/۶۱	-۰/۴۸	-۱۳/۳
۹	۳/۱۱	۲/۴۹	۰/۶۲	۲۴/۷	۳/۲۵	۳/۱۱	۰/۱۴	۴/۶
۱۰	۲/۶۳	۱/۹۶	۰/۶۷	۳۴/۴	۲/۴۸	۲/۳۱	۰/۱۷	۷/۵
۱۱	۲/۱۱	۱/۷۱	۰/۴۰	۲۳/۴	۲/۲۸	۲/۱۳	۰/۱۵	۶/۹
۱۲	۱/۱۲	۱/۰۹	۰/۰۳	۲/۶	۱/۴۹	۱/۷۴	-۰/۲۵	-۱۴/۵
متوسط	۲/۵۵	۲/۴۹	۰/۴۵	۱۹/۹	۲/۵۹	۳/۰۷	۰/۵۹	۱۹
مجموع کل دوره	۶۱۳	۵۹۷	۱۵/۴	۲/۶	۶۲۲	۷۳۷	۱۱۵	-۱۵/۶
پارامترهای خطا	MAE = ۰/۴۵ (mm/day)	RMSE = ۰/۵۵ (mm/day)	MAE = ۰/۵۹ (mm/day)	RMSE = ۰/۷۵ (mm/day)				

برابر ۲ میلیمتر بر روز، دلگرم و همکاران (۱۳۹۴) مقدار $RMSE$ را ۰/۶۲ میلیمتر بر روز و رائینی سرجاز و همکاران (۱۳۹۷) MAE را ۰/۹۶ و $RMSE$ را برابر ۱/۱۴ میلیمتر در روز بیان کردند. بر این اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق نیز در دامنه مشابه با سایر تحقیقات بوده و می‌توان از الگوریتم سبال برای تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در دشت سیرجان استفاده کرد.

تعیین سطوح تامین آب در هر مرحله از رشد

تأمین ناکافی آب در هر مرحله از رشد پسته منجر به اعمال سطوح متفاوت کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد شده است. نتایج مقدار کم‌آبیاری در هر مرحله از رشد برای متوسط دشت سیرجان (متوسط تمام مناطق ۱۵ گانه) برای سال زراعی ۹۲ - ۱۳۹۱ در جدول (۵) آورده شده است.

مقدار خطا در برآورد تبخیر - تعرق در دوره‌های ۲۰ روزه متغیر بوده است این مقدار در مراحل اولیه زیاد بوده و به مرور کاهش داشته است. نتایج الگوریتم سبال در سال ۱۳۷۹ اغلب بیش برآورد (به جز دوره‌های اولیه رشد) و در سال ۱۳۸۰ اغلب کم برآورد بوده است. میانگین درصد خطای مطلق در سال ۱۳۷۹ برابر ۱۹/۹ درصد و در سال ۱۳۸۰ برابر ۱۹ درصد بوده است. این مقادیر نشان می‌دهد الگوریتم سبال قادر است با درصد خطای حدود ۲۰ درصد تبخیر - تعرق پسته را برآورد کند. مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) و $RMSE$ به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۵۵ میلیمتر بر روز برای سال ۱۳۷۹ و ۰/۵۹ و ۰/۷۵ میلیمتر بر روز برای سال ۱۳۸۰ بوده است. در برآورد تبخیر - تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم سبال Teixeira و همکاران (2009) مقدار $RMSE$ را برابر با ۰/۳۸ میلیمتر بر روز، باقری هارونی و همکاران (۱۳۹۱) میانگین درصد خطا را ۱۹/۲۵ درصد و مقدار $RMSE$ را

جدول ۵. مقادیر درصد کم‌آبیاری در هر مرحله از رشد در سال زراعی ۹۲ - ۱۳۹۱ برای متوسط دشت سیرجان

شماره دوره	مراحل رشد	تاریخ شمسی معادل دوره	کم آبیاری (mm)	کم آبیاری (%)
	گلدهی Bloom	۱۲ تا ۲۶ فروردین	۴	۱۴
مرحله اول رشد	ظهور برگ‌ها Leaf out	۲۷ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت	۱	۳
	حجیم شدن پوست Shell Expansion	۱۱ تا ۲۵ اردیبهشت	۰	۰
مرحله دوم رشد	استخوانی شدن پوست Shell Hardening	۲۶ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۴	۷
	استخوانی شدن پوست Shell Hardening	۱۱ تا ۲۵ خرداد	۱۵	۲۳
	استخوانی شدن پوست Shell Hardening	۲۶ خرداد تا ۹ تیر	۱۶	۲۲
مرحله سوم رشد	پر شدن مغز Nut Filling	۱۰ تا ۲۴ تیر	۲۰	۲۳
	پر شدن مغز Nut Filling	۲۵ تیر تا ۹ مرداد	۲۹	۳۱
	Nut Fill/Shell Split	۱۰ تا ۲۴ مرداد	۲۵	۳۲
	خندان شدن Shell Splitting	۲۵ مرداد تا ۹ شهریور	۲۹	۳۴
	ترکیدن پوست بیرونی Hull Slip	۱۰ تا ۲۴ شهریور	۲۳	۳۱
	برداشت Harvest	۲۴ تا ۸ مهر	۱۲	۳۱
مرحله چهارم رشد	پس از برداشت Postharvest	۹ تا ۲۳ مهر	۳	۶
	پس از برداشت Postharvest	۲۳ مهر تا ۹ آبان	۲	۵
	پس از برداشت Postharvest	۱۰ تا ۲۴ آبان	۰	۰
	مقدار متوسط برای کل دوره		۱۲	۱۷

این بررسی نشان داد که در اوایل دوره آبیاری در نیمه‌های فروردین، آب مورد نیاز پسته تأمین می‌شود به طوریکه کم آبیاری در اردیبهشت ماه به صفر می‌رسد. به مرور از ابتدای مرحله دوم رشد و با شروع خرداد ماه با گرم شدن تدریجی هوا درصد کم آبیاری نیز افزایش یافته و در انتهای این مرحله به ۲۳ درصد می‌رسد. با ادامه افزایش دما و به دلیل عدم دسترسی به آب مورد نیاز، میزان کم آبیاری در مرحله سوم رشد بطور نسبی افزایش می‌یابد. میزان کم آبیاری در ابتدای این دوره ۲۳ درصد بوده و در انتهای مرداد ماه در مرحله خندان شدن به بیشترین مقدار خود یعنی ۳۴ درصد می‌رسد. در شهریور ماه به دلیل کاهش تدریجی دما مقدار کم آبیاری نیز به تدریج کاهش یافته است. در مرحله چهارم رشد و پس از برداشت محصول به دلیل کاهش دما در مهر ماه آب تأمین شده برای گیاه کافی بوده و درصد کم آبیاری کاهش یافته و در انتهای این مرحله به صفر می‌رسد. روند موجود در تأمین آب، نشان می‌دهد با دسترسی یکنواخت به آب در طول دوره رشد، مقدار و دور آبیاری بطور ثابت در کل فصل وجود داشته است. در عمل، در منطقه مورد مطالعه تأمین آب مورد نیاز از طریق پمپاژ از منابع آب زیرزمینی انجام می‌شود و با توجه به سهم ثابت هر فرد از آب برداشتی مدیریت موجود منجر به آبیاری با دور ثابت و مقدار ثابت در طول دوره آبیاری شده است. این روند باعث شده در ابتدای دوره‌ی رشد مقدار آبیاری در حد کافی بوده ولی در مرحله سوم با گرم شدن شدید هوا به دلیل افزایش نیاز آبی پسته این مقدار آبیاری، ناکافی بوده و منجر به کم آبیاری و اعمال تنش شدیدی شده است.

تحقیقات موجود در این زمینه نشان داده است مرحله دوم رشد پسته، قابلیت تحمل تا ۵۰ درصد کم آبیاری را دارد ولی مرحله سوم به کم آبیاری حساس بوده و اعمال تنش در این مرحله منجر به کاهش محصول شده است (Iniesta et al., 2008; Gijón et al., 2011; Carbonell-

در دشت سیرجان در مرحله دوم رشد حداکثر کم آبیاری ۲۳ درصد بوده است و در نتیجه از حد مجاز فراتر نرفته است. در مرحله سوم رشد میزان کم آبیاری ۳۰ درصد بوده است که به دلیل حساسیت این مرحله به تأمین ناکافی آب، این میزان کم آبیاری باعث کاهش محصول خواهد شد. فلذا در صورتیکه بتوان کاهش آبیاری در مرحله دوم و افزایش آبیاری در مرحله سوم اعمال کرد میتوان با استفاده از میزان مشابه تأمین آب، مدیریت آبیاری را براساس حساسیت در مراحل رشد تنظیم و عملکرد محصول را افزایش داد. فراهم آوردن این شرایط مستلزم تغییر میزان پمپاژ از منابع زیرزمینی در داخل فصل خواهد بود. طبیعتاً در شرایط حفظ روش برداشت آب موجود، امکان تغییر میزان آبیاری در منطقه محدود است. از این رو برای جبران آب مورد نیاز گیاه، بهتر است از تلفات آب به ویژه در مرحله سوم رشد جلوگیری کرد.

مقدار کم آبیاری در هر مرحله از رشد و در هر منطقه از دشت سیرجان تعیین شده است. در همه مناطق مشابه با متوسط دشت، کم آبیاری بیش از ۲۰ درصد در نیمه‌های مرحله دوم شروع شده و در مرحله سوم در زمان خندان شدن پسته به بیشترین مقدار رسیده و سپس در زمان برداشت به پایان می‌رسد. فقط در منطقه حجت آباد در اکثر مراحل رشد، درصد کم آبیاری بیش از ۲۰ درصد بوده است. این وضعیت نشان‌دهنده مدیریت ضعیف آبیاری و عدم تناسب تأمین آب در این منطقه است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد در صورتیکه امکان تطبیق تأمین آب متناسب با حساسیت در مراحل رشد پسته نباشد، یکی از اقدامات مؤثر کاهش سطح زیر کشت و تأمین آب مورد نیاز برای باغات باقیمانده است (عبدالهی عزت آبادی، ۱۳۹۳).

برای بررسی مناطق مختلف دشت سیرجان، متوسط شوری آب آبیاری و مقدار تبخیر - تعرق واقعی بدست

آمده از الگوریتم سیال، سطوح کم آبیاری اعمال شده و عملکرد متوسط در سال زراعی ۹۲ - ۱۳۹۱ در هر منطقه از دشت سیرجان در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶. مقادیر تبخیر - تعرق واقعی و کم آبیاری به همراه اطلاعات هر منطقه از دشت سیرجان

شماره منطقه	نام منطقه	سطح باغات پسته (ha)	AET (mm)	کم آبیاری (%) P _s	شوری آب آبیاری (µmho/cm)	عملکرد (Kg/ha)
۱	شهر سیرجان	۸۹۶	۸۹۱	-	۱۵۴۱	۱۰۰۰
۲	دارستان	۲۲۶۲	۶۸۱	۲۰	۱۵۳۸	۱۲۰۰
۳	کهن شهر	۱۳۵۳	۶۳۳	۲۲	۱۸۵۹	۱۲۰۰
۴	محمود آباد	۲۳۶۱	۶۴۷	۲۳	۱۸۹۱	۸۰۰
۵	ملک آباد	۱۳۲۰	۶۶۵	۲۱	۱۹۵۲	۱۲۰۰
۶	برج شيله	۱۴۳۰	۷۱۹	۱۵	۲۱۰۵	۱۴۰۰
۷	خسروانی	۸۳۶	۶۳۳	۲۳	۲۲۳۵	۱۰۰۰
۸	دو چاهی	۹۳۱	۷۴۸	۱۰	۲۵۹۶	۱۰۰۰
۹	نجف شهر	۱۰۴۳	۶۴۱	۲۰	۲۹۷۹	۱۰۰۰
۱۰	حجت آباد	۱۶۴۷	۶۱۲	۲۶	۳۲۵۹	۱۰۰۰
۱۱	کهن دشت	۱۲۵۸	۶۳۶	۲۳	۴۷۶۲	۷۰۰
۱۲	کاظم آباد	۸۲۴	۷۳۲	۱۰	۴۸۳۹	۱۰۰۰
۱۳	فخر آباد	۸۰۱	۶۴۴	۲۱	۵۳۸۴	۸۰۰
۱۴	عماد آباد	۷۳۱	۷۷۳	۶	۶۰۴۷	۱۰۰۰
۱۵	زید آباد	۴۸۵۷	۶۵۸	۲۰	۶۰۷۴	۷۰۰
	میانگین		۶۸۸	۱۷	۳۲۷۱	۱۰۰۰

مقادیر درصد کم آبیاری نشان دهنده تفاوت تبخیر - تعرق واقعی نسبت به تبخیر - تعرق پتانسیل پسته است. منطقه ۱ (شهر سیرجان) به دلیل وجود فضای سبز شهری (وجود درختان غیر از درخت پسته) دارای تبخیر - تعرق واقعی بیش از باغات پسته است، فلذا در این منطقه نمیتوان از شاخص کم آبیاری استفاده کرد. مناطق با کم آبیاری کمتر از ۱۰ درصد از قبیل مناطق دوچاهی، کاظم آباد و عماد آباد بیشترین سطح تامین آب در منطقه را داشته اند که نشان از آبیاری تقریباً کامل درختان پسته در این مناطق است. علی اکبری و زند پارسا (۱۳۹۶) با بررسی درصدهای مختلف آبیاری پسته در شهرستان انار تیمار ۸۰ درصد آبیاری را تیمار مناسب آبیاری معرفی

کردند. آن‌ها بیان کردند که این تیمار با کاهش مقدار آبیاری، هیچ تأثیری در مقدار عملکرد پسته، درصد خندانی، تعداد جوانه های زایشی در هر درخت نداشته است. متوسط کم آبیاری در دشت سیرجان ۱۷ درصد بدست آمد که نشان می دهد در مجموع کل دشت در آستانه قابل تحمل آبیاری شده است. دستورانی و همکاران (۱۳۹۱) در منطقه اردکان استان یزد تفاوت ۱۸ درصدی بین میزان آب مورد نیاز و تبخیر - تعرق واقعی را بدست آوردند که مشابه با مقدار آن در دشت سیرجان است. کم آبیاری بالای ۲۰ درصد در مناطق محمود آباد، حجت آباد، کهن شهر، خسروانی و کهن دشت تأمین ناکافی آب در این مناطق را نشان می دهد. در منطقه زیدآباد،

فخرآباد و کهن‌دشت کم‌آبیاری با شوری توأمان شده و عملکرد به کمترین میزان در سطح دشت (700 Kg/ha) رسیده است. عملکرد 1400 Kg/ha در منطقه برج شيله با EC پایین و میزان کم‌آبیاری ۱۵ درصد رخ داده است. این درحالیست که حتی با کمترین میزان کم‌آبیاری (۶ درصد) در مناطق شور از قبیل عماد آباد عملکرد 1000

بدست آمده است. در نتیجه علاوه بر کم‌آبیاری، مقدار شوری آب نیز تأثیر چشم‌گیر بر عملکرد دارد. جدول (۷) نتایج تجزیه واریانس و میزان همبستگی عملکرد در هر منطقه (Y) به کم‌آبیاری (P_s) و شوری آب (EC) را نشان می‌دهد.

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس عملکرد محصول پسته در سطح دشت

$(X_2) EC$	$(X_1) P_s$	عملکرد محصول (Y)	
-۰/۰۹۷	-۱۶/۰۵۶	۱۶۲۸/۷۸	ضریب رگرسیون
۰/۰۲۵	۶/۹۹	۱۸۱/۸	خطای استاندارد (Standard Error)
**۰/۰۰۲۵	*۰/۰۴۲۳	**۰/۰۰۷	<i>P Value</i>
$CV = 14$	$R^2 = 0.6$	$RMSE = 141$ (Kg/ha)	دقت مدل رگرسیونی

** معنی دار در سطح ۹۹ درصد و P کمتر از ۰/۰۱

* معنی دار در سطح ۹۵ درصد و P کمتر از ۰/۰۵

این نتایج نشان داد که تجزیه واریانس فوق با مقدار P برابر ۰/۰۰۷ از سطح معنی‌داری بسیار بالایی (در سطح ۹۹ درصد) و بیانگر همبستگی خوب عملکرد محصول به دو عامل توأمان کم‌آبیاری و شوری آب است. دامنه‌ی شوری آب آبیاری در مناطق مختلف از ۱۵۰۰ تا ۶۰۷۰ ($\mu\text{mho/cm}$) بوده است و همبستگی عملکرد به شوری در این دامنه در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. در دشت سیرجان مقدار کم‌آبیاری در بازه ۶ تا ۲۶ درصد بدست آمده است (جدول ۶) و جدول (۷) نشان داد که مقدار همبستگی عملکرد به کم‌آبیاری در بازه‌ی موجود در سطح

۹۵ درصد معنی‌دار است. در نتیجه همبستگی عملکرد به کم‌آبیاری کمتر از شوری آب بوده است. در سطوح بالای شوری آب آبیاری حتی در شرایط کم‌آبیاری محدود (۶ درصد) عملکرد پایین بدست آمده است. تجزیه واریانس در سطوح مختلف شوری انجام و همبستگی عملکرد (Y) به کم‌آبیاری (X) در سطوح مختلف شوری بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بیشترین همبستگی عملکرد به کم‌آبیاری در سطوح شوری آب بالای $4000 \text{ } (\mu\text{mho/cm})$ بدست آمده است (جدول ۸).

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس عملکرد محصول پسته در سطوح مختلف شوری

تعداد مناطق	<i>P Value</i>	R^2	<i>CV</i>	$RMSE$ (Kg/ha)	دامنه EC
۹	۰/۴۴	۰/۱	۱۶/۵	۱۸۰	۱۵۰۰ - ۴۰۰۰
۵	*۰/۰۱۶۲	۰/۸۹	۶/۹	58	۴۰۰۰ - ۶۰۷۰

* معنی دار در سطح ۹۵ درصد و P کمتر از ۰/۰۵

تبخیر - تعرق واقعی پسته در دشت سیرجان را برآورد کند.

کمترین سطح تأمین آب در منطقه حجت آباد رخ داده است که منجر به بیشترین میزان کم آبیاری شده و نشان-دهنده‌ی مدیریت ضعیف آب در این منطقه است. متوسط کم آبیاری در دشت سیرجان ۱۷ درصد بدست آمد که نشان داد در مجموع کل دشت در حد آستانه قابل تحمل آبیاری شده است.

نتایج کم آبیاری نشان داد که در دشت سیرجان در ابتدای دوره‌ی رشد مقدار آبیاری مناسب بوده ولی در زمان مرحله سوم با گرم شدن شدید هوا (انتهای تیر تا انتهای شهریور) به دلیل افزایش نیاز آبی پسته این مقدار آبیاری ناکافی بوده و منجر به کم آبیاری شدیدی شده است. در صورتیکه بتوان کاهش آبیاری در مرحله دوم و افزایش آبیاری در مرحله سوم اعمال کرد میتوان آبیاری را براساس حساسیت در مراحل رشد تنظیم و عملکرد محصول را افزایش داد. یکی از اقدامات مؤثر در این زمینه، جلوگیری از تلفات آب به ویژه در مرحله سوم رشد است. در دشت سیرجان عملکرد همبستگی خوبی به دو عامل کم آبیاری و شوری آب دارد ولی همبستگی عملکرد به کم آبیاری کمتر از شوری آب بوده است. برای متوسط مناطق مورد بررسی، درخت پسته در سطوح کم شوری آب به کم آبیاری (تا ۲۶ درصد) مقاوم بوده و با افزایش شوری آب، تنش شوری و کم آبیاری توأمان شده و در این حالت اثر کم آبیاری بر عملکرد نیز معنی دار شده است.

این بررسی نشان داد که کم آبیاری در سطوح موجود (۶ تا ۲۶ درصد) در شوری آب کمتر از ۴۰۰۰ ($\mu\text{mho/cm}$) تأثیر معنی داری بر عملکرد ندارد ولی پس از افزایش شوری آب به مقادیر بالای ۴۰۰۰ ($\mu\text{mho/cm}$) تأثیر کم آبیاری بر عملکرد معنی دار شده است. در واقع درخت پسته در سطوح شوری کم به کم آبیاری (حتی تا سطح ۲۶ درصد) مقاوم بوده و کم آبیاری تأثیر معنی دار بر عملکرد ندارد. با افزایش شوری، اثر توأمان کم آبیاری و شوری بر عملکرد نیز معنی دار می شود. مقدار بالای R^2 (۰/۸۹) نشان از همبستگی بالای عملکرد به کم آبیاری در این سطح از شوری است. این نکته قابل ذکر است که این مقادیر همبستگی، برای متوسط مناطق و متوسط شرایط خاک و مدیریت زراعی در آن مناطق بدست آمده است و در صورت بررسی مجزای باغ‌ها ممکن است با تغییر در سن درخت، رقم پسته و مدیریت باغ مقادیر فوق نیز تغییر کند.

نتیجه گیری

صحت سنجی نتایج بدست آمده از برآورد تبخیر - تعرق واقعی پسته با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبال در مقایسه با اطلاعات مطالعات لایسیمتری نشان داد که مقدار خطای الگوریتم سبال در برآورد تبخیر - تعرق پسته در مراحل اولیه زیاد بوده و به مرور کاهش داشته است. الگوریتم سبال قادر بوده است که با دقت حدود ۲۰ درصد (۰/۶ میلیمتر بر روز) و مشابه با سایر تحقیقات،

منابع مورد استفاده

- آمارنامه کشاورزی ایران سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶، محصولات باغی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، معاونت امور برنامه‌ریزی و اقتصادی، وزارت جهاد کشاورزی، ایران، <https://maj.ir>
- باقری هارونی، م.ح.، ارشد، ص.، مجنون، ا. و مرید، س. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های سنجش از دور تک منبعی و دومنبعی شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز. سنجش از دور و GIS ایران. ۴(۱): ۸۱-۹۶.
- ثنایی نژاد، س.ح.، نوری، س. و هاشمی نیا، س.م. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵(۳): ۵۴۰-۵۴۷.
- خلاصه وضعیت آب‌های زیرزمینی، ۱۳۹۲، وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب، معاونت پژوهش و مطالعات پایه منابع آب، دفتر مطالعات منابع آب استان کرمان.
- دستورانی، م.ت.، پورمحمدی، س. و رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۱. تخمین تبخیر- تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۱): ۱-۱۲.
- دلگرم، س.، رحیم پور، م.، بختیاری، ب. و سیاری، ن. ۱۳۹۴. مقایسه تبخیر - تعرق واقعی حاصل از داده‌های لایسیمیتری و الگوریتم SEBAL در دشت کرمان، با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS، مجله تحقیقات آب و خاک تهران، ۵۳(۱): ۳۶-۵۳.
- رائینی سرجاز، م.، پیری، ه.، غلامی، م.ع. و خزاعی، س. ۱۳۹۷. برآورد تبخیر تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و الگوریتم سبال (مطالعه موردیک دشت ناز - ساری). نشریه هواشناسی کشاورزی. ۶(۱): ۱-۸.
- علی‌اکبری، ا. و زند پارسا، ش. ۱۳۹۶. تأثیر سطوح مختلف آب آبیاری بر رشد و عملکرد درخت پسته در شهرستان انار استان کرمان. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۳): ۱۲۳-۱۳۶.
- عبداللهی عزت آبادی، م. و محمدی محمد آبادی، ا. ۱۳۹۳. بررسی اقتصادی نسبت بهینه اقتصادی آب به زمین در مناطق پسته‌کاری شهرستان‌های انار و رفسنجان. گزارش نهایی مؤسسه تحقیقات پسته کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی.
- فرشی، ع.، شریعتی، م.، جاراللهی، ر.، قائمی، م.، شهابی، ف. و تولایی، م. ۱۳۷۶. برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی، جلد دوم - گیاهان باغی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور. نشر آموزش کشاورزی، ۶۳۰ صفحه.
- کوهی، ن. ۱۳۹۵. ارزیابی سامانه‌های اجرا شده زیر سطحی در باغات پسته استان کرمان (منطقه سیرجان). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان. وزارت جهاد کشاورزی.
- محمدی محمد آبادی، ا.، حسینی فرد، س.ج. و صدقاتی، ن. ۱۳۸۷. اثرات تغییر سیستم آبیاری از روش سنتی (غرقابی) به زیرسطحی (تراوا) بر درختان بارور پسته. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه اصفهان. ۱۲(۴۳): ۴۶-۲۹.
- موذن پور کرمانی، م.، محمدی محمد آبادی، ا.، آزاد، ا.، مهدیزاده، س. و محمدی، ن. ۱۳۸۶. تعیین تبخیر و تعرق گیاه پسته. گزارش نهایی مؤسسه تحقیقات پسته کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی.
- Ahmad, M.U.D., Turrall, H. and Nazeer, A., 2009. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. *Agricultural water management*, 96(4): 551-564.
- Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W. and Gieske, A., 2007. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agricultural water management*, 88(1-3): 99-109.
- Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R.S., 2002. *Surface Energy Balance Algorithm for Land: advanced training and users manual*. Idaho:[sn].

- Bastiaanssen, W.G., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*, 229(1-2): 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P. and 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.
- Carbonell-Barrachina, Á.A., Memmi, H., Noguera-Artiaga, L., Gijón-López, M.D.C., Ciapa, R. and Pérez-López, D., 2015. Quality attributes of pistachio nuts as affected by rootstock and deficit irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(14): 2866-2873.
- Costa, J.D.O., Coelho, R.D., Wolff, W., José, J.V., Folegatti, M.V. and Ferraz, S.F.D.B., 2019. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. *Scientia Agricola*, 76(2): 93-101.
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H. and Khabba, S., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1): 1-27.
- Gijón, M., Gimenez, C., Perez-López, D., Guerrero, J., Couceiro, J.F. and Moriana, A., 2011. Water relations of pistachio (*Pistacia vera* L.) as affected by phenological stages and water regimes. *Scientia horticulturae*, 128(4): 415-422.
- Goldhamer, D. A., 1995. Irrigation management. *Pistachio Production*, 71-81.
- Goldhamer, D.A., 2005. Tree water requirements and regulated deficit irrigation. *Pistachio production manual*, 4: 103-116.
- Goldhamer, D. and Beede, R., 2004. Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(4): 538-545.
- Goldhamer, D.A., Phene, B.C., Beede, R., Sherlin, L., Mahan, S. and Rose, D., 1986. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance. *California Pistachio Industry Annual Report*, 87(1987): 61-66.
- Iniesta, F., Testi, L., Goldhamer, D.A. and Fereres, E., 2008. Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.). *agricultural water management*, 95(7): 877-886.
- Jia, Z., Liu, S., Xu, Z., Chen, Y. and Zhu, M., 2012. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D13).
- Jin, N., Ren, W., Tao, B., He, L., Ren, Q., Li, S. and Yu, Q., 2018. Effects of water stress on water use efficiency of irrigated and rainfed wheat in the Loess Plateau, China. *Science of the total environment*, 642: 1-11.
- Jin, Y., He, R., Marino, G., Whiting, M., Kent, E., Sanden, B.L., Culumber, M., Ferguson, L., Little, C., Grattan, S. and Lajos, L.O., 2018. Spatially variable evapotranspiration over salt affected pistachio orchards analyzed with satellite remote sensing estimates. *Agricultural and forest meteorology*, 262: 178-191.
- Kanber, R., Yazar, A., Önder, S. and Köksal, H., 1993. Irrigation response of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Irrigation Science*, 14(1): 7-14.
- Kiptala, J.K., Mohamed, Y., Mul, M.L. and Zaag, P., 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research*, 49(12): 8495-8510.
- Mahmoud, S.H. and Alazba, A.A., 2016. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 269-283.
- Memmi, H., Gijón, M.C., Couceiro, J.F. and Pérez-López, D., 2016. Water stress thresholds for regulated deficit irrigation in pistachio trees: Rootstock influence and effects on yield quality. *Agricultural Water Management*, 164: 58-72.
- Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D. and Liu, Z., 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4): 1086-1092.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L., 2003, September. US Validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. In 2003 ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions (Vol. 17).
- Teixeira, A.D.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M. and Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *agricultural and forest meteorology*, 149(3-4): 462-476.
- USDA. 2017. California agricultural statistics reviews 2016 crop year.

- Usman, M., Liedl, R. and Shahid, M.A., 2014. Managing irrigation water by yield and water productivity assessment of a rice-wheat system using remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(7): 04014022.
- Zhang, T., Peng, J., Liang, W., Yang, Y. and Liu, Y., 2016. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000–2010. *Science of the Total Environment*, 565: 105-122.



Evaluation of the different levels of water supply in pistachio gardens using SEBAL algorithm (The case study of Sirjan Plain)

Alireza Badiehneshin¹, Masoud Parsinejad², and Hamideh Noory^{3*}

- 1) Ph.D Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 2) Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 3) Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

* Corresponding author: hnoory@ut.ac.ir

Received: 01-06-2019

Accepted: 02-10-2019

Abstract

Regarding the development trend of pistachio gardens in many provinces and the severe shortage of water resources in these areas, the supply of water requirement of pistachio is not feasible. In order to optimize management in water shortage conditions, it is necessary to evaluate the different levels of water supply during pistachio growth stages. The purpose of this study is determine the water supply status at different stages of pistachio growth using satellite images and SEBAL algorithm in Sirjan Plain. The actual evapotranspiration of pistachios was estimated using the SEBAL algorithm and Landsat 8 images. The result of this model was validated with Landsat 7 images. This model could calculate actual evapotranspiration of pistachio the same as other research with 20% error (0.6 mm/day). The results showed that supply of water in the third stage of growth (at the peak consumption) due to increased pistachio water requirement, insufficient water supply led to 30% deficit irrigation in Sirjan plain. In order to better irrigation management, production can be increased by reducing irrigation in the second stage and increasing irrigation in the third stage. The rate of deficit irrigation in the Sirjan Plain was 17% and it was in the tolerable threshold for the pistachio. The results show that the pistachio tree is resistant to deficit irrigation (up to 26%) in low salinity levels. In high water salinity (4000 $\mu\text{mho} / \text{cm}$), the effect of deficit irrigation and salinity is combined and pistachio production is rapidly reduced due to deficit irrigation.

Keywords: Actual evapotranspiration; Deficit irrigation; Pistachio; Salinity