



پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی آب گرایش آبیاری و زهکشی

استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (SEBAL) برای
تخمین تبخیر - تعرق پسته (مطالعه موردی: اردکان)

استادان راهنما:

دکتر محمدرضا نوری امامزاده‌ئی

دکتر سیدحسن طباطبائی

استادان مشاور:

دکتر صالح تقوائیان

دکتر محمدحسین مختاری

پژوهش‌گر:

محمدحسن رحیمیان

شهریور ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه شهر کرد است.

تشکر و قدردانی:

سپاس خدای را که به من توفیق داد تا بتوانم وارد عرصه تحصیلات تکمیلی بشوم و در این مقطع ادامه تحصیل نمایم. بی‌شک تحصیل علم و دانش که توصیه بزرگان‌مان نیز هست، همان نعمتی است که خداوند عطا فرموده و از این منظر، همیشه باید شاکر ذات حق بود. اما همیشه در راستای نیل به هدف، وسایل و اسبابی نیز بوده است که در هموارکردن مسیر پیشرفت نقش موثری دارند. دور از انصاف خواهد بود، اگر اولین مراتب تشکر و قدردانی خود را از مرکز ملی تحقیقات شوری اعلام ندارم؛ این مرکز زمینه و عرصه برای ادامه تحصیل و ارتقاء اینجانب به عنوان عضو کوچکی از جامعه تحقیقات شوری کشور را فراهم نمود و از این بابت، قدردان مرکز و به‌ویژه رئیس محترم آن "جناب آقای دکتر روستا" بوده و خواهم بود. جای دارد که مراتب تشکر و قدردانی خود از سایر همکاران عزیزم (اعضای هیئت علمی، کارشناسان و پرسنل اداری) که در طول مدت تحصیل اینجانب، خلاء کاری‌ام در مرکز ملی تحقیقات شوری را پر نمودند، تشکر نمایم. "آقای دکتر مشکوه، آقای مهندس هاشمی‌نژاد، آقای مهندس بناکار، آقای مهندس رنجبر، آقای مهندس بابائی، آقای مهندس قائمی‌نیا، آقای مهندس نشاط، آقای مهندس سنایی، آقای مهندس شیران، سرکارخانم مهندس بشارت، سرکار خانم عزت‌پناه، آقای سیدجلیل هاشمی‌نسب و آقای محمدعلی مروتی" از افرادی بودند که در بدو یا در طول مدت تحصیل و در انجام همزمان امورات جاری مرکز و انجام پایان‌نامه، اینجانب را راهنمایی، همکاری و همدلی نموده‌اند که جای سپاس فراوان دارد. همچنین از تجارب و راهنمایی‌های ارزنده "آقایان مهندس میراب‌زاده، مهندس فتوحی و مهندس اسدیان" که در ایستگاه تحقیقات پسته اردکان فعالیت دارند، استفاده بردم و بسیار متشکرم. همکاری صمیمانه باغداران پسته منطقه اسیل‌آباد (آقای احمد طالعی، آقای محمد افخمی و دیگران) نیز جای تقدیر و تشکر دارد و هرگز فراموش نخواهد شد. اما بی‌تردید، انجام این پایان‌نامه جز در سایه راهنمایی‌ها و نظرات ارزنده اعضای پایان‌نامه میسر نبود و لذا، بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی ویژه خود از اساتید محترم راهنما "آقای دکتر نوری و آقای دکتر طباطبائی"، اساتید محترم مشاور "آقای دکتر تقواییان و آقای دکتر مختاری" و اساتید محترم داور "آقای دکتر نادری و آقای دکتر قبادی‌نیا" را اعلام می‌دارم؛ برخی به من درس منش و نگاه به مسایل داده‌اند، برخی درس سخت‌کوشی و تلاش تا رسیدن به هدف و برخی هم درس علم. سعی می‌کنم درس‌هایی که به من داده‌اید را از یاد نبرم و قدردان زحماتتان باشم. همچنین از همسر و خانواده‌ام که در طول مدت تحصیل در شهرکرد، سختی‌های زیادی را تحمل نموده‌اند، عذرخواهی نموده و شرمندگی ایشان هستم. امیدوارم که بتوانم در آینده جبران زحمات بی‌دریغ‌تان را بنمایم و باعث سربلندی و افتخارتان باشم. در انتها نیز از تمامی دوستان، همکاران و اساتید گرامی که شاید نامشان در این فهرست از قلم افتاده است، ولی در طول مدت تحصیل و در پیش‌برد این پژوهش یاری‌ام داده‌اند، سپاسگزارم و از صمیم قلب بهترین‌ها را برایشان آرزو می‌کنم.

محمدحسن رحیمیان

شهریور ۱۳۹۲

"پدر، مادر و همسر"

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول - کلیات.....	۱۰
۱-۱ مقدمه.....	۱۰
۲-۱ ضرورت اجرای پژوهش.....	۱۳
۳-۱ اهداف پژوهش.....	۱۵
۴-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه.....	۱۵
فصل دوم - بررسی منابع.....	۱۶
۱-۲ مقدمه.....	۱۶
۲-۲ تبخیر - تعرق.....	۱۶
۳-۲ سبال در ایران.....	۱۹
۴-۲ پایش شوری خاک.....	۲۱
۵-۲ نیاز آبخوبی و کسر آبخوبی.....	۲۲
فصل سوم - مواد و روش‌ها.....	۲۴
۱-۳ مقدمه.....	۲۴
۲-۳ منطقه مطالعاتی.....	۲۴
۱-۲-۳ موقعیت جغرافیایی.....	۲۴
۲-۲-۳ منابع آب و خاک.....	۲۶
۳-۲-۳ مدیریت حاکم بر باغ‌های پسته مورد مطالعه.....	۲۷
۴-۲-۳ چرخه نمو پسته در منطقه مطالعاتی.....	۲۸
۳-۳ روش اجرا.....	۲۸
۱-۳-۳ زمان‌بندی اجرای پژوهش.....	۲۹
۲-۳-۳ نصب لوله‌های TDR و قرائت روزانه رطوبت خاک.....	۳۲
۳-۳-۳ ساخت و نصب تعیین‌گر جبهه رطوبتی (WFD) و تعیین EC_{dw}	۳۳
۴-۳-۳ پایش شوری خاک توسط هدایت‌گر الکترومغناطیس (EM_{38}).....	۳۵
۵-۳-۳ نمونه‌برداری از خاک منطقه مطالعاتی.....	۳۸
۶-۳-۳ تعیین عمق آب آبیاری (I) در منطقه مطالعاتی.....	۳۸
۷-۳-۳ تعیین و ارزیابی کسر آبخوبی (LF).....	۳۹
۸-۳-۳ تعیین متوسط نفوذ عمقی (DP).....	۳۹
۹-۳-۳ تخمین عمق موثر ریشه پسته (D_{rz}).....	۴۱
۱۰-۳-۳ آماده‌سازی داده‌های هواشناسی مورد نیاز.....	۴۳
۱۱-۳-۳ محاسبه تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) و پتانسیل پسته (ET_c).....	۴۴
۱۲-۳-۳ داده‌های ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها.....	۴۴
۱۳-۳-۳ محاسبه تبخیر - تعرق واقعی روزانه پسته به کمک سبال.....	۴۶
۱۴-۳-۳ کوچک‌مقیاس‌سازی (Downscaling) نتایج سبال.....	۵۱

۵۲.....	۳-۳-۱۵ تعمیم نتایج سبال به سایر روزهای سال
۵۳.....	۳-۳-۱۶ ارزیابینتایج سبال
۵۵.....	فصل چهارم - نتایج و بحث
۵۵.....	۱-۴ مقدمه
۵۵.....	۲-۴ خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی و نقشه‌های مربوطه
۶۱.....	۳-۴ کسر آبشویی (LF) در منطقه مطالعاتی
۶۶.....	۴-۴ تغییرات روزانه رطوبت خاک
۷۲.....	۵-۴ تغییرات تبخیر - تعرق مرجع (ET_o) و پتانسیل پسته (ET_c)
۷۳.....	۶-۴ تبخیر - تعرق واقعی پسته (ET_a)
۷۶.....	۷-۴ ارزیابی نتایجسبال
۷۶.....	۱-۷-۴ در مقیاس ناحیه ریشه
۷۷.....	۲-۷-۴ در مقیاس منطقه‌ای
۷۹.....	۸-۴ نتیجه‌گیری
۸۰.....	۹-۴ پیشنهادات
۸۱.....	پیوست ۱
۸۹.....	پیوست ۲
۹۳.....	پیوست ۳: بررسی آماری داده‌های تعیین‌گر جبهه رطوبتی
۹۹.....	پیوست ۴: آزمون معنی‌داری مربوط به دقت دستگاه WFD
۱۰۰.....	پیوست ۵
۱۰۴.....	فهرست منابع

فهرست شکل‌ها

شماره صفحه	عنوان
۱۱.....	شکل ۱-۱ نقشه بازسازی شده توزیع مکانی گونه‌های بومی پسته در ایران.....
۲۵.....	شکل ۱-۳ نقشه باغ‌های پسته اردکان و موقعیت قرارگیری آن در دشت یزد-اردکان.....
۲۶.....	شکل ۲-۳ تصویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی و موقعیت قرارگیری آن در باغ‌های پسته اردکان.....
۲۷.....	شکل ۳-۳ تصویری شماتیک از نظام آبیاری در منطقه مطالعاتی.....
۳۰.....	شکل ۴-۳ روندنمای پژوهش.....
۳۲.....	شکل ۵-۳ نحوه توزیع میدان الکتریکی و حجم موثر اندازه‌گیری توسط دستگاه TDR.....
۳۳.....	شکل ۶-۳ موقعیت نصب لوله‌های دسترسی برای انجام قرائت‌های رطوبت توسط TDR.....
۳۳.....	شکل ۷-۳ تصاویری از لوله دسترسی و پروب دستگاه TDR مدل TRIME-T3.....
۳۴.....	شکل ۸-۳ نمونه اصلی و طراحی شده دستگاه تعیین‌گر جبهه رطوبتی.....
۳۵.....	شکل ۹-۳ موقعیت نصب WFD برای تعیین کسر آبشویی در منطقه مطالعاتی.....
۳۵.....	شکل ۱۰-۳ نحوه استخراج زه‌آب جمع شده در مخزن WFD.....
۳۶.....	شکل ۱۱-۳ هدایت‌گر الکترومغناطیس (EM_{38}) برای تعیین شوری خاک.....
۳۶.....	شکل ۱۲-۳ اساس کار دستگاه EM_{38}
۳۷.....	شکل ۱۳-۳ نحوه استفاده از EM_{38} در وضعیت‌های مختلف قرارگیری روی زمین.....
۳۸.....	شکل ۱۴-۳ موقعیت مکانی نقاط سنجش شوری خاک بوسیله EM_{38}
۴۰.....	شکل ۱۵-۳ روندنمای تعیین کسر آبشویی در منطقه مطالعاتی.....
۴۰.....	شکل ۱۶-۳ برازش منحنی بر عامل غلظت (X) و کسر آبشویی (LF).....
۴۱.....	شکل ۱۷-۳ تغییرات تبخیر و تعرق تجمعی در هر یک از اعماق ریشه گیاه.....
۴۲.....	شکل ۱۸-۳ روندنمای تعیین عمق موثر ریشه پسته (D_{r2}) در منطقه مطالعاتی.....
۴۳.....	شکل ۱۹-۳ موقعیت نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک به منطقه مطالعاتی.....
۴۴.....	شکل ۲۰-۳ تغییرات ضرایب گیاهی پسته (KC) در مراحل مختلف نمو.....
۴۷.....	شکل ۲۱-۳ جایگاه سبال در معادله بیلان انرژی.....
۴۹.....	شکل ۲۲-۳ مراحل محاسبه شار گرمای محسوس (H).....
۵۱.....	شکل ۲۳-۳ اهمیت قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مطالعاتی.....
۵۲.....	شکل ۲۴-۳ نقشه نسبت تبخیر و تعرق (R_{ET}) برای کوچک‌مقیاس‌سازی نتایج سبال.....
۵۶.....	شکل ۱-۴ نقشه‌های جرم مخصوص ظاهری خاک.....
۵۸.....	شکل ۲-۴ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده جرم مخصوص ظاهری خاک.....
۵۹.....	شکل ۳-۴ ضریب تغییرات مکانی جرم مخصوص ظاهری خاک در اعماق مختلف.....
۶۱.....	شکل ۴-۴ نقشه‌های درصد رطوبت حجمی و درصد رطوبت اشباع خاک.....
۶۲.....	شکل ۵-۴ ارتباط بین شوری آب زه‌کشی شده از ناحیه ریشه و غلظت عناصر سدیم و کلر.....
۶۳.....	شکل ۶-۴ مقایسه شوری خاک مشاهداتی و پیش‌بینی شده.....
۶۴.....	شکل ۷-۴ رابطه هدایت الکتریکی آب زه‌کشی شده و متوسط شوری خاک ناحیه ریشه (EC_e).....
۶۵.....	شکل ۸-۴ توزیع متوسط شوری (الف) و کلاسه‌بندی مقادیر کسر آبشویی.....
۶۶.....	شکل ۹-۴ کلاسه‌بندی کسر آبشویی با احتمال تأمین نیاز آبشویی پسته.....

- شکل ۴-۱۰ نمودار واسنجی قرائت‌های TDR..... ۶۷
- شکل ۴-۱۱ تغییرات رطوبت خاک در تعدادی از نقاط پایش رطوبت..... ۶۸
- شکل ۴-۱۲ تغییرات رطوبت لایه ۰-۱۲۰ سانتی‌متری خاک..... ۶۹
- شکل ۴-۱۳ تغییرات روزانه رطوبت و انحراف معیار رطوبت روزانه خاک..... ۷۰
- شکل ۴-۱۴ نقشه‌های پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST)..... ۷۱
- شکل ۴-۱۵ تبخیر و تعرق مرجع روزانه و تجمعی در منطقه مطالعاتی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۶ تبخیر و تعرق پسته (روزانه و تجمعی) در منطقه مطالعاتی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۷ میانگین تبخیر و تعرق واقعی پسته (ET_a) در روزهای مختلف از فصل رشد..... ۷۳
- شکل ۴-۱۸ نقشه‌های تبخیر و تعرق واقعی در روزهای مختلف از نمو پسته..... ۷۴
- شکل ۴-۱۹ نقشه تبخیر و تعرق واقعی تجمعی باغ‌های پسته در سال ۱۳۹۱..... ۷۵
- شکل ۴-۲۰ توزیع فراوانی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی باغ‌های پسته در سال ۱۳۹۱..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱ مقایسه تبخیر و تعرق واقعی به‌دست آمده توسط سبال و TDR..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲ تصویر شماتیک از تغییرات کسر آبشویی، شوری آب خاک و تبخیر و تعرق..... ۷۸

فهرست جدول‌ها

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۱ راهنمای عمومی آبیاری باغ‌های پسته بر اساس روش آبیاری	۱۳
جدول ۲-۱ مقایسه نتایج استخراج شده از مدل‌ها و مراجع موجود در زمینه تبخیر و تعرق پسته	۱۳
جدول ۱-۲ مناطق استفاده کننده از سبال در عرصه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی	۱۹
جدول ۲-۲ تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه سبال در ایران	۲۰
جدول ۳-۲ چالش‌های عمده پیش‌روی توسعه سبال در کشور و راهکارهای پیشنهادی	۲۱
جدول ۱-۳ خصوصیات شیمیایی آب آبیاری در منطقه مطالعاتی	۲۶
جدول ۲-۳ مراحل مختلف نمو پسته در منطقه مطالعاتی	۲۸
جدول ۳-۳ زمان‌بندی و نوع فعالیت انجام شده در پژوهش	۳۱
جدول ۴-۳ خصوصیات باندهای سنجنده مودیس	۴۵
جدول ۵-۳ مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش	۴۵
جدول ۶-۳ ضریب‌های تبدیل (Reflectance_scale) باندهای انعکاسی	۴۶
جدول ۷-۳ مشخصات تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده برای کوچک‌مقیاس‌سازی	۵۲
جدول ۱-۴ خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی در اعماق مختلف	۵۵
جدول ۲-۴ ماتریس ضرایب همبستگی (r) بین خصوصیات خاک و قرائت‌های EM ₃₈	۵۷
جدول ۳-۴ معادله‌های تعیین رطوبت حجمی خاک به کمک قرائت‌های EM ₃₈	۶۰
جدول ۴-۴ خصوصیات شیمیایی زه‌آب جمع آوری شده توسط WFD در منطقه مطالعاتی	۶۲
جدول ۵-۴ دمای سطحی (LST) و پوشش گیاهی (NDVI) پسته در تاریخ‌های مختلف	۷۰
جدول ۶-۴ اجزای معادله بیلان آب در منطقه مطالعاتی (میلی‌متر در سال)	۷۸

فصل اول

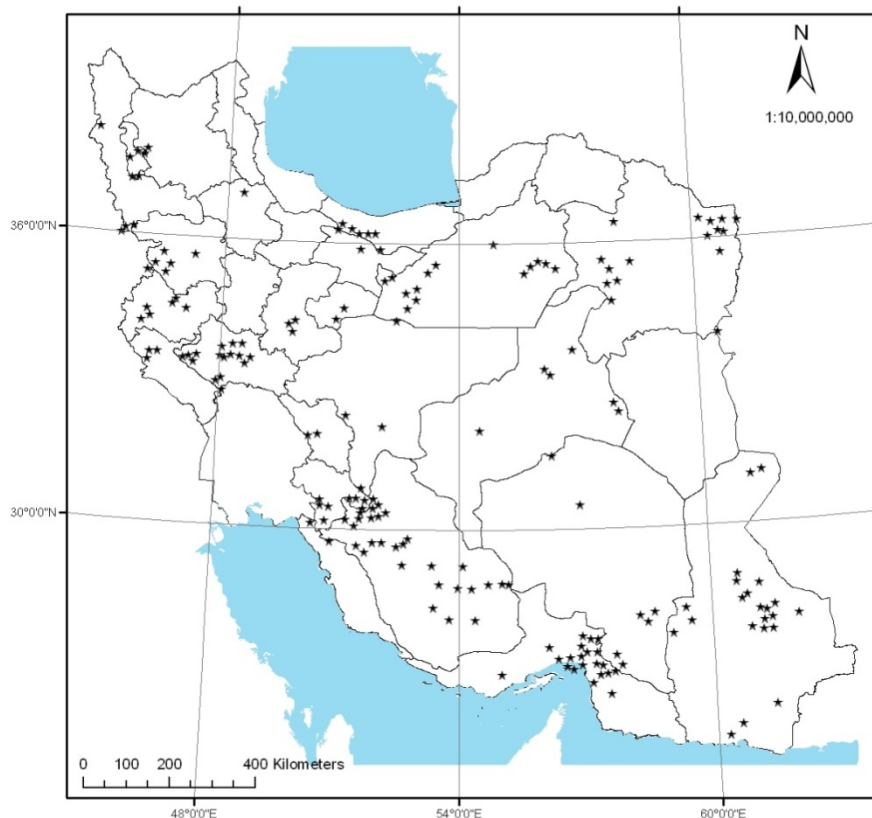
کلیات

۱-۱ مقدمه

پسته صرف نظر از اهمیت غذایی و جایگاه برتر تجاری آن در بین محصولات باغی، تداعی کننده واژه سازگاری در شرایط نامساعد محیطی و مقاومت به تنش های مختلف از جمله خشکی و شوری در ذهن افراد است. در کشورمان اصطلاح های بومی بودن، قدمت و اصالت را نیز باید به این واژه ها افزود. پسته از خانواده *Anacardiaceae* و دارای تعداد زیادی جنس است. مهمترین جنس پسته *Pistacia* است که بیش از ۶۰ گونه آن در ایران شناسایی شده است. از این بین گونه های *P. vera* (پسته اهلی) و *P. Khinjuk* (بنه کوهی) دارای میوه های خوراکی و با ارزش اقتصادی بوده و از سایر گونه ها بیشتر به عنوان پایه (Rootstock) درختان پسته اهلی استفاده می شود. استان های کرمان، یزد، خراسان، فارس، سمنان، قزوین، مرکزی، اصفهان، قم، سیستان و بلوچستان به عنوان جایگاه اصلی پسته در کشور شناخته می شوند. شکل ۱-۱ نشان دهنده توزیع مکانی گونه های بومی و عمده پسته ایران شامل *P. Khinjuk*، *P. Vera* و زیرگونه های *Curdica* و *Mutica*، *Cbulica* است (بهبودی، ۲۰۰۲).

آمار و ارقام ارایه شده توسط پایگاه اطلاعات اینترنتی فائو (<http://www.fao.org>) در مورد پسته حاوی نکات قابل توجهی است. بر این اساس و در سال ۱۹۶۱، به عنوان اولین سالی که اقدام به ثبت و ذخیره سازی اطلاعات کشاورزی شده است، کشور ایران با تولید ۶ هزار تن محصول پسته در صدر جدول تولیدکنندگان پسته جهان قرار داشته است. در این سال کشورهایی مانند ترکیه، چین، ایتالیا، سوریه و یونان نیز در زمره تولیدکنندگان پسته محسوب می شده اند، اما مهم ترین رقیب های ایران از نظر سهم تولید جهانی، کشورهای ترکیه و چین بوده اند. سپس کشورهای تونس، اردن، آمریکا، قبرس، پاکستان، مکزیک، ماداگاسکار، موریتانی، ازبکستان و قرقیزستان نیز به ترتیب نام خود را به عنوان تولیدکنندگان پسته دنیا ثبت کرده اند. آخرین آمارها حاکی از آن است که سهم کشورهای ایران، آمریکا، سوریه، ترکیه و چین در

تولید پسته جهان از سایر کشورها بیشتر بوده که عموماً در مقاوم‌های اول تا پنجم از نظر تولید جهانی جای گرفته اند. این آمار و ارقام اهمیت و نقش ایران در تولید این فرآورده غیرنفتی با ارزش در عرصه جهانی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ نقشه بازسازی شده توزیع مکانی گونه‌های بومی پسته در ایران (به نقل از بهبودی، ۲۰۰۲)

از طرفی دیگر بر اساس آمار ارایه شده توسط فائو، محصول پسته تولید شده ایران در سال ۲۰۰۵ میلادی برابر با ۱۹۰ هزارتن و با ارزش اقتصادی بیش از ۶۲۰ میلیون دلار بوده که در بین تولیدات و فرآورده‌های کشاورزی داخلی این کشور، جایگاه دهم را به خود اختصاص داده است. بنابراین اگرچه پسته جایگاه برتری از نظر سطح زیرکشت و تولید در بین محصولات کشاورزی داخلی ندارد، اما ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده پسته جهان است که این مساله استعدادهای بالقوه و بالفعل بسیار بالای این کشور در کشت و توسعه این گیاه ارزشمند را نشان می‌دهد. با توجه به وجود استعدادهای مذکور در کشور و به منظور بهره‌برداری حداکثر از این استعدادهای، ضرورت دارد که دستاوردهای علمی، معتبر و تخصصی موجود در زمینه پسته در اختیار تولیدکنندگان این محصول گذاشته شود تا علاوه بر آشنایی بیشتر پسته‌کاران با این دستاوردها و افزایش دانش آن‌ها، زمینه برای انجام اقدامات مدیریتی مناسب‌تر برای ارتقاء کیفی و کمی این محصول تجاری و استراتژیک در کشورمان فراهم گردد. خوشبختانه تا کنون مقالات و نوشته‌های علمی زیادی در اکثر موضوع‌های مرتبط با پسته وجود دارد که می‌توان به موضوع آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز پسته، مسایل باغبانی آن به‌ویژه تکثیر، پیوند، هرس، شخم و کود، روش‌های مناسب برداشت، انبارداری و بازاریابی، نیاز آبی، روش‌های آبیاری و نیز روش‌های افزایش بهره‌وری از آبدار باغ‌های پسته‌شماره نمود. تبخیر -

تعرق (Evapotranspiration, ET) یکی از این موضوع‌های مهم و اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، طراحی انواع سیستم‌های آبیاری، ارزیابی پروژه‌های آبیاری و زه‌کشی و همچنین یکی از اجزای معادله بیلان آب در مقیاس‌های مختلف (ملی، حوضه آبخیز، دشت، مزرعه و ناحیه ریشه گیاه) محسوب می‌گردد. با در نظر گرفتن انواع مختلف آن (تبخیر - تعرق مرجع، پتانسیل و واقعی)، روش‌های تعیین آن‌ها نیز متفاوت است؛ به‌طوری‌که تبخیر - تعرق مرجع (Reference ET, ET_0) از طریق فرمول‌های فیزیکی و تجربی، تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه (Crop ET, ET_c) به کمک ضریب گیاهی (K_c) و رابطه $ET_c = K_c * ET_0$ و تبخیر - تعرق واقعی (Actual ET, ET_a) از طریق لایسی‌متر، پایش مستمر رطوبت خاک ناحیه ریشه و یا توازن انرژی (Energy Balance) تعیین می‌شود. استفاده از توازن انرژی برای تعیین ET_a یکی از جالب‌ترین این روش‌هاست که به‌طور عمده در تلفیق با سنجش از دور ماهواره‌ای (Satellite Remote Sensing) انجام می‌شود. این روش ضمن صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های تعیین ET_a ، کمک زیادی به پهنه‌بندی تبخیر - تعرق واقعی در هر منطقه و مدیریت مکانی آب به عنوان بارزترین نهاد کشاورزی می‌کند. پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۱ و در باغ‌های پسته اردکان استان یزد انجام شده و از الگوریتم توازن انرژی سبال (Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL) و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس (MODIS) برای تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در شرایط تنش شوری استفاده گردیده است. این الگوریتم اقدام به حل معادله بیلان انرژی می‌کند که در آن تبخیر - تعرق واقعی (یا شار گرمای نهان، LE) به عنوان بخش باقی‌مانده اختلاف بین تشعشع خالص ورودی به سطح زمین (R_n) و شار گرمای محسوس خارج شده از سطح زمین (H) و نیز شار گرمایی ورودی به زمین (G) قابل محاسبه است.

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

تمامی پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند و توضیحات بیشتر در مورد آن‌ها در فصل سوم آورده شده است. نکته حایز اهمیت در این زمینه این است که اندازه‌گیری دقیق اجزای معادله بیلان انرژی از طریق نصب برج‌های تعیین شار ورودی و خروجی به زمین و اتمسفر (Fluxnet Towers) امکان‌پذیر است. اما در حال حاضر حدود ۱۴۰ برج فعال در دنیا وجود دارد (بلدوچی و همکاران، ۲۰۰۱) و به‌دلیل وجود تنوع وسیع در اقلیم، خاک و گیاه در سطح زمین، نمی‌توان نتایج حاصله از این برج‌ها را به تمامی نقاط سطح زمین تعمیم داد. اما همانطوری که اشاره شد، یکی دیگر از روش‌هایی که می‌تواند در تعیین اجزای مختلف معادله بیلان انرژی مورد استفاده قرار گیرد، سنجش از دور است. سنجش از دور یا توانایی اندازه‌گیری خصوصیات یک شیء بدون تماس مستقیم با آن، از جمله روش‌هایی است که می‌تواند با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن، بیشترین اطلاعات را در این زمینه در اختیار کاربران آن قرار دهد. این کار به کمک باندهای مرئی، مادون قرمز و حرارتی ثبت شده توسط ماهواره و یا هواپیما برای سطح مشخصی از یک مزرعه، پروژه بزرگ آبیاری، دشت، حوضه آبخیز و یا کشور امکان‌پذیر است. روش مذکور تا کنون کمک زیادی به برنامه‌ریزان و دست‌اندرکاران مدیریت منابع آب در نقاط مختلف دنیا نموده است و در پژوهش حاضر نیز سعی بر استفاده از این روش برای تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در شرایط شور و ارزیابی نتایج آن می‌باشد. ارزیابی نتایج از طریق پایش روزانه رطوبت خاک منطقه ریشه با روش انعکاس‌سنجی بازه زمانی (Time Domain Reflectometry, TDR)، تعیین کل حجم آب ورودی به منطقه مطالعاتی در طی یک سال آبی و همچنین استفاده تلفیقی از ابزارهای تعیین‌گر جبهه رطوبتی (Wetting Front Detector, WFD) و هدایت‌گر الکترومغناطیس (ElectroMagnetic induction, EM₃₈) صورت گرفته است که در فصول بعد به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۱-۲ ضرورت اجرای پژوهش

همان طوری که اشاره شد، استان یزد یکی از استان‌های پسته‌خیز کشور است. این گیاه به دلیل آستانه تحمل مناسب به شوری و خشکی، سطح وسیعی را در بین محصولات باغی استان یزد به خود اختصاص داده است. در حال حاضر سطح زیرکشت پسته ایران بیش از ۳۶۰۰۰۰ هکتار می‌باشد که ۴۲۱۸۳ هکتار آن متعلق به استان یزد است (سازمان جهاد کشاورزی استان یزد، ۱۳۹۰). امروزه به دلیل کاهش چشم‌گیر منابع آبی و بروز خشکسالی‌های پی در پی در گستره وسیعی از این استان، ضرورت آبیاری اصولی باغ‌ها و همچنین استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار در این باغ‌ها بیش از پیش حس می‌شود. یکی از پارامترهای اساسی در طراحی سیستم‌های آبیاری، تبخیر - تعرق و نیازآبی (Irrigation Water Requirement) این گیاه است که دقت در تعیین آن‌ها می‌تواند به افزایش کفایت و کارآیی سیستم آبیاری کمک شایانی نماید. اگرچه در ارتباط با نیازآبی پسته تنها به توصیه‌های عمومی و بر اساس نوع سیستم آبیاری اکتفاء شده است (جدول ۱-۱)، اما در ارتباط با تبخیر - تعرق این گیاه در نقاط مختلف کشور مراجع و مستندات زیادی تهیه شده و در اختیار طراحان سیستم‌های آبیاری قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به فرشی و همکاران (۱۳۷۶)، مدل NETWAT (سازمان هواشناسی و وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۱)، مدل OPTIWAT (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۲) و مدل CROPWAT (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸) اشاره کرد. وجه مشترک این مدل‌ها روش محاسبه تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) است که فائو پنمن مانیتیت بوده است.

جدول ۱-۱ راهنمای عمومی آبیاری باغ‌های پسته بر اساس روش آبیاری

شیوه آبیاری	بافت خاک	شیب زمین %	دور آبیاری day	طول ردیف m	نیاز آبی سالانه m^3/ha	عمق هر آبیاری mm	جریان ورودی L/s
غرقابی (نواری)	سنگین	۰/۱-۰/۴	۳۵	۱۰۰-۱۵۰	حدود ۹۰۰۰	۲۰۰	۲-۴
غرقابی (نواری)	متوسط	۰/۱-۰/۸	۳۰	۵۰-۱۰۰	حدود ۹۰۰۰	۱۵۰	۳-۵
غرقابی (نواری)	سبک	۰/۱-۰/۸	۲۵	۳۰-۵۰	حدود ۹۰۰۰	۱۰۰	۵-۷
بابلر	از سبکتانگین	-	۲۵-۳۵	۳۰-۱۰۰	۶۵۰۰	۱۰۰-۲۰۰	-
قطره ای	از سبکتانگین	-	۱۰-۲۰	۳۰-۱۰۰	۴۰۰۰-۵۰۰۰	۱۰۰-۲۰۰	-

این مراجع در مواردی با آرایه اعداد و ارقام متفاوت برای تبخیر - تعرق پسته در یک منطقه خاص، مشکلاتی را برای طراحان سیستم‌های آبیاری تحت فشار ایجاد می‌نمایند. در برخی از مناطق کشور (نظیر دشت یزد-اردکان در استان یزد) اختلاف نتایج مدل‌های مذکور به بیش از سه برابر نیز می‌رسد (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲ مقایسه نتایج استخراج شده از مدل‌ها و مراجع موجود در زمینه تبخیر - تعرق پسته

(میلی‌متر) در دشت یزد-اردکان (به نقل از دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱)

مدل Optiwat	مدل Netwat	FAO Cropwat	فرشی و همکاران (۱۳۷۶)
۲۵۴۰	۱۲۷۴	۱۳۷۵	۷۷۱

یکی از دلایل عمده این تفاوت‌ها به ضریب گیاهی (K_c) استفاده شده در آن‌ها برمی‌گردد. به عنوان مثال حداکثر ضریب گیاهی استفاده شده در کتاب نیاز آبی گیاهان ۰/۶ است (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶). به همین دلیل تبخیر - تعرق کمتری نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد. این در حالی است که ضریب گیاهی توصیه شده توسط فائو در دوره میانی رشد پسته به ۱/۱۹ نیز می‌رسد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). یکی دیگر از دلایل این اختلاف‌ها، داده‌های استفاده شده برای محاسبه ET_0 است که از نظر زمانی با هم تفاوت دارند. لذا ضروت دارد که اعداد و ارقام ارائه شده توسط این مدل‌ها مورد بررسی و کنکاش بیشتری قرار گیرد و در نهایت مناسب‌ترین مقادیر برای تبخیر - تعرق و نیاز آبی این گیاه در هر منطقه توصیه شود. لازمه ارزیابی نتایج مدل‌های مذکور در یک منطقه خاص، اطلاع از تبخیر - تعرق واقعی پسته در آن منطقه است. تعیین و یا تخمین تبخیر - تعرق واقعی از موضوعاتی است که همواره مورد توجه محققین بوده و راه‌حل‌های متعددی نیز برای آن ارائه شده است. یکی از روش‌های تخمین تبخیر - تعرق گیاه در شرایط مزرعه‌ای، استفاده از معادله بیلان آب خاک (Soil Water Balance) در یک سطح مشخص از مزرعه است. در این روش تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های آب کنترل و اندازه‌گیری می‌شوند و بخش‌باقی‌مانده به عنوان مقدار تبخیر - تعرق محسوب می‌گردد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). روش دیگر برای اندازه‌گیری تبخیر - تعرق واقعی گیاه در مزرعه نصب لایسی‌متر است. این روش با تمامی نقاط قوت و ضعفش تا کنون به عنوان عمومی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش اندازه‌گیری تبخیر - تعرق واقعی در مزرعه مطرح بوده است. البته روش‌ها و پیشرفت‌هایی در زمینه تعیین تبخیر - تعرق گیاه در شرایط مزرعه معرفی و صورت گرفته که می‌توان به اندازه‌گیری مستقیم شار بخار آب خارج شده از باغ‌ها توسط ابزاری به نام ادی کواریانس (Eddy Covariance) اشاره نمود (ویلاوبوس و همکاران، ۲۰۰۰). یکی از محدودیت‌های روش اخیر این است که نیاز به باغ‌هایی با پوشش گیاهی یکنواخت و به نسبت بزرگ (حداقل ۲ یا ۳ هکتار) می‌باشد. یکی دیگر از روش‌هایی که در مورد درختان به کار رفته است اندازه‌گیری جریان شیره گیاهی با استفاده از روش بیلان حرارتی (ساکوراتانی، ۱۹۸۱) یا سنسورهای ایجاد پالس‌های حرارتی (کوهن و همکاران، ۱۹۸۱، کوهن و همکاران، ۲۰۰۱) است که در سال‌های اخیر استفاده شده و به صورت مستقیم میزان تعرق صورت گرفته از درخت را تخمین زده است. اگرچه استفاده از روش‌هایی نظیر ادی کواریانس یا نسبت بوون (Bowen Ratio) امکان تخمین تبخیر - تعرق واقعی باغ‌ها را به صورت مستقیم فراهم می‌آورد (تستی و همکاران، ۲۰۰۴)، اما به هر حال این روش‌ها هزینه و نیروی متخصص زیادی را به‌ویژه برای سطوح وسیع صرف می‌کنند. از این رو استفاده از روش‌های کم‌هزینه‌تر نظیر روش‌های سنجش از دور ماهواره‌ای از جمله گرایش‌های اخیر محقق‌ها در این زمینه بوده است. آن‌ها این روش را به عنوان سومین و جدیدترین راه‌حل برای محاسبه ET واقعی در مزرعه دانسته‌اند (آلن و همکاران، ۲۰۰۵؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۷؛ باستیان‌سن و همکاران، ۱۹۹۸؛ باستیان‌سن، ۲۰۰۰؛ باستیان‌سن و همکاران، ۲۰۰۵). الگوریتم‌هایی که با استفاده از اطلاعات سنجش از دور اقدام به محاسبه اجزای معادله بیلان انرژی کرده و سپس تبخیر - تعرق واقعی گیاهان را محاسبه می‌کنند متعدد هستند. در ایران نیز از این روش‌ها در چندین نقطه کشور استفاده و نتایجی کسب گردیده است که در فصل بعد به آن‌ها اشاره خواهد شد. پژوهش حاضر نیز به تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در منطقه اردکان استان یزد پرداخته که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم انرژی سبال (باستیان‌سن و همکاران، ۱۹۹۸) انجام شده است.

۱-۳ اهداف پژوهش

الف) استفاده از الگوریتم توازن انرژی سبالدر تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در شرایط تنش شوری
ب) ارزیابی نتایج سبال از طریق مراجع موجود و اندازه گیری های مزرعه ای

۱-۴ فصل بندی پایان نامه

این پژوهش مشتمل بر چهار فصل است که در فصل اول به پراکنش ارقام مختلف پسته در ایران، جایگاه آن در بین محصولات کشاورزی و اهمیت تعیین تبخیر - تعرق این گیاه در منطقه مطالعاتی اشاره دارد. در فصل دوم اقدام به بررسی منابع علمی داخلی و خارجی موجود در زمینه تحقیق شده است. فصل سوم به معرفی منطقه مطالعاتی و روش انجام پژوهش پرداخته است. در این فصل ضمن آشنایی با ابزارهایی نظیر تعیین گر جبهه رطوبتی (WFD) و هدایت گر الکترومغناطیس (EM₃₈)، به نحوه تلفیق آن ها با هدف تعیین کسر آبشویی اشاره شده است. نحوه استفاده از سبال در تعیین تبخیر - تعرق واقعی و ارزیابی نتایج آن توسط انعکاس سنجی بازه زمانی (TDR) از دیگر موضوعاتی است که در این فصل به آن پرداخته شده است. در فصل چهارم نتایج این پژوهش آورده شده و مورد بحث قرار گرفته است. نتایج به طور عمده در قالب نقشه های مختلف نظیر نقشه کسر آبشویی، نقشه شوری عصاره اشباع خاک، نقشه تبخیر - تعرق واقعی پسته و ... ارائه گردیده و مورد ارزیابی و بحث قرار گرفته است. در انتهای این فصل نتیجه گیری و سپس پیشنهادات لازم ارائه شده است.

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱ مقدمه

این پژوهش که با هدف استفاده و ارزیابی الگوریتم توازن انرژی سبال (SEBAL) در تعیین تبخیر - تعرق واقعی پسته در شرایط تنش شوری انجام گرفته است، مبتنی بر کاربرد سنجش از دور (RS)، انعکاس سنجی بازه زمانی (TDR)، هدایت گر الکترومغناطیس (EM₃₈) و تعیین گر جبهه رطوبتی (WFD) است. در این فصل برخی منابع علمی داخلی و خارجی موجود در زمینه‌های مذکور بررسی شده است.

۲-۲ تبخیر - تعرق

روش متداول در تعیین تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه در شرایط غیر تنش (Standard Condition) یا ET_c ، محاسبه تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) و ضرب گیاهی (K_c) است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ رایت، ۱۹۸۲؛ دورن‌باس و پرویت، ۱۹۷۷). این روش تا کنون در علوم مهندسی آبیاری به صورت موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته و می‌گیرد. علت این امر نیز سهولت تخمین ET_c با استفاده از داده‌های درازمدت هواشناسی و ضرایب گیاهی است (مکونین و همکاران، ۲۰۰۰). این روش اهمیت قابل توجهی در تخمین نیاز آبی گیاه در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری، تدوین تقویم آبیاری، انتخاب الگوی کشت، تعیین وسعت قابل کشت، تعیین گیاه مناسب برای کشت بعد از احداث کانال‌های آبیاری و تاسیسات انحراف آب دارد. اما در یک پروژه در حال اجرای آبیاری که سطح اراضی آن پوشیده از گیاهانیست که دارای مراحل رشدی، درصد پوشش و رطوبت خاک متفاوت‌اند و با تنش‌های مختلف محیطی نیز مواجه هستند، تخصیص مقادیر مناسب به K_c گیاهان آن منطقه کاری بس دشوار خواهد بود. بنابراین طراحان و مهندسان آبیاری در سطوح وسیع به‌طور عمومی با کمبود اطلاعات مختلف مواجه‌اند که از جمله می‌توان به عدم اطلاع دقیق از اراضی تحت

آبیاری، توزیع مکانی رطوبت خاک، نوع گیاه، تاریخ کشت، اراضی آیش و غیره اشاره نمود. در شرایط کمبود داده‌های واقعی مزرعه‌ای، عموماً از داده‌های مرحله طراحی برای تعیین نیاز آبی گیاه در طول فصل آبیاری استفاده می‌شود. بنابراین تفاوتی بین روش استفاده شده در مرحله طراحی سیستم آبیاری باروش تعیین نیاز آبی در شرایط واقعی وجود نخواهد داشت (مکونین و همکاران، ۲۰۰۰). نکته اصلی نیز در اینجا است که تبخیر - تعرق واقعی گیاه در شرایط مزرعه متفاوت از تبخیر - تعرق تانسیل آن در هنگام طراحی سیستم است. همان‌طوری که در مقدمه اشاره گردید، یکی از روش‌های تعیین تبخیر - تعرق واقعی گیاه، روش‌های موسوم به توازن انرژی بین زمین و اتمسفر است که برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی و توسط براون و رزنیبرگ (۱۹۷۳) و استون و هورتون (۱۹۷۴) معرفی شده‌اند. تعیین تبخیر - تعرق گیاه تحت تنش‌های مختلف محیطی (شرایط غیراستاندارد) نظیر شوری و خشکی از نوآوری‌ها و مزایای این قبیل روش‌ها محسوب می‌شود، به‌طوری‌که انجام این کار توسط روش‌های متداول و از طریق فرمول‌های تجربی، همواره پیچیده و بحث‌برانگیز بوده است. در ده‌های اخیر روش توازن انرژی در نقاط مختلف دنیا و روی محصولات مختلف مورد استفاده قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی نیز حاصل شده است. این روش نیازمند حل معادله بیلان انرژی در سطح زمین است که در آن تبخیر - تعرق واقعی (یا شار گرمای نهان LE) به عنوان بخش باقی‌مانده اختلاف بین تشعشع خالص ورودی به سطح (R_n) و شار گرمای محسوس خارج شده از سطح زمین (انرژی مورد استفاده برای گرم نمودن هوای مجاور، H) و نیز شار گرمایی ورودی به زمین (انرژی ذخیره شده در خاک و پوشش گیاهی، G) است که در فصل قبل به آن اشاره گردید (معادله ۱-۱). در دو دهه اخیر نیز مدل‌های مختلفی برای حل معادله بیلان انرژی تبخیر - تعرق به کمک سنجش از دور ماهواره‌ای معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها را به‌طور کلی می‌توان در دو گروه دومنبعی (Two Source) و تک‌منبعی (Single Source) دسته‌بندی نمود که گروه اول قادر به تفکیک تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه است، اما گروه دوم این دو را از همدیگر تفکیک نمی‌کند. مدل سبال (SEBAL) یا الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین (باستیان‌سین و همکاران، ۱۹۹۸)، مدل متریک (METRIC) یا تهیه نقشه تبخیر - تعرق با قدرت تفکیک بالا با انجام کالیبراسیون داخلی (آلین و همکاران، ۲۰۰۷)، مدل مثلثی/دوزنقه‌ای دمای سطحی در برابر شاخص پوشش گیاهی (پرایس، ۱۹۹۰؛ موران و همکاران، ۱۹۹۴؛ جیانگ و اسلام، ۱۹۹۹؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۰)، مدل اس‌سبی (S-SEBI) یا شاخص ساده شده بیلان انرژی سطح (روترینگ و همکاران، ۲۰۰۰) و مدل سبیس (SEBS) یا سامانه بیلان انرژی سطحی (سو، ۲۰۰۲) از جمله مدل‌های تک‌منبعی و مدل‌های این ۹۵ (N95) (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵) و آلکسی (ALEXI) یا تبادل معکوس بین زمین و اتمسفر (آندرسون و همکاران، ۱۹۹۷؛ لی و همکاران، ۲۰۰۹) از جمله مدل‌های دومنبعی محسوب می‌شوند (تانگ و همکاران، ۲۰۱۳). از این بین، سبالز معتبرترین و پرکاربردترین این مدل‌ها برای حل معادله بیلان انرژی است که شهرت و مقبولیت جهانی نیز یافته است. سبال در بین سایر مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی، دارای مزایایی از جمله استفاده از داده‌های زمینی کمتر نسبت به سایر مدل‌ها، عدم نیاز به آمار دمای هوای نزدیک به سطح زمین (بر خلاف بسیاری از روش‌های دیگر) و دارا بودن فرآیند کالیبراسیون درونی است که به‌صورت خودکار و در مرحله تعیین پیکسل‌های سرد و گرم در منطقه مطالعاتی صورت می‌گیرد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۳). دقت الگوریتم سبال که تاکنون در بیشتر از ۲۶ کشور به‌صورت تحقیقاتی و در بیش از ۱۷ کشور به‌صورت کاربردی مورد استفاده قرار گرفته است، به‌شرایط اقلیمی، بارندگی و توپوگرافی حوضه و همچنین مقیاس زمانی و مکانی مورد نظر وابسته است. باستیان‌سین و همکاران (۲۰۰۵) که به بررسی سبال در تعیین تبخیر - تعرق روزانه و

فصلی در دومقیاس مختلف مزرعه‌ایو حوضه آبخیز پرداخته‌اند، دقت این الگوریتم را برای تعیین تبخیر - تعرق روزانه در مقیاس مزرعه ۸۵٪ و برای تبخیر - تعرق فصلی ۹۵٪ و در مقیاس حوضه ۹۶٪ دانسته‌اند. در مقاله‌ای دیگر نیز دقت این روش در مقیاس‌های روزانه، فصلی و سالانه به ترتیب ۸۵، ۹۵ و ۹۶ درصد عنوان شده است (تانگ و همکاران، ۲۰۱۳). در تحقیقی که توسط راموس و همکاران (۲۰۰۸) در دره اِبرو در اسپانیا صورت گرفت، تبخیر - تعرق واقعی چمن و ذرت در طی چهار سال متوالی به کمک سبال محاسبه و ارزیابی شد و خطای آن برای ذرت یک میلی‌متر در روز و برای چمن ۰/۳ میلی‌متر در روز عنوان شد. الگوریتم سبال حاصل تلاش بیست ساله محقق‌ها بوده و بر اساس یافته‌های جدید تحقیقاتی، به‌طور پیوسته در حال بهبود و ارتقاء می‌باشد. در تحقیق‌های مستقلی که توسط باستیان‌سین و همکاران (۲۰۱۰) در این زمینه صورت گرفته است، کارآیی این روش در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری یا برآورد تبخیر - تعرق نظیر نسبت بوون، لایسی‌متر زه‌کش‌دار، اِدی‌کواریانس، سِنْتیلومِتر، لایسی‌متر وزنی و روش بیلان آبی در پانزده کشور از قاره‌های مختلف به اثبات رسیده است. سبال دارای نسخه‌های متعددی است که نسخه ۲۰۰۰ آن به عنوان نسخه قدیمی و پرکاربرد در اکثر نقاط دنیا شناخته شده است. در حال حاضر جدیدترین نسخه این الگوریتم، سبال ۲۰۰۸ (باستیان‌سین و همکاران، ۲۰۱۰) است که در آن روابط آلبیدوی سطحی (تاسومی و همکاران، ۲۰۰۵) و شار گرمای خاک اصلاح و بهبود داده شده‌اند و همچنین اصلاحاتی برای پدیده همرفتی و محاسبه زبری سطح برای انتقال مومنتوم انجام شده است. سبال ۲۰۰۸ در شرایط کوهستانی نیز مناسب بوده و برای تعیین تشعشع خالص خورشیدی در این مناطق از شیب (Slope) و جهت شیب (Aspect) محاسبه شده توسط مدل رقومی ارتفاعات یا DEM (آلِن و همکاران، ۲۰۰۱) استفاده می‌نماید. الگوریتم سبال (نسخه‌های قدیمی و جدید آن) در چهار اقلیم - از پنج اقلیم مشخص شده توسط کوپن - و نه زیر اقلیم مختلف استفاده و ارزیابی شده است. الگوریتم سبال در کاربری‌های مختلف اراضی نظیر مرتع، گیاهان ساحلی و کنار رودخانه‌ای، چمن‌زارها و جنگل‌ها، کفه‌ها و اراضی فاقد پوشش و گیاهان مختلف نظیر چغندر قند، زیتون، برنج، نخیلات، پنبه، گندم، آفتابگردان کاربرد داشته است (باستیان‌سین و همکاران، ۲۰۱۰). این الگوریتم در یکی از مناطق نیمه‌بیابانی برزیل برای کشت مخلوط انگور و انبه و پوشش‌های طبیعی نیز استفاده شده است (تِکْسیرا و همکاران، ۲۰۰۹). گُلُوزکوف و همکاران (۲۰۰۷) نیز این الگوریتم را در کشور قزاقستان برای تعیین تبخیر - تعرق پنبه مورد استفاده قرار داده‌اند. ژونگ‌پینگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و الگوریتم سبال اقدام به تعیین تبخیر - تعرق کاربری‌های مختلف اراضی نظیر سطوح آبی و باتلاقی، اراضی کشاورزی، چمن‌زار، اراضی روستایی، شهری و اراضی بایر در اطراف دریاچه نانسی در چین نموده‌اند. آن‌ها نتایج این روش را رضایت‌بخش اعلام کرده‌اند. به‌طور مشابه، تحقیقی توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۲) در منطقه هِنائو در شمال چین انجام شد و به کمک تصاویر ماهواره‌ای مودیس و الگوریتم سبال، تبخیر - تعرق کاربری‌های مختلف اراضی در یک بازه زمانی ده ساله محاسبه گردید. کونگو و همکاران (۲۰۱۱) نیز از ۲۸ تصویر ماهواره‌ای مودیس استفاده کردند و تبخیر - تعرق کاربری‌های مختلف اراضی بالادست حوضه رودخانه توکِلا در آفریقا را به کمک سبال محاسبه نمودند. آن‌ها با کمک دستگاه سِنْتیلومِتر نتایج کار خود را مثبت ارزیابی کرده‌اند. بورچارت و تِروخ (۲۰۱۲) نیز به کمک ۱۴ تصویر ماهواره‌ای آستر، تبخیر - تعرق صورت گرفته از سطح حوضه آبخیز سوگوتا در شمال کنیا را مورد محاسبه و ارزیابی قرار داده‌اند. مطالعات سَری و همکاران (۲۰۱۳) در تعیین تبخیر - تعرق برنج در جاوای غربی و همچنین کارمالری و همکاران (۲۰۱۲) در تعیین تبخیر - تعرق غلات با کمک چهار تصویر ماهواره‌ای مودیس از دیگر نمونه‌های استفاده از سبال در نقاط مختلف دنیا است. علاوه بر

تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه ارزیابی کارایی و تعیین دقت این الگوریتم در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است، نتایج کسب شده از این الگوریتم در برخی از این کشورها به مرحله کاربردی نیز رسیده است. حتی در مناطقی نظیر فلوریدا، کالیفرنیا، واشینگتن، مصر و آفریقای جنوبی، الگوریتم سبال را به‌طور مستقیم وارد عرصه کاربردی نموده‌اند (جدول ۲-۱).

جدول ۲-۱ مناطق استفاده کننده از سبال در عرصه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی (به نقل از

باستیان‌سین و همکاران، ۲۰۰۵)

قاره	کشور / ایالت	عرصه مورد استفاده		قاره	کشور / ایالت	عرصه مورد استفاده	
		تحقیقاتی	کاربردی			تحقیقاتی	کاربردی
اروپا	هلند	√	√	آمریکا	آفریقا	√	√
	اسپانیا	√	√		کنیا	√	√
	پرتغال	√	√		نیجر	√	√
	ایتالیا	√	√		زیمباوه	√	√
آسیا	فرانسه	√	√	بوتسوانا	√	√	
	بلژیک	√	√	آفریقای جنوبی	√	√	
	ترکیه	√	√	مراکش	√	√	
	ایران	√	√	زامبیا	√	√	
	ازبکستان	√	√	آیداهو	√	√	
	قرقیزستان	√	√	نیومکزیکو	√	√	
	تاجیکستان	√	√	اوکلاهوما	√	√	
	پاکستان	√	√	فلوریدا	√	√	
	هند	√	√	واشینگتن	√	√	
	سريلانكا	√	√	کالیفرنیا	√	√	
	چین	√	√	مکزیک	√	√	
	فیلیپین	√	√	پاناما	√	√	
آفریقا	مصر	√	√	برزیل	√	√	
	سودان	√	√	آرژانتین	√	√	

۲-۳ سبال در ایران

همان‌طوری که در فصل قبل اشاره شد، در ایران نیز از الگوریتم توازن انرژی سبالدر تعیین تبخیر - تعرق محصولات مختلف استفاده گردیده که در جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از این تحقیقات آورده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اکثر تحقیقات داخلی از تصاویر سنجنده مودیس استفاده شده که عمدتاً به دلیل سهولت دسترسی و بازه زمانی مناسب این تصاویر (۱ تا ۲ روز) بوده است. همچنین باید اذعان نمود که به دلیل فقدان اندازه‌گیری‌های دقیق زمینی در عمده تحقیقات سبال در کشور (به استثنای چندین مورد)، ارزیابی نتایج این الگوریتم توسط سایر مدل‌ها و روش‌های تخمینیتبخیر - تعرق صورت گرفته است.

جدول ۲-۲ تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه سببال در ایران

منبع	منطقه مطالعاتی	مقیاس کاری	تصاویر مورد استفاده	گیاهان مورد بررسی	مدل‌های مورد استفاده به همراه سببال
مختاری (۲۰۰۵)	منطقه برخوار در اصفهان	مزرعه‌ای	مودیس (۱۷) تصویر)	ذرت، آفتابگردان، چغندر قند	پنمن-مانتیت، پرستلی تیلور، شاخص سطح برگ
وظیفه‌دوست (۲۰۰۷)	منطقه برخوار در اصفهان	مزرعه‌ای، منطقه‌ای	مودیس (۴ تصویر) استر (۴ تصویر)	گندم، ذرت، آفتابگردان، چغندر قند	سوپ
اکبری و همکاران (۲۰۰۷)	حوضه آبخیز زاینده‌رود	حوضه	نوا (۲۵ تصویر)	پوشش گیاهی مخلوط	بیان آب
شریفی و همکاران (۲۰۰۸)	منطقه صومعه‌سرای گیلان	شهرستان	مودیس (۱۳) تصویر)	برنج	مدل بیوفیزیکی عملکرد محصول
پورمحمدی و رحیمیان (۲۰۰۹)	دشت آزادگان خوزستان	دشت	مودیس (۳۳) تصویر)	کاربری‌های مختلف اراضی	-
موتوواتا و همکاران (۲۰۱۰)	حوضه رودخانه کرخه	حوضه	مودیس (۱۹) تصویر)	کاربری‌های مختلف اراضی، گندم	بیان آب
خاوریان نهزک (۱۳۸۳)	مزرعه ارتش در استان گلستان	مزرعه	مودیس (۲ تصویر)	گندم	-
ارشد و همکاران (۱۳۸۷)	کرمانشاه	حوضه	مودیس	گندم دیم	الگوریتم ژنتیک، شاخص‌های خشکسالی
پورمحمدی (۱۳۸۸)	منطقه منشاد در استان یزد	زیرحوضه	مودیس (۱۵) تصویر) لندست (۱ تصویر)	باغ‌ها مخلوط	بیان آب
یعقوبی فشکی و همکاران (۱۳۸۸)	چمچمال کرمانشاه	زیرحوضه	مودیس (۳ تصویر)	کاربری‌های مخلوط	-
نوری و همکاران (۱۳۸۹)	مشهد	زیرحوضه	مودیس (۳ تصویر)	کاربری مخلوط	-
قمرنیا و همکاران (۱۳۸۹)	کرمانشاه، دشت بیلوار	دشت	مودیس (۱۵) تصویر)	کاربری مخلوط	-
عبدلی و همکاران (۱۳۸۹)	اصفهان، زاینده رود	حوضه	مودیس (۱ تصویر) و لندست (۱) تصویر)	اراضی کشاورزی	-
محسنی ساری و همکاران (۱۳۸۹)	طالقان	حوضه	مودیس	کاربری مخلوط	لایسی متر
کاویانی و همکاران (۱۳۹۰)	قزوین	دشت	مودیس (۵ تصویر)	گندم و کاربری مخلوط	لایسی متر
رحیمیان و پورمحمدی (۱۳۹۱)	دشت آزادگان خوزستان	دشت	مودیس (۱۹) تصویر)	گندم	تابع عملکرد پتانسیل
دستورانی و همکاران (۱۳۹۱)	اردکان یزد	شهرستان	مودیس (۱۳) لندست (۱)	پسته	فائو پنمن-مانتیت،
مرشدی (۱۳۹۱)	شهرکرد	دشت	لندست (۷ تصویر)	کاربری مخلوط	لایسی متر