

اندازه‌گیری تبخیر - تعرق و برآورد مقاومت‌های آیرودینامیکی و سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در اقلیم خشک

فریده السادات هاشمی نسب خبیسی*، دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
محمد موسوی بایگی، استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
بهرام بختیاری، استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
*نویسنده مسئول farideh.hasheminasab@gmail.com

وصول: ۹۵/۶/۱۴ پذیرش: ۹۵/۱۰/۸
صص: ۸۳-۱۰۰

چکیده

با توجه به اهمیت و کاربرد گیاهان دارویی، پژوهش در زمینه نیاز آبی این گیاهان به ویژه در مناطق خشک ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه تبخیر - تعرق، مقاومت آیرودینامیک و مقاومت سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در منطقه خشک کرمان بررسی شد. برای اندازه‌گیری تبخیر - تعرق این گیاه از پنج لایسمتر حجمی زهکش‌دار به قطر ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر استفاده شد. فصل کشت با سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ منطبق بوده است. برای برآورد مقاومت آیرودینامیک از روش پنمن و شش روش مبتنی بر نظریه مونین - آبخوف استفاده شد. مقدار تبخیر - تعرق اندازه‌گیری شده گیاه با لایسمترها برای فصول کشت ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به ترتیب برابر ۳۳۵/۵ و ۱۰۴۳/۲۶ میلی‌متر بود. نتایج حاصل از محاسبه مقاومت آیرودینامیک نشان داد که روش‌های وینی، ورما و تام از روند یکسانی پیروی می‌کنند. همچنین مقاومت سطحی در ابتدای دوره کشت، بیشترین مقدار را داشته است. مقایسه مقادیر تبخیر - تعرق محاسبه شده از مقاومت آیرودینامیک با تبخیر - تعرق اندازه‌گیری شده از لایسمتر نشان داد که روش وینی، مارت - اک و ورما با R2 برابر ۰/۵۶۶ در سال ۱۳۹۳ و روش وینی و ورما با R2 برابر ۰/۸۰۶ در سال ۱۳۹۴، بیشترین همبستگی را با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسمتر داشته است. در نهایت، مقادیر تبخیر - تعرق حاصل از مقاومت آیرودینامیک محاسبه شده از شش روش مبتنی بر نظریه مونین - آبخوف، مقادیر خطای کمتری نسبت به روش پنمن داشتند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر - تعرق، مقاومت آیرودینامیک، گیاه دارویی، همیشه‌بهار، کرمان، لایسمتر

طرح مسئله

به طور کلی رکن اساسی در مدیریت منابع آب و مهمترین بخش طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های تأمین‌کننده نیاز کشاورزی به آب، تخمین نیاز آبی گیاه است. تخمین بیش از حد آب برای رشد گیاه، ضمن هدر دادن آب آبیاری سبب ماندابی شدن اراضی، شست‌وشوی مواد غذایی خاک و آلوده کردن منابع آب زیرزمینی می‌شود؛ علاوه بر اینکه تخمین کمتر نیز وارد شدن استرس رطوبتی به گیاه را موجب می‌شود و در نتیجه، کاهش محصول را دربر خواهد داشت. لازمه تعیین نیاز آبی گیاه، محاسبه تبخیر - تعرق سطوح گیاهی مرجع برای منطقه مورد مطالعه است که یا به طور مستقیم با لایسیمتر اندازه‌گیری می‌شود و یا به صورت غیر مستقیم با استفاده از داده‌های هواشناسی یا تبخیر از تشت تبخیر برآورد می‌شود. تبخیر - تعرق به عوامل اقلیمی نظیر دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش بستگی دارد و از آنجا که مقدار تابش و پارامترهای دیگر اقلیمی از محلی به محل دیگر و با گذشت زمان تغییر می‌کنند، تبخیر - تعرق نیز تغییرات مکانی و زمانی دارد و بنابراین باید در هر منطقه بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی آن محل، محاسبه شود. دو جزء اساسی در معادله تبخیر - تعرق پتانسیل، مقاومت‌های سطحی و آیرودینامیک است و تعیین دقیق آن‌ها برای دستیابی به مقادیر واقعی هر منطقه ضروری است که تا کنون مطالعه جامعی در این زمینه در ایران انجام نشده است.

تبخیر - تعرق مرجع و تبخیر - تعرق گیاهان به دلیل متفاوت بودن وضعیت سطح زمین، ویژگی‌های پوشش گیاهی و مقاومت آیرودینامیک سطوح کشت، متفاوت هستند. دو جزء اساسی در معادله تبخیر - تعرق پتانسیل، مقاومت‌های سطحی و آیرودینامیک است و تعیین دقیق آن‌ها برای دستیابی به مقادیر واقعی هر منطقه ضروری است. تاکنون مطالعه جامعی در این زمینه در ایران انجام نشده است. مقاومت آیرودینامیک، مقاومت پوشش گیاهی در مقابل انتقال بخار آب به سمت بالا و اصطکاک حاصل از جریان هوا روی سطح گیاهی را نشان می‌دهد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). مقاومت موجود در برابر انتقال بخار آب از سطح گیاه در حال تعرق و سطح خاک در حال تبخیر به اتمسفر را مقاومت روزنه‌ای تشریح می‌کند. هنگامی که پوشش گیاهی در سطح خاک کامل نباشد، عامل مقاومت تأثیر خاک را نیز شامل می‌شود. چنانچه تعرق، بالا نباشد، مقاومت سطحی به وضعیت آب در دسترس پوشش گیاهی نیز بستگی دارد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

بنابراین از آنجا که میزان مقاومت‌های آیرودینامیک و سطحی و نیز تبخیر - تعرق برای گیاهان دارویی در ایران کمتر برآورد شده است و نیز با توجه به کاربرد وسیع گیاهان دارویی و ترکیب‌های طبیعی در صنایع دارویی، آرایشی - بهداشتی و غذایی، نیاز ضروری به تحقیقات پایه‌ای و کاربردی در این زمینه احساس می‌شود. علاوه بر این با در نظر گرفتن وقوع پدیده تغییر اقلیم و کاهش عملکرد برخی گیاهان زراعی - اقتصادی به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، ارائه راهکارهای سازگاری برای جلوگیری از مواجهه با بحران غذا در این مناطق، ضروری است. از جمله راهکارهای مطرح در این زمینه می‌توان به کشت جایگزین گیاهان متناسب با شرایط اقلیمی آن مناطق، اشاره کرد. به عبارت دیگر می‌توان امکان کشت گیاهانی که هم از نظر اقتصادی و هم از نظر شرایط اقلیمی و نیاز آبی، قابلیت جایگزینی با محصولات زراعی هر منطقه را دارند، بررسی کرد. همچنین از اهداف عمده و انگیزه‌های کشاورزان در انتخاب گیاهان دارویی برای فعالیت کشت، سودآوری بالای آن‌ها در مقایسه با انواع مختلفی از سایر محصولات زراعی است؛ به‌ویژه آنکه برخی از انواع این گیاهان در شرایط نامساعد و محدودکننده نیز قابلیت کشت و تولید را دارند.

گیاه انتخابی در این تحقیق گیاه دارویی همیشه‌بهار است. علت انتخاب این گیاه کاربرد فراوان آن در داروسازی است. همچنین فراورده‌های این گیاه در کارخانه‌های تولید لوازم آرایشی و عطرسازی کاربرد بسیار زیادی دارد. ضرایب گیاهی در مراحل مختلف رشد و همچنین نیاز خالص آبیاری برای گیاه دارویی همیشه‌بهار محاسبه نشده است.

پیشینه پژوهش

بختیاری و همکاران (۱۳۸۸) در ایستگاه هواشناسی مرجع کرمان، تبخیر - تعرق روزانه را با مجموع ساعتی مقایسه کردند. آن‌ها در پژوهش خود از داده‌های ساعتی ایستگاه مرجع هواشناسی خودکار در دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۸۴ استفاده کردند. همچنین دو روش پنمن - مانیت - فائو ۵۶ و پنمن - مانیت استاندارد ASCE را در دو بازه زمانی روزانه (۲۴ ساعتی) و ساعتی برای مقایسه تبخیر - تعرق مرجع به کار بردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که روش فائو ۵۶ با روش مجموع ساعتی در ماه‌های مختلف بین ۵/۸ تا ۴۴/۶ درصد نسبت به روش ۲۴ ساعتی، بیش‌برآورد داشته است و این بیش‌برآورد در روش استاندارد ASCE در ماه‌های مختلف بین ۷/۴ تا ۴۷/۶ بود. همچنین در پژوهش دیگری بختیاری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از لایسیمتر وزنی، مدل‌های تبخیر - تعرق مرجع را در یک منطقه نیمه‌خشک بررسی کردند. اندازه‌گیری تبخیر - تعرق در پژوهش آن‌ها در منطقه کرمان در طی دوره آوریل ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۰۵ در سه دوره مختلف با لایسیمتر وزنی الکتریکی انجام شد. داده‌های لایسیمتری اندازه‌گیری شده برای ارزیابی شش مدل تبخیر - تعرق پنمن - مانیت - فائو ۵۶، پنمن - کیمبرلی ۱۹۹۶، بلانی - کریدل - فائو ۲۴، تابش فائو ۲۴، ماکینگ و هارگریوز - سامانی استفاده شد. نتایج آن‌ها در تمام طول دوره روش تابش فائو ۲۴ به صورت دقیقتری نشان داده شد. همچنین نتایج آن‌ها مشخص کرد که در هر سه دوره، روش ماکینگ نتایج ضعیفتری را نسبت به سایر مدل‌ها نشان می‌دهد و برای منطقه توصیه نمی‌شود.

فتحعلیان و نوری امامزاده‌ای (۱۳۹۱) در شرایط گلخانه با استفاده از میکرو لایسیمتر، تبخیر - تعرق و ضریب گیاهی خیار را برآورد کردند. در این پژوهش برای تعیین تبخیر - تعرق گیاه چمن و خیار از دو لایسیمتر وزنی استفاده شد و تبخیر - تعرق به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. همچنین با سه روش پنمن - مانیت - فائو، هارگریوز - سامانی و ماکینگ نیز تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شد. تبخیر - تعرق خیار در طول دوره رشد با توجه به فاصله کشت خیار در طول دوره رشد چهار ماهه برابر ۲۷۳/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. بافکار و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه، ضرایب گیاهی ذرت دانه‌ای را در منطقه ماهیدشت کرمانشاه محاسبه کردند. آن‌ها مطالعه مذکور را در دو سال زراعی ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ در ایستگاه لایسیمتری مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان کرمانشاه در دشت ماهیدشت انجام دادند. همچنین محاسبه ضریب گیاهی را از نسبت تبخیر - تعرق واقعی محاسبه شده با استفاده از داده‌های لایسیمتری و تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه مرجع برآورد شده از معادله پنمن - مانیت به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان تبخیر - تعرق گیاه مرجع محاسبه شده از معادله پنمن - مانیت برابر ۹۱۳ میلی‌متر و تبخیر - تعرق واقعی گیاه ذرت به دست آمده از لایسیمتر در طول دوره رشد برابر ۷۴۳ میلی‌متر است.

عابدی کوپایی و همکاران (۱۳۸۷) روش‌های تخمین تبخیر - تعرق سطح مرجع را با داده‌های لایسیمتری در اصفهان مقایسه کردند. آن‌ها در پژوهش خود برای تخمین تبخیر - تعرق مرجع از چهار روش پنمن - مانیت - فائو،

ترک، هارگریوز و تشت تبخیر استفاده کردند و میزان تبخیر - تعرق برآوردشده از این چهار روش را با تبخیر - تعرق محاسبه شده از لایسیمتر مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که معادله پنمن - مانتیث - فائو از دقت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار است و معادله تشت تبخیر، دقت کمتری را در برآورد تبخیر - تعرق دارد.

قمرنیا و همکاران (۱۳۹۳) نیاز آبی و ضرایب گیاهی یک جزئی و دو جزئی رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) را در اقلیم نیمه خشک کرمانشاه برآورد کردند. آن‌ها برای پژوهش خود از پنج لایسیمتر زهکش‌دار در ایستگاه تحقیقاتی دانشگاه رازی کرمانشاه استفاده کردند که در آن از دو لایسیمتر برای محاسبه تبخیر - تعرق چمن و تبخیر از سطح خاک و سه لایسیمتر برای کشت گیاه رزماری استفاده شد. در تمام طول دوره رشد گیاه، رطوبت مزرعه در حد ظرفیت زراعی مزرعه نگه داشته شد و با استفاده از معادله بیلان آبی، میزان تبخیر - تعرق گیاه به دست آمد. در این پژوهش میزان نیاز آبی گیاه رزماری ۴۹۵/۶۳ میلی‌متر محاسبه شد و بیشترین میزان تبخیر - تعرق در شهریورماه رخ داده بود. شریفی عاشورآبادی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از لایسیمتر، نیاز آبی گیاه دارویی بومادران را تعیین کردند. پژوهش آن‌ها در مجتمع تحقیقاتی البرز در جنوب شهرستان کرج در سال‌های ۸۷-۱۳۸۶ انجام گرفت. آن‌ها با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار، نیاز آبی گیاه دارویی بومادران را محاسبه کردند. همچنین ضرایب گیاهی چهارگانه این گیاه دارویی را نیز برآورد کردند. بر اساس نتایج به دست آمده حاصل از این تحقیق، نیاز گیاه دارویی بومادران به آب در دوره رشد اقتصادی، معادل ۱۴۹/۷۲ میلی‌متر برآورد شد.

میراندا و همکاران (۲۰۰۶) تبخیر - تعرق و ضرایب گیاهی را برای فلفل تاباسکو در شمال شرقی برزیل با استفاده از لایسیمتر برآورد کردند. همچنین تبخیر - تعرق گیاه مرجع را با استفاده از معادله پنمن - مانتیث - فائو محاسبه کردند. بر اساس نتایج آن‌ها میزان کل تبخیر - تعرق گیاه، برابر ۸۸۸ میلی‌متر و حداکثر میزان تبخیر - تعرق روزانه، برابر ۵/۶ میلی‌متر بر روز به دست آمد. یارمی و همکاران (۲۰۱۰) ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه زعفران را با استفاده از لایسیمتر به دست آوردند. آن‌ها در پژوهش خود از سه لایسیمتر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شیراز در دشت باجگاه استفاده کردند. کشت زعفران در این تحقیق در دو فصل کشت (۲۰۰۶-۲۰۰۷ و ۲۰۰۷-۲۰۰۸) انجام شد. مقادیر تبخیر - تعرق زعفران برای دو فصل کشت به ترتیب ۵۲۳ و ۶۴۰ میلی‌متر و حداکثر نرخ تبخیر روزانه، برابر ۴/۵ تا ۶/۱ میلی‌متر بر روز برآورد شد. کلورلی و همکاران (۲۰۱۳) مقاومت آیرودینامیک و تبخیر - تعرق را با استفاده از معادله پنمن - مانتیث روی دو لایه یک کانوپی به دست آوردند. این مطالعه در بخش منطقه جنگلی مرکز استرالیا که اقلیم نیمه خشک دارد، انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت آیرودینامیک برای ضریب درگ بیش برآورد شده و در نتیجه تبخیر در محدوده متوسط فشار بخار اشباع بوده است. آن‌ها مقاومت آیرودینامیک را در لایه‌های بالا، پایین و پایه به دست آوردند و با هم مقایسه کردند. از آنجا که مقدار تبخیر به تغییرات حساس است، اندازه‌گیری پروفایل رطوبت جوئی باعث بهبود مقدار تبخیر - تعرق محاسبه شده از طریق معادله پنمن - مانتیث و مقاومت آیرودینامیک شد.

لیو و همکاران (۲۰۰۷) پارامتریزه کردن مقاومت آیرودینامیک را نسبت به انتقال حرارت با استفاده از اندازه‌گیری میدانی در یک ایستگاه تحقیقات کشاورزی در پکن چین ارزیابی کردند. آن‌ها سیستم ارتباط گردابی را برای برآورد مقاومت آیرودینامیک نسبت به انتقال حرارت در سطح خاک لخت و پوشیده از ذرت به کار بردند و تغییرات روزانه مقاومت آیرودینامیک را با هشت مدل، تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت روزانه مقاومت

آبرودینامیک در طول روز برای هر دو سطح خاک لخت و تاج پوشش ذرت معنی‌دار است و مدل‌ها برآورد خوبی را ارائه کردند. فری و پرلو (۲۰۱۰) مقاومت آبرودینامیک را نسبت به استفاده حرارت با استفاده از روش‌های مرفوتریک در دانشگاه قاهره مصر تعیین کردند. آن‌ها در پژوهش خود از داده‌های خرد اقلیم‌شناسی نوامبر ۲۰۰۷ تا فوریه ۲۰۰۸ مربوط به سه ایستگاه و برای برآورد فضایی مقاومت آبرودینامیک نسبت به حرارت با روش‌های مرفومتریک از سه روش مختلف با استفاده از مدل دیجیتال سطح در محاسبه طول زبری برای حرکت و حرارت استفاده کردند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل فضایی نشان داد که بالاترین مقدار مقاومت، مقاومت آبرودینامیک است که نتایج متفاوتی را در پوشش‌های سطحی گوناگون به دست آورد. هال (۲۰۰۲) مقاومت آبرودینامیک صنوبر را اندازه‌گیری کرد. این مطالعه در دوره زمانی رشد آوریل تا اکتبر ۱۹۹۵ در انگلستان انجام شد. آن‌ها از نظریه مونین - آبخوف برای محاسبه مقاومت آبرودینامیک استفاده کردند. در این پژوهش سرعت باد، شاخص سطح برگ، انتقال حرارت و فشار بخار اشباع در لایه مرزی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که برآورد مستقیم مقاومت آبرودینامیک با مقدار شار حرارت محسوس، کمتر از مقدار محاسبه‌شده از فرمول نیمه لگاریتمی کلاسیک است.

نعمت‌پور و همکاران (۱۳۸۹) اثر مقاومت آبرودینامیک و تاج گیاه را بر برآورد تبخیر - تعرق مرجع با معادله پنمن - مانیتش ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از ۷۰ روز داده ساعتی، میزان مقاومت آبرودینامیک و مقاومت تاج گیاه و همچنین تبخیر - تعرق مرجع را به دست آوردند. در این تحقیق از روش‌های مختلف محاسبه مقاومت گیاهی استفاده شد که این مقادیر در نهایت با مقادیر لایسیمیتری مقایسه شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که در میان روش‌های محاسبه تبخیر - تعرق مجموع ساعتی، روش ASCE در برآورد تبخیر - تعرق مرجع، بیشترین مقدار R2 را دارد. با اعمال تصحیح مقاومت آبرودینامیک دو روش مارت و اک (۱۹۸۷) و چادوری و همکاران (۱۹۸۶) دقت محاسبات تبخیر - تعرق تا حد مطلوبی بهبود یافت. از میان مدل‌های روزانه، مدل تودوراویکال (۱۹۹۹) بالاترین R2 را داشت و نتایج دقیقتری ارائه کرده است. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت مدل‌های مجموع تبخیر - تعرق ساعتی بیشتر از مدل‌های تبخیر - تعرق روزانه است.

مفهوم کلی آبرودینامیک را می‌توان این‌گونه بیان کرد که آبرودینامیک، جریان هوا و اثر آن بر اجسام متحرک شامل ذرات بخار شده از گیاه را بررسی می‌کند. مقاومت آبرودینامیک به این معنا است که پوشش گیاهی تمایلی به انتقال بخار به هوای بالای پوشش گیاهی از خود نشان نمی‌دهد. این فرایند با وارد کردن مقداری نیرو و مقاومت همراه است. همچنین جریان هوا روی سطح پوشش گیاهی، اصطکاک ایجاد می‌کند و مقاومت گیاهی آن را نیز نشان می‌دهد. در محاسبه مقاومت آبرودینامیک گیاه، چگالی هوا نقش بسزایی ندارد؛ اما باد یکی از عوامل اثرگذار بر آن است. در پژوهش‌های بسیاری، تأثیر باد بر پوشش گیاهی تأکید شده است. در شرایطی که خاک از گیاه پوشیده باشد، ارتفاع جابه‌جایی و طول زبری، صفر در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت، عوامل مؤثر بر مقاومت آبرودینامیک به ارتفاع و ساختار گیاه بستگی دارد.

مبنای روش‌های جدیدی که برای برآورد مقاومت آبرودینامیک وجود دارند، استفاده از داده‌های سنجش از دور و دمای سطحی است. در این روش‌ها با استفاده از معادلات ارائه‌شده و محاسبه پارامترهای آن‌ها امکان برآورد مقاومت آبرودینامیک فراهم شده است. اغلب این معادلات، تجربی هستند و برخی پارامترهای موجود آن نیز از روش‌های تجربی برآورد می‌شود. روش برآورد مقاومت آبرودینامیک بر اساس انتقال حرارت به صورت ذیل است:

$$r_{ah} = \rho C_p (T_s - T_a) / H \quad (1)$$

در این معادله، rah مقاومت آیرودینامیک (ثانیه بر متر)، چگالی هوا، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت، T_s دمای سطح که از اندازه‌گیری سنجش از دور مادون قرمز حرارتی محاسبه می‌شود، T_a دمای هوا و H شار حرارت محسوس است.

علت انتخاب گیاه دارویی همیشه‌بهار، کاربرد فراوان آن در داروسازی است که نیاز آبی این گیاه محاسبه نشده است. بنابراین بررسی شرایط کشت و میزان نیاز به آب برای ایجاد مزارع گل همیشه‌بهار در تأمین نیاز کارخانه‌های داروسازی ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر تولید با کیفیت این محصول می‌تواند از واردات آن به داخل کشور جلوگیری و همچنین زمینه را برای صادرات این محصول فراهم کند. در نتیجه با انجام این تحقیق و محاسبه نیاز آبی این گیاه می‌توان مناطق مستعد کشت منطقه را شناسایی و از آن به صورت محصولی در الگوی کشت زراعی استفاده کرد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مطالعه شده در ۱۵ کیلومتری شمال شهر کرمان است که مزرعه کشت گیاه دارویی همیشه‌بهار در آن قرار دارد. کرمان با توجه به آمار بلندمدت هواشناسی و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم خشک دارد. بر اساس آمار ۴۰ ساله (۱۳۵۳-۱۳۹۳) ایستگاه هواشناسی در شهر کرمان، میزان بارش ۱۶۴/۱ میلی‌متر، میانگین دمای هوا ۱۷/۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ۳۲ درصد در سال است. در این پژوهش از پنج لایسیمتر گیاه دارویی همیشه‌بهار استفاده شد و کشت گیاه در دو فصل کشت پاییز ۹۳ و بهار ۹۴ انجام گرفت. ارتفاع گیاه دارویی همیشه‌بهار در مرحله میانی رشد در هر یک از لایسیمترها بین ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار با استفاده از لایسیمتر و با معادله بیلان آب (رابطه ۲) اندازه‌گیری شد:

$$(I + P) - (D + ET + DW) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه، P میزان بارندگی، I مقدار آبیاری، D آب زهکشی، DW تغییرات رطوبت خاک (اختلاف رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری) و ET مقدار تبخیر - تعرق است. در این پژوهش از لایسیمتر غیر وزنی زهکش‌دار استفاده شد و پس از آماده‌سازی لایسیمترها در پنج لایسیمتر، گیاه دارویی همیشه‌بهار کشت شد. در طول دوره کشت این گیاه، رطوبت خاک قبل و بعد از هر آبیاری اندازه‌گیری شد. همچنین پس از هر بار آبیاری، میزان خروجی زه آب لایسیمترها اندازه‌گیری و با استفاده از معادله بیلان آب (رابطه ۲) میزان تبخیر - تعرق گیاه محاسبه شد.

در این تحقیق مقادیر مقاومت آیرودینامیک با استفاده از نظریه مونین - آبخوف به دست آمد. نظریه مونین - آبخوف توصیف غیر بعدی جریان متوسط و دمای متوسط در لایه سطحی به صورت یک تابع ارتفاع است. با توجه به نظریه شباهت مونین - آبخوف (MOS) از شیب جدایی‌ناپذیر باد و پروفیل دما در یک لایه سطحی افقی همگن می‌توان معادله ذیل را بیان کرد (لیو و همکاران، ۲۰۰۷):

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right) - \psi_m(\zeta, \zeta_{0m}) \right] \quad (3)$$

$$T_a - T_0 = P_{r0} \frac{T_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \psi_h(\zeta, \zeta_h) \right] \quad (4)$$

در این رابطه، k ضریب وان کارمن، u سرعت باد در ارتفاع Z (متر بر ثانیه)، u_* سرعت اصطکاک (متر بر ثانیه)، T_* دمای مبنا (کلوین)، T_0 دمای سطح آیرودینامیک (کلوین)، z_{om} طول زبری برای انتقال حرکت (متر)، z_{oh} طول زبری برای انتقال حرارت (متر)، d طول جابه‌جایی صفر (متر)، Pro عدد آشفتگی بین جریان گردابی حرکت Km و حرارت Kh و om ، oh پارامترهای ثابت هستند. در اینجا شار حرارت H از پروفیل سرعت باد و دمای هوا به دست می‌آید:

$$H = -\rho C_p u_* T_* \quad (5)$$

باید توجه داشت که در معادله $(T_a - T_0)$ و (L) تفاوت بین دمای هوا و دمای پتانسیل، نادیده گرفته شده است. با استفاده از روابط (۳) تا (۵) می‌توان رابطه مقاومت آیرودینامیک را به صورت ذیل نشان داد:

$$r_{ah0} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{om}} \right) - \psi_m(\zeta, \zeta_{om}) \right] \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{oh}} \right) - \psi_h(\zeta, \zeta_{oh}) \right] \quad (6)$$

روش‌های برآورد مقاومت آیرودینامیک بر اساس نظریه مونین - آبخوف

مقادیر مقاومت آیرودینامیک بر اساس نظریه مونین - آبخوف در شرایط پایداری با روش‌های ذیل محاسبه شد.

روش اول: روش تام^۱ (۱۹۷۵)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{om}} \right) - \psi_m(\zeta) \right] \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{oh}} \right) - \psi_h(\zeta) \right] \quad (7)$$

مقدار $z_{om} = z_{oh} = 0$ و شرایط پایدار در نظر گرفته شد و همچنین از نظریه MOS استفاده و مقدار z_{om} تا z_{oh} در نظر گرفته شد.

روش دوم: روش چادوری و همکاران (۱۹۸۶)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{om}} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{oh}} \right) \right] (1 - \beta Ri_B)^{-3/4} \quad (8)$$

که در آن $\beta = 5$ و معادلات نیمه تجربی است و z_{om} تا z_{oh} در نظر گرفته شده است و در این معادلات، Ri_B به صورت ذیل برآورد می‌شود:

$$Ri_B = \frac{g (T_a - T_s)(Z-d)}{T_a u^2} \quad (9)$$

در این رابطه، Ri_B مقدار عدد ریچاردسون است.

روش سوم: روش ورما و همکاران^۲ (۱۹۷۶)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{om}} \right) \right]^2 (1 - 16 Ri_B)^{-1/4} \quad (10)$$

روش محاسبه آن تجربی و $z_{oh} = z_{om}$ بوده است.

روش چهارم: روش مارت و اک^۳ (۱۹۸۴)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{z_{om}} \right) \right]^2 \left[\frac{1 + c(-Ri_B)^{1/2}}{1 + c(-Ri_B)^{1/2} - 15 Ri_B} \right] \quad (11)$$

روش محاسبه، تجربی است و مقدار $Z_{0h} = Z_{0m}$ در نظر گرفته شده است و همچنین ضریب c با استفاده از معادله ذیل

محاسبه می‌شود:

$$c = \left[75k^2 \left(\frac{Z+Z_{0m}}{Z_{0m}} \right)^{1/2} / \left[\ln \left(\frac{Z+Z_{0m}}{Z_{0m}} \right) \right]^2 \right] \quad (12)$$

روش پنجم: روش زی (۱۹۸۸)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right) \right]^2 \left[1 + \frac{[1-16Ri_B \ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right)]^{-1/2}}{\ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right)} \right] \quad (13)$$

روش محاسبه، تجربی است و مقدار $Z_{0m} = Z_{0h}$ در نظر گرفته شده است.

روش ششم: روش وینی^۱ (۱۹۹۱)

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[\ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0h}} \right) \right] [a + b(-Ri_B)^c]^{-1} \quad (14)$$

در این رابطه، محاسبه نیمه تجربی و Z_{0m} تا Z_{0h} است و ضرایب a ، b و c با کمک معادلات ذیل محاسبه می‌شوند:

$$a = 1.0591 - 0.0552 \ln \left\{ 1.72 + \left[4.03 - \ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right) \right]^2 \right\} \quad (15)$$

$$b = 1.9117 - 0.2237 \ln \left\{ 1.86 + \left[2.12 - \ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right) \right]^2 \right\} \quad (16)$$

$$c = 0.8437 - 0.1243 \ln \left\{ 3.49 + \left[2.79 - \ln \left(\frac{Z-d}{Z_{0m}} \right) \right]^2 \right\} \quad (17)$$

به این ترتیب با استفاده از الگوریتم‌ها مقاومت آیرودینامیک محاسبه و نتایج حاصل از آن بررسی شد.

روش برآورد مقاومت سطحی

مقاومت سطحی، مقاومت در برابر انتقال بخار آب از سطح گیاه در حال تعرق و سطح خاک در حال تبخیر را بیان می‌کند. زمانی که سطح خاک به طور کامل از پوشش گیاهی پوشیده نباشد، عامل مقاومت تأثیر تبخیر از خاک را نیز شامل می‌شود. همچنین در شرایطی که تعرق گیاه بالا نباشد، مقاومت سطحی به وضعیت آب در دسترس پوشش گیاهی نیز بستگی پیدا می‌کند. در این پژوهش به دلیل دسترسی نداشتن به دستگاه اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای است و از سری روابطی که اسزکز و لانگ (۱۹۹۶) بر اساس معادلات پنمن ارائه کردند، استفاده شد:

$$r_s = \frac{\rho c e_s (T_0) - e_0}{\gamma \lambda E} \quad (18)$$

در این رابطه، r_s مقاومت سطحی گیاه، c ظرفیت گرمایی هوای خشک ($4 - 10 \times 29$ کالری بر سانتی‌متر مربع بر درجه سانتی‌گراد) e_0 فشار بخار سطح و e_s فشار بخار اشباع در دمای T_0 (دمای سطح)، ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و E تبخیر - تعرق به دست آمده از لایسیمتر در واحد انرژی (کالری بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه) (گرمای نهان تبخیر برابر با ۵۸۵ کالری بر گرم) هستند. در اینجا دمای سطح با استفاده از سنجش از دور

برآورد شده است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده دو الگوریتم برآورد دمای سطح که کمترین خطا را داشتند، انتخاب و دمای سطح بر اساس آن‌ها برآورد شد و در الگوریتم‌های مختلف برآورد مقاومت آیرودینامیک استفاده شد. دمای سطحی با استفاده از روش کول و کاسیلس (۱۹۹۷) به دست آمد:

$$LST = 0.39T_{31}^2 + 2.34T_{31} - 0.78T_{31}T_{32} - 1.34T_{32} + 0.39T_{32}^2 + 0.56 \quad (19)$$

در این رابطه، T_{31} و T_{32} بر حسب کلون، مقادیر دمای سطح در باند ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس با توان تفکیک ۱۰۰۰ متر هستند.

صحت‌سنجی مقاومت سطحی و آیرودینامیک

پس از محاسبه مقاومت سطحی (r_s) و مقاومت آیرودینامیک (r_a) با استفاده از مدل پنمن - مانیتث مقدار تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در لایسیمترها مقایسه شد. همچنین مقادیر خطای آن برآورد و بهترین الگوریتم معرفی شد.

$$ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (20)$$

به این ترتیب با استفاده از الگوریتم‌های تعریف‌شده، مقادیر مقاومت آیرودینامیک و سطحی برآورد شد. مقادیر محاسبه‌شده از روش پنمن - مانیتث با مقادیر به‌دست‌آمده از هر یک از الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌های خطا سنجی جذر میانگین مربعات خطا، میانگین درصد خطا و میانگین خطای بایاس و همچنین ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{i,lys} - ET_{i,cal})^2} \quad (21)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{i,lys} - ET_{i,cal}) \quad (22)$$

$$MPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{i,cal} - ET_{i,lys})}{ET_{i,cal}} \times 100 \right] / n \quad (23)$$

در این رابطه‌ها $ET_{i,lys}$ ، میزان تبخیر - تعرق به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مقاومت آیرودینامیک و $ET_{i,cal}$ ، میزان تبخیر - تعرق برآوردشده با روش پنمن - مانیتث است.

بحث

نتایج حاصل از تبخیر - تعرق اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر در فصل کشت پاییز نشان داد که میزان تبخیر - تعرق در مرحله اولی رشد و مرحله توسعه گیاه، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد و پس از آن در مرحله میانی و پایانی، مقادیر تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار رو به کاهش بود. این نتایج نشان داد در ابتدای دوره که میزان تبخیر بیشتر از تعرق و سطح خاک به طور کامل از گیاه پوشیده نشده بود، جزء اصلی تبخیر - تعرق را می‌توان جزء تبخیر بیشتر از تعرق و مرحله میانی و پایانی که بیش از ۹۵ درصد سطح لایسیمترها از گیاه پوشیده بود، میزان تبخیر کاهش یافت و بر میزان تعرق افزوده شد. می‌توان این‌گونه در نظر گرفت که جزء غالب تبخیر - تعرق در مرحله میانی جزء تعرق بوده و بیشترین میزان تعرق در این مرحله برای گیاه رخ داده است. همچنین در فصل کشت پاییز باید به این نکته مهم توجه داشت که

کشت در فصل پاییز، اتفاق افتاده است و در مجموع، میزان تبخیر - تعرق بسیار پایین تر از فصل تابستان است. میزان تبخیر - تعرق به دست آمده در فصل کشت پاییز با توجه به روند تغییرات آن و اثر کاهش دما در انتهای دوره در مقایسه با مطالعات دیگر با لایسومتر از روند منطقی پیروی می کند.

نتایج حاصل از اندازه گیری تبخیر - تعرق در فصل کشت بهار نشان می دهد که میزان تبخیر - تعرق در ابتدای دوره با توجه به دمای کمتر هوا و کم بودن میزان تعرق و غالب بودن جزء تبخیر، کمتر بوده است. با افزایش رشد و کامل شدن پوشش گیاهی سطح، جزء تعرق افزایش یافته و از جزء تبخیر کم شده است و این افزایش جزء تعرق در افزایش میزان تبخیر - تعرق در مرحله توسعه گیاه مؤثر بوده است. در مرحله میانی رشد از جمله عوامل مؤثر بر افزایش تبخیر - تعرق را می توان رشد کامل گیاه و پوشش کامل سطح از گیاه دانست. در مرحله میانی که سطح از گیاه، پوشیده است، بیشترین میزان تعرق را داشته است. همچنین نباید این نکته را فراموش کرد که در فصل کشت بهار دوره میانی رشد گیاه، دمای هوا به حداکثر میزان خود رسیده است؛ به این ترتیب می تواند روی افزایش تعرق گیاه نیز تأثیر گذار باشد. در نهایت در مرحله پایانی رشد، تبخیر - تعرق رو به کاهش بوده و در اواخر دوره به کمترین مقدار خود رسیده است.

جدول (۱) مجموع تبخیر - تعرق را در طول دو فصل کشت نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در هر دو فصل کشت، میزان تبخیر - تعرق در دوره میانی رشد، حداکثر مقدار را دارد. مجموع تبخیر - تعرق در فصل کشت پاییز برابر ۳۲۳/۹۶ میلی متر و در فصل کشت بهار برابر ۱۰۴۳/۵۰ میلی متر بود. در دوره کشت پاییزه تبخیر - تعرق حدود یک سوم تبخیر - تعرق کشت بهاره است. میزان تبخیر - تعرق اندازه گیری شده در دهه های رشد گیاه در هر پنج لایسومتر با توجه به شرایط یکسان رشد، اختلاف اندکی داشته است و مقادیر آنها به میانگین نزدیک می شود.

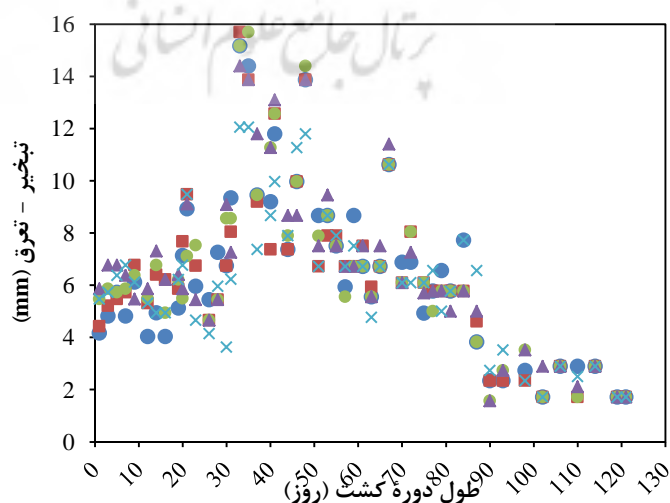
جدول ۱- تبخیر - تعرق دهه ای اندازه گیری شده با لایسومترهای گیاه دارویی همیشه بهار بر حسب میلی متر

میانگین (میلی متر)	تبخیر - تعرق لایسومترها (میلی متر)					دهه های رشد	فصل رشد پاییز
	۵	۴	۳	۲	۱		
۲۸/۸۵	۳۰/۴۶	۳۱/۲۴	۲۹/۲۹	۲۷/۶۰	۲۵/۶۵	۱	
۲۹/۱۱	۲۸/۱۹	۳۱/۶۵	۲۸/۹۲	۳۱/۴۷	۲۵/۲۸	۲	
۴۰/۳۶	۳۴/۰۹	۴۱/۰۲	۴۱/۸۷	۴۱/۱۲	۴۳/۶۹	۳	
۴۷/۴۸	۴۰/۱۵	۵۱/۳۳	۵۱/۵۹	۴۶/۱۳	۴۸/۲۱	۴	
۵۰/۸۷	۴۷/۶۵	۵۱/۸۱	۵۲/۷۲	۵۰/۵۱	۵۱/۶۸	۵	
۳۶/۹۶	۳۷/۵۱	۳۷/۹۰	۳۵/۱۷	۳۶/۷۳	۳۷/۵۱	۶	
۲۹/۴۶	۲۸/۲۱	۳۰/۵۵	۲۸/۹۹	۲۹/۳۸	۳۰/۱۶	۷	
۳۰/۲۳	۲۹/۵۳	۲۹/۵۳	۳۰/۷۰	۳۱/۴۸	۲۹/۹۲	۸	
۱۳/۴۴	۱۷/۰۳	۱۲/۳۵	۱۱/۱۸	۱۲/۷۴	۱۳/۹۱	۹	
۷/۵۹	۷/۵۹	۹/۱۵	۷/۹۸	۶/۴۲	۶/۸۱	۱۰	
۵/۰۸	۵/۳۹	۵/۰۰	۴/۶۱	۴/۶۱	۵/۷۸	۱۱	
۴/۶۱	۴/۶۱	۴/۶۱	۴/۶۱	۴/۶۱	۴/۶۱	۱۲	
۳۲۳/۹۶	۳۱۰/۴۲	۳۳۶/۱۳	۳۲۷/۶۳	۳۲۲/۸۰	۳۲۲/۸۲	میانگین دوره	
۴۹/۱۳	۵۰/۶۲	۵۰/۴۹	۴۸/۱۵	۴۹/۳۲	۴۷/۱۱	۱	فصل کشت

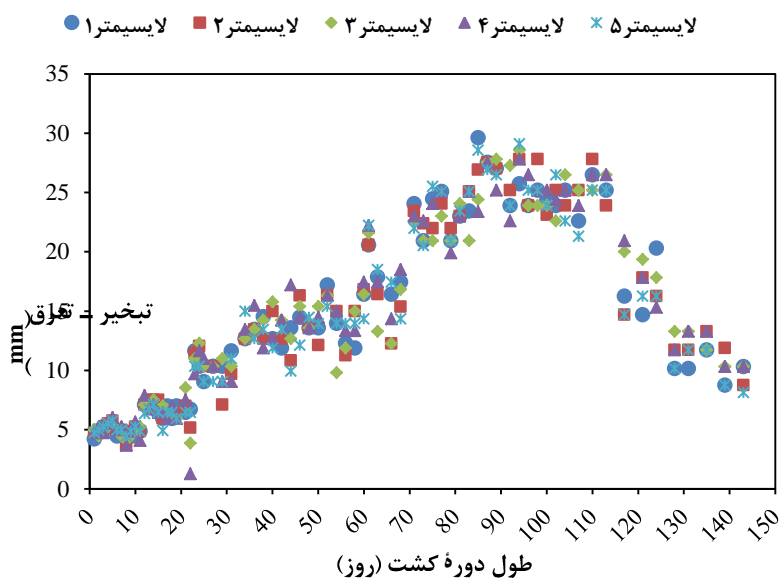
۵۷/۸۸	۵۵/۱۷	۵۷/۵۱	۵۹/۱۰	۵۹/۲۰	۵۸/۴۲	۲	بهار
۶۳/۲۹	۶۰/۶۶	۶۰/۴۰	۶۷/۲۹	۶۳/۲۶	۶۴/۸۲	۳	
۶۴/۲۰	۶۳/۹۱	۶۲/۴۳	۶۶/۳۸	۶۳/۳۹	۶۴/۸۸	۴	
۶۸/۲۷	۶۳/۸۴	۷۳/۹۰	۷۱/۱۷	۶۵/۴۲	۶۷/۰۱	۵	
۷۲/۴۴	۷۱/۵۴	۷۵/۳۶	۶۹/۳۳	۷۴/۳۲	۷۱/۶۹	۶	
۶۹/۱۲	۷۲/۴۴	۷۲/۴۴	۶۳/۹۲	۶۴/۵۴	۷۲/۲۴	۷	
۱۱۳/۲۲	۱۱۳/۹۷	۱۱۴/۶۰	۱۰۸/۳۷	۱۱۳/۷۶	۱۱۵/۴۳	۸	
۱۲۷/۸۹	۱۳۰/۴۶	۱۲۴/۱۷	۱۲۴/۶۹	۱۲۹/۵۳	۱۳۰/۵۷	۹	
۱۲۶/۵۷	۱۲۷/۲۵	۱۲۷/۲۵	۱۲۷/۵۱	۱۲۷/۷۶	۱۲۳/۰۹	۱۰	
۹۹/۰۴	۹۵/۵۶	۹۹/۹۸	۹۹/۴۶	۱۰۲/۰۶	۹۸/۱۶	۱۱	
۵۹/۹۳	۵۶/۱۱	۶۵/۲۱	۶۵/۸۴	۵۶/۳۷	۵۶/۱۱	۱۲	
۴۰/۶۱	۳۸/۱۱	۴۰/۳۰	۴۴/۳۵	۳۹/۳۷	۴۰/۶۱	۱۳	
۳۱/۸۹	۲۸/۵۹	۳۳/۸۹	۳۲/۳۳	۳۳/۸۹	۳۰/۷۷	۱۴	
۱۰۴۳/۵۰	۱۰۲۸/۳۵	۱۰۵۷/۹۴	۱۰۴۷/۸۸	۱۰۴۲/۵۲	۱۰۴۰/۹۱	میانگین دوره	

نگاره (۱) و (۲) مقادیر تبخیر - تعرق روزانه گیاه دارویی همیشه‌بهار را برای لایسومترها در فصل کشت پاییز و بهار نشان می‌دهند. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد از آغاز فصل رشد، مقادیر تبخیر - تعرق، روند افزایشی و این روند تا دوره میانی رشد ادامه داشته است و در نهایت در انتهای فصل رشد، تبخیر - تعرق روند کاهشی یافته است. این نمودارها نشان‌دهنده تغییرات روزانه تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار است. نمودار نگاره (۱) در فصل کشت پاییز نشان می‌دهد که در مدت زمان رسیدن به مرحله میانی رشد، زمان کوتاهتری سپری شده است و در نگاره (۲) و در فصل کشت بهار، زمان رسیدن به مرحله میانی طولانیتر بوده است.

● لایسومتر ۱ ■ لایسومتر ۲ ● لایسومتر ۳ ▲ لایسومتر ۴ × لایسومتر ۵



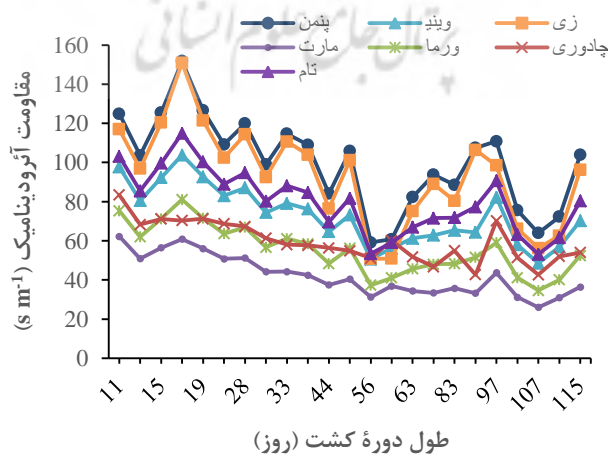
نگاره ۱- تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار در هر لایسومتر در فصل کشت پاییز (میلی‌متر)



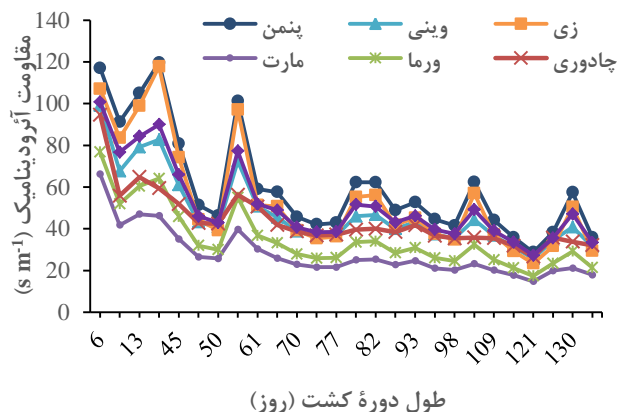
نگاره ۲- تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه بهار در هر لایسیمتر در فصل کشت بهار (میلی متر)

برآورد مقاومت آیرودینامیک

در فصل پاییز، محاسبه مقاومت آیرودینامیکی با الگوریتم‌های بیان شده نشان داد که با وجود اختلاف با یکدیگر، روند تغییرات آن‌ها از ابتدا تا انتهای دوره تقریباً مشابه است. نتایج نشان داد مقادیر مقاومت آیرودینامیک محاسبه شده با روش مارت، کمترین میزان را داشته است و مقادیر به دست آمده از روش پنمن و زی بیشترین مقدار را برآورد کرده است. در روش‌های وینی و تام، مقادیر، نزدیک به هم برآورد شده است. نتایج حاصل از برآورد مقاومت آیرودینامیکی در فصل کشت بهار و پاییز نشان داد در همه الگوریتم‌های استفاده شده، مقدار مقاومت آیرودینامیکی گیاه در دوره ابتدایی رشد، بیشترین مقدار را دارد و با رشد گیاه و افزایش پوشش گیاهی از مقدار آن کاسته شده است. نگاره (۳) و (۴) نمودارهای مقاومت آیرودینامیکی گیاه دارویی همیشه بهار را در دو دمای سطح با استفاده از الگوریتم‌های بیان شده، نشان می‌دهد.



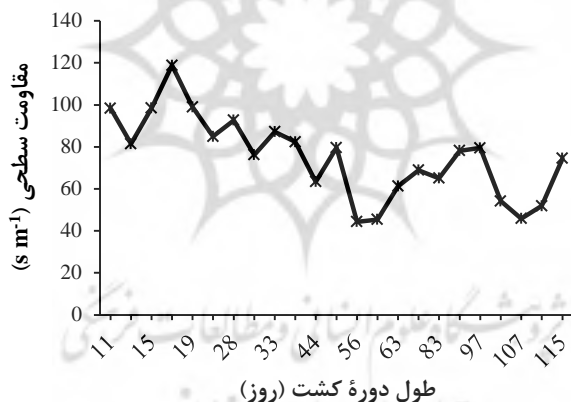
نگاره ۳- مقاومت آیرودینامیک گیاه دارویی همیشه بهار محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف دوره کشت پاییز



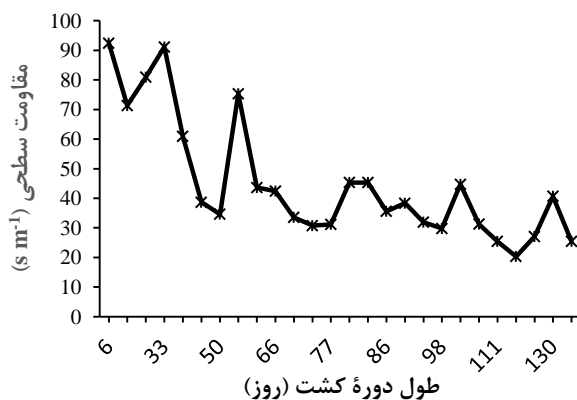
نگاره ۴- مقاومت آبرودینامیک گیاه دارویی همیشه‌بهار محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف دوره کشت بهار

مقاومت سطحی گیاه

نتایج نشان می‌دهد میزان مقاومت سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در ابتدا زیاد بوده است. در انتهای دوره، این مقدار کاهش یافته و این روند با وجود نوسانات موجود در فصل رشد، ادامه داشته است. نگاره (۵) و (۶)، نمودار تغییرات مقاومت سطحی را در طول فصل رشد نشان می‌دهند.



نگاره ۵- مقاومت سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در طول دوره رشد (فصل کشت پاییز)



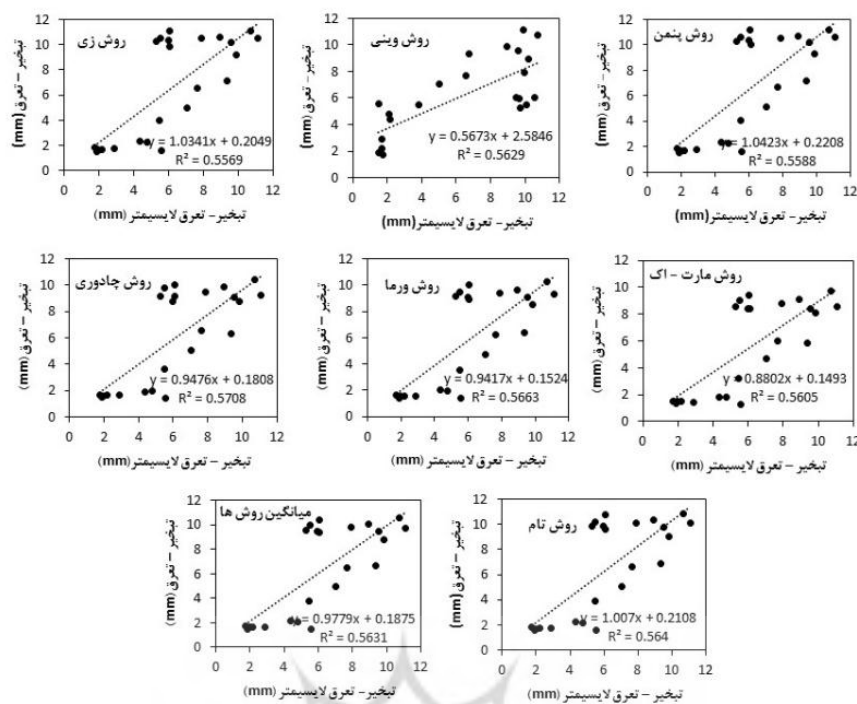
نگاره ۶- مقاومت سطحی گیاه دارویی همیشه‌بهار در طول دوره رشد (فصل کشت بهار)

ارزیابی مقادیر مقاومت سطحی و مقاومت دینامیک گیاه دارویی همیشه بهار

پس از برآورد مقاومت سطحی و مقاومت آیرودینامیک با استفاده از معادله پنمن - مانیتث، تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه بهار برای هر یک از الگوریتم‌ها محاسبه و با مقادیر برآورد شده از لایسمتر، مقایسه شد. نتایج حاصل از آن برای هر دو دمای سطح محاسبه شده و فصل کشت پاییز و بهار به صورت نمودار در نگاره‌های (۷) تا (۸) آمده است. این نتایج، نشان داده است که الگوریتم‌های استفاده شده در برآورد مقاومت آیرودینامیک، توانایی خوبی در برآورد آن داشته است و نتایج تبخیر - تعرق در مقایسه با داده‌های لایسمتری از دقت خوب و مناسبی برخوردار هستند. نتایج حاصل در دوره کشت بهار، همبستگی بیشتر و مقادیر، دقت بالاتری را دارند. همچنین برای صحت‌سنجی الگوریتم‌های مقاومت آیرودینامیک و سطحی، مقادیر خطای تبخیر - تعرق در جدول (۲) آمده است با توجه به مقادیر شاخص‌ها، الگوریتم‌ها دقت خوبی دارند

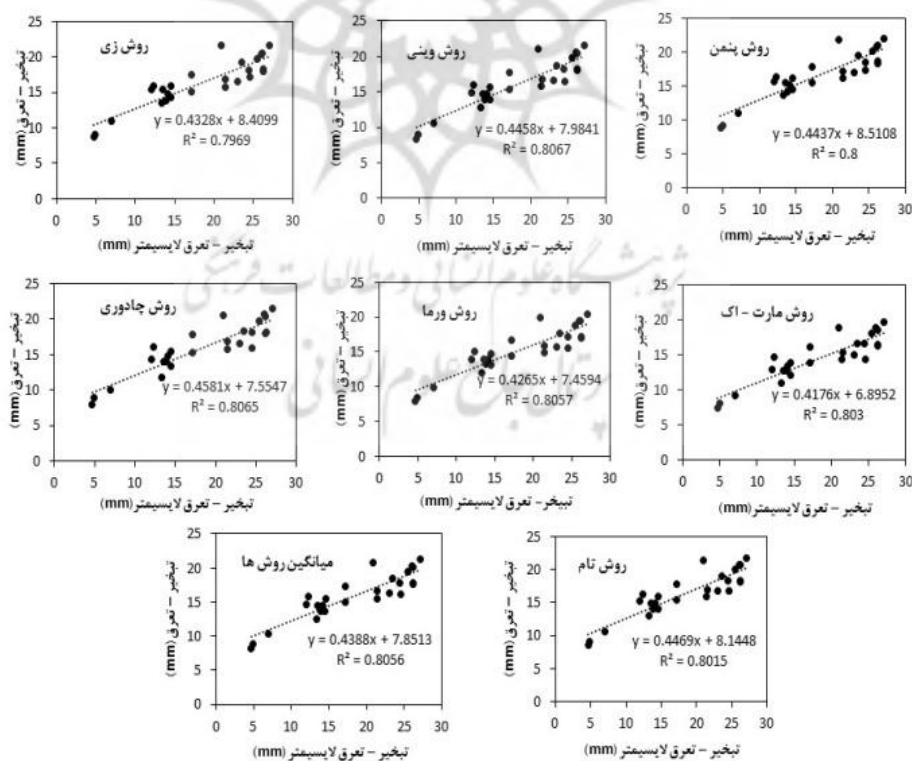
جدول ۲- مقادیر شاخص‌های سنجش خطای الگوریتم‌های محاسبه مقاومت آیرودینامیک مقادیر شاخص‌های سنجش خطای الگوریتم‌های محاسبه مقاومت آیرودینامیک

شاخص‌های خطای فصل کشت بهار			شاخص‌های خطای فصل کشت پاییز			الگوریتم‌های مقاومت آیرودینامیکی
MPE (%)	MBE (s m ⁻¹)	RMSE (s m ⁻¹)	MPE (%)	MBE (s m ⁻¹)	RMSE (s m ⁻¹)	
-۶/۱۲	۱/۱۷	۴/۴۱	-۱۵/۹۳	-۰/۴۸	۲/۶۵	پنمن
-۹/۳۳	۲/۱۶	۴/۶۰	-۲۱/۸۹	-۰/۱۵	۲/۴۷	وینی
-۸/۰۸	۱/۹۷	۴/۵۹	-۱۷/۳۴	-۰/۴۲	۲/۶۴	زی
-۲۱/۴۹	۳/۷۶	۵/۶۵	-۳۸/۳۶	۰/۵۹	۲/۳۰	مارت و اک
-۱۵/۶۲	۳/۰۳	۵/۱۵	-۲۸/۹۶	۰/۲۱	۲/۳۴	ورما
-۱۰/۸۰	۲/۳۶	۴/۶۴	-۲۷/۰۳	۰/۱۴	۲/۳۳	چادوری
-۸/۱۳	۱/۹۷	۴/۵۲	-۱۹/۵۰	-۰/۲۵	۲/۵۱	تام



نگاره ۷- مقایسه‌ مقادیر تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر با مقدار محاسبه‌شده از روش‌های

مختلف، فصل کشت پاییز



نگاره ۸- مقایسه‌ مقادیر تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار اندازه‌گیری شده از لایسیمتر با مقادیر محاسبه‌شده با روش‌های

مختلف، فصل کشت بهار

یافته‌ها

هدف اصلی در این تحقیق، اندازه‌گیری تبخیر - تعرق واقعی گیاه دارویی همیشه‌بهار در دو فصل کشت با استفاده از لایسیمتر زهکش دار و همچنین محاسبه مقاومت سطحی و مقاومت آبرودینامیک این گیاه بود.

به این منظور، گیاه دارویی همیشه‌بهار در پنج لایسیمتر در منطقه‌ای در ۱۵ کیلومتری شهر کرمان کشت شد. بر این اساس با استفاده از معادله بیلان آب، مقادیر تبخیر - تعرق گیاه دارویی همیشه‌بهار محاسبه شد. سپس با استفاده از مقادیر دمای سطح برآوردشده از تصاویر ماهواره‌ای و با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، مقاومت سطحی و مقاومت آبرودینامیک محاسبه و در نهایت نتایج آن‌ها با استفاده از معادله پنمن - مانیت، ارزیابی شد. نتایج تبخیر - تعرق به‌دست‌آمده از لایسیمترهای کشت‌شده از گیاه دارویی همیشه‌بهار به یکدیگر نزدیک بودند و در هر دو فصل کشت از روند یکسانی پیروی کردند. میزان تبخیر - تعرق در ابتدای دوره کمتر بود و با افزایش سطح پوشش گیاهی، این مقدار افزایش و در نهایت در مرحله پایانی رشد گیاه، این مقدار دوباره کاهش یافت. در تمام لایسیمترها این روند مشخص بود و ادامه داشت. نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های محاسبه مقاومت آبرودینامیک، نشان داد که همه از یک روند کلی پیروی می‌کنند. نتایج حاصل با وجود تفاوت در نوع محصول از نتایج حاصل از پژوهش‌های کلورلی و همکاران (۲۰۱۳)، لیو و همکاران (۲۰۰۷)، هال (۲۰۰۲) و نعمت‌پور و همکاران (۱۳۸۹) پیروی می‌کند و با نتایج حاصل از پژوهش پدرو و همکاران (۱۹۹۴) در برخی نتایج، مغایرت دارد.

ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از مقاومت سطحی و آبرودینامیک با استفاده از معادله پنمن - مانیت و مقایسه آن‌ها با نتایج تبخیر - تعرق حاصل از لایسیمترها نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده، صحت بسیار خوبی داشت و تأییدی بر مقادیر حاصل از هر یک از روش‌های مقاومت آبرودینامیک بود.

نتایج کلی نشان می‌دهد که گیاه دارویی همیشه‌بهار برای کشت مناطق خشک، مناسب است. کشت در این مناطق در فصل پاییز با توجه به پایین‌تر بودن دمای هوا و کاهش شدت تابش، مناسبتر ارزیابی می‌شود و مقادیر تبخیر - تعرق کمتر است. همچنین به مقادیر آب کمتری در طول دوره کشت نیاز است و دوره کوتاهتری را تا زمان رسیدن به مرحله گل‌دهی طی می‌کند. بنابراین با توجه به نتایج حاصل، امکان کشت پاییزه گیاه دارویی همیشه‌بهار در مناطق خشک، فراهم است.

منابع

- ۱- بافکار، ع.، فرهادی، ب. و کریمی، ع. ۱۳۹۲، برآورد ضریب گیاهی ذرت دانه‌ای با استفاده از خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه (مطالعه موردی: ماهیدشت کرمانشاه)، مجله آب و خاک، ۲۷(۴): ۸۳۲ تا ۸۳۸.
- ۲- بختیاری، ب.، خلیلی، ع.، لیاقت، ع. و خانجانی، م. ج. ۱۳۸۸، مقایسه تبخیر - تعرق روزانه با مجموع ساعتی در ایستگاه هواشناسی مرجع کرمان، مجله آب و خاک، ۲۳(۱): ۴۵ تا ۵۶.

۳- شریفی عاشورایی، الف.، روحی‌پور، ح.، عصاره، م. ح.، لباسچی، م. ح.، عباس‌زاده، ب.، نادری، ب. و رضایی سرخوش، م. ۱۳۹۱، تعیین نیاز آبی گیاه دارویی بومادران (*Achillea millefolium L.*) با استفاده از لایسیمتر، فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۲۸(۳): ۴۸۴ تا ۴۹۲.

۴- عابدی کوپایی، ج.، اسلامیان، س. و امیری، م. ح. ۱۳۸۷، مقایسه چهار روش تخمین تبخیر - تعرق سطح مرجع با داده‌های میکرو لایسیمتری در منطقه اصفهان، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه چمران اهواز، ۸ تا ۱۰ بهمن ۱۳۸۷.

۵- فتحعلیان، ف.، نوری امام‌زاده‌ای، م. ر. ۱۳۹۱، تعیین تبخیر - تعرق و ضریب گیاهی با استفاده از میکرو لایسیمتر در شرایط گلخانه، مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، ۱۲: ۱۲۵ تا ۱۳۳.

۶- قمرنیا، ه.، امیری، س. و خرمی وفا، م. ۱۳۹۳، برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی یک جزئی و دو جزئی رزماری (*Rosmarinus officinalis L.*) در اقلیم نیمه خشک، فصلنامه مدیریت آب و آبیاری، ۴(۱): ۳۳ تا ۴۳.

۷- نعمت‌پور، ع.، میرلطیفی، م. و محمدی، ک. ۱۳۸۹، ارزیابی اثر مقاومت آبرودینامیکی و تاج گیاه بر برآورد تبخیر - تعرق مرجع به وسیله معادله پنمن - مانتیس، مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱(۴): ۱۵۶ تا ۱۶۶.

8- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper, 56*, Rome.

9- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A. M. and Hoogenboom, G. (2011) Evaluation of Reference Evapotranspiration Models for a Semiarid Environment Using Lysimeter Measurements. *J. Agr. Sci. Tech*, 13:223-237.

10- Choudhury, B. J., Reginato, R. J. and Idso, S. B. (1986) An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agric, For. Meteorol*, 37: 75° 88.

11- Cleverly, J., Chen, C., Boulain, N., Villalobos-Vega, R., Faux, R., Grant, N., Yu, Q. and Eamus, D. (2013) Aerodynamic Resistance and Penman^o Monteith Evapotranspiration over a Seasonally Two-Layered Canopy in Semiarid Central. *J. Hydrometeorology*, 14: 1562-1570.

12- Frey, C. M. and Parlow, E. (2010) Determination of the Aerodynamic Resistance to Heat using Morphometric Methods. *EARSeL eProceedings*, 9 (2): 52-63.

13- Hall, R. L. (2002) Aerodynamic resistance of coppiced poplar. *Agric For Meteorol*, 114: 83° 102.

14- Liu, S., Lu, L., Mao, D. and Jia, L. (2007) Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrol, Earth Sys Sci*, 11: 769° 783.

15- Mahrt, L. and Ek, M. (1984) The influence of atmospheric stability on potential evaporation. *J Clim Appl Meteorol*, 23: 222-234.

16- Miranda, F. R., Gondim, R. S. and Costa, C. A. G. (2006) Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens L.*). *Agric Water Manag*, 82: 237° 246.

17- Verma, S. B., Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Baradas, M. W. (1976) Resistance-energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. *Agronomy J*, 68, 776 ° 782.

18- Viney, N. R. (1991) An empirical expression for aerodynamic resistance in the unstable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 56:381-393.

19- Xie, X. (1988) An improved energy balance-aerodynamic resistance model used estimation of evapotranspiration on the wheat field. *Acta Meteorology Sinica*, 46: 102° 106.

20- Yarami, N., Kamgar-Haghighi, A. A., Sepaskhah, A. R. and Zand-Parsa, Sh. (2011) Determination of the potential evapotranspiration and crop coefficient for saffron using a water-balance lysimeter. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57 (7): 727-740.

