

ارزیابی و مقایسه مدل های فیزیکی و تجربی برآورد تداوم خیسگی سطح برگ

آذر صحرانورد^{۱*}، نوذر قهرمان^۲ و جواد بذرافشان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، ^۲ استادیار گروه مهندسی آبیاری و ابادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۳/۲۳)

چکیده

تداوم خیسگی برگ (Leaf Wetness Duration) یک پارامتر کلیدی در هواشناسی کشاورزی است که به دلیل دشواری های موجود در اندازه گیری، روش های مختلفی برای برآورد آن با استفاده از داده های هواشناسی توسعه پیدا کرده است. از میان مدل های مختلفی که برای برآورد LWD استفاده می شود مدل های فیزیکی که از اصول شکل گیری شبنم و تبخیر شبنم و بارندگی استفاده می کنند دارای قابلیت انتقال پذیری مکانی زیادی بوده اما اغلب به دلیل پیچیدگی استفاده عملی از آنها دشوار است. در مقابل، مدل های تجربی با وجود محدودیت هایی که دارند بیشتر کاربرد دارند. ساده ترین مدل تجربی تنها از رطوبت نسبی استفاده می کند. هدف این مطالعه ارزیابی کارایی یک مدل تجربی بر مبنای کاربرد رطوبت نسبی و یک رهیافت فیزیکی بر مبنای مدل پنمن - مانیتث در برآورد LWD در ایستگاه سروستان استان فارس است. نتایج نشان می دهند که هر دو مدل آستانه ثابت رطوبتی و مدل فیزیکی در فصول پاییز و زمستان برآورد بهتری از LWD را نسبت به فصول بهار و تابستان دارند. هر دو مدل در فصول گرم دارای کم برآورد LWD می باشند که این مقادیر در فصول سرد توسط مدل تجربی کم برآورد و با مدل فیزیکی بیش برآورد را نشان می دهد و میانگین خطای مطلق MAE در مدل تجربی نسبت به مدل فیزیکی کمتر است. در نهایت تعیین آستانه بهینه برای محل مورد نظر و به کارگیری آن در مدل تجربی آستانه ثابت رطوبتی برآوردها را بهبود می بخشد و LWD را با خطای کمتری نسبت به دو مدل پیشین برآورد می کند. مقایسه ساعتی هر سه مدل نیز برآوردهای بهتر با خطای کمتری را برای مدل آستانه بهینه نشان می دهند.

واژگان کلیدی: رطوبت نسبی، سنسور LWD، آستانه رطوبتی، مدل تجربی، مدل فیزیکی

مقدمه

وقوع بسیاری از بیماری های گیاهی به شرایط جوی، بستگی دارد. این ارتباط، هدایتگر تحقیقات مشترک متعددی بین هواشناسان کشاورزی و گیاه پزشکان در نیمه دوم قرن بیستم بوده است. تداوم خیسگی برگ (LWD) دوره زمانی است که قطرات آب حاصل شبنم، بارندگی، مه و یا آبیاری بر سطوح گیاهان حضور دارند. هدف اصلی برآورد تداوم خیسگی سطح برگ تعیین زمان دقیق بروز بیماری ها اعم از قارچی و باکتریایی است که با توجه به دیگر شرایط جوی از جمله دما به ارائه برنامه زمان بندی مناسب برای کنترل شیمیائی و تعداد دفعات آن می پردازد که نتیجه آن کاهش هزینه ها برای تولیدکننده و کاهش خسارات محیطی ناشی از دفعات مکرر از مواد شیمیائی است. خیسگی سطح برگ، همچنین می تواند در اندازه گیری های رطوبت خاک و دمای سطح کانوپی که توسط امواج طول موج کوتاه ماهواره ای انجام می گیرند اختلال ایجاد کند (Basist et al., 1998). علاوه بر همه موارد فوق، خیسگی برگ نقش مهمی در فرایند نشست برخی گازهای شاخص اتمسفری با قابلیت انحلال بالا در آب داشته و در نشست آلودگی های جوی بر برگها مؤثر است (Wichink Kruit, 2008). Van Hove et al. (1989) اهمیت غشاهای آبی را در جذب سطحی گازهای NH₃ و SO₂ در سطح برگ نشان دادند. میزان جذب سطحی قویاً با افزایش رطوبت هوا افزایش می یابد و مشخص می کند که آب سطح برگ نقش اساسی در برهم کنش های بین این گازها با سطح برگ دارد. وجود رطوبت در سطح گیاهان، بر بیلان آبی گیاهان بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک تأثیرگذار است. عوامل ایجاد کننده خیسگی برگ شامل بارندگی، مه، آبیاری، نشست شبنم از جو و یا فرایند تقطیر از خاک است. شبنم، اساساً اصلی ترین ایجاد کننده خیسگی برگ است که عموماً به وسیله انتقال تلاطمی در طول شب، زمانی که سطح برگ سردتر از دمای نقطه شبنم هوای مجاور باشد رخ می دهد (Monteith, 1957). این فرایند نتیجه فقدان تابش حرارتی از سطوح گیاهی به آسمان صاف در طول شب های آرام است و به

وقوع بسیاری از بیماری های گیاهی به شرایط جوی، بستگی دارد. این ارتباط، هدایتگر تحقیقات مشترک متعددی بین هواشناسان کشاورزی و گیاه پزشکان در نیمه دوم قرن بیستم بوده است. تداوم خیسگی برگ (LWD) دوره زمانی است که قطرات آب حاصل شبنم، بارندگی، مه و یا آبیاری بر سطوح گیاهان حضور دارند. هدف اصلی برآورد تداوم خیسگی سطح برگ تعیین زمان دقیق بروز بیماری ها اعم از قارچی و باکتریایی است که با توجه به دیگر شرایط جوی از جمله دما به ارائه برنامه زمان بندی مناسب برای کنترل شیمیائی و تعداد دفعات آن می پردازد که نتیجه آن کاهش هزینه ها برای تولیدکننده و کاهش خسارات محیطی ناشی از دفعات مکرر از مواد شیمیائی است. خیسگی سطح برگ، همچنین می تواند در اندازه گیری های رطوبت خاک و دمای سطح کانوپی که توسط امواج طول موج کوتاه ماهواره ای انجام می گیرند اختلال ایجاد کند (Basist et al., 1998). علاوه بر همه موارد فوق، خیسگی برگ نقش مهمی در فرایند نشست برخی گازهای شاخص اتمسفری با قابلیت انحلال بالا در آب داشته و در نشست آلودگی های جوی بر برگها مؤثر است (Wichink Kruit, 2008). Van Hove et al. (1989) اهمیت غشاهای آبی را در جذب سطحی گازهای NH₃ و SO₂ در سطح برگ نشان دادند. میزان جذب سطحی قویاً با افزایش رطوبت هوا افزایش می یابد و مشخص می کند که آب سطح برگ نقش اساسی در برهم کنش های بین این گازها با سطح برگ دارد. وجود رطوبت در سطح گیاهان، بر بیلان آبی گیاهان بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک تأثیرگذار است. عوامل ایجاد کننده خیسگی برگ شامل بارندگی، مه، آبیاری، نشست شبنم از جو و یا فرایند تقطیر از خاک است. شبنم، اساساً اصلی ترین ایجاد کننده خیسگی برگ است که عموماً به وسیله انتقال تلاطمی در طول شب، زمانی که سطح برگ سردتر از دمای نقطه شبنم هوای مجاور باشد رخ می دهد (Monteith, 1957). این فرایند نتیجه فقدان تابش حرارتی از سطوح گیاهی به آسمان صاف در طول شب های آرام است و به

* نویسنده مسئول: Sahraazar@ut.ac.ir

عنوان ورودی دارد و این مدل‌ها نسبت به مدل‌های فیزیکی بیشتر وابسته به محلی هستند که برای آن توسعه پیدا کرده‌اند (Kim et al., 2005). این مدل‌ها عموماً شامل مقادیر آستانه برای یک یا چندین متغیر وابسته هستند که این مقادیر آستانه از مکانی به مکان دیگر تغییر کرده و نیاز به بهینه‌سازی برای شرایط مختلف محلی دارند. بیشتر پیشرفت‌های مهم در زمینه تحقیقات LWD پس از سال ۱۹۴۰ رخ داده است. توسعه‌های اولیه همراه با درک فیزیکی طبیعت تبخیر و شکل‌گیری شبنم بود و ابزارهای دقیق و مدل‌هایی برای برآورد دوره خیزی سطح برگ از منابع اطلاعاتی مختلف بدست آمد.

به دلیل محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌های دوره خیزی سطح برگ، تلاش‌های بسیاری در جهت رفع این مشکلات انجام شده است. از سال ۱۹۸۰، مدل‌های شبیه‌سازی با پیروی از رهیافت‌های مختلف فیزیکی و تجربی توسعه پیدا کرده‌اند. مدل‌های بر مبنای تعداد ساعات با رطوبت نسبی بیش از یک آستانه خاص معمولترین مدل‌های تجربی هستند که LWD را برآورد می‌کنند. ارزیابی این مدل‌ها نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند. Gleason et al. (1994) از مقایسه LWD اندازه‌گیری شده بوسیله سنسورها و مقادیر برآورد شده بوسیله مدل آستانه رطوبت نسبی بیش از ۹۰ درصد نشان دادند که خطای مرتبط با این مدل تجربی، ۴۰ درصد بزرگتر از خطای بدست آمده در حالت استفاده از مدل درخت تصمیم CART و همچنین از مدل کمبود نقطه اشباع (DPD) و داده‌های سرعت باد می‌باشد. مدل CART یک روش طبقه‌بندی غیر پارامتری است که در برآورد دوره خیزی سطح برگ بر اساس مقادیر آستانه معین سرعت باد، کمبود نقطه اشباع، دمای هوا و رطوبت نسبی عمل می‌کند. مدل کمبود نقطه اشباع با استفاده از تفاضل مقادیر دما و دمای نقطه شبنم آستانه‌هایی تعریف می‌کند که بر اساس آنها رخداد خیزی تعریف می‌شود. نتایج مشابهی توسط Francl and Panigrahi (1997) برای محصول گندم بدست آمد.

Rao et al. (1998) کمیت LWD را در مزارع ذرت در کانادا و Sentelhas et al. (2004) در یک مزرعه پنبه در برزیل به کمک دو مدل آستانه ساده و فیزیکی برآورد کردند. بر طبق نتایج، مدل‌های آستانه ساده رطوبت نسبی از برآوردهای مدل‌های پیچیده فیزیکی دقت بیشتری داشتند. Gillespie et al. (1993) نیز نتایج خوبی در برآوردهای LWD با استفاده از مدل کمبود اشباع بدست آوردند.

Kim et al. (2005) قابلیت تغییرپذیری مکانی دو مدل تجربی برآورد LWD را بر مبنای مدل درخت تصمیم

همین دلیل تابش، در بسیاری از مدل‌های فیزیکی شبیه‌سازی رخداد خیزی برگ به عنوان یک داده ورودی با اهمیت است (Luo and Goudrian, 2000).

برآورد تداوم خیزی برگ، به دلیل برهمکنش‌های بین جو، موقعیت و آرایش برگ‌ها، ساختار کانوپی و خرد اقلیم دشوار است. این برهمکنش‌های پیچیده-بوژه در مقیاس خرد اقلیمی زمانی که سنسورهای الکترونیکی اندازه‌گیری LWD در ایستگاه‌های استاندارد هواشناسی خارج از محل کشت گیاه نصب می‌شوند لحاظ نمی‌شود. به عبارت دیگر اندازه‌گیری تداوم خیزی برگ می‌بایست توسط سنسور نصب شده درون مزرعه انجام شود و به موقعیت سنسور درون کانوپی، زاویه نصب و برهم‌کنش‌های آن با برگ‌های مجاور نیز توجه کرد (Lau et al., 2000). سنسورها، اغلب دقت و صحت متفاوتی دارند و به دلیل شرایط اندازه‌گیری متغیر، داده‌ها ممکن است به تفسیر بیشتر نیاز داشته باشند (Magarey et al., 2005). تلاش‌های بسیاری در جهت رفع مشکلات مربوط به اندازه‌گیری تداوم خیزی برگ انجام شده است. مروری بر تحقیقات گذشته حاکی از توسعه حداقل ۱۶ مدل شبیه‌سازی خیزی سطح برگ می‌باشد.

مدل‌ها به دو شاخه تجربی (Gleason et al., 1994) و فیزیکی (Pedro and Gillespie, 1982) بر مبنای معیارهای کشاورزی و هواشناسی کشاورزی تقسیم‌بندی شده‌اند. علاوه بر این رهیافتها، تلاش‌هایی برای ایجاد رهیافت‌های ترکیبی مانند شبکه عصبی مصنوعی (Francl and Panigrahi, 1997) و منطق فازی که از اصول فیزیکی در ترکیب با مدل‌های تجربی استفاده می‌کنند، صورت گرفته است (Kim et al., 2005).

مبنای مدل‌های فیزیکی بر اصول بیلان انرژی استوار است. انرژی قابل دسترس برای فرآیندهای تبخیر و تراکم توسط داده‌های تابش خالص و پوشش ابر برای اندازه‌گیری شار حرارت نهان و محسوس محاسبه می‌شوند (Pedro and Gillespie, 1982). این مدل‌ها می‌توانند بسیار دقیق و دارای قابلیت انتقال به مناطق اقلیمی و جغرافیایی مختلف باشند اما محدودیت‌هایی برای این مدل‌ها وجود دارد. به عنوان مثال ابزارهایی که تابش خالص را اندازه‌گیری می‌کنند گران‌قیمت هستند و نگهداری از آنها دشوار است (Sentelhas and Gillespie, 2008). همچنین مدل‌های فیزیکی به متغیرهای ورودی مانند پوشش ابر، که بر مبنای مشاهدات عینی و همراه با خطا می‌باشد نیاز دارند.

مدل‌های تجربی می‌توانند LWD را با استفاده از روابط ساده این متغیر با پارامترهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی استاندارد برآورد نمایند. موفقیت این مدل‌ها بستگی به دقت داده‌های هواشناسی استفاده شده به

خیسی، Hubert and Itier (1990) و Jacobs et al. (1994) در مورد خشک شدن قطرات منفرد آب و Luo and Goudriaan (2000) در یک شالیزار که فرآیند تعریق رخ می‌داد به انجام رسیده است. نتایج این تحقیقات حاکی از این هستند که دوره خیسی برگ، بیشترین ناهمگنی مکانی را در میان ورودی‌های هواشناسی در سیستم‌های هشدار دهنده دارد. این تغییرپذیری تنها مربوط به شرایط هواشناسی نیست بلکه بستگی به نوع محصول، مرحله رشد و موقعیت گیاه زراعی، زاویه و هندسه برگ‌های گیاه دارد (Sutton et al., 1984).

هدف این مطالعه، ارزیابی مدل تجربی آستانه ثابت رطوبتی و مدل فیزیکی پنمن - مانیتیت در برآورد تداوم خیسی برگ در مقایسه با سنسور اندازه‌گیری خودکار خیسی برگ در ایستگاه سروستان استان فارس است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

در انجام این طرح، داده‌های هواشناسی در مقیاس ساعتی در سایت مجهز به ایستگاه هواشناسی خودکار واقع در استان فارس، بخش سروستان به همراه متغیر تداوم خیسی برگ جمع آوری گردید. شهرستان سروستان یکی از شهرستان‌های استان فارس واقع در مرکز این استان می‌باشد که در عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۱۱ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۱ دقیقه در ارتفاع ۱۵۳۴ متری از سطح دریا قرار دارد. مرکز این شهرستان، شهر سروستان، در ۸۰ کیلومتری جنوب شرق شیراز واقع است. منطقه سروستان قطب بزرگ کشت محصولات باغی و زراعی همچون پسته، زیتون، گندم، یونجه و ... است. برای انجام این تحقیق، از داده‌های یک ایستگاه خودکار واقع در یکی از باغات موجود در این شهرستان استفاده شده است. سنسور استفاده شده برای اندازه‌گیری طول دوره‌های خیسی برگ، سنسور LWS (شکل ۱) ساخت شرکت Scientific Campbell می‌باشد. ابعاد این سنسور $۰/۷۵\text{cm} \times ۵/۸\text{cm} \times ۱۱/۲\text{cm}$ است. این سنسور برگ مانند قادر است کوچکترین مقادیر آب یا یخ را بر روی سطح خود ثبت کند. این سنسور با دیتالاوگرهای (Datalogger)، 5-Channel Em50 یا Em50R شرکت دکاگون قابلیت انطباق دارد. در محل مورد نظر، یک ایستگاه خودکار هواشناسی نصب شده است که کلیه داده‌های مورد نیاز برای استفاده در مدل‌های تجربی و فیزیکی مانند دما، رطوبت نسبی، تابش ورودی، فشار، سرعت باد و غیره را به عنوان ورودی به صورت ساعتی فراهم می‌کند. فاصله زمانی اندازه‌گیری این متغیرها در ایستگاه مورد نظر به صورت نیم ساعتی بود. برای

Gleason et al. (1994) و مدل منطق فازی Kim et al. (2004) از یک اقلیم معتدل در مرکز آمریکا به یک اقلیم گرمسیری در شمال غرب کاستاریکا مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مدل CART قابل تعمیم به یک منطقه جدید نبود در عین حال مدل منطق فازی دارای کم برآورد LWD در طی فصول خشک بود که دلیل اصلی آن می‌تواند خطاهای مربوط به برآورد تابش خالص ساعتی باشد. Sentelhas (2004) با استفاده از همان مدل CART نتایج خوبی در طی فصل مرطوب در جنوب شرق برزیل بدست آورد.

Wichink Kruit et al. (2004) چهار مدل برآورد LWD را در هلند مورد بررسی قرار دادند. دو مدل بر مبنای مدل‌های فیزیکی پیشنهادی توسط Garrat and Segal (1988) و Pedro and Gillespie (1982) و دو مدل دیگر یکی بر مبنای آستانه ساده (۸۷٪) و دیگری آستانه توسعه یافته که آن هم از یک مقدار آستانه ۸۷٪ استفاده می‌کرد که نتایج آن مطابق تغییرات در رطوبت نسبی بدست می‌آمد. این تحقیق نشان داد که برای همه شرایط مورد آزمایش، مدل آستانه توسعه یافته بهترین کارآئی را داشت و افزایش نسبت برآوردهای صحیح به بیش از ۹۰٪ ساعات مورد ارزیابی رسیده بود. نتایج همه این مطالعات نشان می‌دهند که کارآئی مدل‌های مختلف برآورد LWD از محلی به محل دیگر متفاوت است بنابراین برآوردها باید برای هر منطقه مطابق شرایط اقلیمی آن منطقه واسنجی شوند.

بر اساس تحقیقات گذشته تلاش‌های قابل توجهی برای افزایش دقت سنسورهای اندازه‌گیری LWD صورت گرفته اما تحقیقات اندکی در زمینه تغییرپذیری متغیر دوره خیسی برگ در بخش‌های مختلف کانوپی انجام گرفته است. بیشتر مطالعات پیشین، این متغیر را در بخش‌های بالایی کانوپی (Wittich (1995)) و یا تنها در پایین آن (Sentelhas (2004)) اندازه‌گیری کرده‌اند. در حالیکه برای مثال مشخص شده است که LWD درون کانوپی می‌تواند طولانی‌تر یا کوتاه‌تر از بالای آن باشد که بستگی به ویژگی‌های ساختاری کانوپی و متناوباً شرایط خرداقلیمی آن دارد (Monteith and Unsworth, 1990).

مدل‌های شبیه‌سازی خیسی برگ، در ترکیب با دانش مربوط به بیماری‌های گیاهی می‌توانند برای برنامه‌ریزی‌های کاربردی قارچ‌کش‌ها و سموم دفع آفات مورد استفاده قرار گیرند. تحقیقات زیادی برای برآورد دوره خیسی برگ بوسیله Beysens (1995) برای برگ‌های مصنوعی، Pedr and Gillespie (1982) برای برگ‌های بالای یک کانوپی، Barr and Gillespie (1987) برای آزمایش سنسورهای اندازه‌گیری

مدل فیزیکی

برای اجرای مدل فیزیکی ابتدا باید تابش خالص ورودی از روابط موجود محاسبه گردد به همین منظور از مدلی که توسط Maderia (2002) توسعه یافته استفاده گردید.

برآورد تابش خالص ساعتی

این مدل بر اساس تفاوت ظاهری آسمان و قابلیت نشر (ε) برای آسمان صاف Gats (1980) است.

$$\varepsilon_{clear} = 0.674 + 0.006 \times T \quad (1)$$

T: دما بر حسب °C

و برای آسمان‌های ابری رابطه به صورت زیر می‌باشد (Monteith and Unsworth, 1990):

$$\varepsilon_{cloudy} = (1 - CC) \times \varepsilon_{clear} + [1 - (1 - \varepsilon_{clear}) \times \frac{4 \times \Delta T}{T}] \quad (2)$$

CC کسری از آسمان است که بوسیله ابر پوشیده شده و ΔT تفاوت بین دمای پایه ابر و دمای هواست (که ۵ °C فرض می‌شود).

Ld تابش طول موج بلند به سمت پایین است که با استفاده از معادله استفان - بولتزمن محاسبه می‌شود:

$$Ld = 5.67 \times 10^{-8} \times \varepsilon_{cloudy} \times (273 + T)^4 \quad (3)$$

و Lu تابش طول موج بلند به سمت بالا و Rn تابش خالص با استفاده از معادلات ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند

$$Lu = 5.67 \times 10^{-8} \times (273 + T_d)^4 \quad (4)$$

T_d دمای نقطه شبنم (°C)

$$Rn = 0.7 \times Rg + Ld - Lu \quad (5)$$

Rn تابش خالص ساعتی و Rg تابش کل ورودی بر حسب wm^2 .

برآورد تداوم خیسگی سطح برگ (مدل پنمن - مانیتیت)

مدل پنمن - مانیتیت برای برآورد شار حرارت نهان تبخیر (LE) که برای اندازه‌گیری دوره خیسگی برای یک سنسور روی سطح چمن استفاده شده است به کار گرفته شد (Rao et al., 1998).

شار حرارت نهان تبخیر (LE) برای یک برگ مصنوعی با معادله زیر محاسبه شد (Monteith and Unsworth, 1990):

$$LE = - \frac{\{sRn + [\frac{1200(es_{Ta} - e_a)}{r_b}]\}}{(s + Y^*)} \quad (6)$$

s = شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{hpa}^\circ\text{C}^{-1}$)

es_{Ta} = فشار بخار اشباع در دمای هوای ایستگاه هواشناسی (hpa)

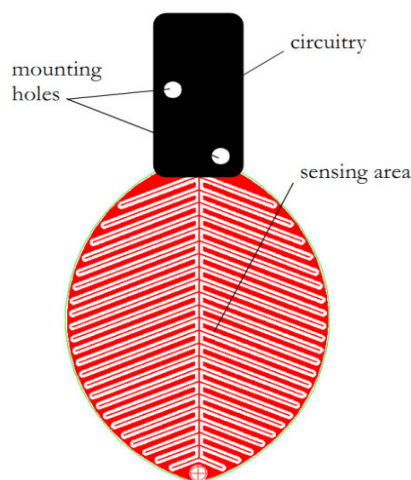
e_a = فشار بخار واقعی هوا (hPa)

Y^* = ضریب اصلاح شده سایکرومتری

r_b = مقاومت لایه مرزی برای انتقال حرارت است (sm^{-1}) که به

وسیله Monteith and Unsworth (1990) ارائه شده است:

برآورد تابش خالص ساعتی به عنوان یکی از ورودی‌های مدل فیزیکی، داده‌های پوشش ابر مربوط به استان فارس، شهرستان شیراز در عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۲ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۶ دقیقه که در ارتفاع ۱۴۸۴ متری از سطح دریا قرار دارد، از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. داده‌های به کار گرفته شده در این تحقیق مربوط به دوره آماري ۲۰۰۷-۲۰۰۸ بوده است. به منظور آماده‌سازی داده‌ها، کنترل کیفی بر روی این داده‌ها انجام گردید و داده‌های ناهمخوان با سایر داده‌ها حذف شد.



شکل ۱ - سنسور دی الکتریک خیسگی برگ

تشریح مدل‌ها

مدل آستانه ثابت رطوبتی

در این روش موسوم به آستانه ثابت RH، فرض می‌شود که LWD برابر با تعداد ساعاتی است که رطوبت نسبی بزرگتر یا مساوی با یک آستانه ثابت است. آستانه‌های رطوبت نسبی، بویژه تعداد ساعات با رطوبت برابر یا بیشتر از ۹۰ درصد به عنوان یک نماینده مناسب برای خیسگی سطح برگ در مدیریت بیماری‌ها به حساب می‌آیند. Van Jaarsveld (2004) از یک مقدار آستانه ۸۷ درصدی در یک مدل انتقال اتمسفری در هلند استفاده کرد. این مقدار در ابتدا از اندازه‌گیری‌های خیسگی در جنگل‌های سپیدار نشأت گرفت و بعداً برای همه انواع گیاهان به کار گرفته شد. Rao et al. (1998) با برآورد LWD در مزرعه ذرت در کانادا و Sentelhas et al. (2004) در یک مزرعه کتان در برزیل نشان دادند که برآوردهای تداوم خیسگی از مدل‌های ساده آستانه رطوبتی بر مبنای رطوبت نسبی می‌تواند بسیار دقیق‌تر از بسیاری از مدل‌های پیچیده فیزیکی باشد. در این مطالعه، ابتدا از یک مقدار آستانه رطوبتی برابر و بزرگتر از ۸۷ درصدی پیشنهاد . Wichink Kruit et al (2008) استفاده شد و سپس یک آستانه بهینه برای ایستگاه مورد نظر ارائه گردید.

$$D = 1 - \left\{ \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (|P_i - O_m| |O_i - O_m|)^2} \right\} \quad (8)$$

$$ME = \frac{\sum (P_i - O_i)}{N} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{N} \quad (10)$$

$$MAXE = MAX(|P_i - O_i|) \quad (11)$$

که در روابط بالا

P_i = LWD برآورد شده

O_i = LWD اندازه‌گیری شده

O_m = میانگین LWD اندازه‌گیری شده

N = تعداد کل داده‌ها

داده‌های LWD همچنین در فواصل زمانی مشخص (۳۰ دقیقه) براساس طبقه بندی خیسی یا خشکی با استفاده از جدول وابستگی Wilks (1995) که در جدول ۱ ارائه می‌شود آنالیز شدند.

مطابق جدول (۱) وقتی پیش‌بینی‌ها درست هستند دو وضعیت مختلف پیش می‌آید یکی موفقیت (hit) در این حالت هم مدل و هم داده‌های مشاهداتی رخداد خیسی را پیش‌بینی می‌کنند حالت دیگر، زمانی است که مدل عدم وجود خیسی را بدرستی پیش‌بینی کرده است (correct rejection) و دو حالت دیگر مربوط به زمانی است که پیش‌بینی‌ها نادرست هستند، یکی زمانی است که مدل خیسی را پیش‌بینی کرده اما خیسی رخ نداده است (False alarm) و در حالت (Miss) مدل خیسی را پیش‌بینی نکرده اما خیسی رخ داده است. یک سیستم پیش‌بینی بی‌عیب تنها قسمت (a) hit و (d) correct rejection را دارد و سلول‌های دیگر آن (b) و (c) صفر هستند. با ترکیب چهار کلاس مختلف این جدول، رتبه‌های آماری مختلفی را می‌توان محاسبه کرد که ما را قادر می‌سازد تا در مورد کارایی مدل قضاوت کنیم. رتبه‌های آماری به کار گرفته شده بطور خلاصه در ادامه ارائه شده است.

اریب بودن (bias) فراوانی مدل را (Pm) با فراوانی مشاهدات (Po) خیسی برگ مقایسه می‌کند و به وسیله معادله ۱۲ محاسبه می‌شود. دامنه B از صفر تا بی‌نهایت است و یک رتبه ناریبی برابر یک است. اگر اریب بیشتر از یک باشد تعداد رخدادها با بیش برآورد همراه است. اریب کوچکتر از یک بدین معنی است که مدل رخدادها را کم برآورد کرده است. بنابراین یک روش خوب می‌بایست اریب نزدیک به یک داشته باشد

$$r_b = 307 \left(\frac{d}{u} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

d = بعد مؤثر برگ مصنوعی

u = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ایستگاه هواشناسی (ms⁻¹).

ماکزیمم ظرفیت نگهداری برگ مصنوعی برای شبنم حدود ۰/۶ میلی‌متر مطرح شده است. وقتی بارندگی وجود دارد خیسی شروع می‌شود و یا افزایش پیدا می‌کند و به منبع گرمای نهان تبخیر مثبت تا حدود ۰/۴ میلی‌متر اضافه می‌شود. مدل، جذب بارندگی را با استفاده از میزان بارندگی اندازه‌گیری شده و یک مقدار ماکزیمم ثابت آب برای ذخیره بارندگی (۰/۴ میلی‌متر) ساده‌سازی می‌کند. این ساده‌سازی، تأثیر سرعت بارندگی را بر جذب نادیده می‌گیرد اما از آنجائیکه میزان ماکزیمم جذب آب خیلی اندک است خطای جدی ایجاد نمی‌کند. با استفاده از همین مدل که با یافته‌های Pedro Gillespie and (1982) مطابقت دارد آغاز و پایان خیسی در این مدل اینگونه محاسبه می‌شود:

(۱) شروع خیسی زمانی است که $LE > 0$ باشد و یا بارندگی شروع شود.

(۲) پایان خیسی زمانی رخ می‌دهد که تراکم و یا بارندگی تجمعی برآورد شده بوسیله مدل با میزان تبخیر برابر تحلیل رود.

آنالیز آماری داده‌ها

تداوم خیسی برگ تعداد ساعات بین ساعت ۱۳ روز n ام و ۱۲ روز n+1 ام است که مدل حضور خیسی را برآورد می‌کند. دوره‌های روزانه که از ساعت ۱۳ شروع می‌شود از تقسیم ساعات نشست شبنم در نیمه شب جلوگیری می‌کنند. داده‌های LWD مشاهده شده و برآورد شده با آنالیز رگرسیونی خطی با یکدیگر مقایسه شدند و کارایی مدل‌ها به وسیله شاخص‌های آماری و خطاهای اندازه‌گیری شده که در ادامه ذکر می‌شود ارزیابی شدند. ضریب تبیین (R^2) که دقت برآوردها را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، شاخص توافق (Willmott et al., 1985) (D) از دامنه صفر (بدون توافق) تا یک (با توافق کامل) بر اساس رابطه (۸) میزان درستی و صحت برآوردها را نشان می‌دهد. خطاهای برآورد شده نیز با شاخص‌های زیر اندازه‌گیری شدند: متوسط خطا (Mean error) که جهت تمایل خطا را تشریح می‌کند (۹)، میانگین خطای مطلق (Mean absolute error) که بزرگی میانگین خطا را نشان می‌دهد (۱۰) و ماکزیمم خطای مطلق (Maximum error) بر اساس رابطه (۱۱) بدست می‌آید...

آستانه‌ها در مدل‌های تجربی تغییر رتبه‌های آماری مطابق با جدول ویلکز است با تغییر آستانه RH می‌توان یک آستانه بهینه برای این متغیر پیدا کرد. برای این کار نموداری رسم می‌شود که محور xهای آن مقادیر اریب بودن و محور yهای آن مقادیر PC است. آستانه بهینه آستانه‌ای است که مقدار اریب آن نزدیک یک باشد و PC می‌بایست در بالاترین مقدار ممکن باشد.

نتایج و بحث

مقایسه روزانه

رابطه بین LWD برآورد شده و اندازه‌گیری شده در شکل (۱) با آنالیز رگرسیونی نشان داده شده است. برای ایستگاه مورد نظر دو فصل گرم (آوریل تا سپتامبر) و سرد (اکتبر تا مارس) در نظر گرفته شد. آستانه ۸۷ درصدی در فصول پاییز و زمستان با ضریب تبیین ۰/۷۴۳ نتیجه بهتری نسبت به تابستان نشان می‌دهد. در فصول گرم و سرد به دلیل تفاوت دمای هوا و تفاوت در ظرفیت رطوبت پذیری جو آستانه‌های رطوبت نسبی نیز دارای مقادیر متفاوت خواهد بود. از آنجائیکه یکی از مهمترین ویژگی‌های مدل‌های تجربی وابسته به مکان بودن آنهاست به همین منظور آستانه بهینه برای محل مورد نظر تعیین شد. شکل (۲) روش تعیین آستانه بهینه را نشان می‌دهد. مطابق شکل برای فصول پاییز و زمستان رطوبت نسبی ۸۱ درصدی در بیشترین PC و اریب آن به یک نزدیکتر است و برای ماه‌های بهار و تابستان آستانه بهینه ۶۸ درصد است. شکل (۳) رابطه رگرسیونی LWD برآورد شده و اندازه‌گیری شده را با آستانه بهینه نشان می‌دهد.

شکل (۳) نشان می‌دهد، رابطه بین LWD برآورد شده و اندازه‌گیری شده نسبت به حالت قبل اصلاح شده و در هر دو فصول گرم و سرد ضریب تبیین بالاتری دارند.

یعنی وقتی برابر یک است نشان‌دهنده عدم تمایل و یا ناریبی است.

$$B = (a + b) / (a + c) = pm / Po \quad (12)$$

جدول ۱- جدول وابستگی بین مشاهدات و مدل تداوم خیسگی سطح برگ

خیسی مشاهدات		عدم خیسگی مشاهدات	
خیسی مدل	Hit (a)	False Alarm (b)	pm
عدم خیسگی مدل	Miss (c)	Correct Rejection (d)	1-pm
	Po	1-Po	

Pm: رخدادهای مدل، Po: رخدادهای مشاهده شده، n: تعداد کل رخدادها

PC (Proportion Correct) بیشترین اطلاعات را در مورد دقت یک سیستم پیش‌بینی ارائه می‌دهد که از رابطه ۱۳ به دست می‌آید. دامنه PC از صفر تا یک است و یک رتبه مناسب آن برابر با یک است. این رتبه می‌بایست در بالاترین مقدار قرار داشته باشد. اما مقدار ماکزیمم آن برابر با یک است. بنابراین این رتبه برای مدل‌های دقیق‌تر می‌بایست در بالاترین حد ممکن باشد.

$$PC = (a + d) / n \quad (13)$$

FAR (False Alarm Ratio) که از فرمول ۱۴ محاسبه می‌شود و این رتبه از صفر تا یک تغییر می‌کند. می‌بایست برای مدل‌های دقیق‌تر در کمترین مقدار ممکن باشد و رتبه کامل آن صفر است.

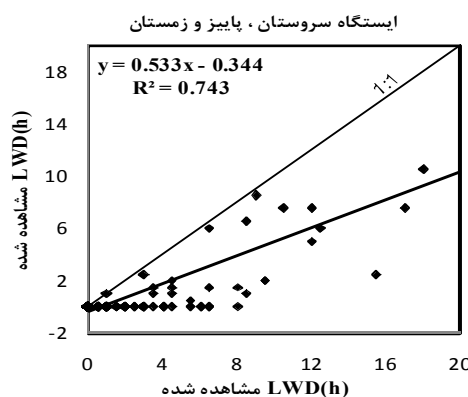
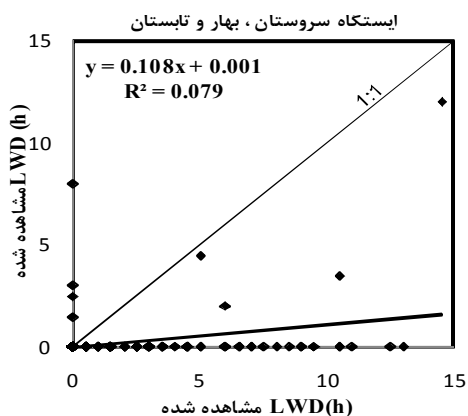
$$Far = a / (a + b) \quad (14)$$

POD (Probability of Detection) نسبت رخدادهای مشاهده شده‌ای است که به درستی پیش‌بینی شده‌اند و مطابق فرمول ۱۵ محاسبه می‌شود، دامنه POD بین صفر تا یک است و رتبه مناسب آن یک است.

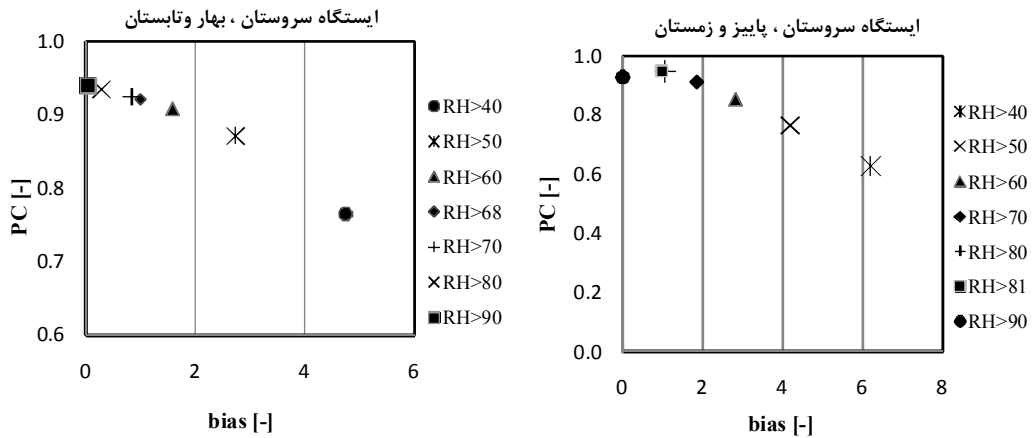
$$POD = a / (a + c) \quad (15)$$

تعیین آستانه بهینه رطوبتی

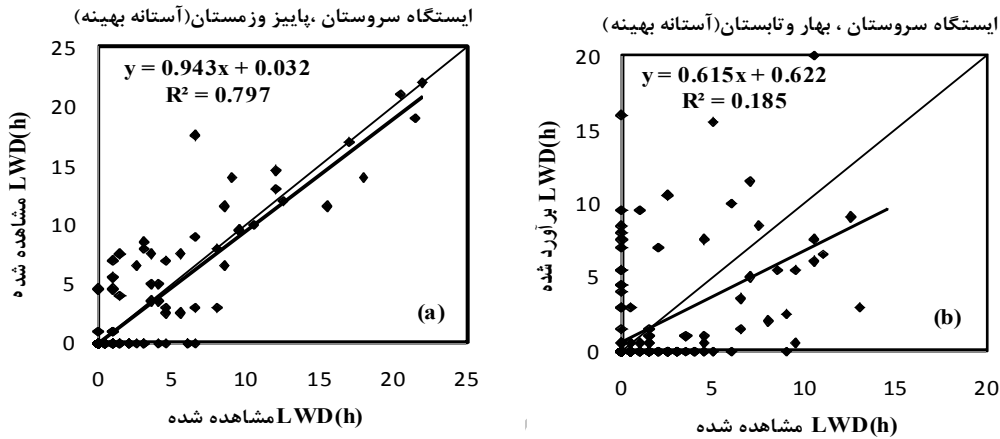
برای تعیین آستانه بهینه برای ایستگاه مورد نظر از روش Wichink Kruit et al. (2008) استفاده گردید نتیجه تغییر



شکل ۱- مقایسه روزانه LWD برآورد شده با اندازه‌گیری شده، مدل آستانه ثابت رطوبتی ۸۷٪.



شکل ۲- رتبه‌های آماری "PC" (محور y) و "bias" (محور x) برای آستانه‌های مختلف رطوبت نسبی ایستگاه سروستان



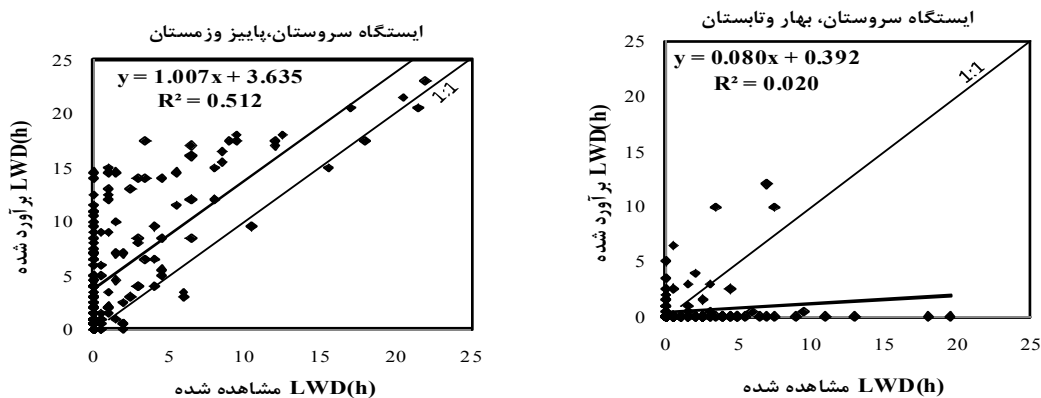
شکل ۳- رابطه بین LWD اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل آستانه رطوبتی با آستانه بهینه، (a) آستانه ۸۱٪، (b) آستانه ۶۸٪

جدول ۲- آنالیز آماری بین آستانه ۸۷ درصدی و آستانه بهینه و مدل فیزیکی ایستگاه سروستان در فصول پاییز و زمستان

مدل	ضریب تبیین	ضریب همبستگی	شاخص توافق	متوسط خطا	متوسط خطای مطلق	ماکزیمم خطا
آستانه رطوبتی ۸۷٪	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۸۵	-۱/۲۹	۱/۲۹	۱۳
آستانه رطوبتی ۸۱٪	۰/۸	۰/۸۹	۰/۹۳	-۰/۰۸	۰/۹۶	۱۱
فیزیکی	۰/۵۱	۰/۷۲	۰/۵۱	۳/۶۳	۳/۸	۱۴/۵

جدول ۳- آنالیز آماری بین آستانه ۸۷ درصدی و آستانه بهینه و مدل فیزیکی ایستگاه سروستان در فصول بهار و تابستان

مدل	ضریب تبیین	ضریب همبستگی	شاخص توافق	متوسط خطا	متوسط خطای مطلق	ماکزیمم خطا
آستانه رطوبتی ۸۷٪	۰/۰۸	۰/۲۸	۰/۲۷	-۱/۴۱	۱/۵۵	۱۳
آستانه رطوبتی ۸۱٪	۰/۱۹	۰/۴۳	۰/۶۳	-۰/۰۱	۱/۹۴	۲۱
فیزیکی	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۴۲	-۱/۰۹	۱/۷۲	۱۹/۵



شکل ۴- رابطه رگرسیونی LWD اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل فیزیکی ایستگاه سروستان

با چه دقتی دوره‌های خیزی و خشکی را برآورد می‌کند. جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهند در فصول بهار و تابستان مدل آستانه ۸۷ درصدی با وجود داشتن PC بیشتر نسبت به دو مدل دیگر دارای اریب حدود ۰/۱۱ است که نشان دهنده کم برآورد کردن خیزی توسط این مدل است. از طرفی نسبت مشاهدات صحیح (POD) در مدل آستانه بهینه بیش از مدل آستانه ثابت و در مدل فیزیکی از هردوی آنها بیشتر است. به دلیل بالاتر بودن اریب در مدل فیزیکی، بیش برآورد برای این مدل نسبت به مدل آستانه بهینه وجود دارد. نسبت خطا یا FAR نیز در مدل فیزیکی کمتر از مدل آستانه بهینه است. اما در فصول پاییز و زمستان با توجه به رتبه‌های آماری موجود، مدل آستانه بهینه برآوردهای بهتری از خیزی سطح برگ ارائه می‌دهد.

جداول (۲) و (۳) هر دو نشان می‌دهند که ضریب تبیین (R^2)، شاخص توافق D در حالتی که از آستانه بهینه استفاده شده افزایش یافته و مقادیر میانگین خطا و میانگین خطای مطلق، ماکزیمم خطا کاهش یافته‌اند. مطابق این جدول مدل آستانه بهینه برآورد بهتری از LWD در محل مورد نظر دارد. شکل (۴) آنالیز رگرسیونی ایستگاه سروستان توسط مدل فیزیکی را در فصول مجزا نشان می‌دهد این مدل در منطقه موردنظر برای فصل پاییز و زمستان برآورد بهتری از تداوم خیزی برگ نشان می‌دهد.

مقایسه ساعتی

آنالیز رتبه‌های آماری از جدول وابستگی امکان ارزیابی کارائی مدل‌ها رایبتر فراهم می‌کند. این آنالیز نشان می‌دهد که مدل

جدول ۴- رتبه‌های شاخص آماری از جدول وابستگی ایستگاه سروستان، بهار و تابستان

مدل فیزیکی	مدل آستانه ثابت بهینه (/۶۸)	مدل آستانه ثابت رطوبتی (/۸۷)	مدل رتبه
Hit(%)	۲۳	۰/۳۷	۳/۸۹
False Alarm(%)	۴/۲۸	۰/۳۴	۵/۳۲
Miss(%)	۳/۹۸	۶/۱۲	۲/۹۳
Bias	۱/۰۵	۰/۱۱	۱/۳۵
POD(Portability of detection)	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۵۷
FAR(False Alarm Ratio)	۰/۶۵	۰/۴۸	۰/۵۸

جدول ۵- رتبه‌های شاخص آماری از جدول وابستگی ایستگاه سروستان، پاییز و زمستان

مدل فیزیکی	مدل آستانه ثابت بهینه (/۶۸)	مدل آستانه ثابت رطوبتی (/۸۷)	مدل رتبه
Hit(%)	۵/۷۴	۲/۸۴	۷/۷۱
False Alarm(%)	۲/۴	۰/۲۵	۱۵/۷۲
Miss(%)	۲/۷۴	۵/۶۵	۰/۷۸
Correct Rejection(%)	۸۹/۱۲	۹۱/۲۶	۷۵/۶۱
Bias	-۰/۹	-۰/۳۶	۲/۷۶
PC(Percentage Correct)	-۰/۹۵	-۰/۹۴	-۰/۸۳
POD(Portability of detection)	۰/۶۸	-۰/۳۲	-۰/۹۱
FAR(False Alarm Ratio)	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۶۷

خیزی و خشکی از دقت بیشتری برخوردار است. بنابراین این مدل برای این منطقه در صورت کالیبره شدن نتایج بهتری نسبت به مدل فیزیکی ارائه می‌دهد و در شرایطی که دسترسی به داده‌های مورد نیاز مدل‌های فیزیکی وجود ندارد می‌توان از این مدل استفاده کرد.

بر مبنای تحقیقات Sentelhas et al. (2008) مدل‌های تجربی برآورد LWD، می‌توانند کارائی بسیار متفاوتی بسته به شرایط اقلیمی منطقه داشته باشند. بر اساس مطالعات Huber and Gillespie (1992) این مدل‌ها برای بعضی کاربردها مناسب هستند اما به طور کلی یک پیش‌بینی کننده معمول برای فرآیندهای پیچیده خرداقلیمی درگیر با رخداد خیزی برگ

نتیجه گیری و بحث

مدل آستانه رطوبتی زمانی که برای مکان مورد نظر کالیبره نشده است نتایج متفاوتی در مقاطع زمانی مختلف نشان می‌دهد. مدل‌های آستانه رطوبتی مطابق با یافته‌های محققان پیشین به شدت وابسته به محل مورد آزمایش و حتی مطابق این تحقیق وابسته به مقطع زمانی اجرا کردن مدل است. با تعیین آستانه مناسب مدل برآوردهای بهتری از LWD ارائه می‌دهد. بنابراین بهتر است که با توجه به نتایج این تحقیق بازه‌های زمانی کوتاه‌تر و دقیق‌تری طی چندین فصل متمادی انتخاب و آستانه مناسب برای آن تعیین شود. مطابق جدول وابستگی مدل آستانه بهینه در برآوردهای ۳۰ دقیقه‌ای وقوع

(1993) در مورد برآورد LWD برای گوجه فرنگی در جنوب کانادا و Rao et al. (1998) در برآوردهای LWD مزرعه ذرت و Sentelhas et al. (2004) در برآوردهای مربوط به یک مزرعه پنبه در برزیل توافق دارد و نشان می‌دهد که برآوردهای LWD با استفاده از مدل‌های ساده تجربی دقت کافی برای به کارگیری در سیستم‌های هشدار بیماری را دارند. مطابق تحقیقات پیشین دقت داده‌های مدل‌های فیزیکی از جمله تابش و ورودی‌های دیگر در کارآئی این مدل‌ها بسیار مؤثر است دلیل تفاوت نتایج با مدل فیزیکی پنمن-مانتیت در مطالعات Sentelhas and Gillespie (2008) احتمالاً طولانی‌تری بودن دوره‌های اندازه‌گیری LWD و میزان دقت داده‌های ورودی است.

تشکر و قدردانی

داده‌های مربوط به دوره خیسی سطح برگ توسط جناب آقای مهندس سوداگری مجری طرح اتوماسیون هواشناسی در منطقه سروستان تامین شده است. نگارندگان مقاله بدین وسیله از ایشان تشکر و قدردانی می نمایند.

REFERENCES

- Barr, A and Gillespie, T.J. (1987). Maximum leaf wetness duration for water drops on leaves in a field. *Agric. For. Meteorol.* 41, 267-274.
- Basist, A., Grody, N.C., Peterson, T.C and Williams, C.N. (1998). Using the special sensor microwave/imager to monitor land surface temperatures, wetness and snow cover. *J. Appl. Meteorol.* 37, 888-911.
- Beysens, D. (1995). The formation of dew. *Atmosphere Researc.* 39, 215-237.
- Dalla Marta, A., Magarey, R.D And Orlandini, S. (2005). Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agric. For. Meteorol.* 132, 84-95.
- Francel, L.J. and Panigrahi, S. (1997). Artificial neural network models of wheat leaf wetness. *Agric. For. Meteorol.* 88, 57-65.
- Gates, D.M. (1980). *Biophysical ecology*. New York: Springer, 611 pp.
- Garratt, J.R. and Segal, M. (1988). On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. *Boundary-Layer Meteorology* 45, 209-236.
- Gillespie, T.J., Srivastava, B and Pitblado, R.E. (1993). Using operational weather data to schedule fungicide sprays on tomatoes in Southern Ontario. *Can. J. Appl. Meteorol.* 32, 567-573.
- Gleason, M.L., Taylor, S.E., Loughin, T.M and Koehler, K.J. (1994). Development and validation of an empirical model to estimate, the duration of dew periods. *Plant Disease*, v.78.
- Huber, L., Gillespie, T.J. (1992). Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Ann. Rev. Phytopathol.* 30, 553-577.
- Hubert, L and Itier, B. (1990). Leafwetness duration in a field bean canopy. *Agric.For. Meteorol.* 51, 281-292.
- Jacobs, A.F.G., vanPul, W.A.J and El-Kilani, R.M.M. (1994). Dew formation and the drying process within a maize canopy. *Boundary-Layer Meteorology.* 69, 367-378.
- Kim, K.S., Taylor, S.E and Gleason, M.L. (2004). Development of a leaf wetness model using a fuzzy logic system. *Agric. Forest Meteorol.* 127, 53-64.
- Kim, K.S., Taylor, S.E., Gleason, M.L., Villalobos, R. and Arauz, L.F. (2005). Estimation of leaf wetness duration using empirical models in northwestern Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.* 129, 53-67.
- Lau, Y.F., Gleason, M.L., Zriba, N., Taylor, S.E. and Hinz, P.N. (2000). Effects of coating, deployment angle, and compass orientation on performance of electronic wetness sensors during dew periods. *Plant Dis.* 84, 192-197.
- Luo, W.H. and Goudriaan, J. (2000). Dew formation on rice under varying durations of nocturnal radiative loss. *Agric. For. Meteorol.* 104, 303-313.
- Madeira, A.C., Kim, K.S., Taylor, S.E. and Gleason, M.L. (2002). A simple cloud-based energy balance model to estimate dew. *Agric Forest Meteorol.* 111: 55-63.
- Magarey, R.D., Russo, J.M., Seem, R.C and Gadoury, D.M. (2005). Surface wetness duration under controlled environmental conditions. *Agric. For. Meteorol.* 128, 111-122.
- Monteith, J.L. (1957). Dew. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 83, 322-341.
- Monteith, J.L. and Unsworth, M.H. (1990). *Principles*

- of Environmental Physics, second ed. Edward Arnold, New York, 291pp.
- Pedro, M.J and Gillespie, T.J. (1982). Estimating dew duration. I.Utilizing micrometeorological data . *Agricultural Meteorology* ,25, 283–296.
- Rao, P.S., Gillespie, T.J and Schaafsma, A.W .(1998). Estimating wetness on maize ears from meteorological observations.Canadian, *Journal of Soil Science*, 78, 149–154.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Gleason, M.L., Monteiro, J.E and Helland, S.T. (2004). Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agric. For. Meteorol* ,126,59–72.
- Sentelhas, P.C and Gillespie, T.J. (2008). Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration modelling using the Penman–Monteith equation. *Theor. Appl. Climatol*, 91, 205–215.
- Sutton, J.C., Gillespie, T.J. and Hildebrand, P.D. (1984). Monitoring weather factors in relation to plant disease. *Plant Disease*, 68, 78-84.
- Van Hove L.W.A., Adema E.H., Vredenburg W.J. And Pieters G.A. (1989). A study of adsorption of NH₃ and SO₂ on leaf surfaces. *Atmospheric Environment*. 23 , 1479–1486.
- Van Jaarsveld, J.A. (2004). The Operational Priority Substances model. Description and validation of OPS-Pro 4.1. RIVM Report 500045001/2004, RIVM, Bilthoven, The Netherlands, 156pp.
- Wilks, D.S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. International Geophysics Series, vol. 59. Academic Press, San Diego, 464pp.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J. J., Klink, K.M., Legates, D.R, O'donnell, J. and Rowe, C.M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *J Geophys Res* , 90, 8995–90.
- Wichink Kruit, R.J., van Pul, A.J., Jacobs, A.F.G and Heusinkveld, B.G. (2004). Comparison between four methods to estimate leaf wetness duration caused by dew on grassland. In: Conference on Agric. For. Meteorol.American Meteorological Society, Vancouver.
- Wichink Kruit, R.J., Jacobs, A.F.G and Holtslag, A.A.M. (2008). Measurements and estimates of leaf wetness overagricultural grassland for dry deposition modeling of trace gases. *Atmospheric Environment*, 42 .5304–5316.
- Wittich K.P. (1995). Some remarks on dew duration on top of an orchard. *Agric .For. Meteorol*. 72, 167–180.

Archive of SID