پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ٤٥، شماره ٣، پاییز ١٣٩٢
صص. ٤٦-٣١

مطالعهٔ تطبیقی روش‌های برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم در اقلیم‌های مختلف ایران

جابر رحیمی * ـ دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
جواد بذرافشان ـ استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
علی خلیلی ـ استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ١٣٩١/٠٧/١٢ تأیید نهایی: ١٣٩٢/٠٦/٢٥

چکیده

برآورد بارش مؤثر که قسمتی از بارش کل بوده و برای تأمین نیازهای تبخیر ـ تعرقی در بخش توسعهٔ ریشهٔ گیاه در دسترس است، به‌دلیل هزینهٔ بالای به‌کارگیری ابزارهای دقیق، عمدتاً به‌کمک روش‌های تجربی انجام می‌شود. هدف از این پژوهش، مقایسهٔ چند روش تجربی برآورد بارش مؤثر با روش مبتنی بر بیلان آب ـ خاک و معرفی روش تجربی مناسب در اقلیم‌های مختلف کشور است. برای این امر از داده‌های هواشناسی، فنولوژی و خاک و عملکرد گندم دیم مربوط به بیست‌ویک ایستگاه هواشناسی کشاورزی کشور (نمایندهٔ اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب) استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل بیلان آب ـ خاک تدوین‌شده با توجه به محدودیت‌های داده‌های اندازه‌گیری، توانایی مناسبی را در تعیین بخشی از تغییراتِ میزان محصول گندم دیم ـ که به‌وسیلهٔ تغییرات در میزان بارش مؤثر قابل توجیه است ـ دارد. همچنین هرچه میزان ضریب خشکی دومارتن افزایش یابد، درصدی از بارش که در کشت گندم دیم مؤثر است، کاهش خواهد یافت. در مناطق با هویت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، روش تجربی نسبت تبخیر ـ تعرق به بارش و در مناطق با هویت اقلیمی مرطوب و نیمه‌مرطوب، به‌ترتیب روش‌های ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده و فائو نسبت به روش‌های تجربی دیگر برتری دارند.

کلیدواژه‌ها: ایران، بارش مؤثر، بیلان آب ـ خاک، روش‌های تجربی، گندم دیم.

مقدمه

در بین عوامل مؤثر بر تولیدات زراعی، به‌ویژه محصولات دیم، عامل بارندگی و نحوهٔ توزیع و فصل بارش آن، نقش بارز و تعیین‌کننده‌ای دارد. از سویی تمامی بارشی که طی سال زراعی رخ می‌دهد، در عملکرد زراعی محصولات مختلف به‌طور

* نویسنده مسئول: ٠٩١١١٠٠٥٧٨٦
E-mail: jaberrahimy@ut.ac.ir

یکسان مؤثر نیست و به مصرف زراعت نمی‌رسد. به‌طور کلی، جامع‌ترین تعریف بارش مؤثر که از ترکیب تعاریف فرهنگ اصطلاحات آبیاری و زهکشی کمیتهٔ بین‌المللی آبیاری و زهکشی (۱۹۷۸) و مطالعات بوس (۱۹۸۰، ۱۹۷۴) در مورد کارایی مصرف آب در سطح مزرعه به‌دست می‌آید، به‌شرح زیر بیان می‌شود:

«بارش مؤثر، قسمتی از بارش کل است که در سطح زیر کشت محصول، در بازهٔ زمانی معین برای تأمین نیازهای تبخیر ـ تعرق در ناحیهٔ توسعهٔ ریشه در دسترس است».

در این تعریف، نکته‌های زیر اهمیت دارد:

الف) لحاظ‌کردن گزارهٔ «سطح زیر کشت» به این دلیل است که مرتبهٔ مؤثر بودن بارش در حالتی که زمین به‌صورت آیش باشد، می‌تواند برای کشت محصول بعدی از خیلی مفید تا خیلی مخرب متغیر باشد.

ب) گزارهٔ «بازه زمانی معین» به هر بازه زمانی بین تاریخ کاشت تا تاریخ برداشت گفته می‌شود که انتخاب آن به دیدگاه پژوهشگر بستگی دارد.

ج) گزاره «تأمین نیازهای تبخیر- تعرقی» نشانگر آن است که در این تعریف بارانی که صرف شست‌وشوی خاک می‌شود، بارش مؤثر در نظر گرفته نمی‌شود (بوس و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۲).

به‌طور کلی روش‌های تعیین بارش مؤثر به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) اندازه‌گیری مستقیم؛

ب) روش‌های تجربی؛

ج) مدل بیلان آب ـ خاک.

به‌دلیل هزینه‌های زیاد اندازه‌گیری و نگهداری ادواتی چون لایسیمتر، به‌طور معمول از روش‌های تجربی و بیلان آب ـ خاک برای برآورد بارش مؤثر استفاده می‌شود. روش‌های مبتنی بر بیلان آب ـ خاک، بعد از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم بیشترین دقت را دارند (اویناش و همکاران، ۱۹۹۰: ۱۸۲).

در زمینهٔ بارش مؤثر، سادات میرئی (۱۳۷۶) بارش مؤثر را در چند نمونهٔ اقلیمی ایران برآورد کرد. وی پس از مقایسهٔ بارش مؤثر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف با مدل بیلان آب ـ خاک به‌منزلهٔ معیار، مشاهده کرد که در مناطق انزلی، گرگان، کرمانشاه، تبریز، مشهد و بندرعباس روش‌های ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده و روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده و فائو، به‌ترتیب بهترین نتایج را دادند و در مناطق خشک و نیمه‌خشک تهران، اصفهان، زاهدان و یزد، به‌ترتیب روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، روش فائو و روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده برتری داشتند.

عزیزی (۱۳۷۹) طی پژوهشی به برآورد بارش مؤثر در رابطه با کشت گندم دیم در دشت خرم‌آباد پرداخته و از روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده استفاده کرد. در این روش، مقادیر بارش مؤثر بر مبنای بارش، تبخیر و تعرق ماهانه و همچنین عمق ذخیرهٔ آب یا عمق آبیاری محاسبه و برآورد شده است.

مجرد و همکاران (۱۳۸۴) روش‌های مختلف برآورد مقادیر بارش مؤثر و نیاز آبی ماهانه برای کشت برنج را در جلگهٔ مازندران مورد سنجش قرار دادند و نتیجه گرفتند که روش بارش قابل اطمینان، مقادیر بارش مؤثر را بیشتر از روش‌های دیگر محاسبه می‌کند.

موهان و همکاران (۱۹۹۶) به مقایسهٔ چند روش برآورد بارش مؤثر برای کشت برنج پرداختند. بارش مؤثر به روش‌های بیلان آب ـ خاک، ایندیَن ـ ۱، ایندیَن ـ۲، روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، نسبت تبخیر- تعرق به بارندگی و روش ویتنام محاسبه شد و با روش بیلان آب ـ خاک به‌منزلهٔ روش مبنا، مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که از بین روش‌های مورد بررسی، روش نسبت تبخیر- تعرق به بارندگی و روش ایندیَن ـ۲، به‌ترتیب در اولویت کاربرد برای برآورد بارش مؤثر در تعیین نیاز آبی گیاه برنج هستند.

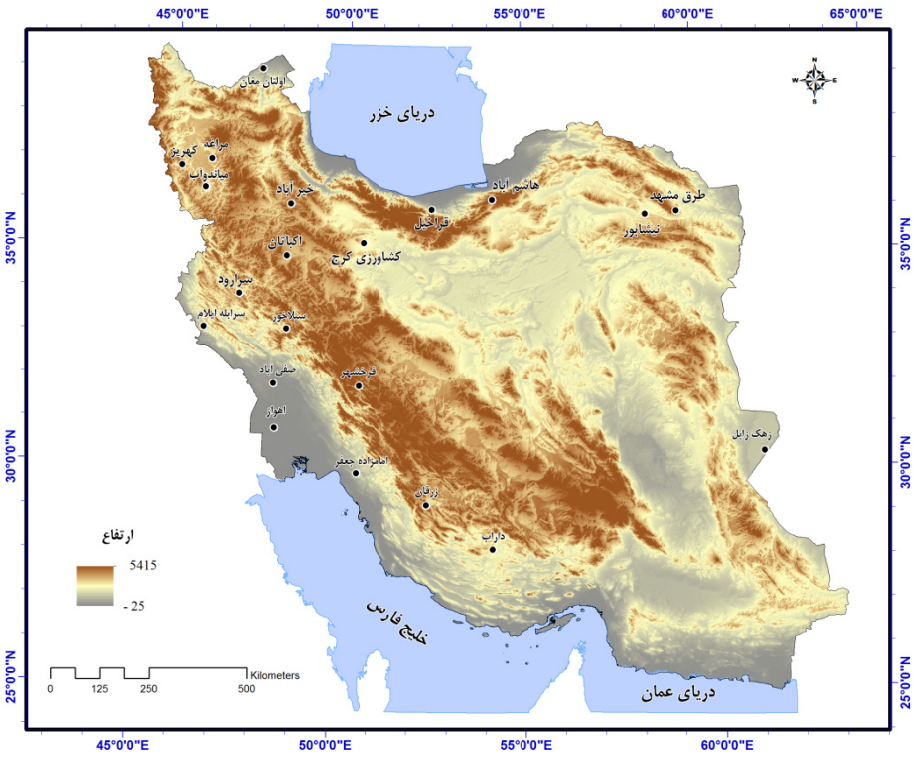
چاهون و همکاران (۲۰۰۱)، در زمینهٔ اندازه‌گیری بارش و برآورد بارش مؤثر برای محصولات دیم و آبی، بارندگی مؤثر را مقداری از بارندگی دانسته‌اند که در منطقهٔ ریشهٔ گیاه ذخیره می‌شود. این پژوهشگران در بررسی خود از روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده استفاده کردند.

از آنجاکه آب مورد نیاز گندم دیم به‌طور عمده از طریق بارش‌های جوّی تأمین می‌شود، بنابراین آگاهی در زمینهٔ میزان بارش مؤثر برای شناخت قابلیت‌ها و محدودیت‌های رطوبتی در سطح مناطق دیم‌خیز، بسیار اهمیت دارد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰).

از این رو پژوهش پیش رو تلاش دارد تا با تحلیل بارش در چهار نمونهٔ اقلیمی کشور (خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب) به بررسی کارایی هریک از روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم در مقایسه با بارش مؤثر به‌دست‌آمده از روش بیلان آب ـ خاک، مبتنی بر رهیافت پیشنهادی بپردازد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های دمای حداقل و حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد)، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی (درصد)، تعداد ساعات آفتابی روزانه، سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (کیلومتر/ روز) و بارندگی روزانه (میلی‌متر) به‌دست‌آمده از بیست‌ویک ایستگاه هواشناسی کشاورزی و سینوپتیک کشور با طول دورهٔ آماری مشترک شانزده سال (سال‌های کشت ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹) گردآوری شد. بازسازی نواقص آماری به‌روش همبستگی متقاطع و روش نسبت نرمال انجام شد. همگنی داده‌های بارش با استفاده از روش آزمون توالی بررسی شد و مورد تأیید قرار گرفت. همچنین اطلاعات مربوط به شانزده سال عملکرد گندم دیم ایستگاه‌های منتخب از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. پس از انتخاب ایستگاه‌های مطالعاتی، اطلاعات مربوط به تاریخ‌های آغاز و پایان و طول هر یک از مراحل مختلف رشد گیاه گندم دیم و همچنین مقادیر رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و نقطهٔ پژمردگی دائم در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی جمع‌آوری شد و در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد بررسی، بر اساس داده‌های موجود در برنامه OPTIWAT (علیزاده، ۱۳۸۶) برای هر منطقه تعیین شد.



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

مدل بیلان آب ـ خاک توسعه‌یافته

در روش‌های موجود برآورد بیلان رطوبتی روزانهٔ آب ـ خاک، برای برآورد میزان بارش مؤثر (آن قسمت از بارش که مستقیماً جوابگوی نیاز آبی گیاه است)، رهیافت‌های متفاوتی وجود دارد. در برخی از مدل‌های بیلان آب ـ خاک، عمق توسعهٔ ریشه در تمامی مراحل رشد ثابت و به‌اندازهٔ عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه فرض شده است (گریسن، ۱۹۸۴: ۲۹۱). در برخی دیگر، مقدار آب مازاد که از منطقهٔ ریشه خارج می‌شود، مقدار نفوذ عمقی در نظر گرفته‌شده و جزء بارش مؤثر روزانه شمرده نمی‌شود (لاشاری و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۸۱).

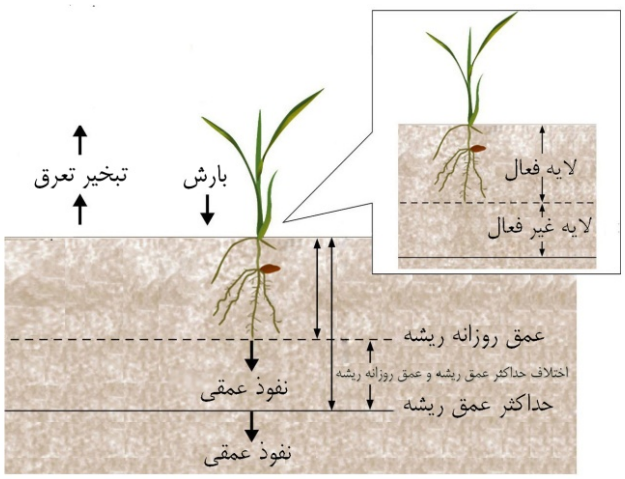
در این پژوهش تلاش شده است تا رهیافتی جدید مبتنی بر نقاط قوت رهیافت‌های موجود، به‌منظور برآوردی قابل قبول از میزان بارش مؤثر در کشت گندم دیم، بر اساس تعریف ذکر شده ارائه شود (رحیمی، ۱۳۹۱). در مدل تدوین شدهٔ حاضر، خاک به‌صورت دولایه در نظر گرفته می‌شود.

لایهٔ اول ـ منطقهٔ رشد فعلی ریشه است و با گذشت زمان، عمق آن افزایش می‌یابد.

لایه دوم ـ در حد فاصل انتهای لایهٔ اول و حداکثر عمق توسعهٔ ریشه قرار گرفته است و ضخامت آن با افزایش رشد ریشه کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که در زمان حداکثر رشد گیاه، ضخامت این لایه به صفر می‌رسد.

تفاوت مدل جدید با مدل‌های قبلی در آن است که مادامی که ریشه گیاه به عمق پایین‌تر منتقل می‌شود، از رطوبت ذخیره‌شده در لایهٔ دوم منتفع می‌شود و این رطوبت به‌منزلهٔ بخشی از بارش مؤثر مد نظر قرار می‌گیرد که توانایی تأمین نیاز رطوبتی گیاه را دارد و به بارش مؤثر محاسبه‌شده در کل دورهٔ رشد اضافه می‌شود (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۷۸۶).

شکل (۲) نمایی از رهیافت پیشنهادی در تعیین بارش مؤثر و نفوذ عمقی را نشان می‌دهد.



شکل۲. نمایی از رهیافت پیشنهادی در تعیین بارش مؤثر

در رهیافت حاضر، مقطع عرضی خاک به دو بخش لایهٔ فعال و لایهٔ غیرفعال تقسیم می‌شود. لایهٔ فعال بخشی از خاک تا عمق توسعهٔ روزانهٔ ریشه است که جذب آب به‌وسیلهٔ ریشه از این لایه صورت می‌گیرد. لایهٔ غیر فعال بخشی است که در زیر لایهٔ فعال، بین حداکثر عمق ریشه و عمق توسعهٔ روزانهٔ ریشه قرار دارد.

یکی از فرض‌های اصلی رهیافت جدید این است که مقدار بارشی که بیش از مقدار ظرفیت زراعی خاک (FC) در لایهٔ فعال خاک است، با فرونشست عمقی از لایهٔ فعال به لایهٔ غیر فعال منتقل می‌شود، این در حالی است که اگر میزان بارندگی نفوذ یافته از لایهٔ فعال به لایهٔ غیر فعال از ظرفیت نگهداری آب در لایهٔ غیر فعال هم بیشتر باشد، نفوذ عمقی از لایهٔ غیر فعال رخ خواهد داد. در فرایند مدل‌سازی، از شار آب رو به بالا به‌دلیل پیچیدگی معادلات صرف نظر شده است (حاجیلال و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۶۳).

برای لایهٔ اول (لایهٔ فعال) محتوای رطوبتی آب ـ خاک در پایان یک روز معین (t) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۷۸۶):

رابطهٔ ۱)
$$MC_{1(t)} = MC_{1(t-1)} + ISM_{(t)} + R_{(t)} - Q_{(t)} - ET_{(t)} - P_{1(t)} - Pc$$

که در آن:

رابطهٔ ۲)
$$P_{1(t)} = \begin{cases} 0 & if \quad MC_{1(t-1)} + ISM_{(t)} + R_{(t)} - Q_{(t)} - ET_{(t)} - Pc \le K_{1(t)} \\ MC_{1(t-1)} + ISM_{(t)} + R_{(t)} - Q_{(t)} - ET_{(t)} - K_{1(t)} - Pc & \text{در غیر اینصورت،} \end{cases}$$

که در آنها؛ MC_1 : محتوای رطوبتی لایهٔ اول (لایهٔ فعال)؛ R: مقدار بارندگی برحسب میلی‌متر؛ Q: رواناب؛ ISM: افزایش رطوبت خاک به‌دلیل رشد روزانهٔ ریشه؛ ET: تبخیرـ تعرق؛ P_1: فرونشست عمقی از لایهٔ اول (لایهٔ فعال)؛

Pc: مقدار برگاب؛ K_1: ظرفیت نگهداری آب در دسترس خاک (FC-PWP) در لایهٔ اول است (کلیه واحدها برحسب میلی‌متر است).

برای برآورد محتوای رطوبتی لایهٔ دو (غیر فعال) نیز، از روابطی مشابه آنچه برای لایهٔ یک بیان شد استفاده شده است با این تفاوت که در لایهٔ دو، هدررفت به‌دلیل تبخیرـ تعرق وجود ندارد (رابطه ۳).

$$MC_{2(t)} = MC_{2(t-1)} - ISM_{(t)} + P_{1(t)} - P_{2(t)}$$ رابطهٔ ۳)

که در آن:

رابطهٔ ۴)

$$P_{2(t)} = \begin{cases} 0 & if \quad MC_{2(t-1)} - ISM_{(t)} + P_{1(t)} \le K_{2(t)} \\ MC_{2(t-1)} - ISM_{(t)} + P_{1(t)} - K_{2(t)} & \text{در غیر اینصورت،} \end{cases}$$

که در آنها؛

MC_2: محتوای رطوبتی لایهٔ دوم (لایهٔ غیر فعال)؛ P_2: فرونشست عمقی از لایهٔ دوم (لایهٔ غیر فعال)؛ K_2: ظرفیت نگهداری آب در دسترس خاک (FC-PWP) در لایهٔ دوم هستند (کلیه واحدها حسب میلی‌متر).

مدل‌سازی رشد ریشه: برای مدل‌سازی عمق روزانهٔ ریشه برای کل دورهٔ رشد از معادلهٔ سیگموئیدی (رابطه ۵) استفاده شده است (بارگ و گریمس، ۱۹۸۶، ۱۹۴).

$$RD_{(t)} = RDM[0.5 + 0.5 \sin(3.03(DAS/DTM) - 1.47)]$$ رابطهٔ ۵)

که در آن؛

t: شمارهٔ روز از ابتدای کاشت؛ $RD_{(t)}$: عمق روزانهٔ ریشه برحسب میلی‌متر؛ RDM: عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه برحسب میلی‌متر؛ DAS: تعداد روز بعد از کاشت؛ DTM: تعداد کل روزها برای رسیدن به عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه است.

البته ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که با توجه به اینکه حداکثر عمق ریشه‌دهی به عوامل بسیار زیادی وابسته است، نمی‌توان به‌طور قطع در این مورد اظهار نظر کرد. همین عدم قطعیّت در مورد تعداد روزهای لازم برای اینکه گیاه گندم به حداکثر عمق ریشه برسد نیز، وجود دارد؛ اما به‌طور متوسط، زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه را مرحلهٔ میانی رشد در نظر می‌گیرند (لاشاری و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۸۱). همچنین میزان RD اولیه نیز با این فرض که در روز نخست کاشت با توجه به عمق آن، تبخیر از ۱۵۰ میلی‌متر فوقانی خاک انجام می‌گیرد، برابر ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (رائو، ۱۹۸۷: ۱۷۹؛ حاجیلال، ۱۹۹۸: ۱۶۳).

یادآوری می‌شود در حالتی که عمق ریشه به حداکثر خود می‌رسد، تنها یک لایهٔ فعال وجود خواهد داشت، بنابراین محاسبات مربوط به لایهٔ غیر فعال و همچنین افزایش رطوبت خاک، به‌دلیل رشد روزانهٔ ریشه متوقف خواهد شد. در این

مطالعه، حداکثر عمق ریشه‌دهی در خاک‌هایی با بافت سنگین، برابر ۸۰ سانتی‌متر و در خاک‌هایی با بافت سبک (مانند لومی شنی)، برابر ۱۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (ریکرت و همکاران، ۱۹۸۷: ۶۵۵).

ظرفیت نگهداری آب قابل دسترس در دو لایه خاک: ظرفیت نگهداری آب در دسترس خاک برای لایهٔ اول با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه شده است.

$$K_{1(t)} = K_{1(t-1)} + (K_{2(t-1)} \times DRD)/(RDM - RD_{(t)}) \quad \text{if } RDM > RD_{(t)}$$ رابطهٔ ۶)

که در این رابطه DRD: افزایش روزانهٔ عمق ریشه برحسب میلی‌متر است.

$$DRD = RD_{(t)} - RD_{(t-1)}$$ رابطهٔ ۷)

و برای لایهٔ دوم خاک، ظرفیت نگهداری آب در دسترس خاک از رابطه (۸) به‌دست آمد.

$$K_{2(t)} = K_{2(t-1)} - P_{1(t)} + P_{2(t)}$$ رابطهٔ ۸)

افزایش رطوبت خاک، به‌دلیل رشد روزانهٔ ریشه برحسب میلی‌متر نیز با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد.

$$ISM_{(t)} = (MC_{2\,(t-1)} \times DRD)/(RDM - RD_{(t)}) \quad \text{if } RDM > RD_{(t)}$$ رابطهٔ ۹)

رواناب: برای محاسبهٔ مقدار رواناب، از روش ادارهٔ حفاظت خاک آمریکا استفاده شده است که رابطهٔ آن با توجه به نوع خاک، پوشش گیاهی، رطوبت اولیهٔ خاک و مقادیر مختلف بارش، به‌صورت زیر است (رابطه‌های ۱۰ و ۱۱):

$$Q = (R - 0.2\,S)^2/(R + 0.8\,S)$$ رابطهٔ ۱۰)

$$S = (1000/CN - 10) \times 25.4$$ رابطهٔ ۱۱)

که در آن؛

R: ارتفاع بارندگی (میلی‌متر)؛ Q: ارتفاع رواناب (میلی‌متر)؛ S: ظرفیت نگه‌داشت خاک (میلی‌متر)؛ CN: شمارهٔ منحنی که تابعی از خصوصیات فیزیوگرافی و رطوبتی خاک در منطقه است (چاو، ۱۹۶۴).

برگاب: مقدار برگاب از کل مقدار بارش کسر می‌شود تا مقدار بارش خالص نفوذ کرده در خاک به‌دست آید. مقدار برگاب از رابطهٔ تجربی هورتون (رابطه ۱۲) محاسبه شده است (هورتون، ۱۹۱۹: ۶۰۳).

$$Pc = a + b\,R_i^{\,n}$$ رابطهٔ ۱۲)

که در آن؛

R_i: کل بارش در روز i برحسب میلی‌متر؛ Pc: مقدار برگاب برحسب میلی‌متر؛ a، b و n: ضرایب معادله هستند که مقدار آنها را هورتون برآورد کرده است و برای گیاه گندم، به‌ترتیب برابر ۰/۱۲۵ h، ۰/۰۵ h و ۱ هستند (h: ارتفاع گیاه).

تبخیر- تعرق پتانسیل: در این مطالعه، با توجه به نبود داده‌های لایسیمتری تبخیر- تعرق پتانسیل به‌روش پنمن مانتیث فائو تعیین شد (آلن و همکاران، ۱۹۸۸).

برآورد ضریب گیاهی: برای تعیین ضریب گیاهی گندم از روابط و جداول ارائه شدهٔ فائو (نشریهٔ فائو ۵۶) استفاده شده است. بدین‌گونه که دورهٔ رشد گندم به چهار مرحله تقسیم‌شده و ضرایب هر مرحله از دوران رشد گیاه با استفاده از جدول (۲) و روابط زیر به‌دست آمد:

$$Kc_i = Kc_{ini} \qquad L_1 \le i < L_2$$ رابطهٔ ۱۳)

$$Kc_i = (Kc_{ini} + (Kc_{mid} - Kc_{ini}))(i - L_2)/(L_3 - L_2) \qquad L_2 \le i < L_3$$ رابطهٔ ۱۴)

$$Kc_i = Kc_{mid} \qquad L_3 \le i < L_4$$ رابطهٔ ۱۵)

$$Kc_i = (Kc_{mid} - (Kc_{mid} - Kc_{end}))(i - L_4)/(L_5 - L_4) \qquad L_4 \le i \le L_5$$ رابطهٔ ۱۶)

که در آنها؛

Kc_i: ضریب گیاهی روزانه؛ Kc_{ini}: ضریب گیاهی مرحلهٔ ابتدایی (۰/۳)؛ Kc_{mid}: ضریب گیاهی مرحلهٔ میانی (۱/۱۵)؛ Kc_{end}: ضریب گیاهی مرحلهٔ انتهایی (۰/۲۵) (علیزاده، ۱۳۸۶)؛ L_1: شمارهٔ روز از ابتدای سال آغاز مرحلهٔ ابتدایی؛ L_2: شمارهٔ روز از ابتدای سال آغاز مرحلهٔ توسعه؛ L_3: شمارهٔ روز از ابتدای سال آغاز مرحلهٔ میانی؛ L_4: شماره روز از ابتدای سال آغاز مرحلهٔ انتهایی؛ L_5: شمارهٔ روز از ابتدای سال پایان فصل رشد؛ i: شمارهٔ روز از ابتدای سال میلادی است.

در این پژوهش از زمان کاشت تا زمان سبز شدن ۷۵ درصد بوته‌ها به‌منزلهٔ مرحلهٔ ابتدایی رشد، از سبز شدن تا انتهای گلدهی به‌منزلهٔ مرحلهٔ رشد و توسعه، از گلدهی تا رسیدن به‌منزلهٔ مرحلهٔ میانی و از رسیدن تا برداشت به‌منزلهٔ مرحلهٔ پایانی در نظر گرفته شده است. بر همین اساس میزان تبخیر- تعرق واقعی گیاه گندم در روز iام از رابطهٔ (۱۷) به‌دست آمد:

$$ET_C = ET_o \times Kc_i$$ رابطهٔ ۱۷)

که در آنها؛

Kc_i: ضریب گیاهی روزانه؛ ET_0: تبخیر- تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)؛ ET_c: تبخیر- تعرق گیاه گندم (میلی‌متر) است.

در نهایت، بارش مؤثر براساس رابطه (۱۸) محاسبه شده است.

$$ER = (MC_{1(t)} - MC_{1(t-1)}) + ET_C$$ رابطهٔ ۱۸)

که در آن؛

ER: بیانگر میزان بارش مؤثر (میلی‌متر)؛ MC_1: محتوای رطوبتی لایهٔ اول (لایهٔ فعال) در انتهای روز i (میلی‌متر)؛

$MC_{1(t-1)}$: محتوای رطوبتی لایهٔ اول (لایهٔ فعال) در انتهای روز قبل (میلی‌متر)؛ ET_C: تبخیر ـ تعرق واقعی در روز i (میلی‌متر) است.

روش‌های تجربی برآورد بارش مؤثر

همزمان با برآورد بارش مؤثر به‌روش بیلان آب ـ خاک (برپایهٔ رهیافت جدید) با استفاده از شش روش مختلف تجربی، مقادیر بارش مؤثر در زراعت گندم دیم محاسبه شد. این روش‌ها عبارتند از: روش معادلهٔ رنفرو (چاو، ۱۹۶۴)، روش ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده (اِستام، ۱۹۶۷)، روش نسبت تبخیر ـ تعرق پتانسیل به بارندگی (داستین، ۱۹۷۴)، روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده (یو. اِس.دی.اِی، ۱۹۷۰)، روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده (اسمیت، ۱۹۸۸) و روش فائو (اسمیت، ۱۹۸۸). برای پرهیز از درازای کلام، برای دسترسی به روابط مربوط به هر یک از این روش‌ها به منابع یاد شده مراجعه شود.

ارزیابی روش‌ها بر اساس شاخص‌های ریشه میانگین مربع خطا[1] و شاخص توافق[2] انجام شد (روابط ۱۹ و ۲۰).

رابطهٔ ۱۹)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P)^2}{n}}$$

رابطهٔ ۲۰)
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\left|P_i - \overline{O}\right| + \left|O_i - \overline{O}\right|}$$

در این روابط؛

P_i: بیانگر مقادیر برآوردشده به‌کمک روابط تجربی؛ O_i: بیانگر مقادیر بارش مؤثر به‌دست آمده با استفاده از روش مبتنی بر بیلان آب ـ خاک است.

مقادیر کم RMSE و مقادیر زیاد D-index بالا، دلالت بر همخوانی رابطه بین بارش مؤثر برآورد شده با استفاده از روش تجربی و روش بیلان آب ـ خاک (مبتنی بر رهیافت جدید) دارد.

یافته‌های پژوهش

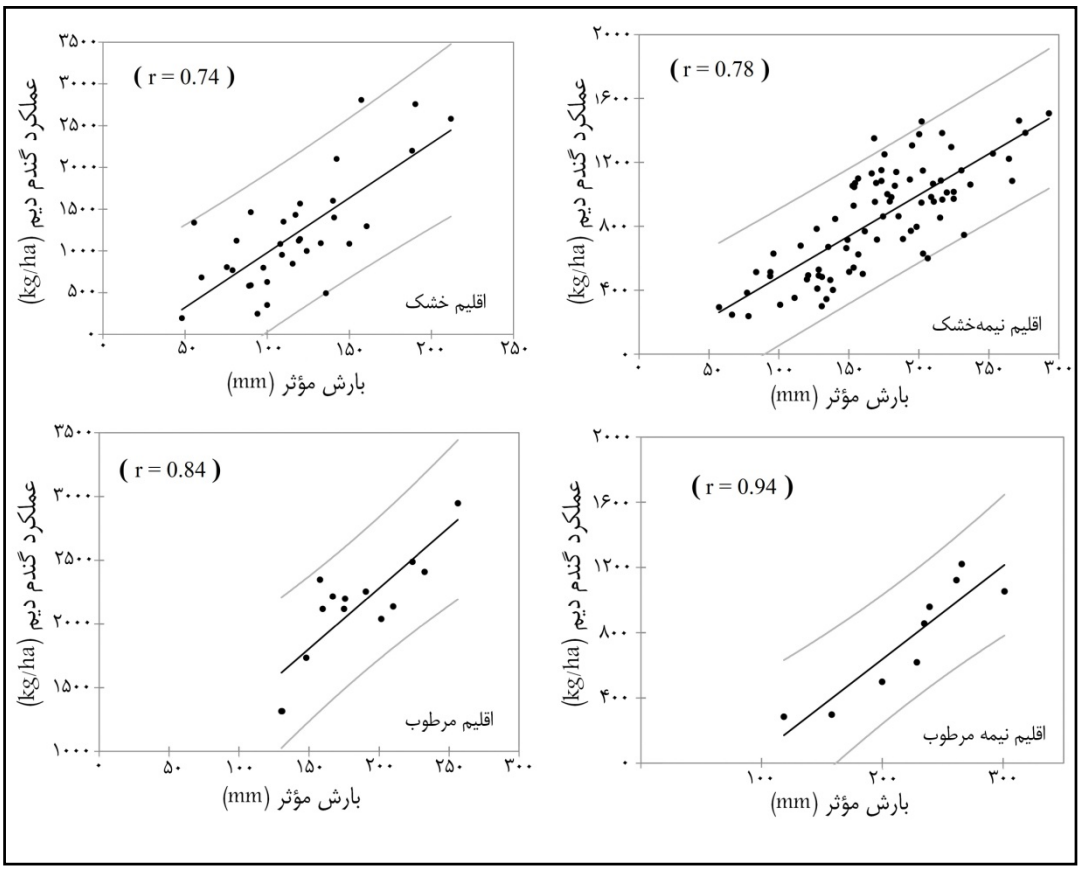
در این پژوهش بارش مؤثر در زراعت گندم دیم با بهره‌گیری از انواع روش‌های برآورد بارش مؤثر (معادلهٔ رنفرو، ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده، نسبت تبخیر ـ تعرق پتانسیل به بارندگی، ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، فائو و بیلان آب ـ خاک) میزان کل بارش مؤثر طی دورهٔ کشت گیاه به‌دست آمد. جدول (۱) متوسط بارش مؤثر به‌دست آمده از روش‌های مذکور را در طول دورهٔ آماری (سال‌های کشت ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹) برای بیست‌ویک ایستگاه مورد بررسی نمایش می‌دهد.

1. RMSE
2. D-index

جدول ۱. مقادیر بارش مؤثر برآورد شده از روش‌های تجربی موجود و همچنین بیلان آب ـ خاک در ایستگاه‌های مورد بررسی

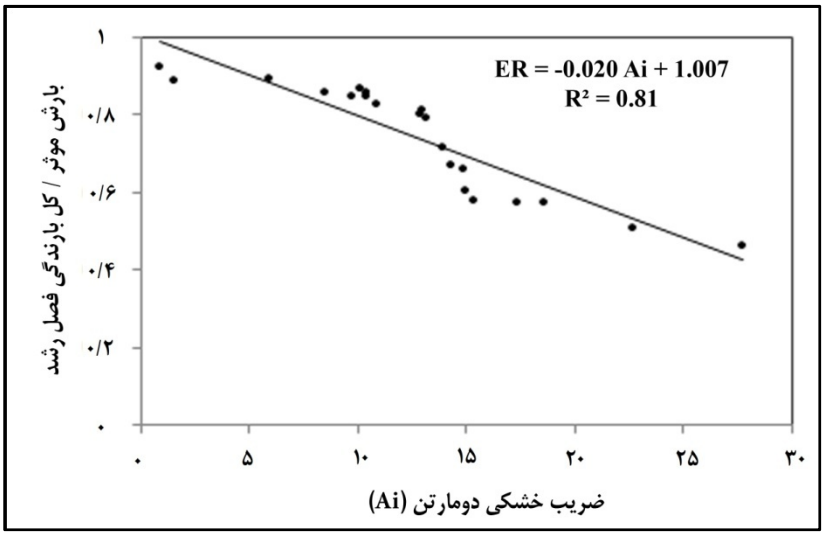
ایستگاه	روش برآورد بارش مؤثر						
	ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده	فائو	روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده	ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده	نسبت تبخیر ـ تعرق پتانسیل به بارندگی	معادلهٔ رنفرو	بیلان آب ـ خاک
اهواز	۱۲۵/۳	۴۴/۸	۱۱۹/۱	۸۸/۱	۱۱۱/۲	۱۰۹/۴	۹۱/۴
هاشم‌آباد	۲۴۱/۳	۱۰۷/۵	۲۲۹/۲	۱۶۴/۹	۲۰۴/۳	۱۱۴/۲	۱۸۰/۶
زهک	۴۴/۳	۸/۸	۴۲/۶	۳۰/۷	۴۱/۲	۳۸/۲	۳۹/۵
داراب	۲۱۶/۳	۱۱۴/۰	۲۰۸/۳	۱۵۱/۹	۱۹۹/۷	۱۶۶/۹	۱۷۱/۷
نیشابور	۲۲۶/۲	۷۶/۰	۲۱۴/۵	۱۴۹/۶	۲۰۲/۹	۱۴۸/۱	۲۱۱/۴
خیرآباد	۲۲۲/۹	۱۲۴/۷	۱۹۸/۴	۱۵۲/۶	۲۱۷/۸	۱۷۹/۸	۲۰۸/۷
زرقان	۲۴۲/۲	۱۴۵/۳	۲۳۷/۹	۱۷۹/۰	۲۳۵/۳	۱۴۷/۰	۱۸۲/۶
سرارود	۳۵۳/۹	۱۹۸/۴	۳۲۰/۲	۲۵۲/۸	۳۱۳/۵	۲۳۷/۴	۲۷۸/۴
سیلاخور	۳۴۷/۳	۱۸۳/۹	۳۳۸/۳	۲۴۶/۵	۳۰۵/۴	۲۲۸/۵	۲۸۹/۷
صفی‌آباد	۱۹۳/۸	۹۳/۸	۱۸۵/۸	۱۳۴/۴	۱۶۵/۴	۱۲۰/۴	۱۲۸/۸
کهریز	۱۶۴/۶	۴۳/۵	۱۵۷/۶	۱۱۶/۲	۱۵۸/۲	۱۳۰/۷	۱۵۹/۵
مراغه	۱۹۳/۳	۷۴/۱	۱۹۴/۶	۱۴۴/۴	۱۸۴/۴	۱۵۸/۴	۱۹۶/۴
میاندوآب	۲۲۱/۱	۹۱/۵	۲۲۳/۲	۱۶۱/۹	۱۹۹/۴	۱۵۸/۳	۲۰۶/۵
اکباتان همدان	۳۵۲/۶	۱۵۶/۰	۳۳۰/۹	۲۳۲/۳	۳۰۲/۳	۲۲۴/۹	۲۶۸/۳
فرخ‌شهر	۱۵۹/۳	۸۹/۲	۱۵۳/۳	۱۰۵/۳	۱۴۹/۵	۱۰۸/۶	۱۴۸/۱
اولتان مغان	۲۱۲/۶	۶۵/۹	۲۱۰/۹	۱۴۶/۸	۲۰۴/۷	۱۵۶/۸	۲۰۸/۰
طرق مشهد	۲۵۵/۲	۱۰۰/۹	۲۴۱/۲	۱۷۷/۸	۲۲۷/۴	۱۸۵/۶	۲۱۸/۹
کشاورزی کرج	۲۶۰/۸	۹۴/۵	۲۳۸/۷	۱۷۲/۵	۲۱۶/۳	۱۷۷/۱	۲۱۸/۱
امام‌زاده جعفر	۴۰۸/۹	۲۶۷/۹	۳۹۳/۳	۲۹۸/۱	۳۳۵/۲	۲۵۵/۷	۲۴۶/۵
سرابله ایلام	۱۶۳/۴	۵۶/۶	۱۵۴/۹	۱۹۲/۴	۲۰۱/۹	۱۱۶/۷	۱۸۷/۶
قراخیل	۶۴۱/۶	۳۱۹/۰	۳۴۸/۳	۲۶۵/۳	۳۳۲/۲	۲۷۱/۵	۲۴۶/۶

با هدف بررسی کارایی مدل بیلان آب ـ خاک در تعیین عملکرد گندم دیم، ابتدا ایستگاه‌های مختلف حسب هویت اقلیمی آنها در چهار گروه خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب تفکیک و سپس روابط همبستگی بین عملکرد و بارش مؤثر در هر گروه اقلیمی تعیین شد. نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در هر یک از چهار گروه اقلیمی، ضرایب همبستگی (r) مربوط به مدل پیشنهادی قابل قبول بوده و نسبت به مدل‌های دیگر، کارایی بیشتری در تعیین تغییرات عملکرد گندم دیم حسب بارش دارد.



شکل ۳. نمودار روابط همبستگی بین مقادیر برآوردشدهٔ بارش مؤثر کل دورهٔ رشد بر مبنای مدل بیلان آب ـ خاک و میزان عملکرد واقعی گندم دیم (کیلوگرم برهکتار) در اقلیم‌های مختلف کشور. خط پررنگ روی نمودار معرف رگرسیون و خطوط کم‌رنگ معرف حدود اطمینان ۹۵ درصدی اطراف خط رگرسیون هستند.

از بررسی قانون‌مندی نسبت بارش مؤثر به کل بارندگی طی فصل رشد در مقابل ضریب خشکی دومارتن، می‌توان این‌گونه برداشت کرد که هرچه میزان ضریب خشکی دومارتن افزایش می‌یابد، درصدی از بارش که در کشت گندم دیم مؤثر است، کاهش خواهد یافت. این گفته به‌خوبی در شکل (۴) نمایش داده شده است. به‌بیان دیگر، هرچه به‌سمت مناطق مرطوب‌تر حرکت می‌کنیم، نسبت بارش مؤثر به باران کمتر می‌شود؛ اگرچه مقدار مطلق بارش مؤثر افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به این مورد نسبت داد که در مناطق خشک، همواره مقدار بارندگی کمتر از ظرفیت نگهداری خاک است، ولی در مناطق مرطوب وضع این‌گونه نیست و میزان زیادی از بارش، از روش‌های گوناگون چه از طریق رواناب یا نفوذ عمقی از ناحیهٔ توسعهٔ ریشه، خارج شده و نمی‌تواند به‌منظور نیازهای تبخیر ــ تعرقی گیاه مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ٤. نمودار تغییرات نسبت بارش مؤثر به مقدار کل بارندگی فصل رشد حسب تغییرات ضریب خشکی دومارتن (Ai)

با تحلیل مشاهدات بارندگی، ابتدا بارش مؤثر به‌روش‌های مختلف تجربی برای هر ایستگاه برآورد و با مدل تدوین‌شده بر اساس بیلان آب ـ خاک مورد مقایسه قرار گرفت و مناسب‌ترین روش برای تعیین بارش مؤثر در هر منطقه اقلیمی تعیین شد. نتایج بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است.

با توجه به میزان خطای برآورد شده در جدول (۲)، می‌توان این‌گونه بیان کرد که در مناطق با هویت اقلیمی خشک در طبقه‌بندی دومارتن، به‌ترتیب روش‌های نسبت تبخیرـ تعرق پتانسیل به بارندگی، ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده بهترین نتیجه را داده‌اند. دلیل این امر آنکه این مناطق جزء مناطقی هستند که در آن، تبخیر مهم‌ترین عامل محدودکنندهٔ بارش مؤثر به‌شمار می‌رود، بنابراین در این مناطق روش‌هایی که تبخیر را یک عامل اساسی در برآورد بارش مؤثر لحاظ می‌کنند، نتایج بهتری داده‌اند.

جدول ۲. مقادیر شاخص ارزیابی خطا برای روش‌های مختلف تجربی در برآورد بارش مؤثر در چند نمونهٔ اقلیمی ایران

روش تجربی	اقلیم خشک		اقلیم نیمه‌خشک		اقلیم مرطوب		اقلیم نیمه‌مرطوب	
	RMSE	D-index	RMSE	D-index	RMSE	D-index	RMSE	D-index
روش ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده	۷۰/۲	۰/۶	۵۴/۷	۰/۸	۲۸۹/۷	۰/۳	۴۵	۰/۵
روش فائو	۸۱/۷	۰/۵	۱۰۷/۲	۰/۵	۳۷/۳	۰/۹	۲۸/۴	۰/۸
روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده	۴۴/۱	۰/۷	۵۴/۲	۰/۷	۶۰/۸	۰/۸	۲۹/۲	۰/۷
روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده	۴۰/۲	۰/۸	۴۸/۹	۰/۸	۱۰۰/۵	۰/۴	۵۰/۹	۰/۶
روش نسبت تبخیرـ تعرق پتانسیل به بارندگی	۳۸/۳	۰/۹	۲۹/۷	۰/۹	۱۳۷/۹	۰/۵	۱۴۶/۴	۰/۳
روش معادلهٔ رنفرو	۴۷/۶	۰/۷	۶۰/۴	۰/۶	۹۱	۰/۷	۸۱/۶	۰/۴

در مناطق با هویت اقلیمی نیمه‌خشک نیز، به‌ترتیب روش‌های نسبت تبخیر ــ تعرق پتانسیل به بارندگی و ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده بهترین نتایج را داشته‌اند. روش نسبت تبخیر- تعرق به‌میزان بارش، روش مفیدی برای محاسبهٔ میزان بارش مؤثر در مناطق نیمه‌خشک و خشک در نظر گرفته می‌شود. تعداد روزهایی که می‌توان با استفاده از این روش به بررسی آن پرداخت، به نوع خاک و شرایط عمومی منطقه بستگی دارد. این‌گونه به نظر می‌رسد که حداکثر تعداد روزهای هر دسته در این روش، از پانزده روز در فصل‌های تابستان و بهار، تا سی روز در فصل‌های زمستان و پاییز نتایج قابل قبول‌تری را در اختیار قرار می‌دهد؛ اما بیان این نکته نیز مهم است که در این روش، بسته به توزیع بارش، می‌تواند مقادیر به‌دست‌آمده بیشتر یا کمتر باشد که این امر، به‌ویژه در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب به‌وضوح دیده می‌شود، اما به‌طور کلی در ایستگاه‌های با هویت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک اشتباه کمتر است. این روش برای برنامه‌ریزی‌های کلی و برای برآورد اولیه و سریع از میزان بارش مؤثر بسیار مناسب و کم‌هزینه است. روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، به‌دلیل اینکه مقدار بارندگی و تبخیر- تعرق ماهانه و عمق خاک را برای برآورد بارش مؤثر ماهانه در نظر می‌گیرد، نتایج رضایت‌بخشی تولید می‌کند.

در مناطق با هویت اقلیمی مرطوب در طبقه‌بندی دومارتن، روش‌های فائو و روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، به‌ترتیب بهترین نتایج را در برآورد بارش مؤثر طی دورهٔ رشد به‌خود اختصاص داده‌اند. روش فائو برای مناطقی با مشخصهٔ مرطوب در طبقه‌بندی دومارتن توصیه می‌شود. نکته‌ای که در زمینهٔ استفاده از روش ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده بسیار اساسی و حائز اهمیت است، آنکه روش ادارهٔ احیای اراضی ایالات متحده، تنها برپایهٔ رواناب بنا شده است و به‌دلیل در نظر نگرفتن نوع خاک، تأثیرات خشکی منطقه و نوع محصول، اگرچه در برآورد بارش مؤثر فصلی به‌خوبی عمل می‌کند؛ اما به‌طور کلی چندان رضایت‌بخش به‌نظر نمی‌رسد.

در خصوص ایستگاه‌های با هویت اقلیمی نیمه‌مرطوب نیز، به‌ترتیب روش‌های فائو، ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده و روش معادلهٔ رنفرو، بهترین نتایج را داشته‌اند. البته بیان این نکته حائز اهمیت است که روش معادلهٔ رنفرو بسیار تجربی است و در مقاطع کوتاه‌مدت، نتایج حاصل از این روش به‌هیچ‌وجه پذیرفتنی نیست، اما این روش برای برآورد بارش مؤثر در کل دورهٔ رشد مناسب به نظر می‌رسد. از این رو، نمی‌توان از این روش در برنامه‌ریزی‌های آبیاری که نیاز به در نظر گرفتن مقادیر کوتاه‌مدت بارش مؤثر هستند، استفاده کرد. به‌طور کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که این معادله به‌نوعی توان خشکی منطقه را منعکس می‌کند و دقت پایینی دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل دولایه‌ای خاک در محیط زبان برنامه‌نویسی ویژوآل بیسیک، به‌منظور برآورد بارش مؤثر در کشت گندم دیم طراحی و تدوین شد. تحلیل آماری میزان بارش مؤثر سالانهٔ به‌دست‌آمده با استفاده از مدل مذکور و عملکرد در واحد هکتار گندم دیم، از بیست‌ویک ایستگاه هواشناسی کشاورزی کشور واقع در چهار اقلیم خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب با طول دورهٔ آماری مشترک شانزده سال (سال‌های کشت ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹) نشان داد که در هر یک از چهار گروه اقلیمی، مدل پیشنهادی قابلیت بالایی در تعیین بخشی از تغییراتِ میزان محصول گندم دیم

ـ که توسط تغییرات در میزان بارش مؤثر قابل توجیه است ـ را دارد. سپس مقادیر بارش مؤثر به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های تجربی موجود با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل تدوین‌شده بر اساس بیلان آب ـ خاک، به‌منزلهٔ روش مبنا، در هریک از چهار گروه اقلیمی به‌طور جداگانه مقایسه شد. نتایج مقایسهٔ روش‌های مختلف نشان داد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ترتیب روش‌های نسبت تبخیرـ تعرق پتانسیل به بارندگی، روش ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده بهترین نتیجه را داده‌اند. در مناطق نیمه مرطوب و مرطوب روش‌های فائو و روش جدید ادارهٔ حفاظت خاک ایالات متحده، بهترین نتایج را در برآورد بارش مؤثر در کل فصل کشت به‌خود اختصاص داده‌اند.

منابع

رحیمی، ج. (۱۳۹۱). **مطالعهٔ تطبیقی روش‌های برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم در چند نمونهٔ اقلیمی ایران**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، هواشناسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.

رحیمی، ج. و بذرافشان، ج. (۱۳۹۰). **برآورد بارش مؤثر بر زراعت گندم دیم با استفاده از روش SCS در کرج**، نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، کرج.

رحیمی، ج.، خلیلی، ع.، بذرافشان، ج. (۱۳۹۰). **تدوین مدل رایانه‌ای مبتنی بر بیلان آب خاک به‌منظور برآورد بارش مؤثر در زراعت گندم دیم (مطالعهٔ موردی: استان فارس)**، نشریهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، سال بیست‌وششم، شماره ۳، صص. ۷۹۸-۷۸۶.

سادات میرئی، م. ح. (۱۳۷۶). **برآورد باران مؤثر در چند نمونه اقلیمی ایران**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، آبیاری زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.

عزیزی، ق. (۱۳۷۹). **برآورد بارش مؤثر در رابطه با کشت گندم دیم (مورد دشت خرم‌آباد)**، فصلنامهٔ پژوهش‌های جغرافیایی، سال سی‌ودوم، شماره ۳۹، صص. ۱۲۳-۱۱۵.

علیزاده، ا. و کمالی، غ. (۱۳۸۶). **نیاز آبی گیاهان در ایران**، چاپ اول، مشهد: نشر دانشگاه امام رضا (ع).

مجرد، ف.، قمرنیا، ه.، نصیری، ش. (۱۳۸۴). **برآورد بارش مؤثر و نیاز آبی برای کشت برنج در جلگهٔ مازندران**، فصلنامهٔ پژوهش‌های جغرافیایی، سال سی‌وهفتم، شماره ۵۴، صص. ۷۶-۵۹.

Alizadeh, A., Kamali, G., 2007, **Water Use of Plants in Iran**, Astan Quds Publication, Mashhad.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements**, FAO Irrigation and Drainage, No. 56.

Avinash, S., Patwardhan, J., Nieber, L., Eldon, L.J., 1990, **Effective Rainfall Estimation Methods**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 2, PP. 182-193.

Azizi, G.H., 2000, **Evolution of Effective Precipitation Values in Relationship with Cultivation of Dry Wheat, Case Study: Khoram Abad Plain**, Geographical Research Quarterly, Vol. 32, No. 39, PP. 115-123.

Borg, H., Grimes, D.W., 1986, **Depth Development of Root with Time-An Empirical Description**, Trans. ASAE, Vol. 29, No. 1, PP. 194-198.

Bos, M.G., 1980, **Irrigation Efficiency at Crop Production Level**, ICID Bulletin, Vol. 29, No. 2, PP. 18–26.

Bos, M.G., Kselik, R.A.L., Allen, R.G., 2009, **Water Requirements for Irrigation and the Environment**, Dordrecht, Springer. ISBN: 978-1-4020-8947-3.

Bos, M.G., Nugteren, J., 1974, **On Irrigation Efficiencies**, Publication 19, 1st Edition 1974; 2nd Edition 1978; 3rd Revised Edition 1982; 4th Edition 1990, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, 4th Edition Also Published in Farsi with IRANCID, Tehran.

Chahoon, J., Yonts, D., Melvin, S., 2001, **Estimating Effective Rainfall**, www.iavrpubs.unl.edu/irrigation/g1099.htm.

Chow, V.T., 1964, **Handbook of Applied Hydrology**, McGraw Hill Book Co., New York,

Dastane, N.G., 1974, **Effective Rainfall in Irrigated Agriculture**, F.A.O. Irrigation and Drainage Paper 25, Flood and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Greacen, E.L., Hignett, C.T., 1984, **Water Balance under Wheat Modelled with Limited Soil Data**, Agricultural Water Management, Vol. 8, No. 1-3, PP. 291-304.

Hajilal, M.S., Rao, N.H., Sarma, P.B.S., 1998, **Planning Intra-Seasonal Water Requirements in Irrigation Projects**, Agricultural Water Management, Vol. 37, No.2, PP. 163–182.

Horton, R.E., 1919, **Rainfall Interception**, Monthly Weather Review, 47, PP. 603-623.

ICID Committee on Assembling Irrigation Efficiency Data, 1978, M.G. Bos (Chmn.) **Standards for the Calculation of Irrigation Efficiencies**, ICID Bulletin, Vol. 27, No. 1, PP. 91–101. New Delhi (also Published in French, Spanish, Turkish, Arabic, and Persian).

Lashari, B.K., Laghari, K.Q., Phul, A.M., 2010, **Development of an Irrigation Scheduling Model**, Journal of Engineering & Technology, Mehran University Research, Vol. 29, No.4. PP. 681-688.

Mohan, S., Simhadrirao, B., Arumugam, N., 1996, **Comparative Study of Effective Rainfall Estimation Methods for Lowland Rice**, Water Resources Management, Vol. 10, No. 1, PP. 335-44.

Mojarrad, F., Nasiri, SH., 2005, **Estimation of Return Periods and Confidence Intervals of the Effective Rainfall for Rice Cultivation in the Mazandaran Plain**, Physical Geography Research Quarterly. Vol. 37, No. 54, PP. 59-76.

Rahimi, J., 2012, **Comparison of Effective Rainfall Estimation Methods for Rainfed Wheat Crop in Several Climatic Samples of Iran**, M.Sc. Dissertation, University College of Agriculture and Natural Recourses University of Tehran, Iran.

Rahimi, J., Bazrafshan, J., 2011, **Estimation of Effective Rainfall for Rainfed Wheat Crop with the SCS Method in Karaj**, First National Conference on Agrometeorology and Agricultural Water Management, 22-23 November, Karaj, Iran.

Rahimi, J., Bazrafshan, J., Khalili, A., 2012, **A Computer Model Based on Soil-Water Balance for Estimating the Effective Rainfall in Dryland Wheat Crop (The Case Study of Fars Province)**, Journal of Water and Soil, Vol. 26, No. 3, PP. 786-789.

Rao, N.H., 1987, **Field Test of a Simple Soil Water Balance Model for Irrigated Areas**, Journal of Hydrology, Vol. 91, No. 1-2, PP. 179–186.

Rickert, K.G., Sedgley, R.H., Stem, W.R., 1987, **Environmental Response of Spring Wheat in the South-Western Australian Wheat Belt**, Australian Journal of Agricultural Research, Vol. 38, No. 4, PP. 655-670.

Sadat Mirei, M.H., 1997, **Estimation of Effective Rainfall in Several Climatic Samples of Iran**, M.Sc. Dissertation, University College of Agriculture and Natural Recourses University of Tehran, Iran.

Smith, M., 1988, **Manual for CROPWAT version 5.2**, FAO, Rome.

Stamm, G.G., 1967, **Problems and Procedures in Determining Water Supply Requirements for Irrigation Projects**, Chap. 40 in Irrigation of Agricultural Lands by Hagan et al. Wisconsin, American Society of Agronomy, Agronomy II.

USDA., 1970, **Irrigation Water Requirements**, Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Technical Release 21, [Revision 2 of 1967 Edition, Available from National Technical Information Service, Spring Field, Va., as NTIS Report PB 85-178390/XAB.], P. 88.