توسعه و کاربرد مدل رایانه‌ای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری مزرعه گندم بر اساس بیلان آب در خاک و بارش مؤثر

مهدی مهبد*، علیرضا سپاسخواه و مرضیه منفرد[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۹/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۷/۲۳)

چکیده

استفاده بهینه از نزولات جوی، منجر به توسعه سطح زیر کشت و امکان تخصیص منابع آب موجود به مصارف دیگر می‌گردد که در نهایت منجر به توسعه اقتصادی خواهد شد. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مدیریت آب خاک و زمان‌بندی آبیاری می‌باشد. در این پژوهش مدل رایانه‌ای برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری مزارع بر اساس بیلان آب خاک و بارش، که قبلاً تهیه شده بود، تکمیل گردید و برای مزرعه گندم در منطقه باجگاه به کار برده شد. هم‌چنین تأثیر مقدار ذخیره رطوبت در حداکثر عمق خاک ناحیه ریشه در مقدار آب آبیاری بررسی شد. مدل مورد نظر در محیط برنامه‌نویسی Visual Basic .Net نوشته شده است. مدل تهیه شده برای ۱۳ سال آمار هواشناسی منطقه باجگاه که کامل‌تر بودند، به کار برده شد. مدل در دو حالت که باران مؤثر کمبود رطوبتی خاک (نسبت به حالت ظرفیت زراعی) تا حداکثر عمق ریشه را جبران می‌نماید (حالت دوم) نسبت به حالتی که باران مؤثر تنها کمبود رطوبتی خاک تا عمق ریشه روزانه را جبران می‌کند(حالت اول) اجرا شد. در حالت دوم، مقدار آب آبیاری و تعداد دفعات آبیاری نسبت به حالت اول کاهش یافته است. چنانکه میانگین مقدار آبیاری فصلی از ۷۰۶/۸ به ۵۶۹/۲ میلی‌متر و میانگین تعداد دفعات آبیاری فصلی از ۸ بار به ۶ بار کاهش یافته‌اند. هم‌چنین میانگین نسبت باران مؤثر به کل مقدار باران از ۴۶/۳۱ درصد به ۷۳/۶ درصد افزایش یافته است. با احتمال ۸۰٪، در حالت اول با احتساب ۱۰۸/۹ میلی‌متر بارش مؤثر نیاز به ۹ بار آبیاری و ۷۵۷/۷ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است و در حالت دوم با احتساب ۲۳۶/۷ میلی‌متر بارش مؤثر به ۷ بار آبیاری و ۶۳۶/۹ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است. با احتمال ۵۰٪ ، در حالت اول با احتساب ۱۶۵/۶ میلی‌متر بارش مؤثر به ۸ بار آبیاری و ۷۱۲/۶ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است و در حالت دوم با احتساب ۲۹۲/۱ میلی‌متر بارش مؤثر به ۶ بار آبیاری و ۵۴۵/۱ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است. در نهایت نشان داده شد که با استفاده از اصول ساده مدیریتی می‌توان از مصرف بیش از اندازه آب آبیاری جلوگیری نمود.

واژه‌های کلیدی: بارش مؤثر، کمبود رطوبتی خاک، تبخیر- تعرق، بیلان آب در خاک

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استاد و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahbod001@yahoo.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

مقدمه

گیاهان به عنوان مواد غذایی و فیبر مهم‌ترین منبع تأمین کننده انرژی حیات برای انسان و دام و تأمین کننده مواد اولیه بسیاری از صنایع می‌باشند. از بین عوامل رشد گیاه، آب مهم‌ترین عامل محدود کننده است. تعیین میزان آب مورد نیاز گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری به منظور تأمین حداکثر رشد و تحصیل حداکثر محصول و هم‌چنین اطلاع از مقدار کل آب مصرفی و در نتیجه تعیین ظرفیت کانال‌ها و مخازن آب مهم‌ترین مرحله مطالعاتی را در یک طرح آبیاری و زه‌کشی تشکیل می‌دهد. در این زمینه از انواع مدل‌های تجربی و تحلیلی استفاده شده است. در سال‌های اخیر با افزایش قدرت رایانه‌ها برای مدیریت آبیاری مزارع از مدل‌های رایانه‌ای استفاده می‌گردد.

مدل رایانه‌ای مجموعه عملیاتی است که طی آن یک فرایند به صورت مصنوعی و با تقلید از حالت واقعی آن بررسی می‌شود (۳، ۲۳، ۲۴ و ۲۶). مدل‌های ارائه شده توسط محققین بر اساس و پایه‌های گوناگون شکل گرفته‌اند. بعضی از مدل‌ها با استفاده از معادله‌های ساده بیلان آب خاک و بدون استفاده از معادله‌های پیچیده آب در خاک مقدار تولید محصول را برآورد می‌کنند، از جمله می‌توان مدل‌های شبیه‌سازی محصولات زراعی و مدیریت آب خاک CRPSM و CRPSM1 (۱) و CRPSM2 (۲) را نام برد. بیلی مدلی ارائه داد که شرایط آب و هوایی و نوع گیاه را به عنوان ورودی گرفته و مقدار تبخیر-تعرق و کمبود رطوبت خاک را محاسبه می‌کند (۷). هس مدل برنامه مدیریتی IMS را ارائه داد که مقدار کمبود رطوبتی خاک، تاریخ و زمان آبیاری بعدی را محاسبه نمود (۱۴). هیل و آلن با کاربرد داده‌های طولانی مدت هواشناسی و با استفاده از مدل CRPSM تقویم‌های آبیاری را ارائه دادند (۱۵). منفرد و سپاسخواه مدلی برای مدیریت و برنامه‌بندی آبیاری مزارع تهیه نمودند و برای گندم در مناطق باجگاه و کوشکک مورد بررسی قرار دادند (۴). سپاسخواه و همکاران یک مدل بیلان آب خاک برای مدیریت و برنامه‌بندی آبیاری و تخمین محصول گیاه لوبیای چشم بلبلی ارائه دادند (۲۳). سپاسخواه و همکاران در یک مدل بیلان آب خاک، اثر تنش آبی و شوری آب را بر تولید محصولات مختلف نشان دادند (۲۴).

در رابطه با بیلان آب خاک و سیستم جمع‌آوری آب باران مدل‌های رایانه‌ای زیادی ساخته شده است. بریسون و همکاران مدلی برای بیلان آب خاک ارائه کردند که قادر به پیش‌بینی آب مصرفی، تبخیر از خاک و تعرق از گیاه در طول فصل رشد می‌باشد (۱۰). مدل ساده دیگری برای تخمین بیلان آب خاک توسط ردی ارائه شده که از آن در مدل سانچز - کوهن و همکاران نیز استفاده شده است (۲۰ و ۲۱). سانچز - کوهن و همکاران مدلی برای بیلان آب خاک در سیستم‌های جمع‌آوری آب باران ارائه کردند که برای سیستم کشت نواری به کار می‌رود (۲۱). سپاسخواه و فولادمند یک مدل رایانه‌ای برای طراحی سیستم‌های جمع‌آوری آب باران در زیر حوضه‌های کشت انگور دیم ارائه کردند (۲۲).

مدل‌های شبیه‌سازی بیلان آب و خاک را می‌توان به طور کلی به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول آنهایی هستند که روابط حاکم بر جریان آب در خاک را به عنوان معادله اصلی در نظر گرفته و با اضافه نمودن عامل جذب آب ریشه به معادله حرکت آب در خاک غیر اشباع و حل آن، وضعیت آب خاک را مشخص می‌نمایند (۸، ۱۶ و ۱۷). دسته دوم این مدل‌ها از معادله‌های ساده بیلان آب در نیمرخ خاک و یا لایه‌های آن استفاده نموده و بیلان آب خاک را به دست می‌آورند. این مدل‌ها افزایش آب خاک را تا حد ظرفیت مزرعه جایز دانسته و مازاد بر آن را نفوذ عمقی در نظر گرفته و حداقل آب خاک را نقطه پژمردگی دائم در نظر می‌گیرند (۱۳و ۱۹).

بیلان‌بندی آب خاک صرفاً تشریح قانون بقای جرم یا معادله پیوستگی در خاک است. تغییرات مقدار آب در نیمرخ مشخصی از خاک صرفاً به علت ورود یا خروج آب از آن می‌باشد که به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\Delta S = (R + I + U) - (R_{\circ} + D + E + T) \qquad [۱]$$

که در آن، ΔS تغییرات آب خاک، R مقدار بارندگی، I مقدار آبیاری، U مقدار تغذیه آب زیر زمینی، $R_{\circ}$ مقدار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

رواناب، D مقدار نفوذ عمقی، E مقدار تبخیر از سطح خاک و T مقدار تعرق می‌باشد. واحد کلیه کمیت‌های بیان شده حجم در واحد سطح می‌باشد.

باران به عنوان یک منبع تغذیه کمکی در کشت آبی و منبع اصلی در کشت دیم مطرح می‌باشد. در اصطلاح به قسمتی از کل بارش که به نحوی مورد استفاده گیاه قرار گیرد باران مؤثر گفته می‌شود. تعیین مقدار باران مؤثر نیاز به اندازه‌گیری باران، تلفات ناشی از رواناب سطحی، تلفات ناشی از نفوذ عمقی و مقدار جذب آب از خاک توسط گیاه دارد. اطلاعات مورد نیاز یا به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده و یا توسط مدل‌های ارائه شده تخمین زده می‌شوند (۱۲). به صورت مستقیم با استفاده از اشل تجمعی (۲۵) می‌توان مقدار باران مؤثر را اندازه‌گیری نمود. رامداس روش دیگری در تعیین مقدار باران مؤثر ارائه نمود (۱۸).

در این پژوهش مدل رایانه‌ای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری مزارع که قبلاً ارائه شده تکمیل شده است و بر اساس نوع گیاه مورد کشت و داده‌های هواشناسی منطقه مورد کشت، مقدار باران مؤثر، کمبود رطوبتی خاک، رطوبت خاک و مقدار نفوذ عمقی را به صورت روزانه گزارش می‌کند. این مدل برای ۱۳ سال آمار هواشناسی منطقه باجگاه و کشت گندم اجرا شد. هم‌چنین تأثیر ذخیره باران در عمق خاک ناحیه ریشه در مقدار آب آبیاری و باران مؤثر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کمیت‌های محاسبه شده در مدل، معادله‌هایی بین باران مؤثر و کل مقدار بارش در مزارع منطقه باجگاه به دست آمدند. در نهایت تحلیل احتمالاتی تعداد دفعات آبیاری، مقدار آب آبیاری ومقدار باران مؤثر گندم در منطقه باجگاه انجام گرفت.

شرح مدل رایانه‌ای

مدل ارائه شده توسط منفرد و سپاسخواه (۴) قادر است با استفاده از داده‌های هواشناسی و مشخصات گیاه، بر اساس بیلان حجمی آب در خاک و جذب یک‌نواخت آب توسط گیاه از نیمرخ خاک، مقدار و زمان آبیاری را تعیین کند. برای قابلیت بیشتر در محاسبات و تسهیل استفاده از آن در محیط برنامه نویسی VB.NET دوباره نوشته شد و تصحیحاتی در آن برای محاسبه زمان و مقدار آبیاری، مقدار باران مؤثر، کمبود رطوبتی و رطوبت روزانه در لایه‌های خاک براساس الگوی جذب آب ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد از نیمرخ خاک، مطابق آنچه در ادامه این فصل گفته می‌شود انجام گرفت. این مدل برای اجراء به اطلاعات روز شروع مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی، روز پایان فصل رشد، ضرایب گیاهی مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی، ضریب آب سهل‌الوصول، مقادیر رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، حداکثر عمق ریشه، ارتفاع منطقه از سطح دریا، عرض جغرافیایی منطقه و ضرایب آلبیدو، ضرایب تابع تخمینی تابش خورشیدی موج کوتاه رسیده به سطح زمین (a_s و b_s) و متوسط رطوبت اولیه خاک دارد.

روند کلی در این مدل به این صورت است که ابتدا اطلاعات هواشناسی که شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه (°C)، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، تعداد ساعات واقعی آفتابی روزانه، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (km/day) و بارندگی روزانه(mm) می‌باشد از طریق معرفی فایل ورودی، وارد مدل می‌شوند. در ادامه، ضریب گیاهی روزانه (۶) و عمق ریشه روزانه (۹) برای کل دوره رشد با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_{C_i} = K_{C_{ini}} \qquad L_۱ \le i \le L_۲ \qquad [۲]$$

$$K_{C_i} = K_{C_{ini}} + (K_{C_{mid}} - K_{C_{ini}}) \frac{i - L_۲}{L_۳ - L_۲} \qquad L_۲ \le i \le L_۳ \qquad [۳]$$

$$K_{C_i} = K_{C_{mid}} \qquad L_۳ \le i \le L_۴ \qquad [۴]$$

$$K_{C_i} = K_{C_{mid}} - (K_{C_{mid}} - K_{C_{end}}) \frac{i - L_۴}{L_۵ - L_۴} \qquad L_۴ \le i \le L_۵ \qquad [۵]$$

$$RD_i = RDM\left[۰/۵ + ۰/۵ \sin\left(۳/۰۳ \frac{DAS}{DTM}\right) - ۱/۴۷\right] \qquad [۶]$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

که در آنها K_{C_i} ضریب گیاهی روزانه، $K_{C_{ini}}$ ضریب گیاهی مرحله ابتدایی، $K_{C_{mid}}$ ضریب گیاهی مرحله میانی، $K_{C_{end}}$ ضریب گیاهی انتهایی، L_1 شماره روز از ابتدای سال میلادی که مرحله ابتدایی شروع می‌شود، L_2 شماره روز از ابتدای سال میلادی که مرحله توسعه شروع می‌شود، L_3 شماره روز از ابتدای سال میلادی که مرحله میانی شروع می‌شود، L_4 شماره روز از ابتدای سال میلادی که مرحله انتهایی شروع می‌شود، L_5 شماره روز از ابتدای سال میلادی که فصل رشد پایان می‌یابد، i شماره روز از ابتدای سال میلادی، RD_i عمق روزانه ریشه(mm)، RDM عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه(mm)، DAS تعداد روز بعد از کشت و DTM تعداد کل روزها برای رسیدن به عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه می‌باشد.

سپس شماره روز برابر با شماره روز کاشت قرار می‌گیرد. برای این روز تبخیر- تعرق بالقوه گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن- فائو (۶) و گیاه زراعی مورد بررسی، به ترتیب با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$ET_{O_i} = C\left[0/408WR_n + (1-W)f_u(e_c - e_d)\right] \quad [7]$$

$$ET_{P_i} = K_{C_i} \times ET_{O_i} \quad [8]$$

که در آن، ET_{O_i} تبخیر- تعرق بالقوه گیاه مرجع در روز شماره i (mm/day)، W ضریب مربوط به دمای هوا، R_n تشعشع خالص دریافتی در سطح گیاه(MJ/m^{2}day)، f_u تابع مربوط به سرعت باد، e_c و e_d به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی (mbar)، C ضریب اصلاحی، K_{C_i} ضریب گیاهی روزانه و ET_{P_i} تبخیر- تعرق بالقوه روزانه گیاه مورد نظر می‌باشد.

ضریب آب سهل الوصول از معادله زیر محاسبه می‌شود (۶):

$$p_i = p_t + 0/04(5 - ET_{C_i}) \quad [9]$$

که در آن، p_i ضریب آب سهل‌الوصول حسب اعشار در روز شماره i و p_i ضریب آب سهل‌الوصول حسب اعشار در تبخیر - تعرق برابر با ۵ میلی‌متر در روز است.

سپس طی روالی که در ادامه توضیح داده می‌شود، نیاز یا عدم نیاز به آبیاری تعیین می‌گردد که در صورت لزوم، مقدار آب آبیاری نیز محاسبه می‌گردد. در ادامه مقدار کمبود رطوبتی و رطوبت در نیمرخ خاک معین می‌گردد. در صورت بارندگی مقدار باران مؤثر نیز محاسبه می‌شود. در پایان به شماره روز، یک واحد افزوده شده و روال فوق برای روز بعد تکرار می‌گردد تا روز برداشت فرا رسد. در شکل ۱ فلوچارت حاکم بر این مدل نشان داده شده است. در ادامه به شرح هر یک از قسمت‌های این مدل پرداخته می‌شود.

حداکثر کمبود رطوبتی

حداکثر کمبود رطوبتی در نیمرخ خاک تا عمق ریشه نیز از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$MAD_i = RD_i(FC - PWP)p_i \quad [10]$$

که در آن MAD_i حداکثر کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت زراعی در روز شماره i (mm)، FC رطوبت حجمی خاک منطقه در حالت ظرفیت زراعی(m^{3}m^{-3}) و PWP رطوبت حجمی خاک منطقه در حالت پژمردگی دائم (m^{3}m^{-3}) است. مقادیر FC و PWP برای خاک منطقه باجگاه به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۱۴ (m^{3}m^{-3}) در نظر گرفته شد.

مقدار برگاب

مقدار برگاب از کل مقدار بارش کسر می‌گردد تا مقدار باران خالص نفوذ کرده در خاک به دست آید. مقدار برگاب از فرمول تجربی هورتن به صورت زیر محاسبه می‌گردد (۵):

$$P_c = a + bR_i^n \quad [11]$$

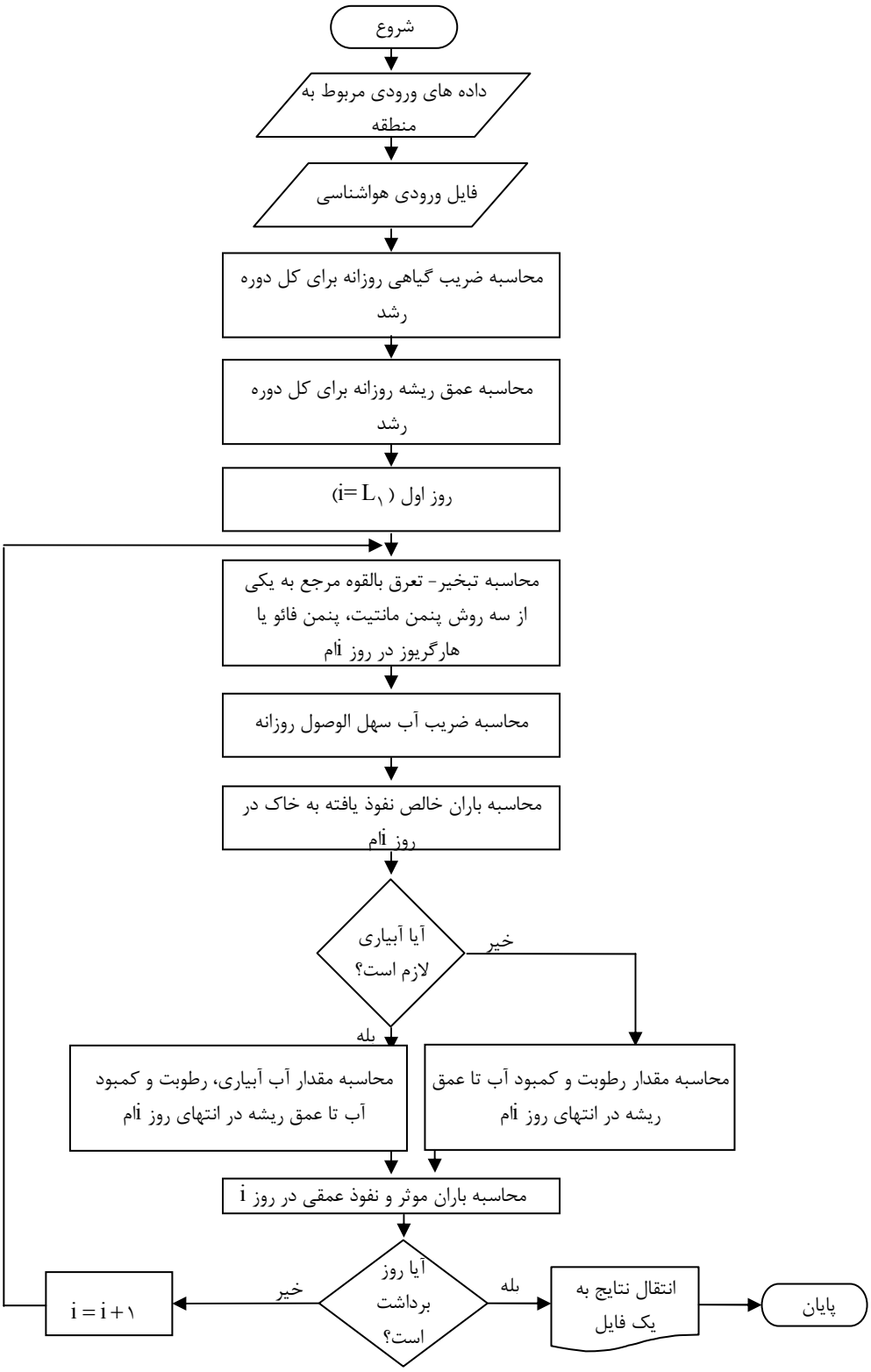
که در آن، R_i کل مقدار بارش در روز شماره i (mm)، P_c مقدار برگاب(mm) و a، b و n ضرایب ثابت معادله هستند که توسط هورتن برآورد شده است و برای گیاه گندم به ترتیب برابر با ۰/۱۲۵، ۰/۰۵ و ۱ می‌باشد.

روز و مقدار آب آبیاری در هر واقعه

در این مدل فرض شده است اگر عمق ریشه به چهار قسمت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]



شکل ۱. فلوچارت حاکم بر مدل ارائه شده

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

تقسیم گردد، لایه اول تا چهارم به ترتیب ۴۰٪، ۳۰٪، ۲۰٪ و ۱۰٪ از تبخیر- تعرق را تأمین می‌کنند. حال با فرض یک رطوبت اولیه و خروج آب بر طبق نسبت‌های یاد شده در هر روز، مقدار کمبود آب در هر لایه در انتهای هر روز (که برابر با کمبود رطوبتی در اول روز بعد است) به دست می‌آید. حال اگر مجموع کمبود رطوبتی در نیمرخ خاک تا عمق ریشه در اول روز مورد نظر و تبخیر- تعرق روزانه منهای مقدار بارندگی نفوذ یافته به خاک، بیشتر از کمبود مجاز در آن روز باشد، روز مورد نظر به عنوان روز آبیاری در نظر گرفته خواهد شد و مقدار آب آبیاری از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$IR = \sum_{j=1}^{4} D_{i,j,start} + ET_{C_i} - (P_{inf_i}) \qquad [۱۲]$$

$$P_{inf_i} = P - P_c \qquad [الف-۱۲]$$

که در آن، P_{inf_i} مقدار خالص نفوذ کرده در روز شماره i (mm)، P_c مقدار برگاب (mm)، ET_{C_i} مقدار تبخیر- تعرق گیاه در روز i، $D_{i,j,start}$ مقدار کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت زراعی در ابتدای روز i در لایه j (mm)، i شمارنده روز، j شمارنده لایه‌های خاک (از بالا به پایین) و IR مقدار آبیاری در روز آبیاری(mm) می‌باشد. مقدار ET_{C_i} از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_{C_i} = \sum_{j=۱}^{۴} \left(K_{S_j} \times ۰/۱ \times (۵-j) \times ET_{P_i} \right) \qquad [۱۳]$$

که در آن، K_{S_j} ضریب بدون بعد کاهش تبخیر- تعرق، که وابسته به مقدار آب موجود در خاک است و ET_{P_i} مقدار تبخیر- تعرق بالقوه گیاه مورد بررسی در روز i می‌باشد. مقدار K_{S_j} از معادله زیر به دست می‌آید(۶):

$$K_{S_j} = \frac{۰/۲۵RD_i \times (FC - PWP) - D_{i,j,start}}{۰/۲۵RD_i (۱-p)(FC - PWP)} \qquad [۱۴]$$

با توجه به عدم نیاز آبیاری در ۱۵ روز انتهایی، مقدار آب آبیاری برای این مدت صفر در نظر گرفته می‌شود. اگر در ابتدای اجرای مدل، کشت از نوع دیم تعریف شود مقدار آبیاری برای کل فصل زراعی صفر در نظر گرفته می‌شود.

مقدار رطوبت و کمبود رطوبتی روزانه خاک

در صورتی که روز مورد نظر روز آبیاری باشد مقدار کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت زراعی صفر خواهد بود و رطوبت هر چهار لایه برابر ظرفیت مزرعه خواهد بود. در صورتی که روز مورد نظر روز آبیاری نباشد، مقدار کمبود رطوبتی در انتهای روز در هر لایه از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{i,j,end} = D_{i,j,start} + ۰/۱(۵-j)(ET_C) - R_j \qquad [۱۵]$$

که در آن، $D_{i,j,start}$ مقدار کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت زراعی در ابتدای روز i در لایه j، j شماره لایه مورد نظر، R_j مقدار بارانی که وارد لایه شماره j شده و $D_{i,j,end}$ کمبود رطوبتی در انتهای روز i در لایه j می‌باشد. مجموعه ضرایب $۰/۱(۵-j)$ سهم هرلایه در تأمین جذب آب از لایه‌های چهارگانه را محاسبه می‌کند. برای مثال در حالتی که j برابر ۱ باشد، مقدار این ضریب ۰/۴ خواهد بود و یا به عبارت دیگر ۰/۴ از کل تبخیر- تعرق از لایه اول جذب می‌شود و این مقدار به کمبود رطوبتی این لایه نسبت به حالت ظرفیت زراعی افزوده می‌شود. هم‌چنین مقدار رطوبت هر یک از چهار لایه نیز از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta_{ij} = \left(\frac{۰/۲۵RD_i(FC - PWP) - D_{i,j,end}}{۰/۲۵RD_i} \right) + PWP \qquad [۱۶]$$

که در آن، θ_{ij} مقدار رطوبت حجمی لایه j در انتهای روز i است.

با فرض رشد ریشه تنها در شب، مقدار کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت مزرعه در ابتدای روز بعد، از معادله‌های زیر برای هریک از سه لایه اول نیمرخ خاک به دست آورده می‌شود:

$$D_{i+۱,۱,start} = D_{i,۱,end} + \left(\frac{D_{i,۲,end}(RD_{i+۱} - RD_i)}{RD_i} \right) \qquad [۱۷]$$

$$D_{i+۱,۲,start} = D_{i,۲,end} - \left(\frac{D_{i,۲,end}(RD_{i+۱} - RD_i)}{RD_i} \right) + \left(\frac{۲D_{i,۳,end}(RD_{i+۱} - RD_i)}{RD_i} \right) \qquad [۱۸]$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

$$D_{i+1,3,start} = D_{i,3,end} - \left(\frac{2D_{i,3,end}(RD_{i+1} - RD_i)}{RD_i}\right) + \left(\frac{3D_{i,4,end}(RD_{i+1} - RD_i)}{RD_i}\right) \quad [19]$$

که در آنها، $D_{i+1,1,start}$، $D_{i+1,2,start}$ و $D_{i+1,3,start}$ کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت مزرعه در ابتدای روز $i+1$ به ترتیب در لایه‌های اول، دوم و سوم می‌باشد.

در مورد لایه چهارم مسأله کمی پیچیده است. در صورتی که در روزهای قبل از این روز مورد نظر($i+1$) باران باریده باشد و مقداری از آن از منطقه ریشه در روزهای قبل عبور کرده باشد دو حالت ممکن است اتفاق افتد:

حجم باران به اندازه‌ای بوده است که نیمرخ خاک را تا عمق ریشه در روز $i+1$ به حالت ظرفیت زراعی رسانده است. در این حالت مقدار کمبود رطوبتی در لایه چهارم از معادله زیر به دست می‌آید:

$$D_{i+1,4,start} = D_{i,4,end} - \left(\frac{3D_{i,4,end}(RD_{i+1} - RD_i)}{RD_i}\right) \quad [20]$$

که در آن، $D_{i+1,4,start}$ کمبود رطوبت نسبت به حالت ظرفیت زراعی در لایه چهارم در روز $i+1$ می‌باشد.

حجم باران به اندازه‌ای بوده است که عمق خیس شده توسط باران به عمق ریشه در روز $i+1$ نمی رسد بنابراین مقدار کمبود رطوبتی در لایه چهارم به صورت زیر خواهد بود:

$$D_{i+1,4,start} = D_{i,4,end} - \left(\frac{3D_{i,4,end}(RD_{i+1} - RD_i)}{RD_i}\right) + (RD_{i+1} - Z_S)(FC - \theta_{ini}) \quad [20]$$

که در آن Z_s عمق جبهه ذخیره عمقی (mm) و θ_{ini} مقدار رطوبت حجمی اولیه نیمرخ خاک قبل از آبیاری اول است.

اما در حالتی که باران نقشی در ذخیره رطوبت در عمق فراتر از ریشه نداشته باشد، $D_{i+1,4,start}$ از معادله زیر به دست می‌آید:

$$D_{i+1,4,start} = D_{i,4,end} - \left(\frac{3D_{i,4,end}(RD_{i+1} - RD_i)}{RD_i}\right) + (RD_{i+1} - RD_i)(FC - \theta_{ini}) \quad [22]$$

در نهایت کمبود رطوبتی نسبت به حالت ظرفیت زراعی تا عمق ریشه موجود وعمق ریشه درزمان حداکثر رشد گیاه در ابتدای روز i از معادله‌های زیر محاسبه می شوند:

$$D_{i,start} = \sum_{j=1}^{4} D_{i,j,start} \quad [23]$$

$$D'_{i+1,start} = D_{i+1,start} + (RD_{max} - \max(Z_s, RD_{i+1}))(FC - \theta_{ini}) \quad [24]$$

که در آن $D'_{i,start}$ کمبود رطوبتی تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه نسبت به حالت ظرفیت زراعی، RD_{max} عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه، Z_s عمق ذخیره رطوبتی، RD_{i+1} عمق ریشه در روز $i+1$ و θ_{ini} متوسط رطوبت نیمرخ خاک از سطح زمین تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه است.

بارش مؤثر

در صورتی که مقدار بارش نفوذ کرده به خاک از مجموع مقدار تبخیر- تعرق روزانه و کمبود رطوبتی ابتدای روز بیشتر باشد دو حالت وجود دارد که در شکل ۲ این دو حالت نشان داده شده‌اند.

مقدار آب اضافه که از منطقه ریشه خارج می‌شود به عنوان نفوذ عمقی در نظر گرفته شود (حالت اول) که در این صورت مقدار باران مؤثر از معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_{e_i} = ET_{C_i} + \sum_{j=1}^{4} D_{i,j,start} \quad [25]$$

که در آن، R_{e_i} مقدار باران مؤثر در روز شماره i (mm) می‌باشد.

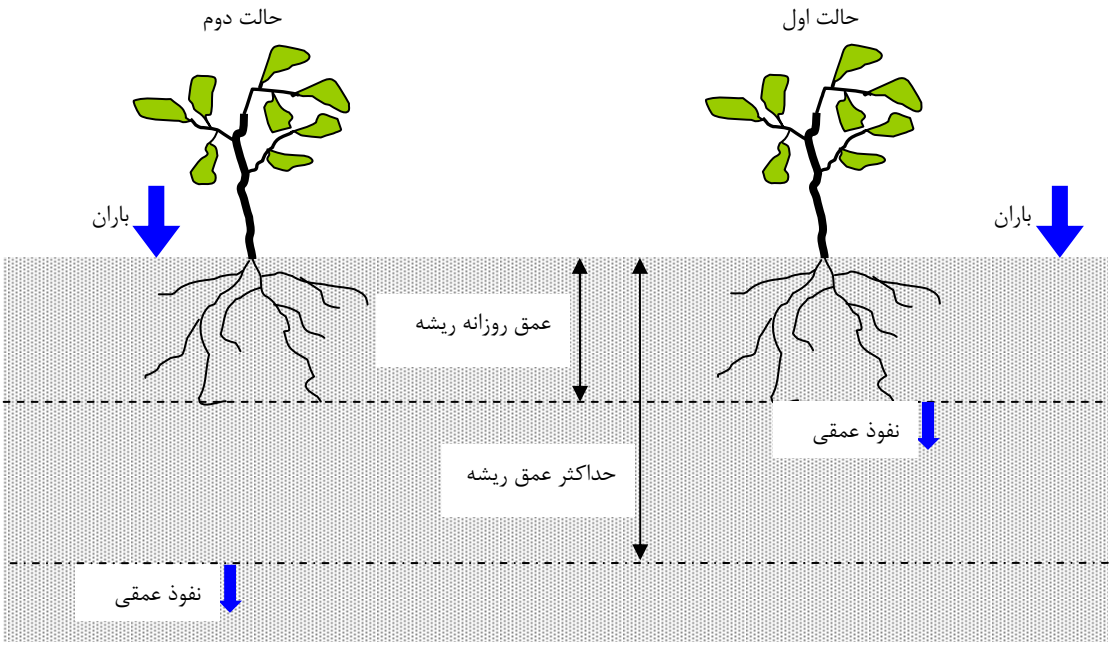
بخشی از مقدار آب خارج شده از محیط ریشه را که صرف ذخیره رطوبت در نیمرخ خاک تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه می‌شود نیز به عنوان باران مؤثر در نظر گرفته شود (حالت دوم). بنابراین مقدار باران مؤثر از معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_{e_i} = ET_{C_i} + \sum_{j=1}^{4} D_{i,j,start} + \left(\min(Z_{Smax}, Z_S) - RD_i\right)(FC - PWP) \quad [26]$$

که در آن، Z_{Smax} عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه و Z_S از معادله زیر محاسبه می‌شود:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]



شکل ۲. نمایی از دو حالت مختلف در تعیین بارش مؤثر و نفوذ عمقی

$$Z_S = \frac{R_{inf_i} - ET_{C_i} - \sum_{j=1}^{4} D_{i,j,start}}{(FC - PWP)} + Z'_S \qquad [۲۷]$$

که در آن، Z'_S عمق ذخیره رطوبتی قبل از بارندگی در روز i می‌باشد.

در صورتی که Z_S به عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه رسیده باشد، در بارندگی‌های بعدی دیگر از این روال استفاده نشده و کل آب خروجی از محیط ریشه به عنوان نفوذ عمقی در نظر گرفته می‌شود. در این صورت، مقدار نفوذ عمقی در روزی که باران باریده باشد، از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DP_i = P_{inf_i} - R_{e_i} \qquad [۲۸]$$

که در آن، DP_i مقدار نفوذ عمقی در روز i است.

نتایج و بحث

اجرای مدل برای ۱۳ سال آمار هواشناسی منطقه باجگاه با استفاده از روش پنمن- فائو برای محاسبه تبخیر- تعرق، در حالتی که باران مؤثر تنها تخلیه رطوبتی تا عمق ریشه روزانه را جبران کند(حالت اول) و در حالتی که باران مؤثر تخلیه رطوبتی تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه را جبران کند(حالت دوم) بررسی شد و نتایج جدول ۱ به صورت خلاصه ذکر شده‌اند.

با توجه به موارد ذکر شده برای هر دو حالت، مقدار آب آبیاری سالانه و تعداد دفعات آبیاری در حالت دوم کاهش یافته است. در شرایطی که باران کمبود رطوبتی نیمرخ خاک را به جای عمق ریشه روزانه تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه جبران می‌کند، با رشد ریشه گیاه در روزهای بعد امکان استفاده از این رطوبت ذخیره شده فراهم می‌آید. بنابراین بخشی از تبخیر- تعرق گیاه با تغذیه از این رطوبت ذخیره شده تأمین می‌گردد و دفعات و مقدار آب آبیاری کاهش می‌یابد. هم‌چنین متوسط درصد نسبی باران مؤثر بر کل باران باریده از ۴۵/۲ درصد درحالت اول به ۷۶/۹ در حالت دوم افزایش یافته است. حداقل دفعات آبیاری بهاره در حالت دوم ۴ نوبت و در حالت اول ۵ نوبت می‌باشد. در تمام سال‌های مورد مطالعه حداقل یک بار آبیاری در پاییز لازم است و این مقدار با توجه به توزیع و مقدار باران‌های پاییزه به ۲ بار نیز رسیده است. به طور کلی با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

جدول ۱. حداقل، حداکثر و متوسط مقدار آب آبیاری و مقدار باران مؤثر در ۱۳ سال آمار هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در مزرعه گندم در حالت‌های مختلف

	مقدار آب آبیاری و باران مؤثر فصل رشد (mm)						تعداد دفعات آبیاری فصل رشد						متوسط درصد باران مؤثر نسبت به کل مقدار بارش
	حداقل		حداکثر		متوسط		حداقل		حداکثر		متوسط		
	مقدار آب آبیاری	باران مؤثر	مقدار آب آبیاری	باران مؤثر	مقدار آب آبیاری	باران مؤثر	پاییز	بهار	پاییز	بهار	پاییز	بهار	
حالت اول	۵۵۸/۴	۹۳/۷	۸۸۴/۷	۲۶۲/۲	۷۰۶/۸	۱۷۷/۹	۱	۵	۲	۸	۱	۷	۴۵/۲
حالت دوم	۴۵۸/۱	۲۷۲	۶۸۰/۵	۳۴۰/۷	۵۶۹/۲	۲۹۱/۵	۱	۴	۲	۶	۱	۵	۷۶/۹

جدول ۲ . تحلیل احتمالاتی تعداد و مقدار آب آبیاری

	حالت اول		حالت دوم	
احتمال ٪	مقدار آب آبیاری مورد نیاز(mm)	دفعات آبیاری	مقدار آب آبیاری مورد نیاز(mm)	دفعات آبیاری
۸۰	۷۵۷/۷	۹	۶۳۶/۹	۷
۵۰	۷۱۲/۶	۸	۵۴۵/۱	۶
۲۰	۶۱۴/۲	۷	۵۴۰/۴	۵
۱۰	۵۸۶/۴	۷	۵۰۰	۵

جدول ۳ . تحلیل احتمالاتی مقدار باران مؤثر

	باران مؤثر (mm)			
	احتمال ٪			
	۸۰	۵۰	۲۰	۱۰
حالت اول	۱۰۸/۹	۱۶۵/۶	۲۳۲	۲۵۷/۹
حالت دوم	۲۳۶/۷	۲۹۲/۱	۳۴۴/۱	۳۷۶

توجه به این‌که گندم زمستانه در منطقه باجگاه در آبان ماه کشت می‌شود و در فصل پاییز گیاه در مرحله ابتدایی رشد می‌باشد و میانگین دمای روزانه پایین است، مقدار تبخیر تعرق گیاه در فصل پاییز در مقایسه با فصل بهار بسیار کمتر می‌باشد و بنابراین نیاز به آبیاری کمتر است.

با استفاده از معادله احتمال وقوع ویبل(۱۱) احتمال وقوع دفعات و نیاز آبی فصلی گیاه گندم و فراوانی وقوع باران مؤثر در منطقه باجگاه در سال‌های مورد مطالعه محاسبه شد که به صورت خلاصه در جداول ۲ و۳ ارائه شده است.

با استفاده از امکانات فراهم شده در مدل رایانه‌ای، کمبود رطوبتی در ابتدای روز باران و مقدار خالص باران نفوذ یافته به خاک، متوسط رطوبت خاک تا عمق۳۰۰ میلی‌متر از سطح خاک و متوسط رطوبت خاک تا عمق ریشه نیز محاسبه شدند. با استفاده از نرم افزار SPSS تأثیر هر یک از عوامل ذکر شده بر روی مقدار باران مؤثر بررسی شد و در نهایت مقدار خالص باران نفوذ کرده به خاک و کمبود رطوبتی خاک نسبت به حالت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

ظرفیت زراعی در ابتدای روز باران، دو عامل اساسی شناخته شدند. با توجه به این‌که در حالت دوم باران مؤثر تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد ریشه در نظر گرفته می‌شود لذا در به دست آوردن معادله‌ها در این حالت از کمبود رطوبتی تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد استفاده شد. بنابراین معادلات زیر به ترتیب برای حالت‌های اول و دوم برای محاسبه باران مؤثر به دست آمدند:

حالت اول:

$$R_{e_i} = ۰/۶۸۳۸ \times \left(D_{i,start} + ۰/۰۰۱\right)^{۰/۲۵۸} \times P_{inf_i}^{۰/۶۳۱}, r^۲ = ۰/۷۵ \quad [۱۹]$$

حالت دوم:

$$R_{e_i} = ۰/۴۸۱ \times \left(D'_{i,start} + ۰/۰۰۱\right)^{۰/۲۲۳} \times P_{inf_i}^{۰/۸۵۸}, r^۲ = ۰/۸۷۱ \quad [۳۰]$$

که در آنها، R_{e_i} مقدار باران مؤثر حسب میلی‌متر، $D_{i,start}$ کمبود رطوبتی نیمرخ خاک تا عمق ریشه نسبت به حالت ظرفیت زراعی حسب میلی‌متر، $D'_{i,start}$ کمبود رطوبتی نیمرخ خاک تا عمق ریشه در زمان حداکثر رشد گیاه حسب میلی‌متر و P_{inf_i} مقدار باران خالص نفوذ کرده به خاک بر حسب میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این که در بعضی از روزها مقدار کمبود رطوبتی خاک برابر با صفر بود و برای به دست آوردن هریک از معادلات بالا باید رگرسیون لگاریتمی خطی استفاده می شد مقدار کمی برابر با ۰/۰۰۱ در معادله‌های بالا جای داده شد. با استفاده از معادله ۳۰ و اندازه‌گیری کمبود رطوبتی خاک تا حداکثر عمق ریشه و مقدار بارش روزانه، می‌توان مقدار باران مؤثر واقعی را به صورت قابل قبولی تخمین زد.

نتیجه‌گیری

در حالت دوم، مقدار آب آبیاری و تعداد دفعات آبیاری نسبت به حالت اول کاهش یافته است. چنانکه میانگین مقدار آبیاری فصلی از ۷۰۶/۸ به ۵۶۹/۲ میلی‌متر و میانگین تعداد دفعات آبیاری فصلی از ۸ بار به ۶ بار کاهش یافته اند. هم‌چنین میانگین نسبت باران مؤثر به کل مقدار باران از ۴۶/۳۱ درصد به ۷۳/۶ درصد افزایش یافته‌اند. با احتمال ۸۰٪، در حالت اول با احتساب ۱۰۸/۹ میلی‌متر بارش مؤثر نیاز به ۹ بار آبیاری و ۷۵۷/۷ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است و در حالت دوم با احتساب ۲۳۶/۷ میلی‌متر بارش مؤثر به ۷/۲ بار آبیاری و ۶۳۶/۹ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است. با احتمال ۵۰٪ ، در حالت اول با احتساب ۱۶۵/۶ میلی‌متر بارش مؤثر به ۸ بار آبیاری و ۷۱۲/۶ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است و در حالت دوم با احتساب ۲۹۲/۱ میلی‌متر بارش مؤثر به ۶ بار آبیاری و ۵۴۵/۱ میلی‌متر آب آبیاری نیاز است. در نهایت نشان داده شده است که با استفاده از اصول ساده مدیریتی می‌توان از مصرف بیش از اندازه آب آبیاری جلوگیری نمود و با استفاده از منابع محدود، حجم تولیدات کشاورزی را افزایش داد.

منابع مورد استفاده

۱. آرین، ا. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۰. معرفی و برازش مدل شبیه‌سازی محصولات زراعی و مدیریت آب و خاک (CRPSM). چهارمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه کرمان.

۲. آرین، ا. ۱۳۷۱. برازش مدل کامپیوتری مدیریت و برنامه بندی آبیاری و تخمین محصول گندم آبی (CRPSM). پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۳. سپاسخواه، ع. ر.، ف. آقایاری و ع. ر. توکلی. ۱۳۸۵. آزمون و اصلاح مدل MEDIWAY برای شبیه‌سازی عملکرد و گندم دیم و آبی در منطقه مراغه. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۷: ۱۳۳-۱۵۰.

۴. منفرد، م. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۸۴. مدل رایانه‌ای برای مدیریت و برنامه‌بندی آبیاری مزارع (مطالعه موردی مزرعه گندم در مناطق

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]

باجگاه و کوشکک). سمینار کارشناسی ارشد آبیاری، دانشگاه شیراز.

۵. نجمایی، م. ۱۳۶۸. *هیدرولوژی مهندسی*. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

6. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotransriration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper. No. 56. FAO. United Nations, Rome, Italy.
7. Baily, R. J. 1990. Irrigated Crops and Their Management. Farming Press Ipswich, UK.
8. Belmans, C., J. G. Wesseling and R. A. Feddes. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J. Hydrol. 63:271-286.
9. Borg, H. and D. W. Grimes. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. Trans. ASAE 29:194-197
10. Brisson, N., B. Seguin and P. Bertuzzi. 1992. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. Agric. For. Meteorol. 59:267-287.
11. Chow V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, USA.
12. Dastane, N. G. 1974. Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. Irrigation and Drainage Paper. No-25. FAO, 61 P.
13. Hanks, R. J. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agron. J. 66:660-664.
14. Hess, T. M. 1994. IMS irrigation scheduling program. Papar of Silsoe College, UK.
15. Hill, R. W. and R. G. Allen. 1996. Simple irrigation scheduling calendars. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE 122(2):107-111.
16. Nima, M. N. and R. J. Hanks. 1973. Modeling for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37:522-532.
17. Ragab, R. A., F. Beese and W. Ehlers. 1990. A soil water balance and dry matter production model. I. Soil water balance of oats. Agron. J. 82:152-161.
18. Ramdas, L.A. 1960 Crops and Weather in Indian. Ind. Council of Agric. Res. Pub., New Delhi.
19. Rasmussen, V. P. and R. J. Hanks. 1978. Spring wheat yield model for limited moisture conditions. Agron. J. 70:940-944.
20. Reddy, S. J. 1983. A simple method of estimating the soil water balance. Agric. Meteorol. 28:1-17.
21. Sanchez-Cohen, I., V. L. Lopes, D. C. Slack and M. M. Fogel. 1997. Water balance model for small scale water harvesting systems. J. Irrig. Drain Eng. 123:123-131.
22. Sepaskhah, A. R. and H. R. Fooladmand 2004. A computer model for design of microcatchment water harvesting systems for rainfall vineyard. Agric. Water Manag. 64:213-232.
23. Sepaskhah, A. R., SH. Rezaee-pour and A. A. Kamgar-Haghighi. 2006 a. Water budget approach to quantify cowpea yield using crop characteristic equations. Biosys. Eng. 95:583-596.
24. Sepaskhah, A. R., A. R. Bazrafshan-Jahromi and Z. Shirmohamadi. 2006 b. Development and evaluation of a model for yield production of wjeat, maize and sugarbeet undet water and salt stresses. Biosys. Eng. 93(2): 139:152.
25. Stanhill, G. 1958. An irrigation gauge for commercial use in field and house glass practice. J. Agric. Eng. Res. 3: 292-298.
26. Ziaei, A. N. and A. R. Sepaskhah. 2003. Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigation conditions. Agric. Water Manag. 58:1-17.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1388.13.49.1.3]