پژوهش‌های علوم کشاورزی پایدار/ جلد ٤/ شماره ١/ بهار ١٤٠٣/ ص ٥٦-٣٨
https://sanad.iau.ir/journal/sarj/

https://doi.org/10.71667/sarj.2024.1104105

ارزیابی بهره‌وری آب سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبیاری با استفاده از رهیافت مدل‌سازی

مهسا مصطفوی بابوکانی[١]، یوسف هاشمی‌نژاد[٢]*، محمد آرمین[٣]، حمید مروی[٤]، کوروش شجاعی[٥]

١- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران

٢- استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

٣- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران

٤- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران

٥- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hasheminejhad@gmail.com

(تاریخ دریافت: ١١ /١٤٠٢/١٢- تاریخ پذیرش: ١٤٠٣/١/١٨)

چکیده

سیب‌زمینی به‌دلیل عملکرد و ارزش غذایی بالا، جایگزینی برای غلات و محصولی حیاتی در امنیت غذایی است. این تحقیق به‌منظور ارزیابی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی تحت شرایط کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP در قطب‌های عمده سیب‌زمینی‌کاری استان خراسان رضوی شامل فریمان، قوچان و گلمکان در سال ١٣٩٨ به اجرا درآمد. ابتدا توانایی مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و عملکرد سیب‌زمینی براساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده از مزارعِ هر سه منطقه موردارزیابی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل ارزیابی‌شده، عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی تحت سناریوهای مختلف آبیاری و کم‌آبیاری شامل آبیاری مرسوم، آبیاری بر اساس ١٠٠، ٩٠، ٨٠، ٧٠، ٦٠ و ٥٠ درصد نیاز آبی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل SAWP در تمامی مناطق دارای قدرت خوب (R2>0/89) و دقت بالایی در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ (RMSE<0/73) بود. قدرت و دقت مدل SAWP در شبیه‌سازی عملکرد (R2=0/96 و RMSE=908/5 kg ha-1) و بهره‌وری آب (R2=0/93 و RMSE=0/5 kg m-3) سیب‌زمینی نیز به‌ترتیب بالا و قابل‌قبول بود. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش میزان آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل تا ٥٠ درصد نیاز آبی، عملکرد سیب‌زمینی روند کاهشی داشت. میزان کاهش عملکرد به‌ازای هر یک درصد کاهش در میزان آب آبیاری در قوچان، فریمان و گلمکان به‌ترتیب ٢٥٥/٩٧ و ١٢٠/١٩ و ٧٨/٦٢ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. میزان بهره‌وری آب نیز با اعمال کم‌آبیاری تا ٥٠ درصد نیاز آبی در گلمکان و فریمان و تا ٩٠ درصد نیاز آبی در قوچان افزایش یافت. به‌طورکلی، با اتخاذ سناریوی کم‌آبیاری مدیریت‌شده در سطح ٨٠ درصد نیاز آبی در گلمکان و فریمان و ٩٠ درصد نیاز آبی در قوچان ضمن حفظ عملکرد در حد مطلوب می‌توان بهره‌وری آب را نسبت به آبیاری کامل بهبود داد.

واژگان کلیدی: اعتبارسنجی، شبیه‌سازی، عملکرد، SWAP

مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی *Solanum tuberosum* L. یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی ازنظر امنیت غذایی در جهان است که پس از گندم، برنج و ذرت در رتبه چهارم تولید دارد (Devaux *et al.*, 2020). ایران با حدود ۱۳۱۰۰۰ هکتار سطح زیرکشت، رتبه هجدهم ازنظر سطح زیرکشت سیب‌زمینی و با تولید حدود ٤٥ میلیون تن، رتبه نود و چهارم در تولید سیب‌زمینی در جهان را دارا است (FAO, 2022). تفاوت شدید جایگاه ایران ازنظر سطح زیر کشت و تولید سیب‌زمینی در جهان، بیانگر این موضوع است که عملکرد این محصول در کشور به میزان قابل‌توجهی کمتر از میانگین عملکردِ آن در جهان است. استان خراسان رضوی ازلحاظ سطح زیرکشت سیب‌زمینی با ٤٤٧٦ هکتار، دوازدهمین استان کشور و از لحاظ میزان تولید با ١٤٧ هزار تن سیزدهمین استان تولیدکننده سیب‌زمینی در کشور می‌باشد. میزان عملکرد سیب‌زمینی در واحد سطح استان خراسان رضوی حدود ۳۲۷۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد که حدود ٤٢٠٠ کیلوگرم در هکتار کمتر از میانگین کشوریِ آن (۳٦۹۰۰ کیلوگرم در هکتار) است (Iranian Ministry of Agriculture, 2022).

محدودیت آب برای آبیاری عامل مهم محدودکننده رشد و کاهش‌دهنده عملکرد در مناطق نیمه‌خشک ایران مانند استان خراسان رضوی است (Yaghoubi *et al.*, 2022). استفاده بهینه از منابع آب به‌دلیل کمبود آب موردانتظار در مواجهه با تغییرات اقلیمی و افزایش رقابت برای منابع آبی بین مصارف کشاورزی، خانگی و صنعتی حائز اهمیت است (Goldani *et al.*, 2021). بنابراین کاهش میزان آبیاری با حفظ عملکرد و کیفیت، در مناطقی که دسترسی به آب یک محدودیت عمده است، مطلوب تلقی می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، افزایش بهره‌وری آب به‌ویژه بهره‌وری اقتصادی آب ممکن است بهترین راه برای مصرف مؤثر و کارآمد آب باشد. بهره‌وری آب کلید ارزیابی استراتژی‌ها در مواجهه با محدودیت آب می‌باشد (Moghimi & Sepaskhah, 2014). یکی از استراتژی‌هایی که به‌منظور افزایش بهره‌وری آب مورداستفاده قرار می‌گیرد کم‌آبیاری است که به‌عنوان روشی مطمئن در صرفه‌جویی آب، به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران استفاده شده است. در این روش از آب کمتری نسبت به نیاز آبی محصول در طول دوره رشد گیاه استفاده می‌شود تا حجم آب آبیاری را به حداقل رسانده شود (Zhang *et al.*, 2010).

قبل از اجرای کم‌آبیاری در سطح مزارع نیاز است تا تقاضای آب در طول دوره رشد محصول و اثر تنش آب بر گیاه کمی‌سازی گردد که این امر با استفاده از مدل‌های ریاضی امکان پذیر است (Jing *et al.* 2021). شبیه‌سازی با مدل‌های ریاضی روشی مؤثر و کارآمد برای ارزیابی تأثیر کم‌آبیاری بر رشد محصول، پویایی موازنه آب و کارایی مصرف آب ارائه می‌دهد (Neukam *et al.*, 2016; Leghari *et al.*, 2019). از مدل‌های رایانه‌ای موجود برای این منظور، می‌توان به مدلی که توسط دانشگاه واگنینگن و مؤسسه آلترا با نام SWAP[1] (Kroes and Van Dam, 2003) نوشته شده است، اشاره نمود. در مدل اگروهیدرولوژیکیِ SWAP برای شبیه‌سازی رشد گیاه از مدل ساده شده WOFOST استفاده می‌شود که در آن رشد گیاه براساس فرآیندهای اکوفیزیولوژیکی شبیه‌سازی

[1]- Soil-water-atmosphere-plant

می‌شود. اساس مدل، ارتباط فیزیکی پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه است و از اطلاعات مختلف اقلیم، آب، خاک و گیاه برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در محیط‌های اشباع و غیراشباع با شرایط مرزی مختلف و مدیریت‌های متفاوت آب آبیاری استفاده می‌کند (Kroes *et al.*, 2017). به‌طورکلی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد محصول، زهکشی، جریان آب، املاح و گرما در خاک، مدیریت آب در کشت آبی و بیلان آب در سیستم‌های هیدرولوژیکی کاربرد دارد (Heinen *et al.*, 2021).

مدل SWAP تحت شرایط و مناطق مختلف آزمایش و مورداستفاده قرار گرفته است. انصاری و همکاران (Ansari *et al.*, 2022) به ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی و تعیین عمق مناسب آب آبیاری در شهرکرد پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از کارایی قابل‌قبول مدل SWAPدر شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی در فرآیندهای واسنجی و ارزیابی بود. برنامه‌ریزی آبیاری سیب‌زمینی با استفاده از این مدل نیز در مطالعه مذکور نشان داد که جهت حصول بالاترین عملکرد، بهتر است عمق آب آبیاری در دوره اول رشد برابر با ۷۵۰ میلی‌متر و در دوره‌های بعدی ۹۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. جنوبی و همکاران (Jonubi *et al.*, 2017) جهت شبیه‌سازی گیاه برنج در شمال کشور از مدل SWAP استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت این مدل در شبیه‌سازی عملکرد برنج در حد قابل‌قبول بود. یان (Yan, 2015) تأثیر تنش آبی را در سیب‌زمینی در جنوب هلند توسط مدل SWAP بررسی کرد و نشان داد که سیب‌زمینی تحت تأثیر شرایط آبیاری قرار می‌گیرد و همچنین وی بیان داشتت که می‌توان عملکرد سیب‌زمینی را با مدل SWAP پس واسنجی در مقیاس بزرگ شبیه‌سازی کرد. در ایالت کنتاکی امریکا، در شرایط محدودیت آب، عملکرد گندم زمستانه را به‌وسیله مدل SWAP با استفاده از توابع انتقالی پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده شد. نتایج نشان داد که مدل SWAP به پارامترهای هیدرولیکی خاک حساسیت زیادی دارد (de Jong van Lier *et al.*, 2015).

ازآن‌جایی‌که اغلب مدل‌های گیاهی بر پایه شرایط اقلیمی زراعی خاص یک منطقه تهیه شده‌اند، کاربرد آن‌ها در مناطق مختلف مستلزم اصلاح و اعتبارسنجی است تا داده‌های حاصل قابل‌مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده باشند. لذا هدف از مطالعه حاضر اعتبارسنجی مدل SWAP در قطب‌های عمده سیب‌زمینی‌کاری استان خراسان رضوی و بررسی اثر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی با استفاده از این مدل بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی با استفاده از مدل SWAP در سه قطب عمده سیب‌زمینی‌کاری (فریمان، قوچان و گلمکان) در استان خراسان رضوی در سال زراعی ۱۳۹۸ صورت گرفت. برای این منظور سه مزرعه در مناطق موردمطالعه انتخاب و اطلاعات لازم جهت اجرای مدل SWAP و اعتبارسنجی آن از این سه مزرعه جمع‌آوری گردید. این اطلاعات شامل اطلاعات هواشناسی، خاک و آب و اطلاعات زراعی و مدیریتی درطی مراحل رشد گیاه سیب‌زمینی در مناطق موردمطالعه بود. اطلاعات

هواشناسی روزانه سه ایستگاه سینوپتیک فریمان، قوچان و گلمکان از سازمان هواشناسی استان تهیه شد. شرایط آب و هوایی در طول فصل رشد سیب‌زمینی برای سه منطقه موردمطالعه در جدول یک ارائه شده است

جدول ۱- اطلاعات ماهانه پارامترهای هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک گلمکان، قوچان و فریمان در طول فصل رشد گیاه سیب‌زمینی در سال **۱۳۹۸**

ایستگاه	ماه	تشعشع خورشیدی	دمای حداقل	دمای حداکثر	رطوبت نسبی	سرعت باد	بارندگی
		مگاژول بر مترمربع در روز	درجه سانتی‌گراد		درصد	متر بر ثانیه	میلی‌متر
گلمکان	آوریل	۹۷۱۶/۷	۷/۷	۱۷/۶	۱/۰	۶/۰	۷۲/۶
	می	۱۲۷۶۷/۱	۱۲/۶	۲۶/۴	۱/۲	۶/۷	۵۲/۱
	ژوئن	۱۴۵۵۳/۲	۱۵/۴	۳۲/۱	۱/۰	۵/۸	۲۰/۲
	جولای	۱۴۴۲۲/۲	۲۰/۰	۳۶/۱	۱/۲	۷/۲	۰/۱
	آگوست	۱۲۷۰۴/۸	۱۶/۲	۳۲/۸	۱/۰	۶/۷	۰/۰
	سپتامبر	۹۶۱۴/۱	۱۱/۶	۲۸/۵	۰/۹	۶/۸	۰/۰
	اکتبر	۵۸۴۳/۳	۶/۵	۲۱/۸	۰/۷	۵/۸	۲۶/۰
	نوامبر	۳۲۶۰/۷	-۰/۹	۱۱/۶	۰/۶	۴/۳	۱۳/۱
	دسامبر	۲۱۵۷/۴	۰/۷	۱۲/۲	۰/۶	۵/۷	۱۰/۹
		۹۴۴۸/۸	۱۰/۰	۲۴/۳	۰/۹	۶/۱	۱۹۵
قوچان	آوریل	۹۷۶۱/۰	۶/۰	۱۷/۱	۱/۰	۸/۱	۱۲۱/۷
	می	۱۲۶۸۱/۴	۱۰/۲	۲۵/۰	۱/۲	۶/۵	۱۰۶/۶
	ژوئن	۱۴۸۷۰/۷	۱۱/۸	۳۰/۲	۱/۱	۶/۵	¼
	جولای	۱۴۴۴۱/۶	۱۶/۱	۳۴/۸	۱/۳	۸/۹	۰/۲
	آگوست	۱۲۷۳۲/۸	۱۳/۰	۳۱/۰	۱/۱	۸/۱	۰/۰
	سپتامبر	۹۴۹۳/۳	۱۰/۶	۲۸/۰	۱/۰	۸/۵	۰/۰
	اکتبر	۵۷۵۵/۷	۵/۱	۲۱/۲	۰/۷	۷/۵	۲۶/۰
	نوامبر	۳۱۵۴/۳	-۲/۱	۱۰/۷	۰/۵	۷/۰	۱۵/۵
	دسامبر	۲۰۴۶/۱	-۱/۸	۱۰/۹	۰/۵	۶/۲	۱۷/۰
		۹۴۳۷/۴	۷/۷	۳۲/۲	۰/۹	۷/۵	۲۹۱/۱
فریمان	آوریل	۹۵۹۱/۲	۶/۵	۱۷/۴	۰/۹	۹/۶	۸۲/۷
	می	۱۳۰۴۹/۱	۹/۷	۲۴/۳	۱/۰	۸/۵	۴۸/۸
	ژوئن	۱۴۸۰۸/۰	۱۲/۶	۲۹/۵	۰/۸	۸/۶	۱۱/۴
	جولای	۱۴۴۰۹/۹	۱۶/۷	۳۳/۴	۰/۹	۱۲/۲	۰/۰
	آگوست	۱۲۷۴۲/۶	۱۲/۸	۲۹/۵	۰/۸	۱۰/۰	۰/۰
	سپتامبر	۹۳۴۱/۸	۱۰/۳	۲۷/۶	۰/۷	۸/۰	۰/۰
	اکتبر	۵۹۴۹/۳	۵/۸	۲۰/۱	۰/۶	۶/۸	۲۱/۵
	نوامبر	۳۳۶۶/۶	-۱/۸	۹/۶	۰/۵	۶/۲	۲۹/۵
	دسامبر	۲۲۸۷/۳	۰/۲	۱۱/۱	۰/۵	۸/۵	۱۵/۴
		۹۵۰۵/۱	۸/۱	۲۲/۵	۰/۷	۸/۷	۲۰۹/۳

اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی شامل تاریخ کاشت، تاریخ برداشت، مدیریت آبیاری، میزان کود مصرفی و تاریخ مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در مزراع انتخاب‌شده از هر منطقه به‌صورت پرسشنامه جمع‌آوری شد. به‌علاوه سطح برگ در پنج مرحله (هر ۳۵ روز یک‌بار) در طول دوره رشد سیب‌زمینی با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج مدل VM-900 E/K و عملکرد در انتهای دوره رشد از ۱۲ مترمربع (شش کوادرات دو مترمربعی) از هر مزرعه ثبت شد. اطلاعات ورودی بخش مدیریت آبیاری به مدل شامل تاریخ آبیاری، عمق آب آبیاری، میزان شوری آب آبیاری و روش آبیاری بودند که از مزارع انتخابی در مناطق موردمطالعه جمع‌آوری گردیدند.

باتوجه‌به اهمیت وضعیت خاک در مراحل مختلف رشد گیاه سیب‌زمینی، در این آزمایش جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، قبل از کاشت از خاک مزارع موردمطالعه نمونه‌برداری به‌عمل آمد. نمونه مرکب که حاصل از ترکیب ۵ نمونه از عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک بود، در آزمایشگاه موردتجزیه قرار گرفت. در مرحله بعد ضرایب توابع هیدرولیکی خاک وارد مدل شد. از بین پارامترهای روابط منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع، رطوبت و هدایت هیدرولیکی حداشباع دارای معنی فیزیکی بوده و اندازه‌گیری شدند. جهت برآورد سایر ضرایب توابع هیدرولیکی خاک (α، n، θ_{res} و λ) از مدل RETC استفاده شد. برای این منظور ابتدا مشخصات هر لایه خاک ارائه‌شده در جدول ۲ به‌عنوان ورودی به مدل داده شد و مقادیر پارامترهای معادله ون‌گنوختن شامل α، n، θ_{res} و λ به‌عنوان خروجی (جدول ۳) به‌دست آمد.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مناطق مورد مطالعه

شهر	عمق خاک (سانتی‌متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی	رطوبت اولیه خاک	رس	سیلت	شن	کربن آلی
			دسی‌زیمنس بر متر	درصد				
فریمان	۰ تا ۳۰	۸/۰	۱/۰۵	۱۲/۹	۳۱	۵۴	۱۵	۰/۳۶
	۳۰ تا ۶۰	۸/۰	۰/۷۸	۱۵/۷	۳۳	۵۰	۱۷	۰/۲۷
قوچان	۰ تا ۳۰	۷/۸	۳/۸۸	۱۰/۴	۲۶	۲۶	۴۸	۰/۵۶
	۳۰ تا ۶۰	۷/۹	۳/۵۷	۱۰/۲	۳۰	۳۶	۳۴	۰/۵۸
گلمکان	۰ تا ۳۰	۸/۱	۱/۱۰	۱۹/۵	۳۷	۴۶	۱۷	۰/۹۹
	۳۰ تا ۶۰	۸/۰	۱/۰۰	۲۱/۰	۳۷	۴۶	۱۷	۰/۶۸

جدول ۳- برخی هیدرولیکی لایه‌های خاک، استخراج شده به‌وسیله مدل RETC

محل	عمق خاک (سانتی‌متر)	رطوبت باقیمانده	رطوبت اشباع	α	n	هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)	جرم مخصوص ظاهری خاک (ρ_b)
فریمان	۰ تا ۳۰	۸	۴۶	۰/۰۰۷۷	۱/۵۲	۱۲/۱۹	۱/۳۵
	۳۰ تا ۶۰	۹	۴۶	۰/۰۰۸۶	۱/۴۹	۱۲/۳۶	۱/۳۵
گلمکان	۰ تا ۳۰	۹	۴۷	۰/۰۱۰۳	۱/۴۵	۱۲/۱۵	۱/۳۵
	۳۰ تا ۶۰	۹	۴۲	۰/۰۱۰۴	۱/۴۳	۵/۱۹	۱/۵۰
قوچان	۰ تا ۳۰	۹	۴۶	۰/۰۱۰۳	۱/۴۵	۱۲/۱۸	۱/۳۵
	۳۰ تا ۶۰	۹	۴۲	۰/۰۱۰۴	۱/۴۳	۵/۲۰	۱/۴۵

ضرایب α و n ضرایب معادله نگهداری رطوبت خاک

همان‌طور که بیان گردید جهت شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی از مدل SWAP استفاده شد. SWAP مدلی یک بعدی است که معادلهٔ ریچاردز مربوط به حرکت قائم آب در سیستم ناهمگن خاک- ریشه گیاه را به روش تفاضل محدود، حل می‌کند. معادله ریچارد که از ترکیب معادلات دارسی و پیوستگی به‌دست آمده است به‌صورت رابطه یک تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right] + S(h) \quad (۱)$$

که در آن، h: بار فشاری خاک (سانتی‌متر)، Z: بار ثقل (سانتی‌متر)، t: زمان (روز)، K: هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر در روز)، θ: درصد رطوبت حجمی خاک و S: میزان جذب آب توسط ریشه‌ها در روز می‌باشد. پارامتر S(h) میزان جذب حجم آب در حجم خاک توسط ریشه‌ها در واحد زمان را شبیه‌سازی می‌کند و بستگی به بار فشاری خاک و حداکثر نرخ جذب آب (S_{max}) دارد (معادله ۲).

$$S(h) = \alpha(h) S_{max} \quad (۲)$$

که در آن، α (h) : ضریب کاهش و S_{max}:حداکثر نرخ جذب آب ریشه‌ها می‌باشد. در این معادله فرض‌شده است نرخ جذب آب توسط ریشه در عمق مؤثر به صورت معادله ۳ می‌باشد.

$$S_{max} = \frac{T_p}{Z} \quad (۳)$$

که در آن، T_p: نرخ تعرق پتانسیل (متر در روز)، Z: عمق مؤثر ریشه‌ها، عمقی که ۷۰ تا ۸۰ درصد ریشه مشاهده شود (متر) و α : ضریب کاهش است که بین صفر و یک متغیر می‌باشد.

جهت ارزیابی مدل از نمودار یک به یک و شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطای (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین تعدیل‌شده (R^2-adj) استفاده گردید (معادله‌های ٤ تا ٦).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n}} \quad (٤)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2} \quad (٥)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{(1-R^2)-(n-1)}{n-k-1}\right] \quad (٦)$$

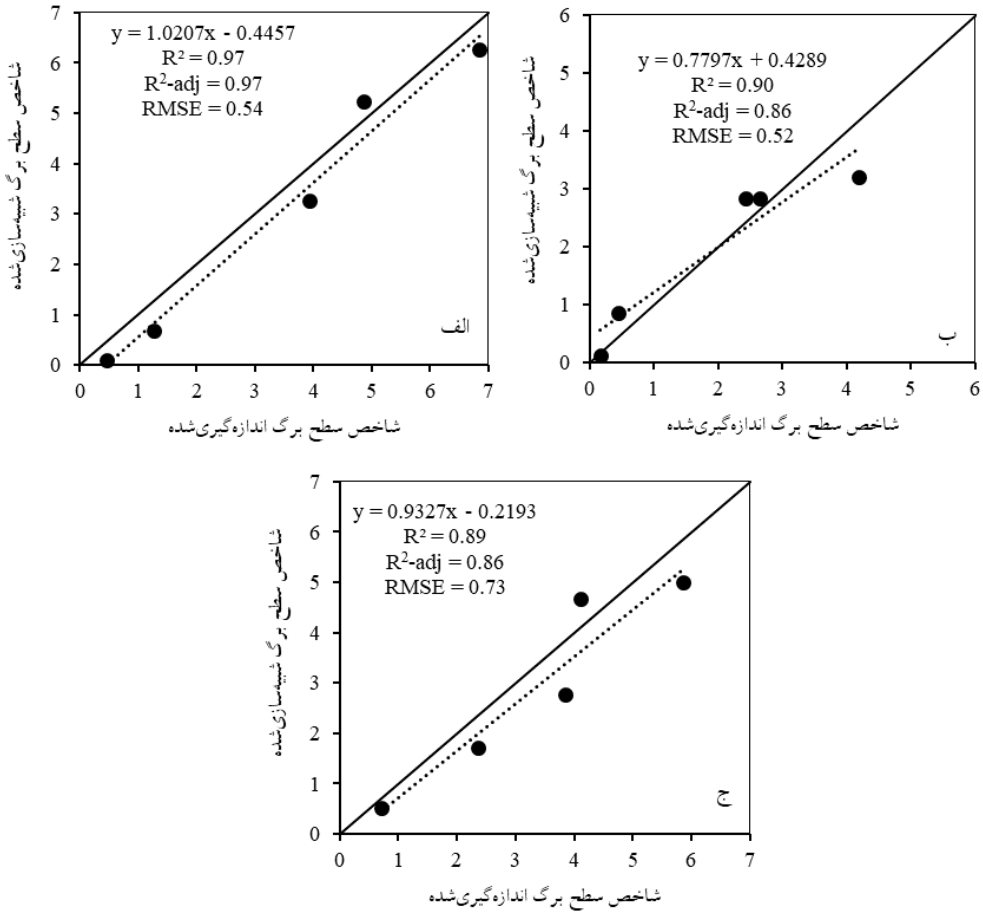
در این معادلات، n تعداد کل مشاهدات، O_i مقدار مشاهده‌شده، S_i مقدار شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، $\bar{S}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و k تعداد رگرسیون‌های مستقل می‌باشد.

پس از ارزیابی مدل، اثرات سناریوهای آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی با استفاده از مدل SWAP موردبررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی عملکرد از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۸ بر اساس ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ٦۰ و ٥۰ درصد نیاز آبی سیب‌زمینی برای فریمان، قوچان و گلمکان انجام شد. نیاز آبی سیب‌زمینی با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 برای هر منطقه برآورد گردید. این نرم‌افزار جهت محاسبه نیاز آبی نیاز به داده‌های آب و هوایی و ضریب گیاهی (K_c) برای مراحل مختلف رشد دارد. اطلاعات هواشناسی برای هر یک از مناطق موردمطالعه شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، تشعشع خورشیدی، بارندگی، سرعت باد و رطوبت نسبی بود که از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری گردید. ضریب گیاهی نیز مطابق با مطالعه آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998) برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی رشد سیب‌زمینی به‌ترتیب ۰/٤۰، ۱/۱٥ و ۰/۷٥ در نظر گرفته شد.

تأثیر کم‌آبیاری بر تبخیر و تعرق، عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی با استفاده از تحلیل رگرسیون بررسی شد. جهت برازش توابع و رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

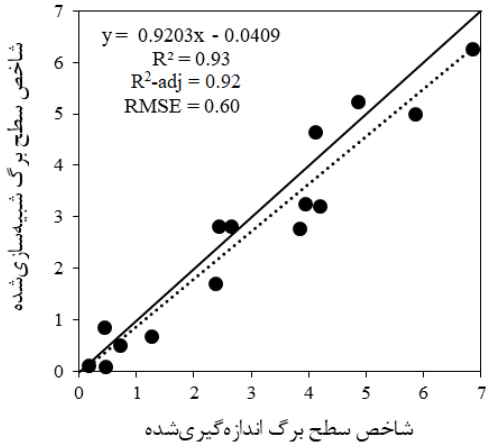
نتایج و بحث

به‌منظور بررسی دقت مدل SAWP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، مقدار شاخص سطح برگ شبیه‌سازی‌شده در مقابل مشاهده‌شده در هر منطقه قرار گرفت و میزان همبستگی آن‌ها با استفاده از رگرسیون خطی و دقت مدل‌ها با استفاده از RMSE بررسی شد (شکل ۱). نتایج حاکی از آن بود که ضریب تبیین رگرسیون خطی بین شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری‌شده با استفاده از مدل SAWP در گلمکان، فریمان و قوچان به‌ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۰ و ۰/۸۹ بود. این در حالی است که دقت شاخص سطح برگ شبیه‌سازی‌شده باتوجه‌به مقدار RMSE به‌ترتیب برای گلمکان، فریمان و قوچان ۰/٥٤، ۰/٥۲ و ۰/۷۳ به‌دست آمد. به‌طورکلی، باتوجه‌به این نتایج می‌توان بیان داشت که مدل SWAP در هر سه منطقه دارای کارایی خوبی در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ بوده و در بین مناطق بهترین دقت و قدرت در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ را در گلمکان داشت.



شکل ۱- مقایسه شاخص سطح برگ شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SAWP با شاخص سطح برگ مشاهده‌شده سیب‌زمینی در گلمکان (الف)، فریمان (ب) و قوچان (ج)

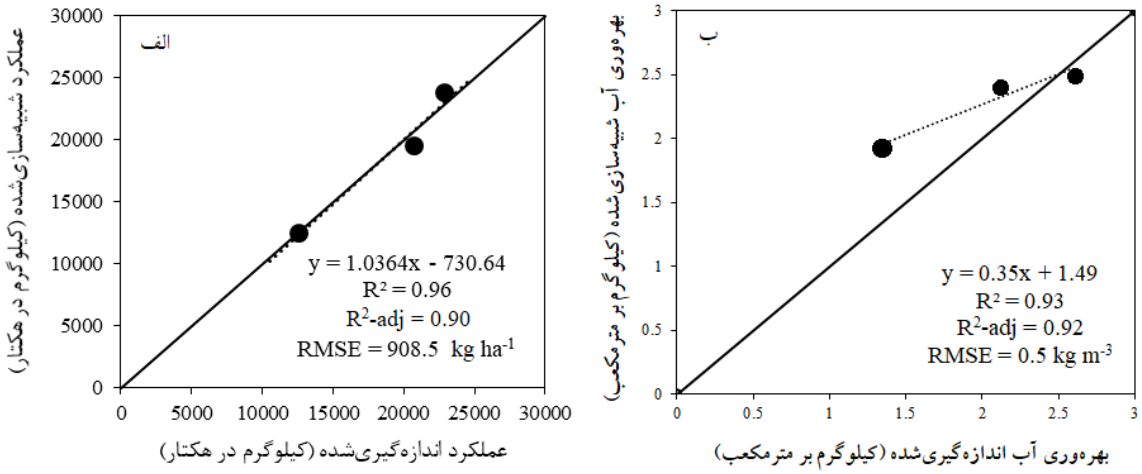
نتایج مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده شاخص سطح برگ درصورت عدم تفکیک مناطق موردمطالعه نیز نشان داد که دقت شاخص سطح برگ برآوردشده بر اساس مدل SAWP ۰/۶۰ بود (شکل ۲). علاوه‌براین، میزان ضریب تبیین ۰/۹۳ به‌دست آمد که حاکی از دقت خوب مدل در پیش‌بینی شاخص سطح برگ سیب‌زمینی در مناطق موردمطالعه است. بااین‌حال، باتوجه‌به شکل ۲ می‌توان بیان داشت که مدل SWAP شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند (Underestimate) که این مقدار با افزایش در مقدار شاخص سطح برگ افزایش می‌یابد.



شکل ۲- مقایسه شاخص سطح برگ شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SAWP با شاخص سطح برگ مشاهده‌شده سیب‌زمینی در سه منطقه موردمطالعه

به‌منظور بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب، عملکرد و بهره‌وری آب شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SAWP برای تمامی مناطق موردمطالعه در مقابل عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری‌شده قرار گرفت (شکل ۳). نتایج نشان داد که ضریب تبیین رگرسیون بین عملکرد و بهره‌وری آب شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۳ بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی است. علاوه‌براین باتوجه‌به میزان RMSE (۹۰۸/۵ کیلوگرم در هکتار و ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب به‌ترتیب برای عملکرد و بهره‌وری آب) نیز می‌توان با اطمینان اظهار داشت که مدل SAWP توانایی خوبی در پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در مناطق موردمطالعه دارد. بااین‌حال، باید توجه داشت که مدل دقت خوبی در برآورد بهره‌وری آب کمتر ۱/۵ را نداشته است. انصاری و همکاران (Ansari *et al.*, 2022) نیز عملکرد خوب (MBE = -0.05، RMSE = 0.32 kg m^{-3} و NRMSE = 8%) مدل SWAP را در پیش‌بینی بهره‌وری آب سیب‌زمینی در منطقه نیمه‌مرطوب ایران گزارش کردند. ما و همکاران (Ma *et al.*, 2015) بیان داشتند که عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده ذرت تابستانه و گندم زمستانه در شمال چین با مدل SWAP به‌خوبی (۳۹۰/۵۴>RMSE>۸۸/۴۰ کیلوگرم در هکتار و ۰/۸۵ >NSME>۰/۷۶) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مطابقت داشت. آزاد طلاتپه و همکاران (Azad Talatapeh *et al.*, 2018) نشان دادند که SWAP دینامیک آب خاک (MBE = 0.0091، RMSE = 0.017% و t = 2.148) و عملکرد گندم (kg ha^{-1} MBE= -۲/۵ و RMSE = ۱۴/۴۷ kg ha^{-1}) را در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران با دقت بالا شبیه‌سازی کرد.

جدول۲ نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس خشک شدن به روش الگوی دوم را در سطح ۱٪ نشان می‌دهد فاکتورهای دما و برهمکنش سرعت و دما تأثیر معناداری در خشک کردن دارند. و با سطح اطمینان ۹۹٪ می توان نتیجه گرفت که فاکتور سرعت در الگوی سینی با هواگذر میانی و جانبی معنادار نیست.

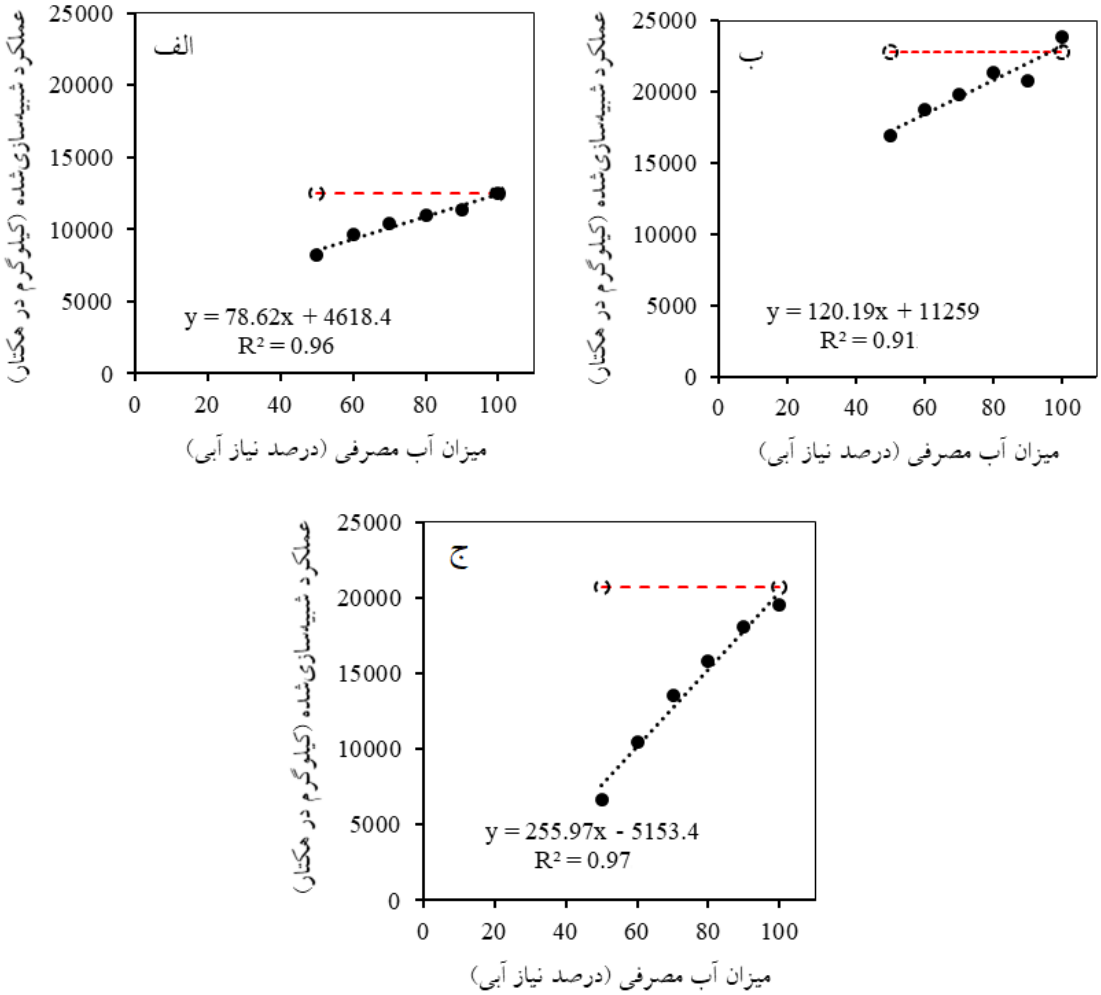


شکل ۳- مقایسه عملکرد (الف) و بهره‌وری آب (ب) شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SAWP با عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌شده سیب‌زمینی در سه منطقه موردمطالعه

نتایج ارزیابی مدل SWAP نشان داد که این مدل می‌تواند جهت شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی مورداستفاده قرار گیرد. بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک ابزار مدیریتی برای ارزیابی برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در مقیاس محلی استفاده نمود. بااین‌حال، داده های کافی به‌ویژه داده‌های دقیق بارش و داده‌های خاک با وضوح بالا برای شبیه‌سازی عملکرد در شرایط محدودیت آب موردنیاز است. بدون آزمایشات انجام‌شده در واقعیت تحت شرایط تنش آب، تأیید نتایج مدل غیرممکن است، چراکه عدم اطمینان زیادی در مورد قابلیت اطمینان عملکرد مدل ایجاد می‌کند (Yan *et al.*, 2015).

پس از اطمینان از دقت مدل در پیش‌بینی عملکرد سیب‌زمینی، مدل ارزیابی‌شده تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری مدیریت‌شده قرار گرفت تا تأثیر آن بر عملکرد و بهره‌وری آب موردبررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که به‌طورکلی با کاهش میزان آب مصرفی از آبیاری کامل تا ۵۰ درصد نیاز آبی، عملکرد سیب‌زمینی در تمامی مناطق موردمطالعه روند کاهشی داشت (شکل ٤). اما میزان کاهش عملکرد به‌ازای هر یک درصد کاهش در میزان آب آبیاری به‌ترتیب در قوچان (۲۵۵/۹۷ کیلوگرم به ازای یک درصد کاهش در میزان آب مصرفی) و فریمان (۱۲۰/۱۹ کیلوگرم) از گلمکان (۷۸/٦۲ کیلوگرم) بیشتر بود. خط نقطه‌چین در هر شکل بیانگر میزان عملکرد اندازه‌گیری‌شده در همان منطقه است که همان‌طورکه مشاهده می‌شود عملکرد اندازه‌گیری‌شده در گلمکان و قوچان تقریباً با عملکرد سیب‌زمینی در شرایط

آبیاری کامل برابر و در فریمان مقدار اندکی کمتر است.



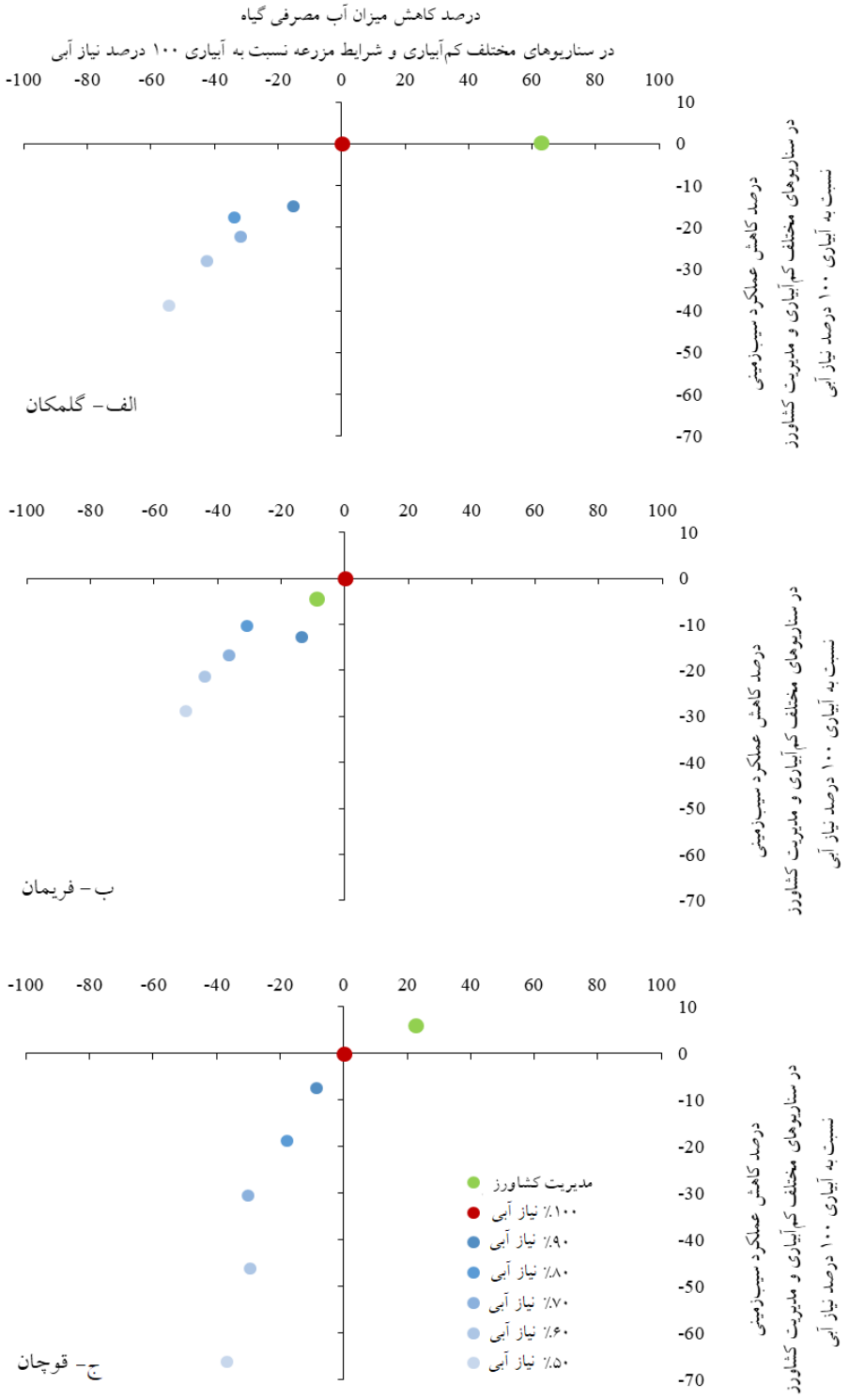
شکل ٤- روند تغییرات عملکرد شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SAWP به‌ازای میزان آب مصرفی سیب‌زمینی در گلمکان (الف)، فریمان (ب) و قوچان (ج) در مقایسه با عملکرد اندازه‌گیری‌شده سیب‌زمینی (خط‌چین قرمز رنگ)

اثر سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بر بهره‌وری آب سیب‌زمینی در منطقه گلمکان نشان داد که مدیریت کشاورز با عملکرد ۱۲۵۵٤/٦ کیلوگرم و مصرف آب ۱۰۹٤٤ مترمکعب در هکتار دارای بهره‌وری آب ۱/۱۵ کیلوگرم در متر مکعب بود (جدول ٤). در واقع در گلمکان، کشاورز به ازای ٦۰ درصد بیشتر آب مصرفی نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مزرعه، عملکرد سیب‌زمینی مشابه‌ای را به‌دست آورد. درحالی‌که کشاورزی با آبیاری کامل (٦۷۱۹ مترمکعب در هکتار) می‌تواند همان میزان عملکرد را با ٦۲ درصد افزایش در بهره‌وری بیشتر آب (۱/۸٦ کیلوگرم در مترمکعب) تولید کند (جدول ٤ و شکل ۵). همچنین با اتخاذ سناریوی کم‌آبیاری مدیریت‌شده در سطح ۸۰ درصد نیاز آبی ضمن حفظ عملکرد ۱۰۹۹۸/۷ کیلوگرم در هکتار (۱۷/۷ درصد کاهش نسبت به آبیاری کامل) می‌توان بهره‌وری آب را بیش

از دو برابر افزایش داد. در این حالت مصرف آب آبیاری به ٤٤٤٠ مترمکعب در هکتار کاهش خواهد یافت (جدول ٤ و شکل ٥).

جدول ۴- حجم آبیاری، عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی برای سناریوهای مختلف کم‌آبیاری در مناطق موردمطالعه (فریمان، گلمکان، قوچان)

منطقه	سناریو	حجم آبیاری (مترمکعب در هکتار)	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	بهره‌وری آب (کیلوگرم در مترمکعب)
گلمکان	مدیریت کشاورز	۱۰۹۴۴	۱۲۵۵۴/۶	۱/۱۵
	۱۰۰ درصد نیاز آبی	۶۷۱۹	۱۲۵۲۲/۳	۱/۸٦
	۹۰ درصد نیاز آبی	۵۷۰۸	۱۱۳۷۰/۲	۱/۹۹
	۸۰ درصد نیاز آبی	۴۴۴۰	۱۰۹۹۸/۷	۲/٤۸
	۷۰ درصد نیاز آبی	۴۵۹۴	۱۰۳۹۳/۱	۲/۲٦
	٦۰ درصد نیاز آبی	۳۸۶۲	۹۶۰۷/۱	۲/٤۹
	۵۰ درصد نیاز آبی	۳۰۶۰	۸۱۹۷/۹	۲/٦۸
فریمان	مدیریت کشاورز	۹۴۹۴	۲۲۸۰۳/۸	۲/٤۰
	۱۰۰ درصد نیاز آبی	۱۰۴۲۶	۲۳۸۵۶/۱	۲/۲۹
	۹۰ درصد نیاز آبی	۹۰۱۱	۲۰۸۰۵/۷	۲/۳۱
	۸۰ درصد نیاز آبی	۷۲۲۷	۲۱۳۷۶/۲	۲/۹٦
	۷۰ درصد نیاز آبی	۶۶۳۷	۱۹۸۶۱/۱	۲/۹۹
	٦۰ درصد نیاز آبی	۵۸۴۴	۱۸۷۷۴/۰	۳/۲۱
	۵۰ درصد نیاز آبی	۵۲۰۵	۱۶۹۶۵/۰	۳/۲٦
قوچان	مدیریت کشاورز	۱۵۷۵۰	۲۰۷۳۲/۸	۱/۹٤
	۱۰۰ درصد نیاز آبی	۸۷۳۰	۱۹۵۶۳/۳	۲/۲٤
	۹۰ درصد نیاز آبی	۷۹۷۷	۱۸۰۸۰/۹	۲/۲۷
	۸۰ درصد نیاز آبی	۷۱۹۰	۱۵۸۷۱/۲	۲/۲۱
	۷۰ درصد نیاز آبی	۶۱۰۳	۱۳۵۹۶/۲	۲/۲۳
	٦۰ درصد نیاز آبی	۶۱۴۹	۱۰۵۱۴/۵	۱/۷۱
	۵۰ درصد نیاز آبی	۵۵۲۵	۶۶۴۰/۲	۱/۲۰



شکل ۵- درصد تغییرات عملکرد سیب‌زمینی و میزان آب مصرفی گیاه در سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و شرایط مزرعه نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد در گلمکان (الف)، فریمان (ب) و قوچان (پ)

نتیجه‌گیری

اثر سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بر بهره‌وری آب سیب‌زمینی در منطقه فریمان نیز نشان داد که مدیریت کشاورز با عملکرد ۲۲۸۰۳/۸ کیلوگرم در هکتار و مصرف آب ۹٤۹٤ مترمکعب در هکتار دارای بهره‌وری آب ۲/٤۰ کیلوگرم در متر مکعب است (جدول ٤). در فریمان برخلاف گلمکان و قوچان، میزان آب مصرفی در مزرعه توسط کشاورز تقریباً ۸/۹ درصد کمتر از میزان آب مصرفی در شرایط آبیاری کامل (۱۰٤۲٦ مترمکعب در هکتار) بود (جدول ٤ و شکل ۵). این در حالی است که میزان عملکرد در این شرایط تنها ٤/٤ درصد از عملکرد تولیدی در شرایط آبیاری کامل کمتر بود که در نتیجه بهره‌وری آب تقریباً ٤/۷ درصد بیشتر از شرایط آبیاری کامل بود (جدول ٤ و شکل ۵). به‌علاوه، با اتخاذ سناریوی کم‌آبیاری مدیریت‌شده در سطح ۸۰ درصد نیاز آبی (۷۲۲۷ مترمکعب در هکتار) ضمن حفظ عملکرد ۲۱۳۷٦/۲ کیلوگرم در هکتار (۱۰/٤ درصد کاهش نسبت به آبیاری کامل) می‌توان بهره‌وری آب را تقریباً ۲۳ درصد (۲/۹٦ کیلوگرم در متر مکعب) افزایش داد (جدول ٤ و شکل ۵).

در قوچان نیز تأثیر سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بر بهره‌وری آب سیب‌زمینی حاکی از آن بود که عملکرد سیب‌زمینی و آب مصرفی در شرایط مدیریت کشاورز به‌ترتیب ۲۰۷۳۲/۸ کیلوگرم در هکتار و ۱۵۷۵۰ مترمکعب در هکتار بود که در این شرایط بهره‌وری آب در حدود ۱/۹٤ کیلوگرم در مترمکعب به‌دست آمد (جدول ٤). این عملکرد که تقریباً ٦ درصد نسبت به عملکرد شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SWAP در شرایط ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیشتر بود با افزایش ۲۲/۷ درصدی آب مصرفی توسط کشاورز نسبت به شرایط ۱۰۰ درصد تعرق نسبی (۸۷۳۰ مترمکعب در هکتار) حاصل شد (جدول ٤ و شکل ۵) که نتیجه آن افزایش ۱۵/۸ درصدی بهره‌وری آب بود. از سوی دیگر اگرچه با اتخاذ سناریوی کم‌آبیاری مدیریت‌شده در سطح ۹۰ درصد تعرق نسبی (۷۹۷۷ مترمکعب در هکتار)، عملکرد سیب‌زمینی تقریباً ۷/٦ درصد کاهش می‌یابد، اما بیشترین میزان بهره‌وری آب (۱۷ درصد افزایش) به‌دست می‌آید. با افزایش میزان کاهش در آب مصرفی تا ۸۰ درصد نیاز آبی، بهره‌وری آب برابر با شرایط ۱۰۰ درصد نیاز آبی بود و عملکرد در حدود ۱۸/۹ درصد کاهش یافت. لازم به ذکر است در شرایط کمبود آب در منطقه و کاهش بارش در سال این مقدار کاهش عملکرد در هر سه منطقه قابل چشم‌پوشی است (جدول ٤ و شکل ۵).

سیب‌زمینی به‌دلیل سیستم ریشه کم‌عمقی که دارد، حساس‌ترین گونه زراعی به خشکی محسوب می‌شود (Dahal *et al*., 2019). واریته‌های زودرس و دیررس در برابر تنش اولیه به‌دلیل کاهش سطح برگ، کاهش نرخ فتوسنتزی و کاهش تخصیص مواد جذب‌شده به غده‌ها بسیار حساس هستند و بیشترین آسیب را به غده‌زایی، حجیم‌شدن و عملکرد غده می‌زند (Pradel *et al*., 2019). ازآن‌جایی‌که رشد سیب‌زمینی و عملکرد غده آن تا حد زیادی به بارندگی و آبیاری بستگی دارد، حتی یک دوره کوتاه کمبود آب می‌تواند باعث از دست‌دادن میزان قابل‌توجهی از عملکرد غده سیب‌زمینی (در حدود ۵۰ درصد) و کاهش کیفیت آن شود (Skowera *et al*., 2016; Łabędzki *et al*., 2017; Pradel *et al*.,

2019). به‌علاوه، سیب‌زمینی دارای محتوی آب بالا و حدود ۸۵ درصد وزن خشک است که ۱ درصد آن برای فرآیندهای متابولیک و ۹۹ درصد برای تعرق موردنیاز است. تنش آب می‌تواند کارایی فتوسنتز را در تمام مراحل رشد سیب‌زمینی کاهش دهد. کمبود آب در طول دوره پر شدن غده باعث از بین رفتن قابل‌توجه محصول در مقایسه با خشکسالی در مراحل دیگر توسعه می‌شود. کولیگ و همکاران (Kulig *et al*., 2020) نیز دریافتند که عناصر عملکرد با بارندگی کل و تعداد روزهای بارندگی در دوره‌های طولانی‌تر مرتبط بودند، اما شروع رسیدگی تا رسیدگی کامل بیشترین تأثیر را برای عملکرد داشت ($r = 0.87$). در واقع ظهور خشکسالی دیررس در مراحل حجیم‌شدن غده و غده‌دهی تأثیر بیشتری بر عملکرد دارد؛ زیرا فرآیندهای فیزیولوژیکی در گیاهان در این دوره به حداکثر بازده خود می‌رسند و خشک‌سالی‌های دیررس در مرحله حجیم‌شدن غده به دلیل افزایش تعرق محصول، کاهش تشکیل برگ‌های جدید و احتمال ریزش زودرس برگ‌ها در این مرحله، تأثیر بیشتری بر عملکرد غده دارد (Kulig *et al*., 2020; ten Den *et al*., 2022). رودریگز و همکاران (Rodriguez *et al*., 2016) نیز بیان داشتند که خشکسالی تا ٤ هفته در طول توسعه سیب‌زمینی منجر به کاهش عملکرد و پارامترهای کیفیت محصول می‌شود. اگرچه سیب‌زمینی به کمبود آب بسیار حساس است، اما فقط آبیاری دقیق (جلوگیری از آبیاری کم یا زیاد) منجر به تولید عملکرد بالا می‌شود (Ati *et al*., 2012; Rodriguez *et al*., 2016). در غیر این صورت، تلفات نه‌تنها در عملکرد غده، بلکه در آب نیز مشاهده می‌شود، همان‌طورکه توسط العابدین و همکاران (Zin El-Abedin *et al*., 2019) نشان داده شده است. آن‌ها نشان دادند که بهره‌وری آب سیب‌زمینی در شرایط آبیاری ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب ۳۰/۱٦ و ٤۱/۳۲ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) کاهش یافته است. به‌طورکلی، محدودیت ۵۰ درصدی آب، مقدار نرخ تعرق را بیش از ۳۰ درصد کاهش داد، درحالی‌که مقادیر نرخ تعرق تیمارهای خشک‌کردن جزئی ناحیه ریشه و کم‌آبیاری کمتر از مقدار مربوط به تیمار آبیاری کامل بود. به‌طورکلی، آن‌ها اظهار داشتند که مقدار زیادی از آبی که در یک محیط خشک استفاده می‌شود ممکن است به‌دلیل تبخیر خاک از بین برود و درنتیجه منجر به عملکرد ضعیف محصول و بهره‌وری آب شود. در شرایط کم‌آبیاری، ریشه‌های گیاه هورمون‌هایی ترشح می‌کنند و سیگنال‌هایی را به اندام‌های هوایی می‌فرستند که تعرق را با بستن نسبی روزنه‌ها بدون ایجاد مانع در فتوسنتز و رشد گیاه، سرکوب می‌کنند، در نتیجه بهره‌وری آب افزایش می‌یابد (Sarker *et al*., 2019).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل SWAP توانایی خوبی در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در استان خراسان رضوی دارد. بااین‌حال، باید توجه داشت که دستیابی به نتایج قابل‌قبول توسط این مدل نیازمند واسنجی و ارزیابی آن در سطح مزرعه است. همچنین نتایج حاکی از آن بود که با اعمال کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد نیاز آبی، عملکرد سیب‌زمینی در تمامی مناطق موردمطالعه روند کاهشی خواهد داشت که میزان این کاهش به‌ازای هر

یک درصد کاهش در میزان آب آبیاری در قوچان بیشتر از فریمان و گلمکان خواهد بود. به‌طورکلی می‌توان بیان داشت که با اتخاذ سناریوی کم‌آبیاری مدیریت‌شده در سطح ۸۰ درصد نیاز آبی در گلمکان و فریمان و ۹۰ درصد نیاز آبی در قوچان ضمن حفظ عملکرد در حد مطلوب، می‌توان بهره‌وری آب را نسبت به آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) بهبود داد.

REFRENCES

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper no. 56. FAO, Rome, Italy.

Ansari, M.A., Egdernezhad, A. and Ebrahimipak, N.A. 2022. Evaluation of SWAP for Simulation of Potato and Determination of Adequate Irrigation Depth. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 16(5): 891-903. (In Farsi)

Ati, A.S., Iyada, A.D. and Najim, S.M. 2012. Water use efficiency of potato (Solanum tuberosum L.) under different irrigation methods and potassium fertilizer rates. Annals of Agricultural Sciences, 57: 99–103.

Azad Talatapeh, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V. and Tayfeh Rezaie, H. 2018. Climate change impacts modeling on winter wheat yield under full and deficit irrigation in Myandoab-Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 64(5): 731-746.

Azad Talatapeh, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V. and Tayfeh Rezaie, H. 2018. Climate change impacts modeling on winter wheat yield under full and deficit irrigation in Myandoab-Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 64(5): 731-746.

Dahal, K., Li, X.-Q., Tai, H., Creelman, A. and Bizimungu, B. 2019. Improving potato stress tolerance and tuber yield under a climate change scenario- a current overview. Frontiers in Plant Science, 10: 547–563.

de Jong van Lier, Q., Wendroth, O. and van Dam, J.C. 2015. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. Agricultural Water Management, 154: 29–42.

Devaux, A., Goffart, J.P., Petsakos, A., Kromann, P., Gatto, M., Okello, J., Suarez, V. and Hareau, G. 2020. Global food security, contributions from sustainable potato agri-food systems. In: Campos, H., Ortiz, O. (Eds.), The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind. In: Campos, H. and Ortiz, O., editors. Springer International Publishing, Cham. p. 3–35.

Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. In FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 33, FAO: Rome, Italy, p. 193.

El-Abedin, T.K., Matter, M.A., Al-Ghobari, H.M.a nd Alazba, A.A. 2019. Water-saving irrigation strategies in potato fields: Effects on physiological characteristics and water use in arid region. Agronomy, 9: 1–9.

FAO (2022). FAOSTAT. FAO. https://www.fao.org/faostat/en.

Goldani, M., Bannayan, M. and Yaghoubi, F. 2021. Crop water productivity and yield response of two greenhouse basil (Ocimum basilicum L.) cultivars to deficit irrigation. Water Supply, 21(7): 3735-3751.

Heinen, M., Mulder, M. and Kroes, J. 2021. SWAP 4: technical addendum to the SWAP documentation. Wageningen Environmental Research. 41 p.

Iranian Ministry of Agriculture, 2022. Statistics of agricultural products in 2017–2018. http://www.maj.ir. Accessed 3 Mar 2022. (In Farsi)

Jing, Q., McConkey, B., Qian, B., Smith, W., Grant, B., Shang, J., Liu, J., Bindraban, P. and Luce, M.S. 2021. Assessing water management effects on spring wheat yield in the Canadian Prairies using DSSAT wheat models. Agricultural Water Management, 244: 106591.

Jonubi, R., Rezaverdinejad, V. and Salemi, H. 2017. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. Paddy and Water Environment, 16(1): 125-141.

Kroes, J.G. and J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Wageningen, Alterra, Green World Research. Alterra-report 773. Reference Manual SWAP version 3.0.3.doc. 211 pp.

Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I. and Van Walsum, P.E.V. 2017. SWAP version 4: theory description and user manual. Alterra-rapport-Wageningen University and Research Centre, (2780).

Kulig, B., Skowera, B., Klimek-Kopyra, A., Kołodziej, S. and Grygierzec, W. 2020. The Use of the WOFOST Model to Simulate Water-Limited Yield of Early Potato Cultivars.

Łabędzki, L. and Bąk, B. 2017. Impact of meteorological drought on crop water deficit and crop yield reduction in polish agriculture. Journal of Water and Land Development, 34: 181–190.

Leghari, S.J., Hu, K., Liang, H. and Wei, Y. 2019. Modeling water and nitrogen balance of different cropping systems in the North China Plain. Agronomy, 9(11): 696.

Moghimi, M.M. and Sepaskhah, A.R. 2014. Consideration of Water Productivity for Farm Water Management in Different Conditions of Water Availability for Dominant Summer Crops. Iran Agricultural Research, 33(2): 47-62.

Neukam, D., Ahrends, H., Luig, A., Manderscheid, R. and Kage, H. 2016. Integrating wheat canopy temperatures in crop system models. Agronomy, 6(1): 7.

Pradel, W., Gatto, M., Hareau, G., Pandey, S.K. and Bhardway, V. 2019. Adoption of potato varieties and their role for climate change adaption in India. Climate Risk Management, 23: 114–123.

Rodriguez, L., Sanjuanelo, D., Nustez, C.E. and Moreno-Fonseca, P. 2016. Growth and phenology of three andean potato varieties (Solanum tuberosum L.) under water stress. Agronomía Colombiana, 34: 141–154.

Sarker, K.K., Hossain, A., Timsina, J., Biswas, S.K., Kundu, B.C., Barman, A., Murad, K.F. and Akter, F. 2019. Yield and quality of potato tuber and its water productivity are influenced by alternate furrow irrigation in a raised bed system. Agricultural Water Management, 224: 105750.

Skowera, B., Kopcińska, J., Ziernicka-Wojtaszek, A. and Wojkowski, J. 2016. Precipitation deficiencies and excesses during the growing season of late potato in the opolskie

voivodship (1981–2010). Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus, 15: 137–149.

Supit, I., Hooyer, A.A. and Van Diepen, C.A. 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in the CGMS Vol. 1: Theory and algorithms. EUR publication 15956. Agricultural Series. Luxemberg.

ten Den, T., van de Wiel, I., de Wit, A., van Evert, F.K., van Ittersum, M.K. and Reidsma, P. 2022. Modelling potential potato yields: Accounting for experimental differences in modern cultivars. European Journal of Agronomy, 137: 126510.

Yaghoubi, F., Bannayan, M. and Asadi, G.A. 2022. Changes in spatio-temporal distribution of AgMERRA-derived agro-climatic indices and agro-climatic zones for wheat crops in the northeast Iran. International Journal of Biometeorology, 66: 431-446.

Yan, Y. 2105. Application of SWAP-WOFOST to evaluate the influence of water and oxygen stress on potato yield in a Dutch farm, MSc Thesis, Plant Production System, and Wageningen University. 61 pp.

Yan, Y., Reidsma, P. and Kroes, J. 2015. Application of SWAP-WOFOST to evaluate the influence of water and oxygen stress on potato yield in a Dutch farm. Unpublished MSc, Plant Production Systems. Thesis, Wageningen Agricultural University, Department of Plant Production Systems, Wageningen, The Netherlands, 61.

Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Wang, Y. and Shao, L. 2010. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain. Agricultural Water Management, 97(8): 1117-1125.

Zin El-Abedin, T.K., Mattar, M.A., Al-Ghobari, H.M. and Alazba, A.A. 2019. Water-saving irrigation strategies in potato fields: Effects on physiological characteristics and water use in arid region. Agronomy, 9(4): 172..

Sustainable Agricultural Science Research /Vol. 4/No. 1/Spring 2024/P: 38-56

https://sanad.iau.ir/journal/sarj/

Evaluation of Potato Water Productivity Under Deficit Irrigation Conditions Using Modelling Approach

Mahsa Mostafavi Babukani[1], Yousef Hasheminejhad[2*], Mohammad Armin[3], Hamid Marvi[4], Kourosh Shojaei[5]

[1]PhD student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran

[2]Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran

[3]Professor, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran,

[4]Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Sabzevar Branch, Islamic Azad University, Sabzevar, Iran

[5]Assistant Professor, Field and Horticulture Crops Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre of Khorasan-e-Razavi, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran.

* Corresponding Author's Email: hasheminejhad@gmail.com

(Received: March. 1, 2024– Accepted: April. 6, 2024)

ABSTRACT

Due to its high yield and nutritional value, potato is an alternative to cereals and a vital food-security crop. This study was conducted in order to evaluate the SWAP model to simulating the yield and water productivity of potato under deficit irrigation conditions in the main potato cultivation regions of Razavi Khorasan province, including Fariman, Ghoochan, and Golmkan in 2019. First, the model performance to simulate the leaf area index and potato yield was evaluated based on the measurements taken from the fields of all three locations. Then, using the evaluated model, the yield and water productivity of potato were simulated under different irrigation and deficit irrigation scenarios, including irrigation based on farmer management, and 100, 90, 80, 70, 60 and 50% of potato water requirement. The results showed that the SAWP model had good performance in simulating potato leaf area index (R^2>0.89 and RMSE<0.73), yield (R^2=0.96 and RMSE=5.908 kg ha^{-1}), and water productivity (R^2=0.93 and RMSE=0.5 kg m^{-3}). Compared to full irrigation, by reducing the amount of irrigation water to 50% of the water requirement, the potato yield decreased. The amount of yield decreases for each one percent decrease in the amount of irrigation water in Ghoochan, Fariman, and Golmkan was 255.97, 120.19 and 78.62 kg ha^{-1}, respectively. The potato water productivity also increased by using deficit irrigation up to 50% of the water requirement in Golmkan and Fariman and up to 90% of the water requirement in Ghoochan. In general, by adopting the deficit irrigation at the level of 80% of the water requirement in Golmakan and Fariman and 90% of the water requirement in Ghoochan, it is possible to improve the water productivity compared to full irrigation while maintaining the optimum yield.

Keywords: Simulation, SWAP, Validation, Yield.