

ارزیابی مدل SWAP در تخمین محصول گندم در شرایط کم آبیاری و شوری در منطقه بیرجند

محمدجواد نحوی نیا^{۱*}، علی شهیدی^۲، مسعود پارسی نژاد^۳ و بختیار کریمی^۴

چکیده

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی و واسنجی مدل SWAP3.03 در برآورد عملکرد رقم روشن گندم، در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ در قالب طرح به صورت فاکتوریل با سه سطح شوری آب آبیاری (با هدایت الکتریکی بین ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان کرت اصلی و چهار سطح ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ در صد نیاز آبی گیاه به عنوان کرت‌های فرعی در مزرعه آزمایشی دانشگاه بیرجند اجرا شد. تیمار آبیاری معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی و شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. ابتدا مدل نسبت به پارامترهای گیاهی گندم زمستانه، در استان خراسان جنوبی، با استفاده از داده‌های دو طرح تحقیقاتی که در سال‌های زراعی ۷۹-۱۳۷۸ و ۸۰-۱۳۷۹ در محل اجرای طرح حاضر اجرا شده بود، به خوبی واسنجی شد. ضریب تعیین R^2 بین عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی برای رقم روشن ۰/۸۳ به دست آمد که از لحاظ آماری معنی‌دار بود ($P < ۰/۰۱$). همچنین مدل به طور متوسط عملکرد را ۱۰٪ کمتر از مقادیر واقعی شبیه‌سازی کرد که آزمون مقایسه میانگین t-test تفاوت معنی‌داری بین عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی نشان نداد.

واژه‌های کلیدی: شوری، مقدار آبیاری، عملکرد، گندم، مدل SWAP.

ارجاع: نحوی نیا م. ج. شهیدی ع. پارسی نژاد م. و کریمی ب. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل SWAP در تخمین محصول گندم در شرایط کم آبیاری و شوری در منطقه بیرجند. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۴۳-۵۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند.

۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران.

۴- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران.

*نویسنده مسئول: javad.nahvinia@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۶

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب موجود، محدود و عموماً لب شور است، بنابراین، در چنین شرایطی علاوه بر بررسی واکنش گیاهان نسبت به مقدار آب مصرفی، عامل شوری نیز باید همزمان مورد مطالعه قرار گیرد.

حدود ۱۵ درصد اراضی کشور ایران با مشکل شوری و زیادی سدیم مواجه است (محمدی، ۱۳۷۰). با اعمال روش‌های مدیریتی مناسب همچون افزایش کیفیت آب آبیاری از طریق اختلاط آب‌های شور و شیرین، اعمال میزان آبیاری مناسب و همچنین کشت واریته‌های نسبتاً مقاوم در برابر شوری می‌توان میزان کاهش محصول را تا حدود زیادی برطرف کرد. اما انتخاب روش مناسب مستلزم انجام مطالعات و آزمایش‌های متعددی است. اعتبار آزمایش‌های صحرایی بسته به شرایط فیزیکی و منطقه‌ای که آزمایش در آن انجام می‌شود کمتر می‌شود. همچنین این آزمایش‌ها معمولاً کوتاه مدت‌اند و فاکتور اصلی در مسائل مرتبط با شوری، یعنی عوامل بلندمدت را در نظر نمی‌گیرند. تعداد روش‌های که با استفاده از آزمایش‌های صحرایی بررسی می‌شوند با ملاحظات عملی مانند ورودی‌های آزمایش و هزینه‌های بالا، محدود می‌شوند. کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی زراعی از جمله روش‌هایی است که محدودیت‌های مذکور را تا حد زیادی برطرف می‌کند. ولی قبل از به‌کارگیری چنین مدل‌هایی درستی نتایج آن‌ها باید با نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد و در صورتی که این مدل‌ها به درستی و انسجام شوند، می‌توان برای ارزیابی اثرات درازمدت روش‌های مختلف آبیاری را به‌کار برد (منصوری و مصطفی‌زاده، ۱۳۸۵).

امروزه مدل‌های شبیه‌سازی معتبری برای پیش‌بینی عملکرد ارائه شده‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل آگرو هیدرولوژیکی SWAP^۱ بوده که بر پایه ارتباط فیزیکی بین پارامترهای آب، خاک، اتمسفر و گیاه است و از زیر مجموعه‌های مختلفی از جمله شبیه‌سازی رشد محصول، مدیریت آبیاری، جریان آب و انتقال املاح و حرارت در خاک تشکیل شده است (هیگن و همکاران، ۲۰۰۰). هسته اصلی این مدل، شبیه‌سازی جریان عمودی آب در منطقه اشباع و غیر اشباع است که به‌وسیله معادله معروف ریچاردز تشریح می‌شود و

شبیه‌سازی با ترکیب یک تابع نزولی نیمه تحلیلی انجام می‌گیرد (ون‌دوام و همکاران، ۱۹۹۷). این مدل به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول و جریان آب و املاح در سیستم‌های هیدرولوژیکی کشاورزی در کشورهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج خوبی در مقایسه با عملکرد مزرعه‌ای داشته است.

قریشی و همکاران (۲۰۰۲) به کمک مدل SWAP برای شبیه‌سازی بیلان رطوبتی آب در خاک در زراعت نیشکر در پاکستان تحقیقاتی انجام دادند. این تحقیق برای تعیین بهترین میزان و دور آبیاری در سیستم آبیاری سطحی به مدت شش سال انجام شد. تیمارها شامل چهار سطح آبیاری به‌میزان ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۶۵۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر در طول فصل زراعی و سه دور آبیاری ۱۵، ۲۲ و ۳۱ روزه بود. نتایج نشان داد که در آن منطقه آب داده شده به‌میزان ۱۶۵۰ میلی‌متر و دور آبیاری ۱۵ روز در مقایسه با دوره‌های ۲۲ و ۳۱ روز بهترین رژیم آبیاری محسوب می‌شود و محصول از عملکرد بالایی برخوردار می‌شود.

خانی و همکاران (۱۳۸۶) به‌منظور ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت شرایط کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری آزمایشی در استان خراسان رضوی انجام دادند. نتایج نشان داد که روند کلی تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل در مقادیر مختلف آب آبیاری بر روند تغییرات عملکرد به‌دست آمده در مزرعه کاملاً مطابقت دارد و هر دو روش، حداکثر محصول را در مقدار آب آبیاری فصلی ۹۵۰ میلی‌متر نشان دادند. مدل عملکرد را به‌طور متوسط ۱۰ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، برآورد کرد (t/ha RMSE=۱۰) و ضریب تعیین بین عملکرد شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه ۰/۸۳ به‌دست آمد که از لحاظ آماری معنی‌دار بود.

سینگ و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی که در هندوستان در زمینه تحلیل بهره‌وری آب با کمک مدل SWAP انجام دادند و مقدار بهره‌وری برای دانه گندم، برنج و پنبه به‌ترتیب ۱/۰۴، ۰/۸۴ و ۰/۲۱ کیلوگرم در هکتار به‌دست آوردند. عوامل مؤثر در کاهش بهره‌وری، زیادی تبخیر در پارامتر تبخیر و تفرق برای برنج و میزان نفوذ آب در مزارع تحت آبیاری بود. عملکرد شبیه‌سازی شده تحت محدودیت آب و شوری، ۲۰ تا ۶۰ درصد بیشتر از عملکرد واقعی بود.

^۱ - Soil, Water, Atmosphere and Plant (SWAP)

خصوصیات رطوبتی خاک با استفاده از اندازه‌گیری رطوبت خاک در مکش‌های مختلف به کمک دستگاه صفحات فشاری و محفظه فشاری تعیین شد. به منظور ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم در دامنه‌های مختلف مقادیر آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب به مقادیر گسترده‌ای از داده‌های عملکرد واقعی (اندازه‌گیری شده در مزرعه) نیاز بود. برای تأمین این هدف، از سه حلقه چاه با شوری مختلف در مزرعه آزمایشی موردنظر (با EC های متغیر از ۱/۴ تا ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) استفاده شد که امکان تأمین آب با شوری‌های مختلف در مزرعه برای ارزیابی مدل SWAP در سه کلاس مختلف شوری (هدایت الکتریکی) را به وجود آورد. نتایج تجزیه شیمیایی آب سه حلقه چاه فوق‌الذکر در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار نسبت جذبی سدیم (SAR) برای هر سه نوع آب نزدیک به هم بوده و در دو کلاس S2 و S3 می‌باشد. اما اثر سدیم بیشتر در شوری‌های کم مشهود است (علیزاده، ۱۳۸۳) و چون در این پژوهش از آب‌های نسبتاً شور استفاده شد، لذا استفاده از آب این چاه‌ها مشکلی برای رشد گندم ایجاد نمی‌کند.

قالب طرح آزمایشی کرت‌های خرد شده به صورت فاکتوریل بود که در آن سطوح مختلف شوری (S_1, S_2, S_3) به ترتیب معادل ۱/۴ و ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و چهار سطح آبیاری (I_1, I_2, I_3, I_4) به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ در صد نیاز آبی گیاه)، به عنوان کرت‌های فرعی که در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال زراعی ۸۴-۸۵ اجرا شد. تیمار آبیاری I_3S_1 معادل ۱۰۰٪ نیاز آبی و شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. روش کاشت به صورت دستی و در داخل کرت انجام شد و به منظور حصول یکنواختی در اعمال شوری، از روش آبیاری کرتی استفاده شد. در این تحقیق ابعاد کرت‌ها 3×4 (متر×متر) و فاصله کرت‌های فرعی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های اصلی حداقل ۴/۵ متر در نظر گرفته شد و در تاریخ ۲۳ آبان ۱۳۸۴ کشت شدند. در هر کرت ۱۰ ردیف کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر و طول ۳ متر طوری کاشته شد که تراکم معمول ۴۰۰ بوته گندم در متر مربع حاصل شود.

وظیفه‌دوست و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی مقادیر بیان آبی مانند تعرق، تبخیر از خاک، نفوذ عمقی و پیش‌بینی عملکرد چهار محصول چغندرقد، گندم، آفتابگردان و ذرت علوفه‌ای در منطقه برخوردار اصفهان، مدل SWAP را ارزیابی و واسنجی کرد و نشان داد که شبیه‌سازی تولید ماده خشک مدل SWAP به پارامترهای سطح ویژه برگ، راندمان مصرف نور و سرعت پیشینه جذب که خاص هر گیاه است، نسبتاً حساس است و در نهایت نتیجه گرفت که مدل بعد از واسنجی می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد گیاه استفاده شود.

مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی کارایی مدل SWAP در تخمین عملکرد گندم و شوری خاک در منطقه رودش اصفهان گزارش کردند که هرچند آزمون صحت‌یابی مدل SWAP با چهار شاخص آماری نشان داد که این مدل در مناطق خشک قابل استفاده است اما این مدل SWAP مقادیر عملکرد محصول را بیشتر از نتایج واقعی شبیه‌سازی کرده است. مقایسه نمودارهای غلظت نمک شبیه‌سازی شده با غلظت نمک واقعی در تیمارهای مختلف آزمایش نشان داد مدل SWAP میزان نمک خاک را در تیمارهایی که با آب با شوری کمتر آبیاری شده‌اند، با دقت نسبتاً قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است.

بررسی سابقه به‌کارگیری مدل SWAP نشان داد که این مدل می‌تواند برای تأمین اهداف این تحقیق استفاده شود. با توجه به محدودیت منابع آبی در استان خراسان جنوبی که در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و قرار گرفتن حجم عظیمی از این آب‌ها در ردیف آب‌های شور و لب شور و همچنین سطح زیر کشت بالای گندم در این استان، تحقیق حاضر به منظور ارزیابی و واسنجی مدل SWAP3.03 در برآورد عملکرد رقم روشن گندم که از ارقام مورد استفاده در مناطق خشک است، انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی بیرجند با عرض جغرافیایی 33° و 53° شمالی و طول جغرافیایی 13° و 55° شرقی و ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا، در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۴ اجرا شد. قبل از کاشت گیاه گندم از اعماق مختلف خاک مزرعه برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه نمونه‌گیری انجام گرفت (جدول ۱). منحنی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

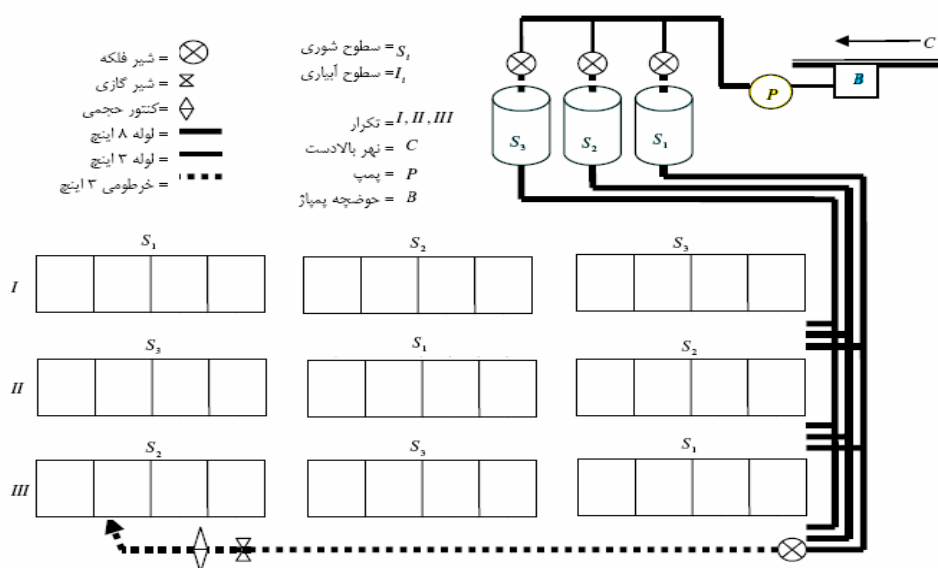
درصد اندازه ذرات خاک			PWP (%)	FC (%)	بافت خاک	SAR	چگالی ظاهری (g/cm ³)	EC _e (dS/m)	رطوبت اولیه (%)	pH	عمق خاک (cm)
رس	سیلت	شن									
۳۵/۷	۳۴/۶	۲۹/۷	۱۹/۳	۳۵/۲	C-L	۷/۴	۱/۵	۲/۱	۹٪	۷/۶۱	۳۰-۰
۳۷/۳	۵۲/۶	۱۰/۱	۱۸/۲	۳۲/۳	Si-C-L	۸/۶	۱/۴۵	۲/۷	۱۰/۷۵٪	۷/۷۲	۶۰-۳۰
۳۵/۲	۵۳/۶	۱۱/۲	۲۱/۳	۳۳/۳۴	Si-C-L	۹/۷	۱/۳۹	۲/۹	۱۱/۷۵٪	۷/۷۸	۹۰-۶۰

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب سه حلقه چاه مورد استفاده

آنیون‌ها (mg/lit)					کاتیون‌ها (mg/lit)			SAR	pH	EC(dS/m)	شماره چاه
SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CL ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺				
۴/۱	۰	۳/۱	۷/۲	۰/۰۵	۱۰/۲	۱/۷	۲/۲	۷/۴	۸/۰	۱/۴	۱
۱۶/۵	۰	۸/۳	۲۱/۲	۰/۳	۲۶/۵	۴/۸	۱۴/۰	۸/۶	۷/۸	۴/۵	۲
۲۰/۸	۰	۱۰/۶	۵۳/۵	۰/۸	۴۳/۸	۱۲/۸	۲۷/۶	۹/۷	۷/۷	۹/۶	۳

قطعه زراعی مورد آزمایش منتقل شد. میزان آب مورد نیاز هر کرت از طریق کنترلر حجمی به کرت‌ها با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۶۵ درصد کنترل شد. آرایش قطعات زراعی، استقرار سیستم آبیاری و کرت‌های آزمایشی در شکل ۱ ترسیم شده است.

برای تجهیز سیستم آبیاری به گونه‌ای که بتوان سطوح مختلف شوری آب آبیاری را در کرت‌های آزمایشی اعمال کرد، ابتدا سه منبع فلزی هر یک با حجم ۲۸۰۰۰ لیتر بر روی سکویی به ارتفاع ۱/۵ متر احداث شد. سپس آب با شوری مورد نظر از نهر بالادست مزرعه به داخل هر یک از منابع آب پمپاژ شد و از طریق خطوط لوله آب به ابتدای



شکل ۱- نقشه شماتیک طرح آزمایشی

در پایان فصل رشد گندم پس از رسیدگی فیزیولوژیکی (در تاریخ ۲۸ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۵) سطحی معادل ۰/۳۶ پس از اندازه‌گیری وزن کل دانه و کاه و کلش (عملکرد

مترمربع از ردیف‌های مرکزی به‌طور کامل برداشت شد و

و چگالی ظاهری خاک به‌عنوان ورودی به مدل داده شد و مقادیر این پارامترها به‌عنوان خروجی به‌دست آمد. مشخصات پارامتر هیدرولیکی برآورد شده توسط مدل RETC در جدول ۴ ارائه شده.

جدول ۴- پارامترهای معادله ون گنوختن استخراج شده از مدل RETC

عمق (cm)	n	α (1/cm)	K_{sat} (cm/d)	Θ_{sat} (%)	Θ_{res} (%)
۰-۳۰	۱/۳۸۶۱	۰/۰۱۲۷	۵/۸۴	۰/۴۱۸۴	۰/۰۸۱۹
۳۰-۶۰	۱/۴۵۲۷	۰/۰۰۹۶	۶/۵۳	۰/۴۴۸۳	۰/۰۸۹۶
۶۰-۹۰	۱/۴۸۳۵	۰/۰۰۹۰	۹/۵۲	۰/۴۵۹۳	۰/۰۸۹۳

پارامترهای آبیاری

برای برنامه‌ریزی و تعیین زمان آبیاری با معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی و شوری (شاهد) از شاخص رطوبت خاک استفاده شد. بر این اساس، رطوبت خاک تا عمق ریشه گیاه به‌ازای هر ۲۰ سانتی‌متر، در روزهای قبل از آبیاری اندازه‌گیری شد و زمانی که میانگین وزنی رطوبت حجمی خاک به حد تخلیه مجاز برای گندم (۵۰٪) رسید (با معیار تیمار ۱۰٪ نیاز آبی) اقدام به اعمال رژیم‌های مختلف آب، بر اساس کمبود رطوبت خاک و ضرایب هر تیمار با استفاده از معادله زیر شد:

$$SMD = (W_{FC} - W_i) \cdot A_s \cdot D \cdot C \quad (1)$$

که در آن: SMD کمبود رطوبت خاک میلی‌متر، W_i, W_{FC} به‌ترتیب درصد وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی و موجود خاک، A_s چگالی ظاهری خاک خشک (g/m^3)، D عمق توسعه ریشه میلی‌متر و C ضرایب هر تیمار درصد. تیمارهای مقدار آب آبیاری (I_1, I_2, I_3, I_4) به‌عنوان فاکتور فرعی برای تأمین به‌ترتیب ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبیاری گیاه بعد از جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفتند. برنامه‌ریزی آبیاری این طرح شامل زمان‌بندی و مقدار هر آبیاری برای تیمارهای مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار مصرف آب توسط گیاه از طریق اندازه‌گیری اجزا

$$I + P = (ET + Dd + Ro) \pm \Delta S \quad (2)$$

که در آن I و P، به‌ترتیب عمق آب آبیاری و بارندگی

بیولوژیک)، دانه‌های گندم از کاه جدا و توزین شد و عملکرد دانه برحسب رطوبت ۱۲ درصد ثبت شد. داده‌های ورودی مدل SWAP مورد استفاده در شبیه‌سازی عملکرد عبارتند از: اطلاعات اقلیمی، زراعی، خاکشناسی و مدیریتی در قالب فایل‌های تعیین شده با استفاده از مدل تعریف می‌شود.

مدل برای محاسبه تبخیر- تعرق بالقوه به‌وسیله معادله پنمن- مانتیث به داده‌های هواشناسی مانند تابش خورشیدی (RAD)، حداقل و حداکثر دمای روزانه، میانگین فشار بخار، ساعات آفتابی، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و بارندگی روزانه نیاز دارد. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بیرجند ۸۵-۱۳۸۴ و تابش خورشیدی روزانه طبق روش پنمن مانتیث (علیزاده، ۱۳۸۳) محاسبه و به مدل داده شدند. بارندگی ماهانه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند مربوط به ماه‌های مقارن با فصل کشت در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- آمار بارندگی ماهانه ایستگاه بیرجند در فصل زراعی ۸۵-۱۳۸۴

بارندگی میلی‌متر	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹
بارندگی میلی‌متر	۴/۰۵	۲۳/۷۵	۴۰/۳۰	۳۱/۷۷	۲۹/۲۱	۲۲/۴۳

کل نیم‌رخ خاک، به سه لایه و ۶۰ زیر لایه تقسیم‌بندی شد و مشخصات هر لایه از قبیل درصد ذرات تشکیل‌دهنده (بافت خاک)، محدودیت‌های نفوذ ریشه، پدیده پسماند رطوبتی و شرایط رطوبتی اولیه (جدول ۳) در فایل مربوطه تعیین شدند. سپس برای تعریف روابط بار فشاری آب خاک، مقدار رطوبت خاک و ضریب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع برای هر لایه تعیین شده در شرح پروفیل خاک، ضرایب معادله ون گنوختن (ون گنوختن و بات، ۱۹۹۱) به مدل داده شد. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه‌های مختلف خاک از روش بار افتان استفاده شد. برای به‌دست آوردن سایر ضرایب توابع هیدرولیکی خاک ($\lambda, \theta_{res}, \alpha, n$)، از مدل RETC استفاده شد، به‌طوری که مشخصات هر لایه خاک ارائه شده در جدول ۱ مانند درصد ذرات تشکیل‌دهنده

می‌شود، با اندازه‌گیری رطوبت تا عمق یک متری خاک به‌دست آمد. به‌دلیل عمیق بودن سطح سفره آب زیرزمینی از سهم آب زیرزمینی صرف‌نظر شد. تغییرات رطوبت خاک از تفاوت رطوبت در ابتدا و انتهای فصل در پروفیل خاک محاسبه شد.

میلی‌متر ET، Dd و Ro به‌ترتیب تبخیر و تعرق گیاه، عمق آب زهکشی و عمق رواناب میلی‌متر ΔS ، تغییرات ذخیره رطوبت خاک هستند. چون انتهای کرت‌ها بسته‌اند، بنابراین رواناب سطحی وجود ندارد. مقدار آب زهکشی شده با این فرض که مقدار رطوبت بیشتر از ظرفیت زراعی زهکشی

جدول ۵- زمان و مقدار آب مصرف شده در هر یک از تیمارهای آبیاری

تیمار اول (۵۰٪ نیاز آبی) (mm)	تیمار دوم (۷۵٪ نیاز آبی) (mm)	تیمار سوم (۱۰۰٪ نیاز آبی) (mm)	تیمار چهارم (۱۲۵٪ نیاز آبی) (mm)	زمان آبیاری
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۵ آبان ۸۴
۳۵	۷۰	۵۳	۸۷	۵ اسفند ۸۴
۳۸	۷۶	۵۷	۹۵	۱۹ اسفند ۸۴
۴۵	۹۱	۶۸	۱۱۴	۴ فروردین ۸۵
۴۹	۹۷	۷۳	۱۲۱	۲۷ فروردین ۸۵
۴۵	۹۰	۶۷	۱۱۳	۷ اردیبهشت ۸۵
۴۰	۸۰	۶۰	۱۰۰	۱۷ اردیبهشت ۸۵
۲۸۲	۵۳۴	۴۰۸	۶۶۰	جمع (mm)
۲۸۲۰	۵۳۴۰	۴۰۸۰	۶۶۰۰	جمع (m ³ /ha)

بخش در مراحل مختلف رشد شامل ارتفاع گیاه، عمق ریشه، ضریب گیاهی K_c ، شاخص سطح برگ^۴، فاکتور جذب CO_2 و تبدیل به ماده خشک^۵، ضریب تقسیم‌بندی ماده خشک به اندام‌ها، آب مصرفی گیاه، آستانه تحمل به شوری، راندمان مصرف نور، سطح ویژه برگ، مجموع دما از کاشت تا گلدهی و مجموع دما از گلدهی تا رسیدگی است. سرعت رشد ماده خشک (Y_p)، کیلوگرم ماده خشک در هکتار در روز) با محاسبه جذب و ماده‌سازی (کربن‌گیری) ناخالص پتانسیل A_{max} ($kgCO_2,ha^{-1}.d^{-1}$) حداکثر سرعت تثبیت $kgCO_2,ha^{-1}.d^{-1}$ ، ϵ_{PAR} ، شیب اولیه یا راندمان مصرف نور ($J^{-1}.d^{-1}$ absorbed) و PAR_{La} سرعت تابش جذب شده ($J.m^{-2}.leaf.d^{-1}$) در عمقی به اندازه L در کانوپی را نشان می‌دهند. سرعت‌های لحظه‌ای جذب در لایه برگ، باید بر روی شاخص سطح برگ کانوپی و در کل روز اندازه‌گیری شود. وارد کردن مقدار تنش آب و یا تنش شوری، $T.TP^{-1}$ ، برای کمی کردن تثبیت ناخالص واقعی ($kgCO_2,ha^{-1}.d^{-1}$)، توسط گیاه انجام می‌شود. بخشی از مواد جذب شده و تولید شده برای تأمین

با استفاده از سامانه آبیاری طراحی شده به‌ازای هر کرت در سطح مزرعه، ترکیب متفاوتی از کمیت و کیفیت آب آبیاری ایجاد شد. بنابراین با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در طول اجرای طرح برای هر کرت، یک پرونده مشخصات آبیاری ایجاد شد (۷۲ پرونده). اطلاعات ورودی به مدل شامل تاریخ آبیاری، عمق آب آبیاری، میزان شوری آب آبیاری و نوع روش آبیاری است.

مدل SWAP حاوی سه بخش مهم در فایل داده‌های ورودی شبیه‌سازی رشد و برآورد عملکرد محصولات زراعی است:
۱- مدل شبیه‌سازی تفصیلی رشد^۱ -۲- مدل مشابه تفصیلی^۲ که به رشد و نمو گیاه چمن اختصاص دارد ۳- مدل ساده^۳ برای برآورد عملکرد محصولات زراعی (هیگن و همکاران، ۲۰۰۰). در این تحقیق از مدل شبیه‌سازی تفصیلی رشد برای پیش‌بینی عملکرد نسبی استفاده شد. مدل تفصیلی مزیت شبیه‌سازی عملکرد ماده خشک پتانسیل (Y_p) و واقعی (Y) را داراست. برخی از پارامترهای موردنیاز برای این

1-Detailed model
2-Detailed (gross only)
3- Simple model
4- Leaf Area Inces

علف‌های هرز و بیماری‌ها بر روی رشد گیاه و مقدار تولید آن در مدل SWAP اعمال نشده است.

برخی از این پارامترهای گیاهی را می‌توان تعدیل و با بررسی منابع تعیین کرد (بسی‌میندر و همکاران، ۲۰۰۵). در این تحقیق پارامترهای گیاهی از قبیل تعداد بوته در واحد سطح، وزن خشک اندام‌های گیاهی و عمق ریشه در طول فصل زراعی ۸۵-۱۳۸۴ اندازه‌گیری شد. برای پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری نبودند، ابتدا طیفی از مقادیر قابل قبول بر اساس پژوهش‌ها و منابع مختلفی که پارامترهای لازم برای گندم زمستانه را اندازه‌گیری و پیشنهاد کرده بودند (وظیفه دوست و همکاران، ۲۰۰۷) در نظر گرفته شد. سپس، مدل با استفاده از داده‌های دو طرح تحقیقاتی زمانی (۱۳۸۳) و کیانی (۱۳۸۴) که در سال‌های زراعی ۷۹-۱۳۷۸ و ۸۰-۱۳۷۹ در محل اجرای طرح حاضر اجرا شده بود، با ترکیب‌های متفاوتی از مقادیر مبنی بر بازه‌های واقعی، به‌طور دستی واسنجی شد. بعد از واسنجی ضریب تعیین داده‌ها (R^2) برای سال ۱۳۸۳، (۸۶/۰) و برای سال ۱۳۸۴ (۸۸/۰) به‌دست آمد که با توجه به شرایط آزمایش در مقیاس مزرعه‌ای تطابق مطلوبی می‌باشد. در جدول ۶ پارامترهای گیاهی ورودی به مدل، برای آزمون آمده است.

جدول ۶- پارامترهای گیاهی مورد استفاده در شبیه‌سازی گندم زمستانه

پارامتر	مقادیر
دمای تجمعی از مرحله سبزی‌نگی تا گلدهی ($^{\circ}\text{C}$) TSUMEA (دمای مبنای $^{\circ}\text{C}$ ۵/۵)	۱۳۰۰
دمای تجمعی از مرحله گلدهی تا رسیدگی ($^{\circ}\text{C}$) TSUMAM	۷۵۰
سطح ویژه برگ (SLA)	۰/۰۰۱۷
حداکثر افزایش نسبی در سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) RGRLAI	۰/۰۰۸
ضریب جذب نور K_{gr}	۰/۳۷
راندمان مصرف نور خورشید ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1} / \text{J m}^2 \text{s}^{-1}$) (ϵ)	۰/۴
حداکثر میزان تثبیت (Assimilation) دی اکسید کربن ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) (A_{max})	۴۳

انتهای فصل رشد (روز برداشت) که در آن عملکرد دانه گندم مدنظر است، استفاده شد. تحلیل حساسیت مدل به‌روش پیشنهادی لیو و همکاران (۲۰۰۷) و با استفاده از اطلاعات زراعی مربوط به تحقیق زمانی (۱۳۸۳) در منطقه بیرجند انجام شد. به‌این‌منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های ورودی، مدل اجرا شد و نتایج

انرژی برای تنفس گیاه و ابقاء (تثبیت) استفاده می‌شود. سرعت‌های خالص باقیمانده جذب، برای کل زمان به‌عنوان مثال فصل رشد گیاه، انتگرال‌گیری شده و با استفاده از ضریب تبدیلی گلوکز به ماده خشک C_e (kg.kg^{-1})، به عملکرد ماده خشک گیاه تبدیل می‌شود.

$$Y = C_e \sum_{i=1}^N \left(\frac{30}{44} TT_p^{-1}(t) - R_m(t) \right) \quad (3)$$

که در آن R_m : سرعت تنفس واقعی ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$) و N طول کل دوره رشد هستند. ضریب C_e به تبدیل CO_2 به گلوکز اشاره دارد. ماده خشک تولیدشده بین ریشه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره‌ای با استفاده از ضرایب تبدیلی که تابعی از مرحله رشد و نمو گیاه هستند، تقسیم می‌شود. افزایش خالص در ماده خشک برگ (Y_L) و شاخص سطح ویژه برگ (kg.ha^{-1})، SLA پویایی شاخص سطح برگ ($LAI = (SAL.Y_L)$) را تعیین می‌کنند. میزان تولید ماده خشک در SWAP به پارامترهای گیاهی از قبیل حداکثر میزان تثبیت دی‌اکسیدکربن (A_{max})، راندمان مصرف نور خورشید (ϵ) و سطح ویژه برگ (SLA) نسبتاً حساس است (بسی‌میندر و همکاران، ۲۰۰۵). در شرایط تنش شوری و آبی، SWAP وزن خشک پتانسیل (Y_p) را به وزن خشک (Y) کاهش می‌دهد. قابل ذکر است که اثرات تغذیه، آفات،

برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP با نتایج اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف کمی و کیفی آب آبیاری در مزرعه، به‌ازای هر فایل آبیاری موجود، مدل یک مرتبه اجرا و عملکرد وزن خشک کل گیاه و (Y) و وزن خشک اندام‌های ذخیره‌ای (Y_{so}) گیاه گندم شبیه‌سازی شد. به‌منظور ارزیابی مدل از آخرین نقطه شبیه‌سازی شده در

ضریب باقیمانده (CRM)^۵

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (۹)$$

که در آنها P_i مقادیر پیش‌بینی شده، Q_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌های به کار رفته، \bar{Q} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. حداقل مقدار ME ، $NRMSE$ و R^2 صفر است. حداکثر مقدار EF برابر با یک است. EF و CRM می‌توانند مقادیری منفی داشته باشند. مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است در حالی که $NRMSE$ نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) چقدر است. شاخص R^2 نسبت پراکندگی^۶ را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. مقدار شاخص EF ، مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین اندازه‌گیری‌های مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، برآوردی بهتر از مقادیر پیش‌بینی شده دارد. شاخص CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های $NRMSE$ ، ME و CRM برابر با صفر و مقدار R^2 و EF برابر با ۱ خواهد بود (همایی و همکاران، ۲۰۰۲). در این تحقیق تمام شاخص‌های آماری فوق برای مقایسه مقادیر عملکرد واقعی مشاهده شده در مطالعه صحرايي و مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل در مقادیر مختلف کمیت و کیفیت آب آبیاری محاسبه شده است.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل

مقادیر ضریب حساسیت محاسبه شده برای پارامترهای ورودی مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود حداکثر رقم مربوط به متوسط ضریب حساسیت، مربوط به عمق آب آبیاری با ضریب حساسیت ۱/۳۳ است و این رقم بیانگر آن است که داده‌های خروجی مدل به‌طور کلی، حساسیت بالایی به پارامتر ورودی عمق آب آبیاری نشان می‌دهند.

خروجی مدل که با استفاده از این داده‌های ورودی به‌دست آمد، به‌عنوان داده‌های خروجی پایه در نظر گرفته شد و بقیه داده‌ها ثابت نگه داشته شدند. میزان تغییر پارامترهای ورودی $\pm 50\%$ درصد در نظر گرفته شد. پس از تهیه پارامترهای موردنیاز حساسیت بخش‌های عملکرد محصول و انتقال آب و املاح در مدل نسبت به پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خروجی مدل بعد از تغییر داده‌های ورودی با نتایج به‌دست آمده خروجی‌های پایه توسط رابطه لیو و همکاران (۲۰۰۷) به شرح رابطه زیر مقایسه شد.

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad (۴)$$

که در آن S_c ضریب حساسیت، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر در متغیر داده شده در متغیر ورودی، \bar{W} متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده شده در متغیر ورودی، ΔP اختلاف مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل و \bar{P} متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل است. برای اطمینان از قابل اعتماد بودن مدل از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده شد. شاخص‌های آماری لازم برای این کار عبارتند از: حداکثر خطا (ME)^۱

$$ME = \text{Max} |P_i - Q_i|_{i=1}^n \quad (۵)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{Q} \quad (۶)$$

ضریب تعیین (R^2)^۲

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۷)$$

کارایی مدل‌سازی (EF)^۳

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۸)$$

1 - Maximum Error

2 - Root Mean Square Error

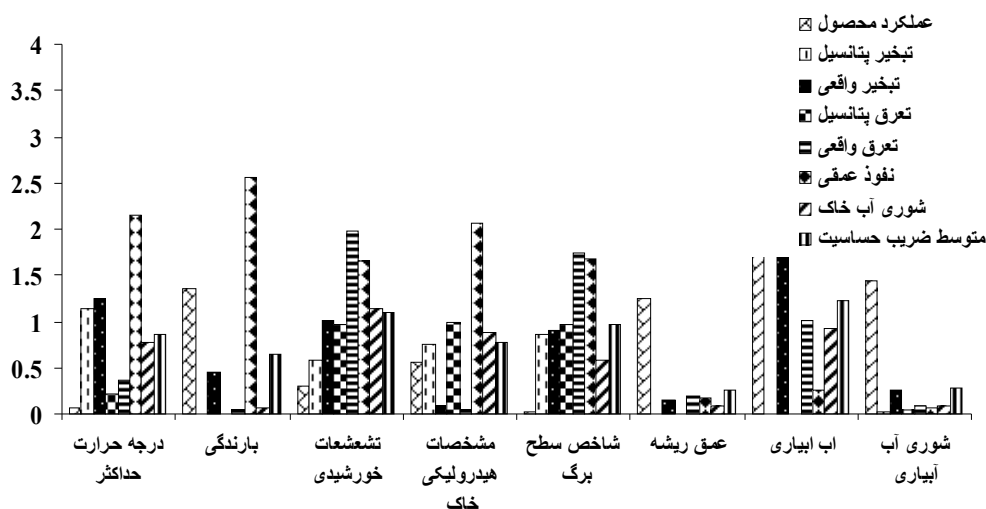
3 - Coefficient of Determination

5 - Modeling Efficiency

6 - Coefficient of Residual Mass

به پارامترهای ورودی در منطقه رودشت اصفهان تحت کشت گندم نشان دادند حساسیت مدل SWAP به عمق توسعه ریشه و شوری آب آبیاری "کم" و به داده‌های هواشناسی، مشخصات هیدرولیکی لایه‌های سطحی خاک، شاخص سطح برگ و میزان آب آبیاری "متوسط" است.

درجات حساسیت پایین‌تر به ترتیب مربوط به پارامترهای تشعشع خورشیدی (متوسط)، شاخص سطح برگ (متوسط)، درجه حرارت حداکثر (متوسط)، مشخصات هیدرولیکی لایه سطحی (متوسط)، بارندگی (متوسط)، شوری آب آبیاری (کم) و عمق توسعه ریشه‌ها (کم) است. مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی میزان حساسیت مدل SWAP



شکل ۲- مقادیر ضریب حساسیت برای برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP

استوارت (۲۰۰۰) نیز گزارش کردند که مجموع ماده خشک یا قسمتی از گیاه که ارزش اقتصادی دارد، با ET رابطه خطی دارد.

کارآیی مصرف

برای تعیین بهترین تیمار کم‌آبیاری در شرایط کمبود آب، از شاخص کارآیی مصرف آب استفاده می‌شود. برای محاسبه کارآیی مصرف آب (WUE) عملکرد در واحد سطح بر مجموع آب آبیاری و بارندگی تقسیم شد. شاخص کارآیی مصرف آب می‌تواند برای تعیین بهترین تیمار کم‌آبیاری شاخص مناسبی باشد. به علت آن که بارندگی در میزان محصول در حالت آبیاری و دیم بسیار تأثیرگذار است، میزان آن در محاسبه WUE وارد شد (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵). این شاخص برای مقادیر واقعی و همچنین برای مقادیر پیش‌بینی شده محاسبه شده است (جدول ۷). مقدار جذب آب توسط گیاه بر اساس محاسبه اجزای بیلان آب در پروفیل خاک به دست آمده است.

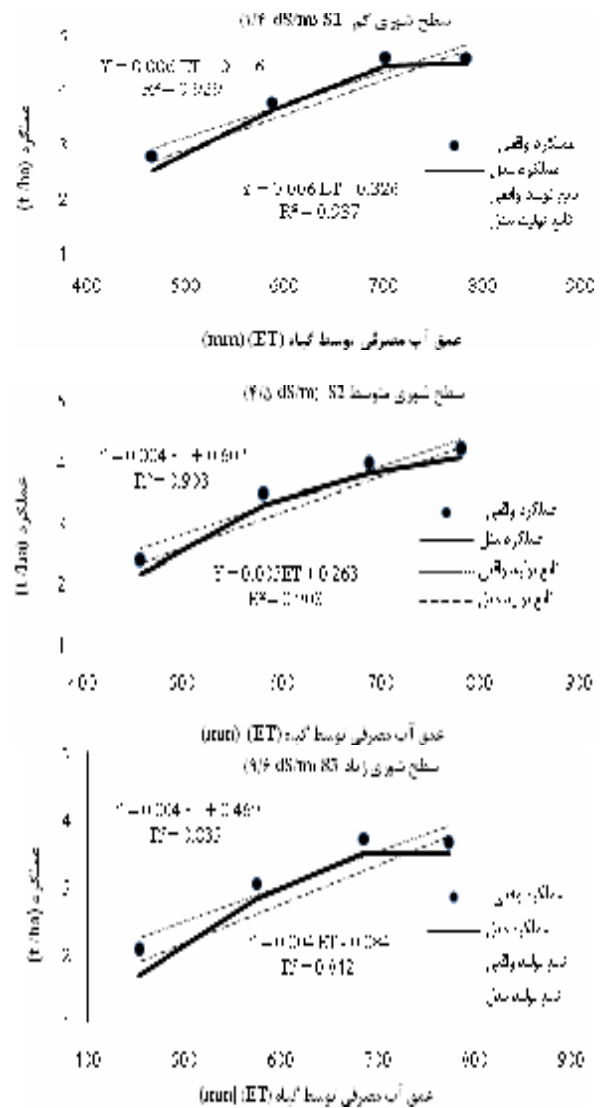
بررسی توابع تولید گندم در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴

برای بررسی اثر میزان آبیاری بر عملکرد دانه تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبی، تابع تولید نسبت به میزان آب مصرفی توسط گیاه (ET) در سطوح مختلف شوری به صورت مجزا و برای مدل تعیین شد (شکل ۳). مقدار جذب آب به وسیله گیاه بر اساس محاسبه اجزای بیلان آب در نیمرخ خاک محاسبه شد. مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل با نتایج واقعی که از سال زراعی ۸۵-۸۴ به دست آمده بود، نشان می‌دهد که مدل کاهش عملکرد حاصل از اعمال کم آبیاری و شوری را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند که این تفاوت از نظر آماری در تیمارهای با آب آبیاری شور (S_3) در سطح ۹۹٪ ($P < 0/01$) معنی‌دار است.

نتایج نشان می‌دهد تابع رگرسیون خطی حاصل از متوسط داده‌های سه تکرار بین عملکرد دانه و ET در سطوح شوری S_2 ، S_1 و S_3 همبستگی بالایی وجود دارد. تحقیقات سایر محققین نیز نشان می‌دهد که عملکرد گیاه با مقدار ET در طی فصل رشد همبستگی معقولی دارد (گاجری و پری‌هار، ۱۹۸۳). هاگان و

گندم روشن (S_1I_1) (با میانگین ۲۷۶۵ کیلوگرم در هکتار) ۳۹/۷ درصد، در تیمار تحت تنش شوری و بدون تنش آبی (S_3I_3) (با میانگین ۳۷۱۶ کیلوگرم در هکتار) ۱۹/۱ درصد و در تیماری که تحت دو تنش قرار دارد (S_3I_1) (با میانگین ۲۶۰۷ کیلوگرم در هکتار) ۴۳/۲۲ درصد کاهش داشته است. این نتیجه با مطالعات محققین بسیاری سازگاری دارد که از جمله آنان می‌توان به مطالعات همایی و همکاران (۲۰۰۲ a,b,c) و کیانی و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد.

حداکثر راندمان مصرف آب در بین تیمارهای مختلف همواره مربوط به تیمار I_2 (یعنی ۷۵ درصد نیاز گیاه) است که در این بین، تیمار S_1I_2 دارای بیشترین راندمان مصرف آب ۶/۷۸ کیلوگرم در هکتار در میلی‌متر است و چون تیمار I_2 یک تیمار کم آبی محسوب می‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کارایی مصرف آب در تیمارهای کم آبیاری (با سطح آبیاری ۷۵ درصد) بیشتر از تیمارهایی است که عمق آب کاربردی در آنها بیشتر است. بنابراین، در مناطقی که کمبود منابع آب مطرح است، منطقی است که به جای تأمین ۱۰۰ درصد نیاز گیاه، ۷۵ درصد آن تأمین شود و از ۲۵ درصد اضافی در زمین‌هایی استفاده شود که تحت تنش‌های شدید آبی هستند. به این طریق، کارایی کل مصرف آب در سطح بهینه می‌شود. کیانی و همکاران (۲۰۰۵)، پاراساد و همکاران (۲۰۰۰) و گورانتیوار (۲۰۰۵) نیز در تحقیقات خود بر روی گندم، پنبه و ذرت گزارش کردند که می‌توان با کاهش آب مصرفی گیاه در شرایط کم آبی تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، میزان کارایی مصرف آب را به میزان ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش داد.



شکل ۳- نمودار توابع تولید گندم نسبت به عمق آب مصرفی برای مدل و شرایط مزرعه در سطوح شوری مختلف

مقادیر پیش‌بینی شده WUE به‌وسیله مدل SWAP با مقادیر واقعی بسیار مشابه است. مدل مشابه مقادیر واقعی بیشترین WUE را در تیمار آبیاری معادل ۷۵٪ نیاز آبی و شوری ۱/۴ دسی زیمنس بر متر (حداقل شوری) نشان می‌دهد. تخمین مدل در برآورد عملکرد و WUE برای اکثر تیمارها کمتر از نتایج واقعی بوده است که باید به این موضوع در تحقیقات توجه کرد.

این نتایج نشان می‌دهد که وجود هر دو تنش آبی و شوری در محیط به‌دلیل اثر هم‌افزایی هر یک در کاهش انرژی آزاد آب، در جذب آب به‌وسیله گیاه اختلال بیشتری ایجاد می‌کند که در نهایت عملکرد را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهند. به‌عنوان مثال، میزان عملکرد در تیمار تحت تنش آبی و بدون تنش شوری

جدول ۷- مقادیر عملکرد و WUE برای گندم روشن و برای مدل در ۳ سطح شوری

اندازه گیری شده		مجموع آبیاری و مصرف گیاه		تیمارهای آبیاری	مصرف گیاه (mm)	بارندگی (mm)	شوری آب آبیاری
عملکرد (kg/ha)	WUE (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	عملکرد (kg/ha)	WUE (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)				
۵/۸۵	۲۵۲۱	۶/۴۱	۲۷۶۵	I ₁ (۵۰٪ نیاز آبی)	۴۶۶	۴۳۱	S1 (۱/۶ dS/m)
۶/۵۰	۳۶۲۵	۶/۷۸	۳۷۷۷	I ₂ (۷۵٪ نیاز آبی)	۵۸۷	۵۵۷	
۶/۴۷	۴۴۵۰	۶/۷۱	۴۵۸۶	I ₃ (آبیاری کامل)	۷۰۳	۶۸۳	
۵/۵۵	۴۴۹۰	۵/۷۸	۴۵۹۲	I ₄ (۱۲۵٪ نیاز آبی)	۷۸۵	۸۰۹	
۵/۰۳	۲۱۶۷	۵/۵۷	۲۴۰۱	I ₁	۴۵۸	۴۳۱	S2 (۴/۵ dS/m)
۵/۹۴	۳۳۱۰	۶/۲۸	۳۵۰۰	I ₂	۵۸۲	۵۵۷	
۵/۵۸	۳۸۱۴	۵/۸۱	۳۹۷۵	I ₃	۶۸۸	۶۸۳	
۵/۰۵	۴۰۸۶	۵/۲۲	۴۲۲۲	I ₄	۷۸۱	۸۰۹	
۳/۹۳	۱۶۹۵	۴/۷۹	۲۶۰۷	I ₁	۴۵۳	۴۳۱	S3 (۹/۶ dS/m)
۵/۰۸	۲۸۲۹	۵/۴۸	۳۰۵۵	I ₂	۵۷۵	۵۵۷	
۵/۱۲	۳۴۹۹	۵/۴۴	۳۷۱۶	I ₃	۶۸۶	۶۸۳	
۴/۲۹	۳۴۷۶	۴/۵۰	۳۶۴۲	I ₄	۷۷۴	۸۰۹	

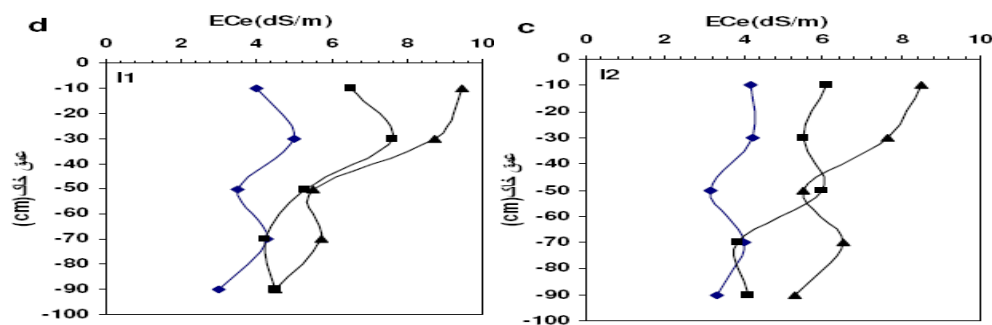
فوقانی کنترل می‌شود. در این مدل پارامتر E_{MAX} با توجه به اینکه این روابط در این مدل با معادله ون‌گنوختن تعریف می‌شوند، نتایج مدل متأثر از پارامترهای این معادله به‌خصوص $\alpha.n$ ، K_s هستند.

عملکرد شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف شوری

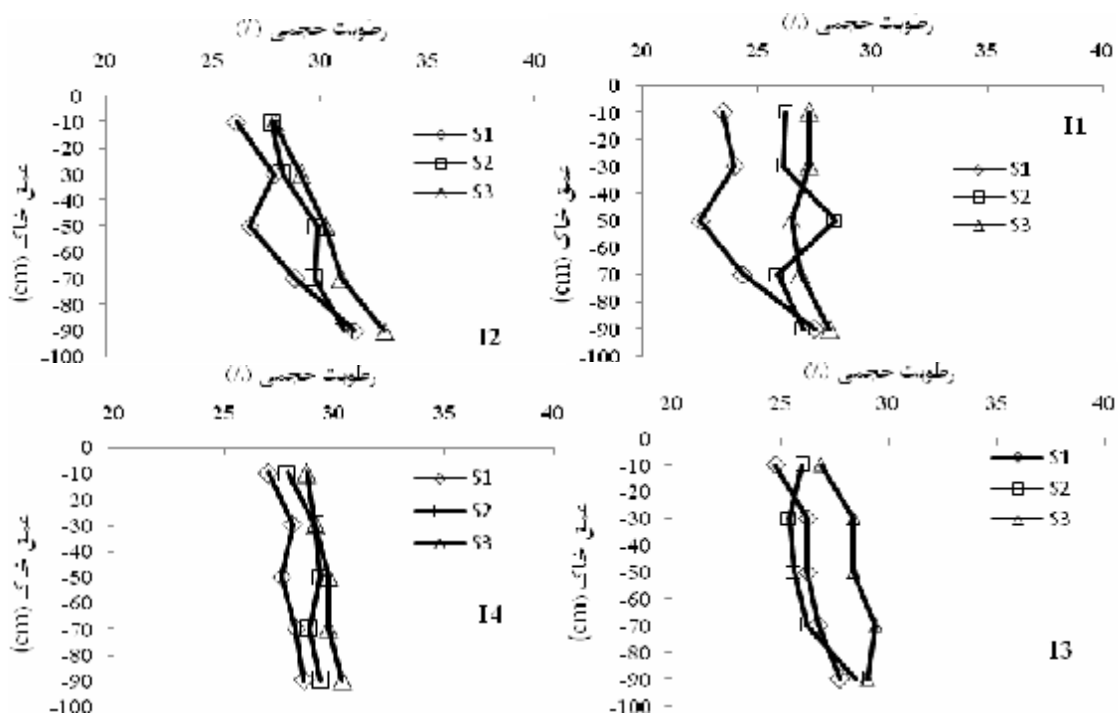
برای بررسی چگونگی توزیع شوری و رطوبت در پروفیل خاک، از میانگین فصلی شوری و رطوبت در تیمارهای مختلف استفاده شد (شکل‌های ۴ و ۵). توزیع شوری و رطوبت در پروفیل خاک در تیمارهای آبیاری کامل (I_3 و I_4) و پر آبیاری یکنواخت‌تر از تیمارهای تحت تنش آبی (I_1 و I_2) است. چون با افزایش آب آبیاری، میزان نفوذ عمقی افزایش یافته و توزیع شوری و رطوبت یکنواخت‌تر می‌شود. حداکثر غیر یکنواختی در تیمارهای تنش آبی و شوری مشاهده می‌شود.

عملکرد شبیه‌سازی شده در عمق‌های مختلف آبیاری

مقایسه عملکردهای به‌دست آمده از مدل و عملکردهای اندازه‌گیری شده در مزرعه نشان داد که روند کلی تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده در عمق‌های مختلف آبیاری و در سطوح مختلف شوری بر روند تغییرات عملکرد واقعی به‌طور کامل مطابقت دارد. در منحنی مقدار آب مصرفی- عملکرد به‌دست آمده از مدل (شکل ۳)، با افزایش عمق آبیاری اختلاف بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده بیشتر می‌شود که این تفاوت از نظر آماری در تیمارهای با آب شور (S_3) در سطح که از لحاظ آماری در سطح ۱٪ ($P < 0.01$) معنی‌دار است. عدم انطباق نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی ممکن است به‌این دلیل باشد که مدل تنها نسبت به پارامترهای گیاهی واسنجی شد و پارامترهای مشخصات خاک در فرآیند واسنجی در نظر گرفته نشدند. درحالی‌که در مدل SWAP تا زمانی که خاک مرطوب است، فلاکس تبخیر واقعی خاک (E)، تحت تأثیر تقاضای اتمسفریک و برابر تبخیر پتانسیل است. اما در شرایط خشک، به‌وسیله حداکثر فلاکس آب خاک (E_{MAX}) در لایه

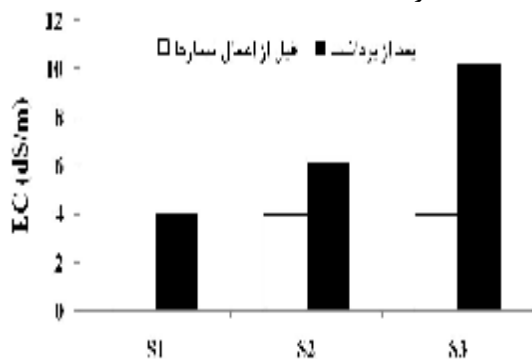


شکل ۴- میانگین فصلی شوری در پروفیل خاک در تیمارهای I₁, I₂, I₃



شکل ۵- میانگین فصلی رطوبت حجمی در پروفیل خاک در تیمارهای I₁, I₂, I₃, I₄

شوری کم (S₁) خفیف تر و در تیمار های با شوری بالا (S₂) و (S₃) شدیدتر است.

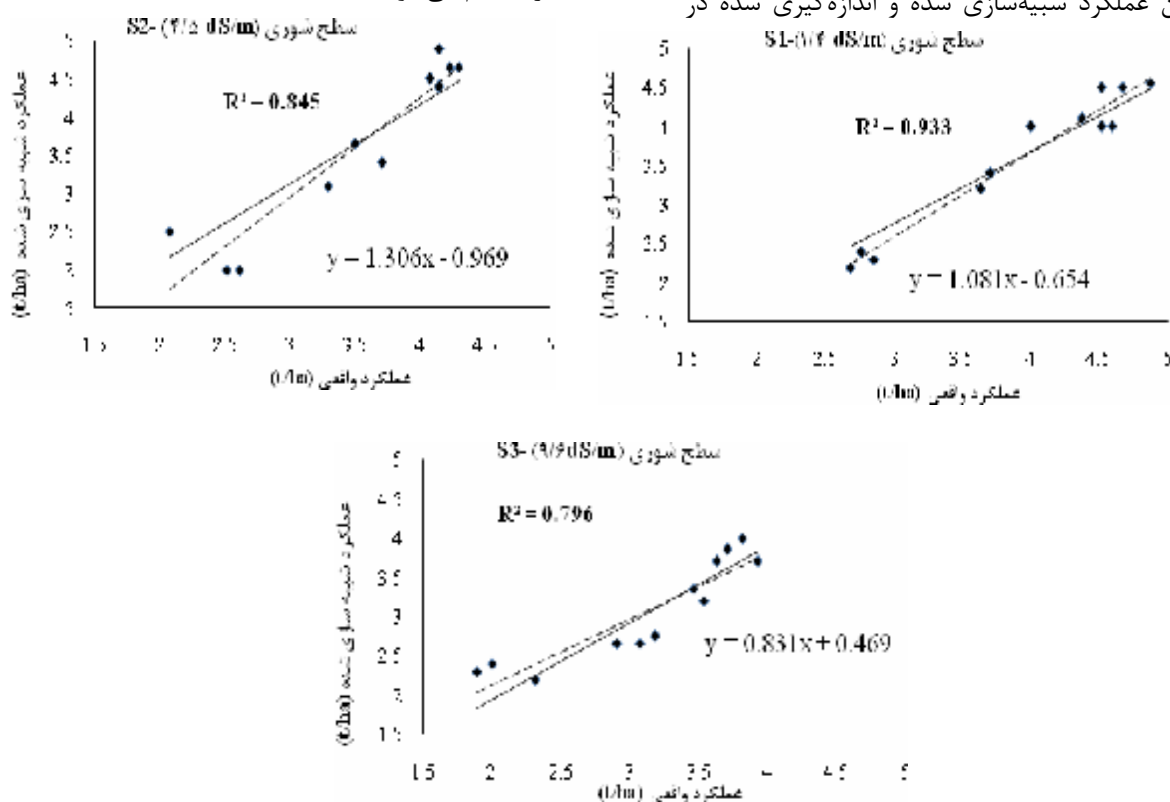


شکل ۶- تغییرات شوری خاک در عمق ۰ تا ۴۰ سانتی متری

بررسی تیمارها نشان می دهد که در تیمارهای با عمق آبیاری یکسان، هرچه شوری آب آبیاری افزایش یابد، درصد رطوبت حجمی نیز افزایش می یابد. این اختلاف جزئی ناشی از این است که در شرایط واقعی، هرچه شوری خاک بیشتر شود، گیاه آب کمتری جذب خواهد کرد، بنابراین در شرایط شور رطوبت بیشتری در خاک باقی می ماند.

نتایج همچنین نشان می دهد که توزیع شوری در پروفیل خاک همچنین مشاهده می شود با افزایش شوری خاک شوری عصاره اشباع خاک به خصوص در لایه سطحی خاک افزایش داشته است. مقایسه شوری در پروفیل خاک در ابتدا و انتهای فصل (شکل ۶) حاکی از روند صعودی شوری در پروفیل خاک است که این روند صعودی در تیمارهای با

سطوح مختلف شوری (شکل ۷) محاسبه شد که همگی از لحاظ آماری در سطح ۱٪ معنی‌دار هستند ($P < 0.01$). همچنین بر اساس آزمون آماری F (اسنیدیکور و همکاران، ۱۹۶۷) علیرغم این که اختلاف شیب رگرسیون خطی برازش داده شده ($y=ax+b$) در سطوح شوری مختلف با شیب خط ۱:۱ از نظر آماری ناچیز است، اما اختلاف عرض از مبدا خط رگرسیونی ($y=ax+b$) با صفر معنی‌دار است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اعمال تیمارهای شوری باعث کاهش ضریب تعیین و در نتیجه کاهش دقت مدل در برآورد عملکرد گندم می‌شود.



شکل ۷ - نتایج صحت‌یابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد در سطوح شوری مختلف

همکاران، ۱۳۸۵) نشان می‌دهد که مدل‌های ضرب‌پذیر بنیان فیزیکی نداشته و نمی‌تواند بین اجزای انرژی آب در خاک و اثر هر یک تمایز قائل شود. شهیدی (۱۳۸۷) با ارزیابی مدل‌های مختلف جذب آب توسط ریشه در منطقه بیرجند در شرایط توام شوری و خشکی نشان دادند که داده‌های خروجی حاصل از تابع جذب همایی (۱۹۹۹) تطابق بیشتری نسبت به مدل ضرب‌پذیر در مقایسه با اندازه‌گیری‌های واقعی دارند. احتمالاً همین عامل باعث می‌شود که مدل در شرایط تنش توأم شوری و خشکی از دقت کمتری برخوردار باشد.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، الگوی توزیع عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده از تغییرات عمق آب آبیاری، توزیع شوری خاک و شوری آب آبیاری تبعیت می‌کند، به طوری که در عمق آبیاری معین، با تغییر شوری آب آبیاری، عملکرد تغییر می‌کند. علیزاده (۱۳۸۳) و زمانی و همکاران (۱۳۸۳) نیز در تحقیقات خود عنوان کردند، شوری بیشتر از ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر باعث کاهش عملکرد گندم می‌شود.

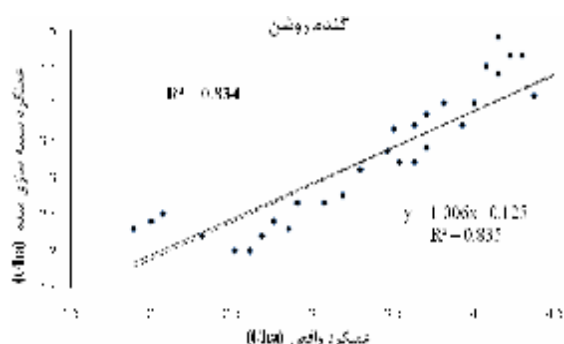
برای بررسی تأثیر شوری در برآورد عملکرد گندم، ضریب تعیین بین عملکرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در

عواملی که در مدل باعث کاهش عملکرد می‌شود تنش خشکی و تنش شوری است. مدل SWAP کاهش عملکرد ناشی از تنش خشکی و تنش شوری را بر اساس شکل ضرب‌پذیر معادله جذب (پیشنهاد شده توسط ون گنوختن، ۱۹۷۸) در نظر می‌گیرد.

$$S_a(z) = \alpha_{rw} \alpha_{rs} S_p(z) \quad (10)$$

که در آن $S_a(z)$ و $S_p(z)$ فلاکس واقعی و پتانسیل جذب آب توسط ریشه ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{S}^{-1}$)، $\alpha_{rs}(-)$ و $\alpha_{rw}(-)$ به ترتیب توابع کاهش بخاطر تنش‌های خشکی و شوری می‌باشد. مطالعات مختلف (همایی و همکاران، ۲۰۰۲، کیانی و

مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. مقدار CRM برای گندم روشن ۰/۰۲۸۷ است که نشانگر این مطلب است که مدل در مجموع عملکرد گندم روشن را کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند. ستون ۸ و ۹ جدول ۵ نشان می‌دهد میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده برای گندم روشن کمتر از مقدار عملکرد واقعی می‌باشد که همان‌طور که قبلاً اشاره شد، از نظر آماری معنی‌دار نیست.



شکل ۸ - عملکرد اندازه‌گیری شده در برابر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری مدل‌های رایانه‌ای برای بررسی اثرات دراز مدت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری، مستلزم واسنجی مدل نسبت به پارامترهای مؤثر بر خروجی‌های مدل و ارزیابی آن با نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای است. استفاده از این پارامترها باید متناسب با شرایط خاص اقلیمی زراعی منطقه صورت پذیرد تا نتایج حاصله منطقی و قابل توجیه باشند. نتایج این بررسی نشان داد که خروجی‌های مدل SWAP نسبت به پارامتر ورودی مقدار آب آبیاری حساسیت بالایی دارند. درجات حساسیت پایین‌تر به ترتیب مربوط به پارامترهای تشعشع خورشیدی، شاخص سطح برگ، درجه حرارت حداکثر، مشخصات هیدرولیکی لایه سطحی خاک، بارندگی، شوری آب آبیاری و عمق توسعه ریشه‌ها است.

عملکرد شبیه‌سازی شده همانند عملکرد اندازه‌گیری شده در مقادیر مختلف شوری آب آبیاری و شوری خاک نشان داد که شوری آب و خاک بیشتر از ۵/۵ دسی‌زیمنس، عملکرد گیاه گندم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و عملکرد تنها تحت تأثیر مقدار آب آبیاری نیست. مدل SWAP بعد از واسنجی برای

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی عملکرد

برای ارزیابی قابل اعتماد بودن نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل از شاخص‌های آماری لازم برای مقایسه با مقادیر واقعی مزرعه‌ای استفاده شد. نتایج این آنالیزها در جدول ۸ ارائه شده است. نسبت پراکندگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به وسیله مدل SWAP (شکل ۸) نشان می‌دهد مقادیر R^2 برای رقم روشن ۰/۸۳۴ است که از لحاظ آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار است ($P < 0/01$). ارزیابی مدل با آزمون مقایسه میانگین t-test تفاوت معنی‌داری را بین عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی نشان نداد. همچنین آزمون آماری F نشان داد اختلاف شیب رگرسیون خطی برازش داده شده ($y=ax+b$) با شیب خط ۱:۱ از نظر آماری ناچیز است، اما اختلاف عرض از مبدا خط رگرسیونی ($y=ax+b$) با صفر معنی‌دار است. در مجموع می‌توان گفت با توجه به مقدار ضریب تعیین ۰/۸۳۴ $R^2=$ بین عملکرد اندازه‌گیری شده در برابر عملکرد شبیه‌سازی شده در مقیاس مزرعه‌ای مدل از تطابق مطلوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در منطقه برخوردار است. در این رابطه اکبری (۱۳۸۳) و مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۰۸) مقدار ضریب تعیین را برای گیاه گندم در منطقه اصفهان به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۶۸ به دست آوردند.

جدول ۸ - مقدار شاخص‌های آماری برای تعیین قابل اعتماد بودن

مدل برای گندم					
ME (t/ha)	NRMSE	EF	CRM	\bar{Y}_0 (kg/ha)	\bar{Y}_s (kg/ha)
۰/۷۵۲	۱۰/۴۶	۰/۷۸۴	۰/۰۲۸۷	۳۵۱۹	۳۴۱۸

همان‌گونه که در جدول ۸ مشخص است مقدار NRMSE، ۱۰/۴۶ است که نشان می‌دهد عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل به‌طور متوسط ۱۰ درصد با عملکرد اندازه‌گیری شده گندم در مقادیر مختلف آب آبیاری اختلاف دارد. مقدار شاخص EF بیانگر کارایی مدل در امر شبیه‌سازی است که مقدار آن برای گندم روشن ۰/۷۸۴، نزدیک به عدد یک که بهترین حالت ممکن است، به دست آمد که نشان می‌دهد مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد گندم در مقیاس مزرعه‌ای از کارایی مطلوبی برخوردار است. شاخص ضریب باقیمانده (CRM) نشان‌گر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد یا کمتر از حد در

۷- محمدی ج. ۱۳۷۰. مقایسه دو روش آبشویی در خاکهای شور و قلیا در اصفهان. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

- 8- Bessembinder J.J.E. Leffelaar P.A. Dhindwal A.S. and Ponsioen T.C. 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agric. Water Manage.* 73(2): 113-130.
- 9- Doorenbos J. and Kassam A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper No.33.* FAO. Rome.
- 10- Qureshi S.A Madroomootoo C.A. and Dodds G.T. 2002. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in sindh, Pakistan, using SWAP93. *Agric. Water Manag.* 54: 97-48.
- 11- Gajeri P.R. and Prihar S.S. 1983. Effect of small irrigation amounts on the yield of wheat. *Agric. Water Manag.* 6:31-41.
- 12- Gorantiwar S.D. and Smout I.K. 2005. Multilevel approach for optimizing land and water resources and irrigation deliveries for tertiary units in large irrigation schemes. II: Application, *J.of Irrig. and Drain. Eng. ASCE* 131(3):264-278.
- 13- Hagan R.M. and Stewart J.I. 1973. Water deficit irrigation design and programming. *J. of Irrigation and Drainage. ASCE.* 98(2):215-237.
- 14- Homae M. Dirksen C. and Feddes R.A. 2002a. Simulation of root water uptake. I. nonuniform transient salinity stress using different macroscopic reduction functions. *Agr. Water Manag.* 57(2):89-109.
- 15- Homae M. Feddes R.A. and Dirksen C. 2002b. Simulation of root and water uptake, II. Non-uniform transient water stress using different macroscopic reduction function. *Agric. Water Manag.* 57:111-126.
- 16- Homae M. Feddes R.A. and Dirksen C. 2002c. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *SSAJ.* 66:1764-1772.
- 17- Homae M. Feddes R.A. and Dirksen C. 2002d. Simulation of root and water uptake. III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. *Agric. Water Manag.* 57:127-144.
- 18- Huygen J. Van Dam J.C. and Krose J.G. 2000. Introduction to SwapGui, the Swap2.0 graphical user interface. Unpublished manual. DLO-Staring Centre and Wageningen Agricultural University. 98p. Record No: H23829.
- 19- Kiani A. Asadi M.E. Homae M and Mirlatifi M. 2005. Wheat production function under salinity and water stress conditions, MTERM International Conference. Asian Institute of Technology. Thailand.

شرایط استان خراسان جنوبی با وجود اختلاف ۱۰ درصدی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد محصول ($NRMSE=10$)، توانست روند کلی تغییرات عملکرد در مقادیر مختلف آب آبیاری و شوری آب و خاک را با قابلیت بالایی برآورد کند. از نتایج آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAP نتیجه می‌گیریم که این مدل برای برآورد عملکرد گندم در منطقه خراسان جنوبی و در شرایط توأم شوری و کم آبی و در مقیاس مزرعه‌ای کارآیی نسبتاً مطلوبی دارد. پیش‌بینی می‌شود اگر مدل برای شرایط خاک منطقه و انتقال آب و املاح در مزرعه نیز کالیبره شود، بتواند با دقت بیشتری عملکرد محصول را در مدیریت‌های مختلف آبیاری شبیه‌سازی کند.

منابع

- ۱- اکبری م. ۱۳۸۳. بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP. پایان‌نامه دکتری آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- خانی‌قریه‌گپی م. داوری ک. علیزاده ا. هاشمی‌نیا م. و ذولفقاران ا. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. *مجله آبیاری و زهکشی.* ۱(۲):۱۱۷-۱۰۷.
- ۳- زمانی غ.ر. ۱۳۸۳. مطالعه جنبه‌های اکوفیزیولوژیکی رقابت یولاف وحشی با گندم تحت تنش شوری. پایان‌نامه دکتری زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۴- شهیدی ع. ۱۳۸۷. اثر برهم‌کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب- شوری در منطقه بیرجند. پایان‌نامه دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- علیزاده ا. ۱۳۸۳. رابطه آب، خاک، گیاه. دانشگاه امام رضا (ع). چاپ چهارم.
- ۶- کیانی ا. ۱۳۸۴. بررسی اثر روش‌های کم آبیاری بر میزان تولید محصول گندم و نقش آن در مدیریت منابع آب در مناطق بیابانی بیرجند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

- 20- Lu H.F. Genard M. Guichard S and Bertin N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to Carbon and water fluxes, *Journal of Experimental Botany*. 58(13):3567-3580.
- 21- Mostafazadeh-Fard B. Mansouri H. Mousavi S.F and Feizi M. 2008. Application of SWAP model to predict yield and soil salinity for sustainable agriculture in an arid region. *International Journal of Sustainable Development and Planning* 3(4):334-342.
- 22- Parra M.A. and Romero G.C. 1980. On the dependence of salt tolerance of baens on soil water matric potential. *Plant and Soil*.56:3-16.
- 23- Prasad A. S. Umamahesh N.V and Viswanath G.K. 2000. Optimal irrigation planning under water scarcity, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 132:3(228).
- 24- Sepaskhah A.R and Boersma L. 1979. Shoot and root growth exposed to several levels of matric potential and NaCl induced osmotic potential of soil water. *Agronomy Journal*. 71:746-752.
- 25- Singh R. Van Dam J.C. and Feddes R.A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district India *J. Agric.Water Manag.* 82: 253-278.
- 26- Snedecor G.W. and Cochran W.G. 1967. *Statistical methods* (6th Ed.). Ames. IA. The Iowa State University Press.
- 27- Van Dam J.C. Huygen J. Wesseling J.G. Feddes R.A. Kabat P. V. Van Walsum P.E. Groenendijk P. and Van Diepen C.A. 1997. *Theory of SWAP version 2.0*. The Netherlands: Wageningen Agricultural University. Report 71; 167p.
- 28- VanGenuchten M.Th. and Yates S.R. 1991. The RETC code for quatifying the hydraulic functions unsaturated soils. *US Environmental Protection Agency*, pp: 85.
- 29- VanGenuchten M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, *Research Report*, U. S. Salinity Lab. Riverside, C.A.
- 30- Vazifedoust M. 2007. Development of an agricultural drought assessment system, Integration of crop and soil modeling remote sensing and geographical information. *Phd Dissertation*. Wageningen Agricultural University.