

مقاله علمی-پژوهشی

فراتر از اقلیم: بازتعریف ردپای آب ذرت از طریق انتخاب رقم در طیف اقلیمی ایران

سیدرضا امیری^{۱*}، افشین سلطانی^۲

چکیده

بحران آب در ایران، به ویژه در بخش کشاورزی به عنوان بزرگترین مصرف کننده، نیازمند بازنگری بنیادین در الگوهای مصرف و حرکت به سوی مدیریت هوشمند تقاضا است. با وجود مطالعات ارزشمند منطقه‌ای، نبود یک تحلیل جامع و مقایسه‌ای در مقیاس ملی که بتواند ناهمگونی‌های گسترده زراعی-اقلیمی کشور را در نظر بگیرد، یک شکاف دانش کلیدی محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به ارزیابی زمانی-مکانی ردپای آب سبز و آبی ذرت دانه‌ای در ۲۳ منطقه کلیدی کشاورزی ایران می‌پردازد. در این تحقیق، از مدل شبیه‌سازی مبتنی بر فرآیند SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد، عملکرد و بیلان آب ذرت استفاده شد و ۲۷۶۰ سناریو بر اساس ترکیبی از ۲۳ منطقه، داده‌های اقلیمی ۳۰ ساله و چهار رقم اجرا گردید. نتایج، یک طیف هیدرو-اقلیمی قدرتمند را در سراسر ایران آشکار ساخت که از وابستگی مطلق به آبیاری در جنوب گرم و خشک (ردپای آب آبی بیش از ۷۰۰ متر مکعب بر تن) تا سهم قابل توجه ۳۷٪ آب سبز در مناطق سرد و نیمه‌خشک شمالی امتداد دارد. یافته کلیدی پژوهش نشان داد که این الگوی اقلیمی می‌تواند توسط تصمیمات مدیریتی مختل شود؛ به طوری که انتخاب یک رقم نامتناسب در سرپل ذهاب، منجر به افزایش ۵۴٪ ردپای آب آبی در مقایسه با منطقه کرج (با اقلیم مشابه) گردید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که سیاست‌های یک نسخه برای همه در مدیریت آب کشاورزی ایران ناکارآمد است و بهینه‌سازی مصرف آب نیازمند گذار به رویکردهای دقیق و منطقه‌ای است. تدوین اطلس‌های راهنمای کشت هوشمند-اقلیمی به عنوان یک راهبرد کلیدی برای افزایش بهره‌وری آب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، مدل‌سازی محصولات زراعی، مدیریت آب

مقدمه

بحران جهانی آب شیرین، بخش کشاورزی را به عنوان بزرگترین مصرف کننده (با سهمی حدود ۹۲٪ از کل مصرف جهانی) در کانون توجه قرار داده است (Hoekstra et al., 2012). این چالش، پایداری کشاورزی و امنیت غذایی را که از ارکان کلیدی اهداف توسعه پایدار سازمان ملل هستند، به طور جدی تهدید می‌کند (Feng et al., 2021). این فشار در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، که ایران نیز در آن قرار دارد، به مراتب شدیدتر است. دهه‌ها سیاست‌گذاری مبتنی بر گسترش سطح زیر کشت و خودکفایی، بدون توجه به محدودیت‌های ذاتی منابع آب، منجر به تخلیه شدید آبخوان‌های زیرزمینی، خشک شدن تالاب‌ها و رودخانه‌ها و تخریب گسترده اکولوژیکی شده است. این شرایط، یک بازنگری علمی و بنیادین در

الگوهای مصرف آب کشاورزی و حرکت به سمت مدیریت هوشمند تقاضا را الزامی می‌سازد (پیری و مبارکی، ۱۴۰۰).

در این راستا، مفهوم ردپای آب، که بر پایه مفهوم آب مجازی توسعه یافت، به عنوان یک ابزار تحلیلی حیاتی برای درک و مدیریت ابعاد مختلف مصرف آب در کشاورزی ظهور کرده است (Demir and Muratoglu, 2025). تمایز میان ردپای آب آبی، یعنی حجم آب مصرفی از منابع آبیاری (رودخانه‌ها و آبخوان‌ها)، و ردپای آب سبز، یعنی حجم آب باران مصرف شده توسط گیاه، برای برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار اهمیت حیاتی دارد. در حالی که آب سبز یک منبع تجدیدپذیر است، اتکا به آب آبی اغلب به معنای فشار بر اکوسیستم‌های حساس، هزینه‌های اقتصادی بالاتر و بهره‌برداری از منابعی است که با سرعتی بیش از ظرفیت تجدید خود مصرف می‌شوند.

مطالعات اولیه عمدتاً بر مقیاس‌های جهانی و ملی متمرکز بودند، اما این ارزیابی‌های کلان اغلب ناهمگونی‌های عظیم زراعی-اقلیمی درون کشوری را نادیده می‌گیرند. نمونه بارز این ناهمگونی را می‌توان در مطالعات موردی مانند پژوهش عارفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) در

^۱ دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، ایران

^۲ استاد دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

دشت جیرفت مشاهده کرد. آنها نشان دادند که در این دشت فراخشک، منابع آب آبی (۱۴۱۳ میلیون متر مکعب) بیش از ۱۰۰ برابر منابع آب سبز (۱۱ میلیون متر مکعب) است و ردپای آب آبی، بخش غالب ردپای آب کل را تشکیل می‌دهد. این مطالعه همچنین یک تناقض کلیدی را آشکار ساخت، علی‌رغم قرار داشتن در وضعیت تنش آبی بالا و فقر آبی، این منطقه به دلیل تنوع کشت، خودکفا و حتی صادرکننده خالص آب مجازی است که این امر فشار بر منابع آب محلی را تشدید می‌کند (عارفی زاده و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین، پژوهش نظری و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از مدل AquaCrop به ارزیابی ردپای آب ذرت در استان قزوین پرداخته و نشان داده‌اند که بین بهره‌وری آب و شرایط اقلیمی مناطق مختلف استان تفاوت معناداری وجود دارد و ردپای آب آبی رابطه معکوس و معناداری با عملکرد محصول دارد (نظری و همکاران ۲۰۲۲). به همین ترتیب، تحقیق اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۳) در دشت سیستان، وابستگی شدید کشاورزی این منطقه به منابع آب آبی را کمی‌سازی کرد و نشان داد که ردپای آب آبی به تنهایی نزدیک به ۷۰٪ از کل ردپای آب کشاورزی را تشکیل می‌دهد. در همین راستا، مطالعه نقوی و بنی‌اسدی (۱۴۰۲) در سه استان خراسان رضوی، کرمان و اصفهان به یک یافته مشترک و مهم دست یافت. در تمام این مناطق، سهم ردپای آب آبی به مراتب بیشتر از ردپای آب سبز و خاکستری بوده و کشاورزی وابستگی شدیدی به آبیاری مستقیم دارد (نقوی و بنی‌اسدی، ۱۴۰۲). این مطالعات ارزشمند، تصویری نگران‌کننده از وضعیت مدیریت آب در نقاط مختلف کشور ارائه می‌دهند.

این مطالعات ارزشمند، ضمن روشن ساختن ابعاد بحران، عمدتاً بر توصیف و کمی‌سازی ردپای آب در سیستم‌های زراعی موجود متمرکز بوده‌اند. با این حال، مطالعات به طور فزاینده‌ای به نقش فعال مدیریت به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی و کاهش ردپای آب اشاره دارد. راهکارهایی چون افزایش بهره‌وری آبیاری، بهینه‌سازی تاریخ کاشت و به ویژه انتخاب ارقام پرمحصول و سازگار به عنوان استراتژی‌های کلیدی شناخته می‌شوند (Chukalla et al., 2015). به عنوان مثال، پژوهش Deihimfard et al., 2022 در ایران نشان داد که ردپای آب گندم بین سیستم‌های دیم و آبی و همچنین بین ارقام مختلف (بهاره و زمستانه) تفاوت معناداری دارد و این امر پتانسیل مدیریت

سیستماتیک برای کاهش مصرف آب را برجسته می‌سازد. با این وجود، اکثر مطالعات یا بر روی یک محصول خاص در یک منطقه محدود تمرکز کرده‌اند یا اثر یک عامل مدیریتی را بدون در نظر گرفتن تعامل پیچیده آن با تنوع گسترده اقلیمی بررسی نموده‌اند. شکاف دانش اصلی در تأثیر انتخاب رقم به عنوان یک تصمیم مدیریتی ساده و قابل دسترس برای کشاورز نهفته است و اینکه تا چه اندازه رقم می‌تواند الگوی کلان و دیکته‌شده توسط اقلیم را در مقیاس ملی بازتعریف یا حتی مختل کند.

با این حال، مطالعات به طور همزمان یک شکاف دانش کلیدی یعنی نبود یک تحلیل جامع و مقایسه‌ای در مقیاس ملی را برجسته می‌سازند. از طرف دیگر، آیا غلبه شدید آب آبی که در سیستان، جیرفت، کرمان و اصفهان مشاهده می‌شود، یک الگوی فراگیر در تمام مناطق خشک ایران است؟ محرک‌های اصلی اقلیمی (کمبود بارش در مقابل تقاضای تبخیری بالا) چگونه در طیف اقلیمی کشور از شمال غرب تا جنوب شرق تغییر می‌کنند؟ پاسخ به این سوالات برای تدوین سیاست‌های ملی امنیت غذایی و تخصیص بهینه آب، حیاتی است و از طریق مطالعات موردی منفرد قابل دستیابی نیست. بنابراین این مطالعه با هدف فراتر رفتن از تحلیل‌های موردی و ساختن یک تصویر ملی یکپارچه، و با بهره‌گیری از یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر فرآیند، یک تحلیل زمانی-مکانی دقیق از ردپای آب سبز و آبی ذرت یک محصول استراتژیک با نیاز آبی بالا در ۲۳ منطقه کلیدی کشاورزی ایران انجام می‌دهد. این پژوهش به طور مشخص، مقدار و ترکیب ردپای آب را در یک طیف اقلیمی گسترده کمی‌سازی و مقایسه کرده، به واکاوی محرک‌های اصلی اقلیمی (بارش، دما، کسری فشار بخار) حاکم بر دینامیک و نسبت بین ردپای آب سبز و آبی می‌پردازد. ناهمگونی‌های اقلیمی ایران، از مناطق سرد و نیمه‌خشک شمال غربی تا مناطق گرم و خشک جنوبی، تحت تأثیر متغیرهای کلیدی مانند درجه روز رشد و شاخص خشکی سالانه قرار دارند که تأثیر مستقیم بر نیاز آبی گیاه، دینامیک تبخیر و تعرق، و نسبت آب سبز به آبی در مناطق مختلف دارند. هدف نهایی از این تحلیل جامع، ارائه بینش‌های مبتنی بر شواهد برای تدوین سیاست‌های مدیریت آب دقیق اقلیمی و منطقه‌ای است.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

این پژوهش با هدف ارزیابی ردپای آب سبز و آبی ذرت دانه‌ای در مناطق مختلف ایران انجام شد. برای اطمینان از قابلیت مقایسه نتایج و انتخاب مناطق نماینده، از چارچوب و پروتکل شناخته‌شده اطلس جهانی خلا عملکرد (گیگا) استفاده گردید که در سطح ملی نیز برای اطلس خلا عملکرد و توان تولید گیاهان زراعی مهم در کشور به کار گرفته شده است (Soltani et al., 2020).

این پروتکل، کشور را بر اساس سه متغیر کلیدی درجه روز رشد (GDD)، شاخص خشکی سالانه (AI) و نوسانات دمای فصلی به پهنه‌های اقلیمی همگن تقسیم‌بندی می‌کند. این شاخص‌های اقلیمی، نمای دقیقی از شرایط آگرو-اقلیمی ارائه می‌دهند که بر نیاز آبی و

مناسب بودن مناطق برای کشت ذرت تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، مناطق با درجه روز رشد بالا مانند دزفول و اهواز، نشان‌دهنده نیاز بالای تبخیر و تعرق هستند، در حالی که مقادیر پایین شاخص خشکی سالانه در این مناطق، سهم کم آب سبز و وابستگی بیشتر به منابع آب آبی را نشان می‌دهد. بر این اساس، ۲۳ ایستگاه هواشناسی نماینده از مناطق اصلی تولید ذرت در کشور که طیف کاملی از پهنه‌های اقلیمی کشت این محصول را پوشش می‌دهند، به عنوان مناطق مورد مطالعه انتخاب شدند. این مناطق از زون‌های اقلیمی سرد و نیمه‌خشک در شمال غرب تا زون‌های گرم و خشک در جنوب و مرکز کشور پراکنده هستند. مشخصات دقیق این مناطق و پهنه اقلیمی متناظر با آن‌ها بر اساس پروتکل GYGA در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مناطق مورد مطالعه و مشخصات پهنه اقلیمی آن‌ها بر اساس چارچوب GYGA

ردیف	استان	منطقه مورد مطالعه (ایستگاه نماینده)	کد پهنه اقلیمی نماینده (GYGA-CZ) ^۱
۱	خوزستان	دزفول (صفی‌آباد)	۶۱۰۲
۲	خوزستان	اهواز	۶۱۰۲
۳	کرمانشاه	سرپل ذهاب	۵۱۰۲
۴	ایلام	دهلران	۶۱۰۲
۵	خوزستان	بهبهان	۶۱۰۲
۶	کهگیلویه و بویراحمد	دوگنبدان (گچساران)	۶۱۰۳
۷	کرمانشاه	کرمانشاه	۴۲۰۲
۸	فارس	چهرم	۵۱۰۳
۹	خوزستان	مسجدسلیمان	۶۱۰۲
۱۰	کرمانشاه	اسلام‌آباد غرب	۴۲۰۲
۱۱	فارس	داراب (حسن‌آباد)	۵۱۰۳
۱۲	فارس	زرقان	۵۱۰۳
۱۳	کرمان	جیرفت	۶۱۰۳
۱۴	هرمزگان	حاجی‌آباد	۶۱۰۳
۱۵	یزد	مروست	۵۱۰۳
۱۶	فارس	شیراز	۵۱۰۳
۱۷	کرمان	کهنوج	۶۱۰۳
۱۸	سیستان و بلوچستان	خاش	۵۱۰۲
۱۹	همدان	نهادوند	۴۲۰۲
۲۰	البرز	کرج	۴۱۰۲
۲۱	آذربایجان غربی	اشنویه	۴۲۰۲
۲۲	کرمان	بم	۶۱۰۳
۲۳	اردبیل	بيله‌سوار	۴۲۰۲

^۱ کد پهنه اقلیمی بر اساس روش GYGA-ED (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸) تعیین شده است که در آن، رقم اول نشان‌دهنده کلاس درجه روز رشد (GDD)، رقم دوم کلاس شاخص خشکی (AI) و رقم چهارم کلاس نوسانات دمای فصلی است. این کدها نماینده شرایط آگروکلیماتیک غالب برای کشت ذرت در هر منطقه هستند.

مدل شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی روزانه رشد، توسعه، بیلان آب و عملکرد نهایی ذرت، از مدل مبتنی بر فرآیند SSM-iCrop2 استفاده شد (Soltani and Sinclair, 2012). این مدل که بر پایه چارچوب مدل‌های شبیه‌سازی ساده (SSM) توسعه یافته است، فرآیندهای کلیدی رشد گیاه را در گام زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌کند. در ادامه، زیرمدل‌های اصلی آن به اختصار تشریح می‌شوند:

فنولوژی گیاه: مراحل نمو گیاه (مانند سبز شدن، گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک) بر اساس تجمع واحدهای گرمایی روزانه (درجه-روز رشد) و با در نظر گرفتن دماهای کاردینال (پایه، بهینه و سقف) برای هر مرحله پیش‌بینی می‌شود.

توسعه سطح برگ و تولید ماده خشک: توسعه شاخص سطح برگ (LAI) به عنوان تابعی از واحدهای دمایی تجمعی شبیه‌سازی شده و در شرایط کمبود آب، توسعه آن کاهش می‌یابد. تولید ماده خشک روزانه بر پایه مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) جذب شده توسط کانوپی گیاه و ضریبی به نام کارایی مصرف تشعشع (RUE) محاسبه می‌گردد. مقدار RUE خود تحت تأثیر تنش‌های محیطی مانند دمای نامساعد و کمبود آب تعدیل می‌شود. تخصیص ماده خشک و تشکیل عملکرد: عملکرد نهایی دانه از طریق مفهوم «افزایش خطی شاخص برداشت (HI)» در طی دوره پر شدن دانه تخمین زده می‌شود. در این فرآیند، بخشی از ماده خشک تولیدی روزانه به دانه‌ها تخصیص یافته و همچنین امکان انتقال مجدد ماده خشک ذخیره شده در اندام‌های رویشی به دانه‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود.

بیلان آب خاک و تعرق گیاه: مدل بیلان آب خاک را در دو لایه سطحی و ناحیه توسعه ریشه به صورت روزانه محاسبه می‌کند. این محاسبات شامل ورودی‌ها (بارش و آبیاری) و خروجی‌ها (تبخیر از سطح خاک، تعرق گیاه، رواناب و نفوذ عمقی) است. یک ویژگی مهم مدل SSM-iCrop2، محاسبه تعرق گیاه بر اساس ارتباط مستقیم آن با تولید ماده خشک و از طریق ضریب کارایی تعرق (TEC) است. این رویکرد، مصرف آب گیاه را به صورت تنگاتنگ به فرآیندهای رشدی آن پیوند می‌دهد. این مدل به دلیل نیاز به ورودی‌های محدود و در دسترس و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی گسترده برای بیش از ۳۰ گونه زراعی در شرایط ایران (Soltani et al., 2020)، ابزاری

قدرتمند و مناسب برای ارزیابی‌های منطقه‌ای مانند این پژوهش محسوب می‌شود.

طراحی آزمایش شبیه‌سازی و داده‌های ورودی

برای ارزیابی اثرات متقابل اقلیم، سال و مدیریت بر رد پای آب ذرت، شبیه‌سازی‌ها به صورت زیر اجرا شد:

مکان: ۲۳ منطقه منتخب که به عنوان ایستگاه‌های هواشناسی مرجع بر اساس پروتکل GYGA انتخاب شده‌اند (جدول ۱). این مناطق نماینده پهنه‌های اقلیمی اصلی تولید ذرت در کشور هستند. سال: داده‌های اقلیمی ۳۰ سال از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲ بود. انتخاب پایگاه داده NASA-POWER به دلیل فراهم آوردن یک مجموعه داده کامل، یکپارچه و بدون خلاء برای یک دوره بلندمدت در تمام مناطق مورد مطالعه صورت گرفت؛ مزیتی که دستیابی به آن از طریق داده‌های ایستگاه‌های زمینی به دلیل پراکندگی ناهمگون و وجود داده‌های گمشده، اغلب دشوار است. اعتبار و دقت این پایگاه داده برای شرایط ایران در مطالعات متعددی ارزیابی و تأیید شده است. به عنوان مثال، پژوهش‌های (Kheyruri and Sharafati, 2022; Kheyruri et al., 2024) نشان داده‌اند که داده‌های دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشیدی از این منبع، همبستگی بسیار بالا و خطای قابل قبول RMSE پایین در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک کشور دارند. هرچند داده‌های بارش آن ممکن است عدم قطعیت بیشتری داشته باشند، اما برای شبیه‌سازی‌های منطقه‌ای و تحلیل طیف‌های اقلیمی، به عنوان یک منبع داده استاندارد و پذیرفته‌شده در جامعه علمی شناخته می‌شوند. بنابراین، این منبع داده ابزاری قابل اعتماد برای اهداف این پژوهش، یعنی ارزیابی مقایسه‌ای و تحلیل الگوهای مکانی-زمانی رد پای آب در مقیاس ملی، محسوب می‌شود.

رقم زراعی: در این پژوهش، به جای استفاده از نام‌های تجاری ارقام خاص، از چهار گروه رسیدگی نماینده شامل زودرس، متوسط‌درس، دیررس و خیلی‌دیررس استفاده شد. این رویکرد برای یک تحلیل در مقیاس ملی انتخاب گردید تا نتایج از قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری برخوردار باشند. در مدل شبیه‌سازی، هر یک از این گروه‌ها توسط مجموعه‌ای از ضرایب ژنتیکی تعریف می‌شوند که تفاوت اصلی آن‌ها در نیاز حرارتی تجمعی (بر حسب درجه-روز رشد)

محاسبه شده، نمایانگر نیاز آبی پتانسیل محصول تحت شرایط اقلیمی هر منطقه است.

تغذیه (نیترژن): با توجه به اینکه مدل SSM-iCrop2 برای شبیه سازی در شرایط پتانسیل و محدودیت آب طراحی شده و دینامیک نیترژن را شبیه سازی نمی کند (Soltani et al., 2020)، فرض شد که نیترژن و سایر عناصر غذایی به میزان کافی در دسترس گیاه قرار داشته و عامل محدودکننده رشد نیستند. این یک فرض استاندارد در مطالعات ارزیابی پتانسیل تولید و ردپای آب در مقیاس بزرگ است. تاریخ کاشت و تراکم بوته: برای هر یک از ۲۳ منطقه مورد مطالعه، یک تاریخ کاشت بهینه و یک تراکم بوته استاندارد بر اساس توصیه های زراعی رایج و بهینه برای آن منطقه در مدل تعریف شد. نکته کلیدی این است که این دو پارامتر مدیریتی (تاریخ کاشت و تراکم) برای تمام چهار گروه رسیدگی (رقم) در یک منطقه مشخص، یکسان در نظر گرفته شدند. این تصمیم روش شناختی برای آن بود که اثر خالص تفاوت های ژنتیکی بین ارقام (مانند نیاز حرارتی متفاوت) بر ردپای آب، بدون تأثیرپذیری از تغییرات همزمان در سایر عوامل مدیریتی، ارزیابی شود.

شرایط اولیه خاک: در ابتدای هر فصل شبیه سازی (اولین روز سال)، فرض شد که میزان رطوبت اولیه در پروفیل خاک معادل ۷۵٪ ظرفیت زراعی است تا شرایط اولیه برای تمام سال های شبیه سازی یکسان باشد. با ترکیب این عوامل، مجموعاً ۲۷۶۰ سناریوی شبیه سازی (۲۳ مکان $\times$ ۳۰ سال $\times$ ۴ رقم) اجرا و خروجی های مربوط به عملکرد و بیلان آب برای تحلیل های بعدی ذخیره گردید.

محاسبه ردپای آب

برای تفکیک دقیق مصرف آب کل محصول (تبخیر-تعرق) به دو مؤلفه سبز و آبی، از یک روش حسابداری مبتنی بر بیلان آب روزانه خاک، مطابق با اصول ارائه شده توسط Hoekstra (۲۰۱۹)، استفاده شد. از آنجایی که مدل شبیه سازی، تبخیر-تعرق کل را به صورت یکپارچه محاسبه می کند، تفکیک آن به منابع آب (باران یا آبیاری) نیازمند ردیابی روزانه ترکیب آب موجود در خاک است. این فرآیند به صورت زیر انجام شد:

۱. راه اندازی اولیه: در ابتدای فصل رشد، ترکیب آب سبز و آبی موجود در پروفیل خاک بر اساس شرایط اولیه مدل تعیین شد.

برای رسیدن به مراحل کلیدی فنولوژیکی (گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیکی) است. این پارامترها بر اساس مقادیر گزارش شده در منابع علمی و کاتالوگ های ارقام رایج در ایران تنظیم شدند تا نماینده رفتار چهار گروه اصلی ذرت کشت شده در کشور باشند. لازم به ذکر است که مدل SSM-iCrop2 که در این پژوهش استفاده شد، پیش از این به صورت گسترده برای ذرت در شرایط ایران واسنجی و اعتبارسنجی شده است (Soltani et al., 2020) و از دقت بالایی در شبیه سازی عملکرد و بیلان آب برخوردار است. بنابراین، هدف این مطالعه استفاده از این مدل معتبر برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی بود و نه واسنجی مجدد پارامترهای ژنتیکی.

خاک: برای هر یک از مناطق مورد مطالعه، داده های مربوط به بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس) از پایگاه داده جهانی خاک HC27 استخراج گردید (Koo and Dimes, 2013). از آنجایی که مدل شبیه سازی SSM-iCrop2 برای محاسبات بیلان آب روزانه خود به پارامترهای هیدرولیکی خاک مانند ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم نیاز دارد، این پارامترها با استفاده از توابع انتقالی پدو (Pedo-Transfer Functions - PTFs) از روی داده های بافت خاک تخمین زده شدند. این رویکرد، یعنی استفاده از PTFs برای استخراج پارامترهای مورد نیاز مدل های شبیه سازی از پایگاه داده HC27، پیش از این برای شرایط ایران ارزیابی و اعتبار آن تأیید شده است (Nehbandani et al., 2020).

مدیریت زراعی و مفروضات شبیه سازی

هدف این پژوهش، ارزیابی ردپای آب پتانسیل و ایزوله کردن اثر خالص عوامل اقلیمی و ژنتیکی (انتخاب رقم) بود. برای دستیابی به این هدف، مجموعه ای از مفروضات مدیریتی استاندارد و بهینه در تمام سناریوها به کار گرفته شد تا سایر عوامل محدودکننده رشد حذف شوند:

آبیاری: برای تمام سناریوها، شرایط آبیاری بهینه و بدون محدودیت فرض شد. در مدل، این استراتژی به این صورت پیاده سازی گردید که هرگاه رطوبت قابل استفاده در ناحیه ریشه به کمتر از ۵۰٪ کاهش می یافت، آبیاری به صورت خودکار تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی انجام می شد. این رویکرد تضمین می کند که گیاه هرگز دچار تنش آبی نمی شود و مقادیر تبخیر-تعرق و ردپای آب

۲. محاسبه روزانه بیلان آب: برای هر روز از فصل رشد، بیلان آب سبز و آبی به صورت جداگانه به روزرسانی گردید:

ورودی‌ها: حجم بارش مؤثر روزانه به موجودی آب سبز خاک اضافه شد و حجم آب آبیاری اعمال شده در آن روز به موجودی "آب آبی" خاک افزوده گردید.

محاسبه نسبت‌ها: بر اساس موجودی جدید، نسبت آب سبز (f_{green}) و آب آبی (f_{blue}) در کل آب قابل دسترس گیاه در منطقه ریشه محاسبه شد.

تفکیک خروجی‌ها: مقدار کل تبخیر-تعرق روزانه (ET_{daily}) که توسط مدل SSM-iCrop2 شبیه‌سازی شده بود، بر اساس این نسبت‌ها به دو بخش تفکیک گردید (معادلات ۱ و ۲):

$$ET_{green_daily} = ET_{daily} * f_{green} \quad (۱)$$

$$ET_{blue_daily} = ET_{daily} * f_{blue} \quad (۲)$$

۳. **تجمیع فصلی: مجموع مقادیر**
روزانه ET_{blue_daily} و ET_{green_daily} در طول کل فصل رشد، به ترتیب مصرف آب سبز (CWU_{green}) و مصرف آب آبی (CWU_{blue}) محصول را بر حسب متر مکعب بر هکتار به دست داد.

در نهایت، ردپای آب سبز (WFg) و آبی (Wfb) بر حسب متر مکعب بر تن، با استفاده از فرمول‌های ۳ و ۴ استاندارد زیر محاسبه شدند (Hoekstra, 2019):

$$Wfb \text{ (m}^3\text{/ton)} = CWU_{blue} / Y \quad (۳)$$

$$WFg \text{ (m}^3\text{/ton)} = CWU_{green} / Y \quad (۴)$$

که در آن:

CWU_{green} (مصرف آب سبز): حجم کل آب باران است که در طول فصل رشد توسط محصول مصرف شده است (متر مکعب بر هکتار).

CWU_{blue} (مصرف آب آبی): حجم کل آب آبیاری است که در طول فصل رشد توسط محصول مصرف شده است (متر مکعب بر هکتار).
 Y (عملکرد محصول): وزن محصول اقتصادی برداشت شده (دانه ذرت) در هر هکتار است (تن بر هکتار).

لازم به توضیح است که این پژوهش بر ردپای آب مصرفی، متشکل از اجزای سبز و آبی، تمرکز دارد. این رویکرد، حجم آبی را که

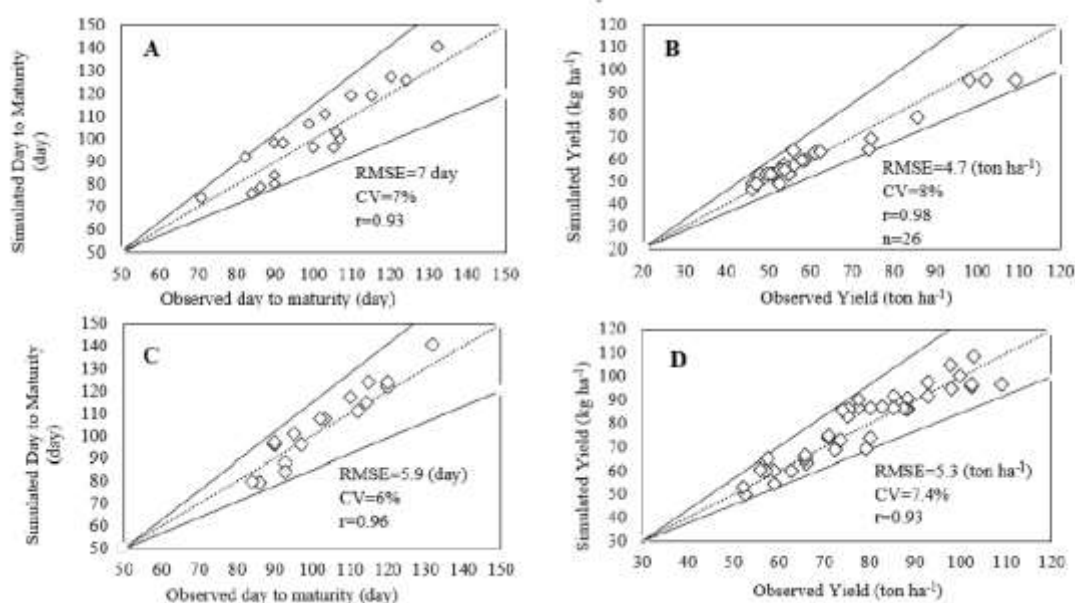
مستقیماً توسط محصول مصرف شده و از منابع آب در دسترس خارج می‌شود، کمی‌سازی می‌کند. مؤلفه ردپای آب خاکستری، که به حجم آب مورد نیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها (عمدتاً نترات حاصل از کودهای نیتروژنی) تا حد استانداردهای کیفی اشاره دارد، به دلیل محدودیت‌های مدل شبیه‌سازی مورد استفاده (عدم شبیه‌سازی دینامیک نیتروژن و آبشویی آن) و تمرکز هدف مطالعه بر بهینه‌سازی مصرف مستقیم آب، محاسبه نگردید. همچنین، سایر مؤلفه‌های بیلان آب مانند نفوذ عمقی و رواناب سطحی، اگرچه توسط مدل به صورت روزانه محاسبه می‌شوند، اما طبق تعریف استاندارد (Hoekstra et al., 2019)، بخشی از ردپای آب مصرفی محصول نیستند و به عنوان جریان‌های بازگشتی در نظر گرفته می‌شوند. نهایتاً، تمامی نمودارها و شکل‌های این مقاله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R (نسخه ۴.۴.۰) و بسته ggplot2 که بخشی از مجموعه tidyverse است، ترسیم و آماده‌سازی شده‌اند.

نتایج و بحث

ارزیابی و قابلیت اطمینان مدل شبیه‌سازی

قابلیت اطمینان نتایج یک مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی، مستقیماً به دقت و اعتبار مدل مورد استفاده بستگی دارد. مدل SSM-iCrop2 که در این پژوهش به کار گرفته شد، پیش از این به صورت گسترده برای شرایط ایران ارزیابی شده است. به طور مشخص، فیاضی و همکاران (۲۰۲۱) در یک مطالعه جامع، این مدل را برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در مناطق مختلف ایران پارامتریابی و ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی آن‌ها که با استفاده از داده‌های مستقل میدانی از سراسر کشور انجام شد، دقت بسیار بالایی مدل را نشان می‌دهد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، همبستگی بسیار قوی ($r=0.93$) بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده عملکرد وجود دارد و نقاط به خوبی در اطراف خط ۱:۱ پراکنده شده‌اند. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز ۵.۳ تن در هکتار (معادل ۷٪ میانگین مشاهدات) بود که نشان‌دهنده خطای پایین و قابلیت پیش‌بینی بالایی مدل است. این ارزیابی اختصاصی برای ذرت در ایران، استحکام علمی ابزار مورد استفاده در این پژوهش را تأیید می‌کند. لازم به تأکید است که هدف این پژوهش، استفاده از این ابزار از پیش ارزیابی‌شده برای یک تحلیل سناریوی گسترده در شرایط

اثبات اعتبار عمومی و قابلیت اطمینان مدل پایه برای ذرت در ایران ارائه شده است.



شکل ۱- مقایسه عملکرد علوفه ذرت شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop2 با مقادیر مشاهده شده در مطالعات میدانی مختلف در سراسر ایران (اقتباس شده فیاضی et al. (۱۴۰۱)). خط ممتد خط ۱:۱ و خطوط نقطه چین انحراف ۲۰٪ را نشان می‌دهند.

این شکاف به وضوح در مقایسه دو سر طیف اقلیمی کشور قابل مشاهده است. در مناطق سرد و نیمه خشک مانند بيله‌سوار، نیاز آبی کل پایین (حدود ۵۴۰ میلی‌متر) و مجموع بارندگی طی فصل رشد بالا (۱۱۱ میلی‌متر)، منجر به کمترین میزان ردپای آب آبی در کل کشور (۲۸۳ متر مکعب بر تن) شده است (جدول ۲). در این مناطق، ردپای آب سبز با مقدار ۱۷۳ متر مکعب بر تن، بیش از ۳۷٪ از کل ردپای آب را تشکیل می‌دهد که نشان‌دهنده پتانسیل بالا برای کشاورزی دیم و آبیاری تکمیلی است. این یافته‌ها با نتایج نظری و همکاران (۱۴۰۱) که نشان دادند مناطق سردتر با تبخیر و تعرق کمتر بهره‌وری آب بیشتری دارند، کاملاً همسو است. در مقابل، در مناطق گرم و خشک مانند دزفول و اهواز، نیاز تبخیری بسیار بالا فراتر از ۱۱۴۰ میلی‌متر و بارش ناچیز (به ترتیب ۴۱ و ۲۵ میلی‌متر)، کشاورزی را به وابستگی تقریباً مطلق به آبیاری سوق می‌دهد. در این مناطق، ردپای آب آبی به ارقام بسیار بالای ۷۴۵ و ۷۱۱ متر مکعب بر تن می‌رسد و به طور میانگین بیش از ۸۳٪ از کل ردپای آب را به خود اختصاص می‌دهد. لازم به ذکر است که این مقادیر، خروجی شبیه‌سازی در شرایط بهینه آبیاری بوده و نمایانگر ردپای آب پتانسیل هستند. اگرچه

پتانسیل (بدون محدودیت آب و نیتروژن) بود، نه ارزیابی مجدد مدل برای هر ترکیب رقم-مکان. بنابراین، شکل ۱ به عنوان سندی برای

طیف اقلیمی و تأثیر آن بر مؤلفه‌های ردپای آب

برای نمایش دقیق تنوع گسترده در سراسر کشور، مقادیر میانگین متغیرهای کلیدی برای تمام ۲۳ منطقه در جدول ۲ آمده است. این داده‌ها وجود یک طیف جغرافیایی قدرتمند را تأیید می‌کنند. این طیف یک دوگانگی هیدرو-اقلیمی آشکار را در الگوی مصرف آب ذرت در ایران به نمایش می‌گذارد. همان‌طور که در این پژوهش نشان داده شد، پهنه‌های اقلیمی که بر اساس درجه روز رشد و شاخص خشکی تعریف شده‌اند، تأثیر قابل توجهی بر مقدار و ترکیب ردپای آب دارند. مناطق با درجه روز رشد بالا (مانند کلاس‌های گرم و بسیار گرم) به دلیل افزایش تبخیر و تعرق، نیاز بیشتری به منابع آب آبی دارند. به طور مشابه، مناطق با شاخص خشکی پایین، سهم کمتری از آب سبز داشته و وابستگی بیشتری به آبیاری نشان می‌دهند. با حرکت از مناطق سرد و نیمه‌خشک شمال غربی به سمت مناطق گرم و خشک جنوبی و مرکزی، یک تغییر بنیادین در کمیت ردپای آب مشاهده می‌شود.

این اعداد الگوها و طیف‌های قدرتمند اقلیمی را به خوبی نشان می‌دهند، اما برای اعتبارسنجی نهایی و تطبیق با مقادیر واقعی در مقیاس مزرعه، نیازمند مطالعات و اندازه‌گیری‌های میدانی تکمیلی می‌باشند. به هر حال این وابستگی شدید، کشاورزی این مناطق را در برابر هرگونه محدودیت در دسترسی به منابع آب آبی به شدت آسیب‌پذیر می‌کند.

جدول ۲- خلاصه‌ی میانگین ردپای آب و متغیرهای اقلیمی کلیدی در ۲۳ منطقه مورد مطالعه

استان	منطقه	اقلیم	رقم	رد پای آب سبز (m ³ /t)	ردپای آب آبی (m ³ /t)	مجموع تبخیر و تعرق (mm)	بارندگی طی فصل رشد (mm)	حداکثر دما (°C)	کمبود فشار بخار (kPa)
خوزستان	دزفول	گرم و خشک	دیررس	۹۳،۳۴	۷۴۴،۵۸	۱۲۲۶،۰۸	۴۱،۵۵	۳۸،۴۰	۳،۵۱
خوزستان	اهواز	گرم و خشک	دیررس	۱۳۰،۵۵	۷۱۰،۹۱	۱۱۴۲،۹۳	۲۴،۶۹	۳۹،۹۴	۳،۶۴
کرمانشاه	سرپل ذهاب	نیمه خشک	خیلی دیررس	۹۳،۹۹	۶۹۰،۹۷	۱۵۱۲،۵۱	۳۹،۷۳	۳۷،۴۹	۳،۳۹
ایلام	دهلران	گرم و خشک	دیررس	۱۴۲،۹۳	۶۷۵،۴۷	۷۸۹،۲۱	۳۸،۴۸	۳۸،۴۳	۲،۹۲
خوزستان	بهبهان	گرم و خشک	دیررس	۱۲۴،۸۲	۶۵۲،۷۹	۱۱۱۰،۹۸	۳۴،۲۰	۳۸،۹۵	۳،۴۰
کهگیلویه	دوگنبدان	گرم و خشک	دیررس	۷۸،۸۶	۶۴۹،۲۲	۱۲۷۹،۱۳	۲۷،۶۸	۳۸،۶۰	۳،۲۸
کرمانشاه	کرمانشاه	نیمه خشک	دیررس	۹۸،۶۷	۶۰۱،۶۵	۱۵۲۱،۷۴	۸۷،۴۵	۳۲،۰۶	۲،۷۲
خوزستان	مسجدسلیمان	گرم و خشک	دیررس	۱۱۰،۴۷	۵۸۹،۸۰	۸۷۴،۵۶	۵۴،۱۰	۳۸،۱۰	۲،۸۹
کرمانشاه	اسلام‌آباد غرب	نیمه خشک	متوسط رس	۱۰۸،۰۳	۵۸۰،۴۲	۱۲۴۹،۱۲	۱۸،۶۹	۳۳،۳۴	۲،۸۴
فارس	داراب	گرم و خشک	خیلی دیررس	۷۳،۷۰	۵۶۵،۹۶	۱۱۶۰،۵۵	۱۱،۸۷	۳۶،۲۵	۲،۸۵
فارس	زرقان	نیمه خشک	دیررس	۹۳،۴۴	۵۶۰،۲۷	۱۲۷۰،۵۱	۲۲،۷۳	۳۲،۶۵	۲،۶۷
کرمان	جیرفت	گرم و خشک	خیلی دیررس	۱۰۹،۶۲	۵۵۱،۱۵	۱۱۰۴،۳۶	۱۶،۷۷	۳۷،۵۴	۲،۹۴
هرمزگان	حاجی‌آباد	گرم و خشک	دیررس	۱۱۳،۶۴	۵۴۵،۹۲	۱۰۹۳،۸۹	۱۷،۷۶	۳۷،۱۹	۳،۰۲
یزد	مرودشت	گرم و خشک	دیررس	۸۷،۱۳	۵۲۱،۱۸	۱۲۴۲،۵۳	۴،۳۴	۳۳،۶۶	۲،۷۰
فارس	شیراز	نیمه خشک	دیررس	۸۹،۱۲	۵۱۵،۰۹	۱۲۲۱،۰۳	۱۰،۹۶	۳۴،۱۶	۲،۷۱
کرمان	کهنوج	گرم و خشک	خیلی دیررس	۱۱۸،۹۶	۵۰۸،۷۶	۹۷۶،۲۷	۲۰،۲۸	۳۷،۳۹	۲،۷۹
فارس	جهرم	گرم و خشک	دیررس	۹۵،۷۳	۵۹۱،۷۷	۱۳۲۸،۷۸	۲۸،۷۹	۳۶،۳۸	۳،۰۵
سیستان	خاش	گرم و خشک	دیررس	۷۰،۲۹	۴۸۳،۱۷	۱۰۷۰،۸۲	۹،۱۸	۳۳،۵۰	۲،۴۷
همدان	نهادوند	نیمه خشک	متوسط رس	۱۱۱،۴۹	۴۷۳،۸۶	۹۷۳،۵۷	۸،۱۴	۳۲،۸۲	۲،۵۳
البرز	کرج	نیمه خشک	دیررس	۷۳،۱۱	۴۴۸،۳۷	۱۰۸۶،۶۹	۳۲،۷۶	۳۱،۶۰	۲،۱۷
آ. غربی	اشنویه	سرد و نیمه خشک	زودرس	۵۶،۲۵	۴۴۷،۱۲	۸۱۲،۸۹	۵۲،۱۷	۲۸،۵۴	۱،۹۶
کرمان	بم	گرم و خشک	دیررس	۱۲۱،۲۰	۳۷۷،۳۸	۷۲۵،۷۶	۴،۶۵	۳۲،۵۲	۲،۰۲
اردبیل	بيله‌سوار	سرد و نیمه خشک	متوسط رس	۱۷۳،۳۰	۲۸۳،۲۱	۵۴۰،۴۶	۱۱۱،۶۱	۲۹،۰۱	۱،۵۹

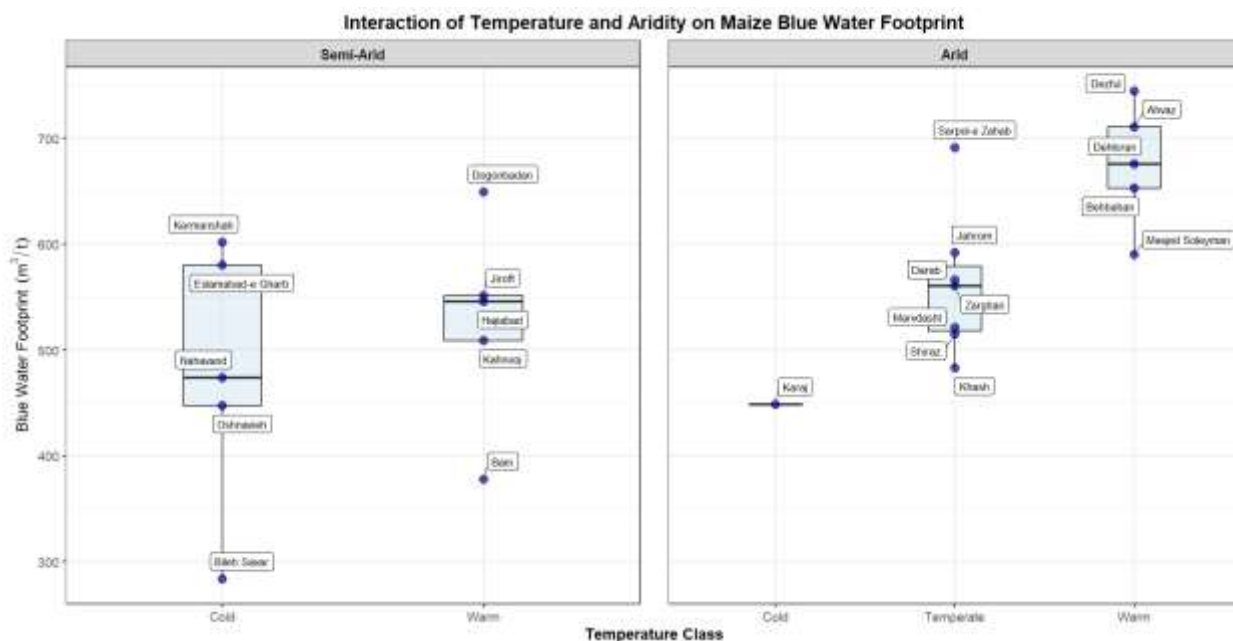
تحلیل برهمکنش اقلیمی: اثر تشدیدکننده خشکی بر تنش دمایی

برای درک عمیق‌تر چگونگی تأثیر اقلیم بر ردپای آب، برهمکنش میان کلاس‌های دمایی و کلاس‌های خشکی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲). این تحلیل، تصویری بسیار دقیق‌تر از اثر مجزای هر عامل ارائه می‌دهد. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که اثر دما به شدت تحت تأثیر سطح خشکی منطقه تعدیل می‌شود. در

مناطق نیمه‌خشک (پنل Semi-Arid)، اگرچه با حرکت از کلاس دمایی سرد به گرم ردپای آب آبی افزایش می‌یابد، اما این افزایش دارای یک شیب نسبتاً ملایم است. این نشان می‌دهد که وجود مقداری بارش مؤثر (آب سبز) در این مناطق، تا حدی اثر منفی افزایش تقاضای تبخیری ناشی از گرما را خنثی کرده و از افزایش نیاز به آب آبیاری جلوگیری می‌کند. در مقابل، در مناطق خشک (پنل Arid)، موضوع کاملاً متفاوت است. در این مناطق که فاقد

بسیار بیشتر از مناطق نیمه‌خشک است. به عبارت دیگر، خشکی به عنوان یک عامل، اثر منفی گرما را تشدید می‌کند. این تحلیل تأیید می‌کند که کد اقلیمی یک منطقه، نه به عنوان دو شاخص مجزا، بلکه به عنوان ترکیبی از شرایط دمایی و رطوبتی، می‌تواند به عنوان یک شاخص پیش‌بینی‌کننده قوی برای میزان وابستگی کشاورزی آن منطقه به منابع آب آبی عمل کند.

منبع قابل توجه آب سبز هستند، هرگونه افزایش در کلاس دمایی، اثر تشدیدشونده و تصاعدی بر ردپای آب آبی دارد. شیب افزایش ردپای آب آبی در این پنل بسیار تندتر است و نشان می‌دهد که در غیاب بارش، دما به تنهایی به نیروی محرکه غالب برای افزایش تقاضای آب تبدیل می‌شود. این برهمکنش، یک یافته کلیدی را آشکار می‌سازد: آسیب‌پذیری کشاورزی در برابر گرمایش، در مناطق خشک



شکل ۲- مقایسه ردپای آب آبی ذرت بر اساس کلاس دمایی (A) و کلاس خشکی (B) مناطق منتخب

می‌کنند. کمبود فشار بخار به عنوان نیروی محرکه اصلی تعرق، مستقیماً فشار بخار بین فضای داخلی مرطوب برگ و هوای خشک بیرون را کنترل می‌کند (Broughton and Conaty, 2022). همانطور که در شکل 3B نشان داده شده، همبستگی مثبت قوی بین کمبود فشار بخار و ردپای آب آبی وجود دارد. این متغیرها حجم مطلق و کلی نیاز آبی گیاه را مشخص می‌کنند. در مناطقی مانند اهواز و بهبهان با کمبود فشار بخار بالای ۳/۴ کیلوپاسکال و مناطقی چون سرپل ذهاب و جیرفت با مقادیر نزدیک به ۳ کیلوپاسکال، نیاز به آب آبی به شدت افزایش می‌یابد. این پدیده شکاف بین تبخیر-تعرق پتانسیل و تبخیر-تعرق واقعی آب سبز را به شدت افزایش می‌دهد؛ شکافی که باید توسط آب آبیاری پر شود تا از افت شدید

نقش‌های دوگانه عوامل اقلیمی

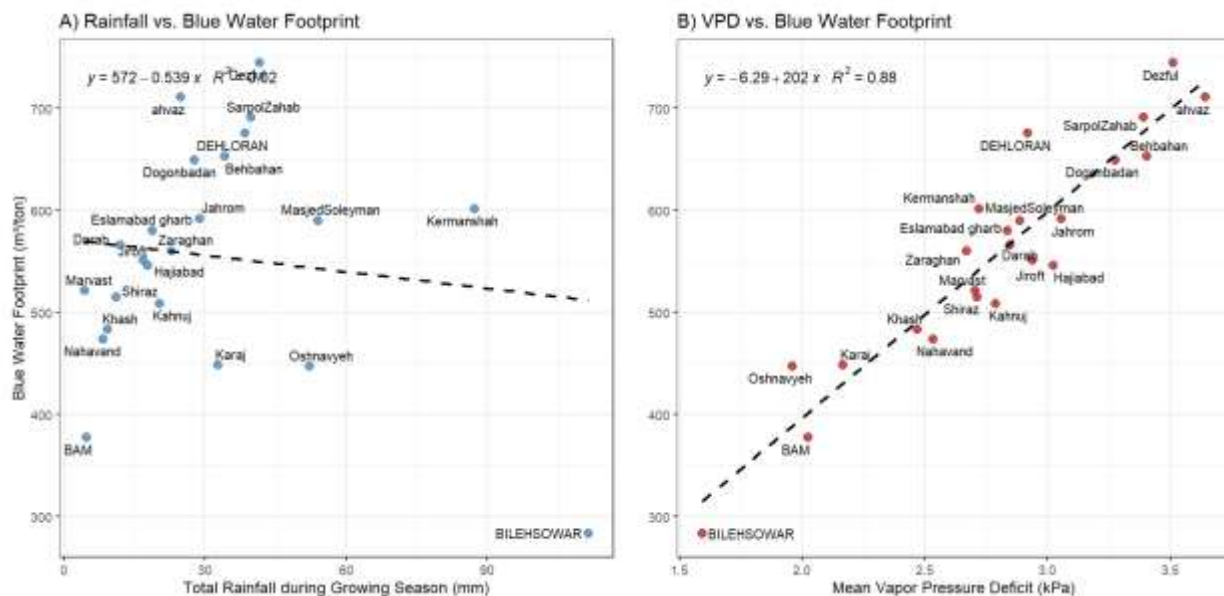
نتایج این پژوهش نقش‌های عملکردی متمایزی را برای متغیرهای اقلیمی اصلی آشکار کرد.

بارش به عنوان عامل تفکیک‌کننده در تمامی مناطق، یک همبستگی منفی بین بارش فصل رشد و ردپای آب آبی مشاهده شد (شکل 3A). بارش مستقیماً منبع آب سبز را تغذیه کرده و با تأمین بخشی از نیاز آبی گیاه، به عنوان جایگزین رایگان برای آب آبیاری عمل می‌کند. بنابراین، بارش نقش تفکیک‌کننده منابع را ایفا کرده و سهم نسبی آب سبز و آبی از کل نیاز گیاه را تعیین می‌کند.

دما و کمبود فشار بخار به عنوان محرک‌های تقاضا: این دو متغیر، عطش اتمسفری و در نتیجه، نیاز آبی کل را تعیین

مطلق ردپای آب آبی مورد نیاز برای جلوگیری از تنش خشکی، خود را نشان می‌دهد

عملکرد جلوگیری گردد (Olivera Rodríguez et al., 2024). این متغیرها به عنوان محرک اصلی تقاضا عمل می‌کنند و در غیاب بارش کافی، تأثیر مستقیم آن‌ها به شکل افزایش مقدار

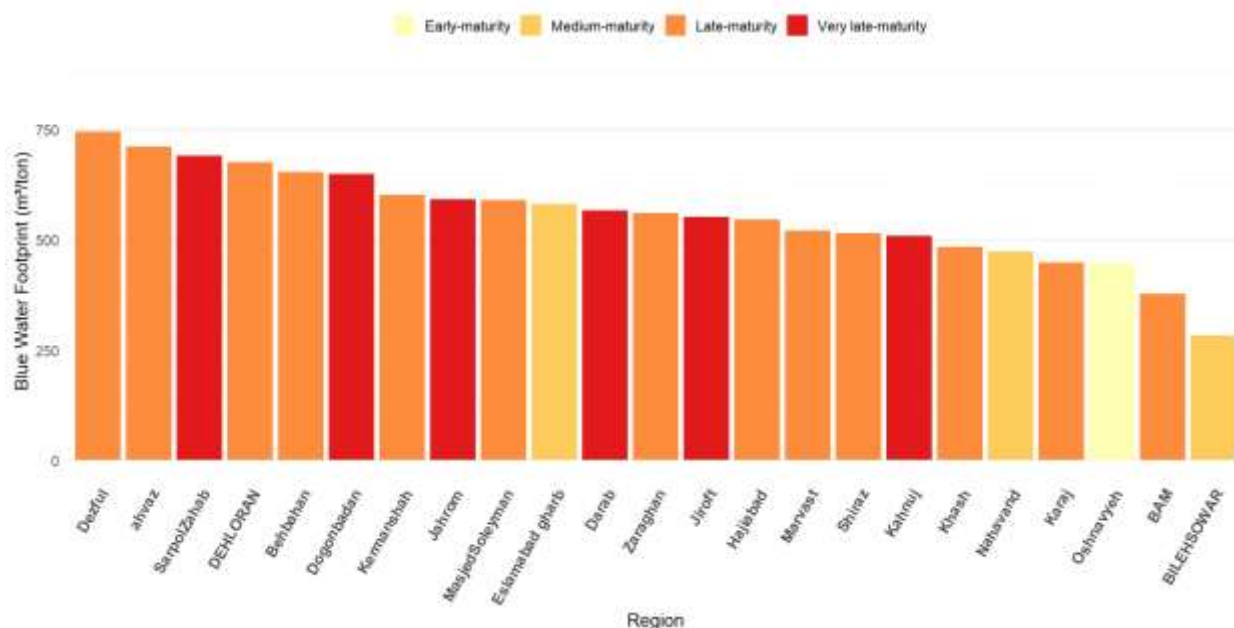


شکل ۳- نمودار ردپای آب آبی در مقابل پراکندگی بارندگی طی فصل رشد (میلیمتر) (A) و کمبود فشار بخار (کیلوپاسکال) (B)

نیست، بلکه یک الگوی تکرارشونده در سایر مناطق با پهنه اقلیمی مشابه است. تحلیل دقیق‌تر نتایج در پهنه اقلیمی نیمه‌خشک این موضوع را به وضوح تأیید می‌کند. در این پهنه، یک طیف واضح در ردپای آب آبی بر اساس انتخاب رقم مشاهده می‌شود. کرمانشاه با انتخاب رقم دیررس، ردپای آب آبی ۶۰۲ متر مکعب بر تن دارد. نه‌اوند با تغییر به رقم متوسط‌رس، این مقدار را به ۴۷۴ متر مکعب بر تن کاهش می‌دهد. اشنویه با انتخاب رقم زودرس، به کمترین میزان ردپای آب آبی در این گروه یعنی ۴۴۷ متر مکعب بر تن دست می‌یابد. این مقایسه نشان می‌دهد که در یک پهنه اقلیمی یکسان، صرفاً با بهینه‌سازی انتخاب رقم از دیررس به زودرس، می‌توان پتانسیل کاهش بیش از ۲۵ درصدی (معادل ۱۵۵ متر مکعب بر تن) در مصرف آب آبی را محقق کرد. بنابراین، یافته کلیدی پژوهش مبنی بر اینکه تصمیمات مدیریتی می‌تواند الگوی غالب اقلیمی را بازتعریف کند، یک نتیجه‌گیری مستحکم و قابل تعمیم است که شواهد آن در چندین منطقه از کشور قابل مشاهده است.

ناسازگاری مدیریتی: اثر تشدیدکننده انتخاب رقم

شکل ۴ با مقایسه ردپای آب ارقام مختلف در مناطق منتخب، این اثر متقابل مکان و رقم را به صورت دقیق‌تری نمایش می‌دهد. تحلیل دقیق‌تر اثر متقابل نشان‌دهنده یک الگوی مدیریتی نگران‌کننده است. در حالی که اقلیم چهارچوب کلی را تعیین می‌کند، تصمیمات مدیریتی، به ویژه انتخاب رقم، نقشی حیاتی در تشدید یا تخفیف فشار بر منابع آبی دارند. بارزترین مثال، مقایسه مناطق درون منطقه نیمه‌خشک است. منطقه سرپل ذهاب با کشت رقم خیلی دیررس، دارای ردپای آب آبی معادل ۶۹۱ متر مکعب بر تن است که این مقدار از بسیاری مناطق گرم و خشک مانند داراب (۵۶۶ متر مکعب بر تن) و جیرفت (۵۵۱ متر مکعب بر تن) نیز بیشتر است و به ردپای آب مناطقی چون اهواز (۷۱۱ متر مکعب بر تن) نزدیک می‌شود (جدول ۲ و شکل ۴). در مقابل، کرج با کشت رقم دیررس، ردپای آب آبی بسیار کمتری (۴۴۸ متر مکعب بر تن) دارد. این ناسازگاری مدیریتی یک مشاهده موردی و محدود به مقایسه سرپل ذهاب و کرج



شکل ۴- اثر متقابل مکان و رقم محصول بر ردپای آب آبی

امر عملاً مزیت اقلیمی نسبی یک منطقه نیمه‌خشک را از بین برده و فشار آبی غیرضروری ایجاد می‌کند. این پدیده به طور مستقیم با مفهوم بنیادی ردپای آب در ارتباط است. ردپای آب تابعی از مصرف آب (متر مکعب) و عملکرد (تن) است. کاهش شدید عملکرد (مخرج کسر) به دلیل تنش آبی، حتی اگر مصرف آب (صورت کسر) ثابت بماند، باعث افزایش تصاعدی ردپای آب خواهد شد. این یافته کاملاً با نتایج Rodríguez et al. (2024) همسو است که در آن، کاهش عملکرد به عنوان عامل اصلی افزایش ردپای آب سبز در شرایط خشک‌تر شناسایی شد. همچنین نظری و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه خود بر روی ذرت دریافتند کاهش عملکرد در ایستگاه بوبین‌زهره تأثیر بسزایی بر افزایش ردپای آب کل محصول داشت.

بنابراین، ناسازگاری مدیریتی که در مطالعه ما شناسایی شد، از طریق مکانیسم کاهش عملکرد (به دلیل تنش گرما و خشکی در مراحل حساس)، منجر به افزایش ردپای آب آبی می‌شود (نظری و همکاران ۱۴۰۱). نکته جالب توجه این است که یافته‌های ما، جنبه دیگری از پیچیدگی‌های مطرح‌شده توسط براوتون و کوناتی را آشکار می‌کند. آن‌ها در مطالعه خود دریافتند که برخی ژنوتیپ‌های پنبه دارای یک ویژگی

این تفاوت بیش از ۲۴۰ واحدی (افزایش ۵۴ درصدی) در نیاز به آب آبیاری در یک منطقه اقلیمی مشابه، به وضوح نشان می‌دهد که انتخاب ارقام با دوره رشد طولانی‌تر در مناطقی که فصل رشد با دوره گرم و خشک تلاقی پیدا می‌کند، یک ناسازگاری مدیریتی است که منجر به اتلاف شدید منابع آب آبی می‌شود. این انتخاب نامناسب باعث می‌شود مراحل فیزیولوژیکی حساس و پرنیاز به آب گیاه، مانند گرده‌افشانی و پر شدن دانه، دقیقاً با اوج گرمای تابستان و حداکثر تقاضای تبخیری اتمسفر همزمان شود. این موضوع اهمیت حیاتی دارد، زیرا همانطور که (Broughton and Conaty, 2022) بیان می‌کنند، گیاه پنبه (که از نظر فیزیولوژیکی شباهت‌هایی به ذرت در پاسخ به تنش دارد) در دوره اوج گلدهی بیشترین حساسیت را به تنش آبی دارد. بنابراین، قرار دادن این دوره حساس در معرض بالاترین کمبود فشار بخار، یک استراتژی پرریسک و ناکارآمد است. این امر یک تنش آبی شدید در دوره بحرانی رشد ایجاد می‌کند. اهمیت این دوره در تحقیقات متعددی تأیید شده است؛ به طوری که عملکرد نهایی محصول تا حدود ۷۰٪ به دسترسی به آب در همین دوره بحرانی بستگی دارد (Rodríguez et al., 2024; Severo Santos and Naval, 2020). بنابراین، تنش آبی ناشی از ناسازگاری مدیریتی، مستقیماً به کاهش شدید عملکرد منجر می‌شود. این

کند. با این حال، باید اذعان دارند که انتخاب رقم تنها یکی از ابزارهای موجود در جعبه‌ابزار مدیریت هوشمند آب است. عوامل مدیریتی حیاتی دیگری همچون بهینه‌سازی تاریخ کاشت (برای فرار از دوره‌های اوج تنش گرمایی و کمبود فشار بخار) و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری (مانند آبیاری قطره‌ای به جای غرقابی) نیز دارای پتانسیل چشمگیری برای کاهش ردپای آب هستند. یافته‌های این پژوهش، با نشان دادن تأثیر شگرف و بیش از ۵۰ درصدی تنها یک عامل (انتخاب رقم)، بر ضرورت یکپارچه‌سازی تمام این راهکارها در قالب بسته‌های مدیریتی هوشمند-اقلیمی برای هر منطقه تأکید می‌کند.

در نهایت شکل ۵ ترکیب ردپای آب را برای مناطق منتخب از هر منطقه نمایش می‌دهد. با حرکت از منطقه سرد و نیمه خشک (بیل‌سوار با ردپای آب کل ۴۵۶ متر مکعب بر تن) به سمت منطقه گرم (داراب با ردپای آب کل ۶۴۰ متر مکعب بر تن)، نه تنها نیاز آبی کل (ارتفاع ستون) افزایش می‌یابد، بلکه سهم آب آبی (بخش آبی) به صورت تصاعدی غالب می‌شود. این تصویر، چالش و البته راه حل مدیریت آب کشاورزی در ایران را به نمایش می‌گذارد.

بنابراین، یافته‌های ما بر یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌شناختی که توسط (Davis et al., 2017) مطرح شده، صحنه می‌گذارد، بسیاری از ارزیابی‌های ردپای آب، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، قادر به لحاظ کردن دقیق شیوه‌های مدیریت کشاورزی مانند زمان آبیاری، نوع آبیاری و انتخاب رقم نیستند و این امر منجر به عدم قطعیت در نتایج می‌شود. مطالعه حاضر با تمرکز بر اثر متقابل رقم و مکان، نشان می‌دهد که این عوامل مدیریتی تا چه حد می‌توانند نتایج را تحت تأثیر قرار دهند و نادیده گرفتن آن‌ها تا چه اندازه می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست از پتانسیل واقعی صرفه‌جویی در آب شود.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادات برای آینده

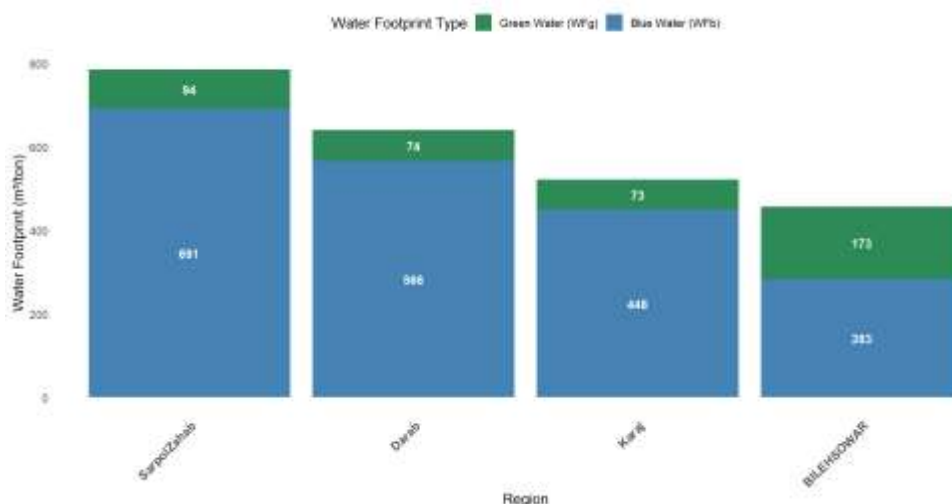
با وجود تلاش برای ارائه یک تحلیل جامع، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که اذعان به آن‌ها برای تفسیر صحیح نتایج ضروری است:

۱. عدم قطعیت در داده‌های ورودی: یکی از محدودیت‌های اصلی، اتکا به پایگاه‌های داده جهانی برای دریافت داده‌های اقلیمی و خاک است.

محدودکننده تعرق هستند که در کمبود فشار بخار بالا برای حفظ آب فعال می‌شود (Broughton and Conaty, 2022). با این حال، آنها به طور متناقضی دریافتند که همین ژنوتیپ‌های محدود کننده تعرق در شرایط کمبود فشار بخار پایین، نرخ تعرق بالاتری دارند که می‌تواند اثر حفاظتی آنها را خنثی کند. ناسازگاری مدیریتی مشاهده‌شده در مطالعه ما، یک سناریوی حتی بدتر را نشان می‌دهد: به جای استفاده از یک ژنوتیپ سازگار، از رقمی استفاده می‌شود که به دلیل طول دوره رشد بلند، مجبور است بدون هیچ مکانیسم دفاعی مؤثری، با حداکثر تقاضای تبخیری روبرو شود و این منجر به افزایش تصاعدی ردپای آب آبی می‌گردد.

علاوه بر این، براوتون و کوناتی نشان دادند که در پنبه، با افزایش کمبود فشار بخار و کاهش دسترسی به آب، ژنوتیپ‌های دارای ویژگی محدود کننده تعرق عملکرد بهتری نسبت به خودشان در شرایط بهتر نشان می‌دهند، اما لزوماً از ژنوتیپ‌هایی با پتانسیل عملکرد بالاتر پیشی نمی‌گیرند (Broughton and Conaty, 2022). این موضوع با یافته‌های ما نیز سازگار است: انتخاب یک رقم نامتناسب (خیلی دیررس در سرپل ذهاب) نه تنها باعث مصرف آب بیشتر می‌شود، بلکه به دلیل تنش شدید، پتانسیل عملکرد آن نیز محقق نشده و در نتیجه ردپای آب به شدت افزایش می‌یابد. این تأیید می‌کند که اثر متقابل بین ژنتیک (انتخاب رقم) و محیط (که توسط مدیریت زمان‌بندی می‌شود) یک عامل تعیین‌کننده و کلیدی در بهره‌وری نهایی آب است. این یافته یک نمونه عملی از اهمیت بهینه‌سازی الگوهای کشت است که به عنوان یکی از مؤثرترین استراتژی‌های کاهش ردپای آب معرفی شده است (Demir and Muratoglu, 2025). مطالعه ما به صورت کمی نشان می‌دهد که چگونه یک انتخاب غیربهینه در الگوی کشت (انتخاب رقم نامتناسب با پنجره اقلیمی) می‌تواند منجر به افزایش شدید ردپای آب شود و این یافته با نتایج مطالعات دیگر از جمله دیویس و همکاران و لیو و همکاران همخوانی دارد (Davis et al., 2017; Liu et al., 2019).

شایان ذکر است که این پژوهش به صورت متمرکز به بررسی انتخاب رقم به عنوان یک اهرم مدیریتی کلیدی پرداخت تا بتواند اثر خالص آن را در تعامل با اقلیم ایزوله و کمی‌سازی



شکل ۵- ردپای آب سبز و آبی در مناطق منتخب

ورودی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی واسنجی و اعتبارسنجی شوند.

۲. فرض آبیاری بهینه: این پژوهش با فرض آبیاری بهینه و نامحدود (تأمین کامل نیاز آبی گیاه در بهترین زمان) انجام شد. این یک فرض روش‌شناختی ضروری برای ایزوله کردن و کمی‌سازی اثر خالص عوامل اقلیمی و انتخاب رقم بر نیاز آبی پتانسیل محصول بود. بنابراین، کاملاً می‌پذیریم که مقادیر ردپای آب آبی محاسبه‌شده، نمایانگر ردپای آب پتانسیل یا حداقل نیاز آبی برای دستیابی به عملکرد بدون تنش است، و نه لزوماً ردپای آب واقعی که در شرایط مزرعه‌ای ایران (با محدودیت‌های آب و مدیریت‌های غیربهینه) رخ می‌دهد. در واقع، این فرض به نتایج ما قدرت بیشتری می‌بخشد؛ اگر در شرایط ایده‌آل، انتخاب یک رقم نامناسب در سرپل ذهاب ردپای آب را ۵۴٪ افزایش می‌دهد، می‌توان انتظار داشت که در شرایط واقعی با مدیریت ضعیف‌تر آبیاری، این ناکارآمدی و اتلاف آب به مراتب شدیدتر باشد. نتایج ما یک خط پایه علمی برای حداقل مصرف آب ممکن ارائه می‌دهند که سیاست‌گذاران می‌توانند شکاف بین این پتانسیل و واقعیت موجود را هدف‌گذاری کنند.

۳. نیاز به اعتبارسنجی میدانی: در راستای نکات فوق، باید اشاره کرد که مقادیر مطلق ردپای آب محاسبه‌شده در این پژوهش با داده‌های اندازه‌گیری‌شده میدانی در مناطق مورد مطالعه مقایسه و اعتبارسنجی نشده‌اند. این اعداد باید به عنوان

داده‌های بارش: هرچند پایگاه داده NASA-POWER به دلیل پوشش کامل و یکپارچگی برای تحلیل‌های مقیاس ملی یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود، اما داده‌های بارش آن ممکن است در مقایسه با داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های زمینی، عدم قطعیت داشته باشند. از آنجایی که محاسبه ردپای آب سبز مستقیماً به حجم بارش مؤثر وابسته است، هرگونه خطا در برآورد بارش می‌تواند بر تفکیک و کمی‌سازی این مؤلفه تأثیر بگذارد.

داده‌های خاک: به طور مشابه، استفاده از پایگاه داده جهانی خاک (HC27) یک انتخاب عملی برای حفظ یکپارچگی و قابلیت مقایسه در ۲۳ منطقه بود، اما این رویکرد، تنوع واقعی و ناهمگونی‌های خاک در مقیاس مزرعه در ایران را ساده‌سازی می‌کند. پارامترهای کلیدی بیلان آب مانند ظرفیت نگهداری آب در خاک، که بر محاسبات تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارند، ممکن است با مقادیر واقعی در هر منطقه تفاوت داشته باشند. توجه و اعتبار نتایج: با وجود این محدودیت‌ها، باید توجه داشت که هدف اصلی این پژوهش، تحلیل طیف‌ها و الگوهای نسبی در سراسر کشور بوده است. طیف هیدرو-اقلیمی مشاهده‌شده (از شمال غرب تا جنوب) و به ویژه یافته کلیدی در مورد تأثیر شگرف انتخاب رقم (مقایسه سرپل ذهاب و کرج)، به قدری قوی هستند که تحت‌الشعاع عدم قطعیت‌های داده‌های ورودی قرار نمی‌گیرند. با این وجود، برای مطالعات آتی در مقیاس‌های محلی، پیشنهاد می‌شود که داده‌های

برآوردهای مبتنی بر مدل تلقی شوند که اگرچه الگوها و روندهای نسبی قدرتمندی را آشکار می‌سازند (که هدف اصلی پژوهش بود)، اما مقادیر دقیق آن‌ها برای هر منطقه نیازمند تأیید از طریق مطالعات میدانی تکمیلی است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با تحلیل جامع داده‌های ۲۳ منطقه کشاورزی در ایران، به صورت کمی و با پشتوانه آماری قوی نشان داد که ردپای آب ذرت، محصول پیچیده‌ای از تعامل میان سه عامل کلیدی اقلیم (مکان)، سال (نوسانات زمانی) و مدیریت (رقم زراعی) است. این موضوع دلالت بر آن دارد که هیچ راهکار واحدی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشت ذرت در سراسر کشور وجود ندارد و سیاست‌گذاری‌ها باید از یک رویکرد کلی به یک رویکرد دقیق، هوشمند اقلیمی و منطقه‌ای تغییر جهت دهند.

منطقه، به عنوان نماینده شرایط اقلیمی بلندمدت، قوی‌ترین عامل تعیین‌کننده در میزان ردپای آب بود. سال زراعی، به عنوان بازتاب‌دهنده نوسانات اقلیمی کوتاه‌مدت، آسیب‌پذیری بالای تولید ذرت نسبت به تغییرات آب و هوایی و ریسک‌های مرتبط با آن را آشکار ساخت. در نهایت، رقم زراعی به عنوان یک عامل مدیریتی مهم، تأثیر بر ردپای آب داشت، اما این تأثیر همواره در تعامل با مکان و سال بود. این مطالعه نشان داد که اقلیم، بسیار تعیین می‌کند؛ تغییرات سالانه، ریسک‌های اجرا را مشخص می‌کند؛ و مدیریت زراعی، نقشی است که کشاورز در این صحنه ایفا می‌کند. انتخاب نادرست رقم می‌تواند حتی در یک منطقه با اقلیم نسبتاً مساعد، فشار بر منابع آب را به سطوح بحرانی برساند. نمونه بارز این موضوع، افزایش بیش از ۵۰ درصدی ردپای آب آبی در سرپل ذهاب (۶۹۱ متر مکعب بر تن) در مقایسه با کرج (۴۴۸ متر مکعب بر تن) است که صرفاً به دلیل انتخاب رقم نامتناسب با اقلیم منطقه رخ داده است.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که برای دستیابی به کشاورزی پایدار، باید از توصیه‌های کلی اجتناب کرد. در پاسخ به این چالش، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که اطلس‌های راهنمای کشت هوشمند-اقلیمی به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری تدوین شوند. این اطلس‌ها صرفاً یک نقشه ثابت نخواهند بود، بلکه پلتفرم‌های دینامیکی هستند که بر پایه مدل‌های شبیه‌سازی (مانند مدل به‌کاررفته در این پژوهش)

عمل می‌کنند و به جای ارائه یک توصیه واحد، سناریوهای مختلف مدیریتی و پیامدهای آبی آن‌ها را برای هر منطقه کمی‌سازی می‌کنند. برای مثال، یک کشاورز در سرپل ذهاب با مراجعه به این اطلس، به وضوح خواهد دید که انتخاب رقم خیلی دیررس (گزینه فعلی) دارای ردپای آب آبی ۶۹۱ متر مکعب بر تن است و به عنوان یک گزینه پریسک و ناکارآمد علامت‌گذاری شده است. در مقابل، اطلس نشان می‌دهد که با تغییر به رقم متوسط‌ترس، ردپای آب پتانسیل به حدود ۴۷۰-۵۰۰ متر مکعب بر تن کاهش می‌یابد، زیرا دوره پر شدن دانه از اوج گرمای تابستان فاصله می‌گیرد. در مقابل، برای منطقه‌ای مانند بيله‌سوار، اطلس ممکن است نشان دهد که رقم متوسط‌ترس بهترین توازن را بین حداکثر کردن عملکرد (با استفاده کامل از فصل رشد نسبتاً خنک) و حفظ ردپای آب در سطح پایین (حدود ۲۸۰ متر مکعب بر تن) ایجاد می‌کند و انتخاب رقم خیلی زودرس ممکن است منجر به کاهش غیرضروری عملکرد شود. این رویکرد به جای تجویز یک نسخه برای همه، به کشاورزان و سیاست‌گذاران اجازه می‌دهد تا بر اساس داده‌های علمی، مبادلات بین عملکرد و مصرف آب را درک کرده و تصمیمی آگاهانه بگیرند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند زیربنای علمی و پایه محاسباتی چنین اطلس‌هایی برای تخصیص بهینه منابع و افزایش بهره‌وری آب در سطح ملی باشد.

منابع

- اسفندیاری، و.، ظریفیان، ش.، عیسی نژاد، ا. و راحلی، ح. ۱۴۰۳. تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی بر مدیریت مصرف آب با رویکرد آب مجازی و ردپای آب. محیط زیست و مهندسی آب. ۱۰ (۲): ۲۴۱-۲۴۳.
- پیری، ح. و مبارکی، م. ۱۴۰۰. بررسی ردپای آب و بهره‌وری مصرف آب محصولات سیب‌زمینی، چغندر قند، گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۷ (۶): ۱۲۰-۱۰۳.
- عارفی‌زاده، ف.، امیری نژاد، م.، رفیعی ساردوئی، ا. و بذرافشان، ا. ۱۴۰۳. برآورد بیلان آب مجازی در بخش کشاورزی دشت جیرفت. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۴ (۳): ۱۵۳-۱۳۱.

- Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. PLOS ONE. 7 (2): e32688.
- Hoekstra, A. Y. 2019. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources*. 129: 112-117.
- Kheyruri, Y. and Sharafati, A. 2022. Spatiotemporal assessment of the NASA POWER satellite precipitation product over different regions of Iran. *Pure and Applied Geophysics*. 179 (9): 3427-3439.
- Kheyruri, Y., Sharafati, A. and Ahmadi Lavin, J. 2024. Performance assessment of NASA POWER temperature product with different time scales in Iran. *Acta Geophysica*. 72 (2): 1175-1189.
- Koo, J. and Dimes, J. 2013. HC27 Generic Soil Profile Database (Version V5) [SOL]. Harvard Dataverse.
- Liu, X., Guo, P., Li, F. and Zheng, W. 2019. Optimization of planning structure in irrigated district considering water footprint under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*. 210: 1270-1280.
- Nehbandani, A., Soltani, A., Taghdisi Naghab, R., Dadrasi, A. and Alimagham, S. M. 2020. Assessing HC27 Soil Database for Modeling Plant Production. *International Journal of Plant Production*. 14 (4): 679-687.
- Rodríguez, P. O., Holzman, M. E., Aldaya, M. M. and Rivas, R. E. 2024. Water footprint in rainfed summer and winter crops: The role of soil moisture. *Agricultural Water Management*. 296: 108787.
- Severo Santos, J. F. and Naval, L. P. 2020. Spatial and temporal dynamics of water footprint for soybean production in areas of recent agricultural expansion of the Brazilian savannah (Cerrado). *Journal of Cleaner Production*. 251: 119482.
- Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S. and Sinclair, T. R. 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*. 182: 102855.
- فیاضی، ح.، زینلی، ا.، سلطانی، ا. و ترابی، ب. ۱۴۰۱. برآورد پتانسیل و خلا عملکرد ذرت علوفه ای در ایران بر اساس پروتکل اطلس جهانی خلا عملکرد (گیگا). گزارش طرح پژوهشی.
- نظری، ر.، رضائی اعتدالی، ه. و دانش کار آراسته، پ. ۱۴۰۱. ارزیابی تغییرات عملکرد و ردپای آب محصول ذرت با مدل گیاهی AquaCrop-GIS. نشریه سنجش از دور و GIS ایران. ۱۴ (۱): ۴۳-۵۸.
- نقوی، س. و بنی اسدی، ن. ۱۴۰۲. ارزیابی و مقایسه شاخص ردپای آب محصولات زراعی در استان‌های خراسان رضوی، کرمان و اصفهان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۴ (۱): ۲۴۶-۲۳۲.
- Broughton, K. J. and Conaty, W. C. 2022. Understanding and Exploiting Transpiration Response to Vapor Pressure Deficit for Water Limited Environments. *Frontiers in Plant Science*. 13: 893994.
- Chukalla, A. D., Krol, M. S. and Hoekstra, A. Y. 2015. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19 (12): 4877-4891.
- Davis, K. F., Rulli, M. C., Seveso, A. and D'Odorico, P. 2017. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. *Nature Geoscience*. 10 (12): 919-924.
- Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B. and Azizi, K. 2022. Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. *Science of The Total Environment*. 807: 150991.
- Demir, M. S. and Muratoglu, A. 2025. Water footprint concept, approaches, and applications: A comprehensive review for the agricultural sector. *Water and Environment Journal*. 39 (2): 128-142.
- Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P. and Wu, P. 2021. A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002-2018. *Ecological Indicators*. 120: 106962.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E. and Richter, B. D. 2012. Global



Beyond Climate: Redefining Maize Water Footprint through Cultivar Selection Across Iran's Climatic Gradient

S. Amiri^{*1}, A. Soltani²

Abstract

Iran's water crisis, driven by agriculture as its largest consumer, necessitates a fundamental shift towards smart water demand management. Despite valuable regional studies, the absence of a comprehensive national-scale analysis considering the country's vast agro-climatic heterogeneity is a key knowledge gap. This research aims to fill this gap by conducting a spatio-temporal assessment of the green and blue water footprint of maize in 23 key agricultural regions of Iran. Using the process-based simulation model SSM-iCrop2, we simulated maize growth, yield, and water balance across 2760 scenarios designed based on a combination of 23 regions, 30-year climate data, and four maturity groups (cultivars). The results revealed a strong hydro-climatic gradient across Iran, ranging from absolute dependence on irrigation in the hot and arid south (blue water footprint more than 700 m³/ton) to a significant 37% green water share in the cool and semi-arid north. The key finding was that this climatic pattern can be disrupted by management decisions; selecting an unsuitable cultivar in Sarpol-e Zahab led to a 54% increase in the blue water footprint compared to the Karaj region (with a similar climate). These findings demonstrate the inefficacy of 'one-size-fits-all' policies in Iranian agricultural water management. Optimizing water use therefore requires a transition towards precise, regional approaches, for which we propose the development of climate-smart cultivation atlases as a key strategic tool to enhance water productivity.

Keywords: Blue water footprint, Crop modeling, Green water footprint, Water management

¹ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Iran
(*- Corresponding Author Email: R.Amiri@ujiroft.ac.ir)

² Professor, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

Received: 04 Sep 2025

Accepted: 27 Sep 2025