

ارزیابی مناطق مناسب کاشت گیاه گندم، ذرت، چغندر قند و گوجه‌فرنگی در اقلیم‌های مختلف ایران با توجه به اثرات تغییر اقلیم به کمک نرم افزار اکواکراپ

چکیده

انتخاب گیاهان مناسب برای کشت در هر منطقه، با توجه به تاب‌آوری سیستم زراعی و وضعیت آب، از ابعاد حیاتی در تدوین استراتژی زراعی کشور بوده و مستلزم برنامه‌ریزی دقیق است. پژوهش حاضر به منظور ارائه چارچوبی کلی برای یافتن بهترین منطقه برای کشت محصولات گوجه‌فرنگی، گندم، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند، در ۱۲ نقطه انتخابی از ایران با اعمال پراکنش و تغییرات اقلیمی از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ صورت گرفت. در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی‌های گیاهی از مدل اکواکراپ استفاده شد. پس از مقایسه مقادیر محصول خشک گزارش شده در هر یک از ۱۲ مناطق مورد مطالعه توسط سازمان جهاد کشاورزی و مقادیر مدل‌سازی شده توسط اکواکراپ، خطای صحت‌سنجی برای مناطق مذکور و محصولات چغندر قند ۸/۴ درصد، گوجه‌فرنگی ۸/۳ درصد، گندم ۶/۶ درصد، و ذرت ۶/۴ درصد بود. به طور میانگین مدل قادر به شبیه‌سازی مقدار محصول خشک تولیدی با خطای زیر ۱۰ درصد بوده است. برای پیش‌نگری مقدار محصول تولیدی در آینده نزدیک، داده‌های اقلیمی مدل‌سازی هواشناسی MRI - ESM 0 - 2 با خروجی‌های سیمپ ۶ در نرم‌افزار سیم‌هاید تهیه شد. با تحلیل داده‌های مدل‌سازی و تاریخی، برای گندم، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی، بیشترین و کمترین مقدار تولید به ترتیب در اصفهان و زاهدان، ارومیه و بجنورد، اصفهان و مشهد، و زنجان و زاهدان مشخص شد. شاخص قابل مقایسه بین محصولات در شهرهای مختلف برای دو حالت برنامه‌ریزی شده و پتانسیل، از سه شاخص مقدار جرم و قیمت ریالی محصول و عمق آب آبیاری، استفاده شد. اولویت کشت محصولات در هر شهر با قیاس ۳ عامل بهترین و ضعیف‌ترین مکان کشت گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند به ترتیب کرمانشاه و زاهدان، اصفهان و مشهد، تهران و زاهدان، کرمانشاه و مشهد می‌باشد.

کلید واژه‌ها: اکواکراپ، پیش‌بینی تولید محصول، سیم‌هاید، مدل‌سازی گیاهی

روانشناسی

کمبود آب به طور فزاینده‌ای به عنوان یک خطر بزرگ در بسیاری از نقاط جهان شناخته می‌شود، به طوری که بحران‌های آب به طور مداوم در بین خطرات جهانی رتبه‌بندی می‌شوند (FAO, 2012). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که بدون پیشرفت در مدیریت آب و اجرای سیاست‌های یکپارچه‌تر، کمبود آب و مشکلات مرتبط به آب، در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، به طور چشمگیری در طول چند دهه آینده افزایش خواهد یافت (Jiménez et al., 2014) و مدیریت منابع آب برای کشاورزی را روز به روز پیچیده‌تر می‌کند. رشد جمعیت جهان، افزایش تقاضا برای غذا، دستیابی به منابع آب و انرژی و تغییرات آب‌وهوا، نیاز به راه‌کارهای هماهنگ و مشارکتی متمرکز بر مدیریت آبیاری و منابع آب طبیعی یکپارچه‌تر و مقیاس‌پذیرتر، برای تضمین امنیت غذایی و حفظ محیط زیست می‌طلبد (Pereira, 2017; Bleischwitz et al., 2018). در نتیجه این امر، تامین نیاز غذایی جهان با توجه به رشد جمعیت در مدت زمان کوتاهی به یک چالش بزرگ تبدیل شده‌است (Mizik, 2021; Karamian et al., 2023). برای دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی، استفاده از یک رویکرد مدیریت یکپارچه که سه منبع آب، انرژی و غذا را به هم متصل می‌کند مثل شاخص پیوند آب-انرژی-غذا، ضروری است (Karamian et al., 2023). به منظور کاهش فشارها و هزینه‌ها بر منابع جهانی مانند آب، انرژی و غذا از مدل‌سازی استفاده شده‌است (Chamas, 2021).

پیشینه پژوهش

مدل‌های رایانه‌ای، به طور کلی، نمایشی ریاضی از یک سیستم در دنیای واقعی هستند (Mize & Cox., 1968; Fu & Sayed., 2022) که استخراج دانش از این داده‌ها و ایجاد سیستم‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مزارع و افزودن ارزش برای برآوردن نیازهای غذایی جمعیت و اطمینان از استفاده پایدار منابع طبیعی، اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌است (Sundmaeker et al., 2016). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، مراحل پیچیده‌ی رشد گیاهان و عوامل متعدد، از جمله ابزارهای اساسی متناسب با شرایط انتخابی و سناریوهای مختلف مدیریتی حاکم بر روابط آب، خاک و گیاه، اثرات کمبود آب بر بهره‌وری محصول و پیش‌بینی عملکرد برای بهینه‌سازی آبیاری با مقدار آب محدود برای تولید را شبیه‌سازی می‌کنند (Bao et al., 2017; سعادت و همکاران، ۱۳۹۷). یکی از مدل‌های گیاهی، مدل اکوکراپ است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد (فائو) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات کشاورزی گوناگون از جمله علوفه‌ها، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، محصولات روغنی و گیاهان دارویی با تعداد محدودی متغیر ورودی و متغیرهای ورودی ارائه شده است (Alishiri et al., 2014; Vanuytrecht et al., 2014). این مدل با استفاده از فاکتورهای تصمیم‌گیری محصول، عملکرد محصول نهایی را در چهار مرحله ساده شبیه‌سازی می‌کند (Katerji et al., 2013). نتایج ارزیابی مدل اکوکراپ در پژوهش‌های مختلف برای مطالعه و پیش‌بینی عملکرد گیاهان و مصرف آب آن‌ها در زمان‌های گوناگون (جرعه‌نوش و همکاران، ۱۳۹۸) نشان از توانایی مناسب این ابزار محاسباتی کشاورزی در شبیه‌سازی عواملی مانند رطوبت خاک، برآورد سطح سایه‌انداز، زیست‌توده محصول، و عملکرد دانه با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) کمتر از ۱۰ درصد دارد (Andarzian et al., 2011; Mkhabela & Bullock., 2019; Garcia-Vila et al., 2012). بنابراین، این مدل می‌تواند بعنوان یک ابزار مورد اعتماد برای تحلیل تأثیرات متغیرها در تولیدات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

از طرف دیگر، نتایج مدل‌های اقلیمی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی می‌تواند زمان کاشت محصولات را دچار تغییر نماید (FAO, 2022). برای پیش‌بینی این تغییرات، از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود که با افزایش دقت در پیش‌بینی‌ها در سال‌های اخیر، می‌توانند به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در آینده کمک کنند (انصاری‌مه‌بادی و همکاران، ۱۴۰۱). در حال حاضر، اکثر اطلاعات

مربوط به تغییرات آینده با شبیه‌سازی‌هایی که توسط مدل‌های اقلیمی انجام می‌شود، تحلیل می‌گردد (هوشمند و همکاران، ۱۳۹۸). تاکنون، فازهای متفاوتی از مدل‌های اقلیمی (به عبارتی سیمپ) به‌روزرسانی شده‌اند. داده‌های مرتبط با پروژه سیمپ به ترتیب تا سری ۶ (CMIP 6)^۲ ارتقا یافته که طیف گسترده‌ای از مشخصات اقلیمی و اطلاعات محیطی را برای محققان و اقلیم‌شناسان در سراسر جهان ارائه می‌دهد (Yukimoto, 2020). تحقیقات انجام‌شده در ایران، تغییرات دما و بارش در آینده و اولویت‌بندی مدل‌های اقلیمی بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌های جوی با سناریوهای مختلف را پیش‌بینی می‌کنند و اطلاعات مربوط به هر مدل‌سازی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند (انصاری و همکاران، ۱۴۰۱؛ زرین و داداشی، ۱۳۹۹).

تخصیص بهینه سطح زراعی می‌تواند مدیریت منابع آب کشاورزی را برای حفظ بهره‌وری کشاورزی و توسعه پایدار بهبود بخشد. تجزیه و تحلیل ارزیابی زمین به منظور بررسی زمین برای فعالیت‌های کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای تخصیص کارآمد منابع آب آبیاری و زمین، برنامه‌ریزی سطح زراعی می‌تواند به تصمیم‌گیری برای تعیین مقدار آب و دستیابی به اهداف معین در مناطق مختلف کشت‌شده کمک شایانی نماید (Cheng et al., 2021). در تحقیق انجام‌شده در چین، تأثیر زمانبندی‌های مختلف آبیاری بر عملکرد ذرت و کارایی استفاده از آب (WUE)، تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی بررسی شد. انتخاب زمانبندی‌های مناسب آبیاری برای تعادل بین کمبود آب و امنیت غذایی، به حفظ رطوبت مناسب خاک و تأمین نیازهای آبی گیاه در مراحل مختلف رشد، کمک می‌کند. بنابراین تغییرات بارش و دما می‌توانند تأثیرات مختلفی بر عملکرد محصولات داشته باشند و از آنجایی که مصرف آب در زراعت اهمیت ویژه‌ای دارد، تنظیم برنامه‌ریزی آبیاری به عنوان راهی برای کاهش مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات پیشنهاد شده‌است (Nie et al., 2022). مطالعات انجام‌شده در صربستان نشان از تأثیر قابل توجه تغییرات آب و هوایی با افزایش دما و تغییر الگوی بارش‌ها می‌دهد. این تغییرات، سبب طولانی‌شدن فصل رشد گیاهان تا ۵۰ روز و کاهش تولید کمتر می‌شود. افزایش روزهای بسیار گرم (بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد) سلامت انسانی و مصرف انرژی را به خطر می‌اندازد. برای کاهش این تأثیرات، نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق منابع کشاورزی و آب است. همچنین، اقدامات فوری برای تطبیق با شرایط جدید و کاهش مخاطرات باید انجام شود تا از تأثیرات منفی بر تولیدات کشاورزی و منابع طبیعی جلوگیری شود. این تحقیقات می‌توانند به برنامه‌ریزی مناسب در حوزه‌های مختلف اقتصادی، حفظ محیط‌زیست و امنیت غذایی کمک کنند و اهمیت تغییرات اقلیمی در آینده را بیشتر تأکید کنند (Vuković et al., 2018). تصمیم‌گیری مؤثر در انتخاب مکان برای کاشت محصولات زراعی به دلیل پیچیدگی و وابستگی به متغیرهای مختلف میسر نمی‌گردد. از این‌رو، تحلیل دقیقی از ویژگی‌های مکانی برای کاشت محصولات زراعی امری حیاتی و اساسی محسوب می‌شود. بنابراین پتانسیل‌یابی مکانی برای کاشت محصولات کشاورزی به یک انتخاب استراتژیک تبدیل شده است و نیاز به اعمال راه‌کارهای مدیریتی با توجه به شرایط هر منطقه می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق، تدوین چهارچوبی برای مکان‌یابی محصولات کشاورزی در کشور ایران می‌باشد. این چارچوب با ارائه راه‌کارهای اجرایی، امکان انتخاب مکان‌های مناسب کاشت محصولات کشاورزی از منظر منابع آب و اقتصاد را فراهم می‌آورد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، ۱۲ ایستگاه سینوپتیک از کشور ایران با پراکنش‌های اقلیمی مختلف آب‌وهوایی انتخاب شدند (جدول ۱) این ایستگاه‌ها شامل زنجان، زاهدان، ارومیه، بندرعباس، بجنورد، اصفهان، مشهد، قزوین، سمنان، شیراز، تهران، کرمانشاه بود که هر یک دارای حداقل

^۲ Climate Model Intercomparison Project (CMIP)

۴۰ سال داده‌ی آماری بودند. در این پژوهش، عوامل اقلیمی دما از ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها در بازه‌ی زمانی روزانه (۲۴ ساعته) برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ از سازمان هواشناسی کشور^۳ دریافت شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک کشور

ردیف	کد ایستگاه	کد منطقه	نام ایستگاه	نام منطقه	اقلیم (شاخص دوام‌تن ^۴)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	۴۰۷۴۵	OIMM	مشهد	خراسان رضوی	خشک ^۵	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲
۲	۴۰۷۳۱	OIKK	قزوین	قزوین	نیمه‌خشک ^۶	۵۰/۰۲	۳۶/۳۲	۱۲۷۹/۱
۳	۴۰۷۵۴	OIII	تهران	تهران	خشک	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱
۴	۴۰۸۰۰	OIFM	اصفهان	اصفهان	خیلی خشک ^۷	۵۱/۷۱	۳۲/۵۲	۱۵۵۰/۴
۵	۴۰۸۵۶	QIZH	زاهدان	سیستان و بلوچستان	بسیار خشک	۶۰/۹۰	۲۹/۴۷	۱۳۷۰
۶	۴۰۷۲۹	OITZ	زنجان	زنجان	نیمه‌خشک	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴
۷	۴۰۷۵۷	OIIS	سمنان	سمنان	خیلی خشک	۵۳/۴۲	۳۵/۵۹	۱۱۲۷
۸	۴۰۸۴۸	OISS	شیراز	فارس	نیمه‌خشک	۵۲/۶۰	۲۹/۵۶	۱۴۸۸
۹	۴۰۷۶۶	OICC	کرمانشاه	کرمانشاه	نیمه‌خشک و مرطوب ^۸	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵	۱۳۱۸/۵
۱۰	۴۰۷۱۲	OITR	ارومیه	آذربایجان غربی	نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب ^۹	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	۱۳۲۸
۱۱	۴۰۸۷۵	OIKB	بندرعباس	هرمزگان	بسیار خشک	۵۶/۳۷	۲۷/۲۱	۹/۸
۱۲	۴۰۷۲۳	OIMN	بجنورد	خراسان شمالی	نیمه‌خشک	۵۷/۳۰	۳۷/۴۹	۱۰۶۵

محاسبه تبخیر تعرق به روش هارگریوز سامانی

بدلیل محدودیت بازه ورودی داده‌های تبخیر تعرق به اکوکراپ و دسترسی به داده‌های این معادله، از بین سایر معادلات، روش هارگریوز سامانی برای محاسبه‌ی تبخیر تعرق گیاه مرجع استفاده شد. روش هارگریوز (۱۹۸۵) اغلب به منظور ارائه پیش‌بینی‌های تبخیر تعرق پتانسیل (تبخیر تعرق گیاه مرجع)^{۱۰} برای دوره‌های هفتگی یا طولانی‌تر برای استفاده در برنامه‌ریزی منطقه‌ای، مطالعات بهره‌برداری از مخزن، ظرفیت‌های طراحی کانال، نیازهای منطقه‌ای برای آبیاری و یا زهکشی، پتانسیل‌های تولید کشاورزی دیام، و در برخی شرایط

^۳ <https://data.irimo.ir>

^۴ De Martonne

^۵ Arid

^۶ Semi-Arid

^۷ Hyper-Arid

^۸ Humid

^۹ Semi-Humid

^{۱۰} ET₀

برای برنامه‌ریزی آبیاری، استفاده می‌شود (Hargreaves & Allen., 2003، رضانی اعتدالی و صفری، ۱۴۰۲). با کمک رابطه (۱) می‌توان میزان تبخیرتعرق را بدست آورد.

$$ET_o = 0.0023 (T_{mean} + 17.8)(T_{max} + T_{min})^{0.5} R_a \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در رابطه فوق ET_o تبخیر تعرق مرجع و R_a تابش فرازمینی بر مبنای $(mm\ day^{-1})$ میلی‌متر بر روز و T_{mean} متوسط درجه حرارت $(^{\circ}C)$ ، T_{max} دمای حداکثر $(^{\circ}C)$ ، T_{min} دمای حداقل $(^{\circ}C)$ می‌باشد.

فازهای محاسباتی الگوریتم رشد گیاه در آکواکراپ

آکواکراپ عملکرد را بر مبنای ۴ فاکتور (۱) توسعه محصول، (۲) تعرق محصول، (۳) تولید زیست‌توده و (۴) تولید محصول، محاسبه می‌کند. تعرق واقعی محصول (T_r) (میلی‌متر) با ضرب تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) در ضریب تعرق محصول (K_{CTr}) و ضریب تنش آبی (K_s) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2009).

$$Tr = K_s K_{CTr} ET_o \quad \text{رابطه (۲)}$$

در نرم افزار اکواکراپ ارتباط بین مقدار زیست‌توده تولیدشده (B)، و مقدار تجمعی تعرق نرمال شده $(\sum_{i=1}^n (\frac{Tr}{ET_o}))$ ، بصورت خطی در نظر گرفته شده‌است؛ که شیب این خط برابر با Wp^* (بهره‌وری آب زیست‌توده) می‌باشد (Raes et al., 2009).

$$B = Wp^* \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{ET_o} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

عملکرد محصول نهایی: عملکرد محصول، جرم ماده خشک در واحد سطح (تن در هکتار) (Y) رابطه (۴) از مقدار زیست‌توده تولیدشده روی زمین، با استفاده از شاخص برداشت (HI_0) که میزان محصول قابل برداشت از کل زیست‌توده تولیدشده روی زمین و قابل برداشت است، به دست می‌آید. HI واقعی در طول شبیه‌سازی با تنظیم شاخص برداشت مرجع (HI_0) با یک ضریب تعدیل برای اثرات تنش به دست می‌آید (لو و همکاران، ۲۰۲۲، آلواربلتران، ۲۰۲۳، رائس و همکاران، ۲۰۲۳).

$$Y = HI_0 \times B \quad \text{رابطه (۴)}$$

عملکرد خشک (Y_{dry}) درصدی (f_m) از محصول تازه (Y_{fresh}) است. کسر (f_m)، میزان ماده خشک از یک محصول تازه را بیان می‌کند (رائس و همکاران، ۲۰۲۳).

$$Y_{dry} = f_m \times Y_{fresh} \quad \text{رابطه (۵)}$$

با مشخص شدن تاریخ کشت محصولات گردآوری شده توسط اطلاعات موجود در مقالات و پژوهش‌ها و ارتباط با متخصصان هر بخش و مقایسه با خروجی حاصل از نرم افزار اکواکراپ با نیاز آبی برآورد شده توسط نرم‌افزار نتوات^{۱۱}، مقدار عمق آبیاری حاصل از واسنجی برنامه‌ریزی آبیاری برای ۱۲ استان، نسبت به مقدار عملکرد موجود در سالنامه آماری جهاد کشاورزی و اطلاعات هیدرولیکی خاک، به

^{۱۱} NETWAT

پردازش‌های مربوط به عملکرد محصول در اکواکراپ پرداخته‌شد. بطور دقیق‌تر در مرحله واسنجی، با اصلاح پارامترهای موجود در فایل CRO و در نظر گرفتن تابع هدف به صورت خطای RMSE در مقایسه با مقادیر ارائه شده در آمارنامه، به طور عمده پارامترهای CDC و اصلاح گردید تا حداقل خطا برای هر شهر در هر سال بدست آمد. با کالیبره کردن مدل اکواکراپ به شبیه‌سازی قابل قبولی برای عملکرد ذرت، چغندر، گندم و گوجه در استان‌ها دست یافته‌شد.

خاک

شبکه‌بندی جهانی خاک توسط هنگل و همکاران (۲۰۱۷)، برای برخی از خصوصیات فیزیکی (مانند بافت خاک از ۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر، چگالی ظاهری و ...) و شیمیایی (مثل مقدار کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، pH و ...) خاک ارائه شده است. این سامانه بر اساس سیستم طبقه‌بندی دپارتمان کشاورزی ایالات متحده^{۱۲} (در مجموع حدود ۲۸۰ لایه رستری) با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر ارائه شده است.

منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی از شاخص‌های مهم فیزیکی خاک و بیانگر ارتباط بین رطوبت خاک و مکش ماتریک است و در مسائل آب‌و خاک مانند آبیاری و زهکشی و حفاظت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. از مرسوم‌ترین مدل‌های منحنی مشخصه رطوبتی که بصورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) است.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در این مدل α, m, n پارامترهای شکل هستند. در این پژوهش، از منحنی مشخصه برای محاسبه نقاط رطوبتی در حد اشباع، ظرفیت زراعی و حد پژمردگی بعنوان ورودی‌های نرم افزار اکواکراپ استفاده شده است.

مدل روزتا^{۱۳}

برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تاکنون توابع انتقالی زیادی پیشنهاد شده‌اند. روزتا از شبکه عصبی مصنوعی برای تشکیل توابع انتقالی بهره برده که می‌تواند پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) را با استفاده از ویژگی‌های زودبافت خاک تخمین بزند. این ویژگی‌های زودبافت می‌تواند حداقل شامل درصد ذرات معدنی خاک (شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری، رطوبت در پتانسیل ماتریک ۳۳- کیلوپاسکال (FC) و رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلوپاسکال (PWP) باشد بکه این ورودی‌ها می‌توانند بصورت سلسله مراتبی افزایش یابد. در این پژوهش نمونه‌های بافت خاک برای عمق‌های مختلف با ورود مقادیر درصد شن، ماسه، سیلت و چگالی ظاهری $[M L^{-3}]$ ، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع $[L T^{-1}]$ ، پارامترهای α و n در رابطه ۶ (در معادله ون گنوختن)، رطوبت اشباع $[L^3 L^{-3}]$ ، رطوبت باقیمانده $[L^3 L^{-3}]$ محاسبه می‌شود. شاپ^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که با افزایش داده‌های ورودی، این مدل تخمین‌های قابل قبول‌تری برای پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) ارائه می‌نماید.

^{۱۲} USDA (United States Department of Agriculture)

^{۱۳} ROSETTA

^{۱۴} Schaap

مدل سیم‌هاید

برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی، از مدل اقلیمی سیمپ^{۱۵} برای پیش‌بینی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰) استفاده شد. داده‌های مدل گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov> برای دوره تاریخی (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) و دوره آینده (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰)، تحت سناریوهای مختلف برای پیش‌نگری سه متغیر بارش، دمای ماکزیمم و دمای مینیمم، براساس نیاز این تحقیق به صورت روزانه استخراج شدند. طبق مقایسه‌ی سنج‌های آماری انجام‌شده در مقاله زرین و رودباری (۲۰۲۰) که برای پیش‌نگری دمای کشور انجام شده بود، سناریوی میانه (متوسط) SSP2-4/5 و مدل MRI - ESM 0 - 2 نسبت به سایر سناریوها و مدل‌ها، با عملکرد بهتری، انتخاب شدند؛ همچنین، با بررسی نتایج پژوهش انصاری مهابادی و همکاران (۲۰۲۲)، برای یافتن مناسب‌ترین مدل GCM، گزارش ششم (سیمپ ۶) به منظور پیش‌نگری میزان بارش، مدل MRI - ESM 0 - 2 بارش نواحی غربی را دقیق‌تر تصویرسازی کرد. بنابراین با بررسی چنین شواهدی، در این پژوهش، مدل MRI - ESM 0 - 2 برای پیش‌نگری داده‌های اقلیمی انتخاب شد. پردازش داده‌های خروجی از نرم‌افزار سیم‌هاید^{۱۶} برای مناطق مورد نظر و تحلیل شرایط اقلیمی ۴۰ سال گذشته و ۲۰ سال آتی انجام گرفت. مدل سیم‌هاید^{۱۷}، ابزاری مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون است که امکان استفاده از داده‌های مدل آب‌وهوای جهانی و حوضه‌ای را در مدل‌های هیدرولوژیکی فراهم می‌کند (Rathjens et al., 2016).

بررسی اقتصادی کشت محصولات مختلف

به منظور مکان‌یابی مناسب کشت هر محصول و اولویت‌بندی کشت در هر شهر و مقایسه‌ی آن با یکدیگر بایستی از ارزش ریالی هر محصول استفاده کرد. پژوهش حاضر برای برنامه‌ریزی‌های کلان مورد استفاده قرار گرفته و به دلیل عدم کفایت وجود داده‌ها و صحت‌سنجی داده‌های قیمت آب از متغیر جایگزین (Proxy) برای تعیین بهای هر متر مکعب آب به شرح ذیل استفاده شد. بنا به دسترسی محققین این پژوهش به داده‌های با جزییات بالا در سطح مشهد، در این شهر هزینه‌ها برآورد شده و به شهرهای دیگر تعمیم داده شد. متغیر جایگزین حاضر توسط نویسندگان ابداع شده و بر اساس مقدار هزینه حفاری و نگهداری چاه در مناطق مختلف ارائه شده‌است.

شهر مشهد به نمایندگی از شهرهای موجود در این پروژه، انتخاب شد. بطور دقیق‌تر برای ارزیابی هزینه عملیات حفاری یک چاه آبرفت به عمق ۲۵۰ متر در محدوده مشهد با دستگاه ضربه‌ای (بعنوان روش اقتصادی‌تر نسبت به روش روتاری) برای ۲۴ ساعت، از تعرفه مصوب انجمن حفاران خراسان استفاده شد. مجموع میانگین هزینه حفاری چاه به روش ضربه‌ای با اعمال سالانه ۲۰ درصد برای هزینه‌ی نگهداری چاه با توجه به کارکرد چاه در ۲۴ ساعت، محاسبه گردید. هزینه هر متر مکعب آب برای هر محصول به وسعت یک هکتار با رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه (۷)} \quad \text{مقدار هزینه حفاری و نگهداری چاه} * \frac{\text{حجم آب مصرفی}}{\text{حجم آب استخراج شده از چاه در سال (ثانیه بر مترمکعب)}} = \text{هزینه هر متر مکعب آب}$$

قیمت محصولات گندم، گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند از سالنامه آماری جهاد کشاورزی استخراج شد. قیمت گندم و چغندر قند بصورت تضمینی ارائه شده که در واقع نرخ اعلام‌شده توسط دولت برای کل کشور است؛ اما برای گوجه‌فرنگی و ذرت

^{۱۵} CMIP

^{۱۶} CMhyd

^{۱۷} Ddgd (Climate Model data for hydrologic modeling)

علوفه‌ای قیمت‌ها در شهرهای متفاوت، اختلاف جزیی دارد. بدلیل نوسانات شدید و عدم دستیابی به قیمت گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در شهرهای مختلف، ارزش‌بهای محصولات در زمین کشاورزی (باصطلاح هزینه سرخرمن) در شهر مشهد به نمایندگی از سایرین، انتخاب شد. سپس مقدار هزینه آب و درآمد محصول برای حالت برنامه‌ریزی و حالت پتانسیل محاسبه شد و با کسر این مبالغ از یکدیگر، مقدار اختلاف درآمد و هزینه که همان سود حاصل از هر سال مختلف می‌باشد، به طور مجزا محاسبه گردید. سودهای محاسبه شده ناشی از قیمت‌های هر سال هست؛ برای مقایسه‌ی بهتر نیاز به، به‌روزرسانی و تبدیل قیمت به سال ۱۴۰۱ می‌باشد. پس با استفاده از رابطه (۸) قیمت‌ها به روز شدند.

$$\text{مبلغ ریالی} * \frac{\text{عدد شاخص در مقطع زمانی مورد نظر}}{\text{عدد شاخص در مقطع زمانی اول}} = \text{ارزش ریالی مبلغ در مقطع زمانی مورد نظر} \quad \text{رابطه ۸}$$

رابطه ۸)، توسط یک محاسبه‌گر برخط (online) تبدیل قیمت از سال‌های متفاوت به یکدیگر از آدرس amar.org.ir قابل استفاده است. این محاسبه‌گر بر اساس شاخص قیمت مصرف‌کننده (CPI) عمل می‌کند که توسط درگاه ملی آمار ایران ارائه شده است.

شاخص‌های مقدار محصول، آب مصرفی و اقتصادی

به منظور مقایسه و اولویت‌بندی کشت محصولات مختلف در شهرهای مورد مطالعه، سه شاخص بدون بعد برای مقدار محصول، آب مصرفی و سود اقتصادی ارائه شد. این سه شاخص از سه منظر زراعی، صرفه‌جویی در منابع آب و اقتصاد کشت گیاهان مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهند. در نهایت، با استفاده از این سه شاخص، مدیریت الگوی کشت در سطح کلان قابل ارائه خواهد بود.

بدین منظور، ابتدا برای هر شهر و هر محصول، حالت پتانسیل برای کشت گیاه با استفاده از نرم‌افزار اکواکراپ ارائه شد. با توجه به اینکه پژوهش حاضر از منظر تخصیص منابع آب به اولویت‌بندی کشت محصولات مختلف می‌پردازد، عدم وجود تنش خشکی به عنوان عامل اساسی برای تعیین حالت پتانسیل برای کشت گیاهان مختلف در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، در حالت پتانسیل رطوبت منطقه‌ی ریشه برای گیاه مورد نظر در حالت ظرفیت زراعی ثابت باقی می‌ماند. این مهم از طریق نرم‌افزار اکواکراپ برای تعیین مقدار نیاز خالص آبیاری قابل انجام است. بر این اساس شاخص مصرف آب نسبت به حالت پتانسیل طبق رابطه ۹) قابل تعریف است.

$$100 * \frac{\text{مصرف آب در حالت واقعی}}{\text{مصرف آب در حالت پتانسیل}} = \text{شاخص مصرف آب} \quad \text{رابطه ۹}$$

بر اساس چنین تعریفی شاخص مصرف آب، امکان بیشتر شدن نسبت به ۱۰۰ درصد را نیز دارد، زیرا که حفظ رطوبت خاک در منطقه ریشه از طریق آبیاری در حد ظرفیت زراعی، گرچه شرایط مطلوبی برای رشد گیاه فراهم نماید؛ الزاما منجر به مصرف کمینه منابع آب نخواهد شد. مشابه با شاخص مصرف آب می‌توان برای مقایسه‌ی عملکرد گیاهان مختلف، شاخص مقدار محصول را مطابق رابطه (۱۰) تعریف نمود.

$$100 * \frac{\text{مقدار محصول در حالت واقعی}}{\text{مقدار محصول در حالت پتانسیل}} = \text{شاخص مقدار محصول} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

صورت کسر رابطه ۱۰) مقدار محصول متناظر با برنامه‌ریزی آبیاری در مقدار مصرف آب در حالت واقعی (صورت کسر در رابطه ۹) می‌باشد. بطور مشابه برای مخرج نیز مقدار محصول در حالت پتانسیل برابر با مقدار مصرف آب در حالت پتانسیل (مخرج کسر رابطه

۹) می‌باشد. در این حالت انتظار می‌رود شاخص فوق مقادیر قابل ملاحظه‌ای بیش از ۱۰۰ نداشته باشد. مفادیر بیش از ۱۰۰ درصد صرفاً در حالت‌هایی رخ خواهد داد که تنش‌های موجود، سبب افزایش شاخص برداشت بشود. در نهایت شاخص اقتصادی به عنوان عامل تعیین کننده برای اولویت‌بندی کشت یا عدم کشت محصول به صورت رابطه (۱۰) تعریف شد.

$$\text{رابطه (۱۱)} \quad 100 * \frac{\text{هزینه حالت واقعی} - \text{درآمد حالت واقعی}}{\text{هزینه حالت پتانسیل} - \text{درآمد حالت پتانسیل}} = \text{شاخص سود اقتصادی}$$

مشابه با استدلال رابطه (۱۰) انتظار می‌رود که این شاخص صرفاً مقادیر اندکی بیش از ۱۰۰ درصد را داشته باشد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، با بررسی و مطالعات انجام‌شده، داده‌ها از نرم‌افزار اکوکراپ استخراج و آماده‌سازی می‌شوند تا برای تحلیل مقدار تولید محصول در شرایط مرجع (رشد گیاه در شرایط رطوبتی برابر با حد ظرفیت زراعی در تمام طول فصل رشد) برای هر منطقه مدل‌سازی شوند. برای مدل‌سازی نرم‌افزار و درک روند تولید و مقدار محصول، نیاز به تغذیه مدل با استفاده از داده‌های گذشته مناطق انتخابی می‌باشد. این ورودی‌ها شامل: (۱) داده‌های اقلیمی، (۲) داده‌های آبیاری، (۳) داده‌های محصول و (۴) داده‌های خاک هستند.

به این منظور، تبخیر تعرق به روش هارگریوز-سامانی محاسبه و تاریخ کشت محصولات در شهرهای مورد مطالعه از طریق مصاحبه با کارشناسان و یا جستجو در مقالات تعیین شد (جدول ۲). بخش‌های خالی جدول، نمایانگر عدم کاشت آن محصول در آن منطقه می‌باشد.

جدول ۲. تاریخ کشت ذرت، گوجه‌فرنگی، گندم و چغندر قند در مناطق مختلف کشور

ردیف	نام ایستگاه	نام منطقه	ذرت	گوجه فرنگی	گندم	چغندر
۱	مشهد	خراسان رضوی	21-May	15-May	1-Nov	3-Apr
۲	قزوین	قزوین	26-May	18-May	16-Nov	20-Apr
۳	تهران	تهران	23-Apr	12-May	23-Sep	9-May
۴	اصفهان	اصفهان	22-Jun	5-Jul	26-Oct	20-Apr
۵	زاهدان	سیستان و بلوچستان	22-Jun	20-Apr	1-Oct	-
۶	زنجان	زنجان	21-May	19-Jul	22-Oct	-
۷	سمنان	سمنان	22-May	8-May	22-Oct	-
۸	شیراز	فارس	4-Jul	21-May	22-Oct	21-Mar
۹	کرمانشاه	کرمانشاه	5-May	1-Mar	23-Oct	21-Mar
۱۰	ارومیه	آذربایجان غربی	15-May	30-May	6-Oct	4-Apr
۱۱	بندرعباس	هرمزگان	-	2-Sep	6-Oct	-
۱۲	بجنورد	خراسان شمالی	12-May	13-May	22-Oct	9-Apr

با انتخاب هر یک از محصولات گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر قند و ذرت با تاریخ کشت تعیین‌شده در هر شهر، فایل‌های محصولات (CRO). پیش‌فرض در نرم‌افزار اکوکراپ استفاده می‌شود. برخی از پارامترهای مهم هر محصول در جدول ۳ به نمایش گذاشته شده‌است. به منظور کالیبره کردن محصول چغندر قند برخی پارامترها از جمله طول مدت جوانه‌زنی، زمان رسیدن به حداکثر سبزیگی گیاه، زمان گلدهی، زمان پیری و مدت زمان بلوغ و طول مدت HI و در نتیجه‌ی آن، درصد دو ضریب رشد پوشش گیاهی و کاهش پوشش گیاهی تغییر یافت. در شهرهای مشهد، بجنورد و اصفهان و برای محصول گندم در شهرهای اصفهان، زنجان، قزوین،

کرمانشاه، بجنورد و مشهد نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش فرض استفاده شد.

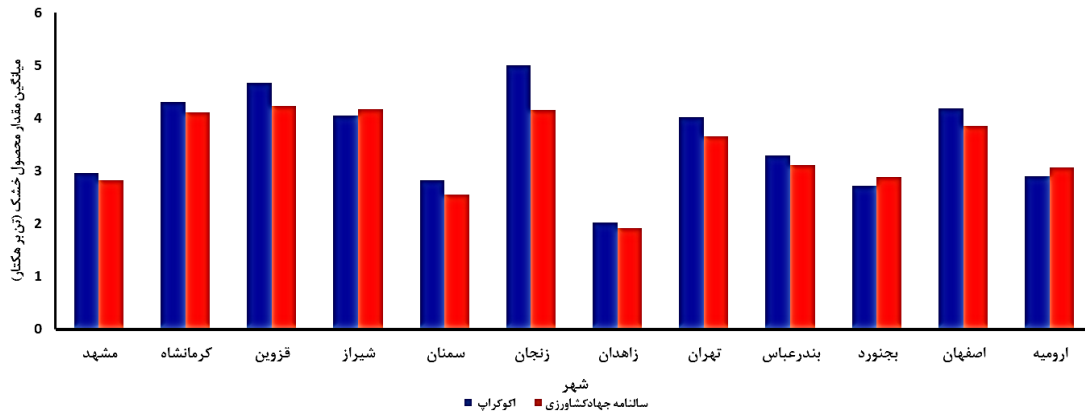
جدول ۳. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصولات ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی

دوره / محصولات	ذرت	چغندر	گندم	گوجه‌فرنگی
جوانه‌زنی (روز)	۶	۴	۱۳	۴
حداکثر سبزی‌نگی (روز)	۵۴	۷۳	۱۱۹	۶۳
گلدهی (روز)	۶۶	-	۱۲۷	۳۴
مدت زمان گلدهی (روز)	۱۳	-	۱۵	۴۲
پیری (روز)	۱۰۷	۱۱۵	۱۵۸	۹۱
بلوغ (روز)	۱۳۲	۱۴۲	۱۹۷	۱۱۰
طول مدت HI (روز)	۶۱	۷۰	۶۷	۵۸
درصد سطح سایه‌انداز در ۹۰٪ جوانه‌زدن یا پس از پیوند (CC_0)	۰/۴۹	۰/۱	۶/۷۵	۰/۶۷
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) (درصد به روز)	۱۶/۳	۱۳/۶	۴/۹	۱۲/۳
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) (درصد به روز)	۱۱/۷	۷/۱	۷/۲	۷/۲
حداکثر عمق موثر ریشه‌زایی (متر)	۲/۳	۱	۱/۵	۱
ضریب تعرق محصول (K_{et})	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱	۱/۱
بهره‌وری آب زیست‌توده نرمال شده (w_p^*) (گرم بر مترمربع)	۳۳/۷	۱۷	۱۵	۱۸
شاخص برداشت (HI_0) (درصد)	۴۸	۷۰	۴۸	۶۳

در مرحله بعد با برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای مقادیر تعریف‌شده در نت‌وات و مقدار نیاز آبی گیاه نسبت به شرایط اقلیمی و بررسی خاک هر نقطه، مقدار محصول تولیدی نسبت به شرایط تعریف‌شده، بدست می‌آید.

صحت‌سنجی

با مقایسه‌ی بین میزان محصول خشک گزارش شده از آمارنامه جهادکشاورزی، هر کدام از محصولات شهرها یا مقادیر خروجی حاصل از برنامه‌ریزی با اکوکراپ، مقدار درصدخطا مشخص می‌شود. در شکل ۱. **Error! Reference source not found.** برای محصول گوجه‌فرنگی به مدت ۵ سال در ۱۲ شهر، درصد خطا به نمایش گذاشته شده است؛ همچنین درصد ماکزیمم خطا برای ذرت‌علوفه‌ای و چغندر قند به مدت ۱۵ سال و گندم به مدت ۱۶ سال به ترتیب کرمانشاه ۹/۶۱، ارومیه ۹/۰۲ و اصفهان با ۹/۸۸ درصد برآورد شد.



شکل ۱. صحت‌سنجی محصول گوجه‌فرنگی در استان‌های کشت‌شده ایران

برخی از پارامترهای ورودی برای محصول چغندر قند در شهرهای مشهد، بجنورد و اصفهان نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش‌فرض استفاده شد (جدول ۴).

جدول ۴. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصول چغندر در برخی شهرها

اصفهان	بجنورد	مشهد	چغندر قند
۵	۵	۶	جوانه‌زنی (روز)
۹۸	۹۳	۱۱۱	حداکثر سبزی‌نگی (روز)
۱۵۳	۱۴۶	۱۷۴	پیری (روز)
۱۹۱	۱۸۱	۲۲۲	بلوغ (روز)
۱۰/۱	۱۰/۷	۹	CGC
۷/۱	۷/۱	۷/۱	CDC
۱۱۷	۱۰۷	۱۴۶	طول مدت HI

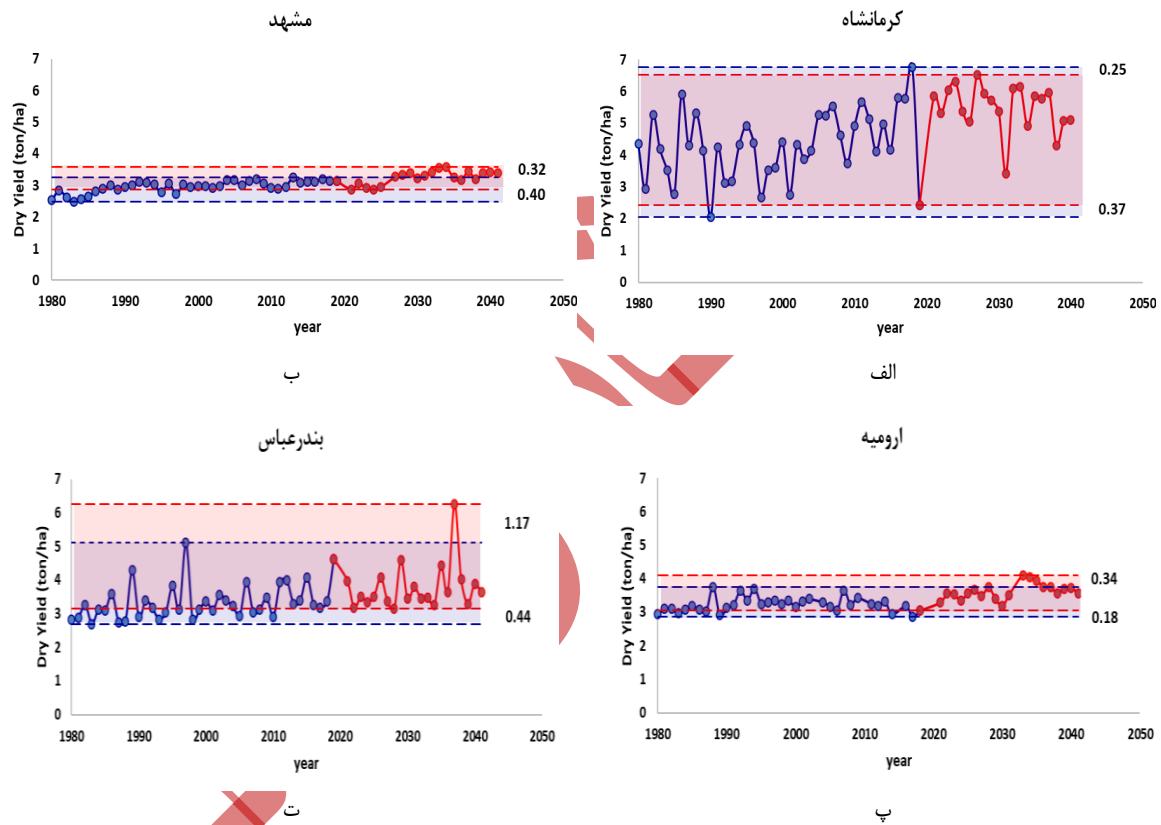
برخی از پارامترهای ورودی برای محصول گندم در شهرهای اصفهان، زنجان، قزوین، کرمانشاه، بجنورد و مشهد نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش‌فرض استفاده شد (جدول ۵).

جدول ۵. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصول گندم در برخی شهرها

مشهد	بجنورد	کرمانشاه	قزوین	زنجان	بندرعباس	اصفهان	گندم
۱۵	۱۵	۱۴	۱۵	۱۶	۸	۱۴	جوانه‌زنی (روز)
۱۲۱	۱۴۴	۱۲۴	۱۲۸	۱۵۸	۶۷	۱۲۴	حداکثر سبزی‌نگی (روز)
۱۶۰	۲۰۰	۱۶۴	۱۸۳	۲۰۸	۱۱۴	۱۶۴	پیری (روز)
۲۳۲	۲۴۹	۲۱۱	۲۲۹	۲۷۰	۱۵۳	۲۱۱	بلوغ (روز)
-	۴	۴/۷	۴/۲	۳/۷	۸/۸	۴/۷	CGC
۱۲۹	۱۲۹	۱۲۸	۱۲۹	۱۳۰	۱۱۴	۱۲۸	گلدهی (روز)
-	۳۰	-	۱۸	۵۴	-	-	مدت زمان گلدهی (روز)
۹۹	۱۱۵	۷۹	۹۶	۱۳۴	۳۰	۷۹	طول مدت HI

پیش‌نگری برای ۲۰ سال آینده با نرم‌افزار سیم‌هاید

در ادامه به منظور پیش‌بینی مقدار محصولات برای ۲۰ سال آینده از مدل‌سازی استفاده شد. نرم‌افزار سیم‌هاید با توجه به داده‌های ورودی، خروجی‌های اقلیمی برای آینده نزدیک را پیش‌بینی می‌نماید. در نتیجه‌ی پردازش‌های اقلیمی، می‌توان مقدار محصول تولیدشده را پیش‌بینی کرد. به دلیل طولانی‌شدن مقاله و عدم وجود فضای کافی برای ارائه‌ی کلیه خروجی‌ها برای همه‌ی محصولات انتخابی، فقط ۴ شهر مشهد، کرمانشاه، ارومیه و بندرعباس با فرض اعمال پراکنش اقلیمی به نمایندگی از ۱۲ شهر برای محصول گوجه‌فرنگی در شکل ۲ به نمایش گذاشته می‌شود.



شکل ۲. میزان تولید محصول گوجه‌فرنگی بصورت سالانه در شهرهای (الف) مشهد، (ب) کرمانشاه، (پ) بندرعباس و (ت) ارومیه، برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۴۰.

ترتیب اولویت‌بندی کشت با بیشترین مقدار محصول تولیدی (تن بر هکتار) گیاه گندم، شهرهای: اصفهان (۵/۰۶)، سمنان (۴/۱۸)، کرمانشاه (۴/۱۷)، برای چغندرقد، ارومیه (۱/۶۶)، کرمانشاه (۱/۵۵)، شیراز (۱۰/۳۹)، برای ذرت اصفهان (۱۳/۸۳)، تهران (۱۳/۶۸)، کرمانشاه (۱۳/۴۴) و برای گوجه‌فرنگی زنجان (۵)، قزوین (۴/۶۷)، اصفهان (۴/۱۹) می‌باشند.

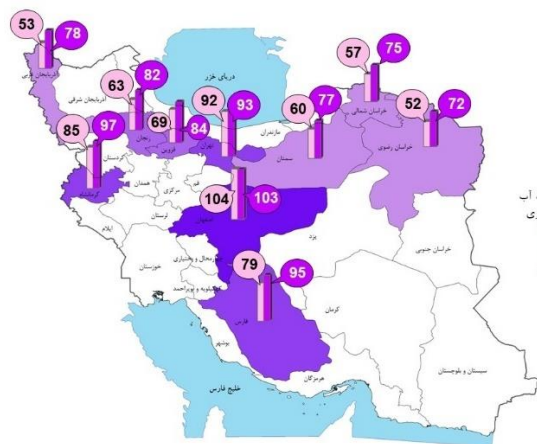
بررسی اقتصادی کشت و پتانسیل یابی مکانی محصولات

برای ارائه چارچوبی جهت انتخاب بهترین محل کشت هر محصول در شهرهای مختلف نیاز به مقایسه ریالی در شرایط برنامه‌ریزی (آبیاری با توجه به نیاز آبی گیاه و مقدار آب موجود) و پتانسیل (آبیاری کامل) است. مقدار هزینه یک کیلوگرم از هر محصول گندم، چغندر، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی که از سالنامه‌ی آماری جهاد کشاورزی استخراج گردیده و هزینه حفاری یک چاه آبرفت در شهر مشهد به عمق ۲۵۰ متر به ضربه‌ای برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۱ در جدول ۶ برای شهر مشهد مشخص شده‌است.

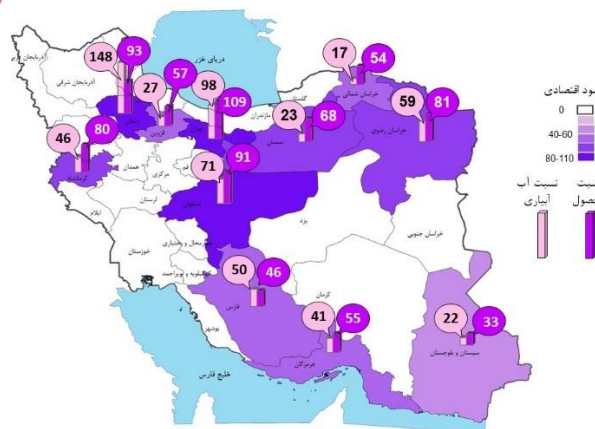
جدول ۶. برآورد هزینه‌های حفاری (ریال) یک چاه در شهر مشهد به عمق ۲۵۰ متر به روش ضربه‌ای

۸۰۰۰۰۰	هر کیلومتر	هزینه رفت و برگشت ۱۵۰ کیلومتر
۳۰۰۰۰۰۰۰	هر کارگاه	تجهیز کارگاه برای حفاری
۱۲۰۰۰۰۰۰	هر مرحله	نصب و جمع‌آوری
۹۵۰۰۰۰۰	هر متر	حفاری ۱۶ اینچ تا عمق ۱۵۰ متر
۱۲۰۰۰۰۰۰	هر متر	حفاری ۱۶ اینچ عمق ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر
۳۰۰۰۰۰۰	هر متر	لوله‌گذاری ۱۲ اینچ تا ۱۵۰ متر
۴۰۰۰۰۰۰	هر متر	لوله‌گذاری ۱۲ اینچ ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر
۲۰	لیتر بر ثانیه	دبی چاه

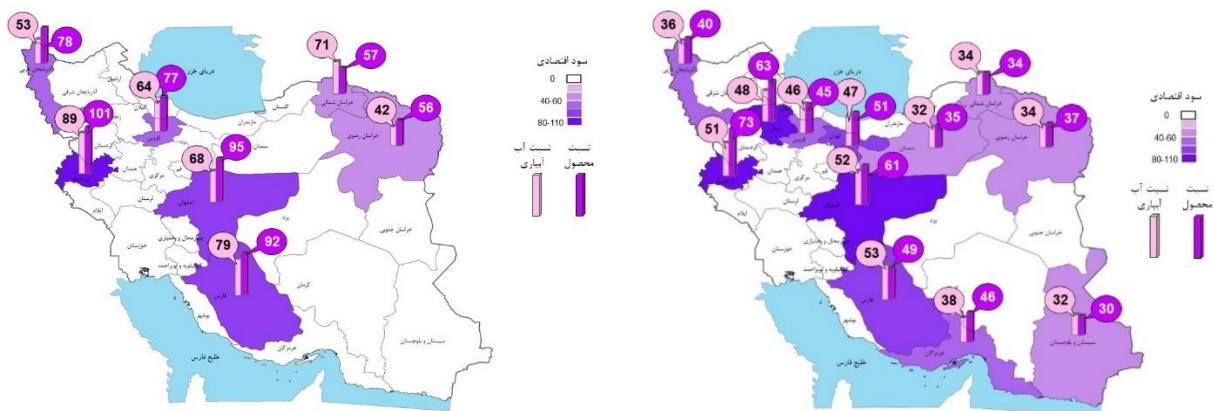
مقدار سود خالص محصولات کشاورزی بر اساس شاخص قیمت مصرف‌کننده در شهرهای مختلف طبق رابطه (۱۱) نسبت به سال ۱۴۰۱ به‌روزرسانی شده است. با داشتن مقدار سود (میلیون تومان)، مقدار آب آبیاری (میلی‌متر) و مقدار محصول تولیدی (تن بر هکتار) می‌توان موقعیت مناسب برای کشت هر محصول را اولویت‌بندی کرد. بنابراین، مقایسه نسبت‌های محاسبه‌شده برای مقدار محصول تولیدشده، مقدار میلی‌متر آب آبیاری استفاده‌شده و سود ریالی ناشی از دو حالت برنامه‌ریزی با اکوکراپ و حالت پتانسیل منجر به تولید اولویت‌های کشت برای محصولات مورد مطالعه شده است (جدول ۷). درصد ظرفیت کاشت محصول در شهرهای مختلف برای چهار محصول گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی و چغندر قند استفاده شد.



ب



الف



شکل ۳. مقایسه‌ی نسبت مقدار محصول، آب آبیاری و میزان سود اقتصادی در دو حالت برنامه‌ریزی و پتانسیل برای گیاهان (الف) گندم، (ب) ذرت علوفه‌ای، (پ) گوجه‌فرنگی و (ت) چغندر قند (شهرهای سفید رنگ، مناطق مطالعاتی این پژوهش نیستند)

با مقایسه‌ی این ۳ شاخص برای هر شهر، ترتیب اولویت‌بندی کشت محصولات در شهرهای مورد مطالعه به شرح زیر است.

جدول ۷. اولویت‌بندی کشت محصولات در شهرهای مختلف ایران به ترتیب از راست (مناسب‌ترین) به چپ (نامناسب‌ترین)

شهر	محصولات
مشهد	گندم، ذرت علوفه‌ای، چغندر قند
کرمانشاه	چغندر قند، ذرت علوفه‌ای، گندم
قزوین	ذرت علوفه‌ای، چغندر قند، گندم
شیراز	ذرت علوفه‌ای، چغندر قند، گوجه‌فرنگی
بجنورد	ذرت علوفه‌ای، چغندر قند، گندم
اصفهان	ذرت علوفه‌ای، چغندر قند، گندم
سمنان	ذرت علوفه‌ای، گندم، گوجه‌فرنگی
تهران	گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی
زنجان	گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی
ارومیه	چغندر قند، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی
بندرعباس	گندم، گوجه‌فرنگی
زاهدان	گندم، گوجه‌فرنگی

همچنین مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مکان کشت گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند در ۱۲ شهر انتخابی به ترتیب کرمانشاه (۶۵ درصد) و زاهدان (۳۱ درصد)؛ اصفهان (۱۰۳ درصد) و مشهد (۶۵ درصد)؛ تهران (۱۰۵ درصد) و زاهدان (۳۲ درصد)؛ کرمانشاه (۹۶ درصد) و مشهد (۱۴ درصد) می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۷ و شکل ۳، علل اولویت‌بندی محصولات کشت‌شده در بخش بعد تجزیه و تحلیل شده‌است.

بحث

در شکل ۲ مقایسه چهار منطقه مورد مطالعه (مشهد، بندرعباس، ارومیه و کرمانشاه) با اقلیم‌های متفاوت را برای آمار طولانی مدت

(سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که با توجه به نوسانات شدید آب‌وهوایی در کرمانشاه و بندرعباس، ریسک تولید محصول بالا و در نتیجه پایداری تولید محصول، پایین است. بالعکس، نوسانات ملایم در مشهد و ارومیه، ریسک تولید محصول نسبتاً پایین است. در مقایسه‌ی ارومیه با کرمانشاه (مناطق غربی کشور)، گرچه مقدار محصول تولیدشده در ارومیه نسبت به متوسط مقدار محصول کرمانشاه پایین‌تر است، با این حال به لحاظ پایداری احتمال تولید محصول بصورت پایدار، بالاتر خواهد بود. همچنین در مقایسه‌ی شهر بندرعباس با شهر مشهد (مناطق مرکزی و شرقی) مشخص می‌شود که در شهر بندرعباس، تولید محصولات با یک بازه نوسان گسترده‌تر نسبت به مشهد همراه است که نشان از متوسط مقدار تولید بیشتر در بندرعباس است. با این وجود، احتمالاً ریسک تولید محصولات در بندرعباس بیشتر و پایداری آن کمتر از مشهد است. علت این اختلاف را می‌توان به وجود نوسانات بارش در پیش‌نگری داده‌های اقلیمی مدل سیم‌هاید که با الگوبرداری از ۴۰ سال گذشته برای ۲۰ سال بعد اعمال می‌کند، ارتباط داد. ضمناً لازم به ذکر است تغییرات سطح ایستابی به دلیل استفاده از مدل اکواکراپ در این پژوهش، احتمال عدم قطعیت دارد.

چنانچه در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود، از نظر سود اقتصادی، محصول گندم در نوار شمالی کشور و شهر اصفهان دارای اولویت برتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که هماهنگی بین شاخص‌ها نشان می‌دهد که شاخص اقتصادی جایگزین مناسبی برای هر دو شاخص مقدار محصول و آب آبیاری است. شکل ۳-ب و پ نشان می‌دهد که کشت ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به لحاظ سود اقتصادی در مرکز و در غرب کشور دارای اولویت است. برای این محصولات کمینه شاخص مصرف آب و بیشینه شاخص مقدار محصول توسط شاخص اقتصادی قابل توضیح نیست و نیاز به استفاده از هر ۳ پارامتر برای تصمیم‌گیری می‌باشد. اولویت کشت برای چغندر قند در قسمت غرب نسبت به سمت شرق کشور، بیشتر است که توسط شاخص‌های نسبت محصول و سود اقتصادی تبیین می‌شود.

در شکل ۳ سه شاخص مقدار محصول، آب مصرفی و سود اقتصادی، محصولات گندم، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در کل کشور ایران در مقیاس کلان، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با توجه به این مقایسه، به نظر می‌رسد که ذرت با میانگین شاخص اقتصادی ۹۰ درصد بین شهرهای مورد مطالعه، به عنوان محصولی با بهترین عملکرد به لحاظ سود اقتصادی و مقدار محصول تولیدی معرفی شود. علت این امر را می‌توان در مقاومت ذرت نسبت به تغییرات اقلیمی و تنش‌ها جستجو نمود. همچنین، با توجه به مقایسه آب مصرفی، گوجه‌فرنگی با میانگین شاخص آب آبیاری ۴۰ درصد، به عنوان محصولی با شاخص مصرف آب کم معرفی شده‌است، که احتمالاً مربوط به دوره‌ی کشت کوتاه‌تر آن در مقایسه با سایر محصولات است و از این جهت به عنوان یک گزینه پایدار می‌تواند مطرح شود. بر اساس شاخص سود اقتصادی و مقدار محصول به منظور تعیین اولویت کشت محصولات در سطح ملی به ترتیب اولویت‌بندی ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی (با میانگین شاخص سود اقتصادی و مقدار محصول به ترتیب برای ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی ۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۵۰ درصد) پیشنهاد می‌شود. در زمینه مقایسه آب مصرفی نیز، اولویت‌های پیشنهادی گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر، و ذرت (با میانگین شاخص آب مصرفی به ترتیب برای گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر، و ذرت ۷۰، ۵۰، ۴۰ و ۷۰ درصد) می‌باشند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه، با هدف شناسایی بهترین نقاط برای کشت محصولات اصلی در ایران با توجه به نوسانات اقلیمی آینده و اهمیت تأمین غذا با در نظر گرفتن رشد جمعیت، انجام شد. صحت‌سنجی ناشی از مدل اکواکراپ برای محصولات چغندر ۸/۴ درصد، گوجه‌فرنگی ۸/۳ درصد، گندم ۶/۶ درصد، و ذرت ۶/۴ درصد محاسبه شد. درصد خطای زیر ۱۰ درصد، نشان از شبیه‌سازی قابل قبولی را می‌دهد. همچنین با مدل‌سازی هواشناسی MRI - ESM 0 - 2، خروجی‌های سمپ‌۶ در نرم‌افزار سیم‌هاید برای ۲۰ سال آینده استخراج شد. در نهایت، با تحلیل و بررسی مقادیر میانگین تولید محصولات با استفاده از داده‌های تاریخی، برای گندم، بیشترین مقدار تولید در اصفهان و کمترین مقدار تولید در زاهدان، بیشترین مقدار تولید چغندر قند در ارومیه و کمترین مقدار آن در بجنورد، ذرت علوفه‌ای با

بیشترین مقدار تولیدی در اصفهان و کمترین آن در مشهد، و گوجه‌فرنگی با بیشترین مقدار در زنجان و کمترین مقدار تولیدی در زاهدان مشخص شد. برای یافتن بهترین مکان کشت بین محصولات مختلف در شهرهای متفاوت نسبت به حالت برنامه‌ریزی با اکوکراپ و حالت پتانسیل هر محصول، از ارزش ریالی محصولات و هزینه آب مقادیر پتانسیلی استفاده شد.

در ۱۲ شهر انتخابی بهترین و ضعیف‌ترین مکان کشت گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند به ترتیب کرمانشاه و زاهدان، اصفهان و مشهد، تهران و زاهدان، کرمانشاه و مشهد اولویت‌بندی شد. با یافتن مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مناطق کشت محصولات توصیه می‌شود، شهرهایی که شاخص‌های بهتری دارند، از نظر کشت محصول در اولویت قرار گیرند. همچنین توصیه می‌شود از کشت در شهرهایی که دارای ضعیف‌ترین شاخص‌ها هستند، اجتناب شود (یا می‌توان دنبال محصول جایگزین بود). در نتیجه به منظور پیش‌بینی میزان بیشینه و کمینه و مقدار بارش و در نتیجه برآورد مقدار محصول خشک در هر هکتار می‌توان ترکیبی از مدل‌سازی توسط اکوکراپ و مدل هواشناسی MRI - ESM 0 - 2 برای اقلیم‌های متفاوت ایران، استفاده کرد. این ابزارها با بهره‌گیری از آنالیز دقیق می‌توانند به مدیریت بهینه منابع کمک کرده و تا به بهترین نحو از شرایط موجود استفاده شود. گرچه در این تحقیق سعی شده است تا نقاط ضعف به حداقل رسانده شود، اما باید بپذیریم که این مطالعه تنها یک جزء محدود از حوزه‌های بی‌پایان علمی است. از این رو جهت بهبود کیفیت این تحقیق، بکارگیری نمونه‌های بیشتری از محصولات کشاورزی برای ارزیابی صحت مدل سیم‌هاید، ایجاد مدل جایگزین برای تخمین عکس‌العمل اکوکراپ‌ها از جمله مدل‌های شبکه‌ی عصبی در مناطق با تغییرات دمایی زیاد مثل یزد و اردبیل و اعمال سیاست‌های مدیریتی متفاوت برای شهرهایی با پتانسیل کشت بالا، پیشنهادات می‌شود. در نهایت می‌توان ذکر نمود که پژوهش حاضر می‌تواند از لحاظ فرهنگی و اجتماعی و رفتارهای کشاورزان بر الگوی کشت نیز مورد تحقیق قرار گیرد.

منابع

- انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد و فرخ نیا، اشکان. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل های CMIP ۶. *مجله پژوهش آب/ایران*، ۱۶(۱) (پیاپی ۴۴)، ۲۴-۱۱.
- جرعه نوش، محمدهادی، برومندنسب، سعید، ناصری، عبدالعلی، پاک پرور، محتبی، و تقواییان، صالح. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل اکوکراپ در شبیه سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۹(۱)، ۹۵-۱۰۷.
- رمضانی اعتدالی، هادی؛ و صفری، فاطمه. (۱۴۰۲). ارزیابی تاثیر روش‌های مختلف برآورد ETO در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی و زیست‌توده گندم با مدل اکوکراپ. *آب و خاک*، ۳۷(۱)، ۱-۱۴.
- زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برونداد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). *فیزیک زمین و فضا*، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.
- سعادت، زهرا؛ دلبری، معصومه، پناهی، مهدی، و امیری، ابراهیم. (۱۳۹۷). شبیه سازی رشد چغندر قند تحت تنش آبی با استفاده از مدل AquaCrop. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۷(۳)، ۱-۱۸.
- هوشمند، دل آرام، اسماعیلی، کاظم، فریدحسینی، علیرضا، ثنایی نژاد، سیدحسین، و خلیلی، داور. (۱۳۹۸). شبیه سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل های گزارش ارزیابی پنجم تحت سناریوهای RCP بر منابع آبی حوضه ی آبریز سد سلمان فارسی. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۲)، ۲۴۳-۲۵۸.

Alishiri, R., Paknejad, F., Aghayari, F. (2014). Simulation of sugarbeet growth under different water regimes and nitrogen levels by Aqua crop. 4. 1-9. 10.12692/ijb/4.4.1-9.

Andarzian, B. & Bannayan, Mohammad & Steduto, Pasquale & Mazraeh, Hamed & Barati, Mehdi & Barati, M. & Rahnama, Amir. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Fuel and Energy Abstracts*. 100. 1-8. 10.1016/j.agwat.2011.08.023.

Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M.j., Farokhnia, Ashkan. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 11 to 24. (In Persian).

Bao, Y., Hoogenboom, G., Mcclendon, R., & Vellidis, G. (2017). A comparison of the performance of the CSM-CERES-Maize and EPIC models using maize variety trial data. *Agricultural Systems*, 150, 109-119. doi: 10.1016/j.agsy.2016.10.006.

Bleischwitz, C., Spataru, R., VanDeveer, C., Obersteiner, S.D., Van, E., Johnson, D. P., Andrews-Speed, P., Boersma, P., Hoff, H., & van Vuuren, M. (2018). Resource Nexus Perspectives towards the UN Sustainable Development Goals, *Nature*, 1. 737 - 743

Chamas, Z., Abou Najm, M., Al-Hindi, M., Yassine, A., & Khattar, R. (2021). Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123894. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123894.

Cheng, Kun & Wei, Shuai & Ren, Yongtai & Fu, Qiang. (2021). Optimal Allocation of Agricultural Water Resources under the Background of China's Agricultural Water Price Reform—a Case Study of Heilongjiang Province. *Applied Mathematical Modelling*. 97. 10.1016/j.apm.2021.04.019.

Etedali, H. R., & Safari, F. (2023). Evaluation of the Influence of Different ET₀ Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model, 37(1), 1–14. (In Persian).

FAO. (2012). Coping with water scarcity An action framework for agriculture and food security.

FAO. (2022). The future of food and agriculture: Drivers and triggers./ *The state of food and agriculture*.

FAO. (2022). The future of food and agriculture: Drivers and triggers./ *The state of food and agriculture*.

Fu, C., & Sayed, T. (2022). Bayesian dynamic extreme value modeling for conflict-based real-time safety analysis. *Analytic methods in accident research*, 34, 100204.

Garcia-Vila, M., Morillo-Velarde, R., & Fereres, E. (2019). Modeling sugar beet responses to irrigation with AquaCrop for optimizing water allocation. *Water (Switzerland)*, 11(9). doi: 10.3390/w11091918.

Hargreaves, George & Allen, Richard. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce*. 129. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53).

Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaei Nejad, S. H. & Khalili, D. (2018). Simulation of Climate Change Impacts Using Fifth Assessment Report Models under RCP Scenarios on Water Resources in the Upper Basin of Salman Farsi Dam. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, ۲۴۳-۲۵۸ ،(۲)۱۳ <https://sid.ir/paper/131746/fa>. (In Persian).

Jiménez, B., Oki, T., Arnell, N., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S. (۲۰۱۴). Freshwater resources. In: Climate Change ۲۰۱۴: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. *Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. ۲۲۹-۲۶۹

Jorenush, M.Hadi., BoroomandNasab, S., Naseri, A., Pakparvar, M., Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and planting date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management*, ۹۵-۱۰۷. (In Persian).

Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2023). Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus framework. *Science of the Total Environment*, 860, 160419. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160419

Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.005.

Mize, J.H., Cox, J.G. (1968). *Essentials of simulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. New York, U.S.A.

Mizik, T. (2021). The Performance of the Agri-food Sector in the Recent Economic Crisis and during Covid-19 Pandemic. *HighTech and Innovation*, 2(3), 168-178.

Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16–24. doi: 10.1016/j.agwat.2012.03.009.

Nie, T., Tang, Y., Jiao, Y., Li, N., Wang, T., Du, C., Zhang, Z., Chen, P., Li, T., Sun, Z., & Zhu, S. (2022). Effects of Irrigation Schedules on Maize Yield and Water Use Efficiency under Future Climate Scenarios in Heilongjiang Province Based on the AquaCrop Model. *Agronomy*, 12(4), 810. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040810>

Pereira, L. S. (2017). Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. *Water Resources Management*, 31(10), 2985-2999. doi: 10.1007/s11269-017-1664-z

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. (200۹), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron. J.*, 101: 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. “*CMhyd User Manual Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*,” ۲۰۱۶

Saadati, Z., Delbari, M., Panahi, M., Amiri, E. (2018). Simulation of sugar beet growth under water stress using AquaCrop model. *journal of water and soil resources conservation*, ۱-۱۸، (۳)۷. (In Persian).

Schaap, Marcel & Leij, Feike & Van Genuchten, Martinus. (2001). ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251. 163-176. 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.

Sundmaeker, H., & Verdouw, C., & Wolfert, S., & Pérez-Freire, L. (2016). *Internet of Food and Farm 2020*, 129–151. DOI:10.1201/9781003337966-4.

Vanuytrecht, E. & Hsiao, T. & Fereres, E. & Heng, Lee & García-Vila, Margarita & Mejías, Patricia. (2014). AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*. 62. 10.1016/j.envsoft.2014.08.005.

Vuković, A J., Vujadinović, M. P., Rendulić, S. M., Djurdjević, V. S., Ruml, M. M. and Babić, V. P. "GLOBAL WARMING IMPACT ON CLIMATE CHANGE IN SERBIA FOR THE PERIOD 1961-2100 by," vol. 22, no. 2, pp. 2261-2280, 2018

Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, Sh., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., Adachi, Y. (2020). MRI MRI-ESM2-0 model output prepared for CMIP6 DCP. *Version 2020 Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.630>

Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of The coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 46, No. 3, Autumn 2020, P. 10. (In Persian).

Assessment of Suitable Areas for Cultivation of Wheat, Corn, Sugar Beet, and Tomato in Various Climates of Iran Considering the Climate Change Effects Using AquaCrop model

Abstract

Choosing suitable crops for cultivation in each region, considering the resilience of the agricultural system and water conditions, is a vital aspect in formulating the country's agricultural strategy and requires meticulous planning. The research carefully examines choosing the right crops for different places, considering how well the farming system can handle challenges and the availability of water. The main goal is to create a detailed plan for finding the best areas to grow tomatoes, wheat, forage corn, and sugar beets in 11 specific locations in Iran, while considering climate changes from 1980 to 2020. Utilizing the Aqua Crop model for plant simulations, the study achieved validation errors of 4.8 percent, 3.8 percent, 7.7 percent, and 4.7 percent for sugar beets, tomatoes, wheat, and forage corn, respectively. The model consistently demonstrated an average simulation error below 10 percent. Future crop production predictions were derived from climate data sourced from the MRI-ESM v2 weather modeling software. Comparative indices to decide which crops are best for each city and prioritize them, considering mass, product price, and irrigation water depth. The study highlights the best and worst locations for cultivating tomatoes, forage corn, wheat, and sugar beets as Kermanshah and Zahedan, Isfahan and Mashhad, Tehran and Zahedan, and Kermanshah and Mashhad, respectively.

Keywords: *Aquacrop, crop production forecasting, Cmhhd, plant modeling.*

Assessment of Suitable Areas for Cultivation of Wheat, Corn, Sugar Beet, and Tomato in Various Climates of Iran Considering the Climate Change Effects Using AquaCrop model

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

The pivotal task of selecting crops for a country's agricultural strategy, considering resilience and water conditions, demands meticulous planning. This study delves into the assessment of spatial potential for cultivating tomatoes, wheat, forage corn, and sugar beet across 12 diverse points in Iran. These locations include Mashhad, Kermanshah, Qazvin, Shiraz, Semnan, Zanjan, Zahedan, Tehran, Bandar Abbas, Bojnourd, Isfahan, and Urmia. The geographical spread encompasses a variety of climate conditions, and the analysis spans the years 1980 to 2020. This comprehensive approach aims to provide a nuanced understanding of the agricultural landscape in these key regions, guiding strategic decisions for sustainable crop cultivation.

Materials and Methods:

By employing the Hargreaves–Samani equation, Rosetta pedotransfer model, and NetWat, our study intricately calculates daily reference evapotranspiration, soil characteristics, and irrigation water planning. The comprehensive approach involves utilizing the AquaCrop model to formulate dry product quantities, which are then rigorously validated against data from the Ministry of Agriculture Jihad. The comparison of measured values with AquaCrop-modeled dry yields results in validation error rates of 4.8 percent for sugar beet, 3.8 percent for tomatoes, 6.6 percent for wheat, and 4.6 percent for corn. On average, the model showcases an impressive simulation accuracy of 90 percent, with an overall error rate remaining below 10 percent. To forecast future crop yields, we leverage climate data from the meteorological model MRI-ESM 0-2 with CMIP6 outputs, obtained through the CMhyd software.

Results and Discussion:

Analyzing both modeling and historical data unveils considerable variations in production levels for wheat, sugar beet, forage corn, and tomatoes across different cities. The prioritization, based on factors like crop mass, irrigation water depth, and monetary value, provides valuable insights into identifying the most and least suitable locations for each crop. This process aids in efficient resource management and informed decision-making, offering crucial guidance for agricultural and environmental experts. By evaluating the highest and lowest production levels in cities such as Isfahan, Zahedan, Urumieh, Bojnord, Mashhad, and Zanjan, the study explores a comprehensive perspective on crop cultivation dynamics. The utilization of three indices—crop mass, irrigation water depth, and monetary value—enhances the accuracy of comparisons, ensuring a nuanced understanding of the planning required for cultivating various crops in different cities. The prioritization achieved in this research not only optimizes resource management but also underscores the importance of sustainable practices for the preservation of vital resources.

Conclusions:

The research, by emphasizing the importance of comprehensive studies, not only contributes to national food security but also plays a pivotal role in ecosystem preservation. The prioritization process, a key outcome of this study, significantly enhances efficient resource management, providing substantial support for the principles of sustainable agriculture. This research serves as

a guiding beacon for agricultural and environmental experts, empowering them with precise planning insights for cultivating crops optimally. The identified gap in existing research endeavors, considering multifaceted aspects, accentuates the urgency of undertaking such investigations. The holistic approach proposed in this study is not just essential but imperative for safeguarding national food security and ensuring the preservation of ecosystems. By addressing these critical aspects, the research paves the way for a sustainable future, where prudent decision-making aligns with the long-term well-being of both agriculture and the environment.

Keywords: *Aquacrop, crop production forecasting, Cmhyd, plant modeling.*

فیلد انجمنی
فیلد انجمنی