Development of the framework of an irrigation management optimization model considering crop rotation

Abstract

In arid and semi-arid countries such as Iran, the uneven spatial and temporal distribution of rainfall necessitates a reliance on irrigated agriculture for food production. Consequently, a substantial portion of water resources in these areas is devoted to agricultural use. Identifying strategies that reduce water consumption and enhance its efficiency in agriculture is, therefore, a top priority. This study employs crop rotation as a key variable in an optimization framework to calculate a matrix of impact coefficients based on insights from expert farmers. The entries of this matrix quantify the impact coefficients of sequential crop planting. The impact coefficient of crop rotation is integrated into a water allocation optimization model designed to maximize economic profitability, utilizing a genetic algorithm and the AquaCrop plug-in program. For this purpose, C# coding within the framework of Visual Studio was carried out to optimize three-, four-, five-, six-, and seven-year rotations with wheat, soybean, tomato, potato, corn, alfalfa, barley, and sugar beet. Moreover, the impact of crop rotation on crop yield and water allocation as well as the expected profitability per unit area was assessed using a valuation formula. Rotation Optimization results indicated that the four-year rotation yielded (sugar beet, corn, potato, tomato) the highest economic profit and the seven-year rotation emerged as the most effective in reducing allocated water volume (9.45%). Therefore, crop rotation optimization is a significant parameter for enhancing crop yield, boosting profitability, and achieving long-term water savings.

Keywords: *AquaCrop, Economic Profitability, Deficit irrigation, Genetic Algorithm*

توسعه چارچوب یک مدل بهینه‌سازی مدیریت آبیاری با نظر گرفتن تناوب زراعی

چکیده

در کشورهای خشک و نیمه خشک مانند کشور ایران به دلیل پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی، تولید مواد غذایی با تکیه بر کشاورزی فاریاب صورت می‌گیرد و بخش زیادی از منابع آبی این اقلیم‌ها، به کشاورزی اختصاص دارد. لذا انتخاب راهکارهایی که باعث کاهش مصرف شده و استفاده بهینه آب در این بخش را به دنبال داشته باشد، اولویت دارد. به این منظور در این پژوهش، از تناوب زراعی به‌عنوان عامل مؤثر در معادله بهینه‌سازی، برای محاسبه ماتریس ضریب تأثیر تناوب کشت، از نظر کشاورزان خبره از طریق پرسشنامه استفاده شده است. درایه‌های این ماتریس، ضرایب تأثیر کشت هر محصول پس از محصول دیگر را نشان می‌دهد. ضریب تأثیر تناوب در مدل بهینه‌سازی تخصیص آب با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی، برمبنای الگوریتم ژنتیک و استفاده از مدل گیاهی AquaCrop plug- in ارائه شد. برای این منظور کدنویسی سی شارپ (C#) در محیط Visual Studio برای بهینه‌سازی تناوب‌های سه، چهار، پنج، شش و هفت ساله با محصولات گندم، سویا، گوجه فرنگی، سیب زمینی، ذرت، یونجه، جو و چغندرقند در یک مطالعه موردی تحلیلی انجام شد. همچنین اثر تناوب کشت بر عملکرد محصول و تخصیص آب بر میزان سود مورد انتظار از واحد زراعی توسط یک معادله ارزشیابی بررسی شد. نتایج بهینه‌سازی تناوب‌ها نشان داد بهترین سود اقتصادی محاسبه شده مربوط به تناوب چهار ساله (چغندرقند، ذرت، سیب زمینی و گوجه فرنگی) است. همچنین بهینه‌ترین تناوب برای کاهش حجم آب تخصیص یافته برای تناوب هفت ساله بود که به میزان ۹/۴۵ درصد کاهش یافت. لذا بهینه‌سازی تناوب زراعی، پارامتری مؤثر در میزان عملکرد محصولات مختلف، افزایش سود و صرفه‌جویی آب در درازمدت می‌باشد.

واژگان کلیدی: *اکوکراپ، الگوریتم ژنتیک، سود اقتصادی، کم آبیاری .*

.

ویراستاری نشده

مقدمه

افزایش تقاضا برای مواد غذایی و کاهش بازده محصولات کشاورزی ، یک چالش بزرگ در مقیاس ملی و جهانی است، (Davis et al.,2016) (Renard et al.,2019) ، لذا تخصیص معقول منابع آب برای برآوردن نیازهای غذایی بشر ضروری است (Miglietta et al, 2018).

چرخه کشاورزی و فنون کشاورزی پایدار، از زمان‌های بسیار دور در اختیار بشر بوده و به‌صورت جهانی در حال اجرا است. تغییر بین محصولات پوششی و محصولات فروشی (محصولاتی که هدف اصلی از کشت آن‌ها فروش و سودآوری است، نه مصرف داخلی مزرعه) به کاهش اثرات منفی کشاورزی فشرده (الگوی کشت بدون آیش) کمک می‌کند.تعیین برنامه بهینه چرخش محصولات نقدی–پوششی برای حداکثر سودزایی توسط پژوهشگران کشاورزی، اقتصاددانان، زیست‌شناسان و متخصصین کامپیوتر، مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، در طراحی استراتژی‌های کشاورزی یا کشت چرخشی، در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از بیماری‌ها، آفات، خشکسالی، سیلاب و اثرات ناشی از تغییرات آب‌وهوایی ضروری است.

تناوب زراعی، یک شیوه کشاورزی است که منجر به تقویت عناصر کلیدی تنوع زیستی، کاهش حمله بیماری‌ها و آفات و افزایش عملکرد تولیدی به مرور زمان می‌شود (Ose et al,2023). افزایش عملکرد به علت حفظ رطوبت، کاهش علف‌های هرز، دستیابی به عملکرد بالا، افزایش کارایی اقتصادی همراه با کاهش هزینه‌ها، استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی با بهره‌وری بیشتر و جلوگیری از فرسایش خاک است. لذا، نهادها باید استانداردهای مناسبی را برای حمایت از فناوری‌های تناوب زراعی توسعه دهند و از مشکلات جلوگیری کنند، به نحوی که کشاورزان بدانند چه اتفاقی پس از هر محصول در تناوب زراعی از سال گذشته به سال آینده افتاده است (Yu et al,2022).

مدل‌های گیاهی به‌عنوان ابزارهای اساسی در طراحی، ارزیابی توسعه و تولید محصول اهمیت زیادی دارند. با این حال، این مدل‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که پیچیدگی و محاسبات طولانی را به حداقل برسانند. در عین حال، مدل‌ها باید قادر به ارائه تحلیل‌های دقیق و مؤثر باشند تا به بهینه‌سازی فرآیندها و تصمیم‌گیری‌های مربوط به تولید محصول کمک کنند. در این رابطه، مدل Aqua Crop (Steduto et al, 2009)&(Raes et al., 2009) که به وسیله FAO ارائه شده دقت بالایی دارد و پیچیده نیست. علاوه‌براین، این مدل برای بیش از ۱۵ محصول در مکان‌های مختلف توسعه داده شده است. AquaCrop ابزار مؤثری است که می‌تواند با دقت قابل قبولی زیست توده کل و عملکرد نهایی را برای استراتژی‌های مختلف آبیاری شامل عدم تنش آبی تا تنش کم یا در برخی موارد تنش شدید آبی محاسبه و برآورد کند (Battilani,2006). لگوریتم ژنتیکی دارای ویژگی های متعددی هستند که به مسائل برنامه‌ریزی پاسخ می‌دهند. الگوریتم ژنتیک روشی قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی از نوع محدود و غیر محدود بر اساس انتخاب طبیعی است و همچنین در مسائل بهینه‌سازی هوش مصنوعی نیز استفاده می‌شود (Javadi et al, 2005). مفهوم این الگوریتم‌ها بهترین گزینه‌ها را با استفاده از روش ژنتیکی که از طبیعت استخراج شده انتخاب می‌کند، تا مکانیزم جستجوی قدرتمند را تشکیل دهند (Liang,2017; Ma,2020). از الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنیتیک برای بهینه‌سازی‌های مختلف از جمله برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود. الگوریتم ژنیتیک برای بهینه‌سازی در زمینه‌های متفاوتی ازجمله تخصیص زمین و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود (کیخامقدم و همکاران،۱۴۰۱). بهینه‌سازی مصرف آب موجب حفظ منابع آبی و افزایش کیفیت محصولات می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

در زمینه تأثیر تناوب زراعی بر خصوصیات خاک و مدیریت منابع، تحقیقات متعددی صورت گرفته است. سودائی‌زاده ، (۱۳۹۸) گزارش کردند که تناوب زراعی بر روی برخی از خصوصیات خاک مانند کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، ازت، فسفر، ماده آلی و هدایت

الکتریکی تأثیر گذاشته و تیمار یونجه آیش مخلوط، اثر اصلاحی بیشتری روی خصوصیات خاک مانند ازت و ماده آلی دارد، به‌طوری‌که این تیمار بیشترین درصد ازت و ماده آلی را به‌ترتیب به مقدار ۱/۲۵ و ۰/۷۷۳ داشت. همچنین Shrestha et al, (2021) به این نکته اشاره کردند که تناوب زراعی به‌عنوان یکی از رویکردهای مدیریت پایدار مزرعه، می‌تواند به بهبود مواد آلی خاک و کاهش فرسایش کمک کند. همچنین، این تناوب با مختل کردن چرخه زندگی آفات و بیماری‌ها، نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش داده و مواد مغذی خاک را بازسازی می‌کند. لذا کشت متناوب یک فن مفید در کاربرد کشاورزی پایدار است. در مطالعه‌ای دیگر، Mullen et al, (2005) نتایج نظرسنجی خود بر انتخاب محصول و تخصیص مساحت در مزارع جورجیا گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که ۸۰ درصد از کشاورزان تناوب زراعی را به‌عنوان یکی از دو عامل مهم تأثیرگذار بر انتخاب محصولات خود رتبه‌بندی کرده‌اند و ۶۶ درصد از آن‌ها کشاورزی تناوب زراعی را به‌عنوان یکی از دو عامل مهم بر مدیریت تخصیص مساحت زمین خود رتبه‌بندی کرده‌اند. در پژوهش انجام‌شده توسط Alhameid et al, (2017) نشان می‌دهد که تناوب زراعی به‌طور قابل‌توجهی در کاهش فرسایش خاک، بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش بهره‌وری مصرف آب و مواد مغذی تأثیرگذار است. این تحقیق همچنین بر اهمیت تناوب زراعی در بهینه‌سازی مدیریت منابع طبیعی و ارتقای تولیدات کشاورزی تأکید دارد.

در زمینه استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، (Farahani, 2009 ; Garcia-vila, 2009) مدل Aqua Crop برای محصول پنبه تحت رژیم‌های آبیاری کامل و کم‌آبیاری در سوریه و اسپانیا را بررسی کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که این مدل توانایی خوبی در کالیبراسیون پارامترهای کلیدی تحت شرایط مختلف محیطی دارد. برای ارزیابی اثر تغییرات مقدار آب آبیاری((Geeta,2009; Heng ,2009; steduto, 2009 از مدل Aqua Crop برای کینوا، ذرت، آفتابگردان و ذرت استفاده دند. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، Aqua Crop یک مدل مناسب برای تحلیل سناریو است که تعادل خوبی بین استحکام و دقت نتایج فراهم می‌کند. در پژوهش دیگر، Salemi et al (2011) از مدل Aqua Cropبرای شبیه‌سازی عملکرد گندم و واکنش اجزای عملکرد به کم‌آبیاری در حوضه خشک رودخانه گاوخونی، ایران مرکزی استفاده کردند. آزمایش مزرعه‌ای برای سه فصل رشد انجام شد که نشاندهندهاین است که مدل Aqua Crop کالیبره شده در شرایط تنش آبی برای بر آورد عملکرد گندم زمستانه مناسب است.

در نهایت، Daxin et al, (2020) از الگوریتم بهینه‌سازی جهانی (EGA[1]) برای کالیبراسیون مدل AquaCrop استفاده کردند و دریافتند که این الگوریتم عملکرد مطلوبی در کالیبراسیون پارامترهای مربوط به ذخیره آب خاک و برآورد عملکرد ذرت و گندم ارائه می‌دهد.

در این پژوهش اثر عامل تناوب زراعی و تخصیص آب، بر میزان سود مورد انتظار به‌عنوان اقدام مدیریتی تأثیر گذار برای افزایش بهره‌وری و سود اقتصادی بررسی شد. به این منظور، یک مدل بهینه‌ساز تخصیص آب با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی بر مبنای الگوریتم ژنتیک و با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop plug- in توسعه داده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش با همراهی کشاورزان نمونه در خراسان رضوی و با تمرکز بر مزارع در محدوده شهر مشهد انجام شد. شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی با مساحت ۳۵۱ کیلومتر مربع در شمال‌شرق ایران در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه و در حوضه آبریز کشف‌رود، بین رشته‌کوه‌های بینالود و هزار مسجد واقع

[1] Elegent genetic algorithm

است. ارتفاع شهر از سطح دریا حدود ۱۰۵۰ متر (حداکثر ۱۱۵۰ متر و حداقل ۹۵۰ متر) است. اقلیم شهر مشهد نیمه‌خشک است، زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک از ویژگی‌های این اقلیم است. میانگین بارندگی سالانه در شهر مشهد حدود ۲۵۰ میلی‌متر است (اکبری و همکاران،۱۴۰۲).

گیاهان مورد استفاده

در این پژوهش از هشت گیاه گندم، سویا، گوجه فرنگی، ذرت دانه، سیب زمینی، جو، یونجه و چغندرقند برای استفاده در تناوب زراعی استفاده شد. این محصولات، شامل محصولات استراتژیک و محصولات پیشنهاده شده از سوی کشاورزان خبره هست.

تناوب زراعی

انتخاب ترکیب و تراکم کشت توسط کشاورزان به عوامل متعددی وابسته است که نه تنها سود ایشان را حداکثر میکند بلکه پایایی کشاورزی آن‌ها را نیز تضمین می‌کند. در این پژوهش اثر عوامل مؤثر بر اتخاذ تصمیم کشاورزان در انتخاب تناوب زراعی شناسایی شد و با کمک مدل آکواکراپ و بهینه‌سازی سعی شد ترکیب بهینه مورد نظر کشاورزان به‌دست آید.

تناوب زراعی روشی مرسوم و با قدمت بسیار بالا برای برخی اهداف شامل مبارزه با آفات (α_1)، کنترل علف‌های هرز (α_2) و حاصلخیزی خاک (α_3) است. برای کمی‌سازی این عامل (و زیر عوامل آن) پرسشنامه‌ای توسط کشاورزان خبره برای یافتن ضریب تأثیر تناوب تکمیل و تدوین شد.

تناوب زراعی از نظر مبارزه با علف‌های هرز، حفظ حاصلخیزی خاک و مبارزه با آفات نقش مهمی در عملکرد محصول دارد. در این پژوهش، برای اولین بار تأثیر تناوب زراعی از نظر ۳ عامل یادشده به‌صورت همزمان بر عملکرد محصول بررسی شد. به‌این‌منظور پرسشنامه‌ای به‌صورت جدول‌های (۱ و ۲) در اختیار 20 کشاورز قرار گرفت و از آن‌ها درخواست شد تا به‌ازای هر کشت در هر تناوب امتیاز مربوط به آن کشت براساس دسته‌بندی (عالی=۱/۸، خوب = ۱/۴، متوسط= ۱، ضعیف =۰/۶ و بد = ۰/۲) در ردیف‌های هر جدول مشخص شود. روش نمونه‌گیری انتخاب کشاورزان برای پرسشنامه (گلوله برفی) است (Kirchherr et al, 2018). پرسشنامه برفی نوعی تکنیک جمع‌آوری داده‌هاست که در آن پرسشنامه به‌صورت تدریجی به شرکت‌کنندگان بیشتری ارسال می‌شود. ابتدا از تعداد کمی از افراد شروع می‌شود و سپس این افراد دیگران را به مشارکت دعوت می‌کنند، تا به مرور تعداد شرکت‌کنندگان افزایش یابد.

جدول ۱. میانگین اعداد تأثیر تناوب زراعی بر گیاه از نظر مبارزه با آفات و بیماری‌ها ($\bar{\alpha}_1$) ، نظر مبارزه با علف هرز ($\bar{\alpha}_2$)، نظر حفظ حاصلخیزی خاک ($\bar{\alpha}_3$) (صراف زاده و همکاران،۱۴۰۱)

	کشت اول		
کشت دوم	I	J	N
I	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(i/i)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(i/j)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(i/n)}{p}$
J	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(j/i)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(j/j)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(j/n)}{p}$
N	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(n/i)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(n/j)}{p}$	$\{\bar{\alpha}_1,\bar{\alpha}_2,\bar{\alpha}_3\}=\frac{\sum\{a_1,a_2,a_3\}(n/n)}{p}$

P: تعداد کشاورزان خبره که پرسشنامه را تکمیل کردند.

درایه‌ها در جدول (۱) به شرح زیر است:

ویرایشگاری شده

درایه α(I,J)<1 نشان می‌دهد، کشت گیاه i بعد از گیاه j اثر منفی بر عملکرد گیاه j دارد.

درایه α(I,J)>1 نشان می‌دهد، گیاه i بعد از گیاه j اثر مثبت بر عملکرد گیاه j دارد.

درایه α(I,J)= 1 نشان می‌دهد، گیاه i بعد از گیاه j اثر خنثی بر عملکرد گیاه j دارد.

پر کردن جدول (۱) به‌گونه‌ای است که به تأثیر سه عامل مطرح شده به‌نحوی امتیاز داده شود که مجموع امتیاز سه عامل برابر ۱ شود. به‌عنوان نمونه، وقتی کشاورزی به عامل کنترل آفات و بیماری‌ها (c_{11})، عامل کنترل علف های هرز (c_{22}) و عامل حفظ حاصلخیزی خاک (c_{33}) به ترتیب ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۵ داده است، یعنی اثر عامل حفظ حاصلخیزی خاک در تناوب را بیشتر و پر رنگ تر از بقیه و با نسبت اختصاص داده شده، می‌داند.

به این ترتیب بر اساس نظر کشاورزان و با استفاده از جدول (۲)، یک ماتریس از پرسشنامه برای یافتن ضریب تأثیر تناوب با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آمد:

$$a = \overline{A_1} * C_{11} + \overline{A_2} * C_{22} + \overline{A_3} * C_{33} \quad (۱)$$

که در آن، میانگین اعداد تأثیر تناوب زراعی بر گیاه از نظر مبارزه با آفات و بیماری‌ها ($\overline{A_1}$) ، مبارزه با علف هرز ($\overline{A_2}$)، حفظ حاصلخیزی خاک ($\overline{A_3}$)، سهم امتیاز عوامل مؤثر بر تناوب زراعی از نظر کشاورزان (کنترل آفات و بیماری‌ها (c_{11})، عامل کنترل علف‌های هرز (c_{22}) و عامل حفظ حاصلخیزی خاک (c_{33})).

جدول ۲. نمونه ماتریس ضرایب تأثیر تناوب زراعی (صراف زاده و همکاران، ۱۴۰۱)

کشت اول			
کشت دوم	**I**	**j**	**N**
I	α (i/i)	α (i/j)	α (i/n)
J	α (j/i)	α (j/j)	α (j/n)
N	α (n/i)	α (n/j)	α (n/n)

از تقسیم اعداد به‌دست آمده از سطر و ستون‌های جدول‌های (۱ و ۲) بر تعداد کشاورزانی که پرسشنامه را پرکردند (P) درایه‌های ماتریس به‌دست می‌آید.

اکوکراپ [2]

از آخرین نسخه مدل AquaCrop (AquaCrop v 6.1) ۶,۱ که توسط سازمان خوار و بار جهانی (FOA) توسعه داده شده، به‌منظور سازی عملکرد محصول‌های پیشنهاد شده توسط کشاورزان خبره در دو حالت آبیاری کامل و کم آبیاری و کیفیت خاک استفاده شد. این مدل شبیه‌سازی گیاه–بهره‌وری آب است که بر اساس رابطه پاسخ عملکرد به آب مصرفی، به وسیله فائو (Steduted et al,2015)، تهیه شده است. در این مدل، شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده گیاهی در ارتباط با آب قابل دسترس گیاه بر پایه یک رابطه تجربی که توسط (Doorenbos_et al,1979)ارائه شده، پایه‌گذاری شد.

[2] **AquaCrop**

ویراستاری نشده

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی گیاهان از ۴ بخش فایل‌های ورودی مدل یادشده مربوط به داده‌های اقلیمی (شامل بارندگی، تبخیر و تعرق، غلظت دی اکسید کربن و ...)، داده‌های گیاهی (شامل ویژگی‌های محصول)، داده‌های مدیریتی (شامل مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری) و مشخصات خاک (بافت خاک، تعادل آب در خاک و شوری خاک) داده‌های اقلیمی، مشخصات گیاه، ویژیگی‌های خاک و استفاده شد .

عملکرد گیاه به‌عنوان محصول زیست توده گیاهی خشک از طریق شاخص برداشت تخمین زده می‌شود. این عمل از طریق تفکیک زیست توده گیاهی به بخش‌های عملکرد به کمک شاخص برداشت شبیه‌سازی می‌شود که از ویژگی‌های خاص این مدل است. از جنبه‌های خاص دیگر این مدل که آن را از سایر مدل‌هایی که کاربرد مشابه دارند متمایز میکند، استفاده از پوشش سایه‌انداز به جای شاخص سطح برگ است. و بر اساس روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است:

$$T_r = (Ks.Kc_{tr})ET_0 \quad (۲)$$

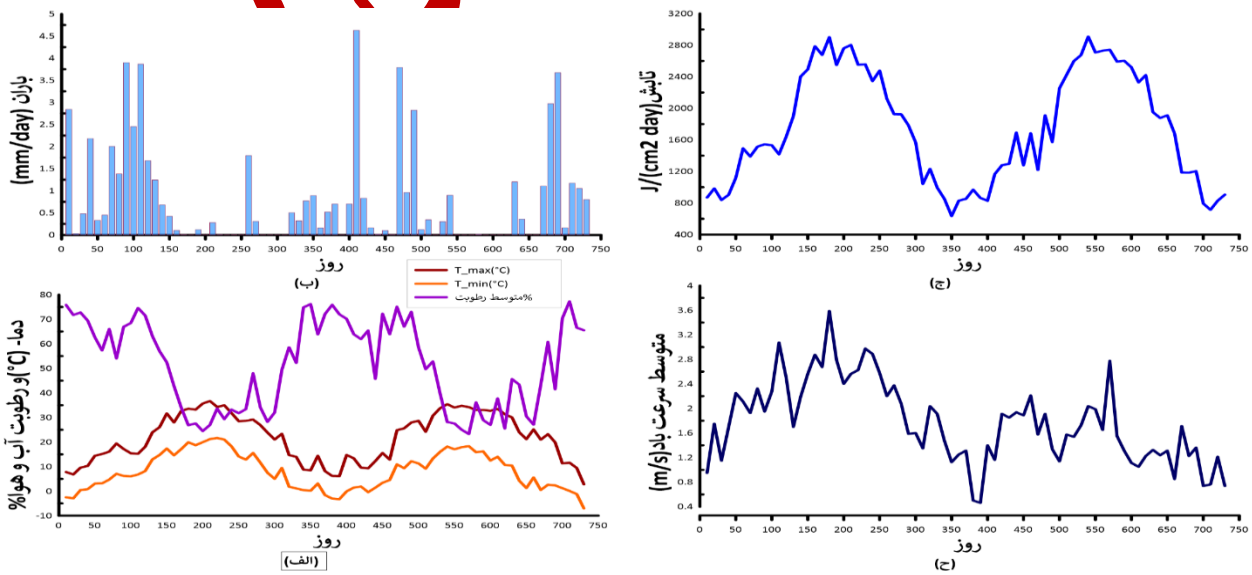
$$B_i = WP^*(\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}) \quad (۳)$$

که در آن‌ها: WP^* بهره‌وری آب که با نرمال کردن مناسب برای شرایط اقلیمی متفاوت مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود، Bi (زیست توده تهایی) عملکرد بیولوژیک، Tri تعرق روزانه و ET0,i تبخیر و تعرق روزانه، Ks ضریب تنش آبی و KcTR ضریب تعرق گیاه است.

اثر تنش آبی بر ماده خشک و شاخص برداشت نیز به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای محاسبه عملکرد و زیست توده، مدل از رابطه (۴) استفاده می‌کنند:

$$Y = HI * B \quad (۴)$$

که در آن: HI شاخص برداشت (طـی مرحلـه بلوغ فیزیولوژی) می‌باشد. لازم به ذکر است، در فایل‌های ورودی مدل اکواکراپ بخش داده‌های اقلیمی با الگوریتم مشابه با مدل ET_0 Calculator و با استفاده از روش فائو–پنمن مونتیث، تبخیر و تعرق مرجع محاسبه می‌شود. علاوه‌برآن سایر داده‌های ورودی مانند دمای کمینه و بیشینه روزانه، بارش روزانه، سرعت باد روزانه در ارتفاع ۲ متر، غلظت دی اکسید کربن موجود در جو، تابش خورشید و رطوبت نسبی هستند، در این پژوهش از اطلاعات ایستگاه هواشناسی استان خراسان رضوی سال (۱۴۰۰–۱۴۰۱) استفاده شد (شکل 1).



شکل 1. دادها اقلیمی: الف. تغییرات دما و رطوبت آب و هوا، (ب) –باران،(ج)– تابش و (ح) متوسط سرعت باد

ویراستاری

جدول ۳. مشخصات خاک (اکبری و همکاران،۱۴۰۱).

در صد ذرات خاک					در صد رطوبت حجمی		
عمق cm	شن %	رس %	سیلت %	بافت	وزن مخصوص ظاهری $g.cm^3$	هدایت هیدرولیکی $mm.day^{-1}$	نقطه اشباع $m^3.m^{-3}$	ظرفیت زراعی $m^3.m^{-3}$	نقطه بژمردگی $m^3.m^{-3}$
۰-۲۰	۵۱/۶۴	۱۹/۴۴	۲۸/۹۲	Loam	۱/۷۴	۴۹/۹۷	43	28	۸/۵
20-40	۵۴/۶۳	۱۹/۴۴	۲۶/۲	Sandy loam	۱/۳۵	۵۶/۱۸	۴۴/۶	۲۵/۵	۹/۳
40-60	54	۲۰/۴۴	۲۵/۵۶	Sandy clay loam	۱/۵۷	۲۶/۲۰	۴۳/۳	26	11
60-80	58	۱۵/۴۴	۲۶/۵۶	Sandy loam	۱/۵۵	۹۴/۱	45	۲۴/۴	9
80-100	۶۶/۳۶	۱۱/۴۴	۲۲/۲	loamy Sand	۱/۴۴	۸۱/۵۴	42	۲۶/۸	۱۰/۹

کم آبیاری یک استراتژی بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول هست و به نام‌های آبیاری بخشی و ناقص و آبیاری محدود نیز شناخته می‌شود. مطالعات کم آبیاری تعیین حد مجاز کاهش عملکرد بر حسب کاهش آب مصرفی و برآورد حد بهینه آن در شرایط مختلف برای مناطق خشک و کم آب امر ضروری به‌شمار می‌آید. کم آبیاری در افزایش سود و یا کیفیت تولید مواد غذایی به‌عنوان یک استراتژی ارزشمند مطرح می‌باشد. معمولا کم آبیاری به سه دلیل وقوع می‌یابد:

۱- با کاهش مختصر آبیاری امکان افزایش سطح کشت فراهم می‌آید، که با تحقق این امر انتظار می رود تولید محصول افزایش یابد.

۲- کم آبیاری به‌طور موقت به‌دلیل همزمان شدن نیاز آبی دو کشت مانند آخرین آبیاری گندم با اوایل کاشت چغندرقند در خراسان، در این حالت کم آبیاری به اختیار انتخاب می‌شود (الگوی کشت انتخاب شده) اما در زمان وقوع در هم کنش کم آبیاری اجباری و قوع می‌یابد.

۳- در تابستان (ایام گرم) با افزایش نیاز آبیاری به اجبار ممکن است کم‌آبیاری ضرورت یابد.

در این پژوهش درصد کم آبیاری کمتر از ۲۵٪ هست؛ لذا باید در هر دوره (d) (دور آبیاری لادهه/ماهانه) آب آبیاری با در نظر گرفتن راندمان (E) (نیاز آبیاری ناخالص) برای هر یک از محصولات بیشتر از کم آبیاری مجاز باشد. لذا مقدار آبیاری (IR) با در نظر گرفتن راندمان (E) در رابطه (۵ و ۶) تغییر می‌کند.

$$Irri_{i,d} = NetIrr\ /E \quad (۵)$$

$$0.80 \times Irri_{i,d,k} \leq IR_{i,d,k} \leq 1 \times Irri_{i,d,k} \quad (۶)$$

که در آنها: NetIrrii,d و NIRi,d به‌ترتیب نیاز آبیاری گیاه و عمق آبیاری گیاه i در دوره d است.

بهینه‌سازی

هدف از حل مساله تعیین الگوی کشت بهینه، انتخاب سبد محصولاتی است که با توجه به محدودیت‌های منابع آبی و اثر تناوب، حداکثر سود را به دست دهد. به‌عبارت‌دیگر، مسأله این است که چه محصولاتی با چه دوره تناوب و چه میزان آبیاری کشت شود به‌طوری که سود حاصل حداکثر شود. در این پژوهش پایایی کشاورزی (حاصلخیزی) مد نظر بوده است شکل (۲).

ویرایش اولیه

متغیرهای مسأله بهینه سازی، تناوب محصولات (α) ، میزان آبیاری (IR) و عملکرد محصول (Y)در معادله ۷ است. هدف از برنامه‌ریزی تخصیص آب کشاورزی، حداکثرسازی میزان بهره‌برداری از منابع آب در دسترس، بدون کاهش حاصلخیزی خاک و تضمین پایداری توسعه از طریق حفظ توان اکولوژیک منطقه و با پرهیز از تخریب محیط طبیعی است. به‌طورکلی، در فرآیند تخصیص باید تلاش شود تا خسارات ناشی از برداشت یا عدم برداشت آب، شناسایی و تعیین شود و بر اساس آن مقادیر بهینه برداشت مشخص شود.

جدول (۲) به دست آمده در قسمت تناوب زراعی، می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی برای پیدا کردن بهترین تناوب زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

برای ارزشیابی تناوب‌های زراعی مختلف پیشنهاد شده، از رابطه (۷) استفاده شد.

$$EU = \left\{\left(\sum_{k=1}^{m}(\alpha * Y_{i,k} \times Pr_i * A_{i,k} - C_i - IR_{i,k} \times Cw)\right)\right\} \quad (۷)$$

که در آن: Yi,k عملکرد هر محصول در هر دوره تناوب آن و خروجی مدل Aquacrop است، α ضریب تناوب زراعی EU ، مطلوبیت اقتصادی الگوی کشت پیشنهادی و خروجی مدل بهینه‌سازی است.Pri قیمت فروش هر محصول. متغیرهای تصمیم، میزان آبیاری (IRi,k) هر یک از محصولات انتخاب شده (برحسب ۱۰ میلی‌متر) در هر دوره تناوب و مساحت کشت هر تناوب (Aj) هستند که با تغییر آنها سود محصول تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مساحت محصولات داخل هر تناوب یکسان فرض خواهد شد. می‌توان بیان کرد هر تناوب یک محصول فرض شده است؛ اما اعمال کم آبیاری و برنامه آبیاری برای هر محصول باید مستقل از تناوب انجام شود. i و j به ترتیب شمارنده محصول و تناوب هستند. n تعداد محصولات و m نیز تعداد تناوبی است که در منطقه وجود دارد و کاربر باید تعیین کند؛ این تعداد تناوب می‌تواند ثابت باشد و یا حداکثر تعداد تناوب که انتظار دارد حاصل شود را انتخاب کند. Ci هزینه تولید هر محصول (ریال بر هکتار) ، Cw هزینه آب آبیاری برای هر محصول (ریال).

به منظور ارزیابی نتایج بهینه‌سازی کافی است الگوریتم ژنتیک برای داده‌هایی که نتایج آن قابل پیش‌بینی است، آزمون شود. لذا باید الگوریتم در حالت‌های زیر بررسی شود:

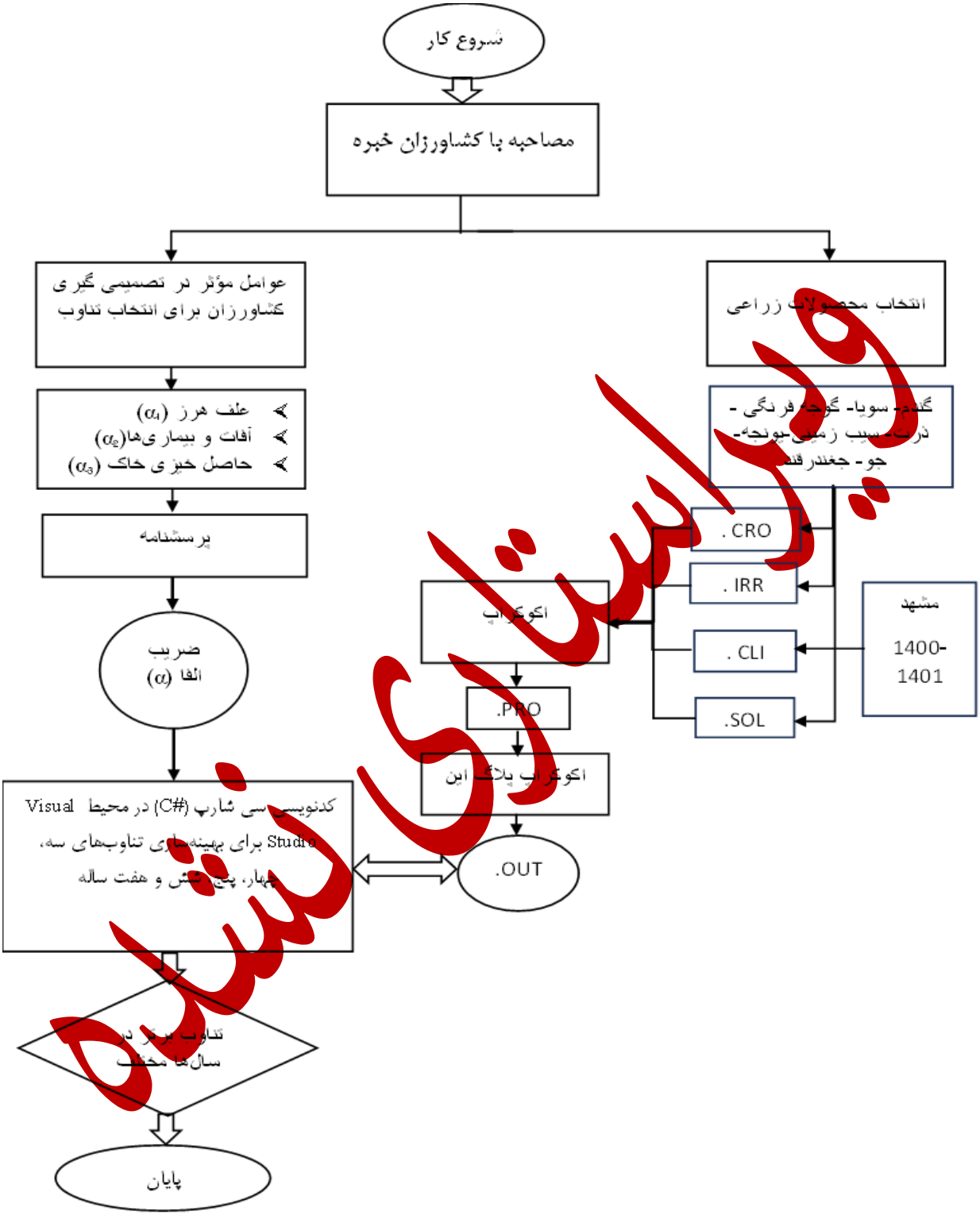
۱- آب هزینه‌ای نداشته باشد و سایر هزینه‌ها و قیمت همه محصولات یکسان باشد و تمام ضرایب یک فرض شوند، در این حالت الگوریتم باید محصولی را انتخاب کند که بیشترین عملکرد را دارد.

۲- تمام ضرایب یک فرض شوند و با در نظر گرفتن هزینه و قیمت یکسان برای کشت محصولات، در حالتی که عملکرد دو یا چند محصول یکسان باشد، الگوریتم باید محصولی را انتخاب کند که کمترین نیاز آبیاری را دارد. درحالتی که عملکردها یکسان نباشد، باید محصولی انتخاب شود که بیشترین عملکرد به ازای کمترین آب مصرفی را داشته باشد.

۳- برای بررسی اثر تناوب، فرض شود کشت محصول و آب هزینه‌ای نداشته باشد و هزینه فروش یکسان باشد، الگوریتم باید تناوبی را انتخاب کند که محصولات عملکرد بالاتری داشته باشند.

برای تعیین ترکیب کشت محصولات که حداکثر سود اقتصادی را دارند، به‌طوری‌که که محدودیت مربوط به موجودی آب در آن برقرار باشد، از یک مدل بهینه‌ساز تخصیص آب با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی، برمبنای الگوریتم ژنتیک برای تولید داده‌های آبیاری و تناوب محصولات استفاده شد. داده‌های آبیاری تولید شده به‌عنوان ورودی مدل استفاده شده و خروجی عملکرد محصولات از نرم‌افزار به‌دست آمد. برای بهینه‌سازی این چرخه از کدنویسی C# در محیط Visual Studio استفاده شد

ویراستاری نشده



شکل ۲. فلوچارت مدل بهینه‌سازی مدیریت آبیاری با نظر گرفتن تناوب زراعی

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از پرسشنامه تدوین‌شده برای بررسی اثر سه عامل اصلی در تناوب زراعی، شامل کنترل آفات، کنترل علف‌های هرز و حفظ حاصلخیزی خاک، ارائه شده است. این پرسشنامه برای هشت محصول (گندم– سویا– گوجه فرنگی– ذرت– سیب زمینی– جو –یونجه– چغندرقند) تکمیل شد. نمونه‌ای از پرسشنامه‌های تکمیل شده توسط کشاورزان درجداول (۴ تا ۶) ارائه شده است. در ضمن نظرات افراد خبره هم‌گرا بود و دارای نظرات پرت نبودند.

جدول ۴. تأثیر تناوب زراعی بر گیاه (عامل کنترل آفات)

	کشت اول							
کشت دوم	**گندم**	**سویا**	**گوجه فرنگی**	**ذرت**	**سیب زمینی**	**جو**	**یونجه**	**چغندرقند**
گندم	بد	عالی	خوب	متوسط	متوسط	ضعیف	عالی	عالی
سویا	عالی	بد	خوب	عالی	خوب	خوب	ضعیف	عالی
گوجه فرنگی	خوب	خوب	بد	خوب	ضعیف	خوب	عالی	عالی
ذرت	بد	عالی	عالی	بد	خوب	ضعیف	عالی	عالی
سیب زمینی	خوب	عالی	ضعیف	خوب	بد	عالی	عالی	متوسط
جو	ضعیف	عالی	خوب	متوسط	عالی	بد	عالی	عالی
یونجه	خوب	ضعیف	عالی	عالی	خوب	خوب	بد	عالی
چغندرقند	عالی	عالی	عالی	عالی	متوسط	عالی	عالی	بد

جدول ۵. تأثیر تناوب زراعی بر گیاه (عامل کنترل علف هرز)

	کشت اول							
کشت دوم	**گندم**	**سویا**	**گوجه فرنگی**	**ذرت**	**سیب زمینی**	**جو**	**یونجه**	**چغندرقند**
گندم	بد	خوب	متوسط	عالی	متوسط	ضعیف	متوسط	ضعیف
سویا	متوسط	بد	عالی	متوسط	عالی	ضعیف	عالی	عالی
گوجه فرنگی	متوسط	عالی	بد	متوسط	خوب	ضعیف	عالی	عالی
ذرت	عالی	ضعیف	ضعیف	بد	ضعیف	عالی	متوسط	ضعیف
سیب زمینی	متوسط	خوب	عالی	ضعیف	بد	ضعیف	خوب	عالی
جو	ضعیف	متوسط	ضعیف	عالی	ضعیف	بد	ضعیف	ضعیف
یونجه	خوب	عالی	خوب	متوسط	خوب	ضعیف	بد	عالی
چغندر	ضعیف	عالی	خوب	متوسط	عالی	ضعیف	عالی	بد

جدول ۶. تأثیر تناوب زراعی بر گیاه (عامل حفظ حاصلخیزی خاک)

	کشت اول							
کشت دوم	**گندم**	**سویا**	**گوجه فرنگی**	**ذرت**	**سیب زمینی**	**جو**	**یونجه**	**چغندرقند**
گندم	بد	عالی	خوب	ضعیف	خوب	بد	عالی	خوب
سویا	خوب	بد	خوب	خوب	خوب	خوب	بد	عالی

ویرایش شده

گوجه فرنگی	خوب	خوب	بد	خوب	خوب	خوب	خوب	عالی
ذرت	ضعیف	عالی	متوسط	بد	خوب	بد	عالی	عالی
سیب زمینی	خوب	خوب	متوسط	خوب	بد	عالی	خوب	متوسط
جو	بد	عالی	خوب	بد	خوب	بد	عالی	خوب
یونجه	خوب	ضعیف	خوب	خوب	عالی	خوب	بد	عالی
چغندرقند	خوب	خوب	خوب	خوب	متوسط	عالی	عالی	بد

در جدول (۷) باتوجه‌به ملاحظات اقتصادی برای عبارت توصیفی امتیاز تعیین شد (با فرض اینکه عبارت متوسط برابر با ۱ در نظر گرفته شود)

جدول ۷. ضریب توصیفی

عالی	خوب	متوسط	ضعیف	بد
۱/۶	۱/۳	۱	۰/۷	۰/۴

در جدول (۸) امتیاز مربوط به سهم هر یک از عوامل بر میزان اثر تناوب ارائه شده است. مجموع اعداد برابر ۱ است.

جدول ۸. سهم امتیاز عوامل مؤثر بر تناوب زراعی

مبارزه با آفات و بیماری‌ها	مبارزه با علف هرز	حاصلخیزی خاک	جمع
C_{11}	C_{22}	C_{33}	
۰/۳	۰/۲	۰/۵	1

ضرایب حاصل از هر پرسشنامه، با استفاده از میانگین اعداد خودش، نرمال‌سازی شده است. سپس از متوسط وزنی عوامل مختلف ضریب اثر تناوب به‌دست آمد که در قالب جدولی برای ترکیبات مختلف تمام محصولات به‌صورت دو به دویی تعریف شد و می‌تواند اعدادی بین صفر تا بیشتر از یک را بگیرد (جدول ۹).

جدول ۹. ضریب تأثیر تناوب زراعی بر عملگرد محصول

	کشت اول							
کشت دوم	**گندم**	**سویا**	**گوجه فرنگی**	**ذرت**	**سیب زمینی**	**جو**	**یونجه**	**چغندرقند**
گندم	۰/۵	۱/۴	۱/۳	۰/۹	۱/۲	۰/۶	۱/۵	۱/۴
سویا	۱/۳	۰/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۱	۱/۲	۰/۸	۱/۲
گوجه فرنگی	۱/۲	۱/۲	۰/۵	۱/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳
ذرت	۰/۶	۱/۴	۱/۱	۰/۵	۱/۲	۰/۹	۱/۵	۱/۳
سیب زمینی	۱/۳	۱/۵	۰/۹	۱/۲	۰/۵	۱/۴	۱/۴	۱
جو	۰/۶	۱/۵	۱/۳	۰/۷	۱/۴	۰/۵	۱/۴	۱/۴
یونجه	۱/۵	۰/۹	۱/۲	۱/۴	۱/۲	۱/۳	۰/۶	۱/۳
چغندرقند	۱/۴	۱/۵	۱/۲	۱/۲	۱	۱/۵	۱/۴	۰/۵

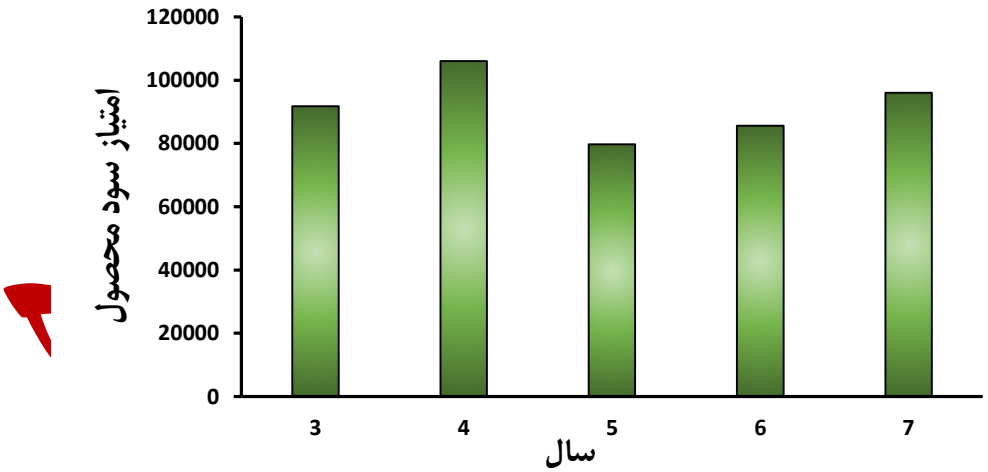
ویراستاری نشده

در جدول (۱۰) برنامه بهینه‌سازی، تناوب کشت بهینه محصولات برای دوره‌های سه کشت، چهار کشت ، پنج، کشت شش کشت و هفت کشت مورد بررسی قرار گرفت است. در جدول (۱۰) همه محصولات حداقل دو بار در تناوب‌های مختلف تکرار می‌شود و بیشترین تکرار محصول مربوط به گندم وسیب‌زمینی است. اما محصول سویا تنها در تناوب هفت ساله مشاهده می‌شود که کمترین تکرار را دارد. . همچنین، میزان سودآوری هر تناوب بر اساس قیمت فروش و هزینه تولید هر محصول و هزینه آب بر مبنای سال ۱۴۰۲ برای منطقه مشهد محاسبه شد. پس از آن، با استفاده از ضرایب تأثیر تناوب استخراج شده (جدول ۹) از نظر کشاورزان که اثرش بر عملکرد محصول تأثیر دارد و با استفاده از رابطه (۷) محاسبه و متوسط امتیاز هر تناوب به‌عنوان معیار انتخاب تناوب برتر در سال‌های مختلف قرار گرفت.

در شکل (۳)، تغییرات امتیاز سود محصول در پنج سال مختلف (از سال ۳ تا ۷) به وضوح نشان داده شده است. طبق داده‌های موجود، مشخص است که بالاترین امتیاز سود مربوط به تناوب چهار ساله است، در حالی که پایین‌ترین امتیاز سود در تناوب پنج ساله مشاهده می‌شود.

جدول ۱۰. بهینه‌سازی تناوب در سه، چهار،پنج، شش و هفت سال

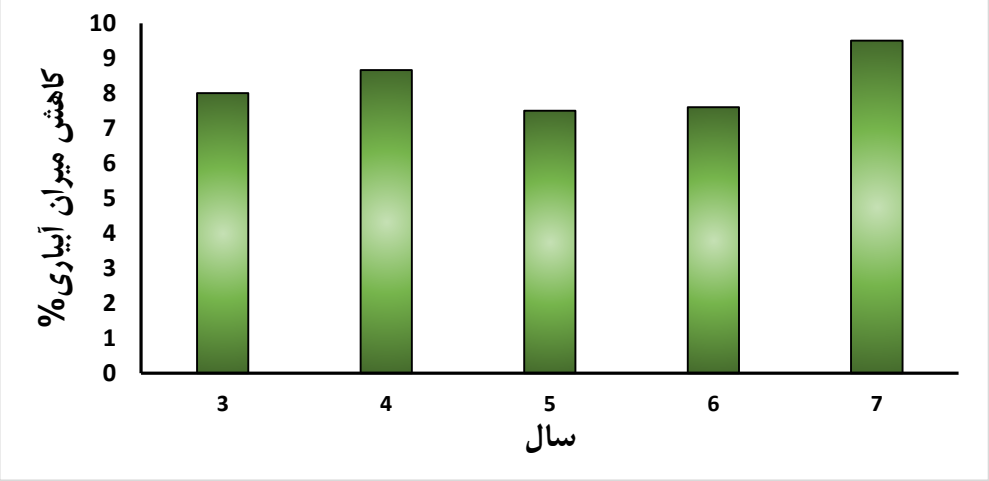
تناوب	محصولات							
سه ساله	گوجه فرنگی	گندم	سیب زمینی					
چهار ساله	چغندرقند	ذرت	سیب زمینی	گوجه فرنگی				
پنج ساله	گوجه فرنگی	جو	یونجه	گندم	سیب زمینی			
شش ساله	جو	یونجه	سیب زمینی	یونجه	گندم	گوجه فرنگی		
هفت ساله	یونجه	گندم	چغندرقند	سویا	گندم	سیب زمینی	ذرت	



شکل ۳. امتیاز سود به‌دست آمده از هر تناوب در سال‌های مختلف

در شکل (۴) بیشترین متوسط کاهش حجم آبیاری برای تخصیص آب بهینه در تناوب هفت ساله ۹/۴۵ درصد و کمترین متوسط کاهش حجم آبیاری برای تخصیص آب بهینه در تناوب پنج و شش ساله به ترتیب ۷/۵ و ۷/۶ درصد ارائه شده است.. این نتیجه‌گیری با نتایج پژوهش Ouda & Zohry,2015 مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند تناوب زراعی و کشت مخلوط می‌تواند برای حل مشکل

ناامنی غذایی از طریق افزایش بهره‌وری زمین کمک کند. علاوه‌براین، اجرای تناوب زراعی و کشت مخلوط می‌تواند به ذخیره بخشی از آب آبیاری و افزایش بهره‌وری آن منجر شود. آب ذخیره‌شده از این طریق می‌تواند برای توسعه کشت در مناطق جدید مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش ناامنی غذایی کمک کند.

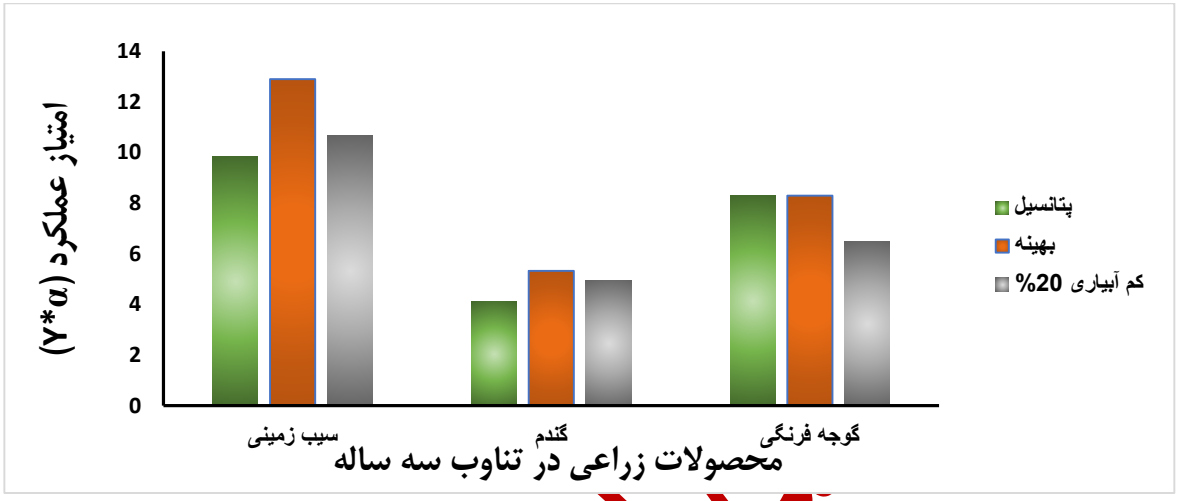


شکل ۴. مقدار کاهش آبیاری بهینه برای هر تناوب در سال‌های مختلف

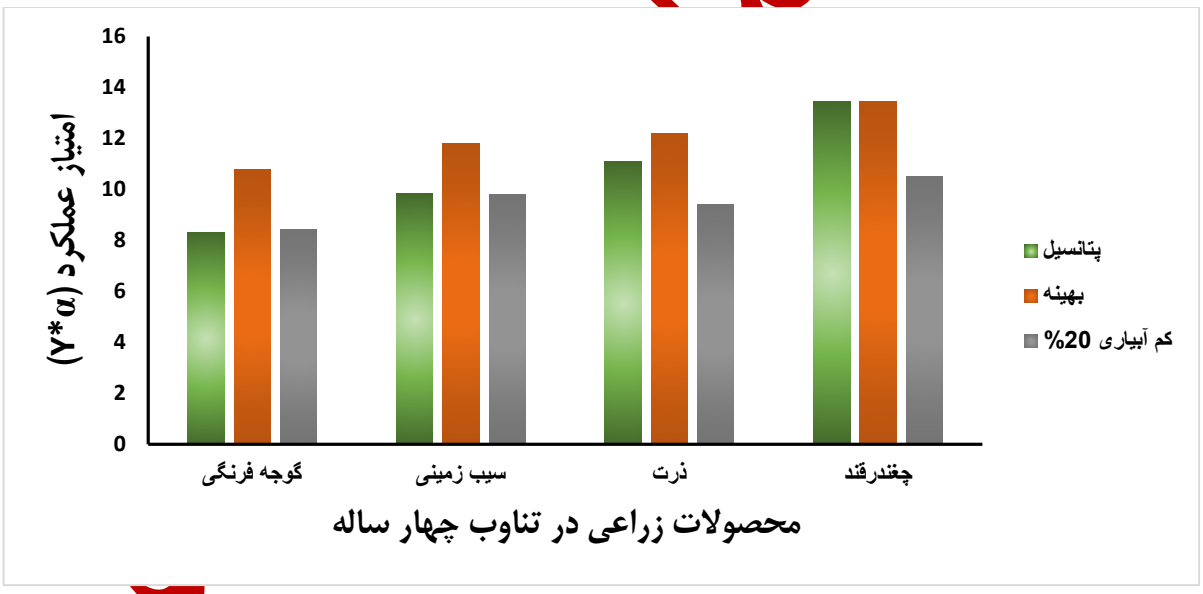
نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد محصولات در تناوب‌های مختلف نشان می‌دهد که میزان عملکرد هر محصول تحت تأثیر کشت قبلی قرار دارد. به‌طوری که در تناوب‌های مختلف در صورتی که محصول قبل از گندم، یونجه میزان امتیاز عملکرد گندم از ۴/۱۰ به ۶/۱۵ که معادل ۳۳/۳ درصد افزایش یافت (شکل 5 (پ،ح)، این نتیجه با نتایج پژوهش Li et al,2023 مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند تناوب زراعی یونجه باعث افزایش عملکرد محصول گندم می‌شود. در شکل (5–الف) مشاهده می‌شود اگر محصول قبلی گوجه فرنگی باشد، عملکرد گندم از ۴/۱۰ به ۵/۳۳ به میزان افزایش ۲۳/۰۸ درصد می‌شود که با نتایج پژوهش Ventrella et al,2012 مطابقت دارد. همچنین عملکرد گندم در صورتی‌که محصول قبلی سویا باشد، به میزان ۲۸/۵۷ درصد افزایش می‌یابد شکل (5–ح)، که با نتایج پژوهش Luiz et al,2022 هم‌خوانی دارد. بنابراین، تناوب زراعی باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود که این افزایش باعث بیشتر شدن سود حاصل از واحد زراعی می‌گردد. این نتیجه با نتایج پژوهش(صراف زاده و همکاران،۱۴۰۱) نیز هم‌راستا است.

مدل بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش قادر است کم‌آبیاری ۲۰ درصد را شبیه‌سازی کند (شکل(5)). در سال اول، به دلیل عدم دریافت امتیاز از محصول قبلی، تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد محصولات به‌وضوح مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش در امتیاز عملکرد پتانسیل (سبز رنگ) نسبت به کم‌آبیاری (خاکستری رنگ) در کشت سال اول مربوط به چغندرقند است که امتیاز آن از ۱۳/۴۶ به ۱۰/۵۰ کاهش یافته و به میزان ۲۲ درصد افت کرده است، و گوجه‌فرنگی که امتیاز آن از ۸/۳ به ۶/۵۰ کاهش یافته و به مقدار ۲۱/۶۹ درصد افت کرده است. (شکل ۵ (الف و ب)). اما اجرای تناوب زراعی باعث کاهش اثرات ناشی از کم‌آبیاری بر امتیاز عملکرد محصول می‌شود. به‌طوری‌که، کمترین کاهش امتیاز عملکرد بهینه محصول (قهوی رنگ) نسبت به عملکرد کم‌آبیاری (خاکستری رنگ) در مورد محصولات گندم و یونجه مشاهده می‌شود. به طوری که، امتیاز عملکرد گندم از ۵/۳۳ به ۴/۹۶ کاهش یافته و افتی معادل ۶/۹ درصد را نشان می‌دهد، و برای یونجه از ۱۱/۷۳ به ۱۰/۸ کاهش یافته و افتی به مقدار ۷/۹ درصد را نشان می‌دهد شکل ۵ (الف و ج))، این کاهش هنوز در محصولات مثل گندم، یونجه، سیب زمینی،جو و چغندرقند بالاتر از پتانسیل اولیه است، اما نسبت به شرایط بهینه کاهش یافته است. که با نتایج

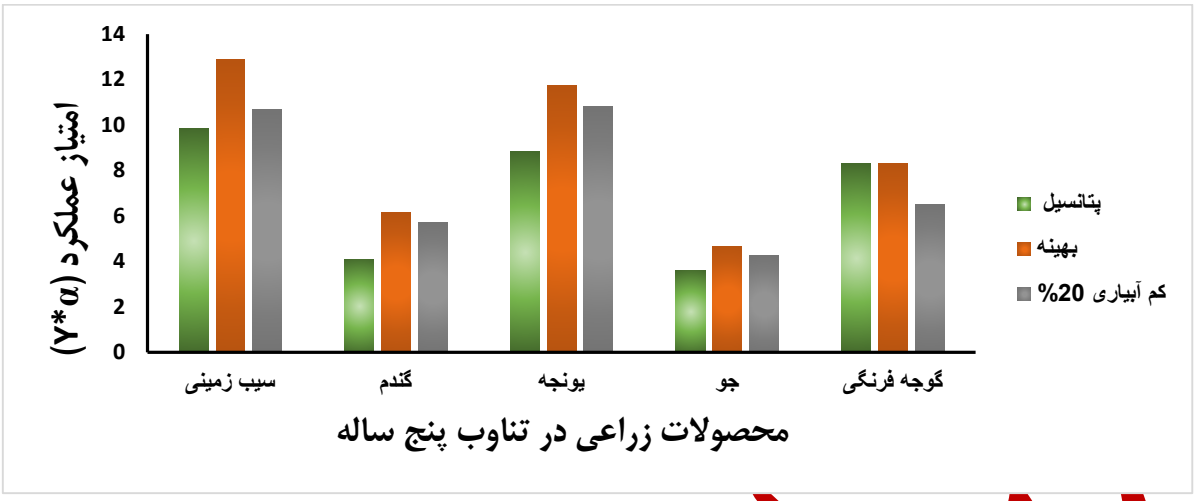
پژوهش Qin et al, 2018 مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند استفاده از آب محصول قبلی تأثیر مهمی بر دسترسی خاک به آب برای گندم زمستانه دارد که نقش مهمی در حفظ عملکرد این محصول تحت برنامه‌ریزی کم آبیاری داشت. همچنین بیشترین کاهش امتیاز عملکرد بهینه محصول نسبت به عملکرد ۲۰ درصد کم آبیاری محصول ذرت به میزان ۲۳ درصد در تناوب چهار ساله و ۲۲/۸ درصد در تناوب هفت ساله مشاهده شد (شکل ۵ (ب و ح)).



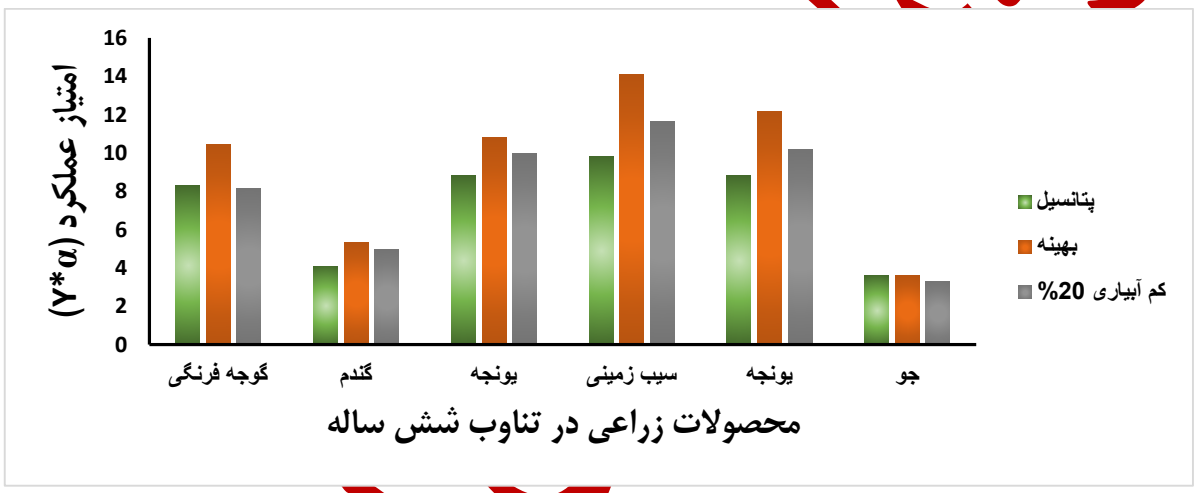
(الف)



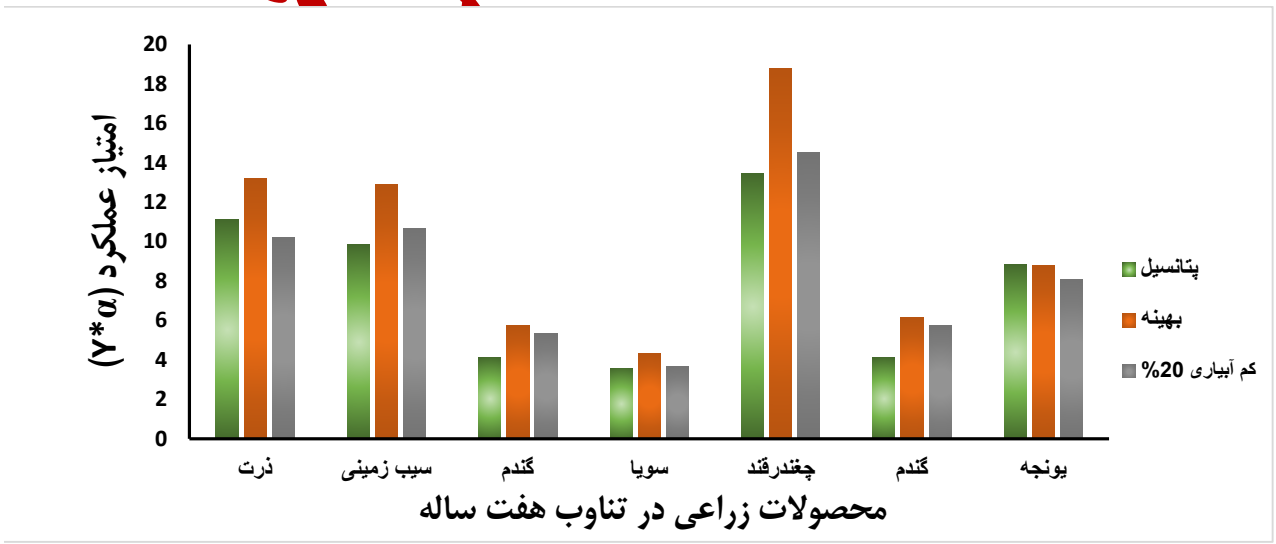
(ب)



(پ)



(چ)



(ح)

شکل ۵. امتیاز به‌دست آمده از عملکرد محصولات مختلف در تناوب‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور کاهش مصرف و استفاده بهینه آب، از تناوب زراعی به‌عنوان عامل مؤثر در معادله بهینه‌سازی، برای محاسبه ماتریس ضریب تأثیر تناوب کشت، با استفاده از نظر کشاورزان خبره استفاده شد. روش بهینه‌سازی توصیف شده، در این پژوهش برای محاسبه الگوی کشت بهینه و برنامه‌ریزی آبیاری برای هشت محصول گندم، جو، سیب زمینی، چغندرقند و یونجه به‌عنوان محصولات زمستانه، ذرت، گوجه فرنگی و سویا به‌عنوان محصولات تابستانه تحت شرایط آب و هوایی مشهد استفاده شد. این مدل تصمیم‌گیری اقتصادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد که تأثیر چرخه کشاورزی بر بازده اقتصادی در طول چند فصل رشد را در نظر می‌گیرد. برای منطقه مورد مطالعه، نتایج شبیه‌سازی شده این مطالعه نشان می‌دهند که محصولات گندم و سیب‌زمینی به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه‌ها در شرایط آب و هوایی مشهد شناسایی شدند، زیرا بیشترین تکرار را در تناوب‌های مختلف دارند. بر عکس، محصول سویا تنها یک بار در تناوب‌ها تکرار می‌شود بنابراین به‌عنوان گزینه‌ای کمتر مناسب در نظر گرفته می‌شود. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که تناوب چهار محصول چغندرقند، ذرت، سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی در یک دوره چهار ساله به‌عنوان بهترین تناوب از نظر امتیاز سود تعیین شده است.

در بررسی اثر تناوب زراعی بر عملکرد محصولات، نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند، تناوب زراعی و نوع محصول کشت شده در تناوب قبل به‌طور قابل توجهی بر عملکرد محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارند. به‌ویژه، کشت گندم پس از یونجه موجب افزایش ۳۳/۳۳ درصدی در عملکرد گندم می‌شود.

در بررسی اثر تناوب زراعی بر کم آبیاری محاصیل، نتایج نشان می دهد، اجرای تناوب زراعی به‌طور قابل توجهی تأثیرات منفی ناشی از کم‌آبیاری بر عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد. کمترین کاهش عملکرد بهینه به محصولات گندم با کاهش ۷ درصد تعلق دارد، در حالی که بیشترین کاهش عملکرد بهینه مربوط به محصول ذرت تحت شرایط کم‌آبیاری ۲۰ درصدی با کاهش ۲۳ درصدی مشاهده شد. لذا، اعمال ۲۰ درصد کم‌آبیاری برای محصول ذرت در منطقه مشهد توصیه نمی‌شود.

با توجه به نتایج بررسی و تحلیل‌ها، می‌توان نتیجه کلی این تحقیق تأکید می‌کند که انتخاب مناسب تناوب زراعی و مدیریت مؤثر آب می‌توانند به بهبود عملکرد محصولات کشاورزی و کاهش تأثیرات منفی کم‌آبیاری کمک کنند. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده تمرکز بیشتری بر بهبود روش‌های بهینه‌سازی، افزایش سرعت و دقت، و طراحی تابع‌های هدف پیشرفته برای مدل‌های کشاورزی صورت گیرد. این اقدامات می‌توانند به کارایی و سودآوری بهتر در کشاورزی و استفاده بهینه‌تر از منابع آب کمک کنند.

تشکر و قدردانی

"در پایان، از همه کسانی که در فرآیند نگارش این مقاله همکاری و حمایت کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. همچنین از دانشگاه فردوسی مشهد برای فراهم کردن امکانات علمی و تحقیقاتی لازم و پشتیبانی‌های ارزشمند قدردانی می‌کنم که نقش مهمی در انجام این تحقیق داشت".

" هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

ویراستاری نشده

منابع

اکبری، امیر.، نقی‌ضیایی، علی.، ناقدی‌فر، سید محمد رضا.، رضوانی‌مقدم، پرویز و غلامی‌شرفخانه، مهدی. (۱۴۰۱). بهبود برنامه‌ریزی آبیاری زعفران با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی گیاهی. *نشریت فناوری و زراعت زعفران*. ۱۱(۱)، ۵۳-۶۹.

سودائی‌زاده، حمید.، آدوین، سعید.، حکیمی، محمدحسین.، حکیم‌زاده، محمدعلی و هوشمندزاده، فاطمه. (۱۳۹۸). اثر تناوب زراعی بر برخی خصوصیات خاک در مناطق خشک (مطالعه موردی رکن آباد میبد). *مطالعات علوم محیط زیست*. ۴(۴)، ۲۰۵۶-۲۰۶۲.

صراف‌زاده، نسرین.، داوری، کامران.، نقی‌ضیایی، علی و انصاری، حسین. (۱۴۰۱). به گزینه الگوی گشت با بکار گیری اولویت های تناوب کشت و استفاده از مدل Aqua Crop با هدف حد اکثر سازی سود اقتصادی. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۳ (۳)،۵۴۳-۵۵۷.

کهخامقدم،پریسا.، نقی‌ضیایی، علی.، داوری، کامران.، کانونی، امین و صادقی،صدیقه. (۱۴۰۲). تخصیص بهینه آب و زمین در شبکه‌ی آبیاری مغان با ترکیب مدل گیاهی و الگوریتم ژنیتیک. *تحقیقات اب و خاک ایران*. ۵۳ (۱۲)، ۲۹۲۱-۲۹۳۵.

References

Akbari, A., Naghi Ziaei, A., Naghedifar, S.M., Rezvani Moghaddam, P., & Gholami Sharafkhane, M. (2023). Improving saffron irrigation scheduling using field measurements and plant modeling. *Saffron Agronomy & Technology*, 11(1): 53-69. (In Persian).

Alhameid, A., Ibrahim, M., Kumar, S., Sexton, P., & Schumacher, T. E. (2017). Soil organic carbon changes impacted by crop rotational diversity under no-till farming in South Dakota, USA. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4): 868–877.

Battilani, A., (2006). Water and nitrogen use efficiency, dry matter accumulation and nitrogen uptake in fertigated processing tomato. *Acta Hortic*. 724: 67–74.

Davis, K. F., Gephart, J. A., Emery, K. A., Leach, A. M., Galloway, J., & 'D'Odorico, N. P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources, *Global Environmental Change*, 39: 125–132.

Daxin, G., Jørgen, E. O., Johannes, P., Changjiang, G., &X iaoyi, Ma. (2020). Calibrating Aqua Crop model using genetic algorithm with multi-objective functions applying different weight factors, *Agronomy journal*, 712100, China.

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage, FAO paper no. 33, Rome, Italy.

Farahani, H., Gabriella, I., & Oweis, T. (2009). Parameterization and Evaluation of the Aqua Crop model for full and deficit irrigated cotton. *Journal of Agronomy*, 101:469-476.

García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., & Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with Aqua Crop. *Journal of Agronomy*, 101: 477- 487.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., & Steduto, P. (2009). Simulating yield response of quinoa to water availability with Aqua Crop. *Journal of Agronomy*, 101: 498-508.

Hamid, S., Saiedeh, A., Mohammad, H., Mohammad Ali, H., & Fatemeh, H. (2018). The Effect of Crop Rotation on Some Soil Properties in Dry Lands (Case Study Roknabad Maybod). *Environmental Science Studies*, 4th period, 4th issue, winter season, pages 2056-2062. (In Persian).

Heng, L., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO Aqua Crop model for irrigated and water deficient field maize. *Journal of Agronomy*, 101: 487-498.

Javadi, A., Farmani, R., &Tan, T. P. (2005). A hybrid intelligent genetic algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 19, 255–262.

Keykhamoghadam, P., Naghi Ziaei, A., Davari, K., Kanooni, A., & Sadeghi, S. (2023). Optimal allocation of water and land in moghan irrigation network using crop model and genetic algorithm, *Iranian Journal of Soil and Water Research*,53(12),2921-2935. (In Persian).

Kirchherr, J., & Charles, K. (2018). Enhancing the sample diversity of snowball samples: Recommendations from a research project on anti-dam movements in Southeast Asia. PLOS ONE, 13(8), e0201710.

Liang, H., Qi, Z., DeJonge, K. C., Hu, K., & Li, B. (2017). Global sensitivity and uncertainty analysis of nitrate leaching and crop yield simulation under different water and nitrogen management practices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 201–210.

Luiz, G., Henrique, D., Alvadi, J., Julio, F., Antonio, C., & Tiago, T. (2022). Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems, *European Journal of Agronomy*. Volume 137, Page 126528.

Li, A., Wu, Y., Tai, X., Cao, S., & Gao, T. (2023). Effects of Alfalfa Crop Rotation on Soil Nutrients and Loss of Soil and Nutrients in Semi-Arid Regions. *Sustainability*, 15, 15164.

Ma, H., Malone, R. W., Jiang, T., Yao, N., Chen, S., Song, L., Feng, H., Yu, Q., & He, J. (2020). Estimating crop genetic parameters for DSSAT with modified PEST software. *European Journal of Agronomy*, 115, 126017.

Mullen, J. D., Escalante, C., Hoogenboom, G., & Yu, Y. (2005). Determinants of irrigation farmers' crop choice and acreage allocation decisions: opportunities for extension service delivery. J. Extension, 43.

Miglietta, P. P., Morrone, D., & Lamastra, L. (2018). Water footprint and economic water productivity of Italian wines with appellation of origin: Managing sustainability through an integrated approach. *Science of The Total Environment*, 633, 1280-1286.

Osei, E., Jafri, S. H., Gassman, P. W., & Saleh, A. (2023). system and Farm-Level Economic Impacts of Conservation Tillage in a Northeastern Iowa County. *Agriculture Simulated Eco*, 13, 891.

Qin, W., Zhang, X., Chen, S., Sun, H., & Shao, L. (۲۰۱۸). Crop rotation and N application rate affecting the performance of winter wheat under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, ۲۱۰, ۳۳۰–۳۳۹.

Ouda, S., & Zohry, A. (2015). Crop Rotation An Approach to Save Irrigation Water under Water Scarcity in Egypt. *Agricultural and food sciences*, environment science.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E., (2009). Aqua Crop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. Journal of Agronomy, 101, 438–447.

Renard, D., Tilman, D. (2019). *National food production stabilized by crop diversity*, Nature, vol. 571, no. 7764, pp.257–260.

Sarrafzadeh, N., Davari, K., Naghi Ziaei , A., & Ansari, H., (2022). Cultivation Pattern Optimization Using Crop Rotation Priorities Using AquaCrop Crop Yield Simulation Model to Maximize the Economic Benefit. *Iranian Journal of Soil and Water Research*,53(12),543- 557. (In Persian).

Salemi, H., Mohd, M. A., Shui, T., Mousavi, S., Ganji, A., &Yusoff, M. (2011). Application of Aqua Crop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 610, pp. 2204-2215.

Shrestha, J., Subed, S., & Timsina, K. (2021). Sustainable intensification in agriculture: an approach for making agriculture greener and productive," Journal of Nepal Agricultural Research Council, vol. 7, pp. 133–150.

Steduted, P., Raes, D., Hsiao, T., C., & Fereres, E. (2015). Aqua crop new features and updates version 5.0. FAO land and water division, Roma, Italy.

Steduto, P., Hsiao, C., Heng, K., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aqua Crop the FAO crop model to simulate yield response to water. III. Parameterization and testing for maize. *Journal of Agronomy*, 101: 448-459.

Ventrella, D., Giglio, L., Charfeddine, M., Lopez, R., Castellini, M., Sollitto, D., & Castrignano, A. (2012). Climate change impact on crop rotations of winter durum wheat and tomato in Southern Italy: yield analysis and soil fertility, *Italian Journal of Agronomy*.vol7: e15.

Yu, T., Mahe, L., Li, Y., Wei, X., Deng, X., & Zhang, D. (2022). Benefits of Crop Rotation on Climate Resilience and Its Prospects in China. *Agronomy*, (12), 436.

Development of the framework of an irrigation management optimization model considering crop rotation

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A big challenge on a national and global scale is the increasing demand for food due to the growing population and the decrease in the crop yields, so the production in the agricultural sector is very important to solve the crisis. Crop rotation, a sustainable agricultural technique, has been at humanity's disposal since time immemorial and is practiced globally. Switching between cover crops and cash crops helps avoid the adverse effects of intensive farming. Determining the optimum cash-cover rotation schedule for maximizing yield has been tackled on multiple fronts by agricultural scientists, economists, biologists and computer scientists, to name a few. However, considering the uncertainty due to diseases, pests, droughts, floods and impending effects of climate change is essential when designing rotation strategies. Crop models are considered as an important tool for design and evaluation in order to adequately describe product development and production, but the main forms should not be too complex, or have long calculations. The AquaCrop[3] provided by FAO is highly accurate and not complicated. Furthermore, this model has been developed for more than 15 products in different locations. Aqua Crop is an effective tool that can calculate and predict the total biomass and final yield for different irrigation strategies including no water stress to low stress or in some cases severe water stress with acceptable accuracy. Optimizing water usage leads to preserving water resources and improving the quality of crops. Optimization is used to control and manage the water usage in agriculture and reduce the amount of water used in plants, it should be noted that this method takes into account the highest economic profit.

Materials and Methods

This study employs crop rotation as a key variable in an optimization framework to calculate a matrix of impact coefficients based on insights from expert farmers. The entries of this matrix quantify the impact coefficients of sequential crop planting. The impact coefficient of crop rotation is integrated into a water allocation optimization model designed to maximize economic profitability, utilizing a genetic algorithm and the AquaCrop plug-in program. For this purpose, C# coding within the framework of Visual Studio was carried out to optimize three-, four-, five-, six-, and seven-year rotations with wheat, soybean, tomato, potato, corn, alfalfa, barley, and sugar beet. Moreover, the impact of crop rotation on crop yield and water allocation as well as the expected profitability per unit area was assessed using a valuation formula.

Results and Discussion

An optimization model for the allocation of water resources with the aim of maximizing economic profit based on genetic algorithm was used to generate irrigation and crop rotation data to determine the combination of crop cultivation with maximum economic profit, so that the limitation related to water availability is established. The generated irrigation data was used as an input to AquaCrop, and the output of crop yield was obtained from the software. C# (C-Sharp) coding was used in the Visual Studio environment to optimize this cycle. The optimization model used in this study is able to implement 20% less irrigation. The study of the effect of low irrigation on crop yield showed that the implementation of crop rotation reduces the effects of low irrigation on the yield score of the crop, so that the lowest reduction of the optimum yield score of the crop compared to the deficit irrigation yield of wheat and alfalfa crops was obtained 7 and 7.8, respectively. Also, the highest decrease in the optimum yield score compared to the yield of 20% deficit irrigation of the corn crop was observed by 23% in the 4-yr period and 22.8% in the 7-yr period.

[3] AquaCrop is a crop growth model developed by FAO's Land and Water Division to address food security and assess the effect of the environment and management on crop production.

Conclusion

In this study, crop rotation was used as an effective factor in the optimization equation to calculate the matrix of the impact factor of crop rotation, using the opinion of expert farmers, in order to reduce consumption and optimal use of water resources. The optimization method described in this research was used to calculate the optimal cultivation pattern and irrigation planning for eight crops of wheat, barley, potato, sugar beet and alfalfa as winter crops, corn, tomato and soybean as summer crops under the weather conditions of Mashhad. The genetic algorithm has been used for this economic decision-making model that considers the impact of the agricultural cycle on the economic yield during several growing seasons. According to the results of this study, for the studied area, the highest frequency of wheat and potato crop is in different intervals and the lowest frequency is soybean crop. Also, the best rotation was obtained in terms of 4-yr rotation profit score (sugar beet, corn, potato and tomato). It is suggested that future researches focus on improving the optimization speed, accuracy and formulation of an advanced objective function for crop models.

Author Contributions

Conceptualization: Kamran Davary; Methodology: Seyed Mohammadreza Naghedifar; Software: Seyed Mohammadreza Naghedifar, Sedigheh Sadeghi, and Mohammad Ali Boush; Validation: Kamran Davary, Seyed Mohammadreza Naqedifar, and Hossein Banejad; Formal analysis: Kamran Davary and Mohammad Ali Boush; Investigation: Seyed Mohammadreza Naqedifar, Hossein Banejad, and Mohammad Ali Boush; Resources: Mohammad Ali Boush; Data curation: Kamran Davary and Seyed Mohammadreza Naqedifar; Writing—original draft preparation: Mohammad Ali Boush; Writing—review and editing: Mohammad Ali Boush; Visualization: Hossein Banejad; Supervision: Kamran Davary and Hossein Banejad; Project administration: Kamran Davary; Funding acquisition: Kamran Davary.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data were extracted from a thesis with the project number (57828) and title: "Optimization of Irrigation Management with Emphasis on Crop Rotation and Price Risk."

Acknowledgements

The authors would like to extend their heartfelt thanks to Ferdowsi University of Mashhad for providing the necessary support and resources for this research. The university's commitment to academic excellence has been instrumental in facilitating this project.

Additionally, the authors wish to express their sincere gratitude to the esteemed faculty members of Ferdowsi University, including Dr. Kamran Davary, Dr Seyed Mohammadreza Naghedifar, Dr Hossein Banejad, and Sedigheh Sadeghi. Their invaluable contributions, expert insights, and continuous support were essential to the successful completion of this research. The authors deeply appreciate their dedication and collaboration throughout the process.

"There is no conflict of interest among the authors."

ویراستاری شناه