Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

https://wra.areeo.ac.ir/

Optimizing Well Water and Wastewater Blending Ratios for Maximizing Forage Maize Yield Using Genetic Algorithm

N. Shakeri, M. Mirnaseri*, M. KoshRavesh, and R. Delerhasannia

M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.
Shakerinarjes130@gmail.com

Assistant Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. **Mohammadmirnaseri@yahoo.com**

Associate Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. **Khoshravesh_m24@yahoo.com**

Associate Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. **Delearhasannia@yahoo.com**

Article Info

Research Article

Received: November 17, 2025

Accepted: March 16, 2026

Keywords: Multi-objective optimization**,** Non-linear regression model, Irrigation water quality, Meta-heuristic algorithm, Sustainable water management

Corresponding author's email: Mohammadmirnaseri@yahoo.com

Abstract

This study aimed to determine the optimal combination of water quality parameters for maximizing forage maize yield using Genetic Algorithm. This study collected 45 forage maize yield data points from five treatments in three replications over three cropping years in Mazandaran Province, Iran. Water quality parameters including electrical conductivity (EC), sodium (Na^{+}), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), and sodium adsorption ratio (SAR) were measured. After developing three different regression models, the interactions model was selected as the superior model with an adjusted R^2 of 0.99. Parameter optimization was performed using Genetic Algorithm with an initial population of 50 chromosomes. The optimization results revealed that optimal parameter combination consisted of 1.18 dSm^{-1} electrical conductivity, 1.65 meq/L sodium, 1.04 sodium adsorption ratio, 2.86 meq/L calcium, and 41.60 meq/L magnesium. In fact, this study demonstrated that an optimal region exists between 75% and 100% treated wastewater, which can be achieved through more precise adjustment of ionic ratios. This optimal combination resulted in a predicted fresh biomass yield of 26.9 $t.ha^{-1}$, representing a 10% improvement over the best existing treatment and a 27.3% improvement over the mean forage maize yield. The developed model demonstrates high predictive accuracy, and Genetic Algorithm proves to be an efficient tool for multi-parameter optimization of irrigation water quality for forage production. This approach can be implemented in operational management of forage maize fields to achieve optimal biomass yield.

Cite this article: Shakeri, N., Mirnaseri, M., KoshRavesh, M, and Delerhasannia, R., 2026. Optimizing Well Water and Wastewater Blending Ratios for Maximizing Forage Maize Yield Using Genetic Algorithm. ***Journal of Water Research in Agriculture*** **34(4), pp.321-340**

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.371395.1101

نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۹ / شماره ۴/ ۱۴۰۴. ص ۳۲۱-۳۴۰

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه پژوهش آب در کشاورزی

https://wra.areeo.ac.ir

تعیین نسبت بهینه اختلاط آب چاه و پساب شهری برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک

نرجس شاکری، محمد میرناصری*، مجتبی خوش‌روش و رضا دلیر حسن‌نیا

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. **Shakerinarjes130@gmail.com**

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. **mohammadmirnaseri@yahoo.com**

دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. **khoshravesh_m24@yahoo.com**

دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز ایران. **delearhasannia@yahoo.com**

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری، بهینه‌سازی چندهدفه، کیفیت آب آبیاری، مدل رگرسیونی غیرخطی، مدیریت پایدار آب

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:
mohammadmirnaseri@yahoo.com

چکیده

این پژوهش با هدف تعیین ترکیب بهینه پارامترهای کیفی آب برای حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. در این مطالعه، تعداد ۴۵ داده عملکرد ذرت علوفه‌ای حاصل از پنج تیمار در سه تکرار طی سه سال زراعی در استان مازندران جمع‌آوری گردید. پارامترهای کیفی آب شامل: هدایت الکتریکی (EC)، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+}) و نسبت جذب سدیم (SAR) اندازه‌گیری شد. پس از توسعه سه مدل رگرسیونی مختلف، مدل تعاملات به عنوان مدل برتر با ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۹۹ انتخاب گردید. بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک با جمعیت اولیه ۵۰ کروموزوم انجام شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که ترکیب بهینه پارامترها شامل هدایت الکتریکی dSm^{-1} ۱/۱۸، سدیم میلی اکوالانت در لیتر ۱/۶۵، نسبت جذب سدیم ۱/۰۴، کلسیم میلی اکوالانت در لیتر ۲/۸۶ و منیزیم میلی اکوالانت در لیتر ۴۱/۶۰ می‌باشد. نتایج نشان داد که بین تیمار ۷۵٪ پساب شهری تصفیه‌شده و ۱۰۰٪پساب شهری تصفیه‌شده منطقه‌ای بهینه وجود دارد که با تنظیم دقیق‌تر نسبت‌های یونی می‌توان به آن دست یافت. این ترکیب بهینه منجر به عملکرد پیش‌بینی‌شده ۲۶/۹ تن در هکتار گردید که این امر سبب بهبود ۱۰٪ نسبت به عملکرد بهترین تیمار موجود و ۲۷/۳٪ نسبت به میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای شد. بررسی نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته از دقت پیش‌بینی بسیار بالایی برخوردار بوده و الگوریتم ژنتیک ابزار کارآمدی برای بهینه‌سازی چندپارامتری کیفیت آب آبیاری است. این رویکرد می‌تواند در مدیریت عملیاتی مزارع ذرت برای دستیابی به عملکرد بهینه مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: شاکری، نرجس، میرناصری،محمد، خوش‌روش، مجتبی، و دلیرحسن‌نیا، رضا، ۱۴۰۴. تعیین نسبت بهینه اختلاط آب چاه و پساب شهری برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۹ (۴) ، صص.۳۲۱-۳۴۰ .

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.371395.1101

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان محور اصلی امنیت غذایی جهانی، همواره با چالش‌های متعددی روبرو بوده است که در رأس آن‌ها محدودیت منابع آب شیرین قرار دارد (کاسگرو و لوکس، ۲۰۱۵). این چالش در مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان که با تنش آبی مضاعفی نیز مواجه هستند، به‌مراتب جدی‌تر است (فائو، ۲۰۲۰). ایران به‌عنوان کشوری واقع در کمربند خشک جهان، از این قاعده مستثنی نبوده و بخش کشاورزی آن به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، نیازمند اتخاذ راهبردهای مدیریتی نوین و پایدار است. در این میان، ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L.*) با توجه به اهمیت استراتژیک آن در تأمین خوراک دام و صنایع غذایی، جایگاه ویژه‌ای دارد. آمارهای جهانی حاکی از تولید بیش از ۱۵۱۵ میلیون تن ذرت علوفه‌ای در سطح جهان است که میزان تولید این محصول در ایران نیز بیش از ۱۲/۷ میلیون تن گزارش شده است (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۹). تولید پایدار این محصول در گرو تأمین منابع آب مطمئن و باکیفیت خواهد بود.

به دلیل افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف و همچنین تغییرات اقلیمی، استفاده از منابع آب غیرمتداول در کشاورزی اجتناب‌ناپذیر شده است. در این راستا، استفاده از پساب‌های شهری و صنعتی نه تنها به‌عنوان یک راهکار برای مقابله با کم‌آبی، بلکه به‌عنوان منبعی ارزشمند حاوی عناصر غذایی برای گیاهان مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کاربرد پساب می‌تواند عملکرد محصولات زراعی را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، روسان و همکاران (۲۰۰۷) در اردن گزارش کردند که آبیاری گیاه جو با پساب طی پنج سال، افزایش عملکردی حدود ۶۷ درصدی را در پی داشت. فریدونی و همکاران (۲۰۱۳) نیز تأثیر کاربرد پساب شهری تصفیه‌شده را بر ذرت شیرین بررسی کردند و افزایش معنی‌دار عملکرد بلال و دانه را مشاهده نمودند. کریمی و همکاران (۱۳۹۷) در شرایط گلخانه‌ای نشان دادند که آبیاری با پساب شهری تصفیه‌شده موجب افزایش معنی‌دار عملکرد ذرت و گوجه‌فرنگی در مقایسه با آب معمولی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، عباسی و همکاران (۱۴۰۰) دریافتند که بیشترین عملکرد ماده خشک و دانه ذرت در تیمار آبیاری کامل با پساب حاصل شد. این یافته‌ها به‌طورکلی حاکی از پتانسیل بالای پساب شهری در بهبود عملکرد محصولات زراعی است.

با این وجود، استفاده از پساب چالش‌های مهمی نیز به همراه دارد. کیفیت آب آبیاری، به‌ویژه شاخص‌هایی نظیر هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون سدیم (Na^+) و نسبت جذب سدیم (SAR)، تأثیر مستقیم و غیرقابل انکاری بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی دارند. تجمع بیش از حد یون سدیم در گیاهان می‌تواند با برهم زدن تعادل یونی، فرآیندهای حیاتی مانند فتوسنتز را مختل کند (رو و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش شوری نیز از طریق ایجاد پتانسیل اسمزی منفی، جذب آب توسط گیاه را با مشکل مواجه ساخته و می‌تواند منجر به کاهش شدید عملکرد شود (ونزلم و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعه ذاکری‌نیا و عبدالهی (۱۴۰۲) نشان داد که افزایش شوری و سدیمی بودن آب آبیاری، به‌طور معنی‌داری نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهد. همچنین خوش‌سیما و نوری (۱۳۹۸) گزارش کردند که افزایش شوری آب آبیاری موجب کاهش معنی‌دار عملکرد و صفات زراعی هیبریدهای مختلف ذرت گردید.

با وجود آگاهی از اهمیت پارامترهای کیفی آب، تعیین مقادیر دقیق و بهینه این پارامترها در شرایط استفاده توأم از منابع متداول و غیرمتداول (مانند پساب) یک چالش عمده باقی مانده است. رویکردهای سنتی مبتنی بر آزمایش و خطا یا تحلیل‌های تک‌عاملی، به دلیل نادیده گرفتن اثرات متقابل و غیرخطی پارامترها، به‌ندرت قادر به یافتن نقطه بهینه هستند (لی و همکاران، ۲۰۲۱). در این شرایط است که نیاز مبرم به روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی چندمتغیره آشکار می‌شود.

در این میان، الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌ویژه الگوریتم ژنتیک (GA) به‌عنوان یکی از قدرتمندترین

ابزارهای محاسبات تکاملی، قابلیت بالایی در یافتن راه‌حل‌های بهینه برای مسائل پیچیده چندپارامتری دارند (هالند، ۱۹۹۲). این الگوریتم در سال‌های اخیر در حوزه‌های مختلف کشاورزی از جمله مدیریت آبیاری (راجو و کومار، ۲۰۰۴)، پیش‌بینی عملکرد محصول (نوری و همکاران، ۲۰۱۱) و بهینه‌سازی کیفیت آب (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۲) موفقیت‌آمیز عمل کرده است. با این حال، کاربرد این الگوریتم در بهینه‌سازی هم‌زمان چندین پارامتر کیفی آب آبیاری برای ذرت علوفه‌ای، به‌ویژه در شرایط استفاده از پساب کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بنابراین، هدف اصلی این پژوهش توسعه یک چارچوب مدل‌سازی- بهینه‌سازی یکپارچه است که از طریق آن، ابتدا رابطه کمی بین پارامترهای کیفی آب (شامل EC، Na^+، SAR، Ca^{2+} و Mg^{2+}) و عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از داده‌های تجربی مزرعه‌ای استخراج گردد و سپس با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه این پارامترها با هدف حداکثرسازی عملکرد این گیاه تعیین گردد. دستیابی به این هدف می‌تواند گامی مؤثر در جهت مدیریت پایدار منابع آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی در شرایط کم‌آبی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

این پژوهش بر پایه داده‌های میدانی جمع‌آوری‌شده از یک آزمایش مزرعه‌ای در سال‌های زراعی ۱۳۹۹، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در مزرعه‌ای واقع در روستای آرمیچ‌کلای شهرستان بابلسر (استان مازندران) انجام شد. منطقه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی (E°) و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی (N^{o}) قرار دارد و ارتفاع آن ۲۱- متر از سطح دریاهای آزاد است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، این ناحیه دارای آب‌وهوای مرطوب بوده و میانگین بارندگی سالانه آن ۸۹۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است (پورغلام آمیجی و خوش-روش، ۱۴۰۱؛ خوش‌روش و پورغلام‌آمیجی، ۱۴۰۱). نتایج جدول ۱، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در آستانه اجرای آزمایش در سه عمق مختلف به‌منظور شناخت دقیق محیط ریشه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در ابتدای آزمایش

Table 1- Physical and chemical properties of the soil at the study site at the beginning of the experiment

عمق Depth (cm)	بافت خاک Soil Texture	درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک Percentage of soil particles			چگالی ظاهری Bulk density (gr/cm^3)	pH	EC (dSm^{-1})
		رس Clay	سیلت Silt	شن Grain			
0 -30	لوم (Loam)	19.69	45.04	35.27	1.50	7.5	1.91
30 -60	لوم (Loam)	19.34	45.16	35.50	1.53	7.4	1.93
60 -90	لوم (Loam)	19.55	45.39	35.06	1.59	7.7	1.92

طرح آزمایشی، تیمارها و مدیریت آبیاری

این تحقیق در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل و با سه تکرار اجرا شده بود. فاکتورها شامل پنج سطح کیفیت آب آبیاری بوده است. هر واحد آزمایشی در لایسیمترهای PVC با قطر ۶۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر مستقر گردید. تیمارهای کیفی آب به شرح زیر طراحی شدند.

Q_1: آبیاری با ۱۰۰ درصد آب چاه (شاهد)

Q_2: آبیاری با اختلاط ۲۵ درصد پساب شهری تصفیه‌شده و ۷۵ درصد آب چاه

Q_3: آبیاری با اختلاط ۵۰ درصد پساب شهری تصفیه‌شده و ۵۰ درصد آب چاه

Q_4: آبیاری با اختلاط ۷۵ درصد پساب شهری تصفیه‌شده و ۲۵ درصد آب چاه

Q_5: آبیاری با ۱۰۰ درصد پساب شهری تصفیه‌شده

کشت گیاه ذرت (*Zea mays L.*) رقم SC 704 در تاریخ‌های متعارف منطقه برای سال‌های ۱۳۹۹، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ (مطابق با تقویم زراعی استان مازندران) انجام شد. تراکم کاشت بر اساس توصیه فنی برای این رقم خاص، معادل ۷۵۰۰۰ بوته در هکتار در نظر گرفته شد. فاصله ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. کلیه عملیات تهیه بستر، کاشت و کنترل علف‌های هرز به‌صورت یکنواخت و مکانیزه در تمامی کرت‌های آزمایشی انجام پذیرفت.

آبیاری به روش قطره‌ای نواری[1] و با استفاده از نوارهای آبیاری با فاصله دهانه‌های ۲۰ سانتی‌متر و دبی ثابت ۱/۶ لیتر بر ساعت برای هر دهانه انجام شد. دور آبیاری بر اساس محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) و ضرایب گیاهی (K_c) ذرت در مراحل مختلف رشد و با در نظر گرفتن رطوبت قابل دسترس خاک، به‌طور میانگین سه روز تعیین گردید. حجم دقیق آب مصرفی در هر نوبت آبیاری برای هر کرت با نصب کنتور حجمی در ورودی هر لایسیمتر اندازه‌گیری و ثبت شد. برنامه کوددهی بر اساس نتایج آزمون خاک و نیاز غذایی ذرت، به‌صورت یکنواخت و برای کلیه تیمارها به اجرا درآمد تا اثر خاص کیفیت آب به تنهایی مورد سنجش قرار گیرد. کلیه عملیات زراعی دیگر به‌صورت یکنواخت برای تمامی تیمارها اجرا شده و نتایج تجزیه آب هر یک از تیمارها نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- تجزیه آب تیمارهای مختلف مورد استفاده در مزرعه اختلاط آب چاه و پساب شهری تصفیه‌شده

Table 2- Water analysis of different treatments used in the field (mixing well water and treated urban wastewater)

پارامتر Parameter	واحد Unit	آب چاه Well water	۲۵٪ پساب + ۷۵٪ آب چاه 25% wastewater + 75% well water	۵۰٪ پساب + ۵۰٪ آب چاه 25% wastewater + 75% well water	۷۵٪ پساب + ۲۵٪ آب چاه 25% wastewater + 75% well water	۱۰۰٪ پساب 100% wastewater
هدایت الکتریکی (EC)	dSm^{-1}	0.58	0.73	0.85	0.98	1.14
کلسیم (Ca^{2+})	meq/lit	2.93	3.35	3.78	4.19	4.48
منیزیم (Mg^{2+})	meq/lit	2.13	12.16	21.80	31.83	41.54
سدیم (Na^{+})	meq/lit	1.66	4.21	6.81	9.51	12.10
SAR	-	1.05	1.51	1.89	2.25	2.52

اندازه‌گیری متغیر وابسته و داده‌های نهایی

متغیر کلیدی این پژوهش که به‌عنوان شاخص نهایی عملکرد و همچنین تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک انتخاب شد، عملکرد ذرت علوفه‌ای بود. به‌منظور اندازه‌گیری ذرت علوفه‌ای، در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، گیاهان از سطح مفید هر کرت برداشت شدند و وزن تر کل اندام‌های هوایی اندازه‌گیری شد.

داده‌های عملکرد ذرت علوفه‌ای حاصل از سه سال زراعی مستقل، پنج تیمار کیفیت آب و همچنین سه تکرار که در مجموع ۴۵ داده مشاهده‌ای را تشکیل می‌دهند، مجموعاً داده‌های اصلی برای واسنجی مدل و انجام فرآیند بهینه‌سازی در این پژوهش بوده‌اند.

بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

هدف از این بخش، توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای کلیدی کیفیت آب آبیاری شامل: هدایت الکتریکی (EC)، سدیم (Na^{+})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+}) و نسبت جذب سدیم (SAR) با هدف حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای بوده است. این فرآیند که بر اساس داده‌های میدانی جمع‌آوری‌شده از ۴۵ واحد آزمایشی طراحی شد، در چهار مرحله اصلی شامل: ۱) توسعه مدل ریاضی تابع هدف، ۲) پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، ۳) ارزیابی راه‌حل‌ها و ۴) اعتبارسنجی نتایج انجام پذیرفت.

1- Tape Drip Irrigation

توسعه مدل ریاضی و تابع هدف

به‌منظور انجام عملیات بهینه‌سازی، می‌بایست یک رابطه ریاضی دقیق بین پارامترهای کیفیت آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای ایجاد گردد. با توجه به ماهیت بسیار پیچیده تأثیر پارامترهای کیفی آب بر عملکرد محصول مدنظر و به‌منظور اطمینان از ایجاد بهترین برازش، ابتدا چندین شکل مختلف مدل رگرسیونی شامل مدل خطی[1]، مدل درجه دوم[2] و مدل اثرات متقابل[3] با کدنویسی در محیط MATLAB ایجاد گردید و هرکدام جداگانه مورد آزمون قرار گرفتند. این رویکرد مبتنی بر روش‌های استاندارد در مدل‌سازی ریاضی است که انتخاب مدل را به داده‌ها وابسته خواهد کرد (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲). فرم‌های کلی این مدل‌ها برای حالات خطی، درجه دوم و درجه سوم به‌ترتیب مطابق روابط (۱) الی (۳) می‌باشند:

$$Yield_{pred} = \beta_0 + \beta_1 \cdot EC + \beta_2 \cdot Na + \beta_3 \cdot SAR + \beta_4 \cdot Ca + \beta_5 \cdot Mg + \varepsilon \quad (1)$$

$$Yield_{pred} = \beta_0 + \beta_1 \cdot EC + \beta_2 \cdot Na + \beta_3 \cdot SAR + \beta_4 \cdot Ca + \beta_5 \cdot Mg + \beta_6 \cdot EC^2 + \beta_7 \cdot Na^2 + \beta_8 \cdot SAR^2 + \beta_9 \cdot Ca^2 + \beta_{10} \cdot Mg^2 + \varepsilon \quad (2)$$

$$Yield_{pred} = \beta_0 + \beta_1 \cdot EC + \beta_2 \cdot Na + \beta_3 \cdot SAR + \beta_4 \cdot Ca + \beta_5 \cdot Mg + \beta_6 \cdot (EC \times Na) + \beta_7 \cdot (EC \times SAR) + \beta_8 \cdot (EC \times Ca) + \beta_9 \cdot (EC \times Mg) + \beta_{10} \cdot (Na \times SAR) + \beta_{11} \cdot (Na \times Ca) + \beta_{12} \cdot (Na \times Mg) + \beta_{13} \cdot (SAR \times Ca) + \beta_{14} \cdot (SAR \times Mg) + \beta_{15} \cdot (Ca \times Mg) + \varepsilon \quad (3)$$

ضرایب هر مدل با استفاده از روش پیاده‌سازی ماتریسی حداقل مربعات معمولی[4] (OLS) و به کمک داده‌های ۴۵ گانه حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای برآورد گردیدند. دقت و صحت مدل‌های برازش یافته با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. بر اساس مقایسه این معیارها، مدلی که بهترین تعادل را بین پیچیدگی و دقت پیش‌بینی نشان می‌داد (مدل با کمترین RMSE و بالاترین R^2)، به‌عنوان مدل نهایی به‌صورت خودکار توسط کد نوشته‌شده در MATLAB انتخاب گردید. بر این اساس، مدل تعاملات با ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۹۹۹۳ و RMSE معادل ۰/۰۶۱۰ تن در هکتار به‌عنوان مدل برتر شناسایی و به‌عنوان تابع هدف در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفت.

پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

با توجه به این‌که هدف نهایی این پژوهش، بیشینه کردن یک شاخص اصلی (عملکرد ذرت علوفه‌ای) است، لذا از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه استفاده گردید. این الگوریتم بر اساس اصول تکامل طبیعی و با الهام از فرآیند انتخاب اصلح در اصول ژنتیک طراحی شده است (گلدبرگ، ۱۹۸۹). مراحل کدنویسی الگوریتم ژنتیک این پژوهش در محیط نرم‌افزار MATLAB R2014a به شرح زیر انجام پذیرفت:

الف) نمایش کروموزوم[5] و مقداردهی اولیه: هر فرد در جمعیت که یک راه‌حل احتمالی است، به‌صورت یک کروموزوم با پنج ژن واقعی نمایش داده می‌شود:

$$\text{Chromosome} = [Gene_1, Gene_2, Gene_3, Gene_4, Gene_5] = [EC, Na^+, SAR, Ca^+, Mg^{2+}] \quad (4)$$

محدوده مجاز برای هر ژن بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر اندازه‌گیری شده در تیمارهای پنج‌گانه میدانی ($2.10 < Mg^{2+}$ (meq/lit) < 41.60 ,$2.86 < Ca^{2+}$ (meq/lit) < 4.55, $1.65 < Na^+$ (meq/lit) < 12.21, ($1.04 < SAR < 2.54$, $0.57 < EC$ (dSm^{-1}) < 1.18

1 -Linear Model
2 -Quadratic
3 -Interactions Model
4- Ordinary Least Squares (OLS)
5 -Chromosome

تعریف شد. این مقادیر به‌عنوان مرزهای جستجو در الگوریتم ژنتیک استفاده شدند تا اطمینان حاصل گردد که راه‌حل‌های تولید شده در محدوده واقعی و قابل دسترس از داده‌های مزرعه‌ای قرار داشته باشند. جمعیت اولیه متشکل از ۵۰ کروموزوم به‌صورت تصادفی و یکنواخت در این محدوده‌ها تولید شد.

ب) عملگرهای ژنتیکی: در این پژوهش چهار عملگر انتخاب، تقاطع، جهش و نخبه‌گرایی با توجه به ماهیت مسئله، مطابق شرایط زیر در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شدند:

۱) عملگر انتخاب: در این پژوهش برای این عملگر در الگوریتم ژنتیک، از روش رقابتی تورنمنت با اندازه گروه سه استفاده گردید. در این روش، از بین سه کروموزوم انتخاب شده به‌صورت تصادفی، کروموزومی که بالاترین پتانسیل را در تولید عملکرد مطلوب ذرت علوفه‌ای نشان دهد، به‌عنوان والد انتخاب خواهد شد. این رویکرد به‌طور ویژه برای مسائل بهینه‌سازی در کشاورزی مناسب است، زیرا می‌تواند امکان انتخاب راه‌حل‌های برتر را با در نظر گرفتن شرایط واقعی رشد ذرت فراهم سازد.

۲) عملگر تقاطع: عملگر تقاطع به روش تک‌نقطه‌ای با نرخ ۰/۸ پیاده‌سازی شد که در آن نقطه تقاطع به‌صورت تصادفی انتخاب شده و ژن‌های مربوط به پارامترهای کیفیت آب شامل: هدایت الکتریکی (EC)، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+}) و نسبت جذب سدیم (SAR)، بین دو والد مبادله می‌شوند. این مکانیسم به ایجاد ترکیب‌های جدیدی از پارامترهای کیفی آب منجر خواهد شد که می‌توانند پتانسیل بالاتری در بهبود عملکرد ذرت علوفه‌ای داشته باشند.

۳) عملگر جهش: عملگر جهش نیز با نرخ ۰/۰۵ و به روش غیریکنواخت اعمال شد که در آن میزان تغییرات با پیشرفت نسل‌ها کاهش خواهد یافت. این استراتژی به الگوریتم این امکان را می‌دهد تا در مراحل اولیه، اکتشاف گسترده‌ای در فضای جستجو انجام دهد و در مراحل پایانی، بهره‌برداری دقیق‌تری از مناطق امیدبخش داشته باشد. این رویکرد به‌طور خاص برای مسائل بهینه‌سازی پارامترهای آبیاری در کشاورزی مناسب خواهد بود، چرا که نیازمند تعادل بین کشف راه‌حل‌های جدید و بهینه‌سازی راه‌حل‌های موجود است.

۴) عملگر نخبه‌گرایی: در کد نوشته‌شده برای الگوریتم ژنتیک، از عملگر نخبه‌گرایی با حفظ دو کروموزوم برتر در هر نسل استفاده شد. این عملگر تضمین خواهد کرد که بهترین راه‌حل‌های یافته شده در طول فرآیند تکامل از دست نروند و به‌صورت مستقیم به نسل بعد منتقل گردند. این ویژگی به‌خصوص در بهینه‌سازی این پژوهش دارای اهمیت فراوانی است، چرا که از حذف تصادفی ترکیب‌های امیدبخش کیفیت آب که می‌توانند منجر به عملکرد بالای ذرت علوفه‌ای شوند، می‌تواند جلوگیری نماید.

این چهار عملگر به‌صورت هماهنگ و مکمل یک‌دیگر عمل نموده و امکان جستجوی مؤثر در فضای پاسخ را برای یافتن ترکیب بهینه پارامترهای کیفیت آب برای حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای فراهم می‌سازند.

۵) شرط توقف: توقف در این الگوریتم بر اساس دو معیار کدنویسی صورت پذیرفت: ۱) رسیدن به حداکثر ۱۰۰ نسل و یا ۲) عدم مشاهده بهبود در جواب برتر طی ۲۰ نسل متوالی. این تنظیمات پارامتری که مبتنی بر پژوهش‌های استاندارد در حوزه الگوریتم‌های تکاملی است، تضمین می‌نماید که الگوریتم بتواند در فضای جواب به‌صورت کارا به جستجو پرداخته و در زمان مناسب به راه‌حل بهینه همگرا شود (دب، ۲۰۰۱؛ میرجلیلی، ۲۰۱۹).

ارزیابی، همگرایی و تحلیل نتایج

ارزیابی راه‌حل‌ها در هر نسل از الگوریتم ژنتیک (GA) بر این اساس صورت پذیرفت که مقادیر عددی مربوط به سه پارامتر کیفیت آب: الف) هدایت الکتریکی (EC)، ب) سدیم (Na^+)، ج) کلسیم (Ca^{2+})، د) منیزیم (Mg^{2+}) و ه) نسبت جذب سدیم (SAR) برای هر کروموزوم، مستقیماً در مدل ریاضی جایگذاری شده و خروجی این مدل که بیانگر عملکرد پیش‌بینی‌شده ذرت

علوفه‌ای است، به‌عنوان مقدار تابع هدف آن کروموزوم در نظر گرفته شد. روند همگرایی[1] کل الگوریتم با ثبت و بررسی چهار شاخص کلیدی در طی نسل‌ها به دقت بررسی گردید. این شاخص‌ها شامل: الف) مقدار برازش بهترین کروموزوم (Best Fitness) در نسل جاری، ب) مقدار میانگین برازش (Mean Fitness) در کل جمعیت آن نسل، ج) میزان تنوع ژنتیکی جمعیت (Population Diversity) و انحراف معیار (Standard Deviation) مقادیر کروموزوم‌ها سنجیده شده و نهایتاً ترکیب پارامترهای مربوط به بهترین راه‌حل در هر نسل خواهد بود. این پایش دقیق و مستمر، امکان اطمینان از حرکت الگوریتم در مسیر صحیح و همگرایی به سمت یک جواب بهینه را فراهم خواهد ساخت.

همچنین پس از اتمام فرآیند بهینه‌سازی، در بخش دیگری از کدنویسی این پژوهش در محیط نرم‌افزار MATLAB، یک تحلیل حساسیت[2] ساختاریافته با تمرکز بر پارامترهای پنج‌گانه کیفیت آب انجام پذیرفت. در این تحلیل، به‌منظور سنجش میزان اثرگذاری و حساسیت جواب نهایی نسبت به تغییرات احتمالی در داده‌های ورودی، یک تغییر به‌اندازه پنج درصد از محدوده هر پارامتر کیفیت آب (EC, Na^+, SAR, Ca^{2+}, Mg^{2+}) برای هر تیمار به‌صورت مجزا اعمال شد. سپس، تأثیر این تغییرات روی شاخص اصلی، یعنی میزان عملکرد پیش‌بینی‌شده محصول ذرت علوفه‌ای به‌صورت کمی اندازه‌گیری گردید. خروجی این فرآیند، به‌وضوح نشان خواهد داد که هر یک از تیمارهای پنج‌گانه آبیاری (از Q_1 تا Q_5) تا چه حد نسبت به نوسانات در پارامترهای کیفی آب حساس خواهند بود. این تحلیل، به پژوهشگر این امکان را می‌دهد که علاوه بر یافتن نقطه بهینه، پایداری و قابلیت اطمینان آن نقطه را در شرایط غیرایده‌آل و واقعی نیز مورد ارزیابی قرار دهد.

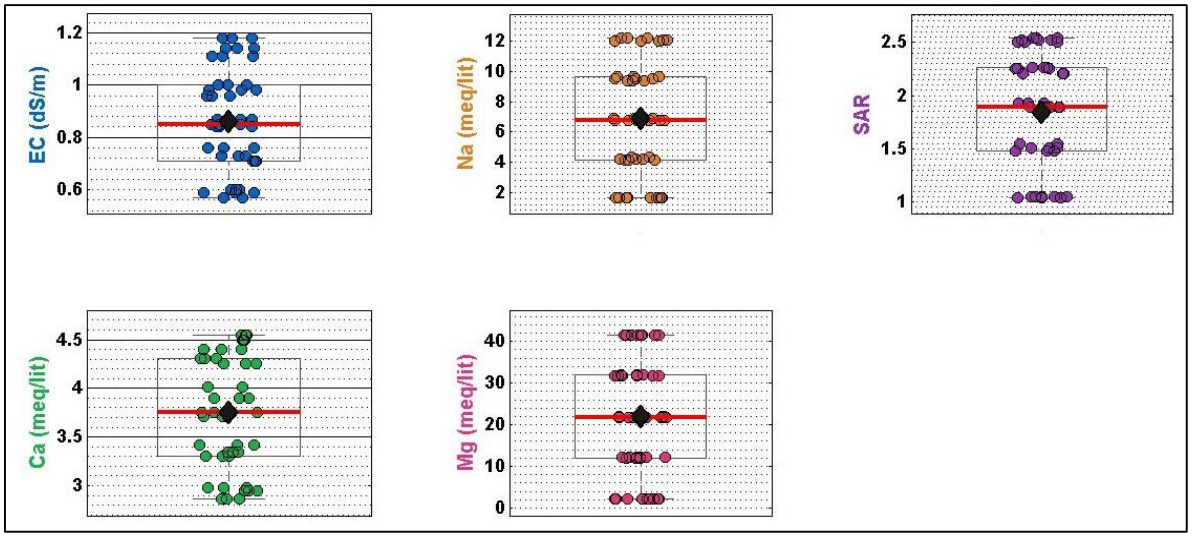
نتایج

تحلیل آماری داده‌های میدانی و توزیع پارامترهای کیفی آب

داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۴۵ واحد آزمایشی طی سه سال زراعی که شامل پنج تیمار کیفیت آب آبیاری با سه تکرار بود، نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل‌توجهی در پارامترهای کیفی آب است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، توزیع فراوانی پارامترهای کیفی آب دارای الگوهای مشخصی است که بیانگر تنوع مناسب داده‌ها برای اهداف مدل‌سازی است. هدایت الکتریکی (EC) با میانگین dSm^{-1} ۰/۸۶ و انحراف معیار ۰/۲۰، غلظت سدیم (Na^+) با میانگین meq/lit ۶/۸۶ و انحراف معیار ۳/۷۵ و نسبت جذب سدیم (SAR) با میانگین ۱/۸۵ و انحراف معیار ۰/۵۳، همگی نشان از پراکندگی مناسب در بین تیمارهای مختلف داشتند. این سطح از تغییرپذیری در پارامترهای ورودی، امکان توسعه یک مدل رگرسیونی قوی را برای پیش‌بینی عملکرد ذرت علوفه‌ای فراهم خواهد ساخت، چراکه مدل می‌تواند رابطه بین تغییرات پارامترهای مستقل و متغیر وابسته را به‌خوبی شناسایی نماید (گرجی و همکاران، ۲۰۲۰).

1- Convergence

2- Sensitivity Analysis



شکل ۱- توزیع پارامترهای کیفی آب در داده‌های میدانی

Figure 1- Distribution of water quality parameters in the field data

عملکرد ذرت علوفه‌ای در تیمارهای مختلف کشت‌شده در مزرعه نشان داد که متوسط بیشترین عملکرد مربوط به تیمار Q_5 با ۲۴/۶۲ ton/ha و کمترین عملکرد مربوط به تیمار Q_1 با ۱۸/۱۹ ton/ha است. این روند تأیید می‌کند که افزایش سهم پساب شهری علی‌رغم وجود چالش‌های زیست‌محیطی در شرایط این آزمایش، به‌طورکلی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای تأثیر مثبت داشته است. شکل ۲ به‌وضوح نشان می‌دهد که خطای استاندارد برای تمامی تیمارها در محدوده باریکی قرار دارد که بیانگر دقت بالا در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و قابلیت اطمینان نتایج است. مقایسه میانگین اثرات میزان اختلاط آب و پساب در تیمارهای مختلف مزرعه‌ای بر مقدار عملکرد ذرت علوفه‌ای (تن در هکتار) برای سال‌های مختلف انجام پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان داد که مقادیر میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای در سطوح مختلف اختلاف آب و پساب دارای اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد بودند و صرفاً در تیمارهای آزمایشی آب چاه و ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه اختلاف معنی‌داری در میزان میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای در سطح پنج درصد ارزیابی نشد. حداکثر عملکرد ذرت علوفه‌ای ۲۵/۷۶ تن در هکتار در تیمار اختلاط ۱۰۰ درصد پساب و هم‌چنین حداقل این میزان عملکرد نیز ۱۹/۵۰ تن در هکتار در تیمار آب چاه بوده است.

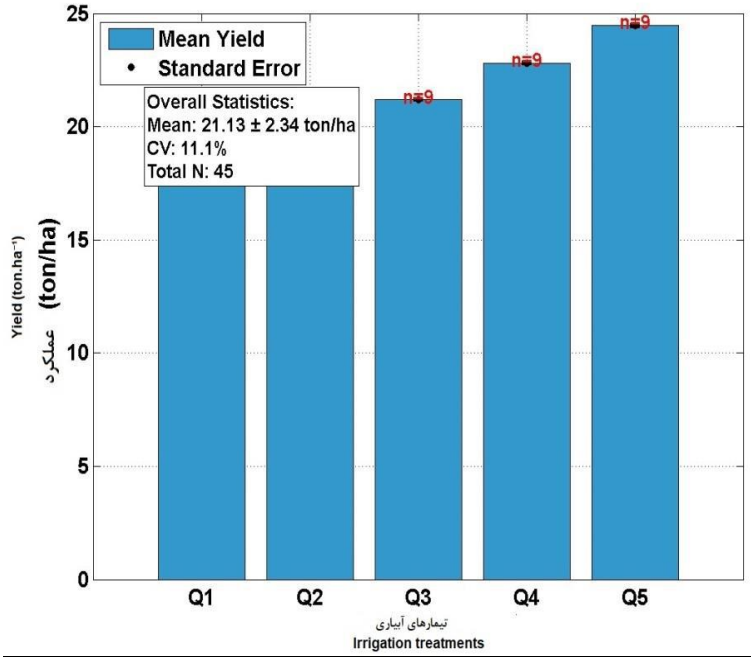
جدول ۳- مقایسه میانگین‌های مقدار عملکرد ذرت علوفه‌ای (تن در هکتار) در سال‌های مختلف

Table 3- Comparison of mean forage maize yield (tons per hectare) in different years

2022	2021	2020	تیمار آزمایشی اختلاط آب و پساب Experimental treatment of water-wastewater mixing
19.50 d	19.61 d	19.72 d	آب چاه (**Well water**)
19.94 d	20.08 d	20.21 d	۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه (**25% wastewater + 75% well water**)
22.25 c	22.38 c	22.54 c	۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه (**50% wastewater + 50% well water**)
23.88 b	24.02 b	24.16 b	۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه (**75% wastewater + 25% well water**)
25.54 a	25.61 a	25.76 a	۱۰۰ درصد پساب (**100% wastewater**)

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیست

Different letters in each column indicate significant difference at the 5% probability level



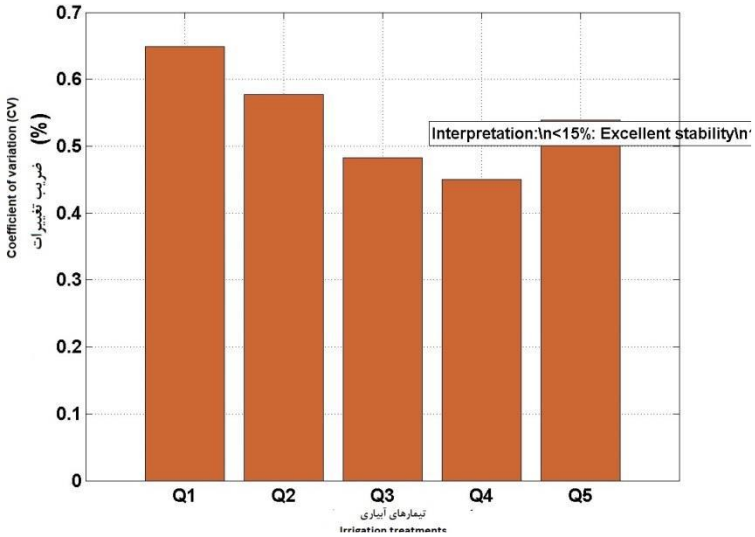
شکل ۲- میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت تیمارهای مختلف کیفیت آب آبیاری

Figure 2- Average forage maize yield under different irrigation water quality treatments

نتایج شکل ۲، روند افزایشی عملکرد ذرت علوفه‌ای با بهبود کیفیت آب آبیاری از Q_1 تا Q_5 را نشان می‌دهد که حاکی از تأثیر مثبت افزایش سهم پساب شهری در عملکرد محصول است. از سوی دیگر، پایداری داده‌ها (خطای استاندارد کمتر از ۰/۰۴۴ تن در هکتار) و روند افزایشی عملکرد محصول، لزوم بهینه‌سازی ترکیب منابع آب چاه و پساب شهری را نیز توجیه می‌کند.

ارزیابی پایداری داده‌ها و تغییرپذیری تیمارها

تحلیل ضریب تغییرات به‌عنوان شاخصی از پایداری داده‌ها در شکل ۳ نشان داد که کلیه تیمارها از ضریب تغییرات کمتر از یک درصد برخوردار بودند. این سطح از پایداری در داده‌های مزرعه‌ای بسیار قابل توجه است، چرا که معمولاً آزمایش‌های مزرعه‌ای به دلیل تأثیرپذیری از عوامل محیطی مختلف، با ضریب تغییرات بالاتری مواجه هستند (سپاس‌خواه و تبرزاد، ۲۰۰۶). کمترین ضریب تغییرات مربوط به تیمار Q_4 با ۰/۴۵ درصد و بیشترین مربوط به تیمار Q_1 با ۰/۶۵ درصد بود که نشان می‌دهد اجرای عملیات زراعی و نتایج آزمایش‌ها با دقت بالایی صورت گرفتند.

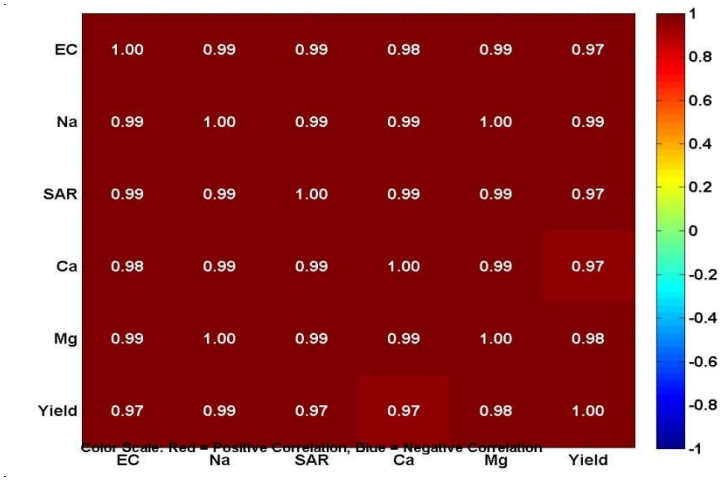


شکل ۳- ضریب تغییرات عملکرد ذرت علوفه‌ای برای تیمارهای مختلف

Figure 3- Coefficient of variation of forage maize yield for different treatments

تحلیل روابط همبستگی بین پارامترهای کیفی آب و عملکرد

ماتریس همبستگی محاسبه‌شده بین پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای در شکل ۴ نشان می‌دهد که کلیه پارامترهای کیفی آب با عملکرد، همبستگی مثبت و قوی نشان می‌دهند. بیشترین همبستگی مربوط به غلظت Na^{+} با عملکرد (۰/۹۹) و کمترین همبستگی مربوط به EC، SAR و Ca^{2+} با عملکرد (r^2=0.97) بود که نشان از همبستگی قوی و مثبت عملکرد ذرت علوفه‌ای با پارامترهای کیفی آب است. همچنین، بین خود پارامترهای کیفی آب نیز چنین همبستگی مشاهده شد که نشان‌دهنده وابستگی متقابل این پارامترها در سامانه‌های آبیاری است. این یافته با نتایج (مین‌هاس و همکاران، ۲۰۲۰) که گزارش کردند پارامترهای کیفی آب معمولاً به‌صورت هماهنگ تغییر می‌کنند و نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت مجزا در نظر گرفت نیز مطابقت دارد.



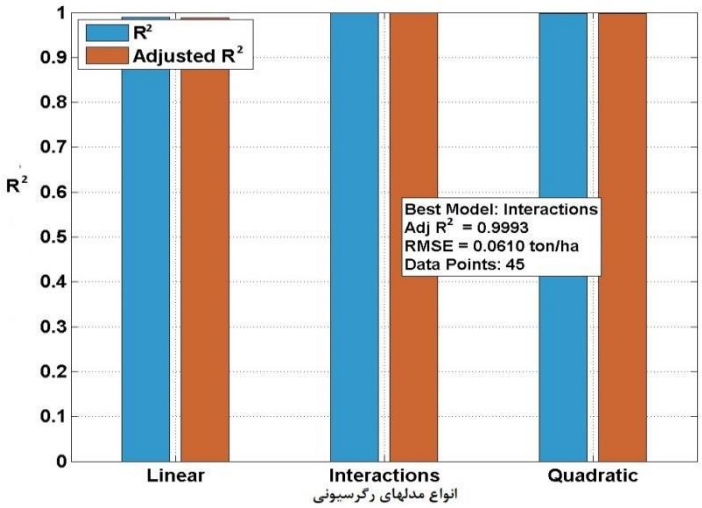
شکل ۴- ماتریس همبستگی پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای

Figure 4- Correlation matrix of water quality parameters and forage maize yield

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی و انتخاب مدل بهینه

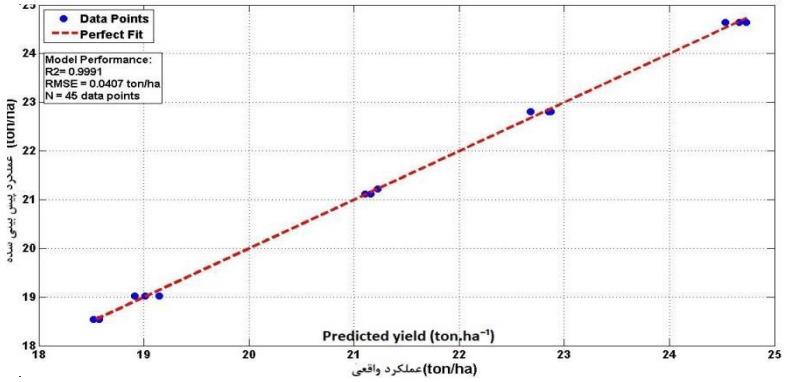
در این پژوهش، سه مدل رگرسیونی مختلف شامل مدل خطی، مدل با اثرات متقابل و مدل درجه دوم مورد ارزیابی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مدل تعاملات با ضریب تعیین تعدیل شده ۰/۹۹۹۳ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۰۹ تن در هکتار بهترین نتیجه در پیش‌بینی عملکرد ذرت علوفه‌ای را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، این مدل قادر است ۹۹/۹۳ درصد از تغییرات عملکرد را تبیین نماید که بیانگر دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد ذرت علوفه‌ای بر اساس پارامترهای کیفی آب است. از سوی دیگر، بررسی نتایج نشان داد که مدل‌های درجه دوم و خطی به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند اما هرکدام از این مدل‌ها نیز دارای دقت بسیار زیادی در پیش‌بینی عملکرد ذرت علوفه‌ای بودند.

دقت پیش‌بینی مدل بهینه در شکل ۶ نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر واقعی عملکرد با دقت بسیار بالایی با خط برازش کامل قرار دارند. تحلیل آماری این نمودار نشان می‌دهد که ضریب تعیین بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی برابر با ۰/۹۹۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی ۰/۰۴۸۹ تن در هکتار است. این سطح از دقت در پیش‌بینی عملکرد محصول، مدل توسعه‌یافته را به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای مدیریت بهینه آبیاری معرفی می‌نماید.



شکل ۵- مقایسه آماری مدل‌های رگرسیونی

Figure 5- Statistical comparison of regression models

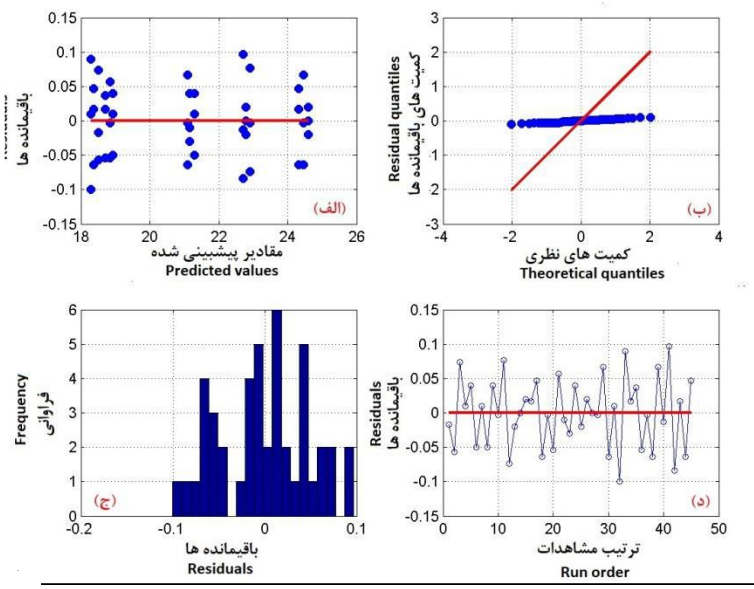


شکل ۶- مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی عملکرد ذرت علوفه‌ای

Figure 6- Comparison of predicted values with actual values of forage maize yield

تحلیل جامع باقیمانده‌های مدل بهینه و ارزیابی صحت مدل‌سازی

برای صحت و قابلیت اطمینان مدل رگرسیونی منتخب، تحلیل جامع روی باقیمانده‌های مدل انجام شد. این تحلیل در شکل ۷ در چهار بخش مجزا که هر یک از جنبه‌ای متفاوت به ارزیابی مدل رگرسیونی پرداخته، ارائه شده است.



شکل ۷- تحلیل جامع باقیمانده‌های مدل

Figure 7- Comprehensive analysis of model residuals

الف) نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده

در این نمودار، پراکندگی باقیمانده‌ها حول خط صفر (خط قرمزرنگ) به‌صورت کاملاً تصادفی و بدون الگوی خاصی مشاهده می‌شود. این الگوی تصادفی نشان می‌دهد که فرض همگنی واریانس[1] در داده‌ها برقرار است. دامنه تغییرات باقیمانده‌ها در محدوده باریک ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۱۰- تن در هکتار قرار دارد که بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول است.

ب) نمودار احتمال نرمال

نزدیکی بسیار زیاد نقاط به خط ۴۵ درجه (خط قرمز) در این نمودار، تأیید می‌کند که توزیع باقیمانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌نماید. این نتیجه با مقادیر چولگی ۰/۱۴ و کشیدگی ۱/۵۲ که از تحلیل آماری داده‌های عملکرد به‌دست آمده، هم‌خوانی کامل دارد و فرض نرمال بودن خطاها را نیز تأیید می‌نماید.

ج) هیستوگرام توزیع باقیمانده‌ها

شکل تقریباً متقارن و زنگوله‌ای هیستوگرام باقیمانده‌ها، مجدداً فرض نرمال بودن توزیع خطاها را تأیید می‌کند. تمرکز بیشترین فراوانی حول نقطه صفر نشان می‌دهد که اکثر پیش‌بینی‌های مدل با دقت بسیار بالایی انجام گردیده‌اند.

د) نمودار باقیمانده‌ها در مقابل ترتیب مشاهدات

عدم وجود هرگونه الگوی خاص (روند افزایشی، کاهشی، یا تناوبی) در این نمودار، نشان می‌دهد که خطاها مستقل از یکدیگر هستند. این موضوع حاکی از آن است که در جمع‌آوری داده‌ها هیچ‌گونه همبستگی زمانی وجود نداشته است.

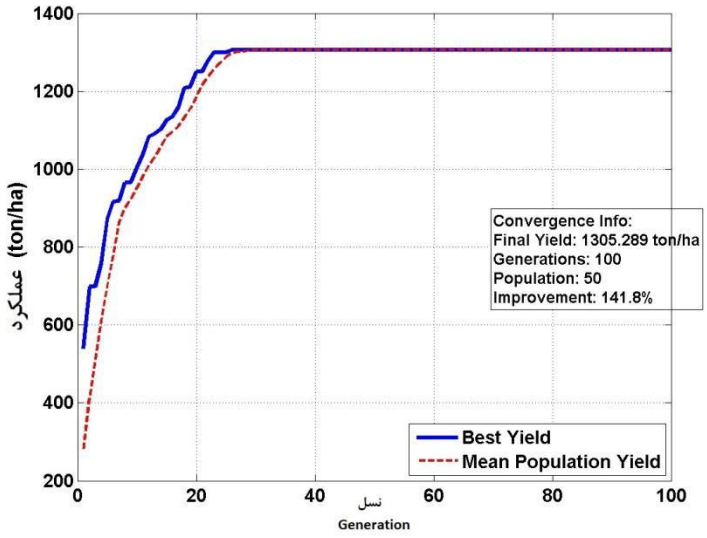
1 -Homoscedasticity

بر اساس تحلیل‌های چهارگانه فوق، می‌توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیونی با اثرات تعاملی: الف) از کفایت آماری کامل برخوردار است، ب) تمامی مفروضات کلیدی مدل رگرسیونی را برآورده می‌کند و ج) برای اهداف پیش‌بینی و بهینه‌سازی کاملاً قابل اتکا است. این سطح از صحت آماری مدل رگرسیونی، امکان استفاده از آن را در مدیریت عملیاتی آبیاری با اطمینان بالا فراهم ساخته و نشان داد که نتایج بهینه‌سازی به‌دست آمده برای بهینه‌سازی مناسب می‌باشند.

فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و تحلیل همگرایی

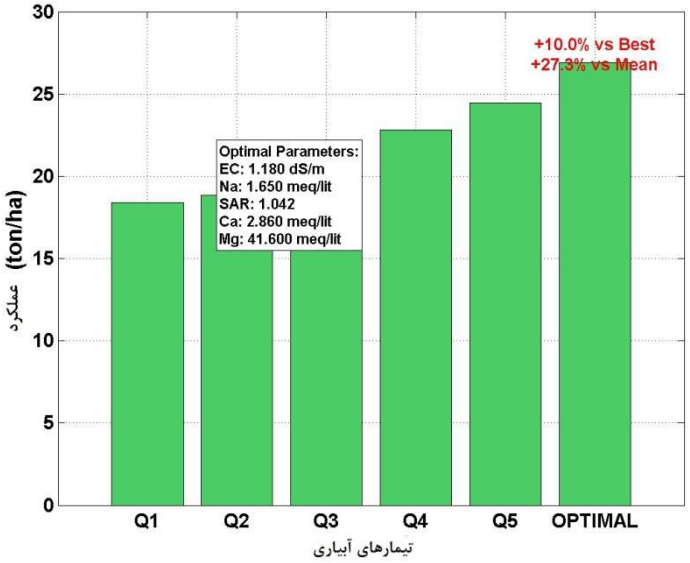
با استفاده از مدل رگرسیونی منتخب (مدل تعاملات)، فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کیفی آب انجام گردید. این فرآیند با جمعیت اولیه ۵۰ کروموزوم و حداکثر ۱۰۰ نسل اجرا گردید. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، الگوریتم پس از گذشت حدوداً ۴۰ نسل به پایداری رسیده و مقادیر بهینه پارامترها را تعیین نموده است. میانگین برازش جمعیت نیز روند صعودی داشته و در نسل‌های پایانی به مقدار بهینه نزدیک شده است که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم در جستجوی فضای پاسخ است (دب، ۲۰۰۱). این همگرایی پایدار نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته است به منطقه بهینه در فضای جواب دست یابد.

مدل عددی با جای‌گذاری پارامترهای بهینه در مدل رگرسیونی، عملکرد نهایی ذرت علوفه‌ای ۲۶/۹۰۱ تن بر هکتار را پیش‌بینی کرد. این مقدار در شکل ۹ برای مقایسه با تیمارهای موجود به‌وضوح نمایش داده شده است.



شکل ۸- روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف

Figure 8- Convergence trend of the genetic algorithm in different generations



شکل ۹- مقایسه عملکرد بهینه با تیمارهای موجود

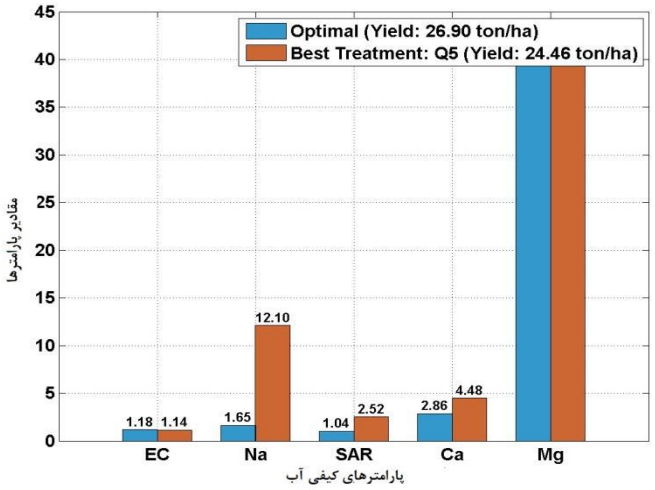
Figure 9- Comparison of optimal yield with the available treatments

نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان می‌دهد که عملکرد پیش‌بینی‌شده بهینه نسبت به بهترین تیمار موجود (Q_5) (۲۴/۴۵۶ تن در هکتار) ۱۰٪ و نسبت به میانگین عملکرد کلیه تیمارها (۲۱/۱۳۱ تن در هکتار) ۲۷/۳۰٪ بهبود نشان داده است. نتایج نهایی پارامترهای بهینه کیفیت آب به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ ارائه شده است. این مقادیر بهینه پارامترهای کیفی آب در شکل ۱۰ در مقایسه با بهترین تیمار موجود (Q_5) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۴- پارامترهای بهینه کیفیت آب

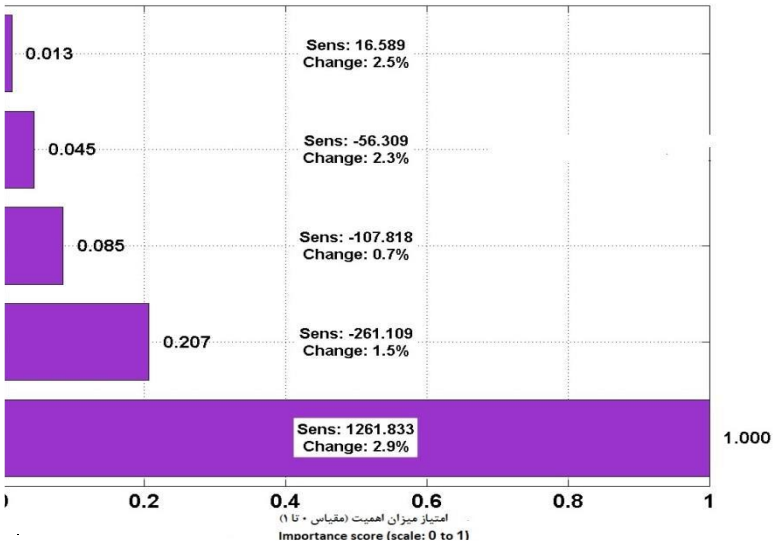
Table 4- Optimal water quality parameters

محدوده پارامترها Parameter Value	واحد Unit	پارامترهای بهینه کیفیت آب Optimal water quality parameters
1.18	dSm^{-1}	هدایت الکتریکی (**EC**)
2.86	meq/lit	کلسیم (Ca^{2+})
41.60	meq/lit	منیزیم (Mg^{2+})
1.65	meq/lit	سدیم (Na^{+})
1.04	-	**SAR**



شکل ۱۰- مقایسه پارامترهای بهینه کیفیت آب با بهترین تیمار موجود (Q_5)

Figure 10- Comparison of optimal water quality parameters with the best available treatment (Q5)



شکل ۱۱- رتبه‌بندی پارامترهای کیفی آب بر اساس میزان حساسیت

Figure 11- Ranking of water quality parameters based on sensitivity

تحلیل حساسیت پارامترهای بهینه و اولویت‌بندی مدیریتی

برای تعیین میزان حساسیت مدل به تغییرات هر یک از پارامترهای کیفی آب، تحلیل حساسیت انجام شد. شکل ۱۱، نتایج تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهد که EC با امتیاز اهمیت ۱/۰۰۰ حساس‌ترین پارامتر و Mg^{2+} با امتیاز اهمیت ۰/۰۱۳ کم‌اهمیت‌ترین پارامتر در حساسیت مدل بهینه است. تحلیل حساسیت انجام‌شده روی پارامترهای بهینه نشان می‌دهد که به‌طورکلی، ترتیب حساسیت پارامترها به‌صورت: $EC>SAR>Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}$ است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش آیرز و وست‌کوت (۱۹۸۵) که EC را به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر کیفی آب در مدیریت آبیاری معرفی کرده‌اند، مطابقت دارد. این تحلیل با اعمال تغییرات پنج درصدی در مقادیر هر پارامتر و اندازه‌گیری تأثیر آن بر عملکرد پیش‌بینی‌شده انجام گردید. میزان تغییرات عملکرد برای هر پارامتر به ترتیب EC برابر ۲/۹٪، SAR برابر ۱/۵٪، Na^{+} برابر ۲/۳٪، Ca^{2+} برابر ۰/۷٪ و Mg^{2+} برابر ۲/۵٪ است. نکته قابل توجه این است که اگرچه Mg^{2+}

کم‌حساس‌ترین پارامتر شناسایی‌شده، اما تغییرات پنج درصدی در این پارامتر بیشترین درصد تغییر در عملکرد (۲/۵٪) را ایجاد می‌کند که این پدیده نشان‌دهنده آن است که حساسیت یک پارامتر نه تنها به شیب تابع پاسخ، بلکه به دامنه تغییرات طبیعی آن پارامتر نیز وابسته است. دامنه تغییرات گسترده Mg^{2+} (۲/۱ تا ۴۱/۶ meq/lit) در مقایسه با سایر پارامترها، توضیح‌دهنده این رفتار غیرخطی در مدل است.

بحث

نتایج عملکرد تیمارهای مختلف در شکل ۲ نشان‌دهنده اثر معنی‌دار نسبت‌های مختلف اختلاط آب چاه و پساب شهری بر عملکرد ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.)بوده که موجب گردیده تا عملکرد از ۱۸/۳۹ تن در هکتار در تیمار شاهد Q_1 (۱۰۰ ٪ آب چاه) به ۲۴/۴۶ تن در هکتار در تیمار Q_5 (۱۰۰ ٪ پساب شهری) افزایش یافت. این روند افزایشی خطی نبوده و بیشترین شیب بهبود عملکرد بین تیمارهای Q_2 و Q_3 مشاهده شد که نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه اولیه در اختلاط است. این افزایش عملکرد را می‌توان عمدتاً به تأمین نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در پساب شهری نسبت داد. مطالعات میدانی نشان داده‌اند که آبیاری با پساب شهری تصفیه‌شده می‌تواند عناصر غذایی قابل‌توجهی در دسترس ذرت قرار دهد و درصد پروتئین، ماده خشک و محتوای فسفر را افزایش دهد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۳). از نظر فیزیولوژیکی، نیتروژن در فتوسنتز، تولید کلروفیل و پروتئین‌ها نقش کلیدی دارد و فسفر نیز در انتقال انرژی و توسعه ریشه مؤثر است. کمبود این عناصر، رشد و جذب آب و عناصر را محدود خواهد کرد و تأمین آن‌ها از طریق پساب شهری می‌تواند بهبود عملکرد ایجاد شده را توجیه نماید (ونس و همکاران، ۲۰۰۳).

بررسی پارامترهای کیفی آب (شکل ۱) نشان داد که با افزایش سهم پساب شهری، هدایت الکتریکی (EC) از ۰/۵۷ به ۱/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر و غلظت سدیم (Na^+) از ۱/۶۵ به ۱۲/۲۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر افزایش می‌یابد. با این وجود، ماتریس همبستگی (شکل ۴) نشان‌دهنده همبستگی مثبت و قوی (r^2=0.97) بین این پارامترها و عملکرد ذرت علوفه‌ای بود. این یافته حاکی از آن است که در محدوده شوری کم تا متوسط این پژوهش، مزیت تغذیه‌ای بر تنش شوری غلبه کرده است. این موضوع با نتایج مین‌هاس و همکاران (۲۰۲۰) همسو است که گزارش کردند در شرایط EC کمتر از سه دسی‌زیمنس بر متر، عناصر غذایی موجود در آب‌های نامتعارف می‌توانند اثرات منفی شوری را جبران نمایند.

مدل رگرسیونی با اثرات متقابل (شکل ۵) با ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۹۹۹۳ به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. دقت زیاد پیش‌بینی این مدل (شکل ۶) نشان می‌دهد که رابطه بین پارامترهای کیفی آب و عملکرد، ماهیتی غیرخطی و تعاملی دارد. به‌عنوان مثال، اثر افزایش EC بر عملکرد به غلظت کلسیم (Ca^{2+}) وابسته است. این مشاهده با اصول تئوری نسبت‌های یونی در آب آبیاری مطابقت دارد که بر اساس آن، تعادل بین یون‌های Ca^{2+}، Mg^{2+} و Na^+تعیین‌کننده نفوذپذیری خاک و قابلیت جذب آب توسط گیاه خواهد بود (آیرز و وست‌کوت، ۱۹۸۵).

نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک (جدول ۴ و شکل ۹) ترکیب بهینه پارامترها را مشخص کرد که منجر به عملکرد پیش‌بینی‌شده ۲۶/۹۰۱ تن در هکتار شد. نکته قابل تأمل این است که این ترکیب بهینه، معادل هیچ‌یک از تیمارهای آزمایشی نبود. مقدار بهینه EC در محدوده ۱/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر مرز بالایی دامنه آزمایش قرار داشت، درحالی‌که مقدار بهینه (SAR) ۱/۰۴ و (Na^+) ۱/۶۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در پایین‌ترین حد بودند. این ترکیب، مدیریت تعادلی بین بهره‌برداری از عناصر غذایی پساب شهری و حداقل‌سازی خطر شوری و سمیت سدیم را نشان می‌دهد. مقدار بهینه (Mg^{2+}) ۴۱/۶۰ meq/L که نزدیک به غلظت آن در پساب خالص است، با نقش کلیدی و شناخته‌شده‌ی این عنصر در فرآیندهای حیاتی رشد گیاه از

جمله فتوسنتز و تولید کلروفیل (رنگدانه سبز گیاه) مرتبط است (کاک‌مک و یازیسی، ۲۰۱۰).

بررسی نتایج تحلیل حساسیت (شکل ۱۱) نشان داد که EC با حساسیت ۱/۰۰۰، تأثیرپذیرترین پارامتر بر عملکرد است، درحالی‌که Mg^{2+} با حساسیت ۰/۰۱۳ کمترین تأثیر را داشت. این نتیجه با پژوهش‌های آسولین و همکاران (۲۰۱۵) هم‌خوانی دارد که EC را به‌عنوان اصلی‌ترین شاخص مدیریت کیفیت آب در کشاورزی پایدار معرفی کردند. بااین‌حال، دامنه تغییرات گسترده Mg^{2+} از ۲/۱۴ تا ۴۱/۶۱ meq/L در مقایسه با سایر پارامترها، نشان‌دهنده ظرفیت تحمل بالای ذرت علوفه‌ای نسبت به تغییرات این یون در شرایط این پژوهش است.

در مقایسه با مطالعات پیشین، یافته‌های این تحقیق از چند جهت قابل تأمل است. اولاً، حداکثر عملکرد بهینه‌شده (۲۶/۹۰۱ تن در هکتار) حدود ۱۰٪ بالاتر از بهترین تیمار میدانی (Q_5) بود. این اختلاف نشان می‌دهد که حتی در تیمار ۱۰۰٪ پساب شهری نیز نسبت‌های یونی در حالت ایده‌آل خود نبوده و امکان بهبود از طریق تنظیم دقیق وجود دارد، ثانیاً، نتایج حاکی از آن است که کیفیت آب بهینه برای ذرت علوفه‌ای، لزوماً معادل آب با کمترین شوری نیست، بلکه آبی است که در عین دارا بودن عناصر کافی، از نظر نسبت‌های یونی (به‌ویژه SAR کم) در تعادل باشد. این موضوع در تناقض با رویکرد سنتی که بر حداقل‌سازی شوری تأکید دارد، نیست و بلکه آن را تکمیل می‌کند.

نتایج نشان داد که اختلاط هدفمند آب چاه و پساب شهری، همراه با بهینه‌سازی چندپارامتری کیفیت آب، می‌تواند راهبردی عملی برای افزایش عملکرد ذرت علوفه‌ای در شرایط محدودیت منابع آب باشد. موفقیت این راهبرد مستلزم پایش مستمر EC و SAR و مدیریت آن‌ها در نزدیکی مقادیر بهینه شناسایی‌شده است. کاربرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تعیین این نقاط بهینه در سامانه‌های پیچیده کشاورزی باشد.

یکی از نکات کلیدی در مدیریت آب کشاورزی این است که بیشینه‌سازی عملکرد گیاه لزوماً به بیشینه شدن بهره‌وری آب محصول منجر نمی‌شود. بهره‌وری آب معمولاً به‌صورت نسبت عملکرد اقتصادی به مقدار آب مصرف‌شده تعریف می‌شود. در بسیاری از شرایط، افزایش عملکرد تنها از طریق تأمین آب بیش‌تر امکان‌پذیر است، درحالی‌که این افزایش آب مصرفی معمولاً با شیب بیشتری نسبت به افزایش عملکرد رخ می‌دهد. در نتیجه، نسبت عملکرد به آب مصرفی کاهش‌یافته و بهره‌وری آب افت می‌کند. از لحاظ فیزیولوژیک و زراعی، منحنی پاسخ عملکرد به آب اغلب شکل غیرخطی دارد. در سطوح پایین تا متوسط آبیاری، افزایش آب موجب افزایش قابل‌توجه عملکرد می‌شود، اما پس از رسیدن به یک آستانه مشخص، افزودن آب بیشتر تنها افزایش اندکی در عملکرد ایجاد می‌کند. در این ناحیه، هر واحد آب اضافی سهم کمی در تولید دارد و حتی می‌تواند از طریق کاهش تهویه ریشه، افزایش تلفات تبخیری، شست‌وشوی عناصر غذایی و تحریک رشد رویشی بیش از حد، کارایی مصرف آب را کاهش دهد. در این شرایط، کاهش کنترل‌شده مصرف آب مانند کم‌آبیاری می‌تواند به‌طور هم‌زمان منجر به کاهش تبخیر و تلفات آب، افزایش کارایی مصرف آب در سطح گیاه و مزرعه و حفظ بخش عمده‌ای از عملکرد حداکثری، شود. در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است که با کاهش محدود آب آبیاری (مثلاً ۱۰ تا ۳۰ درصد کمتر از آبیاری کامل)، افت عملکرد نسبتاً کم است، درحالی‌که صرفه‌جویی آب قابل‌توجه بوده و در نهایت بهره‌وری آب افزایش می‌یابد. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری دارد، جایی که آب عامل محدودکننده اصلی تولید است. از منظر مدیریتی، تمرکز صرف بر حداکثر عملکرد، رویکردی متعلق به شرایط وفور منابع آبی است. در شرایط کنونی که کمبود آب، رقابت بین بخش‌های مصرف‌کننده و تغییر اقلیم تشدید شده است، هدف اصلی مدیریت آبیاری، نیل به حداکثر عملکرد اقتصادی و بهره‌وری آب بهینه، نه الزاماً حداکثر عملکرد بیولوژیک است. در مجموع،

اندرکنش بین کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری آب و دستیابی به عملکرد بالا نشان می‌دهد که این اهداف لزوماً متضاد نیستند، اما هم‌پوشانی کامل نیز ندارند. مدیریت موفق زمانی حاصل می‌شود که به‌جای بیشینه‌سازی مطلق عملکرد، بهینه‌سازی هم‌زمان عملکرد و مصرف آب مدنظر قرار گیرد؛ رویکردی که با اصول کشاورزی پایدار و امنیت غذایی در شرایط محدودیت منابع آبی هم‌راستا است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی تحلیل رگرسیونی چندمتغیره و الگوریتم ژنتیک، موفق به تعیین ترکیب بهینه پارامترهای کیفی آب آبیاری برای حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای گردید. یافته‌ها حاکی از آن بود که مدل رگرسیونی با اثرات تعاملی با ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۹۹۹۳ از قابلیت پیش‌بینی دقیق عملکرد برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مطمئن در مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، ترکیب پارامترهای شامل هدایت الکتریکی (EC) ۱/۱۸ dSm^{-1}، غلظت سدیم (Na^+) ۱/۶۵ meq/lit، نسبت جذب سدیم (SAR) ۱/۰۴، غلظت کلسیم (Ca^{2+}) ۲/۸۶ meq/lit و غلظت منیزیم (Mg^{2+}) ۴۱/۶۰ meq/lit منجر به عملکرد پیش‌بینی‌شده ۲۶/۹۰۱ تن در هکتار می‌شود که بهبودی معادل ۱۰٪ نسبت به بهترین تیمار موجود و ۲۷/۳۰٪ نسبت به میانگین عملکرد تیمارها را نشان می‌دهد. نکته قابل تأمل این است که نقاط بهینه شناسایی‌شده در فضای پارامترها، دقیقاً معادل هیچ‌یک از پنج تیمار از پیش تعریف‌شده آزمایش‌های میدانی نبودند. این یافته به‌وضوح نشان می‌دهد که رویکردهای سنتی طراحی آزمایش بر اساس سطوح گسسته و محدود تیمارها، حتی با وجود تکرار و دقت اجرا، قادر به شناسایی دقیق نقطه اوج پاسخ عملکرد در فضای پیوسته پارامترهای کیفی آب نیستند. در واقع، این پژوهش نشان داد که بین تیمار Q4 (۷۵٪ پساب شهری تصفیه‌شده) و Q5 (۱۰۰٪ پساب شهری تصفیه‌شده) منطقه‌ای بهینه وجود دارد که با تنظیم دقیق‌تر نسبت‌های یونی می‌توان به آن دست یافت. این شکاف مهم، توجیه‌گر ضرورت به‌کارگیری روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی چندمتغیره در کنار آزمایش‌های مزرعه‌ای برای حداکثرسازی عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای است.

تحلیل حساسیت انجام شده مشخص نمود که هدایت الکتریکی با امتیاز اهمیت ۱/۰۰۰ حساس‌ترین پارامتر در مدل بهینه است، درحالی‌که منیزیم با امتیاز اهمیت ۰/۰۱۳ کم‌حساس‌ترین پارامتر شناسایی شد. این یافته‌ها اولویت‌بندی ارزشمندی را برای مدیریت عملیاتی منابع آب ارائه می‌نماید، به‌طوری‌که تمرکز نظارتی می‌بایست به‌طور ویژه بر کنترل هدایت الکتریکی معطوف گردد. با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده و ویژگی‌های منابع آب موجود، استفاده از ترکیب ۱۰۰٪ پساب شهری با نظارت دقیق بر غلظت سدیم (Na^+) و نسبت جذب سدیم (SAR) پیشنهاد می‌شود.

پیشنهاد می‌شود به‌منظور تحقق عملی این یافته‌ها، اجرای دوره‌ای آنالیز کیفیت آب و تطبیق با مقادیر بهینه پیشنهادی در دستور کار قرار گیرد. هم‌چنین انجام پژوهش‌های آتی برای اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته در شرایط اقلیمی و خاکی مختلف و نیز بررسی اقتصادی بودن اجرای راهکارهای پیشنهادی در مقیاس وسیع توصیه می‌شود. این پژوهش گامی مؤثر در جهت توسعه کشاورزی پایدار و مدیریت بهینه منابع آب محسوب شده و می‌تواند الگویی برای پژوهش‌های مشابه در سایر مناطق باشد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۹ .آمارنامه کشاورزی (سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷) جلد اول: محصولات زراعی .چاپ اول. تهران: وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.

۲. پورغلام آمیجی، مسعود و خوش‌روش، مجتبی، ۱۴۰۱. اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر جذب برخی فلزات سنگین در کشت ذرت. *تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۵۳(۵)، صص ۱۰۷۹-۱۰۹۱.
DOI: 10.22059/ijswr.2022.340774.669237

۳. خوش‌روش، مجتبی و پورغلام آمیجی، مسعود، ۱۴۰۱. اثر تنش آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی با استفاده از آب مغناطیسی‌شده. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۶(۴)، صص ۴۴۱-۴۵۳.
DOI: 10.22092/jwra.2022.359733.941

خوش‌سیما، مرتضی و نوری، حمیده، ۱۳۹۸. اثر شوری آب آبیاری بر عملکرد و صفات زراعی سه‌هیبرید ذرت (Zea mays L.) با استفاده از آبیاری قطره‌ای نواری، *تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۵۰(۸)، صص ۲۰۳۷-۲۰۴۹. **DOI**: **10.22059/ijswr.2019.271808.668073**

۴. ذاکری‌نیا، مهدی و عبدالهی، سینا، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی تأثیر آبیاری با آب شور -سدیمی بر تغییرات نفوذپذیری خاک با مدل‌های نفوذ فیلیپ و کاستیاکوف. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست*، ۲(۱)، صص ۱-۱۰. **DOI: 10.22034/nawee.2023.346062.1003**

۵. عباسی، پدرام، بابازاده، حسین، یارقلی، بهمن و باخدا، حسین، ۱۴۰۰. اثر استفاده از پساب شهری بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت تحت مدیریت کم آبیاری (مطالعه موردی: شهرستان مرودشت). نشریه *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۲)، صص ۴۰۲-۴۱۳. **https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.2.15.7**

۶. کریمی، بختیار، عبدی، چنور و فتحی تیلکو، زینب، ۱۳۹۷. تأثیر آبیاری با پساب شهری تصفیه‌شده بر عملکرد و برخی ویژگی‌های رشد گوجه‌فرنگی و ذرت در شرایط گلخانه‌ای. *دانش آب‌وخاک*، ۲۸(۴)، صص ۱۹-۲۹.

7. Assouline, S., Russo, D., Silber, A. and Or, D., 2015. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. *Water Resources Research*, 51(5), pp. 3419–3436. **DOI: 10.1002/2015WR017071**
8. Ayers, R. S. and Westcot, D. W., 1985. *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. **DOI: 10.25607/OBP-1790**
9. Burnham, K. P. and Anderson, D. R., 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. 2nd edn. New York: Springer-Verlag.
10. Cakmak, I. and Yazici, A. M., 2010. Magnesium: A forgotten element in crop production. *Better Crops*, 94(2), pp. 23–25.
11. Cosgrove, W. J. and Loucks, D. P., 2015. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6), pp. 4823–4839. **DOI: 10.1002/2014WR016869**
12. Deb, K., 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester: John Wiley & Sons. **DOI: 10.1002/0471722102**
13. FAO., 2020. *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Rome: FAO. Available at: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb1447en.
14. Fereidooni, M. J., Farajee, H. and Owliaei, H. R., 2013. Effect of treated urban sewage and nitrogen on yield and grain quality of sweet corn and some soil characteristics in Yasouj region. *Water and Soil Science*, 23(3), pp. 43-56.
15. Gorji, T., Yildirim, M. and Sert, E., 2020. Evaluation of the water quality criteria for irrigation. *Agricultural Water Management*, 240, 106289. **DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106289**

16. Holland, J. H., 1992. Genetic algorithms. *Scientific American*, 267(1), pp. 66–73. **DOI: 10.1038/scientificamerican0792-66**
17. Isayenkov, S. V. and Maathuis, F. J. M., 2019. Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. **DOI: 10.3389/fpls.2019.00080**
18. Li, Y., Li, H. and Li, Y., 2021. A review of multi-objective optimization in agricultural water management: Current status and future directions. *Agricultural Water Management*, 243, 106501. **DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106501**
19. Maas, E. V. and Hoffman, G. J., 1977. Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), pp. 115–134. **DOI: 10.1061/JRCEA4.0001137**
20. Malash, N., Flowers, T. J. and Ragab, R., 2008. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production. *Agricultural Water Management*, 95(2), pp. 182-192. **DOI: 10.1016/j.agwat.2007.10.005**
21. Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A. and Pereira, L. S., 2020. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832. **DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105832**
22. Mirjalili, S., 2019. *Evolutionary algorithms and neural networks: Theory and applications*. Cham: Springer.
23. Mousavi, R. S., Galavi, M. and Eskandari, H., 2013. Effects of treated municipal wastewater on fluctuation trend of leaf area index and quality of maize (Zea mays). *Water Science & Technology*, 67(4), pp. 797–802. **DOI: 10.2166/wst.2012.624**
24. Noory, H., Liaghat, A. and Parsinejad, M., 2011. Crop yield prediction using genetic algorithms and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, 98(9), pp. 1497–1507. **DOI: 10.1016/j.agwat.2011.04.004**
25. Raju, K. S. and Kumar, D. N., 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. *Water Resources Management*, 18(2), pp. 163–176. **DOI: 10.1023/B:WARM.0000024738.72486.b2**
26. Rho, H., Van Epps, V., Wegley, N., Doty, S. L. and Kim, S. H., 2021. Salinity stress tolerance and sodium exclusion in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 660409. **DOI: 10.3389/fpls.2021.660409**
27. Rusan, M. J. M., Hinnawi, S. and Rousan, L., 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215, pp. 143-152.
28. Sepaskhah, A. R. and Tabarzad, A. A., 2006. Soil and water salinity in crop production. *Agricultural Water Management*, 83(1-2), pp. 152-160. **DOI: 10.1016/j.agwat.2005.10.004**
29. Van Zelm, E., Zhang, Y. and Testerink, C., 2020. Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71, pp. 403–433. **DOI: 10.1146/annurev-arplant-050718-100005**
30. Vance, C. P., Uhde Stone, C. and Allan, D. L., 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants. *New Phytologist*, 157(3), pp. 423-447. **DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x**
31. Zheng, Y., Bai, Y., Yue, W. and Ding, C., 2022. Optimize the irrigation and fertilizer schedules by combining DSSAT and genetic algorithm. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(36), pp. 52473-52482. **DOI: 10.1007/s11356-022-19525-z**